

地殻変動のシミュレーションに関する研究

(核燃料サイクル開発機構委託研究報告書)

2002年3月

(株) 富士総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村4番地49
核燃料サイクル開発機構 技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section, Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2002

JNC TJ7400 2002-005

2002年3月

地殻変動のシミュレーションに関する研究

(核燃料サイクル開発機構業務委託報告書)

藤枝忠臣*

要 旨

地質環境の長期的な安定性を評価するためには、隆起運動などの地殻変動が将来どのような規模で発生するかを予測することが重要である。その手段として、数値シミュレーションは有望である。現状の研究では、汎用の工学数値解析コードを用いて、地殻のモデリングを行い、隆起などの地殻変動の解析を行ってきた。しかし、汎用コードでは、せん断破壊の構成則の設定など地殻の詳細な現象の解析が困難である。そのため、詳細な地盤活動を予測するためには、専用コードの開発が必要である。

本研究では、実際の地殻変動の予測の手段として、2次元対応の動的緩和法を用いた、地殻変動専用コードを開発する。2001年度の作業では、地殻変動専用コードの基本機能の設計・開発・検証試験を行う。開発した機能は、線形弾性体解析機能・弾塑性解析機能・粘弾性解析機能・自重解析機能である。本プログラムにより、1次元解析および2次元解析を行い、それぞれ厳密解および汎用ソフト「FLAC」による解析結果と比較を行うことにより、各機能の検証を行った。その結果、本プログラムによる解析結果は厳密解および「FLAC」による解析結果と良好に一致し、各機能が正確に動作することが確認された。

本報告書は、(株)富士総合研究所が核燃料サイクル開発機構殿との契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 地質環境長期予測研究グループ

* (株)富士総合研究所

March 2002

A Study on Finit Element Model for the Crustal Movement

Tadaomi Fujieda*

Abstract

In this study, the exclusive code for crustal movement analysis using dynamic relaxation was developed. In the work in fiscal 2001, the following were carried out: Design, development and verification of the basic function of the exclusive code for crustal movement analysis. The each function of elastic analysis, elasto-plastic analysis, viscoelastic analysis and self-weight analysis was developed. The one- and two-dimensional analyses were carried out using the developed code. Each function was verified in comparison with the exact solution and the analytical result using commercial code "FLAC". As a result of this verification, the analytical results by the developed code agreed well with exact solutions and analytical result by "FLAC". Then, it was confirmed that the each function of the developed code operated accurately.

This work was performed by FUJI RESEACH INSTITUTE CORPORATION under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: NEOTECTONICS RESEACH GROUP, TONO GEOSIENGE CENTER

* FUJI RESEACH INSTITUTE CORPORATION

目次

記号表.....	1
1 はじめに.....	3
2 機能概要.....	4
2.1 支配方程式.....	4
2.2 構成方程式.....	4
2.2.1 線形弾性体.....	4
2.2.2 弾塑性体.....	5
2.2.3 粘弾性体.....	9
2.3 解析ソルバー.....	11
2.3.1 動的緩和法.....	11
2.3.2 有限要素法による離散化.....	13
2.3.3 弾塑性解析のアルゴリズム.....	15
2.3.4 粘弾性体解析アルゴリズム.....	19
2.4 使用要素.....	21
2.5 境界条件.....	21
2.5.1 設定可能な境界条件.....	21
2.5.2 強制変位条件と荷重条件について.....	21
3 入力機能.....	23
3.1 データ入力の一般的規則.....	23
3.2 入力の概要.....	23
3.2.1 全体構成.....	23
3.2.2 プログラムのコマンド一覧.....	24
3.2.3 入力単位系について.....	25
3.3 モジュール##INPUT.....	25
3.3.1 機能.....	25
3.3.2 ファイル構成.....	25
3.3.3 サブコマンド一覧.....	26
3.3.4 入力データ説明.....	27
3.4 モジュール##EXPLICIT.....	35
3.4.1 ファイル構成.....	35
3.4.2 サブコマンド一覧.....	36

3.4.3	入力データ説明.....	37
3.5	プログラムの終了について.....	50
3.6	入力例.....	50
3.6.1	線形弾性解析の入力例.....	50
3.6.2	自重解析の入力例.....	58
3.6.3	弾塑性解析の入力例.....	60
3.6.4	粘弾性体の入力例.....	61
4	出力機能.....	64
4.1	任意節点履歴データの出力.....	64
4.2	任意要素履歴データの出力.....	64
4.3	最大残差力履歴データの出力.....	65
4.4	AVS ファイルの出力.....	65
4.5	標準出力.....	66
4.6	出力例.....	66
4.6.1	任意節点データ履歴の出力例.....	66
4.6.2	任意要素データ履歴の出力例.....	67
4.6.3	最大残差力履歴の出力例.....	68
4.6.4	AVS データの出力.....	69
5	実行方法.....	70
5.1	実行方法.....	70
5.2	節点数・要素数・境界条件数・領域数などの最大数の設定.....	70
6	制限事項その他.....	70
6.1	開発環境.....	70
6.2	動作環境.....	70
6.3	ADJUST.Fのフォーマット.....	71
6.4	開発プログラムのインストールについて.....	72
6.5	制限事項.....	72
7	試験結果.....	73
7.1	弾性波動解析による陽的動解析機能の検証.....	73
7.1.1	検証モデル.....	73
7.1.2	解析結果.....	74
7.2	線形弾性体解析機能の検証.....	76
7.2.1	1次元解析による検証.....	76

7.2.2	2次元解析による検証.....	78
7.3	弾塑性解析機能の検証.....	80
7.3.1	1次元解析による検証.....	80
7.3.2	2次元による検証.....	82
7.4	粘弾性体（マックスウェルモデル）の検証結果.....	86
7.4.1	1次元解析による検証.....	86
7.4.2	2次元解析による検証.....	87
7.5	粘弾性体（べき乗則の構成則）の検証結果.....	91
7.5.1	1次元解析による検証.....	91
7.5.2	2次元解析による検証.....	92
7.6	自重解析.....	96
7.6.1	1次元による検証.....	96
7.6.2	解析結果.....	96
7.6.3	2次元解析による検証.....	98
7.7	格子が不均一な場合の検証.....	100
7.7.1	解析モデル.....	100
7.7.2	解析結果.....	101
8	おわりに.....	102
	参考文献.....	103
	付録 語句説明.....	104

図表目次

図 2.1	マックスウェル要素.....	9
図 2.2	動的緩和法のアルゴリズム.....	13
図 2.3	塑性変形における応力状態の変化.....	18
図 2.4	弾塑性体の構成方程式の解法アルゴリズム.....	19
図 2.5	粘弾性体における動的緩和法のアルゴリズム.....	21
図 2.6	強制変位条件から分布荷重条件への変換.....	22
図 3.1	##input のファイル構成.....	25
図 3.2	要素構成節点番号.....	32
図 3.3	##explicit のファイル構成.....	35
図 3.4	要素面番号.....	41
図 3.5	解析モデル.....	51
図 3.6	荷重履歴.....	51
図 3.7	最大残差力の履歴.....	56
図 3.8	y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴.....	56
図 3.9	応力の yy 成分の動的緩和ステップでの履歴.....	57
図 3.10	y 方向変位の実時間ステップでの履歴.....	57
図 3.11	応力の yy 成分の実時間ステップでの履歴.....	58
図 3.12	y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴.....	59
図 3.13	応力の yy 成分の動的緩和ステップでの履歴.....	59
図 3.14	y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴.....	61
図 3.15	変位履歴.....	61
図 3.16	y 方向変位の实時間ステップでの履歴.....	63
図 7.1	検証モデル.....	74
図 7.2	弾性波の伝播.....	75
図 7.3	検証問題.....	76
図 7.4	残差力ノルムの収束状況.....	76
図 7.5	エネルギー残差の収束状況.....	77
図 7.6	x 軸上における x 方向変位の分布.....	77
図 7.7	解析モデル.....	78
図 7.8	解析格子.....	78
図 7.9	最大残差力の履歴.....	79
図 7.10	点 A(50km,10km)における x 方向変位の履歴.....	79

図 7.11	点 A(50km,10km)における y 方向変位の履歴	80
図 7.12	検証問題	80
図 7.13	ひずみの xx 成分と応力の xx 成分の関係	81
図 7.14	検証モデル	82
図 7.15	最大残差力の履歴	83
図 7.16	点 A(50,20)における応力の yy 成分の履歴	83
図 7.17	y=10km 面上の y 方向変位.....	84
図 7.18	y=10km 面上の応力の xy 方向成分.....	84
図 7.19	y=10km 面上の応力の yy 方向成分.....	85
図 7.20	y=10km 面上の応力の xx 方向成分.....	85
図 7.21	検証問題.....	86
図 7.22	クリーブ解析.....	87
図 7.23	検証モデル	87
図 7.24	粘弾性域 (点 B) における FLAC の時間刻み幅 1.56×10^6 s, 本プログラムの 時間刻み幅 6.31×10^8 s の場合の応力の xx 成分の時刻歴	88
図 7.25	粘弾性域 (点 B) における FLAC の時間刻み幅 3.95×10^5 s, 本プログラムの 時間刻み幅 6.31×10^8 s の場合の応力の xx 成分の時刻歴	89
図 7.26	粘弾性域 (点 A) における応力の xx 成分の時刻歴	89
図 7.27	3,000 年における x=100km 面上の y 方向変位.....	90
図 7.28	3,000 年における x=100km 面上の応力の xx 成分.....	90
図 7.29	検証問題.....	91
図 7.30	クリーブ解析.....	92
図 7.31	検証モデル	93
図 7.32	粘弾性域 (点 B) 応力の xx 成分の時刻歴.....	93
図 7.33	粘弾性域 (点 A) における応力の xx 成分の時刻歴	94
図 7.34	3,000 年における x=100km 面上の y 方向変位.....	95
図 7.35	3,000 年における x=100km 面上の応力の xx 成分	95
図 7.36	解析モデル	96
図 7.37	残差力ノルムの収束状況.....	96
図 7.38	エネルギー残差の収束状況.....	97
図 7.39	x 軸上における応力の xx 方向成分の分布	97
図 7.40	解析モデル	98
図 7.41	x=100km 面上の応力の yy 成分の分布	99
図 7.42	x=100km 面上の応力の xx 成分の分布	99
図 7.43	解析モデル	100
図 7.44	解析格子.....	100

図 7.45	分布荷重を加えた場合の $y=5\text{km}$ 面上の y 方向変位.....	101
図 7.46	y 方向変位コンター.....	101
表 3.1	本プログラムのコマンド一覧.....	24
表 3.2	入力単位例.....	25
表 3.3	##input のサブコマンド一覧表.....	26
表 3.4	##explicit のサブコマンド一覧表.....	36

記号表

A	: べき乗則の構成則の定数
a	: 流れベクトル
B_α	: B マトリックス
C	: 粘着力
c	: 減衰係数
$C_{\alpha\beta}$: 減衰行列
D	: D マトリックス
D_{ep}	: 弾塑性 D マトリックス
$d\epsilon$: ひずみ増分
$d\epsilon_e$: 弾性ひずみ増分
$d\epsilon_p$: 塑性ひずみ増分
$d\bar{\epsilon}_p$: 相当塑性ひずみ増分
$d\kappa$: ひずみ硬化パラメータの増分
$d\lambda$: 塑性比例係数
E	: ヤング率
e_{ij}	: ひずみテンソル
e_{ij}'	: 偏差ひずみテンソル
\dot{e}_{ij}^c	: クリープひずみ速度テンソル
F	: $F=0$ で降伏条件となる関数
F_i	: 外力
G	: せん断弾性係数
H'	: 硬化係数
J_1	: 応力の第一不変量
J_2'	: 偏差応力の第二不変量
K	: 体積弾性係数
k	: 塑性応力
$M_{\alpha\beta}$: 質量行列
n	: べき乗則指数
N_α	: 形状関数
P_α	: 内力ベクトル
Q	: 塑性ポテンシャル
T_α	: 外力ベクトル
u_i	: 変位ベクトル
Wp	: 塑性仕事

ε	: 工学ひずみ成分
$\dot{\varepsilon}_{cr}$: クリーブ速度
$\bar{\varepsilon}_p$: 相当塑性ひずみ
ϕ	: 内部摩擦角
η	: 粘性係数
κ	: ひずみ硬化パラメータ
λ	: 緩和時間
ν	: ポアソン比
ρ	: 密度
σ	: 応力成分
$\bar{\sigma}$: 相当応力
σ_{ij}	: 応力テンソル
σ'_{ij}	: 偏差応力テンソル
σ_{iso}	: 応力の等方成分

一般に Δ は数値解析上での1ステップ間での増分または修正量を意味する。

1 はじめに

本報告書は、核燃料サイクル機構殿より委託された「地殻変動のシミュレーションに関する研究」の2001年度の研究成果をまとめたものである。

地質環境の長期的な安定性を評価するためには、隆起運動などの地殻変動が将来どのような規模で発生するかを予測することが重要である。その補助手段として、数値シミュレーションは非常に有望である。現状の研究では、汎用の工学数値解析コードを用いて、地殻のモデリングを行い、隆起などの地殻変動の解析を行ってきた¹⁾¹²⁾。しかし、汎用の計算コードでは、地殻のせん断破壊の構成則、クリープ則の設定など地殻の詳細な現象のモデリングが困難であり、専用コードの開発が必要となっている。本研究では、2次元対応の地殻変動専用コードを開発し、実際の地殻変動の予測の手段とする。2001年度は地殻変動専用コードの基本機能の設計・開発・検証試験を行う。

本報告書は全8章からなる。第1章では本報告書の概要をまとめている。第2章では本プログラムの機能の概要を示す。第3章で本プログラムの入力データフォーマットおよび入力データ例を示す。第4章では本プログラムの出力機能および出力データ例を示す。第5章では、本プログラムの実行方法を示す。第6章では、本プログラムの制限事項や動作環境などを示す。第7章では、本研究で開発した地殻変動専用コードの検証試験の結果を示す。第8章では本年度の研究成果をまとめる。

2 機能概要

2.1 支配方程式

支配方程式として式(2.1)の静的釣り合い式と式(2.2)と構成方程式を考える。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i = 0 \quad (2.1)$$

$$\sigma_{ij} = f(\sigma_{ij}, u_i, \dot{u}_i) \quad (2.2)$$

なお、 σ_{ij} は応力テンソル、 u_i は変位で、 F_i は外力である。

2.2 構成方程式

本プログラムでは、地盤解析に必要な物性として、線形弾性体・弾塑性体・粘弾性体を取り扱う。線形弾性体の構成方程式として一般化フックの構成則を、弾塑性体の構成則としてドラッカー・プラッカーの構成則^[3]を、粘弾性体の構成則としてマックスウェルの構成則^[4]およびべき乗則の構成則^[4]をそれぞれ導入する。

2.2.1 線形弾性体

本プログラムでは、線形弾性体の構成方程式として平面ひずみの2次元近似を用いた一般化フックの弾性則を採用する。以下にその構成方程式を示す。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はそれぞれ次式で定義される応力成分、ひずみ成分である。

$$\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z\}, \boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \varepsilon_z\} \quad (2.4)$$

なお、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ の各成分は工学ひずみであり、次式で定義される。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.5)$$

ここで、 u_i は*i*方向の変位である。なお、平面ひずみの条件下では $\varepsilon_z=0$ である。式(2.3)の \boldsymbol{D}

は D マトリックスとよばれるひずみと応力を関連付ける行列で、平面ひずみ近似の条件下では、次式で定義される。

$$D = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 & \nu \\ \nu & 1-\nu & 0 & \nu \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ \nu & \nu & 0 & 1 \\ \nu & \nu & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

ここで、 ν はポアソン比、 E はヤング率である。

2.2.2 弾塑性体

本プログラムでは、弾塑性体の構成則として地盤の特性をよく表現するドラッカー・プラッカーの構成則を採用する。以下にその構成則を示す。

① 弾塑性体の構成方程式

弾塑性体の降伏の開始は、ある応力の関数 $f(\sigma_{ij})$ が物性値 $k(\kappa)$ に達することが条件となる。この条件を降伏条件と呼び、次式のように表現される。

$$f(\sigma_{ij}) = k(\kappa) \quad \text{または} \quad F(\sigma_{ij}, \kappa) = f(\sigma_{ij}) - k(\kappa) = 0 \quad (2.7)$$

$F < 0$ 弾性挙動

$F = 0$ 弾塑性挙動

ここで、 κ は硬化パラメータである。降伏開始後のひずみ増分は弾性変形によるひずみ増分と塑性変形によるひずみ増分の和として表現される。すなわち、

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}_e + d\boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (2.8)$$

となる。ここで、 $d\boldsymbol{\varepsilon}$ は全ひずみ増分、 $d\boldsymbol{\varepsilon}_e$ は弾性変形によるひずみ増分、 $d\boldsymbol{\varepsilon}_p$ は塑性変形によるひずみ増分である。 $d\boldsymbol{\varepsilon}_e$ は弾性 D マトリックス D と応力増分 $d\boldsymbol{\sigma}$ をとすると式(2.3)より、

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_e = D^{-1} d\boldsymbol{\sigma} \quad (2.9)$$

となる。塑性ひずみ増分について、流れ則がなりたつと仮定すると、

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_p = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (2.10)$$

となる。なお、 $d\lambda$ は塑性比例係数、 Q は塑性ポテンシャルである。ここで $Q=F(\sigma_{ij}, \kappa)=f(\sigma_{ij})-k(\kappa)$ とする結合流れ則が成り立つと仮定すると、式(2.10)は

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = d\lambda \mathbf{a}, \quad \mathbf{a} = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (2.11)$$

となる。なお、 \mathbf{a} は流れベクトルと呼ばれ、

$$\mathbf{a}' = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_z}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \right] \quad (2.12)$$

である。式(2.9)および式(2.11)を(2.8)式に代入すると、

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1} d\boldsymbol{\sigma} + d\lambda \mathbf{a} \quad (2.13)$$

また、式(2.7)より、

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa = \mathbf{a}' d\boldsymbol{\sigma} - B d\lambda = 0 \quad (2.14)$$

$$B = -\frac{1}{d\lambda} \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa \quad (2.15)$$

式(2.13)の両辺から、 $d_D \boldsymbol{\varepsilon}' = \mathbf{a}' \mathbf{D}$ を乗じ、式(2.14)を用いて $\mathbf{a}' d\boldsymbol{\sigma}$ を消去すると、塑性比例定数 $d\lambda$ が得られる。

$$d\lambda = \frac{1}{(B + \mathbf{a}' d_D)} d_D^t d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.16)$$

式(2.13)に式(2.16)を代入すると、応力増分とひずみ増分の関係式は得られる。

$$\mathbf{D}_{ep} = \mathbf{D} - \frac{d_D d_D^t}{B + \mathbf{a}' d_D}, \quad d_D = \mathbf{D} \mathbf{a} \quad (2.17)$$

ここで、 B を陽に決定する必要がある。加工硬化説を採用すると、硬化パラメータの増分は $d\kappa = \sigma' d\epsilon_p$ で与えられる。式(2.11)より、

$$d\kappa = \sigma' d\epsilon_p = \sigma' d\lambda a = d\lambda a' \sigma \quad (2.18)$$

また、

$$d\kappa = \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}_p \quad (2.19)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\epsilon}_p$ は相当塑性ひずみである。ここでは、応力の相当量として k をもちいる。その場合、

$$d\kappa = k d\bar{\epsilon}_p \quad (2.20)$$

となる。式(2.15)、式(2.7)より、

$$B = -\frac{1}{d\lambda} \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa = \frac{1}{d\lambda} \frac{dk}{d\kappa} d\kappa \quad (2.21)$$

ここで、オイラーの定理を用いると、式(2.7)から

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} \sigma = a' \sigma = f = k \quad (2.22)$$

式(2.18)に式(2.22)を代入して、

$$d\kappa = \sigma' d\epsilon_p = \sigma' d\lambda a = d\lambda k \quad (2.23)$$

式(2.21)に式(2.19)、式(2.23)を代入して

$$B = \frac{1}{d\lambda} \frac{dk}{d\kappa} d\kappa = \frac{dk}{d\bar{\epsilon}_p} = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}_p} = H' \quad (2.24)$$

ここで、 H は硬化係数と呼ばれ、単軸引張り試験によって実験的にもとめることができる。
また、式(2.20)、式(2.23)より、

$$d\bar{\epsilon}_p = d\lambda \quad (2.25)$$

となる。

②ドラッカー・プラッカーの降伏条件

ドラッカー・プラッカーの構成方程式では、式(2.7)の降伏条件は次式で与えられる。

$$f(\sigma_{ij}) = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = k, \quad F = f - k = 0 \quad (2.26)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \phi)}, \quad k = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \phi)}$$

ここで、 C 、 ϕ はそれぞれモール・クーロンの構成則における粘着応力および内部摩擦角である。なお、 α 、 k における分母の±はドラッカー・プラッカーの降伏曲面をモール・クーロンの降伏曲面の六角形の内側に一致させた場合−、外側に一致させた場合+となる。また、 J_1 、 J_2 はそれぞれ応力の第一不変量および、偏差応力の第二不変量であり、次式で定義される。

$$J_1 = \sigma_{ii}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij}^i \sigma_{ij}^i, \quad \sigma_{ij}^i = \sigma_{ij} - p \delta_{ij}, \quad p = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (2.27)$$

平面ひずみの仮定のもと、上記の降伏条件を式(2.12)に代入すると、流れベクトル \mathbf{a} は次の式になる。

$$\mathbf{a}' = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \right]$$

$$= \left[\alpha + \frac{\sigma_x^i}{2\sqrt{J_2}^i}, \alpha + \frac{\sigma_y^i}{2\sqrt{J_2}^i}, \frac{\tau_{xy}^i}{\sqrt{J_2}^i}, \alpha + \frac{\sigma_z^i}{2\sqrt{J_2}^i} \right] \quad (2.28)$$

式(2.6)、式(2.17)および式(2.27)より、 \mathbf{d}_p は次式で表される。

$$d_D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ \begin{array}{l} (1+\nu)\alpha + \frac{1-\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_x + \frac{\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_y + \frac{\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_z \\ (1+\nu)\alpha + \frac{\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_x + \frac{1-\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_y + \frac{\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_z \\ \frac{1-2\nu}{2\sqrt{J_2}} \tau_{xy} \\ (1+\nu)\alpha + \frac{\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_x + \frac{\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_y + \frac{1-\nu}{2\sqrt{J_2}} \sigma'_z \end{array} \right\} \quad (2.29)$$

2.2.3 粘弾性体

本プログラムでは、粘弾性体の構成則としてマックスウェルの構成則およびべき乗則の構成則を採用する。以下にそれぞれの構成則を示す。

(1) マックスウェルモデルの構成則

1次元のマックスウェルモデルでは、粘弾性挙動を図 2.1 で示すバネ・ダッシュポットを直列につないだマックスウェル要素で粘弾性挙動を記述できるものと仮定する。このとき、バネのバネ定数を k 、ダッシュポットの粘性係数を η 、外力を F 、変位 u とすると、以下の関係が成り立つ。

$$\dot{F} = k\dot{u} - \frac{k}{\eta} F = k\dot{u} - \frac{1}{\lambda} F \quad (2.30)$$

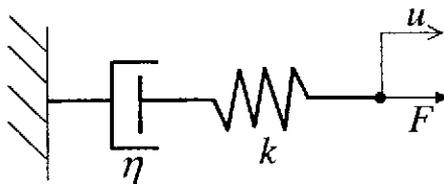


図 2.1 マックスウェル要素

ここで、 $\lambda=(\eta/k)$ は緩和時間である。本プログラムで扱うマックスウェルモデルでは、応力およびひずみを偏差成分と等方成分に分離して、偏差成分は粘弾性挙動を示し、等方成分は弾性挙動を示すものとする。偏差応力テンソル σ'_{ij} および偏差ひずみテンソル e'_{ij} は次式で定義される。

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (2.31)$$

$$e'_{ij} = e_{ij} - \frac{1}{3} e_{kk} \delta_{ij} \quad (2.32)$$

ここで、 e_{ij} はひずみテンソルであり、次式で定義される。

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.33)$$

式(2.30)を偏差成分に適用すると

$$\dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} - \frac{G}{\eta} \sigma'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} - \frac{1}{\lambda} \sigma'_{ij} \quad (2.34)$$

となる。ここで、 G はせん断弾性係数、 η は粘性係数、 $\lambda (= \eta/G)$ は緩和時間である。応力の等方成分 σ_{iso} には弾性体の構成則を適応して、

$$\dot{\sigma}_{iso} = K\dot{e}_{ii} \quad (2.35)$$

となる。ここで、 K は体積弾性係数である。したがって、マックスウェルモデルの構成則は次式で表される。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} + \dot{\sigma}_{iso} \delta_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} - \frac{G}{\eta} \sigma'_{ij} + K\dot{e}_{kk} \delta_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} - \frac{1}{\lambda} \sigma'_{ij} + K\dot{e}_{kk} \delta_{ij} \quad (2.36)$$

なお、せん断弾性係数および体積弾性係数はヤング率およびポアソン比との間に以下の関係がある。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.37)$$

(2) べき乗則の構成方程式

べき乗則の構成方程式は、応力が増加すると、クリープひずみ速度が応力のべき乗で増加する現象をモデル化した粘弾性モデルである。以下にその構成則を示す。いま、クリープひずみを ϵ_{cr} とすると、べき乗則の構成方程式では、クリープ速度は応力のべき乗に比例すると仮定して、次式を得る。

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A \bar{\sigma}^n \quad (2.38)$$

ここで A, n はともにべき乗則の構成則の物理定数である， $\bar{\sigma}$ は次式で定義される相当応力である。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (2.39)$$

ここで，クリープひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ を次式で定義する。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_{cr} \left(\frac{\sigma'_{ij}}{\bar{\sigma}} \right) \quad (2.40)$$

マックスウェルモデルの場合と同様，偏差成分のみ粘弾性効果を考慮すると，偏差応力および等方応力の構成則はそれぞれ次式となる。

$$\dot{\sigma}'_{ij} = 2G(\dot{\epsilon}'_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^c) \quad (2.41)$$

$$\dot{\sigma}_{iso} = K\dot{\epsilon}_{ii} \quad (2.42)$$

よって，べき乗則の構成方程式は次式となる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} + \dot{\sigma}_{iso} \delta_{ij} = 2G(\dot{\epsilon}'_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^c) + K\dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} \quad (2.43)$$

2.3 解析ソルバー

2.3.1 動的緩和法

本プログラムは，非線形計算における計算時間・計算容量を削減するため，動的陽解法を繰り返し計算することにより，静的解を求める動的緩和法^{[4]~[7]}を導入する。以下にそのアルゴリズムを示す。式(2.1)は時間発展型の方程式ではないので陽的に解を求めることはできない。そこで，仮想的な密度 ρ ，減衰係数 c を付加して，式(2.44)の仮想的な動的釣り合い式を導入する。式(2.44)は時間発展型の方程式なので，陽的に解くことが出来る。式

(2.44)で設定した仮想的な慣性項および減衰項は定常状態では0となるため、式(2.44)を定常状態まで陽解法による時間積分を行えば、式(2.1)の解が求まることになる。

$$\rho \ddot{u}_i + c \dot{u}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (2.44)$$

ここで、式(2.2)、(2.44)を陽的に離散化すると以下の式が得られる。

$$\rho(u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1})/\Delta t^2 + c(u_i^n - u_i^{n-1})/\Delta t = \frac{\partial \sigma_{ij}^n}{\partial x_j} + F_i \quad (2.45)$$

$$\sigma_{ij}^{n+1} = f(\sigma_{ij}^n, u_i^{n+1}, u_i^{n+1} - u_i^n) \quad (2.46)$$

ここで、 ρ は仮想密度、 Δt は仮想的な時間刻み幅、 c は仮想的な粘性係数、上添え字の n は仮想的な時間反復ステップをそれぞれ示す。解析アルゴリズムは以下のとおり

step1) 式(2.45)より陽的に u^{n+1} を求める。

step2) step1で求めた u^{n+1} を用いて(2.46)より σ^{n+1} を求める。

step3) 収束の判定をする。収束した場合、 u^{n+1} 、 σ^{n+1} を解として計算終了。収束しなかった場合、 $u^n = u^{n+1}$ 、 $\sigma^n = \sigma^{n+1}$ としてstep1へ。

収束の判定は、残差力ノルム ($\|\{\nabla \cdot \sigma + F\}\|^2$) とエネルギー残差 ($\Delta t \{\dot{u}\} \{\nabla \cdot \sigma + F\}$) が共に許容値以下になると収束したとみなす。

$$\|\{\nabla \cdot \sigma + F\}\|^2_{t=0} < \varepsilon_1 \text{ and } |\Delta t \{\dot{u}\} \{\nabla \cdot \sigma + F\}|_{t=0} < \varepsilon_2 \quad (2.47)$$

ここで、 ε_1 および ε_2 はそれぞれ残差力ノルム、エネルギー残差の許容値である。また、 $\{a\}$ は a の解空間全体でのベクトルであり、下添え字 $t=0$ は動的緩和ステップ第1ステップでの値である。図 2.2 に動的緩和法のアルゴリズムを示す。

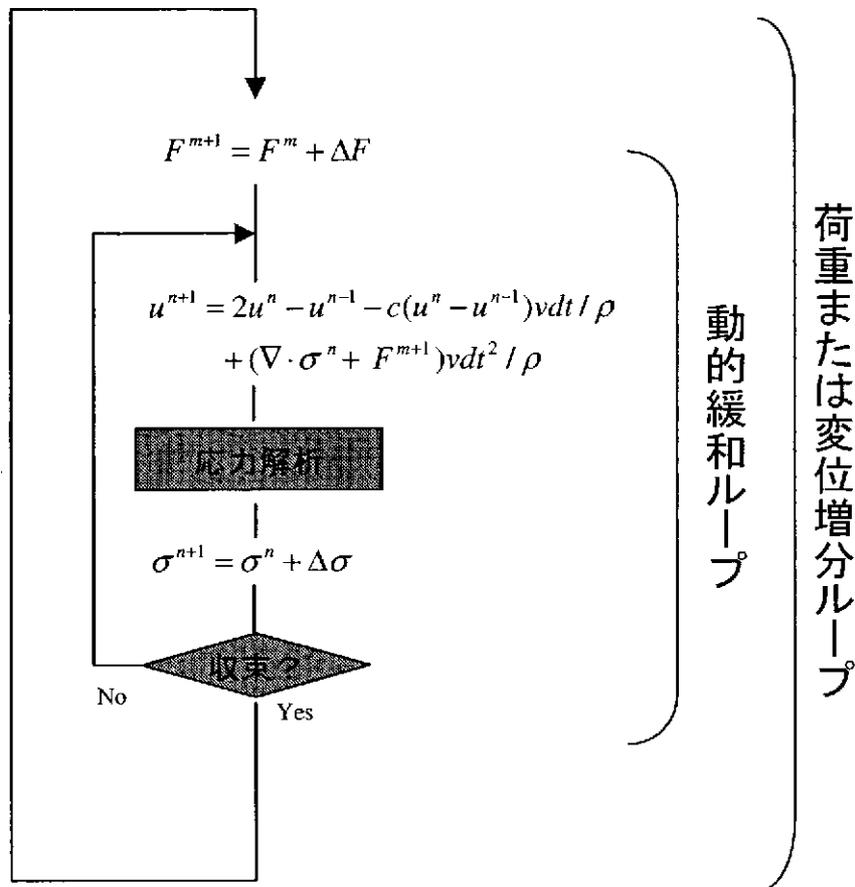


図 2.2 動的緩和法のアルゴリズム

2.3.2 有限要素法による離散化

本ソルバーは、空間の離散化に有限要素法を用いる。離散化式を以下の示す。式(2.44)に仮想速度 $\delta \dot{u}_i$ を乗じ、Gauss の発散の定理を用いると、次式の仮想仕事の原理式が得られる。

$$\int \rho \ddot{u}_i \delta \dot{u}_i dV + \int c \dot{u}_i \delta \dot{u}_i dV + \int \sigma_{ij} \frac{\delta \dot{u}_i}{\partial x_j} dV = \int F_i \delta \dot{u}_i dS \quad (2.48)$$

