

J A E R I - M
91-129

CASKETSS-2：放射性物質輸送容器熱構造
安全解析コードシステム（第2次版）

1991年8月

幾島 毅

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

CASKETSS-2：放射性物質輸送容器熱構造安全
解析コードシステム（第2次版）

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部
幾 島 穎

(1991年7月16日受理)

放射性物質輸送容器熱構造安全解析コードシステム（第2次版）CASKETSS-2 (CASK Evaluation code system for Thermal and Structural Safety-version 2) を作成した。CASKETSS-2 の特徴は次のとおりである。

- (1) 1～3次元構造の伝熱計算および構造計算が可能な計算プログラム群から構成されている。
- (2) 構造計算プログラム群には、簡易計算プログラムと詳細計算プログラムが含まれている。
- (3) 入力データ作成プログラムが用意されている。
- (4) 計算結果の図形表示プログラムが用意されている。

本報告書は、CASKETSS-2 の概要、計算プログラム群の概要および入力データについて記述したものである。

CASKETSS-2

A Computer Code System for Thermal and Structural Analysis
of Nuclear Fuel Shipping Casks (Version 2)

Takeshi IKUSHIMA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 16, 1991)

A computer program CASKETSS-2 has been developed for the purpose of thermal and structural analysis of nuclear fuel shipping casks. CASKETSS-2 means a modular code system for CASK Evaluation code system Thermal and Structural Safety (Version 2). Main features of CASKETSS-2 are as follow;

- (1) Thermal and structural analysis computer programs for one-, two-, three-dimensional geometries are contained in the code system.
- (2) There are simplified computer programs and a detailed one in the structural analysis part in the code system.
- (3) Input data generator is provided in the code system.
- (4) Graphic computer program is provided in the code system.

In the paper, brief illustration of calculation method, input data and sample calculations are presented.

Keywords: Computer Program, Structural Analysis, Thermal Analysis, Finite Element Method, Finite Difference Method, Computer Code System, Mesh Generator, Shipping Cask, Nuclear Fuel Cask, CASKETSS-2

目 次

1. まえがき	1
2. CASKETSS-2 コードシステム	2
3. 熱計算プログラム	5
3.1 TOPAZ 3D	5
3.1.1 概 要	5
3.1.2 計 算 式	5
3.1.3 入力データ	11
4. 構造計算プログラム	32
4.1 ROCKING	32
4.1.1 概 要	32
4.1.2 計 算 式	32
4.1.3 入力データ	35
4.2 SHOCK-JR	43
4.2.1 概 要	43
4.2.2 計 算 式	44
4.2.3 入力データ	45
4.3 CRUSH	60
4.3.1 概 要	60
4.3.2 計 算 式	60
4.3.3 入力データ	82
4.4 FINCRUSH	91
4.4.1 概 要	91
4.4.2 計 算 式	91
4.4.3 入力データ	105
4.5 PUNCTURE	109
4.5.1 概 要	109
4.5.2 計 算 式	109
4.5.3 入力データ	117
4.6 DYNA 3D	119
4.6.1 概 要	119
4.6.2 計 算 式	122
4.6.3 入力データ	140
5. 入力データ作成プログラム	233
5.1 INGRID	233

5.1.1 概 要	233
5.1.2 入力データ	241
6. 計算結果の図形表示プログラム	336
6.1 TAURUS	336
6.1.1 概 要	336
6.1.2 入力データ	337
7. あとがき	346
謝 辞	346
参考文献	347

Contents

1. Introduction	1
2. CASKETSS-2 Code System	2
3. Thermal Analysis Computer Program	5
3.1 TOPAZ3D	5
3.1.1 General	5
3.1.2 Calculation Equations	5
3.1.3 Input Data	11
4. Structural Analysis Computer Programs	32
4.1 ROCKING	32
4.1.1 General	32
4.1.2 Calculation Equations	32
4.1.3 Input Data	35
4.2 SHOCK-JR	43
4.2.1 General	43
4.2.2 Calculation Equations	44
4.2.3 Input Data	45
4.3 CRUSH	60
4.3.1 General	60
4.3.2 Calculation Equations	60
4.3.3 Input Data	82
4.4 FINCRUSH	91
4.4.1 General	91
4.4.2 Calculation Equations	91
4.4.3 Input Data	105
4.5 PUNCTURE	109
4.5.1 General	109
4.5.2 Calculation Equations	109
4.5.3 Input Data	117
4.6 DYNA3D	119
4.6.1 General	119
4.6.2 Calculation Equations	122
4.6.3 Input Data	140
5. Input Data Generation Program	233
5.1 INGRID	233
5.1.1 General	233

5.1.2 Input Data	241
6. Graphic Program for Output Representation	336
6.1 TAURUS	336
6.1.1 General	336
6.1.2 Input Data	337
7. Concluding Remarks	346
Acknowledgments	346
References	347

1. まえがき

我が国の軽水型原子炉による総発電量は全発電量の30%の規模になり、これに伴い核燃料輸送の機会が増加している。核燃料の輸送の安全性確証の一環として、輸送中に想定される事故、すなわち、衝突やその後の火災などに対して、輸送容器が規定の条件を満足していることを、試験および解析によって明らかにする必要がある。

このための研究が国内外において精力的に進められている。我が国では、輸送容器の耐火性に関して、古くは日本機械学会、現在は消防研究所、動力炉核燃料開発事業団、三菱金属株式会社、電力中央研究所において実施される。輸送容器の落下衝撃性に関して、古くは日本機械学会、現在は機械技術研究所、動力炉核燃料事業団、電力中央研究所において実施されている。車両に積載された輸送容器の衝突特性に関しては、三菱金属株式会社、動力炉核燃料開発事業団において実施されている。一方、解析法および解析コードに関しては、輸送容器の製造業者、使用者等の努力によって開発整備されてきている。安全審査のための標準的な解析コードの開発整備の必要性が認識され、1981年～1985年の安全研究5ヶ年計画によって、輸送容器熱構造安全解析コードシステム CASKETSS⁽¹⁾を作成した。

CASKETSS コードでは多くの計算プログラムが有ること、熱解析コードは差分法であるのにに対して構造解析プログラムは有限要素法であり、両方のデータの交換が複雑であることなどの点を改良することとした。改良点は、必要最小限の計算プログラムとする。熱解析コードを有限要素法にする。各計算プログラムのレベルアップを計る。

この計画に従って、熱計算プログラム、構造計算プログラム、入力データ作成プログラム、計算結果図形表示プログラムを開発整備し、これらを統合して核燃料輸送容器の熱・構造安全解析コードシステム CASKETSS-2 (CASK Evaluation code system for Thermal and Structural Safety Version 2) を作成した。CASKETSS-2 の特徴は次の通りである。

- (1) 1～3次元体形の熱および構造計算が可能な計算プログラム群^{(2)～(8)}から構成されている。
- (2) 構造計算プログラム群には、簡易計算プログラムと詳細計算プログラムが含まれている。

簡易計算プログラム群を第2.3図に示す。

- (3) 入力データ作成プログラム⁽⁹⁾が用意されている。

本報告書は、CASKETSS-2についての内容を概説したものである。

2. CASKETSS-2 コードシステム

CASKETSS-2 コードシステム第2.1図に示すように次のものから構成されている。

- (i) 熱および構造計算プログラム
- (ii) 熱および構造計算用材料データライブラー (CASKETSS 参照)
- (iii) 入力データ作成のためのプリプロセッサー
- (iv) 計算結果図形表示のためのポストプロセッサー。

CASKETSS-2 コードシステムに含まれている計算プログラムの概要について、第3章から第6章までに記述するが、ここでは簡単に計算プログラム名と用途および CASKETSS-2 コードシステムにおける位置を第2.1表および第2.2図に示す。

簡易計算プログラム群は第2.3図に示す。

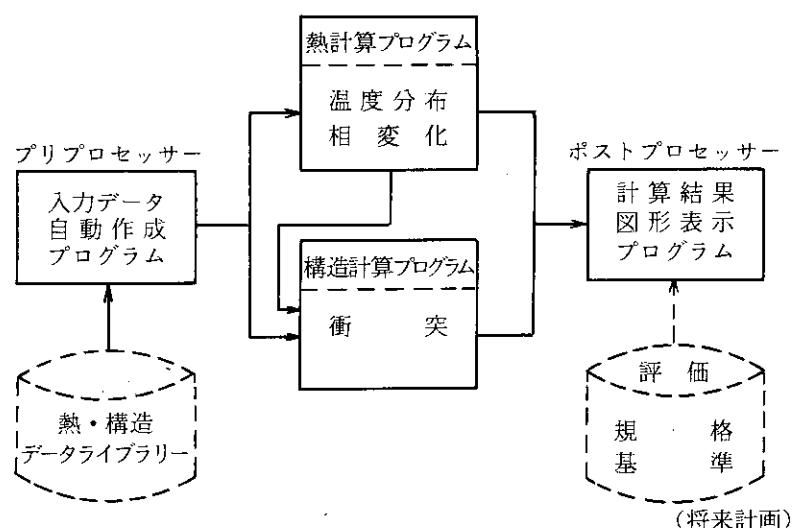
第2.1表 CASKETSS-2 コードシステムの計算プログラム

分類	計算プログラム	特徴	用途	オリジナル	改良整備
熱解析	◦TOPAZ 3D	3次元非定常解析伝導、対流、幅射相変化	火災 熱伝達	LLNL ⁽²⁾	JAERI ⁽¹⁾
構 造 強 度 解 析	◦ROCKING	輸送容器のロッキング振動解析	ロッキング 振動	JAERI	
	◦CRUSH	1次元簡易衝突解析輸送容器構造のみ	落下 衝突	JAERI ⁽¹⁾	
	◦FINCRUSH	フィン衝突解析	落下 衝突	JAERI	
	◦PUNCTURE	簡易貫通解析	貫通	JAERI	
	◦SHOCK-JR	1次元振動解析	車両 落下 衝突	SNL ⁽³⁾	JAERI
	◦DYNA 3 D	3次元衝突解析	落下 衝突	LLNL	JAERI
プリプロセッサー	◦INGRID	入力データ作成		LLNL	JAERI
ポストプロセッサー	◦TAURUS	解析、結果の図形表示プログラム		LLNL	JAERI

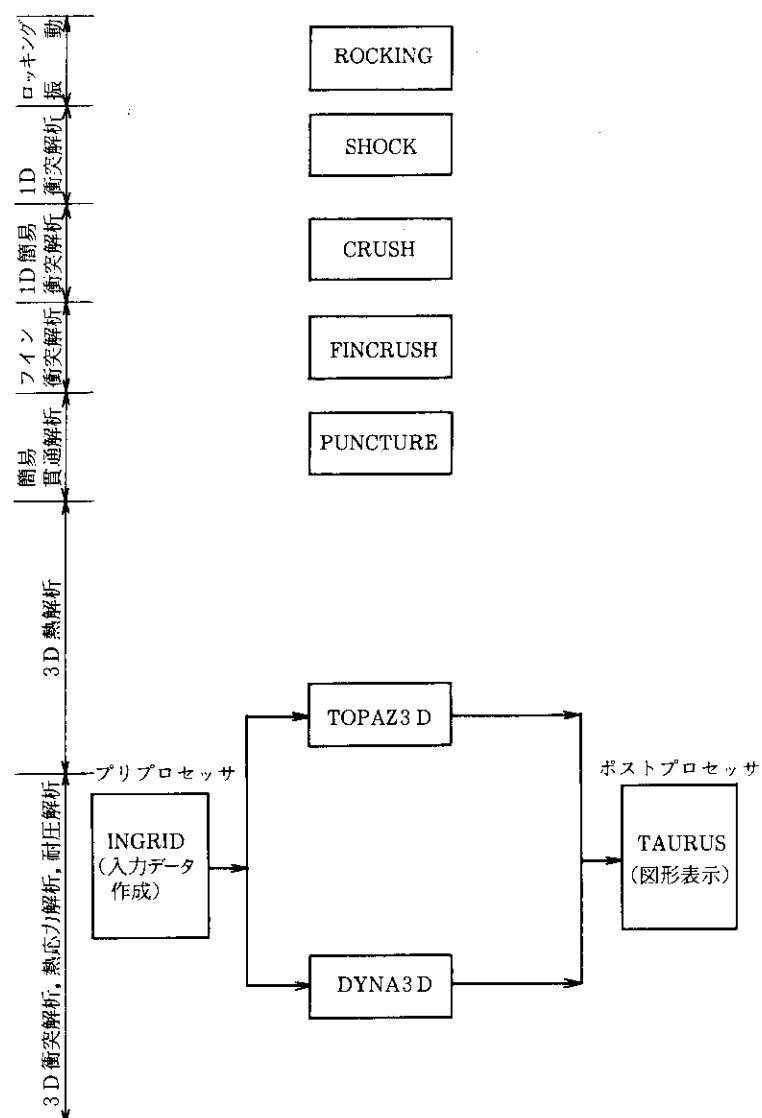
注 (1)JAERI:日本原子力研究所

(2)LLNL:米国ローレンスリバモア国立研究所

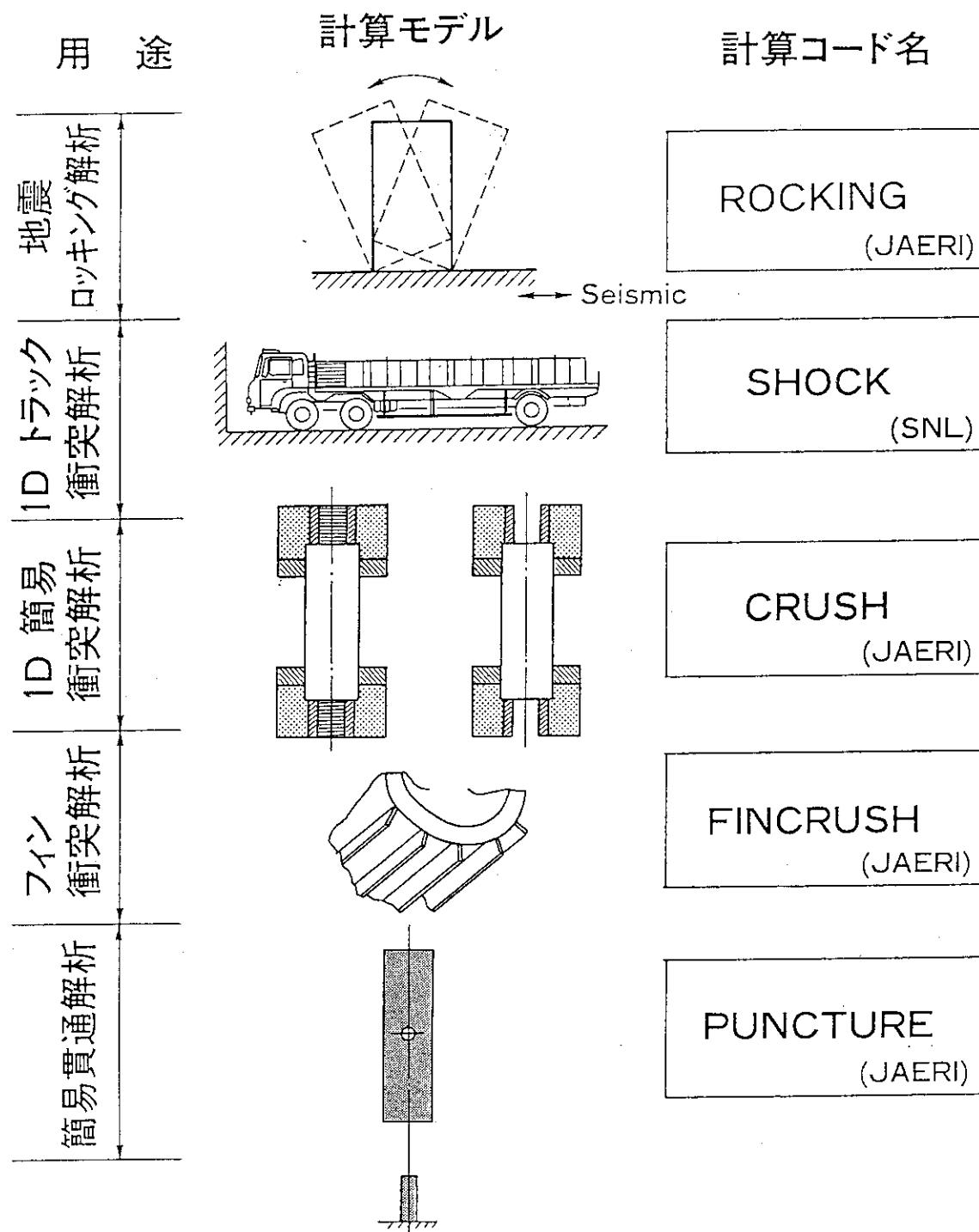
(3)SNL:米国サンディア国立研究所



第2.1図 CASKETSS-2 コードシステムの概要



第2.2図 CASKETSS-2 コードシステムの計算プログラム群



第2.3図 簡易解析計算コード

3. 熱計算プログラム

3.1 TOPAZ 3 D⁽²⁾

3.1.1 概要

有限要素法に基づく熱伝導計算プログラム TOPAZ 3 D は米国ローレンスリバモア国立研究所の Shapiro 博士が開発した 3 次元体系まで取扱えるものである。

3.1.2 計算式

3 次元直交座標系における固体の熱伝導方程式は、領域 Ω において次式で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_g \quad (3.1.1)$$

境界条件は境界 Γ 領域において次式で与えられる。

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q_b \quad (3.1.2)$$

初期条件は時刻 $t=t_0$ において次式とする。

$$T=T(x, y, z)$$

ここで、
x : x 座標

y : y 座標

z : z 座標

T : 温度

t : 時間

q : 热量

λ_x : x 方向熱伝導率

λ_y : y 方向熱伝導率

λ_z : z 方向熱伝導率

n_x : x 方向のベクトル

n_y : y 方向のベクトル

n_z : z 方向のベクトル

q_g : 発热量

q_b : 境界の熱流束

である。(3.1.1) ~ (3.1.3) 式を解いて固体内の温法分布を求める。

境界の熱流束は次のように表わすことができる。

(1) 热流束境界条件

$$q_b = -q_f \quad (3.1.4)$$

ここで, q_f : 境界の热流束である。

(2) 対流境界条件

$$q_b = h_c (T - T_c) \quad (3.1.5)$$

ここで, h_c : 対流热伝達率

T_c : 境界まわりの温度

である。

(3) 辐射境界条件

$$q_b = \sigma \mathcal{F} (T^4 - T_r^4) = h_r (T - T_r) \quad (3.1.6)$$

ここで, h_r : 辐射热伝達率

σ : ステファン・ボルツマン定数

\mathcal{F} : 総括形態係数

T_r : 境界まわりの温度

である。

熱伝導率が等方性であれば, (3.1.1) および (3.1.2) 式はそれぞれ次のようになる。

$$\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$$

$$\left. \begin{aligned} & \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_g \\ & \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_g \end{aligned} \right\} \quad (3.1.7)$$

$$\left. \begin{aligned} & \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = q_b \\ & \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_b \end{aligned} \right\} \quad (3.1.8)$$

(3.1.8) 式へ (3.1.4) ~ (3.1.6) 式を代入して整理すると次式となる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q_f$$

または,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q_f + h_c (T - T_c) + \sigma \mathcal{F} (T^4 - T_r^4) \quad (3.1.9)$$

である。 $T_c = T_r = T_a$ ならば, (3.1.9) 式は次式となる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_a (T - T_a) \quad (3.1.10)$$

ここで、

$$h_a = h_f + h_c (T - T_c)^m \sigma \mathcal{F} \{(T + T_r) (T^2 + T_r^2)\} \quad (3.1.11)$$

ここで h_a : 境界面の熱伝達率

である。境界面コンダクタンス h_o を仮定すると (3.1.10) 式は次式となる。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_s (T - T_a) \quad (3.1.12)$$

ここで

$$h_s = h_o + h_v (T - T_c)^m + \sigma \mathcal{F} \{(T + T_r) (T^2 + T_r^2)\} \quad (3.1.13)$$

$$h_o = - \frac{q_f}{T - T_a}$$

である。

(4) 有限要素法基本式

熱伝導の基本式は次式のようにまとめることができる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + q_g \quad (3.1.14)$$

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h_a (T - T_a) \quad (3.1.15)$$

$$T = T(x, y, z); t = t_0 \quad (3.1.16)$$

(5) 離散化

(3.1.14) 式を積分すると次式となる。

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz &= \iiint_{\Omega} W \left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad dx dy dz + \iiint_{\Omega} W q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (3.1.17)$$

ここで、W : 重み関数

である。(3.1.14) 式右辺第1項を部分とすると次式となる。

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt &= - \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad dx dy dz + \iint_{\Gamma} W \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \\ &\quad + \iiint_{\Omega} W q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (3.1.18)$$

(3.1.15) および (3.1.10) 式を (3.1.18) 式へ代入すると次式が得られる。

$$\iiint_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial x} dx dy dz = - \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} \lambda_y \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\begin{aligned} dx dy dz - \iint_{\Gamma_f} W q_f d\Gamma_f + \iint_{\Gamma_a} W h_a T d\Gamma_a \\ - W h_a T_a d\Gamma_a + \iiint_{\Omega} W q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (3.1.19)$$

ここで、 Γ_f ：熱流束境界面

Γ_a ：対流・輻射境界面

である。

ガラーキンの方法により(3.1.19)式の近似解を求める。

温度Tの形状関数は次式で与える。

$$T = \sum_{i=1}^n N_i T_i = [N] \{T\} \quad (3.1.20)$$

重み関数は次式となる。

$$W = N_i \quad (3.1.21)$$

(3.1.20) および (3.1.21) 式を (3.1.19) 式へ代入して一つの要素に対して次式を得る。

$$\begin{aligned} [\iiint_{\Omega} N_i \rho c N_j dx dy dz] \{\frac{\partial T}{\partial t}\} &= [-\iiint_{\Omega} \nabla^T N_i \lambda \nabla N_j dx dy dz] \{T\} \\ - \iint_{\Gamma_f} N_i q_f d\Gamma_f + \iint_{\Gamma_a} N_i h_a T_a d\Gamma_a &- [\iint_{\Gamma_a} N_i h_a N_j d\Gamma_a] \{T\} \\ + \iiint_{\Omega} N_i q_g dx dy dz \end{aligned} \quad (3.1.22)$$

または

$$[C] \{\dot{T}\} + [H] \{T\} = \{F\} \quad (3.1.23)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} [C_{ij}] &= \iiint_{\Omega} N_i \rho c N_j dx dy dz \\ [H_{ij}] &= \iiint_{\Omega} \nabla^T N_i \lambda \nabla N_j dx dy dz + \iint_{\Gamma_a} N_i h_a N_j d\Gamma_a \\ [F_{ij}] &= \iiint_{\Omega} N_i q_g dx dy dz - \iint_{\Gamma_f} N_i q_f d\Gamma_f + \iiint_{\Gamma_a} N_i h_a T_a d\Gamma_a \end{aligned} \right\} \quad (3.1.24)$$

である。系全体に対しては次式となる。

$$\left. \begin{aligned} [C] &= \sum_e [C_{ij}^e] \\ [H] &= \sum_e [H_{ij}^e] \\ \{F\} &= \sum_e [F_{ij}^e] \end{aligned} \right\} \quad (3.1.25)$$

形状関数は第3.1.1図に示すように六面立方体8節点要素に対して2次要素で近似すると次式

となる。

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i) \quad (3.1.26)$$

$$\left. \begin{array}{l} -1 \leq \xi \leq 1 \\ -1 \leq \eta \leq 1 \\ -1 \leq \zeta \leq 1 \end{array} \right\} \quad (3.1.27)$$

である。積分点の値と次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} x(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) x_i^e \\ y(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) y_i^e \\ z(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) z_i^e \end{array} \right\} \quad (3.1.28)$$

$$T(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) T_i^e \quad (3.1.29)$$

積分は次式となる。

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dx dy dz = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f[x(\xi, \eta, \zeta), y(\xi, \eta, \zeta), z(\xi, \eta, \zeta)] J d\xi d\eta d\zeta \quad (3.1.30)$$

ここで, J : ヤコビアン
であり次式となる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (3.1.31)$$

(3.1.24) 式はガウス積分によって求めることができる。

2次の8点積分の一般式は次式となる。

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta = \sum_{\ell=1}^8 g(\xi_\ell, \eta_\ell, \zeta_\ell) W_\ell \quad (3.1.32)$$

ここで, $\xi_\ell, \eta_\ell, \zeta_\ell$ および W_ℓ は第3.1.1表のようになる。

第3.1.1表 ξ_ℓ , η_ℓ , ζ_ℓ , W_ℓ の表

ℓ	ξ_ℓ	η_ℓ	ζ_ℓ	W_ℓ
1	-1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	1
2	-1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	1
3	1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	1
4	1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	1
5	1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	1
6	1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	1
7	-1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	1
8	-1/ $\sqrt{3}$	1/ $\sqrt{3}$	-1/ $\sqrt{3}$	1

(6) 時間積分法

(3.1.23) 式は差分法によって時間積分できる。

$$[C] \cdot \{\dot{T}\} + [H] \cdot \{T\} = \{F\}$$

$$[C_{n+\alpha}] \cdot \{\dot{T}_{n+\alpha}\} + [H_{n+\alpha}] \cdot \{T_{n+\alpha}\} = \{F_{n+\alpha}\} \quad (3.1.33)$$

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + \Delta t \cdot \{\dot{T}_{n+\alpha}\} \quad (3.1.34)$$

$$\{T_o\} = T \quad (3.1.35)$$

ここで,

$$[C_{n+\alpha}] = [C(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha})] \quad (3.1.36)$$

$$[H_{n+\alpha}] = [H(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha})] \quad (3.1.37)$$

$$\{T_{n+\alpha}\} = (1-\alpha) \cdot \{T_n\} + \alpha \cdot \{T_{n+1}\} \quad (3.1.38)$$

$$\{F_{n+\alpha}\} = (1-\alpha) \cdot \{T_n\} + \alpha \cdot \{T_{n-1}\} \quad (3.1.39)$$

$$\{\dot{T}_{n+\alpha}\} = (1-\alpha) \cdot \{\dot{T}_n\} + \alpha \cdot \{\dot{T}_{n+1}\} \quad (3.1.40)$$

$$t_{n+\alpha} = (n+\alpha) \cdot \Delta t \quad (3.1.41)$$

(3.1.34) および (3.1.38) 式を書き直して、それぞれ次式を得る。

$$\{\dot{T}_{n+\alpha}\} = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \{T_{n-1}\} - \{T_n\} \right\} \quad (3.1.42)$$

$$\{T_{n+\alpha}\} = \{T_n\} + \alpha \cdot (\{T_{n+1}\} - \{T_n\}) \quad (3.1.43)$$

(2.3.29) および (2.3.30) 式を (2.3.20) 式へ代入して次式を得る。

$$\left[\frac{[C_{n+\alpha}]}{\Delta t} + \alpha [H_{n+\alpha}] \right] \left\{ \{T_{n+1}\} - \{T_n\} \right\} = \left\{ \{F_{n+\alpha}\} - [H_{n+\alpha}] \cdot \{T_n\} \right\} \quad (3.1.44)$$

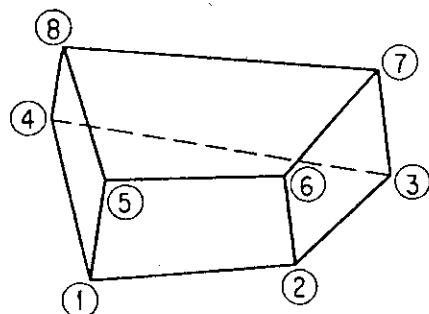
上式を各時刻ごとに数値積分して温度を得る。 α はその値によって第3.1.2表のように呼ばれている。

第 3.1.2 表 α の値と解法

α	解 法
0	前進差分法, 前進オイラー法
1/2	中央差分法, クランク・ニコルソン法
2/3	ガラーキン法
1	後退差分法, 後退オイラー法

また $\alpha = 0$ は陽解法である。定常解析では (3.1.23) 式は次式となる。

$$[H] \{T\} = \{F\} \quad (3.1.45)$$



第 3.1.1 図 六面体 8 節点要素

3.1.3 入力データ

以下の注記を参照しながら第 3.1.3 表に示すように入力データを作成する。

(注 1) 時間依存等の関数関係は正負及び零を含む曲線番号により示される。定数値が曲線に乗せられるか 1000 以上の曲線番号は、特別な関数を評価するユーザー・サブルーチンが用意されていることを示している。

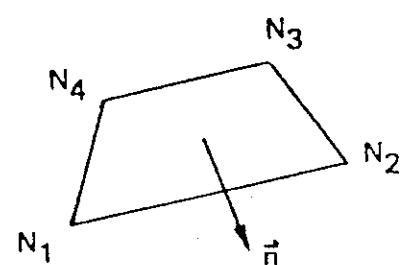
(注 2) データが生成される場合、節点および要素番号は順に増分される。

$$N_i, N_i + INC, N_i - 2 * INC, \dots, N_i + NMIS * INC$$

(注 3) データが生成される場合、面番号 s は最初から 1 ずつ増分されるが、節点番号は次式にしたがって増分される（第 3.1.1 図参照）。

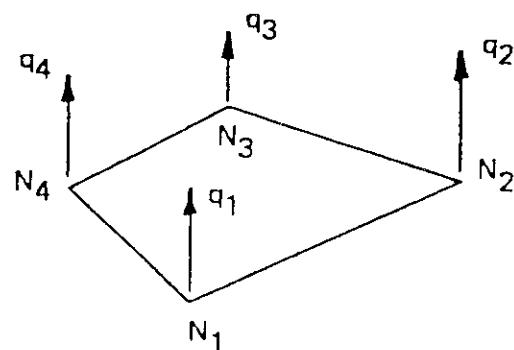
$$N_i^{s-j} = N_i^s + j * INC \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ j = 1, 2, \dots, NMIS$$

(注 4) 熱伝達では、面の外向き垂直ベクトル方を熱流の正とする。面の定義は右手則に従う。本向き垂直ベクトルは、節点 $N_1 - N_2 - N_3 - N_4$ と進んだときに右向きに指される（第 3.1.2 図参照）。



第3.1.2図 面と垂直ベクトル

(注5) 境界面での曲線乗数は面上の各節点での値を別々に指定することにより面内で線形に変化できるようになっている。



第3.1.3図 節点の熱流束

第 3.1.3 表 入力データ

1.1 タイトル・カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 72	タイトル (出力に現われる)	12 A 6

1.2 制御カード

カード 1		
カラム	内容	フォーマット
1 - 5	物性数 (NUMMAT)	I 5
6 - 10	節点数 (NUMNP)	I 5
11 - 15	要素数 (NUMEL)	I 5
16 - 20	温度単位系 (IUNIT) = 1: 無次元 = 2: 摂氏 = 3: 華氏 = 4: Kelvin = 5: Rankine	I 5
21 - 25	スキップ	
26 - 30	バンド幅およびプロファイル最小化 (IBAND) = 0: 最小化せず (デフォルト) = 1: 最小化 = 2: 最小化, 節点指向ベクトルを入力ファイルより読み込む	I 5
31 - 35	温度荷重または境界条件の定義に用いる関数曲線の数 (NCURV)	I 5
36 - 40	あらゆる曲線での定数点数の最大値 (MPCURV)	I 5
41 - 45	スライド面の数 (NSL)	I 5
46 - 50	スレーブ節点の総数 (NSLVT)	I 5
51 - 55	マスター節点の総数 (NMSRT)	I 5
56 - 60	節点温度束の計算 (IEF) = 0: 計算せず (デフォルト) = 1: 計算される	I 5
61 - 65	相変化フラッグ = 0: 相変化なし = 1: 相変化計算の実行	I 5
66 - 80	使用する計算機の使用可能なメモリーのバーセンテージ = 0: 90% にセット	B 15.0

カード 2

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	内部発熱をする要素の数 (NHGEN)	I 5
6 - 10	非零の初期温度を指定する節点の数 (NIT)	I 5
11 - 15	温度境界条件を指定する節点の数 (NIBC)	I 5
16 - 20	熱流束境界条件面の数 (NFBC)	I 5
21 - 25	熱伝達境界の数 (NCRC)	I 5
26 - 30	輻射境界面の数 (NRBC)	I 5
31 - 35	多重輻射面の数 (NRSEG)	I 5
36 - 40	輻射バンドの数 (NBAND)	I 5
41 - 45	放射率-波長曲線の数 (NECURV)	I 5
46 - 50	輻射計算のタイプ (IRTYP)	I 5
	= 1: view factor	
	= 2: exchange factor	
51 - 55	特種内部境界要素の数 (NIBC)	I 5
56 - 60	バルク・節点の数 (NBN)	I 5
61 - 65	バルク・節点境界面の数 (NBNSEG)	I 5
76 - 80	特別ユーザーの BC	I 5

カード 3

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	解析タイプ (ITRAN)	I 5
	= 0: 定常 (デフォルト)	
	= 1: 非定常	
6 - 10	以下の変数は非定常解析の場合に定義する。 時間ステップ・コード (ISTEP)	I 5
	= 0: 固定時間ステップ	
	= 1: 可変西間ステップ	
11 - 15	プリント・データ出力の時間ステップ間隔 (IPRINT)	I 5
	= 0: 1 にセットされる	
16 - 20	プロット・データ出力の時間ステップされる間隔 (IPLOT)	I 5
	= 0: 1 にセットされる	
21 - 25	ダンプ・ファイル出力の時間ステップ間隔 = 0: TOPAZ 3D が正常終了したときにダンプ・ ファイルが出力される	I 5
26 - 35	時間積分パラメーター (ALPHA) = 0: 0.5 にセットされる	E 10.0

カード 4

(定常解析の場合、このカードはブランクにしておく)		
固定時間ステップ (ISTEP= 0)		
カ ラ ム	内 容	フォーマット
1 - 10	問題の開始時刻 (TIMIN)	E 10.0
11 - 20	問題の終了時刻 (TIMEND)	E 10.0
21 - 30	時間ステップの大きさ (DT)	E 10.0

可変時間ステップ (ISTEP= 1)

カ ラ ム	内 容	フォーマット
1 - 10	問題の開始時刻 (TIMIN)	E 10.0
11 - 20	問題の終了時刻 (TIMEND)	E 10.0
21 - 30	初期時間ステップの大きさ (DT) = 0 : この系で最小の時間定数の 1 % にセットされる	E 10.0
31 - 40	最小時間ステップ (DTMIN) = 0 : この系で最小の時間定数の 1 % にセットされる	E 10.0
41 - 50	最大時間ステップ (DTMAX) = 0 : この系で最小の時間定数の 100 倍にセットされる	E 10.0
51 - 60	時間ステップが減少する最大温度変化 = 0 : 1 にセットされる	E 10.0
61 - 70	時間ステップの増減の修正係数 = 0 : 2 にセットされる	E 10.0

カード 5

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	問題のタイプ = 0 : 線形問題 = 1 : 非線形問題 以下の変数は非線形問題の場合に定義する。	I 5
6 - 10	熱伝導マトリクスの再構成の時間ステップ間隔 = 0 : 1 にセットされる	I 5
11 - 15	平衡繰り返し計算の時間ステップ間隔 = 0 : 1 にセットされる	I 5
16 - 20	時間ステップ内での熱伝達マトリクスの再構成の最大回数 = 0 : 10 にセットされる	I 5
21 - 25	熱伝達マトリクスの再構成をする間の平衡計算の最大繰り 返し回数 = 0 : にセットされる	I 5
26 - 35	平衡繰り返し計算の収束許容値 = 0 : 0.0001 にセットされる	E 10.0
36 - 45	リラグゼーション・パラメータ = 0 : 1 にセットされる	E 10.0

1.3 物性特性データ・カード

カード 1		
カラム	内容	フォーマット
1 - 5 6 - 10	物性認識番号 物性タイプ = 1: 等方明-k ₁ のみ定義する = 2: 異方性-k ₁ , k ₂ , k ₃ , のみ定義する = 3: 温度依存等方性 = 4: 温度依存異方性	I5 I5
11 - 20	密度	E 10.0
21 - 30	潜熱が吸収または解放される温度	E 10.0
31 - 40	潜熱	E 10.0
41 - 45	熱発生率曲線の番号（注1）	I5
46 - 55	熱発生率乗数	E 10.0
56 - 60	異方性物質のための物性軸定義オプション = 0: 要素節点 N ₁ , N ₂ , N ₃ による物性軸を持つ局所異方性 = 1: 要素中心位置と空間内の 1 点による物性軸を持つ局所異方性 = 2: ベクトルによって定義される全体異方性	I5

カード 2

カラム	内容	フォーマット
1 - 72	物性認識名	12 A 6

物性タイプ 1 - 等方性

カード 3

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	熱容量: C	E 10.0
11 - 20	熱伝導率: k	E 10.0
カード 4 ~ 9 はブランク。		

物性タイプ2-異方性

カード3

カラム	内容	フォーマット
1-10	熱容量	E 10.0
11-20	熱伝導率 k_1	E 10.0
21-30	熱伝導率 k_2	E 10.0
31-40	熱伝導率 k_3	E 10.0
カード4~7はブランク。		

カード8

カラム	内容	フォーマット
1-10	x_p , AOPT = 1.0 の場合定義する (第3.1.4図参照)	E 10.0
11-20	y_p , AOPT = 1.0 の場合定義する	E 10.0
21-30	z_p , AOPT = 1.0 の場合定義する	E 10.0

カード8

カラム	内容	フォーマット
1-10	a_1 , AOPT = 2.0 の場合定義する (第3.1.4図参照)	E 10.0
11-20	a_2 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0
21-30	a_3 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0

カード9

カラム	内容	フォーマット
1-10	d_1 , AOPT = 2.0 の場合少善する (第3.1.4図参照)	E 10.0
11-20	d_2 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0
21-30	d_3 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0

物性タイプ3-温度依存等方性

カード3

カラム	内容	フォーマット
1-80	温度 T_1, T_2, \dots, T_8	8 E 10.0

カード 4

カラム	内 容	フォーマット
2 - 80	熱容量 C_1, C_2, \dots, C_8	8 E 10.0

カード 5

カラム	内 容	フォーマット
1 - 80	熱伝達率 k_1, k, \dots, k_8	8 E 10.0
カード 6 ~ 9 はブランク。		

物性タイプ 4 - 温度依存異方性

カード 3

カリム	内 容	フォーマット
1 - 80	温度 T_1, T_2, \dots, T_8	8 E 10.0

カード 4

カラム	内 容	フォーマット
1 - 80	熱容量 C_1, C_2, \dots, C_8	8 E 10.0

カード 5

カラム	内 容	フォーマット
1 - 80	熱伝達率 $(k_1)_1, (k_1)_2, \dots, (k_1)_8$	8 E 10.0

カード 6

カラム	内 容	フォーマット
1 - 80	熱伝達率 $(k_2)_1, (k_2)_2, \dots, (k_2)_8$	8 E 10.0

カード 7

カラム	内 容	フォーマット
1 - 80	熱伝達率 $(k_3)_1, (k_3)_2, \dots, (k_3)_8$	8 E 10.0

カード 8

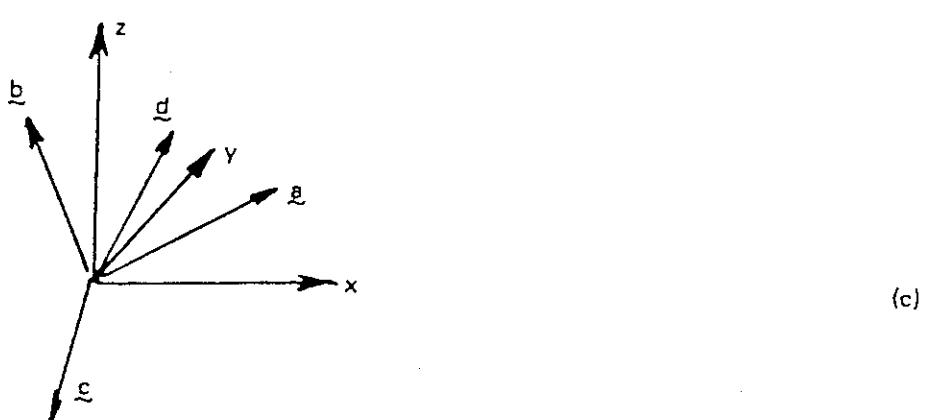
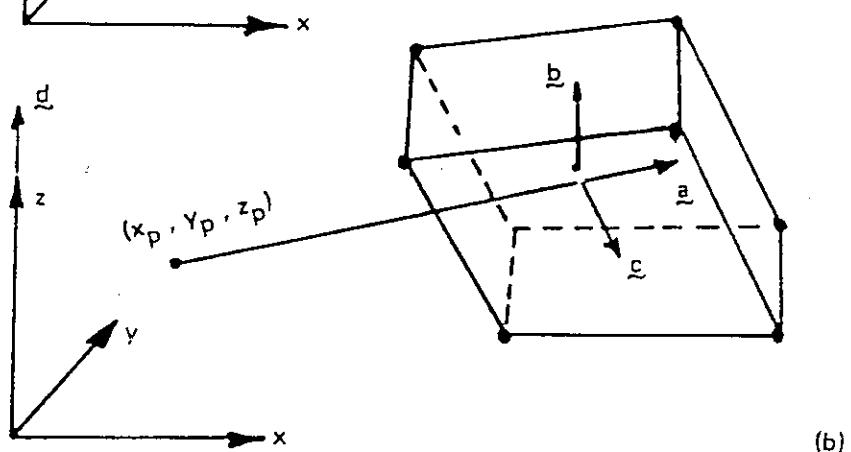
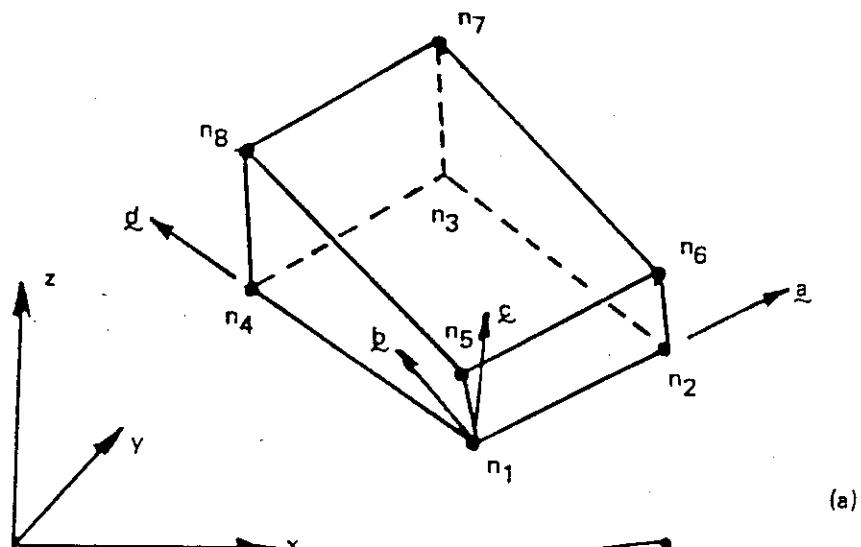
カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	x_p , AOPT = 1.0 の場合定義する (第 3.1.4 図参照)	E 10.0
11 - 20	y_p , AOPT = 1.0 の場合定義する	E 10.0
21 - 30	z_p , AOPT = 1.0 の場合定義する	E 10.0

カード 8

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	a_1 , AOPT = 2.0 の場合定義する (第 3.1.4 図参照)	E 10.0
11 - 20	a_2 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0
21 - 30	a_3 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0

カード 9

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	d_1 , AOPT = 2.0 の場合定義する (第 3.1.4 図参照)	E 10.0
11 - 20	d_2 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0
21 - 30	d_3 , AOPT = 2.0 の場合定義する	E 10.0



物性主軸定義のためのオプション： (a) AOPT=0.0, (b) AOPT=1.0, (c) AOPT=2.0 ここで $\underline{c} = \underline{a} \times \underline{d}$ および $\underline{b} = \underline{c} \times \underline{a}$ である

第3.1.4図 物性主軸定義のためのオプション

1.4 節点カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	節点番号	I 5
6 - 10	生成増分	I 5
11 - 30	x 座標	E 20.0
31 - 50	y 座標	E 20.0
51 - 70	z 座標	E 20.0
71 - 80	初期温度	E 10.0

カード間でデータが生成される場合は、節点番号は昇順でなければならない。データがない場合、下に示す順列で、節点番号が生成される。

$$N_i, N_i + INC, N_i + 2 * INC, \dots, N_j$$

ここで、 N_i および N_j は連続する 2 枚のカード上の節点番号であり、INC は N_i のカードより読み込まれる。生成される節点の座標値は、線形補間により計算される。INC が、またはブランクの場合は節点は生成されない。

1.5 要素データ・カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	要素番号	I 5
6 - 10	物性番号	I 5
11 - 15	生成増分	I 5
16 - 55	節点番号列 $N_1 - N_8$	8 I 5
56 - 60	NMISS	I 5

要素カードは要素番号順になっているものとして扱われる。省略されたデータは、省略部分の前にあるカードを先頭として、下に示すように自動的に生成される。

$$N_j^{e+1} = N_j^e + INC$$

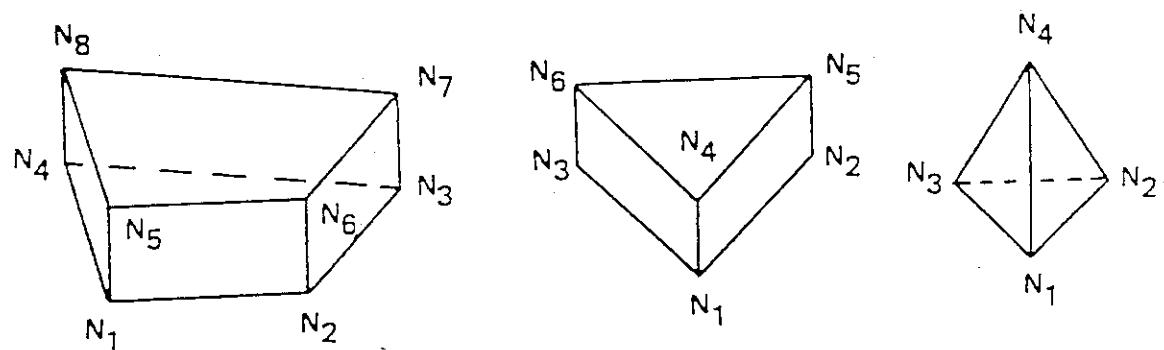
生成される要素の物性特性および生成パラメーター INC は最初のカードのものを使用する。INC のデフォルト値は 1 である。

節点 $N_1 - N_8$ により 8 節点ソリッド要素が定義される。8 点よりも少ない節点を持つ要素は、1 またはそれ以上の節点番号を繰り返すことにより定義される。4, 6 および 8 節点要素を下に示す。これらの要素のデータ・カードの節点入力は以下の形式による（第 3.1.5 図参照）。

4 節点 $N_1 N_2 N_3 N_4 N_4 N_4 N_4$

6 節点 $N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_5 N_6 N_6$

8 節点 $N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_6 N_7 N_8$



第3.1.5図 要素の節点

1.6 インターフェース・データ・カード

制御カード		
各インターフェースにつき1枚制御カードを定義する		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	この面でスレープ面の数	I5
6 - 10	この面でマスター面の数	I5
11 - 15	スキップ	5X
16 - 25	温度接触抵抗	E10.0

各インターフェースにつき以下のカード・セットを定義する		
スレープ面カード:		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	スレープ面番号	I5
6 - 10	スキップ	5X
11 - 30	節点番号列 n ₁ , n ₂ , n ₃ , n ₄	4I5

マスター面カード:		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	マスター面番号	I5
6 - 10	スキップ	5X
11 - 30	節点番号列 n ₁ , n ₂ , n ₃ , n ₄	4I5

1.7 热源要素生成カード

カラム	内 容	フォーマット
2 - 5	要素番号	I 5
6 - 10	発熱率 q'' の曲線番号 (注 1)	I 5
11 - 20	発熱率 q'' の曲線乗数	E 10.0
21 - 25	以下に続いて生成される要素の個数	I 5
26 - 30	生成増分 (注 2)	I 5

1.8 温度初期条件カード

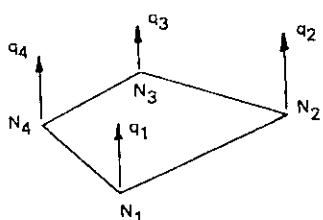
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	節点番号	I 5
6 - 15	初期温度	E 10.0
16 - 20	以下に生成される節点の数 (NMISS)	I 5
21 - 25	生成増分 (INC), (注 2)	I 5

1.9 温度境界条件カード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	節点番号	I 5
6 - 10	時間関数曲線番号	I 5
11 - 20	曲線乗数	E 10.0
21 - 25	以下に生成される節点の数 (NMISS)	I 5
26 - 30	生成増分 (INC), (注 2)	I 5

1.10 热流束境界条件カード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	热流束面番号 (第 3.1.6 図参照)	I 5
6 - 25	热流束曲線番号 (注 1)	I 5
31 - 70	節点列 n_1, n_2, n_3, n_4 に対する曲線乗数 (注 5)	4 E 10.0
71 - 75	生成される面の数 (NMISS)	I 5
76 - 80	生成増分 (INC), (注 3)	I 5



第 3.1.6 図 節点の热流束

1.11 热伝達境界条件カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	热伝達面番号	I5
6 - 25	節点番号列 n_1, n_2, n_3, n_4 (注4)	4I5
26 - 30	h の曲線番号 (注1)	I5
31 - 40	h の曲線乗数	E10.0
41 - 45	T_∞ の曲線番号 (注1)	I5
46 - 55	T_∞ の曲線乗数	E10.0
56 - 65	自由热伝達指数	E10.0
66 - 70	生成される面の数 (NMISS)	I5
71 - 75	生成増分 (INC), (注3)	I5

1.12 輻射境界条件カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	輻射面番号	I5
6 - 25	節点番号列 n_1, n_2, n_3, n_4 (注4)	4I5
26 - 30	f の曲線番号 (注1)	I5
31 - 40	f の曲線乗数	E10.0
41 - 45	T_∞ の曲線番号 (注1)	I5
46 - 55	T_∞ の曲線乗数	E10.0
56 - 60	生成される面の数 (NMISS)	I5
61 - 65	生成増分 (INC), (注3)	I5

1.13 多重輻射データ・カード

カード1		
カラム	内容	フォーマット
1 - 10	Stefan-Boltzmann 定数	E10.0
11 - 20	NBAND > 1 の場合以下の変数を定義する 全形態係数計算収束許容値	E10.0
21 - 25	全形態係数計算繰り返し最大回数	I5

カード 2

(全輻射面が定義されるまでこれらのカードを繰り返す)		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	面番号	I 5
6 - 25	節点番号列 n_1, n_2, n_3, n_4 (注 4)	I 5 I 5
26 - 30	スキップ	5 X
31 - 35	これ以降生成される面の数 (NMISS)	I 5
36 - 40	生成増分 (INC), (注 3)	I 5
41 - 45	面を問題の熱伝達部分と一緒にする	I 5
46 - 50	放射率曲線	I 5
51 - 60	曲線番号が 0 の場合の温度。面の放射率は 1 にセットされる	E 10.0

カード 3

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	波長の折れ点 λ_1	E 10.0
11 - 20	波長の折れ点 λ_2	E 10.0
	.	
	.	
	.	
71 - 80	波長の折れ点 λ_8	E 10.0

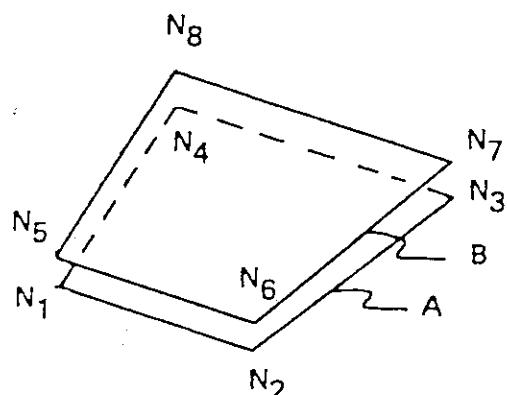
カード 4 (NECURV 回繰り返す)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	バンド $0 \rightarrow \lambda_1$ での放射率	E 10.0
11 - 20	バンド $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ での放射率	E 10.0
	.	
	.	
	.	
71 - 80	バンド $\lambda_{17} \rightarrow \lambda_8$ での放射率	E 10.0

1.14 特種内部要素カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 40	節点番号列 n_1, n_2, \dots, n_8 (注4)	I5
41 - 45	これ以降生成される面の数 (NMISS)	I5
46 - 50	生成増分 (INC), (注3)	I5
51 - 60	係数 f の曲線番号 (注1)	I5
61 - 70	f の曲線乗数	E 10.0
71 - 75	指数 "a"	I5
76 - 80	指数 "b"	I5

内部境界要素を定義するためには、8個の節点が必要である。これらの節点は第3.1.7図のように番号付けされなければならない。



第3.1.7図 特種内部要素

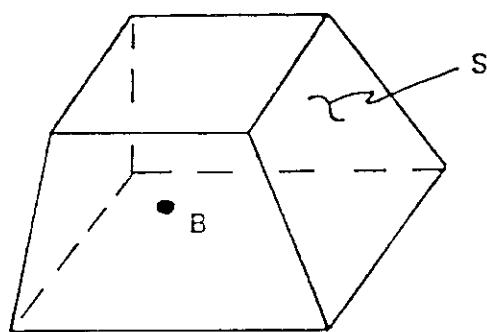
面Aは節点 N_1-N_4 により、面Bは節点 N_5-N_8 により定義されなければならない。同一節点番号を重複して使ってならない。しかし、対応する節点（例えば N_1 と N_5 ）は同じ座標値を持つ。

1.15 バルク・コード・データ・カード

カード1		
カラム	内容	フォーマット
1 - 5	バルク・ノード番号 (第3.1.8図参照)	I5
6 - 10	バルク・ノードの物性番号	I5
11 - 15	このバルク・ノードに関わる境界面の数: NBSEG(I)	I5
16 - 25	このバルク・ノードに関わる全体積	E 10.0

カード 2

(NBSEG(I)= 0 の場合省略する)		
カラム	内容	フォーマット
1 - 20	節点番号列 n_1, n_2, n_3, n_4 (注 4)	I 5
21 - 25	係数 f の曲線番号 (注 1)	I 5
26 - 35	f の曲線乗数	E 10.0
36 - 45	指数 “a”	E 10.0
46 - 55	指数 “b”	E 10.0
56 - 60	生成される面の数 (NMISS)	I 5
61 - 65	生成増分 (INC), (注 3)	I 5



第 3.1.8 図 バルクノードデータ

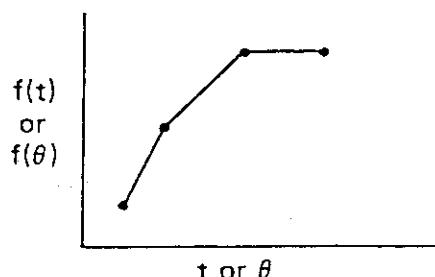
1.16 関数曲線

カード 1		
(各曲線について以下のカードを繰り返す)		
カラム	内容	フォーマット
1 - 5	曲線番号 (第 3.1.9 図参照)	I 5
6 - 10	曲線上の点数 (NP)	I 5
11 - 20	曲線の認識名	A 10

カード 2

(NP 点数だけ繰り返す)		
カラム	内容	フォーマット
1 - 10	時刻または温度	E 10.0
11 - 20	関数値	E 10.0

曲線を定義する点の座標値は、最も小さい時刻または温度を第1点として、昇順に定義しなければならない。曲線上の中間点は、線形補間により求められる。曲線の範囲外の関数値を求めるとき、エラー・メッセージの出力とともに実行を終了する。



第3.1.9図 関数曲線

第3.1.4表 リスタート・データ

TOPAZ 3D のリスタートをする場合、通常入力データは必要としない。しかし、入力データを使用することにより、以下のパラメーターをリセットできる。

- 解析タイプ
- 追加する解析ステップの数
- 時間ステップの大きさ
- プリントおよびプロットの出力間隔
- 積分定数
- 非線形繰り返し計算パラメーター
- 関数曲線
- 物性特性

0 またはブランクが入力され、他の記載がない場合、前回に計算で指定されたパラメーターは変更されない。すべての変更は、次に出力されるダンプ・ファイルに反映される。

2.1 制御カード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	解析タイプ変更フラグ (IACF) = 0: 変更なし = 1: 以下に指定するとおり変更する	I5
6 - 10	非線形解法パラメーター変更フラグ (NONLIN) = 0: 変更なし = 1: 以下に指定するとおり変更する	I5
11 - 15	再定義する物性の数 (NUMAT)	I5
16 - 20	再定義する温度荷重曲線の数 (NUMCUR)	I5

2.2 解析タイプの変更カード

IACF = 0 の場合は省略する		
カード 1		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	時間ステップ・コード (ISTEP) = 0: 固定時間ステップ = 1: 可変時間ステップ	I 5
6 - 10	プリント・データ出力の時間ステップ間隔 (IPRINT)	I 5
11 - 15	プロット・データ出力の時間ステップ間隔 (IPLOT)	I 5
16 - 20	ダンプ・ファイル出力の時間ステップ間隔	I 5
21 - 30	時間積分パラメーター (ALPHA)	E 10.0

カード 2

固定時間ステップ (ISTEP = 0)		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	問題終了時刻 (TIMEND)	E 10.0
11 - 20	時間ステップの大きさ (DT)	E 10.0

可変時間ステップ (ISTEP = 1)		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	問題の終了時刻 (TIMEND)	E 10.0
11 - 20	初期時間ステップの大きさ (DT)	E 10.0
21 - 30	最小時間ステップ (DTMIN)	E 10.0
31 - 40	最大時間ステップ (DTMAX)	E 10.0
41 - 50	時間ステップが減少する最大温度変化	E 10.0
51 - 60	時間ステップの増減の修正係数	E 10.0

2.3 非線形解法パラメーター変更カード

NONLIN = 0 の場合このカードを省略する		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	熱伝導マトリクスの再構成の時間ステップ間隔	I 5
6 - 10	平衡繰り返し計算の時間ステップ間隔	I 5
11 - 15	時間ステップ内での熱伝達マトリクスの再構成の最大回数	I 5
16 - 20	熱伝達マトリクスの再構成をする間の平衡計算の最大繰り返し回数	I 5
21 - 30	平衡繰り返し計算の収束許容値	E 10.0
31 - 40	リラグゼーション・パラメータ	E 10.0

2.4 物性特性変更カード

NUMAT = 0 の場合このカードを省略する。それ以外の場合は 1.3 節にあるとおり、
NUMAT 個の物性のデータを入力する。再定義される物性の個数はオリジナル入力データ
で指定された物性の個数を越えることはできない。

2.5 関数曲線変更カード

NUMCUR = 0 の場合このカードを省略する。その他の場合は、NUMCUR 個のカード・
セットを定義する。曲線の点数はオリジナル入力のものから変更はできない。

カード 1

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	再定義される関数曲線番号	I5

カード 2

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	時刻または温度	E 10.0
11 - 20	関数值	E 10.0

4. 構造計算プログラム

4.1 ROCKING^{(3), (4)}

4.1.1 概要

ROCKING は輸送容器の縦置きの場合の地震応答解析を行う計算プログラムである。ROCKING プログラムの計算方法は浅田ら⁽⁴⁾の研究に基づいており、輸送容器に 4 本のワイヤロープで固縛できる場合の解析も可能である。

4.1.2 計算式

計算モデルは第 4.1.1 図に示すように、輸送容器は 4 本のワイヤロープに固縛され、輸送容器に動的荷重が作用する時、輸送容器は回転運動を起す。輸送容器の回転運動は、加振力、ベースからの反力、4 本のワイヤロープからの引張力である。

第 4.1.1 図に示すように、ワイヤロープ a および b が配置されている X 軸から角度 β の方向に水平加速度が作用し、同時に垂直加速度が作用するとする。この時、輸送容器は点 Q および Q' を支点として第 4.1.2 図のような回転運動をする。

加振方向にのみ回転運動をすると仮定すると、次の 6 つの約り合い式が成立する。

(1) ξ 方向の力の釣り合い式

$$\left(F_\xi - \frac{W}{g} a_\xi \right) + (F_\xi)_A + (F_\xi)_B + (F_\xi)_C + (F_\xi)_D + R_\xi = \frac{W}{g} \ddot{\xi}$$

$$F_\xi = \begin{cases} F \cos \theta : \text{輸送容器面に垂直に力が作用する。} \\ F : \text{土台に平行に力が作用する。} \end{cases}$$

$\ddot{\xi}$: 輸送容器重心の ξ 方向の加速度

(2) η 方向の釣り合い式

$$(F_\eta)_A + (F_\eta)_B + (F_\eta)_C + (F_\eta)_D + R_\eta = 0$$

(3) Z 方向の力の釣り合い式

$$(F_z - \frac{W}{g} a_z) + (F_z)_A + (F_z)_B + (F_z)_C + (F_z)_D + R_z = \frac{W}{g} \ddot{z}$$

$$a_z = a_z + g_3 \begin{cases} F_z = -F \sin \theta : \text{輸送容器面に垂直に力が作用する。} \\ F_z = 0 : \text{土台に平行に力が作用する。} \end{cases}$$

\ddot{z} : 輸送容器重心の Z 方向の加速度

(4) ξ 軸回りのモーメントの釣り合い式

$$(M_\xi)_A + (M_\xi)_B + (M_\xi)_C + (M_\xi)_D + \Delta_\xi = 0$$

(5) η 軸回りのモーメントの釣り合い式

$$(M_\eta)_{\text{ext}} + (M_\eta)_A + (M_\eta)_B + (M_\eta)_C + (M_\eta)_D = \frac{I_Q}{g} \ddot{\theta} + C \dot{\theta}$$

(6) Z 軸回りのモーメントの釣り合い式

$$K_r R_\eta + (M_z)_A + (M_z)_B + (M_z)_C + (M_z)_D + \Delta_z = 0$$

$$K = \begin{cases} 1 : \theta > 0 \\ 0 : \theta = 0 \\ -1 : \theta < 0 \end{cases}$$

ここで、

$$F_\xi = \xi \text{ 方向の荷重} = \begin{cases} F \cos \theta : \text{輸送容器面に垂直に力が作用する。} \\ F : \text{土台に平行に力が作用する。} \end{cases}$$

a_ξ : ξ 方向の土台の加速度（輸送容器重心はその反対方向に $\frac{W}{g_\xi}$ の慣性力が作用する。）

W : 輸送容器の重量

g : 重力加速度: 980 cm/s^2

$$F_z = z \text{ 方向の荷重} = \begin{cases} F \sin \theta : \text{輸送容器面に垂直に力が作用する。} \\ 0 : \text{土台に平行に力が作用する。} \end{cases}$$

a_z : z 方向の土台の加速度

$$a_z^3 = a_z + g$$

r_o : 輸送容器半径 ($r_o^{(1)}$: 輸送容器下部半径, $r_o^{(2)}$: 輸送容器上部半径)

I_Q/g : Q 点での慣性モーメント

$\ddot{\theta}$: 角加速度, $\dot{\theta}$: 角速度, θ : 角度, h : 減衰率

C : 粘圧係数 ($C = [4 \pi \frac{I_Q/g}{T} h]$)

T : 輸送容器系の固有周期

$(M_\eta)_{\text{ext}}$: η 軸回りの外力モーメント

$(F_\xi)_x$: ワイヤの ξ 方向のバネ力 ($x = A, B, C, D$)

$(F_\eta)_x$: ワイヤ X の η 方向のバネ力 ($x = A, B, C, D$)

$(F_z)_x$: ワイヤ X の方向のバネ力 ($x = A, B, C, D$)

$(M_\xi)_x$: ワイヤ X による ξ 軸回りの回転モーメント ($x = A, B, C, D$)

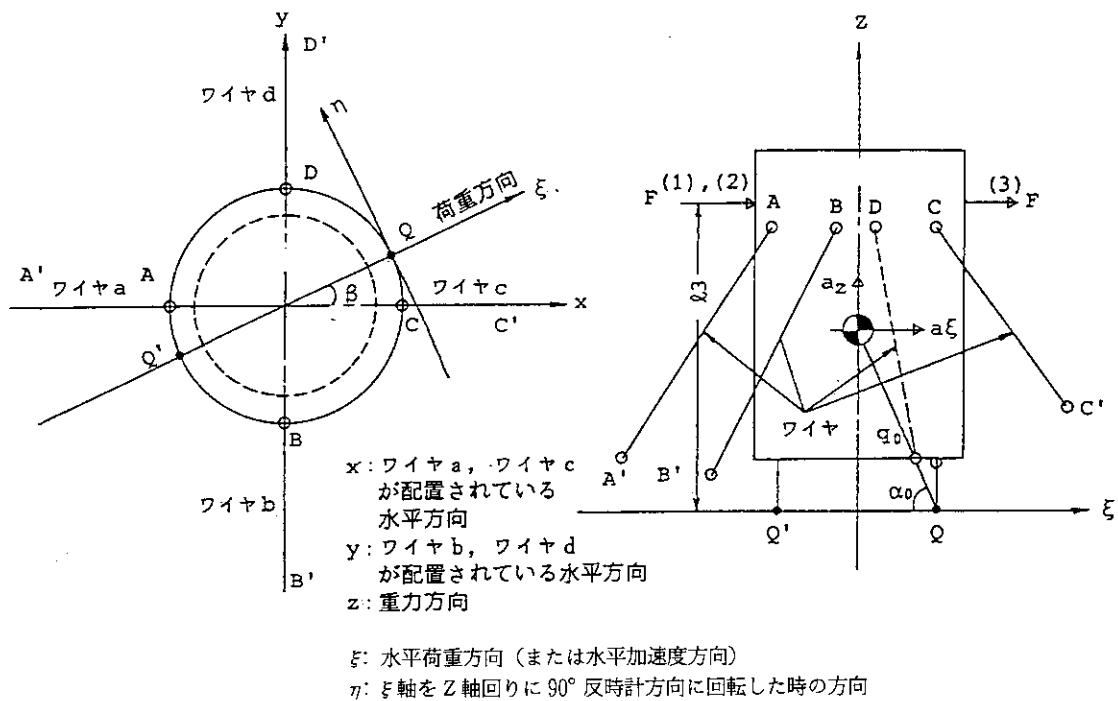
$(M_\eta)_x$: ワイヤ X による η 軸回りの回転モーメント ($x = A, B, C, D$)

$(M_z)_x$: ワイヤ X による Z 軸回りの回転モーメント ($x = A, B, C, D$)

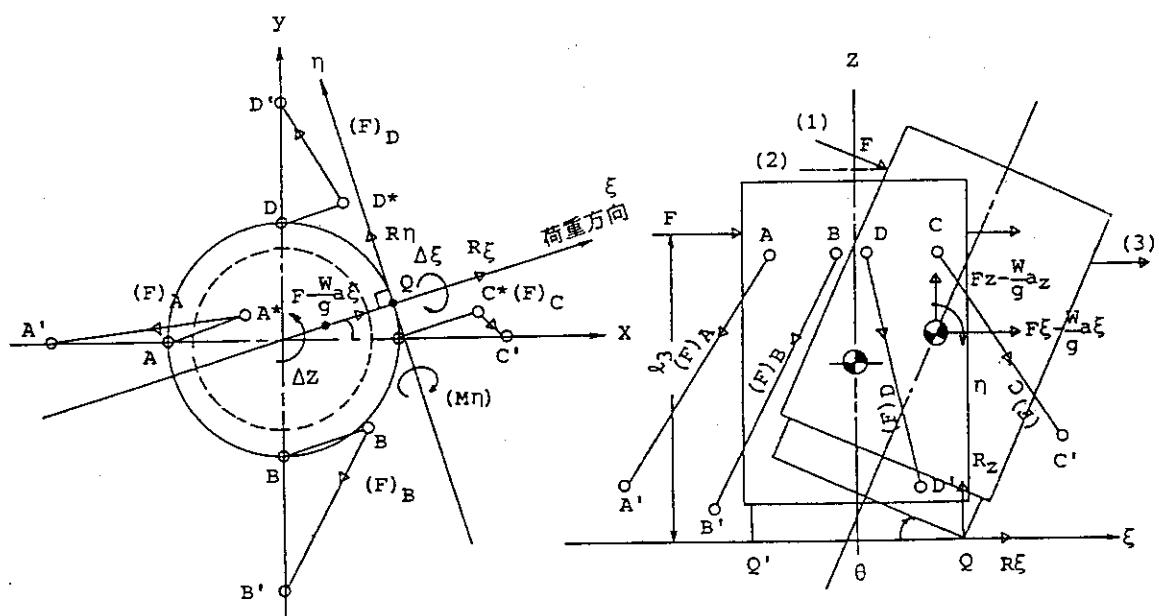
R_ξ : 地面からの ξ 方向の反力, R_η : 地面からの η 方向の反力

R_z : 地面からの Z 方向の反力, Δ_ξ : 地面からの ξ 軸回りの回転モーメント

Δ_z : 地面からの Z 軸回りの回転モーメント



第 4.1.1 図 輸送容器計算モデル

第 4.1.2 図 Q 点回りの回転運動 ($\theta > 0$)

4.1.3 入力データ

ROCKING の入力データを第 4.1.1 表に示す。

第 4.1.1 表 ROCKING の入力データ

1. タイトルカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 72	タイトル (ジョブの記述)	18 A 4

2. 計算コントロールカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 7	'CONTROL' と入力	7 A 1
8 - 10	ブランク	3 X
11 - 15	垂直ばねの個数 (最大 10 個)	I 5
16 - 20	ブランク	5 X
21 - 25	変形図出力ステップ	I 5
26 - 40	ブランク	15 X
41 - 45	応答曲線データ出力ステップ (ファイル No. 11 へ出力)	I 5

3. 初期値データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 7	'INITIAL' と入力	7 A 1
8 - 10	ブランク	3 X
11 - 20	初期回転角	E 10.0
21 - 30	初期回転角速度	E 10.0
31 - 40	初期水平変位	E 10.0
41 - 50	初期水平速度	E 10.0
51 - 60	初期垂直変位	E 10.0
61 - 70	初期垂直速度	E 10.0

4. 形状データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 8	'GEOMETRY' と入力	8 A 1
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	輸送容器の重心高さ	E 10.0
21 - 30	輸送容器の下部半径	E 10.0
31 - 40	輸送容器の上部半径	E 10.0
41 - 50	輸送容器の慣性モーメント	E 10.0
51 - 60	輸送容器の質量	E 10.0
61 - 70	輸送容器の重量	E 10.0

5. 摩擦係数データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 8	'FRICTION'	8 A 1
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	静摩擦係数	E 10.0
21 - 30	動摩擦係数	E 10.0
31 - 40	粘性減衰係数	E 10.0

6. 垂直ばね定数、垂直減衰係数データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 8	'VERTICAL' と入力	8 A 1
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	垂直ばね定数: K_{v1}	E 10.0
21 - 30	垂直ばね定数: K_{v2}	E 10.0
31 - 40	垂直ばね定数: K_{v3}	E 10.0
41 - 50	垂直減衰係数: C_{v1}	E 10.0
51 - 60	垂直減衰係数: C_{v2}	E 10.0
61 - 70	垂直減衰係数: C_{v3}	E 10.0

垂直ばね定数

$$K_v = K_{v1} + K_{v2} \cdot \gamma + K_{v3} \cdot \gamma^2$$

垂直減衰係数

$$C_v = C_{v1} + C_{v2} \cdot \dot{\gamma} + C_{v3} \cdot \dot{\gamma}^2$$

ここで、

 γ : 垂直ばねオーバラップ量 $\dot{\gamma}$: 垂直相対速度

7. 水平ばね定数、水平減衰係数データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'HORIZONTAL' と入力	10 A 1
11 - 20	水平ばね定数: K_{b1}	E 10.0
21 - 30	水平ばね定数: K_{b2}	E 10.0
31 - 40	水平ばね定数: K_{b3}	E 10.0
41 - 50	水平減衰係数: C_{b1}	E 10.0
51 - 60	水平減衰係数: C_{b2}	E 10.0
61 - 70	水平減衰係数: C_{b3}	E 10.0

水平ばね定数

$$K_B = K_{b1} + K_{b2}\varepsilon + K_{b3}\varepsilon^2$$

水平減衰係数

$$C_B = C_{b1} + C_{b2}\varepsilon + C_{b3}\varepsilon^2$$

ここで、

 ε : 水平ばねオーバラップ量 ε : 水平相対速度

8. 時間データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 8	'Timestep' と入力	8 A 1
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	積分時間間隔	E 10.0
21 - 30	計算終了時刻	E 10.0
31 - 40	計算開始時刻	E 10.0

9. 計算結果の出力データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'CHECKPOINT' と入力	10 A 1
11 - 20	ルンゲークッタ計算内のチェック出力開始時刻	E 10.0
21 - 30	ルンゲークッタ計算内のチェック出力終了時刻	E 10.0
31 - 40	計算結果の出力開始時刻	E 10.0
41 - 50	計算結果の出力終了時刻	E 10.0

10. 垂直ばね取付位置データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'V-SPRING-L' と入力	10 A 1
11 - 20	垂直ばね(1)の取付位置半径	E 10.0
21 - 30	垂直ばね(2)の取付位置半径	E 10.0
31 - 40	垂直ばね(3)の取付位置半径	E 10.0
41 - 50	垂直ばね(4)の取付位置半径	E 10.0
51 - 60	垂直ばね(5)の取付位置半径	E 10.0
61 - 70	垂直ばね(6)の取付位置半径	E 10.0

(注) 垂直ばねの数はデータカード 2. で定義する。7 個以上の場合はデータカード 10. の 2 枚目に定義する。最大 10 個まで。

11 A. 地震波データカード(I)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'SINUSOIDAL' と入力	10 A 1
11 - 20	入力波の振幅オプション KIK = 0 : 入力波は変位振幅 KIK = 2 : 入力波は加速度振幅	
21 - 30	円固有振動数オプション KIK = 0 : 円固有振動数 (rad/s) KIK = 2 : 振動数 (Hz)	E 10.0
31 - 40	位相 (rad)	E 10.0

(注) KIK はデータカード 11 B で定義する。

11 B. 地震波データカード (II)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	ブランク	5 X
6 - 10	KIK: 入力地震波の種類オプション	I 5

11 C. 地震波データカード(III)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	水平地震入力オプション = 0: 入力なし = 1: 入力あり	I 5
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 15	垂直地震波入力オプション = 0: 入力なし = 1: 入力あり	I 5
16 - 20	ブランク	5 X
21 - 30	地震波入力変位のスケールファクタ	E 10.0
31 - 40	地震波入力速度のスケールファクタ	E 10.0

11 D 1. 地震波データカード (IVA: 水平変位データオプション)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	水平変位データ数	I 5
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	水平変位データのタイムステップ	E 10.0

11 D 2. 地震波データカード (IVB: 水平変位データ)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ブランク	10 X
11 - 20	水平変位(1)	E 10.0
21 - 30	水平変位(2)	E 10.0
31 - 40	水平変位(3)	E 10.0
41 - 50	水平変位(4)	E 10.0
51 - 60	水平変位(5)	E 10.0

(注) 11 D 1 データカードにおける水平変位データの数だけ 11 D 2 データアカードを使用する。

11 E 1. 地震データカード (VA: 水平速度データオプション)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	水平速度データ	I 5
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	水平速度データのタイムステップ	E 10.0

11 E 2. 地震波データカード (VB: 水平速度データ)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ブランク	10 X
11 - 20	水平速度(1)	E 10.0
21 - 30	水平速度(2)	E 10.0
31 - 40	水平速度(3)	E 10.0
41 - 50	水平速度(4)	E 10.0
51 - 60	水平速度(5)	E 10.0

(注) 11 E 1 データカードにおける速度データの数だけ 11 E 2 データカードを使用する。

11 F 1. 地震データカード (VIA: 垂直変位データオプション)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	垂直変位データの数	I 5
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	垂直変位データのタイムステップ	E 10.0

11 F 2. 地震波データカード (VIB: 垂直変位データ)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ブランク	10 X
11 - 20	垂直変位(1)	E 10.0
21 - 30	垂直変位(2)	E 10.0
31 - 40	垂直変位(3)	E 10.0
41 - 50	垂直変位(4)	E 10.0
51 - 60	垂直変位(5)	E 10.0

(注) 11 F 1 データカードにおける垂直変位データの数だけ 11 F 2 データカードを使用する。

11 G 1. 地震波データカード (VIIA: 垂直速度データオプション)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	垂直速度データの数	I 5
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	垂直速度データのタイムステップ	E 10.0

11 G 2. 地震波データカード (VIB: 垂直速度データ)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	ブランク	10 X
11 - 20	垂直速度(1)	E 10.0
21 - 30	垂直速度(2)	E 10.0
31 - 40	垂直速度(3)	E 10.0
41 - 50	垂直速度(4)	E 10.0
51 - 60	垂直速度(5)	E 10.0

(注) 11 G 1 データカードにおける垂直速度データの数だけ 11 G 2 データカードを使用する。

12 A. ワイヤロープ A のデータカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	'WIREROPE-A' と入力	10 A 1
11 - 20	ワイヤロープ A の土台取付半径	E 10.0
21 - 30	ワイヤロープ A の土台取付高さ	E 10.0
31 - 40	ワイヤロープ A の輸送容器取付高さ	E 10.0
41 - 50	ワイヤロープ A の縦弾性係数	E 10.0
51 - 60	ワイヤロープ A の断面積	E 10.0
61 - 70	ワイヤロープ A の破断応力 (デフォルト値 10^{20})	E 10.0

12 B. ワイヤロープ B のデータカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	'WIREROPE-B' と入力	10 A 1
11 - 20	ワイヤロープ B の土台取付半径	E 10.0
21 - 30	ワイヤロープ B の土台取付高さ	E 10.0
31 - 40	ワイヤロープ B の輸送容器取付高さ	E 10.0
41 - 50	ワイヤロープ B の縦弾性係数	E 10.0
51 - 60	ワイヤロープ B の断面積	E 10.0
61 - 70	ワイヤロープ B の破断応力 (デフォルト値 10^{20})	E 10.0

12 C. ワイヤロープ C のデータカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'WIREROPE-C' と入力	10 A 1
11 - 20	ワイヤロープ C の土台取付半径	E 10.0
21 - 30	ワイヤロープ C の土台取付高さ	E 10.0
31 - 40	ワイヤロープ C の輸送容器取付高さ	E 10.0
41 - 50	ワイヤロープ C の縦弾性係数	E 10.0
51 - 60	ワイヤロープ C の断面積	E 10.0
61 - 70	ワイヤロープ C の破断応力 (デフォルト値 10^{20})	E 10.0

12 D. ワイヤロープ D のデータカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'WIREROPE-D' と入力	10 A 1
11 - 20	ワイヤロープ D の土台取付半径	E 10.0
21 - 30	ワイヤロープ D の土台取付高さ	E 10.0
31 - 40	ワイヤロープ D の輸送容器取付高さ	E 10.0
41 - 50	ワイヤロープの縦弾性係数	E 10.0
51 - 60	ワイヤロープ D の断面積	E 10.0
61 - 70	ワイヤロープ D の破断応力 (デフォルト値 10^{20})	E 10.0

13. 水平地震波の入力方向データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	'INPUTANGLE' と入力	10 X
11 - 20	X 軸に対する水平地震波の入力角度 (rad)	E 10.0

(注) 水平地震波の入力方向を X 軸からの角度で定義する。

4.2 SHOCK-JR⁽⁵⁾

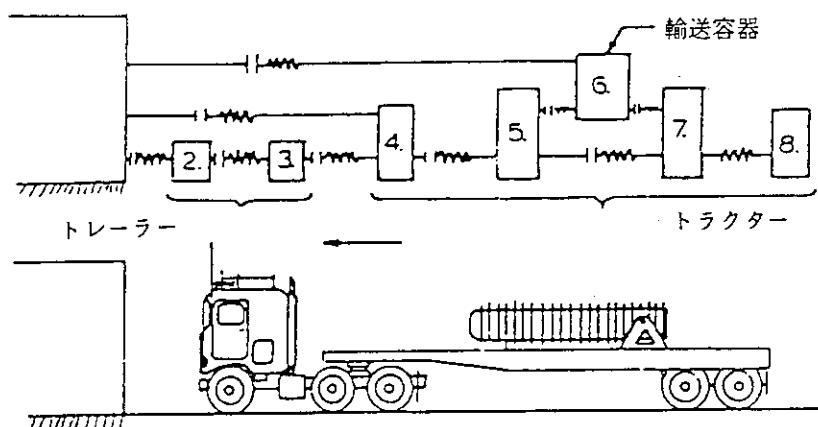
4.2.1 概 要

衝撃計算プログラム SHOCK-JR は、サンディア国立研究所リバモア研究所においての Gabrielson によって開発された SHOCK に改良を加え、SI 単位系に変更し、さらに計算結果の図形処理ルーチンを変更したものである。SHOCK は汎用振動計算プログラムであり、1 次元集中質量系の振動計算が可能である。サンディア国立研究所では、輸送容器を積載したトラックや列車の衝撃応答解析に使用している。計算モデルは第 4.2.1 図に示すように核燃料輸送容器を積載したトラックを、図中のように質点とばねおよびダッシュポットで置き、運動方程式を Runge-Kutta-Gill 法または Newmark- β 法のいずれかによって解く。

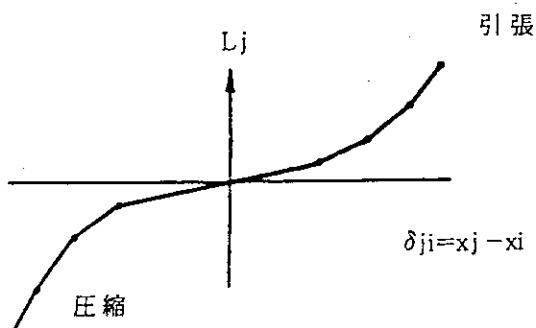
質点と質点を連結するばねは線形ばね以外にも種々の非線形ばねを使用することができる。計算は第 4.2.2 図に示すように区間線形ばねや、第 4.2.3 図に示すようにギャップを有する非線形ばね、あるいはヒステリシスを有する非線形ばねが使用できる。これらの非線形ばねを使用することによって弾塑性振動解析が実施できる。さらに非線形減衰特性も取り扱うことができる。

SHOCK の入力データは分り易く、必要なものをラベルに従ってランダムに入力することができる。積分時間間隔は入力によって決められることもできるが、内部において自動的に決められ、従って問題に応じた積分時間間隔がとられ、安定な解と無駄が省かれる。SHOCK では応答計算のみならず加速度、速度、変位のそれぞれの応答スペクトル計算ができる。SHOCK-JR の特徴をまとめると次のようになる。

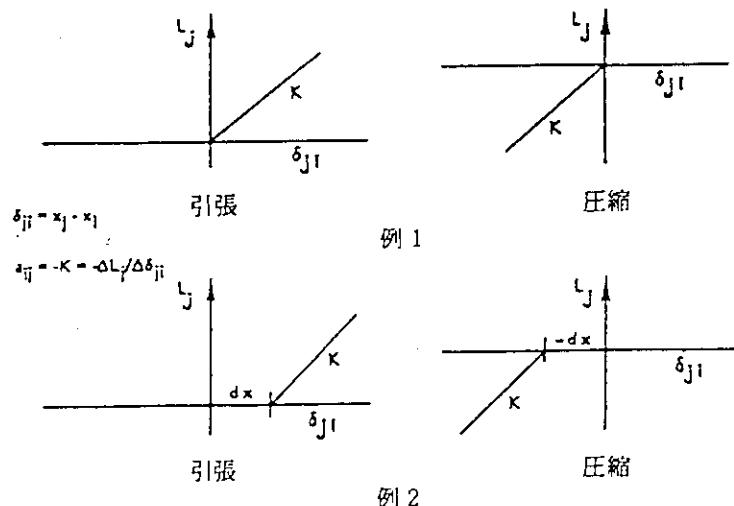
- (1) 入力データの作成が容易である。
- (2) 積分時間間隔が自動的に決められる。
- (3) 計算時間が早い。
- (4) 計算結果の図形表示ができる。



第 4.2.1 図 SHOCK トレイラモデル



第 4.2.2 図 非線形荷重一変形曲線



第 4.2.3 図 圧縮, 引張荷重の例

4.2.2 計算式

輸送容器は、1自由度または3自由度のばね-質量系のモデルによって衝突現象を取扱う。これは最も単純な1次元のモデルであるが、IMPAC 2と同様に、ばねは非線形ばねを使用して、衝突による材料の弾塑性特性をモデル化できる。さらに、圧縮の場合のみ作用する圧縮ばね(ギャップを取扱うことができる)、引張の場合のみ作用する引張りばね、および減衰も取扱うことができる。

一般のばね-質量系の運動方程式は、2次の微分方程式として、次のように表わされる。

$$M\ddot{X} = A_x X + A_x^* X + A_x \dot{X} + F_x \quad (4.2.1)$$

ここで、 \ddot{X} , \dot{X} , X はそれぞれ、加速度、速度、変位であり、 M , A_x^* , A_x , F_x はそれぞれ、質量、減衰、ばねマトリックス、外力ベクトルである。(4.2.1)式を軸方向について示したものとすれば、これと直角方向および回転方向についての運動方程式は、それぞれ、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{Y} &= AY + B\theta + A^* \dot{Y} + B^* \dot{\theta} + F_y \\ J\ddot{\theta} &= CY + D\theta + C^* \dot{Y} + D^* \dot{\theta} + F_\theta \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2)$$

これらの2階の微分方程式は、1階の微分方程式にして、Runge-Kutta-Gill法またはNewmarkによって積分できる。(2.1)式に $v=x$ を代入して1階の微分方程式に変換する。

$$\frac{dv_n}{dt} = f(x, v, t) \quad \frac{dx_n}{dt} = v$$

(4.2.2)式に対しては

$$\left. \begin{aligned} \text{軸方向: } \frac{dy_n}{dt} &= f(y, \dot{y}, t) & \frac{dy_n}{dt} &= \dot{y}_n \\ \text{横方向: } \frac{dy_n}{dt} &= f(y, \theta, \dot{y}, \dot{\theta}, t) \\ \frac{d\theta_n}{dt} &= f(y, \theta, \dot{y}, \dot{\theta}, t) \\ \frac{dy_n}{dt} &= \dot{y}_n \\ \frac{d\theta_n}{dt} &= \dot{\theta}_n \end{aligned} \right\} \quad (4.2.3)$$

4.2.3 入力データ

SHOCK はばね-質量系としてモデル化される1あるいは2自由度を持つ構造体の動的応答計算プログラムである。プログラムでは各集中質量の挙動(各自由度に対する変位、速度、加速度)とばねあるいはばねとダッシュポットの挙動(力、応力、変位、モーメント)を時間の問題として扱っている。

解析する問題に関して諸条件を定義する必要がある。例えば荷重について言えば、衝撃、初速、初期変位のような瞬間的な条件を持つ場合や、一定荷重、重力荷重、変動荷重、初期荷重の場合などを考慮しなければならない。

入力形式は一様な FORMAT で入力され、そこで定義された値によってばねと質量の動的応答に関する解が output される。また時間に対するばねと質量の加速度、力、応力モーメントなどの各曲線をそれぞれオプションで図化出力できる。

このプログラムにおける問題点は、大きな質点数の問題に対する計算時間である。この時間は最大振動数、質量数、自由度、そして非線形のカップリング数の関数となっている。積分ステップサイズの数値的安定は計算モデルの最大振動数の周期の $1/5$ ほどで得られ、その振動数は (a_{ij}/m_i) の最大値によって決定される。ここで a_{ij} はばね定数、 m_i は質量である。プログラムで用いられている Runge-Kutta-Gill 積分法は非線形問題に対して非常に有効であるが大きな線形問題に対しては不向きである。そこで大きな線形問題に対しては実行時間を直縮するため Newmark 積分法を用いている。

最初の表題の入力と最後の終了を示す入力を除いて各入力は順序不同でよいが、同種毎に入力

することを推奨する。例えば、問題における自由度、減衰、積分方法、時間、に関する情報が1つのグループとして、また、質量、重量、慣性、各質量の位置関係が1のグループとして考えられるからである。しかし、これらは出力の内容や順序に関係することはない。

プログラムで用いられる入力ワードは次のとおりである。

I 計算の諸条件

- | | |
|-------------|---|
| 1. AXIAL | 軸方向問題（自由度がx方向のみ）の場合に用いふ入力ワードでデータはない。 |
| 2. LATERAL | 横方向問題（自由度がyと θ ）の場合に用いる入力ワードでデータはない。 |
| 3. DAMPED | 減衰を含む問題に用いる入力ワードでデータはCS(1)のみ。 |
| | CS(1) すべての線形ばねが同じ減衰率を有する場合の臨界減衰率（%） |
| 4. UNDAMPED | 減衰を含まない問題に用いふ入力ワード。減衰に関する入力がない場合は減衰がないものとして実行される。 |
| 5. TSTEPS | 計算開始時間(t_0)と終了時刻(t_{max})の定義と計算結果の印刷および図化の出力時間刻みの定義（第4.2.1表参照）。 |
| | JDEX 計算結果の出力時間刻み数。1ステップは $(t_{max} - t_0) / KDEX$ となる。 |
| | CS(1) 開始時間(t_0) |
| | CS(2) 終了時間(t_{max}) |

第4.2.1表 入力データTSTEPSの例

```
0000000001111111112222222223333333334444444455555555566666666667
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

