文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発
「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」

CISS フリーソフトウェア

FrontISTR

Ver. 3.6

ユーザーマニュアル

お問い合わせ先
（契約窓口）　一般財団法人生産技術研究奨励会
〒153-8505　東京都目黒区駒場４－６－１
（ソフトウェア管理元）　東京大学生産技術研究所　革新的シミュレーション研究センター
〒153-8505　東京都目黒区駒場４－６－１
Fax：03-5452-6662
E-mail：software@ciss.iis.u-tokyo.ac.jp

目次

1. はじめに

1.1 本書の位置づけ

FrontISTR が対象範囲とする解析に関するデータの入力方法の解説および FrontISTR の実行方法について記述したものである。

1.2 本書の目的

本書では、ユーザーが FrontISTR を実行するにあたり、プログラム特有のデータ構造と解析機能の基本的な内容について記述する。FrontISTR での解析実行制御は、全体制御データ、計算制御データを指定する必要がある。またメッシュに関するデータについては分散メッシュファイルを入力し解析を実行する。以下の章より、これらの制御データの入力方法および入力データの関連についてその詳細を説明する。

1.3 Ver.3.6 における更新内容

FrontISTR Ver.3.6 において、以下に示す機能が追加された：

- 入出力
  - ファイル読込の高速化
  - 781 シェル要素と 761 シェル要素を使用した場合の出力変更
  - デバッグ用のメッセージ消去
- リファイナ
  - !EQUATION の定義で，右辺の定数を設定した場合に，正しくリファインされない不具合を修正
- 解析
  - 周波数応答解析に関する修正
  - !SOLUTION,TYPE=STATIC を通る場合の熱応力解析に関する修正
  - !SOLUTION,TYPE=NLSTATIC を通る場合の圧力法線方向更新に関する修正
  - 接触剛性マトリックスのサブルーチン getContactStiffness の修正
- 要素
  - 要素ループの OpenMP 並列化
  - B-bar 要素（ソリッド要素）に関する修正
  - シェル要素に関する修正
  - トラス要素に関する修正
  - シェル，ビーム，トラス，ソリッドが全て混在した場合に発生するメモリ不正の修正
- 材料
  - 直交異方弾性体に関する修正

- 線形ソルバー
  - 行列ダンプ機能の修正
  - 3×3 ILU 前処理の省メモリ化
  - 4×4 CG ソルバーの追加
  - 6×6 CG ソルバーの追加
  - 3×3 CG, GMRES ソルバーによる前処理適用後行列の条件数推定（試験的）
  - 3×3 CG ソルバーへの発散チェック追加
  - 3×3 ソルバー使用時の前処理セットアップ情報の再利用
  - 3×3 ソルバー用外部 AMG 前処理ライブラリ（ML）へのインターフェース（試験的）
  - 3×3 ソルバーの行列ベクトル積での通信隠蔽（試験的）
  - 陽的な自由度消去法による多点拘束条件処理
  - 接触解析における反復法ソルバーの利用（試験的）
- パーティショナ
  - ファイル入力の高速化
  - ログ出力の機能拡張
  - 分散メッシュ作成ループの OpenMP 並列化

1.4 Ver.3.5 における更新内容

FrontISTR Ver.3.5 において、以下に示す機能が追加された：

- 解析機能関連
  - シェル・梁要素とソリッド要素の混在解析対応（3.7、4.1、6.3(3)参照）
  - シェル要素における直交異方性材料対応（4.2.2(3)参照）
  - 積層シェル対応（4.2.2(3)参照）
  - 大変形解析の際の圧力荷重の FOLLOW 機能（7.4.2(14)参照）
  - 梁要素の動解析対応（3.7 参照）
  - 動解析における複数節点のモニタリング（7.4.5(1)参照）
  - 動解析における節点応力・節点ひずみのモニタリング（7.4.5(1)参照）
  - 連成解析における入力流体力へのウィンドウ関数の適用（7.4.5(4)参照）
- パーティショナ関連
  - 大幅な高速化
  - Metis Ver.5 系列への対応（インストールマニュアル参照）
- メッシュ・リファイン関連
  - 要素タイプ混在モデルのリファイン対応
  - 入力温度データのリファイン情報に基づく補間に対応
- 線形ソルバ関連（7.4.6(1)参照）
  - 前処理におけるマルチカラー処理およびハイブリッド並列対応
  - ベクトル計算機向けオーダリング

- 自由度３の問題で利用可能な前処理と反復解法の組み合わせの拡大
- 行列データのダンプ機能

また、以下に示す修正が行われた：

- シェル要素の Drilling DOF の修正
- 非線形解析における収束判定の修正
- 線形動解析のリスタート時の時刻の修正
- 連成解析時のメッセージ内の節点番号表示の修正
- ILU 前処理の修正
- 一部のコンパイラによる最適化時の不具合回避