なお、 V は体積、 S は表面積である。ここで、有限要素内の変位を形状関数 N_α を用いて補間する。

$$u = N_\alpha u_\alpha$$

$$N_\alpha = \frac{1}{4} (1 + \xi_\alpha \xi) (1 + \eta_\alpha \eta)$$

$$\xi_\alpha^t = \{-1, 1, 1, -1\}, \eta_\alpha^t = \{-1, -1, 1, 1\}$$

ここで、下添え字 α は局所節点番号、 ξ, η は局所節点座標である。上式を(7.1)に代入すると次式の有限要素式が得られる。

$$\overline{M}_{\alpha\beta}\ddot{u}_\beta + C_{\alpha\beta}\dot{u}_\beta + P_\alpha = T_\alpha \quad (2.49)$$

$$M_{\alpha\beta} = \int \rho N_\alpha N_\beta dV_e$$

$$C_{\alpha\beta} = \int c N_\alpha N_\beta dV_e$$

$$P_\alpha = \int \sigma \cdot B_\alpha dV_e$$

$$T_\alpha = \int F N_\alpha dS$$

$$B_\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \\ \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} & \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \end{pmatrix}$$

なお、 $\overline{M}_{\alpha\beta}$ は質量集中行列である。なお、減衰行列 $C_{\alpha\beta}$ は次式で近似する。

$$C_{\alpha\beta} = c \overline{M}_{\alpha\beta}$$

ここでは、式(2.50)で示される川本ら⁶⁾が用いた臨界減衰率の近似値を用いて減衰係数 c を求める。

$$c = 2 \sqrt{\frac{\{u\}' [K] \{u\}}{\{u\}' [M] \{u\}}} \quad (2.50)$$

ただし、 $[M]$ は全体質量行列、 $[K]$ は近似的な対角全体接線剛性行列である。 $[K]$ の対角成分は次式で表される。

$$K_{ii} = \frac{P_i^t - P_i^{t-1}}{\Delta \ddot{u}_i^t} \quad (2.51)$$

また、仮想密度は次式で計算する。

$$\rho = \frac{\Delta t^2 E(1-\nu)}{\alpha^2 \Delta x^2 (1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.52)$$

ここで、 Δt は仮想的な時間刻み幅（本プログラムでは1とした）、 Δx は節点間最小距離、 ν はポアソン比であり、 α は0~1の係数である。

2.3.3 弾塑性解析のアルゴリズム

弾塑性解析を行う場合、塑性開始の判定、応力状態が降伏曲面上に乗るようにするなどの工夫が必要である。本節では、本プログラムが用いた構成方程式の計算アルゴリズムを示す。

Step 1) 全変形が弾性変形によるものと仮定した場合の応力 σ_e^{n+1} および塑性ポテンシャル F を求める。

Step 2) 前ステップで塑性しているかどうか調べる。前ステップで塑性している場合 Step4へ。塑性していない場合 Step 3へ。

Step 3) Step 1で求めた塑性ポテンシャルの正負を調べる。 $F < 0$ の場合引き続き弾性変形が生じている。Step 6へ。 $F > 0$ の場合、塑性変形が開始。塑性開始までの応力増分 $\Delta \sigma$ を次式により求め、Step 5へ（図 2.4 参照）。

$$\Delta \sigma = (1-r) \Delta \sigma_e^{n+1} \quad (2.53)$$

$$r = \frac{f(\sigma_e^{n+1}) - k(\bar{\epsilon}_p^n)}{f(\sigma_e^{n+1}) - f(\sigma^n)} \quad (2.54)$$

Step 4) Step 1で求めた塑性ポテンシャルの正負を調べる。 $F < 0$ の場合、塑性変形から弾性的な徐荷による変形が生じる。Step 6へ。 $F > 0$ の場合、引き続き塑性変形が継続する。塑性開始の応力は前ステップの応力 σ^n であるから、式(2.53)における r は1となる。Step 5へ（図 2.3 参照）。

$$r = 1 \quad (2.55)$$

Step 5) 次式より塑性変形開始時の応力状態を求める。ここで、 r は(2.54)または(2.55) より求めた r である。

$$F = f(\boldsymbol{\sigma}^n + \Delta\boldsymbol{\sigma}') - k(\bar{\varepsilon}_p^n) \quad (2.56)$$

上式および式(2.12), (2.17), (2.16)の各式より, 流れベクトル \mathbf{a} , d_D , 塑性係数 $d\lambda$ を求める。また, 式(2.13)の両辺の左から \mathbf{D} を乗じると次式を得る。

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\Delta\boldsymbol{\varepsilon} - d\lambda d_D = \Delta\boldsymbol{\sigma}_e - d\lambda d_D \quad (2.57)$$

上式および先に求めた d_D , 塑性係数 $d\lambda$ より応力増分 $\Delta\boldsymbol{\sigma}$ を求める。また, 相当ひずみ $\bar{\varepsilon}_p^{n+1}$ は式(2.25)より, 次式で与えられる。

$$\bar{\varepsilon}_p^{n+1} = \bar{\varepsilon}_p^n + d\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_p^n + d\lambda \quad (2.58)$$

また, 線形ひずみ硬化を仮定すると, 相当応力 k^{n+1} は

$$k^{n+1} = k^n + H' \bar{\varepsilon}_p^{n+1} \quad (2.59)$$

本解析は陽解法の反復により計算を行うため, 式(2.57)より求めた応力を用いると反復の過程における誤差の蓄積により, 応力状態が塑性面からはずれることが考えられる。そのため, この誤差を修正する必要がある。いま, 降伏条件を $F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = 0$ とする。現在の応力状態を $\boldsymbol{\sigma}_1 (= \boldsymbol{\sigma}^n + \Delta\boldsymbol{\sigma})$ とすると, その塑性ポテンシャルは $F(\boldsymbol{\sigma}_1, \kappa) = f_1$ となる。ここで, 応力の修正量を $\Delta\boldsymbol{\sigma}''$ とすると,

$$F(\boldsymbol{\sigma}_1 + \Delta\boldsymbol{\sigma}'', \kappa) = F(\boldsymbol{\sigma}_1, \kappa) + \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \Delta\boldsymbol{\sigma}'' = f_1 + \mathbf{a}' \Delta\boldsymbol{\sigma}'' = 0 \quad (2.60)$$

$\Delta\boldsymbol{\sigma}''$ を降伏曲面の垂線方向にとると,

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}'' = c \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = c \mathbf{a} \quad (2.61)$$

ここで c は定数である。式(2.61), (2.60)より, 修正量 $\Delta\boldsymbol{\sigma}''$ は

$$\Delta\sigma' = -\frac{f_1}{a'a}a \quad (2.61)$$

となる。したがって、式(2.57)は以下のように修正される。

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_e - d\lambda d_D + \Delta\sigma' = \Delta\sigma_e - d\lambda d_D - (f_1/a'a)a \quad (2.62)$$

以上の式により、応力増分を決定する。Step 7 へ。

Step 6) 弾性挙動のみであるため、Step 1 でもとめた仮の応力増分は実際の応力増分と一致する。したがって、

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_e \quad (2.63)$$

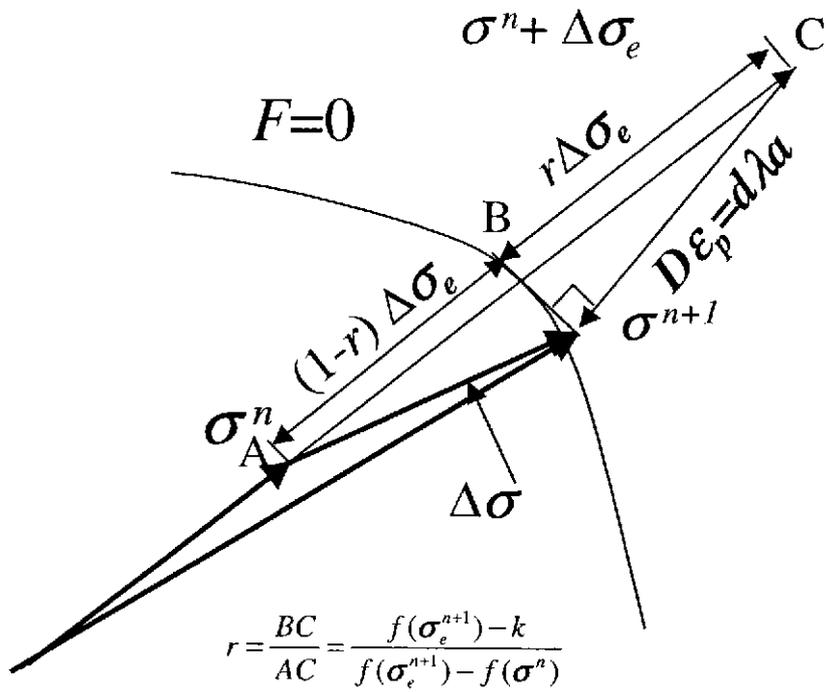
Step 7 へ。

Step 7) 前ステップにおける応力に増分応力を加え、応力を更新する。

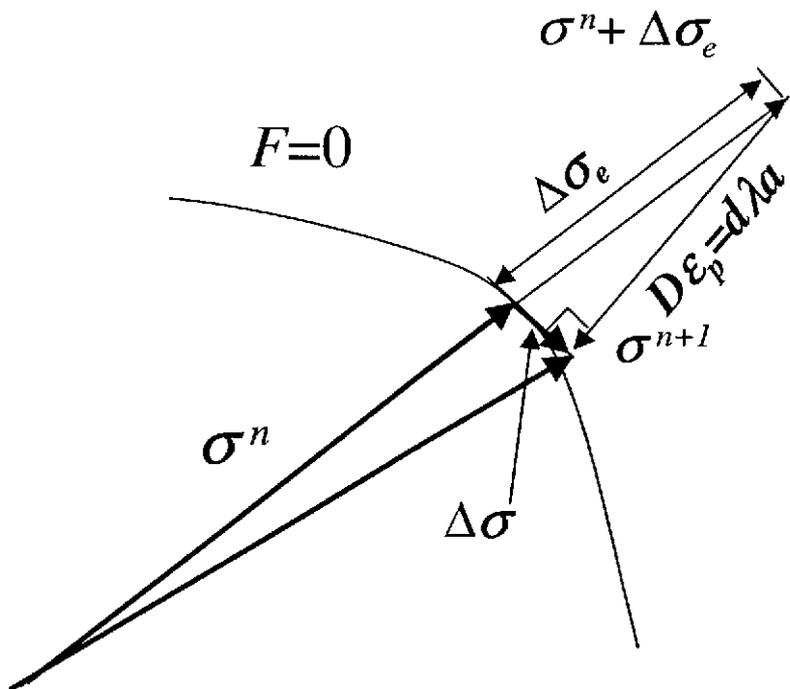
$$\sigma^{p+1} = \sigma^p + \Delta\sigma \quad (2.64)$$

次の動的緩和ステップへ。

図 2.4 に本アルゴリズムのフロー図を示す。



(a) 前ステップ弾性で、現在のステップで塑性が開始する場合



(b) 前ステップが塑性状態で、さらに塑性が進行する場合

図 2.3 塑性変形における応力状態の変化

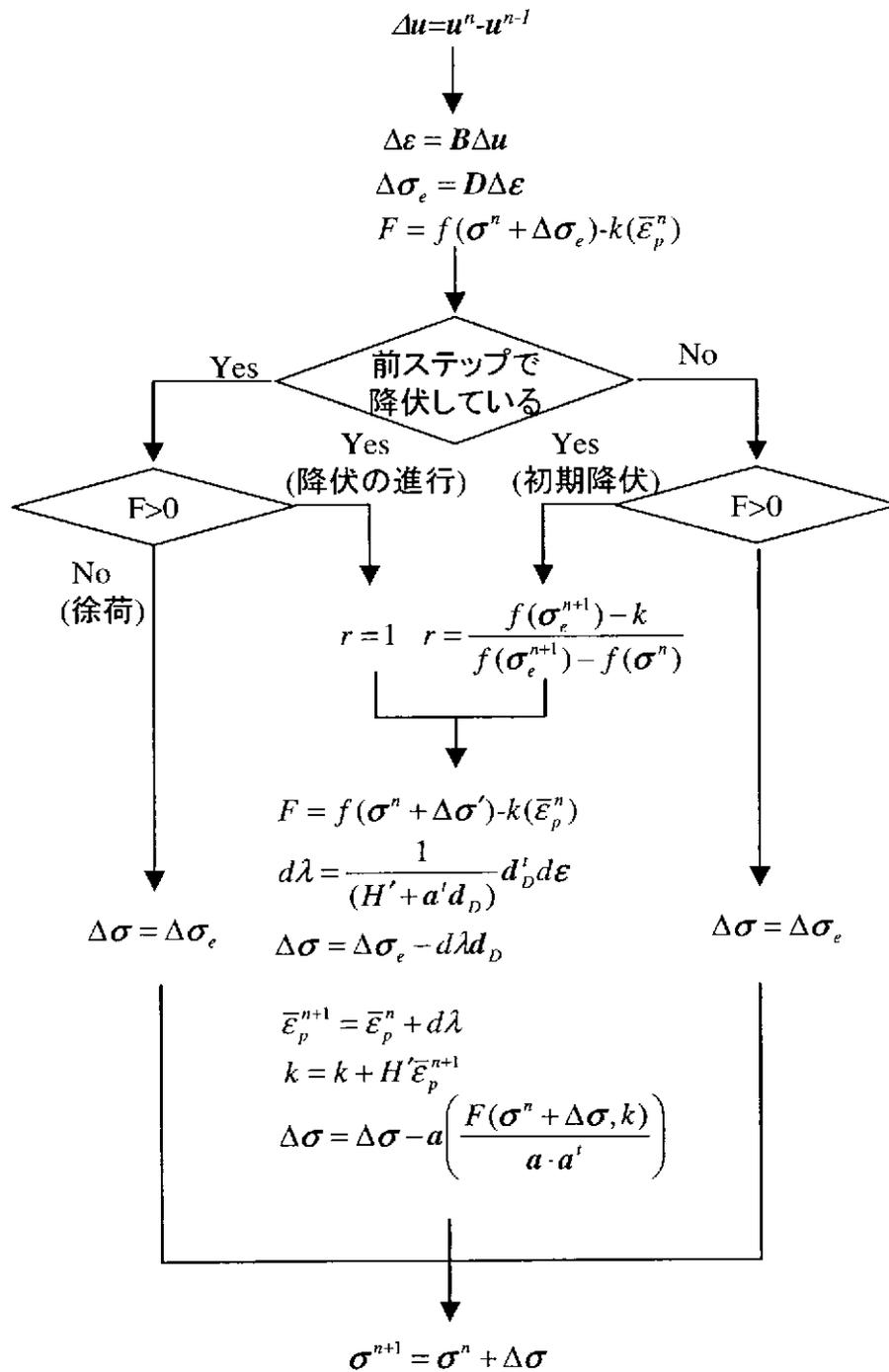


図 2.4 弾塑性体の構成方程式の解法アルゴリズム

2.3.4 粘弾性体解析アルゴリズム

粘弾性体の解析では、構成方程式は時間依存の関数であるため、実時間の時間増分による解析が必要となる。一方、静的釣り合い式は仮想時間による動的緩和法による解析が必

要である。したがって、実時間ステップ 1 ステップにつき、動的緩和法の収束計算を行うことになる。ここでは、簡単のため、マックスウェルモデルの構成則を例にとって解説するが、べき乗則の構成則についても同様の手法を用いて解析を行う。マックスウェルモデルの構成則式(2.36)を陽的に離散化すると次式が得られる。

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + 2G\Delta e'_{ij} - \frac{1}{\lambda}\sigma_{ij}'^n \Delta t + K\Delta e_{kk} \delta_{ij} \quad (2.65)$$

上式と(2.1)の静的釣り合い式を連成して解く。その場合、アルゴリズムは以下のようになる。

Step1) 前実時間ステップの変位 u_i^n および応力 σ_{ij}^n を動的緩和ループの初期値とする。

Step2) 次式より、動的緩和ステップの(m+1)ステップの変位 $u_i^{(m+1)}$ を求める。

$$u_i^{(m+1)} = 2u_i^{(m)} - u_i^{(m-1)} - c(u_i^{(m)} - u_i^{(m-1)})vdt / \rho + \left(\frac{\partial \sigma_{ij}^{(m)}}{\partial x_j} + F \right) vdt^2 / \rho \quad (2.66)$$

Step3) 次式より、動的緩和ステップの(m+1)ステップの応力 $\sigma_{ij}^{(m+1)}$ を求める。

$$\sigma_{ij}^{(m+1)} = \sigma_{ij}^n + 2G(e_{ij}'^{(m+1)} - e_{ij}'^n) - \Delta t \sigma_{ij}'^{(m)} / \lambda + K(e_{kk}^{(m+1)} - e_{kk}^n) \delta_{ij} \quad (2.67)$$

Step4) 収束の判定をする。収束していれば、実時間ステップの変位および応力を更新し ($u_i^{n+1} = u_i^{(m+1)}$, $\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^{(m+1)}$) 次の実時間ステップ (Step1) にすすむ。収束していなければ、 $u_i^{(m)} = u_i^{(m+1)}$, $\sigma_{ij}^{(m)} = \sigma_{ij}^{(m+1)}$ とし次の動的緩和ステップ (Step2) にすすむ。

ここで、上添え字 n は実時間ステップを、 (m) は動的緩和法の反復ステップを意味する。また、 c , ρ および vdt はそれぞれ動的緩和法における仮想的な減衰係数、密度および時間刻みである。 Δt は実時間刻み幅である。図 2.5 に本アルゴリズムのフローチャートを示す。

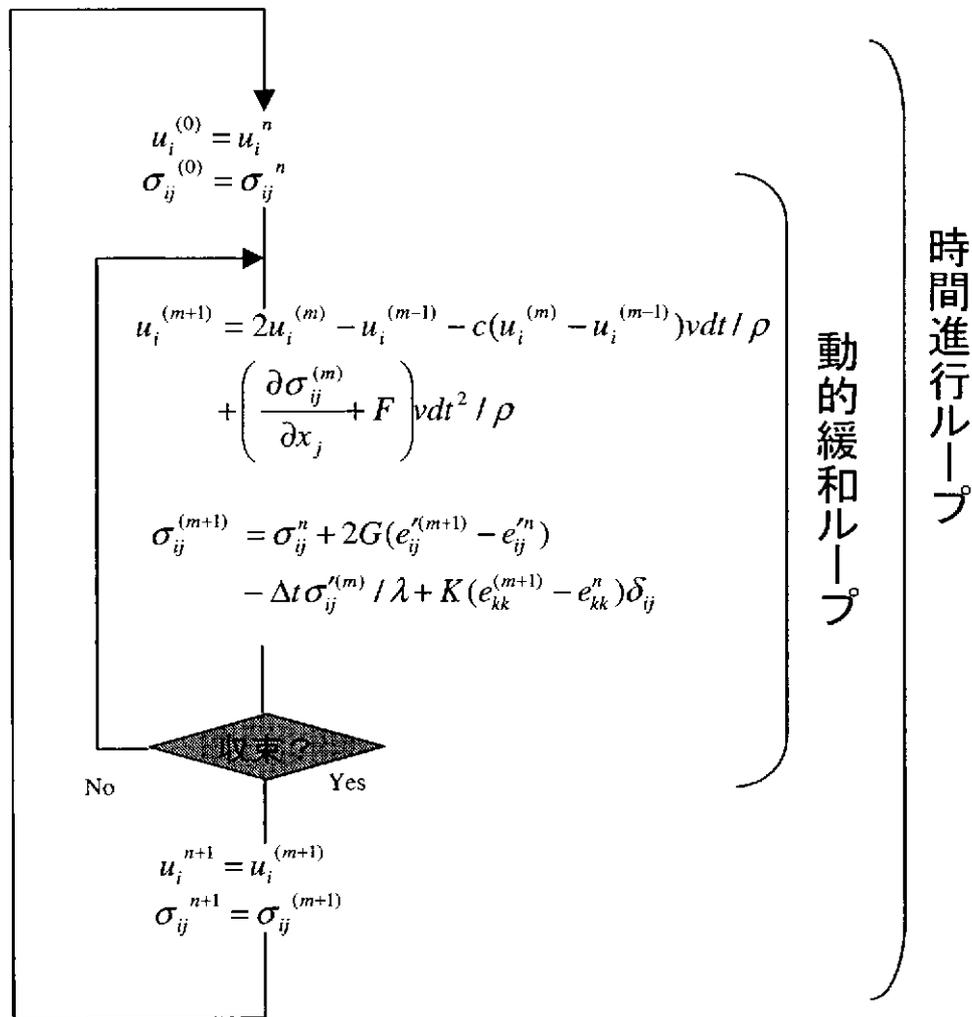


図 2.5 粘弾性体における動的緩和法のアルゴリズム

2.4 使用要素

使用要素は四角形 1 次平面ひずみ要素である。

2.5 境界条件

2.5.1 設定可能な境界条件

節点固定の条件, 節点荷重, 分布荷重, 強制変位を設定可能

2.5.2 強制変位条件と荷重条件について

本プログラムでは荷重条件と強制変位条件の設定が可能である。荷重条件の場合, 境界で発生した応力が動的緩和ステップの反復中にその応力が徐々に解析対象の材料中に伝播していく。そのため, 良好に解は収束していく。それに対し, 強制変位を境界条件として

与えた場合、解析の初期段階で、境界に近い要素で過度のひずみが発生し、特に弾塑性解析を行った場合、十分に小さな変位の増分を与えないと実際の解と異なった数値解に収束する危険性がある。そこで、本プログラムでは、強制変位条件を次式に従い荷重条件に変換し解析を行う。

$$W = \alpha E(X - x)$$

ここで、 X は強制変位の入力値、 x は境界の変位、 α は変位制御係数、 E は境界に接する要素のヤング率、 W は境界に接する面に作用する分布荷重である (図 2.6)。これにより、動的緩和ステップにおいて徐々に変位が増加し、解が収束するまでに境界の変位が入力した強制変位の値と一致することになる。変位制御係数 α の値は本研究で検証した範囲では、線形弾性体および粘弾性体の解析では 1.0×10^5 程度が妥当であった。しかし、弾塑性解析で、強制変位境界近傍の要素で塑性が生じる場合、実際のヤング率が入力したヤング率よりも低くなるため、 α の値を低く設定する必要がある。

このように強制変位境界では、 α のチューニングが必要であるうえに、収束を遅いため、可能な限り分布荷重または集中荷重の境界条件を設定することが望ましい。

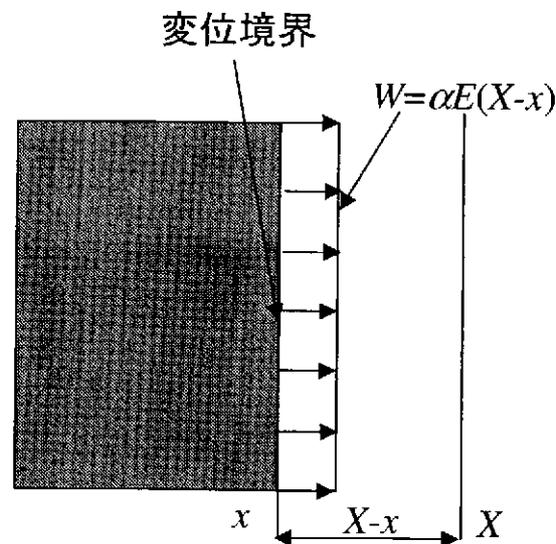


図 2.6 強制変位条件から分布荷重条件への変換

3 入力機能

3.1 データ入力の一般的規則

本プログラムは、独立した機能を持つモジュールを入力データのコマンド命令により実行し、目的とする計算を行うように作成されている。

本プログラムのコマンド命令には、大コマンド、中コマンド、小コマンドの3種類がある。これらのコマンド命令による各モジュールの実行は、論理的に矛盾しなければ任意でよい。また一部例外を除き同じコマンドを何度実行してもよい。コマンド命令のタイプは次のとおりである。

1	3	1 0	
##	input		1, 2カラムが##は大コマンドを示す
△#	coord		△#は中コマンドを示す
△△	coord		△△は小コマンドを示す

ここで△は、空白を示している。上記の例では、大コマンドでモジュール##inputを呼び出し、中コマンド△#で##inputの中の中モジュール△#coordを呼び出す。さらに中モジュール△#coordの中の小モジュール△△coordを呼び出し実行する。モジュールの実行は論理的に整合がとれていれば任意でよいが、入力データは入力フォーマットで記された順でなければならない。

大コマンドと同格の命令に次のものがある。

stop プログラムを終了する

このコマンドは入力データの最後に必ずセットしなければならない。また1, 2カラムのどちらかがcであると、この行はスキップされる。

3.2 入力の概要

3.2.1 全体構成

本プログラムは2つの独立したモジュール(##input, ##explicit)から構成された1本のプログラムである。それぞれのモジュールの機能は、次のとおりである。

input 構造データ入力機能

explicit 2次元地盤解析プログラムの実行機能

3.2.2 プログラムのコマンド一覧

本プログラムで使用するコマンドを、表 3.1に示す。

表 3.1 本プログラムのコマンド一覧

コマンド名	内 容
##input	構造データ入力を指示する
△#coord	節点データ入力を指示する
△△coord	節点データ入力
△#elem	要素データ入力を指示する
△△solid	線形弾性体要素データ入力
△△plastic	弾塑性要素データ入力
△△maxwell	粘弾性（マックスウェル）要素データ入力
△△power	粘弾性（べき乗則）要素データ入力
△#material	材質データ入力を指示する
△△msolid	線形弾性体要素の材質データ入力
△△mplastic	弾塑性体要素の材質データ入力
△△mmaxwell	粘弾性（マックスウェル）要素の材質データ入力
△△mpower	粘弾性（べき乗則）要素の材質データ入力
##explicit	2次元地盤解析プログラムの実行を指示する
△#boundd	境界条件入力を指示
△△fixed	固定節点入力
△△fixline	固定直線入力
△△load	節点集中荷重データ入力
△△dsload	分布荷重データ入力
△△disp	強制変位データ入力する
△△gravity	自重計算の設定を入力する
△#output	データの出力を指示する
△△ndhist	節点データの履歴の出力（動的緩和ステップ）
△△nehist	要素データの履歴の出力（動的緩和ステップ）
△△nddata	節点データの履歴の出力（実時間ステップ）
△△nedata	要素データの履歴の出力（実時間ステップ）
△△vavs	AVS データの出力（動的緩和ステップ）

△△ravs	AVS データの出力 (実時間ステップ)
△△residual	最大残差力の履歴
△#schedule	解析スケジュールの入力を指示する
△△schedule	解析スケジュールのデータを入力する
△#param	解析パラメータの入力および計算開始
##stop	プログラムの終了を指示する

3.2.3 入力単位系について

本プログラムの入力には、MKS、工学単位系、SI 単位系のどれを用いてもよいが、すべて統一しておかなければならない。表 3.2 に入力単位例を示す。

表 3.2 入力単位例

コマンド名	入力項目	工学単位	SI 単位系	
##input	△#coord (座標値)	m	m	
	△#matera (G_r =加速度)	9.8	1.0	
	△△msolid	E (ヤング率)	tonf/m ²	N/m ²
	△△mvisco		tonf/m ³	kg/m ³
	△△mmaxwell			
△△mpower				
	ρ (単位体積重量)			

3.3 モジュール##input

3.3.1 機能

節点データ、要素データ、材質データなどの構造データを入力する。##explicit はここで入力した構造データ (メッシュ) に対して計算を行う。構造データは FT12 に出力される。ここで、FT*は、装置番号*番であることを意味する。

3.3.2 ファイル構成

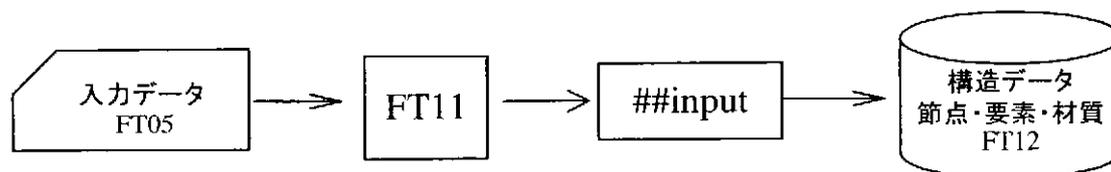


図 3.1 ##input のファイル構成

プログラム起動時にコメント行を削除した FT11 のイメージファイルが作成され、モジュール##input に入力される。

3.3.3 サブコマンド一覧

モジュール##input のサブコマンドを以下に示す。

表 3.3 ##input のサブコマンド一覧表

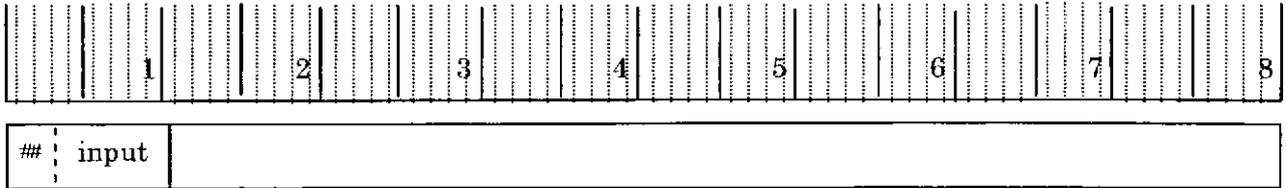
	サブコマンド名	内 容	必須
1	△# coord	節点データ入力指示	○
	△△coord	節点データの入力	○
2	△# elem	要素データ入力指示	○
	△△solid	線形弾性体要素データ入力	○*1
	△△plastic	弾塑性要素データ入力	○*1
	△△maxwell	粘弾性（マックスウェル）要素データ入力	○*1
	△△power	粘弾性（べき乗則）要素データ入力	○*1
3	△# material	材質データ入力指示	○
	△△msolid	線形弾性体要素の材質データ入力	○*2
	△△mplastic	弾塑性体要素の材質データ入力	○*2
	△△mmaxwell	粘弾性（マックスウェル）要素の材質データ入力	○*2
	△△mpower	粘弾性（べき乗則）要素の材質データ入力	○*2

*1 および*2 では、それぞれのグループで最低1個必要である。また、*1 と*2 は対応していなければならない。

3.3.4 入力データ説明

入力データ説明

input



(A2) (A8)

コマンド##inputにより、入力モジュールの実行を行う。

モジュール##inputでは、構造データの入力を行い、構造データをファイル FT12 に格納する。

以下の計算モジュールでは、##inputで入力された構造データに対して計算を行う。

モジュール##inputで入力するデータは以下のデータである。

- △# coord 節点データの入力
- △# elem 要素データの入力
- △#matera 物性データの入力

入力データ説明

△# coord

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

△#	coord	iflag	
----	-------	-------	--

(A2) (A8) (I5)

コマンド△# coord で、節点データの入力を行う。続けて以下のデータを節点行数入力する。
ただし、節点番号は通し番号でなければならない。

iflag 0:入力した座標データを標準出力へ出力しない(デフォルト)。
 0以外の整数:入力した座標データを標準出力へ出力する。

△△coord

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

△△	coord	nordi	x	y	
----	-------	-------	---	---	--

(A2) (A8) (I10) (F10.0) (F10.0)

nordi 節点番号 1からの通し番号
x,y 節点座標

入力データ説明

△# elem



△#	elem	iflag	
----	------	-------	--

(A2) (A8) (I5)

コマンド△# elemにより、要素データの入力を開始する。続けて各要素データを入力する。要素番号は通し番号でなければならない。

iflag 0 : 入力した座標データを標準出力へ出力しない (デフォルト)。
 0以外の整数 : 入力した座標データを標準出力へ出力する。

モジュール△# elem で入力するデータは以下のデータである。

- △△solid 等方性弾性体要素データの入力
- △△plastic 弾塑性体要素データの入力
- △△maxwell 粘弾性体 (マックスウェル) 要素データの入力
- △△power 粘弾性体 (べき乗則) 要素データの入力