```
TSTEPS      50    500    0.0     0.5
```

```
TSTEPS      50        0.0     0.01
```

- | | |
|-----------|---|
| 6. HSTEPS | 通常プログラム内部で積分ステップサイズが決定されるため必要ないが、ステップサイズ h が一定あるいは線形ばねが定義されていない問題はこれを入力しなければならない。 |
|-----------|---|

JDEX }
KDEX } 不要

CS(1) 一定ステップサイズ（通常、計算時間をセーブするため横方向問題に用いられる）。

- | | |
|------------|--|
| 7. NEWMARK | Newmark積分を用いる場合の入力で未定義の場合はRunge-Kutta-Gill積分法で実行される。 |
|------------|--|

II 質量特性と初期条件

第4.2.2表 入力データベクトルの例

```
0000000001111111111222222222333333334444444455555555566666666666777777777778
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

LOADS	1	1	-75.0				
YVALUE	1	6	0.12	0.24	0.30	300.	250.
MOMENTS	2	5	15.0	75.0	42.0	-28.0	
WINERTIA	4	7	15.2	11.7	21.4	16.9	
INERTIA	1	3	1.0	2.5	0.5		
WEIGHT	1	6	10.5	11.0	1.5	2.0	12.5
MASSES	2	7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
MASSES	1	1	1.0				

8. WEIGHT 各要素の重量の入力。MASSES が用いられる場合は不要（第4.2.2表参照）。
9. MASSES 各要素の質量 (kg) の入力（第4.2.2表参照）。
10. INERTIA 横方向系の各要素の質量慣性モーメントの入力。単位は (kg・m) で重量慣性モーメントの 1 / 9.8 である。
11. WINERTIA 重量慣性モーメント (N・m) の入力。INERTIA が用いられる場合は不要。
12. LOAD 特定の要素に加わる時間に依存しない一定荷重 F_c の入力。（単位は Newton で重力荷重など）。
13. MOMENT 特定の要素における時間に依存しい一定モーメント M_c の入力で、プログラム内では質量数を m とすると以下のようないベクトルとして定義される（第4.2.3(a)表参照）。

軸方向問題

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m, \dot{x}_{m+1}, \dot{x}_{m+2}, \dots, \dot{x}_{2m})$$

$$\begin{pmatrix} x; \text{ 初期変位} \\ \vdots \\ x; \text{ 初期速度} \end{pmatrix}$$

横方向問題

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_m, \theta_{m+1}, \theta_{m+2}, \dots, \theta_{2m}, \dot{y}_{2m+1}, \dot{y}_{2m+2}, \dots, \dot{y}_{3m}, \dot{\theta}_{3m+1}, \dot{\theta}_{3m+2}, \dots, \dot{\theta}_{4m})$$

$$\begin{pmatrix} y; \text{ 初期線形変位} & \theta; \text{ 初期角変位} \\ \vdots & \vdots \\ y; \text{ 初期線形速度} & \theta; \text{ 初期角速度} \end{pmatrix}$$

より正確な初期値を設定したい場合には第4.2.3(b)表に示すような形式で入力することができる。

第4.2.3(a)表 入力データ YVALUE の例

```
0000000001111111122222222233333333344444444555555556666666667777777778
123456789012 456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

```
YVALUE      1     6    0.00001    0.00002    0.00003   10.      20.      30.
```

SAMPLE OF DATA CARDS FOR A 3-MASS LATERAL PROBLEM WITH LINEAR DISPLACEMENTS
AND VELOCITIES (FORMAT (A8,4X,2I5,6E10.2))

```
YVALUE      1     6    0.00001    0.00002    0.00003   0.      0.      0.
YVALUF      7     12   10.      20.      30.      0.      0.      0.
```

AN ALTERNATIVE FORM WHICH DOES NOT INCLUDE THE ZERO'S IS

```
YVALUE      1     3    0.00001    0.00002    0.00003
YVALUE      7     9   10.      20.      30.
```

```
0000000001111111122222222233333333344444444555555556666666667777777778
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

第4.2.3(b)表 入力データ YVALUE の例

```
0000000001111111122222222233333333344444444555555556666666667777777778
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

```
YVALUE      6
-1.023412E-04 -3.2142315E-5 -2.461751E-04  2.123412532   3.4521314E+1
3.1203102E+02
```

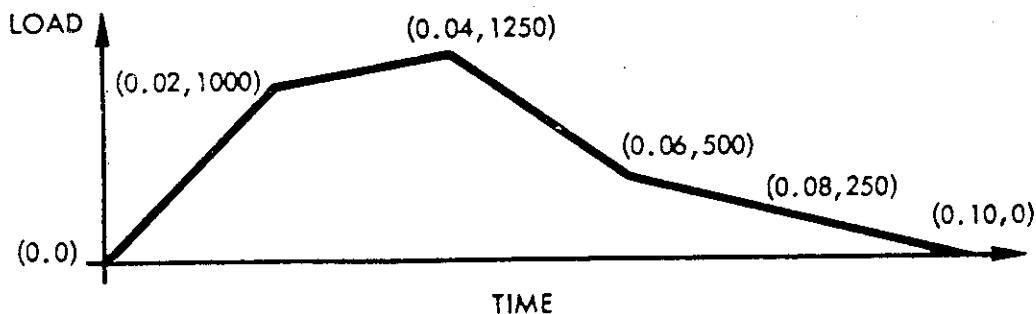
```
0000000001111111122222222233333333344444444555555556666666667777777778
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

FORMAT (6E14.7)

15. XLOCANE 横方向問題での x 軸に沿ったある質量の重心位置の入力。各質量間の距離は SPRING ワードで入力されるが、この入力でそれを正確に補正する必要がある。また、この入力を用いることによって時間刻み毎に剛体に関する加速度、速度、変位の情報が計算される。壁や地面のように固定されたモーメントを生じない質量の定義

III 荷重条件

17. LPOINT 第4.2.4 図に示されたような時間によって変化する外部荷重の入力定義



第4.2.4図 外部荷重時間変化

18. MPOINT 時間によって変化する外部モーメントの入力定義（第4.2.4表参照）

JDEX 荷重およびモーメントが加わる質量番号

KDEX 荷重-時間及びモーメント-時間曲線上の入力点の数（最大3）

CS(1) } 曲線上の第1点の横および縦座標値の定義
CS(2) }CS(3) } 第2点での定義
CS(4) }CS(5) } 第3点での定義
CS(6) }

第4.2.4表 入力データ LPOINT の例

```
000000000111111122222222233333333444444444555555555666666677777777778
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

LPOINT	1	1	1.0	0.0			
LPOINT	1	3	0.0	0.0	0.02	1000.0	0.04
LPOINT	1	3	0.06	500.0	0.08	250.0	0.10
							0.0

19. SINELOADS 特定の質量における時間依存の正弦関数で表わされる荷重の入力定義。

JDEX 荷重が加わる質量番号

CS(1) 振動数の入力 (rad/s)

CS(2) 振幅の入力 (Newton)

CS(3) 荷重が加わりはじめる時間の入力定義。

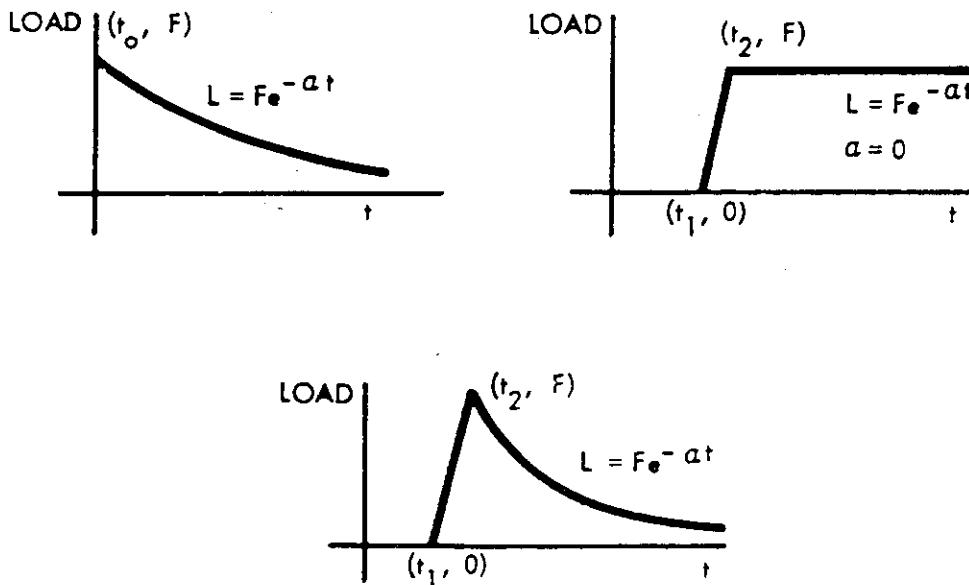
零のときはすべての時間ステップで計算が実行される。

CS(4) 位相のずれの入力 (rad)

20. DECAYLOAD 特定の質量における時間依存の減衰荷重の入力定義（第4.2.5図参照）

JDEX 時間 t において荷重が加わる質量番号CS(1) 減衰率(α)CS(2) 荷重の最大値(F)

- CS(3) 荷重勾配と時間軸とが交差した時間 (t_1)
 CS(4) 荷重勾配と減衰曲線とが交差した時の時間 (t_2)



第 4.2.5 図 DECYLOAD の使用

IV ばねとカップリングの定義

21. SPRING 軸方向および横方向における線形ばねの定義（第 4.2.5 表参照）

JDEX
 KDEX) ばねが定義される質量番号

- CS(1) 臨界減衰率 ζ_{ij} (%)
 CS(2) 回転を伴わない j 端での正の変位に対して i 端に生じる負荷 a_{ij}
 CS(3) 回転を伴わない j 端での正の変位に対して i 端に生じるモーメント b_{ij}
 CS(4) 変位を伴わない j 端での正の回転に対して i 端に生じるモーメント d_{ij}
 CS(6) 質量 i と質量 j との距離

第 4.2.5 表 入力データ SPRING の例

SPRING	3	4	0.05	-1.000+6	-0.474+6	0.326+6	-1.210+6	0.80
--------	---	---	------	----------	----------	---------	----------	------

SPRING	3	4	0.05	-5.000+6
--------	---	---	------	----------

000000000111111111222222222333333333444444444555555556666666677777777778 12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
--

22. RADIAL

第 4.2.6 図に示されたような半径方向の剛性に対してのばねを定義する。

JDEX 左にある質量の番号

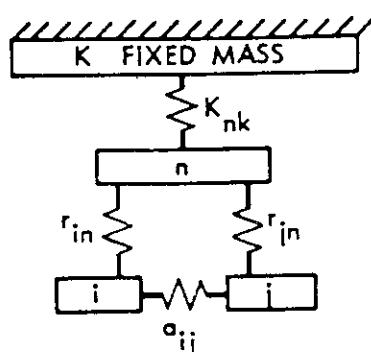
KDEX 右にある質量の番号

CS(1) CS(2)と CS(4)にかかる減衰率

CS(2) ばね $-a_{ij}$

CS(3) $r_{in}; r_{jn}; |r_{in}| = |r_{jn}|$

CS(4) K_{nk}



第 4.2.6 図 半径方向ばね-質点モデル

23. COMPRESS カップリングについて圧縮のみの場合の線形ばね定数の入力

24. TENSION カップリングについて引張りのみの場合の線形ばね定数の入力

JDEX) ばねが定義される質量番号
KDEX)

CS(1) 臨界減衰率 ζ_{ij} (%)

CS(2) j 端の単位変位に相当する i 端での負荷 a_{ij} 。通常負の値が入力される。

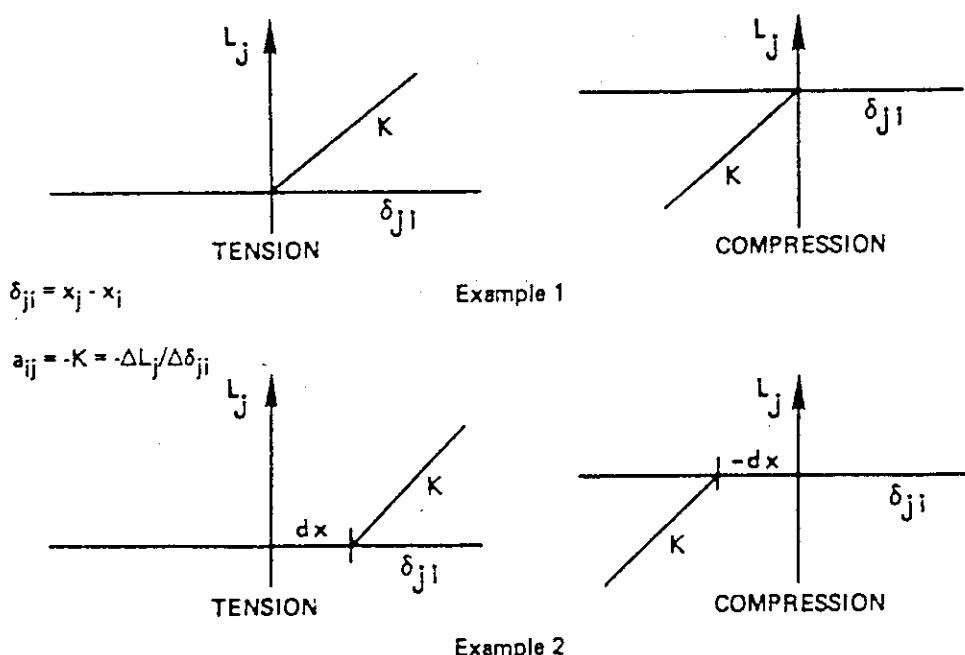
CS(3)~CS(5) 不要

CS(6) 第 4.2.7 図のように圧縮、引張りに対して不連続な場合の dx を定義する。

第 4.2.7 図は各ばねにおいて j に関する i の相対変位 δ_{ij} が次式のようになることを示している。

$$\delta_{ij} = Y_i - Y_j = -\delta_{ij}$$

第 4.2.7 図はある変位において不連続が生じる場合を示している。



第4.2.7図 圧縮、引張荷重の例

25. DAMPCOFF 線形及び非線形のカップリングにおける減衰定数の入力。質量 i, j 間の減衰力やモーメントは以下の式から計算される。

軸方向問題の場合

$$F_i = a_{ij}^* (y_i - y_j)$$

横方向問題の場合

$$\begin{aligned} F_i &= a_{ij}^* (y_i - y_j) + b_{ij}^* \dot{\theta}_j - c_{ij}^* \dot{\theta}_i \\ M_i &= d_{ij1}^* (y_i - y_j) + d_{ij2}^* \dot{\theta}_i - d_{ij2}^* \dot{\theta}_j \\ F_j &= a_{ij}^* (y_j - y_i) + c_{ij}^* \dot{\theta}_j - b_{ij}^* \dot{\theta}_i \\ M_j &= c_{ij}^* (y_j - y_i) + d_{ij2}^* \dot{\theta}_i - d_{ij1}^* \dot{\theta}_j \end{aligned}$$

ここで $a_{ij}, c_{ij}^*, d_{ij}^*$ は減衰マトリクス a, b, c, d の各要素で通常減衰係数は負の値にとられる。

JDEX
KDEX) 減衰力が加わる質量番号

CS(1) 不要

CS(2) a_{ij}^*

CS(3) b_{ij}^*

CS(4) c_{ij}^*

CS(5) d_{ij1}^* } 横方向のばねが 2 つの質量の中間点に定義される場合は等しい

CS(6) d_{ij2}^* } 値をとる。

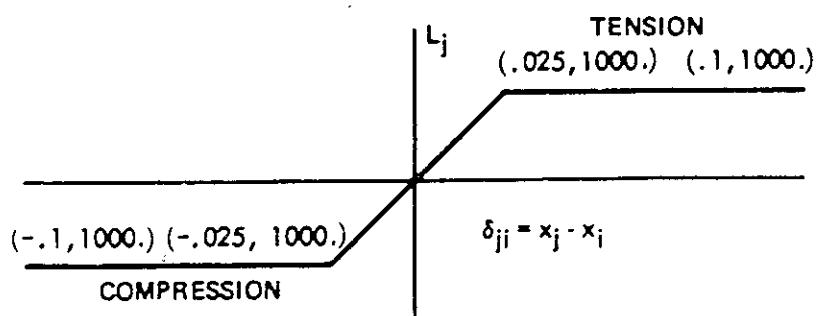
26. DXLOAD

第4.2.8図に示されたような荷重-変位曲線の入力定義。これは実行における変位の進行を促すために入力される。もし、計算における相対変位が荷重偏向曲線から与えられる数値よりも大きいと実行は停止する。(第4.2.6表)

軸方向問題の場合

JDEX
KDEX) 荷重が加わる質量番号

CS(1) 曲線上のある点の定義で CS(2) は i 端が固定されているときの j 端での偏向によって生じる負荷の値である。



第4.2.8図 荷重変位曲線の例

第4.2.6表 入力データ DXLOAD の例

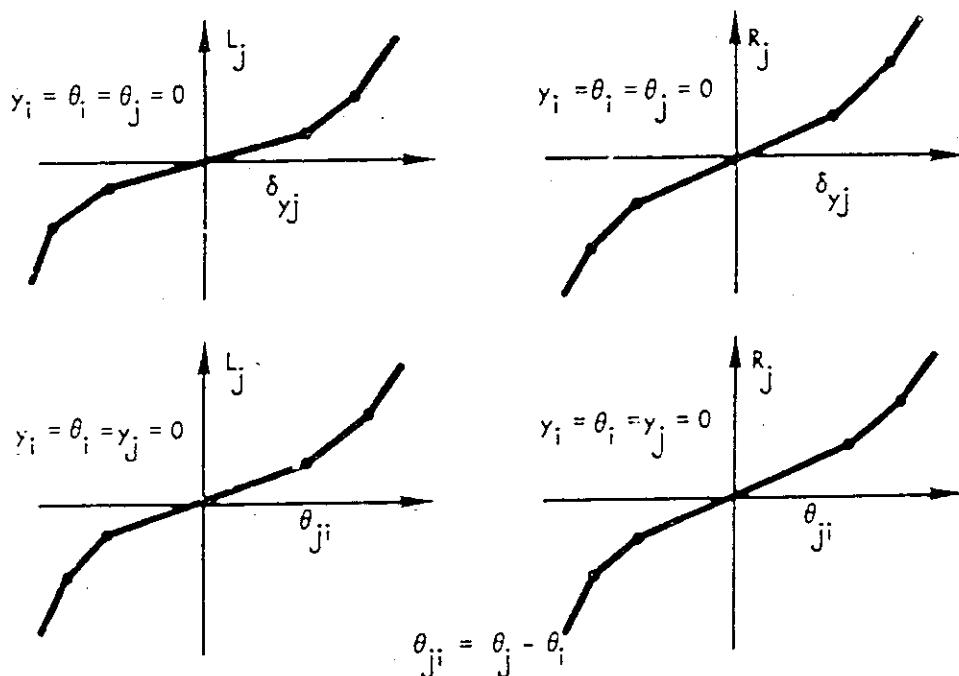
```
000000000:111111111222222222333333334444444445555555566666666677777777778
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

DXLOAD	1	2	0.1	1000.0
DXLOAD	1	2	0.0250	1000.0
DXLOAD	1	2	0.0	0.0
DXLOAD	1	2	-0.025	-1000.0
DXLOAD	1	2	-0.1	-1000.0

横方向問題の場合

ここでは4つの関数が用いられるが軸方向の場合と同様に各点に対して DXLOAD を用いればよい。

以下に示すように f_1 と f_3 は相対線形変位点を用いて定義され、 f_2 と f_4 は相対角変位点を用いて定義される (第4.2.9図参照)。



第4.2.9図 4つの非線形荷重とモーメント曲線の例

JDEX) 荷重が加わる質量番号
KDEX)

- CS(1) 質量 i が固定されているときの相対線形変位 δ_{ij}
- CS(2) 変位 δ_{ij} により j 端に生じる負荷 f_1
- CS(3) 変位 δ_{ij} により j 端に生じるモーメント f_3
- CS(4) 質量 i が固定されているときの相対角変位 θ_{ij}
- CS(5) 角変位 θ_{ij} により j 端に生じる負荷 f_2
- CS(6) 角変位 θ_{ij} により j 端に生じるモーメント f_4

ここで、質量 j における適当な変位とモーメントの数値に対して、質量 j に関するその物理的重心位置を明らかにしておく必要がある。

27. DXPOLY ある 2 つの質量間の荷重-変位関係の関数の各係数を定義する。

JDEX) 荷重関数が定義される質量番号
KDEX)

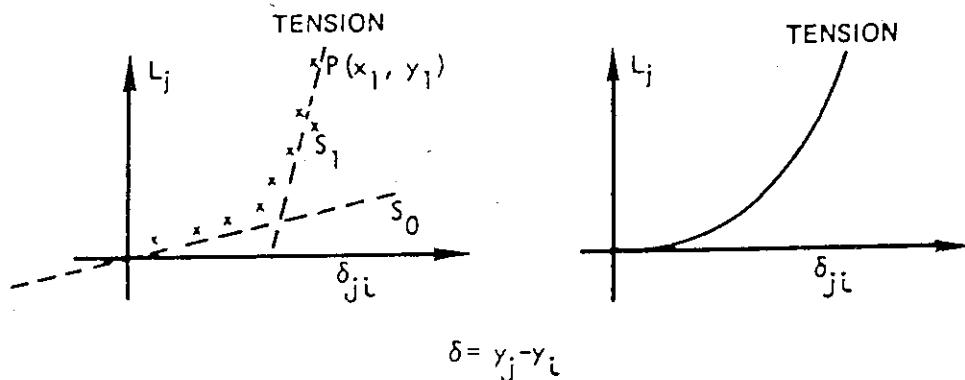
- CS(1) 係数 A。
- CS(2) 係数 $A_1 \sim A_5$ 。荷重 L_j は次式から計算される。
$$L = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + \dots + A_5 X^5$$
- CS(6)

ここで X は質量間の相対変位 δ_{ji} で、力となって質量 i に加わる。

28. DXPOWER ある 2 つの質量間に $L = AX^B + CX$ で表わされる荷重-変位関数を定義する。(第4.2.10図参照)。

JDEX) この関数が定義される質量番号
KDEX)

- CS(1) 曲線上の定義点の x 座標値
- CS(2) 曲線上の定義点の y 座標値
- CS(3) 定義点における曲線の勾配 s_1
- CS(4) 原点における曲線の勾配 s_0



第 4.2.10 図 関数 DXPOWER の例

29. TANGENT 正切関数によって表わされる荷重の入力定義
30. TANHLOAD 正切双曲線関数によって表わされる荷重の入力定義

JDEX) この関数が定義される質量番号
KDEX)

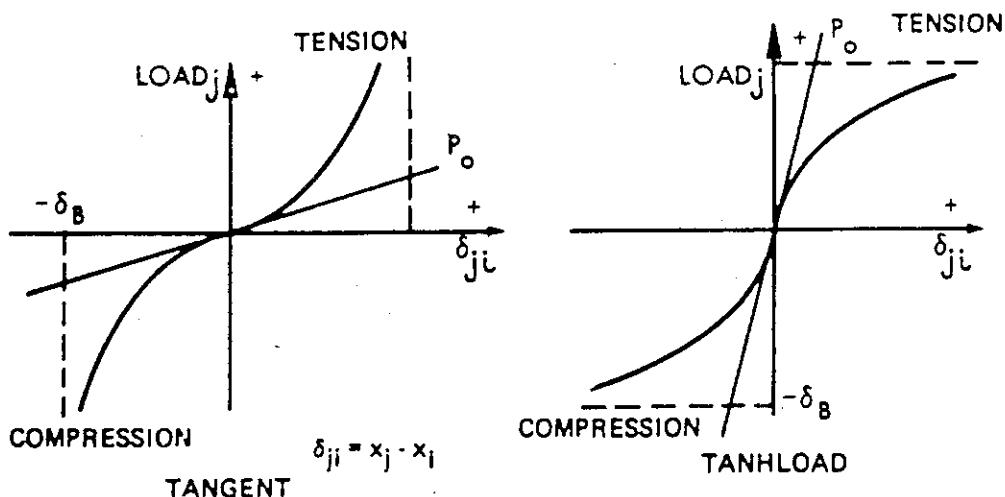
- CS(1) 第 4.2.1 図に示されたような漸近線の値 δ_B
- CS(2) 原点における曲線の勾配 P_o 。
- CS(3) 変位軸上の対称点の位値

第 4.2.11 図は次式で表わされる荷重変位曲線の図である。

$$L_j = \frac{2P_o\delta_B}{\pi} \left\{ \tan \left(\frac{\pi\delta_{ji}}{2\delta_B} \right) \right\}$$

$$L_j = \delta_B \tanh \left(\frac{P_o\delta_{ji}}{\delta_B} \right)$$

$$\delta_{ji} = y_j - y_i$$



第4.2.11図 TANGENTとTANHLOAD変位曲線の例

31. HYSTER

ある2つの質量間で履歴特性を有する荷重-変位曲線の入力定義で、この関数はいくつかの線分で表わされ、無荷重の場合はある直線とし表わされる（第4.2.12図参照）。

JDEX
KDEX } 荷重が加わる質量番号

- CS(1) 横軸座標値 X_n
- CS(2) 縦軸座標値 Y_n
- CS(3) 線分に沿った勾配あるいは荷重率の定義。（Newton/m）
- CS(4) 単位線分当たりの負荷の減少率の定義。（Newton/m）
- CS(5) オプション番号（第4.2.13図参照）

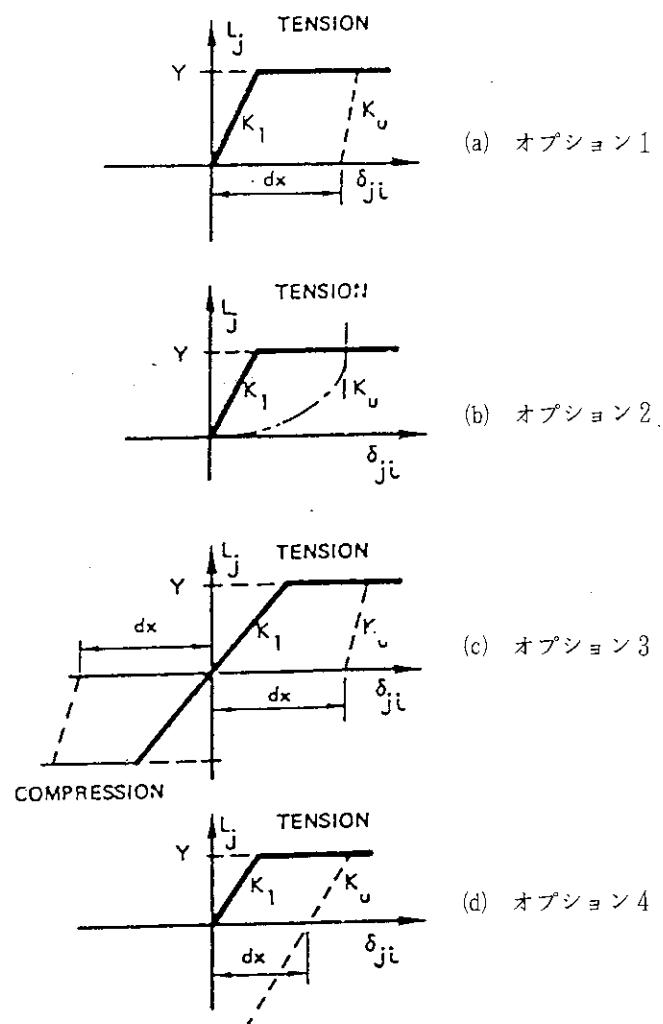
V 初期条件

- 32. YDISP 初期線形変位の定義
- 33. YVEL 初期線形速度の定義
- 34. THDISP 初期角変位の定義
- 35. THVEL 初期角度速度の定義

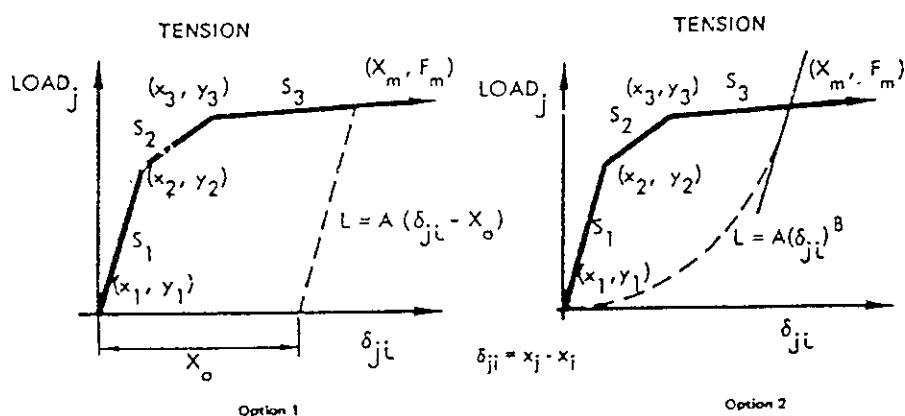
これらの入力は YVALUE と同様、プログラム内ではベクトルとして定義され、以下の入力形式となっている。

- JDEX 初期条件に関する関数が加わる質量番号
- KDEX 1; 変位に関する入力の場合
2; 速度に関する入力の場合
3; 加速度に関する入力の場合

KDEX > 0 とき、ここで関数は多直線近似関数となり CS(1)～CS(6)によって表わされる。



第4.2.12図 履歴荷重オプション



第4.2.13図 履歴オプション 1 と 2 の例

DATA VALUES

(x_1, y_1)	=	$(0.0, 0.0)$
(x_2, y_2)	=	$(0.048, 36500)$
(x_3, y_3)	=	$(0.088, 29520)$

CS(1)	時間軸上の 3 点 X_i
CS(3)	
CS(5)	
CS(2)	関数値 Y_i
CS(4)	
CS(6)	

KDEX < 0 のとき、関数は減衰正弦関数となり次式で表わされる。

$$f(t) = A e^{\alpha t} \sin(\omega t)$$

CS(1)～CS(2)不要

CS(3) 振幅 A

CS(4) 係数 α

CS(5) 係数 ω

36. FRICTION 各カップリングに加わるクーロン摩擦による角荷の定義

KDEX	負荷が加わる質量番号
JDEX	

CS(1) $r * (y_i - y_j)$ がすべり出しの摩擦力を越した後に加わる摩擦力

CS(2) 変位が小さく、弾性であるとき、あるいは荷重-変位関数が加わらないときの負荷率 (r)

CS(3) 荷重-変位関数の弾性域を越した後に加わるすべり出しの摩擦力で、クーロン摩擦力はこの摩擦力の後に加わる。

VI 特殊サブルーチン

例えば垂直方向ばねがギャップを含む場合や質量に対する強制応答などの場合のように現在の SHOCK のオプションでは解析ができない場合、それらを解析可能にするためにユーザー自身によって組まれたサブルーチンを SPCIAL という名前で加えることができる。

37. NEWLOADS サブルーチン SPCIAL の登録

38. SPECTRUM サブルーチン SCENE の登録

VII 図化出力

a) 図化出力オプション

39. PLOTALL 入力データで要求されたすべての出力の図化 (第 4.2.7 表参照)

40. PLOTFILe JDEX と KDEX で示されたファイルのみの図化。PLOT ファイルは 1 番と 2 番が RESTART と時間のファイルのため $JDEX \geq 3$ でなければならない。PLOTALL および PLOTFILe カードは、最後の入力カード FINI の後に位置し再び FINI を付けて終了とする。

41. PIOTSPEC 振動に対する 3 つの減衰値による各応答値の図化。ここで振動数の範囲は時間と図化の刻みから決定される。

入力形式は次のとおりである。

PLOTSPEC i j

i, j はプロットファイル番号

42. NOPLOT 図化出はされないが RESTART のためのプロットファイルは保存される。

b) 質量情報

43. PLOTACC 加速度－時間曲線の図化
 44. PLOTVEL 速度－時間曲線の図化
 45. PLOTDISP 変位－時間曲線の図化

c) カップリング情報

- | | |
|---------------|----------------------------------|
| 46. PLOTEX | 2つの質量間の相対変位曲線の図化 |
| 47. PLOTSHEAR | 2つの質量間の荷重曲線の図化 |
| 48. PLOTMOM | カップリングが定義されている i, j 間のモーメント曲線の図化 |
| 49. PLOTFORCE | 荷重-時間曲線の図化 |
| 50. FINI | 終了カード |

第4.2.7表 入力データ PLOT の例

0000000001111111112222222233333333344444444445555555556666666666
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789

PLOTACC	1	3
PLOTACC	7	9
PLOTVEL	1	10
PLOTOX	4	7
PLOTSHEAR	2	5
PLOTMOM	4	6
PLOTFORCE	195	200

4.3 CRUSH⁽⁶⁾

4.3.1 概 要

CRUSH は単軸変形法 (UDM: Uni-axial Displacement Method) と呼ばれ、第 4.3.1 図に示すように、緩衝材を互に干渉しない 1 次元棒の集合とみなし、1 次元棒塑性変形によって衝突エネルギーを吸収すると仮定して、変形、荷重、加速度を求めるものである。

4.3.2 計算式

(1) 一般的な取扱い

UDM の計算式について説明するに際して、一般的な考え方を、傾斜落下を例にとる。

第 4.3.1 図に示すように長さ ℓ_i の i 番目の 1 次元棒が圧縮力を受け変形した場合のひずみおよび変形抵抗力（荷重）は次式で表わすことができる。

$$\varepsilon_i(\delta) = \frac{\delta_i}{\ell_i} \quad (4.3.1)$$

$$F_i(\delta) = K_{i\sigma i}(\varepsilon_i) A_i \quad (4.3.2)$$

ここで、 δ : 変形

ε : ひずみ

ℓ : 1 次元棒の長さ

F : 荷重

K : 端面拘束係数

σ : 応力

A : 1 次元棒の断面積

である。端面拘束係数の値は以下の範囲にある。

$$0 \leq K_i \leq 1 \quad (4.3.3)$$

緩衝材の全荷重は次式となる。

$$F(\delta) = \sum_i F_i(\delta) A_i \quad (4.3.4)$$

緩衝材の吸収エネルギーは次式となる。

$$E(\delta) = \int F(\delta) d\delta \quad (4.3.5)$$

一方、重量 W の輸送容器が高さ H から落下した場合の衝突エネルギーは次式で表わすことができる。

$$E(\delta) = \gamma W H \quad (4.3.6)$$

ここで、 γ : 落下エネルギーに対する 1 次衝突によって消費されるエネルギーの割合である。輸送容器に加わる加速度は次式で求めることができる。

$$\alpha = \frac{F(\delta)}{W/g} \quad (4.3.7)$$

ここで、 α : 加速度
 g : 重力の加速度
 である。

このようにして、変形量、荷重、加速度を求めることができる。以下に種々の落下姿勢に対する、変形量と荷重の関係について記述する。

(2) 垂直落下

(i) 荷重

第4.3.2図は典型的な緩衝体付き輸送容器2種類の概略形状を示したものである。変形と荷重は図に示すI型をもとに記述するが、II型についてはI型との相違についてのみ記述する。

第4.3.3図に示す緩衝材の形状寸法および材料区分を考える。垂直方向落下衝突によって緩衝材が中心軸Z方向に δ だけ変形した場合の荷重を求める。

(a) 領域O~R₁の荷重

$$\left. \begin{array}{l} F_1 = K_1 \sigma_D (\varepsilon_D) \pi R_1^2 \\ \varepsilon_D = \delta / \ell_2, \ell_2 = Z_2 \end{array} \right\} \quad (4.3.8)$$

ここで、 F_1 : 領域O~R₁の荷重
 K_1 : 端末拘束係数
 ε_D : 緩衝材材料Dのひずみ
 σ_D : 緩衝材材料Dのひずみに依存する動的変形応力
 R_1 : 緩衝材材料Dの半径
 ℓ_2 : 1次元棒の長さ
 Z_2 : ℓ_2 のZ軸座標値

である。

(b) 領域R₁~R₂の荷重

領域R₁~R₂の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} F_2 = K_2 \sigma_A (\varepsilon_A) \pi (R_2^2 - R_1^2) \\ \varepsilon_A = \delta / \ell_2, \ell_2 = Z_2 \end{array} \right\} \quad (4.3.9)$$

ここで、 F_2 : 領域R₁~R₂の荷重
 K_2 : 端面拘束係数
 ε_A : 緩衝材材料Aのひずみ
 σ_A : 緩衝材材料Aのひずみに依存する動的変形応力
 R_2 : 緩衝材材料Aの外半径

である。

(c) 領域R₂~R₃の荷重

領域 $R_2 \sim R_3$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} F_3 = K_3 \sigma_B (\varepsilon_B) \pi (R_3^2 - R_2^2) \\ \varepsilon_B = \delta / \ell_2, \ell_2 = Z_2 \end{array} \right\} \quad (4.3.10)$$

ここで、
 F_3 : 領域 $R_2 \sim R_3$ の荷重
 K_3 : 端末拘束係数
 ε_B : 緩衝材材料 B のひずみ
 σ_B : 緩衝材材料 B のひずみに依存する動的変形応力
 R_3 : 輸送容器本体の外半径

である。

(d) 領域 $R_3 \sim R_4$ の荷重

領域 $R_3 \sim R_4$ において、緩衝材材料 B の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} F_{4B} = K_4 \sigma_B (\varepsilon_B) \pi (R_4^2 - R_3^2) \\ \varepsilon_B = \delta_B / \ell_3, \ell_3 = Z_3 \end{array} \right\} \quad (4.3.11)$$

ここで、
 F_{4B} : 領域 $R_3 \sim R_4$ の緩衝材材料 B の荷重
 K_4 : 端面拘束係数
 ε_B : 緩衝材材料 B のひずみ
 σ_B : 緩衝材材料 B のひずみに依存する動的変形応力
 R_4 : 緩衝材材料 B の端面拘束係数 K_4 に関する外半径
 δ_B : 緩衝材材料 B の変形肩
 ℓ_4 : 1 次元棒の長さ
 Z_3 : ℓ_3 の座標値

である。一方、緩衝材材料 C の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} F_{4C} = K_4 \sigma_C (\varepsilon_C) \pi (R_4^2 - R_3^2) \\ \delta_C = \delta_C / \ell_4, \ell_4 = Z_4 - Z_3 \end{array} \right\} \quad (4.3.12)$$

ここで、
 F_{4C} : 領域 $R_3 \sim R_4$ の緩衝材材料 C の荷重
 ε_C : 緩衝材材料 C のひずみ
 σ_C : 緩衝材材料 C のひずみに依存する動的変形応力
 ℓ_4 : 1 次元棒の長さ
 Z_4 : 緩衝材の高さ

である。領域 $R_3 \sim R_4$ の荷重は (4.3.11) および (4.3.12) 式に等しいので次式が成立する。

$$F_4 = F_{4B} = F_{4C} \quad (4.3.13)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_B(\varepsilon_B) = \sigma_C(\varepsilon_C) \\ \text{または} \\ \sigma_B(\delta_B/\ell_3) = \sigma_C(\delta_C/\ell_4) \end{array} \right\} \quad (4.3.14)$$

$$\delta = \delta_B + \delta_C \quad (4.3.15)$$

ここで、 F_4 ：領域 $R_3 \sim R_4$ の荷重
である。

(e) 領域 $R_4 \sim R_5$ の荷重

領域 $R_4 \sim R_5$ の荷重は、領域 $R_3 \sim R_4$ の荷重を求める式と同様にして次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} F_{5B} = K_5 \sigma_B(\varepsilon_B) \pi (R_5^2 - R_4^2) \\ \varepsilon_B = \delta_B / \ell_3, \ell_3 = Z_3 \end{array} \right\} \quad (4.3.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} F_{5C} = K_5 \sigma_C(\varepsilon_C) \pi (R_5^2 - R_4^2) \\ \varepsilon_C = \delta_C / \ell_4, \ell_4 = Z_4 - Z_3 \end{array} \right\} \quad (4.3.17)$$

$$F_5 = F_{5B} = F_{5C}$$

ここで、 F_{5B} ：領域 $R_4 \sim R_5$ の緩衝材材料 B の荷重
 F_{5C} ：領域 $R_4 \sim R_5$ の緩衝材材料 C の荷重
 F_5 ：領域 $R_4 \sim R_5$ の荷重
 K_5 ：端面拘束係数
 R_5 ：緩衝材の外半径

である。この領域でも (4.3.14) および (4.3.15) 式は成立する。

(f) 垂直落下の荷重

第 4.3.3 図で示した各領域の荷重が求められたので、第 4.3.2 図で示した緩衝体 I 型の垂直落下衝突の場合の荷重は次式となる。

$$F_V = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (4.3.19)$$

ここで、 F_V ：垂直落下衝突の荷重
 である。一方、緩衝体 II 型の全荷重は、領域 $O \sim R_1$ の緩衝材材料 D が存在しないので次式となる。

$$F_V = F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (4.3.20)$$

(ii) 加速度

加速度は (4.3.7) 式によって求めることができる。

(3) 水平落下

(i) 荷重

(a) 一般的な取扱い

第4.3.4および4.3.5図に示す典型的な輸送緩衝体を例にとり、水平落下によって生じる緩衝体の変形、荷重、加速度について記述する。第4.3.5図の緩衝材の材料領域区分と衝突エネルギー吸収を計算するに必要な1次元棒の長さに関連する寸法を、断面A-AおよびB-Bとして第4.3.6図に示す。この図には、緩衝体I型およびII型の相違、すなわち、緩衝材材料Dの有無による差も合せて示している。

水平落下衝突では、第4.3.7図に示すように、緩衝材の中心からの距離Xにおける接地面と緩衝材円筒外面との距離hが、緩衝材の変形量δよりも小さい場合のみ荷重となる。緩衝材の領域の微小幅の荷重は(4.3.2)式から次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_i &= K_i \sigma_i (\varepsilon_i) \Delta X (Z_i - Z_{i-1}) \\ \varepsilon_i &= \delta_i / \ell_i \end{aligned} \right\} \quad (4.3.21)$$

ここで、 ΔF_i ：緩小幅 ΔX の荷重

ΔX ：緩衝材の微小幅

$Z_i - Z_{i-1}$ ：緩衝材の領域

である。領域全体の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_i &= 2 \int_0^R dF_i dX \\ F_i &= 2(Z_i - Z_{i-1}) K_i \int_0^R \sigma_i(\varepsilon_i) dX \end{aligned} \right\} \quad (4.3.22)$$

ここで、R：緩衝材の外半径

である。

(b) 領域O~R₁の荷重

領域O~R₁において区間O~R₁の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_{11D} &= 2Z_1 K_1 \int_0^{R_1} \sigma_D(\varepsilon_D) dX, (\text{緩衝材材料D}) \\ F_{11A} &= 2Z_1 K_1 \int_0^{R_1} \sigma_A(\varepsilon_A) dX, (\text{緩衝材材料A}) \\ F_{11B} &= 2Z_1 K_1 \int_0^{R_1} \sigma_B(\varepsilon_B) dX, (\text{緩衝材材料B}) \end{aligned} \right\} \quad (4.3.23)$$

ここで、 F_{11A} ：緩衝材材料Aの荷重

F_{11B} ：緩衝材材料Bの荷重

F_{11D} ：緩衝材材料Cの荷重

であり、また

$$\varepsilon_D = \delta_D / \ell_1, \varepsilon_A = \delta_A / \ell_2, \varepsilon_B = \delta_B / \ell_5 \quad (4.3.24)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ell_1 = 2\sqrt{R_1^2 - X^2} \\ \ell_2 = 2(\sqrt{R_2^2 - X^2} - \sqrt{R_1^2 - X^2}) \\ \ell_3 = 2(\sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2}) \end{array} \right\} \quad (4.3.25)$$

である。(4.3.23) 式は次の条件を満さなければならない。

$$\left. \begin{array}{l} F_{11} = F_{11D} = F_{11A} = F_{11B} \\ \delta = \delta_D + \delta_A + \delta_B \\ \sigma_D(\varepsilon_D) = \sigma_A(\varepsilon_A) = \sigma_B(\varepsilon_B) \end{array} \right\} \quad (4.3.26)$$

ここで, F_{11} : 領域 $O \sim Z_1$ において区間 $O \sim R_1$ の荷重

である。

上述のものは緩衝体 I 型の荷重に関する式である。緩衝体 II 型については、緩衝材材料 D が存在しないので、(4.3.23) から (4.3.26) 式のうち次のものを変更すればよい。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_D = \varepsilon_D = \delta_D = 0 \\ \ell_2 = \sqrt{R_2^2 - X^2} - \sqrt{R_1^2 - X^2} \\ \ell_5 = \sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2} \end{array} \right\} \quad (4.3.27)$$

領域 $O \sim Z_1$ において区間 $R_1 \sim R_2$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} F_{12A} = 2Z_1 K_1 \int_{R_1}^{R_2} \sigma_1(\varepsilon_1) dX, \text{ 緩衝材材料 A)} \\ F_{12B} = 2Z_1 K_1 \int_{R_1}^{R_2} \sigma_B(\varepsilon_B) dX, \text{ (緩衝材材料 B)} \end{array} \right\} \quad (4.3.28)$$

ここで, F_{12A} : 緩衝材材料 A の荷重

F_{12B} : 緩衝材材料 B の荷重

である。また

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_A = \delta_A / \ell_2, \varepsilon_B = \delta_B / \ell_5 \\ \ell_2 = 2\sqrt{R_2^2 - X^2} \\ \ell_5 = 2(\sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2}) \end{array} \right\} \quad (4.3.29)$$

である。(4.3.28) 式は次の条件を満さなければならない。

$$\left. \begin{array}{l} F_{12} = F_{12A} = F_{12B} \\ \delta = \delta_A + \delta_B \\ \sigma_A(\varepsilon_A) = \sigma_B(\varepsilon_B) \end{array} \right\} \quad (4.3.30)$$

ここで, F_{12} : 領域 $O \sim Z_1$ において区間 $R_1 \sim R_2$ の荷重

である。

領域 $O \sim Z_1$ において区間 $R_2 \sim R_3$ の荷重は次式となる。

$$F_{15} = 2Z_1 K_1 \int_{R_2}^{R_5} \sigma_B(\varepsilon_B) dX \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \varepsilon_B = \delta / \ell_5 \\ \ell_5 = 2\sqrt{R_5^2 - X^2} \end{array} \right\} \quad (4.3.31)$$

であり、また

F_{15} : 領域 $O \sim Z_1$ において区間 $R_2 \sim R_3$ の荷重
である。領域 $O \sim Z_1$ の荷重は次式となる。

$$F_1 = F_{11} + F_{12} + F_{15} \quad (4.3.32)$$

ここで、 F_1 : 領域 $O \sim Z_1$ の荷重
である。

(c) 領域 $Z_1 \sim Z_2$ の荷重

領域 $Z_1 \sim Z_2$ における荷重は上述(b)の領域 $O \sim Z_1$ における計算式 (4.3.23) ~ (4.3.32) 式において、 Z_1 を $Z_2 \sim Z_1$ 、 K_1 を K_2 に変更すれば得られる。

(d) 領域 $Z_2 \sim Z_3$ の荷重

領域 $Z_2 \sim Z_3$ において区間 $O \sim R_3$ の荷重は次式となる。

$$F_{33} = 2(Z_3 - Z_2) K_3 \int_O^{R_3} \sigma_B(\varepsilon_B) dX \quad (4.3.33)$$

ここで、

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_B = \delta / \ell_5 \\ \ell_5 = \sqrt{R_3^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2} \end{array} \right\} \quad (4.3.34)$$

であり、また、

F_{34} : 領域 $Z_2 \sim Z_3$ において区間 $O \sim R_3$ の荷重
である。

領域 $Z_2 \sim Z_3$ において区間 $R_3 \sim R_5$ の荷重は次式となる。

$$F_{35} = 2(Z_3 - Z_2) K_3 \int_{R_3}^{R_5} \sigma_B(\varepsilon_B) dX \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \varepsilon_B = \delta / \ell_5 \\ \ell_5 = 2\sqrt{R_5^2 - X^2} \end{array} \right\} \quad (4.3.35)$$

であり、また、

F_{35} : 領域 $Z_2 \sim Z_3$ において区間 $R_3 \sim R_5$ の荷重
である。領域 $Z_2 \sim Z_3$ の荷重は次式となる。

$$F_3 = F_{33} + F_{35} \quad (4.3.36)$$

ここで、 F_3 ：領域 $Z_2 \sim Z_3$ の荷重
である。

(e) 領域 $Z_3 \sim Z_4$

領域 $Z_3 \sim Z_4$ における荷重は上述(d)の領域 $Z_2 \sim Z_B$ における計算式 (4.3.33) ~ (4.3.36) 式において、 $Z_X - Z_2$ を $Z_4 - Z_3$ 、 K_3 を K_4 に変更すれば得られる。

(f) 水平落下の荷重

第 4.3.5 図で示した各領域の荷重が求められたので、水平落下衝突の場合の荷重は次式となる。

$$F_H = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (4.3.37)$$

ここで、 F_H ：水平落下衝突の荷重
 F_2 ：領域 $Z_1 \sim Z_2$ の荷重
 F_4 ：領域 $Z_3 \sim Z_4$ の荷重

である。

(ii) 加速度

加速度は (4.3.7) 式によって求めることができる。

(4) 傾斜落下

(i) 荷重

(a) 一般的な取扱い

第 4.3.8 および 4.3.9 図に示す典型的な輸送容器緩衝体を例にとり、傾斜落下によって生じる緩衝材の変形荷重、加速度について記述する。緩衝材の材料は単純化して同一材料とする。緩衝材の変形量を求めるに際して、緩衝材を厚さ ΔS で切り出し、第 4.3.10 図に示す馬てい型のスライド注を、さらに幅 ΔX で切り出した 1 次元棒の集まりとして取扱う。

水平落下衝突の場合に記述したと同様に、傾斜落下衝突においても、第 4.3.11 図に示すように緩衝材の中心からの距離 X における接地面と緩衝材外線との距離 $h + h_0$ が緩衝材の変形量 δ よりも小さい場合のみ荷重を生じる。緩衝材のスライド片の幅 ΔS 、 X 方向の微小幅 ΔX 、長さ ℓ_i の 1 次元棒に生じる荷重は (4.3.2) 式から次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_i &= K_i \sigma_i(\varepsilon_i) \Delta X \cdot \Delta S \\ \varepsilon_i &= \delta_i / \ell_i \end{aligned} \right\} \quad (4.3.38)$$

ここで、 ΔF_i ： $\Delta S \cdot \Delta X$ の断面の 1 次元棒に生じる荷重

ΔS ：馬てい型のスライス片の幅

ΔX ： X 方向の幅

である。スライス片全体の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_i &= 2 \int_0^{X_m} dF_i dX \\ F_i &= 2ASK_i \int_0^{X_m} \sigma_i(\epsilon_i) dX \end{aligned} \right\} \quad (4.3.39)$$

(b) 断面形状

幅 ΔS スライスされた梢円断面は第 4.3.12 図に示すように、寸法 h_0 , h_1 , ℓ_1 , ℓ_2 および R_5 によって形状が決る。

ここで, h_0 : 衝突面と緩衝材底面の距離

h_1 : 緩衝材上面と輸送容器中心軸との距離

ℓ_1 : 緩衝材底面と輸送容器中心軸との距離

ℓ_2 : 輸送容器中心軸と緩衝材上面との距離

R_5 : 輸送容器の外半径

である。

スライス断面が輸送容器と交叉するか否かによって、断面形状が異なるので、交叉の有無による識別符号 K_h を導入し

$K_h = 0$: 交叉無し

$K_h = 1$: 交叉有り

とする。このように整理すると、第 4.3.12 図の断面 A-A および B-B、さらには $K_h = 1$ の断面形状として、第 4.3.13 図に示すように 3 種類の断面形状に分類することができる。これらの断面形状、寸法および衝突による変形量が求まれば、荷重は計算することができる。

(c) 局所座標系

計算を容易にするために、第 4.3.14 図に示すような局所座標系 S-T を導入する。図に示した主要な位置の座標値 (S, T) は S-T 座標系で次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l}
 P_1 = (-R_5 \cos \theta, R_5 \sin \theta) \\
 P_2 = (-R_1 \cos \theta, R_1 \sin \theta) \\
 P_3 = (R_1 \cos \theta, -R_1 \sin \theta) \\
 P_4 = (R_5 \cos \theta, -R_5 \sin \theta) \\
 P_5 = (-R_3 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, R_3 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\
 P_6 = (-R_1 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, R_1 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\
 P_7 = (R_1 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, -R_1 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\
 P_8 = (R_3 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, -R_3 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\
 P_9 = (-R_5 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, R_5 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\
 P_{10} = (-R_3 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, R_3 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\
 P_{11} = (R_3 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, -R_3 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\
 P_{12} = (R_5 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, -R_5 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\
 Q_0 = (Z_2 \sin \theta, Z_2 \cos \theta) \\
 Q_2 = (-R_1 \cos \theta + Z_1 \sin \theta, R_1 \sin \theta + Z_1 \cos \theta) \\
 Q_3 = (R_1 \cos \theta + Z_1 \sin \theta, -R_1 \sin \theta + Z_1 \cos \theta) \\
 Q_4 = (R_4 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, -R_4 \sin \theta + Z_4 \cos \theta)
 \end{array} \right\} \quad (4.3.40)$$

代表的な座標値が求められたので、これらを用いてスライス断面の形状寸法を求める。

(d) $K_h = 0$ で ℓ_2 が与えられる場合 ($P_5 > S \geq 0$)

h_0, h_1, ℓ_2 は第 4.3.15 図に示すようになる。これらの値は第 4.3.14 図に示した代表的な点の区間に従って緩衝体 I 型について次式となる。

$$\left. \begin{array}{l}
 h_0 = R_5 \sin \theta - \tan \theta, (\text{区間 } P_1 \sim P_2 \sim P_3 \sim P_4) \\
 h_0 = (S - R_5 \cos \theta) \cot \theta, (\text{区間 } P_4 \sim P_{12})
 \end{array} \right\} \quad (4.3.41)$$

$$h_1 = \frac{S}{\sin \theta \cos \theta} \quad (4.3.42)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \ell_2 = \frac{R_5}{\sin \theta}, (\text{区間 } P_1 \sim P_9) \\
 \ell_2 = \frac{Z_4 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_9 \sim P_{10})
 \end{array} \right\} \quad (4.3.43)$$

一方、緩衝体 II 型については、(4.3.41) および (4.3.42) 式はそれぞれ (4.3.44) および (4.3.45) 式となる。

$$\left. \begin{array}{l}
 h_0 = R_5 \sin \theta - \tan, (\text{区間 } P_1 \sim P_2, P_3 \sim P_4) \\
 h_0 = (S - R_5 \cos \theta) \cot \theta, (\text{区間 } P_4 \sim P_{12}) \\
 h_0 = (S + R_1 \cos \theta) + (R_1 + R_5) \sin \theta, (\text{区間 } P_2 \sim Q_2 \sim P_6) \\
 h_0 = \infty, (\text{区間 } P_6 \sim Q_0 \sim P_7)
 \end{array} \right\} \quad (4.3.44)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_1 \sim P_2) \\ h_1 = \frac{R_1}{\sin \theta}, (\text{区間 } P_2 \sim P_6) \end{array} \right\} \quad (4.3.45)$$

$$K_h = 0 \quad (4.3.46)$$

(e) $K_h = 0$ で ℓ_1 と ℓ_2 が与えられる場合 ($P_5 > S > 0$)

h_0, ℓ_1, ℓ_2 は第 4.3.15 (b) で示したようになる。 h_0 は (4.3.4) 式と同一であり, $h_1 = 0$ である。

$$\left. \begin{array}{l} \ell_1 = \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_2 \sim P_4 \sim P_{12}, S \leq P_4) \\ \ell_1 = \frac{R_5}{\sin \theta}, (\text{区間 } P_2 \sim P_4 \sim P_{12}, S > P_4) \end{array} \right\} \quad (4.3.47)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ell_2 = \frac{R_5}{\sin \theta}, (\text{区間 } P_1 \sim P_9) \\ \ell_2 = \frac{Z_2 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_9 \sim P_{10}) \end{array} \right\} \quad (4.3.48)$$

$$K_h = 0 \quad (4.3.49)$$

(f) $K_h = 0$ で ℓ_2 が与えられる場合 ($P_5 > S > 0$)

h_0, h_1, ℓ_1 は第 4.3.15 (a) 図に示したようになる。計算式は上記(d)の場合と同じであり, h_0 は (4.3.41) 式, h_1 は (4.3.44) 式, ℓ_2 は (4.3.45) 式, K_h は (4.3.46) 式と同一となる。

(g) $K_h = 1$ で ℓ_2 が与えられる場合 ($P_5 > S > 0$)

h_0, h_1, ℓ_1, ℓ_2 は第 4.3.16 (d) や (f) 図で示すようになる。 h_0 は (4.3.41) 式と同一である。

$$\ell_2 = \frac{Z_2 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0) \quad (4.3.50)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = -\frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S \leq 0) \\ \ell_1 = 0, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S \leq 0) \end{array} \right\} \quad (4.3.51)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 0, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, P_4 \geq S \geq 0) \\ \ell_1 = \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, P_4 \geq S \geq 0) \end{array} \right\} \quad (4.3.52)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 0, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S > P_4) \\ \ell_1 = \frac{R_5}{\sin \theta}, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S > P_4) \end{array} \right\} \quad (4.3.53)$$

$$K_h = 0 \quad (4.3.54)$$

一方、緩衝体Ⅱ型については (4.3.51) ~ (4.3.53) 式は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{R}{\sin\theta}, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S \leq P_6) \\ \ell_1 = 0, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S \leq P_6) \end{array} \right\} \quad (4.3.55)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{Z_2 \sin\theta - S}{\sin\theta \cos\theta}, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S > P_6) \\ \ell_1 = 0, (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, S > P_6) \end{array} \right\} \quad (4.3.56)$$

(h) $K_h = 1$ で ℓ_1 が与えられる場合 ($P_1 \geq S \geq Q_0$)

h_0, h_1, ℓ_1 は第 4.3.16 (e) 図に示すようになる。 h_0 は (4.3.41) 式と同一であり、 $\ell_2 = 0$ である。

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{S - Z_2 \sin\theta}{\sin\theta \cos\theta}, (\text{区間 } Q_0 \sim P_8) \\ h_1 = \frac{R_3}{\sin\theta}, (\text{区間 } P_8 \sim P_1) \end{array} \right\} \quad (4.3.57)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ell_1 = \frac{S}{\sin\theta \cos\theta}, (\text{区間 } Q_0 \sim P_8 \sim P_1, S < P_4) \\ \ell_1 = \frac{R_5}{\sin\theta}, (\text{区間 } Q_0 \sim P_8 \sim P_1, S \geq P_4) \end{array} \right\} \quad (4.3.58)$$

$$K_h = 1 \quad (4.3.59)$$

(i) $K_h = 0$ で ℓ_1 が与えられる場合 ($S > P_{11}$)

h_0, h_1, ℓ_1 は第 4.3.15 (c) 図に示したようになる。 h_0 は (4.3.41) 式と同一であり、 $\ell_2 = 0$ である。

$$h_1 = \frac{S - Z_4 \sin\theta}{\sin\theta \cos\theta}, (\text{区間 } P_{11} \sim P_{12}) \quad (4.3.60)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ell_1 = \frac{S}{\sin\theta \cos\theta}, (\text{区間 } P_{11} \sim P_{12}, S < P_4) \\ \ell_1 = \frac{R_5}{\sin\theta}, (\text{区間 } P_{11} \sim P_{12}, S \geq P_4) \end{array} \right\} \quad (4.3.61)$$

$$K_h = 0 \quad (4.3.62)$$

(j) 楕円の計算式

スライス断面は第 4.3.17 図に示すような楕円形状であり、緩衝材外半径 R_5 と傾斜角度 θ から楕円の形状を求める式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} & \frac{X^2}{R_s^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1 \\ & b = \frac{R_s}{\sin\theta} \end{aligned} \right\} \quad (4.3.63)$$

(4.3.63) 式から $Y=h$ における X の値 X_M および Y の値は次式によって得られる。

$$\left. \begin{aligned} & X_M = \sqrt{b^2 - h^2} \sin\theta \\ & Y = \frac{\sqrt{R_s^2 - X^2}}{\sin\theta} \end{aligned} \right\} \quad (4.3.64)$$

(k) 傾斜落下の荷重

上記(c)から(j)までの計算式によって、各スライス断面の微小幅 ΔS と ΔX からなる1次元棒の変形前の長さ ℓ_i および衝突による変形量 δ_i を計算することができる。これから(4.3.38)式を用いて1次元棒の荷重 ΔF_i を求め、さらに(4.3.39)式に示すように、スライス断面 ΔS 全体の荷重 F_i が求まる。さらに、緩衝材の変形部の全スライス断面にわたって荷重 F_i を積分して、緩衝全体の荷重を求めることができる。

(ii) 加速度

加速度は(4.3.7)式によって求めることができる。

(5) 材料データの取扱い

緩衝材材料の1つであるウレタンホームのように、材料特性が荷重方向によって大きな差を生じない、均質材料として取扱ってよいものがある。一方、緩衝材材料として代表的な材料である木材は、直交異方性材料であり、その応力-ひずみ特性は、木目の方向とその直角方向で大きく異なる。

輸送容器の中心軸に平行あるいは直角方向に、緩衝材の木材は木目方向あるいは木目と直角方向を適切に組合して配列する。よって、垂直あるいは水平落下解析では、木目方向あるいは木目と直角方向の応力-ひずみ特性を、緩衝材の各部の木材の配列に合せて使用できる。しかしながら、傾斜落下解析では、落下方向と木材の方向性が複雑となり、木材の応力-ひずみ特性は、木材の方向性を無視して均質材料として取扱わざるを得ない、この場合でも、緩衝材木材の主要な方向性と落下角度から、均質と考慮した木材の応力-ひずみ特性を仮定しなければならない。この問題に関してあるひずみ量に対して、木目方向および木目と直角方向のそれぞれの荷重時の応力 σ_A および σ_B の場合、木目方向とある角度 θ における応力 σ_X を実験結果に基づき次式で近似できる。

$$\sigma_X = \sigma_A (\cos\theta)^2 + \sigma_B (\sin\theta)^2 \quad (4.3.65)$$

(6) 端末拘束係数

2.3.2節から2.3.4節までにおいて記述した端末拘束係数 K は、緩衝材のオーバーパック剛性および容器本体への取付条件によって変化するものと考える。剛な容器本体によって緩衝材の変形が拘束されている場合には $K=1$ でよい。一方、オーバーパックの変形に従って緩衝材の変形が決まる場合には、オーバーパックの変形状態に応じて K の値を0から1まで変える必

要があり、この値はこれまでの実験結果を参考に決めることができる。

(7) 緩衝材オーバーパックの取扱い

一般に緩衝材は軟鋼、ステンレス鋼などによって覆われている（オーバーパック）。このオーバーパックの取扱いについて、簡易解析では次の4つの方法が考えられる。

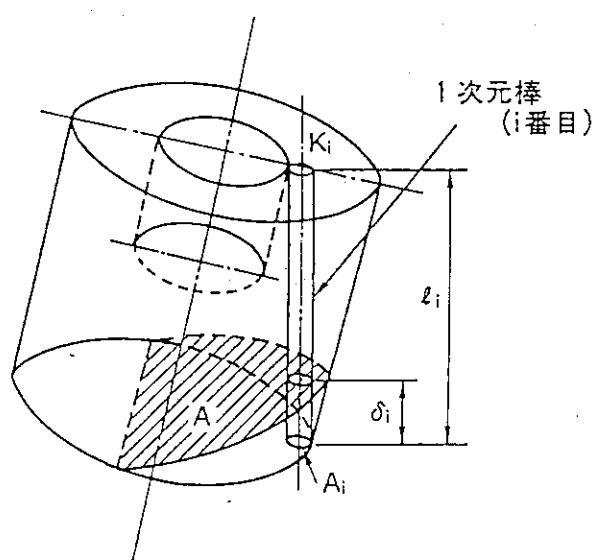
第1の方法は、すでに述べたような緩衝材と同様にして、変形抵抗力を求めるものである。

第2の方法は、オーバーパックの変形抵抗力をVDMによって求め、さらにUDMによって求めた緩衝材の変形抵抗力と加え合せるものである。

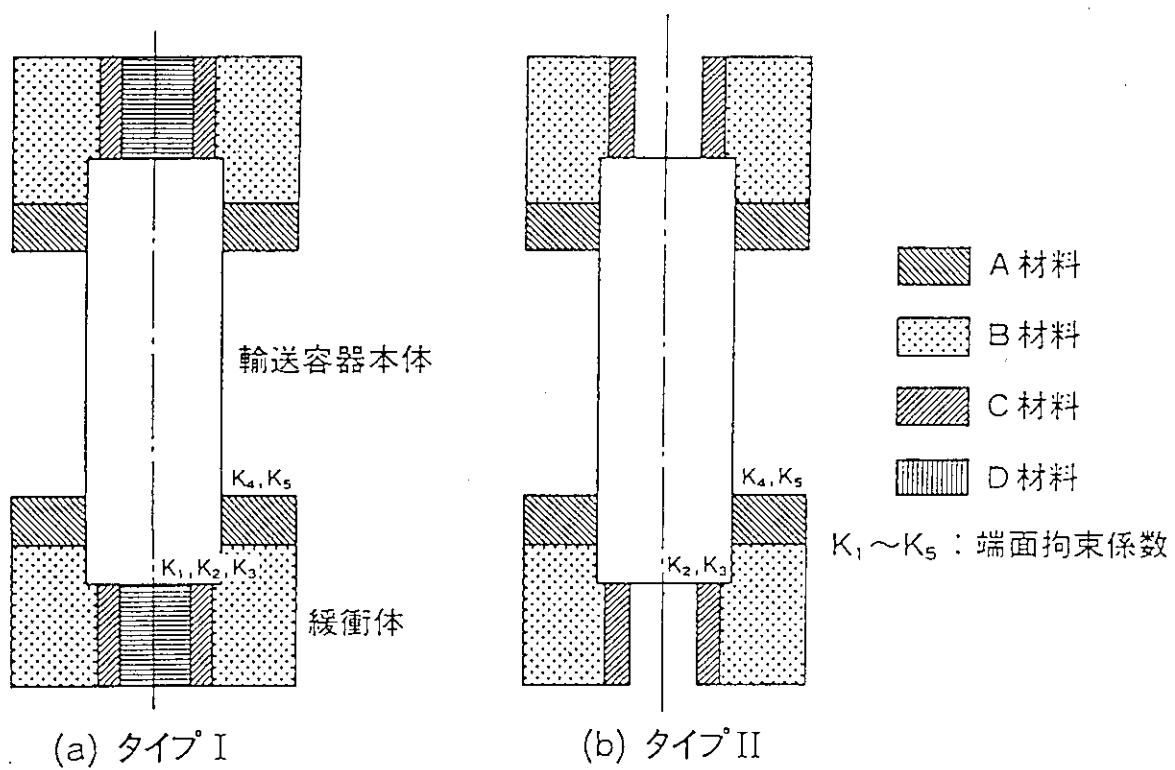
第3の方法は、オーバーパックの効果を実験結果をもとに安全側に評価するものである。オーバーパックを考慮しない場合、変形量は大きく、変形抵抗力は小さくなり、変形量は安全側の評価となる。一方、過小評価となる変形抵抗力とこれから得られる最大加速度については、多くの実験結果から決めた安全倍率を掛けて安全側の評価とする方法が考えられている。

第4の方法は、オーバーパックの剛性を緩衝材の剛性に含めるものであり、緩衝材の剛性を高めに決める。

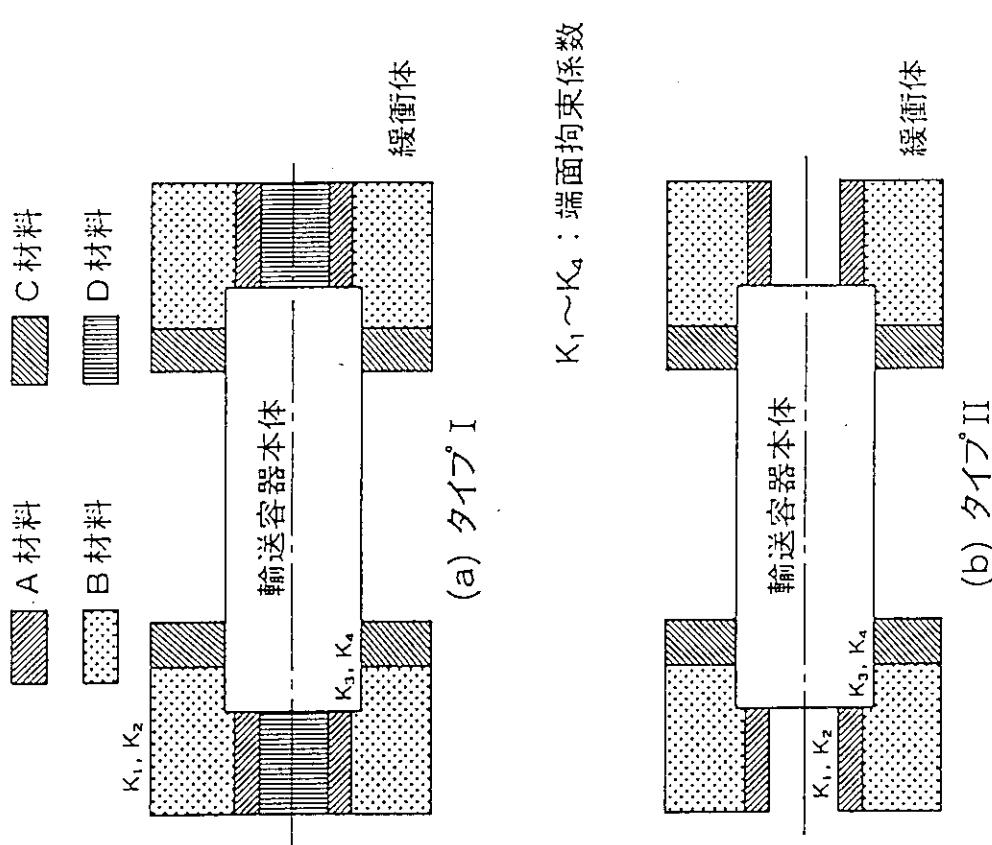
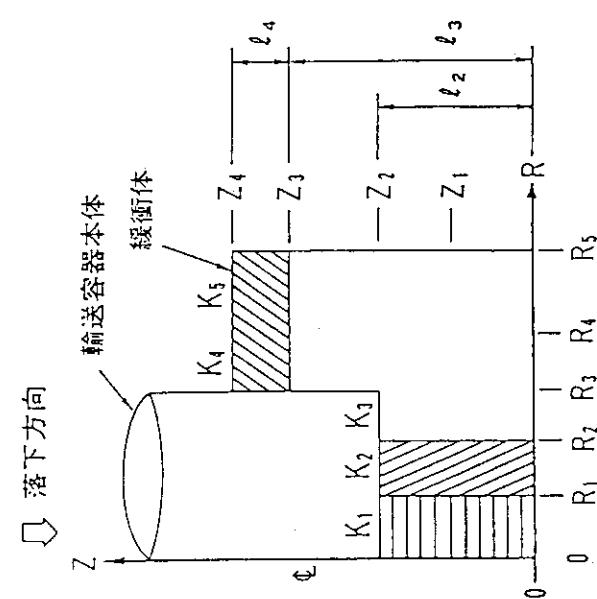
CRUSHはオーバーパックは考慮されていないが、CRUSH 2では考慮されている。



第4.3.1図 UDMによる衝突計算法

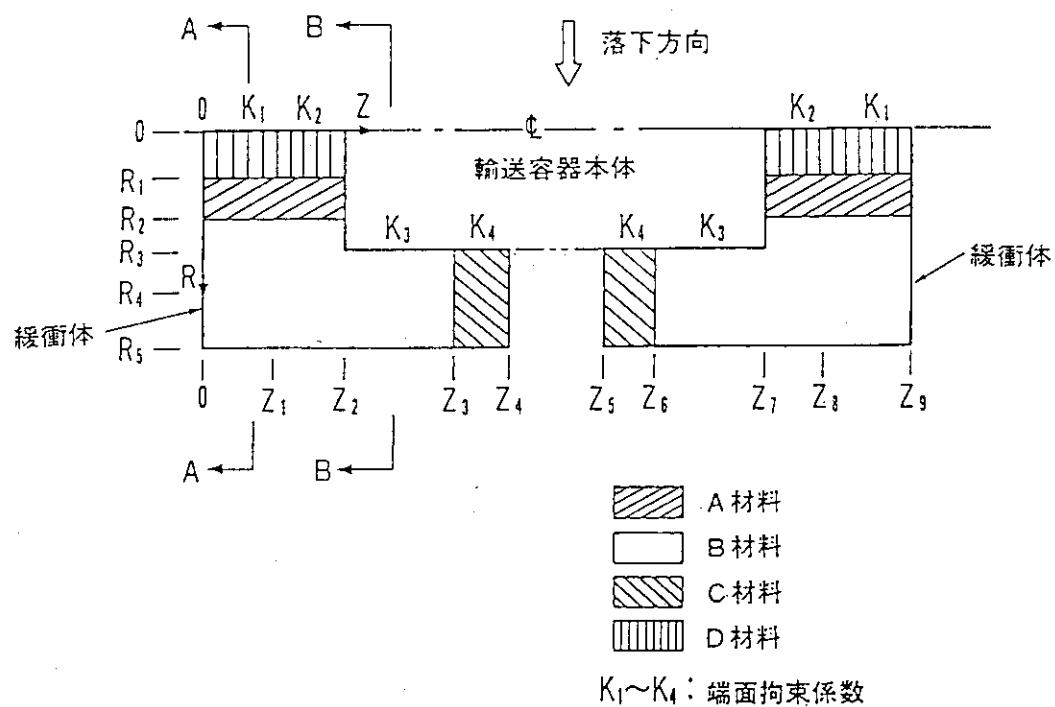


第4.3.2図 垂直落下モデル

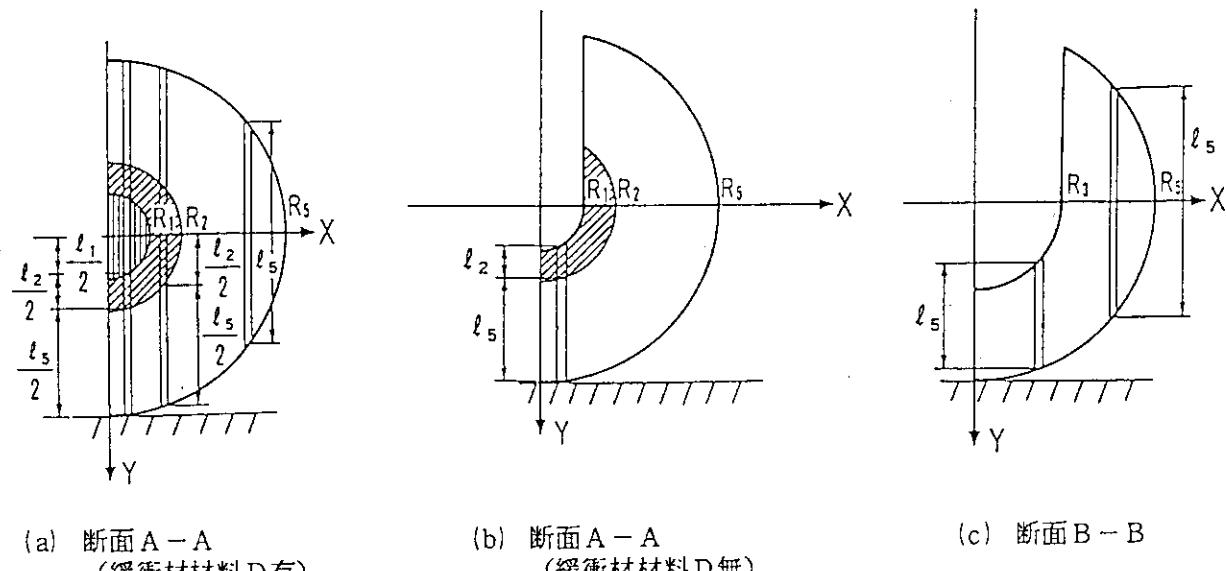


第4.3.3図 垂直落下の場合の形状寸法、材料区分および
境界条件定数

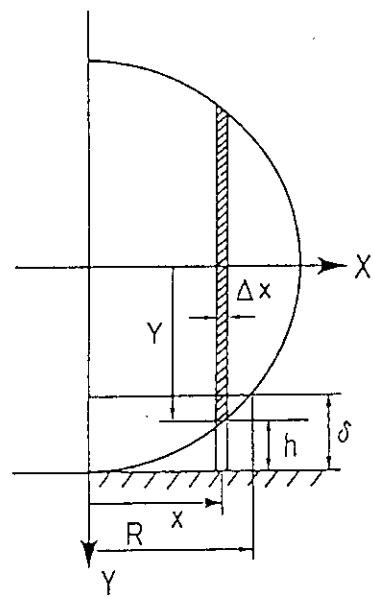
第4.3.4図 水平落下モデル



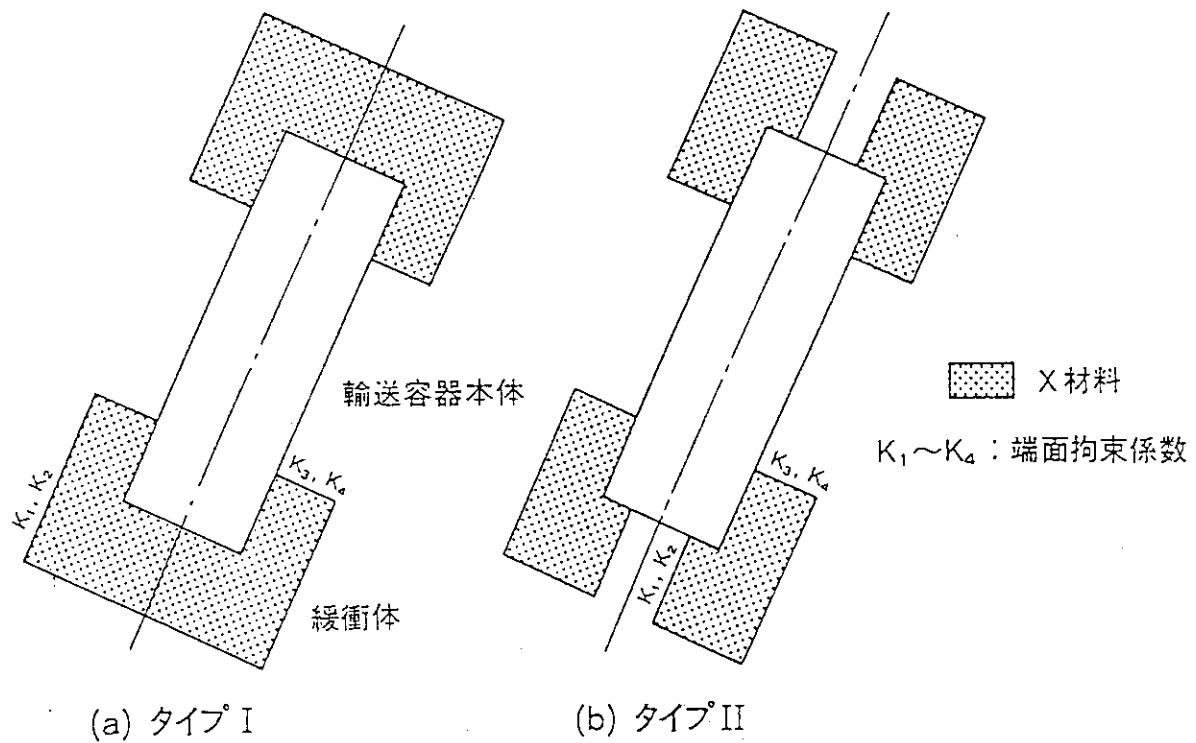
第4.3.5図 水平落下の場合の形状寸法、材料区分および境界条件定数



第4.3.6図 水平落下の場合の緩衝材の断面形状(I)



第4.3.7図 水平落下の場合の緩衝材の断面形状(II)

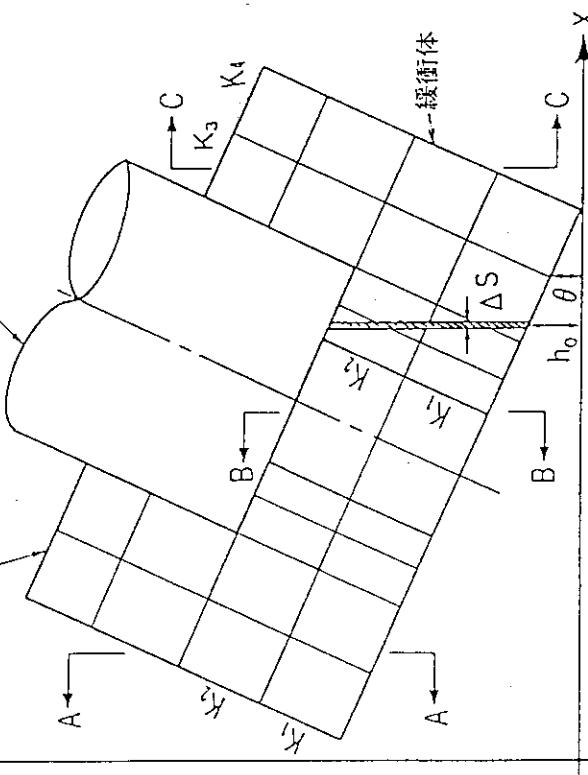


第4.3.8図 傾斜落下モデル



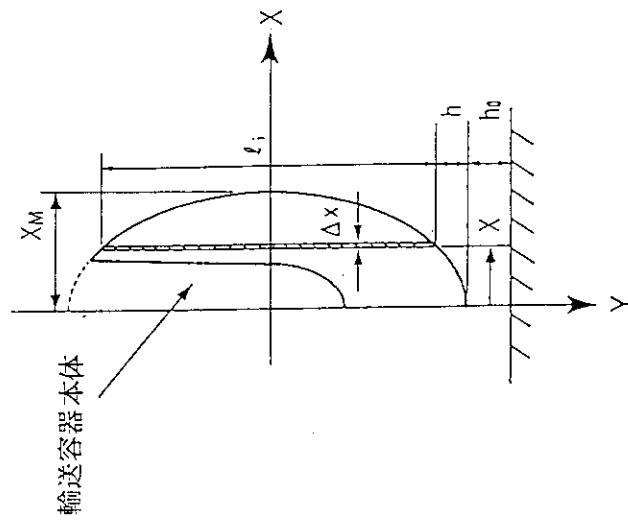
落下方向
↓

輸送容器本体



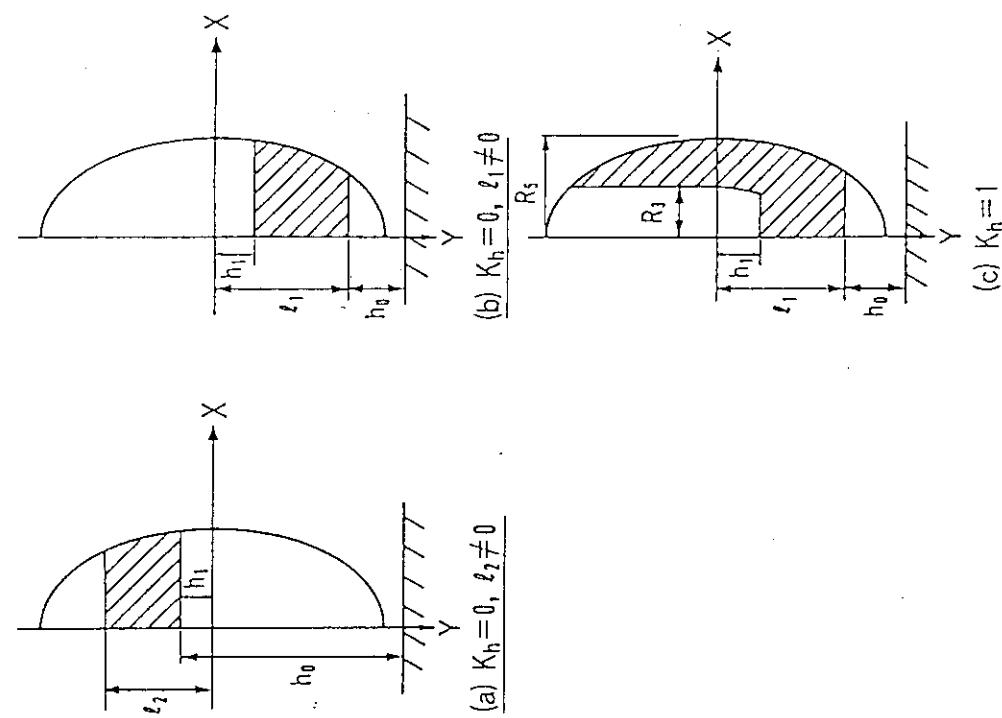
(a) 断面A-A (b) 断面B-B (c) 断面C-C

第4.3.10図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(I)

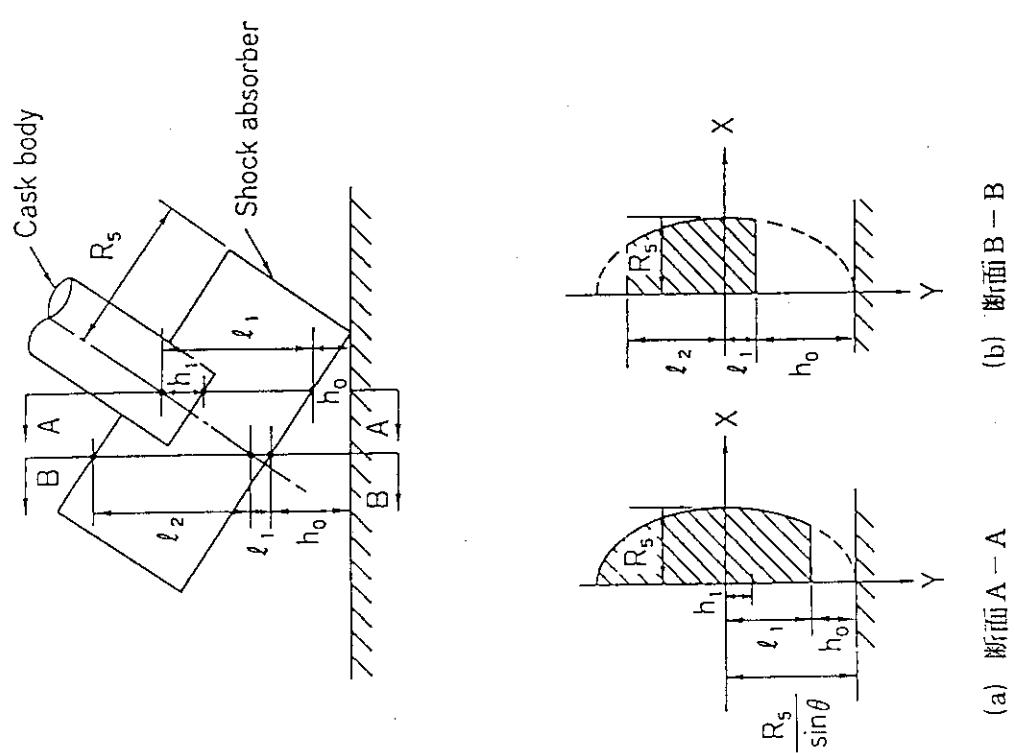


第4.3.9図 傾斜落下の場合の形狀寸法、材料区分および
境界条件定数

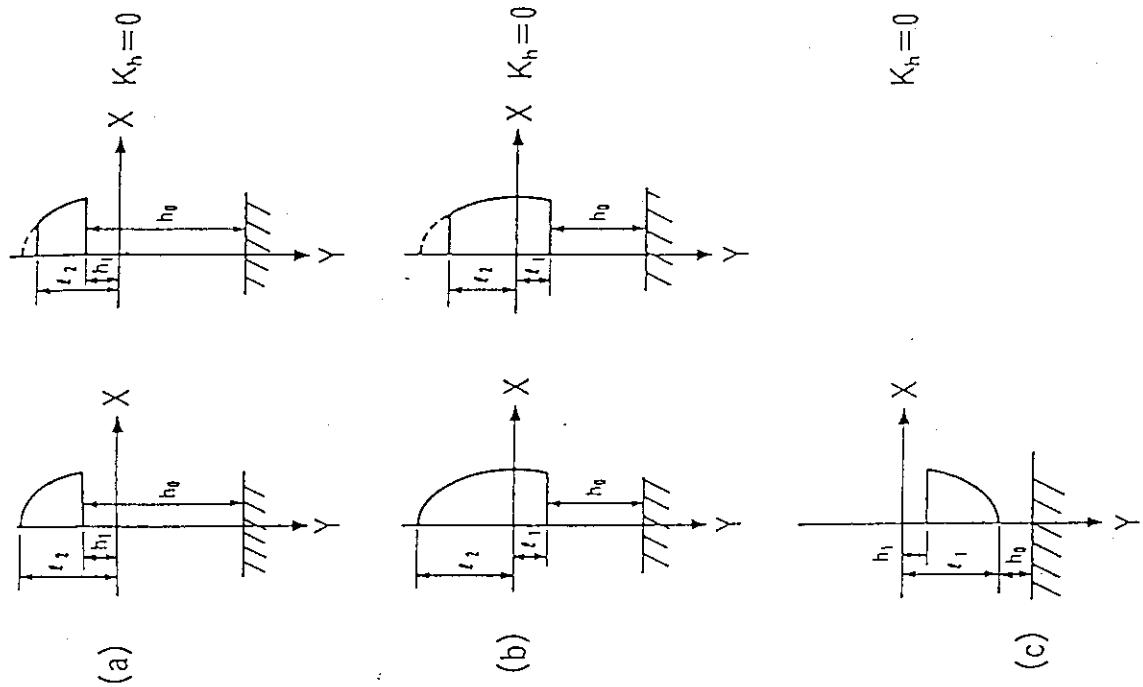
第4.3.11図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(II)



