

JAERI-M
91-060

放射性物質輸送容器構造解析ハンドブック

1991年4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。

JAERJ-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)

放射性物質輸送容器構造解析ハンドブック

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

幾島 肇

(1991年3月5日受理)

本文は放射性物質輸送容器の安全解析の一部分である構造解析に関して、使用されている安全解析法、安全解析条件、計算コード、材料データについてまとめ、解析および評価を行うために便利なようにハンドブックとしたものである。

Handbook for Structural Analysis of
Radioactive Material Transport Casks

Takeshi IKUSHIMA

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

(Received March 5, 1991)

This paper described structural analysis method of Radioactive Material transport casks for use of a handbook of safety analysis and evaluation. Safety analysis conditions, computer codes for analyses and stress evaluation method are also involved in the handbook.

Keywords: Handbook, Structural Analysis, Stress Analysis, Cask, Package, Packaging, Impact Analysis, Drop Impact, Shipping Cask, Safety Analysis, Transport Cask, Radioactive Material, Safety Evaluation

目 次

1. まえがき	1
2. 衝突解析法	2
2.1 衝突解析法	2
2.2 体積変形法 (VDM)	6
2.2.1 一般的な取扱い	6
2.2.2 垂直落下	7
2.2.3 水平落下	8
2.2.4 傾斜落下	9
2.3 単軸変形法 (UDM)	17
2.3.1 一般的な取扱い	17
2.3.2 垂直落下	18
2.3.3 水平落下	21
2.3.4 傾斜落下	25
2.3.5 材料データの取扱い	29
2.3.6 端末拘束係数	30
2.3.7 緩衝材オーバーパックの取扱い	30
2.4 ばね-質点モデル法	39
2.5 有限差分法 (FDM)	40
2.6 有限要素法 (FEM)	44
2.7 衝突によるエネルギー吸収割合	60
2.8 傾斜落下衝突のエネルギー吸収	63
2.9 トロイダル型緩衝構造の衝突解析法	68
2.10 遮蔽鉛の沈下量の解析法	71
2.11 トラニオン衝突の解析法	74
3. フィン衝突解析法	75
3.1 フィン衝突解析法	75
3.2 簡易解析法	76
3.3 フィンの吸収エネルギーデータ	80
4. 貫通解析法	91
4.1 貫通解析法	91
4.2 簡易解析法	92
4.3 塑性大変形法	98
4.4 貫通限界の実験式	107
5. 解析条件	111

5.1 特別形放射性物質のための試験条件	111
5.2 一般の試験条件	114
5.3 特別の試験条件	117
5.4 固縛構造解析条件	119
6. 応力評価	121
6.1 一般的な考慮	121
6.2 ASME 規格の適用範囲と輸送容器への適用性	123
6.2.1 ASME 規格の適用範囲	123
6.2.2 輸送容器への適用性	124
6.2.3 レベル A およびレベル D の適用	125
6.3 応力評価に用いる設計基準の例	131
7. 構造解析	135
8. 計算コード	137
9. 材料データ	160
10. あとがき	161
謝　　辞	161
参考文献	162

Contents

1.	Introduction	1
2.	Impact analysis	2
2.1	Impact analysis method	2
2.2	Volumetric displacement method (VDM)	6
2.2.1	General	6
2.2.2	Vertical drop	7
2.2.3	Horizontal drop	8
2.2.4	Oblique drop	9
2.3	Uni-axial displacement method	17
2.3.1	General	17
2.3.2	Vertical drop	18
2.3.3	Horizontal drop	21
2.3.4	Oblique drop	25
2.3.5	Material data	29
2.3.6	Constraint factor	30
2.3.7	Overpack	30
2.4	Spring-mass model	39
2.5	Finite difference method (FDM)	40
2.6	Finite element method (FEM)	44
2.7	Impact energy dissipation	60
2.8	Impact energy dissipation in case of oblique drop	63
2.9	Toroidal shock absorber	68
2.10	Shielding lead settlement	71
2.11	Trunnion	74
3.	Fin impact analysis	75
3.1	Fin impact analysis	75
3.2	Simplified analysis method	76
3.3	Absorbed energy of fin	80
4.	Puncture analysis	91
4.1	Puncture analysis	91
4.2	Simplified analysis method	92
4.3	Plastic large displacement method	98
4.4	Experimental formulas	107
5.	Safety analysis	111
5.1	Tests conditions for special form	111
5.2	Tests for normal transprt	114

5.3 Tests for accidental conditions	117
5.4 Structural analysis for tie-down	119
6. Stress evaluation	121
6.1 General	121
6.2 ASME Code and application for package	123
6.2.1 ASME Code section III	123
6.2.2 Application for package	124
6.2.3 Application of level A and D	125
6.3 Design criteria	131
7. Structural analysis	135
8. Computer codes	137
9. Material data	160
10. Concluding remarks	161
Acknowledgements	161
References	162

1. まえがき

放射性物質輸送容器の一般的試験条件あるいは特別の試験条件における健全性あるいは安全性の解析評価には、IAEA⁽¹⁾および国内の安全輸送規則に従って、実験あるいは解析、または実験と解析によって実施されている。解析によって輸送容器の健全性あるいは安全性の解析評価を行う場合の標準的な手法やデータを収めたハンドブックの必要性が、輸送容器が規則に適合することを容易に評価できるようにするために、安全解析評価および設計をする人達の間で認識されてきている。

輸送容器のハンドブックは、米国の幾つかの原子力関連研究所において、それぞれ固有のものを所有している。その中でも、よく引用されるものは、オークリッジ国立研究所の設計ガイドがある。これはShappertら⁽²⁾によって1970に作成されたものであり、この中には、構造、材料、熱、ガスケット、臨界、遮蔽および製造について、解析法、データなど多岐にわたる記載があり、我が国では、現在に至るまで広く利用されている。

しかしながら、この設計ガイドは1970年初頭に出版されたものであり、その後の20年間において、研究者および設計者の努力によって、解析手法ならびにデータが整備されてきた。また、電子計算機の長足の進歩により、計算コードによる計算が増加してきた。このような背景のもとで、解析手法、データおよび計算コードに関する最近の成果を取り入れた輸送容器の構造解析ハンドブックの作成を行い、構造解析法に関する整理を行うこととした。

この構造解析ハンドブックは構造解析に関して標準的な解析法、解析条件、計算コードおよび構造計算に必要なデータをまとめたもので、輸送容器の安全解析評価および設計を行う人達に標準的な参考資料を提供しようとしたものである。

落下衝突解析法については、緩衝体付きおよびフィン付き輸送容器について、さらに貫通解析法についても記述した。これらの解析法について、詳細解析法と簡易解析法の両方を詳しく記述している。

2. 衝突解析法

2.1 衝突解析法

IAEAの安全輸送規則によれば、輸送容器に最大の影響を与える落下姿勢による衝突条件下においても、輸送容器の安全性を確保しなければならない。それ故、第2.1.1図に示すように、垂直落下から水平落下までの輸送容器の落下角度に対して、その安全性を解析・評価しておく必要がある。このため、実験あるいは計算によって落下衝突による影響を明らかにしている。これを計算によって明らかにする場合の解析法について以下に述べる。

輸送容器の落下衝突解析法は、第2.1.2図に示すように、動的解析法と静的解析法に大別できる。動的解析法の中には、有限要素法(FEM: Finite Element Method)、有限差分法(FDM: Finite Difference Method)およびばね-質点モデル法(Spring-Mass Model)がある。一方、静的解析法の中には、有限要素法、体積変形法(VDM: Volumetric Displacement Method)および単軸変形法(UDM: Uniaxial Displacement Method)がある。有限要素法および有限差分法では、計算対象を2次元あるいは3次元の体系にモデル化して計算を行うので詳細計算法(Detailed Analysis Model)と呼ぶことができる。一方、ばね-質点モデル法、体積変形法および単軸変形法は、本質的には計算対象を1次元の体系にモデル化して計算を行うので簡易計算法(Simplified Analysis Model)と呼ぶことができる。これらの解析法に基づく計算コードのうち、我が国において利用できるものを例示すると第2.1.1図のとおりとなる。以下、簡易解析法と詳細解析法について比較検討する。

(1) 簡易解析法

VDMは第2.1.3図に示すように、消失体積のみを考慮すればよいので、計算は簡単であるが、この体積部材料のロックアウトひずみ(ひずみ増分に対して応力増分が急激が大きくなり始めるひずみ)を着目して計算を行うので、計算の妥当性がロックアウトひずみに大きく依存する。計算精度の高い結果を得るには、荷重-変形データ(あるいは等価応力-変形データ)を用いることが必要となる。

一方、UDMは第2.1.3図に示すように、1次元棒の変形を考慮すればよいので、計算はVDMよりも複雑となるが、容易に得られる1次元棒の応力-ひずみデータを用いることによって妥当な計算結果を得ることができる。

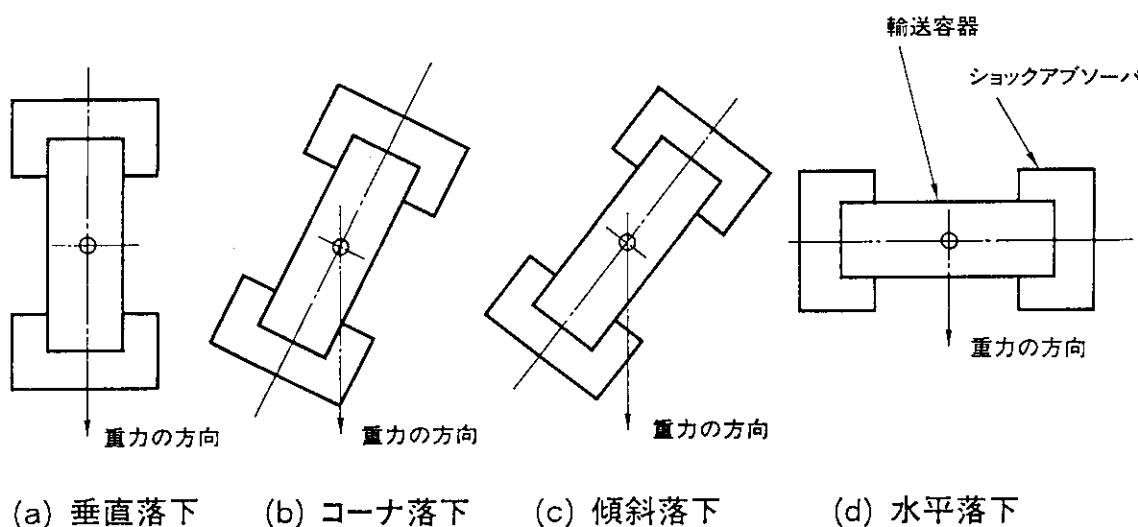
ばね-質点モデル法は第2.1.4図に示すように、輸送容器を部分部分に分け、各部分の質量を集中質量とし、部分部分の剛性を集中質量間のばねで置き換えて、ばね-質点系の体系として運動方程式を作り、衝突現象を解析するものである。この解析法では、質点間のばね定数を推定することおよび衝突面のばね定数の推定が計算精度に大きく影響する。これらのばね定数の推定が困難である。

VDMおよびUDMは静的解析法であるが、ばね-質点モデル法は動的解析法であり、VDM

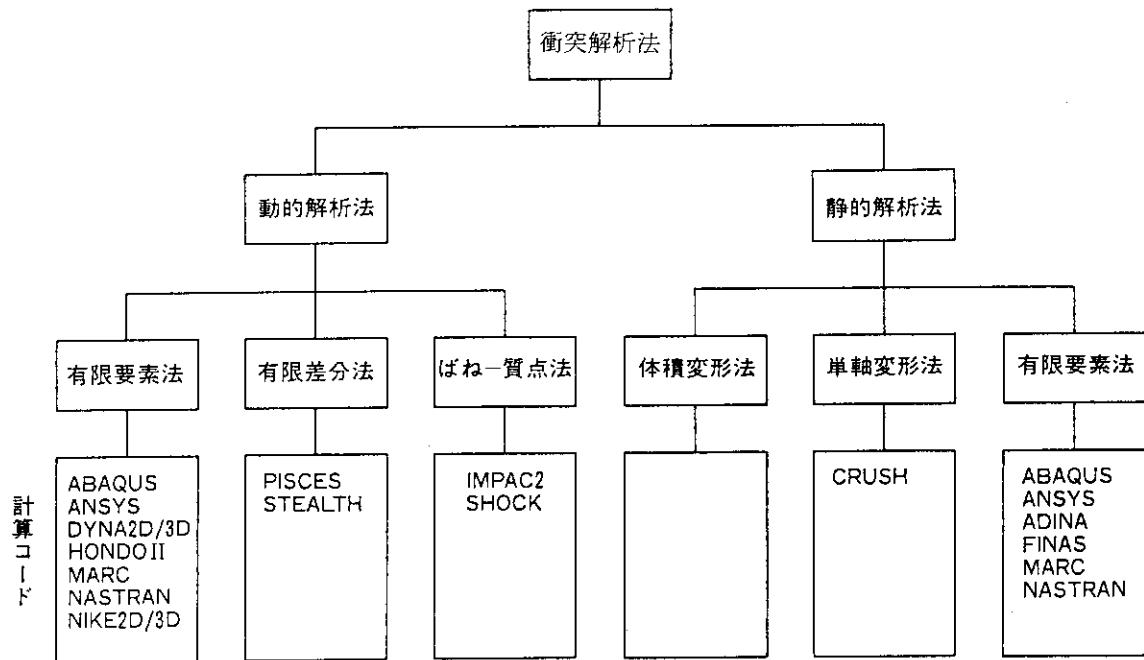
およびUDMでは、計算時間は少いが、ばね-質点モデル法では計算時間が多く必要となる。

(2) 詳細解析法

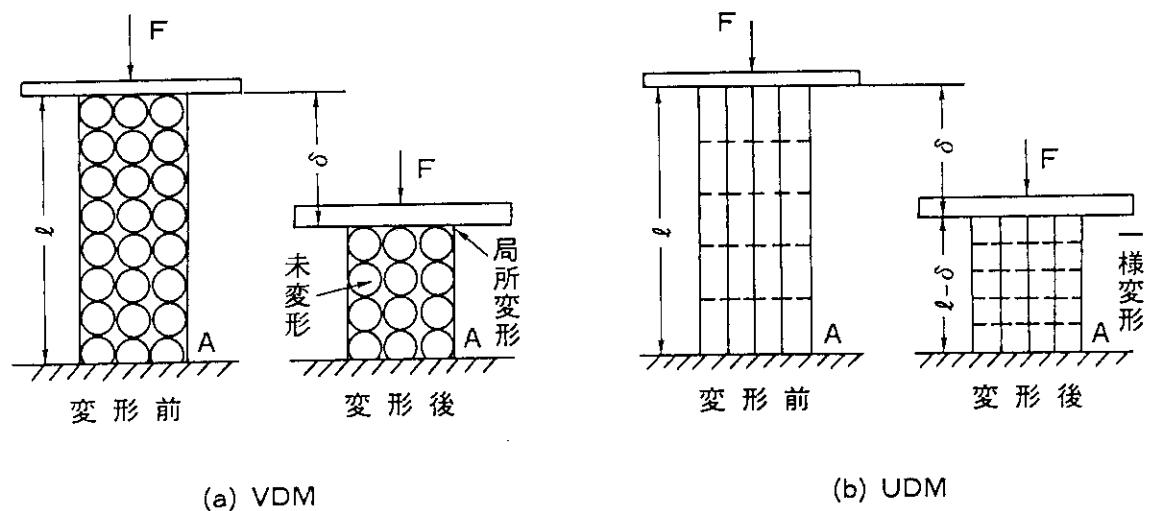
有限差分法(FDM)は第2.1.5図に示すように各部分を2次元あるいは3次元で領域分割し、各領域内では状態変数を1点で代表させ、衝突力と変位の平衡を時間刻みで計算する方法である。有限要素法(FEM)は第2.1.5図に示すように各部分を2次元あるいは3次元で要素分割し、各要素内では状態変数を多点で与え、衝突力と変位の平衡を時間刻みで計算する方法である。有限差分法の各領域と有限要素法の各要素は同じ意味であり、有限要素法の各要素の状態量を1点で代表させるならば、有限差分法と有限要素法は、理論的な厳密さを考えなければ、衝突力と変位の平衡を求める上で同じものと考えてよい。



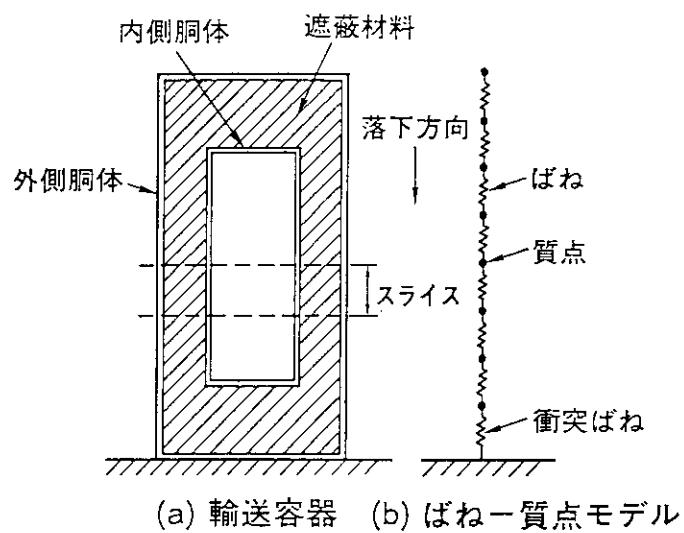
第2.1.1図 輸送容器落下姿勢



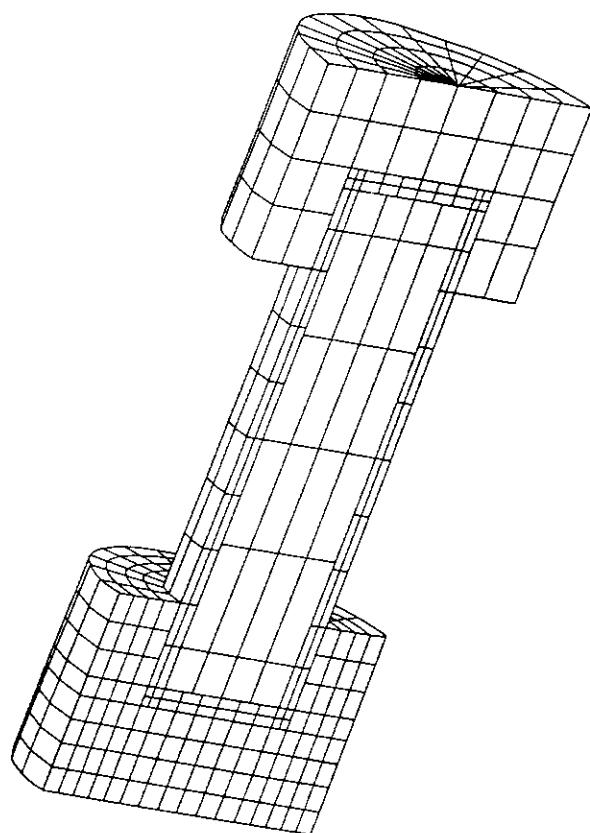
第 2.1.2 図 輸送容器衝突解析法と計算コード

 ℓ : 初期長さ, F : 荷重 δ : 变位, A : 断面積

第 2.1.3 図 V D M と U D M の 比較



第 2.1.4 図 輸送容器落下衝突解析用ばねー質点モデル



第 2.1.5 図 輸送容器落下衝突解析用 FDM または FEM モデル

2.2 体積変形法 (VDM)

2.2.1 一般的な取扱い

体積変形法 (VDM)⁽³⁾ は、第 2.2.1 図に示すように輸送容器の緩衝体が衝突によって消失する体積が落下エネルギーを吸収するとして、変形、荷重、加速度を求めるものである。VDMによる輸送容器の落下衝突解析モデルと計算式の一般的な考え方を傾斜落下を例にとり示す。

第 2.2.1 図に示すように緩衝体が圧縮力を受け変形した場合の変形抵抗力 (荷重) は次式で表わすことができる。

$$F(\delta) = \sigma(\epsilon) \cdot A(\delta) \quad (2.2.1)$$

ここで、 δ : 変形量

F : 荷重であり変形量の関数

ϵ : ひずみ

σ : 応力でありひずみの関数

A : 受圧面積であり変形量の関数

である。

緩衝体のひずみエネルギーは次式となる。

$$E(\delta) = \int F(\delta) d\delta \quad (2.2.2)$$

ここで、 E : 吸收エネルギー

である。材料の弾性ひずみエネルギーは塑性ひずみエネルギーに比較して小さいとし、材料を完全弾塑性体とすると、変形抵抗力は次式となる。

$$F(\delta) = \sigma_y A(\delta) \quad (2.2.3)$$

ここで、 σ_y : 材料の塑性応力

である。 $(2.2.3)$ 式を $(2.2.2)$ 式へ代入すると、吸收エネルギーは次式で表わすことができる。

$$E(\delta) = \int \sigma_y A(\delta) d\delta$$

$$E(\delta) = \sigma_y V \quad (2.2.4)$$

ここで、 V : 圧潰体積

である。

重量 W の容器が高さ 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。

$$E(\delta) = r W H \quad (2.2.5)$$

ここで、 r : 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。

$$\alpha = \frac{F(\delta)}{W/g} \quad (2.2.6)$$

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、第 2.1.1 図に示した種々の落下姿勢に対する、変形量に対する圧潰体積、吸収エネルギー、受圧面積、荷重、加速度について記述する。

2.2.2 垂直落下

第 2.2.2 図に示すような典型的な輸送容器緩衝体を例にとり、垂直落下衝突によって生じる緩衝体の変形、圧潰体積、吸収エネルギー、受圧面積、荷重、加速度について記述する。

(1) 圧潰体積

圧潰体積は変形量を δ とすると次式で与えられる。

$$V = \delta \left\{ \pi R_1^2 + \pi (R_2^2 - R_1^2) + \pi (R_5^2 - R_2^2) \right\} \quad (2.2.7)$$

ここで、 $R_1 \sim R_5$: 第 2.2.2 図に示す緩衝体の半径
 である。この圧潰体積によって、衝突エネルギーを吸収するとすると (2.2.4) 式から次のようになる。

$$E(\delta) = V \sigma \quad (2.2.8)$$

$$E(\delta) = \delta_m \left\{ \pi R_1^2 \sigma_D + \pi (R_2^2 - R_1^2) \sigma_A + \pi (R_5^2 - R_2^2) \sigma_B \right\} \quad (2.2.9)$$

ここで、 σ_A : 緩衝材 A の動的変形応力
 σ_B : 緩衝材 B の動的変形応力
 σ_D : 緩衝材 C の動的変形応力

であり、 σ_A 、 σ_B および σ_D はそれぞれのひずみに依存する応力である。近似的には各々の材料の降伏応力である。

(2) 受圧面積

受圧面積は第 2.2.2 図から容易に次式を導くことができる。

$$A = \pi R_1^2 + \pi (R_2^2 - R_1^2) + \pi (R_5^2 - R_2^2) \quad (2.2.10)$$

(3) 荷 重

荷重は (2.2.3) 式から次式を導くことができる。

$$F = \pi R_1^2 \sigma_D + \pi (R_2^2 - R_1^2) \sigma_A + \pi (R_5^2 - R_2^2) \sigma_B \quad (2.2.11)$$

(4) 加速度

加速度は(2.2.6)式によって求めることができる。

2.2.3 水平落下

第2.2.3図に示すような典型的な輸送容器緩衝体を例にとり、水平落下衝突によって生じる緩衝体の変形、圧潰体積、吸収エネルギー、受圧面積、荷重、加速度について記述する。

(1) 圧潰体積

圧潰体積を求める計算式は、緩衝材を覆うオーバパックのような薄肉円筒と緩衝材のような厚肉円筒の場合に、それぞれ以下に示すように求めることができる⁽²⁾

薄肉円筒の場合の圧潰体積は第2.2.4図に示すように次式によって求めることができる。

$$V = R \cdot t \cdot L \left\{ \sin \phi (2 - \cos \phi) - \phi \right\} \quad (2.2.12)$$

ここで、
R : 円筒の外半径

t : 円筒の厚さ

L : 円筒の長さ

ϕ : 変形角度

である。

厚肉円筒の場合の圧潰体積は第2.2.5図に示すように次式によって求めることができる。

$$V = R^2 \cdot L \left\{ \phi - \frac{1}{2} \sin 2\phi \right\} \quad (2.2.13)$$

この圧潰体積によって、衝突エネルギーを吸収するとすると(2.2.4)式から次のようになる。

$$E(\delta) = V \sigma \quad (2.2.14)$$

ここで、 σ は材料の動的変形応力でひずみに依存する値である。近似的には材料の降伏応力である。

(2.2.11)および(2.2.12)式における変形による角度 ϕ と変形量 δ の関係式は第2.2.5図から次式のように導くことができる。

$$\delta = R(1 - \cos \phi) \quad (2.2.15)$$

(2) 受圧面積

受圧面積は厚肉円筒の場合、第2.2.5図から次式を導くことができる。

$$A(\delta) = 2R \cdot L \sin \phi \quad (2.2.16)$$

(3) 荷 重

荷重は(2.2.3)式から求めることができる。

(4) 加速度

加速度は(2.2.6)式から求めることができる。

2.2.4 傾斜落下

第2.2.6図に示すような典型的な輸送容器の緩衝体を例にとり、傾斜落下によって生じる緩衝体の変形、圧潰体積、吸収エネルギー、受圧面積、荷重、加速度について記述する。

(1) 圧潰体積

圧潰体積を求めるに際して、基本的な二重円筒を例にとる。変形の進行に従って圧潰体積が馬てい型から斜円筒まで変ることがあり、この圧潰体積の変形形状を4種類に分離して圧潰体積の計算式を導く。

(a) 外側円筒のみ馬てい型に変形

第2.2.7図に示すように外側円筒のみが馬てい型に変形する場合の圧潰体積は次式によつて求めることができる。

$$V_0 = R_s^3 \tan \theta \left\{ \sin \phi_s - \frac{\sin^3 \phi_s}{3} - \phi_s \cos \phi_s \right\} \quad (2.2.17)$$

ここで、 V_0 : 外側円筒の圧潰体積

R_s : 外側円筒の外半径

θ : 傾斜落下角度

ϕ_s : 変形角度

である。変形量と変形角度の関係は次式によって表わされる。

$$\begin{aligned} \delta &= R_s \sin \theta (1 - \cos \phi_s) \\ \phi_s &= \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{\delta}{R_s \sin \theta} \right\} \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (2.2.18)$$

(b) 外側円筒および内側円柱が馬てい型に変形

第2.2.8、2.2.9および2.2.10図に示すように、外側円筒および内側円柱の圧潰体積を求める。最初に、全体の圧潰体積を求め、次に、内側円柱の圧潰体積を求め、最後に、外側円筒の圧潰体積は全体のものと内側のものの差として求めることができる。

全体の圧潰体積は(2.2.17)および(2.2.18)式と同様に次式となる。

$$V_t = R_s^3 \tan \theta \left\{ \sin \phi_s - \frac{\sin^3 \phi_s}{3} - \phi_s \cos \phi_s \right\} \quad (2.2.19)$$

$$\phi_s = \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{\delta}{R_s \sin \theta} \right\} \quad (2.2.20)$$

ここで、 V_t : 全体の圧潰体積

である。

内側円柱の圧潰体積は(2.2.17)および(2.2.18)式と同様に次式となる。

$$V_i = R_1^3 \tan \theta \left\{ \sin \phi_1 - \frac{\sin^3 \phi_1}{3} - \phi_1 \cos \phi_1 \right\} \quad (2.2.21)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left\{ \frac{R_5 \cos \phi_5}{R_1} \right\} \quad (2.2.22)$$

ここで, V_i : 内側円柱の圧潰体積

R_1 : 内側円柱の半径

ϕ_1 : 変形角度

である。

外側円筒の圧潰体積は (2.2.19) と (2.2.21) 式の差として求めることができる。

$$V_o = V_t - V_i$$

$$V_o = R_5^3 \tan \theta \left\{ \sin \phi_5 - \frac{\sin^3 \phi_5}{3} - \phi_5 \cos \phi_5 \right\} \\ - R_1^3 \tan \theta \left\{ \sin \phi_1 - \frac{\sin^3 \phi_1}{3} - \phi_1 \cos \phi_1 \right\} \quad (2.2.23)$$

ここで, V_o : 外側円筒の圧潰体積

である。

(c) 外側円筒が馬てい型, 内側円柱が斜円柱型に変形

第 2.2.11 および 2.2.12 図に示すように外側円筒が馬てい型となり内側円柱型に変形する場合の圧潰体積を求める。外側円筒の圧潰体積は, 全体の馬てい型の圧潰体積と内側円柱の斜円柱型の圧潰体積の差として求めることができる。

全体の圧潰体積は (2.2.17) および (2.2.18) 式と同様である。一方, 内側円柱の圧潰体積は, 斜円柱の体積の計算式を用いて求めることができる。第 2.2.13 図に示す斜円柱の体積は次式によって得られる。

$$V = \pi R^2 \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \quad (2.2.24)$$

ここで,

$$\frac{h_1 + h_2}{2} = (b - R_5) \tan \theta \quad (2.2.25)$$

であるから, 内側円柱の圧潰体積は次式となる。

$$V_i = \pi R_1^2 (b - R_5) \tan \theta \quad (2.2.26)$$

ここで, b : 第 2.2.12 図に示す馬てい型の底面長さ

である。

外側円筒の圧潰体積は (2.2.17) と (2.2.26) 式の差となり次式で求めることができる。

$$V_o = V_t - V_i$$

$$V_o = R_s^3 \tan \theta \left\{ \sin \phi_s - \frac{\sin^3 \phi_s}{3} - \phi_s \cos \phi_s \right\}$$

$$- \pi R_i^2 (b - R_s \tan \theta) \quad (2.2.27)$$

(d) 外側円筒が斜円筒、内側円柱が斜円柱に変形

第 2.2.14 図に示すように外側円筒が斜円筒となり内側円柱が斜円柱に変形する場合の圧潰体積を求める。外側円筒の圧潰体積は、全体の斜円柱型の圧潰体積と内側円柱の斜円柱型の圧潰体積の差として求めることができる。

全体の圧潰体積は (2.2.25) および (2.2.26) 式と同様に、次式によって得られる。

$$\frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{\delta - R_s \sin \theta}{\cos \theta} \quad (2.2.28)$$

$$V_t = \pi R_s^2 \frac{\delta - R_s \sin \theta}{\cos \theta} \quad (2.2.29)$$

内側円柱の圧潰体積は、同様に求めることができ、次式となる。

$$V_i = \pi R_i^2 \frac{\delta - R_s \sin \theta}{\cos \theta} \quad (2.2.30)$$

外側円筒の圧潰体積は (2.2.29) と (2.2.30) 式の差となり次式で求めることができる。

$$V_o = V_t - V_i$$

$$V_o = \pi \frac{\delta - R_s \sin \theta}{\cos \theta} (R_s^2 - R_i^2) \quad (2.2.31)$$

(2) 受圧面積

受圧面積は馬てい型の弓部の面積を求める式によって得ることができ、次式となる。

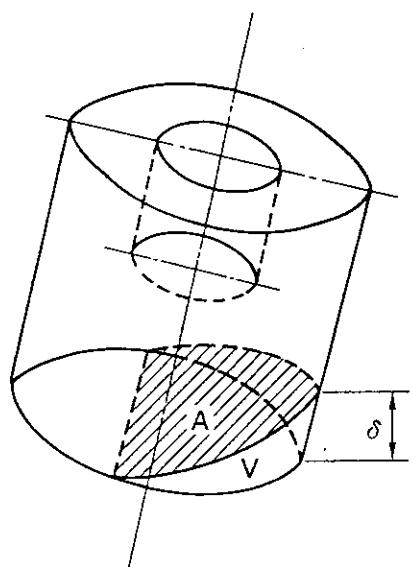
$$A(\delta) = \frac{1}{2} R_s^2 \left\{ 2\phi_s - \sin(2\phi_s) \right\} \quad (2.2.32)$$

(3) 荷重

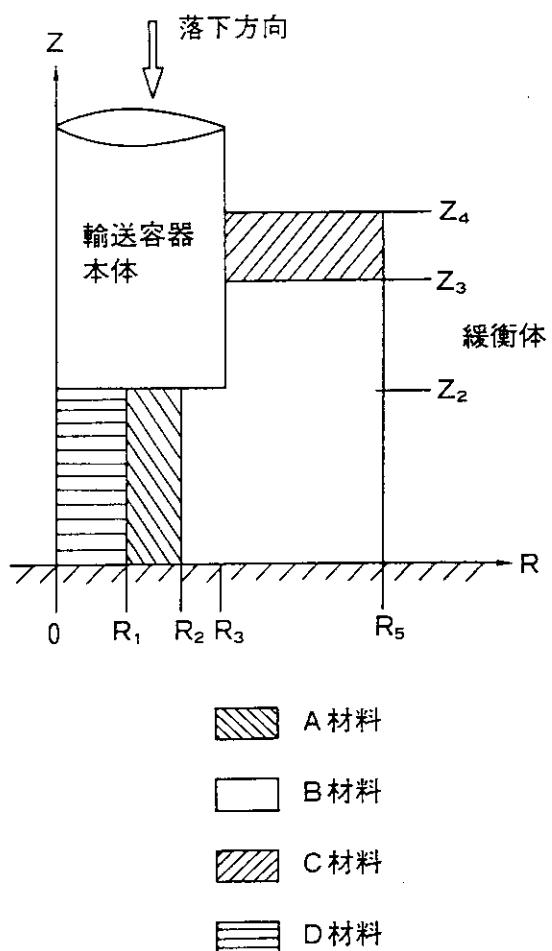
荷重は (2.2.3) 式から求めることができる。

(4) 加速度

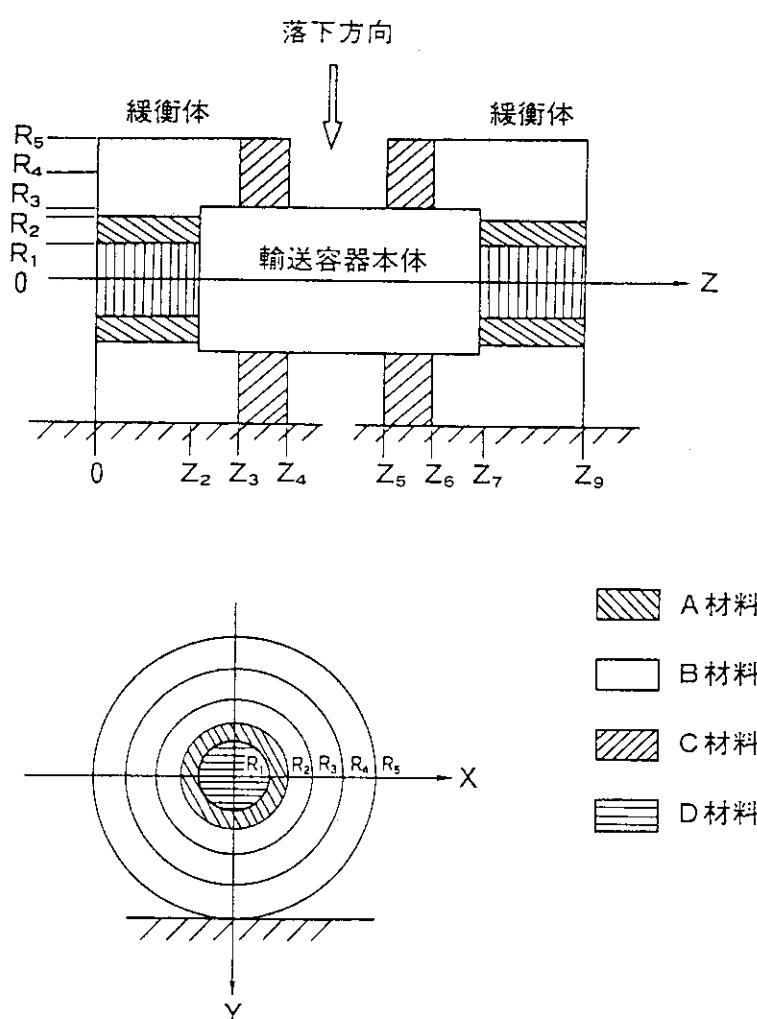
加速度は (2.2.6) 式から求めることができる。



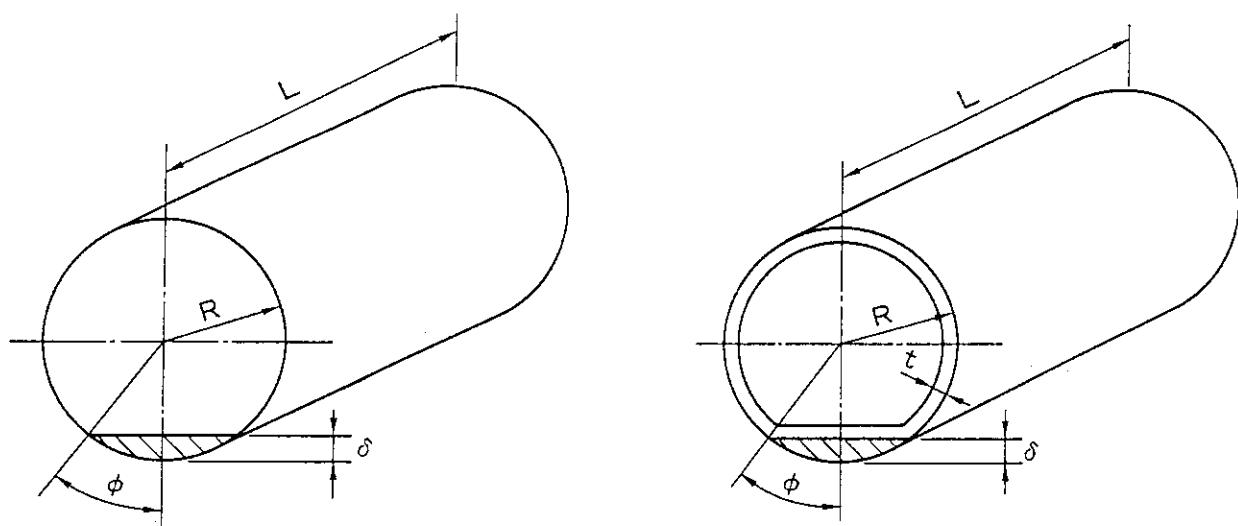
第 2.2.1 図 VDMによる衝突計算法



第 2.2.2 図 垂直落下の場合の形状寸法と材料区分

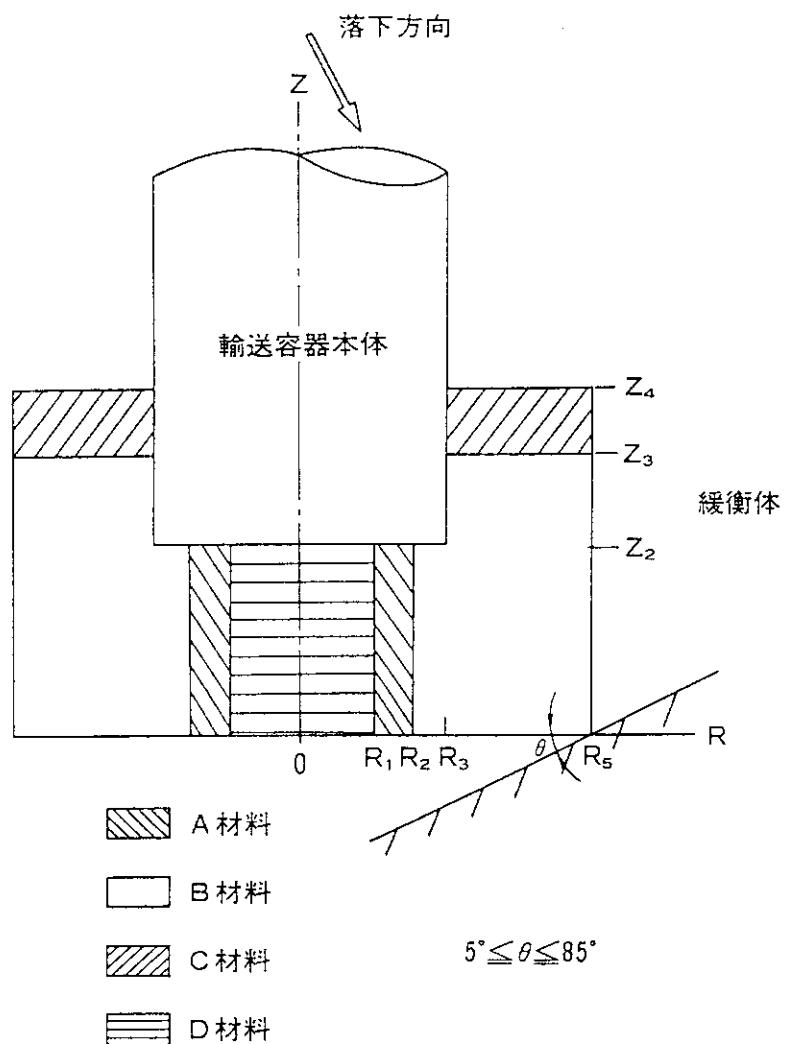


第 2.2.3 図 水平落下の場合の形状寸法と材料区分

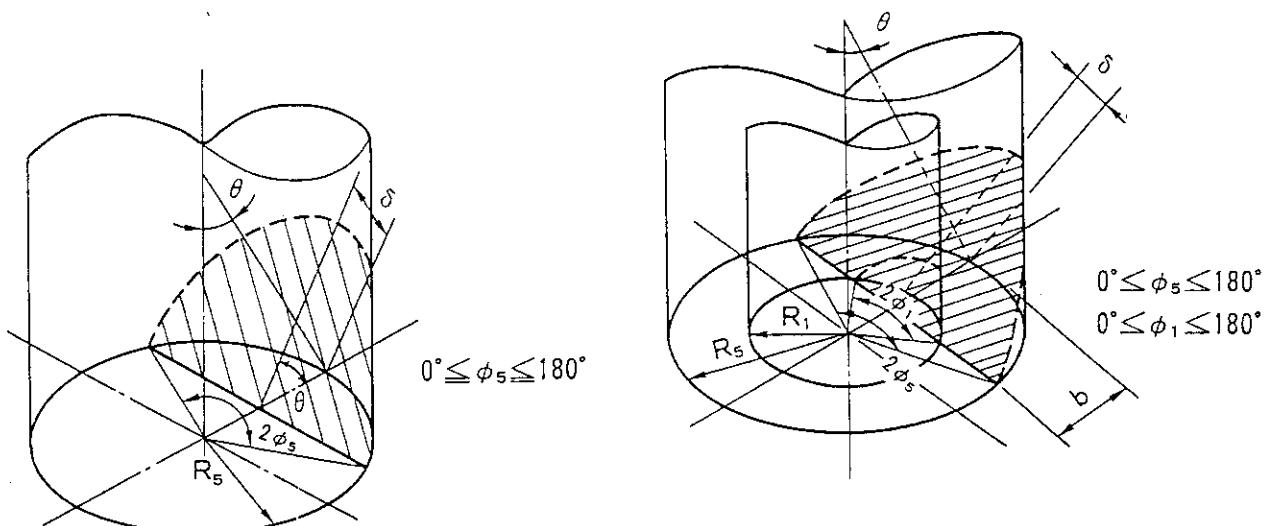


第 2.2.4 図 薄肉円筒の体積計算モデル

第 2.2.5 図 厚肉円筒の体積計算モデル

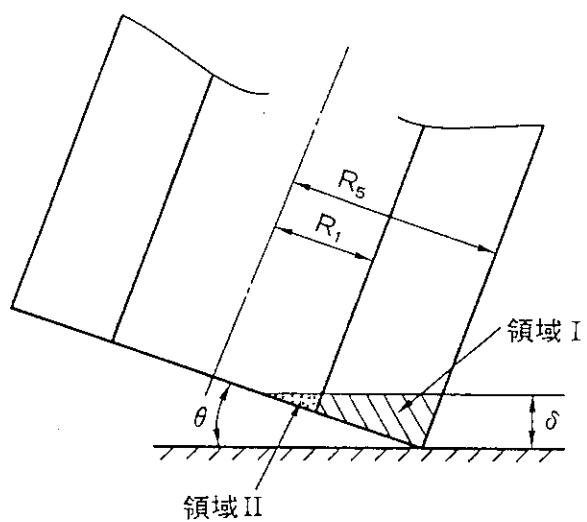


第 2.2.6 図 傾斜落下的場合の形状寸法と材料区分

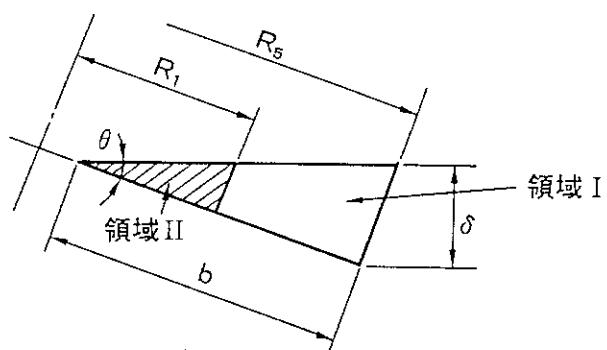


第 2.2.8 図 馬てい型の体積計算モデル (II)