入力データ説明

△△solid

1	2	3	4	5	6	7	8	
△△	solid	ma	melei	n1	n2	n3	n4	
(A2)	(A8)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	

△△solidにより，2次元線形弾性要素を定義する。

ma 材質番号
melei 要素番号

n1～n4 要素構成節点番号（節点のまわり順は，図 3.2 のように入力する）

△△plastic

1	2	3	4	5	6	7	8	
△△	plastic	ma	melei	n1	n2	n3	n4	
(A2)	(A8)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	

△△plasticにより，2次元弾塑性要素を定義する。

ma 材質番号
melei 要素番号

n1～n4 要素構成節点番号（節点のまわり順は，弾性体要素と同様に入力する）

入力データ説明

△△maxwell

△△	maxwell	ma	melei	n1	n2	n3	n4
(A2)	(A8)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)

△△maxwellにより，2次元粘弾性（マックスウェル）要素を定義する。

ma 材質番号
melei 要素番号

n1～n4 要素構成節点番号（節点のまわり順は，弾性体と同様）

△△power

△△	power	ma	melei	n1	n2	n3	n4
(A2)	(A8)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)	(I10)

△△powerにより，2次元粘弾性（べき乗則）要素を定義する。

ma 材質番号
melei 要素番号

n1～n4 要素構成節点番号（節点のまわり順は，弾性体と同様）

入力データ説明

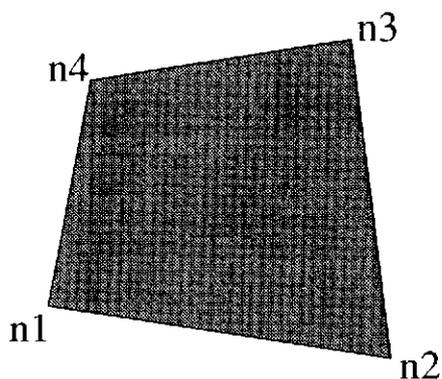


図 3.2 要素構成節点番号

<u>△# material</u>								
1	2	3	4	5	6	7	8	
△#	material	gr						

(A2) (A8) (F10.0)

△#material により、材質データの入力を開始する。

gr 重力加速度
 SI 単位系のとき $gr=1.0\text{m/s}^2$
 工学単位系のとき $gr=9.8\text{ m/s}^2$ など
 (デフォルト=1.0)

本コマンドに続けて材質データを入力する。材質データは最大で 100 行まで入力できる (サブルーチン `adjust.f` で調整可能, 6.3 参照)。入力単位系は SI 単位系でも工学単位系でもよいが、すべて統一しておくこと。SI 単位系で入力するとき ρ (単位体積重量) を密度で与えればよい。また種類の異なる要素に対しては同じ材質番号を用いてもよい。

△#material 以下で入力できるデータは以下のデータである。

△△msolid

入力データ説明

△△msolid

1	2	3	4	5	6	7	8
△△ msolid	ma	E	ν	ρ			
(A2) (A8)	(I5)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)			

本コマンドによって線形弾性体要素の物性値を定義する。ma の値は、△△solid の ma の値と対応させるものとする。

- ma 物性番号
- E ヤング率
- ν ポアソン比
- ρ 単位体積重量または密度

△△mplastic

1	2	3	4	5	6	7	8
△△ mplastic	ma	E	ν	ρ	ϕ	C	H
(A2) (A8)	(I5)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)

本コマンドによって弾塑性要素の物性値を定義する。ma の値は、△△plastic の ma の値と対応させるものとする。

- ma 物性番号
- E ヤング率
- ν ポアソン比
- ρ 単位体積重量または密度
- ϕ 内部摩擦角 (degree)
- C 粘着力
- H ひずみ硬化係数

入力データ説明

△△mmaxwell

1	2	3	4	5	6	7	8
△△mmaxwell	ma	E	ν	ρ	λ		
(A2) (A8)	(I5)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)		

本コマンドによって粘弾性体（マックスウェルモデル）要素の物性値を定義する。ma の値は、△△maxwell の ma の値と対応させるものとする。

ma	物性番号
E	ヤング率
ν	ポアソン比
ρ	単位体積重量または密度
λ	緩和時間

△△mpower

1	2	3	4	5	6	7	8
△△mpower	ma	E	ν	ρ	A	n	
(A2) (A8)	(I5)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	

本コマンドによって粘弾性体（べき乗則）要素の物性値を定義する。ma の値は、△△power の ma の値と対応させるものとする。

ma	物性番号
E	ヤング率
ν	ポアソン比
ρ	単位体積重量または密度
A	べき乗則の物性値 A
n	べき乗則指数

3.4 モジュール##explicit

本モジュール「##explicit」は、「##input」の中で作成された構造データ（FT12）に対し、地殻変動シミュレーションを行い、その結果を出力するモジュールである。

3.4.1 ファイル構成

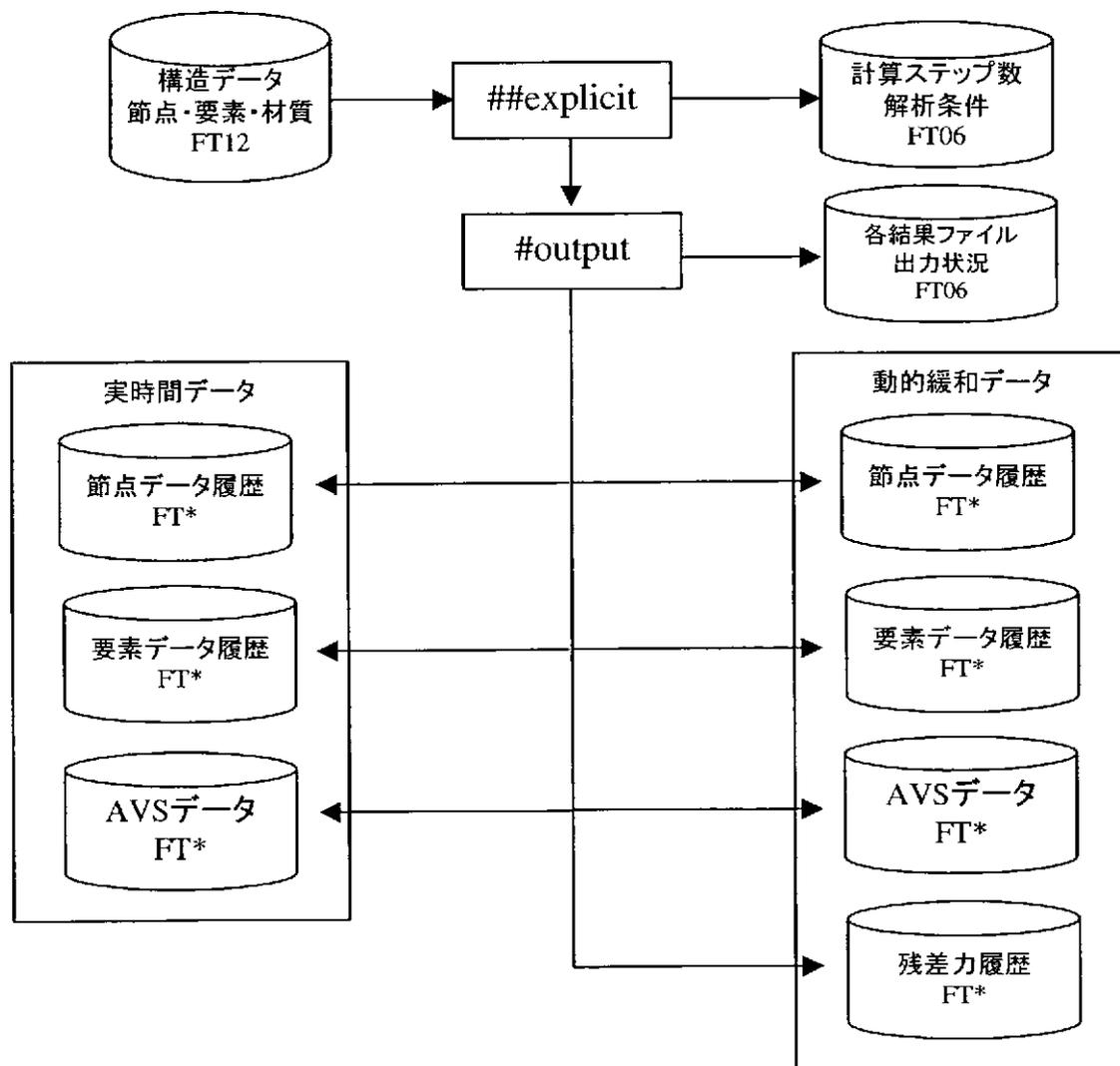


図 3.3 ##explicit のファイル構成

3.4.2 サブコマンド一覧

モジュール##explicit のサブコマンドを以下に示す。

表 3.4 ##explicit のサブコマンド一覧表

	サブコマンド名	内 容	必須
1	△#boundd	境界条件入力を指示	
	△△fixed	固定節点入力	
	△△fixline	固定直線入力	
	△△load	節点集中荷重データ入力	
	△△dsload	分布荷重データ入力	
	△△disp	強制変位データ入力	
	△△gravity	自重計算の設定を入力する	
2	△#output	データの出力を指示	
	△△ndhist	節点データの履歴の出力 (動的緩和ステップ)	
	△△nehist	要素データの履歴の出力 (動的緩和ステップ)	
	△△nddata	節点データの履歴の出力 (実時間ステップ)	
	△△nedata	要素データの履歴の出力 (実時間ステップ)	
	△△vavs	AVS データの出力 (動的緩和ステップ)	
	△△ravv	AVS データの出力 (実時間ステップ)	
	△△residual	最大残差力の履歴	
3	△# schedule	荷重・変位スケジュールの指示	○
	△△schedule	荷重・変位スケジュールの入力	○
4	△#param	解析パラメータの入力および計算開始	○

3.4.3 入力データ説明

入力データ説明

explicit

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

## explicit	
-------------	--

(A2) (A8)

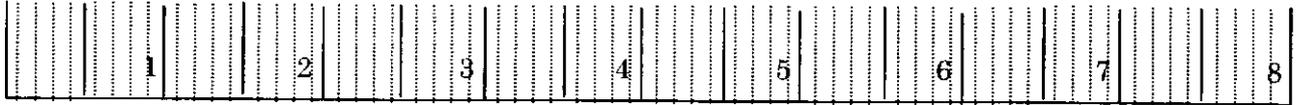
コマンド##explicitによって、2次元地殻変動プログラムを実行する。計算はモジュール##inputで入力された構造データ(FT12)について行われる。##explicitの下位の中コマンドの入力順位は任意でよいが、#paramは最後に入力する。

モジュール##explicitで入力するデータは以下のデータである。

- △# boundd 境界条件の入力
- △# output 出力データの入力
- △#schedule 変位・荷重スケジュールの入力
- △#param 解析パラメータの入力および計算開始

入力データ説明

△# boundd



△#	boundd	iflag	
----	--------	-------	--

(A2) (A8) (I5)

境界条件の入力を開始する。

iflag 0 : 詳細な境界条件を標準出力へ出力しない (デフォルト)。
 0 以外の整数 : 詳細な境界条件を標準出力へ出力する。

本コマンドに続けて以下順での境界条件を必要枚数入力する。

- △△fixed 固定節点を入力
- △△fixline 固定直線を入力
- △△load 節点集中荷重を入力
- △△dsload 分布荷重を入力
- △△gravity 自重計算の設定を入力

入力データ説明

△△ fixed

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

△△	fixed	nordi	n1	n2	
----	-------	-------	----	----	--

(A2) (A8) (I10) (I5) (I5)

コマンド△△fixedにより節点の拘束条件を入力する。

nordi 節点番号

n1=1 のとき 節点 nordi の x 方向の変位を拘束する。

n1=0 のとき x 方向の自由度を拘束しない。

n2 はそれぞれ y 方向を上記と同じように拘束する。

△△fixline

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

△△	fixline	n1	n2	a	b	c	
----	---------	----	----	---	---	---	--

(A2) (A8) (I2)(I2)(x) (F10.0) (F10.0) (F10.0)

コマンド△△fixlineにより指定する線上のすべての節点を拘束する。

$ax+by=c$ 線上のすべての節点を拘束する。

n1=1 のとき 上記の節点の x 方向の変位を拘束する。

n1=0 のとき 上記の節点の x 方向の変位を拘束しない。

n2 はそれぞれ y 方向を上記と同じように拘束する。

入力データ説明

△△load



△△	load	nordi	fx	fy	
----	------	-------	----	----	--

(A2) (A8) (I10) (F10.0) (F10.0)

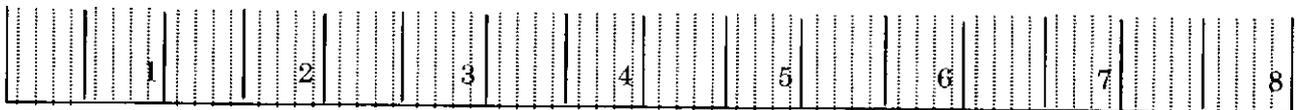
コマンド△△loadにより節点集中荷重を付加する。

nordi 節点番号

fx 上記の節点の x 方向に fx の集中荷重増分速度を加える。

fy 上記の節点の y 方向に fy の集中荷重増分速度を加える。

△△dsload



△△	dsload	ke	face	fx	fy	
----	--------	----	------	----	----	--

(A2) (A8) (F10.0) (I5) (F10.0) (F10.0)

コマンド△△dsloadにより指定する要素面に分布荷重を付加する。

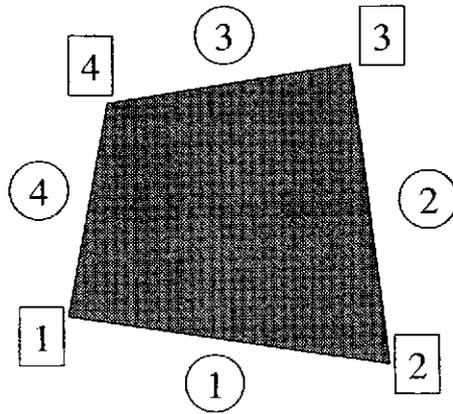
ke 分布荷重を付加する要素。

face 分布荷重を付加する局所面番号 (図 3.4 参照)。

fx 上記の面の x 方向に fx の分布荷重増分速度を加える。

fy 上記の面の y 方向に fy の分布荷重増分速度を加える。

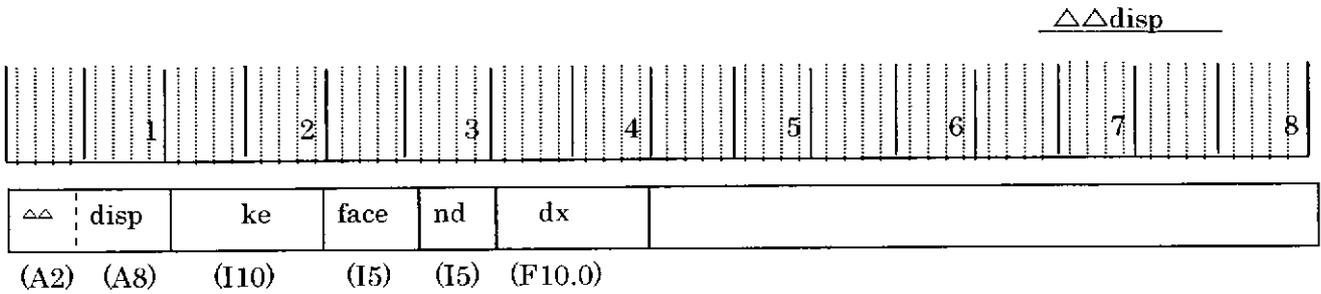
入力データ説明



□ 1 : 局所節点番号

○ 1 : 局所面番号

図 3.4 要素面番号

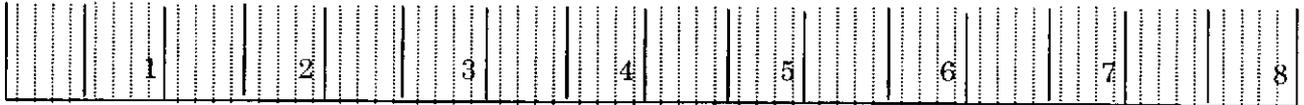


コマンド△△dispにより指定する要素面に強制変位を付加する。

- ke 強制変位を与える要素
- face 強制変位を与える局所面番
- nd 強制変位を与える方向 (x方向:1 y方向:2)
- dx 変位増分速度

入力データ説明

△△gravity



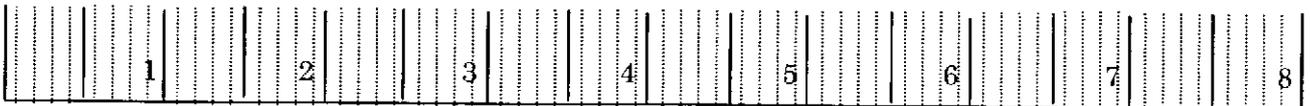
△△ gravity	gx	gy	
------------	----	----	--

(A2) (A8) (F10.0) (F10.0)

コマンド△△gravityにより重力加速度を設定し、自重解析を行う。

- gx x方向の重力加速度（一方向の重力が正）
- gy y方向の重力加速度（一方向の重力が正）

△# output



△ output	iflag	
----------	-------	--

(A2) (A8) (I5)

データの出力を指示する。

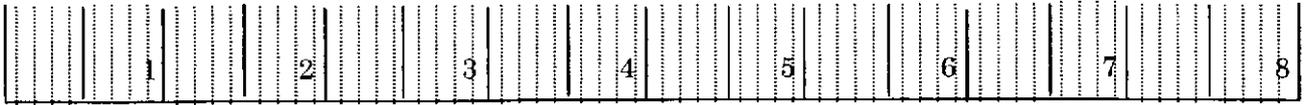
- iflag 0 : 詳細な出力情報を標準出力へ出力しない（デフォルト）。
- 0 以外の整数 : 詳細な出力情報を標準出力へ出力する。

本コマンドに続けて以下のコマンドを入力する。

- △△ndhist 任意節点のデータ履歴を出力（動的緩和ループ）
- △△nehist 任意要素のデータ履歴を出力（動的緩和ループ）
- △△nddata 任意節点のデータ履歴を出力（実時間ループ）
- △△nedata 任意要素のデータ履歴を出力（実時間ループ）
- △△vavs AVS データの出力（動的緩和ループ）
- △△ravsv AVS データの出力（実時間ループ）
- △△residual 残差力データ履歴の出力

入力データ説明

△△ndhist



△△	ndhist	nf	nt	
----	--------	----	----	--

(A2) (A8) (I10) (I10)

コマンド△△ndhistにより動的緩和ループでの任意節点のデータ履歴を出力する。

- nf 出力ファイル数
- nt 出力ステップ間隔

nfで指定した数だけ以下の行を入力する。

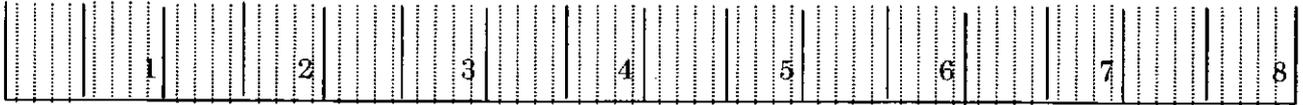
	ntf	nod	
--	-----	-----	--

(10X) (I10) (I10)

- ntf 出力ファイル装置番号
- nod データを出力する節点番号

入力データ説明

△△nehist



△△	nehist	nf	nt	
----	--------	----	----	--

(A2) (A8) (I10) (I10)

コマンド△△nehistにより動的緩和ループでの任意要素のデータ履歴を出力する。

nf 出力ファイル数
nt 出力ステップ間隔

nfで指定した数だけ以下の行を入力する。

	ntf	mele	
--	-----	------	--

(10X) (I10) (I10)

ntf 出力ファイル装置番号
mele データを出力する要素番号

入力データ説明

△△nddata



△△	nddata	nf	nt	
----	--------	----	----	--

(A2) (A8) (I10) (I10)

コマンド△△nddataにより実時間ループでの任意節点のデータ履歴を出力する。

- nf 出力ファイル数
- nt 出力ステップ間隔

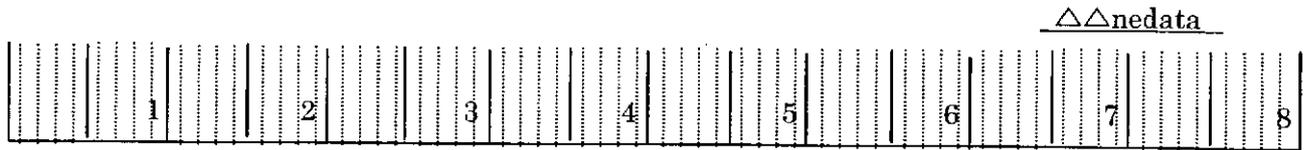
nfで指定した数だけ以下の行を入力する。

	ntf	nod	
--	-----	-----	--

(10X) (I10) (I10)

- ntf 出力ファイル装置番号
- nod データを出力する節点番号

入力データ説明



△△	nedata	nf	nt	
----	--------	----	----	--

(A2) (A8) (I10) (I10)

コマンド△△nedataにより実時間ステップでの任意要素のデータ履歴を出力する。

- nf 出力ファイル数
- nt 出力ステップ間隔

nfで指定した数だけ以下の行を入力する。

	ntf	mele	
--	-----	------	--

(10X) (I10) (I10)

- ntf 出力ファイル装置番号
- mele データを出力する要素番号

入力データ説明

△△vavs



△△	vavs	nf	
----	------	----	--

(A2) (A8) (I10)

コマンド△△vavsにより動的緩和ループ内での AVS データを出力する。

nf 出力ファイル数

nfで指定した数だけ以下の行を入力する。

	ntf	nstep	mstep	
--	-----	-------	-------	--

(10X) (I10) (I10) (I10)

ntf 出力ファイル装置番号

nstep AVS ファイルを出力する実時間ステップ数

mstep AVS ファイルを出力する同時緩和ステップ数

実時間ステップ nstep の同時緩和ステップが mstep 未満で終了した場合、AVS ファイルは生成されない。

入力データ説明

							<u>△△ravs</u>
1	2	3	4	5	6	7	8

△△	ravs	nf	
----	------	----	--

(A2) (A8) (I10)

コマンド△△ravsにより実時間ループ内での AVS データを出力する。

nf 出力ファイル数

nfで指定した数だけ以下の行を入力する。

	ntf	nstep	
--	-----	-------	--

(10X) (I10) (I10)

ntf 出力ファイル装置番号

nstep AVS ファイルを出力する実時間ステップ数

							<u>△△residual</u>
1	2	3	4	5	6	7	8

△△	residual	ndiv	nf	
----	----------	------	----	--

(A2) (A8) (I10) (I10)

コマンド△△residualにより最大残差力の履歴データを出力する。

ndiv 履歴出力間隔

nf 出力ファイル装置番号

入力データ説明

△#schedule

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

△#schedule	iflag	
------------	-------	--

(A2) (A8) (I5)

データの出力を指示する。

iflag 0 : 詳細なスケジュール情報を標準出力へ出力しない (デフォルト)。
 0 以外の整数 : 詳細なスケジュール情報を標準出力へ出力する。

本コマンドに続けて以下のコマンドを必要行数入力する。

△△schedule 変位・荷重のスケジュールを入力

△△schedule

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

△△schedule	alamp	damp	α	dt	
------------	-------	------	---	----	--

(A2) (A8) (F10.0) (F10.0) (F10.0) (F10.0)

荷重変位を指示する。

almp 荷重増分速度倍率
damp 変位増分速度倍率
α 変位制御係数
dt 実時間刻み幅

入力データ説明

△#param

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

#	param	nmax	eps1	eps2	α	nout
(A2)	(A8)	(I10)	(F10.0)	(F10.0)	(F10.0)	(I10)

計算の開始を指示する。

nmax	動的緩和ステップの最大反復回数
eps1	許容残差力ノルム
eps2	許容エネルギー残差
α	仮想密度係数
nout	標準出力に計算経過を出力する間隔

仮想密度 ρ は仮想密度 α により(2.52)式より決定される。

3.5 プログラムの終了について

本プログラムは次のコマンドによって終了する。このコマンドは、必須のコマンドである。

```
##stop
```

3.6 入力例

3.6.1 線形弾性解析の入力例

(1) 解析モデル

解析例として、図 3.5 に示す 1 要素の引っ張り問題を取り上げる。ヤング率 $E=410\text{MPa}$, ポアソン比 $\nu=0.3$, 密度 $\rho=2.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ である。拘束条件は、節点 1 および節点 2 の y 方向変位を拘束する。荷重条件は、節点 3 および節点 4 の +y 方向に図 3.6 で示す荷重履歴を加える。

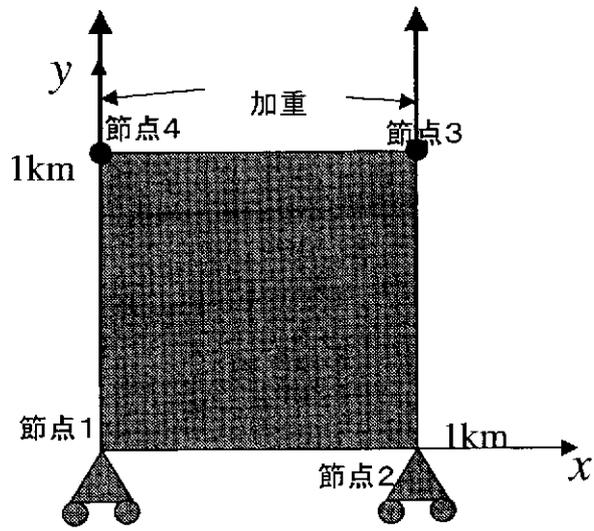


図 3.5 解析モデル

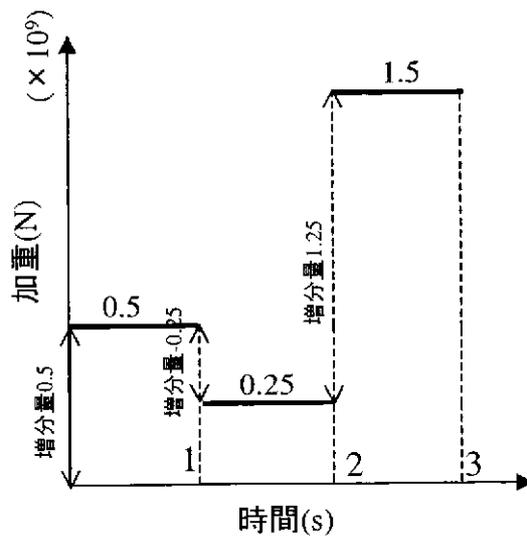
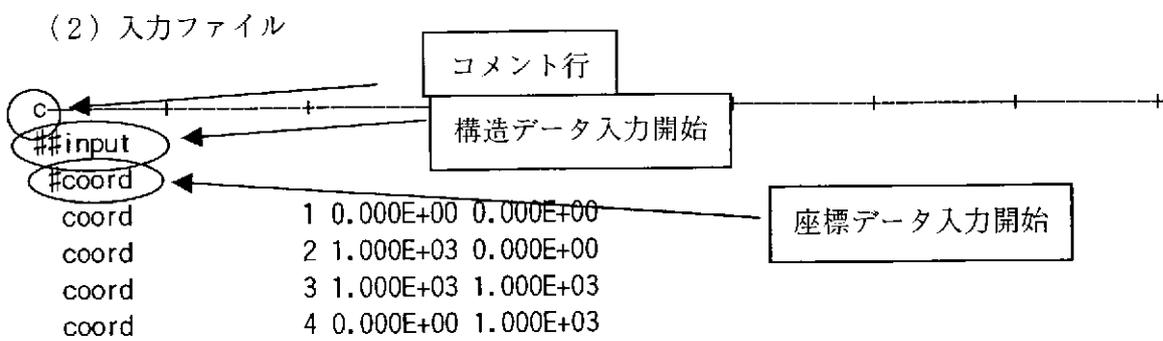
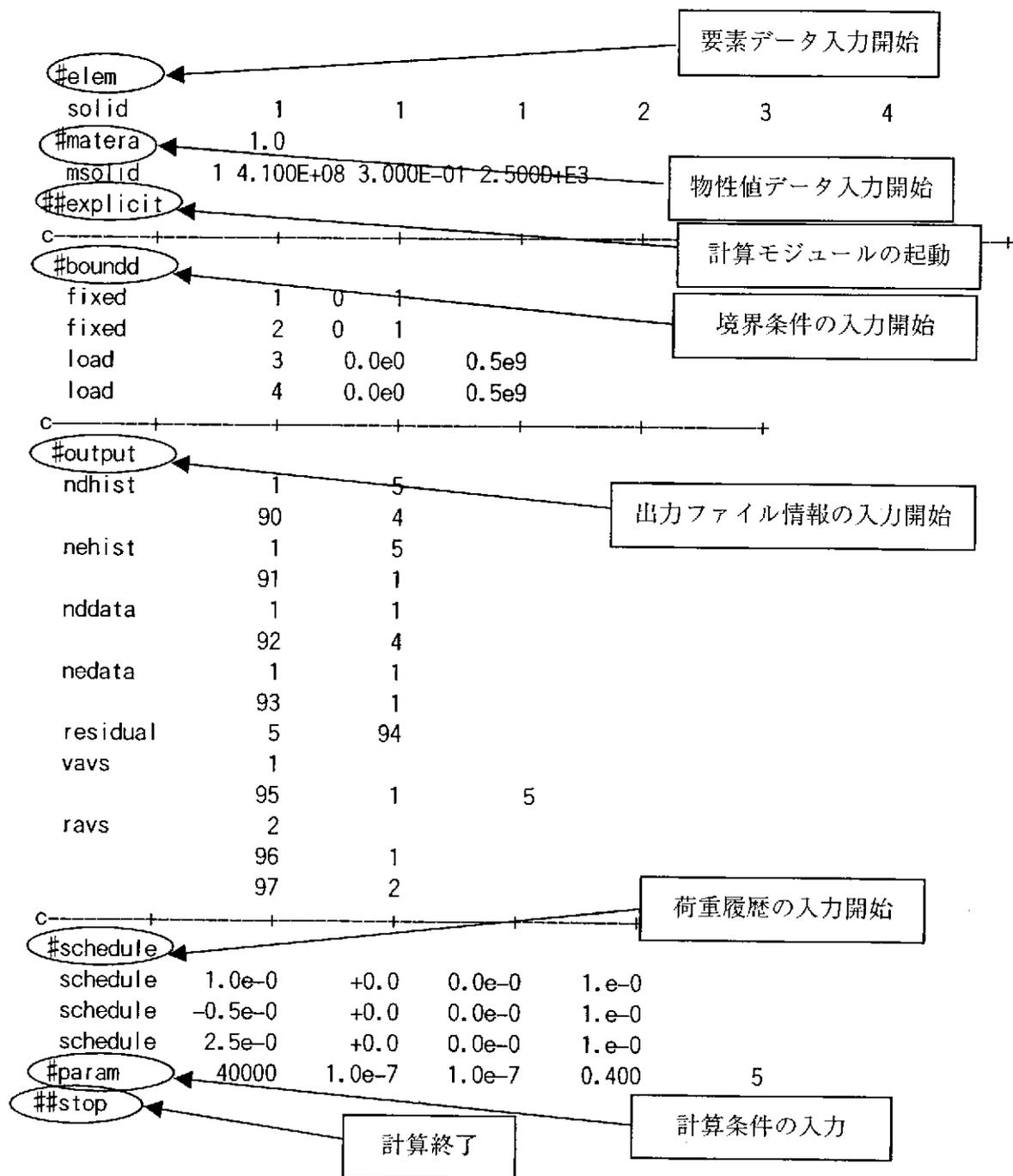