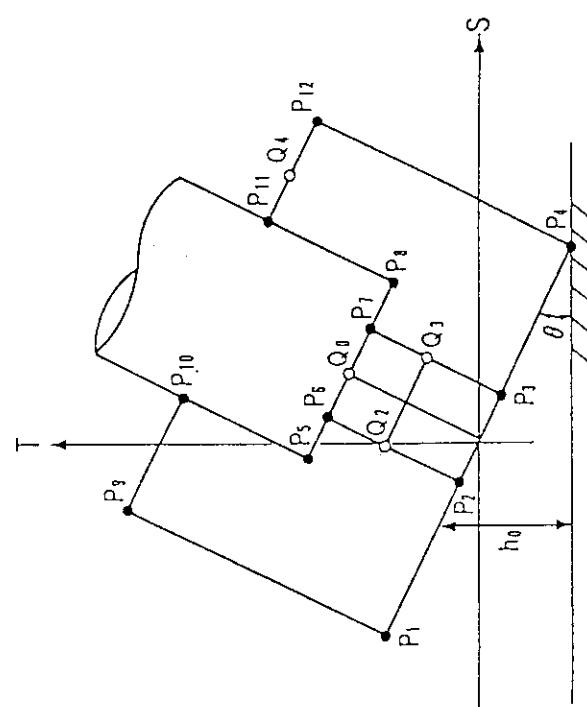
第4.3.13図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状③



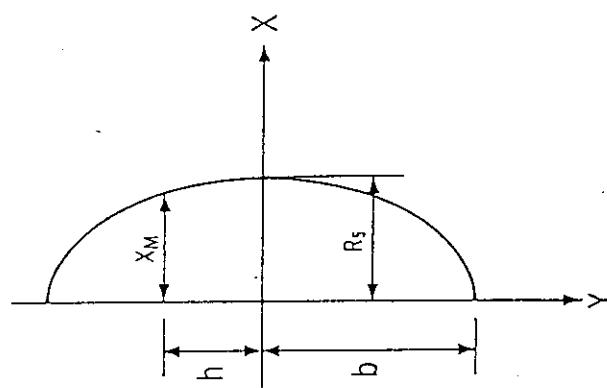
第4.3.12図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状③



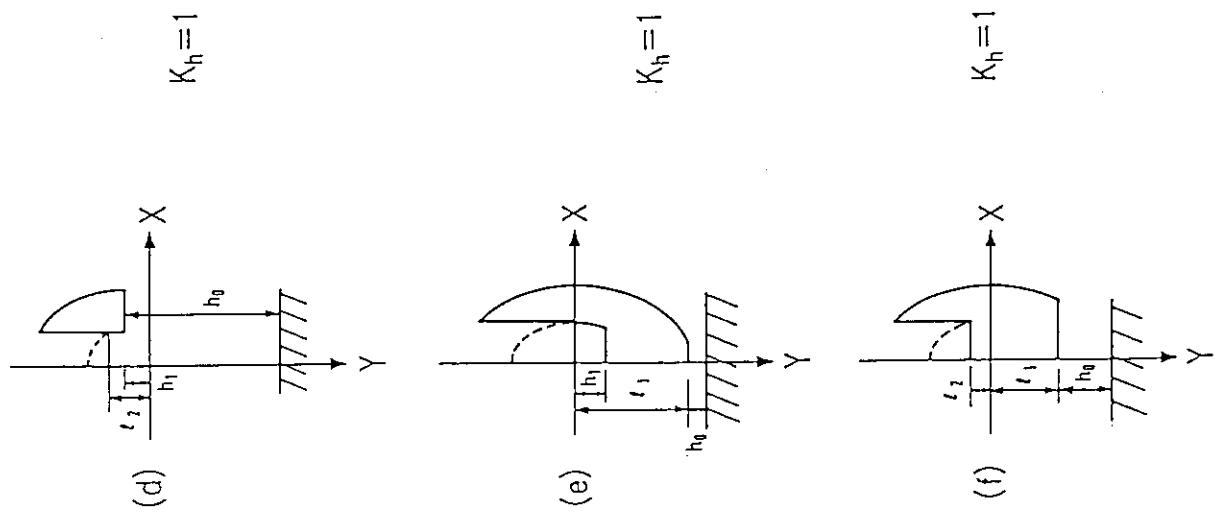
第4.3.15図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(V)



第4.3.14図 傾斜落下の場合の緩衝材のS-T座標系



第4.3.17 図 楠円形状



第4.3.16 図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(Ⅳ)

4.3.3 入力データ

計算プログラム CRUSH には、緩衝材のみをモデル化した CRUSH と緩衝材のオーバーパックも含めてモデル化した CRUSH 2 がある。CRUSH の入力データを第 4.3.1 表に、CRUSH 2 の入力データを第 4.3.2 表にそれぞれ示す。

第 4.3.1 表 CRUSH の入力データ

1. タイトルカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	'TITLE' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 80	タイトル (ジョブの内容)	70 A 1

2. オプションおよび形状データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 8	'VERTICAL': 垂直落下解析 'HORIZONTAL': 水平落下解析 'CORNER': 傾斜落下解析	2 A 4
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	輸送容器重量 (kg)	E 10.0
21 - 30	落下高さ (m)	E 10.0
31 - 40	傾斜落下の場合の角度 (度)	E 10.0
41 - 50	変形量の増分 (mm), ブランクの場合 1 mm	E 10.0
51 - 60	収束エラー, ブランクの場合 10^{-5}	E 10.0
61 - 62	単位オプション, 'CM', 'MM' と入力	A 2
63 - 70	ブランク	8 X
71 - 80	最大ひずみの相対値 0 ~ 1.0, ブランクの場合 1.0	E 10.0

3. 入力データのチェックと図表示データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	入力データチェック 'RUN': 計算実行	5 A 1
6 - 10	'MODEL': 入力データチェック ブランク	5 X
11 - 14	図表示オプション 'PLOT': 図表示有り ': 図表示なし	A 4

4. 緩衝体の形状データカード(I)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	'RCOOR' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	緩衝体の半径 (第 4.3.3 図, 第 4.3.5 図, 第 4.3.9 図) R_1	E 10.0
21 - 30	R_2	E 10.0
31 - 40	R_3	E 10.0
41 - 50	R_4	E 10.0
51 - 60	R_5	E 10.0

5 A. 緩衝体形状データカード (IIA)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	'ZCOOR' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	緩衝体の軸方向形状寸法 (第 4.3.3 図, 第 4.3.5 図, 第 4.3.9 図) Z_1	
21 - 30	Z_2	E 10.0
31 - 40	Z_3	E 10.0
41 - 50	Z_4	E 10.0
51 - 60	Z_5	E 10.0
61 - 70	Z_6	E 10.0
71 - 80	Z_7	E 10.0

5 B. 緩衝体形状データカード (IIB)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ブランク	10 X
11 - 20	緩衝体の軸方向形状寸法 (第 4.3.3 図, 第 4.3.5 図, 第 4.3.9 図) Z_8	E 10.0
21 - 30	Z_9 (上下対称の場合には $Z_5 \sim Z_9$ は不用)	E 10.0

6. 境界条件定数

カラム	内 容	フォーマット
1 - 4	'MESH' と入力	A 4
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 15	X-Y 面(第 4.3.6 図, 第 4.3.9 図) の分割数(水平落下解析 および傾斜落下解析), 最大 300, ブランクの場合 100	
16 - 20	R-Z 面(第 4.3.9 図) の分割数(傾斜落下解析), 最大 400, ブランクの場合 100.	I 5
21 - 30	端末拘束係数(第 4.3.2 図, 第 4.3.4 図, 第 4.3.8 図) K ₁	E 10.0
31 - 40	K ₂	E 10.0
41 - 50	K ₃	E 10.0
51 - 60	K ₄	E 10.0
61 - 70	K ₅	E 10.0

7 A. 緩衝体の材料データ

カラム	内 容	フォーマット
1 - 4	材料の応力-ひずみデータの種類表示 'SIGA': 材料の種類 σ_A	A 4
	'SIGB': σ_B	
	'SIGC': σ_C	
	'SIGD': σ_D	
	'SIGX': σ_X (第 4.3.2 図, 第 4.3.4 図, 第 4.3.8 図参照)	
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 15	応力-ひずみのデータの数	I 5
16 - 20	ブランク	5 X
21 - 30	応力値の倍数(ブランクの場合 1.0)	E 10.0

7 B. 材料の応力-ひずみデータ

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	ひずみ(1)	E 10.0
11 - 20	応力(1)	E 10.0
21 - 30	ひずみ(2)	E 10.0
31 - 40	応力(2)	E 10.0
41 - 50	ひずみ(3)	E 10.0
51 - 60	応力(3)	E 10.0
61 - 70	ひずみ(4)	E 10.0
71 - 80	応力(4) (応力-ひずみデータの数だけ繰返す)	E 10.0

7 A, 7 B データセットは SIGA, SIGB, SIBC, SIGD, SIGX ごとに繰返す。

第4.3.2表 CRUSH 2 の入力データ

1. タイトルカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	'TITLE' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 80	タイトル (ジョブの内容)	70 A 1

2. オプションおよび形状データカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 8	'VERTICAL': 垂直落下解析 'HORIZONT': 水平落下解析 'CORNER': 傾斜落下解析	2 A 4
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	輸送容器重量 (kg)	E 10.0
21 - 30	落下高さ (m)	E 10.0
31 - 40	傾斜落下の場合の角度 (度)	E 10.0
41 - 50	変形量の増分 (mm), ブランクの場合 1 mm	E 10.0
51 - 60	収束エラー, ブランクの場合 10^{-5}	E 10.0
61 - 62	単位オプション, 'CM', 'M' と入力	A 2
63 - 70	ブランク	8 X
71 - 80	最大ひずみの相対値 0 ~ 1.0, ブランクの場合 1.0	E 10.0

3. 輸送容器形状データ

カラム	内 容	フォーマット
1 - 6	'LENGTH' と入力	6 A 1
7 - 10	ブランク	4 X
11 - 20	輸送容器の全長	E 10.0
21 - 30	輸送容器の半径	E 10.0
31 - 35	ブランク	5 X
36 - 39	材料の種類 D が存在	A 4
	'SIGD': 材料 D が存在	
	'NONE': 材料 D が存在しない	
40	ブランク	1 X
41 - 50	緩衝体のカバー(1)の板厚 (第 4.3.18 図)	E 10.0
51 - 60	緩衝体のカバー(2)の板厚 (第 4.3.19 図)	E 10.0
61 - 70	緩衝体のカバー(3)の板厚 (第 4.3.20 図)	E 10.0

4. 入力データのチェックと図表示データカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	入力データのチェック 'RUN': 計算実行	5 A 1
6 - 10	'MODEL': 入力データチェック ブランク	5 X
11 - 14	図表示オプション 'PLOT': 図表示有り ': 図表示なし	A 4

5. 緩衝体の形状データカード(I)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	'RCOOR' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	緩衝体の半径 (第 4.3.3 図, 第 4.3.5 図, 第 4.3.9 図) R_1	E 10.0
21 - 30	R_2	E 10.0
31 - 40	R_3	E 10.0
41 - 50	R_4	E 10.0
51 - 60	R_5	E 10.0

6 A. 緩衝体データカード (II A)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	'ZCOOR' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	緩衝体の軸方向形状寸法 (第 4.3.3 図, 第 4.3.5 図, 第 4.3.9 図) Z_1	E 10.0
21 - 30	Z_2	E 10.0
31 - 40	Z_3	E 10.0
41 - 50	Z_4	E 10.0
51 - 60	Z_5	E 10.0
61 - 70	Z_6	E 10.0
71 - 80	Z_7	E 10.0

6 B. 緩衝体形状データカード (II B)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ブランク	10 X
11 - 20	緩衝体の軸方向形状寸法 (第 4.3.3 図, 第 4.3.5 図, 第 4.3.9 図) Z_8	E 10.0
21 - 30	Z_9 (上下対称の場合には $Z_5 \sim Z_9$ は不用)	E 10.0

7. 境界条件定数

カラム	内容	フォーマット
1 - 4	'MESH' と入力	A 4
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 15	X-Y 面 (第 4.3.6 図, 第 4.3.9 図) の分割数 (水平落下解析 および傾斜落下解析), 最大 300, ブランクの場合 100.	I 5
16 - 20	R-Z 面 (第 4.3.9 図) の分割数 (傾斜落下の場合), 最大 400, ブランクの場合 200.	I 5
21 - 30	端末拘束係数 (第 4.3.2 図, 第 4.3.4 図, 第 4.3.8 図) K_1	E 10.0
31 - 40	K_2	E 10.0
41 - 50	K_3	E 10.0
51 - 60	K_4	E 10.0
61 - 70	K_5	E 10.0

8 A. 緩衝体の材料データ

カラム	内容	フォーマット
1 - 4	材料の応力-ひずみデータの種類表示 'SIGA': 緩衝体の材料種類 σ_A 'SIGB': σ_B 'SIGC': σ_C 'SIGD': σ_D 'SIGX': σ_X (第 4.3.2 図, 第 4.3.4 図, 第 4.3.8 図参照) 'SIG 1': 緩衝体カバーの材料種類 σ_{P1} 'SIG 2': σ_{P2} 'SIG 3': σ_{P3} (第 4.3.18 図, 第 4.3.19 図, 第 4.3.20 図参照)	A 4
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 15	応力-ひずみのデータの数	I 5
16 - 20	ブランク	5 X
21 - 30	応力値の倍数 (ブランクの場合 1.0)	E 10.0

8 B. 材料の応力-ひずみデータ

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ひずみ(1)	E 10.0
11 - 20	応力(1)	E 10.0
21 - 30	ひずみ(2)	E 10.0
31 - 40	応力(2)	E 10.0
41 - 50	ひずみ(3)	E 10.0
51 - 60	応力(3)	E 10.0
61 - 70	ひずみ(4)	E 10.0
71 - 80	応力(4)	E 10.0
(応力-ひずみデータの数だけ繰返す)		

8 A, 8 B データセットは SIGA, SIGB, SIGC, SIGD, SIGX, SIG 1, SIG 2, SIG 3 ごとに繰返す。

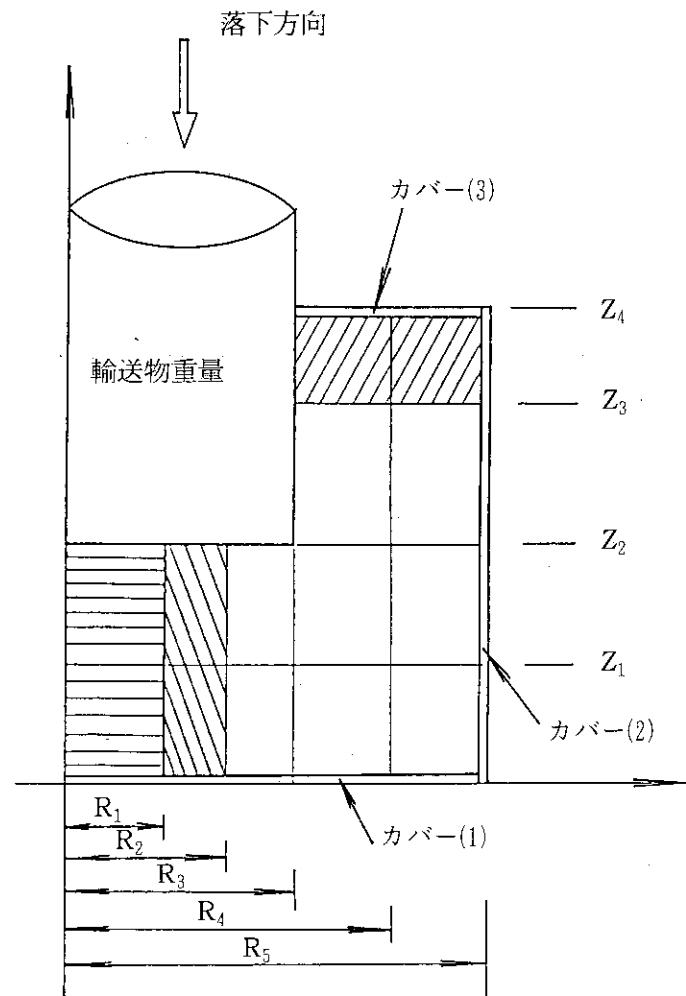
9 A. 荷重-変位データ(I)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	'FORCE' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 15	荷重-変位データの数	I 5

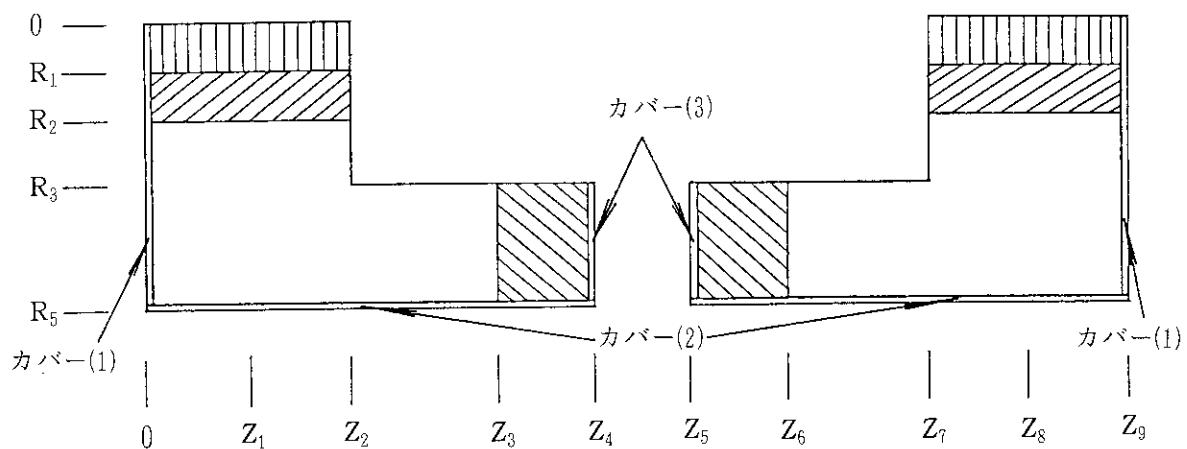
9 B. 荷重-変位データ(II)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	変位(1)	E 10.0
11 - 20	荷重(1)	E 10.0
21 - 30	変位(2)	E 10.0
31 - 40	荷重(2)	E 10.0
41 - 50	変位(3)	E 10.0
51 - 60	荷重(3)	E 10.0
61 - 70	変位(4)	E 10.0
71 - 80	荷重(4)	E 10.0
(荷重-変位データの数だけ繰返す)		

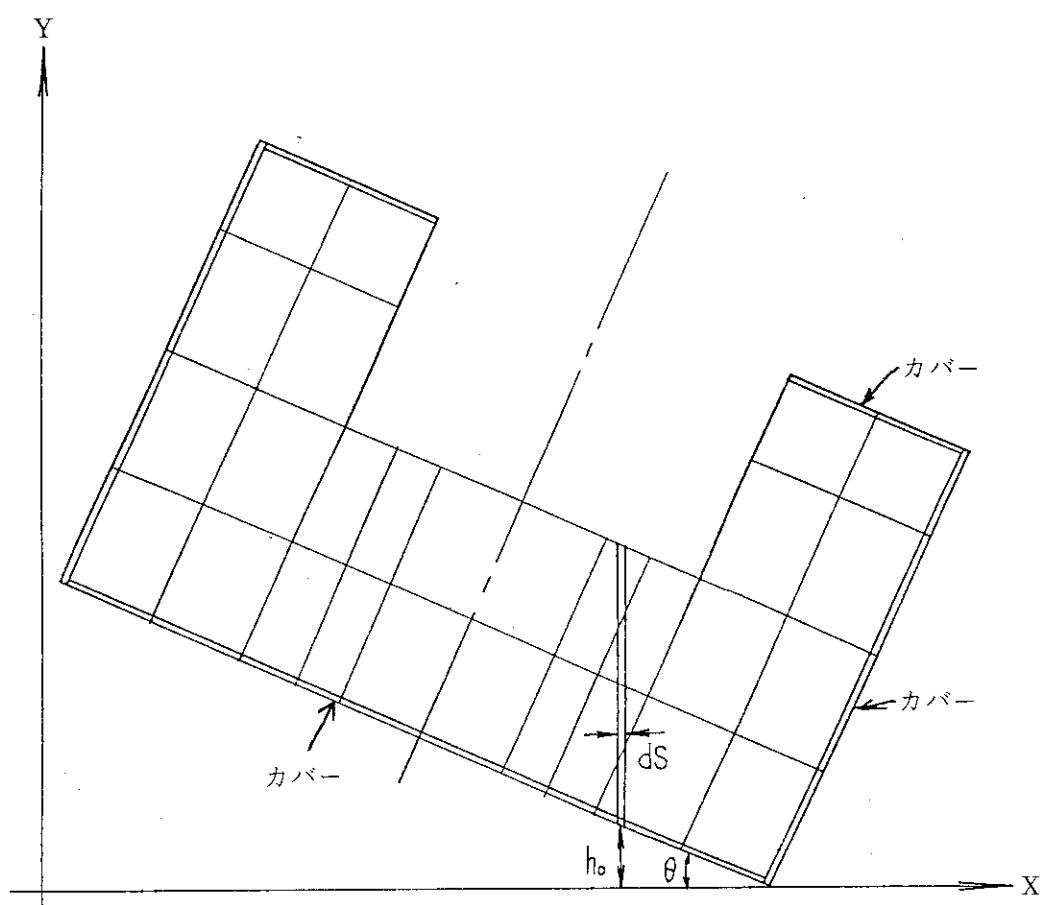
9 A および 9 B のデータは VDM による計算に用いる。



第4.3.18図 カバー付き緩衝体の計算モデル
(垂直落下の場合)



第4.3.19図 カバー付き緩衝体の計算モデル
(水平落下の場合)



第 4.3.20 図 カバー付き緩衝体の計算モデル
(傾斜落下の映合)

4.4 FINCRUSH⁽¹⁾

4.4.1 概 要

FINCRUSH は米国オークリッジ国立研究所の Davis⁽⁸⁾ およびカナダのモンサコ社の Torr⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ によるフィンの吸収エネルギー実験データを用いて、フィン付き輸送容器のフィンの変形量と輸送容器に与える荷重および加速度を求める簡易計算コードである。

4.4.2 計算式

FINCRUSH の計算式について以下に説明する。

輸送容器の外表面フィンの衝突によるフィンの変形、荷重および加速度を求める簡易解析法の一つである、フィン吸収エネルギーについて述べる。

重量 W の輸送容器が高さ H から落下した場合、位置エネルギーがすべて衝突エネルギーとすると次式が成立する。

$$E_v = WH \quad (4.4.1)$$

ここで、 E_v : 衝突エネルギー

W: 輸送容器の重量

H: 輸送容器の落下高さ

である。この衝突エネルギーをフィンによって吸収するものとする。いま、フィンの変形量を δ 、フィンに加わる力を F とすると、フィンの吸収エネルギーは次式となる。

$$E_\phi = F\delta \quad (4.4.2)$$

ここで、 E_ϕ : フィンの吸収エネルギー

F: フィンの荷重

δ : フィンの変形量

である。また、

$$E_v = E_\phi \quad (4.4.3)$$

である。

フィンの材料は剛塑性体を仮定し、衝突エネルギーはフィンの曲げ変形によって吸収するものとすると、次式が成立する（第 4.4.1 図）。

$$F\delta = \sigma_y \left(\frac{bT^2}{4} \right) \quad (4.4.4)$$

ここで、 σ_y : フィンの降伏応力

b: フィンの幅

T: フィンの厚さ

である。また、フィンの単位幅当たりの塑性モーメント M_p を次式で定義する。

$$M_p = \sigma_y \frac{T^2}{4} \quad (4.4.5)$$

ここで、 M_p : 塑性モーメント

である。フィンの幅 L の吸収エネルギーは次式で与えることができる。

$$E_\phi = \varepsilon M_p L \quad (4.4.6)$$

ここで、 L : フィン幅 (長さ)

ε : フィンのエネルギー吸収割合 (吸収エネルギー/塑性モーメント)

これによってフィンの衝突吸収エネルギーが簡単に求まるようになった。

現実の輸送容器は第 4.4.1 図に示すように、外表面にある間隔を置いて配置されている。この図のような直線フィンについて、フィン変形量、荷重、加速度を求める。

第 4.4.2 図に示すように、変形量 δ_0 の場合の変形角度 θ は次式で与えられる。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R_0 - \delta_0}{R_0} \right) \quad (4.4.7)$$

ここで、 θ : 変形角度

δ : フィンの変形量

R_0 : フィンの外周半径

である。取付角度 ϕ のフィンの変形量 δ は次式により求められる。

$$\delta = R_0 - \frac{R_0 - \delta_0}{\cos \phi} \quad (4.4.8)$$

フィンの変形量 δ に対する吸収エネルギーを第 4.4.3 図に示すような Davis のデータから求め る。フィンの変形割合 γ は (4.4.9) 式で求められる。

Davis は ORNL におけるフィンの衝突実験を整理して、フィンの変化割合に対するエネルギーの吸収割合を整理した。

$$\gamma = \frac{\delta}{H} \quad (4.4.9)$$

ここで、 γ : フィンの変化割合

である。

次に、第 4.4.3 図からフィンの変化割合に対する吸収エネルギーの割合 (吸収エネルギー/塑性モーメント) ε を求める。フィンの吸収エネルギーは (4.4.6) 式から次式で得られる。

$$E_\phi = \varepsilon M_p L$$

フィンの吸収エネルギー E と変形量 δ から、衝撃力 F は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} E &= \int F d\delta \\ F &= \frac{dE}{d\delta} \end{aligned} \right\} \quad (4.4.10)$$

ここで、

F: 衝撃力

である。また、衝撃加速度 α は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{E}{W/g} \quad (4.4.11)$$

ここで、

α : 輸送容器の加速度

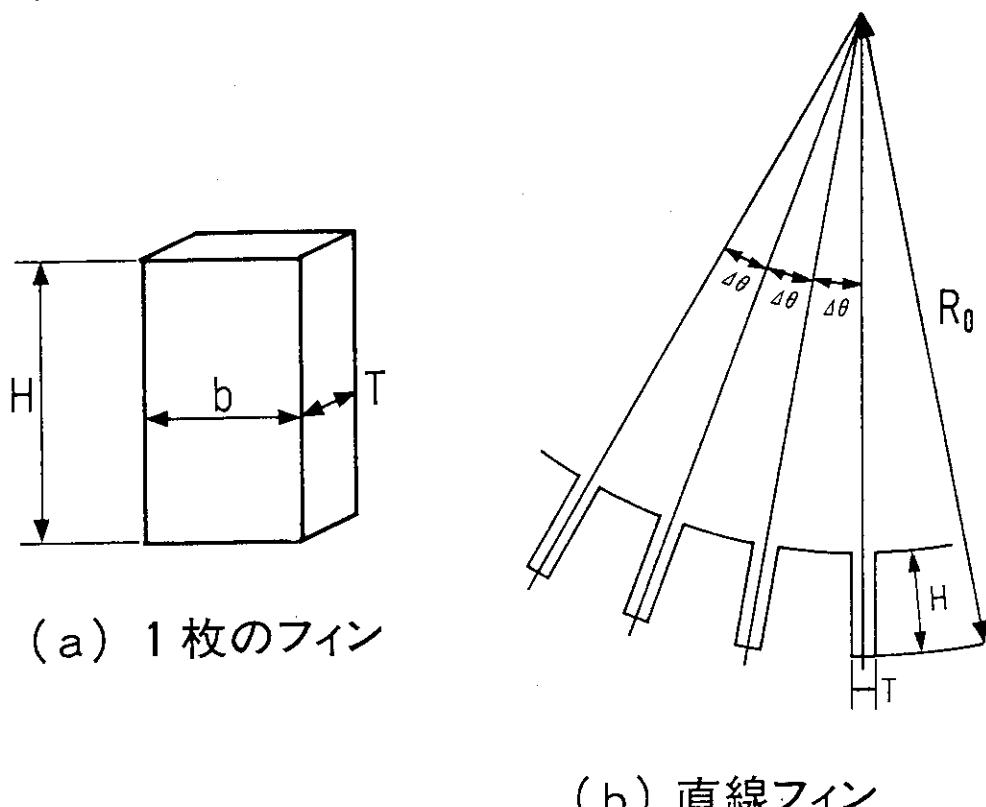
W : 輸送容器の重量

g : 重力の加速度

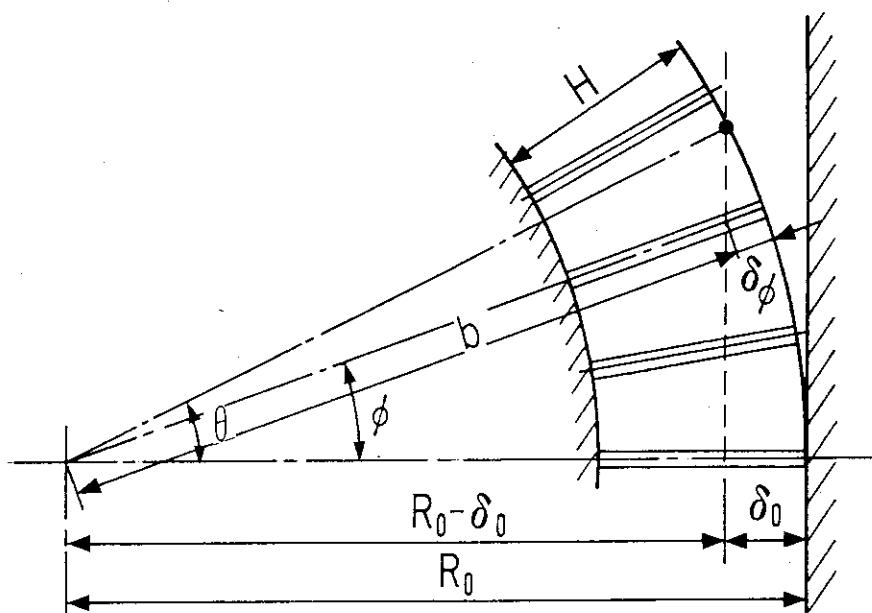
である。

フィン吸収エネルギー法に用いられるデータは、古くは Davis によって 1971 年に ORNL における実験結果をまとめて作成された。その後、1986 年に、Torr によって AECL の要請により Monserco 社において Davvis よりも広範囲な実験によってデータが作成された。これらのデータについて Torr の報告書からの抜粋を第 4.4.4 ~ 4.4.23 図に示す。Davis (ORNL) のデータと Torr (MONSERCO) のデータには、ある差異があり、これに関しては Torr の報告書に詳しく述べられている。

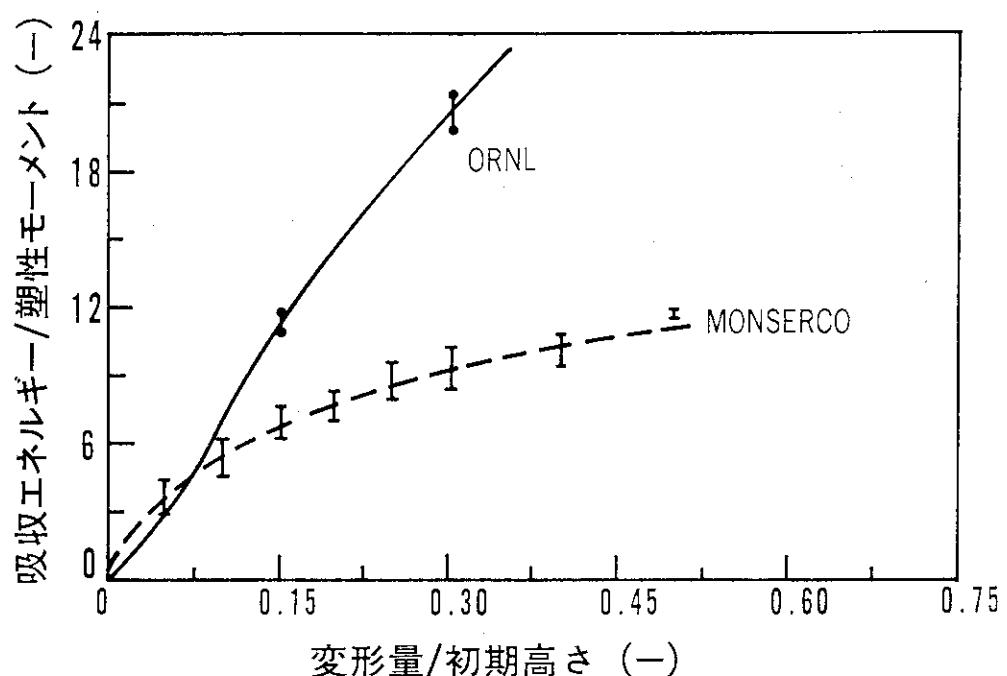
第 4.4.4 ~ 4.4.23 図のフィンの吸収エネルギーは横軸は(6)式の変形割合 ε 、縦軸は吸収エネルギー εM_p を示す。



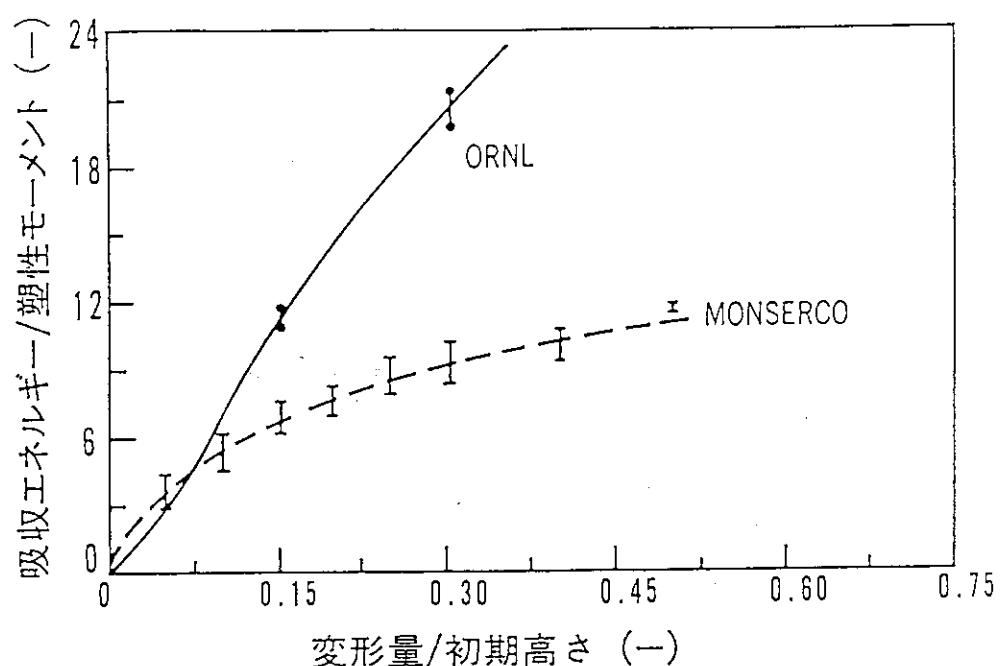
第 4.4.1 図 フィンの形状



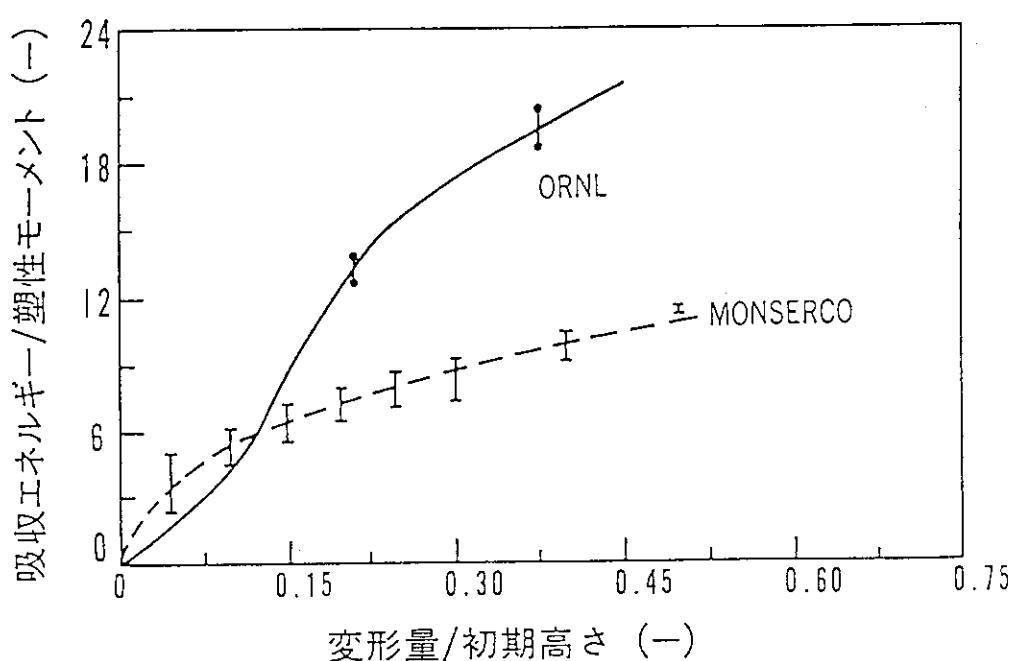
第4.4.2図 フィンの変形と角度の関係



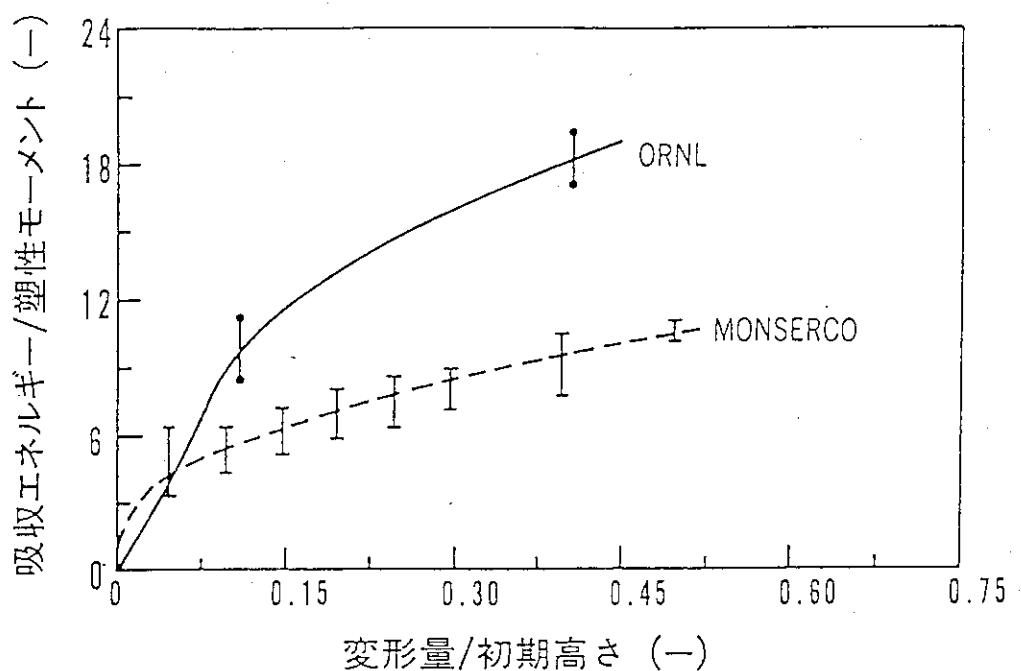
第4.4.3図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)]
 [フィン角度: 0°]



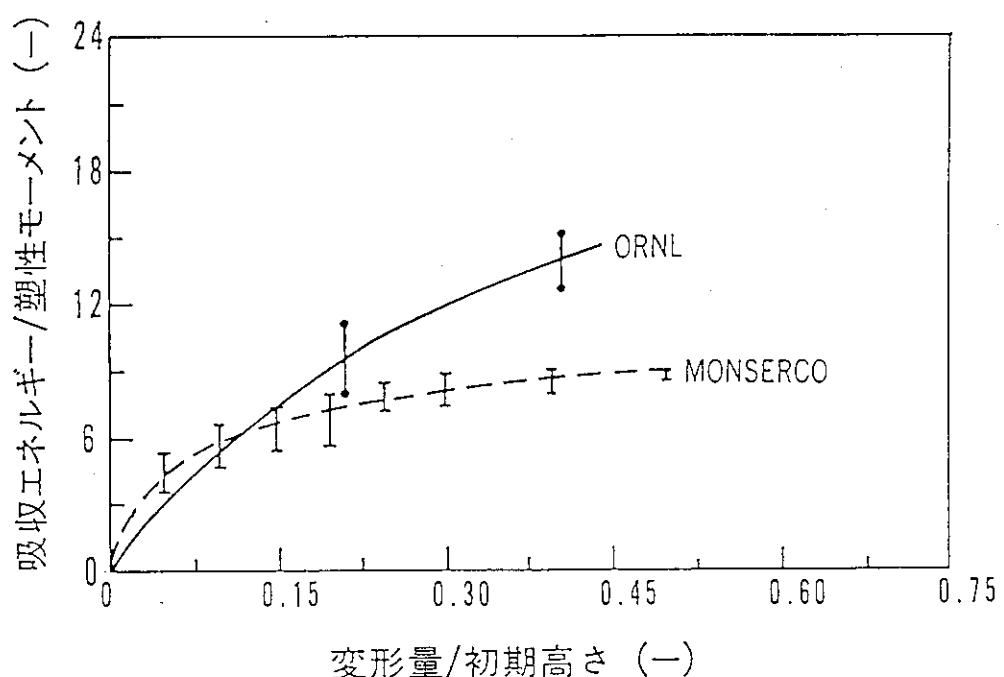
第4.4.4図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
〔フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)
フィン角度: 0°〕



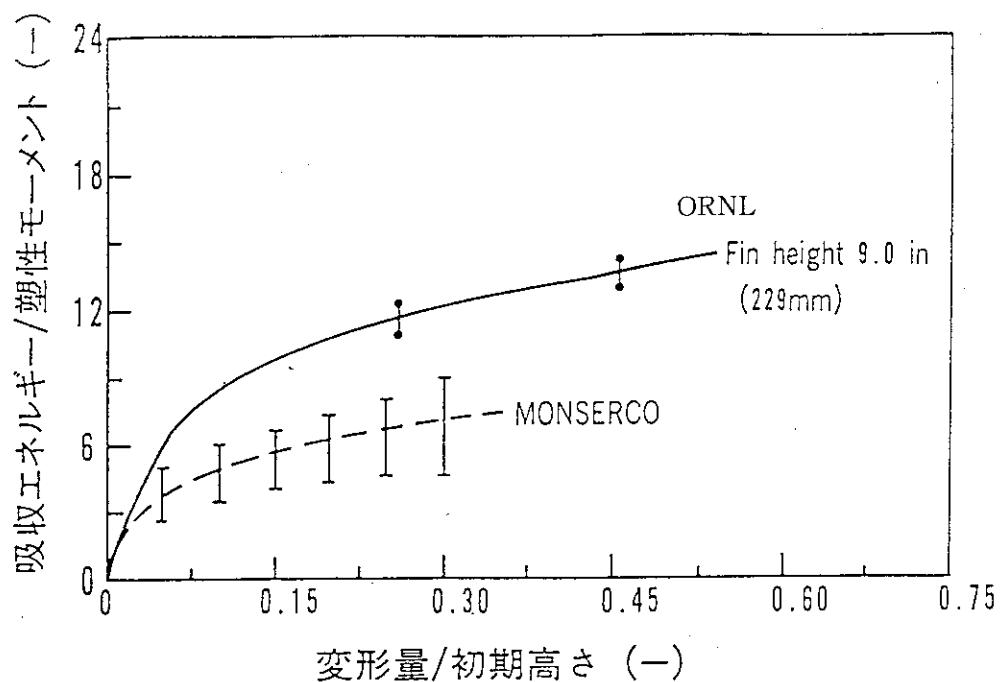
第4.4.5図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
〔フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)
フィン角度: 0°〕



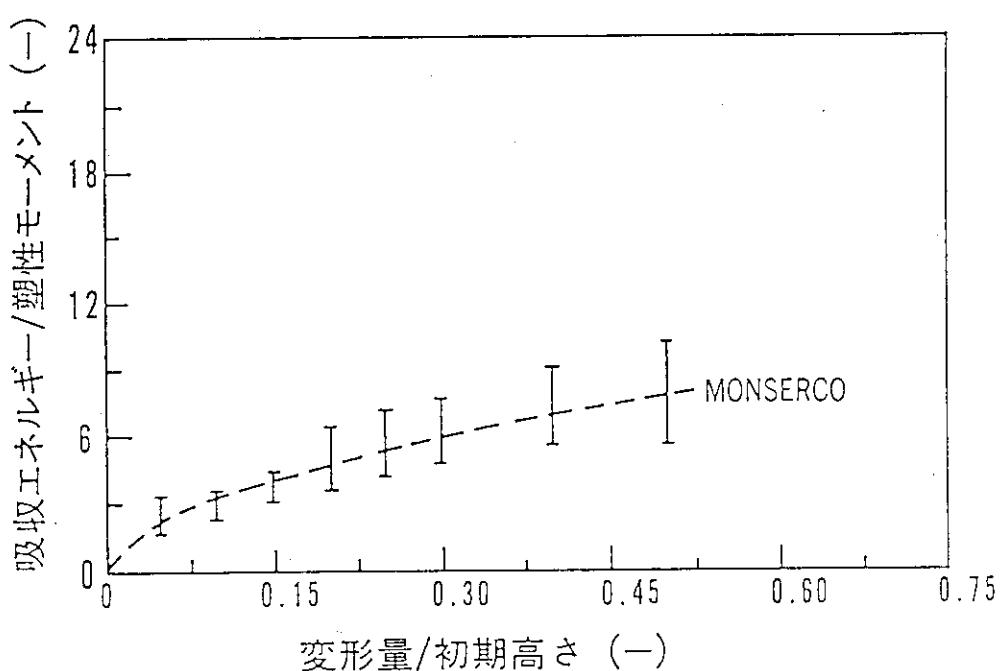
第4.4.6図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
〔フィン高さ: 6.0 in. (152 mm) 〕
〔フィン角度: 0° 〕



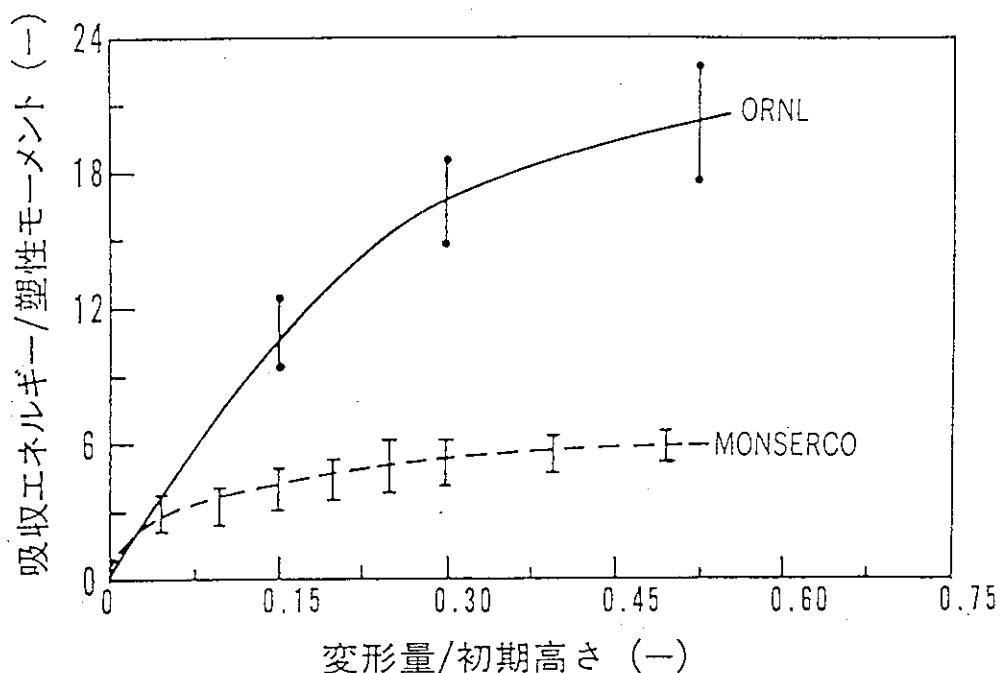
第4.4.7図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
〔フィン高さ: 8.0 in. (203 mm) 〕
〔フィン角度: 0° 〕



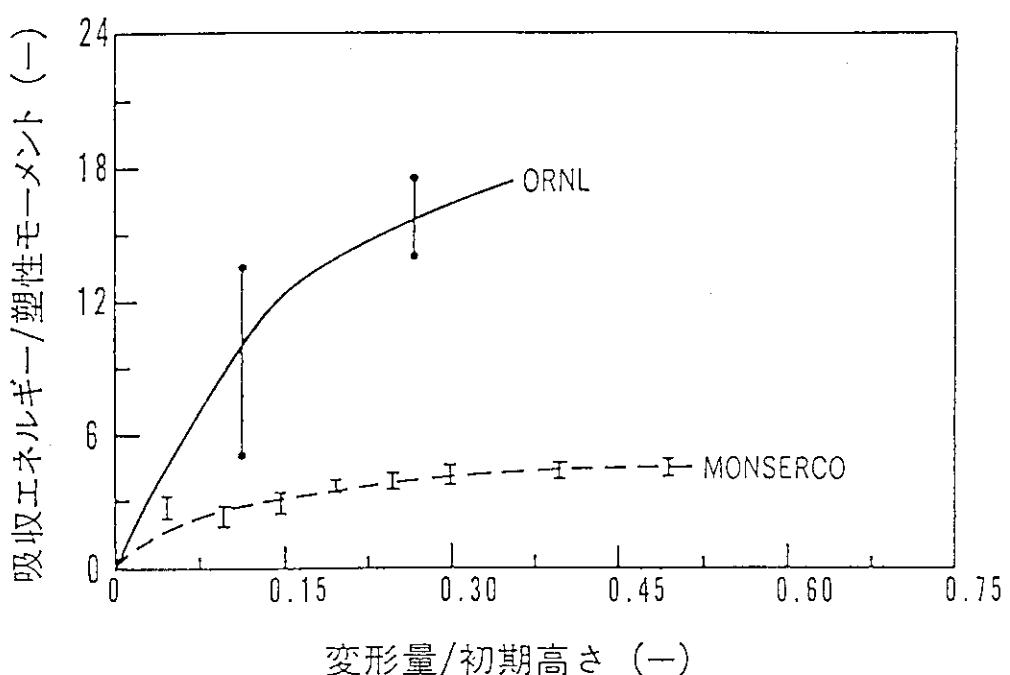
第4.4.8図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 10 in* (254 mm)
 フィン角度: 0°



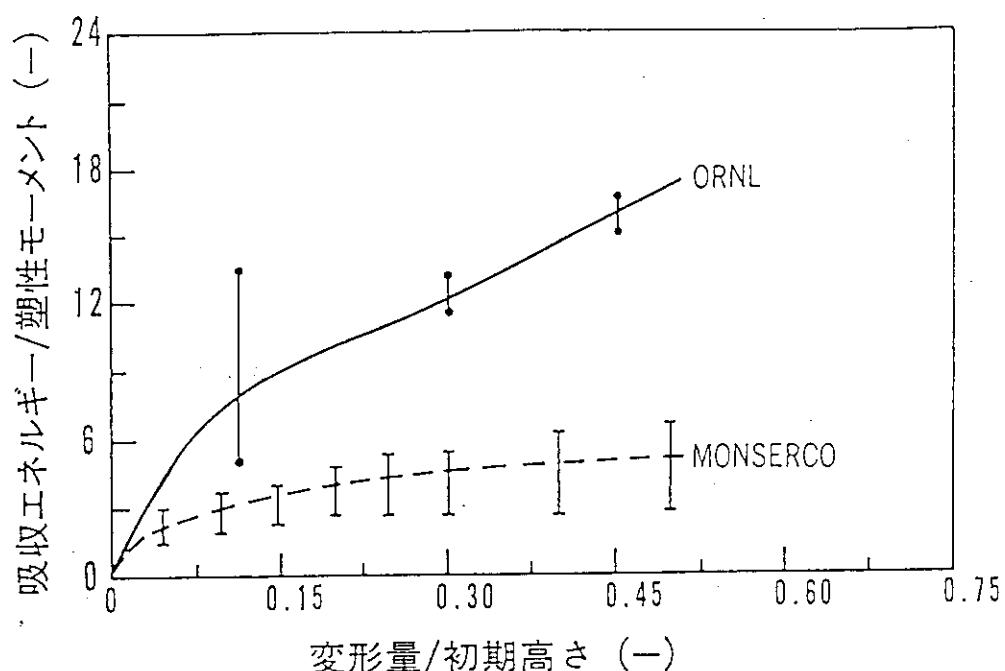
第4.4.9図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)
 フィン角度: 10°



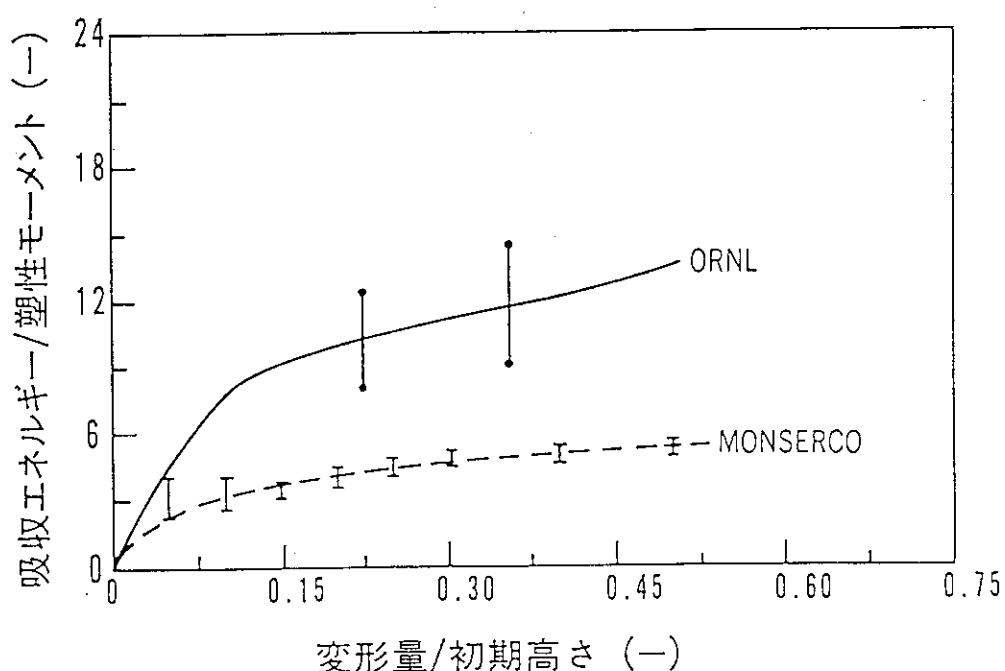
第4.4.10図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)]
 [フィン角度: 10°]



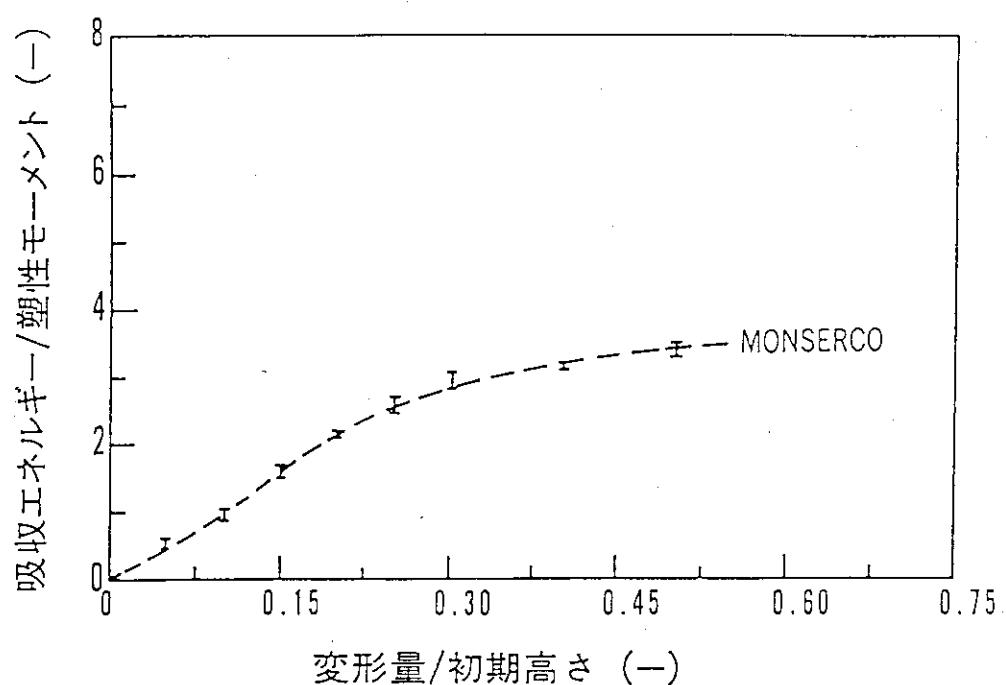
第4.4.11図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 6.0 in. (152 mm)]
 [フィン角度: 10°]



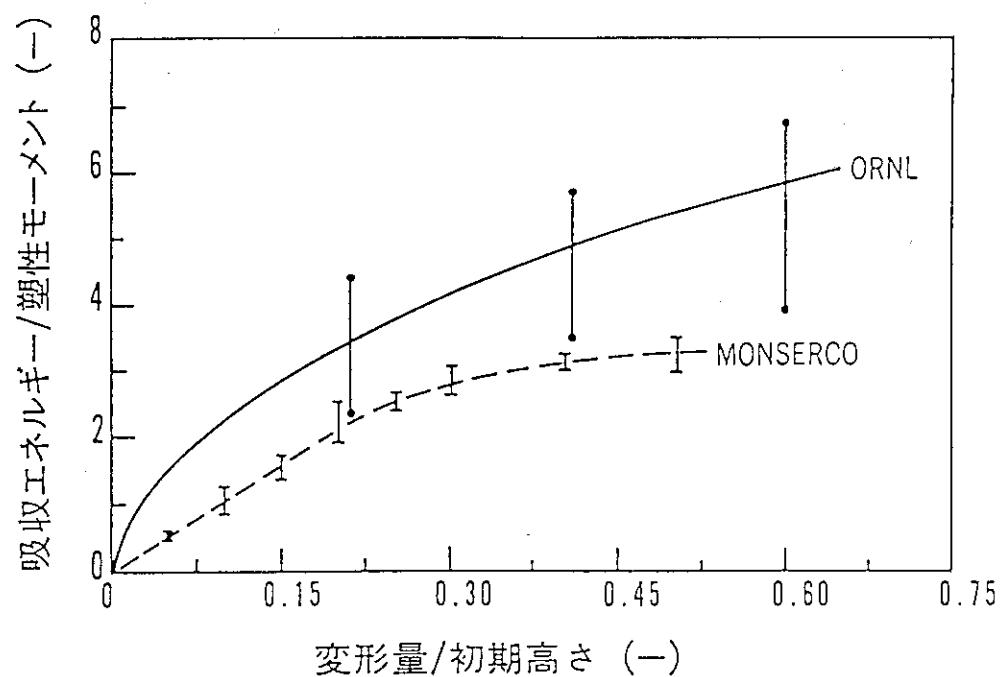
第4.4.12図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 8.0 in. (203 mm)
 フィン角度: 10°]



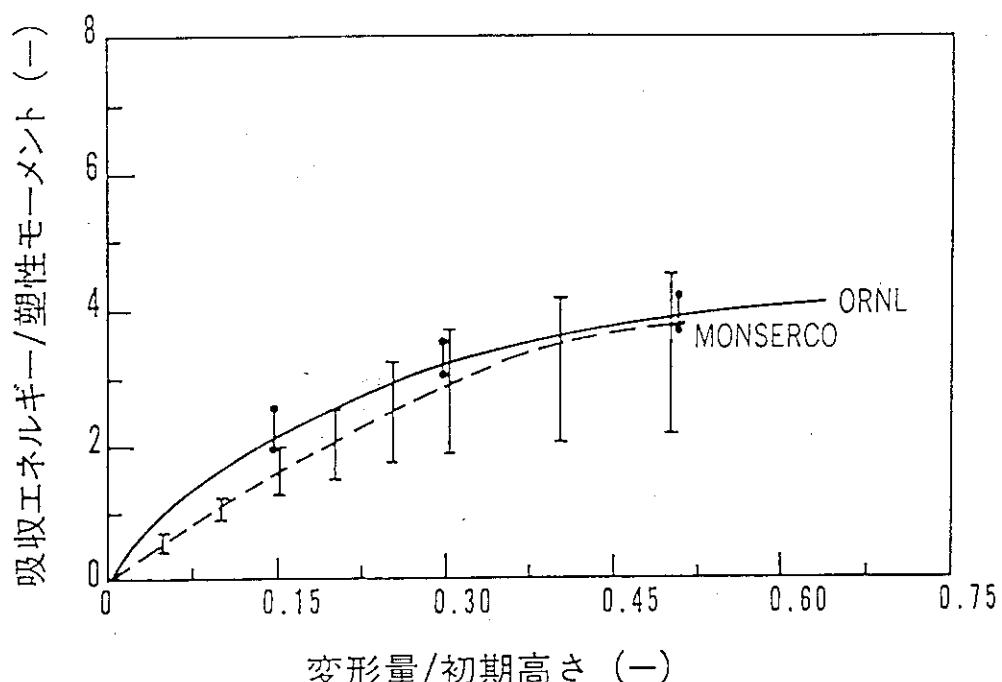
第4.4.13図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 10.0 in. (254 mm)
 フィン角度: 10°]



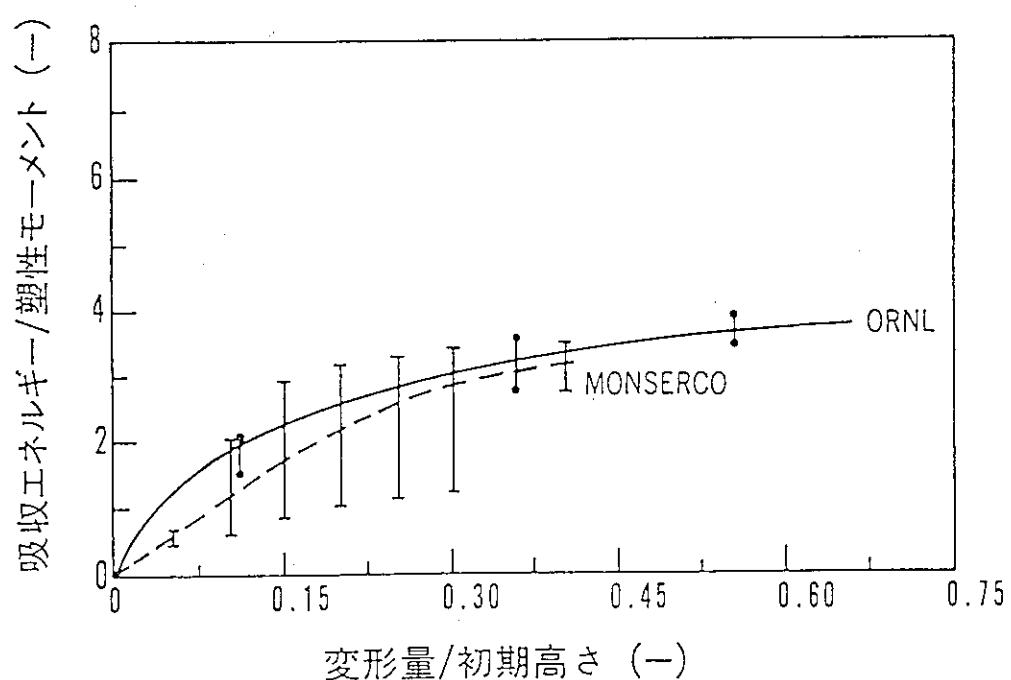
第4.4.14図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)
 フィン角度: 20°]



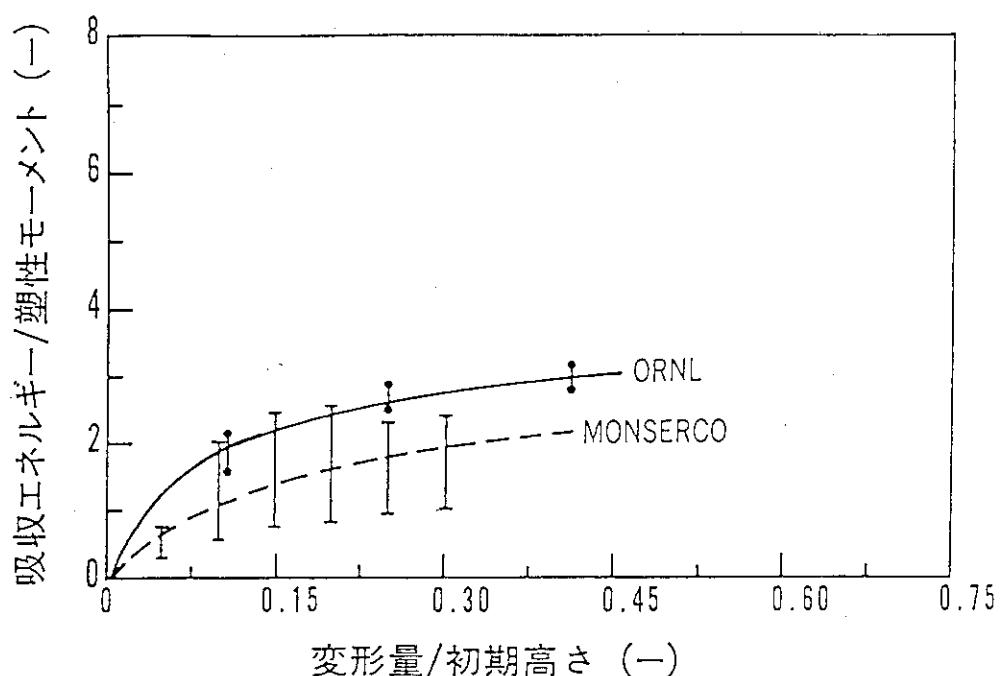
第4.4.15図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)
 フィン角度: 20°]



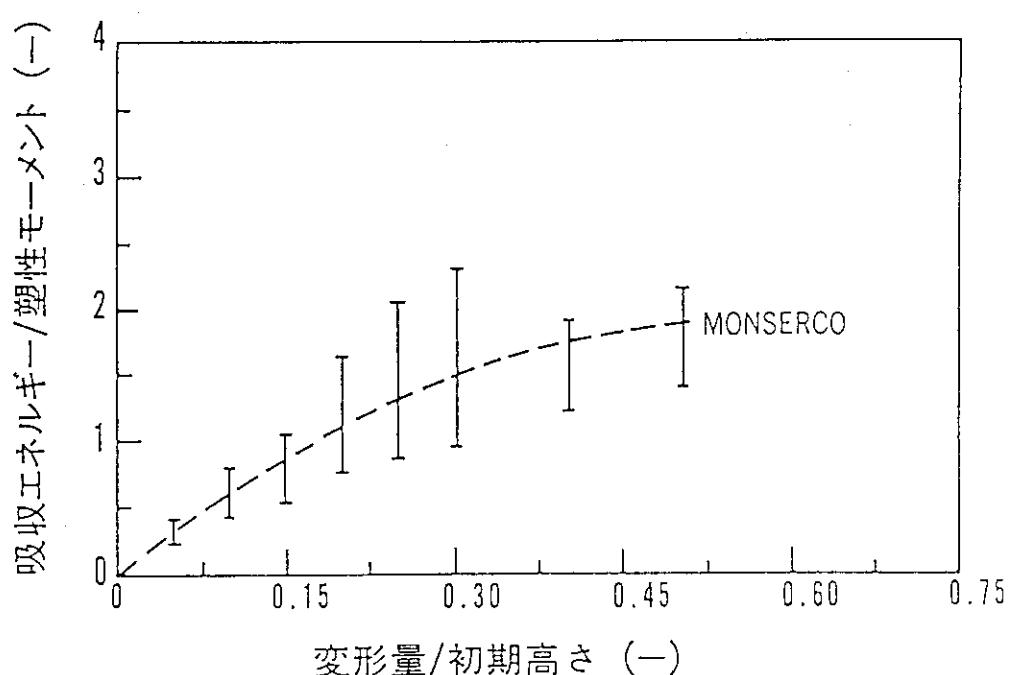
第4.4.16図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 6.0 in. (152 mm)
 フィン角度: 20°



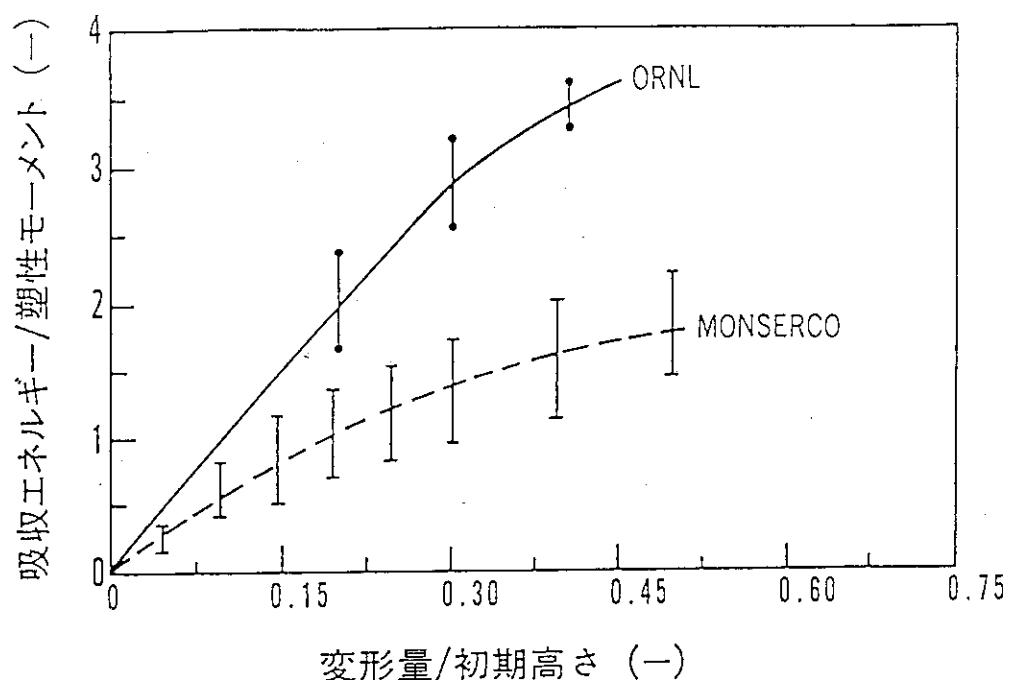
第4.4.17図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 8.0 in. (203 mm)
 フィン角度: 20°



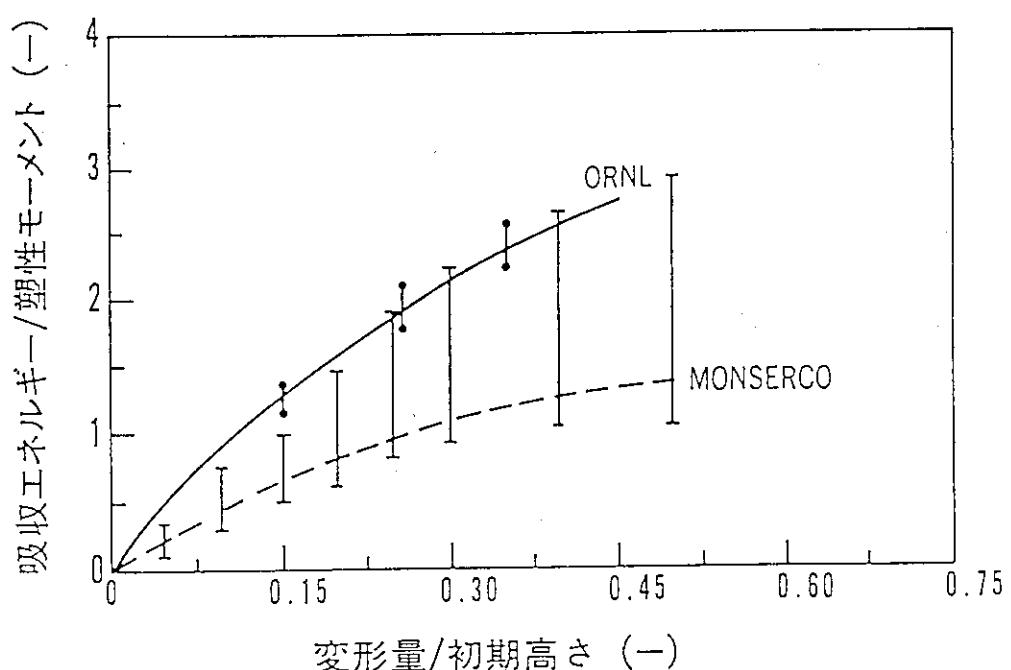
第 4.4.18 図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 10.0 in. (254 mm)]
 [フィン角度: 20°]



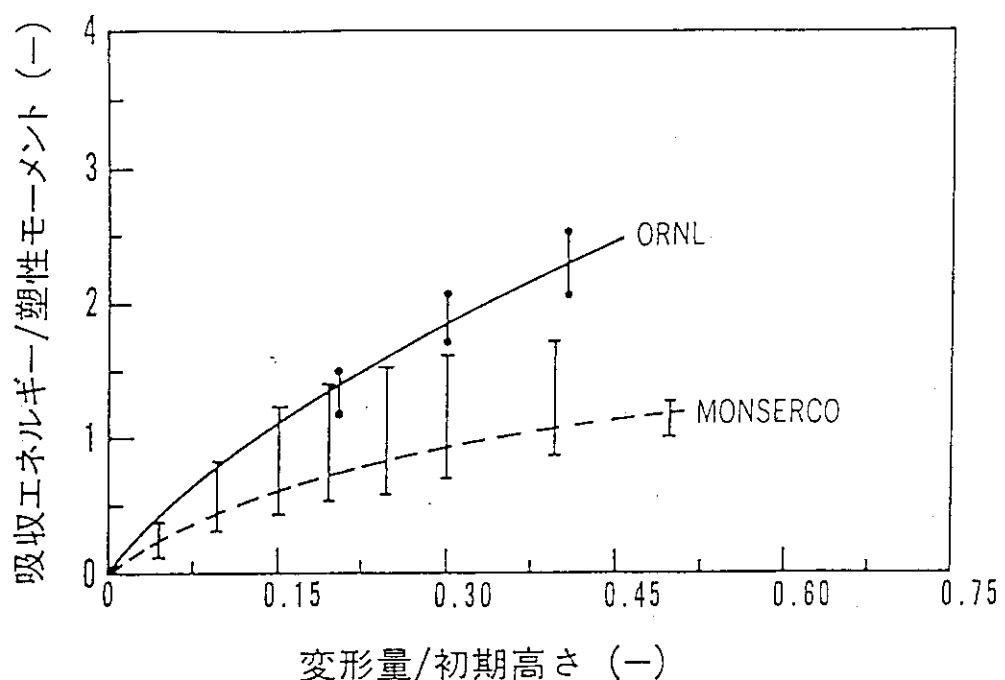
第 4.4.19 図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)]
 [フィン角度: 30°]



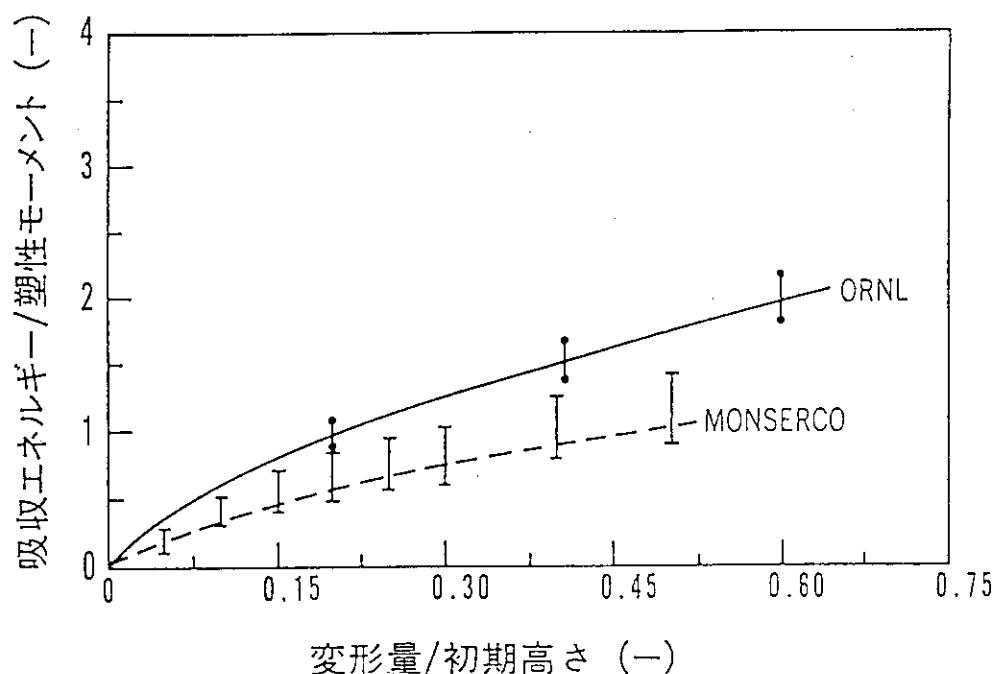
第4.4.20図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)
 フィン角度: 30°



第4.4.21図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 フィン高さ: 6.0 in. (152 mm)
 フィン角度: 30°



第4.4.22図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 8.0 in. (203 mm)]
 [フィン角度: 30°]



第4.4.23図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係
 [フィン高さ: 10.0 in. (254 mm)]
 [フィン角度: 30°]

4.4.3 入力データ

計算プログラム FINCRUSH の入力データを第 4.4.1 表に示す。

第 4.4.1 表 FINCRUSH の入力データ

1. タイトルカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	'TITLE' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 80	タイトル (ジョブの内容)	70 A 1

2. 形状データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 7	'FINDATA' と入力	7 A 1
8 - 10	ブランク	3 X
11 - 20	輸送容器の重量 (kg)	E 10.0
21 - 30	フィンの高さ (mm)	E 10.0
31 - 40	フィンの幅 (mm)	E 10.0
41 - 50	フィンの厚さ (mm)	E 10.0
51 - 60	フィン外半径 (mm)	E 10.0
61 - 70	フィン間角度 (度)	E 10.0
71 - 75	フィンオプション ブランク: 上記のデータから -30 度から +30 度までの フィン形状を生成する。 'INPUT': データカード 2 A によってフィン形状を入力する 'PLATE': フィンが円筒端面の円盤上に取付けられている 場合であり、データカード 2 A によってフィン形状を入力する。	A 5

2 A. フィン形状データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 4	フィンデータの開始と終了 'PHI.'：フィン形状データの入力を開始する。 'END.'：フィン形状データの入力を終了する。	A 4
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 20	フィン角度(度)	E 10.0
21 - 30	フィン高さ(mm)	E 10.0
31 - 40	フィン幅(mm) この入力では、フィンの厚さは形状データカード2.で入力される。形状データカード2.で'PLATE'オプションの場合、フィン角度は円盤上の取付け角度となる。	

3. 解析データカード

カラム	内容	フォーマット
1 - 4	'DISP'と入力	A 4
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 20	フィン衝突角度(度) 0度またはフィン角度の1/2	E 10.0
21 - 30	計算時の変形増分量(mm) ブランクの場合は1.0 mm	E 10.0
31 - 40	フィン材料の降伏応力(kg/mm ²)	E 10.0
41 - 50	吸収エネルギー(kg・mm)	E 10.0
51 - 60	フィン最大変形量の割合(%)	E 10.0
61 - 64	図形出力オプション ブランク：図形出力を行わない。 'PLOT'：図形出力を行う。	A 4
65	ブランク	1 X
66 - 69	フィン吸収エネルギーの図形出力オプション ブランク：図形出力を行わない。 'PLOT'：図形出力を行う。	

4. フィンデータの種類

カラム	内容	フォーマット
1 - 7	'FINNAME' と入力	7 A 1
8 - 10	ブランク	3 X
11 - 18	フィン形式名 フィンデータライブラリーで用意されたフィンデータ名。 この場合、以下の 5. ~ 9. のデータカードは省略。	2 A 4
19 - 20	ブランク	2 X
21 - 25	ある板厚のフィンに対する吸収エネルギーのデータの組数 (最大 5 種類) 以下の 5. ~ 9. のデータカードの組数。 なお、フィンデータライブラリーはユニット番号 20 から 入力される。この場合、フィン形式名は 'FILE' と入力す る。	I 5

5. フィン吸収エネルギーデータ(I)

カラム	内容	フォーマット
1 - 9	'THICKNESS' と入力	9 A 1
10	ブランク	1 X
11 - 20	フィンの板厚 (mm) (板厚のデータセットは値の小さい順とする)	E 10.0

6. フィン吸収エネルギーデータ(II)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	フィン板厚に対する吸収エネルギーデータの開始と終了 'ANGLE': フィンのある角度のデータの入力を開始する。 'END': フィンのある角度のデータの入力を終了する。	A 5
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 20	フィンの角度 (度) (最大 20 組)	E 10.0
21 - 25	あるフィン角度に対するフィンの高さの類 (最大 10 組)	I 5

7. フィン吸収エネルギーデータ(Ⅲ)

カラム	内容	フォーマット
1 - 4	'FINH' と入力	A 4
5 - 10	ブランク	6 X
11 - 20	フィンの高さ (mm)	E 10.0
21 - 30	あるフィン高さに対するフィンの変形割合と吸収エネルギーデータの数 (最大 10)	I 5

8. フィン吸収エネルギーデータ(Ⅳ)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	フィンの変形割合 γ_1 ((4.4.9) 式参照)	E 10.0
11 - 20	フィンの変形割合 γ_2	E 10.0
21 - 30	フィンの変形割合 γ_3	E 10.0
31 - 40	フィンの変形割合 γ_4	E 10.0
41 - 50	フィンの変形割合 γ_5	E 10.0
51 - 60	フィンの変形割合 γ_6	E 10.0
61 - 70	フィンの変形割合 γ_7	E 10.0
71 - 80	フィンの変形割合 γ_8 (必要なだけ繰返す。)	E 10.0

9. フィン吸収エネルギーデータ(Ⅴ)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_1 ((4.4.6) 式の ε)	E 10.0
11 - 20	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_2	E 10.0
21 - 30	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_3	E 10.0
31 - 40	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_4	E 10.0
41 - 50	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_5	E 10.0
51 - 60	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_6	E 10.0
61 - 70	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_7	E 10.0
71 - 80	吸収エネルギー/塑性モーメント ε_8 (必要なだけ繰返す。)	E 10.0

4.5 PUNCTURE¹²⁾

4.5.1 概 要

PUNCTURE は塑性大変形理論に基づく輸送容器の貫通解析を行う簡易計算コードである。

4.5.2 計算式

PUNCTURE の計算式について以下に説明する。

(1) 一般的な取扱い

塑性大変形理論に基づく貫通解析法は、一般性があり、比較的少い計算機使用時間と費用で解が得られる利点がある。しかし、これまで一層の円板についてのみ理論解が導かれている。輸送容器の構造では、貫通解析の対象部材は、一層円板構造以外に、鋼-鉛、鋼-鉛-鋼、鋼-木材-鋼などの多層円板構造が用いられている。それ故、多層円板構造に対する塑性大変形理論の拡張が望まれていた。浅田ら^{12,13)}は、この理論拡張を行った。この一層円板構造から多層円板構造への拡張には、等価板厚と等価応力の考え方を用いている。

貫通解析では、次の 2 つの場合を考慮しなければならない。

(i) 貫通棒が輸送容器に衝突する場合

(ii) 貫通棒上へ輸送容器が落下する場合

この 2 通りがいずれにおいても、理論上は同じ取扱いとなる。2 つの間の相違は落下エネルギーが、貫通棒かあるいは輸送容器かの違いだけである。

以下の理論では、貫通棒は輸送容器壁を貫通しないことを前提にしている。

輸送容器と貫通棒が衝突する場合、落下物の衝突エネルギーは輸送容器および貫通棒のそれぞれの塑性変形エネルギーに変換されるものとする。また、落下物の位置エネルギーがすべて衝突エネルギーとなり、さらに塑性変形エネルギーとなるものとし、材料は剛塑性体を仮定とするとエネルギーの平衡から次式が成立する。

$$E_v = WH = \int_0^{\delta_{bm}} f_b(\delta_b) d\delta_b + \int_0^{\delta_{cm}} f_c(\delta_c) d\delta_c \quad (4.5.1)$$

ここで、 E_v : 衝突エネルギー

W : 落下物の重量

H : 落下高さ

f_b : 貫通棒の塑性変形エネルギー

f_c : 輸送容器の塑性変形エネルギー

δ_b : 貫通棒の変位

δ_{bm} : 貫通棒の最大変位

δ_c : 輸送容器の変位

δ_{cm} : 輸送容器の最大変位

であり、さらに、貫通棒と輸送容器の荷重は等しいので次式が成立する。

$$\left. \begin{array}{l} P_b = P_c \\ P_b = f_b(\delta_{bm}) \\ P_c = f_c(\delta_{cm}) \end{array} \right\} \quad (4.5.2)$$

ここで, P_b : 貫通棒の荷重

P_c : 輸送容器の荷重

である。さらに輸送容器の加速度は次式となる。

$$\alpha_c = \frac{P_c}{W_c/g} \quad (4.5.3)$$

ここで, α_c : 輸送容器の加速度

W_c : 輸送容器の重量

g : 重力の加速度

である。

(2) 円板の荷重一変位関係

輸送容器円板構造の荷重一変位関係は3つの理論に別けることができる。

- (i) 完全固定円板の曲げ変形理論
- (ii) 単純支持円板の曲げ変形理論
- (iii) 完全固定円板の膜変形理論
- (a) 完全固定円板の曲げ変形理論

第4.5.1図に示すように、完全固定円板の荷重一変位関係式は、無次元荷重と無次元変位の式で表わすと次式となる。

$$P^* = \begin{cases} 1 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2; & U \leq U^* \\ \beta_1 + \beta_2 U + \beta_3/U; & U > U^* \end{cases} \quad (4.5.4)$$

$$P^* = P/P_\ell \quad (4.5.5)$$

$$U = \delta/t^* \quad (4.5.6)$$

$$U^* = \frac{1}{2} \left(1 + \ln \frac{R}{\zeta} \right) \quad (4.5.7)$$

ここで, P^* : 無次元荷重

U^* : 無次元変位

P : 荷重

P_ℓ : 極限荷重

R : 円板の半径

t^* : 多層円板の等価厚さ

δ : 円板の中心変位

ζ : 速度曲率の不連続点

であり, α_1 , α_2 , β_1 , β_2 および β_3 はそれぞれ次式で与えられる。

$$\alpha_1 = \frac{\left(1+2\ln\frac{R}{\zeta}\right)}{\left(2+\ln\frac{R}{\zeta}\right)\left(1+\ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.5.8a)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\left(1+3\ln\frac{R}{\zeta}\right)}{3\left(2+\ln\frac{R}{\zeta}\right)\left(1+\ln\frac{R}{\zeta}\right)^2} \quad (4.5.8b)$$

$$\beta_1 = \frac{3+\ln\frac{R}{\zeta}}{2\left(2+\ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.5.8c)$$

$$\beta_2 = \frac{2\left(1+2\ln\frac{R}{\zeta}\right)}{\left(2+\ln\frac{R}{\zeta}\right)\left(1+\ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.5.8d)$$

$$\beta_3 = \frac{1+\ln\frac{R}{\zeta}}{12\left(2+\ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.5.8e)$$

また、 ζ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} 1 - \frac{2a}{3\zeta} \left(1 + \ln \frac{R}{\zeta}\right) = 0 \quad ; \frac{a}{R} \leq 0.606 \\ 1 - \left(\frac{a}{\zeta}\right)^2 \left(1 + 2\ln \frac{R}{\zeta}\right) + \frac{2}{3} \left(1 + \ln \frac{R}{\zeta}\right) = 0; \frac{a}{R} > 0.606 \end{array} \right\} \quad (4.5.9)$$

ここで、 a ：荷重作用半径

である。さらに、 P_ℓ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} P_\ell = 2\pi M_p \frac{A}{B} \\ A = 2 + \ln \frac{R}{\zeta} \\ B = \begin{cases} 1 + \ln \frac{R}{\zeta} - \frac{2a}{3\zeta}; \zeta \geq a \\ \frac{1}{2} + \ln \frac{R}{a} - \frac{\zeta^2}{6a^2}; \zeta < a \end{cases} \end{array} \right\} \quad (4.5.10)$$

(b) 単純支持円板の曲げ変形理論

第4.5.2図に示すように、単純支持円板の無次元荷重と無次元変位は次式で与えられる。

$$P^* = \begin{cases} 1 + \frac{4}{3}U^2; U \leq 0.5 \\ 2U + \frac{1}{6U}; U > 0.5 \end{cases} \quad (4.5.11)$$

また、 P_ℓ は次式で与えられる。

$$P_e = \frac{2\pi M_p}{1 - \frac{2a}{3R}} \quad (4.5.12)$$

(c) 完全固定円板の膜変形理論

第4.5.3図に示すように、完全固定円板の膜変形理論に基づく荷重一変位関係式は次式で与えられる。

$$P = \frac{2\pi N_p \delta}{\frac{1}{2} + \ln \frac{R}{a}} \quad (4.5.13)$$

(3) 等価板厚と等価応力

多層円板の等価板厚と等価応力を、三層構造を例にとり力のつり合い条件から求めるため、次の仮定をする。

- (i) 円板は第4.5.4図に示すように外側壁、中間壁および内側壁の三層構造である。
- (ii) 各層は異なる圧縮流れ圧力と引張り流れ応力をそれぞれ有する。