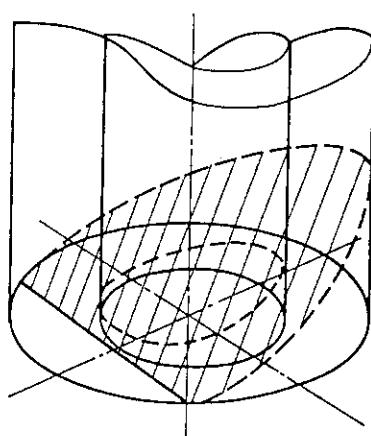
第 2.2.7 図 馬てい型の体積計算モデル (I)



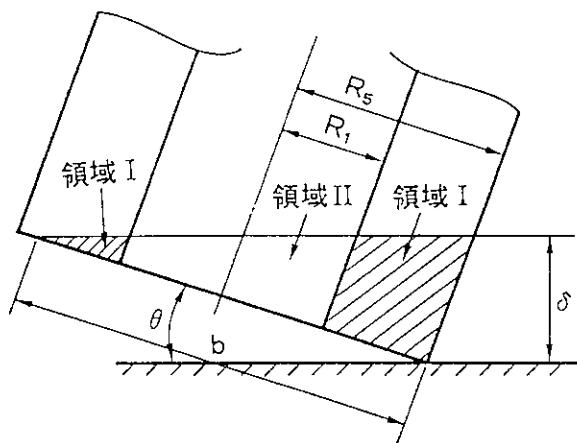
第 2.2.9 図 馬てい型の体積計算モデル（III）



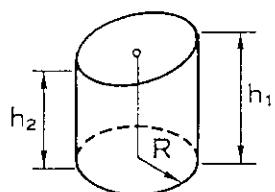
第 2.2.10 図 馬てい型の体積計算モデル（IV）



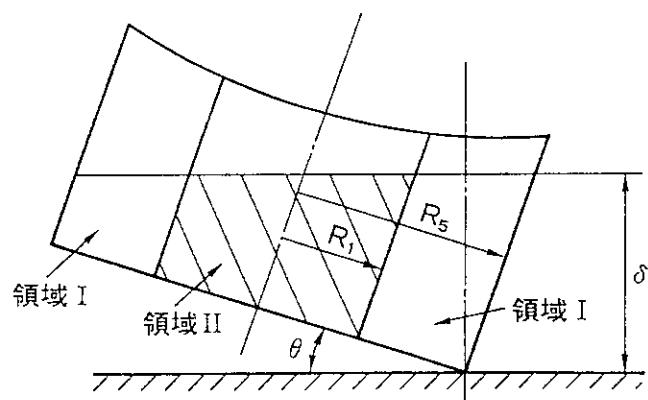
第 2.2.11 図 馬てい型の体積計算モデル（V）



第 2.2.12図 馬てい型の体積計算モデル (VI)



第 2.2.13図 斜円柱の体積計算モデル (I)



第 2.2.14図 斜円柱の体積計算モデル (II)

2.3 単軸変形法 (UDM)

2.3.1 一般的な取扱い

単軸変形法 (UDM)⁽⁴⁾⁽⁵⁾ は、第 2.3.1 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。UDM による輸送容器の落下衝突解析モデルと計算式の一般的な考え方を傾斜落下を例にとり示す。

第 2.3.1 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。

$$\varepsilon_i(\delta) = \frac{\delta_i}{\ell_i} \quad (2.3.1)$$

$$F_i(\delta) = K_i \sigma_i(\varepsilon_i) A_i \quad (2.3.2)$$

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。端面拘束係数については 2.3.6 節で述べるが、この値は以下の範囲にある。

$$0 \leq K_i \leq 1 \quad (2.3.3)$$

緩衝材の全荷重は次式となる。

$$F(\delta) = \sum_i F_i(\delta) A_i \quad (2.3.4)$$

緩衝材の吸収エネルギーは次式となる。

$$E(\delta) = \int F(\delta) d\delta \quad (2.3.5)$$

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。

$$E(\delta) = \gamma W H \quad (2.3.6)$$

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。

$$\alpha = \frac{F(\delta)}{W/g} \quad (2.3.7)$$

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。以下に第 2.1.1 図に示した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。

2.3.2 垂直落下

(1) 荷 重

第 2.3.2 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 2.3.3 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 $0 \sim R_1$ の荷重

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= K_1 \sigma_D (\varepsilon_D) \pi R_1^2 \\ \varepsilon_D &= \delta / \ell_2, \quad \ell_2 = Z_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.8)$$

ここで, F_1 : 領域 $0 \sim R_1$ 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 $R_1 \sim R_2$ の荷重

領域 $R_1 \sim R_2$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= K_2 \sigma_A (\varepsilon_A) \pi (R_2^2 - R_1^2) \\ \varepsilon_A &= \delta / \ell_2, \quad \ell_2 = Z_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.9)$$

ここで, F_2 : 領域 $R_1 \sim R_2$ 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 $R_2 \sim R_3$ の荷重

領域 $R_2 \sim R_3$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_3 &= K_3 \sigma_B (\varepsilon_B) \pi (R_3^2 - R_2^2) \\ \varepsilon_B &= \delta / \ell_2, \quad \ell_2 = Z_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.10)$$

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。

$$\left. \begin{aligned} F_{4B} &= K_4 \sigma_B (\varepsilon_B) \pi (R_4^2 - R_3^2) \\ \varepsilon_B &= \delta_B / \ell_3, \quad \ell_3 = Z_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.11)$$

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 の変形量

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。

$$\left. \begin{aligned} F_{4C} &= K_4 \sigma_C (\varepsilon_C) \pi (R_4^2 - R_3^2) \\ \delta_C &= \delta_C / \ell_4, \quad \ell_4 = Z_4 - Z_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.12)$$

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 (2.3.11) および (2.3.12) 式に等しいので次式が成立する。

$$F_4 = F_{4B} = F_{4C} \quad (2.3.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_B(\varepsilon_B) &= \sigma_C(\varepsilon_C) \\ \text{または} \\ \sigma_B(\delta_B/\ell_3) &= \sigma_C(\delta_C/\ell_4) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.14)$$

$$\delta = \delta_B + \delta_C \quad (2.3.15)$$

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。

$$\left. \begin{aligned} F_{5B} &= K_5 \sigma_B(\varepsilon_B) \pi (R_5^2 - R_4^2) \\ \varepsilon_B &= \delta_B / \ell_3, \quad \ell_3 = Z_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.16)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{5C} &= K_5 \sigma_C(\varepsilon_C) \pi (R_5^2 - R_4^2) \\ \varepsilon_C &= \delta_C / \ell_4, \quad \ell_4 = Z_4 - Z_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.17)$$

$$F_5 = F_{5B} = F_{5C} \quad (2.3.18)$$

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 (2.3.14) および (2.3.15) 式は成立する。

(f) 垂直落下の荷重

第 2.3.3 図で示した各領域の荷重が求められたので、第 2.3.2 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。

$$F_v = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (2.3.19)$$

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 $0 \sim R_1$ の緩衝材材料 D が存在しないので次式となる。

$$F_v = F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (2.3.20)$$

(2) 加速度

加速度は(2.3.7)式によって求めることができる。

2.3.3 水平落下

(1) 荷重

(a) 一般的な取扱い

第2.3.4および2.3.5図に示す典型的な輸送容器緩衝体を例にとり、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2.3.5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2.3.6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2.3.7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(2.3.2)式から次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_i &= K_i \sigma_i (\varepsilon_i) \Delta X (Z_i - Z_{i-1}) \\ \varepsilon_i &= \delta_i / \ell_i \end{aligned} \right\} \quad (2.3.21)$$

ここで、
 ΔF_i : 緩衝材の微小幅 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。

$$\left. \begin{aligned} F_i &= 2 \int_0^R dF_i dX \\ F_i &= 2 (Z_i - Z_{i-1}) K_i \int_0^R \sigma_i (\varepsilon_i) dX \end{aligned} \right\} \quad (2.3.22)$$

ここで、
R : 緩衝材の外半径
である。

(b) 領域 $0 \sim Z_1$ の荷重

領域 $0 \sim Z_1$ において区間 $0 \sim R_1$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_{11D} &= 2 Z_1 K_1 \int_0^{R_1} \sigma_D (\varepsilon_D) dX, \quad (\text{緩衝材材料D}) \\ F_{11A} &= 2 Z_1 K_1 \int_0^{R_1} \sigma_A (\varepsilon_A) dX, \quad (\text{緩衝材材料A}) \\ F_{11B} &= 2 Z_1 K_1 \int_0^{R_1} \sigma_B (\varepsilon_B) dX, \quad (\text{緩衝材材料B}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.23)$$

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

$$\varepsilon_D = \delta_D / \ell_1, \quad \varepsilon_A = \delta_A / \ell_2, \quad \varepsilon_B = \delta_B / \ell_5 \quad (2.3.24)$$

$$\left. \begin{aligned} \ell_1 &= 2 \sqrt{R_1^2 - X^2} \\ \ell_2 &= 2 (\sqrt{R_2^2 - X^2} - \sqrt{R_1^2 - X^2}) \\ \ell_5 &= 2 (\sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.25)$$

である。 (2.3.23) 式は次の条件を満さなければならない。

$$\left. \begin{aligned} F_{11} &= F_{11D} = F_{11A} = F_{11B} \\ \delta &= \delta_D + \delta_A + \delta_B \\ \sigma_D(\varepsilon_D) &= \sigma_A(\varepsilon_A) = \sigma_B(\varepsilon_B) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.26)$$

ここで、 F_{11} : 領域 $0 \sim Z_1$ において区間 $0 \sim R_1$ 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、 (2.3.23) から (2.3.26) 式のうち次のものを変更すればよい。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_D &= \varepsilon_D = \delta_D = 0 \\ \ell_2 &= \sqrt{R_2^2 - X^2} - \sqrt{R_1^2 - X^2} \\ \ell_5 &= \sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.27)$$

領域 $0 \sim Z_1$ において区間 $R_1 \sim R_2$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_{12A} &= 2 Z_1 K_1 \int_{R_1}^{R_2} \sigma_A(\varepsilon_A) dX, \quad (\text{緩衝材材料 A}) \\ F_{12B} &= 2 Z_1 K_1 \int_{R_1}^{R_2} \sigma_B(\varepsilon_B) dX, \quad (\text{緩衝材材料 B}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.28)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_A &= \delta_A / \ell_2, \quad \epsilon_B = \delta_B / \ell_5 \\ \ell_2 &= 2 \sqrt{R_2^2 - X^2} \\ \ell_5 &= 2 (\sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_2^2 - X^2}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.29)$$

である。(2.3.28)式は次の条件を満さなければならない。

$$\left. \begin{aligned} F_{12} &= F_{12A} = F_{12B} \\ \delta &= \delta_A + \delta_B \\ \sigma_A(\epsilon_A) &= \sigma_B(\epsilon_B) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.30)$$

ここで、 F_{12} ：領域 $0 \sim Z_1$ において区間 $R_1 \sim R_2$ の荷重である。

領域 $0 \sim Z_1$ において区間 $R_2 \sim R_3$ の荷重は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_{15} &= 2 Z_1 K_1 \int_{R_2}^{R_5} \sigma_B(\epsilon_B) dX \\ \text{ここで,} \\ \epsilon_B &= \delta / \ell_5 \\ \ell_5 &= 2 \sqrt{R_5^2 - X^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.31)$$

であり、また

F_{15} ：領域 $0 \sim Z_1$ において区間 $R_2 \sim R_3$ の荷重である。領域 $0 \sim Z_1$ の荷重は次式となる。

$$F_1 = F_{11} + F_{12} + F_{15} \quad (2.3.32)$$

ここで、 F_1 ：領域 $0 \sim Z_1$ 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 $0 \sim Z_1$ における計算式(2.3.23)～(2.3.32)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 $0 \sim R_3$ の荷重は次式となる。

$$F_{33} = 2 (Z_3 - Z_2) K_3 \int_0^{R_3} \sigma_B (\varepsilon_B) dX \quad (2.3.33)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_B &= \delta / \ell_5 \\ \ell_5 &= \sqrt{R_5^2 - X^2} - \sqrt{R_3^2 - X^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.34)$$

であり、また、

F_{34} : 領域 $Z_2 \sim Z_3$ において区間 $0 \sim R_3$ 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。

$$\left. \begin{aligned} F_{35} &= 2 (Z_3 - Z_2) K_3 \int_{R_3}^{R_5} \sigma_B (\varepsilon_B) dX \\ \varepsilon_B &= \delta / \ell_5 \\ \ell_5 &= 2 \sqrt{R_5^2 - X^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.35)$$

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。

$$F_3 = F_{33} + F_{35} \quad (2.3.36)$$

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 (2.3.33) ~ (2.3.36)
式において、 $Z_3 - Z_2$ 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 2.3.5 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。

$$F_H = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (2.3.37)$$

ここで、 F_H : 水平落下衝突の荷重
 F_1 : 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。

(2) 加速度

加速度は (2.3.7) 式によって求めることができる。

2.3.4 傾斜落下

(1) 荷重

(a) 一般的な取扱い

第2.3.8および2.3.9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。緩衝材の変形量と荷重を求めるに際して、緩衝材を厚さ ΔS で切り出し、第2.3.10図に示す馬てい型のスライス片を、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2.3.11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。緩衝材のスライス片の幅 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(2.3.2)式から次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_i &= K_i \sigma_i (\varepsilon_i) \Delta X \cdot \Delta S \\ \varepsilon_i &= \delta_i / \ell_i \end{aligned} \right\} \quad (2.3.38)$$

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。

$$\left. \begin{aligned} F_i &= 2 \int_0^{x_M} dF_i dX \\ F_i &= 2 \Delta S K_i \int_0^{x_M} \sigma_i (\varepsilon_i) dX \end{aligned} \right\} \quad (2.3.39)$$

(b) 断面形状

幅 ΔS スライスされた橿円断面は第2.3.12図に示すように、寸法 h_0 、 h_1 、 ℓ_1 、 ℓ_2 および R_s 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_s : 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2.3.12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2.3.13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2.3.14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。

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = (-R_5 \cos \theta, R_5 \sin \theta) \\ P_2 = (-R_1 \cos \theta, R_1 \sin \theta) \\ P_3 = (R_1 \cos \theta, -R_1 \sin \theta) \\ P_4 = (R_5 \cos \theta, -R_5 \sin \theta) \\ P_5 = (-R_3 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, R_3 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\ P_6 = (-R_1 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, R_1 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\ P_7 = (R_1 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, -R_1 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\ P_8 = (R_3 \cos \theta + Z_2 \sin \theta, -R_3 \sin \theta + Z_2 \cos \theta) \\ P_9 = (-R_5 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, R_5 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\ P_{10} = (-R_3 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, R_3 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\ P_{11} = (R_3 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, -R_3 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\ P_{12} = (R_5 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, -R_5 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \\ Q_0 = (Z_4 \sin \theta, Z_2 \cos \theta) \\ Q_2 = (-R_1 \cos \theta + Z_1 \sin \theta, R_1 \sin \theta + Z_1 \cos \theta) \\ Q_3 = (R_1 \cos \theta + Z_1 \sin \theta, -R_1 \sin \theta + Z_1 \cos \theta) \\ Q_4 = (R_4 \cos \theta + Z_4 \sin \theta, -R_4 \sin \theta + Z_4 \cos \theta) \end{array} \right\} \quad (2.3.40)$$

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2.3.15図に示すようになる。これらの値は第2.3.14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。

$$\left. \begin{array}{l} h_0 = R_5 \sin \theta - S \tan \theta, \quad (\text{区間 } P_1 \sim P_2 \sim P_3 \sim P_4) \\ h_0 = (S - R_5 \cos \theta) \cot \theta, \quad (\text{区間 } P_4 \sim P_{12}) \end{array} \right\} \quad (2.3.41)$$

$$h_1 = -\frac{S}{\sin \theta \cos \theta} \quad (2.3.42)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ell_2 = \frac{R_5}{\sin \theta}, \quad (\text{区間 } P_1 \sim P_9) \\ \ell_2 = \frac{Z_4 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } P_9 \sim P_{10}) \end{array} \right\} \quad (2.3.43)$$

一方、緩衝体Ⅱ型については、(2.3.41)および(2.3.42)式はそれぞれ(2.3.44)および(2.3.45)式となる。

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= R_5 \sin \theta - S \tan \theta, & (\text{区間 } P_1 \sim P_2, P_3 \sim P_4) \\ h_0 &= (S - R_5 \cos \theta) \cot \theta, & (\text{区間 } P_4 \sim P_{12}) \\ h_0 &= (S + R_1 \cos \theta) + (R_1 + R_5) \sin \theta, & (\text{区間 } P_2 \sim Q_2 \sim P_6) \\ h_0 &= \infty, & (\text{区間 } P_6 \sim Q_0 \sim P_7) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.44)$$

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, & (\text{区間 } P_1 \sim P_2) \\ h_1 &= \frac{R_1}{\sin \theta}, & (\text{区間 } P_2 \sim P_6) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.45)$$

$$K_h = 0 \quad (2.3.46)$$

(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 2.3.15(b)で示したようになる。 h_0 は(2.3.4)式と同一であり, $h_1 = 0$ である。

$$\left. \begin{aligned} \ell_1 &= \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, & (\text{区間 } P_2 \sim P_4 \sim P_{12}, S \leq P_4) \\ \ell_1 &= \frac{R_5}{\sin \theta}, & (\text{区間 } P_2 \sim P_4 \sim P_{12}, S > P_4) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.47)$$

$$\left. \begin{aligned} \ell_2 &= \frac{R_5}{\sin \theta}, & (\text{区間 } P_1 \sim P_9) \\ \ell_2 &= \frac{Z_2 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, & (\text{区間 } P_9 \sim P_{10}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.48)$$

$$K_h = 0 \quad (2.3.49)$$

(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 2.3.15(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(2.3.41)式, h_1 は(2.3.44)式, ℓ_2 は(2.3.45)式, K_h は(2.3.46)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 2.3.16(d)および(f)図で示すようになる。 h_0 は(2.3.41)式と同一である。

$$\ell_2 = \frac{Z_2 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0) \quad (2.3.50)$$

h_1 と ℓ_1 は緩衝体Ⅱ型については次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = -\frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S \leq 0) \\ \ell_1 = 0, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S \leq 0) \end{array} \right\} \quad (2.3.51)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 0, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ P_4 \geq S > 0) \\ \ell_1 = \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ P_4 \geq S > 0) \end{array} \right\} \quad (2.3.52)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = 0, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S > P_4) \\ \ell_1 = \frac{R_5}{\sin \theta}, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S > P_4) \end{array} \right\} \quad (2.3.53)$$

$$K_h = 0 \quad (2.3.54)$$

一方、緩衝体Ⅲ型については (2.3.51) ~ (2.3.53) 式は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{R}{\sin \theta}, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S \leq P_6) \\ \ell_1 = 0, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S \leq P_6) \end{array} \right\} \quad (2.3.55)$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{Z_2 \sin \theta - S}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S > P_6) \\ \ell_1 = 0, \quad (\text{区間 } P_5 \sim Q_0, \ S > P_6) \end{array} \right\} \quad (2.3.56)$$

(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 2.3.16(e) 図に示すようになる。 h_0 は (2.3.41) 式と同一であり, $\ell_2 = 0$ である。

$$\left. \begin{array}{l} h_1 = \frac{S - Z_2 \sin \theta}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } Q_0 \sim P_8) \\ h_1 = \frac{R_3}{\sin \theta}, \quad (\text{区間 } P_8 \sim P_1) \end{array} \right\} \quad (2.3.57)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ell_1 = \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } Q_0 \sim P_8 \sim P_1, \ S < P_4) \\ \ell_1 = \frac{R_5}{\sin \theta}, \quad (\text{区間 } Q_0 \sim P_8 \sim P_1, \ S \geq P_4) \end{array} \right\} \quad (2.3.58)$$

$$K_h = 1 \quad (2.3.59)$$

(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 2.3.15(c) 図に示したようになる。 h_0 は (2.3.41) 式と同一であり、 $\ell_2 = 0$ である。

$$h_1 = \frac{S - Z_4 \sin \theta}{\sin \theta \cos \theta}, \quad (\text{区間 } P_{11} \sim P_{12}) \quad (2.3.60)$$

$$\left. \begin{aligned} \ell_1 &= \frac{S}{\sin \theta \cos \theta}, & (\text{区間 } P_{11} \sim P_{12}, S < P_4) \\ \ell_1 &= \frac{R_s}{\sin \theta}, & (\text{区間 } P_{11} \sim P_{12}, S \geq P_4) \end{aligned} \right\} \quad (2.3.61)$$

$$K_h = 0 \quad (2.3.62)$$

(j) 楕円の計算式

スライス断面は第 2.3.17 図に示すような楕円形状であり、緩衝材外半径 R_s と傾斜角度 θ から楕円の形状を求める式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{X^2}{R_s^2} + \frac{Y^2}{b^2} &= 1 \\ b &= \frac{R_s}{\sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.63)$$

(2.3.63) 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。

$$\left. \begin{aligned} X_M &= \sqrt{b^2 - h^2} \sin \theta \\ Y &= \frac{\sqrt{R_s^2 - X^2}}{\sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.64)$$

(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 (2.3.38) 式を用いて 1 次元棒の荷重 ΔF_i を求め、さらに (2.3.39) 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、緩衝体全体の荷重を求めることができる。

(2) 加速度

加速度は (2.3.7) 式によって求めることができる。

2.3.5 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一ひずみ特性を、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、木材の応力一ひずみ特性は、2.3.4節で記述したように、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一ひずみ特性を仮定しなければならない。この問題に関して浅田ら⁽⁴⁾は、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ことを明らかにしている。

$$\sigma_x = \sigma_A (\cos \theta)^2 + \sigma_B (\sin \theta)^2 \quad (2.3.65)$$

2.3.6 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。

2.3.7 緩衝材オーバーパックの取扱い

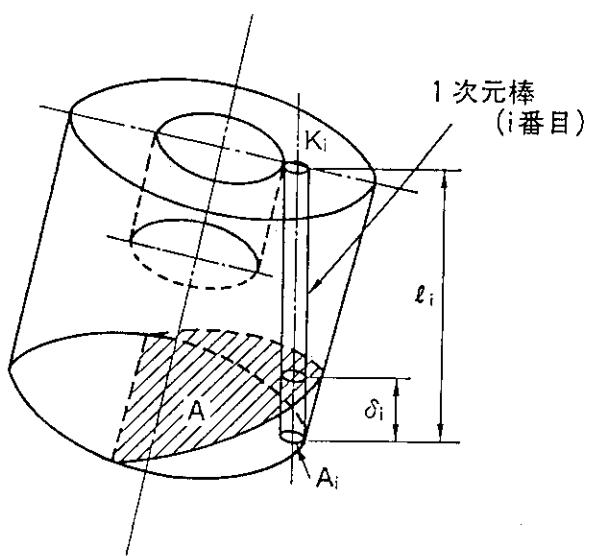
一般に緩衝材は軟鋼、ステンレス鋼などによって覆われている（オーバーパック）。このオーバーパックの取扱いについて、簡易解析では次の4つの方法が考えられる。

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。

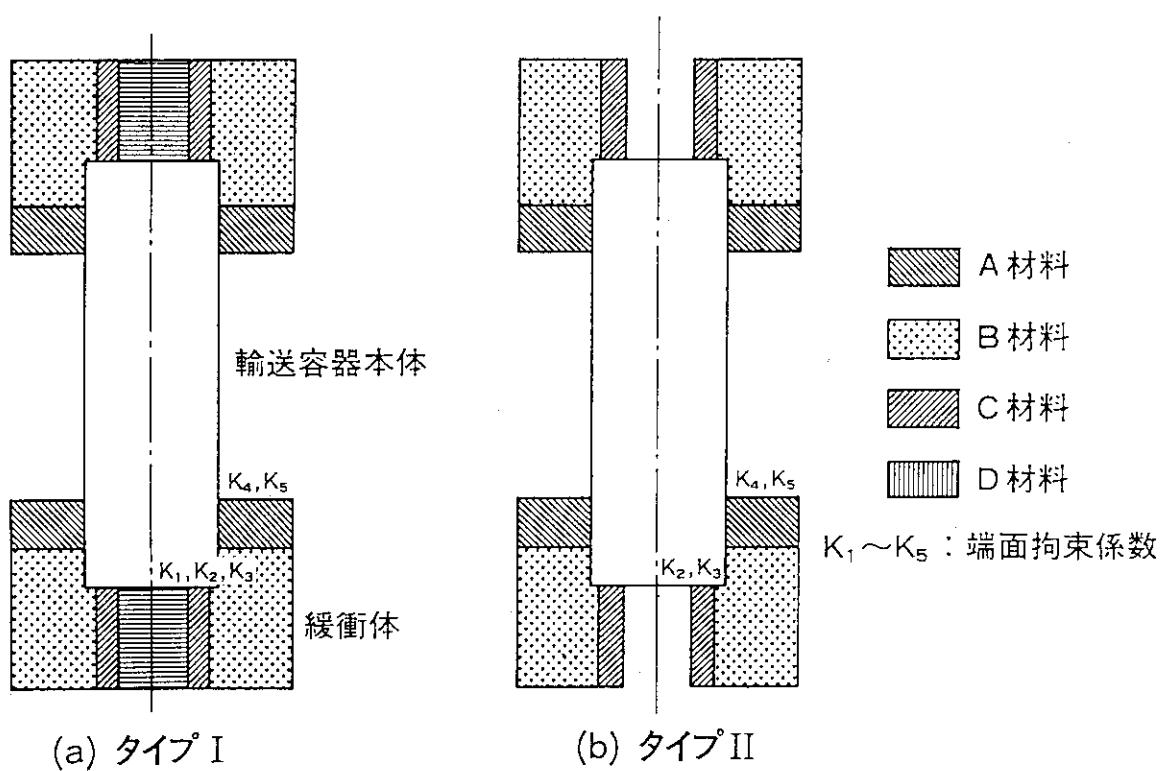
第2の方法は、オーバーパックの変形抵抗力をVDMによって求め、2.3.2節から2.3.4節までに述べたUDMによって求めた緩衝材の変形抵抗力と加え合せるものである。

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。

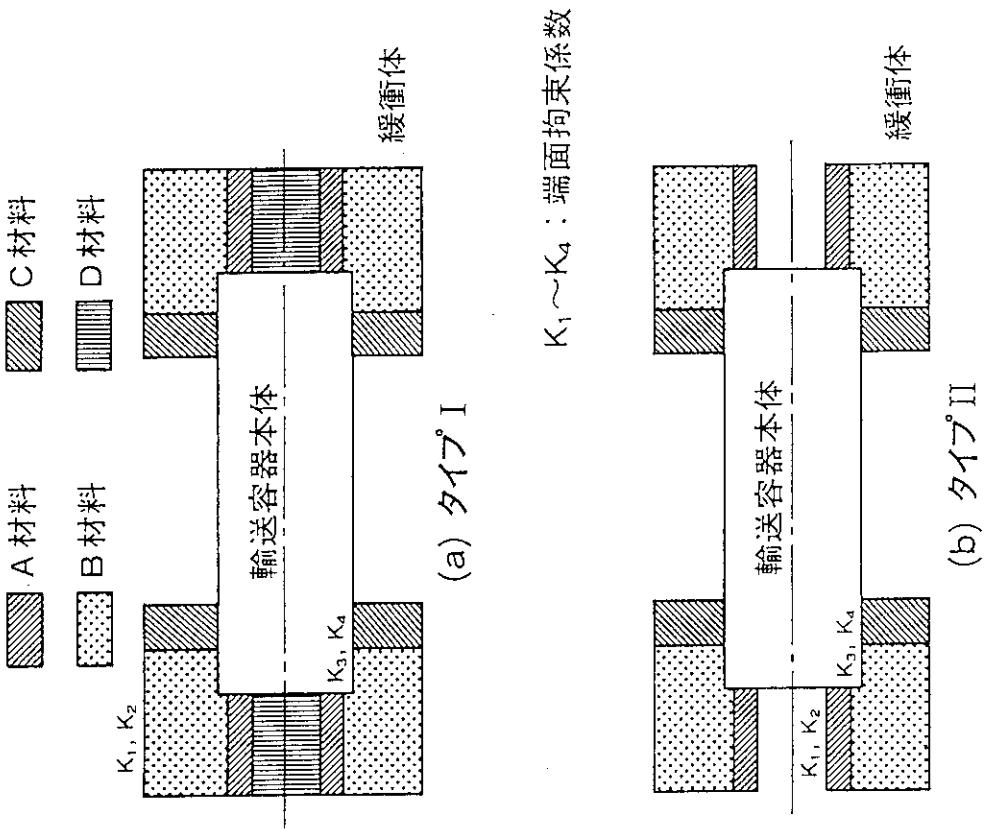
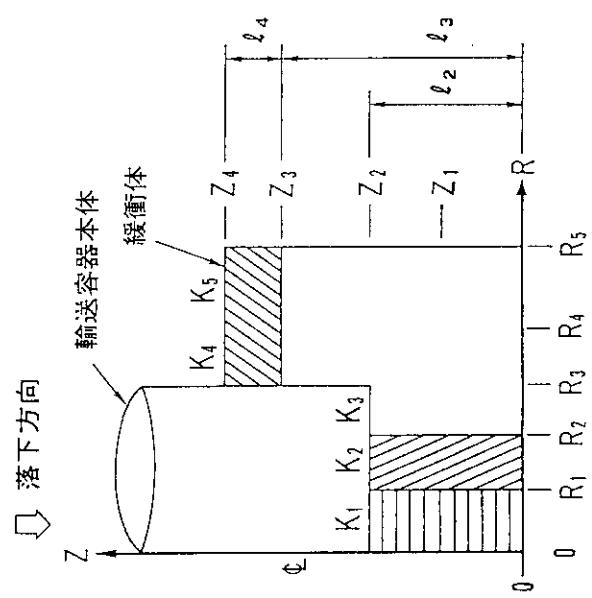
第4の方法は、オーバーパックの剛性を緩衝材の剛性に含めるものであり、緩衝材の剛性を高めに決める。



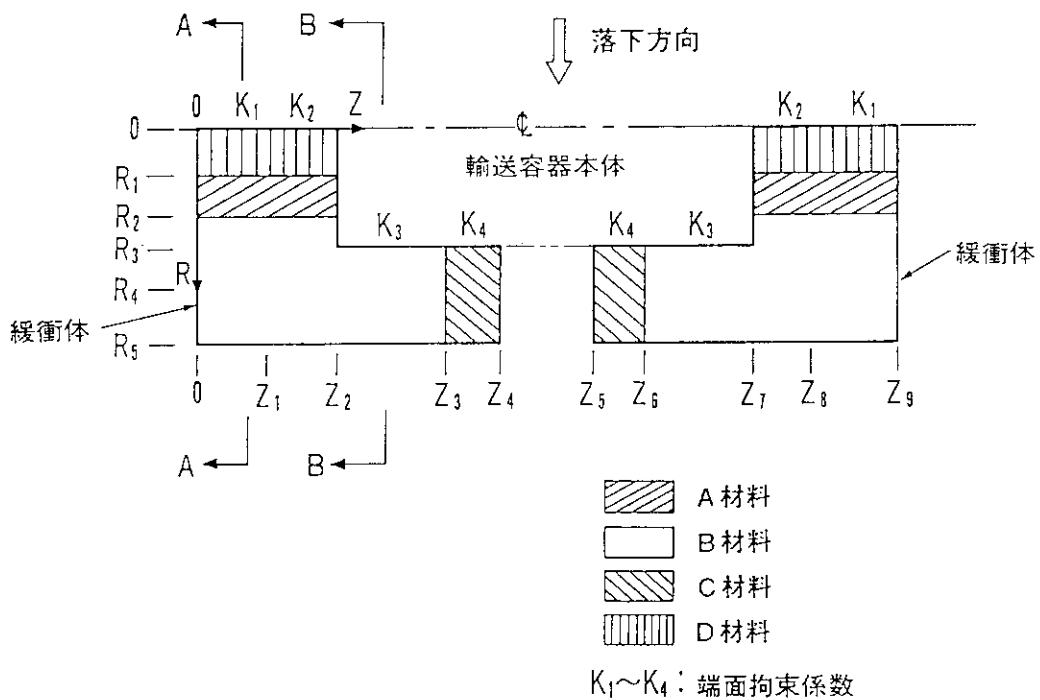
第 2.3.1 図 UDM による衝突計算法



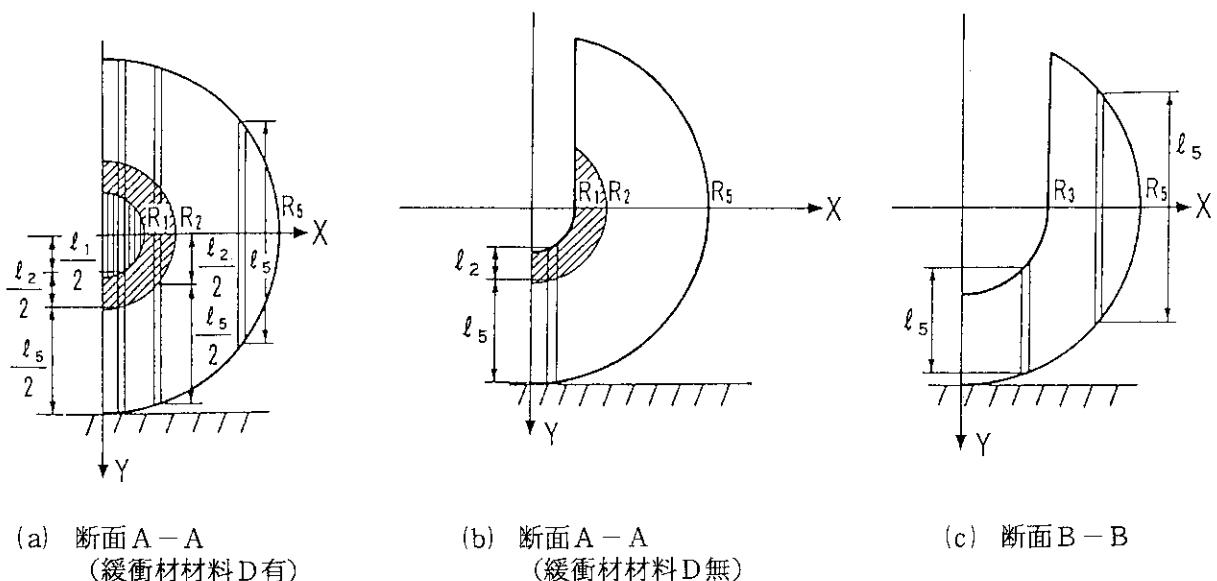
第 2.3.2 図 垂直落下モデル



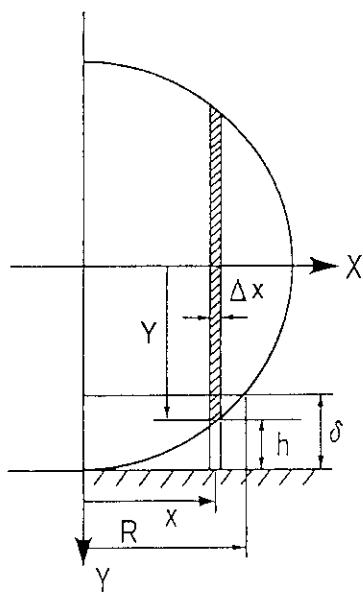
第2.3.4図 水平落下モデル



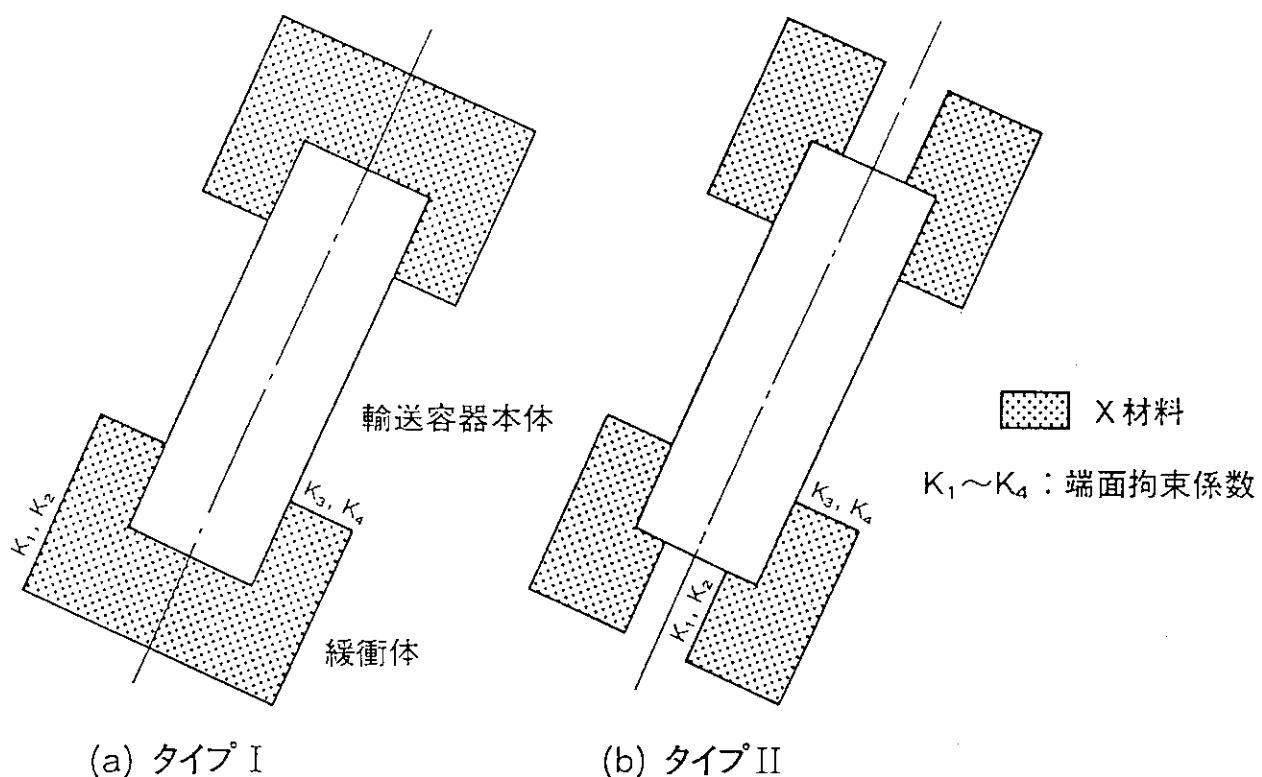
第 2.3.5 図 水平落下の場合の形状寸法、材料区分および境界条件定数



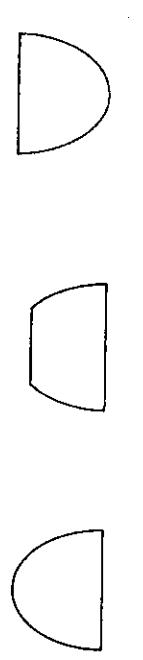
第 2.3.6 図 水平落下の場合の緩衝材の断面形状 (I)



第 2.3.7 図 水平落下の場合の緩衝材の断面形状 (II)



第 2.3.8 図 傾斜落下 モデル



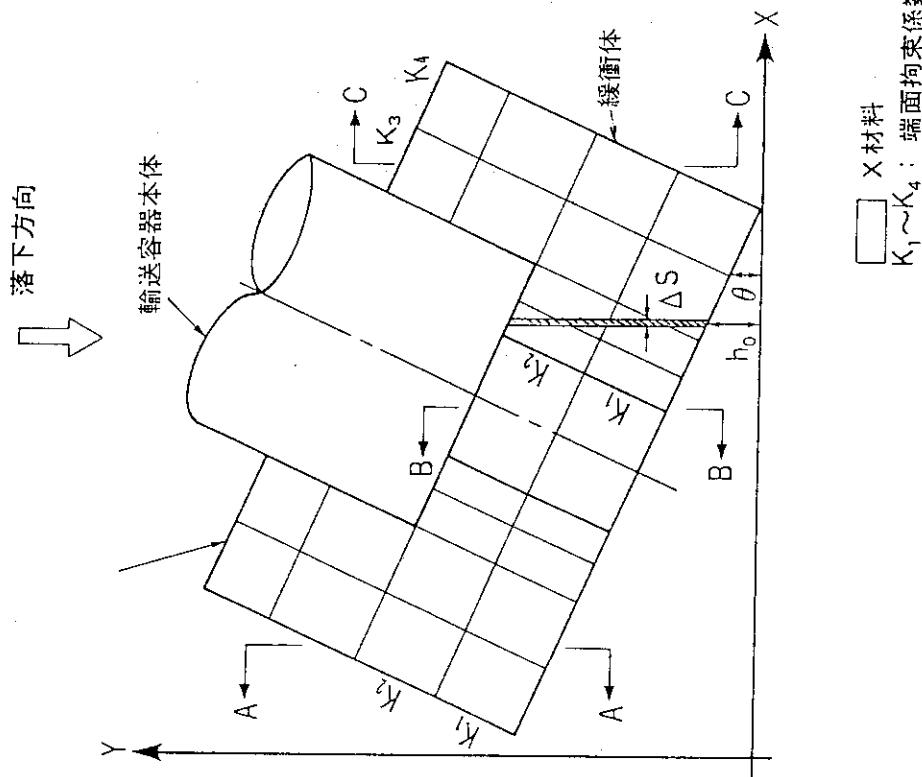
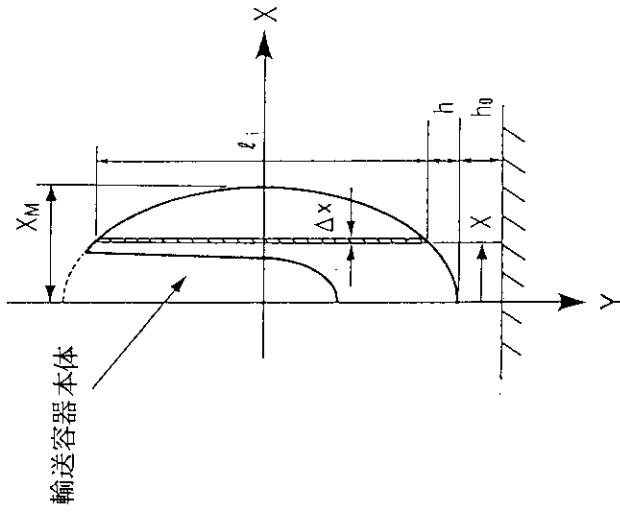
落下方向

(a) 断面A-A

(b) 断面B-B

(c) 断面C-C

第2.3.10図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(Ⅰ)