2.　有限要素法解析理論

第 2 章は、本開発コードで用いられる有限要素法（Finite Element Method）による解析手法について示す。固体の応力解析手法については、まず微小変形線形弾性静解析手法について示し、引き続き大変形問題を扱う際に必要となる幾何学的非線形解析手法、弾塑性解析手法について示す。さらに FEM による応力解析の結果を利用して得られる破壊力学パラメータを評価する方法についてまとめたものを示す。次に、固有値解析および熱伝導解析手法につていて示す。

2.1　微小変形線形弾性静解析

ここでは微小変形理論に基づく弾性静解析についての定式化を示す。応力・ひずみ関係として線形弾性を仮定している。

2.1.1　基礎方程式

固体力学の平衡方程式、力学的境界条件、幾何学的境界条件（基本境界条件）は次式で与えられる（図 2.1.1 参照）。

$$\nabla \bullet \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{b}} = 0 \quad in\, V \tag{2.1.1}$$

$$\boldsymbol{\sigma} \bullet \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad on\, S_t \tag{2.1.2}$$

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \quad on\, S_u \tag{2.1.3}$$

ここで、$\boldsymbol{\sigma}$ は応力、$\bar{\mathbf{t}}$ は表面力、$\bar{\mathbf{b}}$ は物体力であり、S_t は力学的境界、S_u は幾何学的境界を表す。

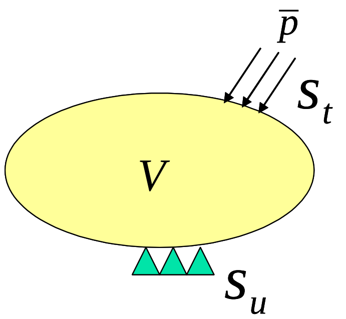


図 2.1.1　固体力学における境界値問題(微小変形問題)

微小変形問題におけるひずみ・変位関係式は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \nabla_s \mathbf{u} \tag{2.1.4}$$

また、線形弾性体での応力・ひずみ関係式（構成式）は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \tag{2.1.5}$$

ここで、C は 4 階の弾性テンソルである。

2.1.2　仮想仕事の原理

基礎方程式(2.1)(2.1.2)(2.1.3)と等価である、微小変形線形弾性問題についての仮想仕事の原理は次式のように表される。

$$\int_V \boldsymbol{\sigma} : \delta\boldsymbol{\varepsilon}\ dV = \int_{St} \bar{\mathbf{t}} \bullet \delta\mathbf{u} dS + \int_V \bar{\mathbf{b}} \bullet \delta\mathbf{u} dV \tag{2.1.6}$$

$$\delta\mathbf{u} = 0 \quad on \quad S_u \tag{2.1.7}$$

さらに構成式(2.1.5)を考慮して式(2.1.6)は次式のように表される。

$$\int_V (\mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}) : \delta\boldsymbol{\varepsilon}\ dV = \int_{St} \bar{\mathbf{t}} \bullet \delta\mathbf{u} dS + \int_V \bar{\mathbf{b}} \bullet \delta\mathbf{u} dV \tag{2.1.8}$$

式(2.1.8)において、$\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル、C は 4 階の弾性テンソルである。ここで、応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}$ とひずみテンソル $\boldsymbol{\varepsilon}$ を、それぞれベクトル形式で $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ 、$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ と表すと、構成式(2.1.5)は次式のように表される。

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \tag{2.1.9}$$

ここで、**D** は弾性マトリクスである。

ベクトル形式で表された応力 $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ 、$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ および式(2.1.9)を考慮して、式(2.1.8)は次式のように表わされる。

$$\int_V \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{D} \delta\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} dV = \int_{St} \delta\mathbf{u}^T \bar{\mathbf{t}} dS + \int_V \delta\mathbf{u}^T \bar{\mathbf{b}} dV \tag{2.1.10}$$

式(2.1.10)および式(2.1.7)が、本開発コードにおいて離散化される仮想仕事の原理である。

2.1.3　定式化

仮想仕事の原理式(2.1.10)を有限要素ごとに離散化して次式を得る。

$$\sum_e \int_{V^e} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{D} \delta\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}\ dV = \sum_e \int_{S_t^e} \delta\mathbf{u}^T \bar{\mathbf{t}} dS + \sum_e \int_{V^e} \delta\mathbf{u}^T \bar{\mathbf{b}} dV \tag{2.1.11}$$

要素ごとに、要素を構成する節点の変位を用いて変位場を次式のように内挿する。

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{m} N_i \mathbf{u}_i = \mathbf{N}\mathbf{U} \tag{2.1.12}$$

このときひずみは、式(2.1.4)を用いて次式のように与えられる。

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{BU} \tag{2.1.13}$$

式(2.1.12)(2.1.13)を式(2.1.11)に代入して、次式を得る。

$$\sum_e \delta\mathbf{U}^{\mathrm{T}} \left(\int_{V^e} \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{DB}dV \right) \mathbf{U} = \sum_e \ \delta\mathbf{U}^T \bullet \int_{S_t^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}} dS + \sum_e \delta\mathbf{U}^T \int_{V^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{b}} dV \tag{2.1.14}$$