三層構造板の断面降伏モーメントおよび断面降伏荷重は次式で与えられる。

$$M_p = \frac{\sigma^*}{4} (t^*)^2 \quad (4.5.14)$$

$$N_p = \sigma^* t^* \quad (4.5.15)$$

$$N_p = (\sigma_1)_T t_1 + (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.5.16)$$

ここで、 M_p : 断面降伏モーメント

N_p : 断面降伏荷重

t^* : 等価板厚

t_1 : 外側壁の厚さ

t_2 : 中間壁の厚さ

t_3 : 内側壁の厚さ

σ^* : 等価応力

σ_1 : 外側壁の応力

σ_2 : 中間壁の応力

σ_3 : 内側壁の応力

である。応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 の () 外の添字 T は引張り流れ応力, C は圧縮流れ応力を示すものとする。(4.5.14) および (4.5.15) 式から等価板厚と等価応力はそれぞれ次式となる。

$$t^* = \frac{4M_p}{N_p} \quad (4.5.17)$$

$$\sigma^* = \frac{N_p}{t^*} \quad (4.5.18)$$

第4.5.4図に示すように、3つの応力状態に応じた断面降伏モーメントとを求める。

(a) 領域 A (中立点が外側壁に有る場合)

応力のつり合いは第 4.5.4 (a) 図から次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_c t = (\sigma_1)_T (t_1 - t) + (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.5.19)$$

ここで, t : 引張り応力と圧縮応力の不連続面（中立面）の外側壁表面からの距離である。不連続点は (4.5.19) 式から次式となる。

$$t = \frac{(\sigma_1)_T t_1 + (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3}{(\sigma_1)_c + (\sigma_1)_T} \quad (4.5.20)$$

この場合の断面降伏モーメントは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_p &= \frac{t_2}{2} (\sigma_1)_c + \frac{1}{2} (t_1 - t)^2 (\sigma_1)_T \\ &+ t_2 \left(t_1 - t + \frac{t_2}{2} \right) (\sigma_2)_T + t_3 \left(t_1 - t + t_2 + \frac{t_3}{2} \right) (\sigma_3)_T \end{aligned} \quad (4.5.21)$$

(4.5.21) 式は t が t_1 より小さい場合に成立し, その条件は次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_c t_1 > (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.5.22)$$

(b) 領域 B (中立点が中間壁に有る場合)

応力のつり合いは第 4.5.4 (b) 図から次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_c t_1 + (\sigma_2)_c (t - t_1) = (\sigma_2)_T (t_1 + t_2 - t) + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.5.23)$$

従って不連続点は (4.5.23) 式から次式となる。

$$t = \frac{-(\sigma_1)_c t_1 + (\sigma_2)_c t_1 + (\sigma_2)_T (t_1 - t_2) + (\sigma_3)_T t_3}{(\sigma_2)_c + (\sigma_2)_T} \quad (4.5.24)$$

この場合の断面降伏モーメントは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_p &= t_1 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) (\sigma_1)_c + \frac{1}{2} (t - t_1)^2 (\sigma_2)_c \\ &+ \frac{1}{2} (t_1 + t_2 - t)^2 (\sigma_2)_T + t_3 \left(t_1 + t_2 - t + \frac{t_3}{2} \right) (\sigma_3)_T \end{aligned} \quad (4.5.25)$$

(4.5.25) 式は t が $(t_1 + t_2)$ よりも小さい場合に成立し, その条件は次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_c t_1 + (\sigma_2)_c t_2 > (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.5.26)$$

(c) 領域 C (中立点が内側壁に有る場合)

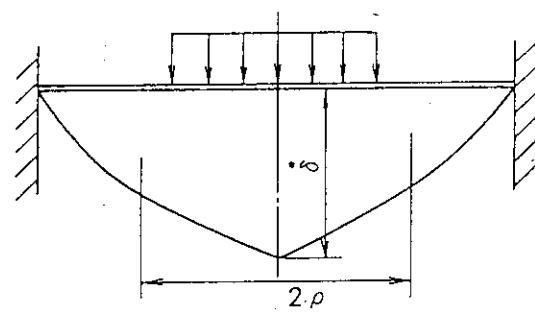
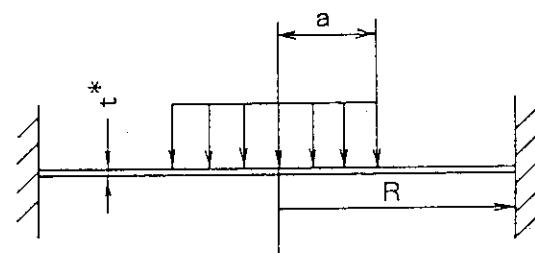
応力のつり合いは第 4.5.4 (c) 図から次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_c t_1 + (\sigma_2)_c t_2 + (\sigma_3)_c (t - t_1 - t_2) = (\sigma_3)_T (t_1 + t_2 + t_3 - t) \quad (4.5.27)$$

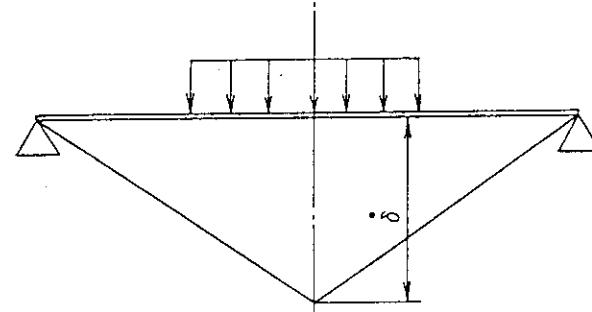
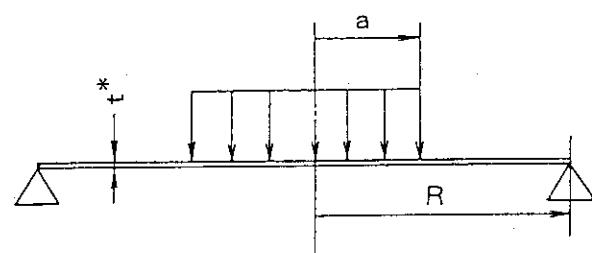
従って不連続点は (4.5.27) 式から次式となる。

$$t = \frac{-(\sigma_1)_c t_1 - (\sigma_2)_c t_2 + (\sigma_3)_c (t_1 + t_2) + (\sigma_3)_T (t_1 + t_2 + t_3)}{(\sigma_3)_c + (\sigma_3)_T} \quad (4.5.28)$$

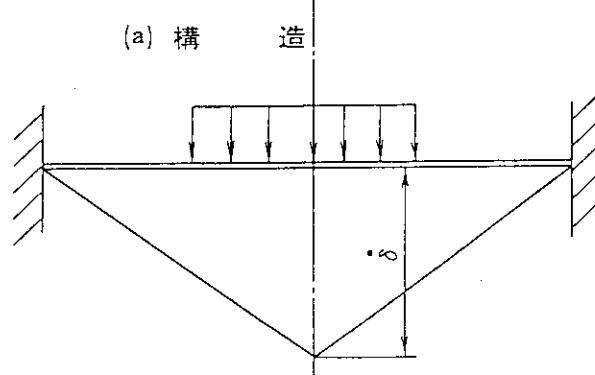
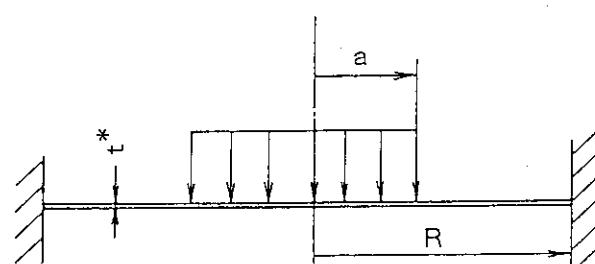
この場合の断面降伏モーメントは次式で与えられる。



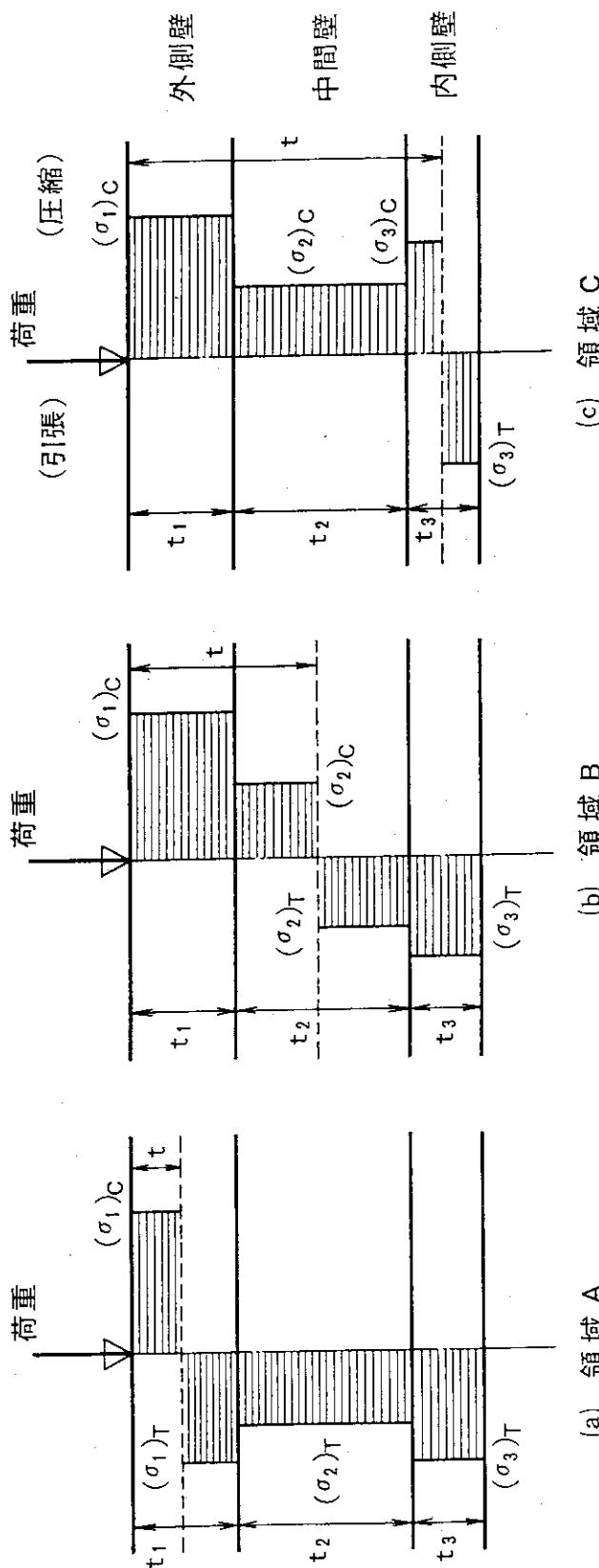
第4.5.1図 完全固定円板



第4.5.2図 単純支持円板



第4.5.3図 膜変形円板



第4.5.4図 三種類の応力状態

$$M_p = t_1 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) (\sigma_1)_c + t_2 \left(t - t_1 - \frac{t_2}{2} \right) (\sigma_2)_c + \frac{1}{2} (t - t_1 - t_2)^2 (\sigma_3)_c + \frac{1}{2} (t_1 + t_2 + t_3 - t)^2 (\sigma_3)_c \quad (4.5.29)$$

(4.5.29) 式は t が $(t_1 + t_2)$ よりも大きい場合に成立し、その条件は次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_c t_1 + (\sigma_2)_c t_2 < (\sigma_3)_c t_3 \quad (4.5.30)$$

(4) 貫通条件

三層円板の容器壁が破壊せん断応力を越えて貫通する条件は次式で与えられる。

$$P = \pi d (\tau_1 t_1 + \tau_2 t_2 + \tau_3 t_3) \quad (4.5.31)$$

ここで、 P : 荷重

d : 貫通棒の直径

τ_1 : 外側壁の破壊せん断応力

τ_2 : 中間壁の破壊せん断応力

τ_3 : 内側壁の破壊せん断応力

$$\left. \begin{array}{l} \tau_1 = 0.6 (\sigma_1)_u \\ \tau_2 = 0.6 (\sigma_2)_u \\ \tau_3 = 0.6 (\sigma_3)_u \end{array} \right\} \quad (4.5.32)$$

$(\sigma_1)_u$: 外側壁の破壊応力

$(\sigma_2)_u$: 中間壁の破壊応力

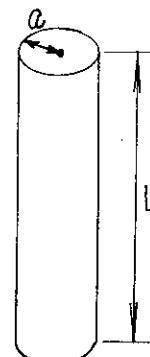
$(\sigma_3)_u$: 内側壁の破壊応力

(5) 貫通棒の荷重-変位関係

貫通棒の形状は右図形状で示すごとく円筒棒

であり、長さ、半径 a で形状が与えられる。

貫通棒の荷重と応力 (σ_b) の関係は次式で与えられる。



第 4.5.5 図 貫通棒の形状

$$P_b = \pi a^2 \cdot \sigma_b \quad (4.4.33)$$

式 (44) の応力と歪 (ε) の関係は材料テーブルより求まる。そこで、貫通棒の変位 (δ_b) は次式より計算できる。

$$\varepsilon_b = \frac{\delta b}{L} \quad (4.4.34)$$

ここで、 L : 貫通棒の長さ

a : 貫通棒の半径

σ_b : 貫通棒の応力

ε_b : 貫通棒の歪

4.5.3 入力データ

計算プログラム PUNCTURE の入力データを第 4.5.1 表に示す。

第 4.5.1 表 PUNCTURE の入力データ

1. タイトルカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	'TITLE' と入力	5 A 1
6 - 10	ブランク	5 X
11 - 70	タイトル (ジョブの内容)	70 A 1

2. 形状データカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 8	計算モデルの種類 'FIXED-B': 完全固定の円板の曲げ変形 'SIMPLE-B': 単純支持の円板の曲げ変形 'FIXED-M': 完全固定の円板の膜変形	2 A 4
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	円板の半径 (mm)	E 10.0
21 - 30	貫通棒の半径 (mm)	E 10.0
31 - 40	貫通棒の長さ (mm)	E 10.0
41 - 50	三層円板の外側壁の板厚 (mm)	E 10.0
51 - 60	三層円板の中間壁の板厚 (mm)	E 10.0
61 - 70	三層円板の内側壁の板厚 (mm)	E 10.0

3. 解析データカード

カラム	内 容	フォーマット
1 - 8	'ANALYSIS' と入力	2 A 4
9 - 10	ブランク	2 X
11 - 20	輸送容器重量 (kg)	E 10.0
21 - 30	落下高さ (mm)	E 10.0
31 - 40	計算ステップの変位増分 (mm) ブランクの場合 1.0 m)	E 10.0
41 - 45	ブランク	5 X
46 - 49	計算結果の図形出力オプション 'PLOT': 図形出力を行う	A 4
50	ブランク ブランク: 図形出力を行なわない。	1 X
51 - 60	三層円板の外側壁の破壊せん断応力 (kg/mm ²)	E 10.0
61 - 70	三層円板の中間壁の破壊せん断応力 (kg/mm ²)	E 10.0
71 - 80	三層円板の内側壁の破壊せん断応力 (kg/mm ²)	E 10.0

4. 円板材料の降伏応力

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	'PLATE' と入力	A 5
6 - 7	ブランク	5 X
11 - 20	三層円板の外側壁の降伏応力 (kg/mm ²)	E 10.0
21 - 30	三層円板の中間壁の降伏応力 (kg/mm ²)	E 10.0
31 - 40	三層円板の内側壁の降伏応力 (kg/mm ²)	E 10.0

5. 応力-ひずみデータ数

カラム	内 容	フォーマット
1 - 4	材料の応力-ひずみデータの種類表示 'SIG 1': 三層円板の外側壁の応力-ひずみデータの入力ラベル 'SIG 2': 三層円板の中間壁の応力-ひずみデータの入力ラベル 'SIG 3': 三層円板の内側壁の応力-ひずみデータの入力ラベル 'SIGT': 貫通棒の応力-ひずみデータの入力ラベル ブランク	A 4
5 - 10		6 X
11 - 15	応力-ひずみデータの数	15

6. 応力-ひずみデータ

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	ひずみ(1)	E 10.0
11 - 20	応力(1)	E 10.0
21 - 30	ひずみ(2)	E 10.0
31 - 40	応力(2)	E 10.0
41 - 50	ひずみ(3)	E 10.0
51 - 60	応力(3)	E 10.0
61 - 70	ひずみ(4)	E 10.0
71 - 80	応力(4) (必要なだけ繰返す。)	E 10.0

4.6 DYNA3D⁽⁸⁾

4.6.1 概 要

DYNA 3 D は LLNL の Hallquist によって開発された、有限要素法による 3 次元非線形動的計算プログラムである。DYNA 3 D の特徴のうち主要なものをあげると次のようになる。

- (1) ベクトル計算機向のアルゴリズムを採用している。
- (2) 陽解法によって計算速度の向上を計っている。
- (3) 多数の材料モデルが用意されている。
- (4) スライドラインの処理が完備している。
- (5) 図化処理プログラムが用意されている。

DYNA 3 D は常に新しい機能が追加されている。このコードシステムに採用されたものは 1988 年版（第 4 改定版）である。

(1) 物性モデル

現在、組み込まれている物性モデルを以下に示す。

- 弾性 (elastic)
- 異方性弾性 (orthotropic elastic)
- 移動/等方硬化塑性 (kinematic/isotropic plasticity)
- 熱弾塑性 (thermoelastoplastic)
- 土とクラッシャブル・フォーム (soil and crushable foam)
- 線形粘弾性 (linear viscoelastic)
- ゴム (rubber)
- 高性能爆薬 (high explosive burn)
- 偏差応力のない流体 (hydrodynamic without deviatoric stress)
- 流体型弾塑性 (elastoplastic hydrodynamic)
- 温度依存性流体型弾塑性 (temperature dependent elastoplastic hydrodynamic)
- 等方弾塑性 (isotropic elastoplastic)
- 破壊モデルのある等方弾塑性 (isotropic elastoplastic with failure)
- 破壊モデルのある土とクラッシャブル・フォーム (soil and crushable fram with failure)
- Johnson/Cook 塑性モデル (Johnson/Cook plasticity model)
- 擬似 TENSOR 幾何モデル (pseudo TENSOR geological model)
- 弾塑性クラック (elastoplastic with fracture)
- 指数則等方塑性 (power law isotropic plasticity)
- 歪速度依存塑性 (strain rate depndent plasticity)
- 剛体 (rigid)
- 熱異方性 (thermal orthotropic)
- 複合材損傷モデル (composite damage model)
- 12 曲線を用いた熱異方性 (thermal orthotropic with 12 curves)

- 部分線形等方塑性 (piecewise linear isotropic plasticity)
- 非粘性 2 不变量土質キャップ (invisid, two invariant geologic cap)
- 異方性クラッシャブル・モデル (orthotropic crushable model)
- Moonsy-Rivlin ゴム (Moonsy-Rivlin rubber)
- 合成塑性 (Resultant plasticity)

(2) 状態方程式

流体様物質では偏差応力のみが決定される。圧力は 10 種の状態方程式のうちの 1 つから決められる。状態方程式としては、次のものが用意されている。

- 線形多項式 (linear polynomial)
- JWL 高性能爆薬 (JWL high explosive)
- Sack "Tuesday" 高性能爆薬 (Sack "Tuesday" high explosive)
- Gruneisen
- 多項式の比 (ratio of polynomials)
- エネルギー開放のある線形多項式 (linear polynominal with energy deposition)
- 高性能爆薬における着火と反応の進展 (ignition and growth of reaction in HE)
- テーブル型コンパクション (tabulated compaction)
- テーブル型 (tabulated)
- TENSOR 細孔崩壊 (TENSOR pore collapse)

(3) 使用要素

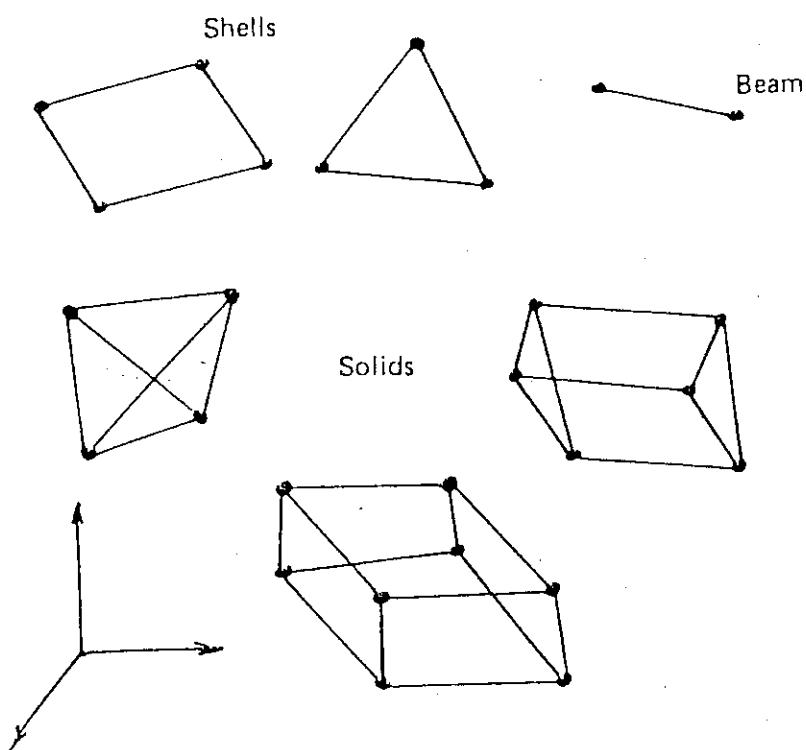
第 4.6.1 図に示す要素群が、現在使用可能である。構造要素としては、Hughes-Liu の方形断面およびシェル、Belytschko-Tsay のシェルおよびビームが組み込まれている。

Belytschko およびその共同研究者の研究に基づく 3 接点シェル要素が組み込まれた。(注: つぶれた四角形シェル要素は面外剪断のせいでロック現象を起こす)

三次元平面応力構成則ルーチンがシェル要素のために組み込まれた。このルーチンでは、シェル中立面に垂直な応力成分がゼロになるように応力テンソルを更新する。

シェルの板厚方向各積分点について、それぞれサブルーチンがコールされる。8 節点ソリッド要素は、Flanagan と Belytschko による厳密な体積積分による 1 点積分、すなわち応力一定の定式化がとられている。シェルおよびソリッド要素ではアワーグラス粘性および剛性により、ゼロ・エネルギーでの変形モードを制御している。

8 節点ソリッド・シェルが組み込まれているが使用は注意を要する。我々はそれらの定式化を試みたが、うまくいかどうかは分からないので注意して使用すべきである。全ての要素はほぼ 100% ベクトル化されている。全ての要素クラスは、剛体の一部に含まれることができる。剛体の定式化は、興味ある人のために文献に報告されている。剛体節点と同様に集中マスおよびバネを含めることができる。



第4.6.1図 DYNA 3 D の使用要素群

(4) ステイディング・インターフェース

三次元の接触・衝突のアルゴリズムは NIKE 2 D での二次元アルゴリズムの拡張である。現在の版では、インターフェース面の片方をマスター面、もう一方をスレーブ面として識別される。各々の面は、3または4節点のセグメントとして定義され、マスターもしくはスレーブ・セグメントと呼ばれ、スレーブおよびマスター面上の節点が、相対的にすべることになる。接触・衝突のアルゴリズムの入力として、このマスターおよびスレーブ面のリストが定義する必要がある。單一面接触のアルゴリズムではスレーブ面のみ定義し、各ステップで面が透過していないか確かめられる。内部ロジックがそれぞれのスレーブ節点に対応するマスター・セグメント（およびその逆でマスター節点に対応するスレーブ・セグメント）を識別し、個々の時間ステップでそれぞれの面が互いにすべることによってこの情報は更新される。現在、次の9種のインターフェースが使える。

1. スライドのみ
2. ギャップ入りスライド
3. 結合
4. 単一面接触
5. 離散化節点衝突面
6. 面に統合される離散化節点
7. シェル面に結合するシェル辺
8. 面に点溶接される節点

9. 破損入り結合面

相互摩擦は 2, 4, 5, 8 および 9 番目について使用できる。このうち結合とスライドのみのロジックは、DYNA 2D で使われている二次元のアルゴリズムと同様である。一般のオプションと違って、この両者の内部的取り扱いは対称でない。従ってより粗く分割された面がマスター面として選ばねばならない。なお、インターフェースの数、型や方向に関する制限はロジック上ではない。

4.6.2 計算式

(1) 概要

DYNA 3D は、弾塑性大変形問題を取り扱う有限要素プログラムであるため、その基礎理論は、連続体力学における 3 つの保存則を満足する系全体の支配方程式に、大変形問題を定式化するため亜弾性理論及び材料の非線形性、すなわち、弾塑性構成式を取り扱うための歪硬化モデルを組合せて成り立っている。

この章では、上記の保存則と関連する境界条件について述べたあとで、亜弾性理論による応力増分の定式化と輸送容器落下解析に使用した等方硬化弾塑性材料モデルについて概説するが、次節以下で使用する時間依存の連続体の運動表示についてここで定義することとする。

第 4.6.2 図に示す様に、初期状態 ($t = 0$)において、連続体 B_0 の中の任意の構成質点の座標値を (a_1, a_2, a_3) で示すものとする。

この連続体 B_0 が $t=t$ 時刻の時 b に移動し、 b 内の任意の構成質点が座標 (x_1, x_2, x_3) を持ったとする。

この運動を Lagrange 形式で表現すると、

$$x_i = x_i(a_\alpha, t) \quad (4.6.1)$$

となる。ここで a_α ($\alpha = 1, 2, 3$) 初期座標 ($t = 0$)

x_i ($i = 1, 2, 3$) 時刻 $t=t$ の座標

であるので $t=0$ のときの初期座標は、(4.6.1) 式で表示すると、

$$x_i(a_\alpha, 0) = a_\alpha \quad (4.6.2)$$

と表わすことができる。また初期速度は、

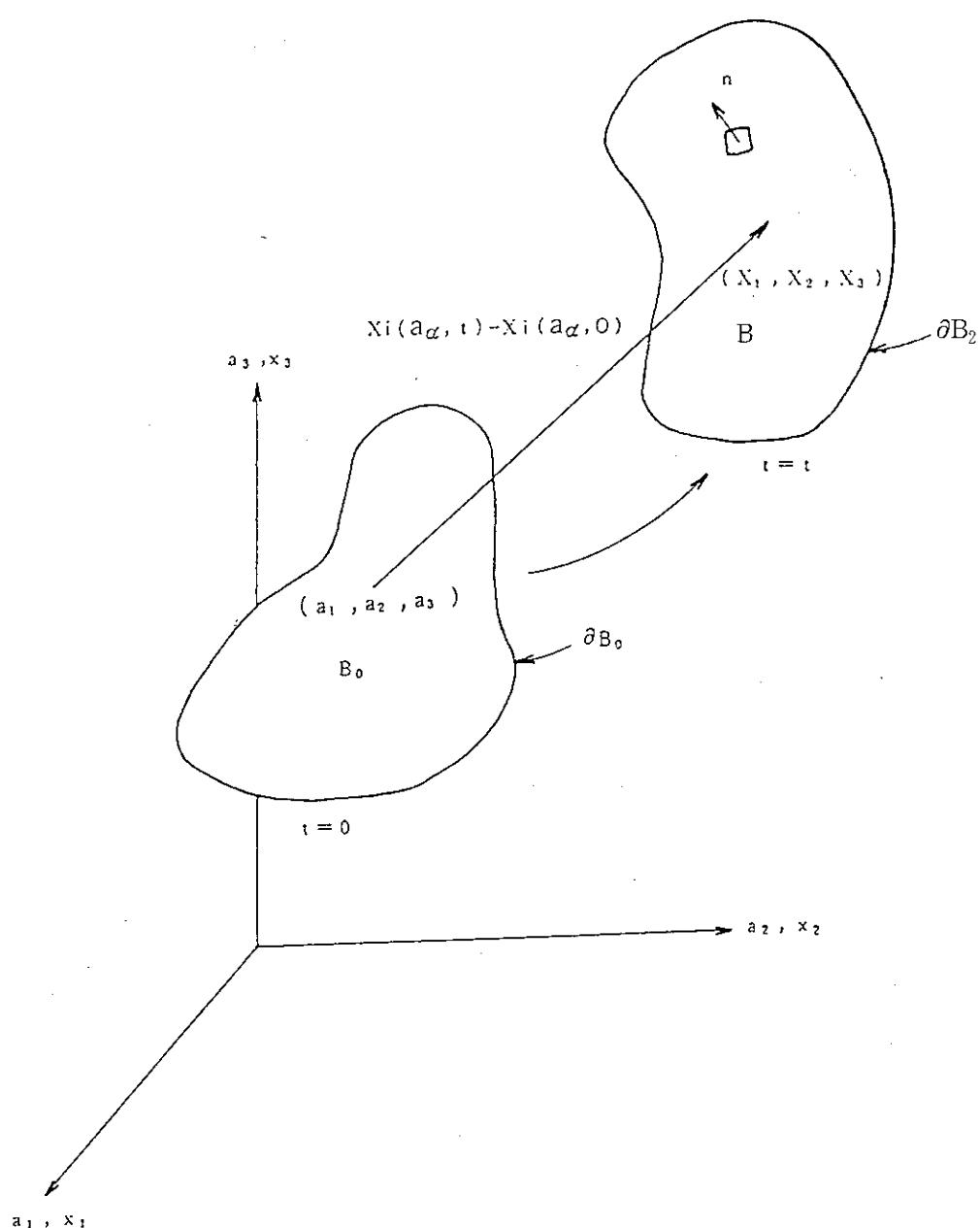
$$\dot{x}_i(a_\alpha, 0) = v_i(a_\alpha) \quad (4.6.3)$$

と表示することができる。

また、この時の移動量は

$$x_i(a_\alpha, t) - x_i(a_\alpha, 0) \quad (4.6.4)$$

で表現することができる。



第4.6.2図 連続体の運動表示

(2) 保存則と境界条件

よく知られている様に連続体力学には次の様な3つの保存則が存在する。

- (a) 運動量保存則（ニュートンの運動法則）
- (b) 質量保存則（連続の式）
- (c) エネルギー保存則

以下にこれらにつき、簡単に説明する。

(1) 運動量保存則

境界 ∂B_1 上での力の境界条件

$$\sigma_{ij}n_{ij} = t_i(t) \quad (4.6.5)$$

と、境界 ∂B_2 上での変位の境界条件

$$x_i(a_a, t) = D_i(t) \quad (4.6.6)$$

さらに、 $x_i^+ = x_i^-$ における内部の境界 ∂B_3 にそっての接触の不連続性

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \quad (4.6.7)$$

を満足する運動量の平衡方程式は、

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (4.6.8)$$

で表わすことができ、これを正確に解くことにより運動量が保存されている。

ここで、 σ_{ij} : Cauchy

$$\sigma_{ij,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$$

ρ : $t=t$ での密度

f_i : 単位体積あたりの物体力

\ddot{x}_i : 加速度であり、 $\left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial t^2} \right)$ を意味する。

n_j : 境界 ∂B に垂直な外向き単位法線ベクトル

である。

また、(4.6.5), (4.6.6) および (4.6.7) における境界上の物理量は

$t_i(t)$: 指定された応力の時刻歴

$D_i(t)$: 指定された変位の時刻歴

$\sigma_{ij}^+, \sigma_{ij}^-$: 接触面の内外の応力

を示している。

(2) 質量保存則

質量保存則は、よく知られている様に、質量が変化しないことを定義するものであり、

$$\int \rho_t dv_t = M \quad (4.6.9)$$

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (4.6.10)$$

である。密度で表現すると

$$\rho_t v = \rho_0 \quad (4.6.11)$$

である。

ここで, ρ_0 : 初期密度、

ρ_t : $t=t$ での密度

v : 相対体積 $\left(v = \frac{v_t}{v_0} = \frac{\rho_0}{\rho_t} \right)$

v_t : $t=t$ での体積

M : 質量

(3) エネルギー保存則

内部エネルギーは、次の内部エネルギー変化率を時間に沿し積分することにより得られる。

$$\dot{E} = v s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} - (p + q) \dot{v} \quad (4.6.12)$$

ここで、 s_{ij} 及び P はそれぞれ偏差応力と圧力を示し、

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q) \delta_{ij} \quad (4.6.13)$$

$$P = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} - q = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} - q \quad (4.6.14)$$

で定義される。

また、 E : 内部エネルギー

q : 体積粘性項

δ_{ij} : クロネッカーデルタ $i=j$ のとき $\delta_{ij}=1$
 $i \neq j$ のとき $\delta_{ij}=0$

$\dot{\varepsilon}_{ij}$: ひずみ速度テンソル

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

$$v_i : \text{速度}, \quad v_i = \frac{\partial x_i}{\partial t}$$

エネルギー保存則は、この内部エネルギーと運動エネルギーの和が一定であることにより満足される。

(3) 大変形

大変形問題を取扱う場合、弾性論に基づく微小変形理論では、ひずみが変位に対応せず、有

限変形理論による定式化が必要となる。

通常の静的大変形問題では、このひずみ-変位関係式の非線形性を有限変形理論に基づいて増分形式で定式化することにより、取扱っているが、DYNA 3D では、ひずみ速度を用いて動的な定式化を行い、このひずみ速度に対する応力速度を Truesdell の亜弾性理論により求め、大変形問題を取扱っている。

ここでは、これらのひずみ速度と応力速度の定式化について述べ、応力増号の取扱いについて解説する。

今、ある Lagrange 領域内のとなりあう構成質点の座標値を x_i , $x_i + dx_i$ と表示し、 x_i の点の速度を v_i とすると、2 点の速度差は

$$dv_i = \frac{dv_i}{dx_j} dx_j \quad (4.6.15)$$

となる。この偏導関数 $\partial v_i / \partial x_j$ は x_i 点において計算する。

今、

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.6.16)$$

とおいて、

変化速度テンソル V_{ij} と回転速度テンソル（スピントンソル） Ω_{ij} を次のように定義する。

$$V_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.6.17)$$

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.6.18)$$

V_{ij} は対称であり、 Ω_{ij} は反対称である。すなわち、

$$V_{ij} = V_{ji}, \quad \Omega_{ij} = -\Omega_{ji} \quad (4.6.19)$$

である。(4.6.17), (4.6.18) に d_i をかけると

$$V_{ij} dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \varepsilon_{ij} \quad (4.6.20)$$

$$\Omega_{ij} dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \omega_{ij} \quad (4.6.21)$$

となり、それぞれ、ひずみテンソル、回転テンソルを表すことになる。

従って、(4.6.17) 式はそのままひずみ速度を表わし、

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.6.22)$$

書ける。

応力速度の成分がひずみ速度の成分の同次線形関数であれば、応力に依存した構成マトリクス C_{ijkl} を用いて、

$$\dot{\sigma}_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl} \cdot \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (4.6.23)$$

と表現できる。ここで σ_{ij} は回転成分をのぞいた応力速度で、通常これを Jaumann Stress Rate と呼んでいる。

回転成分を含めた応力速度 $\dot{\sigma}_{ij}^{\nabla}$ は Truesdell の亜弾性理論より

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij}^{\nabla} + \sigma_{ik}\Omega_{kj} + \sigma_{ij}\Omega_{ki} \quad (4.6.24)$$

で定義され、これに dt をかけたものが応力増分となる。

従って、 $t+dt$ 時刻での応力 $\sigma_{ij}(t+dt)$ は、

$$\sigma_{ij}(t+dt) = \sigma_{ij}(t) + \dot{\sigma}_{ij}^{\nabla} dt \quad (4.6.25)$$

と表現できる。

以上のように、動的大変形問題をひずみ速度と回転速度により取扱うので、増分形の定式化に比べると、大変速い計算が可能となる。

(4) 弹塑性モデル

弾塑性材料の構成方程式は通常、一軸引張圧縮実験により得られた応力ひずみ曲線により与えられるが、多軸応力場により得られたこの曲線も一軸等価な曲線に換算されて用いられるので、一般に相当応力-相当ひずみ曲線 ($\sigma-\varepsilon$ Curve) と、呼んでおり、これを材料の構成方程式として用いる場合が多い。

この相当ひずみ ε の中には弾性成分 ε_{ij}^e と塑性成分 ε_{eff}^p が含まれており、降伏応力限度内では、この曲線の勾配、 $\sigma/\varepsilon_{ij}^e$ を縦弾性係数 E (ヤング率) と呼び、降伏応力を越えた後の曲線の勾配 $\sigma/(\varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{eff}^p)$ と接続係数と呼び E_t で表示する。

また降伏応力を越えた後の $\sigma-\varepsilon$ 曲線を $\sigma-\varepsilon_{eff}^p$ 曲線に置きなおした時のこの曲線の勾配 $\sigma/\varepsilon_{eff}^p$ をひずみ硬化係数 E_p と呼びこれら係数間には、次の様な関係式が成立する。

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (4.6.26)$$

これを用いて降伏応力を表示すると

$$\sigma_y = \sigma_o + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p \quad (4.6.27)$$

である。ここで σ_o は $\varepsilon_{eff}^p = 0$ の時の降伏応力をあらわし、 β は等方硬化の場合 $\beta = 1$ 、移動硬化を表す場合 $\beta = 0$ ととられる硬化モデルのパラメータである。

DYNA 3D では Krieg と Key により定式化された硬化モデルを用いて、Von Mises の降伏条件に従い、降伏関数を次の様に定義している。

$$\phi = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0 \quad (4.6.28)$$

ここで σ_y は (4.6.27) 式の降伏応力を示し、 ξ_{ij} は、次式で示される偏差応力成分である。

$$\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij} \quad (4.6.29)$$

(4.6.29) 式で s_{ij} は等方硬化の偏差応力成分を示し、 α_{ij} は移動硬化による偏差成分の増減量を示すパラメータである。今回の輸送容器落下解析に使用した等方硬化モデルでは $\alpha_{ij} = 0$ 、す

なわち $\xi_{ij} = s_{ij}$ として取扱っている。

また降伏応力は、各時刻ステップごとに次々と変化するので、ひずみ速度により、 ε_{eff}^p を求めたため、次の様に定式化されている。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^e \quad (4.6.30)$$

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt \quad (4.6.31)$$

DYNA 3D では、以上のひずみ硬化モデルを時間に関して陽的に離散化して取扱っている。

(5) 離散化

前章において一般連続体力学の基礎方程式と、大変形弾塑性問題の取り扱いについて述べたが、本章では、これらの方程式を有限要素法により、離散化して計算をすすめる方法について述べる。

有限要素法の定式化には、変位法と応力法ならびにこれらを組合せたハイブリッド法があるが、定式化が容易なことから、現在では変位法を主体とした離散化がよく行われている。

DYNA 3D においても、同様な理由から、空間の離散化に変位法が用いられているので、この方法について以下に簡単な説明を行う。

まず、対象とする連続体を任意の数の要素に分割し、ある要素内の変位場を仮定する変位関数 $\{u\}$ を定める。

次に、微小変形理論のひずみ-変位線形関係式に従い、次の様にひずみ場を求める。

$$\{\varepsilon\} = [B_L] \{u\} \quad (4.6.32)$$

ここで $[B_L]$ は、線形ひずみ-変位関係を定める作用素マトリクスである。また弾性範囲での応力-ひずみ関係を示す $[D_L]$ マトリクスを用いて材料の構成方程式を

$$\{\sigma\} = [D_L] \{\varepsilon\} \quad (4.6.33)$$

で定義し、これらを用いて次の様に剛性マトリクス $[K_L]$ を作成する。

$$[K_L] = \int [B_L]^T [D_L] [B_L] dV_e \quad (4.6.34)$$

通常の線形静解析を行う場合、この $[K_L]$ を用いて次の平衡方程式

$$\{P\} = [K_L] \{u\} \quad \{P\} = \text{荷重ベクトル} \quad (4.6.35)$$

により求め、これを (4.6.32) 式に代入して $\{\varepsilon\}$ み求め、さらにこの $\{\varepsilon\}$ を (4.6.33) 式に代入することにより最終的に $\{\sigma\}$ を求めるものである。

非線形静解析においては、(4.6.32) 式の $[B_L]$ マトリクスに有限変形理論に従う非線形ひずみ-変位関係のマトリクス $[B_N]$ が加わり

$$\{\varepsilon\} = [B_L + B_N] \{u\} \quad (4.6.36)$$

の様に拡張される。また材料の非線形性（弾塑性問題）においても同様に

$$\{\sigma\} = [D_L + D_N] \{\epsilon\} \quad (4.6.37)$$

の様な増分型の定式化がなされ、従って剛性マトリクスも

$$[K] = \int_{ve} [B_L + B_N]^T [D_L + D_N] [B_L + B_N] dv_e = [K_L] + \sum_{all} [K_N] \quad (4.6.38)$$

となる多くの非線形剛性マトリクスが導かれ、これを各積分点ごとに解かなければならない。

さらに非線形動解析となると、上記の各ベクトルが時間の関数として表現され、時間増分ごとの平衡方程式を Newmark の β 法による陰的スキームや中央差分法による陽的スキームを用いて解いてゆくことになる。

DYNA 3D では、これらの変位法の手順を大巾に改良し、増分型の定式化を行わないで計算を進めている。

まず、ひずみ変位関係式においては $[B_L]$ のみ作成し、その非線形性はひずみ速度の積分により Update する。また材料の構成関係は、ひずみ速度に対する応力速度を用いて応力の Update を行い、Update された応力と、ひずみ速度により得られる相当塑性ひずみによって降伏を判定したあと、偏差応力成分の修正を行うことによって材料の非線形性を考慮し、 $[D_N]$ マトリクスというものは作成しない。

従って非線形の剛性マトリクスが作成されないので、

$$\{F\} = \sum_e [L]^T \int_{ve} [B]^T \sigma dv_e \quad (4.6.39)$$

で表現される内力を計算して、これを変える。対象とする問題は動的であるので、この $\{F\}$ を用いて

$$[M] \{a\} + \{F\} = \{P\} \quad (4.6.40)$$

で表わされる運動方程式を陽的中央差分法によって解いている。

次節以下では、上記 (4.6.32) 式の $[B_L]$ マトリクス作成に関するアイソパラメトリック要素の空間離散化と、(4.6.39) 式等で必要となる体積積分に対する 1 積分点法による取扱いについて述べ、1 積分点法を採用した場合に発生するアワーグラスマードの処理方法について解説する。最後に (4.6.40) 式の時間積分に対する陽的中心差分法による取扱いと、時間増分値の求め方について説明する。

(6) 離散化と積分

DYNA 3D における空間の離散化は、8 節点アイソパラメトリック 6 面要素 1 種のみによって行われ、この要素の体積積分には、1 積分点スキーム用を用いた次数低減積分法を採用しており、DYNA 3D の計算効率の向上の 1 因となっている。

ここでは、これらの離散定式化と、体積積分の取扱いについて述べる。

(7) 離散化

ある時刻 t における連続体の任意の位置にある点の座標値は、離散化された質点の座標 $x_i^j(t)$ と、形状関数 ϕ_j を用いて、次式で表わすことができる。(第 4.6.3 図)。

$$\mathbf{x}_i(a_i(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{x}_i^j(t) \quad (4.6.41)$$

この形状関数 ϕ_j は、第 4.6.3 図に示す。局部座標系 (ξ, η, ζ) 上に定義される要素内の任意場所の関数で、節点座標 (ξ_j, η_j, ζ_j) を用いて次の様に定義される。

$$\phi_j = \frac{1}{8}(1 + \xi \xi_j)(1 + \eta \eta_j)(1 + \zeta \zeta_j) \quad (4.6.42)$$

また、局部座標系は、座標位置の簡単化のためそれぞれ

$$\begin{aligned} -1 &\leq \xi \leq 1 \\ -1 &\leq \eta \leq 1 \\ -1 &\leq \zeta \leq 1 \end{aligned} \quad (4.6.43)$$

の範囲が定義されている。

この形状関数を用いて、ひずみ変位関係式を導くためには、局部座標系と全体座標系での微分計算が必要であり、これを Chain rule に従い、次の様に求める。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = \underline{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.6.44)$$

ここで \underline{J} はヤコビンマトリクスである。

これらを考慮した後、全体座標系で、ひずみ変位マトリクスを表示すると、

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \underline{\phi}_{1,1} \\ \underline{\phi}_{2,2} \\ \underline{\phi}_{3,3} \\ \underline{\phi}_{1,2} \\ \underline{\phi}_{2,3} \\ \underline{\phi}_{3,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \underline{N} \quad (4.6.45)$$

となる。ここで \underline{N} は 3×24 のディメンジョンを持つ内そう関係のマトリクスで次式により定義される。

$$\underline{N}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi & 0 \cdots 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 \cdots \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 \cdots 0 & \phi_8 \end{bmatrix} \quad (4.6.46)$$

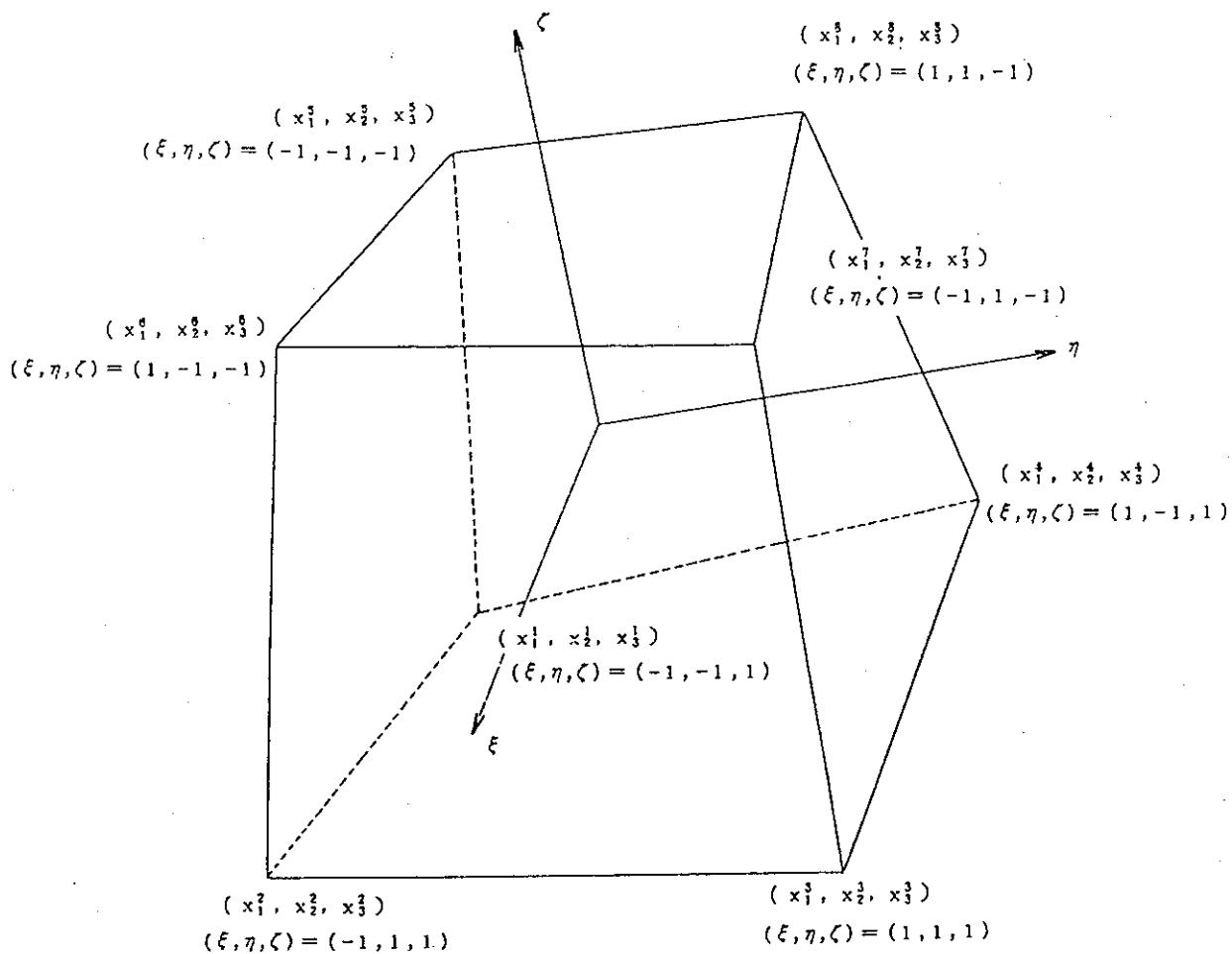
これらの離散化表現を用いて運動方程式を書き表わすと、

$$\sum_{m=1}^N \left\{ \int_{V_m} \rho \underline{N}^t \underline{N} dV_a + \int_{V_m} \underline{B}^t \sigma dV - \int_{V_m} \rho \underline{N}^t \underline{b} dV - \int_{ab_i} \underline{N}^t \underline{t} ds \right\} m = 0 \quad (4.6.47)$$

となる。(4.6.40) 式と比較すれば良くわかる様に、第1項は慣性力すなわち $[M] \{a\}$ を示し、第2項は内力 $\{F\}$ 、第3項、第4項は外力としての物体と表面力を示し、(4.6.40) 式で言う外力 $\{P\}$ に相当する。また、第2項の σ は、応力ベクトルであり、その成分は、

$$\underline{\sigma}^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (4.6.48)$$

である。



第4.6.3図 8節点アイソパラメトリック要素の局部座標系

(8) 一点積分

要素体積上の任意の関数 g の体積積分は、ガウスの公式を用いて次の様に示される。

$$\int_v g dv = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (4.6.49)$$

積分点数を n とすると次の様に近似化される。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n g |J| W_j W_k W_i \quad (4.6.50)$$

ここで、 W_j , W_k , W_i は重み係数であり、 g は、

$$g = g(\xi_j, \eta_k, \zeta_i) \quad (4.6.51)$$

である。また (4.6.49) 式の $|J|$ はヤコビアンマトリックスを示す。

1 積分点公式を適用すると、

$$\begin{aligned} n &= 1 \\ W_i &= W_j = W_k = 2 \\ \xi_i &= \eta_i = \zeta_i = 0 \end{aligned} \quad (4.6.52)$$

であるので、関数 g の体積積分は、

$$\int g dv = 8g(0, 0, 0) |J(0, 0, 0)| \quad (4.6.53)$$

となる。ここで $8 |J(0, 0, 0)|$ は近似化された要素体積である。

1 点積分を行うことによる最大の有利さは、計算時間の短縮化であり、 $\xi = \eta = \zeta = 0$ を用いた時のひずみ-変位マトリクスの反対称特性 (4.6.54) 式を利用すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_1}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \phi_7}{\partial x_i}, \frac{\partial \phi_3}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_5}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \phi_8}{\partial x_i}, \frac{\partial \phi_4}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_6}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (4.6.54)$$

8 積分点スキームを用いる場合と比較し、マトリクス演算時間を 25 倍以上軽減化することができる。

また、この 1 積分点スキームは、空間離散化に差分法を用いた Hydrodynamic 系コード（例えば、PISCES 2 DELK, STEALTH 等）の積分差分法 (Integral Difference Method) による定式化と同等であることが J. O. Hallquist により示され、実用上十分な精度の解を得る上で、有限要素法の方が、優れていると結論づけている。

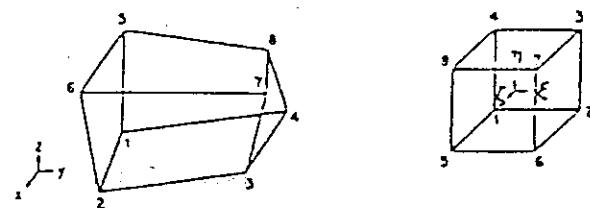
(9) アワーグラス・コントロール

1 積分点スキームを用いた低次要素では、アワーグラスモードあるいはゼロエネルギーと呼ばれる変位モードが生じ、変形エネルギーが爆発して、誤った計算が行われることがあるため、このアワーグラスモードをコントロールする必要が生じる。

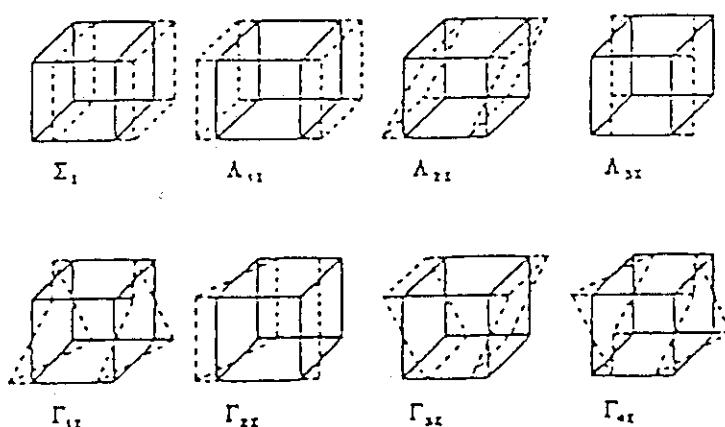
初期の YNA 3D はアワーグラスのコントロールに計算時間がかかるため、20 節点セレンディピティタイプ要素が用いられたこともあったが、その後アワーグラス抵抗力を考慮した効率

的なコントロール手法が開発されたため、現在では、1積分点スキームを用いた、低次の立体要素を使用している。

第4.6.4図に、1積分点低次要素における変位モードとアワーグラスモードを示す。



$$\phi_1 = \frac{1}{8}\xi_1 + \frac{1}{4}\xi\eta_{11} + \frac{1}{4}\xi\eta_{21} + \frac{1}{4}\xi\eta_{31} + \frac{1}{2}\xi\xi_{11} + \frac{1}{2}\xi\xi_{21} + \frac{1}{2}\xi\xi_{31} + \xi\eta\xi_{41}$$



第4.6.4図 変位モードとアワーグラスモード

Hallquistによるアワーグラス抵抗力は次の様に定義される。

Γ_{ik} ($j=1 \sim 4$, $k=1 \sim 8$) を、アワーグラスベクトル (第4.6.1表) とすると、その粘性アワーグラス抵抗力 f_{ik} は

$$f_{ik} = -a_h \sum_{j=1}^4 h_{ij} \Gamma_{ik}, \quad (i=1, 3) \quad (4.6.55)$$

この様に求められる。

ここで h_j はアワーグラスモードの大きさを示し

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^8 v_i^k \Gamma_{jk} \quad (4.6.56)$$

で定義され、 a_h は、次式で表わされる係数である。

$$a_h = Q_{hg} \rho V_e^{2/3} c / 4 \quad (4.6.57)$$

ここで、 V_e は要素体積、 c は波速、 Q_{hg} は 0.05 から 0.15 の間の値をユーザーが指定する定数項である。

このアワーグラスコントロールは Flanagan-Belytschko あるいは, HEMP プログラムで用いられている Wilkins のアルゴリズムと比較して 2 倍以上の計算時間の短縮化が行われている。

第 4.6.1 表 アワーグラスベースベクトル

	j= 1	j= 2	j= 3	j= 4
Γ_{j1}	1	1	1	1
Γ_{j2}	-1	1	-1	-1
Γ_{j3}	1	-1	-1	1
Γ_{j4}	-1	-1	1	-1
Γ_{j5}	1	-1	-1	-1
Γ_{j6}	-1	-1	1	1
Γ_{j7}	1	1	1	-1
Γ_{j8}	-1	1	-1	1

(10) 時間積分

一般に空間離散化に有限要素法あるいは差分法のどちらかを用いたとしても、運動方程式は、力のつりあい条件から次の様に表示される。

$$[M] \{a\} + \{F(u, t)\} = \{P(u, t)\} \quad (4.6.58)$$

ここで, $[M]$: 質量マトリクス

$\{a\}$: 加速度ベクトル

$\{F(u, t)\}$: 内力ベクトル

$\{P(u, t)\}$: 外力(物体力, 表面力)ベクトル

通常の有限要素プログラムは (4.6.58) 式の内力ベクトルとして

$$\{F(u, t)\} = [K] \{u(t)\} \quad (4.6.59)$$

が用いられるが DYNA 3D ではこれを,

$$\{F(u, t)\} = \sum_e [L]^t \int_{V_e} [B]^t \{\sigma\} dV_e \quad (4.6.60)$$

として取扱っている。この積分は, $[B]^t \{\sigma\} = [B]^t [D] \{\varepsilon\} = [B]^t [D] [B] \{u\}$ と考えると、通常の剛性マトリクスに変位をかけあわせて

$$\{F\} = \sum_e \int_{V_e} [B]^t [D] [B] dV_e \cdot \{u\} \quad (4.6.61)$$

と表現される力となり、一般の変位法による有限要素法の定式化と意味の上で変りはない。また、ここで $[L]^t$ は、この内力を全別マトリクスにアセンブルするための Boolean 作用素である。

また、DYNA 3D では、外力ベクトルとして、アワーグラス抵抗力と、次項で説明する接触

により発生する境界節点力があるので、これらも考慮して (4.6.58) 式が時間積分される。

時間積分法には、陽的中央差分法が用いられていることから時刻 n^{n+1} の加速度、速度、変位が次の様に求められる。

$$\begin{aligned}\{\alpha^n\} &= [M]^{-1}(\{P(u, t)^n\} - \{F(u, t)^n\}) \\ \{v^{n+\frac{1}{2}}\} &= \{v^{n-\frac{1}{2}}\} + \{\alpha^n\} \cdot \Delta t^n \\ \{u^{n+\frac{1}{2}}\} &= \{u^n\} + \{v^{n+\frac{1}{2}}\} \cdot \Delta t^{n+\frac{1}{2}}\end{aligned}\quad (4.6.62)$$

ここで、 $\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = (\Delta t^n + \Delta t^{n+1}) / 2$

が用いられる。また、質量マトリクス $[M]^{-1}$ は、陽的スキームが採用されているため、集中質量かあるいは、対角化された質量マトリックスが用いられる。

差分法による Hydrodynamic コードにおいて、基礎方程式の離散化が、空間方向、時間方向について同時に行われ、時間方向の離散化に陽的スキームが採用されている場合には、Courant の安定条件により数値解の安定性が議論される。

DYNA 3D のように、時間方向にのみ陽的差分化が行われている場合は、差分スキームの依存領域を (4.6.58) 式の依存領域よりも大きくとらないと、このスキームは不安定となり、これは (4.6.58) 式の接線剛性マトリクスのスペクトル半径（最大固有値）を用いて判定される。これらの条件の下で求められる安定時間増分値が次の (4.6.63) 式である。

$$\Delta t_e = 9v_e / \{[Q + (Q^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}] A_{e_{max}}\} \quad (4.6.63)$$

ここで Q は、1 次及び 2 次の人工粘性を用いて定義される粘性係数で (4.6.64) 式により定義される。

$$Q = Q_2 c + Q_1 v_e |\dot{\epsilon}_{kk}| / A_{e_{max}} \quad (4.6.64)$$

また、 $A_{e_{max}}$ は、各要素の最大側面積であり、 v_e は要素体積である。また (4.6.61) 式の $\dot{\epsilon}_{kk}$ は体積ひずみ速度を表わす。

系全体の安定時間増分値は、これらの各要素の Δt_e の中の最小値によって決定される。すなわち、

$$\Delta t^{n+1} = \min \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\} \quad (4.6.65)$$

である。

(1) 接触－衝突計算法

DYNA 3D では、Lagrangian 領域の境界面が接触したり、離れたりあるいは、すべったりする取扱いを任意に指定することができる。

これらの接触－衝突を計算する数値計算アルゴリズムは過去の研究において、いくつか開発されたが、分類すると次の 3 つの方法に分けられる。

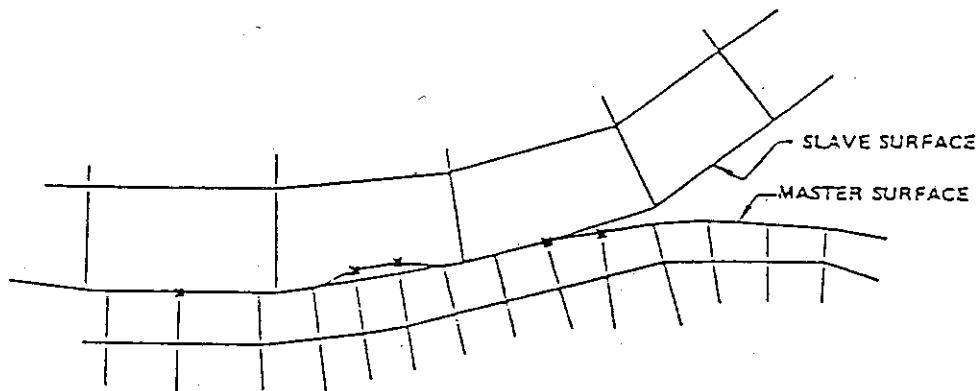
- (a) 節点拘束法 (Nodal Constraint Method)
- (b) 处罰法 (Penalty Method)

(c) 分布パラメータ法 (Distributed Parameter Method)

これらの方法のいずれにおいても共通して用いられる境界面の名称として、 Slave Surface と Master surface があり、前者がぶつかる側、後者がぶつかられる側を示す。

また、それぞれの境界面上の節点 Slave Node, Master Node と呼んでいる。

例えば、第 4.6.5 図には、節点拘束法を用いた場合に、Slave 側のゾーニングが粗く、Master 側のゾーニングが細いので、Master 側が Slave 側に侵入してしまった悪い計算例を示した。



第 4.6.5 図 Master 側が Slave 側に侵入した失敗例

これらの問題は、ゾーニングの細粗をそれぞれ逆にすることによって取り除かれ、正常な接触計算を行うことができるものである。DYNA 3 D でのこれら境界面の取り扱いは、上記 3 種の計算手法を用いて、以下の様な 3 つの境界取扱い名称で呼んでいる。

(a) 離接を伴なうスライディング

(Sliding with Closure and Separation)

(b) 拘束接面

(Tied Interface)

(c) すべり境界

(Sliding only Interfaces)

これらのそれぞれで用いられる計算手法は(1)に対して処罰法、(2)に対して節点拘束法、(3)にして分布パラメータ法が対応している。

次節以下では、これらの境界取扱い名称ごとの計算アルゴリズムとその性質について述べ、最後に剛壁の取扱い方法について簡単に説明する。

(1) 離接を伴うすべり

この境界面の取り扱いは、面接觸問題において、最も良く用いられる処罰法を適用している。

処罰法では、お互いの接觸面が対応する面内への侵入を許しているので、非常に大きな力が働く場合にはメッシュ分割数を増やす等の充分な注意が必要である。

まずこの処罰法では、Slave Node が Master Surface を通って侵入するのをチェックする。

侵入していなければなにもなされないが、侵入している場合は、この Slave Node と接觸点間で、境界節点力 (interface force) が働くことになり、侵入した距離に比例して、この Slave

Node を外側に押し出す様な力が計算される。

この侵入量 ℓ は次式により計算される (第 4.6.6 図)。

$$\ell = n_i \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] < 0 \quad (4.6.66)$$

ここで, n_i は, Master 面に垂直な単位法線ベクトル

t は, 全体座標の原点から侵入した Slave Node への位置ベクトル

$r(\xi_c, \eta_c)$ は, 全体座標の原点から Master 面上の接触点への位置ベクトル (ξ_c, η_c)
は接触点の局部座標値)

を示す。

侵入した Slave Node を Master 側から押し出す様な境界接点力 f_s は, この侵入量 ℓ と要素の剛性を用いて, 次式により求められ, この Slave Node に加えられる。

$$f_s = -\ell k_i n_i \quad \text{if } \ell < 0 \quad (4.6.67)$$

ここで, k_i は接触点を含む Master Surface の剛性係数で, 次式により定義される。

$$k_i = \frac{f_{SI} K_i A_i^2}{V_i} \quad (4.6.68)$$

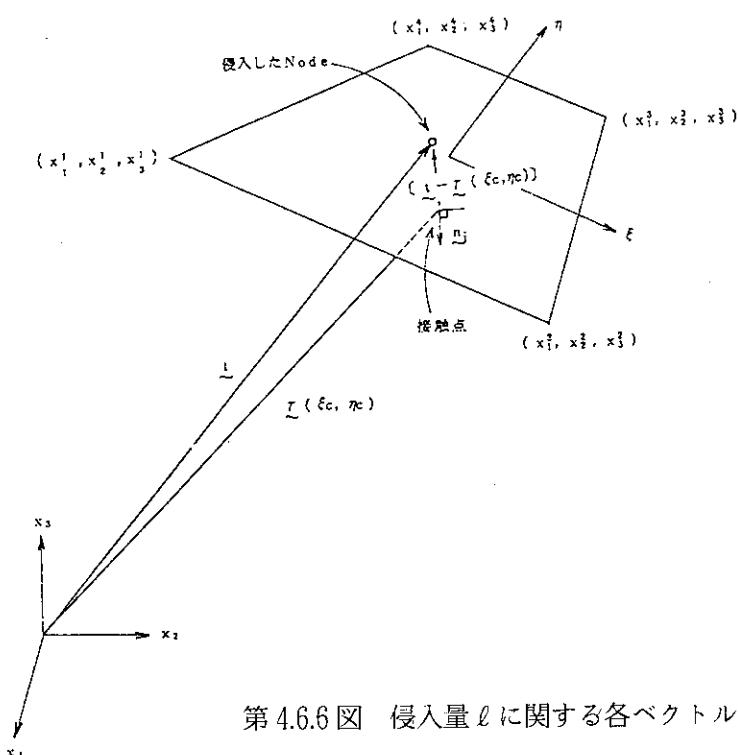
ここで, K_i はこの Master 側の要素の体積弾性係数

V_i はこの Master 側の要素の体積

A_i はこの Master Surface の面積

を示している。

また, f_{SI} は, 境界面の剛性に対するスケールファクターで, 通常 0.1 が用いられる。経験上この値より大きな係数を用いると, 数値的不安定性が生じる。



第 4.6.6 図 侵入量 ℓ に関する各ベクトルの定義

(13) 拘束接触面

DYNA 3D は、粗いメッシュ分割と細いメッシュ分割が行われた接触面間の接合を許している。

通常は、粗いゾーニングが行われる側を Master Surface に取ることが推奨されている。

第 4.6.7 図には、この拘束接面 (Tied Interfaces) を用いた Nose Cone のメッシュ分割図を 1 例として示した。

拘束接面での物理量の伝達は次の様に行われる。

まず、Slave 側での質量と、節点力を計算したあと、対応する Master 側へふりわけられるこれらの物理量の増分を形状関数を用いて次の様に計算する。

$$\begin{aligned}\Delta M_m^i &= \phi_i(\xi_c, \eta_c) M_s & i = 1, \dots, 4 \\ \Delta f_m^i &= \phi_i(\xi_c, \eta_c) f_s\end{aligned}\quad (4.6.69)$$

ここで、 M_s , f_s は Slave 側の質量と、節点力を示し、

ΔM_m^i , Δf_m^i は Master 側へふりわけられる各増分量

$\phi_i(\xi_c, \eta_c)$ は、接触面を含む Master Surface の形状関数

である。

これらの量は、Master 量と Slave 側での節点の相対的な位置が、計算の途中でも変化しないので、初期に 1 度計算されるだけで良い。

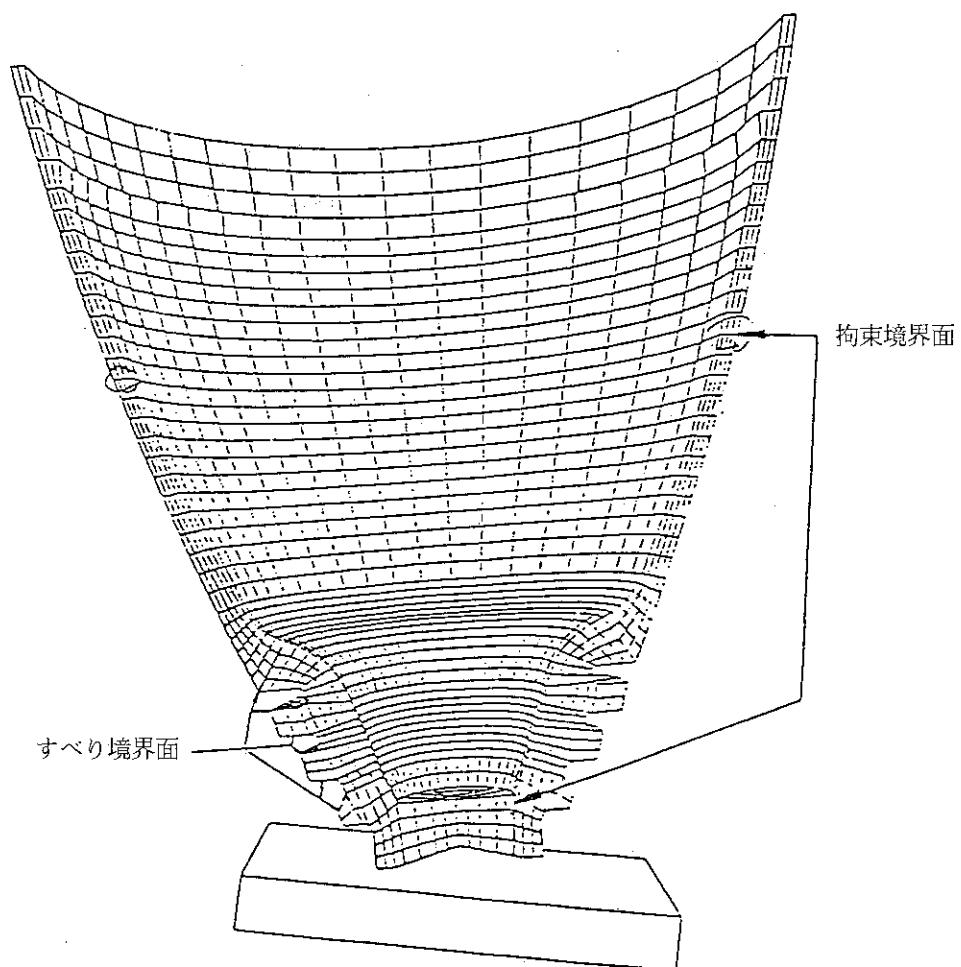
また、Slave 側の質量と節点力が内そうされたあと、Master 側で加速度が計算され、これは、また拘束接面を通じて次式により Slave 側の加速度が算出される。

$$a_{is} = \sum_{j=1}^4 \phi_j(\xi_c, \eta_c) a_j^i \quad (4.6.70)$$

ここで、 a_j^i は Master 側での加速度

a_{is} は Slave 側での加速度

$\phi_j(\xi_c, \eta_c)$ は、接触面を含む Slave Surface の形状関数



第4.6.7図 拘束境界面とすべり境界面

4.6.3 入力データ

I. 初期入力データ

0. オプションデータ

オプションデータは全てヘッダーによりデータの内容を示すようになっている。データの順番は任意である。ただし、#BEGIN カードはオプションデータの最終でしなければならない。実数および整数の入力はフリー・フォーマットであるが、10 文字以内で記述しなければならない。

0.1. イニシャル・ランの定義

カラム	内容	フォーマット
1～8	#INITIAL	A 8

0.2. リスタート・ランの定義

カラム	内容	フォーマット
1～8	#RESTART	A 8

0.3. リスタート・ランの定義（別形式）

カード 1		
カラム	内容	フォーマット
1～7	#RESTEP	A 7

カード 2

カラム	内容	フォーマット
1～80	リスタート開始ステップの指定 (I 10)	*

0.4. 加速度出力の定義

カード 1		
カラム	内容	フォーマット
1～6	#ACC 79	A 6

カード 2

カラム	内容	フォーマット
1～80	出力時間間隔 (E 10.0)	*

0.6. 静解析オプション

カード 1		
カラム	内 容	フォーマット
1 ~ 7	#STATIC	A 7
カード 2		
カラム	内 容	フォーマット
1 ~ 80	減衰係数（実数）(E 10.0)	*
カード 3		
カラム	内 容	フォーマット
1 ~ 80	最小節点, 最大節点, 初速度(x, y, z), (実数) 運動開始時刻 (2 I 10, 4 E 10.0) (実数)	*

静解析で用いられる時間積分は、

$$\dot{\bar{X}}^{n-\frac{1}{2}} = (\omega - 1) \ddot{\bar{X}}^{n-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} \omega \dot{\bar{X}}^{n-1} \Delta t^{n-1}$$

$$\text{ただし, } \omega = \frac{2}{1 + 2\pi\Delta t/T} \text{ (臨界減衰定数)}$$

である。臨界減衰定数 ω は、臨界減衰に到る最低次の振動数により決定する。この定数が正しく選ばれるならば、臨界減衰周期の 3 倍以内に減衰は収束する。

臨界減衰周期の推定法は、

- ① 簡単な解析的近似
- ② 動解析履歴

などから行われる。

0.7. 外部ファイル入力による初期化

カード 1		
カラム	内 容	フォーマット
1 ~ 7	#TESHIN	A 7

カード2

カラム	内容	容	フォーマット
1 ~ 80	入力仕様指定フラグ 入力仕様指定フラグ = 0 入力なし = 1 応力, 座標, 初速の入力 = 2 応力の入力 = 3 座標, 初速の入力 = 11 応力, 座標, 初速の入力 = 12 応力の入力 = 13 座標, 初速の入力	(I 10) (デフォルト) (フォーマット付) (フォーマット付) (フォーマット付) (フォーマットなし) (フォーマットなし) (フォーマットなし)	*

ファイル仕様 (フォーマット付)

応力

$$\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}, \bar{\varepsilon}_p v_{rel} (8E10.0)$$

 $\bar{\varepsilon}_p$: 相当塑性ひずみ v_{rel} : 相対堆積

- ① ソリッド要素数だけ繰り返す
- ② 各ビーム要素について積分点数だけ繰り返す
- ③ 各シェル要素について積分点数だけ繰り返す
- ④ 各厚肉シェル要素について積分点数だけ繰り返す

座標および速度

$$x, y, z, v_x, v_y, v_z (5X, 3E10.0 / 5X, 3E10.0)$$

- ⑤ 節点数だけ繰り返す

ファイル仕様 (フォーマットなし)

応力 (AUX(I), I = 1, NMECON)

$$NMECON = (\text{積分点数}) * (\text{保存変数の個数})$$

- ① ソリッド要素数だけ繰り返す
- ② ビーム要素数だけ繰り返す
- ③ シェル要素数だけ繰り返す
- ④ 厚肉シェル要素数だけ繰り返す

座標および速度

$$(X(I), I = 1, NUMNP * NDOF)$$

$$(V(I), I = 1, NUMNP * NDOF)$$

NUMNP = 節点数

NDOF = 自由度 (3 または 6)

入力ファイルは論理装置番号 7 より読み込まれる。

0.8. 特別仕様ファイルの出力

カード 1		
カラム	内容	フォーマット
1～8	#FILEOUT	A 8
カード 2		
カラム 内容 フォーマット		
1～80	出力時間間隔.(E 10.0)	*

論理装置番号 89 より、シーケンシャルのポストファイルが出力されます。

0.9. 選択節点・要素に関する出力

カラム	内容	フォーマット
1～8	#NOPRINT	A 8

選択節点・要素の時刻歴用出力の指定。このカードを指定しない場合はリスト出力される。指定した場合は、TAURUS 用データベースとして論理装置番号 4 番より出力される。

0.10. DYNA 3D 入力データの開始の定義

カラム	内容	フォーマット
1～6	#BEGIN	A 6

このデータをオプション・データの最後に定義しなければならない。

1. タイトルカード (12 A 6, A 2, 1 X, A 5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 72	ヘッダー・タイトル (HEAD)	12 A 6
73 - 74	プログラムバージョン (YR)	A 2
76 - 80	= 87: 1987年版対応の入力 (デフォルト) = 88: 本マニュアル対応の入力 ラージ・フォーマット使用オプション (フォーマット) (INGRID デフォルト対応: 節点数が 99999 を越える場合使用) “LARGE”と入力する	A 5

2. コントロールカード

カード1 (I5, 5110)			
カラム	内容	フォーマット	
1 - 5	物性の数 (NUMAT)	I 5	
6 - 15	節点数 (NUMNP)	I 10	
16 - 25	ソリッド要素数 (NUMELH)	I 10	
26 - 35	ビーム要素数 (NUMELB)	I 10	
36 - 45	4点シェル要素数 (NUMELS)	I 10	
46 - 55	8点シェル要素数 (NUMELT)	I 10	

カード2 (615)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	節点の時刻歴 出力ブロック数 (≤ 160) (NUMDS)	I 5
6 - 10	ソリッド要素時刻歴 出力ブロック数 (≤ 160) (NSTH)	I 5
11 - 15	ビーム要素の時刻歴 出力ブロック数 (≤ 160) (NSTB)	I 5
16 - 20	シェル要素の時刻歴 出力ブロック数 (≤ 160) (NSTS)	I 5
21 - 25	厚肉シェル要素の時刻歴 出力ブロック数 (≤ 160) (NSTT)	I 5
26 - 30	解析の内部状態の出力間隔 (IKEDIT) (デフォルト 1000)	I 5

カード3 (615, A5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	DYNA 3D と JOY のインターフェースの数 (NUMSNC)	I5
6 - 10	スライド境界面の数 (NUMRC)	I5
11 - 15	破壊条件のあるスライド境界面の数	I5
16 - 20	密度と深さの曲線を与える点の数 (≤ 8) (NUMDP)	I5
21 - 25	Brode 関数のフラッグ = 0 : Brode パラメータは定義されない = 1 : Brode パラメータは定義される (IBRODE)	I5
26 - 30	剛体マージカード数 (NRBC)	I5
31 - 35	節点座標フォーマット (NIF) (デフォルト E 10.0)	A5

カード4 (1615)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	荷重曲線の数 (NLCUR)	I5
6 - 10	集中節点荷重の数 (NUMCL)	I5
11 - 15	面圧が課せられる要素面の数 (NUMPC)	I5
16 - 20	速度/加速度境界条件カードの数 (NUMVC)	I5
21 - 25	剛体壁の数 (NUMRW)	I5
26 - 30	節点拘束カードの数 (NUMCC)	I5
31 - 35	初期条件パラメータ (INITV)	I5
	= 0: 初速を 0 とする	
	= 1: 初速を読み込む	
36 - 40	スライディング・インターフェースの数 (NUMSV)	I5
41 - 45	X 方向加速度 (NTHPX)	I5
	= 0: なし	
	= 1: 有	
46 - 50	Y 方向加速度 (NTHPY)	I5
	= 0: なし	
	= 1: 有	
51 - 55	Z 方向加速度 (NTHPZ)	I5
	= 0: なし	
	= 1: 有	
56 - 60	X 軸まわりの角速度 (NTHSX)	I5
	= 0: なし	
	= 1: 有	
61 - 65	Y 軸まわりの角速度 (NTHSY)	I5
	= 0: なし	
	= 1: 有	
66 - 70	Z 軸まわりの角速度 (NTHSZ)	I5
	= 0: なし	
	= 1: 有	
71 - 75	運動量を与えるソリッド要素の数 (NELMD)	I5
76 - 80	爆発点の数 (NDTPTS)	I5

カード5 (3 E 10.0, 2 I5, 2 E 10.0, 2 I5, E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	終了時刻 (EDNTIM)	E 10.0
11 - 20	時刻歴データ・ダンプの出力時間間隔 (PRTC)	E 10.0
21 - 30	完全な状態・ダンプの出力時間間隔 (変形図等出力) (PLTC)	E 10.0
31 - 35	リスタート・ダンプの出力ステップ間隔 (デフォルト 999999) (IRDECK)	I5
36 - 40	ランニング・リスタート・ダンプの出力ステップ間隔 (デ フォルト 999999) (同一ファイルに上書きされる) (NCBRRF)	I5
41 - 50	初期時間ステップ = 0.0: 初期時間ステップは DYNA 3D で計算される	E 10.0
51 - 60	ペナルティー法のスライディング・インターフェースでの スケール・ファクタ (SLSFAC) = 0.0: デフォルト値 0.1 に設定	E 10.0
61 - 65	温度効果のオプション = 0: なし = n: 荷重曲線 n によって温度の時刻歴を定義 = 0 <: POPAZ 3D の生成するファイルによる節点温度 の定義	I5
66 - 70	デフォルトの人工粘性のリセット・フラッグ (IDFRS) = 1: 新しいデフォルト値をカード 9 から読む	I5
71 - 80	時間ステップのスケール・ファクタ (TSSFAC) (デフォルトは 0.9, 高性能爆薬使用時は, 0.667 になる。 SLSFAC が 1.0 より大きい場合は 0.667 に, 9.0 より大き い場合は 0.333 にセットされる。無反射境界がある場合は, 0.667 にセットされる。)	E 10.0

カード 6 (16 I 5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	ジョイントの定義の個数 (NJT)	I 5
6 - 10	外部節点と定義する剛体の個数 (NXTRA)	I 5
11 - 15	シェルーソリッド要素のインターフェースの個数 (NBLK)	I 5
16 - 20	破壊モデルの入った結合シェルインターフェースの個数 (NTBSL)	I 5
21 - 25	破壊モデルの入った節点結合の個数 (NTNWF)	I 5
26 - 30	最大時間ステップの大きさを制限する荷重曲線の個数 (LCTM)	I 5
31 - 35	バネ, ダンパおよび集中マス入力のフラッグ (INPSD)	I 5
36 - 40	慣性能率を定義する剛制の個数 (NUMRBI)	I 5
41 - 45	TAURUS のプロットデータに内側と外側のひずみテンソルをダンプするフラッグ (ISTRN)	I 5
46 - 50	シャドーバーンオプションのフラッグ (ISHDFG)	I 5
51 - 55	静水圧, Q, 内部エネルギー相対体積, 絶対体積およびパン・フランクションを 6 つの応力成分のかわりにダンプするフラッグ (IHYDRO)	I 5
56 - 60	High-Liu シェルのノーマルの更新のフラッグ (IRNXX) =-2: しない =-1: 各サイクルで計算する = 0: -1 にセットされる =-1: リスタートで計算する = n: n ステップ毎にする	I 5
61 - 65	シェル厚みの変更 (ISTUPD) = 0: 変更しない = 1: 膜ひずみを考慮し厚みを変える	I 5
66 - 70	シェルの定式化 (IBELYT) = 1: Hughes-Liu = 2: Belytchko-Lin-Tsay (デフォルト)	I 5
71 - 75	無反射しない境界セグメント数 (NNRBS)	I 5
76 - 80	87 年版用追加データの指定 (NSPCO) = 0: カード 7 および 8 は無し = 1: カード 7 有り = 2: カード 7 および カード 8 有り	I 5

カード 7 (215, E10.0, 515, 2E10.0, 215)

87年版用データでは、NSPCO(カード6)が非零の時に必要		
カラム	内容	フォーマット
1-5	SPC 節点数 (NODSPC)	I5
6-10	SPC 定義のための座標系の数 (NSPCOR)	I5
11-20	最小ステップ数を決めるため初期時間ステップに対する低減係数 (TSMIN) DTMIN=DTSTART*TSMIN DTSTART: DYNA 3D に決められる初期時間ステップ TSMIN に達した時に、DYNA 3D はリストアート・ダンプを行って終了する	E10.0
21-25	ユーザーの決義するビームの積分則の数 (NUBIR)	I5
26-30	ビーム要素のユーザー定義則で必要な最大積分点数 (MPUBR)	I5
31-35	ユーザーの定義するシェルの積分則の数 (NUSIR)	I5
36-40	シェル要素のユーザー定義則で必要な最大積分点数 (MPUSR)	I5
41-45	動的減衰オプションにおける収束チェック間の繰り返し回数 (デフォルト 250) (NRCYCK)	I5
46-55	動的減衰オプションにおける収束判定 (デフォルト 0.001) (DRTOR)	E10.0
56-65	動的減衰係数 (デフォルト 0.995) (DRFCTR)	E10.0
66-75	動的減衰時に計算された時間ステップに対するスケールファクタ: ゼロならがカード5でのTSSFACにセットされる。収束後はTSSFDRにセットされる。 (TSSFDR)	E10.0
76-80	4節点シェル要素における時間ステップ計算の規則 (ISDO) = 0: (特性長さ) = (面積) / (最長辺) = 1: (特性長さ) = (面積) / (最長対角線)	I5

カード 8 (315)

87年版用データでは、NSPCO=2の時に必要		
カラム	内容	フォーマット
1-5	平面応力塑性オプション (MITER) = 1: 3回に分けて塑性収束計算を行う (デフォルト) = 2: 完全に収束するまで塑性計算を行う = 3: 繰り返し計算はせずにラジアル・リターンを用いる。物性タイプ3, 9, 24に対し指定できる。	I5
6-10	第1サイクルにおける各要素で決まる時間ステップのプリント (IETSPF)	I5
11-15	= 1: プリントする 一次元スライドラインの定義数 (NUMSL(1))	I5

カード9 (IDFRS=1の時必要) (I5, E10.0, I5, 2E10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	アワー・グラス粘性タイプ, IHGQDF = 0: 1にセットされる。 = 1: DYNA 3D 標準型 = 2: Flanagan-Belytscho 粘性減衰 = 3: 厳密な体積積分による Flanagan-Belytscho 粘性減衰 = 4: タイプ2の構造減衰 = 5: タイプ3の構造減衰	I5
6 - 15	アワー・グラス粘性係数, HGQCDF (デフォルトは 0.1) QH の値が 0.15 を越えると不安定の原因となる。推奨値 (デフォルト) は全てのオプションに適用されるが、剛性定式で変形が大きい場合は応答が固くなることがあるので注意を要する。	E 10.0
16 - 20	体積粘性タイプ, IBQSDF = 0: 1にセットされる = 1: DYNA 3D 標準型	I5
21 - 30	二次の人工粘性係数, BQS 1 DF, Q 2 (デフォルトは 1.44)	E 10.0
31 - 40	一次の人工粘性係数, BQS 2 DF, Q 1 (デフォルトは 0.06)	E 10.0

IHGQDF \leq 3 が Belytschko-Tsay の粘性減衰であり、構造減衰では IHGQDF-4 または 5 となる。現在は 1 と 3 のみシェル要素に対し使用可能である。

3. 物性カード

以下のカード群をそれぞれの物性モデルに対して繰り返す。

カード1 (2I5, E10.0, 2I5, E10.5, I5, 2E10.0, 3I5)		
カラム	内容	フォーマット
1 - 5	物性の識別番号 (NUMAT)	I5
6 - 10	物性の型 (MT) 〔 〕内の数字がその物性の適用できる要素タイプを示す 0 - ソリッド, 1 - ビーム, 2 - シェル, 3 - 厚肉シェル = 1: 弹性 [0, 1, 2, 3] = 2: 異方性入り弾性 [0, 2, 3] = 3: 移動/等方硬化 弾塑性 [0, 1, 2, 3] = 4: 温度依存弾塑性 [0, 2] = 5: 土及びクラッシャブル・フォーム [0] = 6: 線形粘弾性 [0] = 7: ラバー (Blatz-Ko) [0] = 8: 爆発性物質 [0] = 9: 偏差応力のない流体 [0] = 10: 弹塑性(流体) [0] = 11: 温度依存・弾塑性 [0] = 12: 等方弾塑性 [0, 2] = 13: 破壊モデルのある弾塑性 [0] = 14: 破壊モデルのある土およびクラッシャブル・フォーム [0] = 15: Johnson/Cook 歪と感温塑性 [0, 2] = 16: 擬似 TESOR 土質モデル [0] = 17: 弹塑性クラクモデル [0] = 18: 級数則塑性 [0] = 19: ひずみ速度依存塑性 [0, 2] = 20: 刃体 [0, 1, 2, 3] = 21: 12定数をもつ熱異方性 [0, 2] = 22: 破壊モデルのある複合材 [0, 2] = 23: 12曲線を持つ熱異方性モデル [0] = 24: 区分線形等方塑性 [0, 2] = 25: 非粘性2不变量土質キャップモデル [0] = 26: 異方性クラッシャブルフォーム [0] = 27: Mooney-Rivlin rubber [0] = 28: 合成塑性 [1, 2] = 30: 移動硬化弾塑性 [2]	I5
11 - 20	密度	E 10.0

カラム	内容	フォーマット
21 - 25	状態方程式の型、流体系の物性に対してのみ定義される。 ソリッド要素で物性タイプ 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17 および 18 使用時 = 1: 線形多項式 = 2: JWL 方程式 = 3: Sack の状態方程式 = 4: Gruneisen の状態方程式 = 5: 多項式の比型 = 6: エネルギー・体積のある線形多項式 = 7: 点火とグロースのある高性能爆薬 = 8: テーブル型コンパクション・モデル = 9: テーブル型状態方程式 = 10: TENSOR 細孔崩壊	I 5
26 - 30	アワー・グラス粘性の型、IHQ = 0: デフォルト = 1 = 1: DYNA 3D 標準 = 2: Franagan-Belytschko = 3: 厳密な体積積分による Franagan-Belytschko = 4: TYPE 2 による剛形式 = 5: TYPE 3 による剛形式	I 5
31 - 40	アワー・グラス粘性係数（デフォルトは 0.1） QH の値が 0.15 を越すと不安定が生じる可能性がある。デフォルトの推奨値がすべてのオプションに対し適用される。しかしながら変形が大きくなる場合等は、応答が固くなり得るので注意を要する。	E 10.0
41 - 45	体積粘性の型 IBQ = 0: デフォルト = 1 = 1: DYNA 3D 標準	I 5
46 - 55	二次の人工粘性係数、Q1（デフォルトは 1.44）	E 10.0
56 - 65	一次の人工粘性係数、Q2（デフォルトは 0.06）	E 10.0
66 - 70	要素クラス = 0: 8 節点ソリッド = 1: 方形ビームまたはトラス = 2: シェルまたは膜 = 3: 8 節点シェル	I 5
71 - 75	重力に対する物性の初期化 = 0: 全ての初期化する = 1: 現在の物性のみ初期化する	I 5

カラム	内容	フォーマット
76 - 80	デフォルト以外での要素の定式化 ビーム要素 = 1 : Hughes-Liu (デフォルト) = 2 : Belytschko-Schwer = 3 : Truss シェル要素 = 1 : Hughes-Liu = 2 : Beuytschko-Tsay (デフォルト) = 3 : BCIZ 三角形 = 4 : C ₀ 三角形	I5

カード 2 (12 A 6)

カラム	内容	フォーマット
1 - 72	物性の識別用タイトル	12 A 6

カード 3, 4, 5, …, 8 (8 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
物性タイプ1 (弾性)		

カード 3 (E 10.0)

1 - 10	ヤング率	E 10.0
--------	------	--------

カード 4 (E 10.0)

1 - 10	ポアソン比	E 10.0
--------	-------	--------

カード 5 ~ 8

1 - 80	ブランク	
--------	------	--

物性タイプ2 (異方性弾性)

カラム	内容	フォーマット
カード 3 (3 E 10.0)		

1 - 10	E _a	E 10.0
11 - 20	E _b	E 10.0
21 - 30	E _c	E 10.0

カード 4 (3 E 10.0)

1 - 10	ν_{ba}	E 10.0
11 - 20	ν_{ca}	E 10.0
21 - 30	ν_{cb}	E 10.0

カード 5 (3 E 10.0)

1 - 10	E_{ab}	E 10.0
11 - 20	E_{bc}	E 10.0
21 - 30	E_{ca}	E 10.0

カード 6 (E 10.0)

1 - 10	<p>AOPT (物性の軸方向指存オプション) AOPT = 0.0 ローカルな異方性、軸は要素中の節点 n_1, n_2, n_4 によって決まる。第 4.6.8 図参照。 カード 7, 8 はブランク。</p> <p>AOPT = 1.0 ローカルな異方性、軸は空間上的一点と要素の中心位置により決定する。カード 8 はブランク。</p> <p>AOPT = 2.0 グローバルな異方性。軸は以下で指定されるベクトルの向きになる。</p> <p>AOPT = 3.0 シェル要素のみに適用可。 シェルノーマルベクトルとカード 7 で定義するベクトルの外積によって決まる面からの角度で定義するオフセットによるローカルな物性軸を定める。</p>	E 10.0
--------	--	--------

カード 7 (3 E 10.0, 3 E 10.0, 3 E 10.0)

1 - 10	x_p	AOPT = 1.0 の場合に使用	E 10.0
11 - 20	y_p		E 10.0
21 - 30	z_p		E 10.0
1 - 10	a_1	AOPT = 2.0 の場合に使用	E 10.0
11 - 20	a_2		E 10.0
21 - 30	a_3		E 10.0
1 - 10	v_1	AOPT = 3.0 の場合に使用	E 10.0
11 - 20	v_2		E 10.0
21 - 30	v_3		E 10.0

カード 8 (3 E 10.0, E 10.0)

1 - 10	d_1	AOPT = 2.0 の場合に使用	E 10.0
11 - 20	d_2		E 10.0
21 - 30	d_3		E 10.0
1 - 10	物性軸角度。要素カードで上書きされる。		E 10.0

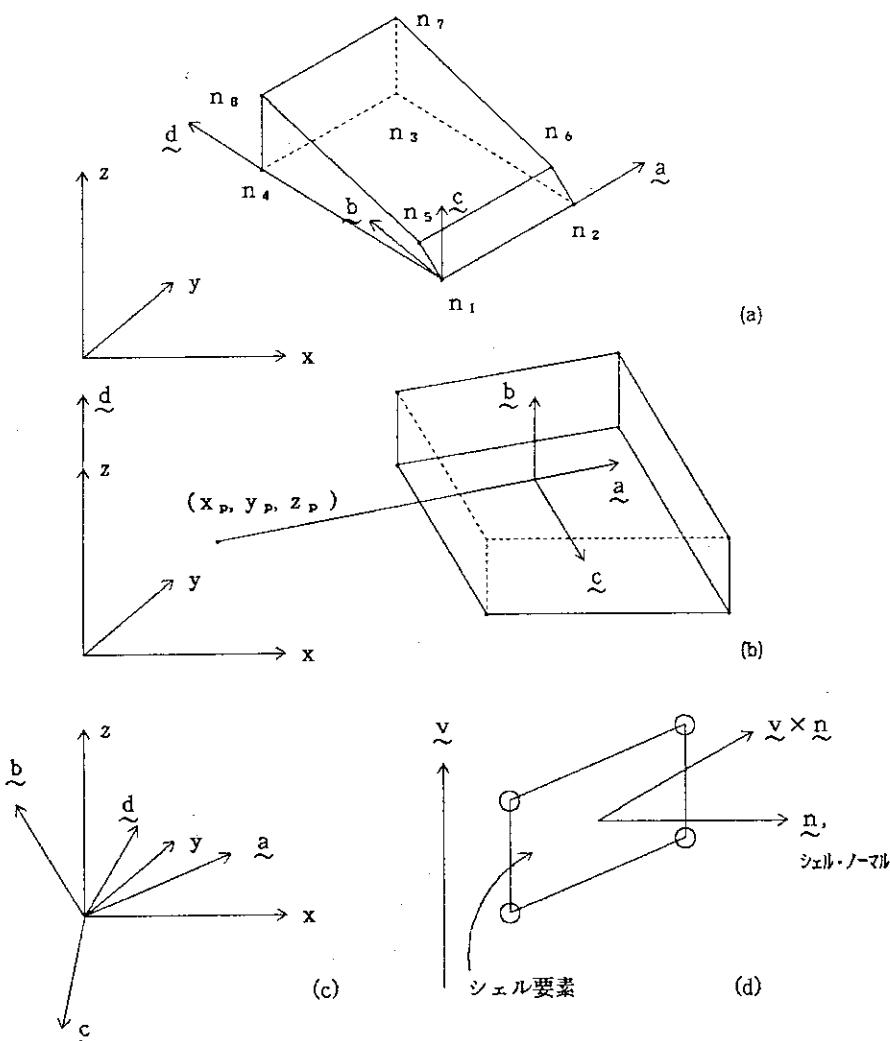
物性則において応力・ひずみは以下の関係で定義する。

$$\tilde{C} = \tilde{T}^T \tilde{C}_l \tilde{T}$$

ここで \tilde{T} は変換マトリックス、 \tilde{C}_l は異方性を設定する軸、a, b, c の下で定義される物性定数から定義される構成マトリックスである。

$$\tilde{C}_L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & -\frac{\nu_{ba}}{E_b} & -\frac{\nu_{ca}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ab}}{E_a} & \frac{1}{E_b} & -\frac{\nu_{cb}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ac}}{E_a} & -\frac{\nu_{bc}}{E_b} & \frac{1}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ca}} \end{bmatrix}$$

ただし、 $\nu_{ab}/E_a = \nu_{ba}/E_b$, $\nu_{ca}/E_c = \nu_{ac}/E_a$ および $\nu_{cb}/E_c = \nu_{bc}/E_b$.