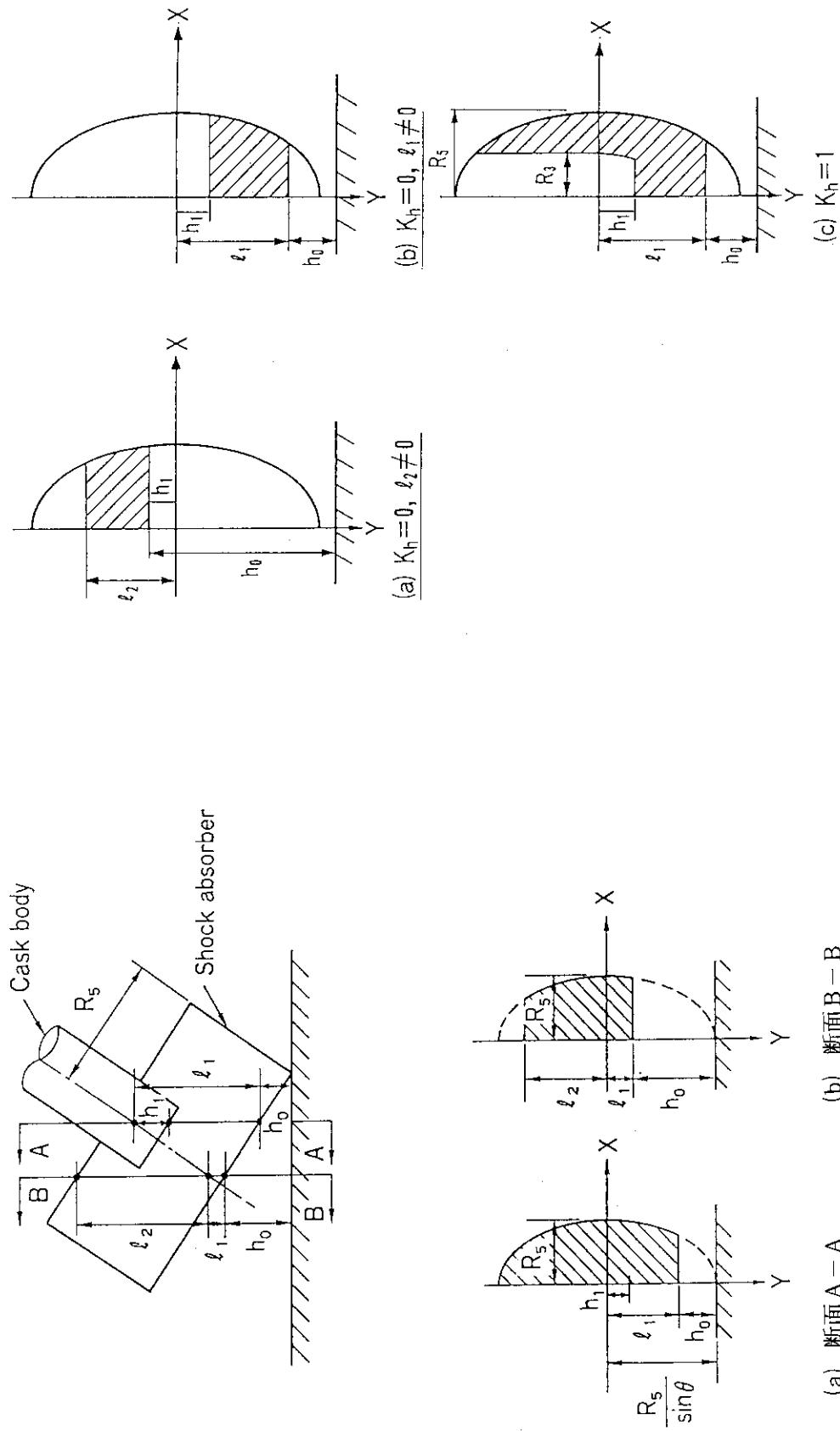


第2.3.9図

傾斜落下の場合の形状寸法、材料区分および
境界条件定数

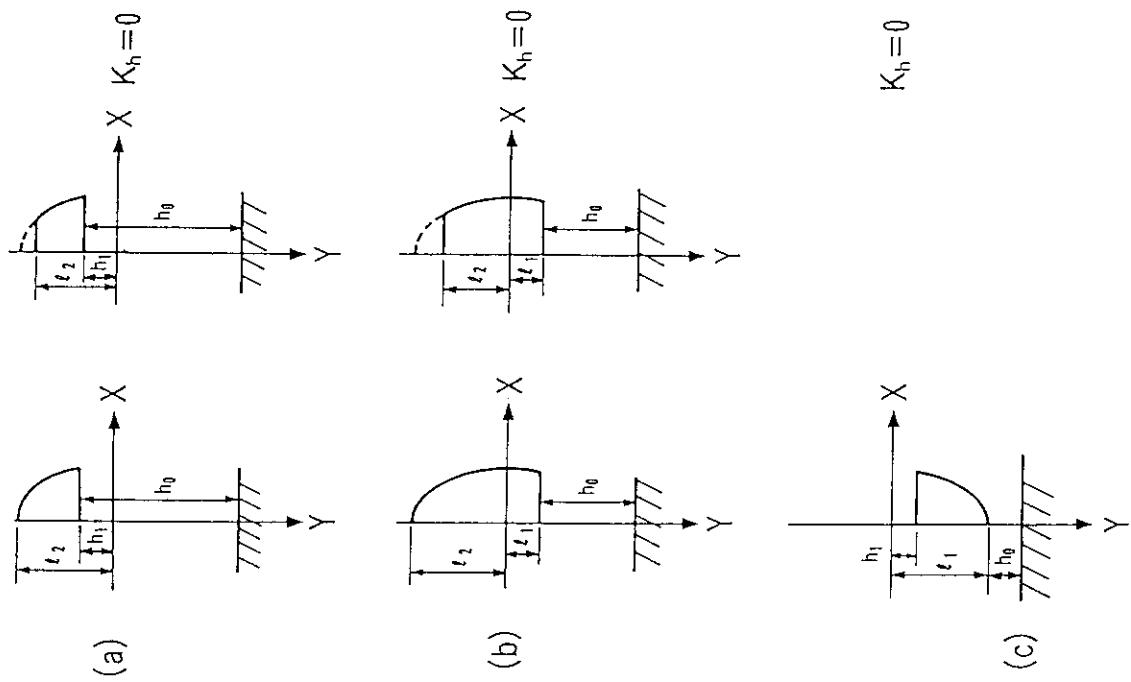
第2.3.11図

傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(Ⅱ)

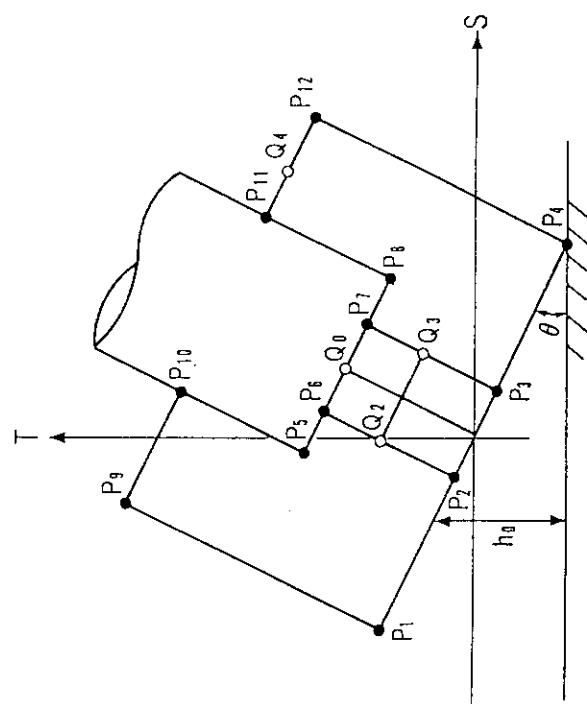


第2.3.12図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(III)

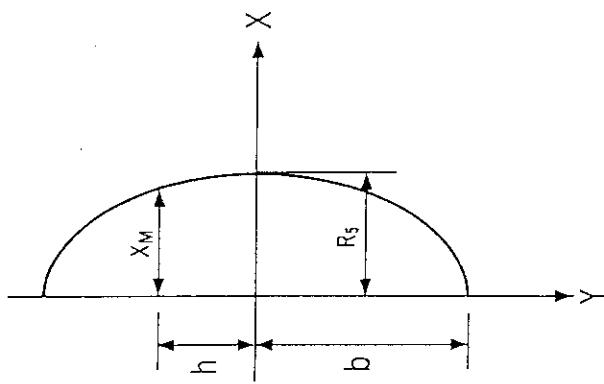
第2.3.13図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状(IV)



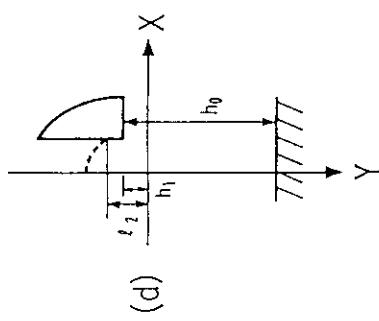
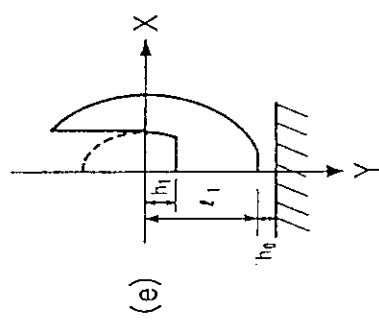
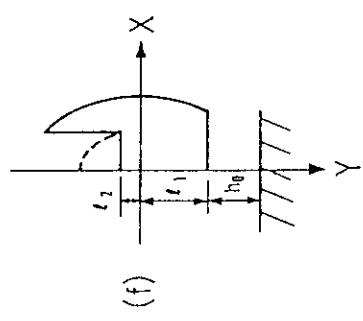
第2.3.15図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状 (V)



第2.3.14図 傾斜落下の場合の緩衝材のS-T座標系



第 2.3.17 図 椭円形状

 $K_h = 1$  $K_h = 1$  $K_h = 1$ 

第 2.3.16 図 傾斜落下の場合の緩衝材の断面形状 (VI)

2.4 ばね-質点モデル法

ばね-集点（集中質量）モデルでは、第2.4.1図で示したように輸送容器を軸方向に区切り、区切られた部分を集中質量に置き換え、質点間は区切られた容器の剛性に関連した非線形ばねで連結する。この非線形ばねは容器本体の形状および材料の応力-ひずみ特性から決定される。

一質点一自由度系の多質点系の運動方程式は次式で表わされる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2.4.1)$$

ここで x : 変位

\dot{x} : 速度

\ddot{x} : 加速度

M : 質量

C : 減衰係数

K : 剛性係数

F : 外力

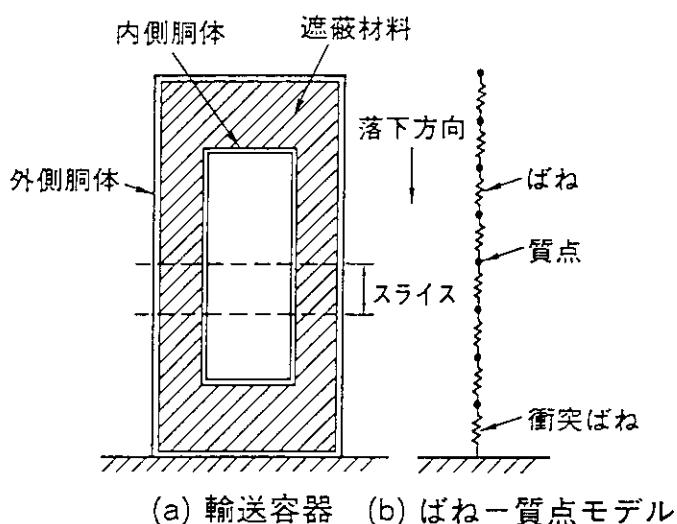
である。衝突による外力は、衝突ばねを仮定することによって次式で求められる。

$$F = k x \quad (2.4.2)$$

ここで、 k : 衝突ばねのばね定数

x : 衝突端のオーバラック量

である。(2.4.2)式を解くことによって、変位、速度、加速度、力を求めることができる。



第2.4.1図 輸送容器落下衝突解析用ばね-質点モデル

2.5 有限差分法 (FDM)

有限差分法に基づく計算コードのうち輸送容器の落下衝突解析のために、有用な計算コードが幾つかある。ここでは、そのうちの STEALTH⁽⁶⁾コードをもとに有限差分法による衝突解析法について記述する。

STEALTHは、弾塑性大変形問題を取り扱うことができる有限差分法による計算コードである。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、大変形問題の取扱いおよび材料の非線形性、すなわち弾塑性構成式を取り扱うための材料モデルを組合せて成り立っている。以下に時間依存の連続体の運動方程式について示す。

(1) 保存則

基本的な連続体力学の方程式は第2.5.1図に示すように空間内の微小体積要素に対して保存則を適用することにより導かれる。オイラー座標系における3つの保存則は次式のようになる。

(a) 質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) \quad (2.5.1)$$

ここで、 v : 固定体積要素を通過する速度

ρ : 密度

(b) 運動量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} s_{ji} - \frac{\partial}{\partial x_j} p \delta_{ij} + \rho g_i \quad (2.5.2)$$

ここで、 s : 偏差応力 (引張が正)

p : 静水圧 (圧縮が正)

σ : 全応力

$$\sigma = s - p$$

g : 重力加速度

δ_{ji} : クロネッカーデルタ

(c) エネルギー保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho u + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) &= - \frac{\partial}{\partial x_i} v_i \left(\rho \dot{u} + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \dot{h}_i'' + \frac{\partial}{\partial x_i} s_{ji} v_j - \frac{\partial}{\partial x_i} p v_i \\ &\quad - \rho v_i g_i + \dot{U}'' \end{aligned} \quad (2.5.3)$$

ここで、 u : 単位質量あたりの内部エネルギー

\dot{h}'' : 热伝導によるエネルギー流出率

\dot{U}'' : 単位体積あたりのエネルギー湧出率

オイラー座標系では、単位要素内の質量は、変数であるが、ラグランジ座標系では固定されている。2つの系間の交換は、質量保存則を用いて直接導びかれる。

固定された質量に対する質量保存則は、物質導関数を用いて、

$$\frac{D}{Dt} \rho = -\rho \frac{\partial}{\partial x_j} v_j \quad (2.5.4)$$

と表示される。これを用いて運動方程式は、

$$\rho \frac{D}{Dt} v_i = +\frac{\partial}{\partial x_j} s_{ji} - \frac{\partial}{\partial x_j} p \delta_{ij} + \rho g_i \quad (2.5.5)$$

と表現される。同様に物質導関数を用いてラグランジ系の内部エネルギー式は、次の様に導びかれる。

$$\rho \frac{D}{Dt} u = -\frac{\partial}{\partial x_i} h''_i + s_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} v_i - p \frac{\partial}{\partial x_i} v_i + \dot{U}''' \quad (2.5.6)$$

(2) 境界条件

境界条件には、幾何学的制約条件と、境界値があるが、前者は、内部の材料の接触面と同様に外部との物理的な境界を定義し、後者は、外部境界における保存則で用いられたある独立変数の値である。例えば、運動量方程式は、すべての境界に対して、応力や速度の成分が必要であるし、またエネルギー方程式では、温度や熱流出境界値が必要である。

(3) 初期条件

初期値は、空間上のすべての時間依存変数に対して与えられなければならない。すなわち、初期の熱的状態や幾何形状は、既知でなければならない。

(4) 構成方程式

境界付けられた内部の特性を定義するために構成方程式が必要である。これらは次の3つの組の方程式より成る。

(a) 状態方程式

$$p = p(u, p) \quad (2.5.7)$$

ここで、 u ：単位質量あたりの内部エネルギー

(b) 偏差応力モデル

$$s_{ij} = s(J'_i, Y)$$

ここで、 J'_i ：偏差応力不变量

$$Y : \text{降伏応力 } (Y = Y(u, \rho))$$

(5) 数値積分法

連続体力学のラグランジ座標系系偏微分方程式を解くための陽表示有限差分スキームは、次の2つの独立な特性を持っている。

- (a) 未知量が既知量の項で直接計算される。すなわち、新しい時間 ($n + 1$) に対して計算された値は、古い時間(n)からのデータを使うのみで求められる。
- (b) 物理現象は、1つの計算ステップ内で1つの空間離散のみ伝達することができる。すなわち、1つの特定の場所における計算値は、一番近い近傍のデータにのみ依存している。一方、陰表示法は、時間がもはや独立な変数ではないような同次方程式の集りを解く。陽解法の安定条件としては、次のクーラント条件を用いる。

$$\frac{c_1 \Delta t}{\Delta \ell} \leq 1 \quad (2.5.8)$$

ここで、 c_1 : 長手方向の波速

Δt : 安定タイムステップ

$\Delta \ell$: 特定領域での離散化長さ

陽表示差分法は、構成特性が変わるたびに変化する剛性マトリックスを持っていない。異なった幾何特性を取扱うために要素の多重定義を行なう必要もない。また運動量と熱量の移動を別々に解く必要もない。さらに異なる収束条件を考慮する必要がない。

この特性は、衝撃現象や、大ひずみ応答を取り扱う上で大変有利である。

(6) 発散定理

空間微分に対する差分式は、次の発散定理に基づいている。

$$\iiint_v (\nabla \cdot \underline{A}) dv = \iint_s (\underline{A} \cdot \underline{n}) dS \quad (2.5.9)$$

ここで、 v : 体 積

S : 表面積

n : S 上の外向き法線ベクトル

A : 連続微分可能なベクトル関数

これを解くと、

$$\nabla \cdot \underline{A} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \iint_s (\underline{A} \cdot \underline{n}) dS \quad (2.5.10)$$

成分形式では、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\cdot) &= \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \int f(\cdot) \cdot n_x dS \\ \frac{\partial}{\partial y} (\cdot) &= \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \int f(\cdot) \cdot n_y dS \\ \frac{\partial}{\partial z} (\cdot) &= \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \int f(\cdot) \cdot n_z dS \end{aligned} \right\} \quad (2.5.11)$$

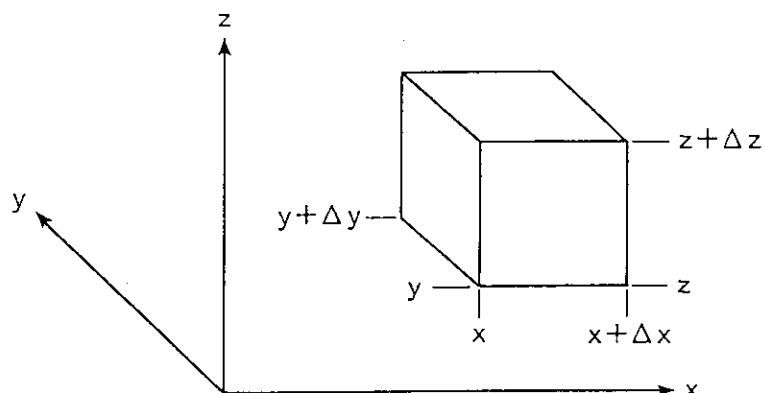
と表わされる。これを差分式に置きなおすと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\cdot) &= \frac{1}{v} \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} [(\cdot) \times \Delta S_x] \\ \frac{\partial}{\partial y} (\cdot) &= \frac{1}{v} \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} [(\cdot) \times \Delta S_y] \\ \frac{\partial}{\partial z} (\cdot) &= \frac{1}{v} \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} [(\cdot) \times \Delta S_z] \end{aligned} \right\} \quad (2.5.12)$$

ここで、
1 : Δv をかこむ面素 ΔS の数

ΔS_x : 面素 ΔS の面積を x 方向に射影したときの大きさ ($\Delta S_y, \Delta S_z$ も同様)

(2.5.12) 式は、直交座標系のもので、2次元軸対称（円筒）では、 (r, θ, z) 座標系に、また1次元の点対称（球）には、 (r, θ, φ) 座標系に置きなおされる。



第 2.5.1 図 微小体積要素

2.6 有限要素法 (FEM)

有限要素法に基づく計算コードのうち輸送容器の落下衝突解析のために、有用な計算コードが幾つかある。ここでは、そのうちの最も広く使用されている D Y N A 3 D⁽⁷⁾ コードをもとに有限要素法による衝突解析法について記述する。

D Y N A 3 D は、弾塑性大変形問題を取り扱う有限要素法による計算コードである。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および材料の非線形性、すなわち弾塑性構成式を取り扱うための材料モデルを組合せて成り立っている。以下に時間依存の連絡体の運動方程式について示す。

(1) 移動量

第 2.6.1 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。

この運動をラグランジ形式で表現すると、

$$x_i = x_i (a_\alpha, t) \quad (2.6.1)$$

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、(2.6.1) 式で表示すると、

$$x_i (a_\alpha, 0) = a_\alpha \quad (2.6.2)$$

と表わすことができる。また初期速度は、

$$x_i (a_\alpha, 0) = v_i (a_\alpha) \quad (2.6.3)$$

と表示することができる。

また、この時の移動量は

$$x_i (a_\alpha, t) - x_i (a_\alpha, 0) \quad (2.6.4)$$

で表現することができる。

(2) 保存則

連続体力学には次の様な 3 つの保存則が存在する。

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

以下にこれらにつき、簡単に説明する。

(a) 運動量保存則

境界 ∂b_1 上での力の境界条件

$$\sigma_{ij} n_{ij} = t_i (t) \quad (2.6.5)$$

と、境界 ∂b_2 上での変位の境界条件

$$x_i (a_\alpha, t) = D_i (t) \quad (2.6.6)$$

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

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \quad (2.6.7)$$

を満足する運動量の平衡方程式は、

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (2.6.8)$$

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

$$\sigma_{ij,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.6.9)$$

ρ : 密度

f_i : 単位体積あたりの物体力

\ddot{x}_i : 加速度 $\left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial t^2} \right)_i$

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、(2.5.5), (2.5.6) および (2.5.7) 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。

(b) 質量保存則

質量保存則は質量が変化しないことを定義するものであり、

$$\int \rho_t dv_t = M \quad (2.6.10)$$

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (2.6.11)$$

である。密度で表現すると

$$\rho_t v = \rho_0 \quad (2.6.12)$$

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

(c) 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関し積分することにより得られる。

$$\dot{E} = v s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q) \dot{v} \quad (2.6.13)$$

ここで、 s_{ij} および p はそれぞれ偏差応力と圧力を示し、

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q) \delta_{ij} \quad (2.6.14)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} - q = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} - q \quad (2.6.15)$$

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 $\delta_{ij} = 0$

$\dot{\epsilon}_{ij}$: ひずみ速度テンソル

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

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

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、D Y N A 3 D 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大変形問題で取扱っている。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、応力増分の取扱いについて解説する。

今、ある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

$$dv_i = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dx_j \quad (2.6.16)$$

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

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.6.17)$$

とおいて、

変形速度テンソル 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。

$$V_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.6.18)$$

$$\Omega_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.6.19)$$

V_{ij} は対称であり、 Ω_{ij} は反対称である。すなわち、

$$V_{ij} = V_{ji}, \quad \Omega_{ij} = -\Omega_{ji} \quad (2.6.20)$$

である。（2.6.18）と（2.6.19）式に dt をかけると

$$V_{ij} dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \epsilon_{ij} \quad (2.6.21)$$

$$\Omega_{ij} dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) dt = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \omega_{ij} \quad (2.6.22)$$

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、（2.6.18）式はそのままひずみ速度を表わし、

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (2.6.23)$$

と書ける。

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 $C_{ijk\ell}$ を用いて、

$$\overset{\nabla}{\sigma}_{ij} = C_{ijk\ell} \epsilon_{k\ell} \quad (2.6.24)$$

と表現できる。ここで $\overset{\nabla}{\sigma}_{ij}$ は回転成分をのぞいた応力速度である。回転成分を含めた応力速度 $\overset{\nabla}{\sigma}_{ij}$ は

$$\dot{\sigma}_{ij} = \overset{\nabla}{\sigma}_{ij} + \sigma_{ik} \Omega_{kj} + \sigma_{ij} \Omega_{kj} \quad (2.6.25)$$

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、

$$\sigma_{ij}(t+dt) = \sigma_{ij}(t) + \dot{\sigma}_{ij} dt \quad (2.6.26)$$

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) 離散化

連続体力学の基礎方程式と大変形弾塑性問題の取扱いについて記述した。ここでは、これらの方程式を有限要素法により離散化して計算する方法について記述する。なお、空間の離散化は変位法による。

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。

$$\{\epsilon\} = [B_L]\{u\} \quad (2.6.27)$$

ここで $[B_L]$ は、線形のひずみ-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

$$\{\sigma\} = [D_L]\{\epsilon\} \quad (2.6.28)$$

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。

$$[K_L] = \int [B_L]^T [D_L] [B_L] dV_e \quad (2.6.29)$$

通常の線形静解析を行う場合は、この $[K_L]$ を用いて次の平衡方程式

$$\{P\} = [K_L]\{u\} \quad \{P\} = \text{荷重ベクトル} \quad (2.6.30)$$

により変位を求め、これを(2.6.27)式に代入して $\{\epsilon\}$ を求め、さらにこの $\{\epsilon\}$ を(2.6.28)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、(2.6.27)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-変位関係マトリクス $[B_N]$ が加わり

$$\{\epsilon\} = [B_L + B_N]\{u\} \quad (2.6.31)$$

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

$$\{\sigma\} = [D_L + D_N]\{\epsilon\} \quad (2.6.32)$$

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

$$[K] = \int_{V_e} [B_L + B_N]^T [D_L + D_N] [B_L + B_N] dV_e \quad (2.6.33)$$

$$= [K_L] + \sum_{all} [K_N] \quad (2.6.34)$$

となる多くの非線形剛性マトリクスが導びかれ、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。

D Y N A 3 D 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更新する。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、更新された応力と、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、

$$\{F\} = \sum_e [L]^T \int v_e [B]^T \sigma dv_e \quad (2.6.35)$$

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

$$[M]\{\alpha\} + \{F\} = \{P\} \quad (2.6.36)$$

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。(2.6.27) 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、(2.6.35) 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モードの処理方法について解説する。最後に(2.6.36) 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。

(5) 離散化と積分

D Y N A 3 D における空間の離散化において要素の体積積分には、1 積分点スキームを用いた次数低減積分法を採用しており、D Y N A 3 D の計算効率の向上の一因となっている。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。

(6) 離散化式

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。

$$x_i(a_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1} \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (2.6.37)$$

この形状関数 ϕ_j は、第 2.6.2 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の場所の関数で、節点座標 (ξ_j, η_j, ζ_j) を用いて次の様に定義される。

$$\phi_j = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_j) (1 + \eta \eta_j) (1 + \zeta \zeta_j) \quad (2.6.38)$$

また、局部座標系は、座標位置の簡単化のためそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} -1 &\leq \xi \leq 1 \\ -1 &\leq \eta \leq 1 \\ -1 &\leq \zeta \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.6.39)$$

の範囲で定義されている。

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、次の様に求める。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = \tilde{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.6.40)$$

ここで \tilde{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、

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_{1,1} \\ \tilde{\phi}_{2,2} \\ \tilde{\phi}_{3,3} \\ \tilde{\phi}_{1,2} \\ \tilde{\phi}_{2,3} \\ \tilde{\phi}_{3,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \tilde{N} \quad (2.6.41)$$

となる。ここで \tilde{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。

$$\tilde{N}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \cdots & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \phi_8 \end{bmatrix} \quad (2.6.42)$$

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、

$$\sum_{m=1}^N \left\{ \int_{V_m} \rho \tilde{N}^T \tilde{N} dV a + \int_{V_m} \tilde{B}^T \sigma dV - \int_{V_m} \rho \tilde{N}^T b dV - \int_{\alpha b_1} \tilde{N}^T t ds \right\} m = 0 \quad (2.6.43)$$

となる。(2.6.36)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 $[M]\{\alpha\}$ 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、(2.6.36)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、

$$\underline{\sigma}^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (2.6.44)$$

である。

(7) 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。

$$\int_V g dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g |J| \sim d\xi d\eta d\zeta \quad (2.6.45)$$

積分点数を n とすると次の様に近似化される。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n g |J| \sim W_j W_k W_i \quad (2.6.46)$$

ここで、 W_j 、 W_k 、 W は重み係数であり、 g は、

$$g = g(\xi_j, \eta_k, \zeta_i) \quad (2.6.47)$$

である。また (2.6.45) 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、

$$\left. \begin{array}{l} n = 1 \\ W_i = W_j = W_k = 2 \\ \xi_i = n_i = \xi_1 = 0 \end{array} \right\} \quad (2.6.48)$$

であるので、関数 g の体積積分は、

$$\int g dV = 8 g(0, 0, 0) |J(0, 0, 0)| \quad (2.6.49)$$

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-変位マトリックスの反対称特性の次式を利用すると、

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \phi_1}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_7}{\partial x_i} \quad \frac{\partial \phi_3}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_5}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_8}{\partial x_i} \quad \frac{\partial \phi_4}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_6}{\partial x_i} \end{array} \right\} \quad (2.6.50)$$

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 PISCES2DELK, 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 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。

(8) 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、変形エネルギーが膨大して、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 D Y N A 3 D 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 2.6.3 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。

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、第 2.6.3 図に示すようにアワーグラスベクトルとする
と、その粘性アワーグラス抵抗力 f_{ik} は

$$f_{ik} = -a_h \sum_{j=1}^4 h_{ij} \Gamma_{jk}, \quad (i = 1, 3) \quad (2.6.51)$$

の様に求められる。

ここで h_{ij} はアワーグラスモードの大きさを示し

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^8 v_i^k \Gamma_{jk} \quad (2.6.52)$$

で定義され、 a_h は、次式で表わされる係数である。

$$a_h = Q_{hg} \rho v_e^{2/3} c / 4 \quad (2.6.53)$$

ここで、 v_e は要素体積、 c は速度、 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 H E M P 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。

(9) 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。

$$[M] \{ \alpha \} + \{ F(u, t) \} = \{ P(u, t) \} \quad (2.6.54)$$

ここで、 $[M]$: 質量マトリクス

$\{ \alpha \}$: 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 (2.6.54) 式の内力ベクトルとして

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

が用いられるが D Y N A 3 D ではこれを、

$$\{F(u, t)\} = \sum_e [L]^t \int_{v_e} [B]^t \{\sigma\} dv_e \quad (2.6.55)$$

として取扱っている。この積分は、 $[B]^t \{\sigma\} = [B]^t [D] \{\epsilon\} = [B]^t [D] [B] \{u\}$ 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

$$\{F\} = \sum_e \int_{v_e} [B]^t [D] [B] dv_e \cdot \{u\} \quad (2.6.56)$$

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、この内力を全体マトリクスにアセンブルするための作用素である。また、D Y N A 3 D では、外力ベクトルとして、アワーグラス抵抗力と、次章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 (2.6.54) 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。

$$\left. \begin{aligned} \{\alpha^n\} &= [M]^{-1} (\{P(u, t)^n\} - \{F(u, t)^n\}) \\ \{v^{n+\frac{1}{2}}\} &= \{v^{n-\frac{1}{2}}\} + \{\alpha^n\} \cdot \Delta t^n \\ \{u^{n+\frac{1}{2}}\} &= \{u^n\} + \{v^{n+\frac{1}{2}}\} \cdot \Delta t^{n+\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.6.57)$$

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。

差分法による流体力学計算コードにおいて、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、クーラントの安定条件により数値解の安定性が議論される。D Y N A 3 D 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 (2.6.54) 式の依存領域よりも大きくならないと、このスキームは不安定となり、これは (2.6.54) 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式である。

$$\Delta t_e = 9 v_e / \{[Q + (Q^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}] A_{e_{max}}\} \quad (2.6.58)$$

ここで Q は、1 次および 2 次の人工粘性を用いて定義される粘性係数で (2.5.56) 式より定義される。

$$Q = Q_2 c + Q_1 v_e |\dot{\epsilon}_{kk}| / A_{e_{max}} \quad (2.6.59)$$

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 (2.5.56) 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、

$$\Delta t^{n+1} = \min \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\} \quad (2.6.60)$$

である。

(10) 接触・衝突計算法

D Y N A 3 D では、ラグランジ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。

- (i) 節点拘束法
- (ii) 処罰法
- (iii) 分布パラメータ法

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、第 2.6.4 図に示すようにスレーブ表面とマスター表面があり、前者がぶつかる側、後者がぶつかられる側を示す。それぞれの境界面上の節点スレーブ節点、マスター節点と呼んでいる。例えば、第 2.6.4 図には、節点拘束法を用いた場合に、スレーブ側のゾーニングが粗く、マスター側のゾーニングが細いので、マスター側がスレーブ側に侵入してしまった悪い計算例を示した。

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。D Y N A 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
- (b) 拘束接面
- (c) すべり境界

これらのそれで用いられる計算手法は(a)に対して処罰法、(b)に対して節点拘束法、(c)に対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。

(11) 離接を伴うすべり

この境界面の取り扱いは、面接触問題において、最も良く用いられる処罰法を適用している。処罰法では、お互いの接触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、スレーブ節点がマスター表面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されないが、侵入している場合は、このスレーブ節点と接触点間で、境界節点力が働くことになり、侵入した距離に比例して、このスレーブ節点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。

$$\ell = n_i \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] < 0 \quad (2.6.61)$$

ここで、 n_i はマスター表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スレーブ節点への位置ベクトル

$r(\xi_c, \eta_c)$ は、全体座標の原点からマスター表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。

侵入したスレーブ節点をマスター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、このスレーブ節点に加えられる。

$$f_s = -\ell k_i n_i \quad \text{if } \ell < 0 \quad (2.6.62)$$

ここで、 k_i は、接触点を含むマスター表面の剛性係数で、次式により定義される。

$$k_i = \frac{f_{s1} K_i A_i^2}{v_i} \quad (2.6.63)$$

ここで、 K_i はこのマスター側の要素の体積弾性係数

v_i はこのマスター側の要素の体積

A_i はこのマスター表面の面積

を示している。また、 f_{s1} 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。

(12) 拘束接触面

D Y N A 3 D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マスター表面に取ることが推奨されている。拘束接面での物理量の伝達は次の様に行われる。まず、スレーブ側での質量と、節点力を計算したあと、対応するマスター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。

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_m^i &= \phi_i(\xi_c, \eta_c) M_s \\ \Delta f_m^i &= \phi_i(\xi_c, \eta_c) f_s \end{aligned} \right\} \quad (2.6.64)$$

ここで、 M_s , f_s はスレーブ側の質量と、節点力を示し、

ΔM_m^i , Δf_m^i はマスター側へふりわけられる各増分量

$\phi_i(\xi_c, \eta_c)$ は、接触面を含むマスター表面の形状関数

である。これらの量は、マスター側とスレーブ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、初期に度計算されるだけで良い。また、スレーブ側の質量と節点力が内そうされたあと、マスター側で加速度が計算され、これは、また拘束接面を通って次式によりスレーブ側の加速度が算出される。

$$a_{is} = \sum_{j=1}^4 \phi_j(\xi_c, \eta_c) a_j^i \quad (2.6.65)$$

ここで、 a_j^i はマスター側での加速度

a_{is} はスレーブ側での加速度

$\phi_j(\xi_c, \eta_c)$ は、接触面を含むスレーブ表面の形状関数

(13) すべり境界

このすべり境界の計算アルゴリズムには、分布パラメータ法が用いられるが、この場合は、

離接は許しておらず、境界面上でマスター表面とスレーブ表面がすべてことのみを定義するオプションである。通常、この手法は構造計算にはあまり使用されず、ガス爆発等による流体（あるいは気体）と固体の接触面を取扱う時有用である。この計算アルゴリズムは現在実験段階であり、定式化が固定できるものになっていないので、基本的な考え方のみを簡単に説明する。

- (i) スレーブ側での単位面積あたりの質量と圧力を計算する。
- (ii) マスター側での接触点を見つけ出し、接触効を含むマスター側での単位面積あたりの質量と圧力がスレーブ側の値より内挿する。
- (iii) このマスター側での圧力分布により加速度を更新する。
- (iv) マスター側での各節点の加速度の垂直成分を次のZ-係数によりスケール化してスレーブ側に伝える。

$$Z\text{-係数} = \frac{\sum(\text{質量}/\text{マスター表面の面積})}{\sum(\text{質量}/\text{スレーブ表面の面積})} \quad (2.6.66)$$

- (v) マスター側とスレーブ側の垂直加速度成分と垂直速度成分の適合性をチェックする。
以上の計算を繰り返して全体計算が進められる。

(14) 剛壁境界

剛壁は接触問題では最もシンプルなもので、剛壁と接触面の相互作用は別々に取扱われる。まず、剛壁面上での外向き法線単位ベクトル \tilde{n}_w を定義する。次に、ラグランジ領域内の1つの節点 k の加速度を更新する時、この \tilde{n}_w と、 \tilde{n}_w の原点から k への位置ベクトル \tilde{r}_k^{n+1} に関する次の不等式を計算する。

$$\tilde{r}_k^{n+1} \cdot \tilde{n}_w < 0 \quad (2.6.67)$$

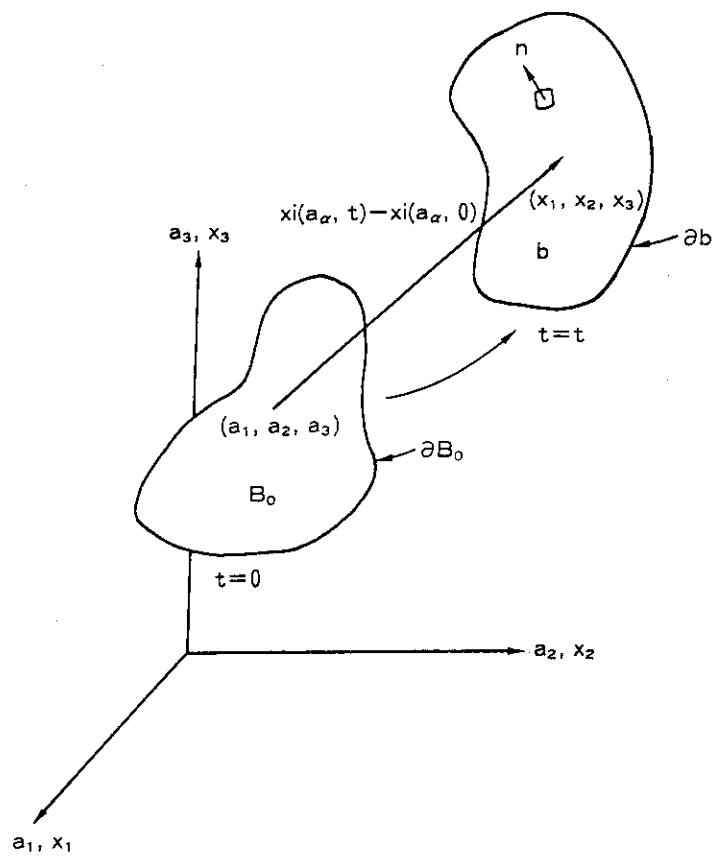
この不等式が満足されたら、剛壁内に k が侵入していることになるのでこの時 k の壁面に垂直な加速度及び速度成分は0として計算し、新しい加速度および速度は次式により計算される。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{a}_k^n_{\text{new}} &= \tilde{a}_k^n_{\text{old}} - (\tilde{a}_k^n_{\text{old}} \cdot \tilde{n}_w) \tilde{n}_w \\ \tilde{v}_k^n_{\text{new}} &= \tilde{v}_k^n_{\text{old}} - (\tilde{v}_k^n_{\text{old}} \cdot \tilde{n}_w) \tilde{n}_w \end{aligned} \right\} \quad (2.6.68)$$

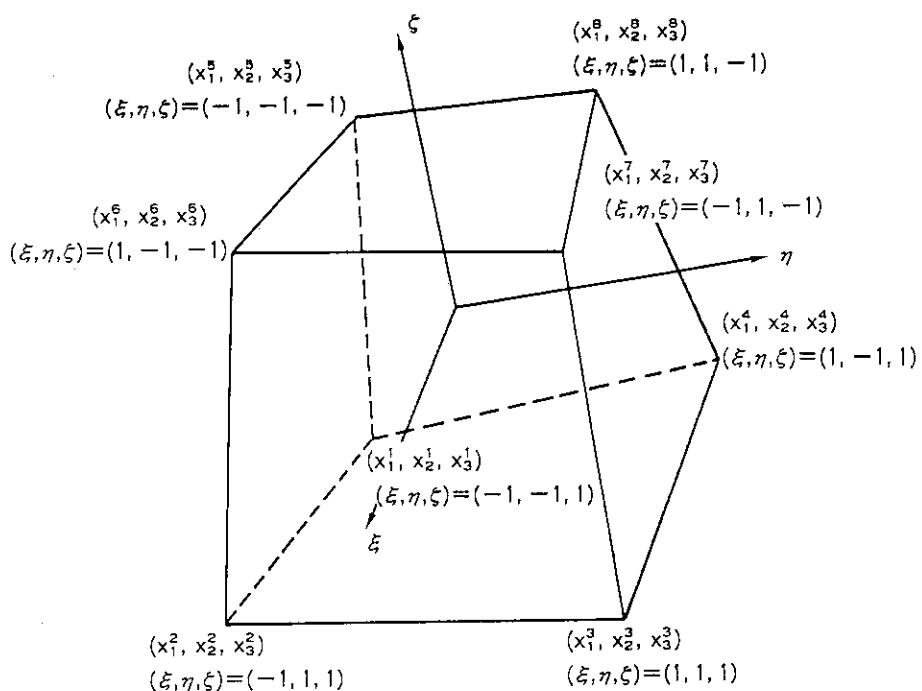
ここで、 \tilde{a}_k および \tilde{v}_k は、節点 k の節点加速度および節点速度を示す。

第 2.6.1 表 アワーグラスベースベクトル

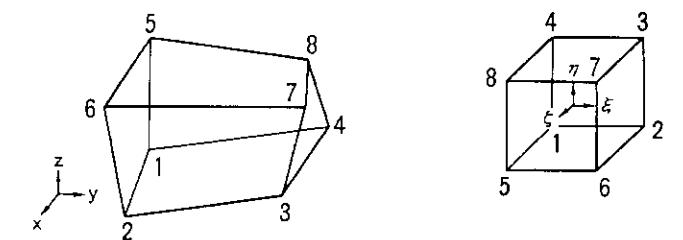
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
Γ_{j1}	1	1	1	1
Γ_{j2}	-1	1	-1	-1
Γ_{j3}	1	-1	-1	1
Γ_{j4}	-1	-1	1	-1
Γ_{j5}	1	-1	-1	-1
Γ_{j6}	-1	-1	1	1
Γ_{j7}	1	1	1	-1
Γ_{j8}	-1	1	-1	1



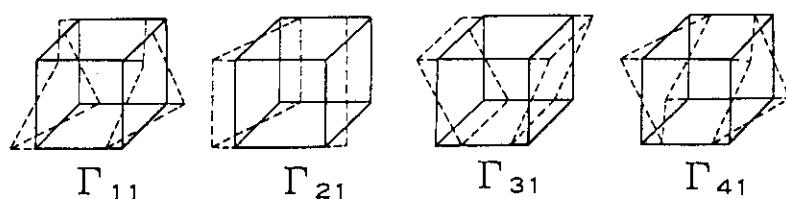
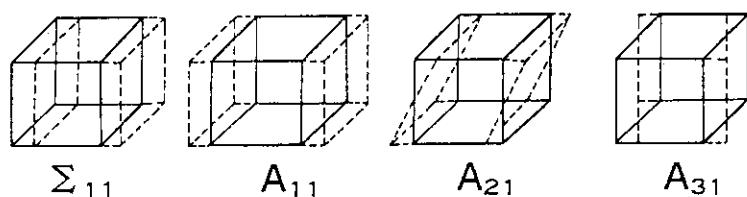
第 2.6.1 図 連続体の運動表示



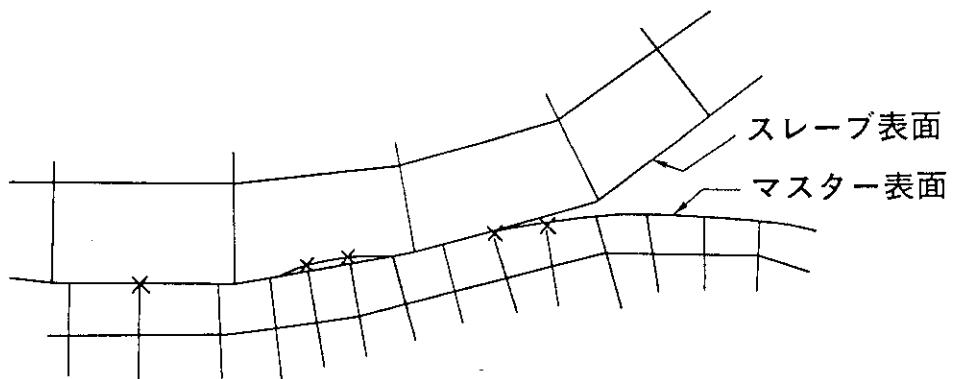
第 2.6.2 図 8 節点アイソパラメトリック要素の局部座標系



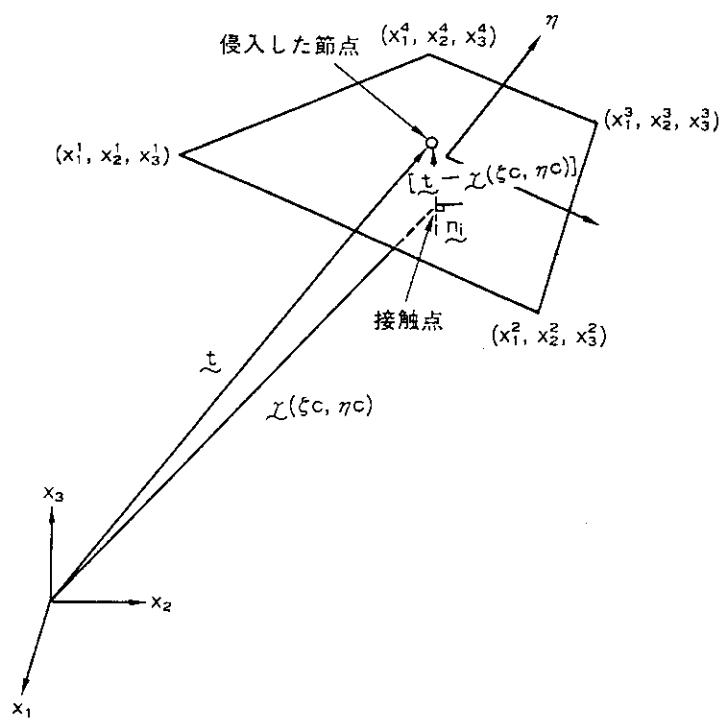
$$\begin{aligned}\phi_1 = & \frac{1}{8} \Sigma_1 + \frac{1}{4} \xi A_{21} + \frac{1}{4} \eta A_{21} + \frac{1}{4} \zeta A_{31} + \frac{1}{2} \eta \zeta \Gamma_{11} \\ & + \frac{1}{2} \xi \zeta \Gamma_{21} + \frac{1}{2} \xi \eta \Gamma_{31} + \xi \eta \zeta \Gamma_{41}\end{aligned}$$



第 2.6.3 図 変位モードとアワーグラスモード



第 2.6.4 図 マスター側がスレーブ側に侵入した失敗例



第 2.6.5 図 侵入量に関する各ベクトルの定義

2.7 衝突によるエネルギー吸収割合

落下衝突解析において、2.2.2および2.3.2節で示したように、落下エネルギーのうち1次衝突に消費されるエネルギー割合を推定する必要がある。このためIAEAの安全輸送規則に規定されている試験条件、さらには、落下衝突実験における輸送容器と衝突面の状態を考えてみる。

試験条件では衝突面は十分に剛であることをIAEAの安全輸送規則で規定されており、衝突面材料およびその吸収されるエネルギーは全落下エネルギーに対してわずかであることは、これまでの多くの実験から推測されている。