図 3.6 荷重履歴

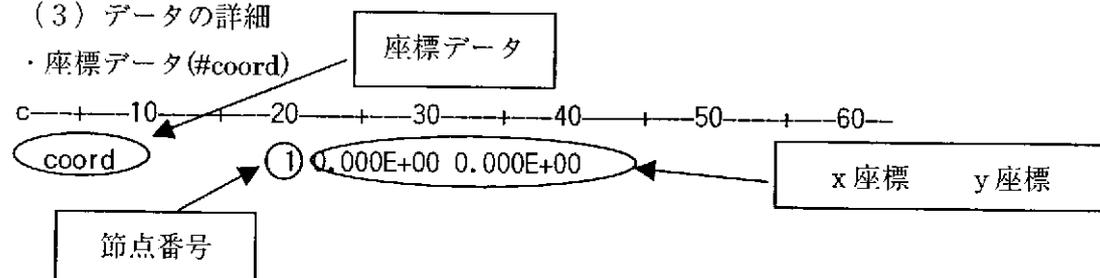


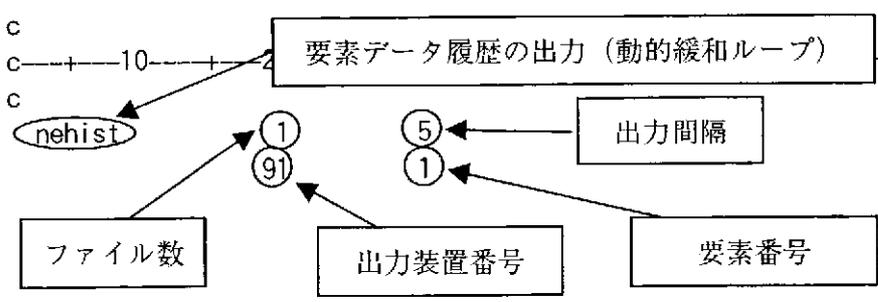
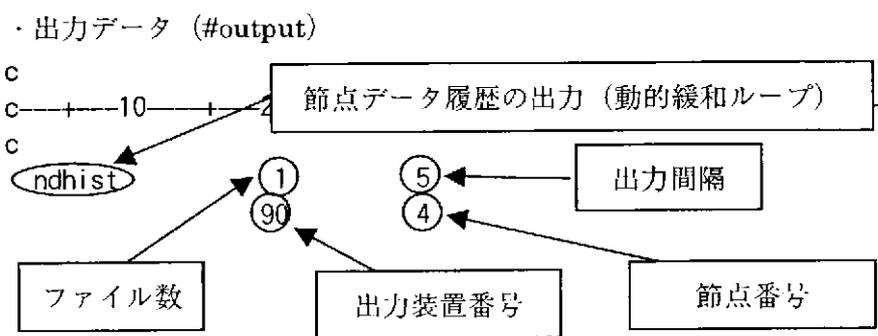
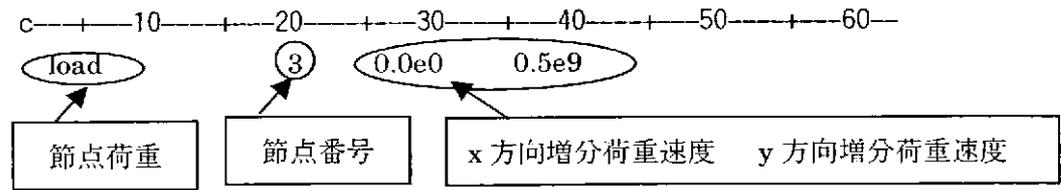
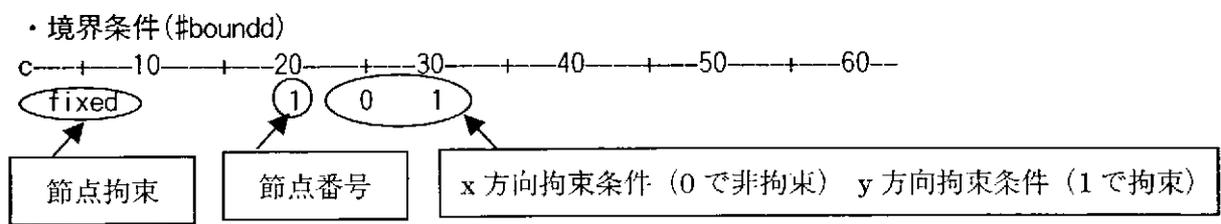
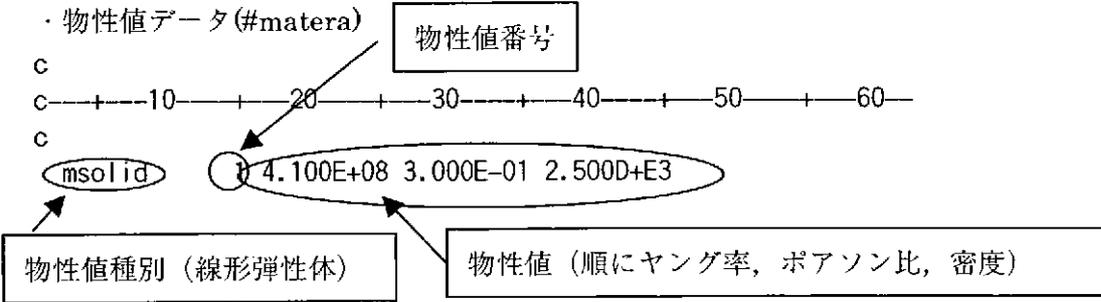
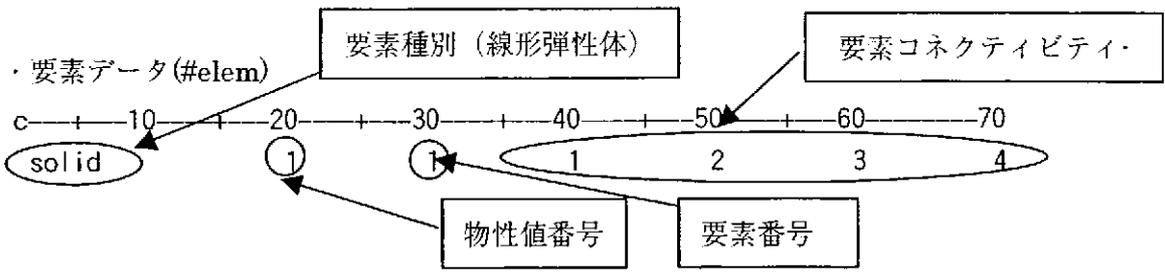


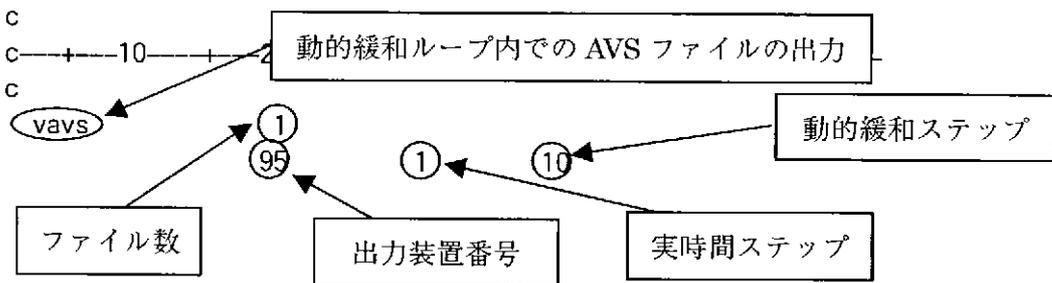
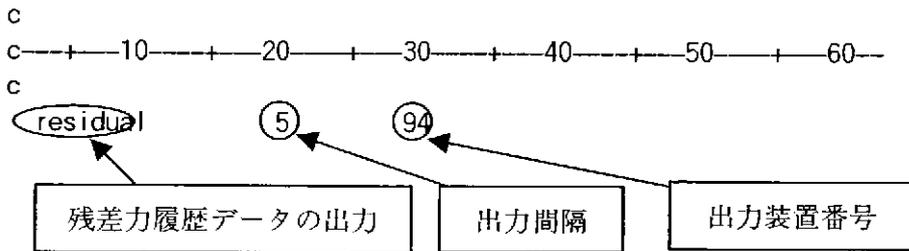
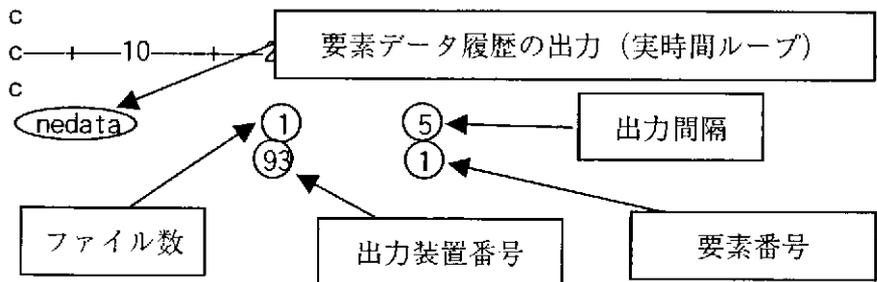
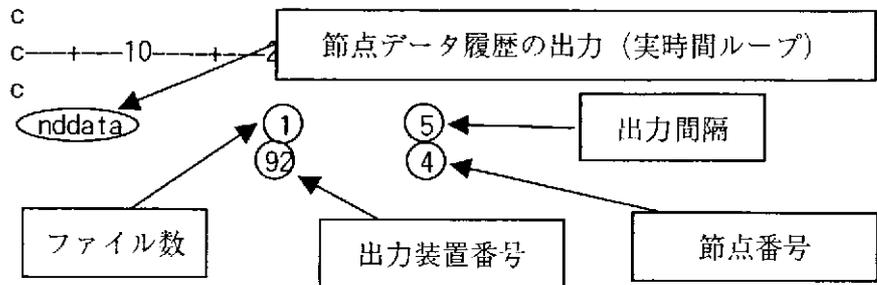
上記のファイルは~/explicit/sample/chap3 にインストールされている (elastic.dat)。

(3) データの詳細

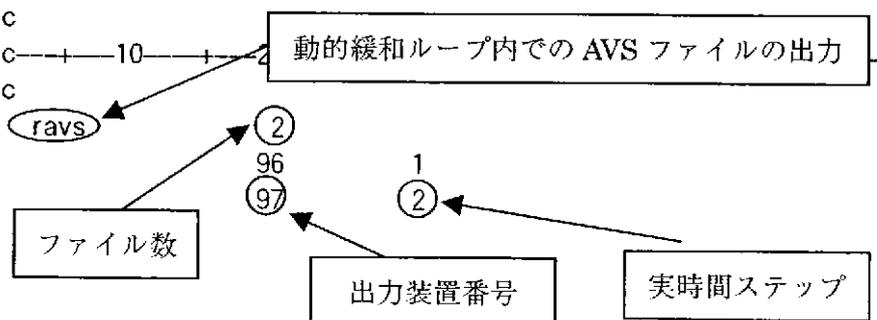
・座標データ(#coord)





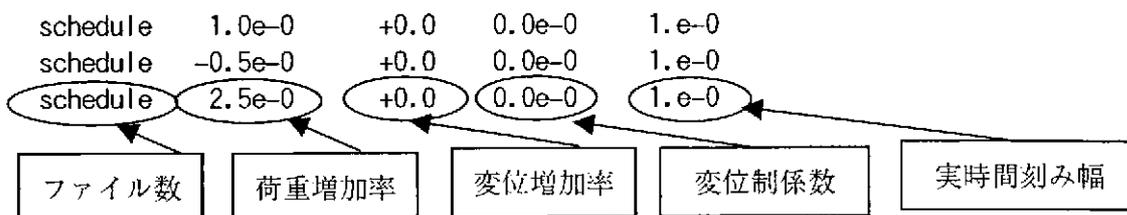


この場合、実時間 1 ステップ目の動的緩和ステップ 10 ステップ目の結果が AVS ファイルとして出力される。



この場合、実時間ステップ 1 の収束解が装置番号 96 に、実時間ステップ 2 の収束解が装置番号 97 にそれぞれ出力される。

・荷重および変位増分の履歴 (#schedule)



実際の荷重増分は、 $\Delta\Delta\text{load}$ または $\Delta\Delta\text{dsload}$ で指定した荷重増分速度と本コマンドで指定した荷重増分率と実時間刻み幅の積になる。実時間刻み幅は、時間依存性のある粘弾性解析のみ意味を持ち、他の解析では荷重増分量（荷重増分速度×荷重増分率×実時間刻み幅）のみ意味を持つ。この例の場合、荷重増分量は

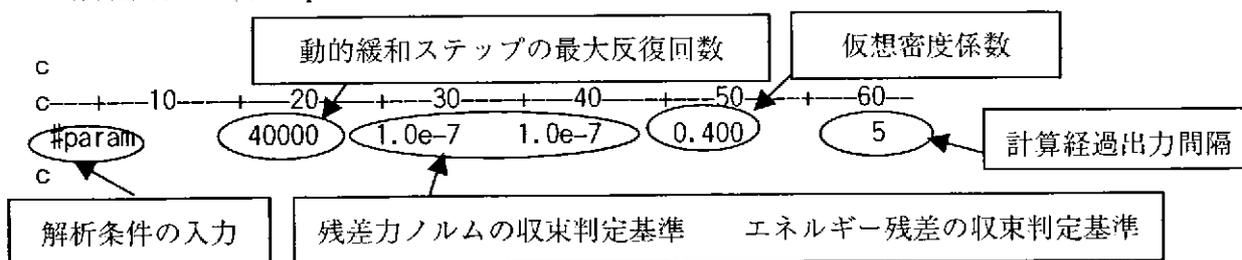
実時間ステップ 1 : $0.5 \times 10^9 \times 1.0 \times 1.0 = 5.0 \times 10^8 \text{ N}$

実時間ステップ 2 : $0.5 \times 10^9 \times -0.5 \times 1.0 = -2.5 \times 10^8 \text{ N}$

実時間ステップ 3 : $0.5 \times 10^9 \times 2.5 \times 1.0 = 1.25 \times 10^9 \text{ N}$

となる。なお、荷重制御の場合は、変位制御係数および変位増加率は無視される。

・解析条件の入力 (#param)



(4) 解析結果

上記の入力データにより解析した結果を以下に示す。図 3.7 に残差力の履歴を示す。この図は、コマンド「residual」によって、装置番号 94 に出力されたものである。横軸の動的緩和ステップ数は全実時間ステップに渡って通し番号で振ってある。各実時間ステップの開始時に残差力が大きく、実時間ステップ終了時には 0 付近に収束していることがわかる。

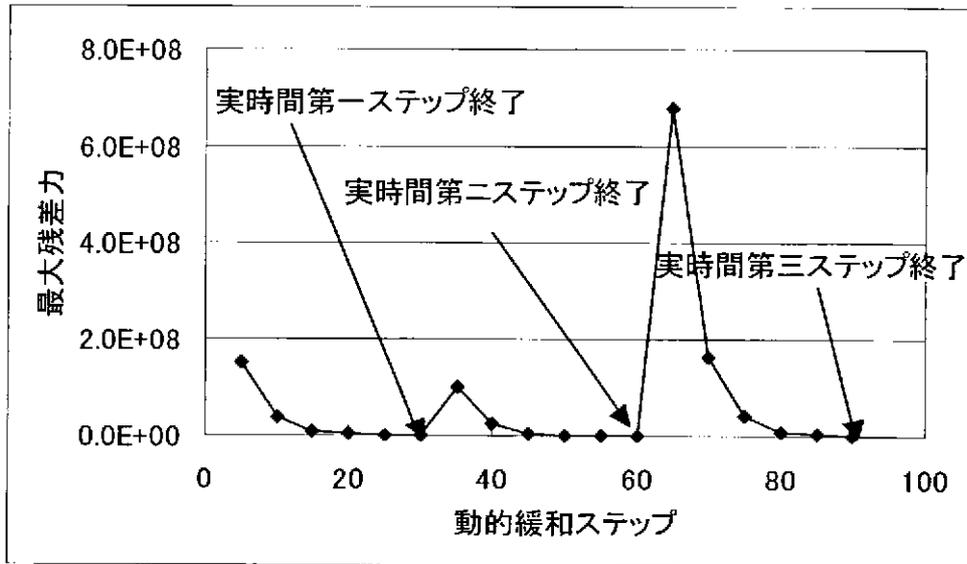


図 3.7 最大残差力の履歴

図 3.8 に節点番号 4 番の節点における y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴を示す。この図はコマンド「ndhist」によって装置番号 90 番に出力されたものである。各実時間ステップ終了時に一定の変位に収束していることがわかる。実時間第 2 ステップでは、実時間第 1 ステップの半分の荷重となっているため、第 2 ステップの変位は第 1 ステップの変位の半分になり、第 3 ステップでは、第 1 ステップの 3 倍の荷重が加わっているため、変位も第 1 ステップの 3 倍の変位が生じている。

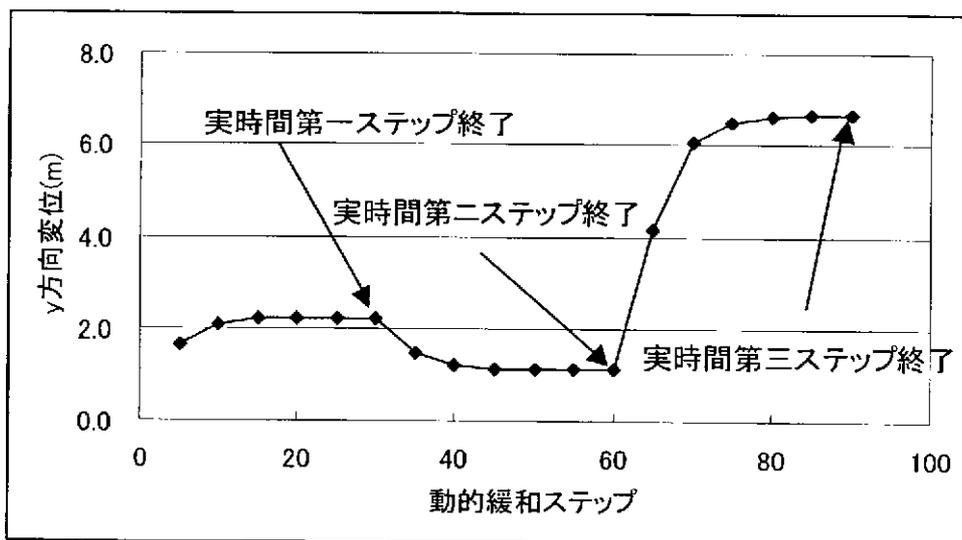


図 3.8 y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴

図 3.9 に要素番号 1 番の要素における応力の yy 成分の動的緩和ステップでの履歴を示す。この図はコマンド「nehist」によって出力装置 91 番に出力されたものである。変位同様、各実時間ステップ終了時に一定の応力に収束していることがわかる。また、第 2 ステップ、第 3 ステップはそれぞれ第 1 ステップの半分、3 倍の荷重が加わっているため、応力もそれぞれ半分、3 倍となっている。

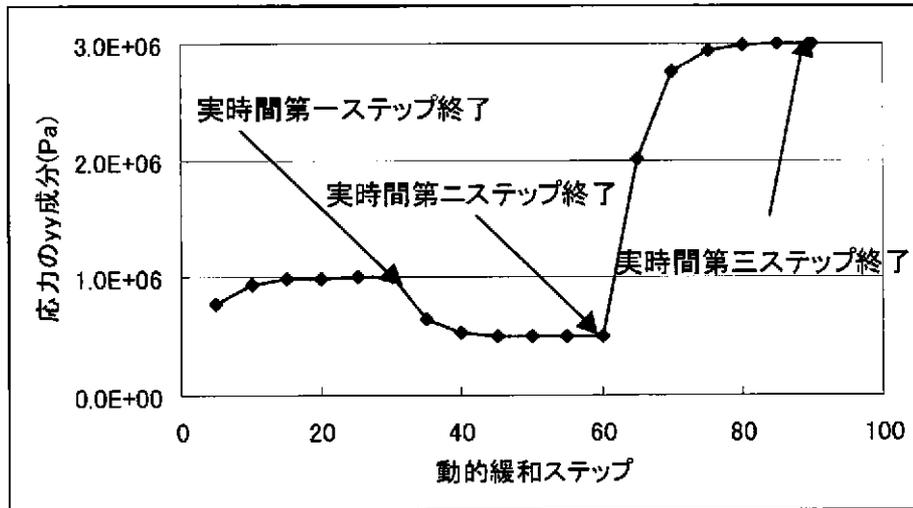


図 3.9 応力の yy 成分の動的緩和ステップでの履歴

図 3.10 および図 3.11 に y 方向変位および応力の yy 成分の実時間ステップでの履歴を示す。これら図はそれぞれコマンド「nddata」および「nedata」によって装置番号 92, 93 に出力されたものである。図 3.8 および図 3.9 とは異なり、収束過程を除いた静的釣り合い式を満足した解のみ出力される。

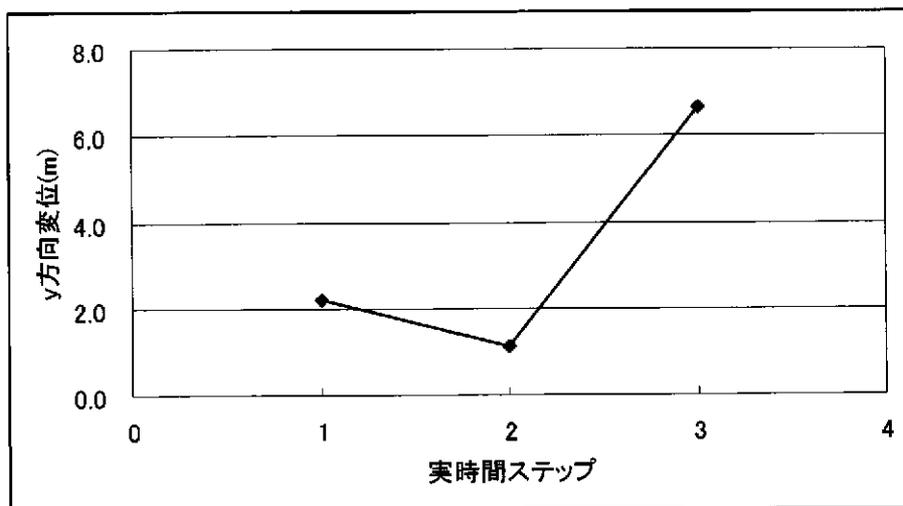


図 3.10 y 方向変位の実時間ステップでの履歴

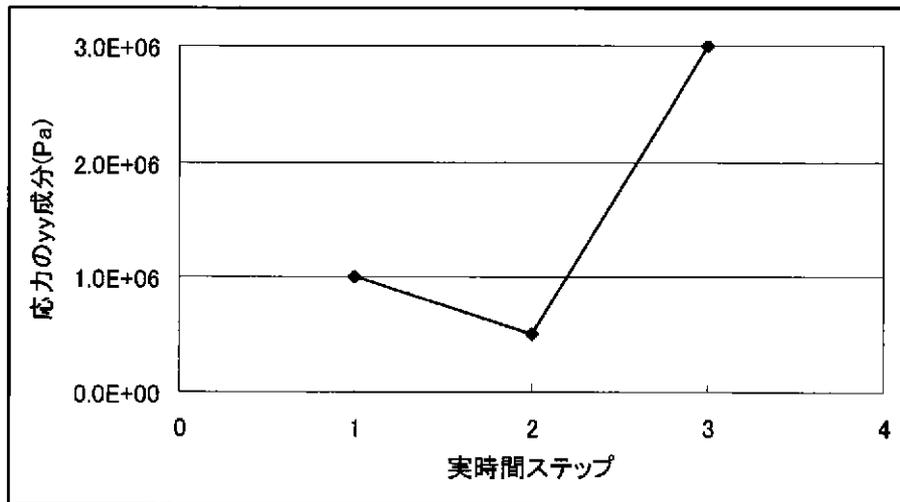


図 3.11 応力の yy 成分の実時間ステップでの履歴

3.6.2 自重解析の入力例

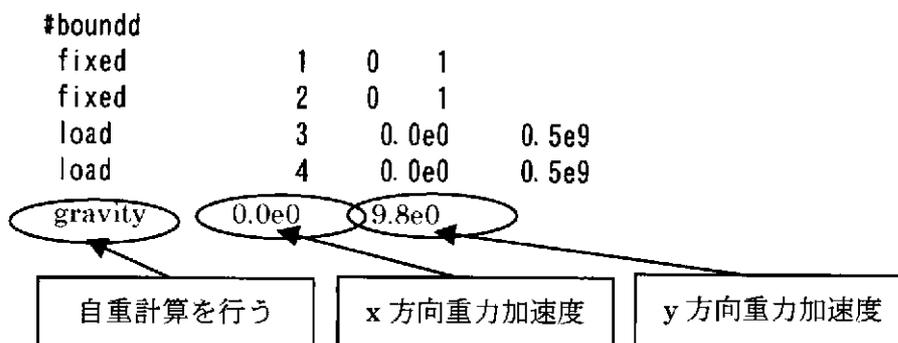
ここでは、自重解析の入力例を示す。本プログラムの自重解析機能では、自重解析の実行が指示された場合、第1ステップとして、外力・強制変位を0として重力の影響のみで解析を行う。この計算により得られた応力を応力の初期値とし、全変位を0として自重解析による変位への影響を取り除き、通常の荷重または変位のステップに移行する。

(1) 解析モデル

解析モデルおよび荷重履歴は 3.6.1 節の線形弾性体と同じとする（図 3.5 および図 3.6 参照）。本例題では、このモデルの y 方向に重力加速度 9.8m/s^2 を付加して、自重解析を行う。

(2) 入力ファイル

解析モデルが同じであるので、入力ファイルは 3.6.1 節とほぼ同じであるが、中コマンド「#boundd」の下の小コマンド群の最終行に小コマンド「gravity」を入力する必要がある。以下に変更後の「#boundd」を示す。



なお、重力加速度の符号は $-$ 方向に重力が作用する場合を正とする。上記のファイルは \sim /explicit/sample/chap3 にインストールされている (gravity.dat)。

(3) 解析結果

図 3.12 および図 3.13 に節点番号 4 番の節点における y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴および要素番号 1 番の要素における yy 成分の応力の動的緩和ステップでの履歴を示す。変位に関しては、自重解析の際に、重力の影響により負の変位を示しているが、荷重解析に入る際に一度ゼロで初期化するため、自重解析以降のプロファイルは自重解析を行わない場合とほぼ等しい。応力に関しては、自重解析により、強い負の応力が発生し、その応力を初期値として荷重解析を行うため、自重解析ステップ終了後は、自重解析で得られた応力に自重解析なしで解析で得られる応力を加えたプロファイルを示している。

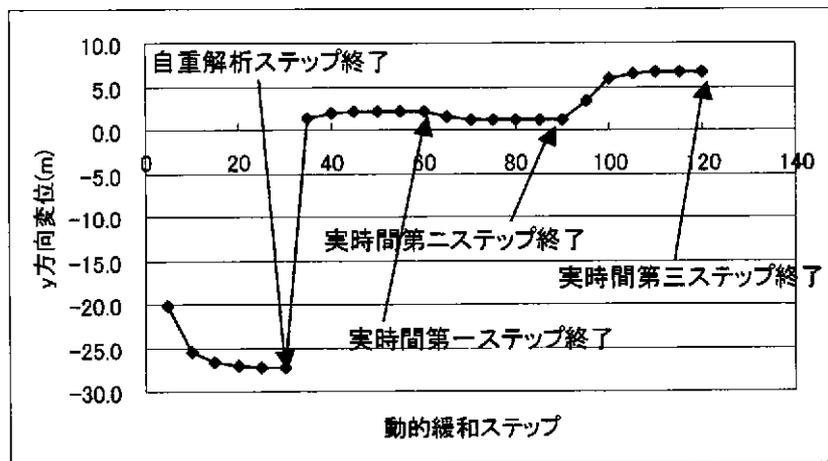


図 3.12 y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴

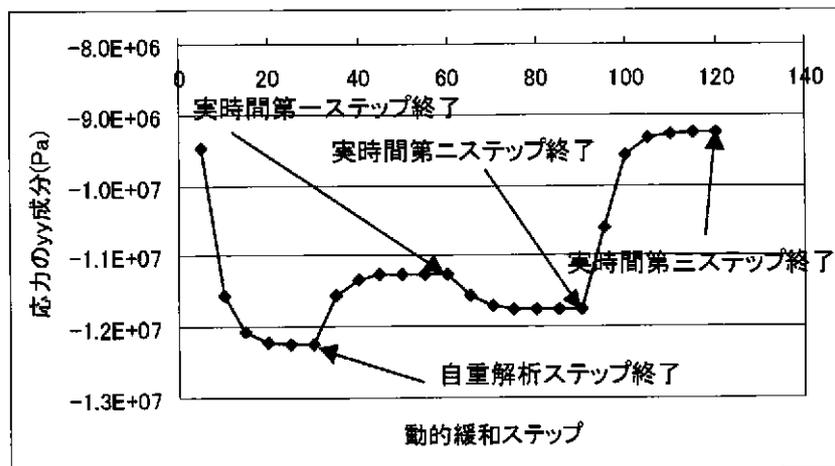


図 3.13 応力の yy 成分の動的緩和ステップでの履歴

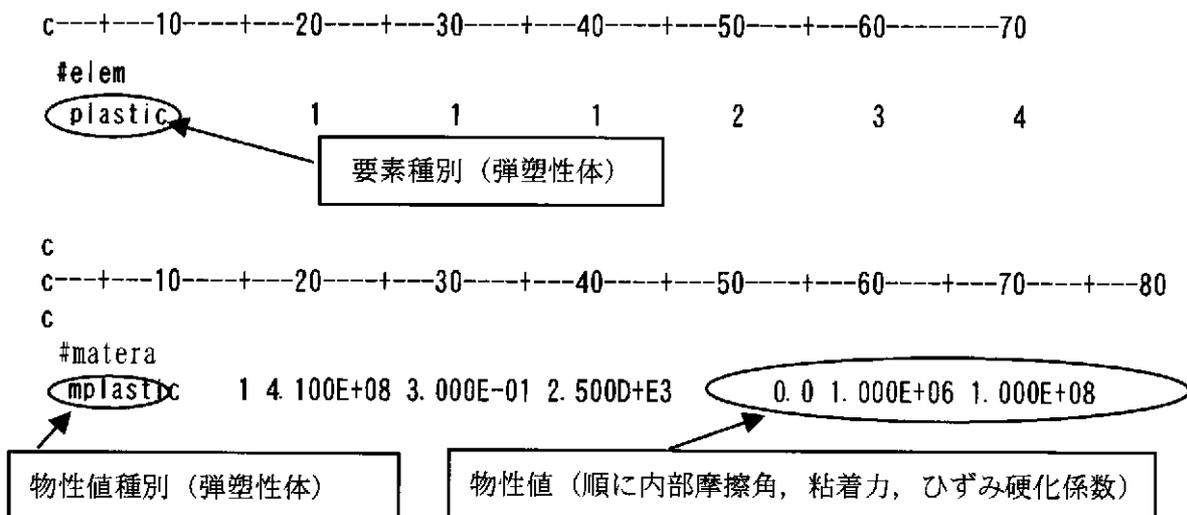
3.6.3 弾塑性解析の入力例

(1) 解析モデル

弾塑性解析の入力例として、3.6.1 節で取り上げたモデルと同一のモデルを用いる（図 3.5 および図 3.6 参照）。ヤング率 $E=410\text{MPa}$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ ，密度 $\rho=2.5\times 10^3\text{kg/m}^3$ は弾性解析の例と同一であり，内部摩擦角 $\phi=0.0$ （この場合，ドラッカー・プラッカーの構成則はミーゼスの構成則と一致する。），粘着力 $C=1.0\text{MPa}$ ，ひずみ硬化係数 $H'=100\text{MPa}$ とした。

(2) 入力ファイル

解析モデルは 3.6.1 節のモデルと同じなので，入力ファイルはほぼ同じであるが，要素データ入力 (#elem) および物性値データ (#matera) の項目が異なる。以下に「#elem」と「#matera」の項目の入力内容を示す。