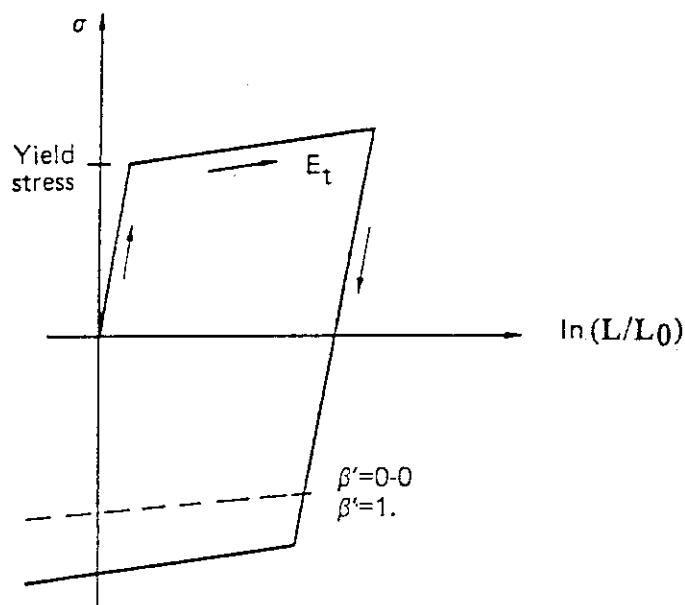


第4.6.8図 物性主軸を定義するオプション：(a)AOPT = 0.0, (b)AOPT = 1.0,
(c)AOPT = 2.0. ただし $\underline{c} = \underline{a} \times \underline{d}$ および $\underline{b} = \underline{c} \times \underline{a}$. (d)AOPT = 3.0.

物性タイプ3 (移動/等方硬化弾塑性)

カ ラ ム	内 容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1 - 10	ヤング率	E 10.0
.....カード4 (E 10.0)		
1 - 10	ポアソン比	E 10.0
.....カード5 (E 10.0)		
1 - 10	降伏応力	E 10.0
.....カード6 (E 10.0)		
1 - 10	ひずみ硬化率 E_t	E 10.0
.....カード7 (E 10.0)		
1 - 10	硬化則のパラメタ β' $0 < \beta' < 1$	E 10.0
.....カード8		
1 - 80	プランク	

第4.6.9図に示すように等方硬化則、移動硬化則あるいは、その中間型の硬化則は1と0の間で指定する β' によって決まる。 β' が、0または1の場合は、それぞれ移動及び等方硬化則となる。等方硬化則の場合 ($\beta' = 1$) は、物性モデル12の方が効率良く、容量も少なくてすむ。可能ならば物性12を使用することを薦める。



第4.6.9図 等方および移動硬化を伴う弾塑性挙動。
ただし、 $\beta' = 0.0$ および $\beta' = 1.0$ は変形前後の単軸引っ張り長さ。

物性タイプ4 (温度依存弾塑性)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (8 E 10.0)		
1 - 10	T_1 , 温家	E 10.0
11 - 20	T_2	E 10.0
:	:	:
71 - 80	T_8	E 10.0
.....カード4 (8 E 10.0)		
1 - 10	T_1 でのヤング率, E_1	E 10.0
11 - 20	T_2 E_2	E 10.0
:	:	:
71 - 80	T_8 E_8	E 10.0
.....カード5 (8 E 10.0)		
1 - 10	T_1 でのボアソン比, ν_1	E 10.0
11 - 20	T_2 ν_2	E 10.0
:	:	:
71 - 80	T_8 ν_8	E 10.0
.....カード6 (8 E 10.0)		
1 - 10	T_1 での熱膨張係数, α_1	E 10.0
11 - 20	T_2 α_2	E 10.0
:	:	:
71 - 80	T_8 α_8	E 10.0
.....カード7 (8 E 10.0)		
1 - 10	T_1 での降伏応力, σ_{y1}	E 10.0
11 - 20	T_2 σ_{y2}	E 10.0
:	:	:
71 - 80	T_8 σ_{y8}	E 10.0
.....カード8 (8 E 10.0)		
1 - 10	T_1 でのひずみ硬化率 E_1^P	E 10.0
11 - 20	T_2 E_2^P	E 10.0
:	:	:
71 - 80	T_8 E_8^P	E 10.0

少なくとも2個の温度と対応する物性値を指定しなければならない。物質の温度が入力で指定された範囲外になると解析は終了する。

塑性を考えない時はカード7と8をブランクにする。

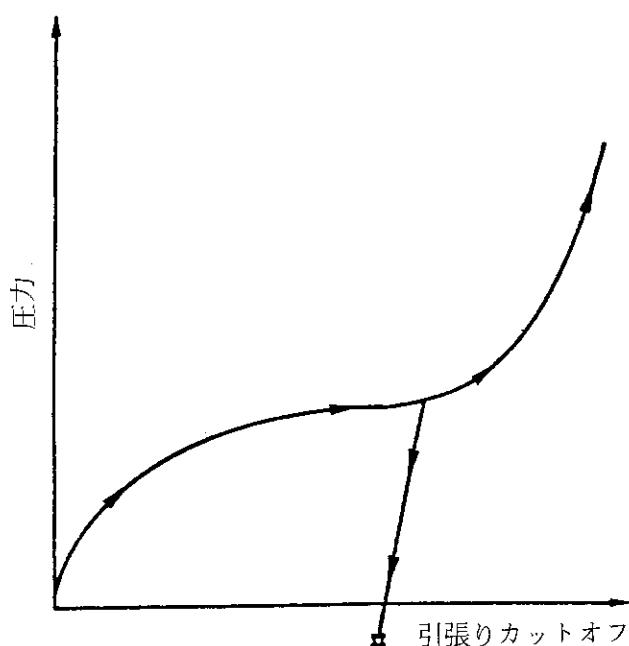
熱膨張係数は計算の最初における参照温度に対して定義される。

物性タイプ5 (土とクラッシャブル・フォーム)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (6 E 10.0)		
1 - 10	せん断剛性	E 10.0
11 - 20	体積除荷率	E 10.0
21 - 30	降伏関数の定数, a_0	E 10.0
31 - 40	降伏関数の定数, a_1	E 10.0
41 - 50	降伏関数の定数, a_2	E 10.0
51 - 60	引張破壊に対するカットオフ圧力	E 10.0
.....カード4 (4 E 10.0)		
1 - 10	体積ひずみ (第4.6.10図参照)	E 10.0
11 - 20	圧力	E 10.0
21 - 30	体積ひずみ	E 10.0
31 - 40	圧力	E 10.0
.....カード5～カード8		
1 - 80	カード4と同様	

体積ひずみと圧力の関係は、(0, 0)を含めて10点まで定義できる。

圧力は圧縮に対して正である。体積ひずみは、相対体積比の自然対数にて与えられ、圧縮に対して負である。テーブル型のデータは圧縮方向に増加する形で並べること。第4.6.10図カットオフ値を上まわった圧力値はカットオフ値にセットされる。

体積ひずみ $[-\ln(V)]$

第4.6.10図 土とクラッシャブル・フォームモデルの体積ひずみー圧力曲線

偏差完全塑性の降伏関数 ϕ は、二次の不变量 J_2 で記述される。

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}$$

圧力は、P、定数を a_0, a_1, a_2 として

$$\phi = J_2 - [a_0 + a_1 p + a_2 p^2]$$

である。 σ_y を単軸降伏応力とすると、降伏面では $J_2 = \frac{1}{3} \sigma_y^2$ であり、

$$\sigma_y = [3(a_0 + a_1 p + a_2 p^2)]^{1/2}$$

である。この面上ではひずみ硬化はない。圧力なしの硬化に対しては、

$$a_1 = a_2 = 0, \text{ および } (3a_0)^{1/2}$$

で降伏強度を定義する。体積ひずみは相対体積 V の自然対数で与えられる。

物性タイプ6（粘弾性）

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1-10	体積弾性係数	E 10.0
.....カード4 (E 10.0)		
1-10	短時間せん断係数, G_0	E 10.0
.....カード5 (E 10.0)		
1-10	長期間せん断係数, G_∞	E 10.0
.....カード6 (E 10.0)		
1-10	減衰定数 β	E 10.0
.....カード7～8		
1-80	ブランク	

せん断の緩和挙動を次式で記述

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty) e^{-\beta t}$$

ジャーマン率の公式は

$$\overset{\nabla}{\sigma}'_{ij} = 2 \int_0^t G(t-\tau) D'_{ij}(\tau) d\tau$$

ここでプライムは応力変化率 σ'_{ij} と、ひずみ変化率 D'_{ij} の偏差部分を意味する。

物性タイプ7 (Blatz-koのラバー)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1 + 10	剪断係数 μ	E 10.0
.....カード4 ~ 8		
1 - 80	ブランク	

2次のピオラーキルヒホッフ応力は

$$S_{ij} = \mu \left(\frac{1}{V} C_{ij} - V^{\frac{-1}{1-\nu}} \delta_{ij} \right)$$

で計算される。ここで V は相対体積, C_{ij} は, Cauchy-Green の応力テンソル, ν はポアソン比であり, 0.463 に内部設定される。

この応力が Cauchy 応力 σ_{ij} に変換される。

関係式は

$$\sigma_{ij} = V^{-1} F_{ik} F_{jl} S_{kl}$$

であり, F_{ij} は変形勾配行列である。

物性タイプ8 (高性能爆薬)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (2 E 10.0)		
1 - 10	爆発速度, D	E 10.0
11 - 20	Chapman-Jouget 壓力, P_{CJ}	E 10.0
.....カード4 ~ 8		
1 - 80	ブランク	

物性タイプ9 (流体)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (2 E 10.0)		
1 - 10	圧力カットオフ値 (≤ 0.0)	E 10.0
11 - 20	粘性係数, μ	E 10.0
.....カード4 ~ 8		
1 - 80	ブランク	

流体物性は、状態方程式と共に使う。圧力カット・オフは引張りを負とする。

粘性応力は, $\mu \neq 0$ の場合

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon'_{ij}$$

物性タイプ10（等方弾塑性一流体）

カ ラ ム	内 容	フォーマット
.....カード3 (4 E 10.0)		
1 - 10	せん断係数	E 10.0
11 - 20	降伏応力, σ_0	E 10.0
21 - 30	塑性ひずみ硬化率, E_h	E 10.0
31 - 40	圧力カット・オフ (デフォルトは $-\infty$)	E 10.0
.....カード4		
1 - 80	ブランク	
.....カード5 (8 E 10.0)		
1 - 10	ε_1 相当塑性ひずみ	E 10.0
⋮	⋮	⋮
71 - 80	ε_8	E 10.0
.....カード6 (8 E 10.0)		
1 - 10	ε_9 相当塑性ひずみ	E 10.0
⋮	⋮	⋮
71 - 80	ε_{16}	E 10.0
.....カード7 (8 E 10.0)		
1 - 10	σ_1 相当応力	E 10.0
⋮	⋮	⋮
71 - 80	σ_8	E 10.0
.....カード8 (8 E 10.0)		
1 - 10	σ_9 相当応力	E 10.0
⋮	⋮	⋮
71 - 80	σ_{16}	E 10.0

カード5～8がブランクの場合に、カード3上の降伏応力と塑性ひずみ硬化率が使われる。この場合には、第4.6.11図で示される二直線の応力-ひずみ関係が得られる ($\beta' = 1$)、降伏応力は、

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_h \varepsilon^{-p}$$

で計算される。 E_h は塑性ひずみ硬化率であり、ヤング率Eと接線剛性 E_t より

$$E_h = \frac{E_t E}{E - E_t}$$

にテ定義される。

カード5～8が使われると図5に示す曲線が定義される。

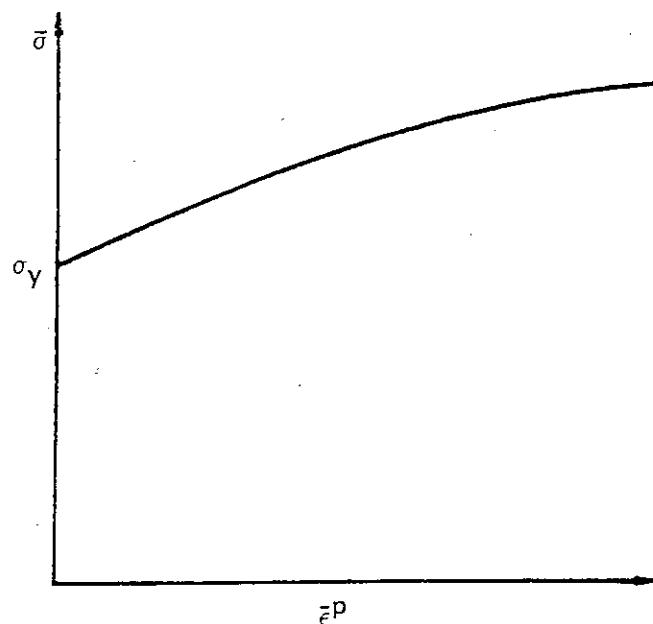
相当応力は偏差応力テンソル、 s_{ij} より

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2}$$

相当ひずみは

$$\bar{\epsilon}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} D_{ij}^p D_{ij}^p \right)^{1/2} dt$$

で定義される、ここで t は時間であり、 D_{ij} は変形テンソルの変化率の塑性成分である。



第 4.6.11 図 相当応力-相当塑性ひずみ曲線

物性タイプ 11 (温度依存、弾塑性、流体型)

カ ラ ム	内 容	フォーマット
.....カード 3 (5 E 10.0)		
1 - 10	G_0	E 10.0
11 - 20	σ_0	E 10.0
21 - 30	β	E 10.0
31 - 40	n	E 10.0
41 - 50	γ_i	E 10.0

.....カード 4 (5 E 10.0)

1 - 10	σ_m	E 10.0
11 - 20	b	E 10.0
21 - 30	b'	E 10.0
31 - 40	h	E 10.0
41 - 50	f	E 10.0

.....カード5 (5 E 10.0)

1 - 10	A (0.0なら R' が定義されるけど)	E 10.0
11 - 20	T_{mo}	E 10.0
21 - 30	γ_0	E 10.0
31 - 40	a	E 10.0
41 - 50	p_{min} 破壁応力, σ_f	E 10.0

.....カード6 (2 E 10.0, 20 X, 3 E 10.0)

1 - 10	スパールの型 = 1.0: $p \geq p_{min}$ = 2.0: $\sigma_{max} > -p_{min}$ となると要素はスパール破壊し, 引張りすなわち $p < 0$ は以後許されない。 = 3.0: $p < -p_{min}$ となると要素はスパール破壊し, 引張りすなわち $p < 0$ は以後許されない。	E 10.0
11 - 20	R' ($R \neq 0.0$ なら A は定義されない。)	E 10.0
41 - 50	1.0ならば, 低温時圧縮エネルギーのフィットに係数 μ が与えられる。	E 10.0
51 - 60	μ または η の最小値	E 10.0
61 - 70	μ または η の最大値	E 10.0

.....カード7 (5 E 16.0)

1 - 16	EC_0	E 16.0
17 - 32	EC_1	E 16.0
33 - 48	EC_2	E 16.0
49 - 64	EC_3	E 16.0
65 - 80	EC_4	E 16.0

.....カード8 (5 E 16.0)

1 - 16	EC_5	E 16.0
17 - 32	EC_6	E 16.0
33 - 48	EC_7	E 16.0
49 - 64	EC_8	E 16.0
65 - 80	EC_9	E 16.0

このモデルに関心があるユーザーには、理論的根拠を述べている Steinbeg と Guinar の論文がある。この他、有益な参考文献が KNVEC ユーザー・マニュアルにある。

以上のパラメータによって、物質の溶解前のせん断係数は

$$G = G_0 \left[1 + bpV^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R^1} - 300 \right) \right] e^{-\frac{fE_i}{E_u - E_i}}$$

と定義される。P は圧力、V は相対体積 EC は低温時の圧縮エネルギー

$$E_c(x) = \int_0^x pdx - \frac{900R' \exp(ax)}{(1-x)^{2(T_o - a - 1/2)}}$$

$$x = 1 - V,$$

である。また E_m は溶解エネルギーであり、次式で与えられる。

$$E_m(x) = E_c(x) + 3R' T_m(x)$$

また融点 $T_m(x)$ は次式で与えられる。

$$T_m(x) = \frac{T_{m0} \exp(2ax)}{V_0^{2(T_0 - a - 1/3)}}$$

T_{m0} は $\rho = \rho_0$ 時の融点である。上式中

$$R' = R\rho/A$$

で定義される。R はガス定数、A は原子量である。R' が与えられないと、DYNA 3D は cm-g-ms 系での R として計算する。

E_m が E_i を越えた場合 σ'_0 は次式で与えられ、

$$\sigma_y = \sigma'_0 \left[1 + b p V^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right) \right] e^{-\frac{fE_i}{E_m - E_i}}$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 [1 + \beta(\gamma_i + \varepsilon^{-p})]^n$$

γ_i は初期塑性ひずみである。 σ'_0 が σ_m を越えると、 σ'_0 は σ_m に等しくとられる。溶融後は σ_y と G は 0 にセットされる。EC 0 ~ EC 9 までの係数が定義されないと、DYNA 3D は低温時の圧縮エネルギーは 10 次の多項式でフィットする。

$$E_c = \sum_{i=0}^9 EC_i \eta^i$$

ここで EC_i は i 次の係数で η は $\rho/\rho_0 - 1$ である。

フィッティングには最小二乗法が使われる。

物性タイプ 12 (等方弾塑性)

カラム	内容	フォーマット
.....カード 3 (3 E 10.0)		
1 - 10	せん断係数	E 10.0
11 - 20	降伏応力 (第 4.6.9 図参照)	E 10.0
21 - 30	ひずみ硬代率	E 10.0
.....カード 4 (E 10.0)		
1 - 10	K, 体積断性率	E 10.0
.....カード 5 ~ 8		
1 - 80	ブランク	

圧力は

$$\dot{p} = -K \frac{\dot{V}}{V}$$

より時間積分される。V は相対体積である。

物性タイプ13（破壊モデル入り弾塑性）

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (5 E 10.0)		
1 - 10	せん断係数	E 10.0
11 - 20	降伏応力（第4.6.9図）	E 10.0
21 - 30	ひずみ硬化率	E 10.0
31 - 40	破壊ひずみ	E 10.0
41 - 50	破壊圧力 (≤ 0.0)	E 10.0
.....カード4 (E 10.0)		
1 - 10	体積断性率	E 10.0
.....カード5～7		
1 - 80	プランク	
.....カード8 (E 10.0)		
1 - 10	要素破壊フラッグ (FTYPE) FTYPE = 1 相当塑性ひずみによる破壊 = 2 最大主応力による破壊 = 3 (積分点単位) = 4 最大主応力による破壊 (要素単位) 最大主応力による破壊の剛性減退 (積分点単位)	E 10.0

相当塑性ひずみ破壊ひずみに達するか圧力が破壊圧力に達した時には、要素は引張り力を伝達する能力を失い、偏差応力を0にセットする。すなわち、物質は流体様の挙動を示す。

物性タイプ14（破壊モデル入り土とクラッシャブル・フォーム）

物性タイプ5と入力データは同一であるが、圧力が破壊圧力に達すると、要素は引張り力を伝達する能力を失う。

物性タイプ15 (Johnson/Cook 歪と感温塑性)

カラム	内容	フォーマット
-----	----	--------

.....カード3 (8 E 10.0)

1 - 10	G	E 10.0
11 - 20	A	E 10.0
21 - 30	B	E 10.0
31 - 40	n	E 10.0
41 - 50	C	E 10.0
51 - 60	m	E 10.0
61 - 70	T _m , 融点	E 10.0
71 - 80	T _a , 室温	E 10.0

.....カード4 (5 E 10.0)

1 - 10	ξ ₀	E 10.0
11 - 20	比熱	E 10.0
21 - 30	p _{min} または破壊応力 σ _P	E 10.0
31 - 40	スパール型 = 0.0: デフォルト値 2.0 にセットする。 = 1.0: p ≥ p _{min} = 2.0: σ _{max} ≥ σ _P となると、要素がスパールし、引張り (p ≤ 0) は許されない。	E 10.0
41 - 50	塑性ひずみ繰り返し計算フラッグ = 1.0: 厳密な繰り返し計算により、塑性ひずみを求める。 デフォルトよりかなり高価。	E 10.0

...カード5 (5 E 10.0)

1 - 10	D 1, 破壊パラメータ	E 10.0
11 - 20	D 2	E 10.0
21 - 30	D 3	E 10.0
31 - 40	D 4	E 10.0
41 - 50	D 5	E 10.0

.....カード6 ~ 8

1 - 80	ブランク	
--------	------	--

Johnson と Cook は、応力流れを

$$\sigma_y = (A + B \xi^P^n) (1 + c \ln \dot{\xi}^*) (1 - T^{*m})$$

と表現している。

ここで、A, B, C, n および m は、入力定数

ξ^P: 相当塑性ひずみξ^{*} = ξ^P / ξ₀: 相当塑性ひずみ速度

ただし $\xi_0 = 1 \text{ s}^{-1}$

T^* = 相当温度

流れ則の塑性ひずみ依存が非線形なので、正確な応力流れを求めるには塑性ひずみ増分を繰り返し計算により求めなければならない。

しかし、現時刻における線形化による Taylor 級数を用いることにより、繰り返し計算なしで充分正確な σ_y を求めることができる。

破面でのひずみは、

$$\xi^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] [1 + D_4 \ell \ln \xi]^* [1 + D_s T^*]$$

によって求められる。ここで σ^* は、圧力と相当応力の比で

$$\sigma^* = \frac{P}{\sigma_{\text{eff}}}$$

破壊は、損傷パラメータ

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\xi^f}$$

が 1 に達した時に生じる。

物性タイプ 16 (擬似 TENSOR コンクリート/土質モデル)

カラム	内容	フォーマット
-----	----	--------

.....カード 3 (8 E 10.0)

1 - 10	ν , (ポアソン比一定モデル) -G, (剪断係数一定モデル)	E 10.0
11 - 20	σ_b , 張力カットオフ値 (破壊最大主応力)	E 10.0
21 - 30	a_0 , 凝集力	E 10.0
31 - 40	a_1 , 圧力硬化係数	E 10.0
41 - 50	a_2 , 圧力硬化係数	E 10.0
51 - 60	損傷スケールファクター	E 10.0
61 - 70	破壊モデルの凝集力	E 10.0
71 - 80	破壊モデルの圧力硬化係数	E 10.0

.....カード 4 (7 E 10.0)

1 - 10	補強材 割合 (%)	E 10.0
11 - 20	補強材 弹性係数	E 10.0
21 - 30	補強材 ポアソン比	E 10.0
31 - 40	初期降伏応力	E 10.0
41 - 50	接線剛性	E 10.0
51 - 60	主物質に対する負荷カーブの速度感度	E 10.0
61 - 70	補強材に対する負荷カーブの速度感度	E 10.0

.....カード5 (8 E 10.0)

1 - 10	ε_1 , 相当塑性ひずみまたは圧力	E 10.0
:	:	:
71 - 80	ε_8	E 10.0

.....カード6 (8 E 10.0)

1 - 10	ε_9	E 10.0
:	:	:
71 - 80	ε_{16}	E 10.0

.....カード7 (8 E 10.0)

1 - 10	σ_1 , 相当応力	E 10.0
:	:	:
71 - 80	σ_8	E 10.0

.....カード8 (8 E 10.0)

1 - 10	σ_9	E 10.0
:	:	:
71 - 80	σ_{16}	E 10.0

ポアソン比一定モデルでは、剪断係数が体積弾性率から計算される。剪断係数一定モデルでは、ポアソン比が体積弾性率より計算される。体積弾性率は、状態方程式で決められる。

$a_0 = a_1 = 0$ とすると、カード5および6は相当塑性ひずみではなく、圧力として用いられる。

a_0 を負値とすると、 σ_f に与えられる値は張力カットオフ値でなく、主物質の非凝縮圧縮強さと仮定される。この場合、圧力硬化係数は以下のように内部で計算される。

$$\sigma_f = 1.7 \times ((f' c)^2 / ucf)^{1/3}$$

$$a_0 = \left(\frac{1}{4} \right) \times (f' c)$$

$$a_1 = \frac{1}{3}$$

$$a_2 = \left(\frac{1}{3} \right) / (f' c)$$

$$a_{0f} = 0$$

$$a_{1c} = 0.385$$

ここで、 $ucf = -a_0$ は $f' c$ (psi/ (DYNA 圧力単位)) に対する換算係数である。

この場合も、状態方程式は特定されず (約 5 kbar 以下の圧力で良好)，3直線近似の状態方程式 8 番データがポアソン比と $f' c$ から内部的に生成される。

さもなければ、ユーザーが状態方程式 8, 9 または 11 番のデータを指定する。

主物質と補強材の特性は、以下の混合則により結合される。

$$\begin{aligned} \text{bulk} &= (1 - fs) * bkm + fs * bkr \\ \text{shrm} &= (1 - fs) * gm + fs * gr \\ \text{sigy} &= (1 - fs) * sym + fs * syr \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \text{sym} &= f(kl, edot) * \{a0 + p / (a1 + a2 * p)\} * g(dmg) \\ &\text{または } f(kl, edot) * g(p) \\ \text{syr} &= f(k2, edot) * qs + qh * epx \end{aligned}$$

である。

$f(k, edot)$ は、荷重カーブ k ($k = 0$ ならば $f = 1.0$) から線形補間で得られるスケールファクタを乗じた歪速度依存の降伏応力を表す。

g は、降伏応力テーブルから線形補間で得られるスケールファクタを乗じた損傷、または圧力を表す。 dmg は以下に定義する等方的な損傷速度である。

$$dmg = \int_0^{\bar{\epsilon}^p} \frac{d\bar{\epsilon}^p}{\left(1 + \frac{p}{sigf}\right)^{**51}}$$

fs は、等方的に取り扱われた補張材比率である。

要素内の主応力が張力カットオフ値を越えた場合、要素の剛性マトリクスは破壊したものと仮定される。破壊後、要素剛性マトリクスは圧縮荷重のみ支えることができ、剪断強さは破壊物性の降伏面により制限される。

$$\text{symf} = a0f + p / (a1f + a2 * p)$$

物性タイプ17 (等方弾塑性クラックモデル)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1 - 10	ヤング率	E 10.0
.....カード4 (E 10.0)		
1 - 10	ポアソン比	E 10.0
.....カード5 (E 10.0)		
1 - 10	降伏応力	E 10.0
.....カード6 (E 10.0)		
1 - 10	ひずみ硬化率	E 10.0
.....カード7 (E 10.0)		
1 - 10	破壊応力	E 10.0
.....カード8 (E 10.0)		
1 - 10	圧力カットオフ ($\leq 0.$)	E 10.0

最大主応力が破壊応力を越えると、最大主応力の方向に垂直な面で破壊する。引張りでは、要素は破壊面上でどのような応力も伝えないが、圧縮では垂直および剪断応力を伝える。他の方向でも破壊応力に達すると、要素は等方的に破断する。要素は引張り応力を伝えることが出来ず、偏差応力がゼロにセットされ、物質は流体のようにふるまう。

物性タイプ18（級数則等方塑性）

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (4 E 10.0)		
1 - 10	縦弾性係数	E 10.0
11 - 20	ポアソン比	E 10.0
21 - 30	k, 強度係数	E 10.0
31 - 40	n, 硬化乗数	E 10.0
.....カード4～8.....		
1 - 80	ブランク	

等方硬化による弾塑性挙動は、このモデルにより与えられる。降伏応力 σ_y は、塑性ひずみの関数であり、次の方程式に従う。

$$\sigma_y = k \bar{\varepsilon}^p^n$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}^p$ は相当塑性のひずみである。

物性タイプ19（ひずみ速度依存等方塑性）

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (8 E 10.0)		
1 - 10	縦弾性係数	E 10.0
11 - 20	ポアソン比	E 10.0
	J ₀ をひずみ速度の関数として定義する。	
21 - 30	荷重曲線番号	E 10.0
31 - 40	ひずみ硬化率, E _t	E 10.0
41 - 50	ヤング率をひずみ速度の関数として定義する荷重曲線番号 (オプション)	E 10.0
51 - 60	接線剛性をひずみ速度の関数として定義する荷重曲線番号 (オプション)	E 10.0
61 - 70	破壊時のミゼス応用をひずみ速度の関数として定義する荷 重曲線番号 (オプション)	E 10.0
71 - 80	自動要素除去のための時間刻み	E 10.0
.....カード4～8.....		
1 - 80	ブランク	

このモデルでは、降伏応力 σ_0 を相当ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の関数として記述するために荷重曲線を用いる。

ただし、

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{2}{3} \varepsilon_{rj} \dot{\varepsilon}_{rj} \right)^{1/2}$$

ここで、プライムは偏差成分を表す。降伏応力は、

$$\sigma_y = \sigma_0(\dot{\varepsilon}) + E_h \bar{\varepsilon}^p$$

として定義される。ここで $\bar{\varepsilon}^p$ は相当塑性ひずみであり、 E_h は

$$E_h = \frac{E E_t}{E - E_t}$$

で定義される。

物性タイプ 20 (剛体)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1-10	縦弾性係数	E 10.0
.....カード4		
1-10	ポアソン比	E 10.0
.....カード5～8		
1-80	プランク	E 10.0

物性データは、剛体がスライディング・インターフェースに関係する場合に、スライディング・インターフェースのパラメータを決定するために用いられる。これらは、現実的な値を定義すべきである。

物性タイプ 21 (熱異方性弾性)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (3 E 10.0)		
1-10	E_a (第4.6.8図参照)	E 10.0
11-20	E_b	E 10.0
21-30	E_c	E 10.0

.....カード4 (6 E 10.0)

1 - 10	ν_{ba}	E 10.0
11 - 20	ν_{ca}	E 10.0
21 - 30	ν_{cb}	E 10.0
31 - 40	α_{aa} , 热膨胀係数	E 10.0
41 - 50	α_{ab}	E 10.0
51 - 60	α_{ac}	E 10.0

.....カード5 (3 E 10.0)

1 - 10	G_{ab}	E 10.0
11 - 20	G_{bc}	E 10.0
21 - 30	G_{ca}	E 10.0

.....カード6 (E 10.0)

1 - 10	物性軸オプション, AORT = 0.0: 要素節点により決まる物性軸を用いる局所異方性。 このオプションの場合は、カード7, 8はブランク。 = 1.0: 空間上の1点と要素中心の位置によって決まる物 性軸を用いる局所異方性。 = 2.0: カード7と8で定義するベクトルによって決まる 物性軸を用いる全体異方性。 = 3.0: シェル要素のみ適用可。	E 10.0
--------	--	--------

.....カード7 (3 E 10.0)

1 - 10	x_p	E 10.0
11 - 20	y_p	E 10.0
21 - 30	z_p	E 10.0
1 - 10	a_1	E 10.0
11 - 20	a_2	E 10.0
21 - 30	a_3	E 10.0
1 - 10	v_1	E 10.0
11 - 20	v_2	E 10.0
21 - 30	v_3	E 10.0

.....カード8 (3 E 10.0)

1 - 10	d_1	E 10.0
11 - 20	d_2	E 10.0
21 - 30	d_3	E 10.0
1 - 10	物性軸角度。要素カードで上書きされる。	E 10.0

物性タイプ 22 (複合材損傷モデル)

カ ラ ム	内 容	フォーマット
.....カード 3 (4 E 10.0)		
1 - 10	E_a , 長手方向	E 10.0
11 - 20	E_b , 横方向	E 10.0
21 - 30	E_c , 鉛直方向	E 10.0
31 - 40	K_f , 破壊物性のための体積弾性率	E 10.0
.....カード 4 (3 E 10.0)		
1 - 10	ν_{ba}	E 10.0
11 - 20	ν_{ca}	E 10.0
21 - 30	ν_{cb}	E 10.0
.....カード 5 (3 E 10.0)		
1 - 10	G_{ab}	E 10.0
11 - 20	G_{bc}	E 10.0
21 - 30	G_{ca}	E 10.0
.....カード 6 (2 E 10.0)		
1 - 10	物性軸オプション, AOPT = 0.0: 要素節点により決まる物性軸を用いる局所異方性。 このオプションの場合は、カード 7, 8 はブランク。 = 1.0: 空間上の 1 点と要素中心の位置によって決まる物性軸を用いる局所異方性。 = 2.0: カード 7 と 8 で定義するベクトルによって決まる物性軸を用いる全体異方性。 = 3.0: シェル要素のみ適用可。 ソリッド要素のための物性軸変更フラグ = 0.1: デフォルト = 2.0: 物性軸を a と b に変更 = 3.0: 物性軸を a と c に変更	E 10.0
11 - 20		E 10.0
.....カード 7 (2 E 10.0)		
1 - 10	x_p	E 10.0
11 - 20	y_p	E 10.0
21 - 30	z_p	E 10.0
1 - 10	a_1	E 10.0
11 - 20	a_2	E 10.0
21 - 30	a_3	E 10.0
1 - 10	v_1	E 10.0
11 - 20	v_2	E 10.0
21 - 30	v_3	E 10.0

.....カード8 (E 10.0)

1 - 10	d_1	E 10.0
11 - 20	d_2	E 10.0
21 - 30	d_3	E 10.0
31 - 40	s_c , 剪断強さ, ab平面	E 10.0
41 - 50	x_t , 長手方向引っ張り強さ	E 10.0
51 - 60	y_t , 横方向引っ張り強さ	E 10.0
61 - 70	y_o , 横方向圧縮強さ	E 10.0
71 - 80	非線形剪断応力パラメータ	E 10.0

厚み方向の積分点それぞれについて物性軸角度を定義する。

各シェル要素に対し、このデータはカード11に続ける必要がある。

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	β_1 , 第1積分点での物性角度	E 10.0
11 - 20	β_2 , 第2積分点での物性角度	E 10.0
:	:	:
71 - 80	β_8 , 第8積分点での物性角度	E 10.0

第NIP点が定義されるまで続ける。NIPは、シェル要素のカード10で特定する厚み方向積分点の個数である。

物性タイプ23 (12曲線による熱的異方性弾性)

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1 - 10	物性定数—温家曲線の点数 NUMPTS (1 < NUMPTS < 49)	E 10.0
.....カード4, 5.....		
1 - 80	プランク	
.....カード6 (E 10.0)		

1 - 10	物性軸オプション, AOPT = 0.0: 要素節点により決まる物性軸を用いる局所異方性。 このオプションの場合は、カード7, 8はプランク。 = 1.0: 空間上の1点と要素中心の位置によって決まる物性軸を用いる局所異方性。 = 2.0: カード7と8で定義するベクトルによって決まる物性軸を用いる全体異方性。 = 3.0: シェル要素のみ適用可。	E 10.0
--------	--	--------

.....カード7 (9 E 10.0)

1 - 10 11 - 20 21 - 30	x_p y_p z_p	AOPT = 1.0 の場合に使用	E 10.0 E 10.0 E 10.0
1 - 10 11 - 20 21 - 30	a_1 a_2 a_3	AOPT = 2.0 の場合に使用	E 10.0 E 10.0 E 10.0
1 - 10 11 - 20 21 - 30	v_1 v_2 v_3	AOPT = 3.0 の場合に使用	E 10.0 E 10.0 E 10.0

.....カード8 (3 E 10.0)

1 - 10 11 - 20 21 - 30	d_1 d_2 d_3	AOPT = 2.0 の場合に使用	E 10.0 E 10.0 E 10.0
------------------------------	-------------------------	-------------------	----------------------------

以上のカードセットにより、8 E 10.0 のフォーマットによる対応温度のリストに従い、12と異方性定数を定義する。

シェル要素に対しては、カード10および11の後に続けなければならない。

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	温度 T_1 における E_a	E 10.0
11 - 20	温度 T_2 における E_a	E 10.0
:	:	:
71 - 80	温度 T_8 における E_a	E 10.0

このカードを NUMPTS 点が定義されるまで続ける。変数 E_b , E_c , ν_{ba} , ν_{ca} , ν_{cb} , a_a , a_b , a_c , G_{ab} , G_{bc} , G_{ca} および T (温度リスト) を以下に続けて定義する。

シェル要素に対してのみ、厚み方向積分点に対し物性角度を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	第1積分点のための物性角度 β_1	E 10.0
11 - 20	第2積分点のための物性角度 β_2	E 10.0
:	:	:
71 - 80	第8積分点のための物性角度 β_8	E 10.0

シェル要素に対しては NIP 点が定義されるまで、このカードを加え続ける。

NIP ではカード10で定義される板厚方向の積分点個数である。

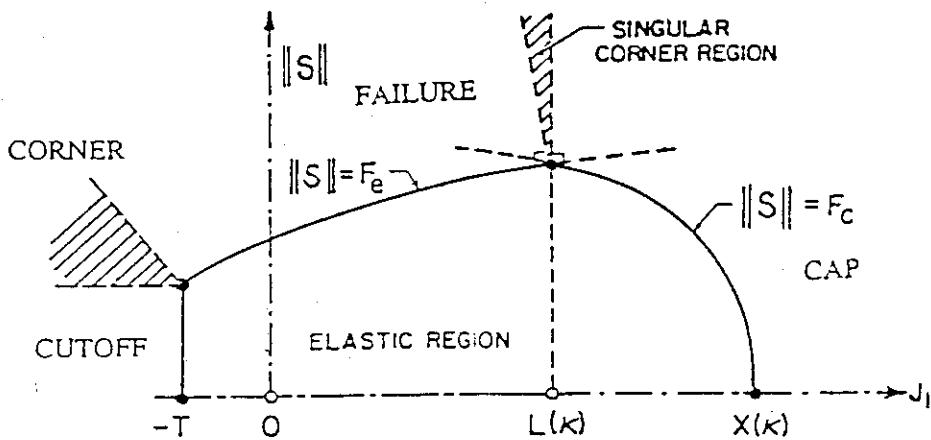
物性タイプ 24 (区分線形等方塑性)

カラム	内 容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1 - 10	ヤング率	E 10.0
.....カード4 (E 10.0)		
1 - 10	ボアソン比	E 10.0
.....カード5 (E 10.0)		
1 - 10	降伏応力	E 10.0
.....カード6 (4 E 10.0)		
1 - 10	接線剛性、以下に応力-ひずみ関係が定義されると無視される	E 10.0
11 - 20	破壊塑性ひずみ	E 10.0
21 - 30	ひずみ速度効果に対する降伏応力をスケーリングする荷重カーブ番号	E 10.0
31 - 40	自動要素削除のための時間ステップサイズ	E 10.0
.....カード7 (E 10.0)		
1 - 80	相当塑性ひずみ値 (8点まで定数) E 10.0	
.....カード8 (E 10.0)		
1 - 80	対応する降伏応力値	E 10.0

物性タイプ 25 (非粘性2不変量土質キャップモデル)

このモデルはベクトル化されていない

カラム	内 容	フォーマット
.....カード3 (2 E 10.0)		
1 - 10	体積弾性率	E 10.0
11 - 20	剪断係数	E 10.0
.....カード4 (5 E 10.0)		
1 - 10	α	E 10.0
11 - 20	θ	E 10.0
21 - 30	r	E 10.0
31 - 40	β	E 10.0
41 - 50	R	E 10.0



第4.6.12図 圧力/ J_2 偏差空間における、2不変量キャップモデルの降伏曲面。
 $f_1 = 0, f_2 = 0$ および $f_3 = 0$ はそれぞれ、破壊包絡線、硬化キャップ面
 および張力カットオフ面を示す。斜線連分は、圧力コーナー領域を示す。

$$f_1(\underline{\sigma}) := \|\underline{s}\| - F_e(J_1), \quad -T \leq J_1 < k$$

$$f_2(\underline{\sigma}, k) := \|\underline{s}\| - F_c(J_1, k), \quad k \leq J_1 < x(k)$$

$$f_3(\underline{\sigma}) := -T - J_1, \quad -T \leq J_1 < k$$

ここで、 $J_1 := \text{tr } \underline{\sigma}$

$$\|\underline{s}\| := \sqrt{\underline{s} : \underline{s}} \text{ with } \underline{s} := \underline{\sigma} - \frac{1}{3} (\text{tr } \underline{\sigma}) \mathbf{1}.$$

また、 $T > 0$ では物性定数は、張力カットオフ値を参照する。以下の土よメカニズムでは標準的な式で、圧縮と集約が正であると仮定する。

$$F_e(J_1) := [\alpha - \lambda_{\exp}(-\beta J_1) + \theta J_1]$$

$$F_c(J_1, k) := \sqrt{F_e^2(k) - \frac{[J_1 - k]^2}{R^2}}$$

ここで、 $\alpha, \lambda, \beta, \theta$ および R はいずれも正値の物性パラメータである。また $x(k)$ は硬化パラメータ k の関数で、

$$x(k) := k + RF_e(k)$$

として定義される。

$$\dot{k} = \begin{cases} 0, & \text{tr}\dot{\varepsilon}_p^p < 0, J_1 = k, f_1 = f_2 = 0 \text{ のとき} \\ \max \left[h'(k) \text{tr}\dot{\varepsilon}_p^p; \frac{d\|s\|/dt}{F_e(k)} \right], & J_1 = k, f_1 = 0, f_2 < 0 \\ h'(k)\dot{\varepsilon}_p^p, & \text{その他} \end{cases}$$

ただし, $\bar{h}(k) := w \{ 1 - \exp [-D(x(k) - x_0)] \}$

.....カード 5 (E 10.0)

1 - 10	D	E 10.0
11 - 20	W	E 10.0
21 - 30	x_0	E 10.0

.....カード 6 (E 10.0)

1 - 10	NPLOT=1: L(0) = 2: x = 3: ε_v^p = 4: J_1 = 5: $\sqrt{J_2}$ = 6: $\sqrt{J_2} L$ = 7: $\sqrt{J_2} tr$ = 8: MTYPE = 9: # interanions	E 10.0
--------	---	--------

.....カード 7 (E 10.0)

1 - 10	LTYPE=1: 土/コンクリート (キャップモデル) = 2: 岩 (キャップモデルでない)	E 10.0
--------	--	--------

.....カード 8 (E 10.0)

1 - 10	張力カットオフ値	E 10.0
--------	----------	--------

NPLOT により TAURUS データベースに格納される変数を特定する。相当塑性ひずみとしてプロットされる。

物性タイプ 26 (金属ハニカム)

カラム	内容	フォーマット
.....カード 3 (8 E 10.0)		
1 - 10	ヤング率	E 10.0
11 - 20	ポアソン比	E 10.0
21 - 30	完全に圧縮されたハニカムの降伏応力	E 10.0
31 - 40	σ_{xx} - 相当体積の関係を示す荷重曲線番号	E 10.0
41 - 50	σ_{yy} - 相当体積の関係を示す荷重曲線番号	E 10.0
51 - 60	σ_{zz} - 相当体積の関係を示す荷重曲線番号	E 10.0
61 - 70	剪断応力 - 相当体積の関係を示す荷重曲線番号	E 10.0
71 - 80	ハニカムが完全に圧縮されたときの相当体積	E 10.0
.....カード 4 (6 E 10.0)		
1 - 10	圧縮されない形での弾性定数 E_{xx}	E 10.0
11 - 20	圧縮されない形での弾性定数 E_{yy}	E 10.0
21 - 30	圧縮されない形での弾性定数 E_{zz}	E 10.0
31 - 40	圧縮されない形での剪断定数 G_{xy}	E 10.0
41 - 50	圧縮されない形での剪断定数 G_{yz}	E 10.0
51 - 60	圧縮されない形での剪断定数 G_{zx}	E 10.0
.....カード 5 ~ 8		
1 - 80	ブランク	

完全に圧縮されたハニカム物性の挙動は、完全弾塑性として扱われる。

圧縮前の挙動は、応力テンソルがカップリングしない異方性となる。すなわち、x 方向ひずみは x 方向抗力となり、y 方向または z 方向とは関係しない。弾塑性係数は、初期値から完全圧縮時の値まで相当体積に対して線形に変わる。

荷重曲線によって密度（相当体積）が変わった時の平均応力の大きさが決まる。この曲線を正しく定義することにより、一次元のクラッシュはモデル化される。このモデルに関する各曲線は、同じ点数と同じ横座標を待たねばならない。曲線の第一の値は、完全に圧縮された値よりも少し小さい相対体積に対応する値でなければならない。

異方性の物性軸は一つの方法で定義されるが、必要であれば一般化することができる。局所的な z 方向は、ソリッド要素底面の直交する 2 辺の外積を計算することにより定義される。節点 4 を始点とし 2 を終点とするベクトルは 1 を始点とし、3 を終点とするベクトルは交差する。x 方向は辺 1 - 2 で定義され、y 方向は z および x に直交する方向として定義される。辺 1 - 2 は鉛直ベクトルに垂直となるように修正される。

物性タイプ27(圧縮性Mooney-Rivlinゴム)

この物性モデルは、Blatz-Koのゴムモデルとは別のものである。

組み込みはMakerによる。

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (3 E 10.0)		
1-10	A	E 10.0
11-20	B	E 10.0
21-30	ν , ポアソン比	E 10.0
.....カード4~8		
1-80	ブランク	

ひずみエネルギー密度は、

$$W = A(I-3) + B(II-3) + C(III^{-2}-1) + D(III-1)^2$$

$$\text{ここで, } C = 0.5A + B$$

$$D = \frac{A(5\nu-2) + B(11\nu-5)}{2(1-2\nu)}$$

$$\nu = \text{ポアソン比}$$

$$2(A+B) = G = \text{線形弾性での剪断係数}$$

I, II, IIIは正則Cauchy-GreenテンソルQの不变量

物性タイプ28(合成塑性)

このモデルはビームとシェルに対し適用可能であるが、開発分のものであるビーム要素に対しては完全弾塑性として扱われ、シェル要素では近似的に等方硬化モデルとなる。

カラム	内容	フォーマット
.....カード3 (E 10.0)		
1-10	ヤング率	E 10.0
.....カード4 (E 10.0)		
1-10	ポアソン比	E 10.0
.....カード5 (E 10.0)		
1-10	降伏応力	E 10.0
.....カード6 (E 10.0)		
1-10	硬化係数, E_t (シェルのみ)	E 10.0
.....カード7, 8		
1-80	ブランク	

物性タイプ 8～11 または 17 のときのみ状態方程式カードを定義する。

カラム	内容	フォーマット
.....カード 9 (12 A 6)		
1 - 72	状態方程式指標	12 A 6

.....カード 10 以下.....

・状態方程式 形式 1 (線型多項式)

カラム	内容	フォーマット
.....カード 10 (7 E 10.0)		
1 - 10	C_0	E 10.0
11 - 20	C_1	E 10.0
21 - 30	C_2	E 10.0
31 - 40	C_3	E 10.0
41 - 50	C_4	E 10.0
51 - 60	C_5	E 10.0
61 - 70	C_6	E 10.0
71 - 80	E_0 , 初期内部エネルギー	E 10.0

.....カード 11 (E 10.0)

1 - 10	V_0 , 初期相対体積	E 10.0
--------	----------------	--------

線型多項式の状態方程式は、内部エネルギーに関して線形である。

圧力は次式で与える。

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

$\mu < 0$ の時には、 $C_2\mu^2$ と $C_6\mu^2$ は 0 にセットされる。なお、

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1$$

であり、 ρ/ρ_0 は現在の密度の初期密度に対する比である。

・状態方程式 形式 2 (JWL)

カラム	内容	フォーマット
.....カード 10 (7 E 10.0)		
1 - 10	A	E 10.0
11 - 20	B	E 10.0
21 - 30	R_1	E 10.0
31 - 40	R_2	E 10.0
41 - 50	ω	E 10.0
51 - 60	E_0 , 初期内部エネルギー	E 10.0
61 - 70	V_0 , 初期相対体積	E 10.0

JWL 状態方程式では、圧力は次式にて定義され、高性能爆薬の燃焼生成物に対し、一般に使用される。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V}$$

状態方程式 形式 3 (Sack)

カラム	内 容	フォーマット
.....カード 10 (7 E 10.0)		
1 - 10	A ₁	E 10.0
11 - 20	A ₂	E 10.0
21 - 30	A ₃	E 10.0
31 - 40	B ₁	E 10.0
41 - 50	B ₂	E 10.0
51 - 60	E ₀ , 初期内部エネルギー	E 10.0
61 - 70	V ₀ , 初期相対体積	E 10.0

Sack の状態方程式では、圧力は次式にて定義され、高性能爆薬の燃焼生成物に対して適用される。

$$p = \frac{A_3}{V^{A_1}} e^{-A_2 V} \left(1 - \frac{B_1}{V} \right) + \frac{B_2}{V} E$$

状態方程式 形式 4 (Gruneisen)

カラム	内 容	フォーマット
.....カード 10 (8 E 10.0)		
1 - 10	C	E 10.0
11 - 20	S ₁	E 10.0
21 - 30	S ₂	E 10.0
31 - 40	S ₃	E 10.0
41 - 50	r ₀	E 10.0
51 - 60	a	E 10.0
61 - 70	E ₀ , 初期内部エネルギー	E 10.0
71 - 80	V ₀ , 初期相対体積	E 10.0

三次の衝撃速度をもつ Gruneisen の状態方程式では、圧縮された物質の圧力は、粒子の速度により次式にて決まる。

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{r_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - \left(S_1 - 1 \right) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2 + (\gamma_0 + a\mu) E}$$

また、膨張する物質では次式で与えられる。

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E$$

ここで C は $\mu_s - \mu_p$ 曲線の切片であり、 S_1, S_2, S_3 は $\mu_s - \mu_p$ 曲線の傾きを表す係数である。 γ_0 は Gruneisen のガンマであり、 a は γ_0 に対する一次の体積補正であり、 μ は

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1$$

である。

・状態方程式 形式 5 (多項式の比)

カラム	内 容	フォーマット
.....カード 10 (4 E 16.0)		
1 - 16	A_{10}	E 16.0
17 - 32	A_{11}	E 16.0
33 - 48	A_{12}	E 16.0
49 - 64	A_{13}	E 16.0
.....カード 11 (4 E 16.0)		
1 - 16	A_{20}	E 16.0
17 - 32	A_{21}	E 16.0
33 - 48	A_{22}	E 16.0
49 - 64	A_{23}	E 16.0
.....カード 12 (4 E 16.0)		
1 - 16	A_{30}	E 16.0
17 - 32	A_{31}	E 16.0
33 - 48	A_{32}	E 16.0
49 - 64	A_{33}	E 16.0
.....カード 13 (4 E 16.0)		
1 - 16	A_{40}	E 16.0
17 - 32	A_{41}	E 16.0
33 - 48	A_{42}	E 16.0
49 - 64	A_{43}	E 16.0
.....カード 14 (4 E 16.0)		
1 - 16	A_{50}	E 16.0
17 - 32	A_{51}	E 16.0
33 - 48	A_{52}	E 16.0
49 - 64	A_{53}	E 16.0
.....カード 15 (4 E 16.0)		
1 - 16	A_{60}	E 16.0
17 - 32	A_{61}	E 16.0
33 - 48	A_{62}	E 16.0
49 - 64	A_{63}	E 16.0

.....カード 16 (4 E 16.0)

1 - 16	A_{70}	E 16.0
17 - 32	A_{71}	E 16.0
33 - 48	A_{72}	E 16.0
49 - 64	A_{73}	E 16.0

.....カード 18 (4 E 16.0)

1 - 16	α	
17 - 32	β	
33 - 48	A_{14}	
49 - 64	A_{24}	

.....カード 19 (2 E 16.0)

1 - 16	E_0 , 初期内部エネルギー	
17 - 43	V_0 , 初期相対体積	

多項式の比による状態方程式では、圧力は

$$p = \frac{F_1 + F_2 E + F_3 E^2 + F_4 E^3}{F_5 + F_6 E + F_7 E^2} (1 - \alpha \mu)$$

と定義される。

ここで

$$F_i = \sum_{j=0}^n A_{ij} \mu^j \quad n = 4 \quad \text{if } i < 3$$

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad n = 3 \quad \text{if } i \geq 3$$

である。

膨張状態では、 F_1 は

$$F'_1 = F_1 + \beta \mu^2$$

で置き換わる。

$A_{10} = 1.0$ とおくことにより、この物質のデルタ・フェーズ・モデルは初期化される。フラッギセット後、それは 0.0 にリセットされる。

・状態方程式 形式（エネルギー・リークのある線型多項式）

カラム	内容	フォーマット
-----	----	--------

.....カード 10 (8 E 10.0)

1 - 10	C_0	E 10.0
11 - 20	C_1	E 10.0
21 - 30	C_2	E 10.0
31 - 40	C_3	E 10.0
41 - 50	C_4	E 10.0
51 - 60	C_5	E 10.0
61 - 70	C_6	E 10.0
71 - 80	E_0 , 初期内部エネルギー	E 10.0

.....カード 11 (2 E 10.0)

1 - 10	V_0 , 初期相対体積	E 10.0
11 - 20	CN, エネルギーの寄与を与える時刻履歴曲線の数	E 10.0

・状態方程式 形式 7 (点火と高性能火薬の反応の進展)

カラム	内容	フォーマット
-----	----	--------

.....カード 10 (5 E 10.0)

1 - 10	A_p	E 10.0
11 - 20	B_p	E 10.0
21 - 30	R_{1_p}	E 10.0
31 - 40	R_{2_p}	E 10.0
41 - 50	G, 発火の第二係数	E 10.0

.....カード 11 (5 E 10.0)

1 - 10	$\omega_p C_p$	E 10.0
11 - 20	A_e	E 10.0
21 - 30	B_e	E 10.0
31 - 40	$\omega_e C_e$	E 10.0
41 - 50	R_{1_e}	E 10.0

.....カード 12 (5 E 10.0)

1 - 10	R_{2_e}	E 10.0
11 - 20	FCRIT, 反応の臨界の分率（通常は 1.0）	E 10.0
21 - 30	I, 発火の第一係数	E 10.0
31 - 40	H, 成長係数	E 10.0
41 - 50	Z, 圧力の指數	E 10.0

.....カード 13 (4 E 10.0)

1 - 10	x	E 10.0
11 - 20	y	E 10.0
21 - 30	C_p , 反応成長物の熱容量	E 10.0
31 - 40	C_e , 反応前の高性能火薬の熱容量	E 10.0

.....カード 14 (3 E 10.0)

1 - 10	m, (通常は 0)	E 10.0
11 - 20	E_0 , 高性能火薬の単位体積あたり初期エネルギー	E 10.0
21 - 30	T_0 , 初期温度 (°K)	E 10.0

.....カード 15

1 - 80	ブランク	
--------	------	--

JWL 型状態方程式では、

反応前の火薬につき、圧力は

$$p_e = A_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R1_e V_e} \right) e^{-R1_e V_e} + B_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R2_e V_e} \right) e^{-R2_e V_e} + \frac{\omega E_e}{V_e}$$

で定義される。 V_e は相対体積、 E_e は内部エネルギー、 A_e 、 B_e 、 ω_e 、 $R1_e$ 、 $R2_e$ は入力で指定される定数である。

同様に反応生成物の圧力は、別の JWL 型の

$$p_p = A_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R1_p V_p} \right) e^{-R1_p V_p} + B_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R2_p V_p} \right) e^{-R2_p V_p} + \frac{\omega E_p}{V_p}$$

で定義される。火薬と反応生成物の混合物は反応の割合 F で定義される。

F = 0 は反応なし、F = 1 は火薬の完全な生成物への変化を示す。圧力と温度は平衡状態にあると仮定され、体積は火薬と反応生成物の和であるものとする。

$$V = (1 - F)V_e + FV_p$$

物性タイプ 13 の反応率は、

$$\frac{\delta F}{\delta t} = I(F_{CRIT} - F)^y (V_e^{-1} - 1)^z [1 + G(V_e^{-1} - 1)] + H(1 - F)^y F^x P^z (V_p^{-1} - 1)m$$

となる。ここで、I, G, H, x, y, z および m (通常は m = 0) は入力指定の定数である。JWL 型状態方程式と反応率は 4 種の爆薬 PBX-9404, RX-03-BB, PETN, TNT の一次元、および二次元の衝撃の開始と爆発のデータに対してフィットされている。計算方法の詳細は Cochran と Chan の文献参照のこと。また、4 種の爆薬の詳細な一次元計算とパラメータについては、Lee と Tarrer によって与えられている。

・状態方程式 形式 8 (テーブル型コンパクション)

カ ラ ム	内 容	フォーマット
.....カード 10 (5 E 16.0)		
1 - 16	ε_{v1} ($\ell n V$)	E 16.0
17 - 32	ε_{v2}	E 16.0
33 - 48	ε_{v3}	E 16.0
49 - 64	ε_{v4}	E 16.0
65 - 80	ε_{v5}	E 16.0

.....カード 11 (5 E 16.0)

1 - 16	ε_{v6}	E 16.0
17 - 32	ε_{v7}	E 16.0
33 - 48	ε_{v8}	E 16.0
49 - 64	ε_{v9}	E 16.0
65 - 80	ε_{v10}	E 16.0

.....カード 12 (5 E 16.0)

1 - 16	C ₁	E 16.0
17 - 32	C ₂	E 16.0
33 - 48	C ₃	E 16.0
49 - 64	C ₄	E 16.0
65 - 80	C ₅	E 16.0

.....カード 13 (5 E 16.0)

1 - 16	C ₆	E 16.0
17 - 32	C ₇	E 16.0
33 - 48	C ₈	E 16.0
49 - 64	C ₉	E 16.0
65 - 80	C ₁₀	E 16.0

.....カード 14 (5 E 16.0)

1 - 16	T ₁	E 16.0
17 - 32	T ₂	E 16.0
33 - 48	T ₃	E 16.0
49 - 64	T ₄	E 16.0
65 - 80	T ₅	E 16.0

.....カード 15 (5 E 16.0)

1 - 16	T ₆	E 16.0
17 - 32	T ₇	E 16.0
33 - 48	T ₈	E 16.0
49 - 64	T ₉	E 16.0
65 - 80	T ₁₀	E 16.0

.....カード 16 (5 E 16.0)

1 - 16	K ₁	E 16.0
17 - 32	K ₂	E 16.0
33 - 48	K ₃	E 16.0
49 - 64	K ₄	E 16.0
65 - 80	K ₅	E 16.0

.....カード 17 (5 E 16.0)

1 - 16	K_6	E 16.0
17 - 32	K_7	E 16.0
33 - 48	K_8	E 16.0
49 - 64	K_9	E 16.0
65 - 80	K_{10}	E 16.0

.....カード 18 (3 E 16.0)

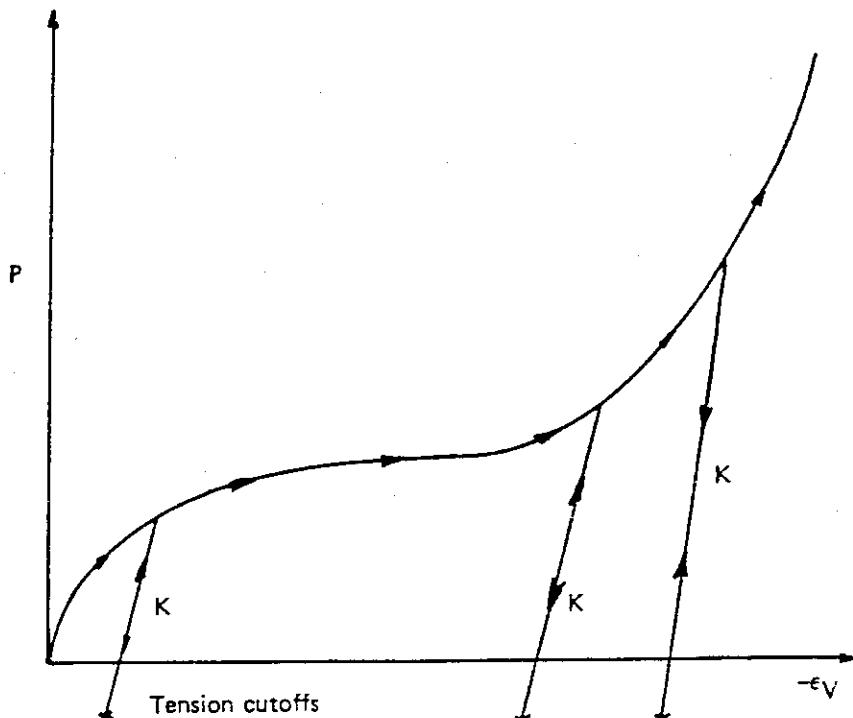
1 - 16	γ	E 16.0
17 - 32	E_0 , 初期内部エネルギー	E 16.0
33 - 48	V_0 , 初期相対体積	E 16.0

テーブル型コンパクション・モデルは、内部エネルギーに関して線型である。

圧力の定義は、載荷のフェースでは

$$p = C(\varepsilon_v) + \gamma^T(\varepsilon_v)E$$

である。体積ひずみ ε_v は相対体積の自然対数で定義される。除荷は除荷体積率に沿って起こり、圧力のカットオフまで到る。再除荷は常に除荷の経路に沿って除荷の開始点まで戻って、載荷の経路がひき続く。(第 4.3.13 図参照) 最低 2 点、10 点までのテーブル型関数が使われる。DYNA 3 D は必要ならば、圧力を求める為に外挿を行う。



第 4.6.13 図 コンパクションのある状態方程式 8 の圧力-体積ひずみ曲線。
コンパクト状態では、体積除係数はピーク時の体積ひずみに依る。

・状態方程式 形式9 (テーブル型)

カ ラ ム	内 容	フォーマット
.....カード 10 (5 E 16.0)		
1 - 16	ε_{v1} , ($\ln v$)	E 16.0
17 - 32	ε_{v2}	E 16.0
33 - 48	ε_{v3}	E 16.0
49 - 64	ε_{v4}	E 16.0
65 - 80	ε_{v5}	E 16.0
.....カード 11 (5 E 16.0)		
1 - 16	ε_{v6}	E 16.0
17 - 32	ε_{v7}	E 16.0
33 - 48	ε_{v8}	E 16.0
49 - 64	ε_{v9}	E 16.0
65 - 80	ε_{v10}	E 16.0
.....カード 12 (5 E 16.0)		
1 - 16	C_1	E 16.0
17 - 32	C_2	E 16.0
33 - 48	C_3	E 16.0
49 - 64	C_4	E 16.0
65 - 80	C_5	E 16.0
.....カード 13 (5 E 16.0)		
1 - 16	C_6	E 16.0
17 - 32	C_7	E 16.0
33 - 48	C_8	E 16.0
49 - 64	C_9	E 16.0
65 - 80	C_{10}	E 16.0
.....カード 14 (5 E 16.0)		
1 - 16	T_1	E 16.0
17 - 32	T_2	E 16.0
33 - 48	T_3	E 16.0
49 - 64	T_4	E 16.0
65 - 80	T_5	E 16.0
.....カード 15 (5 E 16.0)		
1 - 16	T_6	E 16.0
17 - 32	T_7	E 16.0
33 - 48	T_8	E 16.0
49 - 64	T_9	E 16.0
65 - 80	T_{10}	E 16.0

.....カード 16 (3 E 16.0)

1 - 16	γ	E 16.0
17 - 32	E_0	E 16.0
33 - 48	V_0	E 16.0

テーブル型状態方程式のモデルは、内部エネルギーに関して線型である。圧力は次式で定義される。

$$p = C(\varepsilon_v) + \gamma^T(\varepsilon_v)E$$

体積ひずみ ε_v は、相対体積の自然対数で定義する。最低 2 点 10 点までのテーブル型関数が使われる。必要ならば、圧力を求める為に外挿が使われる。

・状態方程式 形式 11 (TENSOR 細孔崩壊)

・カード 1 (215, 4 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	初期荷重曲線の点数 (NDL)	I 5
6 - 10	完全押しつぶし曲線の点数 (NCR)	I 5
11 - 20	細孔が崩壊する前に必要な超過圧縮 (μ_1)	E 10.0
21 - 30	初期荷重曲線と完全押しつぶし曲線が交差する点の超過圧縮 (μ_2)	E 10.0
31 - 40	初期内部エネルギー	E 10.0
41 - 50	初期超過圧縮	E 10.0

——初期荷重曲線の定義——

・カード 2, NLD+1 (2 E 15.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 15	超過圧縮	E 15.0
16 - 30	圧力	E 15.0

——完全押しつぶし曲線の定義——

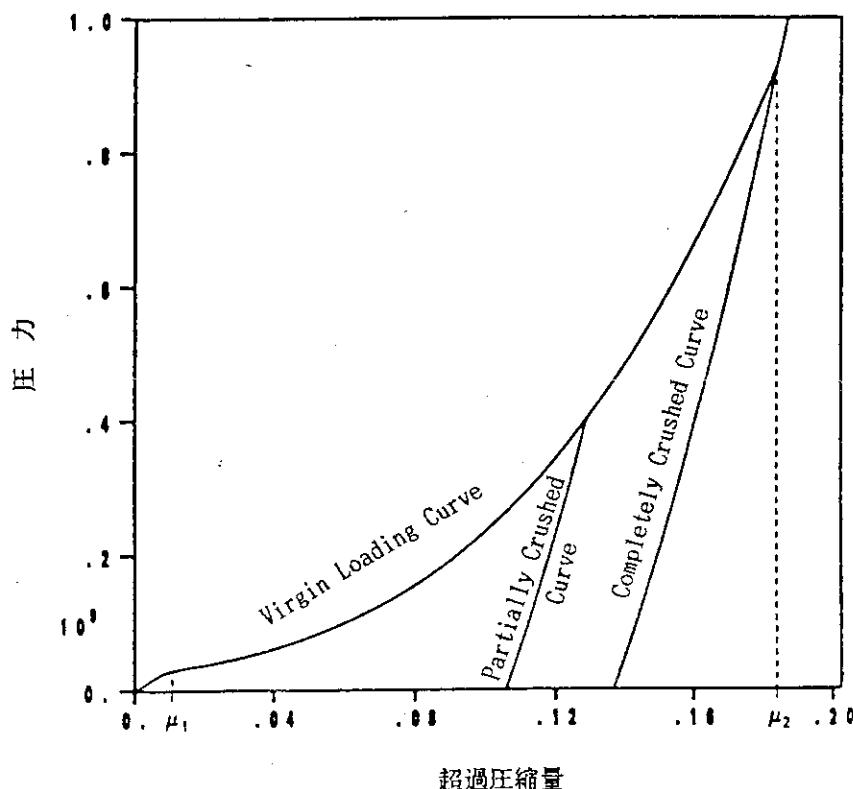
・カード NLD+2,, NLD+NCR+1 (2 E 15.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 15	超過圧縮	E 15.0
16 - 30	圧力	E 15.0

TENSOR のマニュアルにある細孔崩壊モデルは妥当なものではなく、ずっと簡単なモデルに置き換えられている。この理由の 1 つは、より複雑なモデルに必要な実験データが不足していることである。

DYNA での TENSOR モデルをよりよく近似させるためには、それらの量的な結合を行わねばならない。

TENSOR モデルは、第 6.4.14 図に示されている初期荷重曲線と完全押しつぶし曲線の 2 つの曲線を定義する。それは、細孔崩壊に必要な超過圧縮点 (μ_1) を定義し、その物質を完全に押しつぶすのに必要な超過圧縮点 (μ_2) を定義する。



第 6.4.14 図 TENSOR 細孔破壊モデル

このデータと、その物質が到達する最大超過圧縮 (μ_{\max}) から、あらゆる超過圧縮に対する圧力 (μ) を決めることができる。

超過圧縮が μ_1 を通過するまで、初期荷重曲線に沿って行われる。その後、除荷は完全押しつぶし曲線と初期荷重曲線の間を通る曲線に沿って行われ、再載荷は初期荷重曲線に到達するまでこの曲線に沿って行われる。一度、超過圧縮が μ_2 に達すると、除荷は全て完全に押しつぶし曲線に沿って行われることになる。 μ_1 と μ_2 の間の除荷は次に定義される部分押しつぶし曲線が定義される。

$$p_{pc}(\mu) = p_{cc} \left(\frac{(1+\mu_B)(1+\mu)}{(1+\mu_{\max})} - 1 \right)$$

ここで、

$$\mu_B = p_{cc}^{-1}(p_{\max})$$

であり、pc および cc はそれぞれ部分押しつぶし、完全押しつぶし状態を表す。

これは、相対体積 (V) を用いることにより、より容易に理解できる。

$$V = \frac{1}{1+\mu}$$

$$p_{pc}(V) = p_{cc}\left(\frac{V_B}{V_{min}}V\right)$$

この表現は、固定された $V_{min} \left(= \frac{1}{\mu_{max} + 1}\right)$ に対し、部分押しつぶし曲線は、V が増加するにつれて、完全押しつぶし曲線から線形的に離れて行き、物質の細孔回復となる。

体積弾性率 (K) は、現曲線の傾斜に対して 1 に超過圧縮を加えたものを乗じたもので決められる。

$$K = \frac{\partial P}{\partial \mu} (1+\mu)$$

傾斜 $\frac{\partial P}{\partial \mu}$ は、次の差分から得られる。

部分押しつぶし曲線は

$$\frac{\partial P}{\partial \mu} = \frac{\partial P_{cc}\left(\frac{(1+\mu_B)(1+\mu)}{(1+\mu_{max})} - 1\right)(1+\mu_B)}{\partial \mu (1+\mu_{max})}$$

簡単に

$$K = \frac{\partial P_{cc}(\mu_a)}{\partial \mu} (1+\mu_a)$$

ここで

$$\mu_a = \frac{(1+\mu_B)(1+\mu)}{(1+\mu_{max})} - 1$$

音速は、時間ステップの不安定性を回避するために、現圧力における完全押しつぶし曲線の傾斜から決められる。

初期荷重および完全押しつぶし曲線は、単調三次スプライン曲線でモデル化される。

構造クラスが非零ならば、要素のパラメータを定義する。

カード 9 (12 A 6)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	断面認識名	12 A 6

カード 10 および 11

以下のカードは梁およびトラス要素に対し、定義される。

カード 10 (3 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	剪断係数 (デフォルトは 1.0)	E 10.0
11 - 20	梁断面に対する積分則 = 1. ト拉斯要素 = 2. 梁要素 (2×2 ガウス積分, デフォルト) = 3. 梁要素 (3×3 ガウス積分) = 4. 梁要素 (3×3 ロバット積分) = 5. 梁要素 (4×4 ガウス積分)	E 10.0
21 - 30	断面タイプ (BCST) = 0. 矩形 = 1. 管 = 2. 任意 (ユーザーが積分則を定義する)	E 10.0

Hughes-Liu の梁の場合

カード 11 (6 E 10.0)

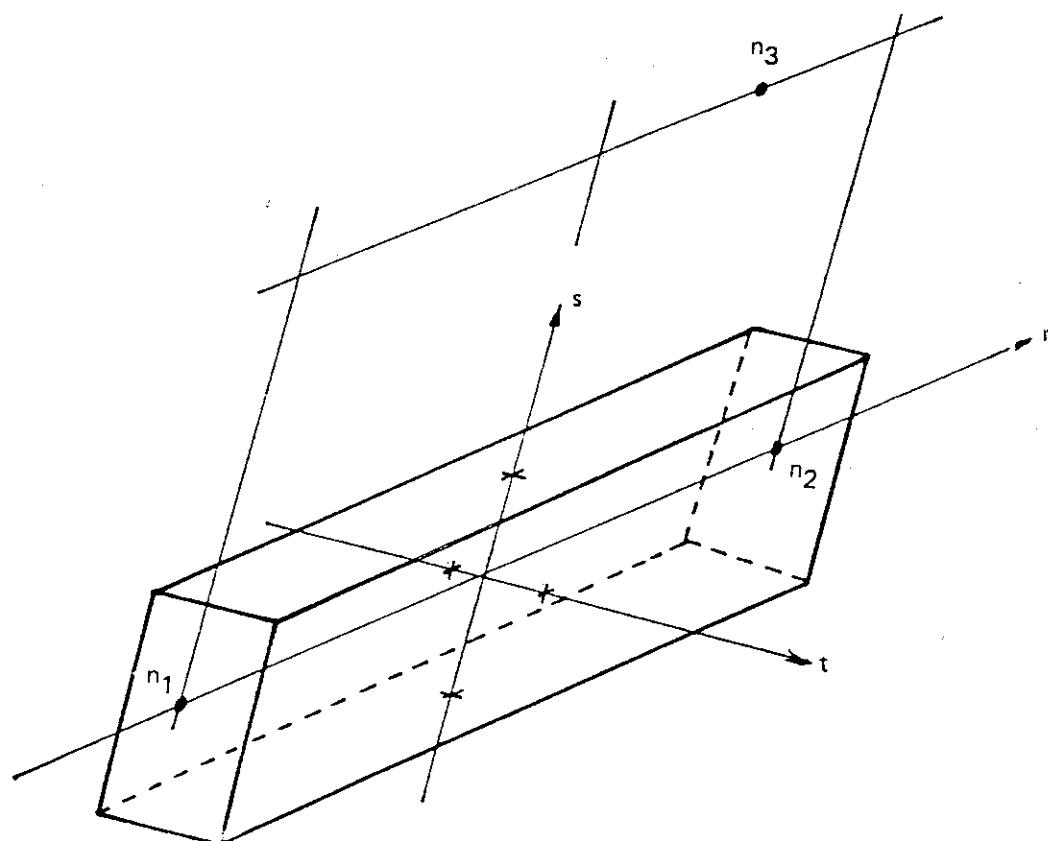
カラム	内容	フォーマット
1 - 10	節点 1 における S 方向梁厚さ (BCST = 0.0 または 2.0) または外径 (BCST = 1.0)	E 10.0
11 - 20	節点 2 における S 方向梁厚さ (BCST = 0.0 または 2.0) または外径 (BCST = 1.0)	E 10.0
21 - 30	節点 1 における T 方向梁厚さ (BCST = 0.0 または 2.0) または外径 (BCST = 1.0)	E 10.0
31 - 40	節点 1 における T 方向梁厚さ (BCST = 0.0 または 2.0) または外径 (BCST = 1.0)	E 10.0
41 - 50	S 軸に垂直な参照面の位置 (第 4.6.17 図参照) = 1.0: S = 1 の側 = 0.0: 中心 = -1.0: S = -1 の側	E 10.0
51 - 60	T 軸に垂直な参照面の位置 = 1.0: S = 1 の側 = 0.0: 中心 = -1.0: S = -1 の側	E 10.0

Belytschko-Schwer の梁の場合

カード 11 (5 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	断面積, A	E 10.0
11 - 20	I_{ss}	E 10.0
21 - 30	I_{tu}	E 10.0
31 - 40	I_{tr}	E 10.0
41 - 50	剪断面積, A_s	E 10.0

トラス要素に対しては断面積 A を定義し, カラム 11 - 80 はブランクにしておく。



第 4.6.17 図 DYNA 3D 梁要素 節点 3 により初期方向を決める

以下のカードは、4節点シェルおよび膜要素に対し定義される。

カード 10 (4 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	剪断係数 (デフォルトは 1.0)	E 10.0
11 - 20	シェル板厚方向に対する積分則 = 1: 膜要素 = 2: 2 点ガウス積分 = 3: 3 点ガウス積分 = 4: 4 点ガウス積分 = 5: 5 点ガウス積分 5 以上: 台形積分またはユーザー定義則	E 10.0
21 - 30	プリントアウトオプション = 1: 平均合力と厚み方向長さ = 2: 参照面における合応力と厚み方向長さ = 3: 全点における厚み方向長さ	E 10.0
31 - 40	求積則 < 0.0: 絶対値 = 0.0: ガウス則 = 1.0: 台形則	E 10.0

カード 11 (5 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	節点 1 における板厚	E 10.0
11 - 20	節点 2 における板厚	E 10.0
21 - 30	節点 3 における板厚	E 10.0
31 - 40	節点 4 における板厚	E 10.0
41 - 50	参照面の位置 (Hughes-Liu シェルのみ) (第 4.6.18 図参考) = 1: 上面 = 0: 中心 =- 1: 下面	E 10.0

板厚は、要素カードにおいて上書きされる。すなわち、上記の値は要素カード上の板厚が零の場合にのみ用いられる。

参照面の位置は、梁、シェルおよびソリッド要素が内部結合される場合に参照される。梁およびシェル要素は、しばしば参照面を共有することが要求される。シェル要素がスライディング・インターフェース上にある場合は、参照面は接触面となる。このオプションは、シェルノーマル更新オプション-2 の Hughes-Liu シェル理論にのみ適用される。

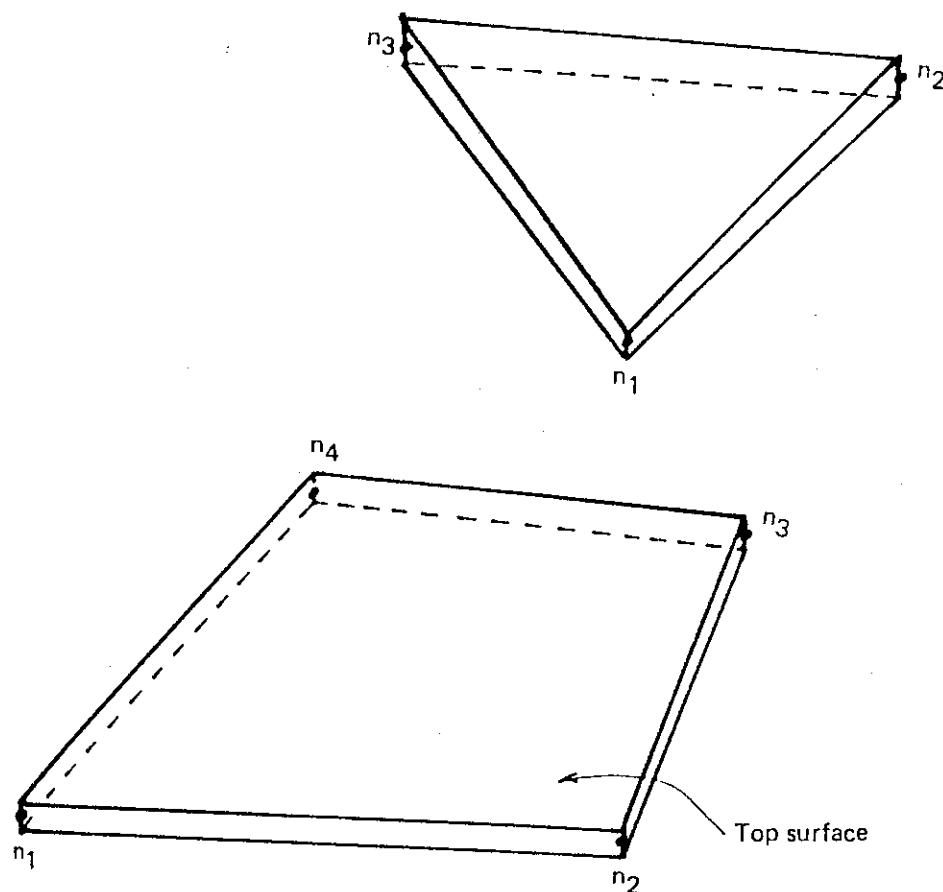
以下の出力は 8 節点シェルに対し定義される。

カード 10 (2 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	剪断係数 (デフォルトは 1.0)	E 10.0
11 - 20	シェル板厚方向に対する積分則 = 1: 膜要素 = 2: 3 点ガウス積分 = 3: 3 点ガウス積分 = 4: 5 点ガウス積分 = 5: 5 点ガウス積分	E 10.0

カード 11

カラム	内容	フォーマット
1 - 80	ブランク	



第 4.6.18 図 DYNA 3 D シェル要素
反時計まわりの節点番号づけにより表面が決まる。

4. 任意断面を持つ Hughes-Liu 梁要素に対するユーザー定義積分則

NUSBIR 個のカードセットを定義する。

カード 1 (I5, E10.0)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	積分点数, NIP	I5
6 - 15	相対断面積 (実際の断面積を S 方向厚みとも t 方向厚みの積で除したもの)	E10.0

カード 2, 3, ……, NIP+1 (3E10.0)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	積分点, s 方向座標値	E10.0
11 - 20	積分点, t 方向座標値	E10.0
21 - 30	重み係数 (積分点に関わる面積を実際の断面積で除したもの)	E10.0

5. シェル要素に対するユーザー定義積分則

ここでは NUSSIR のカードを定義する。

カード 1 (2I5)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	積分点数, NIP	I5
6 - 10	積分点の等間隔オプション = 0 積分点を以下に定義する = 1 厚み方向に NIP 層に分割するような等間隔積分点	I5

カード 2, 3, ……NIP+1 (2E10.0, I5)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	-1 から 1 までの積分点座標	E10.0
11 - 20	重みツァクターで除した積分点に相当する厚みを実際の厚みで除したもの	E10.0
21 - 25	要素カードで定義したものと異なる物性番号を使用する場合に用いる物性番号物性タイプは同じでなければならない	I5

6. 節点カード (2I5, 3E10.0, 2I5)

コントロールカード3でNIF='E 20.0'とした場合は、
(2I5, 3E20.0, 2I5)
LARGEオプションで(I8, I5, 3E10.0, I5)

MUMNP個の要素を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	節点番号	I5 (I8)
6-10(9-13)	変位境界条件コード = 0: 拘束なし = 1: x 方向変位拘束 = 2: y 方向変位拘束 = 3: z 方向変位拘束 = 4: x および y 方向変位拘束 = 5: y および z 方向変位拘束 = 6: z および x 方向変位拘束 = 7: x, y および z 方向変位拘束 = 8: 後に読み込む第一の境界条件カードに定義される方向の変位拘束 = 9: 後に読み込む第二の境界条件カードに定義される方向の変位拘束	I5 (I5)
11-30(14-33)	x 座標	E 20.0 (E 20.0)
31-50(34-53)	y 座標	E 20.0 (E 20.0)
51-70(54-73)	z 座標	E 20.0 (E 20.0)
71 - 75 (-)	増分 k	I5 (省略)
76-80(74-78)	回転変位境界条件コード = 0: 拘束なし = 1: x 軸回り回転変位拘束 = 2: y 軸回り回転変位拘束 = 3: z 軸回り回転変位拘束 = 4: x および y 軸回り回転変位拘束 = 5: y および z 軸回りの回転変位拘束 = 6: z および x 軸回り回転変位拘束 = 7: x, y および z 方向変位拘束	I5 (I5)

節点カードは順番に並べる必要はないが、最後の節点番号で節点データを終了しなければならない。節点データが欠落していても、節点番号は以下の順で自動生成される。

$$n_i, n_i + k, n_i + 2k, \dots, n_j$$

ここで、 n_i および n_j は、2枚の連続したカードで定義された節点番号である。

生成節点の座標は線形補間により得られる。変位境界条件コードは、 n_i と n_j で異なる場合は零にセットされる。 n_i と n_j で変位境界条件コードが等しく、間に非拘束の節点を生成したい場合は、どちらか一方を負の値で定義する。節点データが生成された後、全ての負の境界条件コードはリセットされる。

7. ソリッド要素カード (1115)

LARGE オプションで (I8, I5, 8I8)