式(2.1.14)は次式のようにまとめることができる。

$$\boldsymbol{\delta}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{KU} = \boldsymbol{\delta}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{F} \tag{2.1.15}$$

ここで

$$\mathbf{K} = \sum_e \int_{V^e} \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{DB}dV \tag{2.1.16}$$

$$\mathbf{F} = \sum_e \int_{S_t^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}} dS + \int_{V^e} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{b}} dV \tag{2.1.17}$$

式(2.1.16)(2.1.17)で定義されるマトリクスおよびベクトルの成分は、有限要素ごとに計算し、重ねあわせることができる。

式(2.1.15)が、任意の仮想変位 $\delta\mathbf{U}$ について成立することにより次式を得る。

$$\mathbf{KU} = \mathbf{F} \tag{2.1.18}$$

一方、変位境界条件式(2.1.3)は次式のように表される。

$$\mathbf{U} = \overline{\mathbf{U}} \tag{2.1.19}$$

式(2.1.18)を拘束条件式(2.1.19)のもとで解くことにより、節点変位 $\mathbf{U}$ を決定することができる。

2.2　非線形静解析手法

前述したように微小変形問題の解析においては、平衡方程式などの基礎方程式と等価な仮想仕事の原理を用いて、この式を有限要素により離散化することによって有限要素解析を行うことができる。構造物の大変形を扱う有限変形問題の解析においても基本的には仮想仕事の原理が用いられる点は同様である。しかしながら、有限変形問題においては、たとえ材料の線形性を仮定しても仮想仕事の原理式は変位に関して非線形な方程式になる。非線形式を解くためには通常、反復法による繰り返し計算が用いられる。その反復計算においては、ある小さな荷重増分に対して区分的に行なわれ、それを積み重ねて最終的な変形状態へと至る増分解析手法が用いられる。微小変形問題を仮定した場合、ひずみや応力を定義するための配置は、変形前と変形後とでとくに区別を行なっていなかった。すなわち、微小変形を仮定している場合には基礎方程式を記述する配置は変形前であっても変形後であっても問題にはならなかった。しかしながら、有限変形問題において増分解析を実施する場合、参照配置として最初の状態を参照するか、増分の開始点を参照するかの選択が可能で

ある。前者を total Lagrange 法、後者を updated Lagrange 法と呼ぶ。詳細については章末参考文献などを参照されたい。

本開発コードでは、total Lagrange 法および updated Lagrange 法の双方を採用している。

2.2.1　幾何学的非線形解析手法

2.2.1.1　　仮想仕事式の増分分解

時刻 t までの状態が既知であり、時刻 t'=t+Δ t の状態を未知とする増分解析を想定する。（図 2.2.1 参照）静的境界値問題の平衡方程式、力学的境界条件、幾何学的境界条件（基本境界条件）は次の通りである。

$$\nabla_{{}^{t'}\mathbf{x}} \bullet {}^{t'}\boldsymbol{\sigma} + {}^{t'}\bar{\mathbf{b}} = 0 \quad in\ V \tag{2.2.1}$$

$${}^{t'}\boldsymbol{\sigma} \bullet {}^{t'}\mathbf{n} = {}^{t'}\bar{\mathbf{t}} \quad on\ {}^{t'}s \tag{2.2.2}$$

$${}^{t'}\mathbf{u} = {}^{t'}\bar{\mathbf{u}} \quad on\ {}^{t'}s_u \tag{2.2.3}$$

ただし ${}^{t'}\boldsymbol{\sigma}, {}^{t'}\bar{\mathbf{b}}, {}^{t'}\mathbf{n}, {}^{t'}\bar{\mathbf{t}}, {}^{t'}\bar{\mathbf{u}}$ は、それぞれ時刻 t'における Cauchy 応力（真応力）、物体力、物体表面での外向き単位法線ベクトル、既定された表面力、既定された変位である。これらの式は、時刻 t'での配置 ${}^{t'}v, {}^{t'}s_t, {}^{t'}s_u$ に対して記述されるものである。

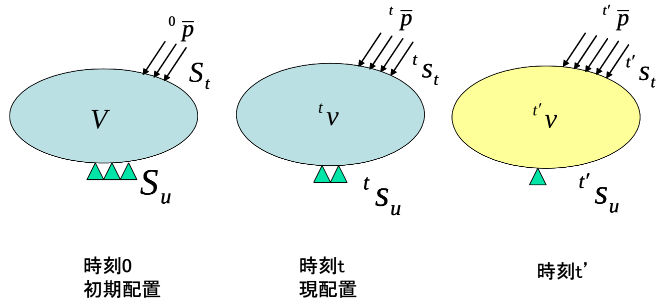


図 2.2.1　増分解析の概念

2.2.1.2　　仮想仕事の原理

式(2.2.1)の平衡方程式と式(2.2.2)の力学的境界条件と等価な仮想仕事の原理は次式で与えられる。

$$\int_{{}^{t'}v} {}^{t'}\boldsymbol{\sigma} : \delta {}^{t'}\mathbf{A}_{(L)} d\,{}^{t'}v = \int_{{}^{t'}s_t} {}^{t'}\bar{\mathbf{t}} \bullet \delta\mathbf{u} d\,{}^{t'}s + \int_{V} {}^{t'}\bar{\mathbf{b}} \bullet \delta\mathbf{u} d\,{}^{t'}v \tag{2.2.4}$$