衝突後、輸送容器は第2.7.1図に示すように数回リバウンドと衝突を繰り返す。第2.7.1図に示しているように、垂直落下、水平落下、傾斜落下の場合でも落下角度が小さい場合には、2次衝突、3次衝突等が、輸送容器の1次衝突部分とほとんど同一部分で生じる。しかし、落下角度の大きい傾斜落下では、第2.7.1(C)図に示すように、衝突後、輸送容器重心まわりの回転慣性によって、前の衝突と重心から対面の部分が衝突し、1次衝突と3次衝突、2次衝突と4次衝突がほとんど同一部分で衝突する。このような衝突の場合の1次衝突によって消費されるエネルギー $E(\delta_m)$ は、Duclott⁽⁸⁾によると次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} E(\delta_m) &= \gamma WH \\ \gamma &= 1 - \frac{\sin^2 \theta}{1 + \frac{Jg}{WL^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.7.1)$$

ここで、
 J ：輸送容器の慣性モーメント

L ：輸送容器の衝突点と重心の距離

θ ：輸送容器の傾斜角度

g ：重力の加速度

である。

衝突後の輸送容器のリバウンド高さは、緩衝体のエネルギー吸収特性が良好な場合ほど、落下高さに比較して低くなる。輸送容器は、この吸収特性を良好にするように設計されるので、このリバウンド高さは低く、1次衝突後のリバウンドに要するエネルギーは全落下エネルギーに対してわずかである。それ故、1次衝突に消費されるエネルギーを全落下エネルギーと等しいと仮定してよい。これは、安全側の評価にもなる。

上述の仮定は、垂直落下や水平落下のように、2次衝突、3次衝突等が輸送容器の1次衝突と同一部分で生じる場合には、問題はない。しかし、第2.7.1(c)図のように落下角度の大きい傾斜落下では、衝突エネルギーを過大に評価し、その結果、最大加速度および最大変形を過大に評価することになる。これを避けるためには、(2.7.1)式によって1次衝突によって消費されるエネルギーを推定すればよい。しかしながら、(2.7.1)式から明らかなように、落下角度が大きくなり、水平落下に近づくに従って、1次衝突に消費されるエネルギーが、全落下エネルギーの半分以下になる場合がある。このような場合には、1次衝突よりも2次衝突に消

費されるエネルギーが多くなると考えることによって、安全側の評価を得ることができる。すなわち、いま1次衝突および2次衝突によって消費されるエネルギーをそれぞれ r_1 および r_2 とすると、全落下エネルギー r_t は1次衝突と2次衝突によって消費されるとすると

$$r_t = W H = r_1 + r_2 \quad (2.7.2)$$

となる。(2.7.1)式による値 $r = r_1$ が0.5よりも大きいか小さいかによって、1次衝突に消費されるエネルギーとして次式のように仮定する。

$$\left. \begin{array}{l} r = r_1 \quad : \quad (r_1 \geq 0.5 r_t) \\ r = r_2 = (r_t - r_1) : \quad (r_1 < 0.5 r_t) \end{array} \right\} \quad (2.7.3)$$

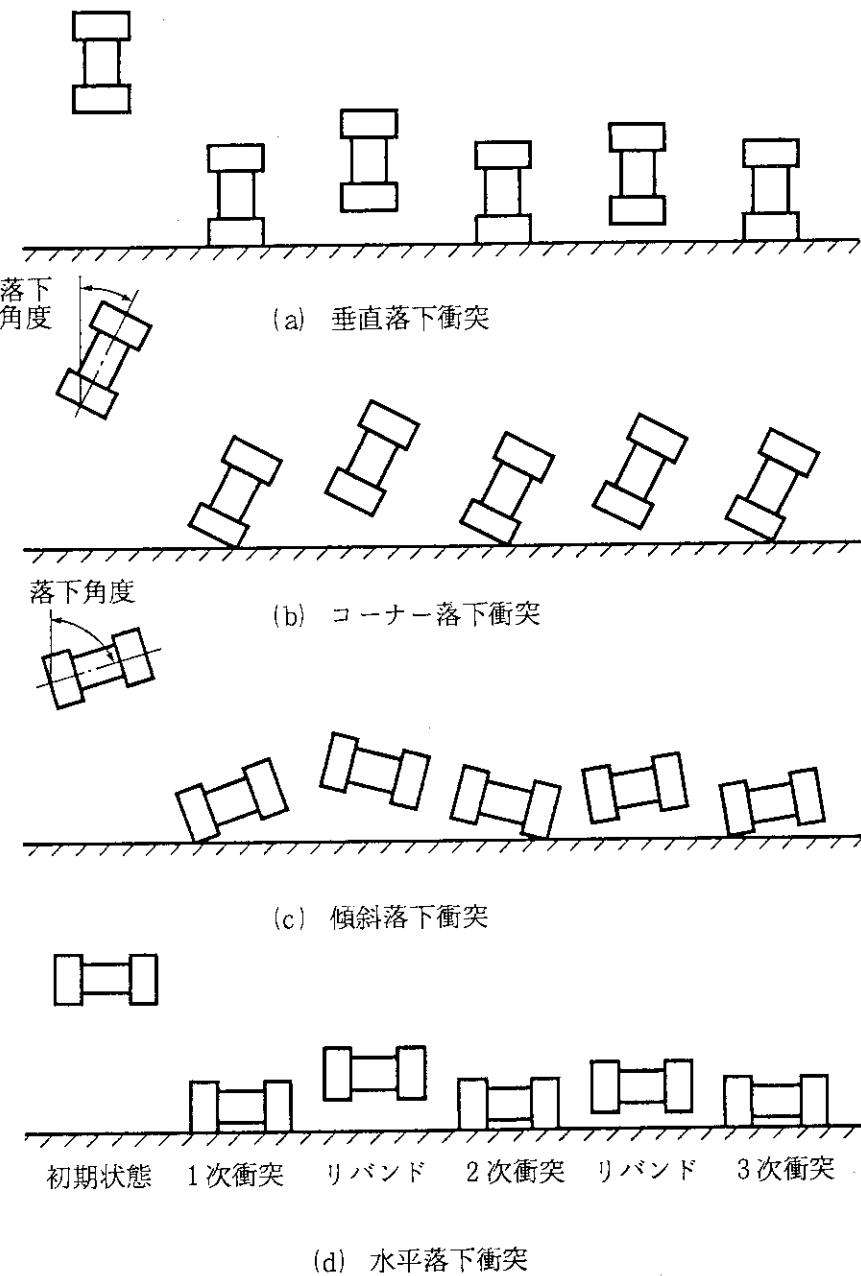
ここで、

$$r_1 = 1 - \frac{\sin^2 \theta}{1 + \frac{J g}{W L^2}}$$

衝突によるエネルギー吸収に関して、以上の他についても少し考えてみる。それは、衝突面の摩擦熱および輸送容器と内部収納物によるエネルギー吸収である。

衝突後、輸送容器が、特に傾斜落下状態において、衝突面で大きく滑ることは実験によって見られず、衝突面の摩擦によって消費されるエネルギーはわずかであると考えてよいし、そのように仮定した方が安全側の評価となる。

輸送容器本体および内部収納物による落下エネルギーの吸収割合は明らかにされてないが、これを考慮しない方が安全側の評価となる。



第 2.7.1 図 落下衝突による衝突とリバンド

2.8 傾斜落下衝突のエネルギー吸収

(2.7.1) 式で示した傾斜落下衝突の場合の吸収エネルギーの計算式を求める。輸送容器が傾斜して落下した場合、落下エネルギーは衝突部の変形により吸収されるエネルギーとその後の回転に消費されるエネルギーになる。この衝突部において吸収されるエネルギーについて傾斜角度との関係を求める⁽⁸⁾。

第2.8.1および2.8.2図に計算モデルを示す。傾斜角度 θ で輸送容器が落下し、床面に衝突する場合の輸送容器重心の運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{W}{g} \ddot{X} &= F_x \\ \frac{W}{g} \ddot{Z} &= -F_z + W \\ J \ddot{\varphi} &= F_z \cdot L \sin \varphi - F_x \cdot L \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2.8.1)$$

ここで、 X : 水平方向の変位

Z : 垂直方向の変位

φ : 重心まわりの回転角

F_x : X 方向の反力

F_z : Z 方向の衝突ばね反力

W : 輸送容器の重量

J : 輸送容器の慣性モーメント

L : 輸送容器の衝突点と重心の距離

g : 重力の加速度

である。

輸送容器衝突変形部をばねでモデル化する。衝突後、衝突ばねが h だけ変形し、輸送容器が ϕ だけ回転したとすると次式が成立する。

$$\varphi = \theta + \phi \quad (2.8.2)$$

ここで、 θ : 輸送容器の落下角度

ϕ : 輸送容器の重心まわりの回転角度

h : 衝突ばねの変形量

である。

(2.8.1) および (2.8.2) 式から次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} X &= L \cos \theta \cdot \phi \\ \ddot{X} &= L \cos \theta \cdot \ddot{\phi} \\ Z &= L \sin \theta \cdot \phi + h \\ \ddot{Z} &= L \sin \theta \cdot \ddot{\phi} + \ddot{h} \end{aligned} \right\} \quad (2.8.3)$$

ばねの変位は (2.8.1) および (2.8.3) 式から次の式を解くことによって求められる。

$$\frac{W}{g} L \cos \theta \cdot \ddot{\phi} = F_x \quad (2.8.4)$$

ばね反力は次式で与えられる。

$$F_z = k Z \quad (2.8.5)$$

ここで, k は衝突ばね定数

である。

(2.8.1), (2.8.3) および (2.8.5) 式から次式を得る。

$$\frac{W}{g} L \sin \theta \cdot \ddot{\phi} + \frac{W}{g} \ddot{h} = -kh + W \quad (2.8.6)$$

さらに, (2.8.1) および (2.8.2) 式から次式を得る。

$$J \ddot{\phi} = F_z \cdot L \sin \theta - F_x \cdot L \cos \theta \quad (2.8.7)$$

(2.8.4) および (2.8.5) 式を (2.8.7) 式へ代入すると次式を得る。

$$J \ddot{\phi} = kh \cdot L \sin \theta - \frac{W}{g} L^2 \cos^2 \theta \cdot \ddot{\phi} \quad (2.8.8)$$

(2.8.6) および (2.8.8) 式において h について解くと次式を得る。

$$\ddot{h} + \Omega^2 h = g \quad (2.8.9)$$

ここで,

$$\Omega^2 = \frac{k g}{W} \left\{ 1 + \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta + \frac{J g}{W L^2}} \right\} \quad (2.8.10)$$

である。 (2.8.10) 式の一船解は次式となる。

$$h = C_1 \cos(\Omega t) + C_2 \sin(\Omega t) + \frac{g}{\Omega^2} \quad (2.8.11)$$

ここで, 初期条件は次式で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} t = 0 : h = 0 \\ t = 0 : \dot{h} = v = \sqrt{2gH} \end{array} \right\} \quad (2.8.12)$$

ここで, v : 輸送容器の速度

H : 輸送容器の落下高さ

である。

(2.8.12) 式は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{v}{\Omega} \sin(\Omega t) + \frac{g}{\Omega^2} \left\{ 1 - \cos(\Omega t) \right\} \\ \dot{h} &= v \cos(\Omega t) + \frac{g}{\Omega} \sin(\Omega t) \end{aligned} \right\} \quad (2.8.13)$$

次に衝突ばねの最大変位量を求め、ばねに吸収されるエネルギー（1次衝突エネルギー）を求める。

衝突が終了する時間は $t = t_s$ とすると、この時には $h = 0$ となる。この条件を (2.8.13) 式へ代入すると次の式を得る。ここで、輸送容器と落下条件では $g \ll \Omega$ であるから次式を得る。

$$v \cos(\Omega t_s) = 0 \quad (2.8.14)$$

(2.8.14) 式は次式となる。

$$\Omega t_s = \frac{\pi}{2} \quad (2.8.15)$$

(2.8.15) 式を (2.8.13) 式へ代入して最大変位量を求める。

$$\delta_m = \frac{v}{\Omega} \quad (2.8.16)$$

ここで、 δ_m : 最大変位量
である。

衝突ばねに吸収されるエネルギーは次式で与えられる。

$$E(\delta) = \frac{k \delta_m^2}{2} \quad (2.8.17)$$

ここで、 E : 吸収エネルギー
である。

(2.8.10) と (2.8.16) 式を (2.8.17) 式へ代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} E(\delta) &= \frac{k v^2}{2 \Omega^2} \\ E(\delta) &= \frac{W v^2}{2 g} \left\{ 1 - \frac{\sin^2 \theta}{1 + \frac{J g}{W L^2}} \right\} \end{aligned} \quad (2.8.18)$$

落下高さと衝突速度との関係は次式で与えられる。

$$H = \frac{v_0^2}{2 g}$$

ここで、 v_0 : 輸送容器の衝突速度
である。これを (2.8.18) 式へ代入すると次式を得る。

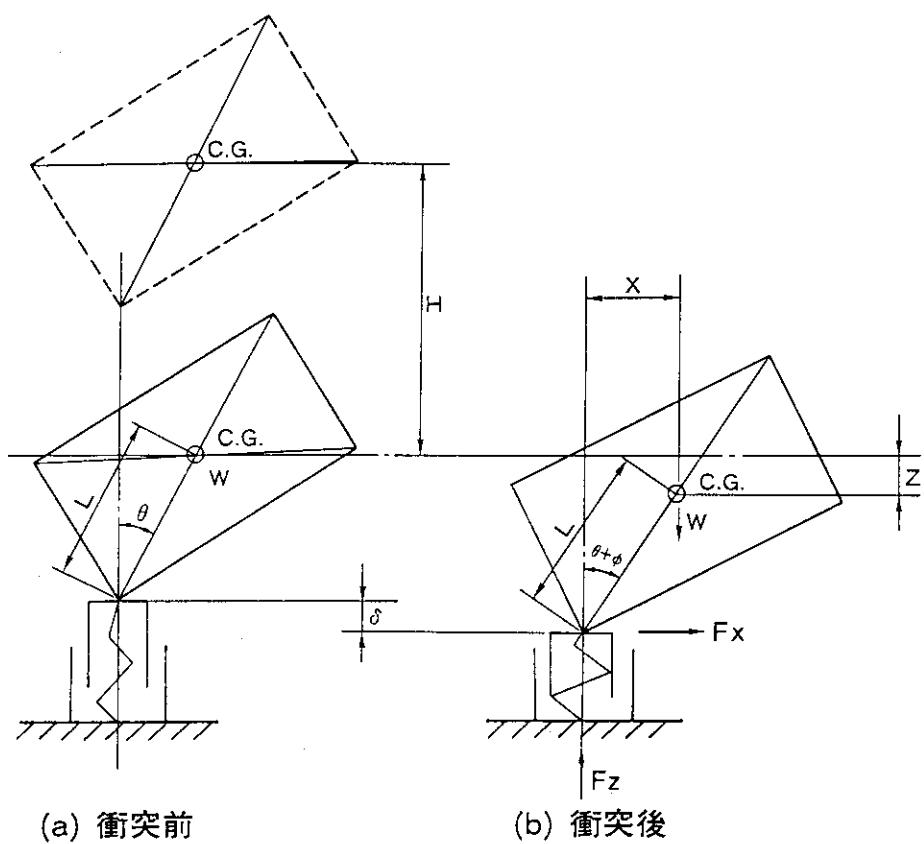
$$E(\delta) = \gamma W H$$

ここで、

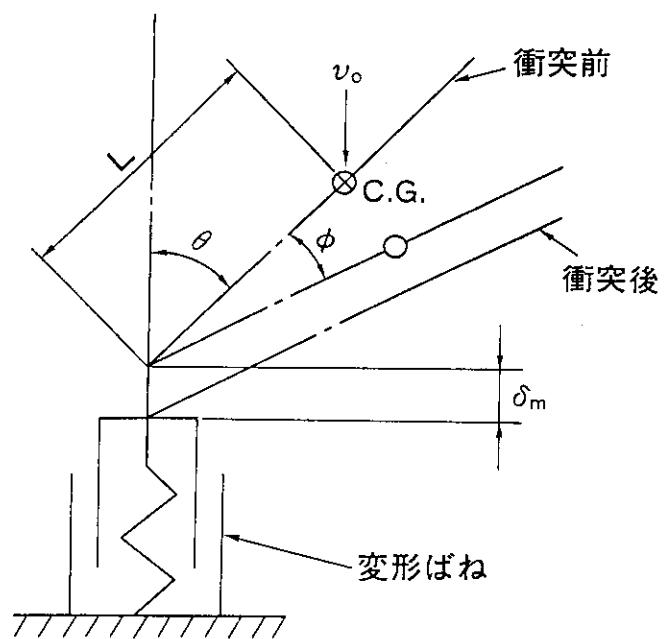
$$\gamma = 1 - \frac{\sin^2 \theta}{1 + \frac{Jg}{WL^2}}$$
(2.8.19)

である。

このようにして、傾斜落下の1次衝突エネルギーを求める計算式を得る。これは2.7節で示した(2.7.1)式である。



第 2.8.1 図 傾斜落下衝突エネルギー計算モデル（I）



第 2.8.2 図 傾斜落下衝突エネルギー計算モデル（II）

2.9 トロイダル型緩衝構造の衝突解析法

緩衝構造の一つとして第 2.9.1 図に示すようなトロイダルリング構造が考えられ、実用に供している。炭素鋼製のトロイダルリングのエネルギー吸収について、Shappert⁽²⁾ らは実験によって次の式を提案している。

$$E = \frac{\sigma_y t^2 L}{r} \left(\delta + 0.4 \frac{\delta^2}{r} \right) \quad (2.9.1)$$

ここで、
E : エネルギー吸収量

r : トロイダルリングの平均半径

t : トロイダルリングの板厚

δ : トロイダルリングの変形量

σ_y : トロイダルリング材料の降伏応力

L : トロイダルリングの長さ

である。トロイダルリングの長さ L は第 2.9.2 図に示すように次式となる。

$$L = 2 \pi R \quad (2.9.2)$$

ここで、R : トロイダルリングの大リング半径

である。

一方、杉田ら⁽⁹⁾は半実験式として以下のように求めている。

第 2.9.3 図に示すように主応力方向を I 方向、II 方向 III 方向に分ける。トロイダルリング構造は、輸送容器に十分剛な構造で固定され、実験結果から考えても座屈形の変形をしている。これは第 2.9.4 図に示すように、トロイダルリングの支持条件は内外径固定条件に近いので、第 2.9.5 図に示すような変形モードに理想化し、仮想仕事の原理によって、トロイダルリングの吸収エネルギーおよび衝突力を以下のように定式化した。

$$E = \frac{1}{2} R t^2 \sigma_y \eta_1 + \frac{1}{4} r^2 t \sigma_y \eta_2 \quad (2.9.3)$$

ここで、E : 吸収エネルギー

σ_y : 完全塑性理論による降伏応力

η_1, η_2 : 変形量、つぶれ面積に依存した係数で ($\phi/2$) パラメーターとして与えられる。

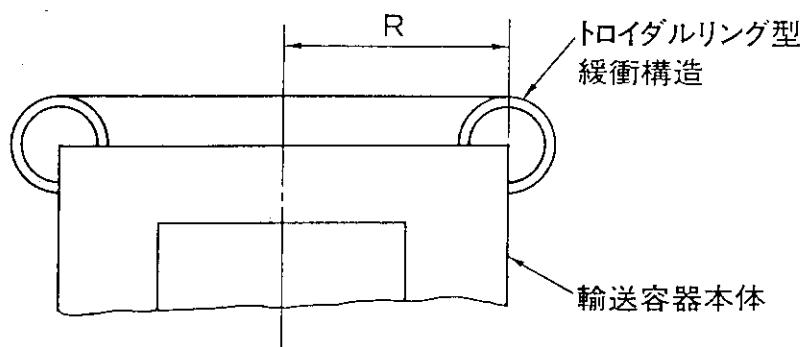
この式の第 1 項が I 方向応力による吸収エネルギー、第 2 項が II 方向応力による吸収エネルギーである。

$$F = \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} R t^2 \sigma_y \eta_3 + \frac{1}{4} r^2 t \sigma_y \eta_4 \right) \quad (2.9.4)$$

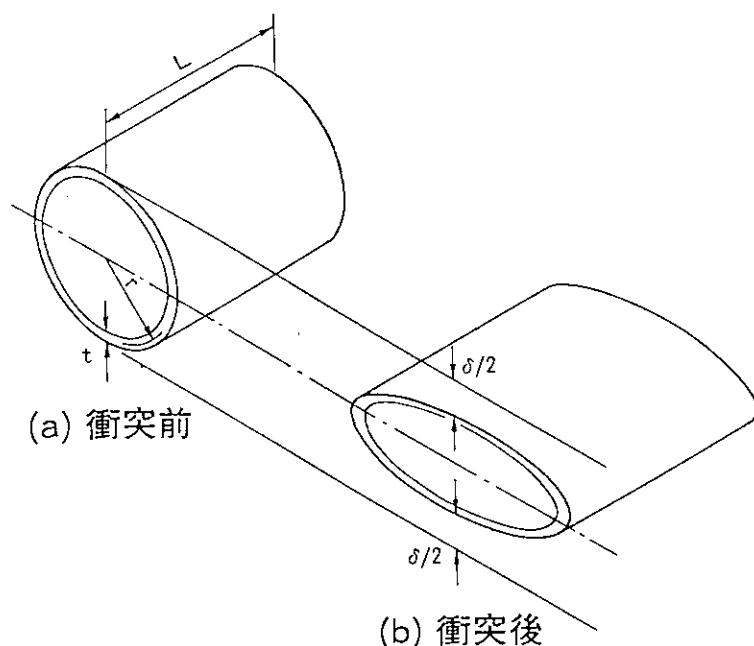
ここで、F : 衝撃力

η_3, η_4 : 変形量、つぶれ面積に依存した係数で ($\phi/2$) をパラメーターとして与えられる

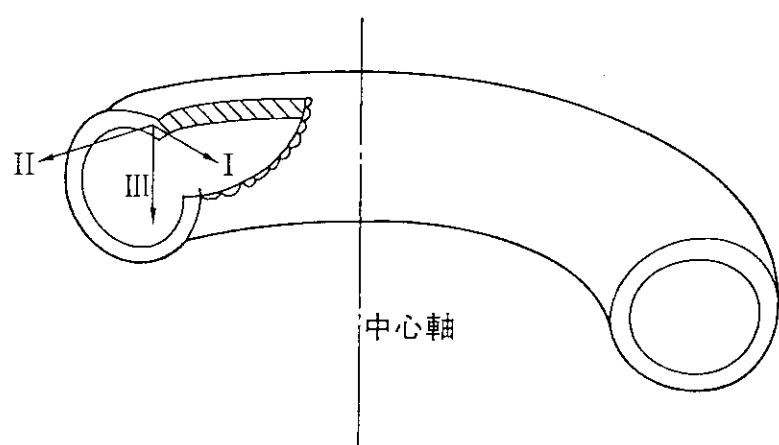
衝撃力は吸収エネルギーを変形量で微分して求めた。



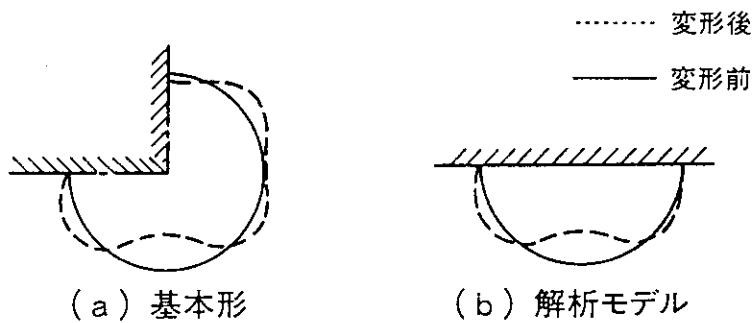
第 2.9.1 図 トロイダルリング型緩衝構造



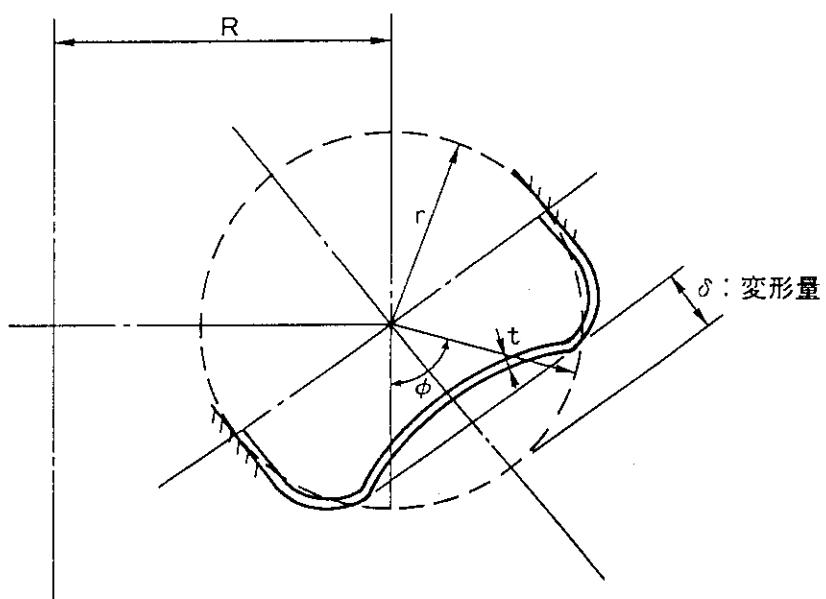
第 2.9.2 図 トロイダル型緩衝構造の変形モデル



第 2.9.3 図 トロイダルリングの主応力方向



第 2.9.4 図 支 持 条 件



第 2.9.5 図 トロイダルリングの変形モード図

2.10 遮蔽鉛の沈下量の解析法

遮蔽材と鉛を用いた輸送容器の底部垂直落下では、鉛材の沈下が起ることが予想される。これによって輸送容器収納物の遮蔽が損われることが予想される。このような遮蔽鉛の沈下量の解析には、有限差分法や有限要素法のような詳細解析によって行うことができる。この一例として、第 2.10.1 図に示すような 1 / 3 縮尺輸送容器の高さ 9 m からの落下衝突実験の解析を行った。結果を第 2.10.2 図に示す。

Shappert⁽²⁾ らは、沈下量の簡易に推定するために、実験結果をもとに次の計算式を提案している。

$$\delta_{pb} = \frac{R_o W H}{\pi (R_o^2 - R_i^2)(t_s \sigma_s + R_o \sigma_{pb})} \quad (2.10.1)$$

ここで、 δ_{pb} : 鉛の沈下量

W : 輸送容器の重量

H : 輸送容器の落下高さ

R_o : 鉛円筒の外径径

R_i : 鉛円筒の内半径

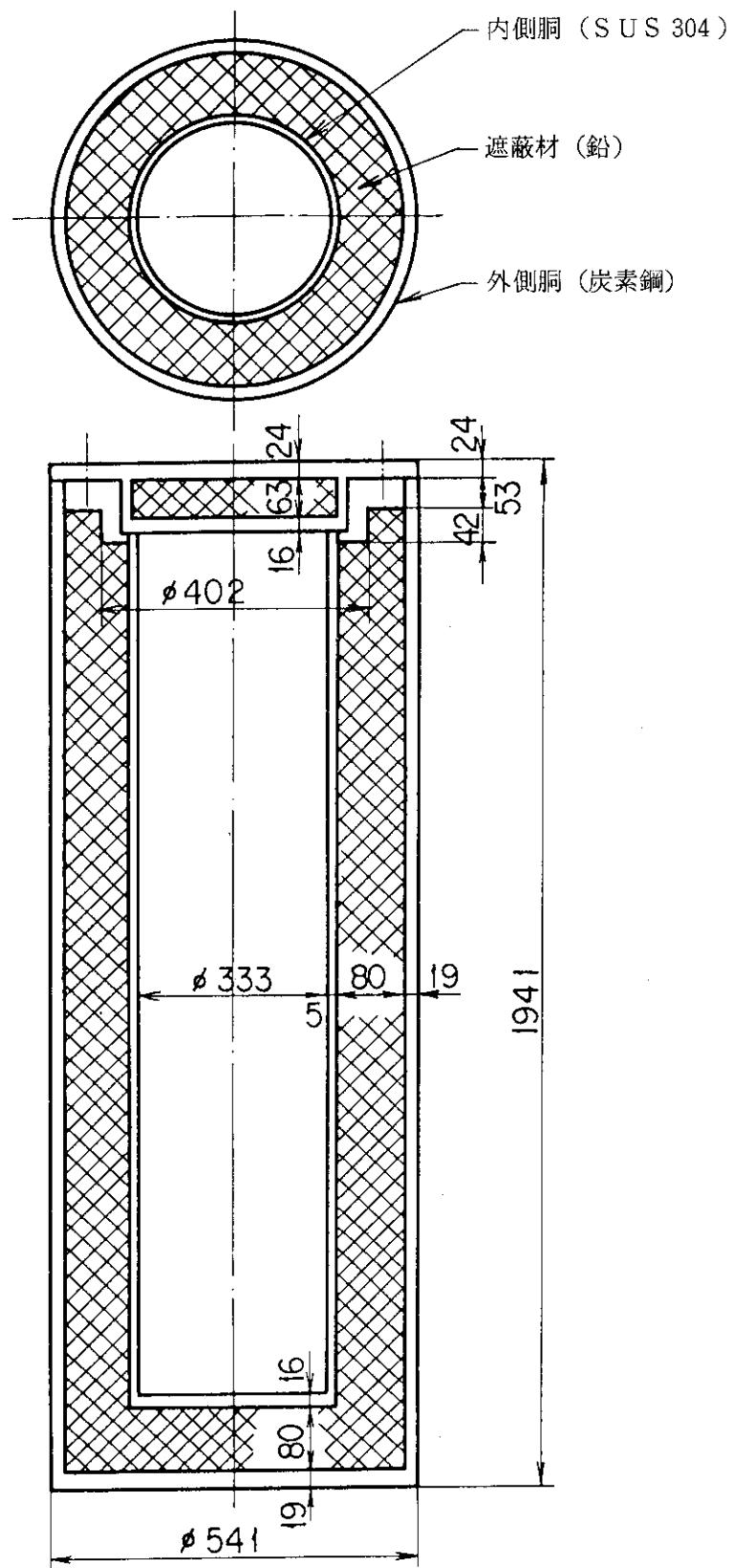
t_s : 外側胴の板厚

σ_s : 外側胴の降伏応力

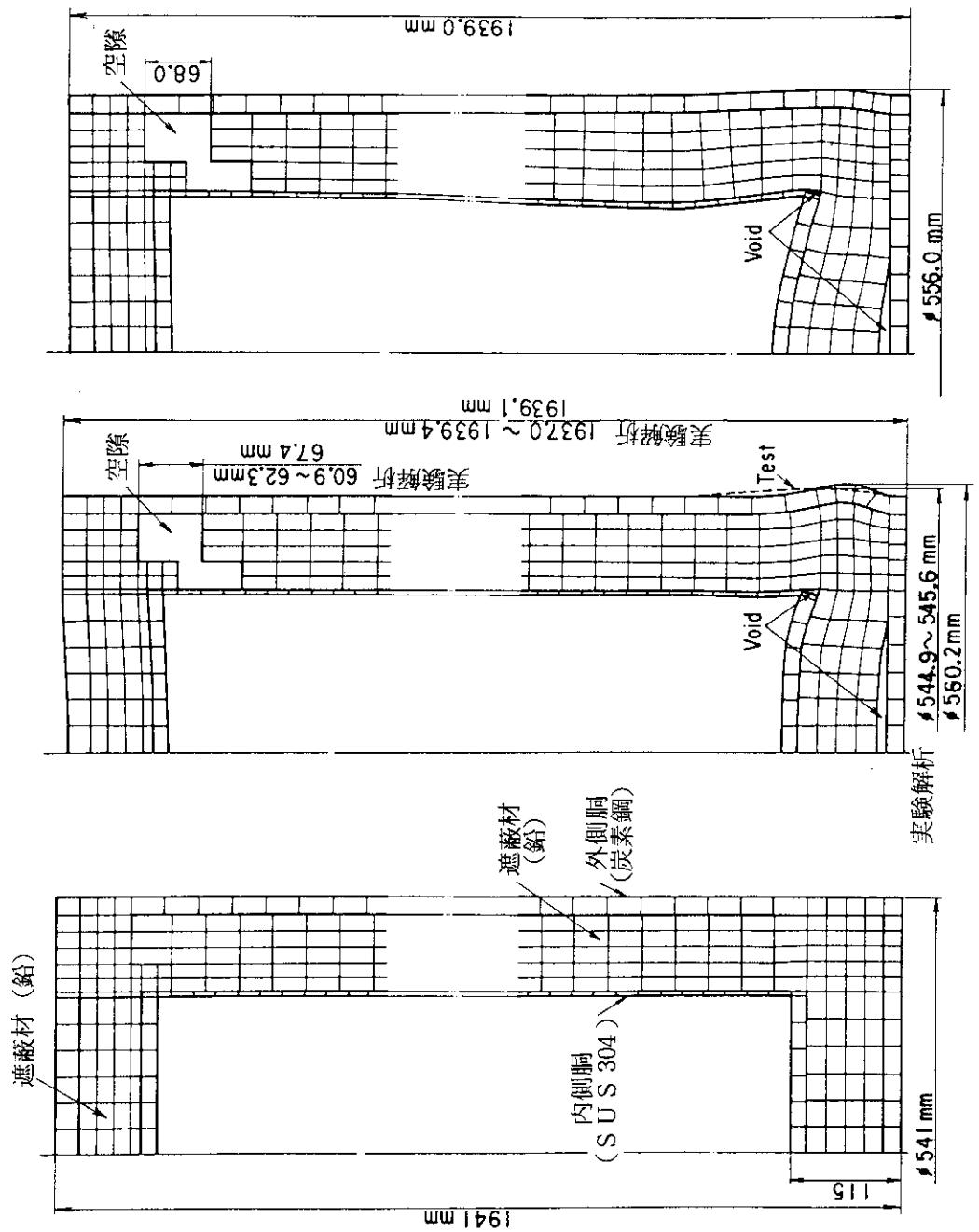
σ_{pb} : 鉛の降伏応力

である。

第 2.10.1 図の輸送容器模型に対して、Shappert の式 (2.10.1) 式を適用すると沈下量は 36 mm となり実験値よりも小さい。これは、この模型の輸送容器の内側胴の板厚が薄く、内側胴が大きく変形したことおよび底面への鉛材の滑り込みによって沈下量が大きくなつたものである。



第 2.10.1 図 鉛遮蔽三層構造輸送容器 1 / 3 縮尺模型 (単位mm)



(b-1) D Y N A 2 Dによる解析 (b-2) NIKE 2 Dによる解析

第 2.10.2 図 落下衝突による変形図

2.11 トラニオン衝突の解析法

輸送容器の取扱のため、本体の胴部に取付けられているトラニオンあるいはフックなどが衝突する場合の解析は、すでに記述した V D M, U D M, ばね一質点法, F D M, F E M によって行うことができる。

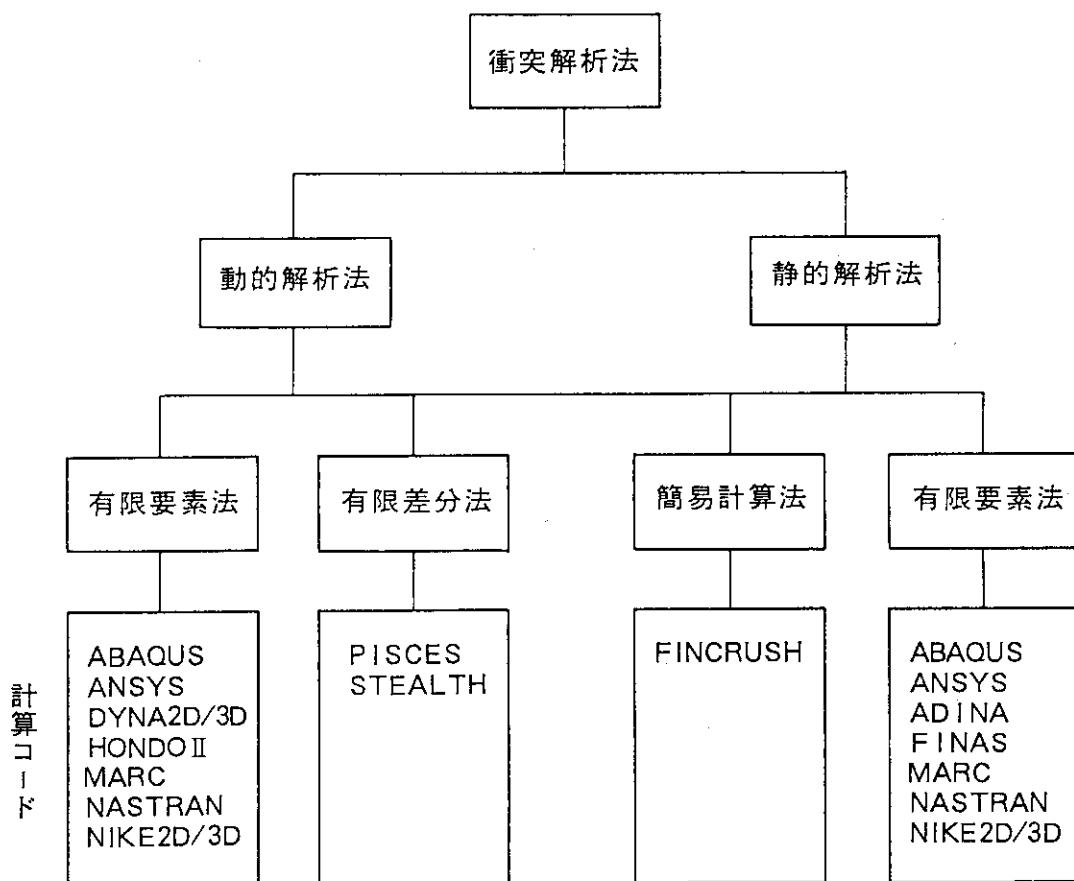
3. フィン衝突解析法

3.1 フィン衝突解析法

輸送容器の落下衝突時に外表面に取付けられたフィンが衝突することによるフィンの変形や輸送容器に加わる力や加速度を求め、輸送容器の健全性や安全性を明らかにするデータを得る必要がある。フィン付き輸送容器のフィン衝突解析法について以下に述べる。

輸送容器フィン衝突解析法は第3.1.1図に示すように、動的解析法と静的解析法に大別できる。動的解析法の中には、有限要素法と有限差分法がある。一方、静的解析法の中には、有限要素法と簡易解析法がある。簡易解析法はフィンの吸収エネルギーを実験によって求め、そのデータを用いて計算するものである。有限要素法および有限差分法では、計算対象を2次元あるいは3次元の体系にモデル化して計算を行うので詳細計算法と呼ぶことができる。

有限要素法および有限差分法は第2章の落下衝突解析法において記述したので、ここでは省略する。よって、簡易計算法についてのみ記述する。



第3.1.1図 輸送容器フィン衝突解析法と計算コード

3.2 簡易解析法

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。

$$E_v = WH \quad (3.2.1)$$

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。

$$E_\phi = F\delta \quad (3.2.2)$$

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、

$$E_v = E_\phi \quad (3.2.3)$$

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3.2.1図）。

$$F\delta = \sigma_y \left(\frac{bT^2}{4} \right) \quad (3.2.4)$$

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。

$$M_p = \sigma_y \frac{T^2}{4} \quad (3.2.5)$$

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。

$$E_\phi = \varepsilon M_p L \quad (3.2.6)$$

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 3.2.1 図に示すように、外表面にある間隔をお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 3.2.2 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。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R_0 - \delta_0}{R_0} \right) \quad (3.2.7)$$

ここで、

θ : 変形角度

δ_0 : 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。

$$\delta = R_0 - \frac{R_0 - \delta_0}{\cos \phi} \quad (3.2.8)$$

フィンの変形量 δ に対する吸収エネルギーを第 3.2.3 図に示すような Davis¹⁰ のデータから求める。フィンの変形割合 γ は (3.2.9) 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、フィンの変形割合に対するエネルギーの吸収割合を整理した。

$$\gamma = \frac{\delta}{H} \quad (3.2.9)$$

ここで、

γ : フィンの変形割合

である。

次に、第 3.2.3 図からフィンの変形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 (3.2.6) 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。

$$\left. \begin{aligned} E &= \int F d\delta \\ F &= \frac{dE}{d\delta} \end{aligned} \right\} \quad (3.2.10)$$

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。

$$\alpha = \frac{E}{W/g} \quad (3.2.11)$$

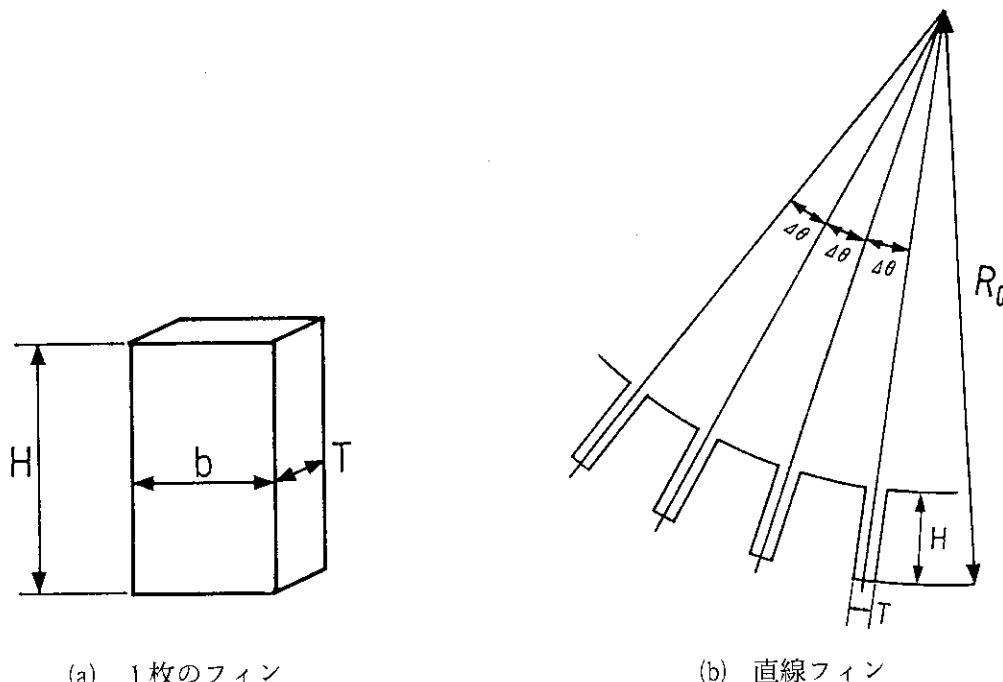
ここで、

α : 輸送容器の加速度

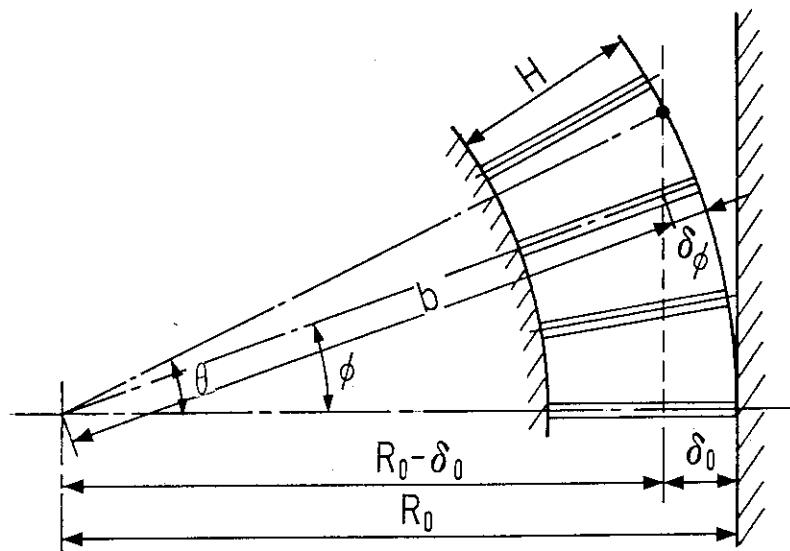
W : 輸送容器の重量

g : 重力の加速度

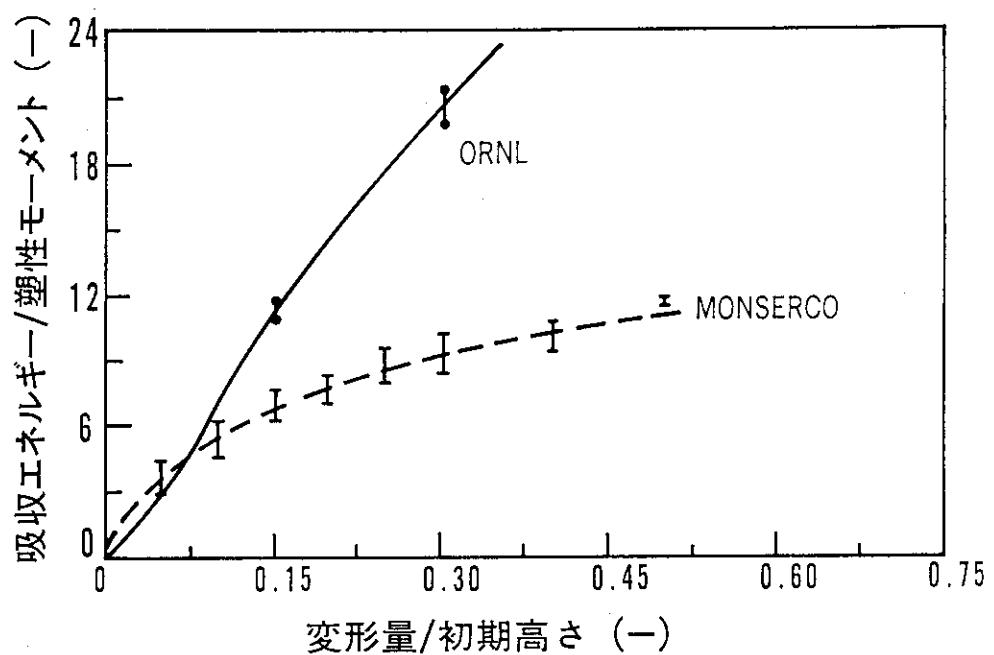
である。



第3.2.1図 フィンの形状



第3.2.2図 フィンの変形と角度の関係



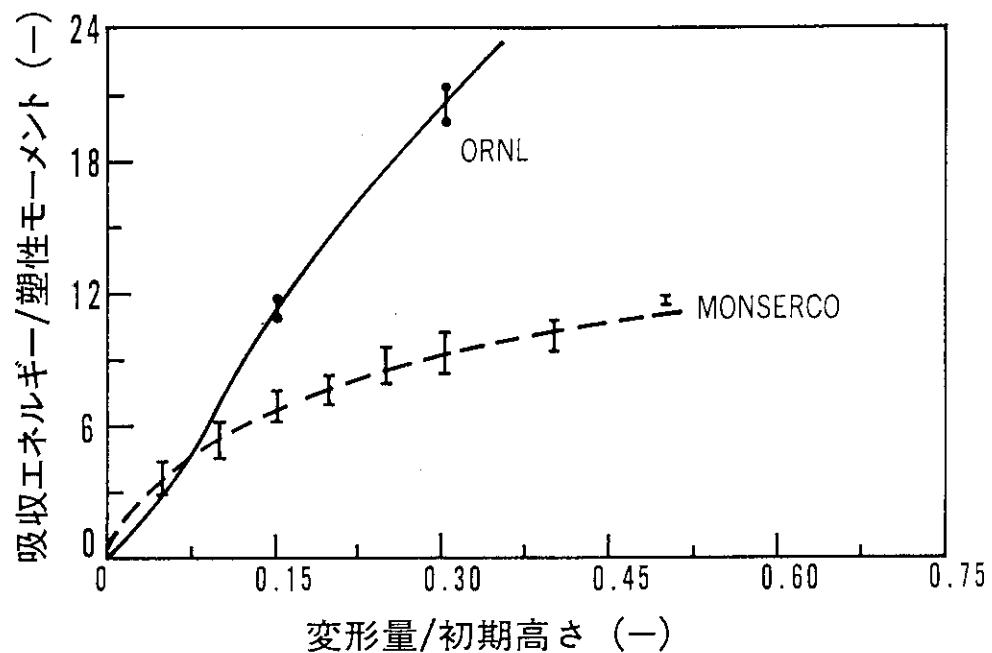
第3.2.3図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)]
[フィン角度: 0°]