MUMELH 個の要素を定義する。

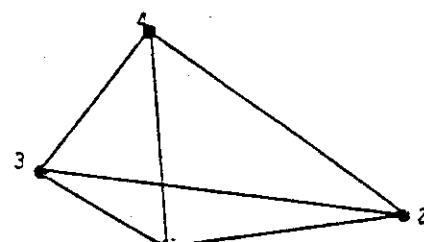
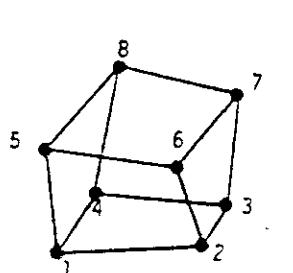
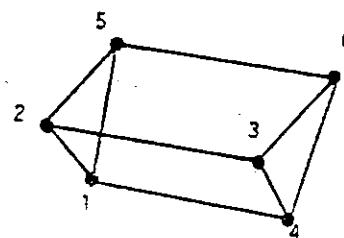
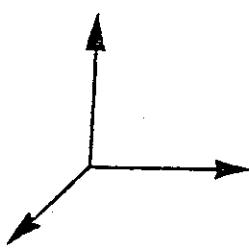
カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	要素番号	I5 (I8)
6-10(9-13)	物性番号	I5 (I5)
11-15 (-)	増分, k	I5 (省略)
16-20(14-21)	節点, n ₁	I5 (I8)
21-25(22-29)	節点, n ₂	I5 (I8)
:	:	:
51-55(70-77)	節点, n ₈	I5 (I8)

要素カードは要素番号順であると仮定される。省略されたデータは、以下の様に省略されたデータの直前のカードから自動生成される。

$$n_j^{i+1} = n_j^i + k \quad (j=1, 2)$$

生成される要素の物性番号、断面特性およびメッシュ生成の増分 k は、このカード値が使われる。k のデフォルト値は 1 である。

節点 n₁～n₈ で 8 節点ソリッドを定義する。8 節点以下の要素は、節点を繰り返すことに得られる。4, 6, 8 節点要素を第 4.6.19 図に示す。4, 6 節点要素のコネクティビティの定義は以下のように行う。

4 節点 n₁ n₂ n₃ n₄ n₄ n₄ n₄ n₄6 節点 n₁ n₂ n₃ n₄ n₅ n₆ n₆

第 4.6.19 図 4, 6 および 8 節点ソリッド要素

8. ビーム要素カード (615, 5E 10.0)

LARGE オプションで (518, 5E 8.0)

MUNELB 個の要素を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	要素番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	物性番号	I5 (I8)
11-15 (-)	節分, k	I5 (省略)
16-20(17-24)	節点, n ₁	I5 (I8)
21-25(25-32)	節点, n ₂	I5 (I8)
26-30(33-40)	節点, n ₃ (方向を定義するため)	I5 (I8)
31-40(41-48)	節点1におけるS方向ビーム厚 (Hughes-liu) 断面積	E 10.0 (E 8.0)
41-50(49-56)	節点2におけるS方向ビーム厚 (Hughes-liu) I _{ss} (Belytschko-Schwer)	E 10.0 (E 8.0)
51-60(57-64)	節点1におけるT方向ビーム厚 (Hughes-liu) I _{tt} (Belytschko-Schwer)	E 10.0 (E 8.0)
61-70(65-72)	節点2におけるT方向ビーム厚 (Hughes-liu) I _{rr} (Belytschko-Schwer)	E 10.0 (E 8.0)
71-88(73-80)	剪断面積 (Belytschko-Schwer)	E 10.0 (E 8.0)

要素カードは要素番号順であると仮定される。省略されたデータは、以下の様に省略されたデータの直前のカードから自動生成される。

$$n_j^{i+1} = n_j^i + k \quad (j=1, 2)$$

生成される要素の物性番号、断面特性方向指示節点 n₃ およびメッシュ生成の増分 k は、このカードの値が使われる。k のデフォルト値は 1 である。

厚みあるいは断面特性が定義されない場合は、物性カードの値が採用される。

9. 4節点シェル要素カード (715, 4E 10.0, E 5.0)

LARGE オプションで (I8, I5, 4I8/5E 10.0)

MUMELS 個の要素を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	要素番号	I5 (I8)
6-10(9-13)	物性番号	I5 (I5)
11-15 (-)	増分, k	I5 (省略)
16-20(14-21)	節点, n ₁	I5 (I8)
21-25(22-29)	節点, n ₂	I5 (I8)
26-30(30-30)	節点, n ₃	I5 (I8)
31-35(38-45)	節点, n ₄	I5 (I8)

*****LARGE オプションの場合はこれより第2カード*****

36-45(1-10)	節点1における板厚(オプション)	E 10.0 (E 10.0)
46-55(11-20)	節点2における板厚(オプション)	E 10.0 (E 10.0)
56-65(21-30)	節点3における板厚(オプション)	E 10.0 (E 10.0)
66-75(31-40)	節点4における板厚(オプション)	E 10.0 (E 10.0)
76-80(41-40)	異方性物性軸角度	E 5.0 (E 10.0)

要素カードは要素番号順であると仮定される。省略されたデータは、以下の様に省略されたデータの直前のカードから自動生成される。

$$n_j^{i+1} = n_j^i + k$$

生成される要素の物性番号、断面特性およびメッシュ生成の増分kは、このカード値が使われる。kのデフォルト値は1である。

厚みが定義されない場合は、物性カードの値が採用される。三角形要素は、3番目の節点を繰り返すことにより定義される。すやわち、 $n_4=n_3$ とする。

10. 8節点ソリッドシェル要素カード (1115)

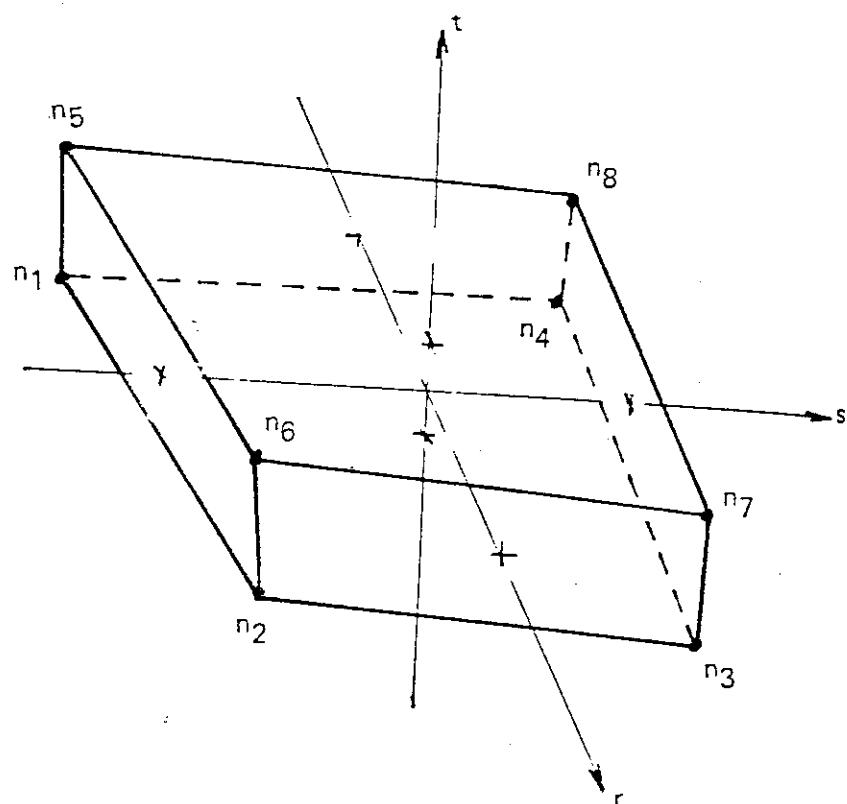
LARGE オプションで (I8, I5, 8I8)		
NUMELT 個の要素を定義する。		
カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	要素番号	I5 (I8)
6-11(9-13)	物性番号	I5 (I5)
11-15 (-)	増分, k	I5 (省略)
16-20(14-21)	節点, n_1	I5 (I8)
21-25(22-29)	節点, n_2	I5 (I8)
:	:	:
51-55(70-77)	節点, n_8	I5 (I8)

要素カードは要素番号順であると仮定される。省略されたデータは、以下の様に省略されたデータの直前のカードから自動生成される。

$$n_j^{i+1} = n_j^i + k$$

生成される要素の物性番号とメッシュ生成の増分kは、このカードの値が使われる。kのデフォルト値は1である。

節点 n_1 から n_4 まで、下面を n_5 から n_8 までで上面を定義する。積分点は、第4.6.18図に描かれたようにt軸に沿って定義される。適切な方向を定めるようコネクティビティの定義に極度の注意を要する。



第4.6.20図 8節点ソリッドシェル要素

11. DYNA 3D-JOY のインターフェース定義 (215)

LARGE オプションで (218)

コントロールカードのカード1で指定の NUMSNC 個の節点を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	インターフェース節点の番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点番号	I5 (I8)

省略されたインターフェース節点は次式によって節点番号により自動生成される

$$\frac{n_i - n_j}{in_i - in_j}$$

ここで in_i と in_j は、2枚の連続したカード上のインターフェース節点の番号であり、 n_i と n_j は対応する節点番号である。

12. 節点拘束条件カード (215, 4X, 611, 215)

LARGE オプションで (18, 15, 4X, 611, 218)

NODSPC 個定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	第1節点番号, IFIRST	I5 (I8)
6-10(9-13)	局所座標系番号<NSPCOR+1	I5 (I5)
11-14(14-17)	ブランク	
15 (18)	= 1: 局所系 x 方向並進拘束する = 0: 局所系 x 方向並進拘束しない	I1 (I1)
16 (19)	= 1: 局所系 y 方向並進拘束する = 0: 局所系 y 方向並進拘束しない	I1 (I1)
17 (20)	= 1: 局所系 z 方向並進拘束する = 0: 局所系 z 方向並進拘束しない	I1 (I1)
18 (21)	= 1: 局所系 x 方向回転拘束する = 0: 局所系 x 方向回転拘束しない	I1 (I1)
19 (22)	= 1: 局所系 y 方向回転拘束する = 0: 局所系 y 方向回転拘束しない	I1 (I1)
20 (23)	= 1: 局所系 z 方向回転拘束する = 0: 局所系 z 方向回転拘束しない	I1 (I1)
21-25(24-28)	最終節点番号 = 0: 第1節点と同じ	I5 (I8)
26-30(29-30)	生成増分値 = 0: デフォルト値1に設定	I5 (I8)

節点拘束のための NSPCOR 個の局所座標系を定義する。xy 平面は 2 つのベクトルによって記述する。すなわち、局所 x 軸を表すベクトルともう 1 つの xy 平面内のベクトルである。局所 z 軸は、2 つのベクトルの外積となる。局所 y 軸は、局所 z および x 軸の外積を取ることにより求められる。

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	節分拘束番号<NSPCOR+1 (局所摩擦系番号)	I5
6 - 15	x 軸ベクトルの x 成分, 原点は (0, 0, 0)	E 10.0
16 - 25	x 軸ベクトルの y 成分, 原点は (0, 0, 0)	E 10.0
26 - 35	x 軸ベクトルの z 成分, 原点は (0, 0, 0)	E 10.0
36 - 45	局所 (xy) 平面内ベクトルの x 成分	E 10.0
45 - 55	局所 (xy) 平面内ベクトルの y 成分	E 10.0
56 - 65	局所 (xy) 平面内ベクトルの z 成分	E 10.0

13. 境界条件カード (4 E 10.0)

コントロールのカード3で指定されるNUMRC個の境界面を定義する。		
カラム	内容	フォーマット
1 - 10	ベクトルのx座標	E 10.0
11 - 20	ベクトルのy座標	E 10.0
21 - 30	ベクトルのz座標	E 10.0
31 - 40	拘束オプション = 0: 垂直平面上を動く = 1: ベクトル方向にのみ動く	E 10.0

節点は任意の方向の面または線上を移動するように拘束できる。境界条件カードでは、この面のノーマル・ベクトル(0., 0., 0.)を視点とし、指定の座標を終点とするベクトルで定義する。

ベクトルの大きさは任意なので、指定する座標値はユニークではない。

14. 破壊を考慮した対称平面

コントロールカードの最終で指定した数のセットだけ定義する。		
カード1 (I5, 7 E 10.0)		
カラム	内容	フォーマット
1 - 5	対称平面のセグメント数, NSGNDS	I5
6 - 15	面から外に向く垂直ベクトルの始点のx座標	E 10.0
16 - 25	面から外に向く垂直ベクトルの始点のy座標	E 10.0
26 - 35	面から外に向く垂直ベクトルの始点のz座標	E 10.0
36 - 45	面から外に向く垂直ベクトルの終点のx座標	E 10.0
46 - 55	面から外に向く垂直ベクトルの終点のy座標	E 10.0
56 - 65	面から外に向く垂直ベクトルの終点のz座標	E 10.0
66 - 75	引張り破壊応力	E 10.0

カード2, 3, ……, NSGNDS+1 (5I5, E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	セグメント番号	I5
6 - 10	節点, n_1	I5
11 - 15	節点 n_2	I5
16 - 20	節点 n_3	I5
21 - 25	節点 n_4	I5
26 - 35	破壊応力 (デフォルト値と異なる場合)	E 10.0

三角形要素は最終節点を繰り返して定義する。

15. 節点時刻歴ブロック・カード (1615)

LARGE オプションで (1018)

コントロールカードで指定する節点時刻歴出力ブロック数が 0 の時は省略する。

0 以外なら 1 枚のカードにより、以下の情報が指定される。160 個のブロックについて定義でき、合計 320 個の節点について定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	最終の時刻歴中の最初の節点番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	最初の時刻歴中の最後の節点電号	I5 (I8)
11-15(17-24)	2 番目の時刻歴の中の最初の節点番号	I5 (I8)
16-20(25-32)	2 番目の時刻歴の中の最後の節点番号	I5 (I8)

16. 要素時刻歴ブロック・カード (1615)

LARGE オプションで (1018)

コントロールのカード 1 で指定する要素時刻歴出力ブロック数が 0 の時は省略する。0 以外なら 1 枚のカードにより、以下の情報が指定される。160 ブロック、320 要素まで各要素タイプについて定義できる。

カラム	内容	フォーマット
.....カード 1 (ソリッド要素)		
1-5(1-8)	最初の時刻歴中の最初の要素番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	最初の時刻歴中の最後の要素番号	I5 (I8)
11-15(17-24)	2 番目の時刻歴の中の最初の要素番号	I5 (I8)
16-20(25-32)	2 番目の時刻歴の中の最後の要素番号	I5 (I8)
:	:	
.....カード 2 (ビーム要素)		
.....カード 3 (シェル要素)		
.....カード 4 (厚肉シェル)		

17. 重力荷重に対して密度と深さの関係を与えるカード

コントロールカードの NUMDP が 0 の時はこのカードを省略する。0 でなければ NUMDP + 1 枚のカードを使う。

カード 1 (E 10.0, 4X, I1, 13I5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	重力加速度	E 10.0
11	方向 = 1: x 方向 = 2: y 方向 = 3: z 方向	I1
16 - 20	初期化する物性の数 (< 13) = 0: 全て = n: 以下に物性のリストを定義	I5
21 - 25	初期化する第 1 の物性番号	I5
26 - 30	初期化する第 2 の物性番号	I5
:	:	

カード 2, 3, ……, NUMDP+1 (2E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	質量密度	E 10.0
11 - 20	深さ	E 10.0

18. Brode 関数の定義

コントロールカード 3 のカラム 21 - 25 がブランクの時 (or 0) は省略すること。さもなければ、2枚のカードにより Brode 関数を定義する。

カード 1 (6E 10.0, 2I5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	降伏点 (Ktons)	E 10.0
11 - 20	破壊の高さ (ft)	E 10.0
21 - 30	XBO	E 10.0
31 - 40	YBO	E 10.0
41 - 50	ZBO	E 10.0
51 - 60	TBO	E 10.0
61 - 65	到達時間と Brode 原点に対する範囲を与える荷重曲線番号 (*)	I5
66 - 70	降伏スケールとスケール時間との関係を与える荷重曲線番号 [yield**1/3]	I5

カード 2 (3 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	コンバージョンファクター kft に対する DYNA の長さ単位	E 10.0
11 - 20	コンバージョンファクター msec に対する DYNA の時間単位	E 10.0
21 - 30	コンバージョンファクター psi に対する DYNA の圧力単位	E 10.0

(*) 両荷重曲線は可変降伏オプションに対して特定されなければならない。このオプションを使用すると、衝撃の到着時刻は到着時刻曲線からわかる。このオプションを使用すると、衝撃の到着時刻は到着時刻曲線からわかる。

Brode 定式での降伏値は、現時刻の降伏スケール曲線からの値と [yield^{**1/3}] と降伏値を乗じることによって得られる。

19. 荷重曲線カード

コントロールカード 4 で指定される NLCUR 個の荷重曲線群を定義する。以下のコード群を NLCUR 回繰り返す。

カード 1 (3 I 5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	荷重曲線番号	I 5
6 - 10	荷重曲線の点数 NPTS	I 5
11 - 15	動的緩和による応力初期化 = 0 : 動解析にのみ荷重曲線を用いる。 = 1 : 応力初期化にのみ荷重曲線を用いて動解析ではな用いない。 = 2 : 応力初期化および解析の両方で用いる。	I 5

カード 2,NPTS+1 (2 E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	時刻	E 10.0
11 - 20	荷重	E 10.0

20. 集中節点荷重カード (315, E 10.0, 315)

LARGE オプションで (I8, 215, E 10.0, 318)		
コントロールカード 4 で指定される NLCUR 個の集中荷重を定義する。		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	荷重の作用する節点の番号 (m)	I5 (I8)
6-10(9-13)	荷重の方向, IDR = 1: x 方向 = 2: y 方向 = 3: z 方向 = 4: フォローウー・フォース = 5: x 軸まわりモーメント = 6: y 軸まわりモーメント = 7: z 軸まわりモーメント	I5 (I5)
11-15(14-18)	荷重曲線番号	I5 (I5)
16-25(19-28)	スケール・ファクタ = 0.0: デフォルトの 1.0 にセット	E 10.0 (E 10.0)
26-30(29-36)	節点 m_1 (コメント参照)	I5 (I8)
31-35(37-44)	節点 m_2	I5 (I8)
36-40(45-52)	節点 m_3	I5 (I8)

IDR = 4 の時には、節点 m_1 , m_2 , m_3 を定義すること。フォローウー・フォースは第 4.6.21 図に示すように、これらの節点で定義される面の法線方向に作用する。

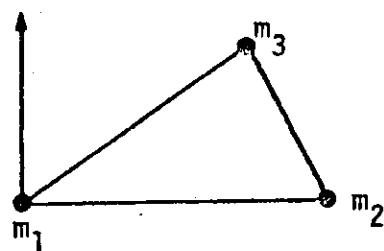
21. 圧力境界条件カード (615, 5 E 10.0)

LARGE オプションで (I5, 418, 4 E 10.0)		
コントロールカード 4 で指定される NUMPC 個の圧力境界条件を定義する。		
カラム	内 容	フォーマット
1-5 (-)	圧力・カード番号	I5 (省略)
6-10(1-5)	荷重曲線番号 (< 0 なら Brode 関数を使用)	I5 (I5)
11-15(6-13)	節点番号 n_1	I5 (I8)
16-20(14-21)	節点番号 n_2	I5 (I8)
21-25(22-29)	節点番号 n_3	I5 (I8)
26-30(30-37)	節点番号 n_4	I5 (I8)
31-40(38-48)	n_1 での荷重曲線番号への乗数	E 10.0 (E 10.0)
41-50(48-57)	n_2 での荷重曲線番号への乗数	E 10.0 (E 10.0)
51-60(58-67)	n_3 での荷重曲線番号への乗数	E 10.0 (E 10.0)
61-70(68-77)	n_4 での荷重曲線番号への乗数	E 10.0 (E 10.0)
71-80 (-)	= 0.0: デフォルトの 1.0 にセット 圧力が面上に働き出す時刻	E 10.0 (省略)

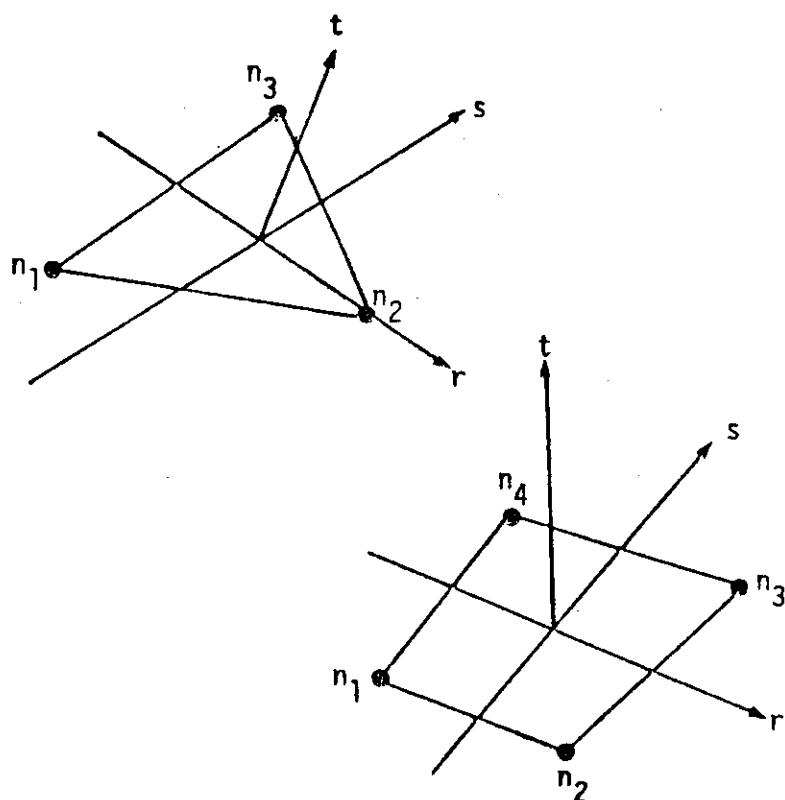
圧力・カードは昇順と仮定される。

$$n_j^{j+1} = n_j^j + k$$

荷重総乗数は、圧力ね増減に用いられる。時間値は、スケーリングされない。三角形要素は、節点 m_3 を繰り返すことにより定義できる。



第4.6.21図 フォローウー・フォースは節点 m_1 , m_2 および m_3 で定義される平面に作用する。この場合、荷重は節点 m_1 に作用する。



第4.6.22図 圧力カードの節点の番号付け。正圧は t 方向逆向きに作用する。

22. 速度/加速度 設定カード (315, 4E10.0, I5)

LARGE オプションで (I8, 215, 4E10.0, I5)

コントロールカード4のNUMVC個の速度境界条件を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	このカードが適用される節点番号または 剛体 $\begin{cases} > 0 & \text{節点} \\ < 0 & \text{絶対値が剛体の物性番号} \end{cases}$	I5 (I8)
6-10(9-13)	荷重曲線番号	I5 (I5)
11-15(14-18)	節点の移動方向 IDR = 1: x 方向並進 = 2: y 方向並進 = 3: z 方向並進 = 4: 以下に定義する並進速度 = 5: x 軸まわり回転 = 6: y 軸まわり回転 = 7: z 軸まわり回転 = 8: 以下に定義する回転速度 = 9: x 軸まわりに回転する節点の y および z 自由度 = 10: y 軸まわりに回転する節点の z および x 自由度 = 11: z 軸まわりに回転する節点の x および y 自由度	I5 (I5)
16-25(19-28)	スケール・ファクタ	E 10.0 (E 10.0)
26-35(19-28)	ベクトルの x 座標	E 10.0 (E 10.0)
36-45(39-48)	ベクトルの y 座標	E 10.0 (E 10.0)
46-55(49-58)	ベクトルの z 座標	E 10.0 (E 10.0)
56-60(59-63)	速度/加速度フラッグ = 0: 速度 (剛体および節点) = 1: 加速度 (節点のみ)	I5 (I5)

加速度フラッグは節点の場合のみ使用できる。剛体に属する節点の速度と加速度は設定できない。

23. 剛体壁カード

コントロール・カード4のNUMRW個の剛壁を定義する。以下のカード群をNUMRW回繰り返す。

カード1 (I5, 6E10.0, 3I5)
LARGEオプションで (I8, 6E10.0, 2I5, I2)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ節点の数	I5 (I8)
6-15(9-18)	法線ベクトルの始点（壁上にあること）のx座標	E10.0 (E10.0)
16-25(19-28)	法線ベクトルの始点のy座標	E10.0 (E10.0)
26-35(29-38)	法線ベクトルの始点のz座標	E10.0 (E10.0)
36-45(39-48)	法線ベクトルの終点（壁以外の物）のx座標	E10.0 (E10.0)
46-55(49-58)	法線ベクトルの終点y座標	E10.0 (E10.0)
56-65(59-68)	法線ベクトルの終点z座標	E10.0 (E10.0)
66-70(69-73)	移動剛体床フラッグ =0: 空間に固定 =1: 剛体床が初期質量、初速度を持つ	I5 (I5)
71-75(74-78)	スティック条件フラッグ =0: 接触後摩擦なしですべる =1: 接触後すべらない	I5 (I5)
76-80(79-80)	剛体床の大きさの制限オプション、LIMIT =0: 無限 =1: 有限、大きさは以下に定義する	I5 (I2)

LIMIT=1の場合、ベクトルの始点は剛体床の始点となる。第4.6.23図参照。

カード1+LIMIT (5E10.0)

LIMIT=1のとき定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-10	端ベクトルx'の終点のx座標	E10.0
11-20	端ベクトルx'の終点のy座標	E10.0
21-30	端ベクトルx'の終点のz座標	E10.0
31-40	端ベクトルx'の長さ	E10.0
41-50	=0: 負から正への無限拡張 端ベクトルy'の長さ =0: 負から正への無限拡張	E10.0

x', y'はともにゼロであってはならない。

カード 1 +LIMIT+IMSWF (5 E 10.0)

IMSWF=1 のとき定義する。

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	剛体床の質量	E 10.0
11 - 20	剛体床の定義ベクトル方向の初速度	E 10.0

カード 2 +LIMIT+IMSWF (2 I 5)

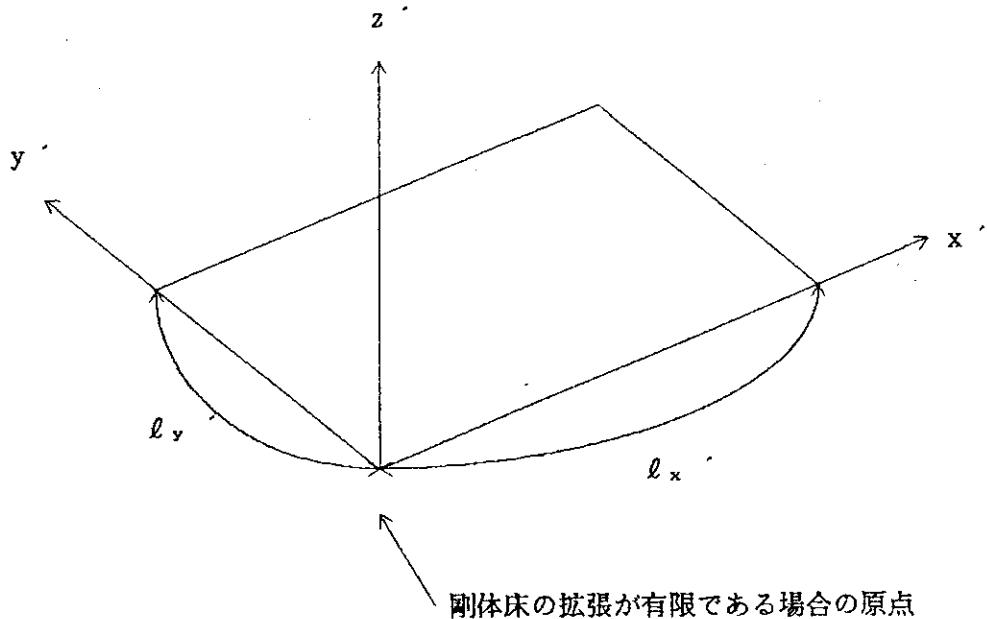
カラム	内容	フォーマット
1 - 5	スレープ番号	I 5
6 - 10	スレープ節点番号	I 5

剛体壁は無限に広がる平面であり、壁上から外に向かう任意長の法線ベクトルで定義される。スレープ節点として指定された節点は壁の中に入りこめない。他の節点は、入りこみうる。

省略されたスレープ節点は次式によって自動的に生成される。

$$\frac{n_i - n_j}{sn_i - sn_j}$$

ここで sn_i と sn_j は二枚の連続したカード上のスレープ番号であり、 n_i と n_j は対応するスレープ節点番号である。



第 4.6.23 図 ベクトル z' は剛体床に垂直である。オプションベクトル x' は $y' = z' \times x'$ となるように定義する。剛体床の拡張は、 ℓ_x および ℓ_y で制限される。 ℓ_x または ℓ_y がゼロの場合は、その方向について無限となる。

24. 節点拘束カード

コントロール・カード2で指定されるNUMCC個の節点拘束データを定義する。

カード1 (215)
LARGE オプションで (I8, I5)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	少なくとも一つの自由度を共有する節点の数	I5 (I8)
6-10(9-13)	共通自由度、	I5 (I5)
= 1 : x		
= 2 : y		
= 3 : z		
= 4 : x と y		
= 5 : y と z		
= 6 : z と x		
= 7 : x, y, z		

カード2 (1615)
LARGE オプションで (10I8)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	結合すべき最初の節点番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	結合すべき2番目の節点番号	I5 (I8)
11-15(17-24)	結合すべき3番目の節点番号	I5 (I8)
:	:	

25. 初期条件カード (I5, 3E10.0, I5)

LARGE オプションで (I8, 3E10.0, I5)

コントロール・カード4の初期条件のパラメタが0の時は省略する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	節点番号	I5 (I8)
6-15(9-18)	x 方向初速	E 10.0 (E 10.0)
16-25(19-28)	y 方向初速	E 10.0 (E 10.0)
26-35(29-38)	z 方向初速	E 10.0 (E 10.0)
36-40(39-43)	増分	I5 (I5)

26. スライディング・インターフェースの定義カード

コントロール・カード3で指定されるNUMSI個のスライディングインターフェースを定義する。

カード1, 2, ……, NUMSI(315, 3E10.0, 315)
LARGEオプションで(218, 15, 3E10.0, 315)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ・セグメント(1-4および9) または節点(5-8)の数(NSS)	I5(I8)
6-10(9-16)	マスター・セグメントの数(NMS)	I5(I8)
11-15(17-21)	タイプ 1-滑り 2-結合 3-滑り+衝突+摩擦 4-シングルサーフェース(NMS=0) 5-面に衝突する離散化節点 6-面に剛結された離散化節点 7-シェル面に剛結されたシェルエッジ 8-面に点溶接された節点 9-切り離し考慮した面	I5(I5)
16-25(22-31)	静止摩擦係数, μ_s	E10.0(E10.0)
26-35(32-41)	動摩擦係数, μ_k	E10.0(E10.0)
36-45(42-51)	指数減衰係数, d_v	E10.0(E10.0)
46-50(52-56)	貫通サーチ・アルゴリズム =0: ノーマルサーチ =1: 特殊サーチ(より厳密なアルゴリズム)	I5(I5)
51-55(57-61)	相互作用プリント・ファイルにスレーブ側を取り込む	I5(I5)
56-60(62-66)	相互作用プリント・ファイルにマスター側を取り込む	I5(I5)

(以下に続く摩擦モデルの説明を参照のこと)

次のカード群をそれぞれのスライディング・インターフェースについて繰り返す。

タイプ1-4の場合、以下のカードを定義する。タイプ5-8のときは飛ばす。

カード NUMSI+1, ……, NUMSI+NSS (615, 2E10.0)

LARGE オプションで (518, 2E10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ・セグメントの番号	I5 (I8)
6-10 (-)	増分 k	I5 (省略)
11-15(9-16)	節点 n ₁	I5 (I8)
16-20(17-24)	節点 n ₂	I5 (I8)
21-25(25-32)	節点 n ₃	I5 (I8)
26-30(33-40)	節点 n ₄	I5 (I8)
31-40(41-50)	破壊垂直応力 (タイプ9のみ)	E 10.0 (E 10.0)
41-50(51-60)	破壊剪断応力 (タイプ9のみ)	E 10.0 (E 10.0)

タイプ5-8のときのみスレーブ節点を定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点番号	I5 (I8)
11-20(17-26)	破壊垂直方向力, S _n	E 10.0 (E 10.0)
21-30(27-36)	破壊剪断方向力, S _s	E 10.0 (E 10.0)
31-40(37-46)	垂直方向力指数, n	E 10.0 (E 10.0)
41-50(47-56)	剪断方向力指数, m	E 10.0 (E 10.0)

省略されたデータは、次式による自動増分で生成される。

$$(n_i - n_j) / (sn_i - sn_j)$$

ここで、sn_i, sn_j は 2 つの連続するカードのスレーブ番号であり、n_i, n_j は対応する節点番号である。

点溶接の破壊は、

$$(f_n/s_n)^n + (f_s/s_s)^m \geq 1$$

となった場合に起こる。ここで、f_n および f_s は相互作用の垂直力および剪断力である。f_n は引っ張り値としてのみ非零である。

カード NUMSI+NSS+1, ……, NUMSI+NSS+NMS (615)

LARGE オプションで (518)

(マスター・セグメント・カード)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	マスター・セグメントの番号	I5 (I8)
6-10 (-)	増分 k	I5 (省略)
11-15(9-16)	節点 n_1	I5 (I8)
16-20(17-24)	節点 n_2	I5 (I8)
21-25(25-32)	節点 n_3	I5 (I8)
26-30(33-40)	節点 n_4	I5 (I8)

スレーブ及びマスター・セグメントは順にあると仮定されるがマスター・セグメントに指定される特別の番号は任意である。省略されたデータは、省略された直前のデータ・カードより自動生成される。

$$n_j^{i+1} = n_j^i + k$$

生成のパラメタ k はこのカードよりとる。節点の順番は時計回りでも反時計回りでもよい。節点の $n_1 \sim n_4$ で第 4.6.24 図に示すようにセグメントの端点が定義される。三角形のセグメントは節点を繰り返すことにより、定義される。

接触面上のすべてのスレーブ及びマスター・セグメントが定義されねばならない。面の定義の順番には、意味がない。

摩擦モデルは、完全弾塑性モデルと相似である。ヤング率とひずみ速度の関係に、面の剛性と節点-面セグメント間の相対速度の関係が対応する。摩擦係数と抗力との積は、降伏応力に相当する。静止および動摩擦係数の移行は、指數関数により滑らかにされている。

27. 結合-破壊シェルインターフェース

カード 1, 2, ……, NTBSL (215)

LARGE オプションで (218)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ節点個数, NSN = 0: スレーブ番号は 1 づつ増される	I5 (I8)
6-10(9-16)	マスター節点個数, NMN	I5 (I8)

以下のデータを各結合-破壊インターフェースに対し定義する。

カード 1 (E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-10	破壊相当塑性ひずみデフォルト値	E 10.0

カード 2, 3, 4, ……NSN+1 (215, E 10.0)

LARGE オプションで (218, E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ番号 = 0: スレーブ番号は 1 づつ増される	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点番号	I5 (I8)
11-20(17-26)	破壊塑性ひずみ	E 10.0 (E 10.0)

データが省略された場合、次の式に従って節点番号が自動増分により生成される。

$$(n_j - n_i) / (sn_i - sn_j)$$

ここで、 $sn_i - sn_j$ は 2 つの連続したカードのスレーブ番地であり、 $n_i - n_j$ はそれらに対応する節点番号である。

カード NSN+2, NSN+3, ……, NSN+NMN+1 (215)

LARGE オプションで (218)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	マスター番号 = 0: スレーブ番号は 1 づつ増される	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点番号	I5 (I8)

データが省略された場合、上のように生成される。

マスター節点は、面に沿って順番に現れるようにしなければならない。スレーブ節点は右側にあるものとする。スライドラインは交差しない。

28. 破壊モデルの入った節点結合

カード 1, 2, 3, ……, NTNWF (215)		
カラム	内容	フォーマット
1-5	節点結合の個数 (NTNC)	I5
6-10	拘束される節点の個数 (最大値)	I5

各グループに対し

カード NTNWF+1 (E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-10	破壊塑性ひずみのデフォルト値	E 10.0

カード NTNWF+2, ……, NTNWF+NTNC

(E 10.0, 12I5 / (14I5))

LARGE オプションで (E 10.0, 6X, 6I8 / (10I8))

カラム	内容	フォーマット
1-10(1-10)	破壊塑性ひずみ	E 10.0 (E 10.0)
11 - 70 (-)	結合される節点リスト (12 個まで)	12I5
* * * * LARGE オプションでは * * * *		
(17 - 64)	結合される節点リスト (6 個まで)	(6I8)

14I5 (LARGE オプションでは 10I8) を続けることにより、さらに定義可能である。この機能は、薄肉シェル要素にのみ適用される。指定された節点は、平均塑性ひずみ（体積による重みつき）が指定値を越えるまで結合されている。結合シェルインターフェースと異なり、個々のシェル要素の全ての領域を結合する。また、結合節点は、破壊に到るまで一致している。

29. 剛体併合 (2I5)

ここでは、NRBS 組の剛体併合カードを定義する。

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	マスター剛体の物性番号	I5
6 - 10	スレーブ剛体の物性番号	I5

スレーブ剛体は、マスター剛体に併合される。

30. 剛体のための外部節点

外部節点を持つ各剛体に対して定義する。

カード 1 (2I5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	剛体物性番号	I5
6 - 10	外部節点番号, NEN	I5

カード 2, 3, 3, ……, NEN+1 (10I5)

LARGE オプションで (10I8)

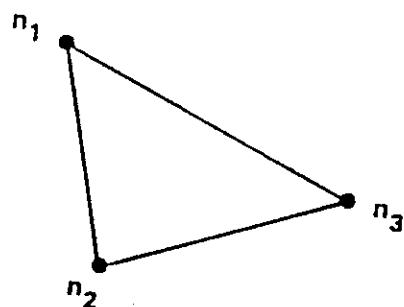
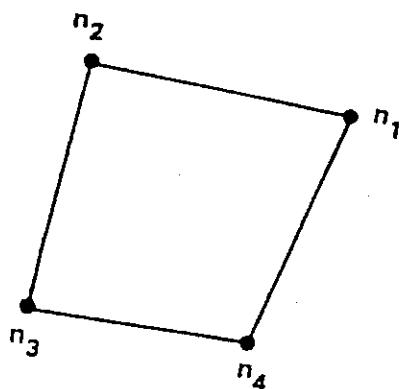
カラム	内容	フォーマット
1-50(1-80)	外部節点 (1枚あたり 10 個まで)	10I5 (10I8)

31. 結合カード (E 10.0, 715)

LARGE オプションで (E 10.0, I5, 618)		
カラム	内容	フォーマット
1-10(1-10) 11-15(11-15)	相対ペナルティ剛性 (デフォルト = 1.0) 結合タイプ = 1: 球 (Spherical) = 2: 反転 (Revolute) = 3: 円筒 (Cylindrical) = 4: 平板 (Planar) = 5: ユニバーサル (Universal) = 6: 並進 (Translational)	E 10.0 (E 10.0) I5 (I5)
16-20(16-23)	節点 1	I5 (I8)
21-25(24-31)	節点 2	I5 (I8)
26-30(32-39)	節点 3	I5 (I8)
31-35(40-47)	節点 4	I5 (I8)
36-40(48-55)	節点 5	I5 (I8)
41-45(56-63)	節点 6	I5 (I8)

結合形状を第 4.6.25 図に定義する。各々の時間ステップで、相対剛性に対し解の安定性を損なわないような最大剛性を与える関数（時間ステップに依存）を乗じる。

もしも、結合拘束における誤差が大きすぎる場合は、時間ステップが減じられる。相対剛性を増加させても影響しない。



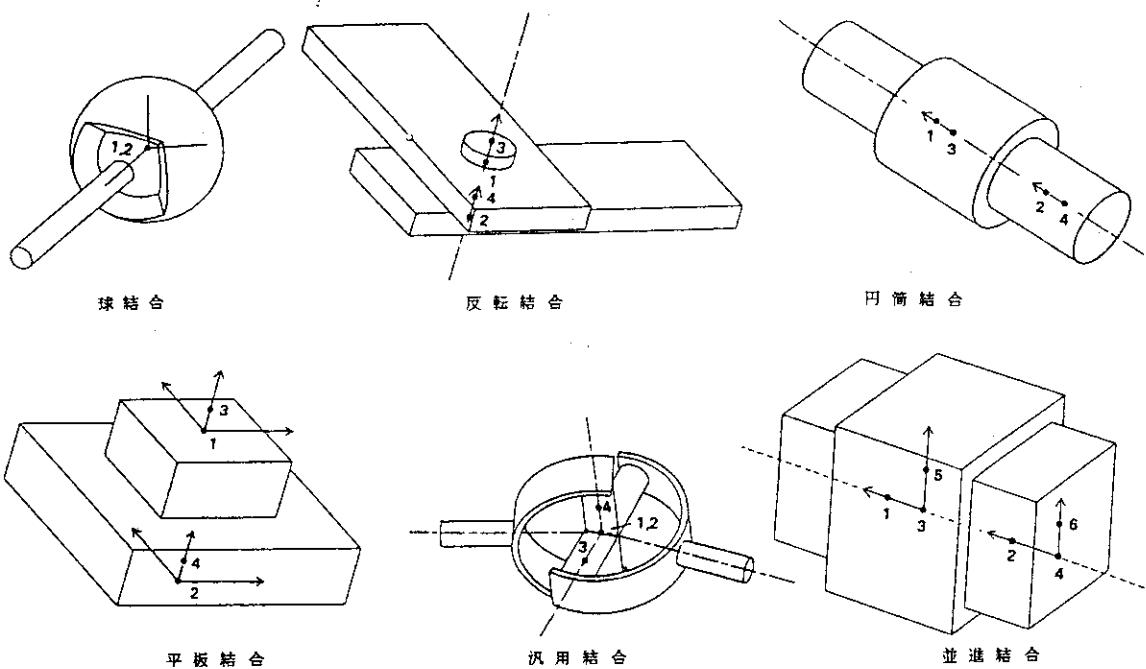
第 4.6.24 図 スレーブおよびマスター セグメントの番号付け

32. X 方向のベース加速度カード (I 5, E 10.0)

コントロール。カード 2 の NATHPX が 0 の時は省略		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	荷重曲線番号	I 5
6 - 15	x 方向加速度のスケール・ファクタ (デフォルトは 1.0)	E 10.0

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-d_v \cdot V_{relative})$$

座屈解析では、自己面衝突をモデル化する單一面接触のアルゴリズムが要求される。単純にスレーブ接点とマスター接点同じにするのではうまくゆかない。單一面接触は、マスター・スレーブ接触アルゴリズムよりもずっと計算時間がかかる。その使用は、絶対に必要な状況にのみ限定されるべきである。



第 4.6.25 図 結合の定義

33. Y 方向のベース加速度カード (I5, E10.0)

コントロール・カード2のNTHPYが0の時は省略		
カラム	内 容	フォーマット
1-5	荷重曲線番号	I5
6-15	y方向加速度のスケール・ファクタ (デフォルトは1.0)	E10.0

34. Z 方向のベース加速度カード (I5, E10.0)

コントロール・カード2のNTHPZが0の時は省略		
カラム	内 容	フォーマット
1-5	荷重曲線番号	I5
6-15	z方向加速度のスケール・ファクタ (デフォルトは1.0)	E10.0

35. X 軸まわりの角速度カード (I5, E10.0)

コントロール・カード2のNTHSXが0の時は省略		
カラム	内 容	フォーマット
1-5	荷重曲線番号	I5
6-10	角速度のスケール・ファクタ (デフォルトは1.0)	E10.0

36. Y 軸まわりの角速度カード (I5, E10.0)

コントロール・カード2のNTHSYが0の時は省略		
カラム	内 容	フォーマット
1-5	荷重曲線番号	I5
6-10	角速度のスケール・ファクタ (デフォルトは1.0)	E10.0

37. Z 軸まわりの角速度カード (I5, E10.0)

コントロール・カード2のNTHSZが0の時は省略		
カラム	内 容	フォーマット
1-5	荷重曲線番号	I5
6-10	角速度のスケール・ファクタ (デフォルトは1.0)	E10.0

角速度による荷重は常に変形後の配置に関して計算される。角速度は単位時間当たりのラディアンで定義される。

38. 運動量指定データ (I5, 4E10.0)

LARGE オプションで (I8, 4E10.0)

コントロール・カード4の71-75カラムが、ブランクまたは0の時は省略。
NELMP個の要素に対して受け取るべき運動量を与える。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	要素番号	I5 (I8)
6-15(9-18)	x 方向運動量	E10.0 (E10.0)
16-25(19-28)	y 方向運動量	E10.0 (E10.0)
26-35(29-38)	z 方向運動量	E10.0 (E10.0)
36-45(39-48)	与える時刻	E10.0 (E10.0)

39. 着火点のデータ (E10.0, I5, 3E10.0)

コントロール・カード4の76-80カラムが、ブランクまたは0の時は省略。 NDETPTS個のH.E.着火点についてに以下のカードを入力する。

カラム	内容	フォーマット
1-10	着火点の発火時刻	E10.0
11-15	発火する物性の番号 =0: 全H.E.物に適用	I5
16-25	着火点のx座標	E10.0
26-35	着火点のy座標	E10.0
36-45	着火点のz座標	E10.0

40. シェルーソリッド・インターフェース

各々のインターフェースに対し定義する。

カード1 (2I5)

カラム	内容	フォーマット
1-5	シェル節点数	I5
6-10	各シェル節点に統合されるソリッド節点数 (最大9個)	I5

カード 2 … シェル節点数 + 1 (1015)

LARGE オプションで (1018)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	シェル節点 s ₁	I5 (I8)
6-10(9-16)	第1ソリッド節点 n ₁	I5 (I8)
11-15(17-24)	第2ソリッド節点 n ₂	I5 (I8)
:	:	:
46-50(73-80)	第9ソリッド節点 n ₉	I5 (I8)

シェルーソリッド結合は、結合面 (tied surface) 機能の拡張であり、ソリッド要素とシェル要素を結合する。シェル節点は、節点の板厚方向に沿った9つ以下の節点と結合することができる。計算中は、節点は板厚方向になければならないが、板厚方向の相対運動は可能である。ソリッド節点は、シェル板厚方向に順番に入力しなければならない。

この機能により、4節点シェルと8節点ソリッドシェル、または8節点ソリッドと結合できる。
8節点ソリッドシェルと8節点ソリッドは結合できない。

41. 離散化バネ・ダンパおよびマス

INPSD = 0 ならばスキップする。

カード 1 (315)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	物性数 NUMMTDE	I5
6 - 10	バネ・ダンパ数, NUMELD	I5
11 - 15	マス数, NUMMAS	I5

NUMMTDE 数のカードセットを以下に定義する。

カード 2, 4, 6, …, (215)

カラム	内容	フォーマット
1 - 5	物性番号 (\leq NUMMTDE)	I5
6 - 10	物性タイプ = 1: 線形弾性 = 2: 線形粘性 = 3: 等方弾塑性 = 4: 非線形弾性 = 5: 非線形粘性	I5

カード 3, 5, 7, …, (8 E 10.0)

〈物性タイプ1〉

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	弾性剛性(力/変位)	E 10.0

〈物性タイプ2〉

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	減衰係数(力/変位/時間)	E 10.0

〈物性タイプ3〉

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	弾性剛性(力/変位)	E 10.0
11 - 20	接線剛性(力/変位)	E 10.0
21 - 30	降伏力(力)	E 10.0

〈物性タイプ4〉

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	力対変位関係を表現する荷重曲線番号	E 10.0

〈物性タイプ5〉

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	力対変位速度を表現する荷重曲線番号	E 10.0

〈物性タイプ6〉一般的非線形

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	載荷に対する荷重変位関係を表す荷重曲線番号	E 10.0
11 - 20	除荷に対する荷重変位関係を表す荷重曲線番号	E 10.0
21 - 30	硬化パラメータ($0 < \beta < 1$)	E 10.0
31 - 40	引張りに対する初期降伏力(> 0)	E 10.0
41 - 50	圧縮に対する初期降伏力(< 0)	E 10.0

荷重曲線の点は、変位、力を2E 10.0の形式で表す。その点列は、最大負値変位(圧縮側)から始め、最大正値変位(引張り)で終わる。曲線は対称である必要はない。

除荷曲線の変位原点は任意で、要素の伸縮に応じてシフトされる。反転降伏においては、載荷曲線は変位軸に沿ってシフトされる。

初期引張りおよび圧縮降伏力(F_{YT} および F_{YC})は要素が弾性を保つ範囲を示す。(すなわち

“荷重”曲線は、載荷および除荷の両方に用いられる) 力がこの範囲を越えた時はいつでも、降伏に到ったと見なされる。その後は“除荷”曲線が除荷の際に用いられる。

NUMELD 数のバネおよびダンパを以下に定義する。

カード $2 + 2^*NUMMTED, \dots, 1 + 2^*NUMMTDE + NUMELD$

(415, E 10.0)

LARGE オプションで (418, E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	要素番号	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点 n_1	I5 (I8)
11-15(17-24)	節点 n_2	I5 (I8)
16-20(25-32)	物性番号	I5 (I8)
21-35(33-42)	力のスケールファクタ (デフォルトは 1.0)	E 10.0 (E 10.0)

NUMMAS 個の集中マスを定義する。

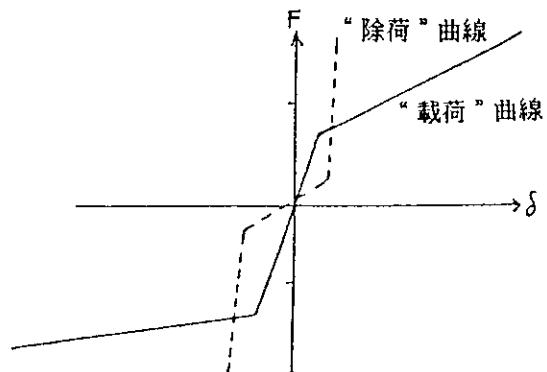
カード $2 + *NUMMTDE + NUMELD, \dots, 1 + 2^*NUMMTDE$

+NUMELD+NUMMAS (I5, E 10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-5	節点番号	I5
6-15	マス	E 10.0

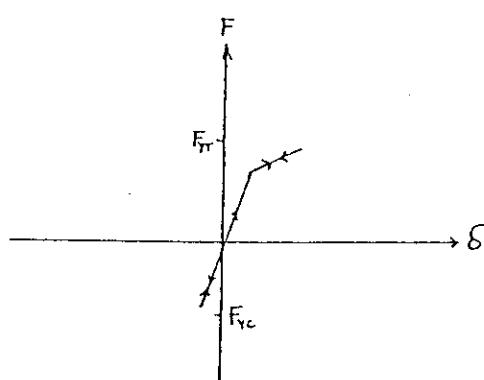
要素の動作を以下に示す。

原曲線



弾性挙動

($F_{yc} < F < F_{yt}$)

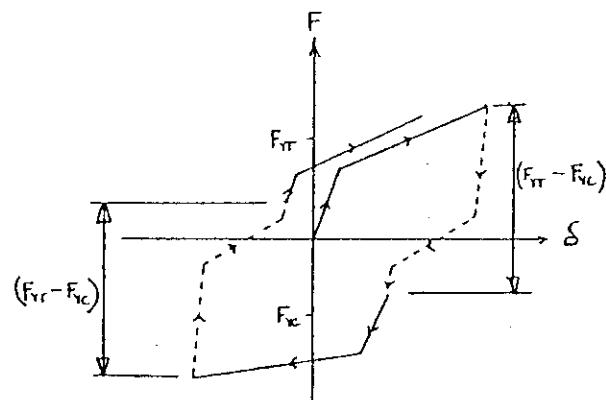


塑性挙動

($\beta = 0$)

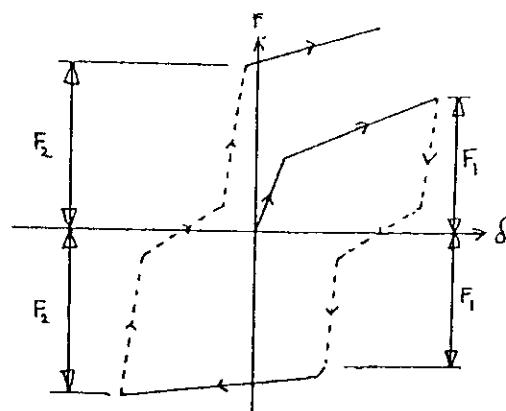
実線が“載荷”曲線

破線が“除荷”曲線



塑性挙動

($\beta = 1$)



第4.6.26図

42. 剛性慣性特性

カード 1 (I5, 4E10.0)		
カラム	内 容	フォーマット
1 - 5	剛体物性番号	I5
6 - 15	マスの中心 [x 座標]	E 10.0
15 - 25	[y 座標]	E 10.0
26 - 35	[z 座標]	E 10.0
36 - 45	並進マス	E 10.0

カード 2 (6E10.0)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	I_{xx} , 慣性テンソル	E 10.0
11 - 20	I_{xy}	E 10.0
21 - 30	I_{xz}	E 10.0
31 - 40	I_{yy}	E 10.0
41 - 50	I_{yz}	E 10.0
51 - 60	I_{zz}	E 10.0

慣性テンソルは、全体座標系で定義する。

カード 3 (6E10.0)

カラム	内 容	フォーマット
1 - 10	剛体速度, x 並進	E 10.0
11 - 20	剛体速度, y 並進	E 10.0
21 - 30	剛体速度, z 並進	E 10.0
31 - 40	剛体速度, x 回転	E 10.0
41 - 50	剛体速度, y 回転	E 10.0
51 - 60	剛体速度, z 回転	E 10.0

43. 無反射境界セグメント (6I5)

LARGE オプションで (5I8)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	面セグメント番号	I5 (I8)
6-20(-)	増分 k	I5 (省略)
11-15(9-16)	節点 n_1	I5 (I8)
16-20(17-24)	節点 n_2	I5 (I8)
21-25(25-32)	節点 n_3	I5 (I8)
26-30(33-40)	節点 n_4	I5 (I8)

44. 温度データ・オプション I (I5, 2E10.0, 2I5)

LARGE オプションで (I8, 2E10.0, 2I8)

温度効果オプションが -9999 の時のみ、NUMNP 個の温度カードを定義する。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	節点番号	I5 (I8)
6-15(9-18)	温度スケール	E 10.0 (E 10.0)
16-25(19-28)	基本温度	E 10.0 (E 10.0)
26-35(29-33)	温度スケールを乗じる荷重曲線番号	I5 (I8)
36-40(24-38)	生成増分, k	I5 (I8)

45. 温度データ・オプション II (I5, 10X, E10.0)

LARGE オプションで (I8, 10X, E10.0)

温度効果オプションが -2 の場合のみ、NUMNP 個の温度カードを定義する。

この条件では、参照温度状態が考慮されない。節点温度は、以下に読み込まれる温度に常に保たれる。

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	節点番号	I5 (I8)
16-25(19-28)	温度	E 10.0 (E 10.0)

節点が足りないと、DYNA 3D が線形補間を行う。

最終節点番号が入力されると、このデータは終わりとなる。

46. 一次元スライドラインの定義

一次元スライドラインは、GA Technologies の Pelessone に開発された。
NUMSL 個の一次元スライドラインを定義する。

カード 1 (2I5, 5E10.0)

カラム	内容	フォーマット
1-5	スレーブ節点数, NSN	I5
6-10	マスター節点の数, NMN	I5
11-20	リバーの外径	E 10.0
21-30	コンクリートの圧縮強さ	E 10.0
31-40	ボンドの剪断係数	E 10.0
41-50	裁断剪断変位	E 10.0
51-60	損傷曲線の指数 (Hdmg)	E 10.0

カード 2, …, NSN+1 (215)

LARGE オプションで (218)

(スレーブ節点)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	スレーブ番号 = 0: スレーブ番号を1つづつ増す	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点番号	I5 (I8)

省略されたデータは、以下の増分により自動生成される。

$$(n_i - n_j) / (sn_i - sn_j)$$

ここで、 sn_i , sn_j は2つの連続するカードのスレーブ番号であり、 n_i , n_j は対応する節点番号である。

カード NSN+2, …, NSN+NMN+1 (215)

LARGE オプションで (218)

(マスター節点)

カラム	内容	フォーマット
1-5(1-8)	マスター番号 = 0: マスター番号を1つづつ増す	I5 (I8)
6-10(9-16)	節点番号	I5 (I8)

省略されたデータは、スレーブ節点を同様に生成される。マスター節点は、面に沿って順に現れるように並べなければならない。スレーブ面は、左に位置しなければならない。スライドラインは交差してもよい。

II. リスタート入力データ

0. オプションデータ

これは I. の初期入力データの同じ。

1. タイトルカード (12 A 6, 3 X, A 5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 72	タイトル	12 A 6
76 - 80	ラージフォーマット・オプション 節点数が 99799 を越えると, "LARGE" にセットされる	A 5

2. コントロールカード

カード 1 (3 E 10, 6 I 5)		
カラム	内容	フォーマット
1 - 10	解析終了時間	E 10.0
11 - 20	EQ .0.0 リストファイル内の値が用いられる プリント出力時間間隔	E 10.0
21 - 30	EQ .0.0 リストファイル内の値が用いられる ポストファイル出力時間間隔	E 10.0
31 - 35	EQ .0.0 リストファイル内の値が用いられる 削除するスライド面の数 (≤ 48)	I 5
36 - 40	削除する要素ブロックの数	I 5
41 - 45	削除する物性の数	I 5
46 - 50	削除するビーム要素ブロック数	I 5
51 - 55	削除する 4 節点シェル要素ブロック数	I 5
56 - 60	削除する 8 節点シェル要素ブロック数	I 5

カード 2 (E 10.0, 4 I 5)

カラム	内容	フォーマット
1 - 10	時間ステップ計算のスケールファクタ	E 10.0
11 - 15	境界条件変更の数	I 5
16 - 20	応力を初期化する物性数	I 5
	このオプションを用いると完全な DYNA 3D 入力データ が必要で、物性やスライディング・インターフェースが追 加、あるいは削除できる。また、他の仮想的な変更も可能 である。	
21 - 25	リスタート・ダンプの出力サイクルの間隔 = 0: 変更なし	I 5
26 - 30	ランニング・リスタート・ダンプの出力サイクルの間隔 = 0: 変更なし	I 5

3. 削除するスライディング・インターフェース (16I5)

LARGE オプションで (10I8)		
削除するスライディング・インターフェース数が 0 の場合省略する。		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	削除する第1のスライディング・インターフェース	I5 (I8)
6-10(9-16)	削除する第2のスライディング・インターフェース	I5 (I8)
11-15(17-24)	削除する第3のスライディング・インターフェース	I5 (I8)

4. 削除する物性 (16I5)

LARGE オプションで (10I8)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	削除する第1の物性	I5 (I8)
6-10(9-16)	削除する第2の物性	I5 (I8)
11-15(17-24)	削除する第3の物性	I5 (I8)

5. 削除するソリッド要素ブロック (16I5)

LARGE オプションで (10I8)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	削除する第1のソリッド要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
6-10(9-16)	削除する第1のソリッド要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)
11-15(17-24)	削除する第2のソリッド要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
16-20(25-32)	削除する第2のソリッド要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)

6. 削除するビーム要素ブロック (16H5)

LARGE オプションで (10I8)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	削除する第1のビーム要素ブロックの最初のエレメント	I5 (C8)
6-10(9-16)	削除する第1のビーム要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)
11-15(17-24)	削除する第2のビーム要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
16-20(25-32)	削除する第2のビーム要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)

7. 削除するシェル要素ブロック (1615)

LARGE オプションで (10I8)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	削除する第1のシェル要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
6-10(9-16)	削除する第1のシェル要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)
11-15(17-24)	削除する第2のシェル要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
16-20(25-32)	削除する第2のシェル要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)

8. 削除する厚肉シェル要素ブロック (1615)

LARGE オプションで (10I8)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	削除する第1の厚肉シェル要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
6-10(9-16)	削除する第1の厚肉シェル要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)
11-15(17-24)	削除する第2の厚肉シェル要素ブロックの最初のエレメント	I5 (I8)
16-20(25-32)	削除する第2の厚肉シェル要素ブロックの最後のエレメント	I5 (I8)

9. 境界条件コードの変更 (I5, F5.0)

LARGE オプションで (I8, F5.0)		
カラム	内 容	フォーマット
1-5(1-8)	節点番号	I5 (I8)
6-10(9-13)	新しい境界条件コード	F5.0 (F5.0)

10. 物性の初期化 (2I5)

初期化する物性数が 0 または -1 ならばスキップする。		
カラム	内 容	フォーマット
1-5	ダンプファイルを用いて、物性番号を初期化する	I5
6-10	新しい入力データを用いて、物性番号を初期化する	I5

初期化する各物性に対し、上のデータを繰り返す。リストア時に変更する内容を含む入力データを入れる。これにより、リストア・ファイルの内容は、上書きされる。カード 2 の終了時刻も上書きされる。

5. 入力データ作成プログラム

5.1 INGRID⁽⁹⁾

5.1.1 概 要

INGRID は DYNA 3 D, NIKE 3 D, FACET および TOPAZ のための入力データを作成するために、米国ローレンズリバモア国立研究所において開発されたものである。幾何学的な扱いは、主として INGEN プログラムからもたらされたインデックス空間の概念による。INGEN で使用されたアイディアは、簡単で強力な新しい方法に再構成されている。

INGRID での INTRACTIVE グラフィックスは、三次元ポストプロセッサ TAURUS と二次元格子を生成する MAZE を模範としている。MAZE によって作成されたコードのほとんどは、INGRID そのまま使用できる。

INGRID の作成は、1979年にテネシー大学で始まった。INGEN プログラムは、ロスアラモス研究所で作成され、多くの格子生成問題に使用された。INGEN は、多くの問題に適していた。しかし、プログラムを試しているうちにすぐ、いくつかの簡単なパターンが度々現れることがわかった。これらのパターンは、INGEN のプリプロセッサにされ、さらに多くの問題に使用された。さらに新しい入力体系によって、たくさんのパターンが生じるのがわかり、自動化された。ついにプリプロセッサは、INGEN と簡単な画像処理プログラムと合体された。INGRID を作成するため、いくつかの最適化が行われ、若干のアルゴリズムが付け加えられた。最終的に、INGEN で必要とされたものの 10 パーセントに満たない入力で済み、線形構造の多様な問題に適当である。

INGRID の新しい段階の作業は、1981 年に国立ローレンス・リバモア研究所で開始された。DYNA と NIKE を強力なコンピュータで利用する有効性から、プログラムのあらゆる面で重要な作業が必要だった。

もっとも明白な改良は、幾何的処理と画像処理の分野でおこなわれた。正確な面の方程式と面の交わりとによって、正確なモデルを扱う能力が改善され、込み入った格子に有効な、隠れた線を処理するアルゴリズムを加えられた。付け加えられた MAZE のパートにより、元々の INGRID のパートを使って作り難いたくさんの簡単な図形をモデル化できる。

能力と効率は、3 万要素の格子を普通に扱う様になるのが限度である。納められているバイナリ I/O コードは、広範囲に使用され、アルゴリズムは、より早く、より効果的にデータを保管できる新しいものにしばしば交換される。結果として、VAX-750 の様な比較的小型の計算機でも、2 万格子の生成に容易に使用される。

最も重要な新しい能力とコードの大きさは、非線形構造体のプログラムに必要とされる境界条件と荷重と材料の性質とに関係している。多くの問題で図形や格子の定義より境界条件や荷重の定義の方が多量のデータを必要とする。一般的のコマンドを使って中間のファイルを書き、プログラムへの入力ファイルを作るよりも、各場合でユーザーの労力が可能な限り小さくなるように各コマンドは、注意深く設計されている。これは、それぞれの荷重及び境界条件において、ほとん

どいつでも特別な処理を必要とするので、特に重要である。

INGRID の作業の開始以来変わらなかったことは、増えていく仕事を処理するための経験豊富な解析者の数である。このプロジェクトの主要な目的は、可能な限り効率良く有限要素のモデルを作ることである。著者は、解析従事者の仕事をさらに単純化すどんなアイディアも歓迎し、それをできる限り取り入れて行く。

(2) 諸 定 義

「インデックス空間」：インデックス空間とは、三次元の離散的な座標系で、それぞれの三方向に、1以上の整数値を取る。離散的な三座標は、各々 I, J, K と名付かれている。インデックス空間での各点 (i, j, k) は、節点を表す。要素は、インデックス空間で、近くにある節点のグループとして定義される。

「領域」：領域とは、長方形または立方体の節点の集合体である。領域は、常にインデックス空間での節点の集合体として定義される。

「パーツ」：パーツとは、インデックス空間においてグループ化でき、便利のために作られた領域の集合である。初心者は、1 パーツに1つの領域を使うが、進歩したユーザーは、多数の領域をまとめて複雑なパーツにできるであろう。

「モデル」：最終的なモデルは、パーツの集合である。各パーツは、各々のインデックス空間を持ち、他のパーツと独立である。パーツどうしは、全体的な重なった節点の除去や滑り面、またはその他の束縛によりつなげられる。

(3) インデックス表示法

INGRID は、INGEN で使用されているインデックス空間表示を基礎としている。インデックス空間表示法に「インデックス数列」という表示方法が付け加えられた。インデックス数列は、複雑な構造を表すのに簡潔で単純な方法を与える、INGRID にデータを入力するのに使用される。以下は、インデックス空間の表示法とインデックス数列についての詳しい記述である。この情報は、ユーザーに INGRID を有効に使用するのに必要な概念を与える。

(4) インデックス空間

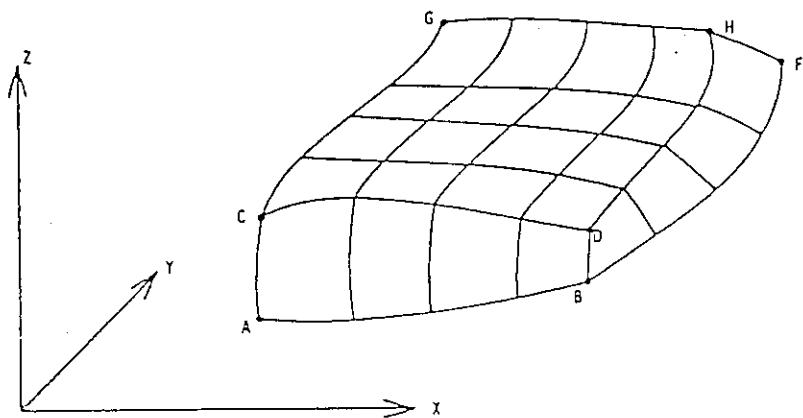
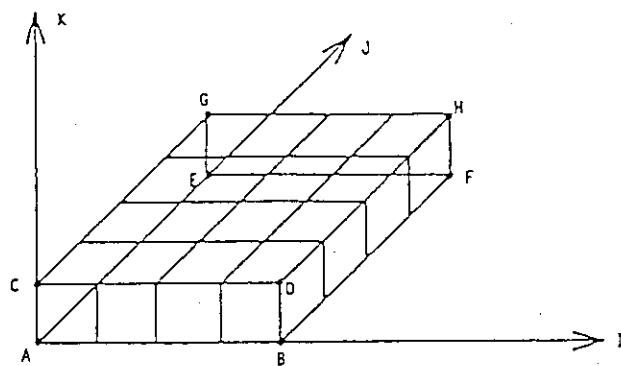
INGRID での節点の生成は、第 5.1.1 図に示される表に、インデックス空間から興味ある物体へのマッピングにより行われる。物体の各領域は、6つのインデックスの組で参照される。 $(IMIN, JMIN, KMIN)$ によってインデックス空間での領域の最小のインデックスが示され、 $(IMAX, JMAX, KMAX)$ により最大のインデックスが示される。立体の領域に対しては、最小及び最大のインデックスの組合せによって、8つのすべての頂点の節点が表される。第 5.1.1 表に第 5.1.1 図を例として、頂点のインデックスを示してある。如何なる 3 つのインデックスの組 (I, J, K) でも、ある点を定め、どんな 6 つのインデックスの組 $(IMIN, JMIN, KMIN, IMAX, JMAX, KMAX)$ も、空間での領域を定めると考える。

$KMIN$ と $KMAX$ が等しい時、それによって表される領域は、第 5.1.2(a)図に示されるような K が一定な平面である。同様に $IMIN$ と $IMAX$ が等しい時、 I 一定の平面が定義され、また $JMIN$ と $JMAX$ が等しければ、 J 一定の平面となる。インデックス空間での直線は、第 5.1.2(b) 図に示される様に、2つのインデックスを一定にし、3つめのインデックスを変化させることにより定義される。

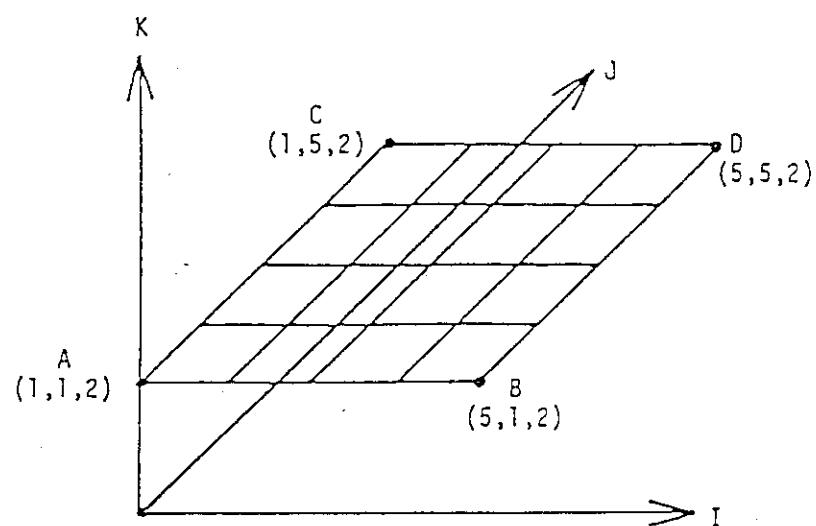
第 5.1.1 表 インデックスと領域の頂点との関係

Node	Indices	Position
A	(1, 1, 1)	(IMIN, JMIN, KMIN)
B	(5, 1, 1)	(IMAX, JMIN, KMIN)
C	(1, 1, 2)	(IMIN, JMIN, KMAX)
D	(5, 1, 2)	(IMAX, JMIN, KMAX)
E	(1, 5, 1)	(IMIN, JMAX, KMIN)
F	(5, 5, 1)	(IMAX, JMAX, KMIN)
G	(1, 2, 2)	(IMIN, JMAX, KMAX)
H	(5, 5, 2)	(IMAX, JMAX, KMAX)

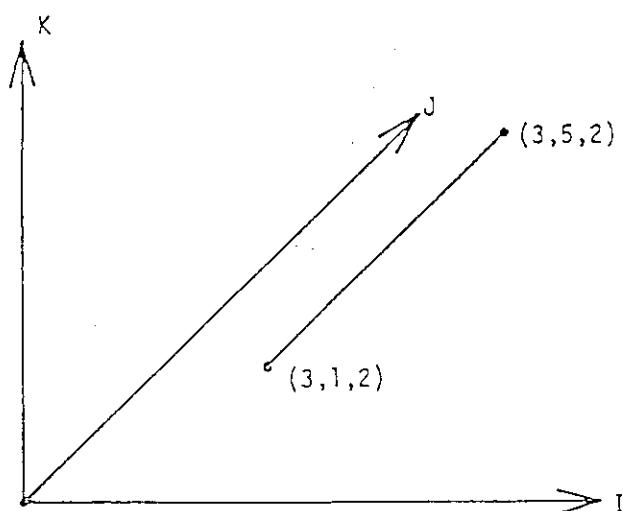
インデックス空間は、 $1 < I < \infty$, $1 < J < \infty$, $1 < K < \infty$ でとることのできるすべてのインデックスの組として、定義される。インデックスが 0 の時は、それらの限りのすべてのインデックスをとる。すなわちインデックス (3, 0, 2) は、インデックス空間中を横切って引かれた直線を定義し、(0, 0, 2) は、インデックス空間を 2 つの領域に分割する平面を定義する。(0, 0, 0) は、インデックス空間全体を定義する。



第 5.1.1 図 インデックス空間から対象空間へのマッピング



(a) インデックス空間における水平面



(b) インデックス空間における直線

第5.1.2図 インデックス空間

(5) インデックス数列

インデックス数列は、インデックス空間で多数の領域を定義するのを容易にするために開発された。領域に対して最小及び最大のインデックスを決めるよりも簡単に I, J, K のそれぞれの方向について、インデックスの数列を決めれば良い。例えば、領域 (2, 7, 6, 8, 9, 10) は数列として (2, 8); (7, 9); (6, 10) と表される。領域 (2, 7, 2, 8, 9, 6) の様に領域 (2, 7, 6, 8, 9, 10) と隣接する領域がある時、2つの領域は一緒に数列 (2, 8); (7, 9); (2, 6, 10) により定義される第 5.1.3(a) 図に示される様な 4 つの立体領域を定義するには、数列 (3, 5, 7); (2, 4, 6); (1, 4) を必要とする。

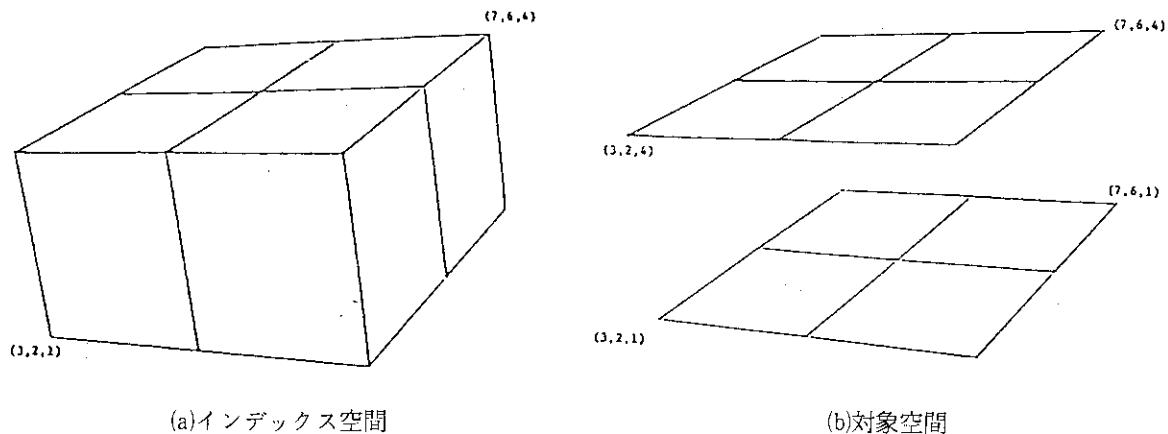
平面に対するインデックス数列も同様の方法で定義される。平面上において一定であるインデックスはマイナス符号で示される。すなわち平面 (2, 5, 5, 2, 7, 8) は、(-2); (5, 7); (5, 8) と表される。

第 5.1.3(b) 図には、数列 (3, 5, 7); (2, 4, 6); (-1, -4) で表せる 8 つの平面が示されている。この表示法による節約は、明白である。つまり第 5.1.3(b) 図の 8 つの領域を別々に示すのには 48 個の数が必要であるが、インデックス数列では、たった 4 つの数しか必要としない。

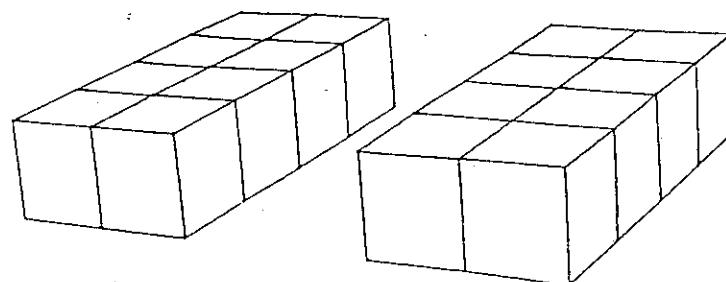
インデックス数列の表示法にもう 1 つ付け加えるものとして、0 インデックスがある。第 5.1.4 図に示される 2 つの立体領域は、それらが不連続でなければ、インデックス数列で表せる。このような場合には、構造が不連続であることを示すために I 方向について 0 インデックスを用いれば良い。これにより数列は (2, 4, 0, 6, 8); (3, 7); (4, 5) となる。立体領域におけるのと同様の方法で、分割された平面領域も 0 インデックスにより表せる。

もっと複雑な領域もインデックス数列の組合せで表せる。第 5.1.5 図はこの例である。方形筒は 2 つのインデックス数列 (-2, -5); (1, 7); (3, 5) と (2, 5); (1, 7); (-3, -5) とで表される。しかしそれらを組み合わせて (-2, -5); (1, 7); (-3, -5) と表すこともできる。第 5.1.6 図にさらに幾つかの構造とそのインデックス数列での表示を示した。

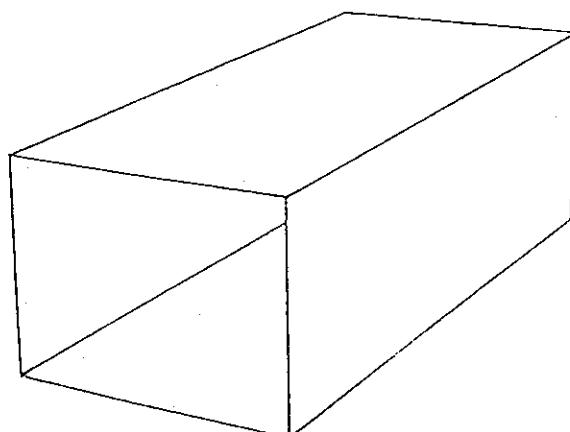
INGRID では、興味のある対象物へ対応付けられる領域をインデックス空間で作るために、インデックス数列を使う。この表示法には、小さな入力データしか必要とせず、20 個より少ないインデックスを使って何千もの形態をインデックス空間で表せるという利点がある。実際にはインデックス空間でのすべての形態がインデックス数列で定義できる訳ではなく、インデックス空間での領域を削除するためのコマンドも付け加えられている。削除コマンドとインデックス数列とによって、ほとんど考えられる限りの領域をインデックス空間で作ることができる。また削除コマンドは、INGRID の格子生成における中心部分として使用されている。



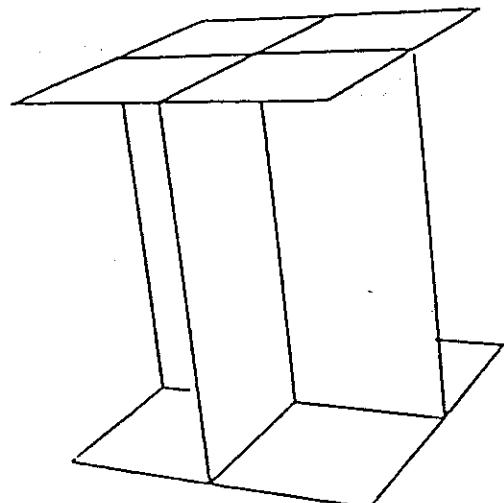
第 5.1.3 図 水平面および立体のインデックス数列



第 5.1.4 図 不連続な立体領域

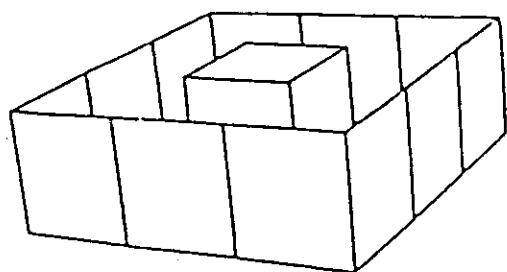


第 5.1.5 図 方形筒



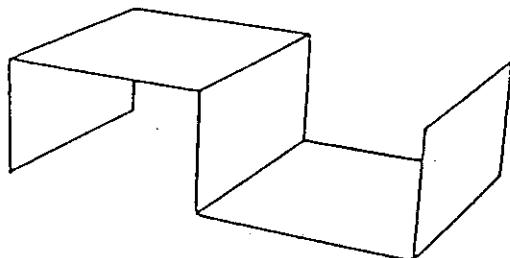
(a)平面構造

$\{(2, -4, 6); (2, -4, 6); (-3, -7)\}$



(b)箱の中の立方体

$\{(-2, 4, 6, -8); (-2, 4, 6, -8), (3, 5)\}$

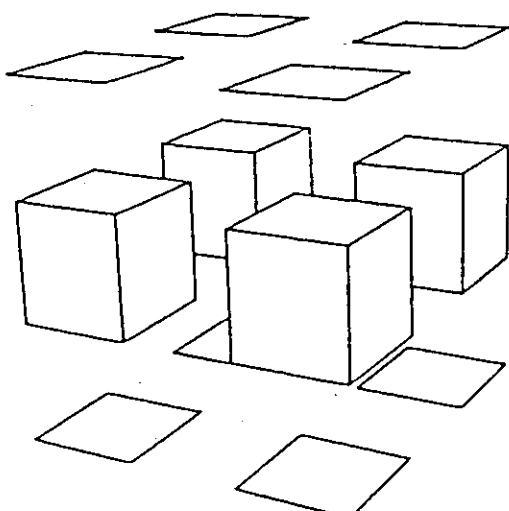


(c)領域削除の例

$\{(-2, -6, -10); (3, 7); (-2, -4)\}$

Deleted Regions:

$\{2, 3, 2, 6, 7, 2\}$ and $\{6, 3, 4, 10, 7, 4\}$



(d)離れている水平面と立体

$\{(2, 4, 0, 6, 8); (2, 4, 0, 6, 8); (-2, 4, 6, -8)\}$

第 5.1.6 図 インデックス数列の例

(6) コマンド

この節では、問題の幾何、材料データ、荷重、境界条件、実行のオプションを記述する cfile に必要とするデータについて述べる。すべてのデータは、自由な型で入力され、空白でその範囲が定められる。注釈は入力中どこにでも、“C”を先頭にしてその後に空白、注釈の続くかたちで挿入できる。注釈が、1カラム目から始まらないときには、“C”の前に空白が無ければならない。いくつかまとまった入力行に注釈をつけるときには、それらの入力行のまえに“{”と“}”とでくくってつける。

cfile でのコマンドの入力順序は、いくつかの制限が適用されるのを除けば自由である。

- (a) 使用するものをその前に定義しておく。例えば、直線の定義はそれが使用されるまえにされなければならない。
- (b) 材料のデータとコードの実行オプションは、コード出力のオプションが選択された後でなければ、入力されない。
- (c) いくつかのコマンドには、その順序によるものがある。例えば、局所的な座標系を別々の軸について回転させるとき。

cfile の形式は以下の通り：

```

題名カード
制御コマンド
パート定義
制御コマンド
パート定義
:
"END"

```

以下に続くコマンドについての記述は、キイワードと変数から成る。入力の記述でのキイワードと変数との区別は、キイワードは大文字で、変数は小文字で表すことによる。それが普通な用箇所では、変数も大文字で表されている。このような場合も変数とキイワードとの区別は、その部分の記述から明かになっている。

どんなコマンドにおいても、はじめから4文字だけに意味がある。その他の部分は、入力ファイルの意味を明かにするために入力されている。しばしばコマンドは、“CY”と“CYLI”的に異なった綴りで表現されるが、これにはいろいろな理由がある。主としてこれは使用者がコマンドの正確な単語を忘れたときの助けとして使用される。INGRIDへの古い入力ファイルでは少し違ったコマンドが使用されているが、それらはまだ使用可能である。MAZE, ORION, TAURUSとの互換性もコマンドに多数の綴り方のあることで維持されている。異なるすべての綴りを列挙することは実際的ではないが、コマンドファイルでマニュアルにない綴り方がされていても、意外に思わないでほしい。

5.1.2 入力データ

1 制御コマンド

制御コマンドは、選択自由で如何なる順序で入力してもよい。以下の制御コマンドが利用できる。

入 力	説 明
COOR nc data	全体的な座標系 nc を入力する。全体的な座標系は、このコマンドが再入力されるまで有効である。座標系のデータは、詳しくはデータ 10 に述べられる。
TEMP t	このコマンドの後に定義されるすべてのパーツは初期温度が t である。これは別の“TEMP”コマンドが入力されるまで有効である。これは個々のパーツ内では無視される。
VELOCITY v _x v _y v _z	剛体並進速度 (v _x , v _y , v _z) をこのコマンドの後で定義されたすべてのパーツに与える。
ROTATION p _x , p _y , p _z , w _x , w _y , w _z	剛体回転速度の初期値をこのコマンドの後で定義されるすべてのパーツに与える。(p _x , p _y , p _z) は回転軸上の任意の点, (w _x , w _y , w _z) はラジアン/秒で表される回転角速度ベクトルである。
MATE m	これ以下のパーツのデフォルト材料番号を m にする。
LMI n	パーツの部分的なコピーの各々について、そのデフォルト材料番号に n を加える。
GMI n	パーツの全体的なコピーの各々について、そのデフォルト材料番号に n を加える。
TMM n t	材料 n の質量の合計は t である。材料の密度は $\rho = t / \text{volume}$ とする。
LEV n	パーツの変換順列番号 n を定義する。これはパーツのグループに行う操作の続き方を定義するものである。
オプション:	
REPE l ₁ l ₂ ...;	パーツを全体的座標系 l ₁ , l ₂ , ... にコピーする。
INCL m	順列 m 中の変換のリストをカレント順列に付け加える。
PROD i j	順列 i と順列 j との積を作る。順列 i に 1 個の変換があり、順列 j に m 個の変換のあるときこのオプションによって、1 * m 個の変換が作られカレント順列に付け加えられる。
COOR n data	n 個の座標変換をカレント順列に加えられる。このコマンドのためのデータは、データ 10 に述べられている。
CYL1	円筒座標変換を行う。
SPHE	球面座標変換を行う。
;	このコマンドの終了。

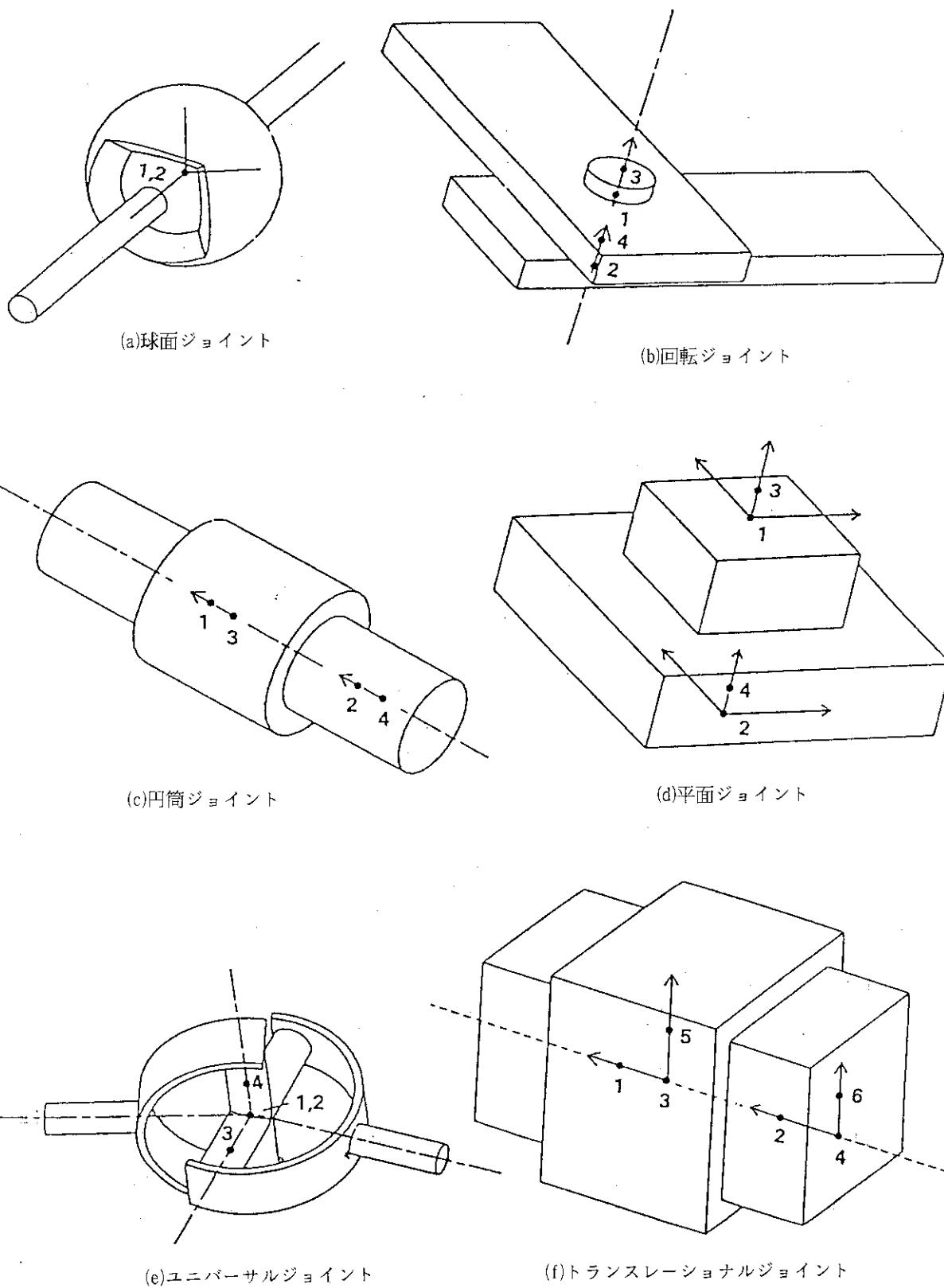
入 力	説 明
PSLV n	パーティ変換順列 n をこの後に続くパーティに実行する。
PPLV	"PPLV" コマンドが与えられるまで有効である。計算機のスタックが、変換順列の実行に使用される。
	"PSLV" で変換順列がスタックの先頭に配置され、"PPLV" でスタックの先頭の順列が削除される。
EXCH i _x i _y i _z	このコマンドにより座標軸の置換が行われ、これは他のすべての座標変換に先だって行われる。i _x , i _y , i _z は生成された x, y, z 座標がどんな操作の結果によるものかを示す記号である。その記号が 1 ならその座標軸が x-軸になり、2 であるなら座標軸が y-軸になり、3. であるなら座標軸が z-軸になる。
LOOF	平面要素が水平面上にない。このコマンドが使用されないと、側面中間部の節点は平面や殻要素の水平面に移動される。
DN3D	DYNA 3 D と互換性のある出力が生成される。
RIGID	剛体についての DYNA 3 D のバージョンを使う。
訳注 DN 3 D コマンドの後で使用。本バージョンでは、意味を持たない。	
NK3D	NIKE 3 D と互換性のある出力が生成される。
SAP4	SAP 4 と互換性のある出力が生成される。
TZ3D	TOPAZ 3 D と互換性のある出力が生成される。必要ならば FACET 入力面も作成できる。
ES3D	TOPAZ 3 D の静電バージョンと互換性のある出力が生成される。
GEM3D	GEM 3 D と互換性のある出力が生成される。
CUBE	Taflove の EM 有限差分法コードに使用できる出力が生成される。
LD n data	直線 n の定義を始める。直線 n がすでに定義されているときは、このコマンドにより古い定義は破壊される。データ 7 でこのコマンドの data について述べる。
SD n data	面 n の定義を始める。面 n がすでに定義されている場合には、これにより古い定義が破壊される。データ 8 でこのコマンドの data について述べる。
VD n data	体積 n の定義を始める。体積 n がすでに定義されている場合には古い定義は破壊される。データ 9 にこのコマンドの data について述べる。
MAT n data	コードによって決められる材料のデータが入力される。このコマンドの詳細についてはデータ 11 を見よ。
DS n	一般的な三次元面の番号 n を入力する。
Type 1:GRID ni nj	論理に合致した三次元の点の集合によって面は定義される。ni * nj 個の点が以下の順番で入力されなければならない。
	x ₁₁ y ₁₁ z ₁₁ ... x _{i1} y _{i1} z _{i1} ... x _{ij} y _{ij} z _{ij}