ここで、${}^{t'}\mathbf{A}_{(L)}$ は Almansi ひずみテンソルの線形部分であり、具体的には次式で表される。

$${}^{t'}\mathbf{A}_{(L)} = \frac{1}{2}\left\{ \frac{\partial {}^{t'}\mathbf{u}}{\partial {}^{t'}\mathbf{x}} + \left(\frac{\partial {}^{t'}\mathbf{u}}{\partial {}^{t'}\mathbf{x}} \right)^T \right\} \tag{2.2.5}$$

式(2.2.4)を幾何学的境界条件、ひずみ変位関係式、応力ひずみ関係式とともに解けばよいのであるが、式(2.2.4)は時刻 t'の配置で記述されており、現段階で時刻 t'の配置は未知である。そこで、時刻 0 の配置Ｖまたは時刻 t での配置 ${}^{t}v$ を参照した定式化が行われる。

2.2.1.3 total Lagrange 法の定式化

ここでは、開発コードで用いられる total Lagrange 法に基づく定式化を示す。

時刻 0 の初期配置を基準とする時刻 t'での仮想仕事の原理式は、次式で与えられる。

$$\int_V {}^{t'}_{0}\mathbf{S} : \delta {}^{t'}_{0}\mathbf{E} dV = {}^{t'}\delta\mathbf{R} \tag{2.2.6}$$

$${}^{t'}\delta\mathbf{R} = \int_{S_t} {}^{t'}_{0}\bar{\mathbf{t}} \bullet \delta\mathbf{u} dS + \int_V {}^{t'}_{0}\bar{\mathbf{b}} \bullet \delta\mathbf{u} dV \tag{2.2.7}$$

ただし ${}^{t'}_{0}\mathbf{S}$, ${}^{t'}_{0}\mathbf{E}$ は、それぞれ時刻 0 の初期配置を基準とする時刻 t'での 2nd Piola-Kirchhoff 応力テンソル、Green-Lagrange ひずみテンソルを表す。また、${}^{t'}_{0}\bar{\mathbf{t}}$, ${}^{t'}_{0}\bar{\mathbf{b}}$ は、公称表面力ベクトル、初期配置の単位体積あたりに換算した物体力であり、式(2.2.1)(2.2.2)(2.2.3)と関連させて、次式で与えられる。

$${}^{t'}_{0}\bar{\mathbf{t}} = \frac{d\,{}^{t'}s}{dS}\,{}^{t'}\bar{\mathbf{t}} \tag{2.2.8}$$

$${}^{t'}_{0}\bar{\mathbf{b}} = \frac{d\,{}^{t'}v}{dV}\,{}^{t'}\bar{\mathbf{b}} \tag{2.2.9}$$

時刻 t における Green-Lagrange ひずみテンソルは次式で定義される。

$${}^{t}_{0}\mathbf{E} = \frac{1}{2}\left\{ \frac{\partial {}^{t}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} + \left(\frac{\partial {}^{t}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T + \left(\frac{\partial {}^{t}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \bullet \frac{\partial {}^{t}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} \right\} \tag{2.2.10}$$

ここで、時刻 t'における変位、2nd Piola-Kirchhoff 応力 ${}^{t'}\mathbf{u}, {}^{t'}_{0}\mathbf{S}$ を次式のように増分分解して表す。

$${}^{t'}\mathbf{u} = {}^{t}\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u} \tag{2.2.11}$$

$${}^{t'}_{0}\mathbf{S} = {}^{t}_{0}\mathbf{S} + \Delta\mathbf{S} \tag{2.2.12}$$

このとき、変位増分に関連して、Green-Lagrange ひずみの増分は次式で定義される。

$${}^{t'}_{0}\mathbf{E} = {}^{t}_{0}\mathbf{E} + \Delta\mathbf{E} \tag{2.2.13}$$

$$\Delta\mathbf{E} = \Delta\mathbf{E}_L + \Delta\mathbf{E}_{NL} \tag{2.2.14}$$

$$\Delta\mathbf{E}_L = \frac{1}{2}\left\{ \frac{\partial \Delta\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} + \left(\frac{\partial \Delta\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T + \left(\frac{\partial \Delta\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \bullet \frac{\partial {}^{t}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} + \left(\frac{\partial {}^{t}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \bullet \frac{\partial \Delta\mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} \right\} \tag{2.2.15}$$

$$\Delta \mathbf{E}_{NL} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \Delta \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \bullet \frac{\partial \Delta \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} \tag{2.2.16}$$