3.3 フィンの吸収エネルギーデータ

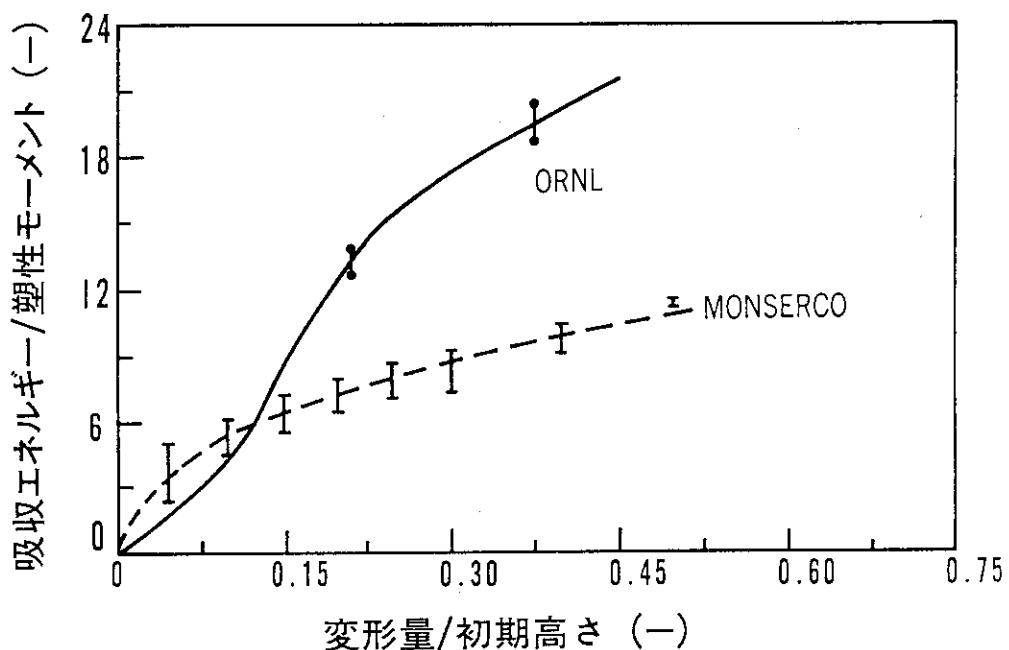
フィン吸収エネルギー法に用いられるデータは、古くは Davis⁽¹⁾ によって 1971 年に ORNL における実験結果をまとめて作成された。その後、1986 年に、Torr によって AECL の要請により Monserco 社において Davis よりも広範囲な実験によってデータが作成された。これらのデータについて Torr の報告書からの抜粋を第 3.3.1 ~ 3.3.20 図に示す。Davis (ORNL) のデータと Torr (MONSERCO) のデータには、ある差異があり、これに関しては Torr^{(1), (2)} の報告書に詳しく述べられている。

第 3.3.1 ~ 3.3.20 図のフィンの吸収エネルギーは横軸は (3.2.6) 式の変形割合 ε 、縦軸は吸収エネルギー εM_p を示す。



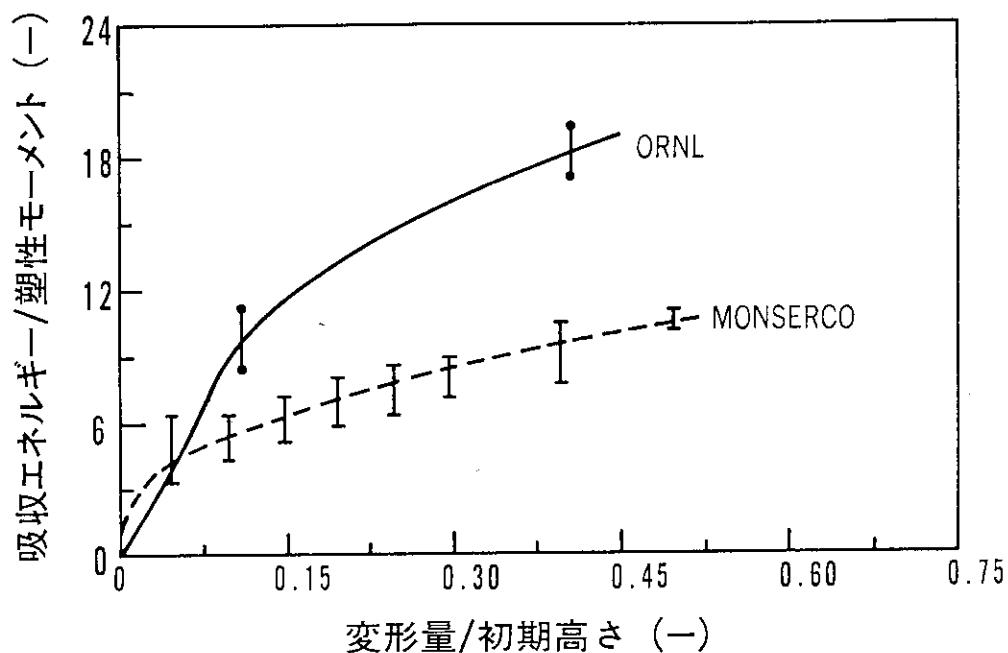
第3.3.1図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)
フィン角度: 0°]



第3.3.2図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

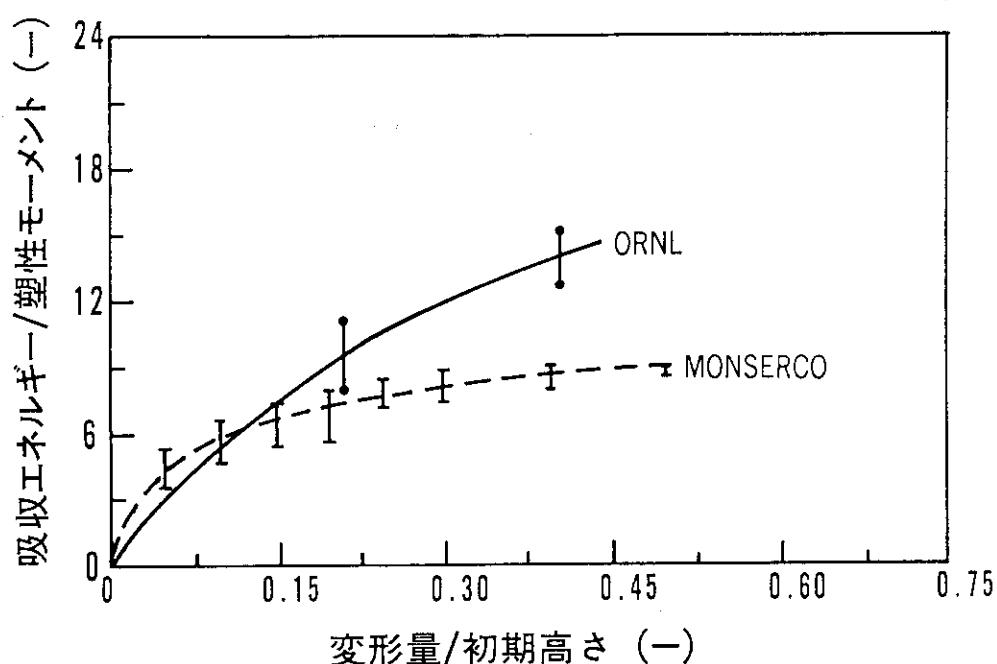
[フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)
フィン角度: 0°]



第3.3.3図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

〔フィン高さ: 6.0 in. (152 mm) 〕

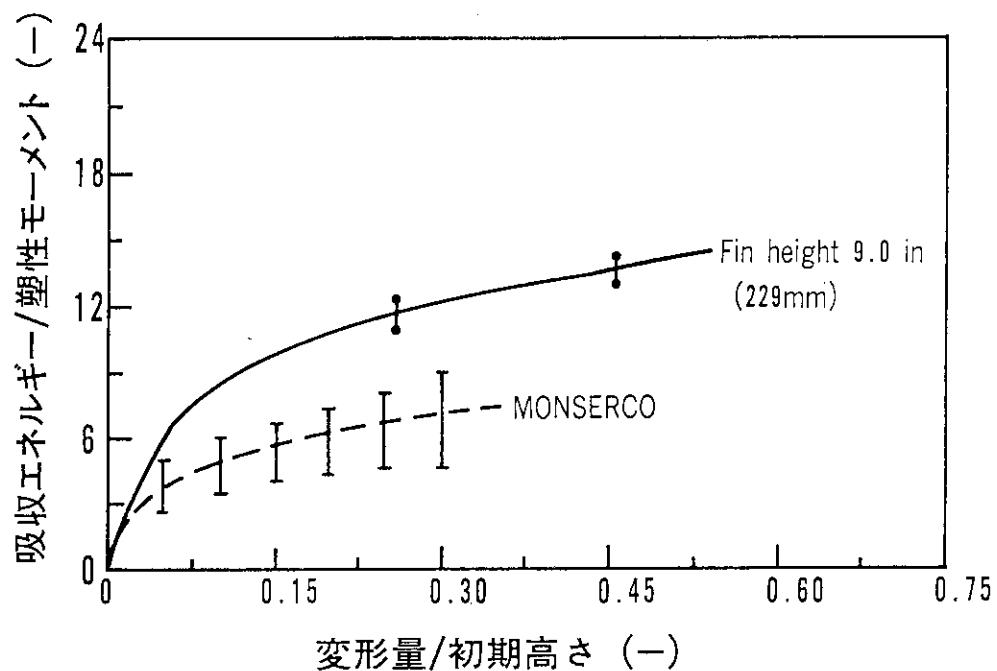
〔フィン角度: 0° 〕



第3.3.4図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

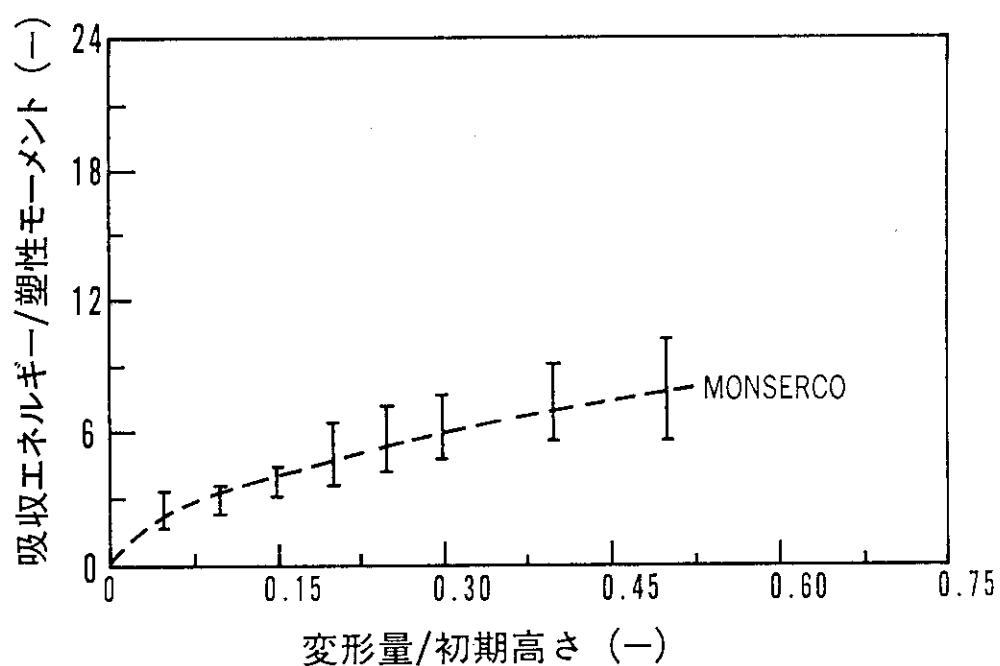
〔フィン高さ: 8.0 in. (203 mm) 〕

〔フィン角度: 0° 〕



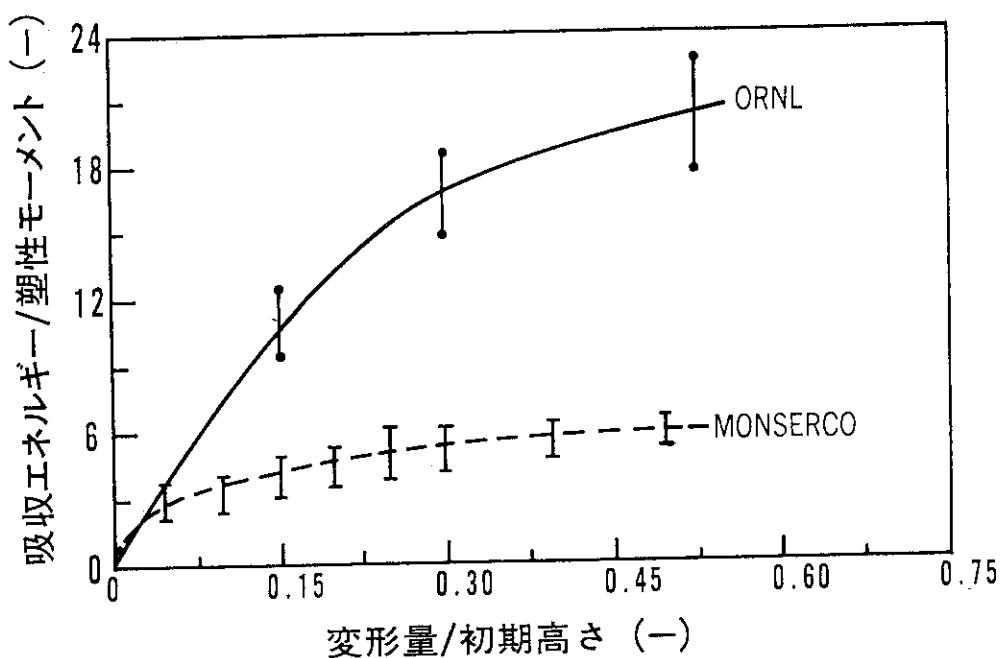
第3.3.5図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 10 in. (254 mm)]
[フィン角度: 0°]



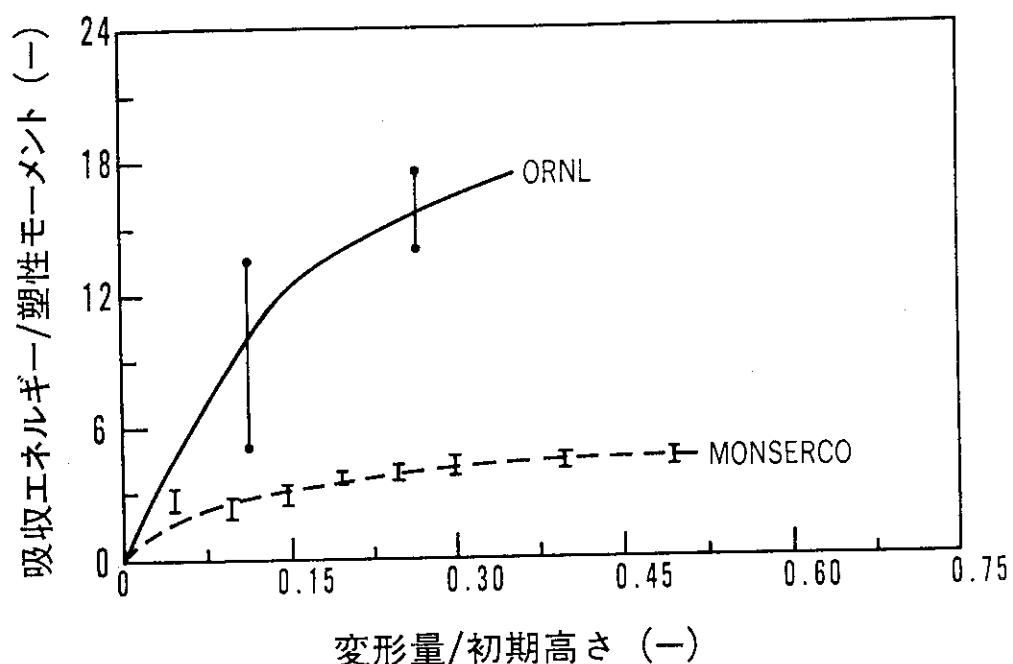
第3.3.6図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)]
[フィン角度: 10°]



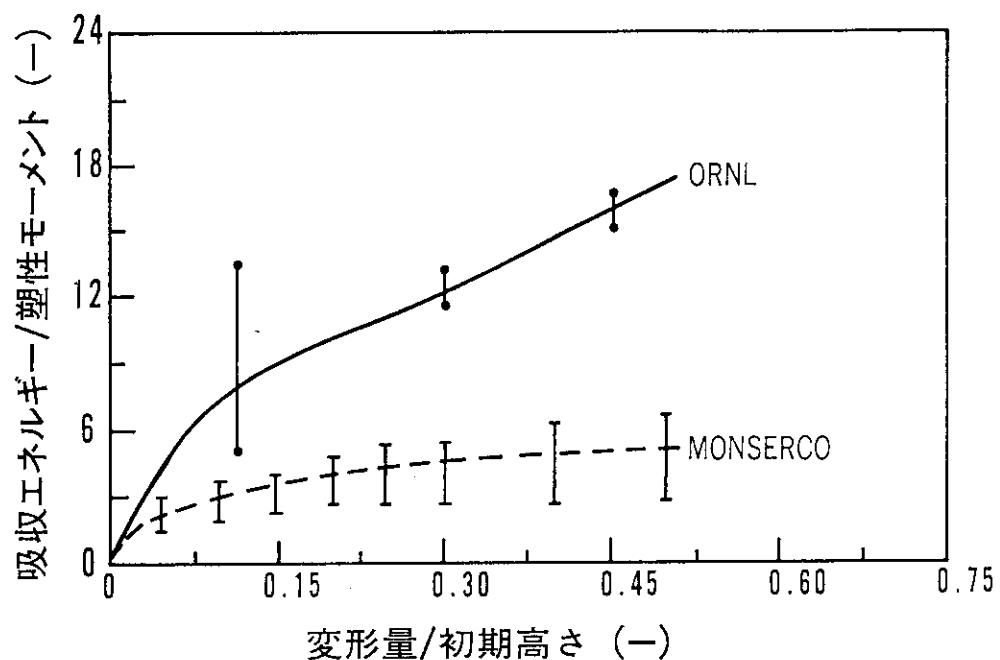
第3.3.7図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)]
[フィン角度: 10°]



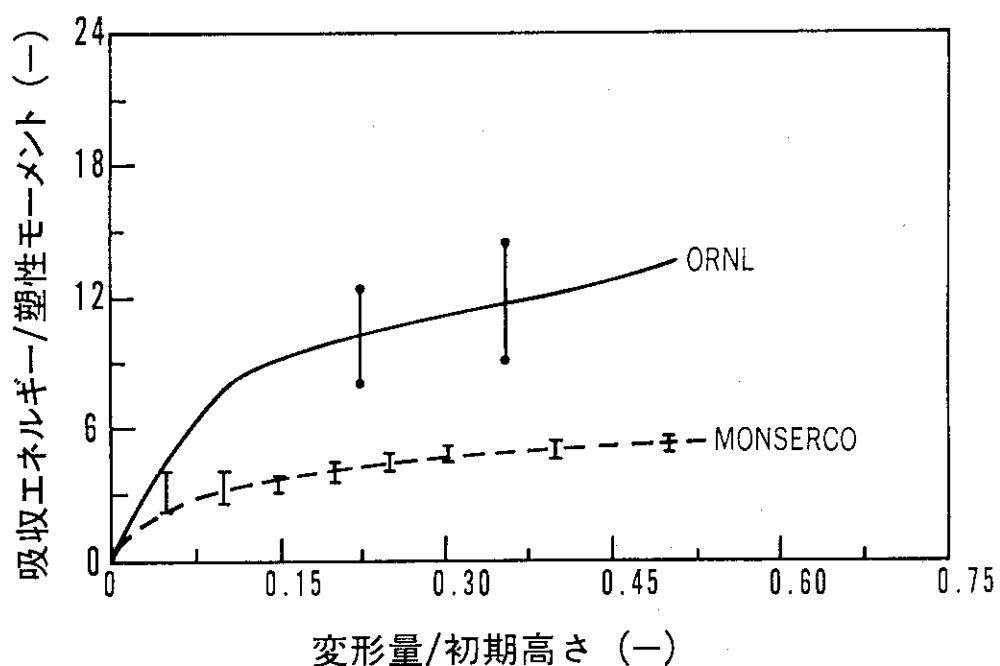
第3.3.8図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 6.0 in. (152 mm)]
[フィン角度: 10°]



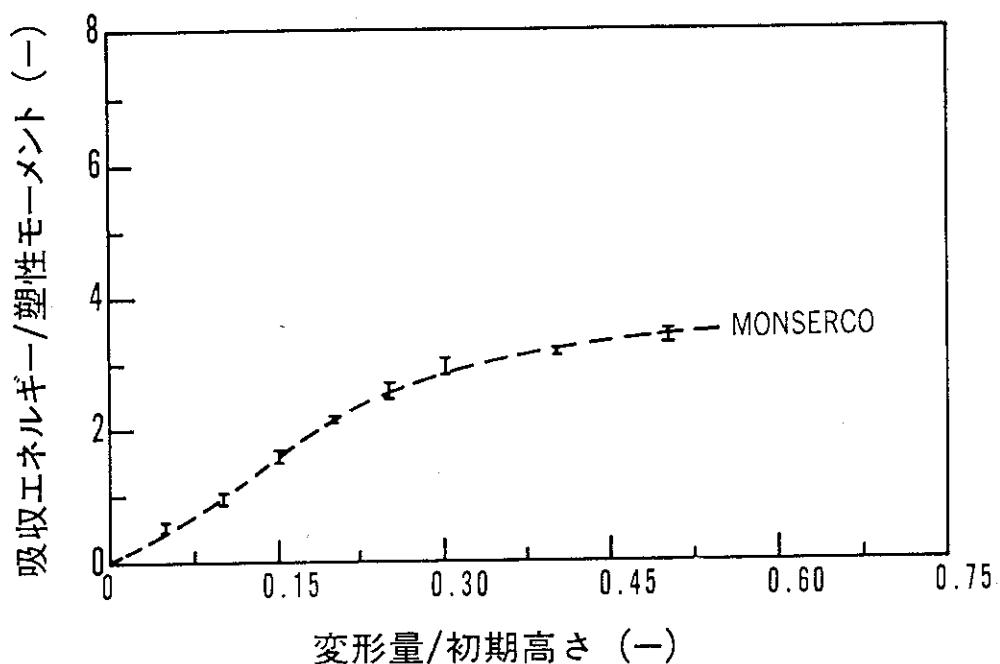
第3.3.9図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 8.0 in. (203 mm)]
[フィン角度: 10°]



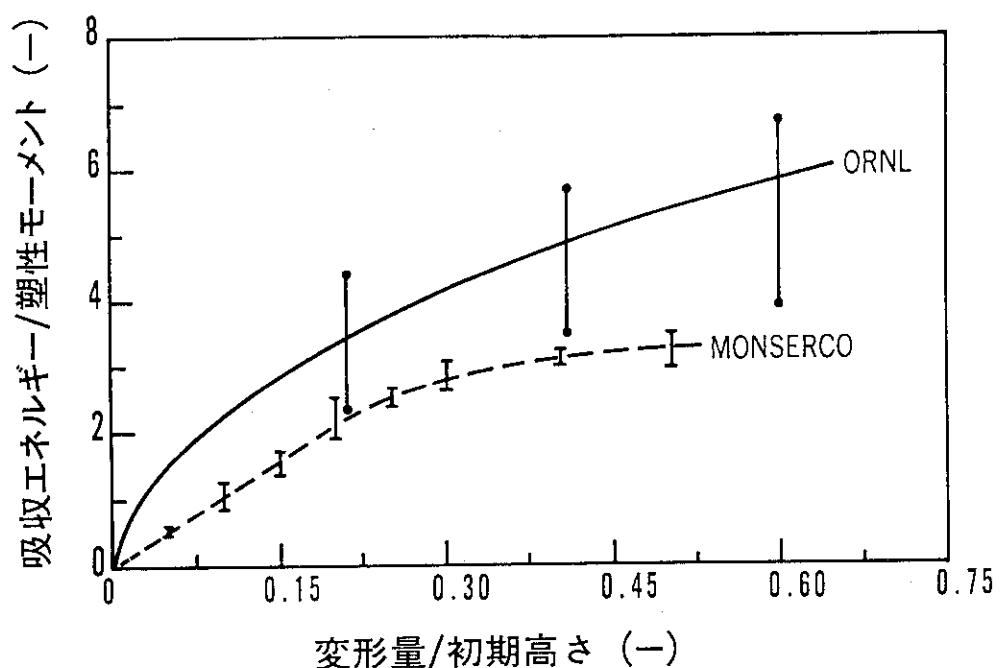
第3.3.10図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 10.0 in. (254 mm)]
[フィン角度: 10°]



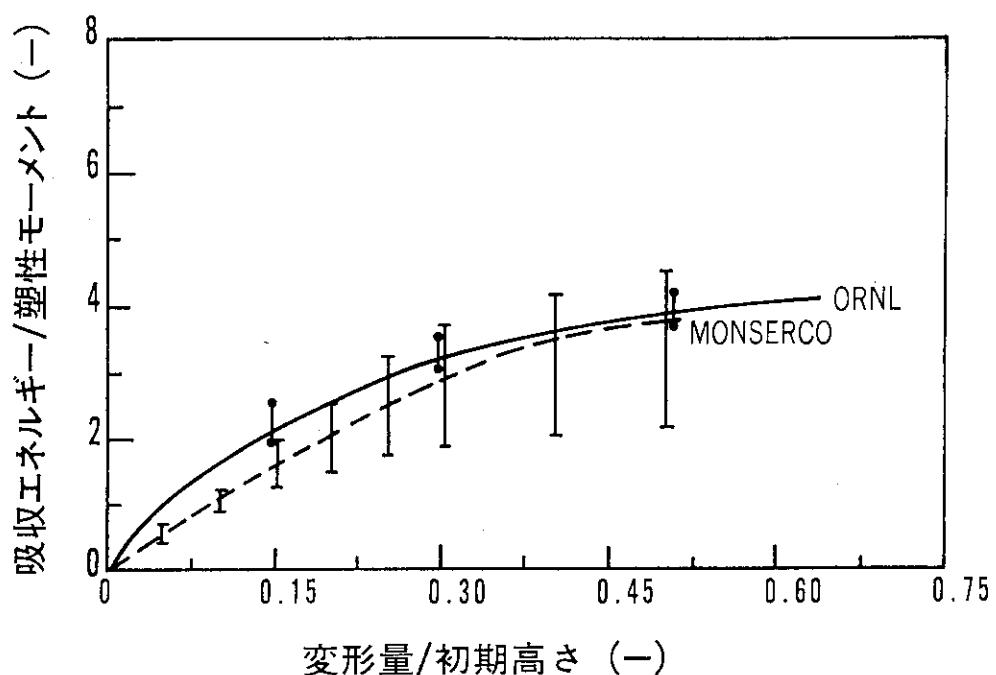
第3.3.11図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)]
[フィン角度: 20°]



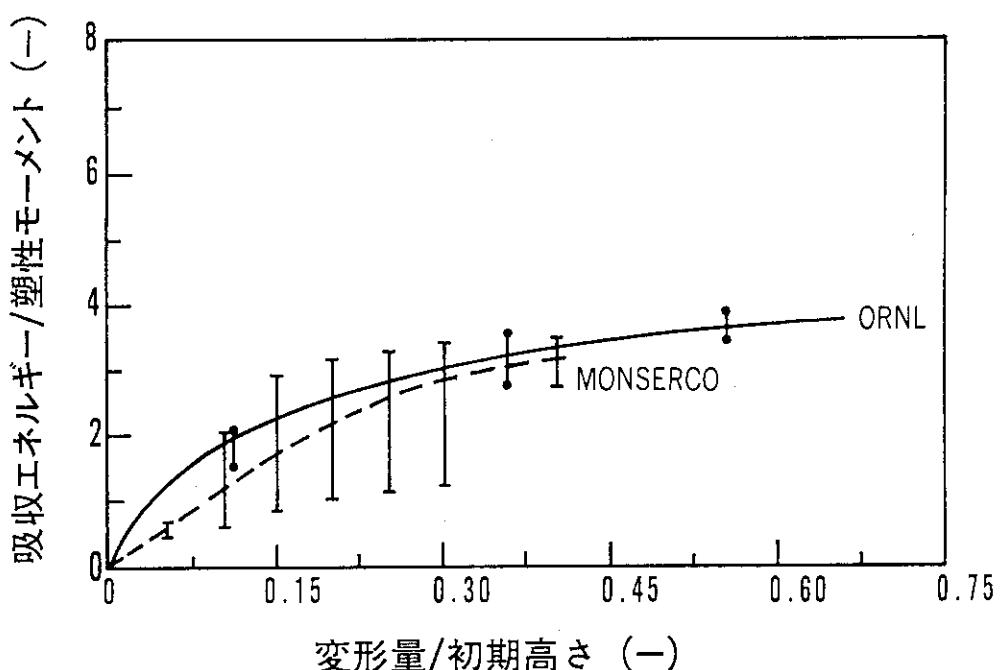
第3.3.12図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)]
[フィン角度: 20°]



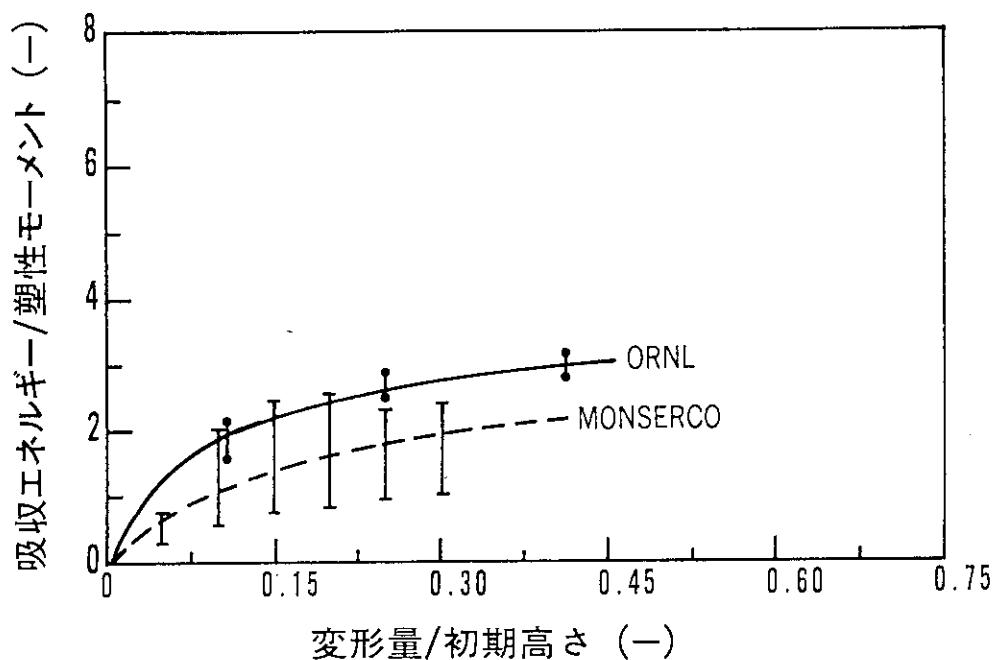
第3.3.13図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 6.0 in. (152 mm)
フィン角度: 20°]



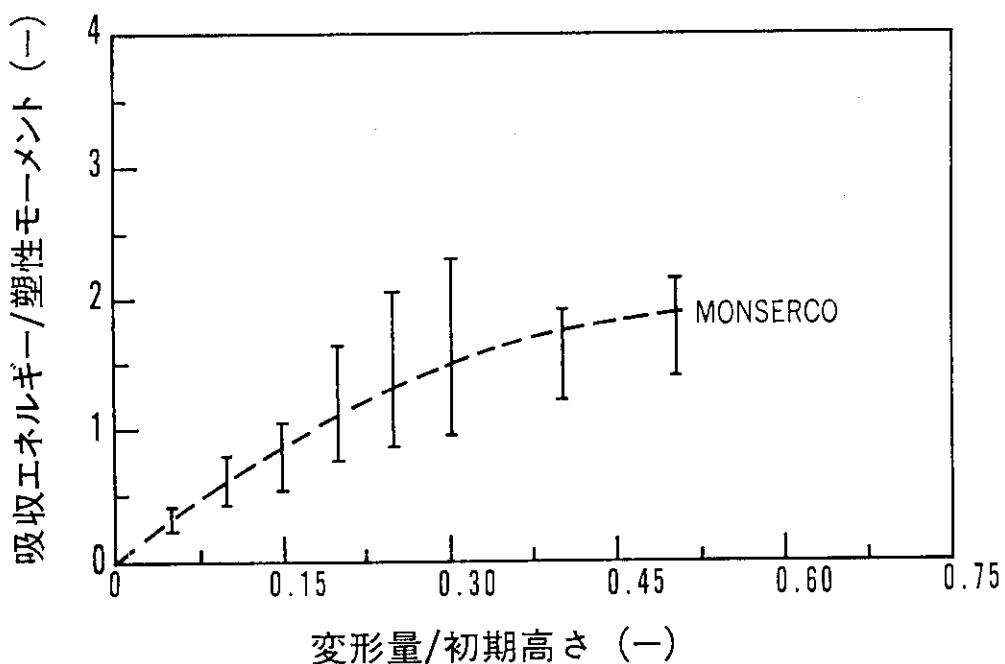
第3.3.14図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 8.0 in. (203 mm)
フィン角度: 20°]



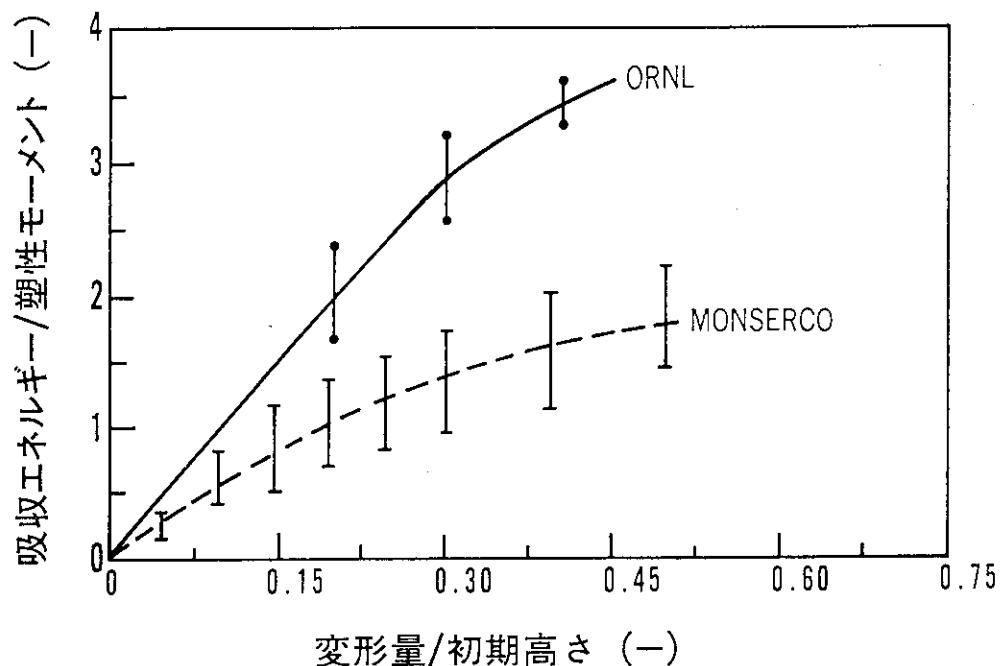
第3.3.15図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 10.0 in. (254 mm)
フィン角度: 20°]



第3.3.16図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

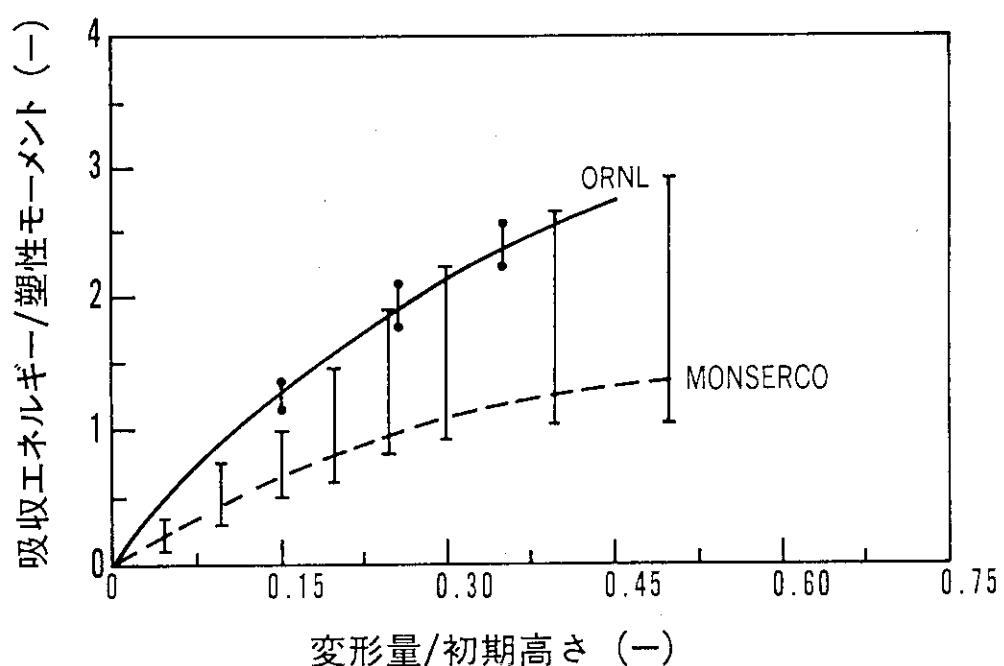
[フィン高さ: 3.5 in. (89 mm)
フィン角度: 30°]



第3.3.17図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

〔フィン高さ: 4.0 in. (102 mm)〕

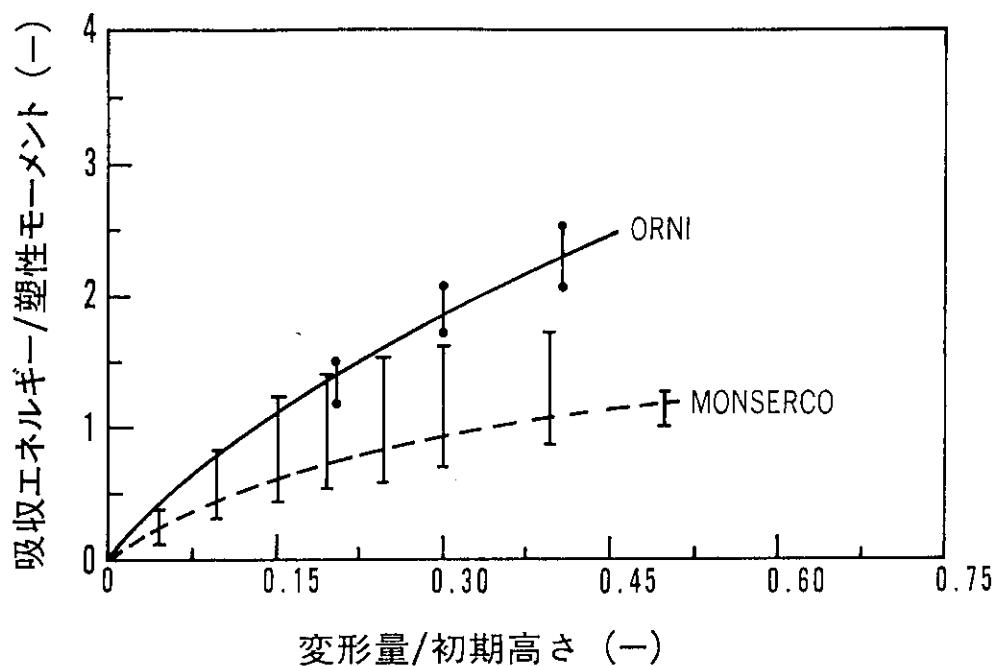
〔フィン角度: 30°〕



第3.3.18図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

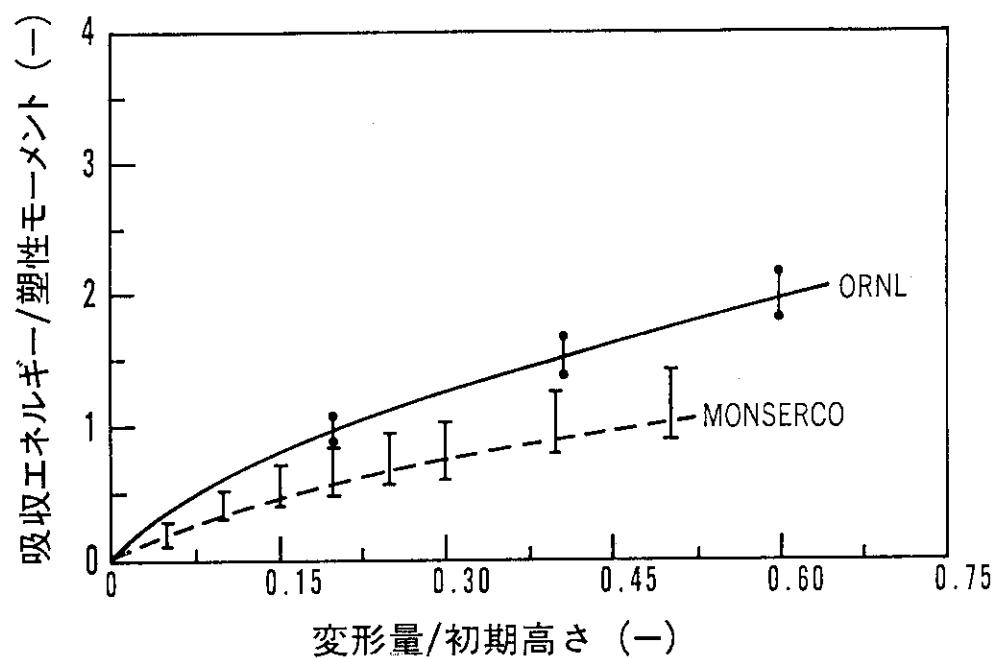
〔フィン高さ: 6.0 in. (152 mm)〕

〔フィン角度: 30°〕



第3.3.19図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 8.0 in. (203 mm)]
[フィン角度: 30°]