入 力	説 明
Type 2:CONT ncont オプション: XLE x YLE y ZLE z CHORD scal FNU nu FNL nl XF xf YF yf ZF zf ;	面は各々任意の数の点からなる ncont 個の外形線により定義される。 前縁の X-座標 前縁の Y-座標 前縁の Z-座標 弦長の縮尺率 外形が上面上の nu 個の点と下面上の nl 個の点とで定義される すべての外形線上の点で X=xf である。 すべての外形線上の点で Y=yf である。 すべての外形線上の点で Z=zf である。 オプションを終了し、必要なデータを読み込む。
必要データ: n	外形線上の点の数。(nu=nl=0 の時だけ入力する) x ₁ y ₁ z ₁ … x _n y _n z _n のこと。XF が使用されている場合、いかなる X 座標も入力してはならず、YF と ZF についても同様である。
MKDS	デジタル化表現された三次元面のバイナリデータベースを作成する。
RDDS	デジタル化表現された三次元面のバイナリデータベースを読み込む。現在は、使用できない。
PLANE nplane	nplane 個の平面の定義を入力する。平面に境界条件を当てるのに使用される。nplane は 20 以下。
各平面について以下を繰り返す。	
P _x P _y P _z	平面上任意の点の全体的座標。
q _x q _y q _z	平面に垂直な任意のベクトル。
tolerance	平面からの距離が tolerance 以下のすべての点は定義に含まれる。
type	平面定義のタイプ = "SYMM", 対称平面 = "ASYM", 非対称平面 = "STON", 剛体壁
CSCA scal	すべての節点座標を縮小・拡大する。
XSCA xsca	X-座標を縮小・拡大する。
YSCA ysca	Y-座標を縮小・拡大する。
ZSCA zsca	Z-座標を縮小・拡大する。
XOFF dx	全体的座標での X-オフセット。
YOFF dy	全体的座標での Y-オフセット。
ZOFF dz	全体的座標での Z-オフセット。

入 力	説 明
GEXC $i_x i_y i_z$	このコマンドは座標軸の置き換えを行う。また他のすべての座標変換の後に実行される。 i_x, i_y, i_z は生成された x, y, z 座標がどのような操作の結果によるものかを示す記号である。その記号が 1 ならその座標軸が x -軸になり、2 であるなら座標軸が y -軸になり、3 であるなら座標軸が z -軸になる。
NOPLOT	いかなる作図も行われない。画像処理デバイスは初期化されない。
PARAMETER name1 num1; ...;	PARAMETER コマンドは、実数を name に割り当てる。このような数は入力ファイルを通じて、マクロな %name に代入される。
MBC m n	電磁性材料 m と n の接触面条件を決める。
SI islide	滑り面の制御データを入力する。
オプション	
TIED	束縛された滑り面。
SL	滑りのみ。
SV	空隙のある滑り（デフォルト）。
SINGLE	単一側面のみの滑り面。
PNLT p	ペナルティを p に変更（デフォルトで 0）。
FRIC f	摩擦を f に変更（デフォルトで 0）。
TCRS r	熱的接触抵抗。
DUMMY	ダミーの滑り面。このオプションにより同一の場所にある節点に不連続な自由度を与えられる。
MERGE	滑り面に対して反対側に属し、かつ同一の位置を占める節点を合体させる。
NOMERGE	滑り面に対して反対側に属し、かつ同一の位置を占める節点を合体させない。（デフォルト）
ALINT	ALE とのインターフェース
;	“SI” コマンドの終了。
FLCD n オプション: LP m $t_1 f_1 \dots t_m f_m$ SINE m cps tlen	荷重曲線 n は以下の関数の中の 1 つで定義される。 m 個の点のデータを曲線に加える。 m 個の点のデータから成るサイン波を加える。波の周波数 cps は、サイクル/単位時間で表され、曲線は tlen の間続く。曲線は定義された長さを持つ前の曲線の継続時間の終わりに始まる。
COSINE m cps tlen	m 個の点のデータから成るコサイン波を加える。波の周波数 cps は、サイクル/単位時間で表され、曲線は tlen の間続く。曲線は定義された長さを持つ前の曲線の継続時間の終わりに始まる。
PHASE θ	“COSINE” または “SINE” オプションに位相角 θ を加える。 θ は度で表される。

入 力	説 明
SCALE s OFFSET o TO f_0 TSCA s TOFF o ;	関数の値を s で縮小・拡大する。 関数のオフセットを o とする。 (注: $f' = f \cdot s + o$) 時間 0 での振幅の初期値を f_0 にリセットする。 時間値の倍率。 時間のオフセット。 (注: $t' = t \cdot s + o$) このコマンドの終了。
LCD n m $t_1 f_1 \dots t_m f_m$ ARRI lc	m 対の時間と関数値の点から荷重曲線 n を定義する。 荷重曲線 lc に関する圧力面への到達時間を決める。 到達時間は、荷重が波動により生ずるという考え方から作られる。この波動は、ある三次元面から発し、ある速度をもって進行する。到達時間は、波が発生源から個々の圧力面に至るまでに必要な時間である。
オプション: VELO vel TOFF dt POINT $p_x p_y p_z$ LINE $p_x p_y p_z v_x v_y v_z$ PLANE $p_x p_y p_z v_x v_y v_z$ COSINE	波動は速度 vel で進行する。 到達時間に dt を加える。 発生源は座標 (p_x, p_y, p_z) にある。 発生源は直線 (p_x, p_y, p_z) はその直線上の任意の点で (v_x, v_y, v_z) は直線に平行な任意のベクトル。 発生源は平面。(p_x, p_y, p_z) はその平面上の任意の点で (v_x, v_y, v_z) は平面に垂直な任意のベクトル。 圧力は、圧力をうける部分に垂直な方向と発生源からの波の進行方向とによってなす角の関数として変化する。
CG p CL p DECAY d type ;	圧力の最大値は p である。 圧力は p より小さくなることはない。(このオプションで 0.0 を選択すると, "COSI" が実行される。) 圧力波は発生源からの距離に応じて減衰する。入力圧力への縮小・拡大率が 1.0 に等しくなる距離を d とする。減衰の仕方は type により決められる。 type="R": $1.0 / R$ で減衰 "R 2": $1.0 / R^2$ で減衰 "R 3": $1.0 / R^3$ で減衰 "CONSTANT": 減衰しない このコマンドの終了。
DEPT mat オプション: TIME t POINT $p_x p_y p_z$	材料 mat に対する爆発点を定義する。mat が 0 のときは、すべての材料が爆発する。 爆発点への点火時間。 (p_x, p_y, p_z) 点を爆発させる。

入力	説明
LNPT px py pz qx qy qz n ;	(px, py, pz) から (qx, qy, qz) までの直線を n 等分した爆発点をつくる。 このコマンドの終了。
JD j	ジョイント j に対するジョイント定義を始める。ジョイントの形式は、第 5.1.7 図に図示される。パート内で節点がジョイント定義に割当られる。 全部で 20 以下のこと。
オプション: SJ RJ CJ PJ UJ TJ	球ジョイント 回転ジョイント 円筒ジョイント 平面ジョイント ユニバーサルジョイント トランスレイショナル (TRANSLATIONAL) ジョイント
PNLT p NC icode	ジョイントペナルティ 節点の拘束。一般的の自由度は icode によって決まる: icode = 1:X 2:Y 3:Z 4:X と Y 5:Y と Z 6:Z と X 7:X と Y と Z
REPE n ;	カレントのジョイント定義 n 個のジョイントの全部に繰り返す。 ジョイント定義の終了。



第5.1.7図 ジョイントの定義

入 力	説 明
FSD m a ₀ a ₁ ϕ ₁ …a _n ϕ _n	フーリエ級数 m を定義する。級数の項数は n であり、係数は: $f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(i\theta + \phi_i)$
RFSD m a x n	ランダムに位相をずらせるフーリエ級数 m を作る。 $f(\theta) = a_0 + \sum_{i=2}^n (a_i / iX) \cos(i\theta + \phi(r))$ ここで $\phi(r)$ はランダムな位相のずれで、0 から 2π の値をとる。

2. 標準パート

各パートの定義は、以下のデータからなる：

“START”

インデックス数列（データ 2. A）

パート制御コマンド（データ 2. B）

関数（データ 2. C）

“END”

“START” はパート定義の開始を表し、各パートの最初に必要である。パート制御コマンドは、格子の性質に影響を与える。以下にパートに対するデフォルトの性質を列挙してある。

4 節点平面要素

8 節点立体要素

直行座標系

材料の性質 = 1

平面の厚さ = 0.0

インデックス空間の範囲は、すべての平面の立体の領域とともに、インデックス数列で定義される。関数により、インデックス数列で定義された格子を操作でき、“END” によりパート定義の終わりを示す。

以下は以前に定義された重要な定義への付け足しである。

インデックス空間 インデックス数列で定義されたすべてのインデックスの集合。例えば、数列 (2, 3, -5, 10), (4, 5), (2, 6) によってインデックス空間 $2 < |I| < 10$, $4 < |J| < 5$, $2 < |K| < 6$ が定義される。

低減インデックス空間 低減インデックス空間は、インデックス数列内の位置を表す。低減インデックス空間での点 I, J, K は、インデックス数列では I-数列で I 番目に、J-数列で J 番目に、K-数列で K 番目に定義される点に対応する。数列 (2, 3, -5, 10), (4, 5), (2, 6) について、低減インデックス空間とインデックス空間の関係を第 5.1.3 表に示してある。

別に記述が無ければ、すべての点と領域は低減インデックス空間で定義される。低減インデックス空間はインデックス数列の実際の値とは無関係なので、格子は洗練され、インデックス数列をいれ替えるだけに簡略化される。

(注) START により生成されるパートが、完全に線状になっている場合に、ビーム要素が自動的に生成されることはありません。このようなパートを定義した場合は、動作が保証されませんので注意して下さい。線分上にビーム要素を生成する場合は BEAM パートを使用する必要があります。

第 5.1.3 表 インデックス数列 (2, 3, -5, 10), (4, 5), (2, 6)
についての低減インデックス空間とインデックス空間の比較。

Reduced Index Space	Index Space
(1, 1, 1)	2, 4, 2
(1, 1, 2)	2, 4, 6
(1, 2, 1)	2, 5, 2
(2, 2, 2)	3, 5, 6
(3, 1, 2)	5, 4, 6
(4, 1, 1)	10, 4, 2

2. A インデックス数列

各パートはインデックス数列を持たねばならない。以下の入力が必要である。

入 力	説 明
i1 i2…ii;	I-方向の数列
j1 j2…jj;	J-方向の数列
k1 k2…kk;	K-方向の数列
x1 x2…xi	X-座標の初期値
y1 y2…yj	Y-座標の初期値
z1 z2…zk	Z-座標の初期値

2. B パーツ制御コマンド

以下のパーツ制御コマンドが使用可能。

入 力	説 明
CYL1	節点は円筒座標系から直行座標系に変換される。 この変換の式は: $Y = R \cos\theta$ $Z = R \sin\theta$
SPHE	節点は球面座標系から直行座標系に変換される。 この変換の式は: $X = R \cos\theta \sin\phi$ $Y = R \sin\theta \sin\phi$ $Z = R \cos\phi$
MATE m	パーツの材料番号は m である。
THIC t	このパーツでの平面の厚さは t である。
REPE 11 12…ln;	コピーコマンド。このコマンドにより、局所的座標系 11 から ln の各々について、パーツのコピーを作る。座標系の数字が 0 のときはパーツ何の変換もされずにコピーされる。
QUAD	二次要素が生成される。8 節点平面か 20 節点立体である。現在は、ダミーである。
ROTATION px py pz wx wy wz	パーツに剛体回転速度の初期値を与える。(px, py, pz) は回転軸上の任意の点、(wx, wy, wz) はラジアン/秒で表された回転ベクトルである。
VELOCITY vx vy vz	このパーツのすべての節点に剛体速度の初期値を与える。(vx, vy, vz) は全体的座標系での速度ベクトルである。
TEMP t	このパーツの温度の初期値を t とする。
COOR nc data	局所的座標系 nc を入力する。座標系の data はデータ 10 で詳しく述べられる
MTV m n	定義された体積 m に含まれるすべての要素に材料番地 n が与えられる。

2. C 関 数

すべての関数は以下の形式をもつ:

キイワードーインデックスの記述ーパラメタ

インデックスの記述には、〈点〉、〈領域〉、〈インデックス数列〉の3つの書き方がある。すべてのインデックスの記述法は、低減インデックス空間で使用される。入力は以下のように定義される:

〈点〉

ijk 関数は点 (i, j, k) に位置する。任意のインデックスが 0 と入力されると、インデックスはとれる限りの最小値から最大値まで変化する。

〈領域〉

im jm km ix jx kx 関数は領域 (im, jm, km, ix, jx, kx) に位置する。im か jm か km かが 0 と入力されると、0 インデックスは可能な最小値を与える。ix か jx か kx かが 0 と入力されると、0 インデックスには可能な最大値が与えられる。

〈インデックス数列〉

i1 i2 i3 …; j1 j2 j3 …; k1 k2 k3 …;

これはインデックス数列の表示法に則って、多数の領域を定義するとき使用される。ある方向のインデックスが入力されないと、関数はその方向についてインデックス空間中に適用される。

インデックスの記述に〈領域〉または〈インデックス数列〉を使用した関数はインデックス空間の他のパートに繰り返したり、移植したりできる。このコマンドの一般的な形式は以下の通り:

キイワードー〈領域〉または〈インデックス数列〉パラメター 1 つめのオフセットーパラメター 2 つめのオフセットーパラメタ…

オフセット情報は以下の通り:

“+”か“+ 0” “+”または“+ 0”がオフセットの最初に付けられる。“+”が付けられたとき、オフセットはその前のオフセットで定義された領域からとられる。“+ 0”が付けられたときは、オフセットは〈領域〉または〈インデックス数列〉で定義された領域に対してとられる。

以下のコマンドのうちただ 1 つが、“+”または“+ 0”に続けて入力されなければならぬ。

I di	I インデックスに di 加える。
J dj	J インデックスに dj を加える。
K dk	K インデックスに dk 加える。
IJ di dj	I, J インデックスに di, dj を加える。
JK dj dk	J, K インデックスに dj, dk を加える。
KI dk di	K, I インデックスに dk, di を加える。
IJK di dj dk	I, J, K インデックスに di, dj, dk を加える。
SIJ	I インデックスと J インデックスとを置き換える。
SJK	J インデックスと K インデックスとを置き換える。
SKI	K インデックスと I インデックスとを置き換える。

標準パートは関数に対して以下のキーワードを持つ:

一般的コマンドと立体機構のコマンド

入 力	説 明
PA, PB, MA, MB	点関数
I, J, K	座標は I, J または K インデックスの関数。
A, BE	弧
AC, ACE	円筒面
B	境界条件カード
BG	梁の生成
CPL	直線の中点
D, DI	削除
EPB	要素プリントブロック
FC, FCI	力
FD, FDI	決められた変位
FV, FVI	速度境界条件
INT	面の交差
JT	ジョイントコマンド
MS	多くの部分からなる面の定義
MT, MTI	材料の決定
N+, N-	殻に垂直外向きの方向
NPB	節点プリントブロック
OR	局所的軸の方向
PR, PRI	圧力荷重
RES	要素の辺の長さの比
RR	回転領域
SF, SFI	面の定義
SI, SI+, SI-, SII, SII+, SII-	滑り接触面の決義
SW	剛体壁上の節点
TH, THI	厚さ
TN, TNI	厚みの番号
VE	見える辺

熱による荷重と境界条件

入力	説明
CV, CVI	対流の境界条件
FL, FLI	熱流束の境界条件
FT, FTI	温度の境界条件
RB, RBI	輻射の境界条件
RE, RE+, RE-, REI, REI+, REI-	輻射囲い
TM, TMI	温度の初期条件

静電荷重と境界条件

入力	説明
EFL	電束
V	電位

電磁荷重と境界条件

入力	説明
FBC, FBCI	電磁場の境界条件
RBC, RBCI	放射の境界条件
SPC, SPCI	決められた電流
SPF, SPF1	決められた電磁場

点関数

入 力	説 明
"MA", "MB", "PA"または"PB"	点関数。これらのコマンドは、節点の集合の1つ、2つまたは3つの座標値を変化させるのに使用される。
〈点〉	"MA" または "PA" だけに。
〈領域〉	"MB" または "PB" だけに。
n	どの座標を変化させたかの記号 = "X", X 座標が変化 = "Y", Y 座標 = "Z", Z 座標 = "XY", X と Y 座標 = "XZ", X と Z 座標 = "YZ", Y と Z 座標 = "XYZ", x と y と z 座標
dx dy dz	新しい座標。記号 n で要求される座標だけ入力されればよい。"MA" と "MB" については、新しい座標は古い座標に加えられる。"PA" と "PB" については、古い座標は新しい座標で置き換えられる。

座標変化関数

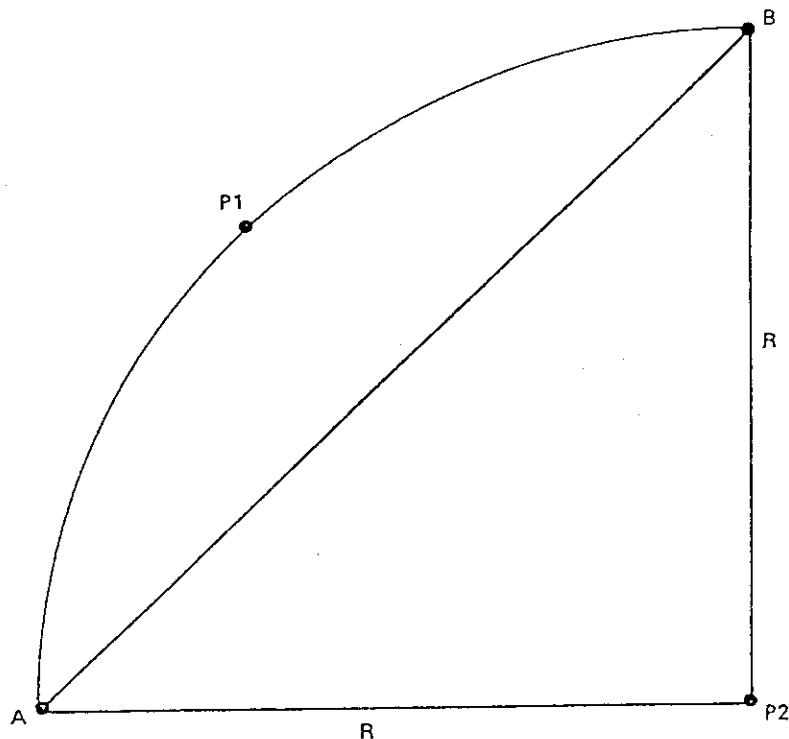
入 力	説 明
dir1〈点〉	関数の独立変数を示す記号 = "I"; I - インデックスの関数として座標が変化する。 = "J"; J - インデックスの関数として座標が変化する。 = "K"; K - インデックスの関数として座標が変化する。
dir2	どの座標を変化させるかを示す記号 = "X": X - 座標が変化 = "Y": Y - 座標が変化 = "Z": Z - 座標が変化
c1 c2 c3...	インデックス dir1 についての座標の新しい数列。

弧のコマンド

"AE" または "ACE" が使用されると、領域の中間の頂点は、弧にそって等間隔に並べられる。さもなければ、領域の中間の頂点は最初の点から放射状に移動される。

タイプ1:	曲線境界	
入力	説明	
"A"<領域>		弧のキーワード。領域は対応インデックス空間の直線である。
ityp		曲線のタイプを示す記号 = 1: 点 P1 を通る放物線 (第 5.1.8 図を見よ) = 2: 点 P1 を通る円弧 = 3: 点 P2 を中心とする円弧
x		点 P1 または P2 の X-座標
y		点 P1 または P2 の Y-座標
z		点 P1 または P2 の Z-座標
r		半径

中心を P2 とする円弧の半径が 0 ではないとき、節点 A と B (第 5.1.8 図参照) は P2 から放射状に、P2 との距離が半径に等しくなるまで移動する。弧はそれらの最終位置にある節点を通る。



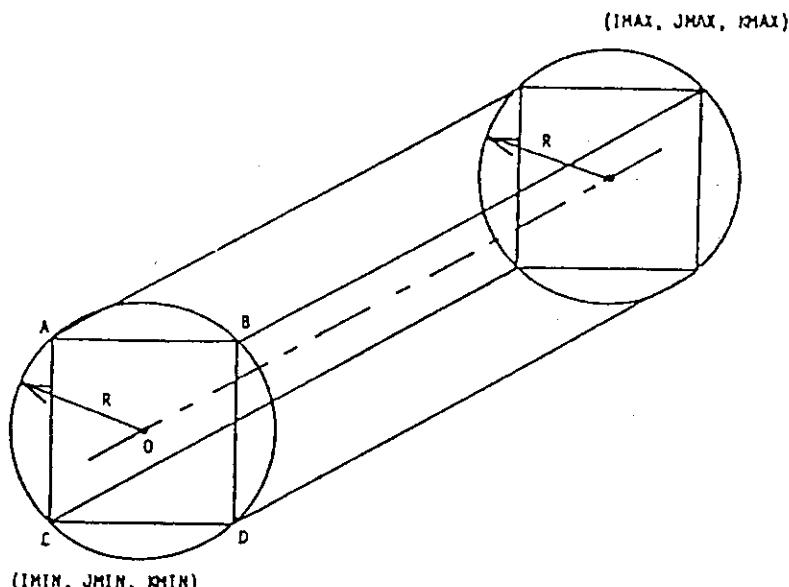
第 5.1.8 図 曲線境界

タイプ2:

円筒領域

入力	説明
"A", "AE"<領域>	弧のキイワード。領域は低減インデックス空間の任意の長さをもつ平面または立体。
idir	インデックス空間での回転軸を示す記号。 ="I": I-軸が回転軸 ="J": J-軸が回転軸 ="K": K-軸が回転軸
r	半径

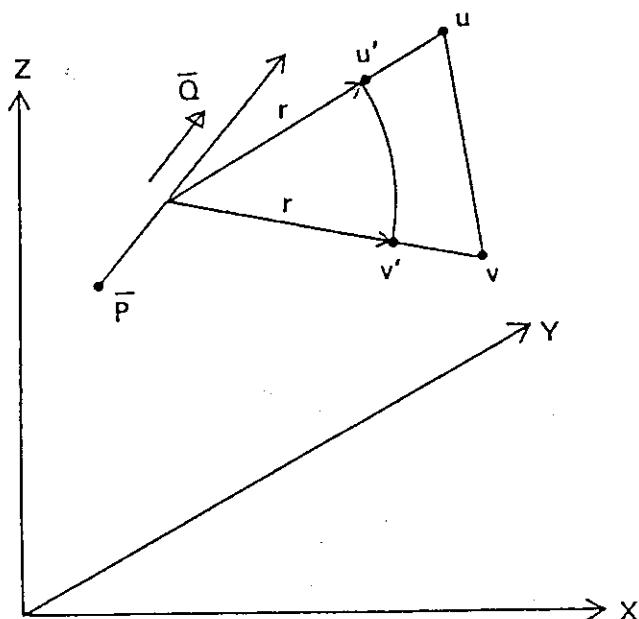
第5.1.9図のABCDのように回転軸に垂直な任意の平面について、回転軸上の点Oは平面の中心に位置する。円筒の半径が0でないとき、点A, B, C, Dは点Oから放射状に点Oからの距離がRになるまで移動する。曲線境界は中心をOとしたAB, BD, AC, CD部分から形成される。これは低減インデックス空間で回転軸に垂直な各平面について行われる。



第5.1.9図 円筒領域

円筒面コマンド

入力	説明
"AC", "ACE"<領域> idir	<領域>はインデックス空間での面である。 インデックス空間での回転軸を示す記号。 = "I": I-軸が回転軸 = "J": J-軸が回転軸 = "K": K-軸が回転軸
px py pz r qx qy qz	円筒の中心軸上の任意の点（第 5.1.10 図参照） 半径 円筒の中心軸に平行な任意ベクトル



第 5.1.10 図 円筒面

境界条件

入力	説明
“B”<領域> n	<p>境界条件のキイワード</p> <p>n は 6 行の 2 進数で、制限された自由度を示す。桁は左から右へ数えられ、以下のような自由度を決める。</p> <p>第1桁: X-方向変位 = 0 自由 = 拘束</p> <p>第2桁: Y-方向変位</p> <p>第3桁: Z-方向変位</p> <p>第4桁: X-軸回転</p> <p>第5桁: Y-軸回転</p> <p>第6桁: Z-軸回転</p> <p>例 0 1 1 1 0 0 X Y Z R R R X Y Z</p>

梁の生成

入力	説明
BG	梁の生成コマンド
オプション:	
MT m	梁の材料番号は m
SC n	梁は n 分割される。
NGEN n	点1から点2まで n 分割の梁を生成する。
N1<点>	点1は <点> に位置する。
P1 px py pz	点1は (px, py, pz) に位置する。
N2<点>	点2は <点> に位置する。
P2 px py pz	点2は (px, py, pz) に位置する。
B1 n	点1に対して境界条件を与える。 n は 6 桁の 2 進数で、制限された自由度を示す。桁は左から右へ数えられ、以下のような自由度を決める。 = 0 自由 = 1 拘束 第1桁: X-方向変位 第2桁: Y-方向変位 第3桁: Z-方向変位 第4桁: X-軸回転 第5桁: Y-軸回転 第6桁: Z-軸回転

(注) 現在、BG コマンドの使用には以下の制約があります。一般的なビーム要素の生成には、BEAM パーツを使用すべきです。

- BG コマンドで生成されるビーム要素は、パーツの特定の辺上に位置します。生成されるビーム要素の数は、点1と点2の分割数により自動的に決定されます。
- シェル要素もしくはソリッド要素の一辺に沿ってビーム要素を張りむけるたみに使用することができます。
 - 以下のオプションは、無視されます。
 - NGEN, P1, P2, V2, B1, B2。
 - 境界条件は、B コマンドで指定できます。

入 力	説 明
V2 vx vy vz	点2の点1から隔たりはベクトル(vx, vy, vz)で表される。
B2 n	点2に対して境界条件を与える。 nは6桁の2進数で、制限された自由度を示す。桁は左から右へ数えられ、以下のような自由度を決める。 = 0自由 = 1拘束 第1桁: X-方向変位 第2桁: Y-方向変位 第3桁: Z-方向変位 第4桁: X-軸回転 第5桁: Y-軸回転 第6桁: Z-軸回転
NO<点>	局所的2-軸の方向を定義する点は、<点>に位置する。
PO px py pz	局所的2-軸の方向を定義する点は、(px, py, pz)に位置する。
VO vx vy vz	局所的2-軸はベクトル(px, py, pz)で定義される。
CO px py pz	点が円筒座標系で表されることを除けば“PO”と同様。
SO px py pz	点が球面座標系で表されることを除けば“PO”と同様。
;	このコマンドの終了。

直線の中点

入 力	説 明
“CPL”<領域>	<領域>が直線なら、このコマンドによって要素は始点と終点について二等分される。<領域>が面もしくは立体であるとき、このコマンドによって、方向記号で示された方向の直線に適用される。
dir	方向記号(<領域>が直線のとき入力してはならない)。 = “I”: I-インデックスについて二等分 = “J”: J-インデックスについて二等分 = “K”: K-インデックスについて二等分

領域削除

入 力	説 明
“D”<領域>または	領域削除のキーワード
“DI”<インデックス数列>	

要素プリントブロック

入 力	説 明
EPB<領域> オプション PO i j k	要素<点>からのオフセットを(i, j, k)として使用する。
RO im jm km ix iy iz ;	要素のブロックの<点>からのオフセットを使用する。 このコマンドの終了。

力, 変位, 速度

入 力	説 明
"FC", "FD", または "FV" <領域>	"FC" = 力 "FD" = 変位の拘束 "FV" = 速度境界条件
lc	荷重状態または荷重曲線番号
amp	荷重曲線にたいする倍率
fx fy fz	力または変位または速度を定義するベクトル

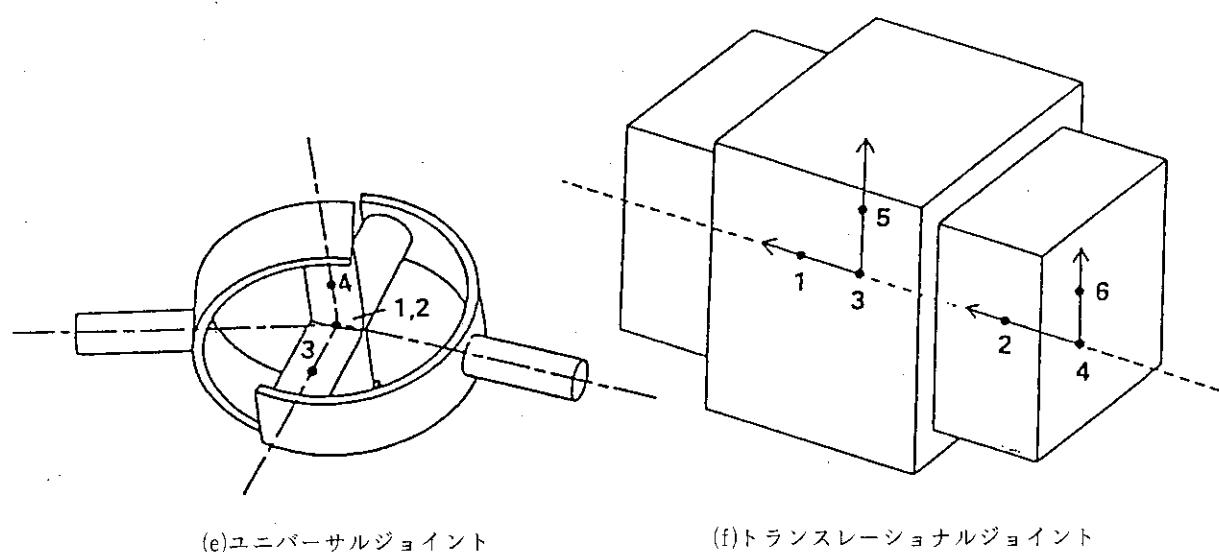
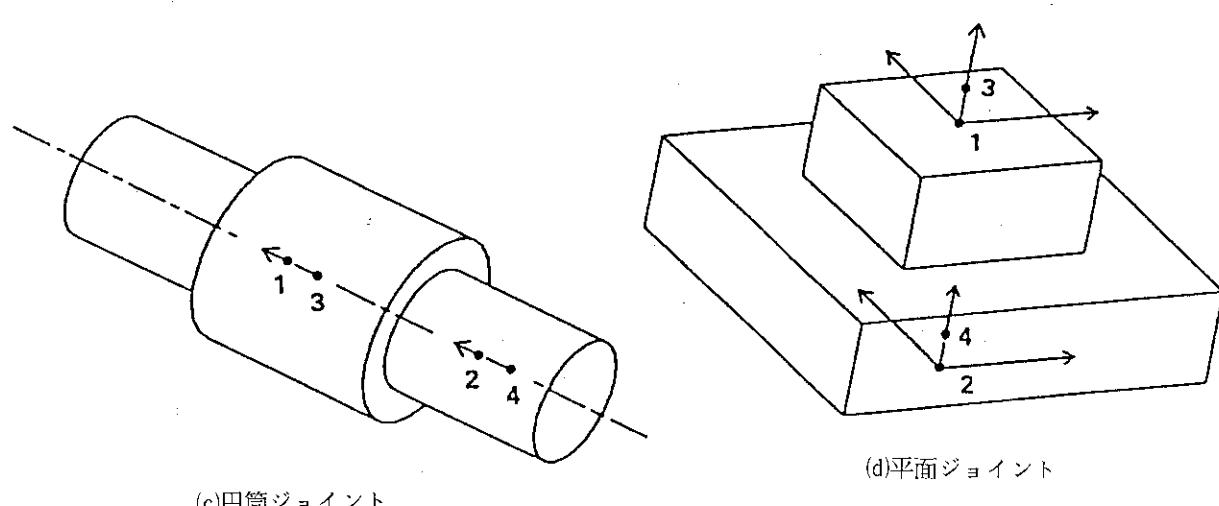
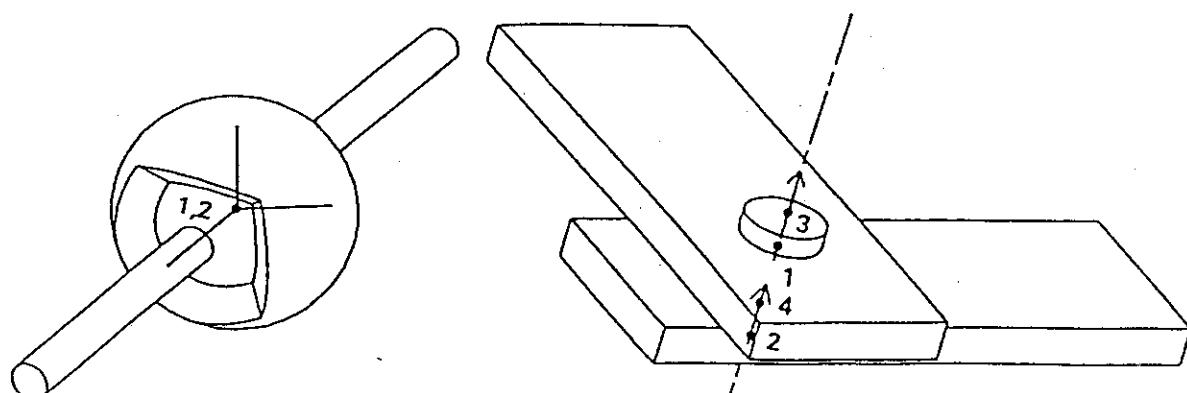
交差した面

2つの曲線の交点上の最も近い点へ節点を移動させる。	
入 力	説 明
"INT"<領域>	
s1	第一面の番号
s2	第二面の番号

2つの面は制御部分で, "SD" コマンドを使って定義される。2つの "SF" コマンドの結果として, インデックス空間での交差面が生じたとき, これらのコマンドが自動的に生成される。

ジョイントコマンド

入 力	説 明
JT	ジョイントコマンド
jn	ジョイント定義番号
I	局所的節点番号 (第 5.1.11 図参照)
オプション:	
N<点>	局所的ジョイント節点 1 は、インデックス空間の〈点〉で定義される。
P px py pz m	局所的ジョイント節点 1 は、局所的座標系の点 (px, py, pz) にある。m は節点に取り付けられた剛体番号である。
INC i	パーツのコピーの各々に対して、jn に i を加える。(デフォルト = 1)
B n	局所的ジョイント節点には境界での拘束 n がある。n は 6 衍の 2 進数で、拘束されることになる自由度を決める。桁は左から右へ数えられ、以下のように自由度を決める。 第1桁: X-方向変位 = 0 自由 = 1 束縛 第2桁: Y-方向変位 第3桁: Z-方向変位 第4桁: X-軸回転 第5桁: Y-軸回転 第6桁: Z-軸回転 ジョイントコマンドの終了。
;	



第5.1.11図 ジョイントの定義

多くの部分からなる面 (multiple surface) の定義

このコマンドでは面の方程式を適用するため、平行なインデックス平面を同一の平面と見なす。このコマンドの関数は“SF”コマンドに類似している。しかしこのコマンドによって大抵の場合、入力に際しての著しい労力の節約がもたらされる。

入 力	説 明
MS <領域> idir	多数の面の方程式を<領域>に適用する。 <領域>はインデックス空間で idir により決められる軸に垂直で平行ないくつかの平面に分割される。 = “I”: I-軸 = “J”: J-軸 = “K”: K-軸 次に決められた軸に垂直な<領域>の各インデックス平面に対して1つの面の方程式が入力されなければならない。以下のオプションのどれかが使用できるであろう。
オプション1:	面の方程式を列挙する。
入 力	説 明
sf1	第一の面の方程式へのデータ
sf2	第二の面の方程式へのデータ
オプション2:	座標軸に垂直な平行平面
入 力	説 明
PPX, PPY, または PPZ u1 u2 u3...	それぞれ x, y, または z 軸に垂直な平行平面。 特定の軸と平面との交点。各平面で1つの値は必ず入力されなければならない。
オプション3:	同心球
入 力	説 明
CNSP px py pz r1 r2 r3...	球の中心 半径
オプション4:	同心円筒
入 力	説 明
CNCY px py pz vx vy vz r1 r2 r3...	円筒軸上の任意の点 軸に平行な任意のベクトル 半径

オプション5:		オフセットを持つ平面
入力	説明	明
PON, POX, POY, POZ	垂直方向もしくはx, y, またはz方向それぞれの方向についての平面どうしのオフセット。	
px py pz	平面上の任意の点。	
qx qy qz	平面に垂直な任意のベクトル。	
o1 o2 o3...	指定された方向のオフセット。	

材料の指定

入力	説明	明
"MT" <領域> または	材料コマンドを示す。	
"MTI" <インデックス数列>		
mat	材料番号	

節点プリントブロック

入力	説明	明
NPB <点>		
オプション		
PO i j k	<点>からみた節点のオフセットとして(i, j, k)を使う。	
RO im jm km ix jx kx	<点>からみた節点集合のオフセットを使う。	
;	このコマンドの終了。	

シェルの方向コマンド

タイプ1		
入力	説明	明
"N+" <領域>	垂直方向コマンド	
px py pz	局所的座標系で要素の正の法線方向の点。	
タイプ2		
入力	説明	明
"N-" <領域>	垂直方向コマンド	
px py pz	局所的座標系で要素の正の法線と反対方向の点。	

入 力	説 明
OR <領域> I1	局所的座標系の方向。 局所的1座標。 = "I": I-方向 = "J": J-方向 = "K": K-方向
I2	局所的2座標。 = "I": I-方向 = "J": J-方向 = "K": K-方向

圧力コマンド

入 力	説 明
"PR" <領域> または "PRI" <インデックス数列>	圧力荷重コマンドを示す。
Ic	荷重状態または荷重曲線番号
p	圧力の大きさ
ax ay az	(ax, ay, az) は局所的座標系の点で、そこに圧力が作用する。(ax, ay, az) を決めることで、INGRID にどの方向に圧力が作用するか知らせ、INGRID により圧力の作用する節点に適当に番号付けされる。

要素の辺の長さの比

入 力	説 明
RES <領域> idir	<領域> 内で問題となっている辺の方向 = "I": I-方向 = "J": J-方向 = "K": K-方向
r	ある要素の辺とその隣の要素の辺の長さの比の I または J または K インデックスについての増分が r である。

回転領域

入 力	説 明
RR <領域> data	回転領域 このコマンドに対するデータはデータ 10. に記述されている。

面の定義

このコマンドによって三次元面に対する方程式の正確な記述ができる。コマンドにより節点が初期の位置から面上の最も接近し合った点に移される。インデックス空間での面の交差が、見つけられ計算される。交差は非常にまれなので、ユーザーは初期座標と点閾数の両方または一方を使用する最終的な形態に近い初期座標を定義しなければならない。このことは INGRIDにおいて正確な幾何形状に収束させるためにしばしば必要とされる。

ペーツが円筒座標系で生成されても、なお面は直行座標系にあると仮定される。このことにより初めは軸対称であったペーツ上に非軸対称の面が生成され得る。

入 力	説 明
“SF” <領域> または “SFI” <インデックス数列> ityp	面コマンド 面の方程式のタイプ = “SD”. ityp = “SD” なら面はその制御部分で “SD” コマンドが使用されるように定義される。このオプションを完全にするには、面番号が入力されねばならない。 ≠ “SD”. ityp はデータ 8. のオプションに参照される。のこる入力のためにデータ 8. を見よ。

滑り接触面（スライディングインターフェース）コマンド

タイプ1		
入力	説明	
“SI”〈領域〉または “SII”〈インデックス数列〉 islid mslid	滑り接触面コマンドを示す。 滑り接触面番号 主/従記号 = “M”: 主面 = “S”: 従面	
タイプ2		
入力	説明	
“SI+”〈領域〉または “SII+”〈インデックス数列〉 islid mslid px py pz	滑り接触面コマンドを示す。 滑り接触面番号 主/従記号 = “M”: 主面 = “S”: 従面 局所的座標系で滑り接触面に面した点。	
タイプ3		
入力	説明	
“SI”〈領域〉または “SII-”〈インデックス数列〉 islid mslid px py pz	滑り接触面コマンドを示す。 滑り接触面番号 主/従記号 = “M”: 主面 = “S”: 従面 局所的座標系で滑り接触面の反対側に面した点。	

剛体壁上の節点

入力	説明
“SW”〈領域〉 d	剛体壁コマンド 剛体壁面番号

厚さの記述

入力	説明
“TH”〈領域〉または “THI”〈インデックス数列〉 thick	厚さコマンドを記述する。 領域内の平面の厚さ

厚み番号の記述

入 力	説 明
"TN" <領域> または "TNI" <インデックス数列>	厚み番号コマンドを記述する。
n	領域内の平面の厚み番号

辺の可視性の指定

入 力	説 明
VE <領域>	外形線と見えない辺の作図に対してそれが可視であるかどうかを指定する。<領域>は低減インデックス空間での線分でなければならない。

以下のコマンドは熱による荷重と境界条件の定義のためのものである。

対流の境界条件

入 力	説 明
CV <領域> または CVI <インデックス数列>	対流の境界条件
lc 1	熱伝導係数 h に対する荷重曲線番号
h	h に対する曲線の乗数
lc 2	T ∞ に対する荷重曲線番号
T ∞	T ∞ に対する曲線の乗数
a	自由対流指数

熱流束の境界条件

入 力	説 明
FL <領域> または FLI <インデックス数列>	熱流束の境界条件
lc	荷重曲線番号
scal	荷重曲線に対する倍率

温度境界条件

入 力	説 明
"FT" <領域>	温度境界条件
lc	荷重曲線番号
t	温度

輻射の境界条件

入 力	説 明
RB <領域> または RBI <インデックス数列>	輻射の境界条件
Ic 1	f に対する荷重曲線番号
f	f に対する曲線の乗数
l	T ∞ に対する荷重曲線番号
T ∞	T ∞ に対する曲線の乗数

輻射囲い

タイプ 1	
入 力	説 明
RE+ <領域> または RE- <領域>	輻射囲い
Ic 1	放射に対する曲線番号
T	部分の温度 (Ic 1 = 0 のときのみ入力する)
flag	遮断面の記号 = "YES": 面は遮断面計算に含まれる。 = "NO": 遮断面計算は行われない。
px py pz	(px, py, pz) は局所的座標系で、それに向かって輻射の生じる点。

タイプ 2	
入 力	説 明
RE <領域> または REI <領域>	輻射囲い
Ic 1	放射に対する曲線番号
T	部分の温度 (Ic 1 = 0 のときのみ入力する)
flag	遮断面の記号 = "YES": 面は遮断面計算に含まれる。 = "NO": 遮断面計算は行われない。
px py pz	(px, py, pz) は局所的座標系で、それに向かって輻射の生じる点。

(注) このオプションが使用されると、面は隣接した熱伝導性要素から外向きに方向付けられる。このコマンドで定義された輻射部分に熱伝導性要素が隣接していないとエラーが生じる。これは外向きの法線が決定できないからである。

温度の初期条件

入 力	説 明
"TM" <領域> t	温度の初期条件 温度

以下コマンドは静電荷重と境界条件を定義するためのものである。

電 束

入 力	説 明
EFL <領域> または EFLI <インデックス数列> f	電束の値

電 位

入 力	説 明
V <領域> または VI <インデックス数列> v	電位

以下のコマンドは電磁荷重と境界条件を定義するためのものである。

電磁場境界条件

入 力	説 明
FBC <領域> または FBCI <インデックス数列> type	= “METAL”: 電導体 = “HMETAL”: 磁性体 = “ZERO”: 電磁場の存在しない場
“00”	電場と磁場を 0 にする—場全体の記述に使う
“01”	磁場の垂直成分と電場を 0 にする
“02”	磁場の平行成分と電場を 0 にする
“03”	電場を 0 にする
“04”	電場の垂直成分と磁場を 0 にする
“05”	電場の垂直成分と磁場の垂直成分を 0 にする
“06”	電場の垂直成分と磁場の平行成分を 0 にする = 磁性体
“07”	電場の垂直成分を 0 にする
“10”	電場の平行成分と磁場を 0 にする
“11”	電場の平行成分と磁場の垂直成分を 0 にする = 電導体
“12”	電場の平行成分と磁場の平行成分を 0 にする
“13”	電場の平行成分を 0 にする = 電導体
“14”	磁場を 0 にする
“15”	磁場の垂直成分を 0 にする
“16”	磁場の平行成分を 0 にする = 磁性体
“17”	何も 0 にしない

放射の境界条件

入 力	説 明
RBC <領域> または RBCI <インデックス数列>	放射の境界条件

決められた電流

入 力	説 明
SPC <領域> または SPCI <インデックス数列> lc	決められた電流 関数番号

決められた電磁場

入 力	説 明
SPF <領域> または SPFI <インデックス数列>	決められた電磁場
lc	関数番号

4.3 梁パート

INGRID での梁の生成は特別な部分で行われる。その部分のデータは以下の通りである。:

“BEAM”

局所的節点の入力

“0”

要素生成のコマンド

“0”

オプションのコマンド

“END”

局所的節点の入力

この部分で重要な頂点が列挙される。この部分のすべての点は全体的座標系での節点番号に割当られ、関係する要素やなくても出力される。節点は連続的に入力され、1から始まる局所的節点番号に割当られる。この番号は後で要素の生成に使用される。

入 力	説 明
ctype	節点座標に行う座標変換 = “RT”, 直行座標 (変換なし) = “CY”, 円筒座標 = “SP”, 球面座標
n	n は 6 衔の 2 進数で、制限される自由度を記述する。 桁は左から右へ数え、それぞれ以下の自由度を決める。 第1桁: X-方向変位 = 0 自由 = 1 拘束 第2桁: Y-方向変位 第3桁: Z-方向変位 第4桁: X-軸回転 第5桁: Y-軸回転 第6桁: Z-軸回転
xi yi zi	節点座標

要素生成コマンド

入 力	説 明
is	梁部分の 1 番目の局所的節点番号
if	梁部分の最後の局所的節点番号
nel	is から if までに生成される要素の番号
mat	梁の材料番号
isect	梁の分割特性番号
normal	梁の方向を定義するための 3 つめの局所的節点。 (注) この節点は, "REPEAT" コマンドで移動でき, 全体的座標では必要ない。

オプション関数

入 力	説 明
REPE 11 12 … ln;	コピー命令。このコマンドにより全体的座標系 1 から ln の各々についてパートのコピーが作られる。座標系番号が 0 なら、変換なしにパートが複製される。
ROTATION px py pz wx wy wz	パートに剛体回転の初期値を与える。(px, py, pz) は回転軸上の任意の点で, (wx, wy, wz) はラディアン毎秒であらわされた回転角速度ベクトルである。
VELOCITY vx vy vz	剛体並進速度ベクトルの初期値をこのパートのすべての節点に与える。(vx, vy, vz) は全体的座標での速度ベクトルである。
LREP 11 12 … ln;	コピー命令。このコマンドにより局所的座標系 1 から ln の各々についてパートのコピーが作られる。座標系番号が 0 なら、変換なしにパートが複製される。
TEMP t	このパートの温度の初期値は t である。
CYLI	節点は円筒座標から直行座標へ変換される。この変換の式は: $X = R\cos\theta$ $Y = R\sin\theta$
SPHE	節点は球面座標から直行座標へ変換される。この変換の式は: $X = R\cos\theta \sin\phi$ $Y = R\sin\theta \sin\phi$ $Z = R\cos\phi$
COOR nc data	局所的座標系 nc を入力する。座標系データの詳細はデータ 10 で記述される。

4. 古いデータパート

このパートによりユーザーは、他の格子生成ソフトで作られたモデルを入力したり扱ったりできる。また既にある有限要素法のモデルを受け入れ、再利用することもできる。このパートへのデータは以下の通り：

“OLD”
コマンド
“END”

入 力	説 明
NODES n オプション： FORM f	n 個の節点を入力する。 節点は書式 f で読み込まれる。f は最大 80 文字までの長さの文字列で、正しい FORTRAN の書式設定に従う。すべての項目は浮動小数点法で読み込まれなければならない。たった 1 つの節点だけが、1 つのカードに記述され得る。このオプションが使用されないと、節点のデータは書式自由で入力される。
NUMBER	節点番号が読み込まれる。このオプションを使わないときは、節点番号は入力順に付けられる。
K	節点増加 K が入力される。
BCND	NIKE 3 D の変位境界条件コードが入力される。
BCNR	NIKE 3 D の回転境界条件コードが入力される。
BCSP	SAP 境界条件コードが入力される。
X	X-座標
Y	Y-座標
Z	Z-座標
T	温度
DUMMY	この項目は読み込むが無視する。(数字でなければならない)
;	オプションを終了し、節点を読み込む。
BEAMS n オプション： FORM f	n 個の梁要素が入力される。 梁要素は書式 f で読み込まれる。f は最大 80 文字までの長さの文字列で、正しい FORTRAN の書式設定に従う。すべての項目は浮動小数点法で読み込まれなければならない。たった 1 つの節点だけが、1 つのカードに記述され得る。このオプションが使用されないと、節点のデータは書式自由で入力される。
NUMBER	要素番号が読み込まれる。このオプションを使わないときは、要素番号は入力順に付けられる。
K	要素増加 K が入力される。
MATERIAL	材料番号が入力される。

入 力	説 明
SECTION NODES	分割特性番号が入力される。 第3の節点が入力される(第1の節点、第2の節点、局所的2軸を定義する節点)
(注) BEANについては、NODESオプションは、使用できない。	
N 1 N 2 N 3 DUMMY ;	第1の節点 第2の節点 局所的2軸を定義する節点 項目は読み込まれるが無視される。 オプションの終了と要素データの読み込み。
SHELLS n オプション: FORM f	n個の殻要素が入力される。 梁要素は書式fで読み込まれる。fは最大80文字までの長さの文字列で、正しいFORTRANの書式設定に従う。すべての項目は浮動小数点法で読み込まれなければならない。たった1つの節点だけが、1つのカードに記述され得る。このオプションが使用されないと、節点のデータは書式自由で入力される。
NUMBER K MATERIAL THICKNESS NODES N 1 N 2 N 3 N 4 DUMMY ;	要素番号が読み込まれる。このオプションを使わないときは、要素番号は入力順に付けられる。 要素增加Kが入力される。 材料番号が入力される。 要素の厚み 4つの節点が入力される 節点1 節点2 節点3 節点4 項目は読み込まれるが無視される。 オプションの終了と要素データの読み込み。
BRICKS n オプション: FROM f	n個のソリッド要素が入力される。 要素は書式fで読み込まれる。fは最大80文字までの長さの文字列でFORTRANの書式設定に則っていなくてはならない。すべての項目は浮動小数点法で読み込まれなければならない。1つのカードに記述できるのは、1要素のみである。このオプションが使用されないときは、節点のデータは書式自由で入力される。

入 力	説 明
NUMBER	要素番号が読み込まれる。このオプションが使用されないときは、要素番号は入力順に割当られる。
K	要素の増加分 K が入力される。
MATERIAL	材料番号が入力される。
NODES	8 節点番号を入力する。
N 1	節点 1
N 2	節点 2
N 3	節点 3
N 4	節点 4
N 5	節点 5
N 6	節点 6
N 7	節点 7
N 8	節点 8
DUMMY	この項目は読み込まれるが、無視される。
;	オプションを終了し、要素のデータを読み込む。

パーツ制御コマンド

入 力	説 明
CYL 1	節点は円筒座標から直行座標系へ変換される。この変換の式は: $X = R \cos\theta$ $Y = R \sin\theta$
SPHE	節点は球面座標から直行座標系へ変換される。この変換の式は: $X = R \cos\theta \sin\phi$ $Y = R \sin\theta \sin\phi$ $Z = \cos\phi$
MATE matnum	パーツの材料番号は matnum である。
THIC thick	このパーツにおいて平面の厚みは thick である。
REPE 11 12 ... ln;	コピーコマンド。このコマンドにより全体的座標系 11 から 12 の各々について、パーツのコピーが作られる。座標系番号が 0 のときは、パーツは変換されずにコピーされる。
LREP 11 12 ... ln;	コピーコマンド。このコマンドにより局所的座標系 11 から 12 の各々について、パーツのコピーが作られる。座標系番号が 0 のときは、パーツは変換されずに複製される。
ROTATION px py pz wx wy wz	剛体回転角速度の初期値をパーツに与える。(px, py, pz) は回転軸上の任意の点で、(wx, wy, wz) はラディアン毎秒で表された回転角速度ベクトルである。

入 力	説 明
VELOCITY vx vy vz	剛体並進速度ベクトルの初期値をこのパーツ内のすべての節点に与える。(vx, vy, vz) は全体的速度ベクトルである。
MEMP t	このパーツの温度の初期値は t である。
COOR nc data	局所的座標系 nc を入力する。このコマンドへのデータはデータ 10 に記述されている。

4.5 MAZE パーツ

MAZE パーツによって二次元断面を容易に生成することができる。この断面は殻要素やドラッグ (drag) 格子操作を使用している三次元立体として使用できる。このパーツのためのデータは以下の通りである：

“PART”

必要なパーツデータ (データ 5. A)

オプションのパーツ制御コマンド (データ 5. B)

オプションの関数 (データ 5. C)

“END”

“PART” は, “MAZE” でもよい。

5. A 必要なパーツデータ

各 MAZE パーツには直線定義の組と、その後に材料番号と格子の密度の情報が必要である。MAZE パーツの記述には下に列挙するようにたくさんの方針が可能である。

入 力	説 明
L1 L2 L3 L4 mt k m	4辺からなる領域の4辺を形成する交差線分 L1, L2, L3, L4 を定義する。この領域の材料番号は mt である。この領域は、辺 L1 と L3 が k 要素に、辺 L2 と L4 が m 要素にと言うように、k * m 個の要素に分割される。辺は反時計回りの順に並べなければならない。k か m が 0 のときは、要素の数は各々線分 L1 または L2 上の点の数より 1 少ない数とされる。線分を定義した点が、こうして節点座標となる。
L1 L2 L3 L3 mt k m	3辺からなる領域の3辺を形成する交差線分 L1, L2, L3 を定義する。この領域の材料番号は mt である。この領域は、辺 L1 と L2 が k+m 要素に、辺 L3 が 2m 要素にと言うように、m * (2k+m) 個の要素に分割される。辺は反時計回りの順に並べなければならない。

入 力	説 明
L1 L2 L3 0 mt k m	3辺からなる領域の3辺を形成する交差線分L1, L2, L3を定義する。この領域の材料番号はmtである。この領域は、辺1とL2がk+m要素に、辺L3が2m要素にと言うように、m*(2k+m)個の要素に分割される。辺は反時計回りの順に並べなければならない。
L1 L2 L3 L4 mt -k -m r1 r2または L1 L2 L3 L4 mt -k m r1 L1 L2 L3 L4 mt k -m r2 L1 L2 L3 L4 -mt k m r1 r2 r3 r4	前述のように4辺からなる領域、ただし可変の地域分けができる。パラメータr1とr2は各々の辺1, 3と2, 4について、最初の部分の辺の長さの残りの部分の辺の長さにたいする比である。 前述のように4辺からなる領域、ただし可変の地域分けができる。パラメータr1とr2は各々辺1, 3と2, 4について、最初の部分の辺の長さの残りの部分の辺の長さにたいする比である。
-L1 L2 L3 L4 mt k m n ₁ n ₂ ¹ ... n _{p-2} ¹ -L1 L2 -L3 L4 mt k m n ₁ ... n _{p-2} ¹ n ₂ ¹ ... n _{p-2} ³	前述のように4辺からなる領域を定義する。ただし、マイナス記号で示される線分を定義する、連続した点の間にできる要素の数をもつ。このオプションが適当に用いられれば、最初の交点は、分割される線分の最初の点と2番目の点上になければならない。線分を定義するのに使用される点の総数はpに等しい。すべての分割が定義される必要はない。例えば、1番目の線分の最初の3点間の
L1 -L2 L3 L4 mt -k m r1 n ₁ ² ... n _{p-2} ² ⋮ etc.	分割の数を記述したいときは、n1 n2 0と打てばよい。 他のk-n1-n一部分は、線分に応じて等分配される。

5. B パーツ制御コマンド

以下のパーツ制御コマンドが使用できる。

入力	説明
THICK t	このパーツの平面の厚みは t である。
STACK n d	積層操作を実行する。節点での層の数は n であり、パーツの合計長さは d である。
SPIN n θ	回転積層操作を実行する。節点での層の数は n であり、パーツの合計角度は θ 度である。
REPE 11 12 … ln;	コピー命令。このコマンドにより、全体的座標系 11 から ln の各々について、パーツのコピーが作られる。座標系番号が 0 のときは、パーツは変換なしで複製が作られる。
LREP 11 12 … ln;	コピー命令。このコマンドにより、局所的座標系 11 から ln の各々について、パーツのコピーが作られる。座標系番号が 0 のときは、パーツは変換なしで複製が作られる。
ROTATION px py pz wx wy wz	パーツに剛体回転角速度の初期値を与える。(px, py, pz) は回転軸上の任意の点であり、(wx, wy, wz) はラディアン毎秒で表される回転角度速度ベクトルである。
VELOCITY vx vy vz	剛体並進速度ベクトルをこのパーツ内のすべての節点に与える。(vx, vy, vz) は全体的座標での速度ベクトルである。
TEMP t	このパーツの温度の初期値は t である。
COOR nc data	局所的座標系 nc を入力する。座標系データについては、データ 10 に詳述される。
DRAG	平面要素から立体要素を作る、ドラッグ (drag) 格子操作を実行する。
オプション:	
MOVE n data	元々の平面要素を data で記述される新しい位置に移動させて、n 層の立体要素を形成する。data はデータ 10 に詳述される。
ROTA n px py pz qx qy qz ang	元々の平面要素を軸の回りに回転させて n 層の立体要素を作る。(px, py, pz) は軸上の任意の点であり、(qx, qy, qz) は軸に平行なベクトルである。回転角度は ang 度である。
RES r	ある要素の長さの次の要素に対する比は r である。これは前にあるドラッグ操作にのみ適用される
;	このコマンドの終了。

5. C 関 数

MAZE パーツの関数は、すべて以下の形式を持つ：

キーワードインデックスの記述—パラメータ

MAZE パーツには、〈M 領域〉と略記されるインデックスの記述タイプがある。このインデックス記述法に対する入力は以下の通りである：

入 力	説 明
c1 c2 p1 p2	4つのインデックスにより、MAZE パーツでの任意の頂点、辺、面を判別できる。各 MAZE パーツには3または4つの角がある。1つ目の角は、パーツを形成する1つ目の線分と最後の線分との交差である。2つ目の角は、1つ目と2つ目の線分の交差である。以降の角はパーツをまわって同様に定義される。パーツまたは元の断面と各抵抗操作に対するもう1つの平面を含むいくつかの平面を持つ。〈M 領域〉で示される1つ目の角の節点はc1であり、最後の角はc2である。1つ目の平面はp1であり、最後の平面はp2である。c1またはc2が0のときには、それぞれ最大と最小の角の番号をとる。同様にp1またはp2が0の時は、それぞれ最小と最大の変面の番号が与えられる。

MAZE パーツには、関数に対して以下のキーワードがある。

一般及び立体構造コマンド

入 力	説 明
B	境界条件
FC	力
FD	変位の記述
FV	速度境界条件
PR	圧力荷重
SI, SI+, SI-	滑り接触面定義
SW	剛体壁節点

熱荷重と境界条件

入 力	説 明
CV	対流境界条件
FL	熱流束境界条件
FT	温度境界条件
RB	輻射境界条件
RE, RE+, RE-	輻射囲い
TM	温度初期条件

静電荷重と境界条件

入 力	説 明
EFL	電束
V	電位

電磁荷重と境界条件

入 力	説 明
FBC	電磁場境界条件
RBC	放射境界条件
SPC	電流の記述
SPF	電磁場の記述

境界条件

入 力	説 明
"B" <M 領域> n	<p>境界条件キーワード n は 6 衍の 2 進数で、制限される自由度を記述する。 衍は左から右へ数え、それらは以下の自由度を決める。</p> <p>第 1 衍: X-方向変位 = 0 自由 = 1 拘束</p> <p>第 2 衍: Y-方向変位</p> <p>第 3 衍: Z-方向変位</p> <p>第 4 衍: X-軸回転</p> <p>第 5 衍: Y-軸回転</p> <p>第 6 衍: Z-軸回転</p>

力と変位

入 力	説 明
"FC", "FD", または "FV" <M 領域>	<p>"FC" = 力</p> <p>"FD" = 拘束された変位</p> <p>"FV" = 速度境界条件</p>
lc	荷重状態または荷重曲線番号
amp	荷重曲線に対する倍数
fx fy fz	力、変位、または速度を定義するベクトル

圧力

入 力	説 明
"PR" <M 領域>	圧力荷重コマンドを示す
lc	荷重状態または荷重曲線番号
p	圧力の大きさ
ax ay az	(ax, ay, az) は局所的座標系の点で、圧力はその点に向いている。(ax, ay, az) を記述することにより INGRID には圧力がどの方向に向いているかが知られ、それに応じて圧力カードの節点を数える。

滑り接触面コマンド

タイプ1	
入 力	説 明
"SI" <M 領域>	滑り接触面コマンドを示す
islid	滑り接触面番号
mslid	主/従記号 = "M": 主面 = "S": 従面
タイプ2	
入 力	説 明
"SI+" <M 領域>	滑り接触面コマンドを示す
islid	滑り接触面番号
mslid	主/従記号 = "M": 主面 = "S": 従面
px py pz	局所的座標系の点で、滑り接触面はその点に面している。
タイプ3	
入 力	説 明
"SI-" <M 領域>	滑り接触面コマンドを示す
islid	滑り接触面番号
mslid	主/従記号 = "M": 主面 = "S": 従面
px py pz	局所的座標系の点で、滑り接触面はその点の反対側に面している。

剛体壁節点

入 力	説 明
"SW" <M 領域> d	剛体壁コマンド 剛体壁面番号

以下のコマンドは、熱荷重と境界条件を定義するためのものである。

対流境界条件

入 力	説 明
CV <M 領域>	対流境界条件
lc 1	熱伝導係数 h に対する荷重曲線番号
h	曲線の乗数 h
lc 2	T に対する荷重曲線
T	曲線に対する乗数 T
a	自由対流指数

熱流束境界条件

入 力	説 明
FL <M 領域>	熱流束境界条件
lc	荷重曲線番号
scal	荷重曲線に対する倍数

温度境界条件

入 力	説 明
"FT" <M 領域>	温度境界条件
lc	荷重曲線番号
t	温度

輻射境界条件

入 力	説 明
RB <M 領域>	輻射境界条件
lc 1	f に対する荷重曲線番号
f	f に対する曲線の乗数
l	T に対する荷重曲線番号
T	T に対する曲線の乗数

輻射囲い

タイプ1	
入 力	説 明
RE + <M 領域> または RE - <M 領域>	輻射囲い
lc 1	輻射に対する曲線番号
T	部分の温度 (lc 1 = 0 のときのみ入力する)
flag	遮断面の記号 = "YES": 面は遮断面計算に含まれる。 = "NO": 遮断面計算は行われない。
px py pz	(px, py, pz) は局所的座標系で、それに向かって輻射の生じる点。

タイプ2	
入 力	説 明
RE <M 順塚>	輻射囲い
lc 1	輻射に対する曲線番号
T	部分の温度 (lc 1 = 0 のときのみ入力する)
flag	遮断面の記号 = "YES": 面は遮断面計算に含まれる。 = "NO": 遮断面計算は行われない。

注: このオプションが使用されると、面は隣接した熱伝導性要素から外向きに方向付けられる。このコマンドで定義された輻射部分に熱伝導性要素が隣接していないとエラーが生じる。これは外向きの法線が決定できないからである。

温度の初期条件

入 力	説 明
"TM" <M 領域>	温度の初期条件
t	温度

以下コマンドは静番荷重と境界条件を定義するためのものである。

電束

入 力	説 明
EFL <M 領域> f	電束の値

電 位

入 力	説 明
V <M 領域> v	電位

以下のコマンドは電磁荷重と境界条件を定義するためのものある。

電磁場境界条件

入 力	説 明
FBC <M 領域>	
type	= “METAL”: 電導体 = “AMETAL”: 磁性体 = “ZERO”: 電磁場の存在しない場
“00”	電場と磁場を 0 にする=場全体の記述に使う
“01”	磁場の垂直成分と電場を 0 にする
“02”	磁場の平行成分と電場を 0 にする
“03”	電場を 0 にする
“04”	電場の垂直成分と磁場を 0 にする
“05”	電場の垂直成分と磁場の垂直成分を 0 にする
“06”	電場の垂直成分と磁場の平行成分を 0 にする=磁性体
“07”	電場の垂直成分を 0 にする
“10”	電場の平行成分と磁場を 0 にする
“11”	電場の平行成分と磁場の垂直成分を 0 にする=電導体
“12”	電場の平行成分と磁場の平行成分を 0 にする
“13”	電場の平行成分を 0 にする=電導体
“14”	磁場を 0 にする
“15”	磁場の垂直成分を 0 にする
“16”	磁場の平行成分を 0 にする=磁性体
“17”	何も 0 にしない

輻射の境界条件

入 力	説 明
RBC <M 領域>	輻射の境界条件

決められた電流

入 力	説 明
SPC <M 領域> lc	決められた電流 関数番号

決められた電磁場

入 力	説 明
SPF <M 領域> lc	決められた電磁場 関数番号

6 対話コマンド

モデルが生成された後、INGRID はプログラムの対話式画像処理フェイズに入る。この段階では以下のコマンドが使用可能である。

以下のコマンドは、モデルを観察し、回転させるためのものである。

入 力	説 明
VIEW or G	格子を見る。z-バッファ法を基礎としたアルゴリズムが、隠れた線の処理に使用されている。
MARK	マーク・ブレアによる隠れた線の処理アルゴリズムを使用して、格子を見る。
	現在は、使用できない。
DRAW	格子を描く。格子のすべての線が作図される。
POOR	プアマンの隠れた線の処理アルゴリズム。
SCALE s	格子の大きさを s 倍する。デフォルトは 1.0 である。

(注) 画面座標での X-軸は、画面に対しえ固定され、観察者の右方へ水平に引かれている。Y-軸は上向き正にとられている。Z-軸は画面から観察者の方へ引かれている。

入 力	説 明
RX θ	画面座標の X-軸について物体を θ 度回転させる。 正の回転は反時計回り。
RY θ	画面座標の Y-軸について物体を θ 度回転させる。 正の回転は反時計回り。
RZ θ	画面座標の Z-軸について物体を θ 度回転させる。 正の回転は反時計回り。

注: 局所的座標系はモデルに固定され、モデルと一緒に回転する。

入 力	説 明
RLX θ	局所的 X-軸回りに対象物を θ 度回転させる。
RLY θ	局所的 Y-軸回りに対象物を θ 度回転させる。
RLZ θ	局所的 Z-軸回りに対象物を θ 度回転させる。
U x	構造から距離 X 上方へ移動させる。
D x	構造から距離 X 下方へ移動させる。
L x	構造から距離 X 左方へ移動させる。
R x	構造から距離 X 右方へ移動させる。
RESTORE	全ての回転を 0 にする。
ROTATE isxaxis θ	画面座標の指定軸の回ひに、対象物を θ 度回転させる。 isaxis = 1 X 軸 = 2 Y 軸 = 3 Z 軸
KELP	主要なコマンドのリストが表示される。

以下のコマンドはパートと材料の小集合 (subsets) の選択のためのものである。

入 力	説 明
P n	パート n のみを表示する。
DPS n i1 i2... in	パート p1, p2... pn を含む n 個のパートからなる パート小集合を表示する。
PARTS n i1 i2... in	パート番号 i1, i2... in の n 個のパートを含む。 n が 0 のときは、すべてのパートが含まれる。
AP n	表示リストにパート n を加える。
RP n	表示リストからパート n を除く。
DAP	すべてのパートを表示する。
M n	材料 n のみを表示する。
DMS n m1 m2... mn	材料 m1, m2... mn を含む n 個の材料の材料小集 合を表示する。
AM n	材料 n を表示リストに加える。
RM n	材料 n を表示リストから除く。
DAM	すべての材料を表示する。

以下のコマンドは、荷重と境界条件を観察するための表示オプションを選択するためのものである。観察コマンド (VIEW, DRAW, etc.) は表示オプションが選択された後で実行される。

入 力	説 明
DI n	境界コードを表示する: = "DX", X-変位コード = "DY", Y-変位コード = "DZ", Z-変位コード = "RX", X-軸回転コード = "RY", Y-軸回転コード = "RZ", Z-軸回転コード
DI F lc	荷重状態 (または荷重曲線) lc による, 点の荷重を表示する。
DI D lc	荷重状態 (または荷重曲線) lc による変位を表示する。
DI PR lc	荷重状態 (または荷重曲線) lc による圧力面を表示する。
DI SY isym	対称平面 isym を表示する。
DI SI islid mslid	滑り面 islid を表示する。 mslid = "M", 主面側を表示する。 mslid = "S", 従面側を表示する。 mslid = "R", 両面を表示する。
DI RB	輻射境界を表示する。
DI RE	輻射囲いを表示する。
DI FLUX	熱流束境界条件を表示する。
DI CV	対流境界条件を表示する。
DI JTS	ジョイントを表示する。現在は, ダミー。
DI TI	温度の初期条件を表示する。
DI TB	温度境界条件を表示する。
DI VB lc	速度境界条件を表示する。
DI LAX code	局所的軸を表示する。 code = "R": 局所的 R-軸 code = "S": 局所的 S-軸 code = "T": 局所的 T-軸 code = "RS": 局所的 RS-軸 code = "ST": 局所的 ST-軸 code = "TR": 局所的 TR-軸 code = "RST": 局所的 RST-軸
DI OON	外形線オプションを開始させる。これはマーク・プレナーの隠れた線のアルゴリズムのみで実行される。
DI OOFF	外形線オプションを終了させる。
DI PHANTOM	仮想 (phantom) の辺を波線で表示する。これはマーク・プレナーの隠れた線のアルゴリズムのみで実行される。見せかけ (phantom) の辺は, 標準パーツの VE コマンドで入力されなければならない。

入 力	説 明
DI NOPAHNTOM	見せかけ (phantom) の辺のオプションを終了する。
DI OFF	表示オプションを終了する。

(注) phantom オプションは、現在使用できない。

入 力	説 明
DI SW	剛体壁に衝突する節点を表示する。

以下の多方面にわたるコマンドは対話フェイズで利用できる。

入 力	説 明
STOP	直ちにプログラムから抜ける。 (出力ファイルは、作成されない。)

(注) END QUIT EXIT SYSTEM 等が同様の扱いとなる。

入 力	説 明
CONTINUE	生成を終了し、出力ファイルを作る。

(注) 通常は、このコマンドで終了する。

入 力	説 明
INFO	格子の大きさに関するプリント情報。
PINF	各パーツに関するプリント情報。
SIZE	カレントアクティブパーティストでの座標の範囲をプリントする。
RESO ires	レゾリューションをiresにセットする。iresは256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192のうちの1つしかとれない。(デフォルトは512である)

(注) 512以外を指定した場合の動作は、保証されない。

入 力	説 明
T tol または TOLE tol	距離 tol 内に存在する節点を重なっているとし除去する。このコマンドでは、滑り面について反対側にあって重なっている節点やジョイント上で重なっている節点は消去されない。
TP tol	距離 tol 内に存在する節点を重なっているとして除去し、2つのペーツ間で合体された節点の数をプリントする。
WTDB	TAURUS データベースを書き出す。
WRDB	圧縮された TAURUS データベースを書き出す。このオプションでは、面の多角形のみを書き出す。
WBGR	出力ファイルに節点、要素のリスト（平面のみ）を出力する。
UPDT	現在までの処理結果を放棄し、再び全データの定義をやりなおす。
TMASS	モデルの総質量を計算する。質量密度は MAT コマンドをつかって入力されねばならない。また、このコマンドで運動量、体積、慣性モーメント、重心も計算される。
PMASS	“PARTS” コマンドで記述されたアクティブペーツのみが計算に含まれることを除けば、“TMASS” と同様である。
CENT	モーメントと慣性乗積が重心に対して確定される。 (デフォルト)
REFP	モーメント等の情報を表示する。
REFERENCE rx ry rz	モーメントと慣性乗積が点 rx, ry, rz に対して確定される。
LV	すべての線を表示する。
LVS m n	m から n までの線を表示する。
LVI n 11 12...ln	線番号 11 12...ln の n 本の線を表示する。
GRID	ディスプレイ上に直交格子が形成される。
NOGRID	ディスプレイ上に直交格子が形成されない。 (デフォルト)
FRAME	リフレンスフレームとして点が打たれる。 (デフォルト)
NOFRAME	リフレンスフレームが作図されない。
TRPT	作図時に他用時間の一覧がプリントされる。
AJNP x y z	指定の座標に最も近い節点の情報を表示する。
LCV n	荷重曲線 n を図化する。

(注) GRID, FRAME コマンドは、LV, LVS, LVI, LCV コマンドの表示方法の指定となる。

入 力	説 明
NDPL	節点番号を表示する。
ELPL	要素番号を表示する。

表示される番号は、隠れ線処理の対象となる。

DIOFF もしくは RESTORE コマンドで、表示の指定がキャンセルされる。

7 線定義

ここでは、INGRID への二次元曲線データの定義のためのオプションについて述べる。

入 力	説 明
LCC n rc zc $\theta_1 \ \theta_2$ R1..Rn	中心 (rc, zc) で角度 θ_1 から θ_2 まで引かれた円弧からなる n 本の線を定義する。R1, R2, ... Rn は n 本の線の半径である。線番号は INGRID により、以前に定義された線と重複しないよう与えられる。
LRL n rc zc R $\theta_1 \dots \theta_n$	長さ R, 点 rc, zc からそれぞれ角度 $\theta_1 \dots \theta_n$ 方向に引かれた放射線からなる n 本の線を定義する。正の角度は r-軸から反時計回りに測られる。
LD n	線 n の定義を開始する。線 n が以前に定義されているときは、このコマンドにより古い定義は破壊される。後で与えられるコマンド “RSEG” から “TBO” までは、線 n の線分を定義するのに使用される。
LP m r1, z1, r2 z2... rm zm	線 n 上の点を定義する。
LPIL L1 L2	線 L1 と L2 の交点で線 n を定義する。
LPTA rc zc R	1 つの前の定義の終点から、中心 (rc, zc), 半径 R の円弧に対する接点まで引かれる線分を定義する。円弧に対する 1 つ目の接点は、r-軸から反時計回りの最終点として作られる。R が負のときは、r-軸からの時計回りで 1 つ目の接点が決められる。
LTAS r1 rot r2 z2 R	中心点 (r1, z1) で 1 つ前の定義の終点から引かれた円弧に接する部分線を定義する。線分は、rot = 1 から反時計回りに、rot = -1 なら時計回りに振られ、半径 R, 中心 (r2, z2) の第 2 の円弧に対する接点まで引かれる。第 2 の円弧に対する 1 つ目の接点は、r-軸から反時計回りの最終点として作られる。R が負のときは、r-軸からの時計回りで 1 つ目の接点が決められる。

入 力	説 明
LEP a b rc zc $\theta_1 \theta_2 \phi$	長軸、短軸をそれぞれ a, b, 中心点を (rc, zc) とし, 長軸から測って角度 θ_1 から角度 θ_2 まで引かれる橢円弧を定義する。角度 ϕ は, 長軸と r-軸となす角である。a=b とすれば, 円弧が生成される。正の角度は反時計回りを示す。
rod m δ	線 m 全体から距離 δ のオフセットを持つ線分を線 n に対して定義する。 δ が正のとき線分は, 線 m 上を線が定義された向きに移動する人から見て左にオフセットされる。
LAP r1 z1 rc zc	記述された点により円弧が定義される。弧は 1 つ前の定義の終点から点 (r1, z1) まで引かれる。点 (rc, zc) は弧の中心点である。
LAR r1 z1 R	記述された半径により円弧が定義される。半径 R の分弧は, 1 つ前の定義の終点から点 (r1, z1) まで引かれる。R が正のとき弧の中心点は, 弧の始点から (r1, z1) へ移動する人から見て左側にある。R が負なら, 弧の中心点は右側にある。
LTP r z R	1 つ前の定義の線分に接し, 点 (r, z) で終わる半径 R の円弧を定義する。前に定義された線分は, 自動的に接点まで延長されるか, 切り取られる。
LPT r1 z1 r2 z2 R	1 つ前の定義の終点から, 点 (r1, z1) と点 (r2, z2) とを結んだ線分への接点まで引かれる半径 R の円弧を定義する。この線分は接点から始まるように, 延長されたり切り取られたりする。
LAT r1 z1 r2 z2 R	1 つ前の定義の線分と点 (r1, z1), 点 (r2, z2) を結んだ線分とに接する半径 R の円弧を定義する。これらの線分は, 接点までになるように自動的に延長されたり, 切り取られたりする。
LAD rc zc θ	中心を (rc, zc) とし, 1 つ前の定義の終点から中心角度 θ にわたって引かれる円弧を定義する。正の θ は, 反時計回りを示す。
LO m r1 z1 r2 z2	線 m の線分をオフセットして, 線 n に対する線分を定義する。新しい線分の始点は (r1, z1) であり, 終点は (r2, z2) である。
LVC θ 1 または LVC r1 z1 θ 1 LVC r2 z2 θ -1	θ 度(正なら r-軸から反時計回り)方向のベクトル 1 により線分を定義する。これが新しい線の定義での最初のコマンドならば, 元になる (r, z) を与えねばならない(2つ目か3つ目の形)。負の 1 は 2 つ目の点が定義されることを示す。すなわちベクトルは, 1 つ目の物を指す。

入 力	説 明
LSTL m Δr Δz	線 m を移動分 (Δr , Δz) 移動させて、線 n に対する線分を定義する。
LTBC m θ $\Delta\theta$ s R1 R2... Rm	タブセル (tab cell) データで線 n に対する線分を定義する。 タブセルデータは、しばしば製図プログラムで使用され、角度 θ から各々 $\Delta\theta$ 度づつずれた m 個の半径からなる。各半径は、S 倍される。正の角度は反時計回りを示す。
LTBO ml $\delta 1$ m2 $\delta 2$.. mm δm	前に “LTBC” または “LTBO” コマンドにより定義された線をオフセットすることにより、線 n に対して線分を定義する。最初の m1 個の点の半径は $\delta 1$ オフセットされ、次の m2 個については $\delta 2$ 、と続く。ただし、 $m = m_1 + m_2 + \dots + m_m$ で m は 1 つ前の “LTBC” コマンドからとられる。
LT n Δr Δz	線 n を移動分 (Δr , Δz) 移動させる。
LCFI m r0 θi θf n	カレント線定義は、フーリエ級数 m で定義される不完全な円筒である。円筒の方程式は以下の様： $r = r_0 + \sum ai \cos(i\theta + bi)$ $i = 1$ ここで、nmodes, ai, bi はフーリエ級数 m で定義される。r0 は円筒の名目上の半径である。θi と θf は、円筒が定義される角度の初期値と最終値である。曲線デジタル化するために使う点の数は、n である。
LINT 11 12 s	カレント線定義は、線定義 11 と線定義 12 との挿入法により形成される。方程式は： $l = s 11 + (1 - s) 12$
LSCA 1 s	線定義 1 を S 倍する。
LSCR 1 s	線定義 1 の r-座標を s 倍する。
LSCZ 1 s	線定義 1 の z-座標を s 倍する。
LADV 1 Δr Δz	線定義 1 に対してベクトル (Δr , Δz) を加える。
LROT 1 θ	線定義 1 を原点について θ 度回転させる。

8 面定義

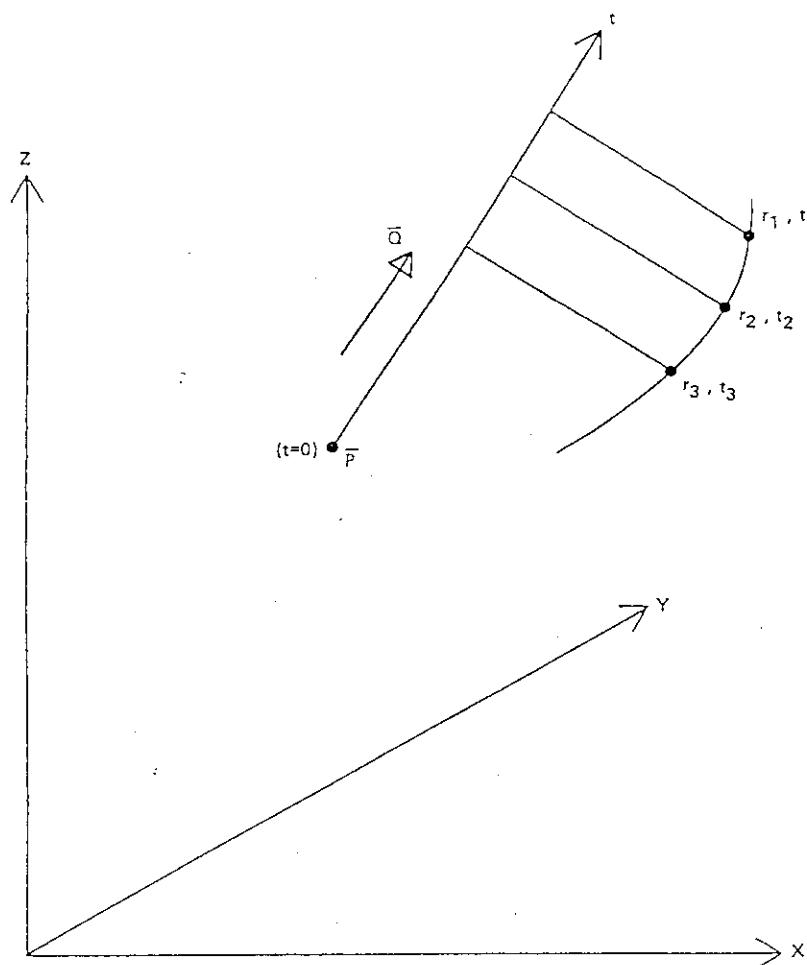
ここでは、三次元曲面を定義するためのオプションについて述べる。これらの面は、制御部分での“SD”コマンドやパーツでの“SF”コマンドで必要とされる。点は面上で最も接近し合うように配置される。

ityp=面方程式タイプ

- = “PR”: 放物線の軸回りの回転 (タイプ1)
- = “SP”: 球面 (タイプ2)
- = “ER”: 楕円の軸回りの回転 (タイプ3)
- = “AC”: コサイン多項式 (タイプ4)
- = “CR”: 離散化表現された曲線 (タイプ5)
- = “PLAN”: 平面 (タイプ6)
- = “POLY”: 多項式の軸回りの回転 (タイプ7)
- = “CY”: 円筒面 (タイプ8)
- = “CONE”: 円錐面 (タイプ9)
- = “CN 2 P”: 2点で定義された円錐面 (タイプ10)
- = “TS”: 円環面 (タイプ11)
- = “TS 2 P”: 2点で定義された円環面 (タイプ12)
- = “GS”, “GSU”, “GSL”: 一般面 (タイプ13)
- = “PL 3”: 3点で定義された平面 (タイプ14)
- = “CRX”, “GRY”, “CRZ”: 曲線の x, y, z 軸回りの回転 (タイプ15)
- = “CP”: 無限に広がる曲面 (タイプ16)

タイプ1. 放物線の軸回りの回転 (第5.1.12図参照)

入力	説明
“PR”	
px py pz	放物線の位置を定義する点。
qx qy qz	局所的 t-軸に平行な任意のベクトル。
r1 t1	放物線上の1つ目の点。t = 0 のとき点は、t-軸に垂直な平面上の点 p にある。t-軸の正の向きは、ベクトル q と同じ向きである。
r2 t2	2つ目の点の座標。
r3 t3	3つ目の点の座標。



第5.1.12図 放物線の軸回りの回転

タイプ2. 球面	
入 力	説 明
"SP" px py pz r	球の中心 球の半径
タイプ3. 楕円の軸回りの回転	
入 力	説 明
"ER" px py pz qx qy qz r1 r2	楕円の中心 回転軸に平行な任意のベクトル 回転軸に垂直な平面上での最大半径 回転軸の中点と楕円との距離

タイプ4. 余弦関数多項式の軸回りの回転

余弦関数多項式によって面が定義される。

$$r = a_0 + a_1 (\cos\theta) + a_2 (\cos\theta)^2 + \dots + a_n (\cos\theta)^n$$

入力	説明
"AC"	
px py pz	曲線の位置を定義する点
qx qy qz	回転軸に平行な任意のベクトル
n	多項式の項数
a ₀ , a ₁ ... a _n	多項式の係数 (nは必ず12以下)

タイプ5. 任意の曲線の軸回りの回転

入力	説明
"CR"	
px py pz	曲線の位置を定義する点
qx qy qz	回転軸に平行な任意のベクトル
nc	線定義番号。この番号は、制御部入力での線定義に参照される。離散化された曲線上の点の数に制限はない。

タイプ6. 平面

入力	説明
"PLAN"	
px py pz	平面上の任意の点
qx qy qz	平面に垂直な任意のベクトル

タイプ7. 多項式の軸回りの回転

入力	説明
"POLY"	
px py pz	原点
qx qy qz	回転軸に平行な任意のベクトル
n	多項式の項数
a ₀ a ₁ ... a _n	多項式の係数 (nterm=n+1)

タイプ8. 円筒

入力	説明
"CY"	
px py pz	回転軸上の点
qx qy qz	回転軸に平行な任意のベクトル
r	半径

タイプ9. 円錐面

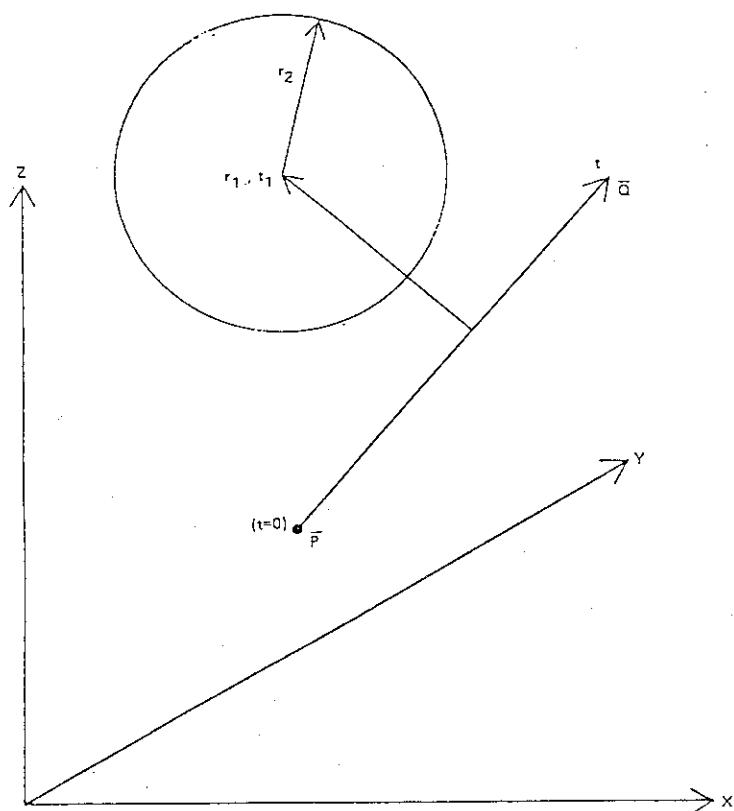
入力	説明
“CONE”	
$p_x p_y p_z$	回転軸上の点
$q_x q_y q_z$	回転軸に平行なベクトル
r	点 p での半径
θ	ベクトル q と円錐面のなす角 (度)