式(2.2.11)(2.2.12)(2.2.13)(2.2.14)(2.2.15)(2.2.16)を、式(2.2.6)(2.2.7)に代入して次式を得る。

$$\int_V \Delta \mathbf{S} : \left(\delta \Delta \mathbf{E}_L + \delta \Delta \mathbf{E}_{NL}\right) dV + \int_V {}_o^t\mathbf{S} : \delta \Delta \mathbf{E}_{NL} dV = {}^{t'}\delta \mathbf{R} - \int_V {}_o^t\mathbf{S} : \delta \Delta \mathbf{E}_L dV \tag{2.2.17}$$

ここで、$\Delta \mathbf{S}$ は、$\Delta \mathbf{E}_L$ と 4 階テンソル ${}_0^t\mathbf{C}$ と関連づけて次式のように表されると仮定する。

$$\Delta \mathbf{S} = {}_0^t\mathbf{C} : \Delta \mathbf{E}_L \tag{2.2.18}$$

式(2.2.17)に式(2.2.18)を代入し、Δu の二次以上の項を有する $\Delta \mathbf{S} : \delta \Delta \mathbf{E}_{NL}$ を省略して次式を得る。

$$\int_V ({}_0^t\mathbf{C} : \Delta \mathbf{E}_L) : \delta \Delta \mathbf{E}_L dV + \int_V {}_o^t\mathbf{S} : \delta \Delta \mathbf{E}_{NL} dV = {}^{t'}\delta \mathbf{R} - \int_V {}_o^t\mathbf{S} : \delta \Delta \mathbf{E}_L dV \tag{2.2.19}$$

式(2.2.19)を有限要素により離散化して次式を得る。

$$\delta \mathbf{U}^T \left({}_0^t\mathbf{K}_L + {}_0^t\mathbf{K}_{NL}\right) \Delta \mathbf{U} = \delta \mathbf{U}^T\, {}_0^{t'}\mathbf{F} - \delta \mathbf{U}^T\, {}_0^t\mathbf{Q} \tag{2.2.20}$$

ここで、${}_0^t\mathbf{K}_L, {}_0^t\mathbf{K}_{NL}, {}_0^{t'}\mathbf{F}, {}_0^t\mathbf{Q}$ は、それぞれ、初期変位マトリクス、初期応力マトリクス、外力ベクトル、内力ベクトルである。

したがって、時刻 t の状態から、時刻 t’の状態を求めるための漸化式は次式で与えられる。

Step1： $i = 0$

$${}_0^{t'}\mathbf{K}^{(0)} = {}_0^t\mathbf{K}_L + {}_0^t\mathbf{K}_{NL}; {}_0^{t'}\mathbf{Q}^{(0)} = {}_0^t\mathbf{Q}; {}^{t'}\mathbf{U}^{(0)} = {}^t\mathbf{U}$$

Step2： ${}_0^{t'}\mathbf{K}^{(i)} \Delta \mathbf{U}^{(i)} = {}_0^{t'}\mathbf{F} - {}_0^{t'}\mathbf{Q}^{(i-1)}$

Step3： ${}^{t'}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t'}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{U}^{(i)}$

$i = 0$

2.2.1.4 updated Lagrange 法の定式化

時刻 t の現配置を基準とする時刻 t’での仮想仕事の原理式は、次式で与えられる。

$$\int_V {}_t^{t'}\mathbf{S} : \delta\, {}_t^{t'}\mathbf{E} dV = {}^{t'}\delta \mathbf{R} \tag{2.2.21}$$

$${}^{t'}\delta \mathbf{R} = \int_{S_t} {}_t^{t'}\bar{\mathbf{t}} \bullet \delta \mathbf{u} dS + \int_V {}_t^{t'}\bar{\mathbf{b}} \bullet \delta \mathbf{u} dV \tag{2.2.22}$$

ただし

$$ {}_{t}^{t'}\bar{\mathbf{t}} = \frac{d^{t'}s}{d^{t}s} {}^{t'}\bar{\mathbf{t}} \tag{2.2.23} $$

$$ {}_{t}^{t'}\bar{\mathbf{b}} = \frac{d^{t'}v}{d^{t}v} {}^{t'}\bar{\mathbf{b}} \tag{2.2.24} $$

テンソル ${}_{t}^{t'}\mathbf{S}$, ${}_{t}^{t'}\mathbf{E}$ やベクトル ${}_{t}^{t'}\bar{\mathbf{t}}$ 、${}_{t}^{t'}\bar{\mathbf{b}}$ が時刻 t の現配置を基準としているが、Green-Lagrange ひずみについては初期変位（時刻 t までの変位）${}^{t}\mathbf{u}$ を含まず

$$ {}_{t}^{t'}\mathbf{E} = \Delta_t \mathbf{E}_L + \Delta_t \mathbf{E}_{NL} \tag{2.2.25} $$