第3.3.20図 フィンの変形量と吸収エネルギーの関係

[フィン高さ: 10.0 in. (254 mm)]
[フィン角度: 30°]

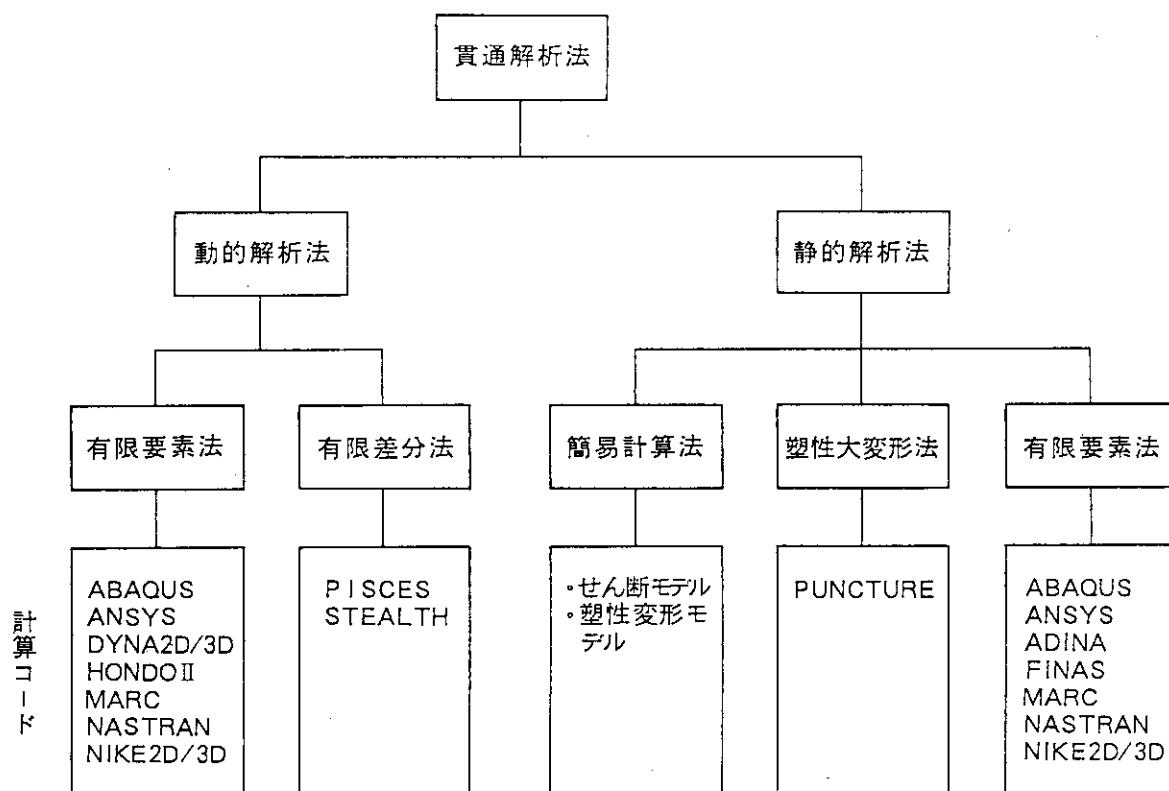
4. 貫通解析法

4.1 貫通解析法

IAEA の安全輸送規則によれば、輸送容器は次の貫通試験（一般的試験条件および特別の試験条件(III)）によっても安全性を確保しなければならない。このため、実験あるいは計算によって貫通がないことを明らかにしている。これを計算によって明らかにする場合の解析法について以下に述べる。

輸送容器の貫通解析法は第 4.1.1 図に示すように、動的解析法と静的解析法に大別できる。動的解析法の中には、有限要素法と有限差分法がある。一方、静的解析法の中には、有限要素法、塑性大変形法および簡易計算法がある。簡易計算法としては、せん断モデルおよび塑性変形モデルがある。有限要素法および有限差分法では、計算対象を 2 次元あるいは 3 次元の体系にモデル化して計算を行うので詳細計算法と呼ぶことができる。一方、塑性大変形法およびせん断モデルおよび塑性変形モデルは、単純化された破壊あるいは塑性モデルによって計算を行うので簡易計算法と呼ぶことができる。

貫通解析法の説明において、有限要素法および有限差分法は第 2 章の落下衝突解析法において記述したものと同じであるので、ここでは省略する。よって、簡易計算法および塑性大変形法について記述するとともに、実験データをもとに貫通限界の推定法についても記述する。



第 4.1.1 図 輸送容器貫通解析法と計算コード

4.2 簡易解析法

(1) せん断モデル

第4.2.1図に示すように、先端が半球形をした軟鋼製の棒が、高さHから輸送容器に衝突する場合の貫通解析をせん断モデル法によって行う。せん断モデルでは、落下衝突エネルギーが輸送容器壁をせん断するエネルギーの大小関係から、貫通の有無を判定する。

落下衝突エネルギーは、貫通棒の落下前の高さHによる位置エネルギーとすると

$$E_p = WH \quad (4.2.1)$$

ここで、

E_p : 落下衝突エネルギー

W : 貫通棒の重量

H : 貫通棒の落下高さ

である。

一方、貫通棒が輸送容器壁を貫通するに必要なせん断エネルギーは、第4.2.2図から

$$E_v = \int_0^t \tau \pi d(t-y) dy \quad (4.2.2)$$

$$E_v = \frac{\pi d}{2} \tau t^2 \quad (4.2.3)$$

ここで、

E_v : せん断エネルギー

τ_{cr} : 輸送容器壁のせん断強さ

d : 貫通棒の直径

t : 輸送容器壁の厚さ

である。

貫通しない条件は

$$E_p < E_v \quad (4.2.4)$$

である。

輸送容器壁が三層の場合には、(4.2.3)式は次のようになる。

$$E_v = \frac{\pi d}{2} (\tau_1 t_1^2 + \tau_2 t_2^2 + \tau_3 t_3^2) \quad (4.2.5)$$

ここで、

τ_1 : 容器外側壁のせん断強さ

τ_2 : 容器中間壁のせん断強さ

τ_3 : 容器内側壁のせん断強さ

t_1 : 容器外側壁の厚さ

t_2 : 容器中間壁の厚さ

t_3 : 容器内側壁の厚さ

なお、ここでは、貫通棒に吸収されるエネルギーは考慮しておらず、落下エネルギーがすべて、せん断エネルギーになるものと仮定している。

(2) 塑性変形モデル

容器壁が薄い場合の貫通解析に用いられる簡易計算モデルとして、第4.2.3図に示す塑性変形モデルがある。貫通棒に吸収されるエネルギーは考慮せず、落下エネルギーがすべて、塑性変形エネルギーになるものと仮定すると、

$$E_v = \sigma(\varepsilon) \{ \pi(d+t)t \} \delta \quad (4.2.6)$$

ここで、

E_v : 塑性変形エネルギー

σ : 容器壁材料の変形応力でひずみの関数

ε : 容器壁材料のひずみ

d : 貫通棒の直径

t : 容器壁の厚さ

δ : 変形量

である。近似的には σ は材料の降伏応力を用いてもよい。さらに、次の式が成立する。

$$E_p = WH \quad (4.2.7)$$

$$E_p = E_v \quad (4.2.8)$$

第4.2.3図に示した変形は、塑性変形エネルギーを簡易に求めるためのものであり、実際の変形モデルは第4.2.4に示すものに近いものと考えられる。変形によって容器壁材料のひずみを求めるには、この図に示すモデルによるものとする。変形による容器壁のひずみは

$$\varepsilon = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell} \quad (4.2.9)$$

ここで、

ε : 容器壁材料のひずみ

ℓ_0 : 変形前の長さ

ℓ_1 : 変形後の長さ

であり、

$$\left. \begin{aligned} \ell_0 &\div 2\delta + d \\ \ell &\div \pi\delta + d \end{aligned} \right\} \quad (4.2.10)$$

よって、

$$\varepsilon = 1.14\delta \quad (4.2.11)$$

となる。

(3) 体積変形法による貫通解析

体積変形法による貫通解析を第4.2.5図に従って説明する。ここでは、貫通棒によって輸送容器壁の変形を求める。容器壁は第4.2.5図(a)のように多層から成るとする。第4.2.5図(b)のように容器の外側の一つの壁の変形によって衝突エネルギーが吸収されるとすると次式が成立する。

$$E_p = \sigma_{cl} V_1 \quad (4.2.12)$$

ここで、

- E_p : 衝突エネルギー
- σ_{cl} : 第一層壁の圧縮変形応力
- V_1 : 第一層壁の変形体積

であり、また、 V_1 は次式で与えられる。

$$V_1 = \frac{1}{3}\pi\delta^2(3r - \delta) \quad (4.2.13)$$

ここで、

- δ : 変形量
- r : 貫通棒の半径

である。第4.2.5図(c)のように二つの壁の変形によって衝突エネルギーが吸収されるとすると次式となる。

$$E_p = \sigma_{cl} V_1 + \sigma_{c2} V_2 \quad (4.2.14)$$

ここで、

- σ_{c2} : 第二層壁の圧縮変形応力
- V_2 : 第二層壁の変形体積

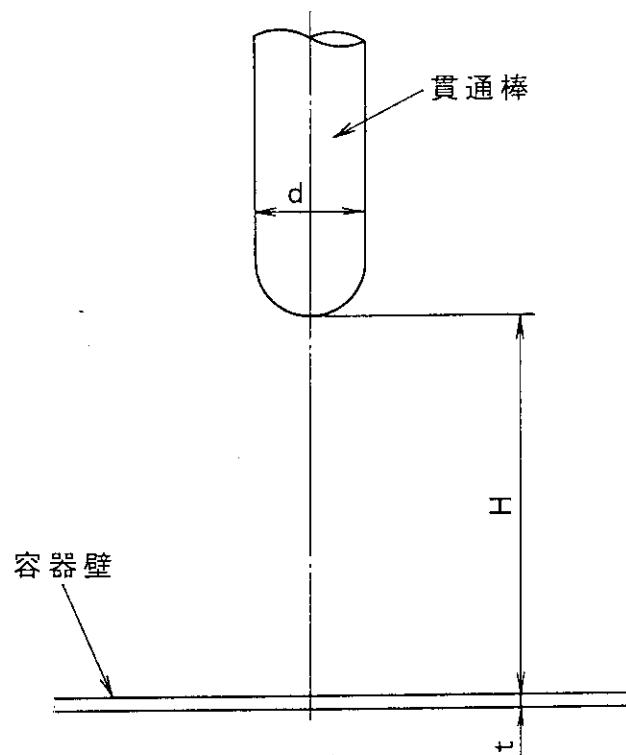
であり、また V_2 は次式で与えられる。

$$V_2 = \frac{1}{3}\pi\delta^2\{3(r+t) - \delta\} \quad (3.2.15)$$

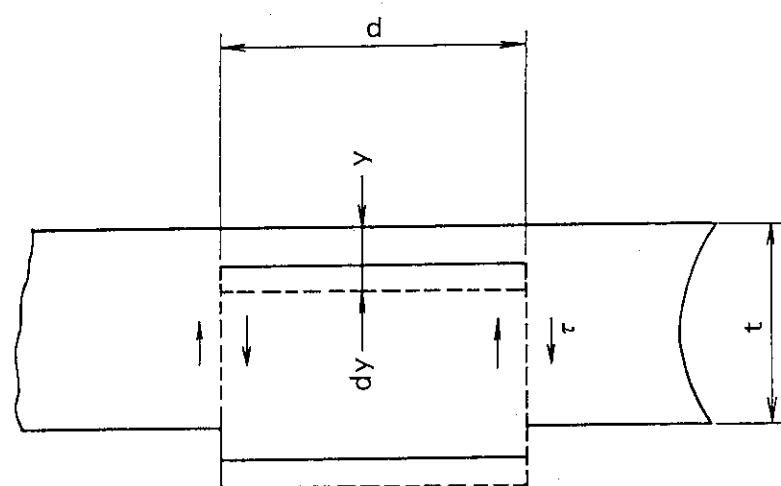
ここで、

- t : 第一壁の板厚

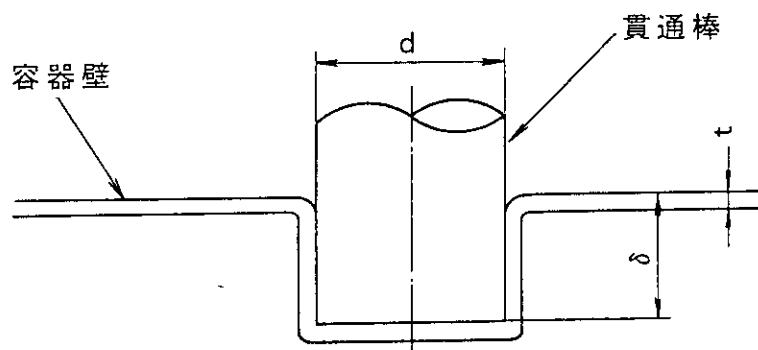
である。



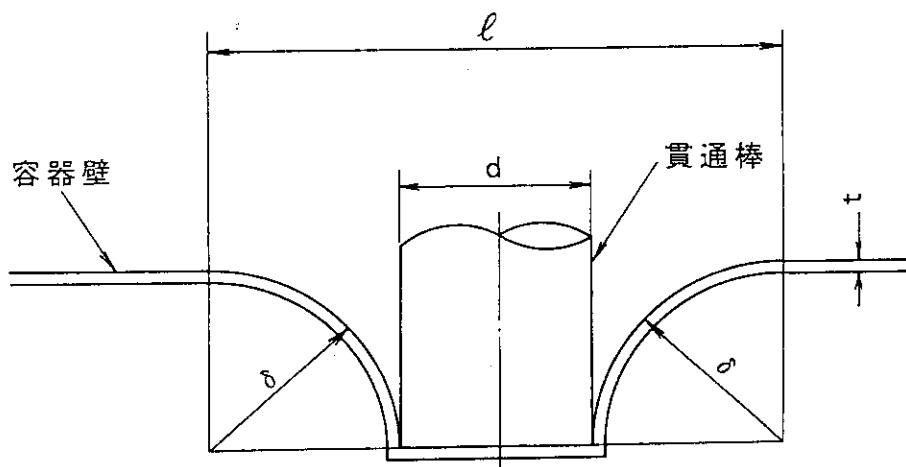
第4.2.1図 貫通解析条件



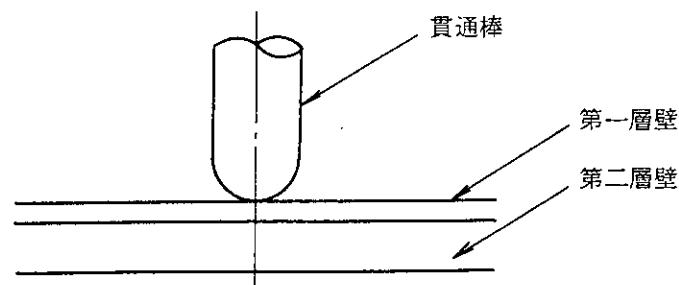
第4.2.2図せん断モデル法



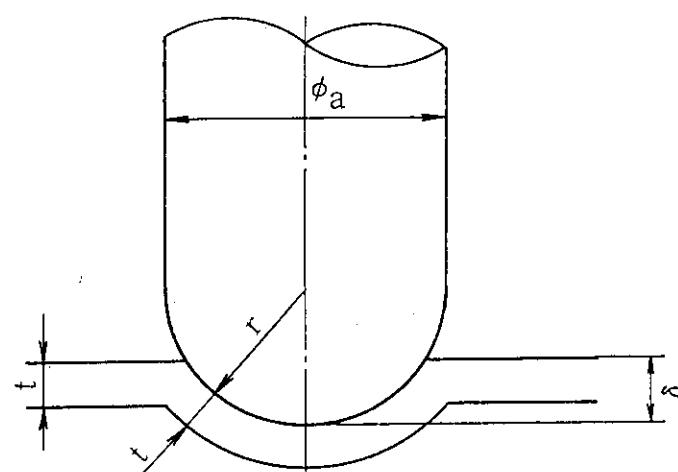
第 4.2.3 図 貫通簡易計算モデル(I)



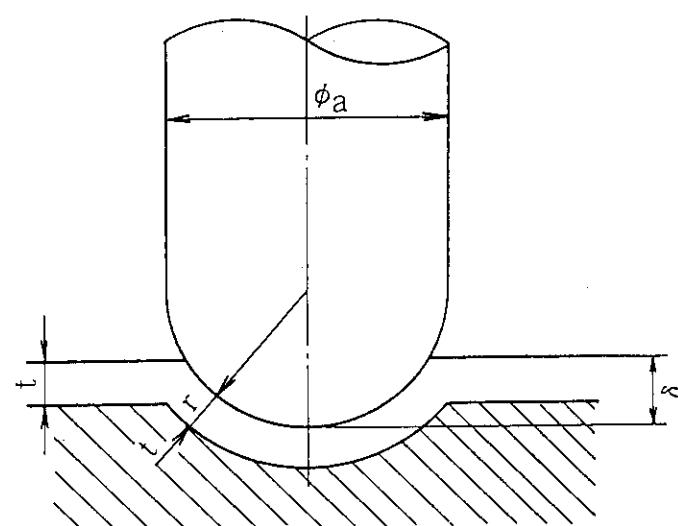
第 4.2.4 図 貫通簡易計算モデル(II)



(a) 多重層壁の貫通



(b) 一層壁



(c) 二層壁

第4.2.5図 体積変形法による貫通解析

4.3 塑性大変形法¹³⁾

(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^{14), 15)}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通りのいずれにおいても、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になるものとし、材料は剛塑性体を仮定するとエネルギーの平衡から次式が成立する。

$$E_V = WH = \int_0^{\delta_{bm}} f_b(\delta_b) d\delta_b + \int_0^{\delta_{cm}} f_c(\delta_c) d\delta_c \quad (4.3.1)$$

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。

$$\left. \begin{array}{l} P_b = P_c \\ P_b = f_b(\delta_{bm}) \\ P_c = f_c(\delta_{cm}) \end{array} \right\} \quad (4.3.2)$$

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。

$$\alpha_c = \frac{P_c}{W_c/g} \quad (4.3.3)$$

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次の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4.3.1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。

$$P^* = \begin{cases} 1 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2; U \leq U^* \\ \beta_1 + \beta_2 U + \beta_3/U; U > U^* \end{cases} \quad (4.3.4)$$

$$P^* = P/P_\ell \quad (4.3.5)$$

$$U = \delta/t^* \quad (4.3.6)$$

$$U^* = \frac{1}{2} \left(1 + \ln \frac{R}{\zeta} \right) \quad (4.3.7)$$

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。

$$\alpha_1 = \frac{\left(1 + 2\ln\frac{R}{\zeta}\right)}{\left(2 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)\left(1 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.3.8a)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\left(1 + 3\ln\frac{R}{\zeta}\right)}{3\left(2 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)\left(1 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)^2} \quad (4.3.8b)$$

$$\beta_1 = \frac{3 + \ln\frac{R}{\zeta}}{2\left(2 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.3.8c)$$

$$\beta_2 = \frac{2\left(1 + 2\ln\frac{R}{\zeta}\right)}{\left(2 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)\left(1 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.3.8d)$$

$$\beta_3 = \frac{1 + \ln\frac{R}{\zeta}}{12\left(2 + \ln\frac{R}{\zeta}\right)} \quad (4.3.8e)$$

また、 ζ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} 1 - \frac{2a}{3\zeta} \left(1 + \ln\frac{R}{\zeta}\right) &= 0 & ; \frac{a}{R} \leq 0.606 \\ 1 - \left(\frac{a}{\zeta}\right)^2 \left(1 + 2\ln\frac{R}{\zeta}\right) + \frac{2}{3} \left(1 + \ln\frac{R}{\zeta}\right) &= 0 & ; \frac{a}{R} > 0.606 \end{aligned} \right\} \quad (4.3.9)$$

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。

$$\left. \begin{aligned} P_\ell &= 2\pi M_p \frac{A}{B} \\ A &= 2 + \ln\frac{R}{\zeta} \\ B &= \begin{cases} 1 + \ln\frac{R}{\zeta} - \frac{2a}{3\zeta}; & \zeta \geq a \\ \frac{1}{2} + \ln\frac{R}{a} - \frac{\zeta^2}{6a^2}; & \zeta < a \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (4.3.10)$$

(b) 単純支持円板の曲げ変形理論

第4.3.2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。

$$P^* = \begin{cases} 1 + \frac{4}{3}U^2; U \leq 0.5 \\ 2U + \frac{1}{6U}; U > 0.5 \end{cases} \quad (4.3.11)$$

また、 P_ℓ は次式で与えられる。

$$P_\ell = \frac{2\pi M_p}{1 - \frac{2a}{3R}} \quad (4.3.12)$$

(c) 完全固定円板の膜変形理論

第 4.3.3 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。

$$P = \frac{2\pi N_p \delta}{\frac{1}{2} + \ln \frac{R}{a}} \quad (4.3.13)$$

(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 4.3.4 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応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。

$$M_p = \frac{\sigma^*}{4} (t^*)^2 \quad (4.3.14)$$

$$N_p = \sigma^* t^* \quad (4.3.15)$$

$$N_p = (\sigma_1)_T t_1 + (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.3.16)$$

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 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 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。(4.3.14) および (4.3.15) 式から等価板厚と等価応力はそれぞれ次式となる。

$$t^* = \frac{4M_p}{N_p} \quad (4.3.17)$$

$$\sigma^* = \frac{N_p}{t^*} \quad (4.3.18)$$

第 4.3.4 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 4.3.4 (a) 図から次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_C t = (\sigma_1)_T (t_1 - t) + (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.3.19)$$

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 (4.3.19) 式から次式となる。

$$t = \frac{(\sigma_1)_T t_1 + (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3}{(\sigma_1)_C + (\sigma_1)_T} \quad (4.3.20)$$

この場合の断面降伏モーメントは次式で与えられる。

$$M_p = \frac{t^2}{2} (\sigma_1)_C + \frac{1}{2} (t_1 - t)^2 (\sigma_1)_T + t_2 \left(t_1 - t + \frac{t_2}{2} \right) (\sigma_2)_T + t_3 \left(t_1 - t + t_2 + \frac{t_3}{2} \right) (\sigma_3)_T \quad (4.3.21)$$

(4.3.21) 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。

$$(\sigma_1)_C t_1 > (\sigma_2)_T t_2 + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.3.22)$$

(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 4.3.4 (b) 図から次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_C t_1 + (\sigma_2)_C (t - t_1) = (\sigma_2)_T (t_1 + t_2 - t) + (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.3.23)$$

従がって不連続点は (4.3.23) 式から次式となる。

$$t = \frac{-(\sigma_1)_C t_1 + (\sigma_2)_C t_1 + (\sigma_2)_T (t_1 + t_2) + (\sigma_3)_T t_3}{(\sigma_2)_C + (\sigma_2)_T} \quad (4.3.24)$$

この場合の断面降伏モーメントは次式で与えられる。

$$M_p = t_1 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) (\sigma_1)_C + \frac{1}{2} (t - t_1)^2 (\sigma_2)_C \\ + \frac{1}{2} (t_1 + t_2 - t)^2 (\sigma_2)_T + t_3 \left(t_1 + t_2 - t + \frac{t_3}{2} \right) (\sigma_3)_T \quad (4.3.25)$$

(4.3.25) 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。

$$(\sigma_1)_C t_1 + (\sigma_2)_C t_2 > (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.3.26)$$

(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 4.3.4(c)図から次式で与えられる。

$$(\sigma_1)_C t_1 + (\sigma_2)_C t_2 + (\sigma_3)_C (t - t_1 - t_2) = (\sigma_3)_T (t_1 + t_2 + t_3 - t) \quad (4.3.27)$$

従って不連続点は (4.3.27) 式から次式となる。

$$t = \frac{-(\sigma_1)_C t_1 - (\sigma_2)_C t_2 + (\sigma_3)_C (t_1 + t_2) + (\sigma_3)_T (t_1 + t_2 + t_3)}{(\sigma_3)_C + (\sigma_3)_T} \quad (4.3.28)$$

この場合の断面降伏モーメントは次式で与えられる。

$$M_p = t_1 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) (\sigma_1)_C + t_2 \left(t - t_1 - \frac{t_2}{2} \right) (\sigma_2)_C \\ + \frac{1}{2} (t - t_1 - t_2)^2 (\sigma_3)_C + \frac{1}{2} (t_1 + t_2 + t_3 - t)^2 (\sigma_3)_C \quad (4.3.29)$$

(4.3.29) 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。

$$(\sigma_1)_C t_1 + (\sigma_2)_C t_2 < (\sigma_3)_T t_3 \quad (4.3.30)$$

(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。

$$P = \pi d (\tau_1 t_1 + \tau_2 t_2 + \tau_3 t_3) \quad (4.3.31)$$

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

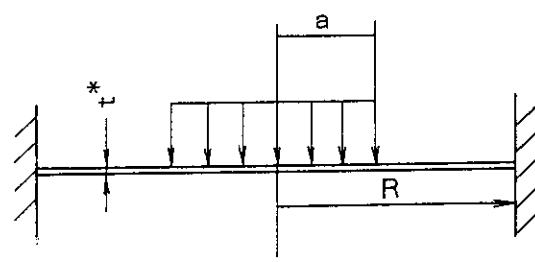
τ_3 : 内側壁の破壊せん断応力

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= 0.6(\sigma_1)_u \\ \tau_2 &= 0.6(\sigma_2)_u \\ \tau_3 &= 0.6(\sigma_3)_u \end{aligned} \right\} \quad (4.3.32)$$

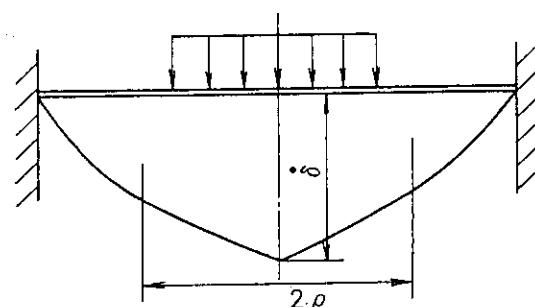
$(\sigma_1)_u$: 外側壁の破壊応力

$(\sigma_2)_u$: 中間壁の破壊応力

$(\sigma_3)_u$: 内側壁の破壊応力

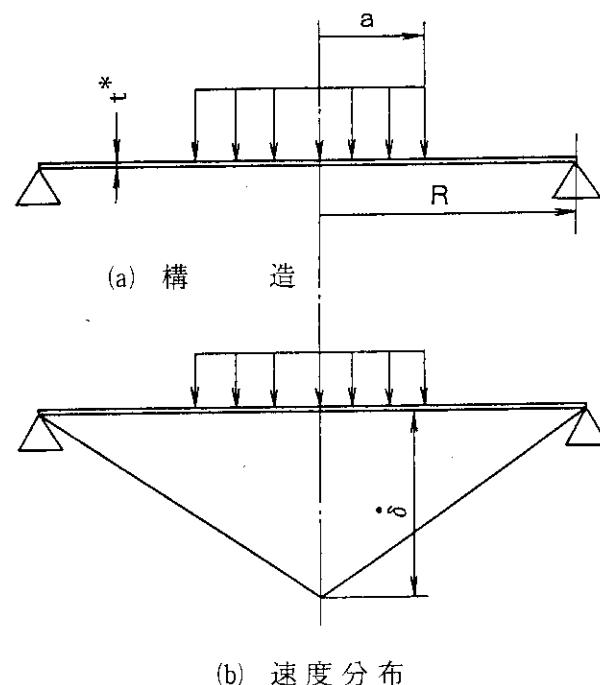


(a) 構造

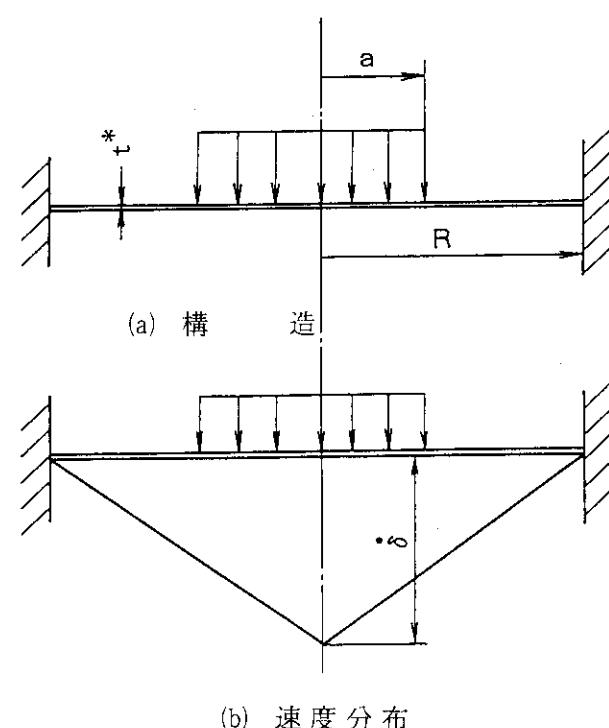


(b) 変位分布

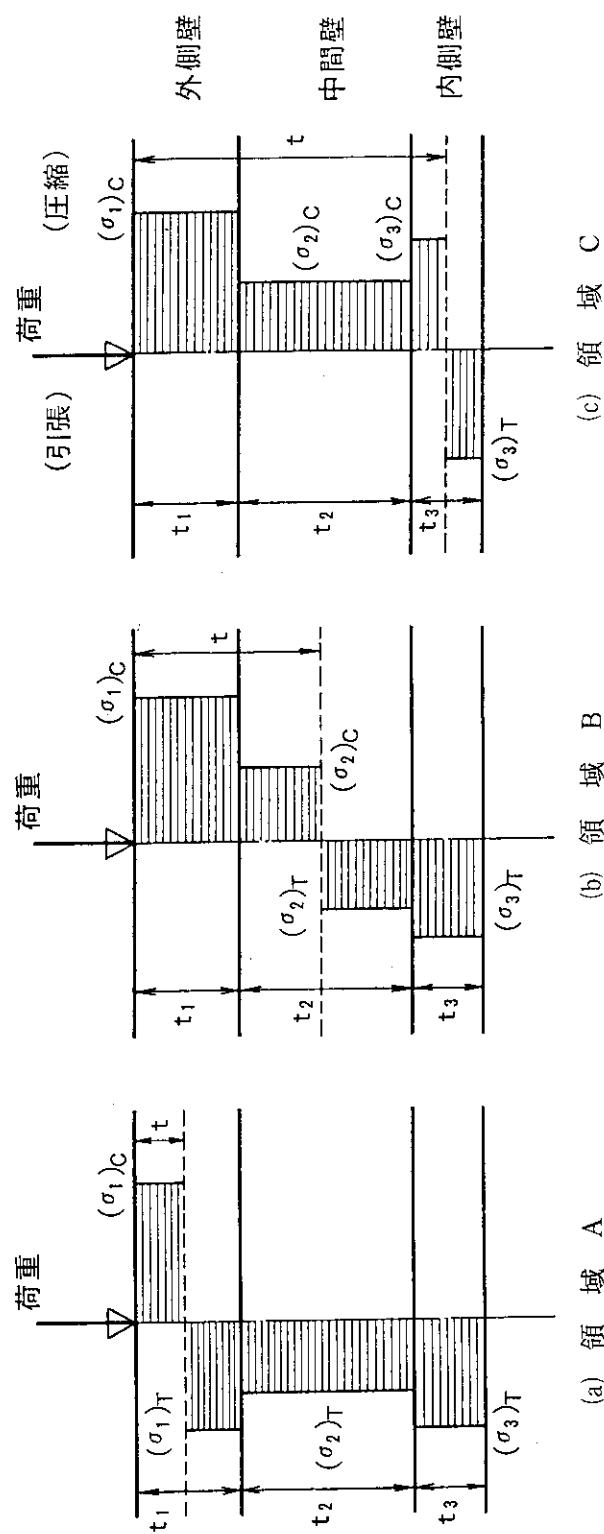
第 4.3.1 図 完全固定円板



第 4.3.2 図 単純支持円板



第 4.3.3 図 膜変形円板



第4.3.4図 三種類の応力状態

4.4 貫通限界の実験式

鉛で裏打ちされた円筒胴および平板に対する貫通限界板厚については、炭素鋼およびステンレス鋼に対して、Nelms⁽¹⁾ および Shappert らによって、実験結果を整理して次式を与えている。

$$E/\sigma_u = 2.4d^{1.6}t^{1.4} \quad (4.4.1)$$

ここで、

E : 吸収エネルギー

σ_u : 引張応力強さ

d : 貫通棒の直径

t : 板厚

である。

Shappert ら⁽²⁾は直径 150 mm の貫通棒に対して、次式を提案している。

$$E/\sigma_u = 6.9 \times 10^3 t^{1.4} \quad (4.4.2)$$

(4.4.2) 式を第 4.4.1 図に示す。

青木ら⁽³⁾は輸送容器外径に対する貫通棒の直径、貫通棒隅部半径、および 1/4, 1/2.5, 1/2 縮尺模型を用いた実験によって Nelms らおよび Shappert の結果と同様の実験式を第 4.4.2 図および次式のように得ている。

$$\left. \begin{array}{l} E/\sigma_u = At^Bd^C \\ A = 3 + 47\frac{t}{D} + 6\frac{r}{d} + 2\frac{d}{D} \\ B = 1.585 - 0.11t \\ C = 1.465 + 0.077t \end{array} \right\} \quad (4.4.3)$$

ここで、

D : 輸送容器の外径

r : 貫通棒の隅部半径

である。

Shie⁽⁴⁾は、輸送容器を高さ 1 m から、直径 150 mm の軟鋼棒上へ落下させる貫通試験において、次の 3 種類の構造に対する貫通限界エネルギーおよび貫通限界重量を与える実験式を提案している。

- (i) 鉛の裏打ちのない長方形板
- (ii) 鉛の裏打ちのある長方形板
- (iii) 鉛の裏打ちのある円筒シェル

(a) 鉛の裏打ちのない長方形板の貫通実験式

$$\begin{aligned} E/\sigma_u &= 3.65 b^{0.54} t^{1.35} \\ W/\sigma_u &= (E/\sigma_u)/(40in + \delta) \\ \delta &= 0.016 \sigma_u b^{0.54} t^{0.24} \\ (0.3 < t < 3, 45 < b < 90, \ell = b) \end{aligned}$$

ここで、

- E : 貫通棒限界エネルギー (kg · in)
- σ_u : 引張強さ (kg · in²)
- b : 長方形板の横長さ (in)
- t : 板の板厚 (in)
- W : 貫通棒限界重量 (kg)
- δ : 変形量 (in)
- ℓ : 長方形板の縦長さ (in)

である。

(b) 鉛の裏打ちのある長方形板の貫通実験式

$$\begin{aligned} W/\sigma_u &= 0.8 t^{1.4} / (1 + 0.1 t^{0.87}) \\ E &= W(40 + \delta) \\ \delta &= 4t^{0.87} \\ (0.3 < t < 3, 48 < b < 80, \ell = 1 \sim 26) \end{aligned}$$

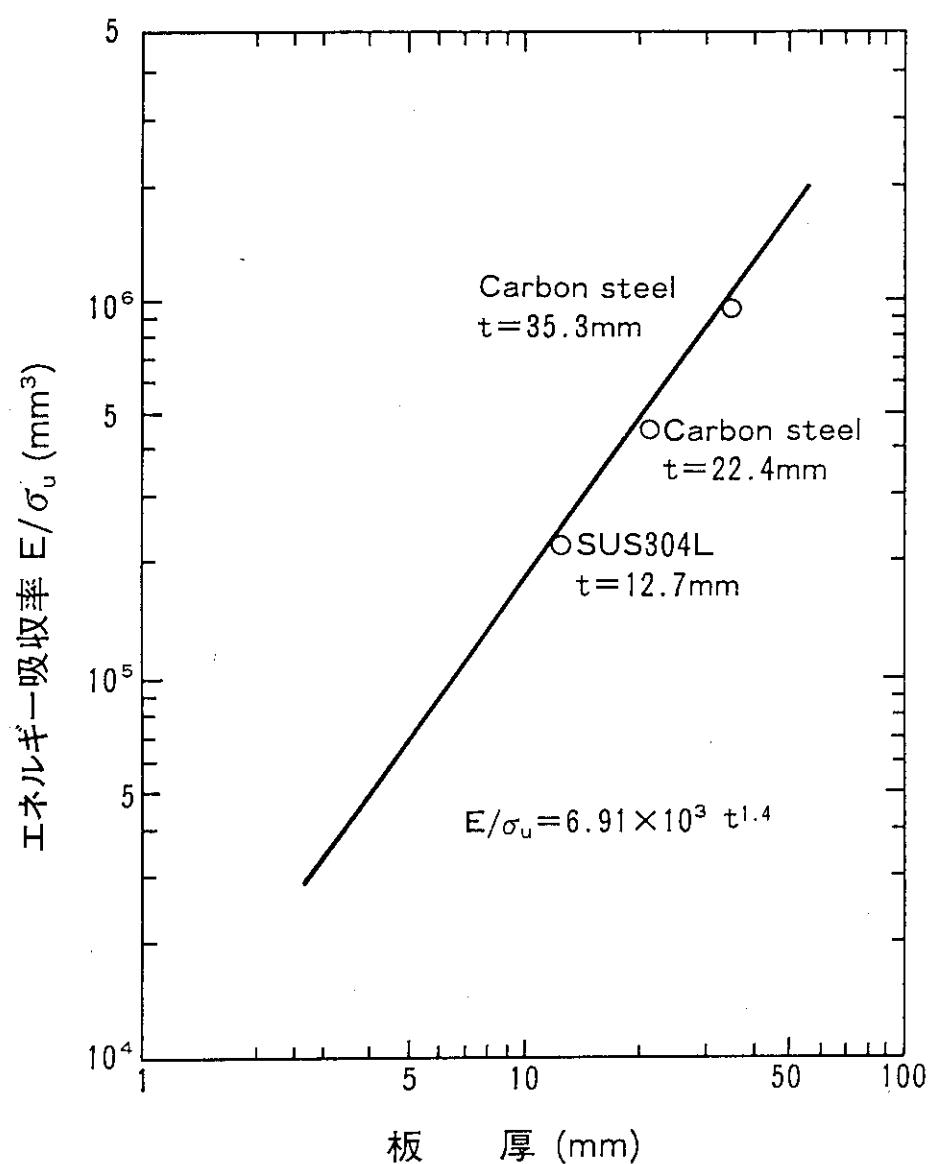
(c) 鉛の裏打ちのある円筒シェルの貫通実験式

$$\begin{aligned} W/\sigma_u &= 0.37 \tau(D) e t / 3 t^{1.58} / (1 + 0.1 t^{0.87}) \\ E &= W(40 + \delta) \\ \tau(D) &= 1 + 6/D + (41/D)^2 \\ \delta &= 4t^{0.87} \\ (0.5 < t < D/30, 45 < D < 90, \ell = 2D \sim 3D) \end{aligned}$$

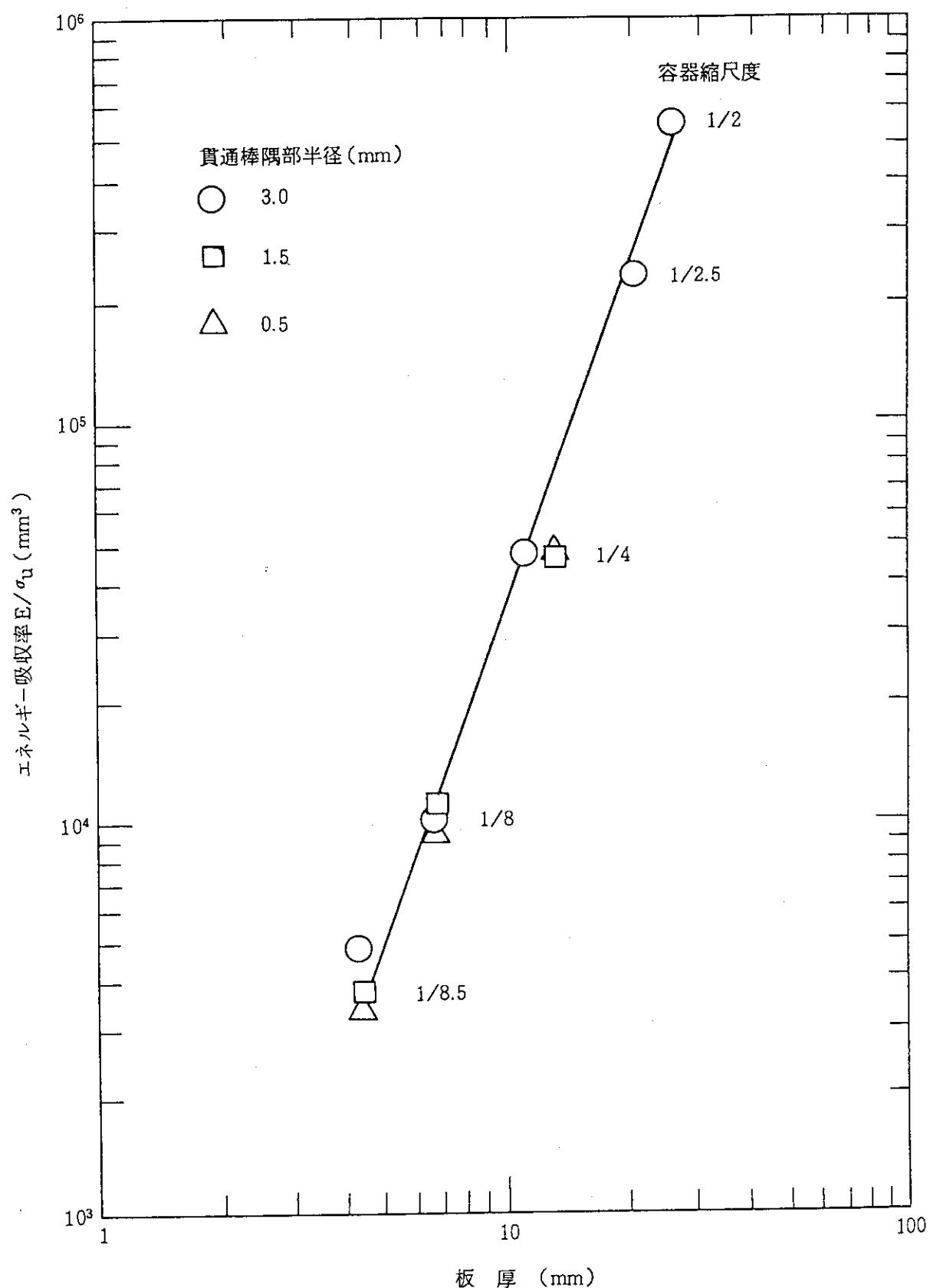
ここで、

- e : 自然数 = 2.7183
- D : 円筒シェルの外径 (in)
- ℓ : 円筒シェルの全長 (in)

である。



第 4.4.1 図 裏面鉛板付き板の貫通限界厚さ



第 4.4.2 図 裏面鉛板付き板の貫通限界厚さ

5. 解析条件

IAEA の安全輸送規則によれば、輸送容器は次の試験条件においても、健全性、安全性を確保しなければならない。

- (i) 自由落下試験（または衝撃試験）
- (ii) 圧縮試験（または曲げ試験）
- (iii) 貫通試験（または打撃試験）

これらの試験条件は輸送容器の収納物（輸送物）の種類に従って規定されている。

5.1 特別形放射性物質のための試験条件

第 5.1.1 表および第 5.1.1 図に示すように衝撃試験、打撃試験、曲げ試験がある。

(1) 供試体

試験は特別形放射性物質から成るか、もしくはそれを構擬する供試体について行われなければならない。それは、衝撃試験、打撃試験、曲げ試験および加熱試験から成る。

各々の試験ごとに、別の供試体を用いることができる。

(2) 衝撃試験

衝撃試験では供試体は、9 m の高さから標的に落下されること。落下試験の標的は、衝撃を与えた時の変位もしくは変形に対する抵抗の増加が、供試体の損傷を著しく増大させないような特性の、平らな水平の表面でなければならない。

(3) 打撃試験

打撃試験では供試体は、滑らかな固体表面によって支えられる鉛板の上に置かれ、鋼製丸棒の平らな面で、1.4 kg の物体の 1 m の自由落下から生ずる衝撃と同等の衝撃を発生するように、打たれること。丸棒の平端面は直径 25 mm で、その縁は半径 3 ± 0.3 mm の仕上げが行われたものであること。鉛は、ピッカース硬度 3.5 ~ 4.5、厚さは 2.5 mm を超えず、供試体によっておおわれる面積以上の面積をもつこと。鉛の新しい面が、各打撃ごとに用いられること。丸棒は、最大の損傷を与えるように、供試体を打つこと。

(4) 曲げ試験

曲げ試験は、最小長さ 10 cm、かつ、長さ対最小幅の比率が 10 を下まわらない、細長い供試体にのみ適用すること。供試体は水平にクランプにしっかりと固定され、クランプ面からその長さの半分が出るようにすること。供試体の方向は、その自由端が鋼製丸棒によって打たれた時に、供試体が最大の損傷をこうむるようなものでなければならない。丸棒は、高さ 1 m のところから 1.4 kg 物体の 1 m の垂直自由落下から生ずると同等の衝撃を生ずるように、供試体を打たなければならない。丸棒の平端面は、直径 25 mm で、その縁は 3 ± 0.3 mm の仕上げが行われたものであること。