タイプ10. 2点で定義される円錐面

入力	説明
“CN 2 P”	
$p_x p_y p_z$	回転軸上の点
$q_x q_y q_z$	回転軸に平行なベクトル
$r_1 z_1 r_2 z_2$	円錐面を定義する 2 点の半径方向, 軸方向座標

タイプ11. 円環面

入力	説明
“TS”	
$p_x p_y p_z$	回転軸上の点
$q_x q_y q_z$	回転軸に平行なベクトル
$r_1 t_1 r_2$	第 5.1.13 図参照



第 5.1.13 図 円環面の定義

タイプ12. 2点で定義された円環面

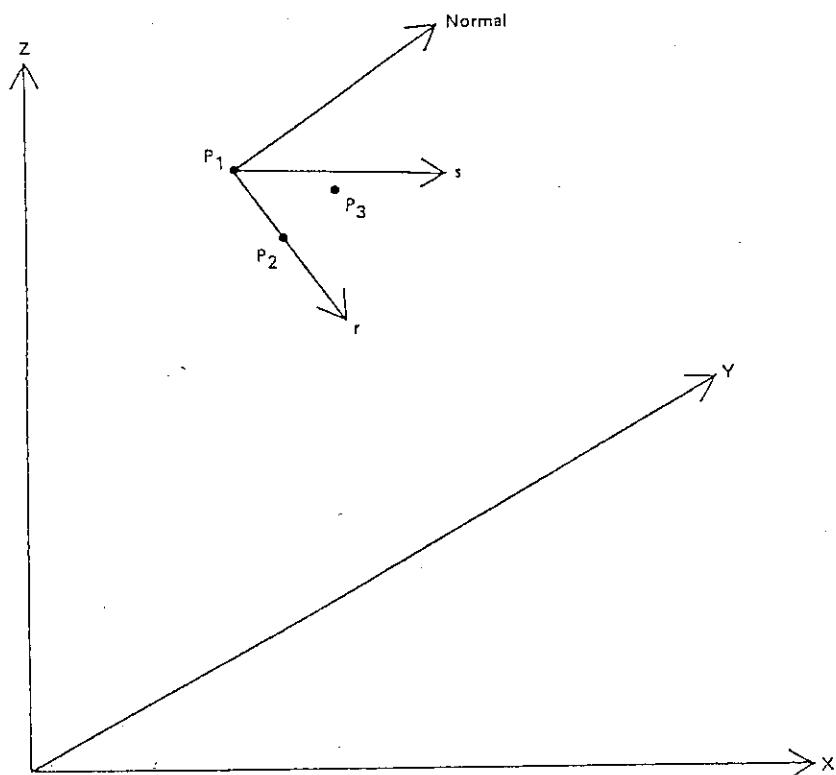
入力	説明
"TS 2 P"	
px py pz	回転軸上の点
qx qy qz	回転軸に平行なベクトル
r1 z1 r2 z2	面上の2点
r3	r3 は点cからの面の半径。r3 > 0ならcは(r1, z1)から(r2, z2)へ移動する人の左側にある。さもなければ、cは右側にある。

タイプ13. 一般面

入力	説明
GS n	離散化表現された番号nの一般3次元面を使う。
GSU n	一般3次元面の上面を使う。
GSL n	一般3次元面の下面を使う。

タイプ14. 3点で定義された平面

入力	説明
"PL 3"	
f1	点1の座標タイプを示す記号 = "RT": 直行座標系 = "CY": 円筒座標系 (R, θ, Z) = "SP": 球面座標系 (R, θ, φ)
p1x p1y p1z	点1の座標
f2	点2の座標タイプを示す記号 = "RT": 直行座標系 = "CY": 円筒座標系 (R, θ, Z) = "SP": 球面座標系 (R, θ, φ) = "V": 点2は点1から以下のベクトルのようなオフセットを持つ。
p2x p2y p2z	点2に対する座標もしくはベクトル
f3	点3の座標タイプを示す記号 = "RT": 直行座標系 = "CY": 円筒座標系 (R, θ, Z) = "SP": 球面座標系 (R, θ, φ) = "V": 点3は点1から以下のベクトルのようなオフセットを持つ。
p3x p3y p3z	点3に対する座標もしくはベクトル
d	平面をその垂直正方向(第5.1.14図参照)に距離dオフセットする。



第 5.1.14 図 3 点で定義された平面

タイプ 15. x, y, または z 軸回りの曲線の回転

入 力	説 明
CRX, CRY, または CRZ n	曲線はそれぞれ x, y, z 軸回りを回転する。 線定義番号（データ 7. 参照）

タイプ 16. 無限に広がる曲面

入 力	説 明
CP data 1	線定義 1 から無限に広がる面を形成する。最初、線定義の r-座標とパートの x-座標が等しく、線定義の z-座標とパートの y-座標が等しい。パートの z-軸に対し、任意の x-y 平面上で面は同じ曲線となる。 データ 10. で、面を空間の任意の場所に移動させるのに使用する。data について述べる。

9 体積定義

この節では、有効な立体の原形を提供する。立体の原形は、制御部での“VD”コマンドによって使用される。以下のタイプが使用できる。

入 力	説 明
SPHE	球
CYLI	円柱
RECT	直方体
TRIA	くさび
CR	立体は曲線の軸の回りでの回転から形成される。
タイプ1. 球	
入 力	説 明
SPHE	球の中心
px py pz	半径
r	
タイプ2. 円柱	
入 力	説 明
CYLI	円柱の軸上の点
px py pz	円柱の軸に平行なベクトル
qx qy qz	
r	半径
タイプ3. 直方体	
入 力	説 明
RECT	立体の方向を定めるために番号 n の全体座標変換を使用する。
n	
xmin xmax	立体の局所的寸法
ymin ymax	
zmin zmax	
タイプ4. くさび	
入 力	説 明
TRIA	立体の方向を定めるために番号 n の全体座標変換を使用する。
n	
x1 y1	x-y 断面の三角形を定義する。断面形は (x, y) で示された 3 点の座標のリストで定義される。
x2 y2	
x3 y3	
zmin zmax	z-方向の寸法

タイプ5. 曲線を軸の回りで回転させる。

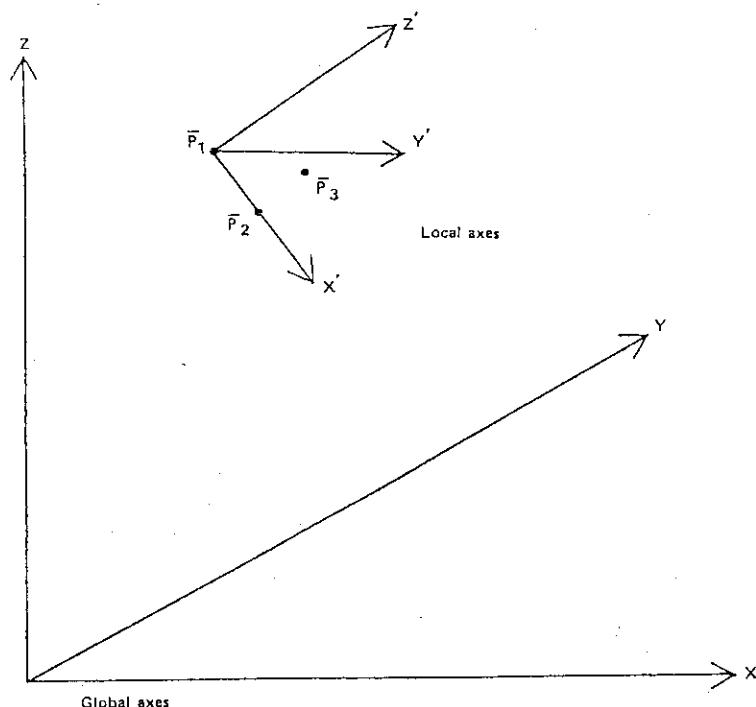
入 力	説 明
CR	
px py pz	立体の軸上の点
qx qy qz	立体の軸に平行なベクトル
nc	線定義番号かこの番号は、制御部入力での線定義に参考される。離散化表示された曲線の点の数に制限はない。

10 座標変換

オプション1

オプション1では、3点が入力されなければならない。第5.1.15図に3点で定義される局所的座標系の方向が示される。

入 力	説 明
f1	点1の座標タイプを示す記号 = “RT”: 直行座標系 = “CY”: 円筒座標系 (R, θ, Z) = “SP”: 球面座標系 (R, θ, φ)
p1x p1y p1z	点1の座標
f2	点2の座標タイプを示す記号 = “RT”: 直行座標系 = “CY”: 円筒座標系 (R, θ, Z) = “SP”: 球面座標系 (R, θ, φ) = “V”: 点2は点1から以下のベクトルのようなオフセットを持つ。
p2x p2y p2z	点2に対する座標もしくはベクトル
f3	点3の座標タイプを示す記号 = “RT”: 直行座標系 = “CY”: 円筒座標系 (R, θ, Z) = “SP”: 球面座標系 (R, θ, φ) = “V”: 点3は点1から以下のベクトルのようなオフセットを持つ。
p3x p3y p3z	点3に対する座標もしくはベクトル



第 5.1.15 図 座標変換

オプション 2

オプション 2 では、以下のコマンドを任意の順序で使用できる。

入 力	説 明
MX Δx	x-方向に Δx 移動させる
MY Δy	y-方向に Δy 移動させる
MZ Δz	z-方向に Δz 移動させる
V Δx Δy Δz	Δx , Δy , Δz に移動させる
RX θ	x-軸回りに θ 度回転させる
RY θ	y-軸回りに θ 度回転させる
RZ θ	z-軸回りに θ 度回転させる
RXY	XY 平面について対称移動する
RYZ	YZ 平面について対称移動する
RZX	ZX 平面について対称移動する
CSCA s	座標値を s 倍する
XSCA s	X-座標を s 倍する
YSCA s	Y-座標を s 倍する
ZSCA s	Z-座標を s 倍する
REPE n	カレントの変換を n 回繰り返す
SAVE n	座標変換の順序は、“REPE” コマンドを使用したとき、n 座標系を最初にして決められる。
:	オプション 2 の終了

11 DYN/NIKE 材料

この節には、INGRID 入力ファイルの制御部に含まれる、材料データの入力のためにコマンドが納められている。DYN/NIKE 3D での材料モデルは、DYN/NIKE 3D と NIKE 2D とに等しいので、この節は、MAZE プログラムから直に取ってこられたものである。MAZE ファイルからの材料データは、INGRID でそのまま使用できる。

入 力	説 明
DBQT i (DYN/NIKE 3D のみ)	デフォルトの体積粘性 (bulk viscosity) タイプ値を 1 から i に変更する: = 1: DYN/NIKE 3D 標準 = 2: リチャーズーウィルキンズ
DQL Ql (DYN/NIKE 3D のみ)	デフォルトの線形体積粘性値を 1.5 から Ql に変更する。
DQQQ Qq (DYN/NIKE 3D のみ)	デフォルトの 2 次の体積粘性値を 1.5 から Qq に変更する。
DHGQ Qh (DYN/NIKE 3D のみ)	デフォルトのアワーグラス粘性値を .10 から Qh に変更する。
DHQQT i (DYN/NIKE 3D のみ)	デフォルトのアワーグラス粘性タイプ値を 1 から i に変更する。 = 1: DYN/NIKE 3D 標準 = 2: 回転 = 3: フラナガンーベリチコ = 4: PISCES
TSHELL	この材料から作られたすべてのソリッド要素は厚肉シェルである。
LTMN	この材料のブリック要素に対する局所的 t- 軸はブリックについての最短の方向を指す。
LTMX	この材料のソリッド要素に対する局所的 t- 軸はソリッドについての最長の方向を指す。
MAT n mt	材料タイプ mt の材料番号 n を定義する。各材料定義は、"ENDMAT" コマンドで終了する。

mt に対する以下の値は、DYN/NIKE 3D の両方に適用できる。:

- = 1 : 弹性
- = 2 : 直交弾性
- = 3 : 動的/等方性 弹性-塑性
- = 4 : 热-弹性-塑性
- = 5 : 土とクラッシュアブルフォーム
- = 6 : 線形粘弹性

以下の材料タイプは DYN/NIKE 3D でのみ使用可能:

- = 7 : ゴム
- = 8 : 高性能火薬 (EXPLOSIVE BURN)

= 9 : ヌル材料 (NULL MATERIAL)

= 10 : 弹性-塑性

= 11 : 温度に依存する弾性-塑性

以下の材料タイプは NIKE 3 D でのみ使用可能:

= 7 : 热直交弹性

= 8 : クリーグ热弹性クリープ

材料特性の定義の後には、0 ではない値のみが記述される必要がある。デフォルトの見出しは、見出しを変えるのに使用される “HEAD” がなければ、出力ファイルにプリントされる。

入 力	説 明
BEMT	この物性は、ビーム要素に適用されることを指定。
SHMT	この物性は、シェル要素に適用されることを指定。
SHEAR sfact	ビームもしくはシェル要素の場合のせん断係数。
NPOINT np	ビームもしくはシェル要素の場合の積分法則。 ビームならば断面内の積分点数は np × np シェルならば板厚方向の積分点数 np は、5 以下のこと。
PROPT npopt	印刷用オプション (DYNA 3 D 88 年版用)
SHQR nshqr	シェルの積分法則オプション (")
BCST nbbst	ビームの断面形状オプション (")
ETYP netyp	シェルもしくはビームの要素種別オプション (")
PAR 1 vpar 1	DYNA 3 D のカード 11 の第 1 パラメター
PAR 2 vpar 2	DYNA 3 D のカード 11 の第 2 パラメター
PAR 3 vpar 3	DYNA 3 D のカード 11 の第 3 パラメター
PAR 4 vpar 4	DYNA 3 D のカード 11 の第 4 パラメター
PAR 5 vpar 5	DYNA 3 D のカード 11 の第 5 パラメター
PAR 6 vpar 6	DYNA 3 D のカード 11 の第 6 パラメター

PAR 1 から PAR 6 までは、シェル要素の場合は各節点での板厚と Hughes-Lieu 要素の場合の参照点位置オプション (PAR 5)，ビーム要素の場合は、各節点での S 方向及び T 方向の厚さと参照面の位置を指定する。詳しくは、DYNA 3 D のユーザーマニュアルを参照のこと。

入 力	説 明
EOS n eost	材料 n に対する状態方程式タイプ eost を定義する。 各状態方程式定義は、"ENDEOS" コマンドで終了する。状態方程式への入力は、材料の入力に続く。

以下の状態方程式タイプは、DYNA 3D で使用できる：

- = 1 : 線形多項式
- = 2 : JWL 高爆発性
- = 3 : サック "Tuesday" 高爆発性
- = 4 : グルナイゼン
- = 5 : 多項式の比率
- = 6 : エネルギー漏れのある線形多項式
- = 7 : HE での点火と反応の進行
- = 8 : 簡潔な表になっている
- = 9 : 表になっている

以下のコマンドは、材料構成モデルと状態方程式モデルの両方を定義する時使用できる。ただし、粘性はデフォルトの値が無視されるので、各材料に対して記述されねばならない。

入 力	説 明
RO ρ	密度
BQT i	容積粘性タイプ i を使う
BQL QI	線形容積粘性係数
BQQ Qq	2次の容積粘性係数
HGQT i	砂時計粘性タイプ i を使う
HGQ Qh	砂時計粘性係数

HEAD (見出しが次の行に打ち込まれる)。デフォルトの見出しを取り替える。

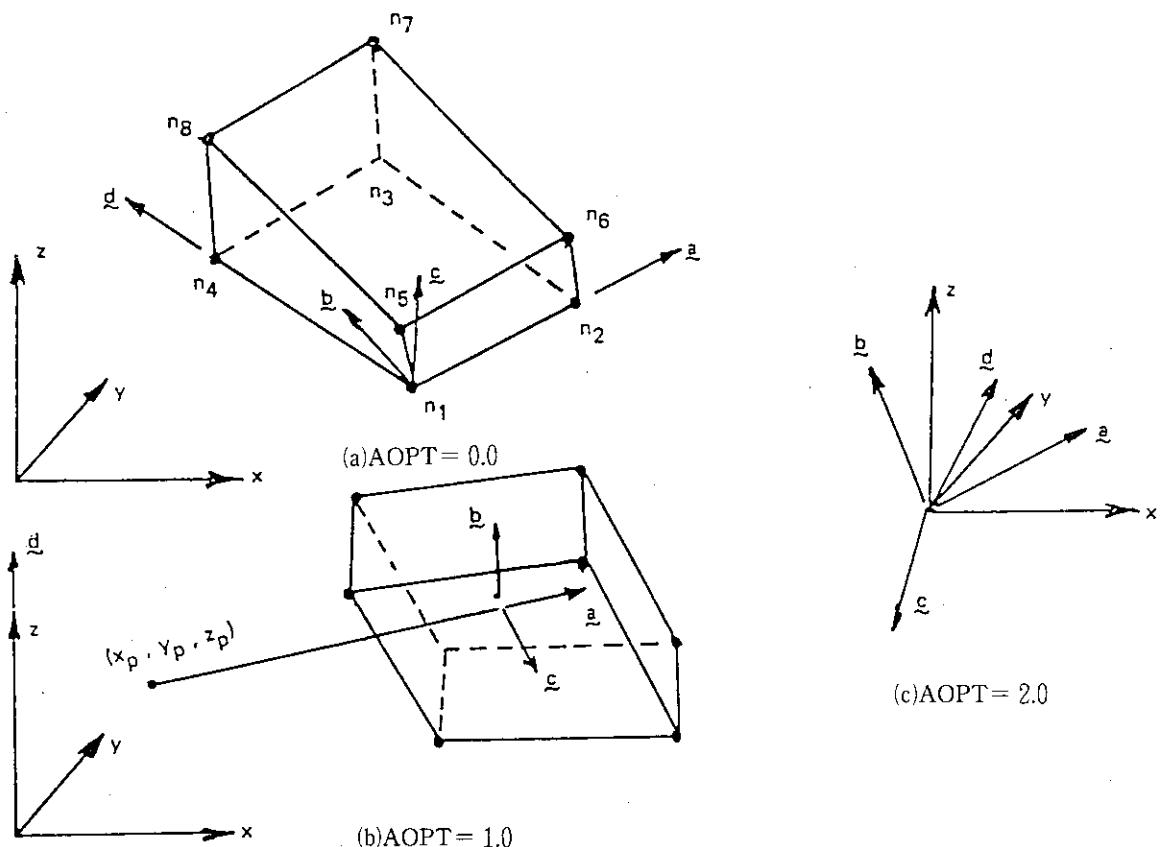
(注) HEAD は TITLE でもよい。

材料タイプ 1 (弾性)

デフォルトの見出し:	Material Type #1 (Elastic)
入 力	説 明
E E	ヤング率
PR ν	ポアソン比
ENDMAT	この材料定義の終了

材料タイプ2（直交弾性）

デフォルトの見出し:	Material Type # 2 (Orthotropic)
入 力	説 明
EA E _a	後の構成マトリックスを見よ
EB E _b	
EC E _c	
PRBA ν _{ba}	
PRCA ν _{ca}	
PRCB ν _{cb}	
GAB G _{ab}	
GBC G _{bc}	
GCA G _{ca}	
AOPT aopt	材料軸オプション（第5.1.16図） EQ.0.0: 要素節点 r ₁ , r ₂ , r ₄ である材料軸について局所的に直交性持つ。 EQ.1.0: 空間での点と要素の中心の全体的位置から決まる材料軸について、局所的に直交性を持つ。 EQ.2.0: 以下で定義されるベクトルで決まる材料軸について、全体的に直交性を持つ。

第5.1.16図 主要な材料軸を決めるオプション
(c=aχd, b=cχa)

入力		説明
XP	xp	AOPT=1 に対する定義
YP	yp	AOPT=1 に対する定義
ZP	zp	AOPT=1 に対する定義
A 1	a 1	AOPT に対する定義
A 2	a 2	AOPT に対する定義
A 3	a 3	AOPT に対する定義
D 1	d 1	AOPT に対する定義
D 2	d 2	AOPT に対する定義
D 3	d 3	AOPT に対する定義
ENDMAT		この材料定義の終了

材料の応力-ひずみ関係式は次式のとおりである。

T は変換行列, \tilde{C}_L は直交した材料軸 a, b による材料定数によって定義された構成行列で

$$\tilde{C} = \tilde{T}^t \tilde{C}_L T,$$

$$\tilde{C}_L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & \frac{\nu_{ba}}{E_b} & \frac{\nu_{ca}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ab}}{E_a} & \frac{1}{E_b} & \frac{\nu_{cb}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ac}}{E_a} & -\frac{\nu_{bc}}{E_b} & \frac{1}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ca}} \end{bmatrix}$$

ただし, $\nu_{ab}/E_a = \nu_{ba}/E_b$, $\nu_{ca}/E_c = \nu_{ac}/E_a$, $\nu_{cb}/E_c = \nu_{bc}/E_b$ である。

材料タイプ3 (動的 (Kinematic) /等方性 弾性/塑性)

デフォルトの見出し: Material Type#3 (Elastic-Plastic)	
入力	説明
E E	ヤング率
PR ν	ポアソン比
SIGY σy	降伏応力
ETAN Et	硬化率 (Hardening modulus)
BETA β'	硬化パラメータ, $0/\beta' < 1$
NPTS n	相当応力-相当塑性歪曲線 (NIKE 3 D のみ) 上の点の数。
ES σ1 σ2 … σn	相当応力
EPS ε1^p ε2^p … εn^p	相当塑性歪
ENDMAT	この材料定義の終了

等方性、動的もしくは、等方性と動的硬化の組合せは、 β' の値を 1 から 0 の間で変化させることにより記述される。 β' がそれぞれ 0 と 1 に等しいときは、第 5.1.17 図に示されるような、動的及び等方性硬化が生じる。

相当応力-相当塑性歪曲線が定義されると、等方性硬化が仮定され、ETAN と SIGY コマンドは無視される。第 5.1.18 図に示されるような曲線が、“ES” と “EPS” コマンドで定義される。相当応力は異方向 (deviatoric) 応力テンソルの項 s_{ij} で以下のように定義される：

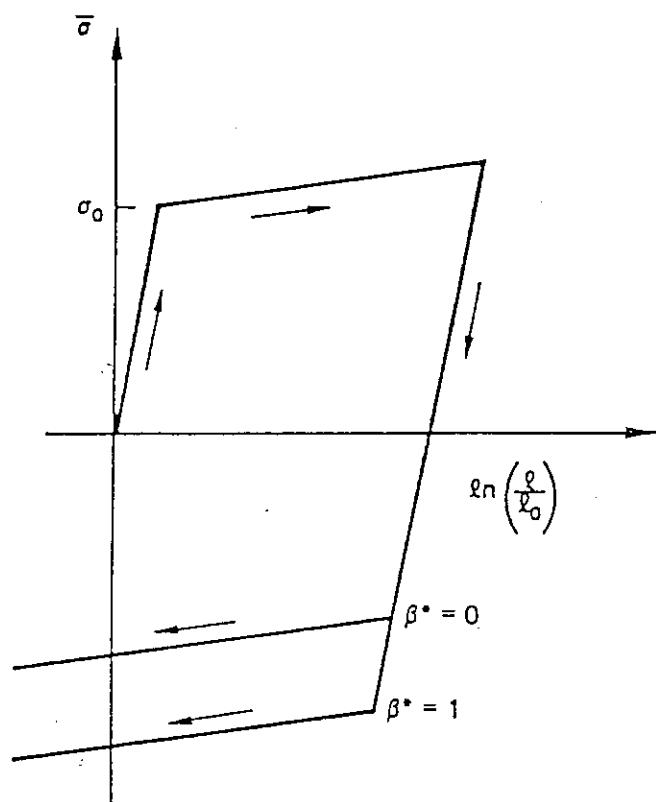
$$\sigma = (3/2 s_{ij} s_{ij})^{1/2}$$

そして、有効塑性応力は：

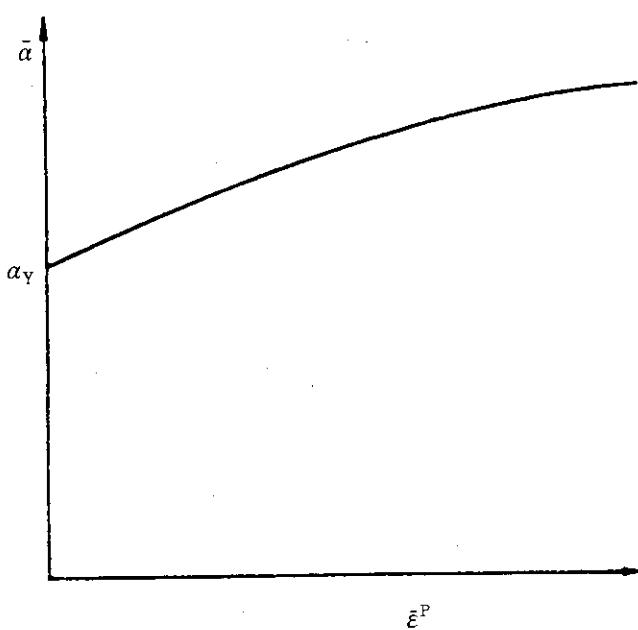
$$\epsilon_p = \int_0^t (2/3 D_{pij} D_{pij})^{1/2} dt$$

ここで、 t は時間を表し、 D_{pij} は変形テンソルの比率のうちの塑性成分である。

第 5.1.17 図等方性及び動的硬化にともなう弾性-塑性挙動。ここで、 l_0 と 1 は単一軸引張り例の無変形及び変形長さである。



第 5.1.17 図 等方硬化および移動硬化による
弾塑性挙動



第 5.1.18 図 等価応力-等価塑性歪曲線

材料タイプ4 (熱-弾性-塑性)

デフォルト見出し: Material Type #4 (Thermo-Elastic-Plastic)	
入 力	説 明
NPTS n	材料定数が定義されるための温度の値の番号
TEMP T1 T2 … Tn	温度
E E1 E2 … En	ヤング率
PR ν1 ν2 … νn	ポアソン比
ALPHA α1 α2 … αn	熱膨張係数
SIGY σy1 σy2 … σyn	降伏応力
ETAN Et1 Et2 … Etn	縦弾性係数
ENDMAT	この材料定義の終了

材料タイプ5 (土とクラッシュアブルフォーム)

デフォルト見出し: Material Type #5 (Soil and Crushable Foam)	
入 力	説 明
G G	剪断弾性係数
KU K	除荷体積弾性係数
A0 a0	降伏関数の定数
A1 a1	降伏関数の定数
A2 a2	降伏関数の定数
PC pc	引張り破壊に対する圧力カットオフ
UL uopt	荷重減少のオプション (NIKE 3D のみ) = 0: 体積破壊 = 1: 体積破壊なし
NPTS n	体積歪 vs 圧力曲線上の点の数 (n<10)
VS εv1 εv2 … εvn	体積歪の値
P p1 p2 … pn	体積歪値に対応する圧力
ENDMAT	この材料定義の終了

偏差 (DEVIATORIC) 降伏関数, ϕ , は, 第 2 定数 J2,

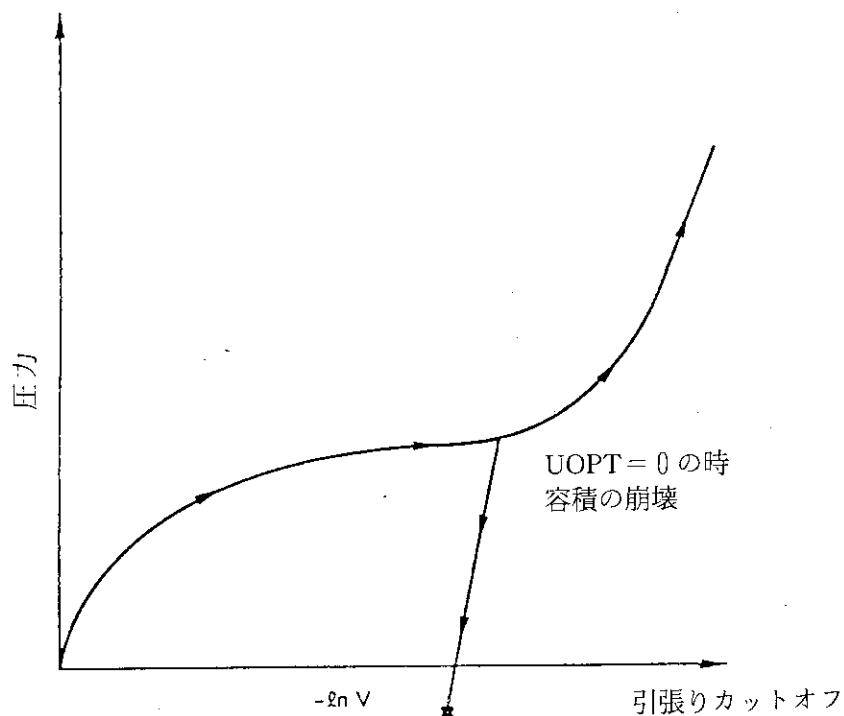
$$J2 = 1/2 \sum_{ij} s_{ij} s_{ij}$$

圧力, p, と定数 a0, a1, a2 とによって:

$$\phi = J2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2)$$

と表される。

体積歪は, 相対体積 (relative volume) V の自然対数として与えられる。圧力降下が, カットオフ値 PC より小さいときは, 圧力降下はその値に対してリセットされる。



第5.1.19図 土と潰れる泡のモデルに対する
体積歪-圧力曲線

材料タイプ6 (粘弾性)

入 力	説 明
K K	体積弾性率
GO GO	短時間剪断弾性率
GI G_∞	長時間剪断弾性率
BETA β	崩壊定数 (Decay constant)
ENDMAT	この材料定義の終了

剪断緩和の振舞い (relaxation behavior) は以下のように記述される:

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t}$$

DYNA 3D 材料タイプ7 (ゴム)

デフォルト見出し: Material Type # (Rubber)	
入 力	説 明
G G	剪断弾性係数
ENDMAT	この材料定義の終了

NIKE 3 D 材料タイプ 7 (熱直交弾性)

デフォルト見出し: Material Type # 7 (Thermal-Orthotropic)		
入力		説明
EA	Ea	材料 2 に対する構成行列を見よ
EB	Eb	"
EC	Ec	"
PRBA	ν_{ba}	"
PRCA	ν_{ca}	"
PRCB	ν_{cb}	"
ALPA	α_a	材料軸 a に沿った熱膨張係数
ALPB	α_b	材料軸 b に沿った熱膨張係数
ALPC	α_c	材料軸 c に沿った熱膨張係数
GAB	Gab	
AOPT	AOPT	材料軸オプション (第 5.1.16 図参照) = 0.0: 各要素節点 n1, n2 に記述された ϕ の値によって決められる材料軸について、局所的直交性を持つ。 = 1.0: 空間の点と要素の中心の全体的位置とから決められる材料について、局所的直交性を持つ。 = 2.0: ϕG によって決められる材料軸について全体的直交性を持つ。
RP	rp	AOPT = 1 に対して定義する。
ZP	zp	AOPT = 1 に対して定義する。
PSIG	ϕG	ラジアン単位で、AOPT = 2 に対して定義する
ENDMAT		この材料定義を終了する

DYNA 3 D 材料タイプ 8 (高性能爆薬)

デフォルト見出し: Material Type # 8 (High Explosive Burn)		
入力		説明
D	D	爆発速度
PCJ	pcj	チャップマン-ジューゲ (JOUGET) 圧力
ENDMAT		高性能爆薬定義の終了

NIKE 3 D 材料タイプ 8 (熱弾性クリープ)

デフォルト見出し: Material Type # 8 (Thermo-Elastic-Creep)	
入力	説明
NPTS n	材料定数が定義されるための温度値の番号
TEMP T 1 T 2 … Tn	温度
G G 1 G 2 … Gn	剪断弾性係数
K K 1 K 2 … Kn	体積弾性係数
ALPHA α 1 α 2 … αn	熱膨張係数
Aθ a 1 a 2 … an	クリープパラメタ
Bθ b 1 b 2 … bn	クリープパラメタ
ENDMAT	この材料定義の終了

このモデルで、G は剪断弾性係数であり、クリープ速度は以下の累乗形式で与えられ

$$|\varepsilon| = a |\sigma|^b$$

ここで、a と b は温度の関数である。このモデルは、NIKE 3 D のために、サンディア国立研究所の R. D. クリーリングによって開発、供給されたものである。

材料タイプ (ヌル物性)

デフォルト見出し: Material Type # 9 (Null Material)	
入力	説明
PC pc	圧力カットオフ
ENDMAT	この材料定義の終了

材料タイプ 10 (等方性-弾性-塑性-流体力学)

デフォルト見出し: Material Type #10 (Elastic-Plastic-Hydrodynamics)	
入力	説明
G G	剪断弾性係数
SIGY σ_y	降伏強さ
EH Eh	塑性硬化率
PC pc または -of	圧力カットオフ $= 0$: $-\infty$ でカットオフとする
A1 a1	降伏関数の定数
A2 a2	降伏関数の定数
NPTS n	降伏応力-相当塑性歪曲線または降伏応力-圧力曲線上の点の数
ES $\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n$	降伏応力
EPS $\epsilon_1 \epsilon_2 \dots \epsilon_n$	相当塑性歪
P p1 p2 ... pn	圧力
ENDMAT	構成要素の定義を終了する。

降伏応力-塑性歪曲線が定義されず、 $a_1 = a_2 = 0$ ならば、第 5.1.17 図に示される双一次応力-歪曲線が $\beta = 1$ について得られる。

降伏強さは以下のように計算される。

$$\sigma_y = \sigma_0 + Eh \epsilon - p + (a_1 + a_2 p) \max(0, p) + \sigma_y(\text{table})$$

ここで、 p は圧力である。量 Eh は、塑性硬化率で、ヤング率 E と縦弾性係数 Et によって以下のように定義される。

$$Eh = Et \cdot E / (E - Et)$$

降伏応力-塑性歪（圧力）曲線が定義されると、第 5.1.15 図に示されるような曲線が定義される。この後者の場合は、降伏応力、塑性硬化率、 a_1 、 a_2 は無視される。相当応力は偏差 (DEVIATORIC) 応力テンソル s_{ij} によって定義され:

$$\sigma = (3/2 s_{ij} s_{ij})^{1/2}$$

そして相当塑性歪は:

$$\epsilon - p = \int_0^t (2/3 D_{pij} D_{pij})^{1/2} dt$$

ここで、 t は時間を表し、 D_{pij} が変形率テンソルの塑性成分である。降伏応力塑性歪または圧力の関数として定義されるが、両方の関数となることはない。

材料タイプ 11 (温度に依存する弾性-塑性流動)

デフォルト見出し: Material Type #11 (Temperature Dependent Elastic-Plastic Hydrodynamic)

入力	力	説明
GO	GO	以下の式を見よ
SIGO	σ_0	
BETA	β	
N	n	
GAMA	γ_i	
SIGM	σ_m	
B	b	
BP	b'	
H	h	
F	f	
A	A	
T0	Tm0	
GAMO	γ_0	
SA	a	
PC	pmin または $-\sigma_f$	
EC0	EC0	冷却圧縮エネルギー係数
EC1	EC1	
EC2	EC2	
EC3	EC3	
EC4	EC4	
EC5	EC5	
EC6	EC6	
EC7	EC7	
EC8	EC8	
EC9	EC9	
SPALL	type	破碎タイプ = 0: デフォルトで "2.0" にセットする = 1: $p > p_{min}$ = 2: $\sigma_{max} > \sigma_f$ のとき要素は破碎し、引っ張り $p < 0$ は許されない; σ_{max} = 最大主応力 = 3: $p < p_{min}$ のとき、要素は破碎し、引っ張り $p < 0$ は許されない。
ENDMAT		構成要素の定義の終了

このモデルに興味のあるユーザーは、理論的基礎を与えるスタンバーグとギュアナン(GUINAN)の論文を研究しなければならない。ほかの役に立つ参考として、KOVEC のユーザーズマニュアルがある。

前の入力パラメタによって、私たちは材料融解前の剪断弾性係数 G を定義する。

$$G = G_0 [1 + bpV^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right)] e^{-\frac{fE}{E_m - E_i}}$$

ここで、 p は圧力、 V は相対体積、 E_c は冷却圧縮エネルギーである：

$$E_c(x) = \int_0^x pdx - \frac{900R' \exp(ax)}{(1-x)^{2(\gamma_0-a-1/2)}},$$

$$x = 1 - v,$$

そして、 E_m は融解エネルギーである：

$$E_m(x) = E_c(x) + 3R'T_m(x)$$

これは、融解温度 $T_m(x)$ により：

$$T_m(x) = \frac{T_{mo} \exp(2ax)}{V^{2(\gamma_0-a-1/3)}}$$

そして、 $\rho = \rho_0$ での融解温度は T_{mo} である。

以上の式において、 R' 以下のように定義される。

$$R' = R\rho/A$$

ここで、 R はガス定数、 A は原子量である。

降伏強さ σ_y は以下のように与えられる：

$$\sigma_y = \sigma_0' [1 + bp'V^{1/3} - h \left(\frac{E_i - E_c}{3R'} - 300 \right)] e^{-\frac{fE}{E_m - E_i}}$$

E_m が E_i より大きい時、ここで σ_0' は以下のようにあたえられ：

$$\sigma_0' = \sigma_0 [1 + \beta(\gamma_i + \varepsilon^{-p})]^n \leq \sigma_m$$

ここで、 γ_i は塑性歪の初期値である。 σ_0' が σ_m より大きいときは、必ず σ_0' と σ_m は等しくセットされる。材料の融解後は、 σ_y と G は 0 にセットされる。

係数 EC_0, \dots, EC_9 が定義されないと、DYNA 3D では、冷却圧縮エネルギーは 10 項の多項式展開とされる：

$$E_c = \sum_{i=0}^9 EC_i \eta^i$$

ここで、 EC_i は i 番目の係数で、 $\eta = \rho/\rho_0$ である。適合させるために最小二乗法が使われる。

材料タイプ12（等方性-弾性-塑性）

入力		説明
	G	剪断弾性係数
SIGY	σ_y	降伏強さ
EH	Eh	硬化率
K	K	体積弾性係数
ENDMAT		この材料定義の終了

圧力は、時間積分されて

$$p = -K \frac{V}{V}$$

ここで、Vは相対体積である。

材料タイプ13（破損する弾性-塑性モデル）

入力		説明
G	G	剪断弾性係数
SIGY	σ_y	降伏強さ
EH	Eh	硬化率
FS	ε_f	破損歪
FP	p_f	破損圧力 (<0.0)
K	K	体積弾性係数
ENDMAT		この材料定義の終了

相当塑性歪が破損歪に達するか、圧力が破損圧力に達するとき、材料は引っ張りに耐えられなくなり、応力の偏差成分 (deviatoric) が 0 にセットされる、すなわち、材料は流体のように振舞う。

材料タイプ14（破損する土とクラッシュアブルフォームのモデル）

このモデルに対する入力は、材料タイプ5と同様であるが、圧力が破損圧力に達すると、要素は引っ張りに耐えられなくなる。

材料タイプ15 (Hughes-Prevost土モデル)

入力		説明
F	f	ラーメンの定数(f)
G	g	ラーメンの定数(g)
GB	gb	未知の弾性係数
NI	n	降伏面番号の初期値
A 1	α 1	
K 1	k 1	
H 1	h 1	
A 2	α 2	
K 2	k 1	
H 2	h 1	
A 3	α 1	
K 3	k 1	
H 3	h 1	
A 4	α 1	
K 4	k 1	
.		
.		
.		
A 9	α 9	
K 9	k 9	
H 9	h 9	
A 10	α 10	
H 10	h 10	
K 10	k 10	
ENDMAT		この材料定義の終了

材料タイプ 16 (疑似テンソル地質学的モデル)

デフォルト見出し: Material Type #10 (Elastic-Plastic-Hydrodynamic)		
入力		説明
G	G	剪断弾性係数
PR	ν	ポアソン比
SIGY	σ_y	降伏強さ
EH	Eh	塑性硬化率
PC	pc または $-\sigma_f$	圧力カットオフ $= 0$: $-\infty$ でのカットオフとされる
A1	a1	降伏関数の定数
A2	a2	降伏関数の定数
RSC	c	率感度 (Rate sensitivity) 係数
RSA	a	率感度 (Rate sensitivity) 係数
RSE	m	率感度 (Rate sensitivity) 指数
SSM	b	歪軟化率
PFC	f	破壊後の内部摩擦係数
FS	ε_f	破損歪
NPTS	n	降伏応力-相当塑性歪曲線または降伏応力-圧力曲線上の点の数
ES	$\sigma_1 \ \sigma_2 \dots \sigma_n$	降伏応力
EPS	$\varepsilon_1 p \ \varepsilon_2 p \ \dots \varepsilon_n p$	相当塑性歪
P	$p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n$	圧力
ENDMAT		この材料定義の終了

降伏応力-塑性歪曲線が定義されず、かつ $a_1 = a_2 = 0$ ならば、第 5.1.17 図に示すような双一次応力-歪曲線が $\beta = 1$ について得られる。

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_h \varepsilon^p + (a_1 + a_2 p) \max(0, p) + \sigma_y(\text{table})$$

ここで、 p は圧力である。量 E_h は、塑性硬化率で、ヤング率 E と縦弾性係数 E_t とによって以下のように定義される。

$$E_h = E_t \cdot E / (E - E_t)$$

降伏応力-塑性歪（圧力）曲線が定義されると、第 5.1.18 図に示されるような曲線が定義される。この後者の場合は、降伏応力、塑性硬化率、 a_1 、 a_2 は無視される。相当応力は偏差 (DEVIATORIC) 応力テンソル s_{ij} によって定義され:

$$\bar{\sigma} = (3/2 s_{ij} s_{ij})^{1/2}$$

そして相当塑性歪は:

$$\dot{\varepsilon}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} D_{ij}^p D_{ij}^p \right)^{1/2} dt,$$

ここで、 t は時間を表し、 D_{pij} が変形率テンソルの塑性成分である。降伏応力塑性歪または圧力の関数として定義されるが、両方の関数となることはない。

歪硬化関数は、

$$f_{sh} = \sigma_0 + E_n \bar{\Sigma}_p + \sigma(\bar{\Sigma}_p)$$

ここで：

σ_0 = 降伏応力の初期値

E_h = 塑性硬化率 = $E_t \cdot E / (E - E_t)$

Σ_p = 相当塑性歪

$\sigma(\Sigma_p)$ = 表を調べる関数

降伏曲線オプションのパラメタによって、表を調べる関数には、塑性歪または圧力の関数である降伏応力が対応することに注意しなければならない。

圧力硬化関数は

$$f_{ph} = (a_2 + a_2 p) \max(0, p) + (p)$$

ここで： a_1, a_2 = 圧力硬化指数

$\sigma(p)$ = 表を調べる関数（上を見よ）

破壊軟化関数は、偏差 (deviatoric) 歪の結果としてのモデルの破壊と、引張り圧力の結果としての破碎にも適用される。即時に 0 にセットすることから生じる人工的なノイズを導入することなしに、その関数によって破壊を近似する、降伏強さの急激な低下が生じる。この軟化は、幾何学的には、破壊の基準に合致する時間までに生じた歪の量に応じて決まる。関数は以下のように定義され

$$ffr = \prod_{i=1}^{n-1} (frs)_i$$

ここで： n = カレントのタイムステップ

(frs) = カレントのタイムステップの結果としての残存強度の残存率

カレントの強度の残存率は以下のように定義され

$$(frs)^i = \begin{cases} 1.0, & P > P_c \text{ and } \bar{\Sigma}_p < \bar{\Sigma}_f^p \\ 1.0 / C_1 + f \bar{\Sigma}_p + f_{pc}, & p < p_c \text{ and/or } \bar{\Sigma}_p > \bar{\Sigma}_f^p \end{cases}$$

ここで：

$\bar{\Sigma}_f^p$ = 破壊の開始時における塑性歪

p_c = 破碎（圧力カットオフ）の開始時における圧力

$f \bar{\Sigma}_p$ = 歪破壊関数

f_{pc} = 引張り圧力破壊（破碎）関数

歪破壊関数は

$$0, \bar{\Sigma}^p < \bar{\Sigma}_f^p$$

$$f\bar{\Sigma}^p =$$

$$\frac{\bar{\Sigma}^p}{\bar{\Sigma}^p} - 1, \bar{\Sigma}^p > \bar{\Sigma}_f^p$$

そして、破碎関数は

$$f_{pc} = 0, p_p > p_c$$

$$\frac{p_p}{p_c} - 1, p_p \leq p_c$$

ここで p_p = 設計試験圧力

相当応力は、偏差 (deviatoric) 応力テンソル、 s_{ij} によって以下のように定義され:

$$\sigma = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2}$$

そして、相当塑性歪は以下のように:

$$\Sigma_p = \int_0^t (2/3 D_{ij} D_{ij}) dt$$

材料タイプ 17 (破損する弾性塑性モデル)

入 力	説 明
E E	ヤング率
PR ν	ポアソン率
SIGY σ_y	降伏応力
EH Eh	硬化率
PC P _c	状態方程式に対する圧力カットオフ
ENDMAT	この材料定義の終了

状態方程式形式1（線形多項式）

デフォルト見出し: Equation-of-state Form 1 (Linear Polynomial)		
入力		説明
C0	C0	以下の方程式を見よ
C1	C1	
C2	C2	
C3	C3	
C4	C4	
C5	C5	
C6	C6	
E0	E0	相対体積の初期値
V0	V0	相対体積の初期値
ENDEOS		状態方程式の定義終了

線形多項式は、内部エネルギーについて線形性を持つ。圧力は以下のように与えられ:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

ここで、 $C_2\mu^2$ と $C_6\mu^2$ 項は $\mu < 0$ ならば 0 にセットされ、 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ で ρ/ρ_0 はカレントの密度の初期値に対する比である。

状態方程式形式2（JWL）

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 2 (JWL High explosive)		
入力		説明
A	A	以下の方程式を見よ
B	B	
R1	R1	
R2	R2	
OMEGA	ω	
E0		内部エネルギーの初期値
V0	V0	相対体積の初期値
ENDMAT		状態方程式の定義終了

JWL 状態方程式は圧力を以下のように定義する。

$$P = A(1 - \omega/R1V)e^{-R1V} + B(1 - \omega/R2V)e^{-R2V} + \omega E/V$$

そして、高性能火薬を熱発させるために使用される。

状態方程式形式3（サック）

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 3 ([ack] uesday High Explosive)

入力	説明
A1	A1
A2	A2
A3	A3
B1	B1
B2	B2
E0	E0
V0	V0
ENDEOS	状態方程式の定義終了

サックの状態方程式は以下のように圧力を定義し

$$p = \frac{A_3}{V^{A_1}} e^{-A_2 V} \left(1 - \frac{B_1}{V}\right) + \frac{B_2}{V} E$$

高性能火薬を熱発させるために使用される。

状態方程式形式4（グルナイゼン）

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 4 (Gruneisen)

入力	説明
SP	C
S1	S1
S2	S2
S3	S3
GAMMA	γ_0
SA	a
E0	E0
V0	V0
ENDEOS	状態方程式の定義終了

三次元衝撃波速度-粒子(PARTICLE)速度を伴うグルナイゼンの状態方程式により、圧縮された材料に対する圧力が以下のように定義され

$$P = \dots * \quad$$

膨張した材料にたいしては

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E.$$

ここで、C は us-up 曲線の交点で、S1, S2, S3 は us-up 曲線の傾きの係数、 γ_0 はグルナイ

ゼンのガンマであり、 a は γ_0 に対する 1 次の体積修正である。

$$p = \frac{p_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a_\mu) E.$$

状態方程式形式 5 (多項式の比率)

デフォルト見出し: Equation-of-state Form 5 (Ratio of Polynomials)		
入力		説明
A 10	A 10	以下の方程式を見よ
A 11	A 11	
A 12	A 12	
A 13	A 13	
A 20	A 20	
A 21	A 21	
A 22	A 22	
A 23	A 23	
A 30	A 30	
A 31	A 31	
A 32	A 32	
A 33	A 33	
A 40	A 40	
A 41	A 41	
A 42	A 42	
A 43	A 43	
A 50	A 50	
A 51	A 51	
A 52	A 52	
A 53	A 53	
A 60	A 60	
A 61	A 61	
A 62	A 62	
A 63	A 63	
A 70	A 70	
A 72	A 72	
A 73	A 73	
ALPHA	α	
BETA	β	
A 14	A 14	
A 24	A 24	
COEF	A 10 … A 24	以上の 32 個の係数を現れたのと同じ順に列挙する。
E 0	E 0	内部エネルギーの初期値
V 0	V 0	内部エネルギーの初期値
ENDEOS		状態方程式定義の終了

多項式の比率の状態方程式により圧力は以下の様に定義され

$$p = \frac{F_1 + F_2 E + F_3 E^2 + F_4 E^3}{F_5 + F_6 E + F_7 E^2} (1 + a\mu)$$

ここで

$$F_i = \sum_{j=0}^n A_{ij} \mu_j \quad \begin{array}{ll} n=4 & \text{if } i < 3 \\ n=3 & \text{if } i \geq 3 \end{array}$$

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1$$

展開域では、 F_1 は $F'_1 = F_1 + \beta\mu^2$ に置き換えられる。

状態方程式形式 6 (エネルギー漏れのある線形多項式)

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 6 (Linear Polynomial with energy leak)

入 力	説 明
C1 C1	状態方程式形式 1 を見よ
C2 C2	
C3 C3	
C4 C4	
C5 C5	
C6 C6	
E0 E0	内部エネルギーの初期値
V0 V0	相対体積の初期値
CN cn	エネルギー蓄積率を与える時間歴曲線の曲線番号
ENDEOS	状態方程式定義の終了

状態方程式形式 7 (HE での点火と反応の進行)

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 7 (Ignition and Growth of Reaction in High Explosive)

入力		説明
AP	Ap	以下の方程式を見よ
BP	Bp	以下の方程式を見よ
R1P	R1p	以下の方程式を見よ
R2P	R2p	以下の方程式を見よ
G	G	第2点火係数
WPCP	$\omega_p C_p$	以下の方程式を見よ
AE	Ae	以下の方程式を見よ
BE	Be	以下の方程式を見よ
WECE	$\omega_e C_e$	以下の方程式を見よ
R1E	R1e	以下の方程式を見よ
R2E	R2e	以下の方程式を見よ
FCRIT	FCRIT	臨界反応率
I	I	第1点火係数
H	H	反応進行係数
Z	z	圧力指数
X	x	以下の方程式を見よ
Y	y	以下の方程式を見よ
CP	Cp	反応生成物の熱容量
CE	Ce	反応しなかった HE の熱容量
M	m	(一般的に 0)
E0	E0	内部エネルギー
T0	T0	温度の初期値 (°K)
ENDEOS		状態方程式定義の終了

JWL 状態方程式により未反応の HE の圧力が以下の様に定義され

$$p_e = A_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R1_e V_e} \right) e^{-R1_e V_e} + B_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R2_e V_e} \right) e^{-R2_e V_e} + \frac{\omega_e E_e}{V_e}$$

ここで, V_e は相対体積, E_e は内部エネルギー, 定数 A_e , B_e , ω_e , $R1_e$, $R2_e$ は入力された定数である。同様に, 反応生成物の圧は別の JWL 形式で以下のように定義され

$$p_p = A_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R1_p V_p} \right) e^{-R1_p V_p} + B_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R2_p V_p} \right) e^{-R2_p V_p} + \frac{\omega_p E_p}{V_p}$$

未反応の火薬と反応生成物の混合物は, 反応率 F で定義される ($F = 0$; 反応なし, $F = 1$; 火薬は完全に生成物に変化した)。圧力と温度は平衡状態で考えられ, 体積ら加え合わせられるとする。

$$V = (1 - F)V_e + FV_p$$

材料タイプ13に対する反応率は

$$\frac{dF}{dt} = I(FCRIT-F)^y(V_e^{-1}-1)^z + G(V_e^{-1}-1)^z + H(V_G^{-1}-1) + H(1-F)^y F^x p^z$$

$$\times (V_p^{-1}-1)^m$$

ここで, I, G, H, x, y, z, m (一般的に m=0) は入力定数である。

JWL 状態方程式と反応率は4つの火薬: PBX-9404, RX-03-BB, PETN, TNT に対する 1, 2 次元衝撃波起動と熱発のデータに適する。計算法の詳細は, Cochran と Chan により記述されている。詳しい1次元計算と4つの火薬に対するパラメータは, Lee と Tarsler により与えられる。

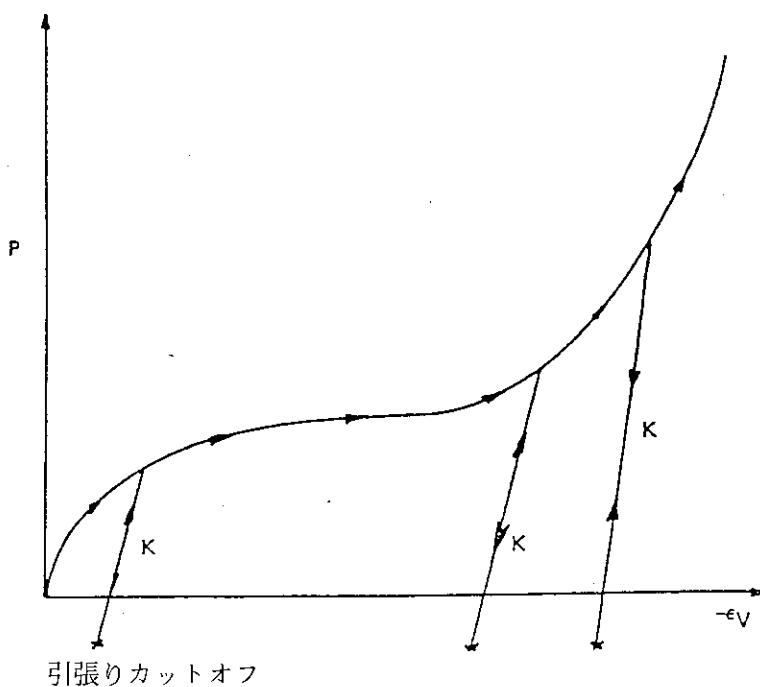
状態方程式形式8 (簡潔な表形式)

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 8 (Tableted Compaction)		
入 力		説 明
NPTS n		表になった曲線の点の数
LNV $\varepsilon v_1, \varepsilon v_2 \dots \varepsilon v_n$		体積歪点, $\varepsilon v_i = \ln V_i$
PC C1, C2 … Cn		C (εv) に対する曲線上の点
PT T1, T2 … Tn		T (εv) に対する曲線上の点
KU K1, K2 … Kn		荷重なしの体積弾性係数に対する曲線上の点
GAMMA γ		下の方程式を見よ
E0 E0		内部エネルギーの初期値
V0 V0		相対体積の初期値
ENDEOS		状態方程式の定義の終了

簡潔な表になったモデルは、内部エネルギーについて線形である。圧力は荷重がかかったとき、以下のように定義される。

$$p = C(\varepsilon v) + \gamma T(\varepsilon v) E$$

体積歪 εv は、相対体積の自然対数で与えられる。荷重なしの状態は、過重なしの体積弾性係数について、圧力カットオフに対して生じる。再荷重は、必ず荷重なし状態の起こった点まで、荷重なし曲線上をなぞり、荷重曲線へ続く。(第5.1.20図参照)。2点より多く10点以下の点が、表の関数を定義するのにしようされ、DYNA 3D では、必要ならば圧力を求めるために補外も行われる。



第5.1.20図 簡潔化された状態方程式形式8に対する圧力対体積歪曲線。(簡潔化された状態では、荷重なし体積弾性係数は、体積歪の頂点による。)

状態方程式形式9(表形式)

デフォルト見出し: Equation-of-State Form 9 (Tabulated)		説明
入力		
NPTS	n	表になった曲線の点の数
LNV	$\epsilon v_1 \ \epsilon v_2 \dots \epsilon v_n$	体積歪点, $\epsilon_{vi} = \ln V_i$
PC	$C_1 \ C_2 \dots C_n$	$C(\epsilon v)$ に対する曲線上の点
PT	$T_1 \ T_2 \dots T_n$	$T(\epsilon v)$ に対する曲線上の点
KU	$K_1 \ K_2 \dots K_n$	荷重なしの体積弾性係数に対する曲線上の点
GAMMA	γ	下の方程式を見よ
E0	E_0	内部エネルギーの初期値
V0	V_0	相対体積の初期値
ENDEOS		状態方程式の定義の終了

表になった状態方程式モデルは、内部エネルギーについて線形である。圧力は以下のように定義される。

$$p = C(\epsilon v) + \gamma T(\epsilon v) E$$

体積歪 ϵv は、相対体積の自然対数で与えられる。2点より多く10点以下の点が、表の関数を定義するのにしようされ、DYNA 3Dでは、必要ならば圧力を求めるために補外も行われる。

12 TOPAZ材料

材料タイプ1（等方性）		
入力		説明
RO	ρ	密度
TLHA	t	潜熱が吸収または放出される温度
LH	h	潜熱
TGC	lc	熱生成率曲線の番号
TGM	r	熱生成率の乗数
C	c	熱容量
K	k	熱伝導性
ENDMAT		この材料モデルの終了

材料タイプ2（直交性）

入力		説明
RO	ρ	密度
TLHA	t	潜熱が吸収または放出される温度
LH	h	潜熱
TGC	lc	熱生成率曲線の番号
TGM	r	熱生成率の乗数
C	c	熱容量
K1	k1	局所的1軸方向の熱伝導性
K2	k2	局所的2軸方向の熱伝導性
K3	k3	局所的3軸方向の熱伝導性
ENDMAT		この材料モデルの終了

材料タイプ3（等方性かつ温度依存性）

入力		説明
RO	ρ	密度
TLHA	t	潜熱が吸収または放出される温度
LH	h	潜熱
TGC	lc	熱生成率曲線の番号
TGM	r	熱生成率の乗数
NPTS	n	温度点の数
TEMP	T1 T2 … Tn	温度
c	c1 c2 … cn	熱容量
K	k1 k2 … kn	熱伝導性
ENDMAT		この材料モデルの終了

材料タイプ4（直交性かつ温度依存性）

入力		説明
RO	ρ	密度
TLHA	t	潜熱が吸収または放出される温度
LH	h	潜熱
TGC	lc	熱生成率曲線の番号
TGM	r	熱生成率の乗数
NPTS	n	温度点の数
TEMP	T ₁ T ₂ ... T _n	温度
C	c ₁ c ₂ ... c _n	熱容量
K1	(k ₁) ₁ (k ₁) ₂ ... (k ₁) _n	局所的1軸方向の熱伝導性
K2	(k ₂) ₁ (k ₂) ₂ ... (k ₂) _n	局所的2軸方向の熱伝導性
K3	(k ₃) ₁ (k ₃) ₂ ... (k ₃) _n	局所的3軸方向の熱伝導性
ENDMAT		この材料モデル終了

静電材料

材料タイプ1（等方性）		
入力		説明
E	e	電気許容量
RO	ρ	体積充電密度
ENDMAT		この材料モデルの終了

解析のオプションはコードに依存する。オプションは、INGRID の入力ファイルの制御部分か
画像処理フェイズでセットできる。

13 DYNA 解析オプション

入力		説明
ITSS	Δt_0	午間ステップサイズの初期値。これは DYNA 3D に対するオプション入力である。 Δt_0 が 0 のときは、DYNA 3D では時間ステップサイズの初期値がとられる。
TSSF	s	時間ステップサイズの倍数
TERM	t	時間 t において、動的時間積分を終了させる。
GRAV	gx gy gz	重力加速度ベクトル
PRTI	Δt	高速プリンタへの節点と要素のデータの転送間隔
PLTI	Δt	TAURUS ポスト処理への節点と要素のデータの転送間隔

入 力	説 明
TEO i	熱効果オプション = 0: 热効果なし = N: 節点温度は入力で定義され、時間関数に比例する。Nは荷重曲線番号である。 = -1: 各時間ステップで、新しい温度状態がディスクファイルから読み込まれる。各温度状態の初めにある時間ワードは無視される。 = -2: 各時間ステップで、温度状態がディスクファイルの温度状態から補間で求められる。そのため、各温度状態の初めにある時間ワードが使用される。 = -3: ディスクファイルに含まれる温度は1つの状態のみである。初期状態では、0とされる。 ブロード(Brode)関数パラメタを定義する。
BRODE	オプション:
YLD yld	降伏点 (Ktons)
HEIGHT h	破裂の高さ
XBO x	INGRID の単位でのブロードの原点(空間、時間)の座標
YBO y	
ZBO z	
CL cl	換算係数 - ft から DYNA の長さの単位へ (デフォルト = meters)
CT ct	換算係数 - ms から DYNA の時間単位へ (デフォルト = seconds)
CP cp	換算係数 - psi から DYNA の圧力単位へ (デフォルト = Pascals)
;	ブロード関数入力の終了

注 “RANG”, “COEF”, “GRUN”が記述されると、DYNAでは“modified”ブロード関数が、使用される；さもなくば、直線ブロードが使用される。

入 力	説 明
RANG rl…r5	ブロード関数に対する変動(range)値
COEF cl…c8	ブロード関数に対する係数値
GFUN gl…g7	ブロード関数に対するGFUNC値

ブロード関数は、荷重曲線番号-1とともに圧力面に適用される。

14 NIKE 解析オプション

入力		説明
ANAL	n	解析タイプ ="STAT", 静的解析 (デフォルト) ="DYN", 直接時間積分 ="DYN5", 静的初期化をともなう直接時間積分 ="EIGE", 固有値抽出 (EXTRACTION)
KEIG	n	固有ベクトルの数
BWMO	n	周波数帯 (BANDWIDTH) 広さの最小化オプション ="ON", 解析コードで最小化を実行する (デフォルト) ="OFF", 周波数帯の最小化を行わない。
TERM	t	時間 t で動的時間積分を終了させる。この命令が "DELT" 命令の代わりに使用されると、動的時間ステップサイズが計算される。
GRAV	gx gy gz	重力加速度ベクトル
NSTEP	n	必要な時間ステップの数
DELT	Δt	KIKE 3 D に対する時間ステップサイズ
IPRT	n	高速プリンタへの節点と要素のデータの転送間隔
IPLT	n	TAURUS ポスト処理への節点と要素のデータの転送間隔
TEO	i	熱効果オプション = 0 : 熱効果なし = N : 節点温度は同力で定義され、時間関数に比例する。N は荷重曲線番号である。 =-1 : 各時間ステップで、新しい温度状態がディスクファイルから読み込まれる。各温度状態の初めにある時間ワードは無視される。 =-2 : 各時間ステップで、温度状態がディスクファイルの温度状態から補間で求められる。そのため、各温度状態の初めにある時間ワードが使用される。 =-3 : ディスクファイルに含まれる温度は1つの状態のみである。初期状態では、0とされる。
NBSR	n	剛性マトリックス変更の間の時間ステップの数
NBEI	n	平衡までの反復の間の時間ステップの数
NIBSR	n	剛性マトリックス変更の間許容される平衡反復の最大数。NIKE 3 D でのデフォルトは、推奨値の 10 である。

入 力		説 明
MSRF	n	時間ステップ当たりの剛性変更の最大数。NIKE 3Dでのデフォルトは、推奨値の5である。
DCTOL	tol	変位の収束許容値。NIKE 3Dのデフォルトは0.001。
ECTOL	tol	エネルギーの収束許容値。NIKE 3Dのデフォルトは0.01。
SBRF	n	再スタートファイルを生成する間の時間ステップの数。0ならば、NIKE 3Dでは、その終了時の通りに再スタートファイルを作る。
NSMD	n	非線形解法 =“BFGS”: BFGS法（デフォルト） =“BROY”: ブロイデンの方程 =“MODN”: 改良(MODIFID)ニュートン法

15 TOPAZ 解析オプション

入 力		説 明
IUNIT	n	温度単位 =“DIME”: 無次元 =“CENT”: 摂氏 =“FAHR”: ファーレンハイト =“KELV”: ケルビン =“RANK”: ルーチン(ROUTINE)
BWMO	n	バンド巾(BANDWIDTH)広さの最小化オプション =“ON”: バンド巾広さを最小化する。 =“OFF”: バンド巾の最小化を行わない。 (デフォルト=“ON”)
FLUX	n	節点熱流束計算 =“ON”: 計算する。 =“OFF”: 計算しない。 (デフォルト=“OFF”)
PHASE	n	相変化記号 =“ON”: 相変化計算をする。 =“OFF”: 相変化計算をしない。 (デフォルト=“OFF”)
RADIATION	n	輻射(RADIATION)計算タイプ “VIEW”: 観察ファクタ =“EXCH”: 交換ファクタ
STEADY		定常状態での解析
TRANSIENT		遷移状態での解析
STEP	n	時間ステップコード =“FLXE”: 固定された時間ステップ =“VARI”: 可変の時間ステップ

入 力		説 明
IPRT	n	出力プリントアウトの間の時間ステップの数
IPLT	n	グラフィックデータベースの出力の間の時間ステップの数
SBRF	n	再スタートした転送中の時間ステップの数
NIPI	x	最初のニューマーク (Newmark) 積分パラメタ (デフォルト = 0.5)
TIMIN	t	問題の時間の初期値
TERM	t	問題の時間の最終値
DELT	Δt	固定時間ステップに対する時間ステップサイズと可変時間ステップに対する時間ステップ初期値。
DTMIN	Δt	最小時間ステップサイズ
DTMAX	Δt	最大時間ステップサイズ
DCMX	Δt	時間ステップ減少時の各時間ステップで必要とされる最大の温度変化。
MFTS	t	増加/減少時間ステップに対する加減ファクタ
LINEAR		問題は線形
NONLINEAR		問題は非線形
NBSR	n	伝導マトリックス変更の間の時間ステップの数 (デフォルト = 1)
NBEI	n	平衡に達するまでの反復の間の時間ステップの数 (デフォルト = 1)
MSRF	n	時間ステップ当たりの伝導マトリックス変更の最大数 (デフォルト = 10)
NIBSR	n	1つの伝導マトリックス変更当たりに許容される平衡反復の最大数 (デフォルト = 1)
DCTOL	tol	平衡反復に対する収束許容値 デフォルト = 0.0001)
RELAX	r	緩和 (RELAXATION) パラメタ (デフォルト = 1)
NSSD	n	輻射観察ファクタ計算に対する面の細分割数 (デフォルト = 5)
SBC	s	ステファンーボルツマン定数
RCTOL	s	輻射性 (RADIOSITY) 収束許容値
MRDI	m	輻射性反復の最大数
RBAND	m n	輻射周波数帯。波長の中断点 (BREAK POINT) 番号は m で、曲線番号は n である。
$\lambda_1 \ \lambda_2 \dots \lambda_m$		波長中断点
$(E_1)_1 \ (E_2)_1 \dots (E_m)_1$		曲線 1 に対する放射性
$(E_1)_n \ (E_2)_n \dots (E_m)_n$		曲線 n に対する放射性

6. 計算結果の図形表示プログラム

6.1 TAURUS⁽¹⁵⁾

6.1.1 概要

TAURUS は DYNA 3D, TOPAZ 3D などの計算結果の図形処理プログラムとして、米国ローレンス・リバモア国立研究所において開発されたものである。

TAURUS の原版は、米国ブリガムヤング大学において開発された MOVIE-BYU であり、変形図、時刻歴応答図、等高線図などの図形表示に優れており、特にカラーアニメーション機能に優れている。TAURUS は会話型のプログラムであるが、一般に使用範囲が広いカルコンプロッタによって図形表示できるように変換した。これによって、計算機のレーザープリンターによって図形表示が可能となった。

6.1.2 入力データ

1. Phase I と II に共通な入力

入 力	説 明
T または END	終了の入力である。
HEAD	全てのプロット図の見出しを決める。見出しは入力データの直後の行に挿入する。会話形式で入力される場合は見出しの入力促進が行われる。
C	コメント。

2. Phase I の入力

入 力	説 明
DAM	全ての材料を表示する。
M m	材料 m のみ表示する。
P m	パート m のみ表示する。
DMS n m ₁ m ₂ …m _n	材料番号 m ₁ ,m ₂ …m _n の一連の n 個の材料を表示する。
DPS n p ₁ p ₂ …p _n	パート番号 p ₁ ,p ₂ …p _n の一連の n 個のパートを表示する。
CMN e ₁ e ₂ m	要素 e ₁ から e ₂ の材料番号を m に変更する。
TIME t	時刻 t に対応する状態をメモリに読み込む。時刻 t に丁度対応する状態がデータベース中になければ隣接する 2 つの状態から、時刻 t の状態を内挿する。また、時刻 t がデータベース中の最大および最小時刻を越えている場合、最後あるいは最初の 2 つの状態から時刻 t の状態を各々外挿する。
STATE n	状態 n がメモリに読み込まれる。
DSF s	変位量を s 倍する。ディフォルト値は 1 である。
DSFS s _x s _y s _z	x,y,z 方向の変位量を各々 s _x ,s _y ,s _z 倍にする。
XSCALE s	初期形状の x 成分を s 倍にする。
YSCALE s	初期形状の y 成分を s 倍にする。
ZSCALE s	初期形状の z 成分を s 倍にする。
UDG n	n が 1 の時は破線で、n=-1 の時は実線で、非変形時の形状をプロットする。n=0 とすれば、この入力は解除される。
CONTOUR c	表示された全ての材料上に成分番号 c の等価線を作る。成分番号を第 6.1.1 表に示す。
WV c w _x w _y w _z	V _c を節点での成分 c の値とし、節点の x,y,z 座標に各々 V _c w _x ,V _c w _y ,V _c w _z を加えてメッシュを歪ませ、それを表示する。平面モデルにおいて、その平面の垂線

入 力	説 明
	に対する傾きのコサインの倍数がスケールファクタである時、この入力は最適である。成分番号は第 6.1.1 表に示すとおりである。

第 6.1.1 表 要素変数の成分

六面体	1	x	薄 膜 板 シェル	26	M _{xx} 曲げ合成
	2	y		27	M _{yy} 曲げ合成
	3	z		28	M _{xy} 曲げ合成
	4	xy		29	Q _{xx} せん断合成
	5	yz		30	Q _{yy} せん断合成
	6	zx		31	N _{xx}
	7	相当塑性歪み		32	N _{yy}
	8	圧力あるいは平均歪み		33	N _{xy}
	9	Von Mises		34	表面応力 N _{xx} /t + 6 M _{xx} /t ²
	10	1 次主偏差 最大		35	表面応力 N _{xx} /t - 6 M _{xx} /t ²
	11	2 次主偏差		36	表面応力 N _{yy} /t - 6 M _{yy} /t ²
	12	3 次主偏差 最小		37	表面応力 N _{yy} /t + 6 M _{yy} /t ²
	13	最大せん断		38	表面応力 N _{xy} /t - 6 M _{xy} /t ²
	14	1 次主		39	表面応力 N _{xy} /t + 6 M _{xy} /t ²
	15	2 次主		40	相当上面表面応力
	16	3 次主		41	相当不面表面応力
	17	x 変位		42	最大相当表面応力
薄 膜 板 シェル	18	y 変位			
	19	z 変位			
	20	最大変位			
	21	x-速度			
	22	y-速度			
	23	z-速度			
	24	最大速度			
	25	温度			

1 ~ 16 の丁号に 100,200,300,400 を足すことにより極小歪み, Green-st.Venant 歪み, Almansi 歪みと速度とが各々得られる。

入 力	説 明
WC c w _x w _y w _z	"WV" と同様であるが、この入力では、歪められた形状の上に等値線がプロットされる。
RANGE r ₁ r ₂	等値線の値の範囲を r ₁ から r ₂ とする。もし定義されなければ、最適値が決められる。この入力を解除する時は r ₁ =r ₂ =0 でこの入力を繰返す。
NUMCON n	n 本の等値線をプロットする。デフォルト値は 9 である。
RX θ	画面座標系で、対象物を x 軸について反時計方向に θ 度だけ回転させる。
RY θ	同様に y 軸について行う。
RZ θ	同様に z 軸について行う。
TRANS x y z	モデルの局部原点を新しい位置 (x,y,z) へ移動する。
XTRANS Δx	図を座標中で距離 Δx だけ移動する。
YTRANS Δy	図を座標中で距離 Δy だけ移動する。
ZTRANS Δz	図を座標中で距離 Δz だけ移動する。
CENTER	形状を中央に置く。
WHERE	モデルでの量をプリントし、第 6.1.3 表にあるようなプロットを行う。

第 6.1.2 表 "ANIMATE" の入力で使用できるオプション

入 力	説 明
TRANS Δx Δy Δz	n フレーム中でモデルを距離 (Δx,Δy,Δz) 移動する。
ROTA θ _x θ _y θ _z	n フレーム中でモデルを角度 (θ _x ,θ _y ,θ _z) 回転する。
VIBR m	n フレーム中モデルを m 回振動させる。
SFEX Δs	n フレーム中分散させるスケールファクタを Δs だけ大きくする。("EXPLODE" と "ESF" を参照のこと。)
DELD Δd	原点からの距離を Δd だけ変更する。正の値は縮小に負の値は拡大となる。
PVT p ₁ p ₂ θ _x θ _y θ _z	部分 p ₁ から p ₂ を "PIVOT" の入力で指定された相対原点に対して θ _x ,θ _y ,θ _z 各々回転させる。

入 力	説 明
FOLLOW n	節点 n を常に画面中央に置く。
SUMM	座標と変位量の最大値、最小値を出力する。また、DIST,ANGLE,ZMIN,ZMAX の値も得られる。
ANGLE θ	視点の角度で θ 度はデフォルト値 45° である。角度が小さいと透視性が小さくなり、角度が大きいと透視性を過大化させる。
Z zmin	前方の切りつめ面を zmin とする。

入 力	説 明
Z zmax	後方の切りつめ面を zmax とする。
SLICE zmin zmax	モデルを z-最小平面上でスライスし、直方体であるかのようにスライス面をキャップし、必要ならば表示のためにスカラ関数を、新表面まで内挿する。
DIST d	モデルの原点と画面空間の原点間の距離を d とする。初期の d は、x,y,z 範囲の最大値の 1.75 倍がデフォルト値として設定されている。d の値を大きくするとモデルは縮小され、小さくすると拡大あるいはズームされる。
TRIAD	方向軸を画面左下隅に描く。この方向軸は、モデルが回転すると、そのモデル座標系に追随する。本オプションは "RESTORE" か、この入力を再度入力することにより解除される。
VIEW または V	陰線処理した形状をプロットや表示する。
DRAW または D	陰線処理しない形状をプロットや表示する。
PVIEW または PV	各部分を陰線処理して表示する。
PDRAW または PD	上と同じ。但し陰線処理を行わない。
NDPLT	節点番号付きの節点を示したメッシュを表示する。
EXPLODE n Δx Δy Δz p ₁ p ₂ …p _n	p ₁ ,p ₂ ,…,p _n の n 個の部分を局部座標方向 v = (Δx,Δy,Δz) に移動し分散される。部分 p ₁ は s v 移動し、p ₂ は s (n-1) v, p ₃ は s (n-3) v というように移動する。スケールファクタ s はデフォルト値は 1 であるが、下記の "ESF" で設定することができる。 "CENTER" の入力で本画面の中央を定めることができる。
ESF s	"EXPLODE" の入力で与えられるベクトル成分のスケールファクタを設定する。
PIVOT p ₁ p ₂ axis θ x ₀ y ₀ z ₀	部分 p ₁ から p ₂ を axis 軸 (x,y,z のどれかを指定する) のまわりに θ 度回転される。相対的原点 (x ₀ ,y ₀ ,z ₀) は回転を行わせる点を通り、指定された軸と平行な線のまわりを回転する。
STICK	ビーム要素を、細長い 6 面体で表示するより、むしろ長い線分として表示する (デフォルト)。この入力は、全ての要素がビーム要素である時に作用する。
BEAM	ビーム要素を細長の 6 面体として表示する (デフォルト)。
RESTORE	すべての移動、相対原点を元に戻し、鏡面対称位置の部分もすべて元に戻し、すべての回転マトリックスを単位マトリックスへと初期化し、スケールファクタを 1 にリセットし、絵を中央に戻す。

入 力	説 明
REVERSE	データベース中のすべての多角形が、ディフォルトの反時計回りの方向づけでなく、時計回りの方向づけがなされている。もし両方の方向づけがある時は、“MIXED”の入力の使用がよい。
MIXED	データベース中の多面体の番号づけが終始一貫していない。
POOR	いかなる多面体においても、外側への垂線が原点より反対側にあるものは描かないし、陰面アルゴリズム処理も行わない。直方体のみがデータベース中の要素である場合はディフォルトとなる。
RAXY	すべての部分を xy 平面に対し、鏡面对称にする。その図形の方向づけは、原図形と同じかあるいは 180° 回転させたものである。モデルとその対称部分は自動的に中央位置にされる。
RAYZ	上記と同様のことを yz 平面について行う。
RAZX	上記と同様のことを zx 平面について行う。
R n m k	この入力を繰返すと直後の入力が状態 n から増分 k で状態 m に至るまで繰返される。この入力は “VIEW” と “CONTOUR” に使用できる。
RMC n m k ℓ	複数の入力を繰返す。直後から ℓ 行までの入力が状態 n から増分 k で m に至るまで繰返される。この入力は I/O の集中的 “R” の入力の連続使用に際して一般的に使用される。
ANIMATE n- (オプション) ENDA	次の “VIEW” “DRAW” あるいは “CONTOUR” の入力により n フレームの間にモデルを移動し、回転し、振動し、分散させたりすることができる。この様な動きは、この入力のオプション “TRNS”, “ROTA”, “VIBR”, “SFEX” と DELD で制御される。それらのオプションは第 6.1.2 表に示されている。入力 “ENDA” は、オプション入力の最後を示す。もし、 “VIEW”, “DRAW” あるいは “CONTOUR” がタイプされれば、 “ENDA” の入力があるものとみなされる。

第6.1.3表 節点における時刻経過プロットのための成分番号

番号	成 分	番号	成 分
1	x-変位	6	z-速度
2	y-変位	7	x-加速度
3	z-変位	8	y-加速度
4	x-速度	9	z-加速度
5	y-速度	10	温度

入 力	説 明
PAUSE または STOP	FORTRAN の PAUSE が作動する。 実行は行送りがなされた後に継続される。
TRPT	"VIEW" と "DRAW" の入力のためにタイミングデータを出力する。 この入力は "TRPT" の再入力が "RESTORE" の入力により解除される。
EXPAND i	"I NEED MORE FREE" というエラーメッセージが現われた場合、 この入力で FREE 配列のサイズを大きくできる。 ディフォルトの i の値が適当であるので、 通常はこの入力は必要でない。 下記の "FREE" の入力で使用されている i の値を知ることができる。
FREE	現在の FREE 配列のサイズの大きさを n 文字 / 行に変更する。
PHS 2	Phase II に移行する。

* * * 以下の全ての入力は連続色調に関する入力である。 * * *

入 力	説 明
COLOR	図形表示とプロットファイル作成を停止し、 カラーオプションを作動させる。 材料の色はディフォルト色に設定され、 バックグラウンドは黒に、 画像の散光の値は 1 / 10 に設定される。 "CONTOUR" の入力がタイプされれば、 材料は全て縁取りられるよう設定されている。 本オプションは "TV" の入力で解除できる。
CB red green blue	カラーのバックグラウンドをリセットする。
CM m ₁ m _n red green blue	m ₁ から m _n までの材料の色をリセットする。
CP p ₁ p _n red green blue	p ₁ から p _n までの部分の色をリセットする。
CFM m ₁ m _n i	材料 m ₁ から m _n までの縁取りに関し、 i = 1 の時はそれを行い、 i = 0 の時は行わない様にする。
CFP p ₁ p _n i	部分 p ₁ から p _n までの縁取りに関し、 i = 1 の時はそれを行い、 i = 0 の時は行わない様にする。
SFC n r ₁ g ₁ b ₁ … r _n g _n b _n	赤 r _i 、 緑 g _i 、 青 b _i の色調を決める。 デフォルト値は 5 であり、 5 色は青、 シアン、 緑、 黄、 赤である。

入 力	説 明
FLAT	要素に単調な陰影を施す(ディフォルト)。光源は切りとられたヴィューボリュームの先端にある。角度は、要素の垂線と、光源と要素上の垂線を立てた点を結ぶ線とで定義される。光の強さはこの角度のコサインの2乗で変化する。本オプションでは光の強さは要素境界では調和しない。
SMOOTH	要素陰影を平滑化する(ガーランド陰影法)。光の強さは要素境界で調和し、曲表面の模擬が行える。
UNIFORM	要素の各面に一様な陰影を施す。つまり陰影は各個の要素上で一定である。使用される値は、単調陰影に基づく節点上の値の平均である。
DIFM $m_1 \ m_n \ d$	材料 m_1 から m_n までのアンビエンスや散光を d に設定する ($0 \leq d \leq 1$)。ディフォルト値は $1/10$ である。
FIFP $p_1 \ p_n \ d$	部分 p_1 から p_n までのアンビエンスや散光を d に設定する ($0 \leq d \leq 1$)。ディフォルト値は、 $1/10$ である。

3. Phase II の入力

入 力	説 明
PHS 1	Phase I に戻る。
ETYPE i	下記の入力で指定される要素のタイプを指定する。ディフォルト値は DYNA 3D, NIKE 3D では $i=3$ である。1つの要素タイプだけしか集められない。 $1 \sim 3$ に対応している。但し、1次元要素での時刻歴表示は、まだ整備されていない。
ELEMENTS $n \ e_1 \ e_2 \cdots e_n$	時刻経過データのプロットを行う要素で、 e_1, e_2, \dots, e_n のタイプ i の n 個の要素の指定。
NODES $n \ n_1 \ n_2, \dots, n_n$	n 個の節点 n_1, n_2, \dots, n_n についての時刻経過をプロットする節点の指定。
MATLS $n \ m_1 \ m_2 \cdots m_n$	n 個の材料 m_1, m_2, \dots, m_n についての時刻経過をプロットする材料の指定。
GATHER	"ELEMENTS", "COMP", "NODES", "MATLS" と "IFNDS" の入力で指定されたすべての人数の時刻経過データをプロットファイルから読み取り格納する。この入力は、時刻経過のプロットがなされる前に入力しなければならない。
ETIME $c \ n \ e_1 \ e_2 \cdots e_n$	n 個の要素 e_1, e_2, \dots, e_n について成分 c のプロットを行う。成分番号は第 6.1.1 表にあるように $1 \sim 16$ が使用できる。

入 力	説 明
NTIME c n n_1, n_2, \dots, n_n	n 個の範節点 n_1, n_2, \dots, n_n について、成分 c のプロットを行う。成分番号は第 6.1.3 表を参照のこと。節点番号は “NODES” の入力で定義される。
MTIME c n m_1, m_2, \dots, m_n	n 個の材料 m_1, m_2, \dots, m_n について、成分 c のプロットを行う。成分番号は第 6.1.4 表を参照のこと。

第 6.1.4 表 材料における時刻経過プロットのための成分番号

番号	成 分	番号	成 分
1	x-剛体変位	6	z-剛体速度
2	y-剛体変位	7	x-剛体加速度
3	z-剛体変位	8	y-剛体加速度
4	x-剛体速度	9	z-剛体加速度
5	y-剛体速度		

入 力	説 明
NRTIME c n_1, n_2	材料番号は “MATLS” の入力で定義される。成分 c の節点 n_1 の値から節点 n_2 の値差をプロットする。成分番号は第 6.1.2 表を参照のこと。節点番号は “NODES” の入力で定義される。
GTIME c	全体系の変数 c のプロットを行う。成分番号は第 6.1.5 表を参照のこと。

第 6.1.5 表 全体系の変数時刻経過プロットのための成分番号

番号	成 分	番号	成 分
1	x-剛体変位	6	z-剛体速度
2	y-剛体変位	7	x-剛体加速度
3	z-剛体変位	8	y-剛体加速度
4	x-剛体速度	9	z-剛体加速度
5	y-剛体速度	10	動エテルギ

以下に示す5個の入力は、"ETIME"，"NTIME"，"NRTIME"，"MTIME"，"ITIME"，"FTIME"，"GTIME"の入力により、プロットを行う場合にのみ適用される。

入 力	説 明
ASET amin amax	横軸の最小、最大値の決定。もし、 $amin=amax=0.0$ (デフォルト) ならば自動的に最小値、最大値が決められる。
OSET omin omax	縦軸の最小、最大値の設定。もし、 $omin=omax=0.0$ (デフォルト) ならば、自動的に決められる。
ASCL f_0	横軸データを f_0 倍する。デフォルト値は 1.0 である。
OSCL f_0	縦軸データを f_0 倍する。デフォルト値は 1.0 である。
SMOOTH n	各データの前後 $2n$ 個の平均値をそのデータの値とする。デフォルトは $n=0$ である。

7. あとがき

CASKETSS の第2次版 CASKETSS-2 を作成した。今後の改良すべき点を掲げると次のものがある。

- (1) 2次元体系の計算が専用で行える計算プログラムを追加する。
- (2) 非弾性構造解析プログラムを追加する。
- (3) 材料データの取扱を容易にする。
- (4) 計算結果の評価を容易にする。

謝　　辞

CASKETSS-2 が約5年間で一応の完成を見たのは、次の人々のご助力を載いたお陰である。深く感謝します。

- (1) 計算プログラムの作成に協力を載いたセンチュリリサーチセンタ(株)の石渡俊氏および(株)三菱総合研究所の大滝真人氏。
- (2) 簡易計算プログラム PUNCTURE および ROCKING の理論について指導を載いた 三菱重工業(株) 浅田和雄氏。
- (3) 詳細計算プログラム TOPAZ 3 D, DYNA 3 D を提供載いた 米国ローレンスリバモア国立研究所の Shapiro 博士, Hallquist 博士および Whirley 博士。
- (4) 種々の支援を載いた 日本原子力研究所 燃料安全工学部 核燃料施設安全評価研究室 内藤淑孝室長。
- (5) 有益な資料を載いた 三菱重工業(株)大橋正雄, (株)神戸製鋼所 横山博臣, 日立造船(株)小野寺 朗, 三井造船(株) 秋山秀夫, 木村化工機(株)山本範夫, (株)日本製鋼所 本間亮介の各氏。

7. あとがき

CASKETSS の第2次版 CASKETSS-2 を作成した。今後の改良すべき点を掲げると次のものがある。

- (1) 2次元体系の計算が専用で行える計算プログラムを追加する。
- (2) 非弾性構造解析プログラムを追加する。
- (3) 材料データの取扱を容易にする。
- (4) 計算結果の評価を容易にする。

謝 辞

CASKETSS-2 が約5年間で一応の完成を見たのは、次の人々のご助力を載いたお陰である。深く感謝します。

- (1) 計算プログラムの作成に協力を載いたセンチュリリサーチセンタ(株)の石渡俊氏および(株)三菱総合研究所の大滝真人氏。
- (2) 簡易計算プログラム PUNCTURE および ROCKING の理論について指導を載いた 三菱重工業(株) 浅田和雄氏。
- (3) 詳細計算プログラム TOPAZ 3 D, DYNA 3 D を提供載いた 米国ローレンスリバモア国立研究所の Shapiro 博士, Hallquist 博士および Whirley 博士。
- (4) 種々の支援を載いた 日本原子力研究所 燃料安全工学部 核燃料施設安全評価研究室 内藤淑孝室長。
- (5) 有益な資料を載いた 三菱重工業(株)大橋正雄, (株)神戸製鋼所 横山博臣, 日立造船(株)小野寺 朗, 三井造船(株) 秋山秀夫, 木村化工機(株)山本範夫, (株)日本製鋼所 本間亮介の各氏。

参考文献

- (1) 織島 肇, "CASKETSS: 核燃料輸送容器熱・構造安全解析コードシステム", JAERI-M 89-009 (1989).
- (2) Shapiro, A. B., "TOPAZ 3 D-A Three-Dimensional Finite Element Heat Transfer Code," UCID-20481 (1985).
- (3) 織島 肇, "放射性物質輸送容器の構造解析ハンドブック", JAERI M 91-060 (1991).
- (4) 浅田和雄, 大橋正雄, "固縛用ワイヤ付きキャスクの耐震評価プログラムの開発", 日本鋼構造協会, 第14回構造工学における数値解析法シンポジウム講演論文集 (1990年7月)。
- (5) 織島 肇, 中里 力, "SHOCK-JR: 核燃料輸送容器の衝撃解析プログラム", JAERI M 83-010 (1983).
- (6) Ikushima,T., "CRUSH;A Simplified Computer Program for Impact Analysis of Radioactive Material Transport Casks", JAERI-M 90-004 (1990).
- (7) 文献(3)と同じ。
- (8) Davis,F.C., "Structural Analysis of Shipping Casks, Vol. 9. Energy Absorption Capabilities of Plastically Deformed Stuts under Specified Loading Conditions", ORNL TM-1312 Vol. 9, (1971).
- (9) Torr,K.G., "Verification of the Performance of Impact Limiting Fins for Transportation Containers", INFO-0146, (1984).
- (10) Torr,K.G., "Verification of the Performance of Impact Limiting Fins for Transportation Containers, Part III", INFO-0146-2, (1986).
- (11) 文献(3)と同じ。
- (12) Asada,K., et al., "Development of Simplified Analysis Codes for 9-m Drop and 1-m Puncture Tests for a Radioactive Material Transport Cask", Waste Management, 88 (Tusco), (1988).
- (13) 浅田和雄, 大橋正雄, "キャスクの貫通解析", 日本機械学会講演論文集 1990-10 pp. 1 ~ 6, (1990)。
- (14) Hallquist,J.O. and Whirley,R.G., "DYNA 3 D User's Manual", UCID-19592. Rev. 4, (1987).
- (15) D.W. Stillman, "INGRID:A Three-Dimensional Mesh Generator for Modeling Non-linear Systems," University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, UCID-20506 (1982).
- (16) Brown,B.E. and Hallquist,J.O., "TAURUS:Interactive Post-Processor for the Analysis Codes NIKE 3 D,DYNA 3 D,TACO 3 D and GEMINI,UCID-19392 (1982).