ただし

$$ \Delta_t \mathbf{E}_L = \frac{1}{2}\left\{ \frac{\partial \Delta \mathbf{u}}{\partial^t x} + \left(\frac{\partial \Delta \mathbf{u}}{\partial^t x} \right)^T \right\} \tag{2.2.26} $$

$$ \Delta_t \mathbf{E}_{NL} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \Delta \mathbf{u}}{\partial^t x} \right)^T \bullet \frac{\partial \Delta \mathbf{u}}{\partial^t x} \tag{2.2.27} $$

の形になる。一方

$$ {}_{t}^{t'}\mathbf{S} = {}_{t}^{t}\mathbf{S} + \Delta_t \mathbf{S} \tag{2.2.28} $$

であるから、これを式(2.2.21)(2.2.22)と式(2.2.25)に代入し整理すると解くべき方程式が次のように与えられる。

$$ \int_{{}^{t}v} \Delta_t \mathbf{S} : \left(\delta\Delta_t \mathbf{E}_L + \delta\Delta_t \mathbf{E}_{NL} \right) d^t v + \int_{V} {}_{t}^{t}\mathbf{S} : \delta\Delta_t \mathbf{E}_{NL} d^t v = {}^{t'}\delta\mathbf{R} - \int_{{}^{t}v} {}_{t}^{t}\mathbf{S} : \delta\Delta_t \mathbf{E}_L d^t v \tag{2.2.29} $$

ここで、$\Delta_t \mathbf{S}$ は、$\Delta_t \mathbf{E}_L$ と 4 階テンソル ${}_{t}^{t}\mathbf{C}$ と関連づけて次式のように表されると仮定する。

$$ \Delta_t \mathbf{S} = {}_{t}^{t}\mathbf{C} : \Delta_t \mathbf{E}_L \tag{2.2.30} $$

これを式(2.2.29)に代入し、次式を得る。

$$ \int_{V} \left({}_{t}^{t}\mathbf{C} : \Delta_t \mathbf{E}_L \right) : \delta\Delta_t \mathbf{E}_L dV + \int_{V} {}_{t}^{t}\mathbf{S} : \delta\Delta_t \mathbf{E}_{NL} dV = {}^{t'}\delta\mathbf{R} - \int_{V} {}_{t}^{t}\mathbf{S} : \delta\Delta_t \mathbf{E}_L dV \tag{2.2.31} $$

式(2.2.31)を有限要素により離散化して次式を得る。

$$ \delta\mathbf{U}^T \left({}_{t}^{t}\mathbf{K}_L + {}_{t}^{t}\mathbf{K}_{NL} \right) \Delta\mathbf{U} = \delta\mathbf{U}^T {}_{t}^{t'}\mathbf{F} - \delta\mathbf{U}^T {}_{t}^{t}\mathbf{Q} \tag{2.2.32} $$

ここで、${}_{t}^{t}\mathbf{K}_L, {}_{t}^{t}\mathbf{K}_{NL}, {}_{t}^{t'}\mathbf{F}, {}_{t}^{t}\mathbf{Q}$ は、それぞれ、初期変位マトリクス、初期応力マトリクス、外力ベクトル、内力ベクトルである。

したがって、時刻 t の状態から、時刻 t'の状態を求めるための漸化式は次式で与えられる。

Step1： $i = 0$

$$ {}_{t}^{t'}\mathbf{K}^{(i)} = {}_{t}^{t}\mathbf{K}_L + {}_{t}^{t}\mathbf{K}_{NL} ; {}_{t}^{t'}\mathbf{Q}^{(i)} = {}_{t}^{t}\mathbf{Q} ; {}^{t'}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t}\mathbf{U} $$

Step2： ${}_{t}^{t'}\mathbf{K}^{(i)} \Delta\mathbf{U}^{(i)} = {}_{t}^{t'}\mathbf{F} - {}_{t}^{t'}\mathbf{Q}^{(i-1)}$

Step3： ${}^{t'}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t'}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}^{(i)}$

$i = i + 1$

2.2.2　材料非線形解析手法

本開発コードでは、等方性超弾性および弾塑性二種類の非線形材料を解析することができる。解析で対象とする材料は弾塑性材である場合では、updated Lagrange 法を適用し、超弾性材である場合では、total Lagrange 法を適用している。また、反復解析手法には Newton-Raphson 法を適用している。

以下にこれらの材料構成式の概要を示す。

2.2.2.1　　超弾性材料

等方性超弾性材料における弾性ポテンシャルエネルギーは、応力の作用していない初期状態からの等方性を持った応答から得られるものであり、右 Cauchy-Green 変形テンソル C の主不変量（$\mathbf{I_1}, \mathbf{I_2}, \mathbf{I_3}$）、または体積変化を除いた変形テンソルの主不変量($\bar{\mathbf{I}}_1$, $\bar{\mathbf{I}}_2, \bar{\mathbf{I}}_3$)の関数,つまり、$\mathbf{W} = \mathbf{W}(\mathbf{I_1}, \mathbf{I_2}, \mathbf{I_3})$ あるいは$\mathbf{W} = \mathbf{W}(\bar{\mathbf{I}}_1, \bar{\mathbf{I}}_2, \bar{\mathbf{I}}_3)$として表すことができる。