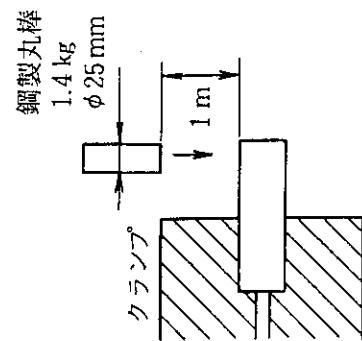
第 5.1.1 表 放射性輸送物の試験条件

試験条件	輸送物の種類 L型輸送物	IP型輸送物(注1)			A型輸送物 同左	B型輸送物		核分裂性 輸送物
		IP-1型	IP-2型	IP-3型		B(M)型	B(U)型	
一般の試験条件								
(1) 水の吹き付け試験	—	—	○	○	○	○	○	○
(2) 落下試験(1.2 m 等)	—	—	○	○	○	○	○	○
(3) 落下試験(0.3 m コーナー)	—	—	軽量の輸送物のみ	同左	同左	同左	同左	○
(4) 積み重ね試験(重量の5倍又は13 kPa)	—	—	○	○	○	○	○	○
(5) 貫通試験(6 Kg, 直径3.2 cm の丸棒を1 m の高さから落下)	—	—	—	○	○	○	○	○
(6) 9 m 落下試験	—	—	—	—	气体、液体のみ	—	—	—
(7) 貫通試験(6 Kg, 直径3.2 cm の丸棒を1.7 m の高さから落下)	—	—	—	—	气体、液体のみ	—	—	—
(8) 環境試験(摂氏38度で1週間放置)	—	—	—	—	—	○	○	—
特別の試験条件								
(1) 落下試験(9 m, 軽量のものにあっては、500 kg の軟鋼版を輸送物に落下)	—	—	—	—	—	○	○	□
(2) 落下試験(直径15 cm, 長さ20 cm の軟鋼丸棒上に1 m の高さから落下)	—	—	—	—	—	○	○	□
(3) 耐火試験(800度30分)	—	—	—	—	—	○	○	□
(4) 浸漬試験(深さ15 m)	—	—	—	—	—	○	○	△
(5) 浸漬試験(深さ200 m)	—	—	—	—	—	37 PBq 以上の使用済核燃料のみ	同左	—
(6) 浸漬試験(深さ0.9 m)	—	—	—	—	—	—	—	□ 注2)

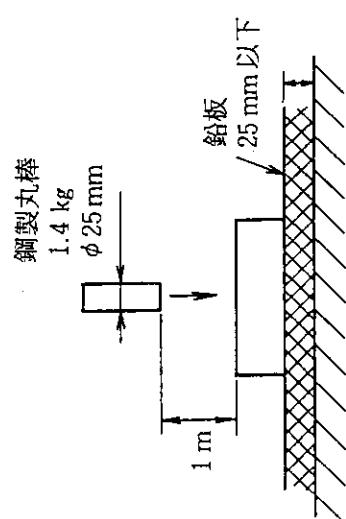
注1) コンテナ、タンクを輸送物とするIP型輸送物については、長官が同時と認める基準によることができる。

注2) 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件については、□の試験条件後△の試験条件を行うもののうち厳しいものを行う。

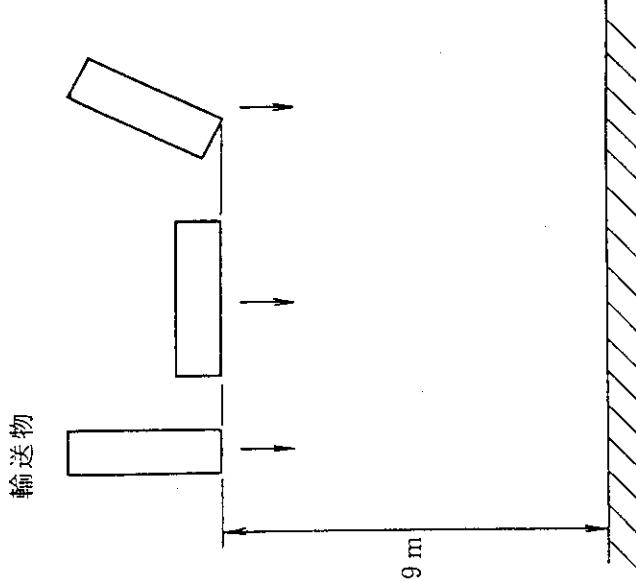
曲げ試験



打撃試験



衝撃試験



第5.1.1図 特別形の試験条件

5.2 一般の試験条件

第 5.2.1 図に示すように自由落下試験、圧縮試験、曲げ試験がある。

(1) 供試体

本試験は、水の吹きつけ試験、自由落下試験、圧縮試験および貫通試験から成る。輸送物の供試体は、自由落下試験、圧縮試験および貫通試験を、各々の場合とも水の吹きつけ試験の後に受けなければならない。次の要件が満たされる場合には、これらのすべての試験に対して一個の供試体が使用されることがある。

水の吹きつけ試験の終了と、次に続く試験との間の時間は、供試体表面に認め得る程の乾燥なしに水が供試体に最大程度浸透するようなものでなければならない。これを満たせないという証拠がない限りは、この間隔は、水の吹きつけが 4 方向から同時に行われる場合には 2 時間でなければならない。ただし、水の吹きつけが 4 方向の各々から行われる場合には、時間間隔があってはならない。

水の吹きつけ試験では供試体は、1 時間当たり約 5 cm の降雨に少なくとも 1 時間曝すことを模擬した水の吹きつけ試験を受けなければならない。

(2) 自由落下試験

自由落下試験では供試体は、試験される安全確認部分について最大の損傷をこうむるように標的上に落下しなければならない。

(a) 供試体の最も低い点から標的の上表面までの落下高さは、該当する質量について

第 5.2.1 表に定められる自由落下高さを下まわらないものでなければならない。標的は、衝撃を与えられた時の変位もしくは変形に対する抵抗の増加が、供試体の損傷を著しく増大させないような特性の、平らな水平の表面でなければならない。

(b) 核分裂性物質を収納している輸送物については、上記に定められる自由落下試験は、各コーナーに対して、あるいは円筒形輸送物の場合は各縁の 4 半分ごとに對して、0.3 m の高さからの自由落下を行っておかなければならぬ。

(c) 質量 50 kg を超えないファイバー板製または木製の長方形輸送物については、別個の供試体が、それぞれのコーナーに対して 0.3 m の高さからの自由落下を受けなければならぬ。

(d) 質量 100 kg を超えないファイバー板製の円筒形輸送物については、別個の供試体が、各縁の 4 半分ごとに對して 0.3 m の高さからの自由落下を受けなければならない。

(3) 圧縮試験

圧縮試験では輸送容器の形状が、実際上積重ねを防げない限り、供試体は、24 時間、次のいずれか大きい方の圧縮荷重を受けなければならない。

(a) 実際の輸送物の重量の 5 倍相当。

(b) 13 kPa (0.13 kgf/cm²) に輸送物の鉛直投影面積を乗じた数値相当。

角荷は供試体の相対する両面に均一に加えられねばならず、このうち一方の面は輸送物が通常置かれる底面でなければならない。

(4) 貫通試験

貫通試験では供試体は、試験中に有意に移動しない硬い平らな水平な表面に置かれなければならない。

- (a) 先端が半球形で重量 6 kg, 直径 3.2 cm の棒が、その軸を鉛直にして、十分深く貫通する場合には密封装置に突き当るように、供試体の最も弱い部分の中心に落されなければならぬ。
- (b) 棒の下端から供試体の上表面上の衝撃目標点までの棒の落下高さは、1 m でなければならない。

(5) 液体および気体用の A 型輸送物のための追加試験

一方の試験が他方より当該供試体にとって厳しいものであることが証明され得る場合には、一つの供試体がこのより厳しい方の試験を受けなければならぬが、そうでない限りは、一つもしくは別個の供試体が次の試験の各々を受けなければならぬ。

- (a) 自由落下試験 供試体は、密封に関して最大の損傷をこうむるように標的上に落下されなければならない。供試体の最も低い部分から標的の上表面までの落下高さは 9 m でなければならない。標的は、衝撃を与えられた時の変位もしくは変形に対する抵抗の増加が、供試体の損傷を著しく増大させないような特性の、平らな水平の表面でなければならない。
- (b) 貫通試験 供試体は、落下高さが、(4)(b)に定められる 1 m から 1.7 m にふやさなければならないことを除けば、(4)に定められる試験を受けなければならぬ。

第5.2.1表 平常の輸送条件に対して輸送物を試験するための自由落下高さ

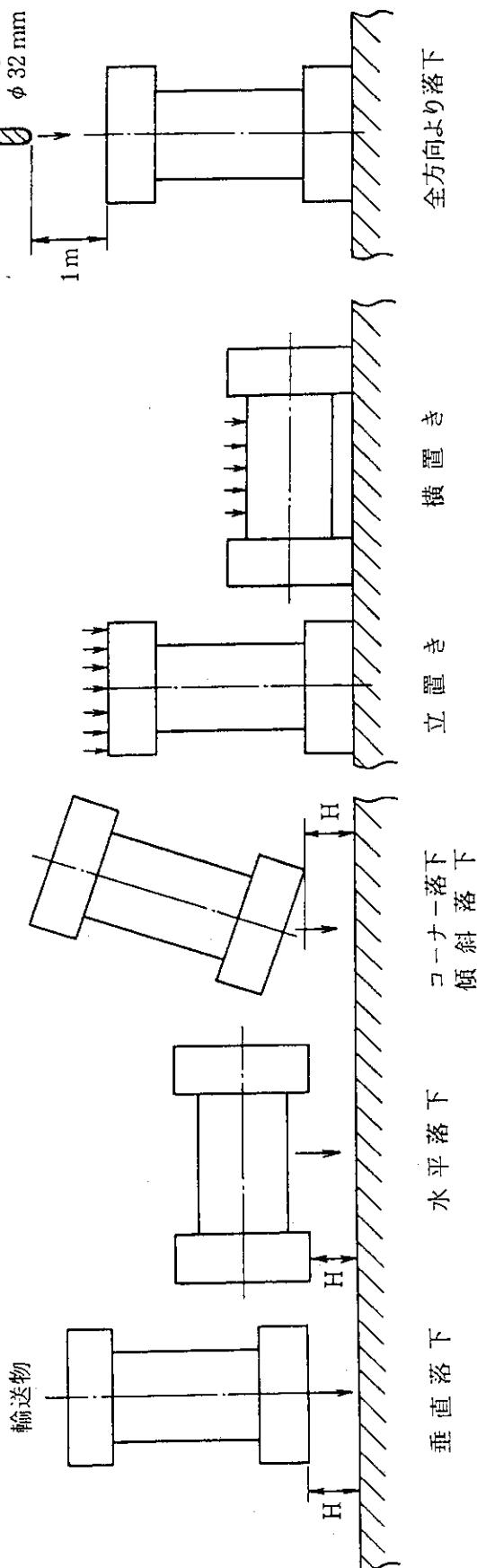
輸送物の重量 (kg)	自由落下高さ (m)
5,000以下	1.2
5,000を超えて10,000以下	0.9
10,000を超えて15,000以下	0.6
15,000を超えるもの	0.3

自由落下試験

圧縮試験

自重×5倍の荷重

貫通試験



第5.2.1図 一般の試験条件

5.3 特別の試験条件

第 5.3.1 図に示すように、落下試験 I, 落下試験 II, 落下試験 III がある。

(1) 供試体

供試体は、(2), (3)および(4)に定められる試験をこの順序で行った場合の累積効果を受けなければならない。これらの試験に続いて、この供試体もしくは別個の供試体を用いて、定められる浸漬試験を受けなければならない。機械的試験は、3つの異なる落下試験から成る。供試体が落下試験を受ける順序は、機械的試験終了時に、供試体が次に続く耐火試験において最大の損傷をこうむることにつながる損傷をこうむっているようなものでなければならない。

(2) 落下試験 I

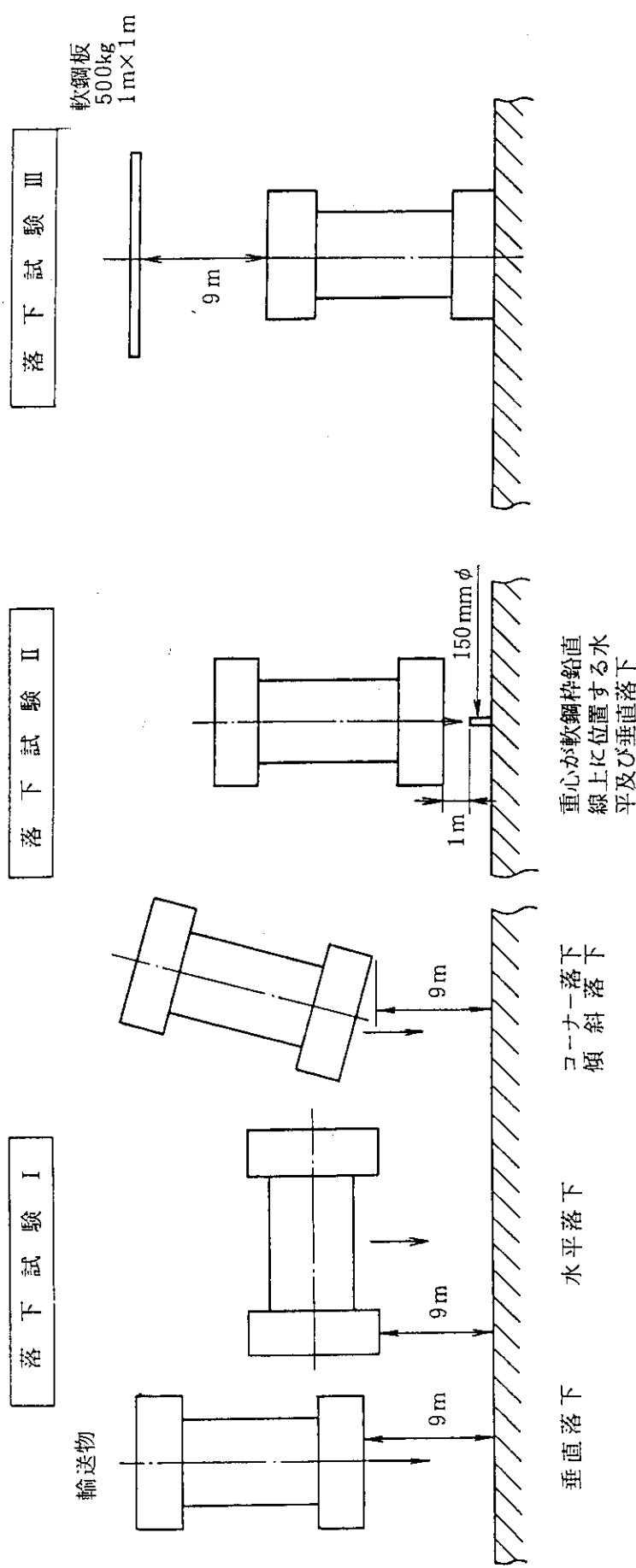
落下試験 I では、供試体は、標的上に最大の損傷をこうむるように落下されなければならず、供試体の最下点から標的の上表面までの落下高さは 9 m でなければならない。標的には、衝撃を与えた時の変位もしくは変形に対する抵抗の増加が、供試体の損傷を著しく増大させないような特性の、平らな水平の表面でなければならない。

(3) 落下試験 II

落下試験 II では、供試体は、標的上に直角に固定された丸棒上に、最大の損傷をこうむるように落下されなければならない。供試体の意図された衝撃点から丸棒の上表面までの落下高さは 1 m でなければならない。丸棒は断面が円の軟鋼棒で、直径が 15 ± 0.5 mm であり、その長さは、それより長い方の棒がより大きな損傷を生ずる場合には最大の損傷を生ずるのに十分な長さの棒が用いられなければならないが、そうでない限り、20 cm でなければならない。丸棒の上端は平らで水平であり、その縁は 6 mm を超えない半径に仕上げられていないなければならない。丸棒が据付けられる標的には、衝撃を与えた時の変位もしくは変形に対する抵抗の増加が、供試体の損傷を著しく増大させないような特性の、平らな水平の表面でなければならない。

(4) 落下試験 III

落下試験 III では、500 kg の重量物の 9 m の高さからの標的上への落下によりその供試体が最大の損傷をこうむるように供試体を標的上に置くことにより、動的圧潰試験を受けなければならない。重量物は、1 m × 1 m の軟鋼板から成り、水平の姿勢で落下しなければならない。落下高さは板の下側から供試体の最も高い点までが測定されなければならない。供試体が置かれる標的には、衝撃を与えた時の変位もしくは変形に対する抵抗の増加が、供試体の損傷を著しく増大させないような特性の、平らな水平の表面でなければならない。



第5.3.1図 特別の試験条件

5.4 固縛構造解析条件

輸送容器の固縛構造の解析条件¹⁹は第5.4.1表のようになっている。

輸送物重心に前述の加速度が働く場合の締め付け装置に生じる反力は、運輸省自動車局、放射性物質自動車運搬技術検討会「放射性物質の自動車運搬に係る積載方法の安全に関する技術基準の適用指針について」¹⁹により求めることができる。5.4.1図中に示すように、各方向に働く加速度は、進行方向を α_x 、横方向を α_y および上下方向を α_z とする。輸送容器固縛金具に生じる引張力Pは、次式で与えられる。

$$P = \frac{W}{4} \left\{ \frac{(\alpha_z - 1)a + 2\alpha_x \cdot h}{c \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi + a \cdot \sin\theta} + \frac{(\alpha_z - 1)b + 2\alpha_y \cdot h}{c \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi + b \cdot \sin\theta} \right\} \quad (5.4.1)$$

ここで、

W	: 輸送物重量
α_z	: 上下方向加速度
α_x	: 進行方向加速度
α_y	: 横方向加速度
a	: 位置決め具の直径 (=b)
h	: 重心の高さ
c	: 固縛金具の高さ
ϕ	: 固縛用棒の角度
θ	: 固縛用棒の角度

また、緩衝体内胴に発生する反力のうち、進行方向の反力の成分(F_x)は、次式で与えられる。

$$F_x = W \cdot \alpha_x - \frac{W}{2} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)a + 2\alpha_x \cdot h}{c \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi + a \cdot \sin\theta} \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \quad (5.4.2)$$

横方向の反力成分(F_y)は、次式で与えられる。

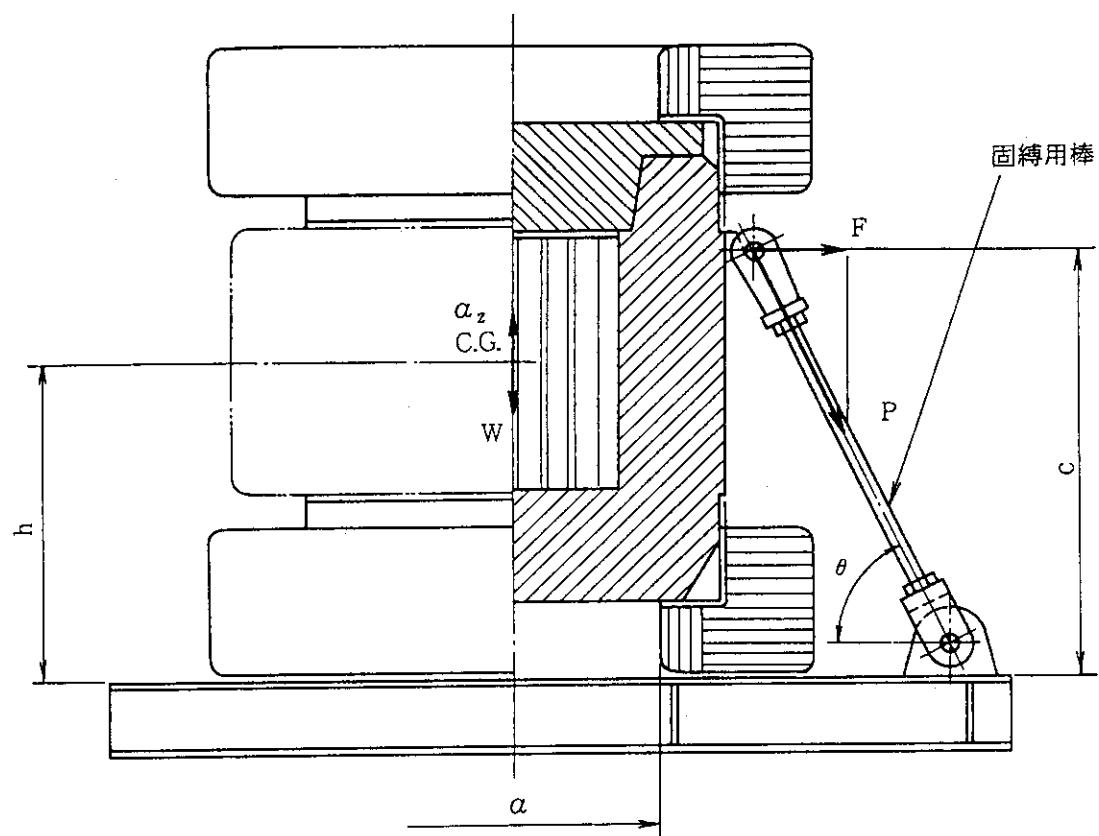
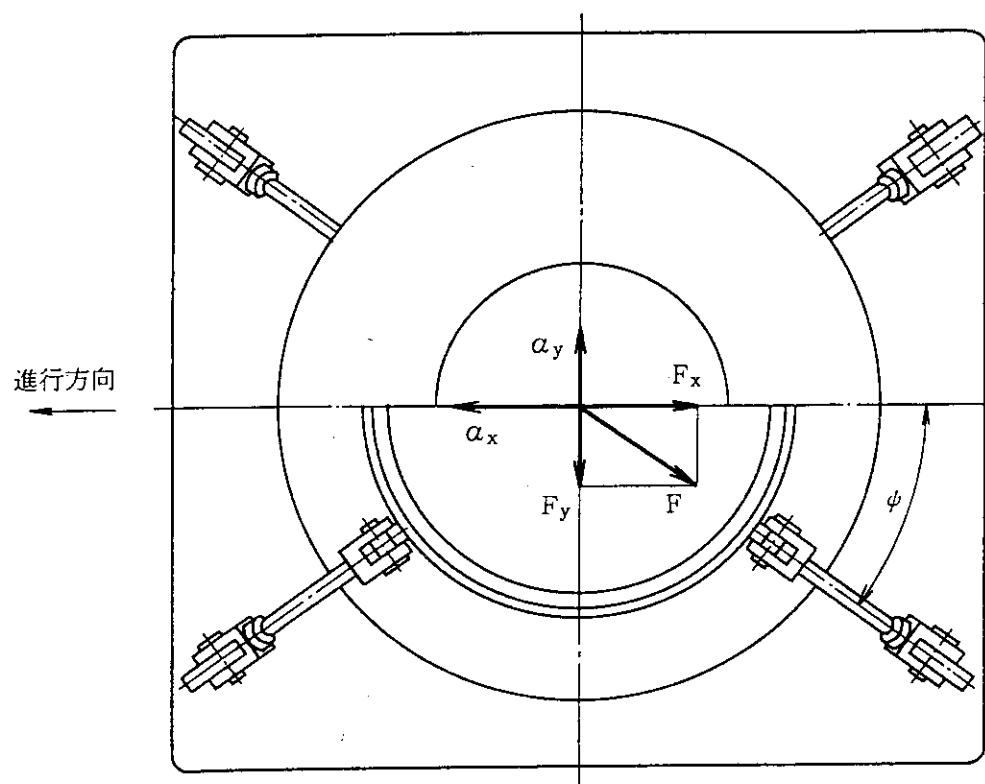
$$F_y = W \cdot \alpha_y - \frac{W}{2} \cdot \frac{(\alpha_z - 1)b + 2\alpha_y \cdot h}{c \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi + b \cdot \sin\theta} \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi \quad (5.4.3)$$

進行方向と横方向の加速度が同時に働く場合は、次式となる。

$$F = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} \quad (5.4.4)$$

第5.4.1表 固縛構造解析条件

吊上装置	負荷係数	3
締付装置	縦方向加速度(進行方向)	10G
	横方向加速度	5G
	垂直方向加速度	2G
許容応力	降伏応力	



第5.4.1図 固縛装置

6. 応力評価

6.1 一般的な考慮

輸送容器の応力評価基準を考慮する事項は次のものあげることができる。

- (1) 通常輸送状態における応力レベルは低い。
- (2) 事故状態における応力レベルは通常輸送状態に比較して高いが、荷重時間は短かく、特に落下衝突条件では極めて短い。
- (3) 収納物の漏洩を生じないようにするために、密封に関連する構造では、塑性変形をしないようとする。

以上のことから考慮して、構造部材の応力は破壊応力以下になるようにするが、密封に関連する部材では降伏応力以下になるようにする。このような考慮に基づいた応力評価に用いる設計基準の一例を第 6.1.1 表に示す。

第6.1.1表 応力評価に用いる設計基準の例(I)

条件	解析項目	応力分類 評価位置		
			1次応力強さ	1+2次応力強さ
一般の条件	吊上装置	本体吊上金具	Sy	—
		ふた吊上金具		
一般的試験条件	熱的試験	容器本体・ふた	—	3Sm
		ふた締付用ボルト	—	Sy
		バスケット	—	3Sm
一般的試験条件	圧力	容器本体・ふた	Sy	—
	振動	輸送物	輸送中の振動に耐えられること。	
	水噴霧	輸送物	水の吹きつけに耐えうること。	
	自由落下	輸送容器	Sy	—
		収納物	Sy	—
	貫通	容器本体・ふた	耐貫通強度	
	圧縮	容器本体・ふた	Sy	—
特別の試験条件	落下試験 I	容器本体・ふた	Su	—
		ふた締付用ボルト	Sy	—
		バスケット	Su	—
		燃料	Su	—
特別の試験条件	落下試験 II	容器本体(衝突近傍)	耐貫通強度	—
		容器本体(上記以外)	Su	—
特別の試験条件	熱的試験	容器本体・ふた	—	3Sm
		ふた締付用ボルト	—	Sy
		バスケット	—	3Sm
	浸漬	容器本体・ふた	Sy	—

Sy : 降伏強さ

Sm : 応力強さ

Su : 引張強さ

6.2 ASME 規格の適用範囲と輸送容器への適用性

6.2.1 ASME 規格の適用範囲

(1) 設計思想

起こりうるあらゆる破壊様式を想定し、ひとつひとつの破壊様式に対応する設計基準を用意し、解析によって構造物の健全性を詳細に評価することができるようとする。

(2) 適用範囲

原子力プラントの主要な圧力バウンダリ（圧力容器、ポンプ、バルブ、配管、機器の支持構造、炉心支持構造等のコンポーネント）

(3) 温度条件

(a) 最低使用温度を基準 NDT 温度（脆性遷移温度）以上とする。

(b) 最高使用温度を次のようにクリープ挙動が生じる温度領域よりも十分低い温度とする。

(i) フェライト鋼: 700° F (371°C)

(ii) オーステナイトステンレス鋼及び高合金鋼: 800° F (427°C)

(4) コンポーネントの分類

各コンポーネントの構造健全性の要求度を考慮し、次のカテゴリに従ってクラス分類する。

(a) クラス 1 コンポーネント

原子炉冷却材圧バウンダリを構成する機器（例、原子炉圧力容器他）

(b) クラス 2 コンポーネント

原子炉格納容器およびこれに接続する容器で放射性物質の漏洩を防止するためのもの（例、原子炉格納容器他）

(c) クラス 3 コンポーネント

原子炉を安全に停止するために必要な設備または非常時に安全を確保するために必要な設備（例、安全注入系統設備の高圧注入タンク他）

(d) 金属性格納容器コンポーネント

(e) コンポーネント支持構造物

各コンポーネントを支持するためのもの（例、ラグ、ブラケット他）

(f) 炉心支持構造物

原子炉圧力容器の内部において、燃料集合体を直接に支持するかまたは拘束する部材（例、炉心板、炉心支持板他）

(g) Sec. III以外の基準によるもの

(5) プラントの使用状態の分類

使用状態を第 6.2.1 表に示すカテゴリに従って分類する。

(a) 設計条件

(b) 運転状態

(i) レベル A

(ii) レベル B

(iii) レベル C

(iv) レベル D

(c) 試験状態

設計条件は、運転状態のなかのレベル A を基準とし、これを安全側に包含するような状態である。

運転状態は、レベル A からレベル D に進むに従って、そのレベルの発生確率は小さくなる一方、そのレベルが発生した場合のコンポーネントに対する負荷は厳しくなる傾向にある。

試験状態は、使用前及び使用中の過圧試験のときに生じる状態をいう。

(6) 解析法の仮定

- (a) 延性材料の前提に立ち、材料を弾完全塑性体として取り扱う。
- (b) 延性破壊と低サイクル疲れ破壊とを防止することに最大の注意を払っている。(その他に、ラチエットや座屈の破壊等にも注意している。)
- (c) 材料の降伏と低サイクル疲れを評価するのに適した強度理論として最大せん断応力説を採用している。
- (d) 構造物の破壊との関連において応力をいくつかのカテゴリに分類し、カテゴリごとに許容限度を設定している。

許容限度の体系、使用状態に対する設計裕度の取り方に応じて構成されており、状態別のホッパ線図として表現されている。

(7) 応力解析のフローチャート

クラス 1 コンポーネントの応力解析のフローチャートを第 6.2.1 図に示す。

(8) ホッパ線図

クラス 1 コンポーネントのホッパ線図を第 6.2.2 表に示す。

6.2.2 輸送容器への適用性

(1) 輸送容器の構造規格基準

- (a) IAEA 規則では、各試験条件下における外部線量率や放射性物質の漏洩量が許容値を上回らないこと、および臨界に達しないこと等を要求しているが、これらの評価に必要と考えられる構造規格（材料、設計、解析、製作、検査等）については特に、具体的な規制は行っておらず各国の規格あるいは設計者に委ねる形となっている。

IAEA 規則（1985 年版）

A 型輸送物に適用する追加設計条件

529. 設計、製作および製造技術は、当局にとって受け入れ可能な国内基準、国際基準、または他の要件に伴うものでなければならぬ。

- (b) 一方、我国では、輸送容器全体を規定する構造規格基準は具体的規定されておらず、「核燃料物質等輸送物設計承認申請書記載要綱（原子力安全局核燃料規制課内規集）」に吊上装置および締付装置にのみ基準が一部示されているのみである。

(2) 輸送容器への ASME 規格適用性

- (a) 輸送容器の構造解析は負荷条件に対応させながら設計を行う「Design by Analysis」を原

則としており、これは ASME Sec. III の基本思想と一致する。

- (b) しかも、ASME Sec. III Subsec. NB では、使用状態に応じ、6.2.1(5)項に示すようにカテゴリ分けをしており、輸送容器の名状態（一般の条件、一般の試験条件および特別の試験条件）のカテゴリと類似性がある。
- (c) 輸送容器の強度評価を最大主応力説に基づく ASME CODE Sec. III の考え方を適用した方が安全側な結果を得る。

多軸応力状態における降伏条件を与える強度理論としてよく用いられるものとして次のものがある。

- (i) 最大主応力説

$$\text{Max } \{ |\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3| \} = S_y$$

- (ii) 最大せん断応力説

$$\text{Max } \{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1| \} = S_y$$

ASME CODE Sec. III では、このうち最大せん断応力説を採用している。これは、次の理由によっている。

(i) 一般に延性材料の多軸応力場での降および低サイクル疲れ破壊に関しては、最大せん断応力説の方が最大主応力説よりもはるかに実験と良くあうこと。

(ii) 多軸応力状態での降伏条件は、最大せん断応力説の方が第 6.2.2 図に示すように安全側となること。

- (d) NRC (米国) では、使用済燃料輸送容器の構造規格として ASME Sec. III Subsec. NB Class 1 Components に関する基準を適用するように指針が出されている。(NRC R.G. 7.6)

なお、日本においては、原子力設備の技術基準として ASME Sec. III に相当する基準が通産省省令および告示 501 号等で定められている。

6.2.3 レベル A およびレベル D の適用

一般の試験条件および特別の試験条件時の評価において ASME CODE Sec. III NB のレベル A およびレベル D を適用した理由は次の通りである（運転状態カテゴリについては第 6.2.1 表参照）。

- (1) 輸送容器でいう一般の試験条件は、第 6.2.1 表に示すように 4 つのカテゴリのうちレベル A でいう正常作動時とはいいがたいが、レベル A で評価することは安全側といえる。
- (2) 特別の試験条件をレベル D としたのは
 - (a) 9 m 落下、1 m 貫通、耐火試験等が仮想的な事故であり運転カテゴリでいうレベル D に相当する。
 - (b) 特別の試験条件に相当する事故は、運転寿命中 1 回しか生じないと考えられる（実際に生じた場合は、その輸送容器は原則として使用しない）。この考え方は、レベル D に共通するものである。一方レベル C というのは、何度かの発生頻度が考えられた評価体系となっている。
 - (c) NRC (米国) では、NRC-R.G.7.6 「Design Criteria for Structural Analysis Shipping

Cask Containment Vessels」において、輸送容器を ASME SEC. III NB でいう "Class 1 Components" 相当と考え、一般の試験条件をレベル A および特別の試験条件をレベル D 扱いとして評価するように指導している。

- (d) また、解析基準値の内、燃料棒および密封境界を構成する重要部品（本体蓋、本体蓋、締付ボルト、収納缶蓋、収納缶蓋締付ボルトおよび収納缶フランジ）については、ASEM Sec. III Subsec. NB に従えばレベル D において1次応力で塑性変形を許容することになるため、第 6.2.3 表に示すようにレベル D においても塑性変形を生じない解析基準値としている。

第6.2.1表 状態カテゴリー

1) レベルA；普通にプラントを起動、運転、高温待機及び停止しているときに生じる状態である。 いいかえれば、使用目的に照らして正常に作動しているときの状態である。
2) レベルB；運転員のショットした誤操作や機器の異状などによって、レベルA からはずれた状態であり、運転中にときどき起こるものをいう。 プラントは修理を要するような損傷を受けない。
3) レベルC；レベルA からはずれた状態であって、損傷部の修理などのために、一度プラントを停止する必要がある状態をいう。その状態は、プラントの寿命中、何度も生じるものであってはならない。
4) レベルD；プラントの安全評価上、仮想的に想定するような状態をいう。 損傷部の修理などのために一度プラントを停止する必要がある。

第 6.2.2 表 応力強さの限界線図（ホッパー線図）

応力の分類	一次応力			二次応力 膜応力と曲げ	ピーク応力 F
	一般膜応力 Pm	局部膜応力 Pl	曲げ応力 Pb		
記号 * 1 設計条件	Pm → Sm	Pl → 1.5 Sm	Pb → Pl + Pb → 1.5 Sm	評価不要	評価不要
レベル A レベル B				Pl + Pb + Q → * 6 → 3 Sm	* 2 → Pl + Pb + Q + F → Sa
レベル C	* 3 Pm → 1.2 Sm * 4 * 5 → Sy 2/3 Su	* 3 Pl → 1.2 Sm × 1.5 * 4, * 5 → Sy 2/3 Su × 1.5	* 3 Pb → 1.2 Sm × 1.5 → Sy 2/3 Su × 1.5 * 4, * 5	評価不要	評価不要
試験状態	* 3 Pm → 2.4 Sm 2/3 Su * 4 * 5 → 2/3 Su	* 3, * 5 Pl → 2.4 Sm 2/3 Su × 1.5 * 4 → 2/3 Su × 1.5	* 3, * 5 Pb → 2.4 Sm 2/3 Su × 1.5 → 2/3 Su × 1.5	評価不要	評価不要
試験状態	Pm → 0.9 Sy	Pl → 1.35 Sy	Pb → Pl + Pb → 1.35 Sy		* 7 → * 2 → Su

(備考) * 1) 記号 Pm, Pl, Pb, Q 及び F は一つの数値を示すものでなく、6 個の応力成分 σ_t , σ_l , σ_r , τ_{lt} , 及び τ_{rt} の組合せを示すものである。

* 2) Sa は設計疲れ線図から求めること。全振幅に対する応力強さの限界は 2 Sa である。
この場合において、実際の繰返し回数が 2 種類以上ある場合は、疲れ累積係数が 1 未満であること。

* 3) オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金に適用する。

* 4) * 3 以外の材料について適用する。

* 5) 2 つの値のうち小さい方の値をとる。

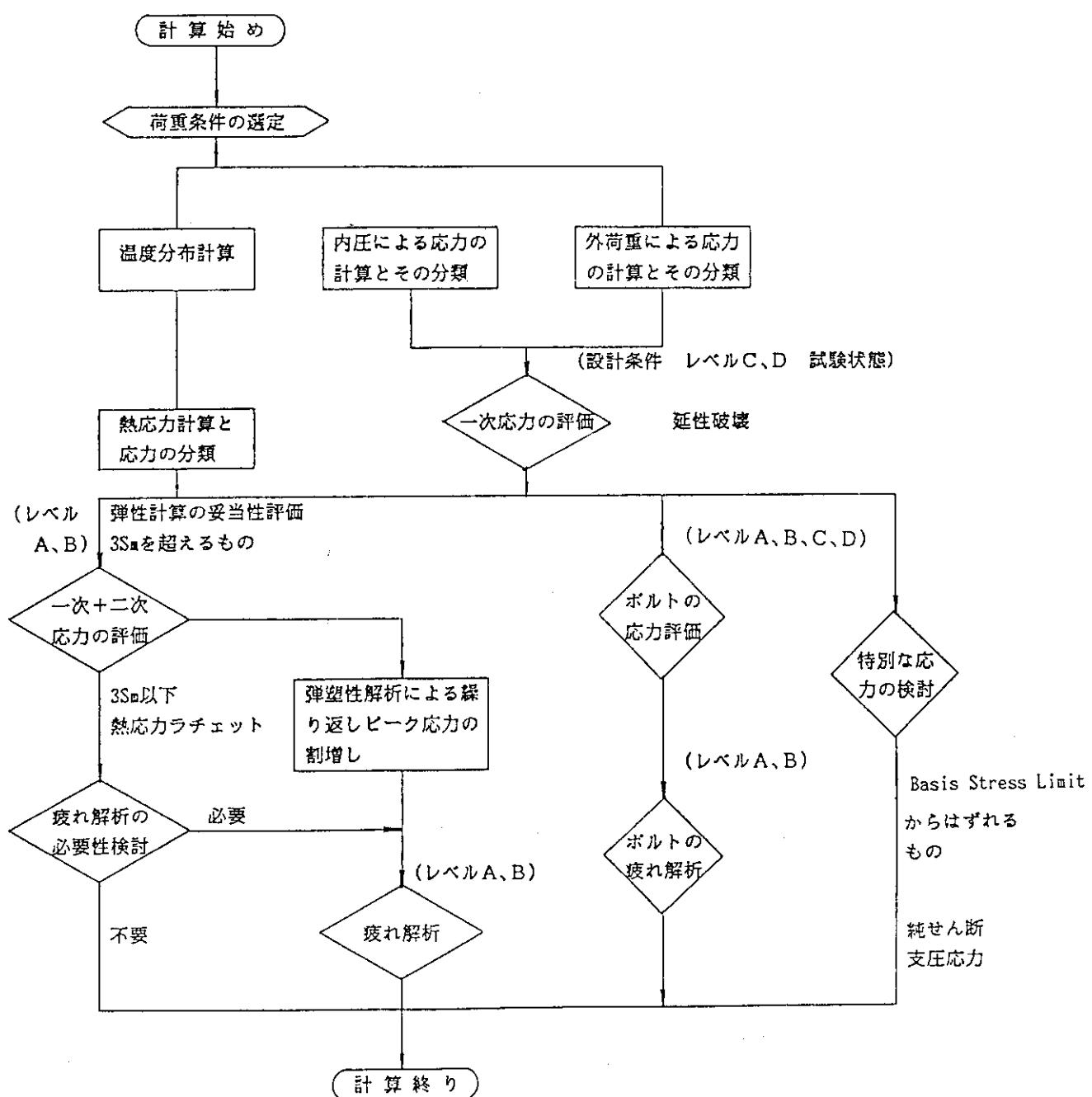
* 6) Pl + Pb + Q が 3 Sm を超えた場合は第 14 条の規定による。

* 7) 本評価基準は 10 回を超える試験状態のみ適用するもので、レベル A 及びレベル B と合わせて評価するものである。

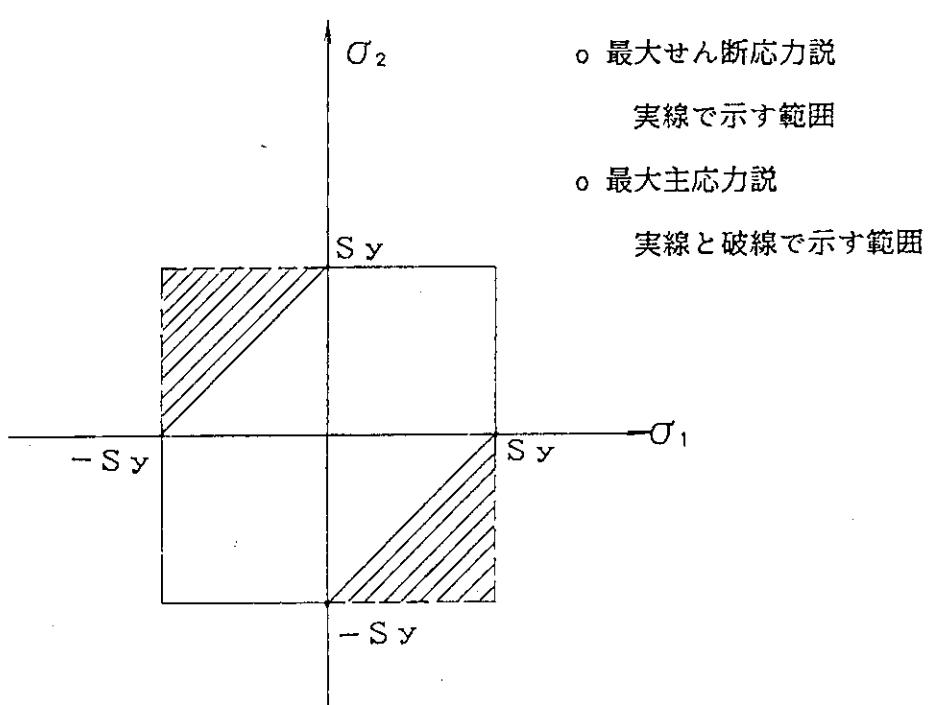
* 8) ボルト、ナット、キャノピーシール及びオメガシールを除く。

第6.2.3表 塑性変形を生じさせない応力強さの限界

応力の分類 運転状態	ASME Sec. III Subsec. NB の基準		応力強さの限界 (密封境界を構成する重要部品)	
	P _m (P _L)	P _L +P _b	P _m (P _L)	P _L +P _b
Level A	< 2 / 3 S _y (2 S _m)	< S _y (3 S _m) ^{*1}	< S _y / 1.8	< S _y / 1.2
Level D	1.2 倍 < S _y / 1.25 (= 2.4 S _m)	< 1.2 S _y (= 3.6 S _m)	< S _y / 1.5 1 / 1.5 倍	< S _y



第 6.2.1 図 原子炉第一種圧力容器の応力解析の流れ図



第 6.2.2 図 二軸応力場の降伏応力

6.3 応力評価に用いる設計基準の例

6.1 および 6.2 節の考慮に基づいて第 6.3.1 表に示すように、輸送容器の応力評価に用いる設計基準の一例をあげた。

第 6.3.1 表 応力評価に用いる設計基準の例(II)

試験 条件	評価位置	応力の分類	負荷の組合せ				応力強さの限界	
			初期締付力	重量	圧力	熱負荷		
一	(準拠規格)	—	—	—	—	—	ASME sec. III Subsec. NB	
一	(降伏条件)	—	—	—	—	—	最大せん断応力	
一般 条件 一般の試験条件（熱的試験）	トラニオン	一次応力	$P_L + P_b$	—	○	—	—	Sy
		一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/1.5
		応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	○	2 Sy
	内筒	一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/1.5
		応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	—	Sy
		一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/1.5
	内筒底板	応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	○	2 Sy
		一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/1.8
		応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	○	Sy/1.2
	本体蓋	一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/0.6
		応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	○	Sy/1.2
		一次応力	Pm	○	—	○	—	Sy/0.6
	本体蓋 締付ボルト	応二力次	$P_L + P_b + Q$	○	—	○	○	Sy/1.8
		一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/1.2
		応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	○	Sy/0.6
	燃料棒	一次応力	Pm	—	—	○	—	Sy/1.8
		応二力次	$P_L + P_b + Q$	—	—	○	—	Sy/1.2
		一次応力	Pm	—	—	○	○	Sy/0.6

記号の説明 Pm : 一次一般膜応力 Sy : 降伏強さ
 PL : 一次局部膜応力 Su : 引張強さ
 Pb : 一次曲げ応力
 Q : 二次応力

第 6.3.1 表 応力評価に用いる設計基準の例(II) (続き)