上記のファイルは~/explicit/sample/chap3 にインストールされている (plastic.dat)。

(3) 解析結果

図 3.14 に節点番号 4 における y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴を示す。比較のため，弾性体での解析も併せて示す。実時間第 1 ステップおよび第 2 ステップでは，応力が塑性応力に達しないため，弾性変形のみが現れる。そのため，弾性体による解析と弾塑性体による解析ではまったく同一の結果になっている。第 3 ステップでは，塑性変形が生じるため，弾塑性体の解析結果は，弾性体の解析結果と比較して大きな変位が生じている。

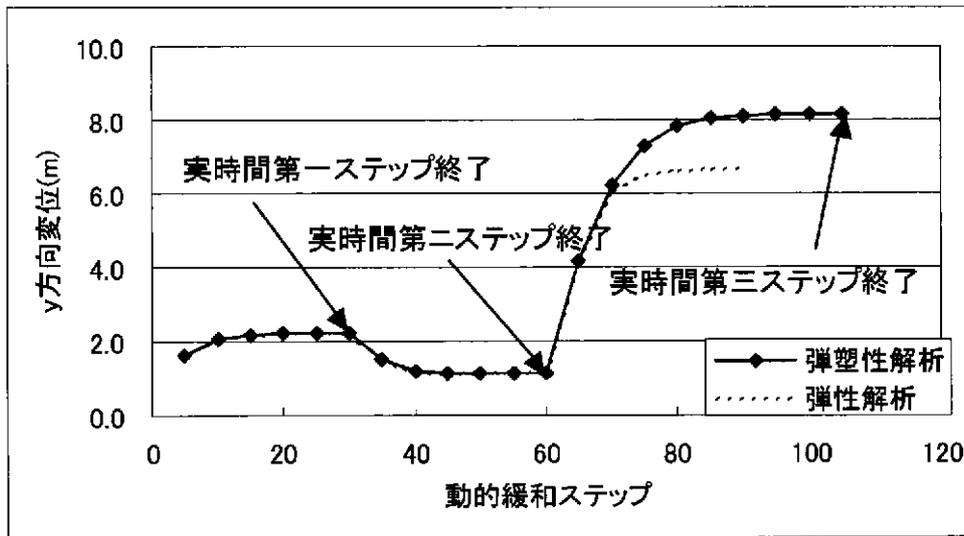


図 3.14 y 方向変位の動的緩和ステップでの履歴

3.6.4 粘弾性体の入力例

(1) 解析モデル

粘弾性解析の入力例として、3.6.1 節で取り上げたモデルと同一のモデルを用いる（図 3.5 参照）。構成方程式はマックスウェルモデルを用いて、緩和時間は 5s とした。ただし、境界条件として節点荷重ではなく、強制変位を+y 方向に与える。変位履歴を図 3.15 に示す。第 1 時間増分ステップで 1m 変位を増分させ、第 2、第 3 ステップで増分を 0m とする。

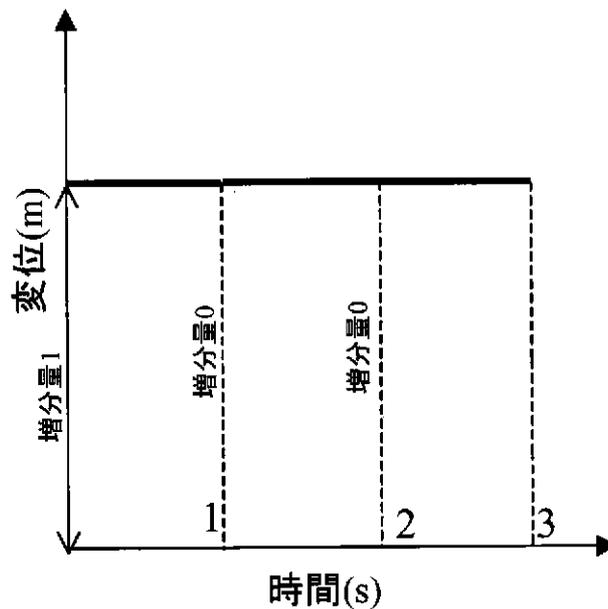
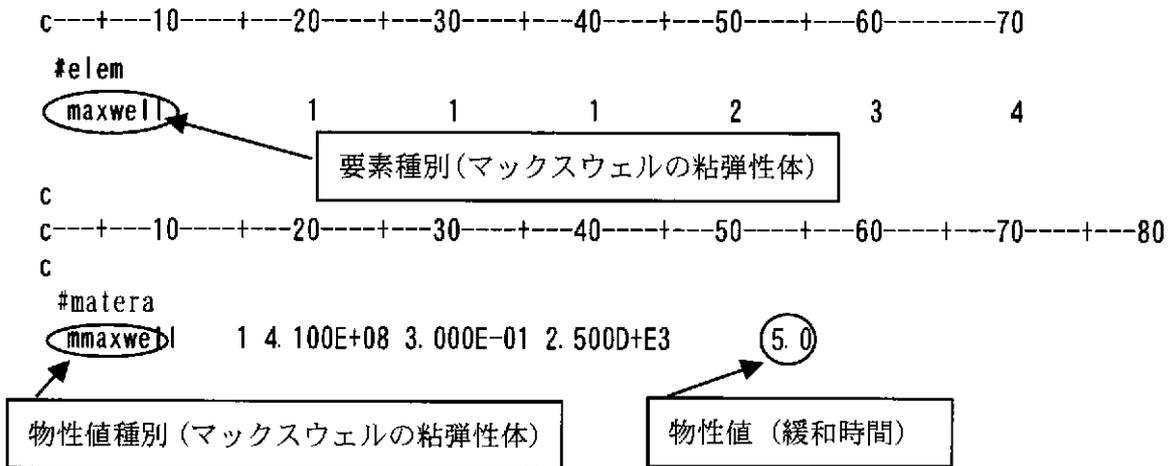


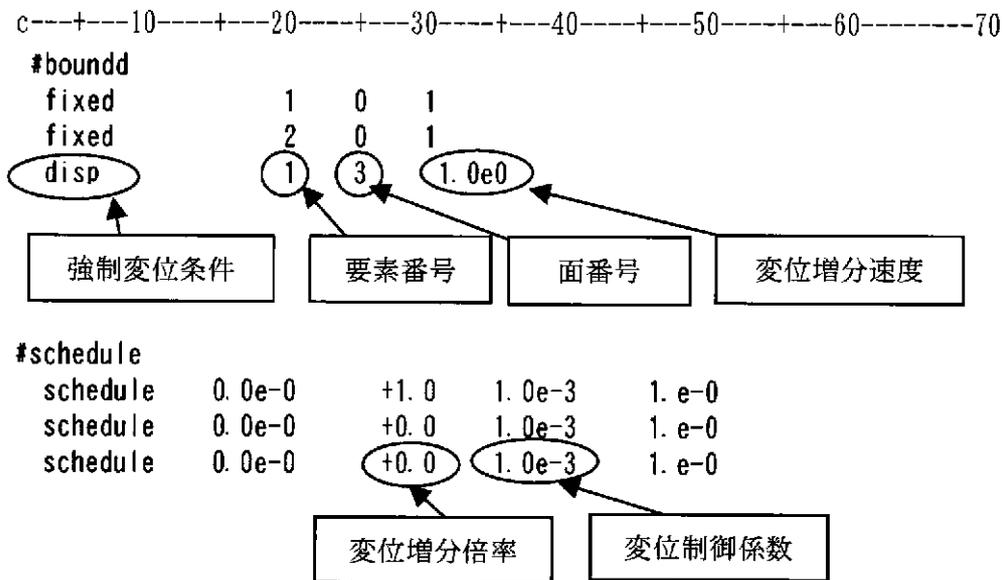
図 3.15 変位履歴

(2) 入力ファイル

解析モデルは 3.6.1 節のモデルと同じなので、入力ファイルはほぼ同じであるが、物性を弾性体から粘弾性体に変更したため、要素データ入力 (#elem) および物性値データ (#matera) の項目が異なる。以下に「#elem」と「#matera」の項目の入力内容を示す。



荷重制御から変位制御に変更し、変位増分の履歴を変更したため、「#boundd」および「#schedule」のコマンドを変更した。両コマンドは以下のように変更されている。



上記のファイルは~/explicit/sample/chap3 にインストールされている (maxwell.dat)。

ここでは、1要素の解析であったので、変位制御係数は 1.0×10^{-3} としたが、通常の解析では、線形弾性体、粘弾性体の解析では 1.0×10^{-6} 程度が妥当である。弾塑性解析が生じる場合には非線形性の強さに応じてさらに小さい値を用いる必要がある。

(3) 解析結果

図 3.16 に要素番号 1 の要素における応力の yy 成分の実時間ステップの履歴を示す。変位は全時間ステップで一定であるので、弾性体であれば応力は一定である。しかし、粘弾性体では、応力緩和現象により応力は時間の経過に伴い減衰する。本結果はその傾向がよく現れている。

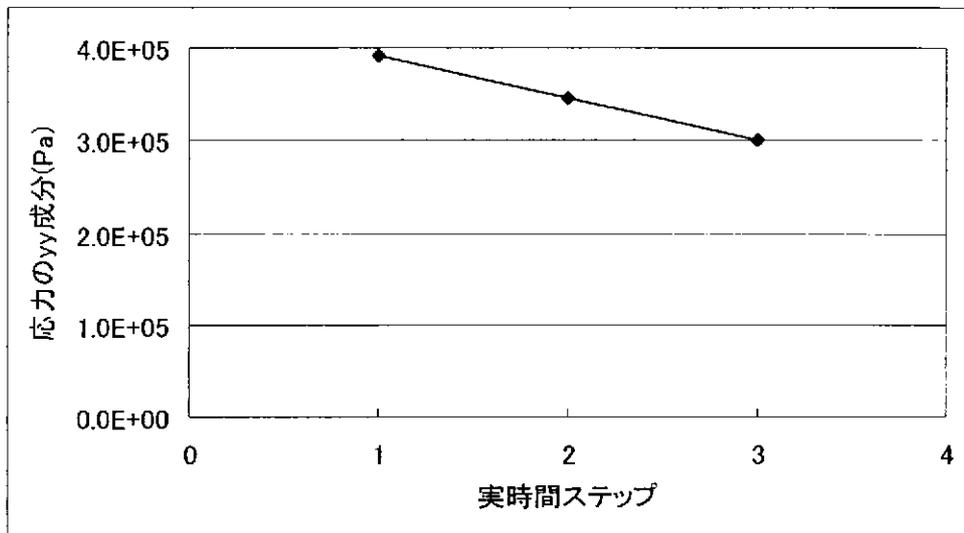


図 3.16 y 方向変位の実時間ステップでの履歴

4 出力機能

4.1 任意節点履歴データの出力

任意節点の履歴データは大コマンド##explicit 下の中コマンド#output 内の小コマンド ndhist および nddata によって出力される。hdhist は動的緩和ステップに対する履歴を、nddata は実時間ステップに対する履歴をそれぞれ出力する。出力される変数は変位と速度である。出力フォーマットは以下のとおり。

ステップ	x 方向変位	y 方向変位	x 方向速度	y 方向速度
(I14)	(E14.5)	(E14.5)	(E14.5)	(E14.5)
		⋮		
		⋮		
		⋮		

第1列のステップは ndhist では全実時間ステップに渡って通し番号で動的緩和ステップのステップ数が出力される。nddata では、実時間ステップ数が出力される。なお、このファイルはコマンド ndhist および nddata で指定された節点数だけ、指定された装置番号に出力される。

4.2 任意要素履歴データの出力

任意要素の履歴データは大コマンド##explicit 下の中コマンド#output 内の小コマンド nehist および nedata によって出力される。hehist は動的緩和ステップに対する履歴を、nedata は実時間ステップに対する履歴をそれぞれ出力する。出力される変数は応力の各成分と工学ひずみの各成分である。出力フォーマットは以下のとおり。

ステップ	応力 xx	応力 yy	応力 xy	応力 zz	ひずみ xx	ひずみ yy	ひずみ xy
(I14)	(E14.5)						
			⋮				
			⋮				
			⋮				

第1列のステップは nehist では全実時間ステップに渡って通し番号で動的緩和ステップのステップ数が出力される。nedata では、実時間ステップ数が出力される。なお、このファイルはコマンド nehist および nedata で指定された要素数だけ、指定された装置番号に出力される。

4.3 最大残差力履歴データの出力

最大残差力の履歴データは大コマンド##explicit 下の中コマンド#output 内の小コマンド residual によって出力される。出力フォーマットは以下のとおり。

ステップ	最大残差力
(I14)	(E14.5)
	⋮
	⋮
	⋮

第1列のステップは全実時間ステップに渡って通し番号で動的緩和ステップのステップ数
が出力される。なお、このファイルはコマンド residual で指定された装置番号に出力され
る。

4.4 AVS ファイルの出力

AVS データは大コマンド##explicit 下の中コマンド#output 内の小コマンド ravs および
vavs によって出力される。ravs では、実時間ステップの終了時の結果が出力され、vavs
では、動的緩和ステップの途中の結果が出力される。出力されるデータは節点変数として、
変位、要素変数として応力および工学ひずみである。出力フォーマットは以下のとおり。

節点数 nd	要素数 ne	2	7	0
(I8)	(I8)	(I4)	(I4)	(I4)
節点番号 1	x 座標	y 座標		0.0
(I8)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)
		⋮		
		⋮		
節点番号 nd	x 座標	y 座標		0.0
要素番号 1	1 quad	要素構成節点番号 1	⋯	要素構成節点番号 4
(I8)	(I2) (A5)			(4I8)
		⋮		
		⋮		
要素番号 ne	1 quad	要素構成節点番号 1	⋯	要素構成節点番号 4
2 1 1				
xdisp, m				
ydisp, m				
節点番号 1	x 方向変位	y 方向変位		

(I8)		(F14.5)		(F14.5)			
			⋮				
			⋮				
			⋮				
節点番号 nd		x 方向変位		y 方向変位			
7	1 1	1 1 1		1 1			
sxx,		N/m ²					
syy,		N/m ²					
sxy,		N/m ²					
szz,		N/m ²					
cxx,							
eyy,							
exy,							
要素番号 1	応力 xx	応力 yy	応力 xy	応力 zz	ひずみ xx	ひずみ yy	ひずみ xy
(I8)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)	(F14.5)
			⋮				
			⋮				
要素番号 ne	応力 xx	応力 yy	応力 xy	応力 zz	ひずみ xx	ひずみ yy	ひずみ xy

なお、このファイルはコマンド `ravs` および `vavs` で指定されたファイル数だけ、指定された装置番号に出力される。

4.5 標準出力

標準出力には各種入力ファイルによって入力されたパラメータが出力される。また、各コマンドの `iflag` を 0 以外の整数に設定することにより、座標データ、要素データ、荷重データなどの詳細な情報が出力される。また、現在の実時間ステップ数、動的緩和ステップ数、残差およびエネルギー残差を出力する。また、各種出力ファイルが出力された際にも標準出力に表示される。

4.6 出力例

本節では、3.6.1 節で示した入力例の出力結果を示す。

4.6.1 任意節点データ履歴の出力例

3.6.1 節で示した `ndhist` コマンドは

```
ndhist      1      5
            90     4
```

であるから、節点番号 4 (0km,1km) の変位の履歴を 5 ステップごとに装置番号 90 番に出力する。装置番号 90 番のファイルを以下に示す。

5	0.28466E+00	0.16461E+01	0.59323E-01	0.18360E+00
10	0.42797E+00	0.20766E+01	0.15259E-01	0.45775E-01
15	0.46374E+00	0.21839E+01	0.38029E-02	0.11409E-01
20	0.47265E+00	0.22106E+01	0.94782E-03	0.28435E-02
25	0.47487E+00	0.22173E+01	0.23623E-03	0.70869E-03
30	0.47543E+00	0.22190E+01	0.58876E-04	0.17663E-03
35	0.36290E+00	0.14881E+01	-0.35448E-01	-0.11986E+00
40	0.26924E+00	0.12041E+01	-0.10071E-01	-0.30208E-01
45	0.24564E+00	0.11333E+01	-0.25097E-02	-0.75291E-02
50	0.23976E+00	0.11156E+01	-0.62550E-03	-0.18765E-02
55	0.23829E+00	0.11112E+01	-0.15590E-03	-0.46769E-03
60	0.23793E+00	0.11101E+01	-0.38854E-04	-0.11656E-03
65	0.62385E+00	0.41667E+01	0.18722E+00	0.81211E+00
70	0.12192E+01	0.60358E+01	0.66525E-01	0.19947E+00
75	0.13751E+01	0.65033E+01	0.16573E-01	0.49719E-01
80	0.14139E+01	0.66199E+01	0.41306E-02	0.12392E-01
85	0.14236E+01	0.66489E+01	0.10295E-02	0.30884E-02
90	0.14260E+01	0.66561E+01	0.25658E-03	0.76974E-03

ステップ数 x 方向変位 y 方向変位 x 方向速度 y 方向速度

4.6.2 任意要素データ履歴の出力例

3.6.1 節で示した nehist コマンドは

```
nehist      1      5
            91      1
```

であるから、要素番号 1 の応力およびひずみの履歴を 5 ステップごとに装置番号 91 番に出力する。装置番号 91 番のファイルを以下に示す。

5	0.75154E+05	0.77388E+06	0.00000E+00	0.25471E+06
-0.56932E-03	0.16461E-02	0.00000E+00		
10	0.18779E+05	0.94366E+06	-0.70392E-10	0.28873E+06
-0.85595E-03	0.20766E-02	-0.44639E-18		
15	0.46805E+04	0.98596E+06	0.43310E-10	0.29719E+06
-0.92747E-03	0.21839E-02	0.27465E-18		
20	0.11665E+04	0.99650E+06	0.82897E-11	0.29930E+06
-0.94530E-03	0.22106E-02	0.52569E-19		
25	0.29074E+03	0.99913E+06	-0.46437E-12	0.29983E+06
-0.94974E-03	0.22173E-02	-0.29448E-20		

30	0.72462E+02	0.99978E+06	-0.46541E-12	0.29996E+06		
-0.95085E-03	0.22190E-02	-0.29514E-20				
35	-0.48587E+05	0.64965E+06	-0.73255E-12	0.18032E+06		
-0.72579E-03	0.14881E-02	-0.46454E-20				
40	-0.12393E+05	0.53718E+06	-0.86612E-12	0.15744E+06		
-0.53848E-03	0.12041E-02	-0.54925E-20				
45	-0.30888E+04	0.50927E+06	-0.73255E-12	0.15185E+06		
-0.49128E-03	0.11333E-02	-0.46454E-20				
50	-0.76983E+03	0.50231E+06	-0.74507E-12	0.15046E+06		
-0.47952E-03	0.11156E-02	-0.47249E-20				
55	-0.19187E+03	0.50058E+06	-0.74716E-12	0.15012E+06		
-0.47658E-03	0.11112E-02	-0.47381E-20				
60	-0.47820E+02	0.50014E+06	-0.74664E-12	0.15003E+06		
-0.47585E-03	0.11101E-02	-0.47348E-20				
65	0.29694E+06	0.20046E+07	-0.18158E-11	0.69045E+06		
-0.12477E-02	0.41667E-02	-0.11515E-19				
70	0.81851E+05	0.27545E+07	-0.15486E-11	0.85090E+06		
-0.24385E-02	0.60358E-02	-0.98207E-20				
75	0.20397E+05	0.29388E+07	-0.14180E-09	0.88776E+06		
-0.27502E-02	0.65033E-02	-0.89921E-18				
80	0.50837E+04	0.29847E+07	-0.36694E-10	0.89695E+06		
-0.28279E-02	0.66199E-02	-0.23270E-18				
85	0.12670E+04	0.29962E+07	0.10342E-09	0.89924E+06		
-0.28472E-02	0.66489E-02	0.65584E-18				
ステップ数 → 90	0.31579E+03	0.29991E+07	0.68434E-10	0.89981E+06		
-0.28521E-02	0.66561E-02	0.43397E-18				
ひずみ xx	ひずみ yy	ひずみ xy	応力 xx	応力 yy	応力 xy	応力 zz

4.6.3 最大残差力履歴の出力例

3.6.1 節で示した residual コマンドは

```
residual      5      94
```

であるから、最大残差力の履歴を 5 ステップごとに装置番号 94 番に出力する。装置番号 94 番のファイルを以下に示す。

⑤	0.14970E+09	ステップ数
10	0.37192E+08	
15	0.92696E+07	最大残差力
20	0.23103E+07	
25	0.57580E+06	
30	0.14351E+06	
35	0.99514E+08	
40	0.24544E+08	

```

45  0.61173E+07
50  0.15246E+07
55  0.37999E+06
60  0.94706E+05
65  0.67755E+09
70  0.16207E+09
75  0.40396E+08
80  0.10068E+08
85  0.25093E+07
90  0.62541E+06

```

4.6.4 AVS データの出力

3.6.1 節で示した avs コマンドは

```

vavs          1
              95      1      5

```

であるから、第1実時間ステップの動的緩和ステップ5ステップ目の結果が AVS ファイルとして出力される。装置番号 95 の出力結果を以下に示す。

```

4      1  2  7  0
1  0.00000E+00  0.00000E+00  0.00000E+00
2  1.00000E+03  0.00000E+00  0.00000E+00
3  1.00000E+03  1.00000E+03  0.00000E+00
4  0.00000E+00  1.00000E+03  0.00000E+00
1 1 quad      1      2      3      4
2      1      1
xdisp, m
ydisp, m
1  2.84660E-01  0.00000E+00
2 -2.84660E-01  0.00000E+00
3 -2.84660E-01  1.64614E+00
4  2.84660E-01  1.64614E+00
7  1  1  1  1  1  1  1
sxx, N/m^2
syy, N/m^2
sxy, N/m^2
szz, N/m^2
exx,
eyy,
exy,
1  7.51544E+04  7.73876E+05  0.00000E+00  2.54709E+05  -5.69320E-04
1.64614E-03  0.00000E+00

```

5 実行方法

5.1 実行方法

本プログラムは実行スクリプト `explicit` を実行することにより動作する。実行スクリプト `explicit` は `~/explicit/` にインストールされている。`explicit` は標準入力からの入力を要求し、標準出力へ情報を出力する。したがって、本プログラムは `~/explicit` に移動し、

```
./explicit <./入力ファイル> 出力ファイル
```

と入力することにより実行される。

5.2 節点数・要素数・境界条件数・領域数などの最大数の設定

本プログラムは、`~/explicit` にインストールされている `adjust.f` によって最大要素数などの設定を行う。`adjust.f` によって設定を行うパラメータは以下のとおり。

- ・ 最大節点数 (`mda`)
- ・ 最大要素数 (`mdb`)
- ・ 最大物性値グループ数 (`mdc`)
- ・ 最大荷重節点数 (`mdg`)
- ・ 最大固定節点数 (`mdf`)
- ・ 最大出力ファイル数 (`mdh`)
- ・ 最大入力ファイル行数 (`mdi`)
- ・ 最大実時間ステップ数の設定 (`mdk`)

なお、`adjust.f` のコンパイルおよびリンクは実行スクリプトの実行時に自動的に行う。詳細な `adjust.f` のフォーマットは 6.3 節を参照。

6 制限事項その他

6.1 開発環境

FORTRAN77 (一部 fortran 90)

6.2 動作環境

UNIX (核燃料サイクル機構殿指定の WS または PC で動作保証)

6.3 adjust.fのフォーマット

節点数・要素数・境界条件数などの最大数は adjust.fにおいて設定する。以下に adjust.fを示す。デフォルトの設定は下記のとおりである。

```
c
  subroutine adjust
c
  implicit  real*8 (a-h,o-z)
c
  common   /mainbb/mda, mdb, mdc, mdd, mde, mdf, mdg, mdh, mdi, mdj, mdk
  common   /maincc/nda, ndb, ndc, ndd, nde, ndf, ndg, ndh, ndi, ndj
  common   /maindd/mda3, mdg3
c
c
c--- maximum node number -----
c
  mda=100000 ← [ 最大節点数の設定 ]
c
c--- maximum element number -----
c
  mdb=100000 ← [ 最大要素数の設定 ]
c
c--- maximum material number -----
c
  mdc=100 ← [ 物性値グループの最大数の設定 ]
c
c--- maximum free dimensional number -----
c
  mda3=2*mda ← [ 最大自由度数 (最大節点数×2) の設定 ]
c
c--- maximum load node number -----
c
  mdg=400 ← [ 荷重節点の最大数の設定 ]
c
c--- maximum load freedom number -----
c
  mdg3=2*mdg ← [ 荷重の最大自由度の設定 ]
c
c--- maximum output file number -----
c
  mdh=1000 ← [ 出力ファイルの最大数の設定 ]
c
c--- maximum input data number -----
c
  mdi=1000000 ← [ 入力ファイルの最大行数の設定 ]
c
c
```

```

c— maximum fixed boundary node number -----
c
    mdf=10000 ←----- 固定節点の最大数の設定
c
c
c— maximum real step number -----
c
    mdk=10000 ←----- 最大実時間ステップ数の設定
c
c
c
    return
    end

```

6.4 開発プログラムのインストールについて

2001年度に開発された「2次元地殻変動プログラム」とサンプルデータについて、核燃料サイクル機構殿のWSまたはPC1台にインストールを行う。格納場所とファイル内容を以下に示す。

```

格納場所：~/explicit/explicit ・・・実行スクリプトファイル
            /adjust.f ・・・パラメータ設定ファイル
            /Makefile ・・・make ファイル
            /src/*.f ・・・プログラムソースファイル
            /obj/adjust.o ・・・パラメータ設定オブジェクトファイル
            /main000.o ・・・メインルーチンオブジェクトファイル
            /libfnd.a ・・・ライブラリーファイル
            /sample/chap3/*.dat ・・・サンプル入力データファイル
            /chap7/*.dat ・・・サンプル入力データファイル

```

6.5 制限事項

- ・シングル CPU での解析を前提とする。
- ・adjust.f で設定可能な最大節点数・要素数は 9,999,999 である。
- ・2次元平面ひずみ条件を前提とする。

7 試験結果

本章では、本プログラムの基本機能の試験結果を報告する。まず、弾性波動解析を行い、動的緩和法のプログラム開発に必要な陽的動解析機能の検証を行う。さらに、線形弾性体解析機能、弾塑性体解析機能、粘弾性体（マックスウェルの構成則および、べき乗則の構成則）解析機能、自重解析機能の各機能の検証を行う。各検証とも1次元の解析を行い、理論解との比較したのち、2次元解析を行い、汎用ソフト「FLAC」による解析結果と比較を行う。

7.1 弾性波動解析による陽的動解析機能の検証

本プログラムは、通常有限要素法と異なり、非線形解析手法として動的緩和法を用いている。この手法では、仮想的な密度・減衰係数を設定し、動解析を行う。本節では、動的緩和で用いられる仮想減衰係数 c を 0 とし、通常陽的動解法スキームと同等なソルバーに変更し、本スキームが正確に陽的動解析が可能かどうかを検証する。陽的動解析の検証問題として弾性波動解析を取り上げる。

7.1.1 検証モデル

図 7.1 に検証モデルを示す。1km×100km の弾性柱の左端($x=0$)に式(7.1)で与えられるリッカー波による x 方向変位を与え、弾性波が伝播する解析を行った。解析格子は格子間隔 1km の正方形要素を用いた。なお、物性値はヤング率 $E=4.1 \times 10^{10}$ Pa, ポアソン比 $\nu=0$ である。ここで、 τ_r はリッカー波の主要周期であり、ここでは $\tau_r=100$ s とした。

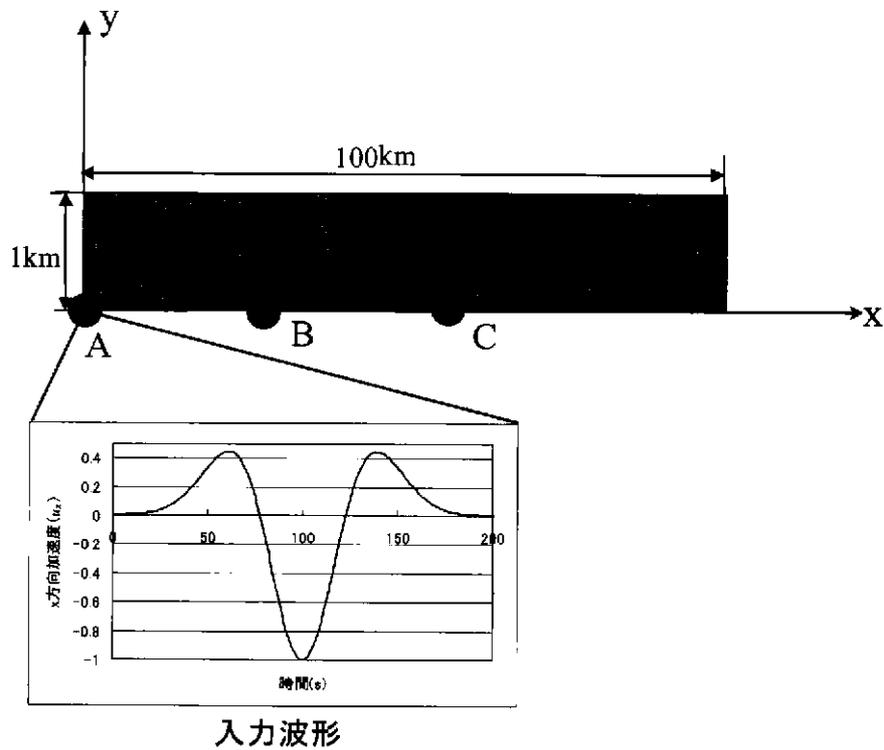


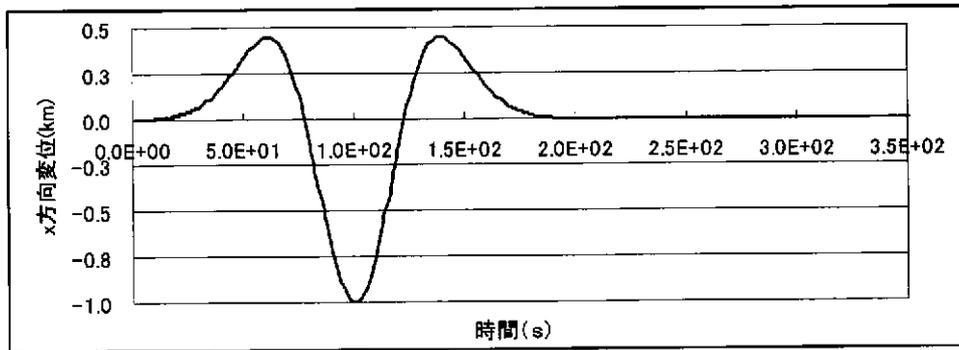
図 7.1 検証モデル

$$\tau = \pi \frac{\tau_s - t}{\tau_s}$$

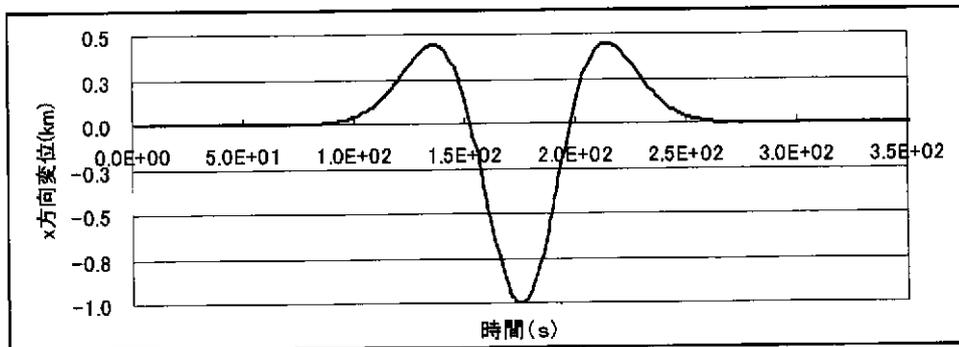
$$u_x = (\tau^2 - 1) \exp(-\tau) \quad (7.1)$$