超弾性材の構成式は 2nd Piola-Kirchhoff 応力と Green-Lagrange ひずみの関係で定義され、その変形解析は total Lagrange 法を適用する。

以下では本開発コードに含まれた超弾性モデルの弾性ポテンシャルエネルギーW を列挙する。弾性ポテンシャルエネルギーW がわかれば、以下のように 2nd Piola-Kirchhoff 応力および応力－ひずみ関係を計算できる

$$\mathrm{S} = 2\frac{\partial \mathrm{W}}{\partial \mathrm{C}} \tag{2.2.33}$$

$$\mathrm{C} = 4\frac{\partial^2 \mathrm{W}}{\partial \mathrm{C}\,\partial \mathrm{C}} \tag{2.2.34}$$

（１）Neo Hookean 超弾性モデル

Neo-Hookean 超弾性モデルは等方性を持つ線形則（Hooke 則）を大変形問題へ対応できるように拡張したものである。その弾性ポテンシャルは以下のとおりである。

$$\mathrm{W} = \mathrm{C}_{10}(\bar{\mathrm{I}}_1 - 3) + \frac{1}{\mathrm{D}_1}(J-1)^2 \tag{2.2.35}$$

ここで、 C_{10}と D_1 は材料定数である。

（２）Mooney Rivlin 超弾性モデル

$$\mathrm{W} = \mathrm{C}_{10}(\bar{\mathrm{I}}_1 - 3) + \mathrm{C}_{01}(\bar{\mathrm{I}}_2 - 3) + \frac{1}{\mathrm{D}_1}(J-1)^2 \tag{2.2.36}$$

ここで、 $\mathrm{C}_{10,}$ C_{01}と D_1 は材料定数である。

（３）Arruda Boyce 超弾性モデル

$$W = \mu\left[\frac{1}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2}(\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^2}(\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^2}(\bar{I}_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^2}(\bar{I}_1^5 - 243)\right] + \frac{1}{D}\left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J\right) \tag{2.2.37}$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \frac{3}{5{\lambda_m}^2} + \frac{99}{175{\lambda_m}^4} + \frac{513}{875{\lambda_m}^6} + \frac{42039}{67375{\lambda_m}^8}} \tag{2.2.38}$$

ここで、 μ, λ_m と D は材料定数である。

2.2.2.2 弾塑性材料

本開発コードでは、関連流れ則に準じる弾塑性構成式を適用している。また、その構成式は Kirchhoff 応力の Jaumman 速度と変形速度テンソルの関係を表し、その変形解析は updated Lagrange 法を適用する。

（１）弾塑性構成式

弾塑性体の降伏条件が次のように与えられるものとする。

初期の降伏条件

$$F(\boldsymbol{\sigma}\ , \sigma_{y0}) = 0 \tag{2.2.39}$$

後続の降伏条件

$$F(\boldsymbol{\sigma}\ , \sigma_y(\bar{e}^p)) = 0 \tag{2.2.40}$$

ここで、

F: 降伏関数

σ_{y0}:初期降伏応力、 σ_y:後続の降伏応力

$\boldsymbol{\sigma}$: 応力テンソル、 $\mathbf{e}$: 微小ひずみテンソル

$\mathbf{e}^p$:塑性ひずみテンソル $\bar{e}^p$: 相当塑性ひずみ

降伏応力–相当塑性ひずみ関係が、単軸状態での応力–塑性ひずみ関係に一致するものとする。

単軸状態での応力–塑性ひずみ関係：

$$\sigma = H(e^p) \tag{2.2.41}$$

$$\frac{d\sigma}{d\,e^p} = H' \tag{2.2.42}$$

ここで、

H': 歪硬化係数

相当応力-相当塑性ひずみ関係：

$$\bar{\sigma} = H\left(\bar{\varepsilon}^{p}\right) \tag{2.2.43}$$

$$\dot{\bar{\sigma}} = H' \dot{\bar{\varepsilon}}^{p} \tag{2.2.44}$$

後続の降伏関数は一般には温度、塑性ひずみ仕事の関数であるが、ここでは簡単のため相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^{p}$ のみの関数であるものとする。塑性変形の進行中は F=0 が満たされ続ける為、次式が成立しなければならない。

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{e}^{p}} : \dot{\boldsymbol{e}}^{p} = 0 \tag{2.2.44}$$

式(2.2.44)中の $\dot{F}$ は F の時間導関数を表しており、以後、ある量 A の時間導関数を $\dot{A}$ で表す。

ここで、塑性ポテンシャル Θ の存在を仮定し、塑性ひずみ速度を次式で表すものとする。

$$\dot{\boldsymbol{e}}^{p} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Theta}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \tag{2.2.45}$$