試験条件	評価位置	応力の分類	負荷の組合せ				応力強さの限界	
			初期締付力	重量	圧力	熱負荷		
一般の試験条件 (自由落下)	内筒 内筒底板	一次応力	P _m	—	○	○	—	Sy/1.5
			P _L +P _b	—	○	○	—	Sy
		応力次	P _L +P _b +Q	—	○	○	○	2Sy
	本体蓋	一次応力	P _m	—	○	○	—	Sy/1.8
			P _L +P _b	—	○	○	—	Sy/1.2
		応力次	P _L +P _b +Q	—	○	○	○	Sy/0.6
	本体蓋 締付ボルト	一次応力	P _m	○	○	○	—	Sy/1.8
			P _L +P _b	○	○	○	—	Sy/1.2
		応力次	P _L +P _b +Q	○	○	○	○	Sy/0.6
	燃料棒	一次応力	P _m	—	○	○	—	Sy/1.8
			P _L +P _b	—	○	○	—	Sy/1.2
		応力次	P _L +P _b +Q	—	○	○	○	Sy/0.6
一般の試験条件 (圧縮)	胴	一次応力	P _m	—	○	○	—	Sy/1.5
			P _L +P _b	—	○	○	—	Sy
		応力次	P _L +P _b +Q	—	○	○	○	2Sy
	注2) 本体蓋	一次応力	P _m	—	○	○	—	Sy/1.8
			P _L +P _b	—	○	○	—	Sy/1.2
		応力次	P _L +P _b +Q	—	○	○	○	Sy/0.6

第6.3.1表 応力評価に用いる設計基準の例(II) (続き)

試験 条件	評価位置	応力の分類	負荷の組合せ				応力強さの限界	
			初期締付力	重量	圧力	熱負荷		
特別の試験条件 (落下試験・I)	胴	一次応力	P _m	—	○	○	—	0.7 S _u
			P _L +P _b	—	○	○	—	S _u
	内筒底板	一次応力	P _m	—	○	○	—	0.7 S _u
			P _L +P _b	—	○	○	—	S _u
	本体蓋	一次応力	P _m	—	○	○	—	S _y /1.5
			P _L +P _b	—	○	○	—	S _y
	本体蓋 締付ボルト	一次応力	P _m	○	○	○	—	S _y /1.5
			P _L +P _b	○	○	○	—	S _y
	燃料棒	一次応力	P _m	—	○	○	—	S _y /1.5
			P _L +P _b	—	○	○	—	S _y
	バスケット	一次応力	P _m	—	○	—	—	0.7 S _u
			P _L +P _b	—	○	—	—	S _u
特別の試験条件 (熱的試験)	内筒	一次応力	P _m	—	—	○	—	0.7 S _u
			P _L +P _b	—	—	○	—	S _u
	内筒底板	一次応力	P _m	—	—	○	—	0.7 S _u
			P _L +P _b	—	—	○	—	S _u
	本体蓋	一次応力	P _m	—	—	○	—	S _y /1.5
			P _L +P _b	—	—	○	—	S _y
	本体蓋 締付ボルト	一次応力	P _m	○	—	○	—	S _y /1.5
			P _L +P _b	○	—	○	—	S _y
	燃料棒	一次応力	P _m	—	—	○	—	S _y /1.5
			P _L +P _b	—	—	○	—	S _y

7. 構造解析

(1) 内圧および外圧による構造解析^{20, 21, 22}

弾性限界内であれば、下記の規格によって、構造解析が実施できる。非弾性解析は第8章に記述する計算コードによって行える。

(a) 昭和55年通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」、

(1980)。

(b) 昭和62年総理府令第11号「試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の技術基準に関する総理府令」、(1987)。

(c) JIS B 8243「圧力容器の構造」、(1983)。

(2) 衝撃による力と応力²³

第2章から第4章までに記述した方法によって輸送容器各部材に加わる加速度が求められると、各部材に加わる力は次式で求められる。

$$F = m\alpha$$

ここで、

F : 加重

m : 質量

α : 加速度

この加重を用いて各部材の応力（あるいは必要に応じてひずみ）を求めることができる。

(3) 輸送時の振動解析

輸送容器が第7.1.1図のように輸送架台上に横置き状態で固縛され、輸送される場合の1次固有振動数は次式で与えられる。

$$f_1 = \frac{a_1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{W\ell^4}} \quad (7.1.1)$$

ここで、

f_1 : 1次固有振動数

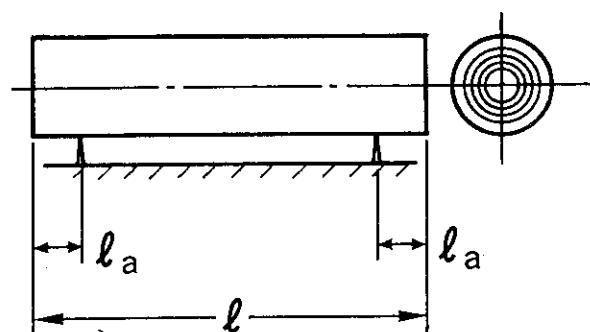
a_1 : 1次モード係数

E : 縦弾性係数

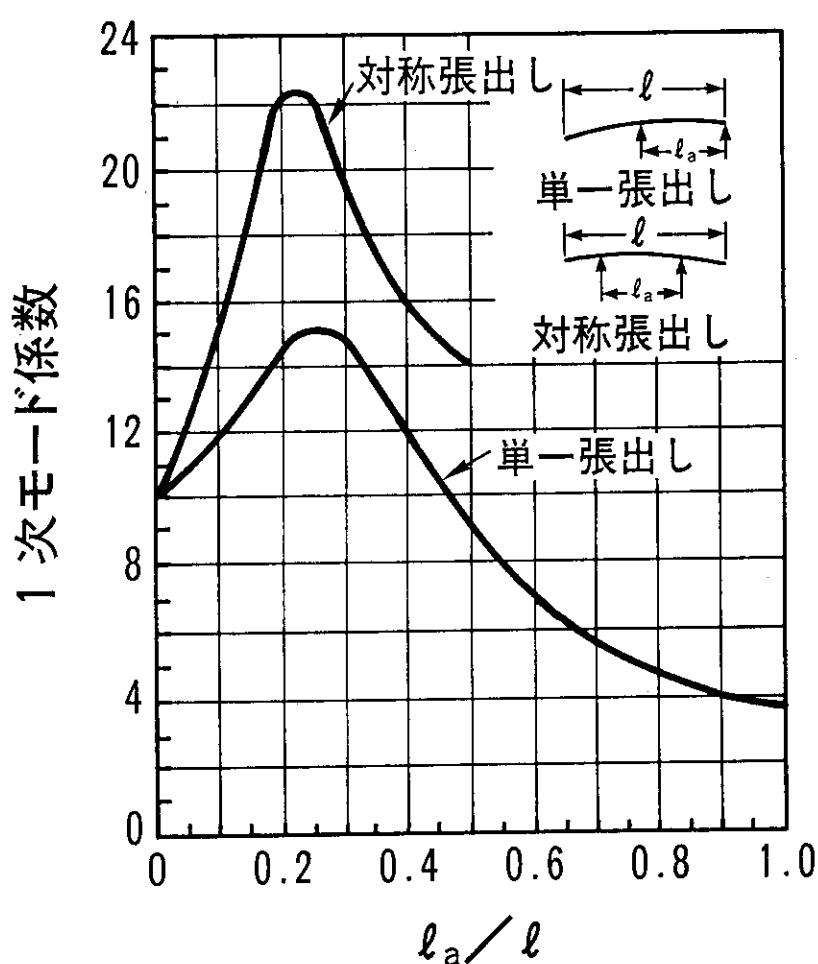
ℓ : 全長

ℓ_a : 支庶からの張出し長さ

である。また、1次モード係数は第7.1.2図から求めることができる。



第 7.1.1 図 輸送容器の振動解析モデル



第 7.1.2 図 1 次モード係数

8. 計 算 コ ー ド

第2章から第4章において、衝突および貫通解析に使用できる計算コード名について示した。
ここでは、これらの計算コードの概要を記述する。

プログラム名 ABAQUS[®] (Hibbit Karlsson and Sorenson, Inc.)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

- | | |
|-------------------------|--|
| (1 - 1) 時間積分法 | Hilber-Hughes-Taylor 法
(Newton β の拡張) |
| (1 - 2) 時間増分の決定法 | 後退差分による時間積分（陰解法） |
| (1 - 3) 弾塑性計算法 | 初期歪法 |
| (1 - 4) 構成方程式の考慮 | 降伏条件 : Von Mises, 硬化則, 等方, 移動, O R N L, 他 |
| (1 - 5) 動的解析に利用できる要素モデル | 1, 2, 3 次元要素 |
| (1 - 6) プレプロセッサー | ABAQUS内蔵, PATRAN |

(2) 衝撃解析用の特殊機能

- | | |
|------------------------------|----------------|
| (2 - 1) 定式化 (ラグランジエ/オイラー/混合) | ラグランジエ法 |
| (2 - 2) 質量マトリックスの集中化 | Consistent |
| (2 - 3) 低次要素モデルの使用 | 特に考慮なし |
| (2 - 4) 接触境界条件の考慮 | G A P 要素, 摩擦 |
| (2 - 5) 材料モデルの選択 | 歪速度依存可 |
| (2 - 6) 計算の効率化 | 時間増分の自動決定機能 |
| (2 - 7) ポストプロセッサー | ABAQUS, PATRAN |

(3) 輸送容器解析以外の解析機能ならびに解析経験

- | | |
|------------------------|----------------------------|
| (3 - 1) 周期的な外力に対する応答解析 | 周波数応答解析可, 経験あり |
| (3 - 2) 衝撃力に対する応答解析 | ABAQUSは衝撃解析には陽解法スキームを用いている |
| (3 - 3) 加振力に対する応答解析 | 地震荷重等経験多 |
| (3 - 4) 連成問題への応答 | 流体との連成は一応できる |
| (3 - 5) 他の動的問題への応用 | 弾性ガタ系の振動は効率良く解ける |

(4) 热解析

- (4-1) 热伝導係数 温度依存可能。第方性、直交異方性および完全異方性
- (4-2) 潜熱 相変態を考慮する場合で、固化温度および液化温度をもとに定義
- (4-3) ギャップ热伝導およびギャップふく射
温度-応力連成解析を行なう場合に使用するもので、構造物間の接触状態に依存する伝熱特性および熱ふく射を規定する
- (4-4) 温度-応力連成解析
伝熱解析と応力解析を同時に行う
ギャップ間の伝熱条件の変化（伝導-伝達）を考慮
時間増分の自動決定機能

プログラム名 ADINA[®](ADINA Engineering, Inc.)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

(1-1) 時間積分法

Newmark- β 法, Wilson- θ 法および
中央差分法

(1-2) 時間増分の決定法

陽解法では C F L 条件, 隕解法では外
力波形の $1/4$ 周期

(1-3) 弾塑性計算法

接線剛性法, 反復法には Newton 法,
修正 Newton 法, B F G S 法があり,
Aitkinの加速法も使用できる。

(1-4) 構成方程式の考慮

等方硬化モデルおよび移動硬化モデル

(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル

ト拉斯要素, はり要素, 板・シェル要素, 2 D ソリッド要素,
3 D ソリッド要素

(1-6) プレプロセッサー

ADINA IN

(2) 衝撃解析用の特殊機能

(2-1) 定式化(ラグランジエ/オイラー/混合)

ラグランジエ法

(2-2) 質量マトリックスの集中化

中心差分法を用いる場合に, 集中質量
マトリックスを用いる

(2-3) 低次要素モデルの使用

新しくゆがみを考慮した4節点シェル
要素が追加された

(2-4) 接触境界条件の考慮

ト拉斯要素を用いたギャップ要素法に
加えて新たに面接触境界条件も考慮
非線形弾性体, 熱弾性体, 弾塑性体,
熱弾塑性クリープモデルが使用できる
なし

(2-5) 材料モデルの選択

ADINA-PLOT

(2-6) 計算の効率化

(2-7) ポストプロセッサー

(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験

(3-1) 周期的な外力に対する応答解析

固有値, 周波数応答解析ができる。また, ADINA-PLOT を用いて応答
スペクトルが計算できる

(3-2) 衝撃力に対する応答解析

中心差分法により時刻歴荷重の応答計算を実施

(3-3) 加振力に対する応答解析

時刻歴荷重として入力できる

(3-4) 連成問題への応力

流体と構造物の振動解析に流体要素が利用できる

(3-5) 他の動的問題への応用

地震応答解析可能

(4) 热解析

(4-1) 热伝導係数 温度依存可能。等方性、直交異方性および完全異方性

(4-2) 潜熱 相変態を考慮する場合で、固化温度および液化温度をもとに定義

(4-3) ギャップ热伝導

プログラム名 ANSYSTM (Ansys Inc.)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

- | | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| (1 - 1) 時間積分法 | Houbolt 法（陰解法） |
| (1 - 2) 時間増分の決定法 | 使用者が入力データで決める |
| (1 - 3) 弾塑性計算法 | 初期歪法 |
| (1 - 4) 構成方程式の考慮 | 降伏条件 : Von Mises, 硬化則, 等方, 移動, ORNL |
| (1 - 5) 動的解析に利用できる要素モデル | 1, 2, 3 次元要素 |
| (1 - 6) プレプロセッサー | ICAN (CRC開発)
ANSYS 内蔵 |

(2) 衝撃解析用の特殊機能

- | | |
|------------------------------|-------------|
| (2 - 1) 定式化 (ラグランジエ/オイラー/混合) | ラグランジエ法 |
| (2 - 2) 質量マトリックスの集中化 | Consistent |
| (2 - 3) 低次要素モデルの使用 | 特に考慮なし |
| (2 - 4) 接触境界条件の考慮 | ギャップ要素, 摩擦 |
| (2 - 5) 材料モデルの選択 | 歪速度依存不可 |
| (2 - 6) 計算の効率化 | 特に考慮されてない |
| (2 - 7) ポストプロセッサー | ICAN, ANSYS |

(3) 輸送容器解析以外の解析機能ならびに解析経験

- | | |
|------------------------|---|
| (3 - 1) 周期的な外力に対する応答解析 | 周波数応答解析可, 経験あり |
| (3 - 2) 衝撃力に対する応答解析 | ANSYSは衝撃解析には計算時間がかかりすぎるので, ベンチマーク以外
ほとんどなし |
| (3 - 3) 加振力に対する応答解析 | 地震荷重等経験多 |
| (3 - 4) 連成問題への応答 | 流体との連成は一応できるが, 経験は少ない |
| (3 - 5) 他の動的問題への応用 | 弾性ガタ系の振動は効率良く解ける。経験多 |

(4) 熱解析

- | | |
|---------------|--------------------------------|
| (4 - 1) 熱伝導係数 | 温度依存可能。等方性, 直交異方性および完全異方性 |
| (4 - 2) 潜熱 | 相変態を考慮する場合で, 固化温度および液化温度をもとに定義 |

プログラム名 CRUSH^⑦ (JAERI)

プログラム作成年月日 1990年1月

(1) 基本的機能

(1-1) 解析法 静的解析法

(1-2) 弹塑性計算法 応力-ひずみデータ使用

(2) 衝撃解析

(2-1) 定式化 単軸変形法

(2-2) 計算用途 緩衝体付き円筒型輸送容器

プログラム名	DYNA2D TM (LLNL)
プログラム作成年月日	1989年
(1) 基本的機能	
(1-1) 時間積分法	中央差分法（陽解法）
(1-2) 時間増分の決定法	プログラム内部で自動的にクーラン条件を満足する時間増分を決定
(1-3) 弾塑性計算法	増分法に基づく接線剛性法、その他等方硬化則、振動硬化則及びこれらの組合せによる関連流れ則
(1-4) 構成方程式の考慮	4節点アイソパラメトリック要素
(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル	M A Z E
(1-6) プレプロセッサー	
(2) 衝撃解析用の特殊機能	
(2-1) 定式化（ラグランジェ／オイラー／混合）	ラグランジェ法
(2-2) 質量マトリックスの集中化	集中質量マトリックスを使用
(2-3) 低次要素モデルの使用	1点積分とアワーグラスコントロールを使用
(2-4) 接触境界条件の考慮	面接触が扱える
(2-5) 材料モデルの選択	弾性、異方性弾性、弾塑性、熱弾塑性、粘弹性材料および土、ゴム、爆薬などが扱える
(2-6) 計算の効率化	リゾーニング機能、ベクトル化、時間増分自動
(2-7) ポストプロセッサー	ORION
(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験	
(3-1) 周期的な外力に対する応答解析	固有値解析はできない
(3-2) 衝撃力に対する応答解析	集中荷重、追従力、分布荷重、加速度、速度、角速度の時刻歴を指定した応答解析が可能
(3-3) 加振力に対する応答解析	(3-2) と同じ
(3-4) 連成問題への応用	熱荷重が扱える
(3-5) 他の動的問題への応用	爆発力に対する応答解析が可能、地震応答解析可能

プログラム名	DYNA3D ⁽⁷⁾ (LLNL)
プログラム作成年月日	1989年
(1) 基本的機能	
(1-1) 時間積分法	中央差分法（陽解法）
(1-2) 時間増分の決定法	プログラム内部で自動的にクーラン条件を満足する時間増分を決定
(1-3) 弹塑性計算法	増分法に基づく接線剛性法、その他等方硬化則
(1-4) 構成方程式の考慮	
(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル	8節点アイソバラメトリックソリッド要素、シェル要素、はり要素
(1-6) プレプロセッサー	INGRID
(2) 衝撃解析用の特殊機能	
(2-1) 定式化（ラグランジエ／オイラー／混合）	ラグランジエ法
(2-2) 質量マトリックスの集中化	集中質量マトリックスを使用
(2-3) 低次要素モデルの使用	1点積分とアワーグラスコントロールを使用
(2-4) 接触境界条件の考慮	面接触が扱える
(2-5) 材料モデルの選択	弾塑性、粘弹性材料及び土、ゴム、爆薬などが扱える
(2-6) 計算の効率化	ベクトル化、時間増分自動
(2-7) ポストプロセッサー	TAURUS
(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験	
(3-1) 周期的な外力に対する応答解析	固有値解析はできない
(3-2) 衝撃力に対する応答解析	集中荷重、追従力、分布荷重、加速度、速度、角速度の時刻歴を指定した応答解析が可能
(3-3) 加振力に対する応答解析	(3-2) と同じ
(3-4) 連成問題への応用	なし
(3-5) 他の動的問題への応用	爆発力に対する応答解性が可能、地震応答解析可能

プログラム名 FINAS[®] (動力炉・核燃料開発事業団)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

- | | |
|-------------------------|--|
| (1 - 1) 時間積分法 | Hilber-Hughes-Taylor 法
(Newton β の拡張) |
| (1 - 2) 時間増分の決定法 | 後退差分による時間積分 (陰解法) |
| (1 - 3) 弾塑性計算法 | 初期歪法 |
| (1 - 4) 構成方程式の考慮 | 降伏条件: Von Mises, 硬化則, 等
方, 移動, ORNL, 他 |
| (1 - 5) 動的解析に利用できる要素モデル | 1, 2, 3 次元要素 |
| (1 - 6) プレプロセッサー | FINAS 内蔵 |

(2) 衝撃解析用の特殊機能

- | | |
|------------------------------|-------------|
| (2 - 1) 定式化 (ラグランジエ/オイラー/混合) | ラグランジエ法 |
| (2 - 2) 質量マトリックスの集中化 | Consistent |
| (2 - 3) 低次要素モデルの使用 | 特に考慮なし |
| (2 - 4) 接触境界条件の考慮 | GAP 要素, 摩擦 |
| (2 - 5) 材料モデルの選択 | 歪速度依存可 |
| (2 - 6) 計算の効率化 | 時間増分の自動決定機能 |
| (2 - 7) ポストプロセッサー | FINAS 内蔵 |

(3) 輸送容器解析以外に対する解析機

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| (3 - 1) 周期的な外力に対する応答解析 | 周波数応答解析可, 経験あり |
| (3 - 2) 衝撃力に対する応答解析 | FINAS では衝撃解析には陽解法スキームを用いている |
| (3 - 3) 加振力に対する応答解析 | 地震荷重等経験多 |
| (3 - 4) 連成問題への応答 | 流体との連成は一応できる |
| (3 - 5) 他の動的問題への応用 | 弾性ガタ系の振動は効率良く解ける |

(4) 熱 解 析

- | | |
|-----------------|--------------------------------|
| (4 - 1) 熱伝導係数 | 温度依存可能。等方性, 直交異方性および完全異方性 |
| (4 - 2) 潜熱 | 相変態を考慮する場合で, 固化温度および液体温度をもとに定義 |
| (4 - 3) ギャップ熱伝導 | |

プログラム名 FINCRUSH²⁹ (JAERI)

プログラム作成年月日 1990年3月

(1) 基本的機能

(1-1) 解析法 静的解析法

(1-2) 弹塑性計算法 実験データ使用

(2) 衝撃解析

(2-1) 定式化 吸収エネルギー法

(2-2) 計算用途 フィン付き輸送容器

プログラム名 HONDO-II⁶⁰ (SNL)

プログラム作成年月日 プログラム作成 S. W. Key, 1978 年

(1) 基本的機能

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| (1-1) 時間積分法 | 中央差分法（陽解法） |
| (1-2) 時間増分の決定法 | 自動 |
| (1-3) 弾塑性計算法 | Von Mises (等方硬化, 移動硬化) |
| (1-4) 構成方程式の考慮 | |
| (1-5) 動的解析に利用できる要素モデル | 4 節点アイソパラメトリック要素 |
| (1-6) プレプロセッサー | 有限要素分割 QMESH/RENUM |

(2) 衝撃解析用の特殊機能

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| (2-1) 定式化 (ラグランジェ/オイラー/混合) | ラグランジェ法 |
| (2-2) 質量マトリックスの集中化 | |
| (2-3) 低次要素モデルの使用 | 特に考慮せず |
| (2-4) 接触境界条件の考慮 | 接触点仮想ばね |
| (2-5) 材料モデルの選択 | 弾塑性, 粘弾性, 土壌, ラバー他 |
| (2-6) 計算の効率化 | 自動時間刻み機能 |
| (2-7) ポストプロセッサー | 計算結果の図形表示 |

(3) 輸送容器解析以外の解析機能ならびに解析経験

- | | |
|----------------------|----------|
| (3-1) 周期的な外力に対する応答解析 | なし |
| (3-2) 衝撃力に対する応答解析 | 輸送容器衝突解析 |
| (3-3) 加振力に対する応答解析 | なし |
| (3-4) 連成問題への応用 | なし |
| (3-5) 他の動的問題への応用 | なし |

プログラム名 IMPAC2[®] (LNL)

プログラム作成年月日 1977年

(1) 基本的機能

(1 - 1) 時間積分法	ルンゲクッタ法(陽解法)
(1 - 2) 時間増分の決定法	入力データ
(1 - 3) 弹塑性計算法	入力データ
(1 - 4) 構成方程式の考慮	入力データ
(1 - 5) 動的解析に利用できる要素モデル	集中質量
(1 - 6) プレプロセッサー	無

(2) 衝撃解析用の特殊機能

(2 - 1) 定式化	ばね-質点
(2 - 2) 質量マトリックスの集中化	集中質量
(2 - 3) 低次要素モデルの使用	-
(2 - 4) 接触境界条件の考慮	ばね
(2 - 5) 材料モデルの選択	弾塑性
(2 - 6) 計算の効率化	-
(2 - 7) ポストプロセッサー	有

(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験

(3 - 1) 周期的な外力に対する応答解析	固有値解析はできない
(3 - 2) 衝撃力に対する応答解析	集中荷重, 追従力, 分布荷重, 加速度, 速度, 角速度の時刻歴を指定した応答解析が可能
(3 - 3) 加振力に対する応答解析	(3 - 2) と同じ
(3 - 4) 連成問題への応用	なし
(3 - 5) 他の動的问题への応用	-

プログラム名 MARC[®] (Marc Inc.)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

- | | |
|-------------------------|---|
| (1 - 1) 時間積分法 | ニューマーク β 法, フーボルト法,
中央差分法 |
| (1 - 2) 時間増分の決定法 | 使用者の指定 |
| (1 - 3) 弹塑性計算法 | 接線剛性法 |
| (1 - 4) 構成方程式の考慮 | 微小ひずみ弾塑性構成則, および有限
ひずみ弾塑性構成則 |
| (1 - 5) 動的解析に利用できる要素モデル | 連続体 (2D, 3D, 軸対称), シェ
ル, はり, 坂, 接触／摩擦, その他 |
| (1 - 6) プレプロセッサー | 各種メッシュ作成機能あり |

(2) 衝撃解析用の特殊機能

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| (2 - 1) 定式化 (ラグランジエ/オイラー/混合) | トータル・ラグランジエ法およびアッ
プデイト・ラグランジエ法 |
| (2 - 2) 質量マトリックスの集中化 | 可 |
| (2 - 3) 低次要素モデルの使用 | 可 |
| (2 - 4) 接触境界条件の考慮 | 可 |
| (2 - 5) 材料モデルの選択 | 要素ごとに指定可 |
| (2 - 6) 計算の効率化 | 衝撃解析用のために特別に用意されて
いるものはない |
| (2 - 7) ポストプロセッサー | ポスト・プロット機能および各種ポス
ト処理機能あり |

(3) 輸送容器解析以外の解析機能ならびに解析経験

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| (3 - 1) 周期的な外力に対する応答解析 | 非線形静的変形後の調和加振力に対する応答解析 |
| (3 - 2) 衝撃力に対する応答解析 | 直接積分法 |
| (3 - 3) 加振力に対する応答解析 | 直接積分法 |
| (3 - 4) 連成問題への応用 | 流体と固体の連成解析機能あり (付加質量考慮) |
| (3 - 5) 他の動的問題への応用 | 自動車衝突 (カー・クラッシュ) 解析への適用 |

(4) 热解析

- (4-1) 热伝導係数 温度依存可能。等方性、直交異方性および完全異方性
(4-2) 潜熱 相変態を考慮する場合で、固化温度および液化温度をもとに定義

プログラム名 NASTRAN⁶³ (Macneil Inc.)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| (1 - 1) 時間積分法 | Newmark- β 法 (陰解法) |
| (1 - 2) 時間増分の決定法 | 使用者の指定 |
| (1 - 3) 弾塑性計算法 | 増分法。収束計算はなし |
| (1 - 4) 構成方程式の考慮 | 等方硬化則 |
| (1 - 5) 動的解析に利用できる要素モデル | バネ, ビーム, シェル, ソリッド等 |
| (1 - 6) プレプロセッサー | PATRAN |

(2) 衝撃解析用の特殊機能

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| (2 - 1) 定式化 (ラグランジエ/オイラー/混合) | ラグランジエ法 |
| (2 - 2) 質量マトリックスの集中化 | 使用者の指定によって集中質量マトリックスを作ることができる |
| (2 - 3) 低次要素モデルの使用 | ガウス積分の次数を指定できる要素もある |
| (2 - 4) 接触境界条件の考慮 | 2つの節点を結ぶギャップ要素が使える |
| (2 - 5) 材料モデルの選択 | 弾塑性, 熱弾塑性, 異方性材料 |
| (2 - 6) 計算の効率化 | 特になし |
| (2 - 7) ポストプロセッサー | MSC/GRASP, PATRAN |

(3) 輸送容器解析以外の解析機能ならびに解析経験

- | | |
|------------------------|--------------------|
| (3 - 1) 周期的な外力に対する応答解析 | 過渡応答解析, 周波数応答解析が可能 |
| (3 - 2) 衝撃力に対する応答解析 | 時間依存の集中荷重が扱える |
| (3 - 3) 加振力に対する応答解析 | (3 - 1) と同じ |
| (3 - 4) 連成問題への応用 | 構造物と流体の連成問題が解析できる |
| (3 - 5) 他の動的問題への応用 | 流体の解析が可能 |

(4) その他

NASTRAN-DYNA 3D として衝撃問題用に供されている

(5) 热解析

(5-1) 热伝導係数

温度依存可能。等方性、直交異方性および完全異方性

(5-2) 潜熱

相変態を考慮する場合で、固化温度および液化温度をもとに定義

プログラム名	NIKE2D [®] (LINL)
プログラム作成年月日	1989年
(1) 基本的機能	
(1-1) 時間積分法	Newmark- β 法（陰解法）
(1-2) 時間増分の決定法	プログラム内部で自動的にクーラン条件を満足する時間増分を決定
(1-3) 弾塑性計算法	増分法に基づく接線剛性法、その他等方硬化則、振動硬化則及びこれらの組合せによる関連流れ則
(1-4) 構成方程式の考慮	
(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル	4節点アイソパラメトリック要素
(1-6) プレプロセッサー	M A Z E
(2) 衝撃解析用の特殊機能	
(2-1) 定式化（ラグランジェ／オイラー／混合）	ラグランジェ法による
(2-2) 質量マトリックスの集中化	集中質量マトリックスを使用
(2-3) 低次要素モデルの使用	1点積分とアワーグラスコントロールを使用
(2-4) 接触境界条件の考慮	面接触が扱える（摩擦は考慮せず）。弹性、異方性弹性、弾塑性、熱弾塑性、粘弹性材料および土、ゴム、爆薬などが扱える
(2-5) 材料モデルの選択	
(2-6) 計算の効率化	リゾーニング機能、ベクトル化
(2-7) ポストプロセッサー	ORION
(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験	
(3-1) 周期的な外力に対する応答解析	固有値解析はできない
(3-2) 衝撃力に対する応答解析	集中荷重、追従力、分布荷重、加速度、速度、角速度の時刻歴を指定した応答解析が可能
(3-3) 加振力に対する応答解析	(3-2) に同じ
(3-4) 連成問題への応用	熱荷重が扱える
(3-5) 他の動的問題への応用	爆発力に対する応答解析が可能、地震応答解析可能

プログラム名	NIKE3D [®] (LLNL)
プログラム作成年月日	1989年
(1) 基本的機能	
(1-1) 時間積分法	Newmark- β 法（陰解法）
(1-2) 時間増分の決定法	プログラム内部で自動的にクーラン条件を満足する時間増分を決定
(1-3) 弾塑性計算法	増分法に基づく接線剛性法、その他等方硬化則
(1-4) 構成方程式の考慮	8節点アイソパラメトリックソリッド要素
(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル	INGRID
(1-6) プレプロセッサー	
(2) 衝撃解析用の特殊機能	
(2-1) 定式化（ラグランジエ／オイラー／混合）	ラグランジエ法
(2-2) 質量マトリックスの集中化	集中質量マトリックスを使用
(2-3) 低次要素モデルの使用	1点積分とアワーグラスコントロールを使用
(2-4) 接触境界条件の考慮	面接触が扱える（摩擦は考慮せず）
(2-5) 材料モデルの選択	弾塑性、粘弹性材料及び土、ゴム、爆薬などが扱える
(2-6) 計算の効率化	ベクトル化
(2-7) ポストプロセッサー	TAURUS
(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験	
(3-1) 周期的な外力に対する応答解析	固有値解析はできない
(3-2) 衝撃力に対する応答解析	集中荷重、追従力、分布荷重、加速度、速度、角速度の時刻歴を指定した応答解析が可能
(3-3) 加振力に対する応答解析	(3-3) に同じ
(3-4) 連成問題への応用	熱荷重が扱える
(3-5) 他の動的問題への応用	爆発力に対する応答解析が可能、地震応答解析可能

プログラム名 PISCES-2DELK[®] (PI Inc.)

プログラム作成年月日

(1) 基本的機能

(1-1) 時間積分法

中央差分法（陽解法）

(1-2) 時間増分の決定法

i) 初期増分は使用者指定

ii) 以降全ゾーン中で安定条件を保つ
為の最小の時間増分に安全率を掛け
て決定。安全率は使用者指定

(1-3) 弹塑性計算法

Wilkins の方法

(1-4) 構成方程式の考慮

等方硬化、シェルには移行硬化（サブ
レーヤー・モデル）も適用可

(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル

○ラグランジエ, ○オイラー, ○シェル, ○剛体

(1-6) プンプロセッサー

独立プログラムはないが、本体にメッ
シュ自動生成機能がある

(2) 衝撃解析用の特殊機能

(2-1) 定式化

ラグランジエ法及びオイラー法

(2-2) 質量マトリックスの集中化

質量マトリックスはない

(2-3) 低次元要素モデルの使用

要素内一定ひずみ、応力

(2-4) 接触境界条件の考慮

可能

(2-5) 材料モデルの選択

異方性はない。ユーザー・サブルーチ
ンが組める

(2-6) 計算の効率化

C R A Y 版ではベクトル化

(2-7) ポストプロセッサー

D D - P L O T

(3) 輸送容器解析以外での使用経験

1) 衝突・貫通問題

2) 原子炉仮想事故解析 (H C D A)

3) パルス荷重に対する波動伝播解析

(4) 熱解析

(4-1) 热伝導係数 温度依存可能。等方性、直交異方性および完全異方性

(4-2) 潜熱 相変態を考慮する場合で、固化温度および液化温度をもとに定義

プログラム名 PUNCTURE[®] (JAERI)

プログラム作成年月日 1990年3月

(1) 基本機能

(1-1) 解析法 静的解析法

(1-2) 弹塑性計算法 応力-ひずみデータ使用

(2) 衝撃解析

(2-1) 定式化 塑性大変形法

(2-2) 計算用途 輸送容器の貫通解析

プログラム名	SHOCK [®] (SNL)
プログラム作成年月日	1973年
(1) 基本的機能	
(1-1) 時間積分法	Newmark- β 法(陰解法), ルンゲ・クッタ・ギル法(陽解法)
(1-2) 時間増分の決定法	プログラム内部で自動的
(1-3) 弹塑性計算法	増分法に基づく接線剛性法
(1-4) 構成方程式の考慮	線形, 非線形(入力データによって)
(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル	軸: 1自由度, 水平: 2自由度
(1-6) プレプロセッサー	-
(2) 衝撃解析用の特殊機能	
(2-1) 定式化(ラグランジエ/オイラー/混合)	-
(2-2) 質量マトリックスの集中化	集中質量マトリックスを使用
(2-3) 低次要素モデルの使用	-
(2-4) 接触境界条件の考慮	面接触が扱える(摩擦は考慮せず)
(2-5) 材料モデルの選択	弾塑性, 粘弹性材料
(2-6) 計算の効率化	自動的に決める
(2-7) ポストプロセッサー	有
(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験	
(3-1) 周期的な外力に対する応答解析	固有値解析はできない
(3-2) 衝撃力に対する応答解析	集中荷重, 追従力, 分布荷重, 加速度, 速度, 角速度の時刻歴を指定した応答解析が可能 (3-2) と同じ
(3-3) 加振力に対する応答解析	有
(3-4) 連成問題への応用	衝突振動一般
(3-5) 他の動的問題への応用	

プログラム名	STEALTH ⁽⁶⁾ (EPRI-SAI Inc.)	
プログラム作成年月日	1976年	
(1) 基本的機能		
(1-1) 時間積分法	中央差分法(陽解法)	
(1-2) 時間増分の決定法	プログラム内自動計算(クーラン安定条件×安全率)	
(1-3) 弾塑性計算法	Von Mises降伏条件、偏差応力修正 (応力関数／降伏応力)	
(1-4) 構成方程式の考慮	平均応力(体積歪)、偏差床力(偏差歪)	
(1-5) 動的解析に利用できる要素モデル	2次元有限差分Zone(平面歪、平面応力、軸対称)	
(1-6) プレプロセッサー	メッシュ・ジェネレータ内蔵、プロット・パッケージ=GRADIS	
(2) 衝撃解析用の特殊機能		
(2-1) 定式化(ラグランジエ/オイラー/混合)	ラグランジエ法	
(2-2) 質量マトリックスの集中化	集中マトリックス相当	
(2-3) 低次要素モデルの使用	一定応力4節点Zone	
(2-4) 接触境界条件の考慮	可能(弾塑性体相互、弾塑性体-剛体)	
(2-5) 材料モデルの選択	選択可、ユーザー組み込みも可	
(2-6) 計算の効率化	一次元アドレス、配列の集約的入出力	
(2-7) ポストプロセッサー	プロット・パッケージ=GRADIS	
(3) 輸送容器解析以外に対する解析機能および経験		
(3-1) 周期的な外力に対する応答解析	ユーザーサブルーチン	
(3-2) 衝撃力に対する応答解析	梁状構造物の衝撃力応答解析	
(3-3) 加振力に対する応答解析	地中構造物、流体中構造物の地震波応答解析	
(3-4) 連成問題への応用	熱的挙動と機械的挙動との連成解析	
(3-5) 他の動的問題への応用		
(4) 熱解析		
(4-1) 熱伝導係数	温度依存可能。等方性、直交異方性および完全異方性	
(4-2) 潜熱	相変態を考慮する場合で、固化温度および液体温度をもとに定義	

9. 材 料 デ 一 タ

(1) 衝撃解析データ^{09~13}

炭素鋼, ステンレス鋼 (SU 304, SU 316), 鉛, 木材の衝撃解析のためのデータは下記の文献を参考にされたい。

幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (1 / 5), 第1編: データライブラリーおよび処理プログラム", JAERI-M 88 - 191 (1988)。

幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (2 / 5), 第2編: 構造用鋼", JAERI-M 88 - 192 (1988)。

幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (3 / 5), 第3編: ステンレス鋼", JAERI-M 88 - 193 (1988)。

幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (4 / 5), 第4編: 鉛", JAERI-M 88 - 194 (1988)。

幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (5 / 5), 第5編: 木材", JAERI-M 88 - 195 (1988)。

(2) 構造解析データ^{20, 21, 22}

弾性限度内であれば、下記の規格にあるデータを用いて、構造解析が実施できる。

(a) 昭和 55 年通商産業省告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(1980)。

(b) 昭和 62 年総理府令第 11 号「試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の技術基準に関する総理府令」(1987)。

(c) JIS B 8243「圧力容器の構造」,(1983)。非弾性解析に関するデータは下記の文献⁴⁴を参考にされたい。

(d) 日本機械学会, 「非弾性構造解析法の実用化に関する研究(II)」, (1976 年)

10. あとがき

輸送容器の解析を行う上で必要とされる解析法、計算式、計算コードおよびデータについてまとめた。本資料が輸送容器の安全解析評価および設計を行う人達に役立つものであることを希望する。

謝 辞

本文をまとめた際して、種々のご支援を載いた日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室 内藤俊孝室長に感謝します。ご協力を戴いた、三菱重工業(株)大橋正雄、浅田和男、甫出 秀、(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 本間亮介の各氏に心から感謝します。

10. あとがき

輸送容器の解析を行う上で必要とされる解析法、計算式、計算コードおよびデータについてまとめた。本資料が輸送容器の安全解析評価および設計を行う人達に役立つものであることを希望する。

謝 辞

本文をまとめに際して、種々のご支援を載いた日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室 内藤倣孝室長に感謝します。ご協力を戴いた、三菱重工業(株)大橋正雄、浅田和男、甫出 秀、(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 本間亮介の各氏に心から感謝します。

参 考 文 献

- (1) LAEA, "Regulations for Safety Transport of Radioactive Material", Safety Series No. 6, 1985 ed., IAEA, Vienna, (1985).
- (2) Shappert, L.B., et al., "A Guide for the Design, Fabrication and Operation of Shipping Casks for Nuclear Applications", ORNL-NSIC-68, (1970).
- (3) Donham, B.J., "Mathematical Model for Prediction of Maximum Damage to Shielded Shipping Containers", IAEA-SM-147/27, (1971).
- (4) Asada, K., et al., "Development of Simplified Analysis Codes for 9m Drop and 1m Puncture Tests for a Radioactive Material Transport Cask", Proceeding of Waste Management '88, (Tusco), (1988).
- (5) Ikushima, T., "CRUSH; A Simplified Computer Program for Impact Analysis of Radioactive Material Transport Casks", JAERI-M 90-004 (1990).
- (6) Hofman, R., "STEALTH: A Lagrang Explicit Finite-Difference Code for Solids, Structural and Thermohydraulic Analysis", EPRI NP-176-1, (1976).
- (7) Hallquist, J.O. and Whirley, R.G., "DYNA3D User's Manual", UCID-19592. Rev. 5, (1989).
- (8) Duclott, D., "Safety Analysis for the LMEBR Spent Fuel Shipping Cask", DOCKET 71-9026, (1974).
- (9) Sugita, Y. and Mochizuki, S., "The Development of a Toroidal Shell-Type Shock Absorber for an Irradiated Fuel Shipping Cask", 7th Int. Symp. on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, New Orleans USA (1983).
- (10) Davis, F.C., "Structural Analysis of Shipping Casks, Vol.9. Energy Absorption Capabilities of Plastically Deformed Struts under Specified Loading Conditions", ORNL TM-1312 Vol.9, (1971).
- (11) Torr, K.G., "Verification of the Performance of Impact Limiting Fins for Transportation Containers", INFO-0146, (1984).
- (12) Torr, K.G., "Verification of the Performance of Impact Limiting Fins for Transportation Containers, Part III", INFO-0146-2, (1986).
- (13) Quat, E.T. and Haythornthwaite, R.M., "The Load-Carrying Capacity of Circular Plates at Large Deflection", ASME, J. Applied Mechanics, Vol. 23, pp. 49-55, (1955).
- (14) 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).
- (15) 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)。
- (16) Nelms, H.A., "Structural Analysis of Shipping Casks, Vol. 3, Effects of Jacket Physical

- Properties and Curvature of Puncture Resistance", ORNL TM-1312 Vol. 3, (1968).
- (17) Shie, R.C., "Empirical equations for puncture analysis of lead-shielded spent fuel shipping casks", Proceedings of the 5th International Symposium Packing and Transportation of Radioactive Material, pp. 341~350, (1978).
- (18) Sakamoto et al. "An Experimental Study on Puncture Resistance of Spent Fuel Shipping Casks by Drop Impact Tests", Proceeding of 4th PATRAM, pp. 262~276, (1974).
- (19) 運輸省自動車局放射性物質自動車運搬技術検討会; 放射性物質の自動車運搬に係る積載方法の安全に関する技術基準の適用指針について, (1982)。
- (20) 昭和55年通商産業省告示第501号, "発電用原子力設備に関する技術基準", (1980)。
- (21) 昭和62年総理府令第11号, "試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の技術基準に関する総理府令," (1987)。
- (22) 日本工業標準調査会, "圧力容器の構造" JISB 8243-1983。
- (23) 日本機械学会, "機械工学便覧", (1987)。
- (24) "ABAQUS User's Manual", (1982). Hibbit, Kalsson and Sorenson.
- (25) Pilkey, W., et al. (ed.), "Structural Mechanics Computer Programs", (1974), Univ. Press of Virginia.
- (26) idem: 文献25と同じ。
- (27) Ikushima T., "CRUSH: A Simplified Computer Program for Impact Analysis of Radioactive Material Transport Casks", JAERI-M90-004 (990).
- (28) Hallquist, J.O., "User's Manual for DYNA2D-An Explicit Two-dimensional Hydrodynamic Finite Element Code with Interactive Rezoning and Graphical Display", UCID-18756, Rev. 3, (1988).
- (29) 幾島 育, "CASKETSS-2: 核燃料輸送容器の熱・構造安全解析コードシステム(第2次版)" JAERI M (出版予定)。
- (30) Key, S.W., Beisinger, Z.E. and Krieg, R.D., "HONDO II-A Finite Element Computer Program for the Large Deformation Dynamic Response of Axisymmetric Solids", SAND 78-0422, (1978).
- (31) E.A. Kern and J.L. Merson, "Users Manual for IMPAC 1-A Lumped Mass Nonlinear Spring Computer Program to Analyze Shipping Containers Subjected to Impact", Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-5344-Ms (August 1973).
- (32) Pilkey W. et al. (ed.), 文献25と同じ。
- (33) idem, 文献32と同じ。
- (34) J.O. Hallquist, "NIKE2D: An Implicit, Finite-Deformation, Finite-Element Code for Analyzing the Static and Dynamic Response of Two-Dimensional Solids", University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-52678 (1979).
- (35) J.O. Hallquist, "NIKE3D: An Implicit, Finite-Deformation, Finite Element Code for Analyzing the Static and Dynamic Response of Three-Dimensional Solids", University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-18822 (1981).

- ⑥ M. Trigg, et al., "PISCES User's Manual" (1980), Physics International.
- ⑦ 幾島 賀, 文献29と同じ。
- ⑧ Gabrielson V.K. and Reese R.T., "SHOCK Code User's Manual, A Computer Code to Solve the Dynamic Response of Lumped mass Systems", SCL-DR-69-98 (1969).
- ⑨ 幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (1/5)", 第1編: データライブラリーおよび処理プログラム", JAERI-M 88-191 (1988)。
- ⑩ 幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (2/5)", 第2編: 構造用鋼", JAERI-M 88-192 (1988)。
- ⑪ 幾島 賀, "衝撃計算用材料データ集 (3/5)", 第3編: ステンレス鋼", JAERI-M 88-193 (1988)。
- ⑫ 幾島 賀, "衝撲計算用材料データ集 (4/5)", 第4編: 鉛", JAERI-M 88-194 (1988)。
- ⑬ 幾島 賀, "衝撲計算用材料データ集 (5/5)", 第5編: 木材", JAERI-M 88-195 (1988)。
- ⑭ 日本機械学会, "非弾性構造解析法の実用化に関する研究(II)" 日本機械学会, (1976年)。