7.1.2 解析結果

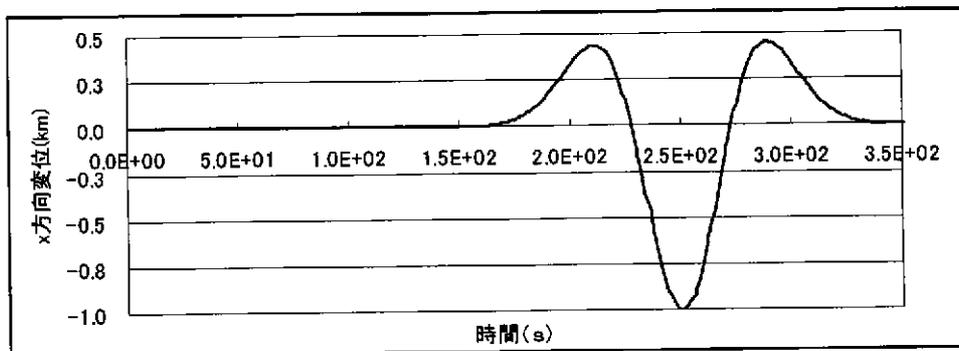
図 7.2 に弾性波伝播の解析結果を示す。(a), (b), (c)はそれぞれ図 7.1 の点 A (x=0km), 点 B (x=30km), 点 C (x=60km) における x 方向変位の時刻歴である。点 A で入力された弾性波が点 B, 点 C へと形状を変化させずに伝播している。これにより, 本プログラムが, 陽解法による動的弾性解析を良好に行うことが可能であることが分かる。



(a) 点 A ($x=0\text{km}$)



(b) 点 B ($x=30\text{km}$)



(c) 点 C ($x=60\text{km}$)

図 7.2 弾性波の伝播

7.2 線形弾性体解析機能の検証

7.2.1 1次元解析による検証

(1) 検証問題

線形弾性体解析機能の1次元検証問題として、図 7.3 の図で示すように弾性体の右端に10MPaの分布引張り荷重を付加した場合の解析を行った。物性値はヤング率 $E=4.1 \times 10^{10}$ Pa, ポアソン比 $\nu=0$ である。また格子間隔は1kmである。

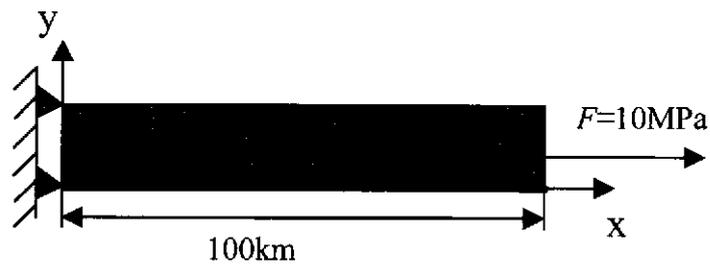


図 7.3 検証問題

(2) 解析結果

図 7.4 および図 7.5 に動的緩和反復過程における残差カノルムとエネルギー残差の変化を示す。1500 ステップではほぼ収束していることが分かる。

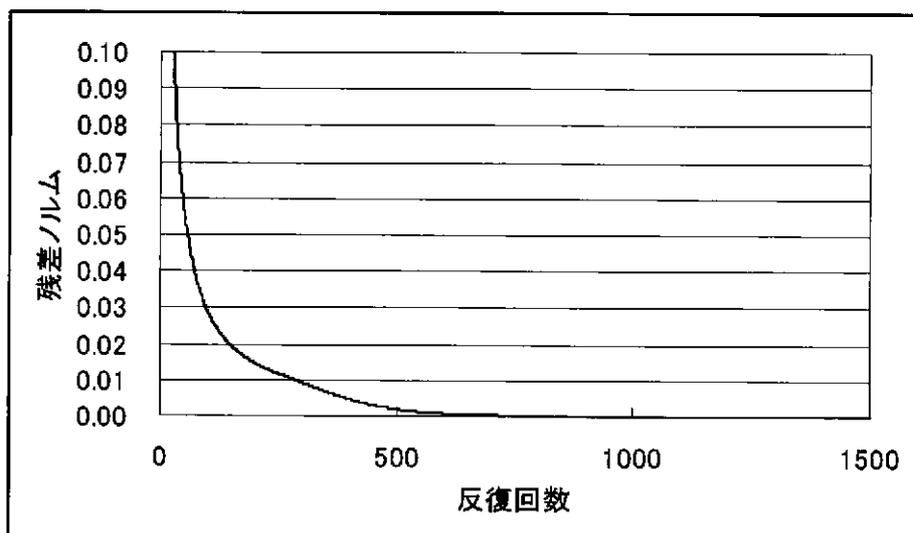


図 7.4 残差カノルムの収束状況

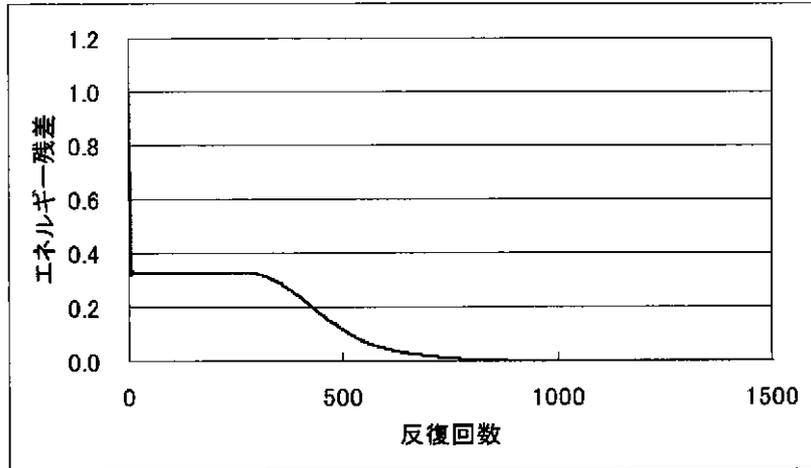


図 7.5 エネルギー残差の収束状況

図 7.6 に収束後の x 軸上における x 方向変位の分布を示す。横軸が x 軸上の位置であり、縦軸が x 方向変位である。比較のため、次式で表される材料力学による理論解と併せて示す。ここで、 $L(x)$ は弾性柱の x の地点における x 方向変位である。本解析結果は理論解と良好に一致し、本プログラムが分布荷重下の弾性解析に対し良好な数値解を与えることが分かる。

$$L(x) = \frac{\sigma}{E} x \quad (7.2)$$

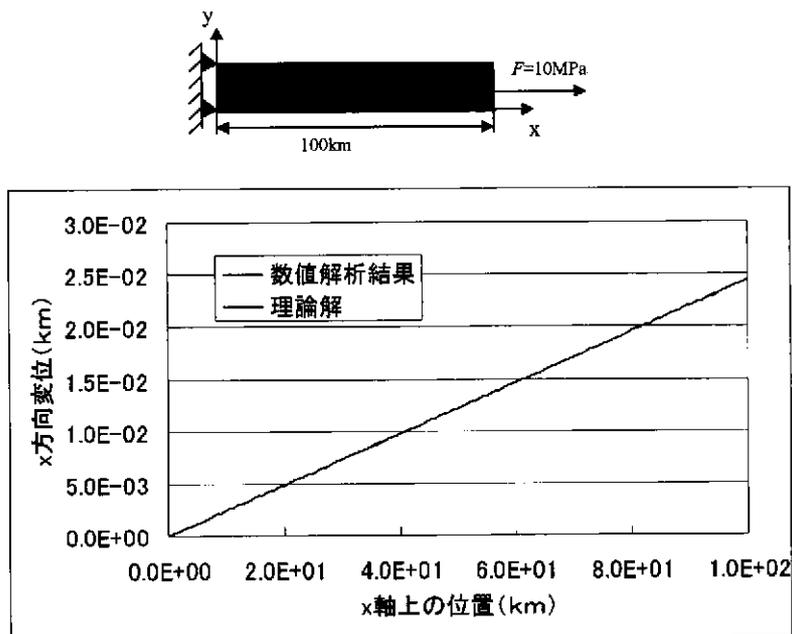


図 7.6 x 軸上における x 方向変位の分布

なお、この検証問題のサンプルデータは
~/explicit/sample/chap7/elastic1.dat
にインストールしてある。

7.2.2 2次元解析による検証

(1) 検証モデル

線形弾性体解析機能の2次元検証問題として、図 7.7 の図で示すように弾性体の右端に 1.0MPa の分布圧縮荷重を付加した場合の解析を行った。物性値はヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ である。また格子間隔は 1km である。解析格子図を図 7.8 に示す。拘束条件は $x=0$ 面および $y=0$ 面でスライドの拘束条件を与えた。

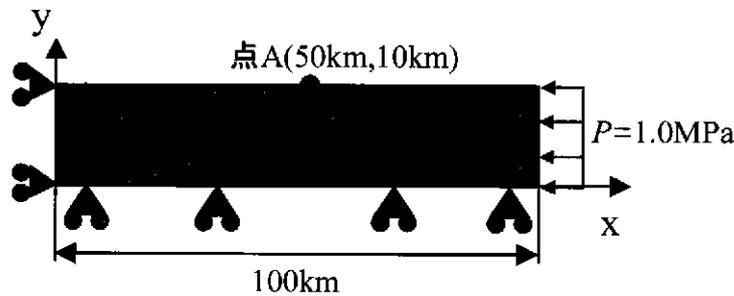


図 7.7 解析モデル

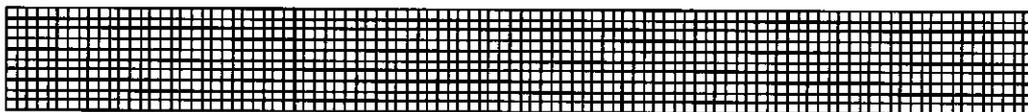


図 7.8 解析格子

(2) 解析結果

図 7.9 に最大残差力の履歴を示す。比較のため、汎用ソフト「FLAC」を用いて、同一の解析条件、解析格子で解析を行った結果を併せて示す。本解析結果は 1,000 回程度の反復で解が収束しているが、FLAC では、解が収束するために 2,000 回以上の反復が必要である。また、FLAC の結果では、収束過程においてやや不安定な振動が生じている。動的緩和法では、仮想的に導入する減衰係数の決定方法に自由度があり、その決定法により、収束速度・安定性に相違が生じる。動的緩和法における収束性の点では、本プログラムは FLAC よりも性能が良いといえる。

図 7.10 および図 7.11 に点(50km,10km) (図 7.8 における点 A) における x 方向変位と y 方向変位を示す。比較のため、FLAC の解析結果も併せて示す。十分に解が収束した後の比較すると、本プログラムによる解析結果は x 方向変位, y 方向変位ともに FLAC による解析結果と良好に一致し、本プログラムの線形弾性解析機能が 2 次元解析においても正常に動作していることが確認された。また、本プログラムが FLAC と比較して少ない反復回数で収束することがこれらの図からも読み取ることが出来る。

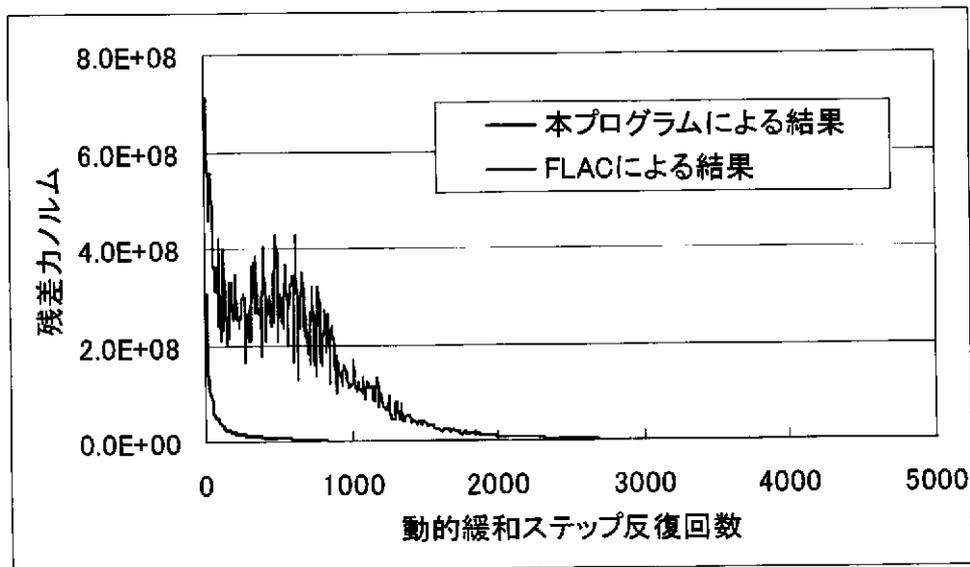


図 7.9 最大残差力の履歴

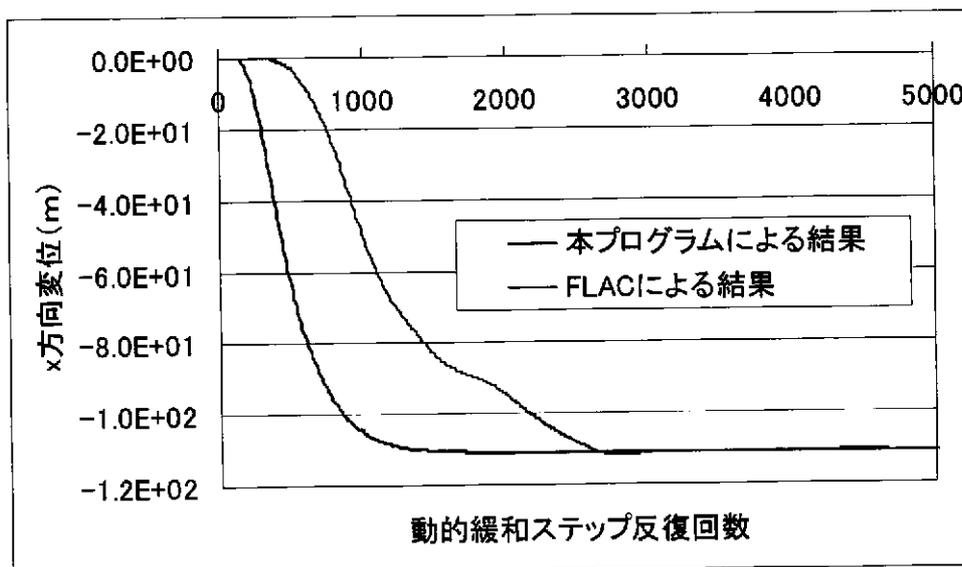


図 7.10 点 A(50km,10km)における x 方向変位の履歴

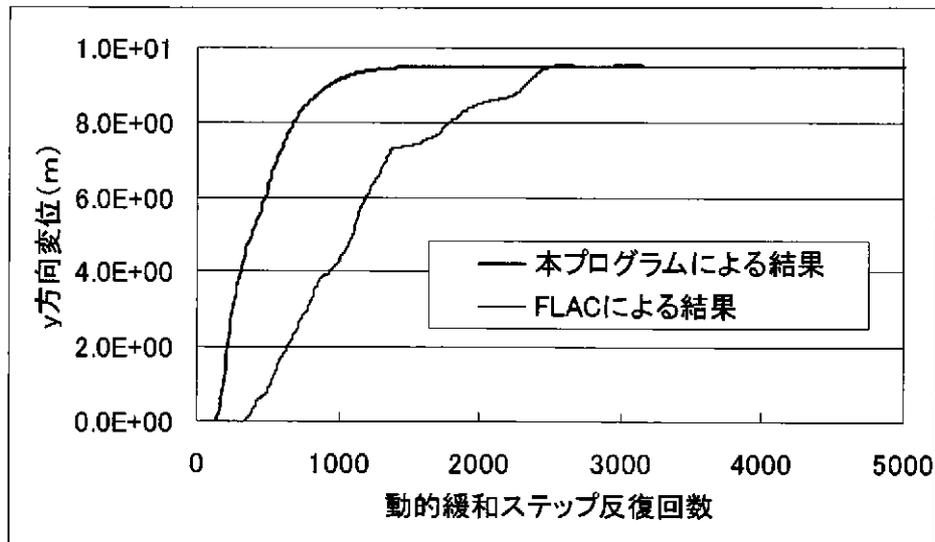


図 7.11 点 A(50km,10km)における y 方向変位の履歴

なお、この検証問題のサンプルデータは
 ~/explicit/sample/chap7/elastic2.dat
 にインストールしてある。

7.3 弾塑性解析機能の検証

7.3.1 1次元解析による検証

(1) 検証問題

弾塑性解析機能の1次元検証問題として、図 7.12 の図で示すように弾性体の右端に $1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ まで段階的に荷重を付加した場合の解析を行った。物性値はヤング率 $E=4.0 \times 10^{10} \text{Pa}$ 、ポアソン比 $\nu=0$ 、内部摩擦角 $\phi=0$ 、ひずみ硬化係数 $H'=1.0 \times 10^{10} \text{Pa}$ 、粘着力 $C=2.26 \times 10^4 \text{Pa}$ である。また格子間隔は 1km である。

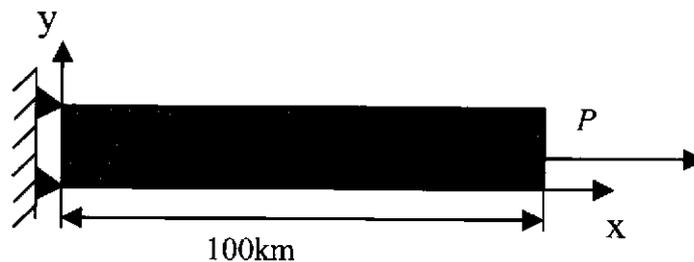


図 7.12 検証問題

(2) 検証結果

図 7.13 にひずみと応力との関係を示した図を示す。比較のため、1次元の厳密解を示す。なお、1次元の厳密解は次式で与えられる。

$$\text{弾性域} : \sigma = E\varepsilon$$

$$\text{弾塑性域} : \sigma = \frac{H'E}{H'+E}(\varepsilon - \varepsilon_p) + \sigma_Y \quad (7.3)$$

ここで、 σ は一軸応力、 ε はひずみ、 ε_p は塑性が生じるひずみ、 σ_Y は塑性応力である。本解析は弾性域では厳密解と良好に一致している。しかし、弾塑性域では、定性的には一致しているが、定量的には本解析結果は厳密解と比較して若干勾配が大きくなっている。これは、弾塑性域ではポアソン比を0としたx軸方向への一軸変形でもy方向への変形が生じるため、厳密な1次元問題にはならないことが原因であると考えられる。この点を考慮すると、本解析結果は良好な解析結果であるといえる。

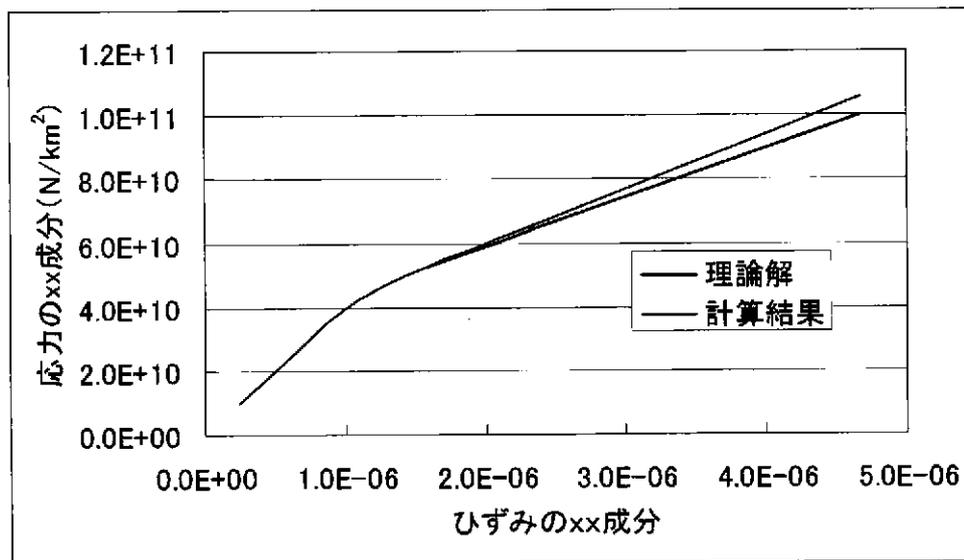


図 7.13 ひずみの xx 成分と応力の xx 成分の関係

なお、この検証問題のサンプルデータは
~/explicit/sample/chap7/plastic1.dat
にインストールしてある。

7.3.2 2次元による検証

(1) 検証モデル

線形弾性体解析機能の2次元検証問題として、図 7.14 の図で示すように弾性体柱の一部に弾塑性体があるモデルの右端に1.0MPaの分布圧縮荷重を付加した場合の解析を行った。物性値は弾性体部で、ヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、弾塑性体部で、ヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、内部摩擦角 30° 、粘着力 0.1MPa 、ひずみ硬化係数 $H'=0$ である。また格子間隔は 1km である。拘束条件は $x=0$ 面および $y=0$ 面でスライドの拘束条件を与えた。

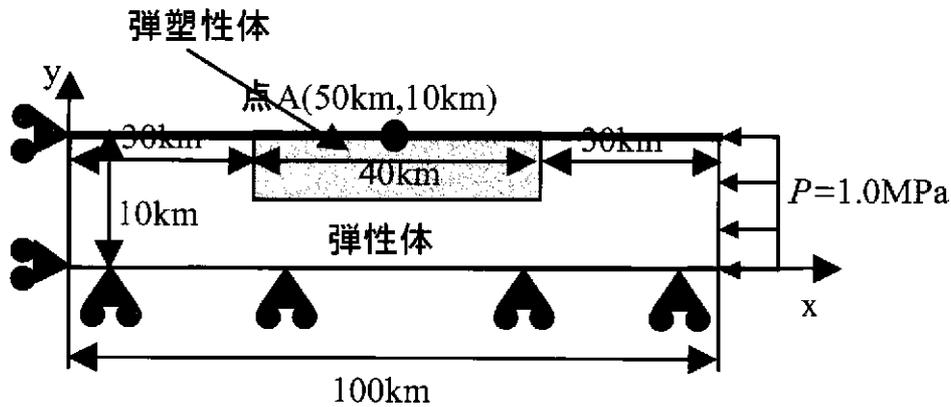


図 7.14 検証モデル

(2) 解析結果

図 7.15 と図 7.16 に、それぞれ最大残差力および点(50,10) (図 7.14 における点 A) における応力の xx 成分の履歴を示す。比較のため、汎用ソフト「FLAC」を用いて、同一の解析条件、解析格子で解析を行った結果を併せて示す。非線形の弾塑性解析の場合でも線形弾性問題と同様、本プログラムは FLAC よりも収束性能が良いといえる。

図 7.17 に $y=10\text{km}$ 面(図 7.14 における赤色線)上の y 方向変位分布を示す。 $x=30, 70\text{km}$ の地点が弾性体と弾塑性体の境界である。塑性域に入ると塑性変形を起こし、 y 方向に大きく変位している。この計算結果は FLAC の解析結果とよく一致している。

図 7.18～図 7.20 に $y=10\text{km}$ 面上の応力分布を示す。図 7.18 は xy 成分、図 7.19 は yy 成分、図 7.20 は xx 成分である。 x 方向に一軸圧縮荷重が加わっているため、弾性体と弾塑性体の境界以外は x 方向のみ強い応力が生じ、他の成分は 0 に近い値を示している。 xx 成分の応力では、弾塑性体ではヤング率が低下するため弾性域と比較して応力の絶対値が低くなっている。弾性体と弾塑性体の境界近傍で変位が急速に変化するため、大きなひず

みが生じ、強い応力の特異性が見られる。これらの結果は、FLAC による解析結果とよく一致し、本プログラムの弾塑性解析機能が良好に動作していることが確認された。

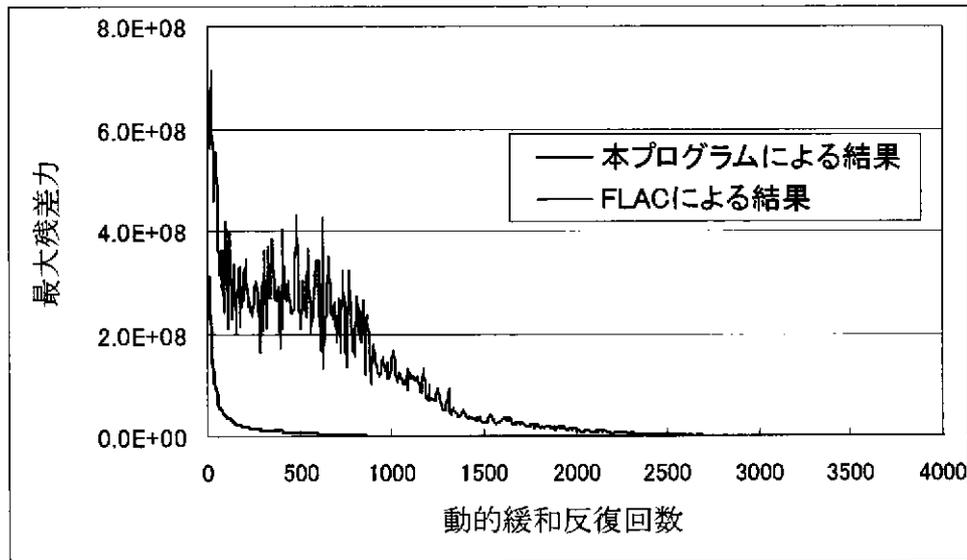


図 7.15 最大残差力の履歴

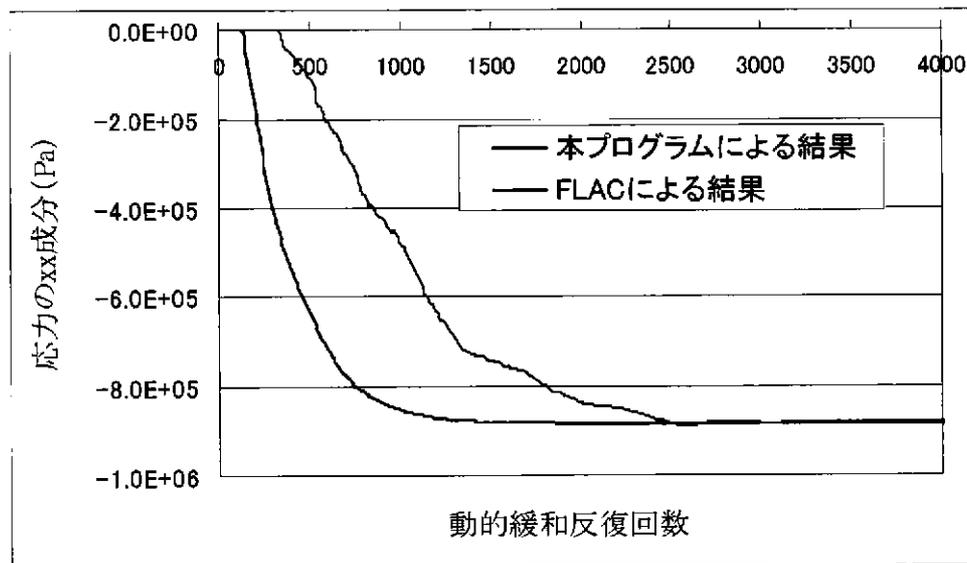


図 7.16 点 A(50,20)における応力の yy 成分の履歴

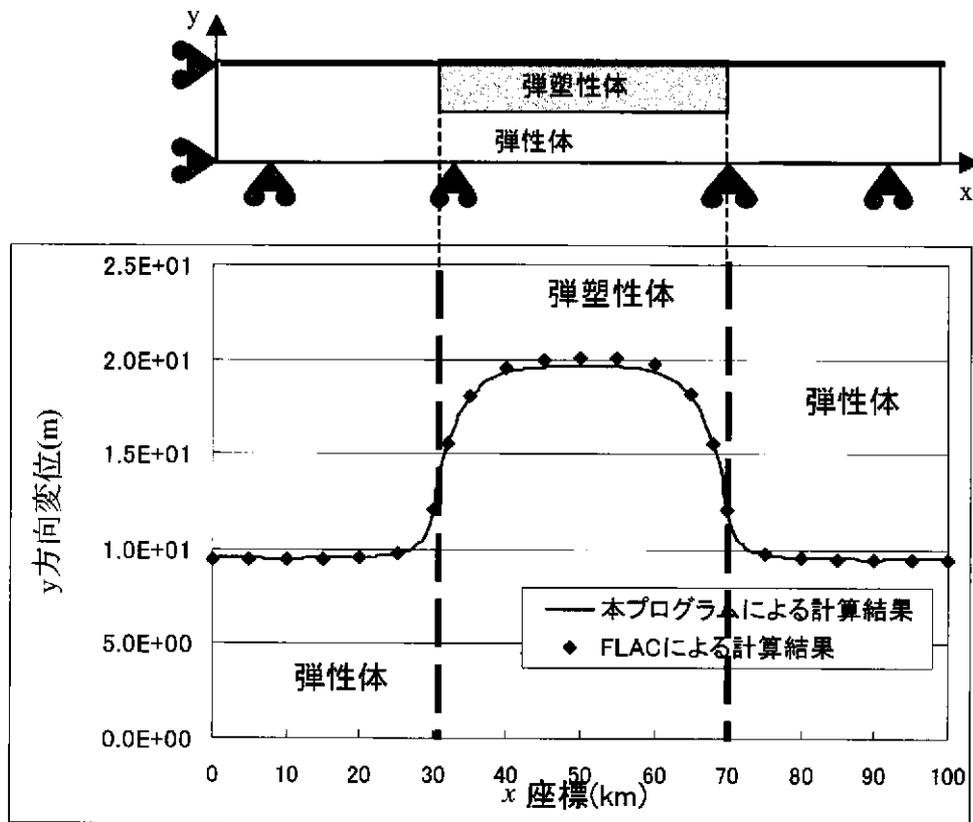


図 7.17 $y=10\text{km}$ 面上の y 方向変位

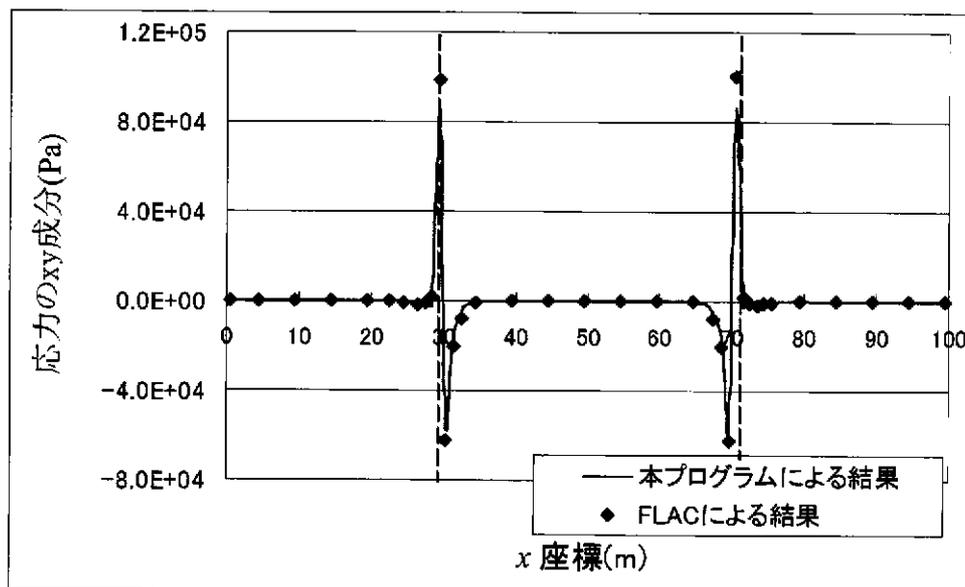


図 7.18 $y=10\text{km}$ 面上の応力の xy 方向成分

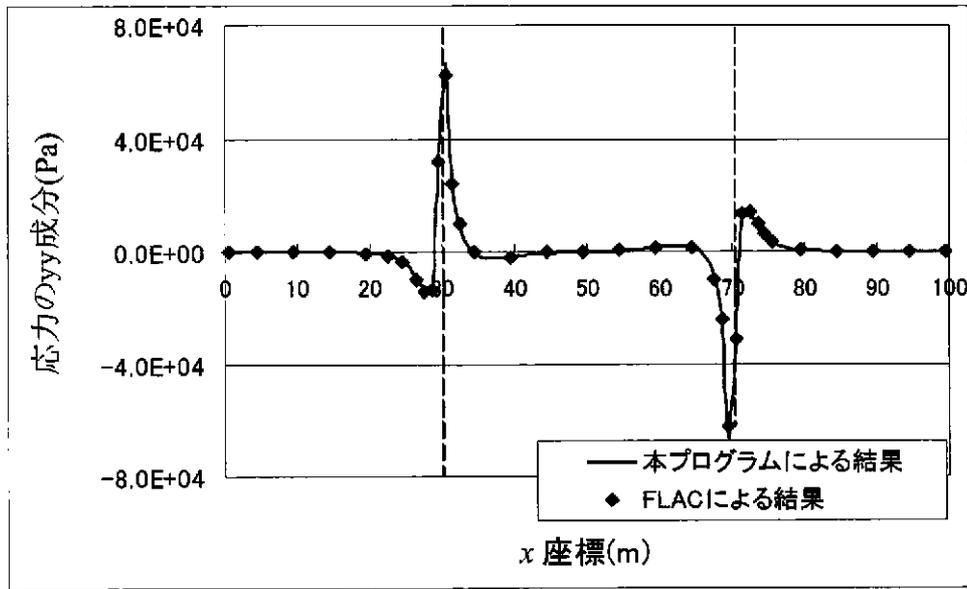


図 7.19 $y=10\text{km}$ 面上の応力の yy 方向成分

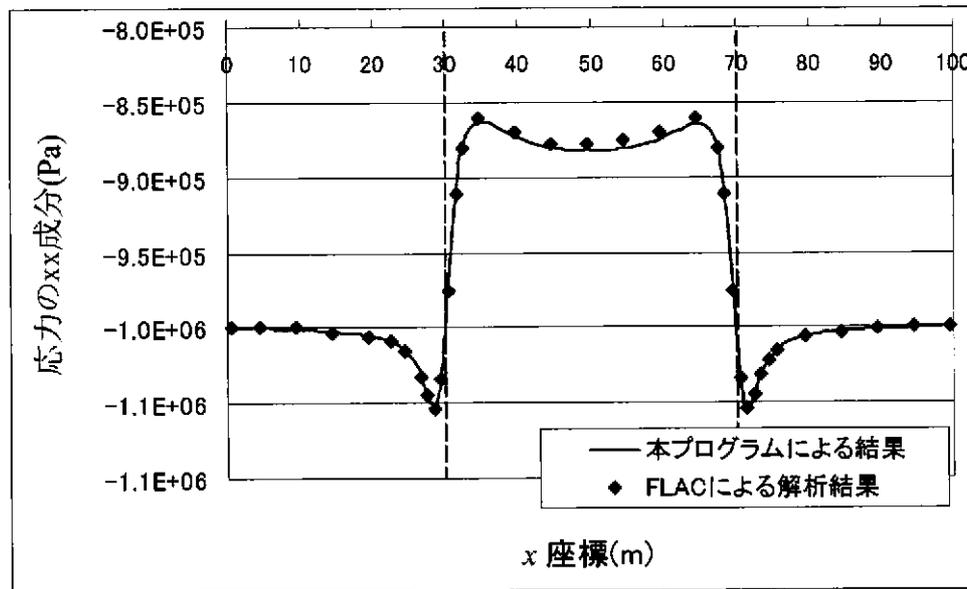


図 7.20 $y=10\text{km}$ 面上の応力の xx 方向成分

なお、この検証問題のサンプルデータは
`~/explicit/sample/chap7/plastic2.dat`
 にインストールしてある。

7.4 粘弾性体（マックスウェルモデル）の検証結果

7.4.1 1次元解析による検証

(1) 検証問題

マックスウェルモデルの機能の1次元検証問題として、図 7.21 の図で示すように弾性体の右端に $1.3 \times 10^4 \text{Pa}$ の分布引張り荷重を付加した場合の解析を行った。粘弾性体では、一定荷重を付加しつづけると、時間の経過とともにひずみが増加するクリープ現象が生じる。本検証では、このクリープ現象の解析を行い、1次元の厳密解と比較して本プログラムの粘弾解析の妥当性を確認する。なお、物性値はヤング率 $E=4.0 \times 10^{10} \text{Pa}$ 、ポアソン比 $\nu=0$ 、緩和時間は 10 (s) である。また格子間隔は 1 km である。

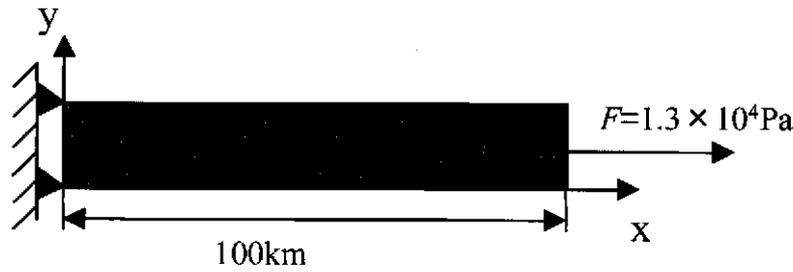


図 7.21 検証問題

(2) 検証結果

図 7.22 にクリープ解析におけるひずみの時刻歴を示す。比較のため、1次元のマックスウェル要素の厳密解を併せて示す。なお、1次元の厳密解は次式で表される。

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \frac{\sigma'}{2G} \left(1 + \frac{t}{\lambda} \right) + \varepsilon_v \\ &= \frac{\sigma}{3G} \left(1 + \frac{t}{\lambda} \right) + \frac{\sigma}{3K}\end{aligned}\tag{7.4}$$

ここで、 σ は短軸応力、 σ' は偏差応力、 ε_v は体積ひずみ、 G はせん断弾性係数、 K は体積弾性係数、 λ は緩和時間である。本解析結果は厳密解と良好に一致し、本プログラムのクリープ解析が良好に行われたことが確認された。なお、この例題は

`~/explicit/sample/chap7/maxwell1.dat`

にインストールしてある。

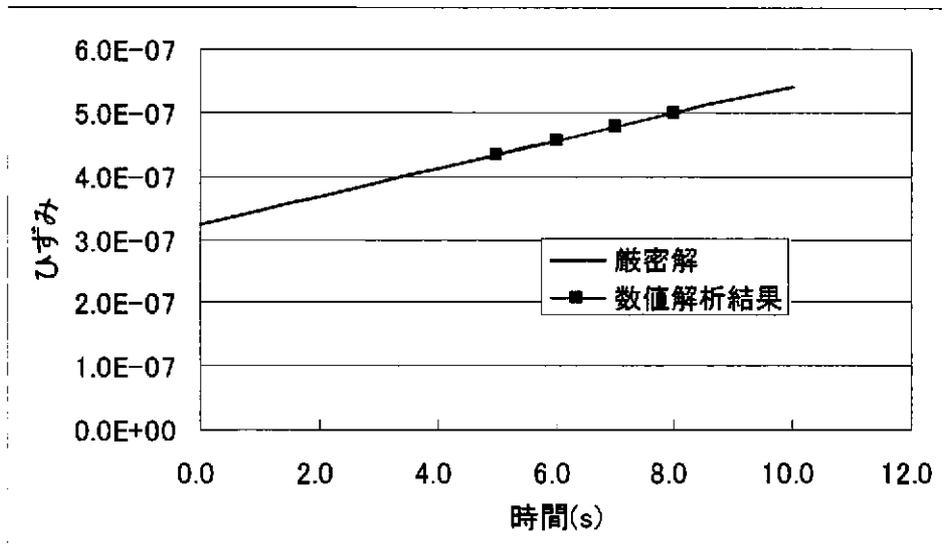


図 7.22 クリープ解析

7.4.2 2次元解析による検証

(1) 検証モデル

粘弾性解析機能（マックスウェルモデル）の2次元検証問題として、図 7.23 の図で示すように角柱の上半分が弾性体、下半分が粘弾性体であるモデルの右端に -0.1m/年 の強制変位速度を付加した場合の解析を行った。物性値は弾性体部で、ヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、粘弾性体部で、ヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、緩和時間 $\lambda=100$ 年である。また格子間隔は 1km である。拘束条件は $x=0$ 面および $y=0$ 面でスライドの拘束条件を与えた。

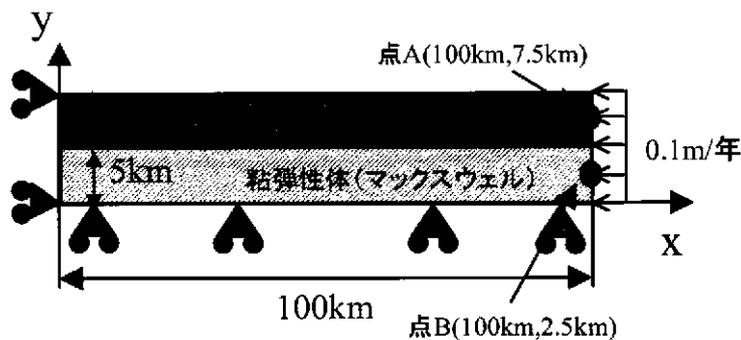


図 7.23 検証モデル

(2) 検証結果

図 7.24 および図 7.25 に粘弾性域の右端 (図 7.23 の点 B) における応力の xx 成分の時刻歴を示す。図 7.24 は FLAC の解析において時間刻み幅を 1.56×10^6 s とした場合、図 7.25 は FLAC の解析において時間刻み幅を 3.95×10^6 s とした場合の解析結果である。両図とも、本プログラムによる解析結果では時間刻み幅は 6.31×10^6 s とした。粘弾性体では、変形が進展しても、応力緩和現象により、応力がある一定値に達するとそれ以上応力が増加しない。時間が十分に経過した時点では、本プログラムによる結果は FLAC による結果とよく一致したが、応力が増加する過渡状態では、時間刻み幅が大きい場合で、FLAC の計算に数値振動が見られた。これは、FLAC の粘弾性解析における時間刻み幅は動的緩和法における仮想的な時間刻み幅をそのまま用いており、残差が大きい計算初期では、正しい解が得られないためである。そのため、計算初期でも精度の良い解析を行うためには、1 ステップあたりの残差が大きくなるように十分に小さい時間刻み幅を用いる必要がある。それに対し、本プログラムでは、実時間のステップごとに動的緩和ステップの収束解析を行う。これにより、実時間 1 ステップあたりの計算時間は増加するものの、時間刻み幅に大きな値を設定した場合でも十分精度の良い解析が可能である。

図 7.26 に弾性体域の右端 (図 7.23 の点 A) での応力の xx 成分の時刻歴を示す。図 7.24 および図 7.25 の粘弾性域と異なり、応力緩和現象が生じないため、変形が進展するに伴い、応力は単調に増加している。

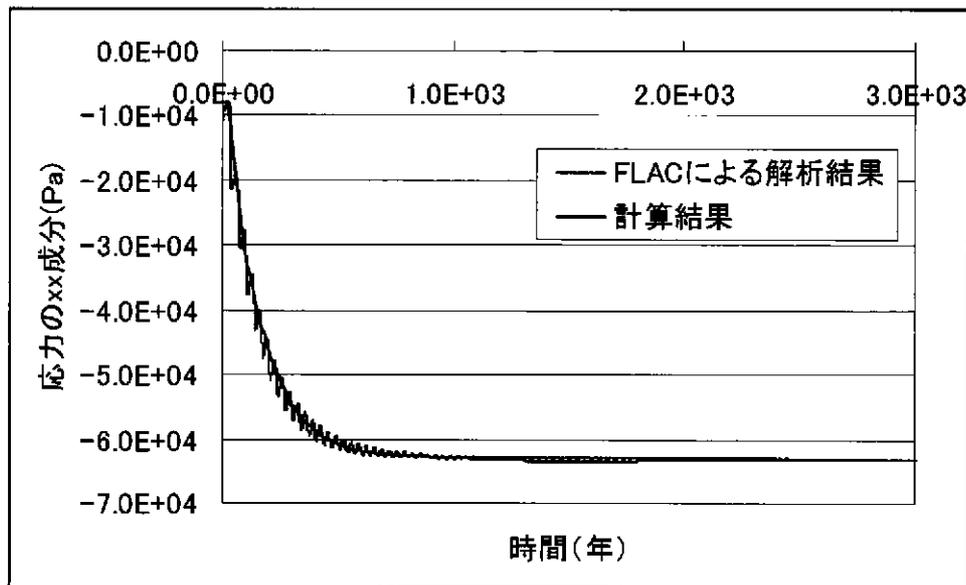


図 7.24 粘弾性域 (点 B) における FLAC の時間刻み幅 1.56×10^6 s、本プログラムの時間刻み幅 6.31×10^6 s の場合の応力の xx 成分の時刻歴

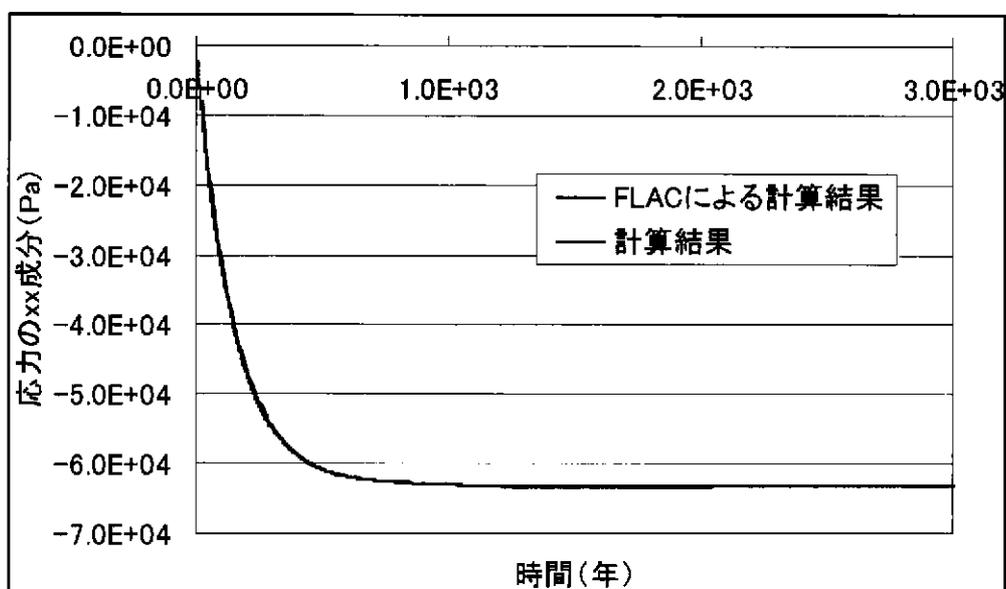


図 7.25 粘弾性域 (点 B) における FLAC の時間刻み幅 3.95×10^6 s, 本プログラムの時間刻み幅 6.31×10^8 s の場合の応力の xx 成分の時刻歴

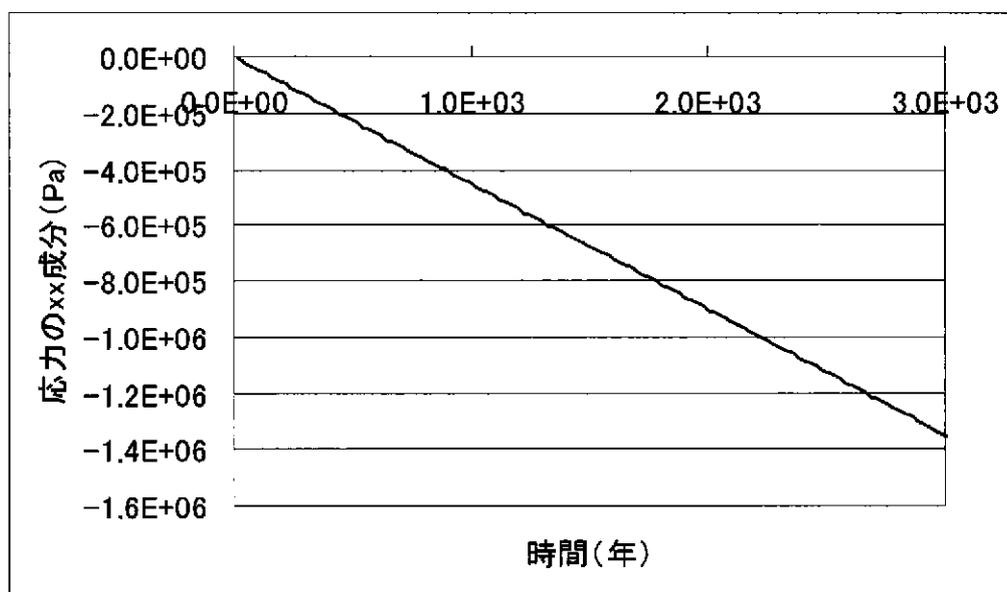


図 7.26 粘弾性域 (点 A) における応力の xx 成分の時刻歴

図 7.27 と図 7.28 に 3,000 年における $x=100$ km 面上の y 方向変位と応力の xx 成分を示す。比較のため、FLAC による解析結果を併せて示す。粘弾性域では、応力緩和現象により応力の値が低くなっている。また、粘弾性域では y 方向へのひずみが大きくなるため、 y

方向の変位の勾配が大きくなっている。これらの結果は FLAC の解析結果と良好に一致し、本プログラムのマックスウェルモデルの粘弾性体解析機能は 2 次元計算でも良好に機能することが確認された。

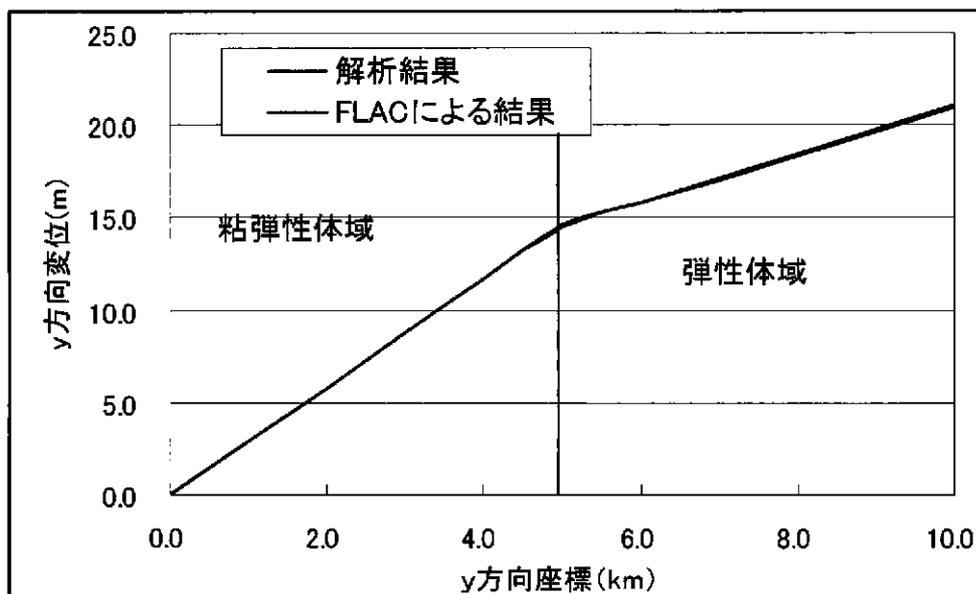


図 7.27 3,000 年における $x=100\text{km}$ 面上の y 方向変位

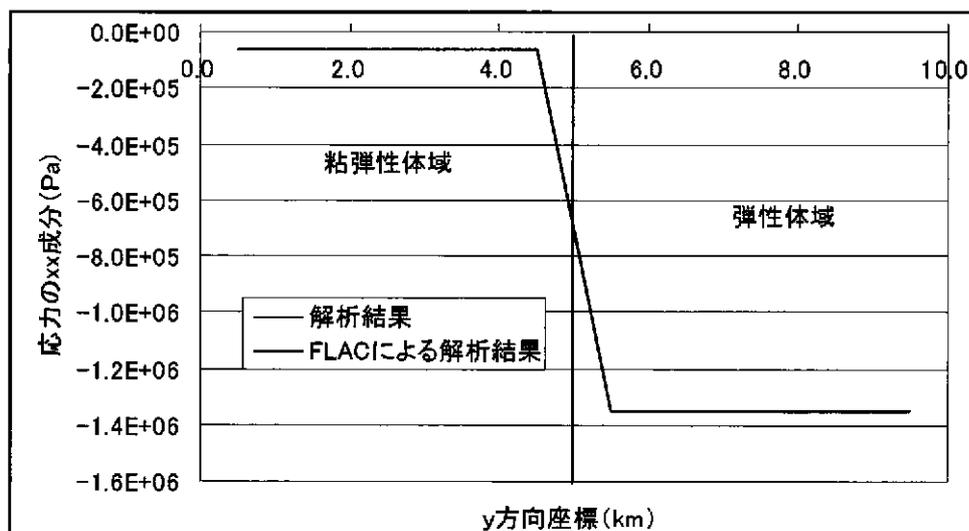


図 7.28 3,000 年における $x=100\text{km}$ 面上の応力の xx 成分

なお、この検証問題のサンプルデータは
`~/explicit/sample/chap7/maxwell2.dat`
 にインストールしてある。

7.5 粘弾性体（べき乗則の構成則）の検証結果

7.5.1 1次元解析による検証

(1) 検証問題

べき乗則の構成則粘弾性モデルの解析機能の1次元検証問題として、図 7.29 の図で示すように弾性体の右端に $1.3 \times 10^4 \text{Pa}$ の分布引張り荷重を付加した場合の解析を行った。べき乗則の場合でも、マックスウェルモデルと同様、一定荷重を付加しつづけると、クリープ現象が生じる。本検証では、このクリープ現象の解析を行い、1次元の厳密解と比較して本プログラムの粘弾解析の妥当性を確認する。なお、物性値はヤング率 $E=4.0 \times 10^{10} \text{Pa}$ 、ポアソン比 $\nu=0$ 、べき乗則の構成方程式の係数 A は $1.0 \times 10^{-17} \text{ ((N/km}^2\text{)}^n \text{s}^{-1})$ である。パラメータとして、べき乗則指数 n を 0.8, 1, 1.05 と変化させ解析を行った。また格子間隔は 1km である。

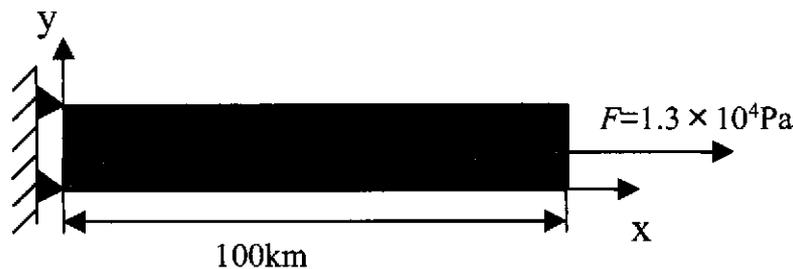


図 7.29 検証問題

(2) 検証結果

図 7.30 にクリープ解析におけるひずみの時刻歴を示す。比較のため、1次元のべき乗則の構成則の厳密解を併せて示す。なお、1次元の厳密解は次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{\sigma'}{2G} + A \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{n+1}{2}} \sigma'^n t + \varepsilon_v \\ &= \frac{\sigma}{3G} + A \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{n+1}{2}} \left(\frac{2\sigma}{3} \right)^n t + \frac{\sigma}{3K} \end{aligned} \quad (7.5)$$

ここで、 σ' は短軸応力、 σ は偏差応力、 ε_v は体積ひずみ、 G はせん断弾性係数、 K は体積弾性係数、 A はべき乗則の構成則の係数、 n はべき乗則指数である。べき乗則指数が 0.8, 1.0,

1.05 のすべてのケースにおいて、本解析結果は厳密解と良好に一致し、本プログラムのクリープ解析が良好に行われたことが確認された。なお、この例題は

~/explicit/sample/chap7/power1.dat

にインストールしてある。

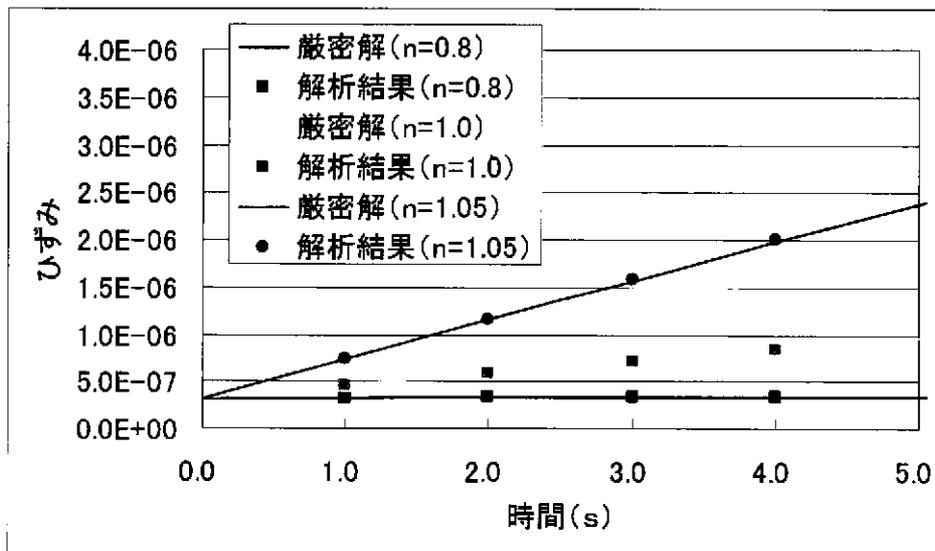


図 7.30 クリープ解析

7.5.2 2次元解析による検証

(1) 検証モデル

粘弾性解析機能（べき乗則の構成則）の2次元検証問題として、図 7.31 の図で示すように角柱の上半分が弾性体、下半分が粘弾性体であるモデルの右端に -0.1m/年 の強制変位を付加した場合の解析を行った。物性値は弾性体部で、ヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、粘弾性体部で、ヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、べき乗則の構成則の係数 $A=1.0 \times 10^{-27}\text{Pa}\cdot\text{ns}^{-1}$ 、べき乗則指数 $n=3.0$ である。また格子間隔は 1km である。拘束条件は $x=0$ 面および $y=0$ 面でスライドの拘束条件を与えた。

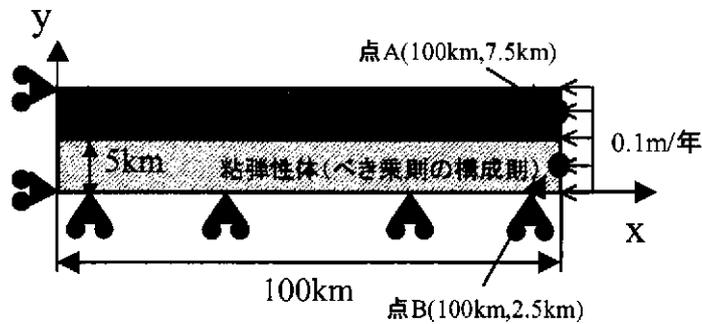


図 7.31 検証モデル

(2) 検証結果

図 7.32 および図 7.33 に解析領域の右端における応力の xx 成分時刻歴を示す。図 7.32 は粘弾性域 (図 7.31 の点 B) の、図 7.33 は弾性域 (場合図 7.31 の点 A) の解析結果である。粘弾性域の結果では、比較のため、FLAC による解析結果を併せて示す。本解析結果は FLAC による解析結果と良好に一致している。弾性域と粘弾性域の応力を比較してみると、粘弾性域では応力緩和現象により変形が進展しても、応力が一定値以上には増加しない。それに対し、弾性域では、応力緩和現象が生じないため、応力は変形が進展するに伴い、単調に増加している。

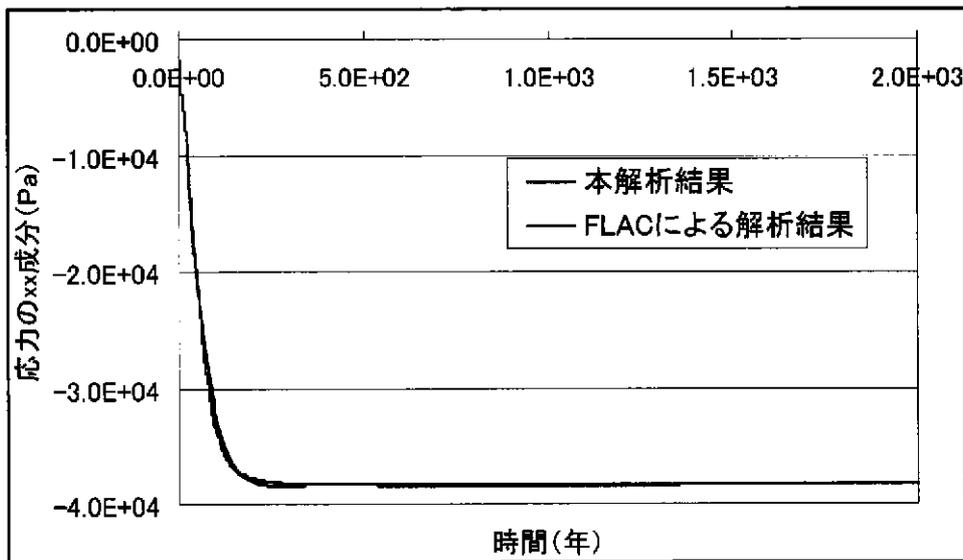


図 7.32 粘弾性域 (点 B) 応力の xx 成分の時刻歴

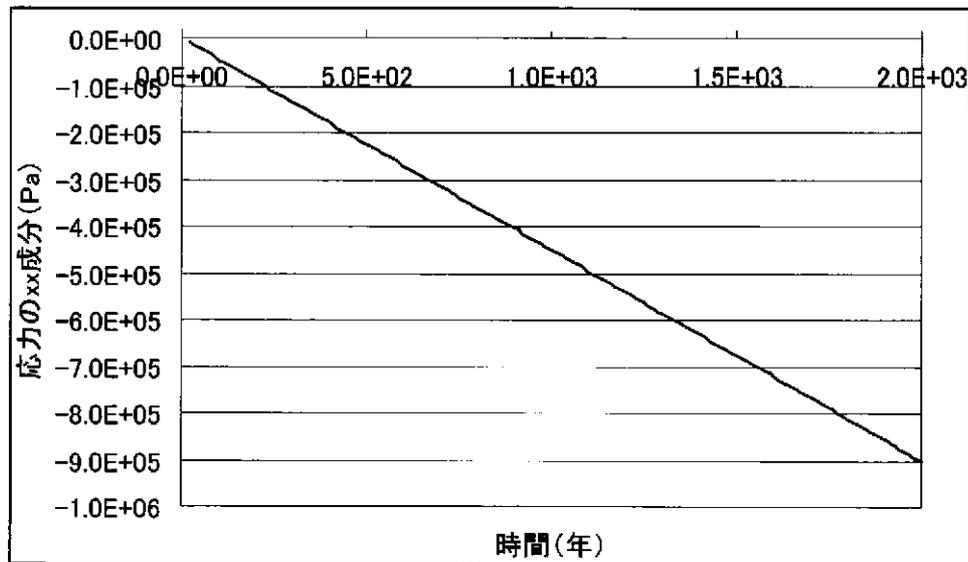


図 7.33 粘弾性域 (点 A) における応力の xx 成分の時刻歴

図 7.34 と図 7.35 に 3,000 年における $x=100\text{km}$ 面上の y 方向変位と応力の xx 成分を示す。比較のため、FLAC による解析結果を併せて示す。粘弾性域では、マックスウェルモデルの場合と同様、応力緩和現象により応力の値が低くなっている。また、粘弾性域では y 方向へのひずみが大きくなるため、 y 方向の変位の勾配が大きくなっている。これらの結果は FLAC の解析結果と良好に一致し、本プログラムのべき乗則モデルの粘弾性体解析機能は 2 次元計算でも良好に機能することが確認された。なお、この検証問題のサンプルデータは

`~/explicit/sample/chap7/power2.dat`

にインストールしてある。

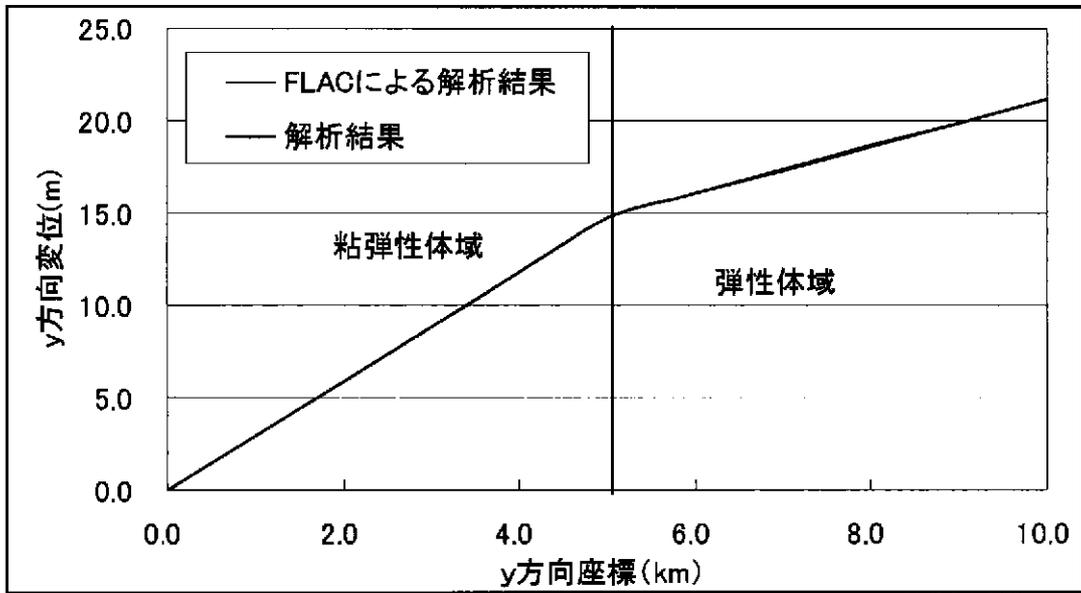


図 7.34 3,000 年における $x=100\text{km}$ 面上の y 方向変位

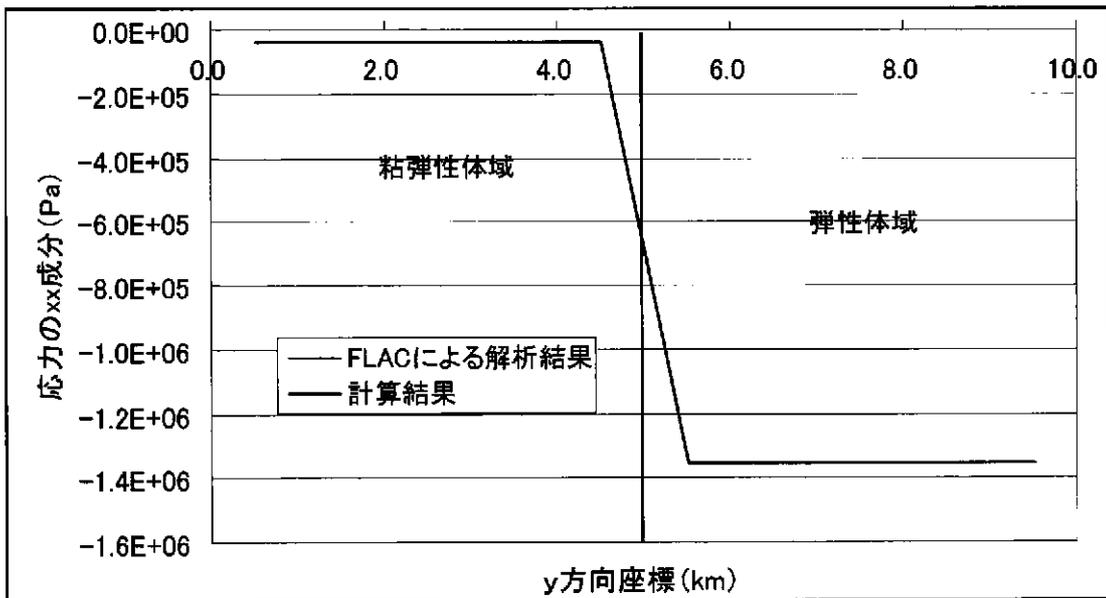


図 7.35 3,000 年における $x=100\text{km}$ 面上の応力の xx 成分

7.6 自重解析

7.6.1 1次元による検証

(1) 検証問題

弾性体の自重解析の検証を行うため、弾性体の-x方向に 9.8m/s^2 の重力加速度を付加した場合の解析を行った。物性値はヤング率 $E=4.1\times 10^{10}\text{Pa}$ 、ポアソン比 $\nu=0$ 、密度 $\rho=2.5\times 10^3\text{kg/m}^3$ である。また格子間隔は 1km である。図 7.36 に解析モデル図を示す。

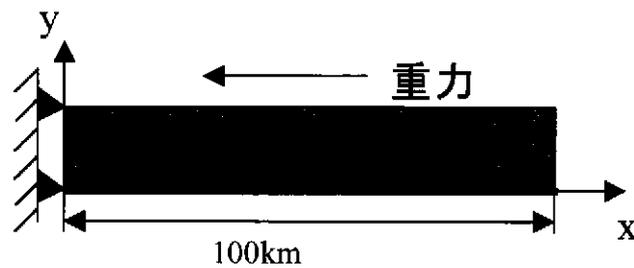


図 7.36 解析モデル

7.6.2 解析結果

図 7.37 および図 7.38 に動的緩和反復過程における残差カノルムとエネルギー残差の変化を示す。2000 ステップではほぼ収束していることが分かる。

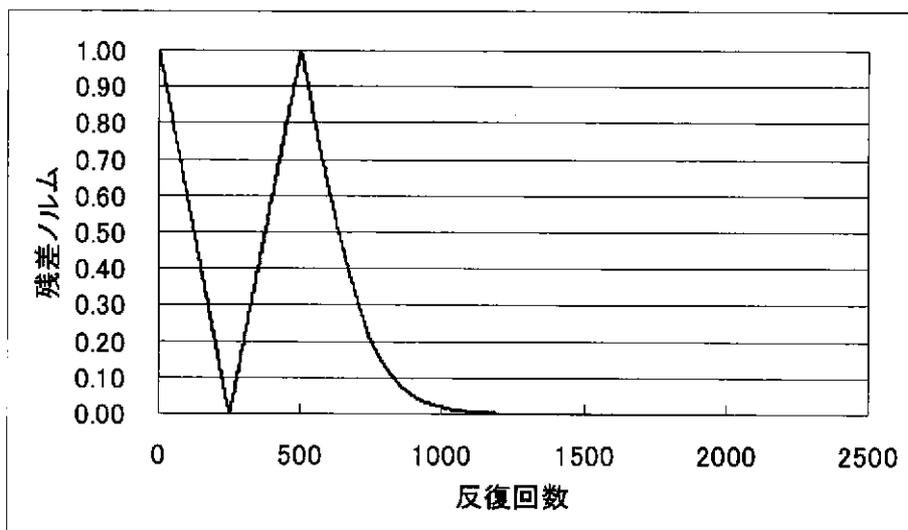


図 7.37 残差カノルムの収束状況

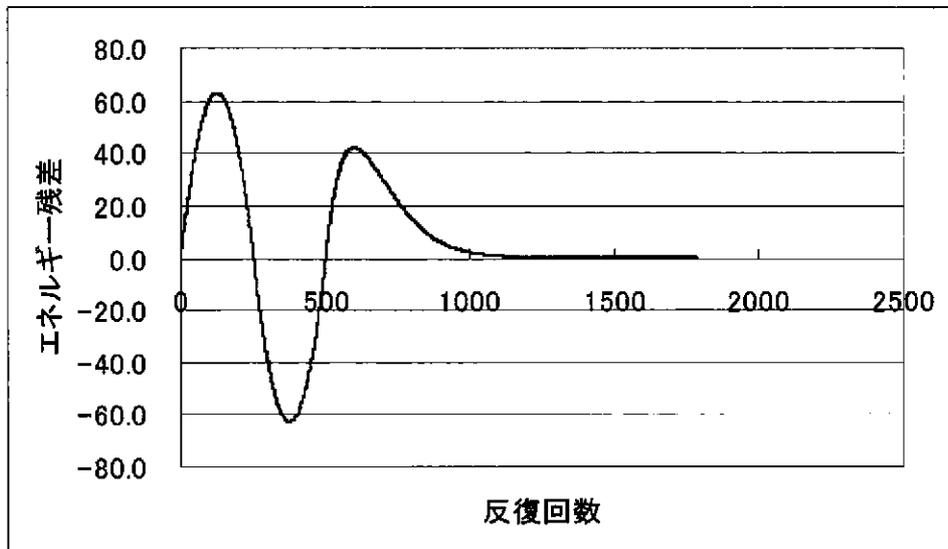


図 7.38 エネルギー残差の収束状況

図 7.39 に収束後の x 軸上における応力の xx 成分の分布を示す。横軸が x 軸上の位置であり、 y 軸が応力の xx 成分である。比較のため、次式で表される材料力学による理論解と併せて示す。本解析結果は理論解と良好に一致し、本プログラムが自重解析に対し良好な数値解を与えることが分かる。ここで、 H は弾性柱の全長(100km)である。

$$\sigma(x) = \rho g(H - x) \quad (7.6)$$

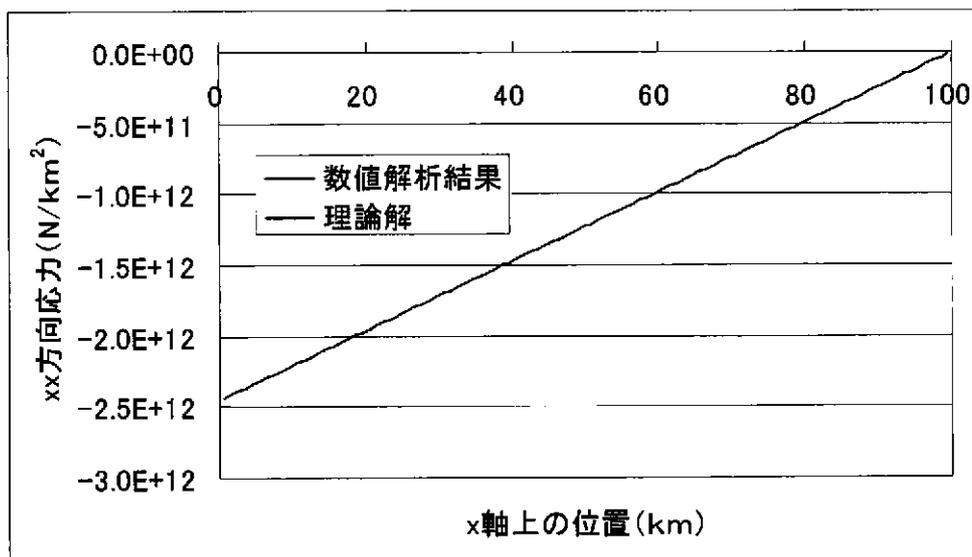


図 7.39 x 軸上における応力の xx 方向成分の分布

なお、この検証問題のサンプルデータは

~/explicit/sample/chap7/gravity1.dat

にインストールしてある。

7.6.3 2次元解析による検証

(1) 検証モデル

自重解析機能の2次元検証問題として、図 7.40 の図で示すように弾性体に-y 方向に 9.8m/s^2 の重力加速度が作用する場合の解析を行った。物性値はヤング率 $E=410\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ である。また格子間隔は 1km である。拘束条件は $x=0$ 面および $y=0$ 面でスライドの拘束条件を与えた。

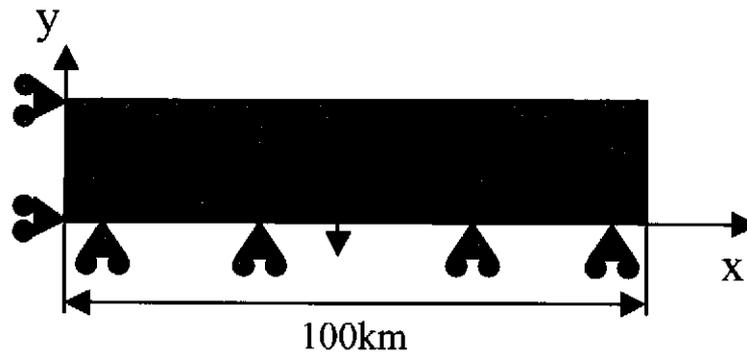


図 7.40 解析モデル

(2) 解析結果

図 7.41 および図 7.42 に $x=100\text{km}$ の面上の応力 yy 成分および xx 成分の分布をそれぞれ示す。比較のため、FLAC による解析結果も併せて示す。図 7.41 より、深度が深くなるに伴い、自重により応力の yy 成分が線形に増加している様子がわかる。図 7.42 からは、最深面および最上面において境界条件の影響により、応力の xx 成分が特異的に高くなっているが、中間部ではほぼ一定の値を示していることがわかる。これらの結果は FLAC と良好に一致しており、本プログラムの自重解析機能は良好に動作していることが確認された。

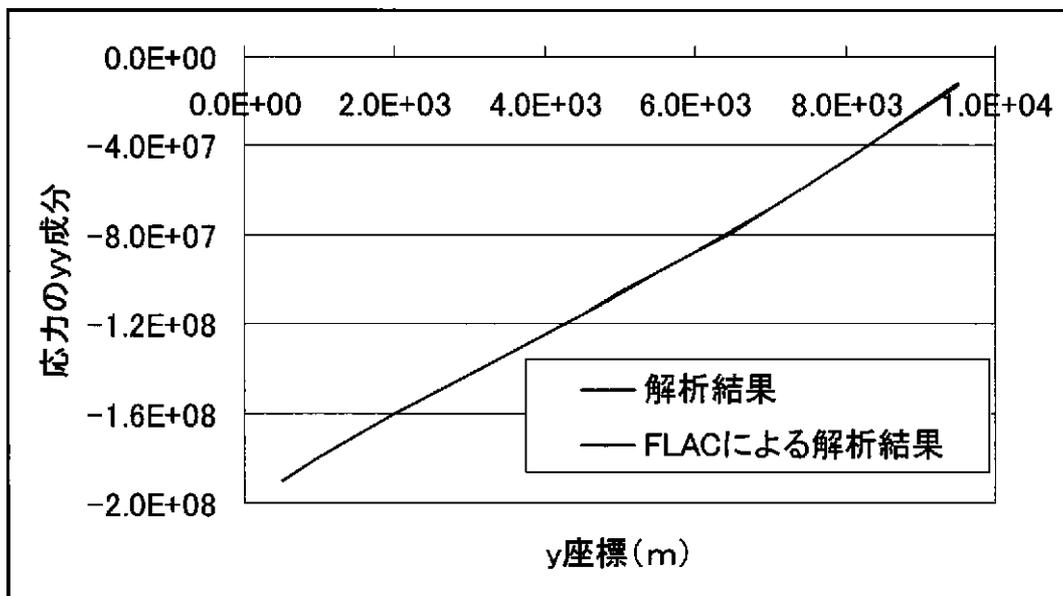


図 7.41 x=100km 面上の応力の yy 成分の分布

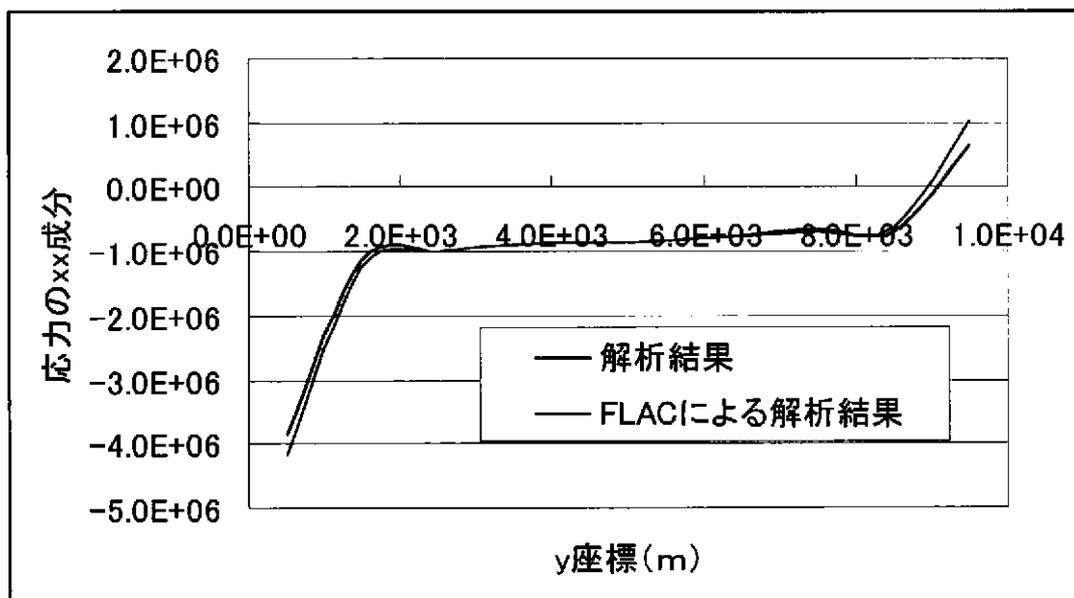


図 7.42 x=100km 面上の応力の xx 成分の分布

なお、この検証問題のサンプルデータは
 ~/explicit/sample/chap7/gravity2.dat
 にインストールしてある。

7.7 格子が不均一な場合の検証

本手法は有限要素法により離散化しているため、格子が不均一な場合も高い精度での解析が期待できる。ここでは、不均一な格子を用いて、一様な分布荷重を付加した場合の解析を行う。

7.7.1 解析モデル

図 7.43 に解析モデルを示す。y=5km の面に-y 方向に一様な 10MPa の分布荷重を付加した場合の解析を行った。格子間隔は、y 方向には 1km の 5 要素の等間隔格子を用い、x 方向には初項が 0.1km、等比が 2、格子数 20 の等比数列の格子間隔を用いて格子分割を行った。このとき、最小の格子間隔と、最大の格子間隔の比は 512 倍となる。図 7.44 に解析格子図を示す。この図から格子の不均一性がかなり高いことが分かる。なお、物性値はヤング率 $E=4.1 \times 10^{10}$ Pa、ポアソン比 $\nu=0$ である。

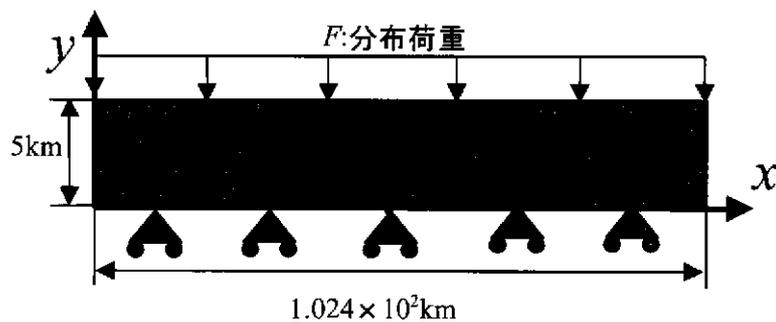


図 7.43 解析モデル

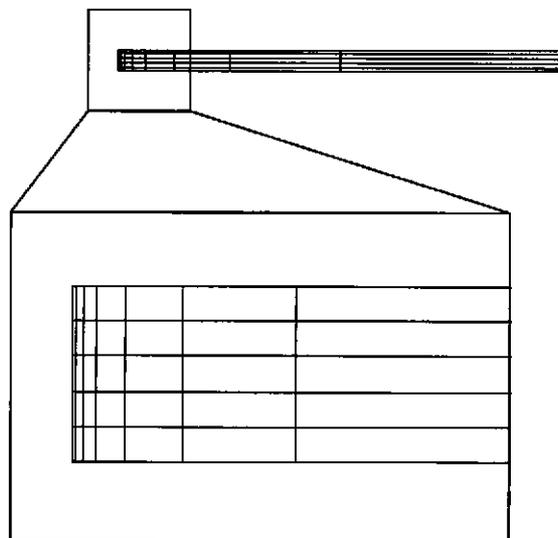


図 7.44 解析格子

7.7.2 解析結果

図 7.45 に $y=5\text{km}$ の面上の変位分布を示す。不均一な格子を用いているにもかかわらず面上で一様な変位が得られている。 $y=5\text{km}$ 面での変位は $1.22 \times 10^{-6}\text{km}$ であり、これらの値が式(7.2)より得られる変位と一致する。

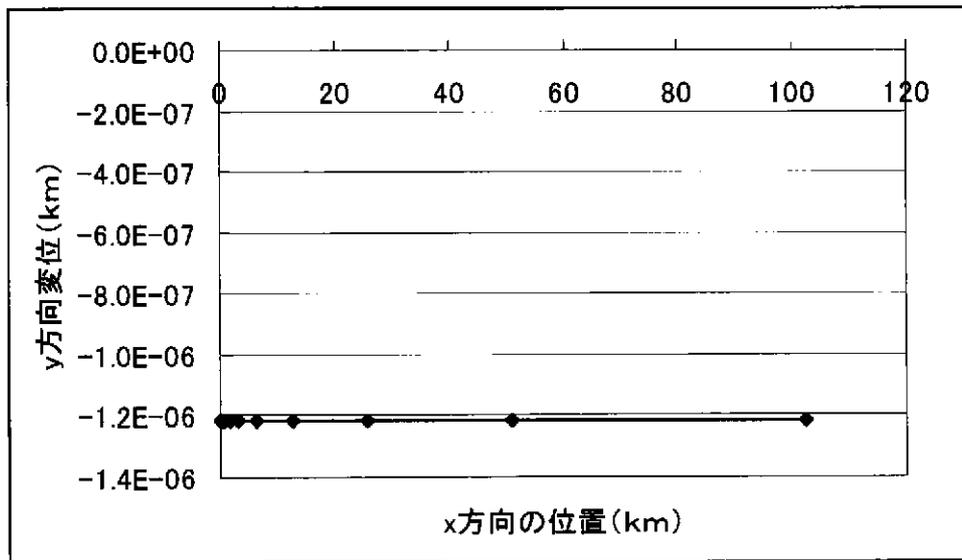


図 7.45 分布荷重を加えた場合の $y=5\text{km}$ 面上の y 方向変位

図 7.46 に y 方向変位分布のコンターを示す。変位の等高線がほぼ等間隔で並んでおり、妥当な結果であるといえる。

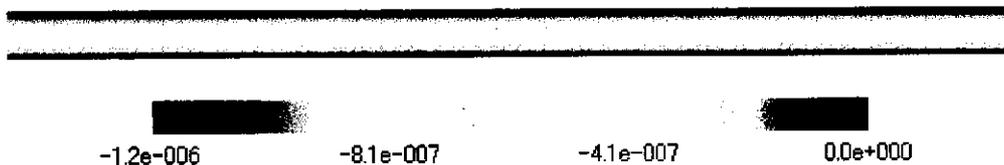


図 7.46 y 方向変位コンター

なお、この検証問題のサンプルデータは
~/explicit/sample/chap7/ununi.dat
にインストールしてある。

8 おわりに

本研究は、地殻変動の予測の支援ツールとして、2次元対応の地殻変動専用コードを開発することを目的としている。本年度は、プログラムの基本機能の設計・開発・検証試験を行った。検証試験は1次元解析による厳密解による比較および2次元解析による汎用ソフト「FLAC」との比較を行った。その結果、以下の各機能について、本プログラムが良好に動作することが確認された。

1. 動的緩和法の基本機能
2. 線形弾性体解析機能
3. 弾塑性体解析機能
4. 粘弾性体解析機能
5. 自重解析機能

来年度以降では、次の解析機能を追加すると共に、本プログラムを用いて実際の地盤解析を行う予定である。

1. 断層解析機能
2. 大変形解析機能
3. 物性値の温度依存性を考慮する機能

参考文献

- [1] 村上裕：“弾粘塑性モデルによる地殻の強度分布の考察”，地殻活動予測のための数値シミュレーション（2） 講演集，p.25，(1999).
- [2] 平原和朗：“摩擦構成則を用いたプレート間巨大地震発生サイクルの2次元有限要素法シミュレーション—予備的解析”，地殻活動予測のための数値シミュレーション（2） 講演集，p.72，(1999).
- [3] D.R.J. Owen and E. Hinton 著，山田嘉昭訳：塑性の有限要素法，初版，科学技術出版社，(1988).
- [4] 鷺津久一郎 他：有限要素法ハンドブックⅡ応用編，初版，培風館，(1983).
- [5] 田中忠次 他：地盤の三次元弾塑性有限要素解析，初版，丸善，(1996).
- [6] 川本治・田中忠次：“動的緩和法による地盤の弾塑性解析と可視化”，農業土木学会，第58巻，第9号，p.991，(1990).
- [7] 津田正明・萩原一郎：“動的緩和法を用いた準静的解析手法について”，第6回設計工学・システム部門講演論文集，p.264，(1996).

付録 語句説明

1. ドラッカー・プラッカーの構成則

弾塑性体の構成方程式の一種。土・岩コンクリートの挙動を記述する 1 次元の構成方程式としてモール・クーロンの摩擦則が一般的である。しかし、モール・クーロンの構成則を 3次元に拡張すると、ある応力状態では、式は特異となる。そこで、金属の構成方程式として一般的なフォン・ミーゼスの構成則に静水圧の影響を加えることにより、モール・クーロン則を近似した構成則が提案された。これがドラッカー・プラッカーの構成則である。この構成方程式では、モール・クーロンの構成方程式で見られた特異性は生じない。

2. 塑性ひずみ

固体に荷重を加えると、ひずみが生じ、固体は変形する。荷重の大きさがある一定値を超えるまでは荷重を取り除くとひずみが無くなり、固体はもとの形状に戻る（弾性変形）。このひずみを弾性ひずみと呼ぶ。さらに大きな荷重を加え、ある一定値を超えると、荷重を除去しても一定のひずみが残る、形状はもとには戻らない（塑性変形）。この非可逆なひずみを塑性ひずみまたは永久ひずみと呼ぶ。一般に固体に生じるひずみは可逆的な弾性ひずみと非可逆的な塑性ひずみの和となる。

3. 相当応力

ある多軸応力状態 (σ_{ij}) の降伏条件（塑性変形が生じる条件、2. 塑性ひずみ参照）が $\bar{\sigma}$ (σ_{ij} =単軸の降伏応力（単軸応力状態で塑性変形が生じる応力レベル）となるスカラー関数 $\bar{\sigma}$ を相当応力と呼ぶ。ある多軸の応力状態はテンソル量であるから、どの程度の強さの応力であるか理解しづらい。相当応力を求めることにより、その応力場に対応する単軸応力のレベルがわかり、どの程度の強さの応力場か理解できる。

4. 結合流れ則

ひずみの増分は弾性ひずみの増分と塑性ひずみの増分の和となる（2. 塑性ひずみ参照）。弾性ひずみの増分についてはフックの法則から容易に計算される。したがって弾塑性解析を行う場合、塑性ひずみの増分の計算が問題となる。ここで、「塑性ひずみの増分は、あるポテンシャル Q の勾配に比例する」という仮定をおく。この仮定が成り立つとする理論を「流れ則」と呼び、ポテンシャル Q を流れポテンシャルと呼ぶ。すると、塑性ひずみの増分は式(2.10)となる。ここで Q を決定することが必要となるが、それは容易ではない。そこで、流れポテンシャル Q は降伏条件(2.7)から得られる F と一致すると仮定する。この仮定は、多くの塑性体について成り立ち、数学的にもある種の合理性を持つ。この仮定が成り立つとする理論を「結合流れ則」と呼ぶ。

5. 陽に決定する

ある未知量を決定する際に、既知量のみから決定する場合を「陽に決定する」と呼ぶ。これに対し、ある未知量を決定する際に、既知量のみでなく、他の未知量を必要とする場合を「陰に決定する」と呼ぶ。この場合は1つの式から1つの未知量を決定することはできず、複数の陰的な式を連立させ、連立方程式を解いて未知量を決定する。これに対し、「陽的に決定する」場合は連立方程式を解く必要がない。

6. 相当ひずみ

単軸の塑性変形では、塑性ひずみ（2. 塑性ひずみ参照）の増分 $d\varepsilon_p$ による仕事の増分（塑性仕事増分） dW_p は単軸の応力を σ とすると次式で計算される。

$$dW_p = \sigma d\varepsilon_p$$

これを多軸の応力場に適応すると、相当応力 $\bar{\sigma}$ （3. 相当応力参照）を用いて、

$$dW_p = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}_p$$

となる。ここで、 $d\bar{\varepsilon}_p$ を相当塑性ひずみ増分と呼び、これを塑性変形の経路に沿って積分した $\bar{\varepsilon}_p$ を相当塑性ひずみと呼ぶ。つまり、相当塑性ひずみとは、ある多軸の応力場における塑性ひずみの大きさの尺度であるといえる。

7. 加工硬化説

ある種の固体では、塑性変形が進展すると降伏応力が増加する（2. 塑性ひずみ参照）。この現象を加工硬化またはひずみ硬化という。この現象には、「降伏応力は塑性仕事（6. 相当塑性ひずみ参照）の関数である」とする説と「降伏応力は塑性ひずみの関数である」とする説がある。前者を加工硬化説、後者をひずみ硬化説と呼ぶ。

8. 動的緩和法

式(2.1)で表される静的釣り合い式は時間依存項がないため、通常、適切な境界条件を与えて、陰的に解く（5. 陽に決定する参照）。そのため、巨大な連立方程式を解くことになり、多くの計算時間・計算容量が必要である。動的陽解法では、仮想的な慣性力（変位の時間の2回微分×仮想的な密度）および減衰力（変位の時間の1回微分×仮想的な減衰係数）を加えることにより、時間発展型の方程式とし、陽的な計算を定常状態になるまで繰り返し行う。定常状態では、変位の時間の2回微分および変位の時間の1回微分はともに0であるため、式(2.1)と直接解いた場合と同じ解が得られる。この手法は、連立方程式を解

く必要がないため、低容量で計算が可能である。また、仮想密度・粘性係数の値は最終的な解に影響を与えないため、適切な密度・粘性係数を設定することにより、安定かつ高速に解を収束させることができる。

9. 強制変位

計算により求まる変位とは異なり、ユーザーが境界条件として強制的に設定した変位。

10. 自重解析

解析対象自身の質量に重力が作用することにより生じる応力を計算すること。

11. 実時間

動的緩和法では、仮想的な時間進行を行うため、仮想時間を定義する必要がある。この仮想時間と実際の物理的な時間とを区別するため、実際の時間を本報告書では「実時間」と定義した。通常の時間の概念と同一と考えてよい。

12. 残差力ノルム

ここで、残差力 P_i を応力テンソル σ_{ij} 、外力ベクトル F_i を用いて次式で定義する。

$$P_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - F_i$$

式(2.1)より、静的釣り合い式を満足している場合は、残差力 P_i は 0 である。しかし、動的緩和法（8. 動的緩和法参照）では、仮想的な慣性力・減衰力を加えるため、計算過程では P_i は 0 ではない。そこで、計算領域の全節点に対し P_i を計算し、全自由度で内積を取る残差力ノルムを定義する。解が収束すれば全節点で $P_i=0$ となるから、残差力ノルムも 0 となる。そのため、残差力ノルムは解の収束判定の基準となる。

12. エネルギー残差

計算ステップ 1 ステップの間に変位が Δu_i 増加したとすると残差力 P_i （11. 残差力ノルム参照）を定義すると、計算ステップ 1 ステップの間に残差力がなす仕事は $P_i \Delta u_i$ となる。この値の絶対値を全節点で求め、すべて足したものをエネルギー残差と定義する。計算収束時には全節点で変位増分、残差力ともに 0 となるため、解の収束判定基準として用いることができる。