ここで $\dot{\lambda}$ は係数である。

さらに、塑性ポテンシャル Θ が降伏関数 F に等しいものとして、次式の関連流れ則を仮定する。

$$\dot{\boldsymbol{e}}^{p} = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \tag{2.2.46}$$

この式を式(2.4.44)に代入し、下式が得られる。

$$\dot{\lambda} = \frac{\mathbf{a}^{T} : \mathbf{d}_{D}}{A + \mathbf{a}^{T} : \mathbf{D} : \mathbf{a}} \dot{\mathbf{e}} \tag{2.2.47}$$

ここで、$\mathbf{D}$ は弾性マトリクスであり、

$$\mathbf{a}^{T} = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \qquad \mathbf{d}_{D} = \mathbf{D}\mathbf{a}^{T} \qquad A = -\frac{1}{\dot{\lambda}} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{e}^{p}} : \dot{\boldsymbol{e}}^{p} \tag{2.2.48}$$

弾塑性の応力—ひずみ関係式は以下のように書ける。

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \left\{ \boldsymbol{D} - \frac{\mathbf{d}_{D} \otimes \mathbf{d}_{D}{}^{T}}{A + \mathbf{d}_{D}{}^{T} \mathbf{a}} \right\} : \dot{\boldsymbol{e}} \tag{2.2.49}$$

弾塑性材の降伏関数(2.2.49)がわかれば、この式からその構成式が得られる。

（１）降伏関数

以下では本開発コードに含まれた弾塑性降伏関数を列挙する

・Von Mises 降伏関数

$$\mathrm{F} = \sqrt{3\mathbf{J}_2} - \sigma_{\mathrm{y}} = 0 \tag{2.2.50}$$

・Mohr-Coulomb 降伏関数

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\phi - 2\,c\cos\phi = 0 \tag{2.2.51}$$

・Drucker-Prager 降伏関数

$$F = \sqrt{J_2} - \alpha\,\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I} - \sigma_y = 0 \tag{2.2.52}$$

ここでは、材料定数αとσ_yは材料の粘着力と摩擦角から以下のように計算する

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{3+\sin\phi}\,, \qquad \sigma_y = \frac{6\,c\cos\phi}{3+\sin\phi} \tag{2.2.53}$$

2.2.2.3 粘弾性材料

本開発コードでは、一般化された Maxwell モデルを適用している。その構成式は以下のように偏差ひずみ $\mathbf{e}$ と偏差粘性ひずみ $\mathbf{q}$ の関数になる。

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = K\mathrm{tr}\boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{I} + 2G(\mu_0\mathbf{e} + \mu\mathbf{q}) \tag{2.2.54}$$

ここでは

$$\mu\mathbf{q} = \sum_{\mathbf{m=1}}^{\mathbf{M}} \mu_{\mathbf{m}}\,\mathbf{q}^{(\mathbf{m})}; \qquad \sum_{\mathbf{m=0}}^{\mathbf{M}} \mu_{\mathbf{m}} = 1 \tag{2.2.55}$$

である。また、q は

$$\dot{\mathbf{q}}^{(m)} + \frac{1}{\lambda_m}\mathbf{q}^{(m)} = \dot{\mathbf{e}} \tag{2.2.56}$$

から求められる。ここではλ_mはリラクゼーションである。また、リラクゼーション係数 G は、以下の Prony 級数で表す。

$$G(t) = G\left[\mu_0 + \sum_{i=1}^{M} \mu_m \exp(-t/\lambda_m)\right] \tag{2.2.57}$$

2.2.2.4 クリープ材料

応力一定の状況下において時間依存性のある変位は「クリープ」と呼ばれる現象である。前述した粘弾性挙動も一種の線形なクリープ現象と考えることができる。ここでは、いくつかの非線形なクリープの説明を行うこととする。この現象は瞬間的に発生するひずみに追加することで構成式とする方法が一般的に用いられ、ある定荷重が継続している間のひずみをクリープひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^c$ とする。クリープを考慮した構成式は、通常、応力と全クリープひずみの関数として定義されるクリープひずみ速度 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^c$ が用いられる。

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{c}} \equiv \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}}{\partial \mathrm{t}} = \boldsymbol{\beta}\,(\,\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}\,) \tag{2.2.58}$$

ここで、瞬間的に発生するひずみが弾性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}}$ であるとすると、全ひずみはクリープひずみを加えた次式のように表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}} \tag{2.2.59}$$

ここで、

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}} = \boldsymbol{c}^{\mathrm{e}^{-1}} : \boldsymbol{\sigma} \tag{2.2.60}$$

である。

前述の塑性材料でも示したように、クリープを示す構成式に対して数値解析上の時間積分の方法を示さなければならい。クリープを考慮したときの構成式は、

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{n+1}} = \boldsymbol{c} : (\,\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{n+1}} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n+1}}\,) \tag{2.2.61}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n+1}} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n}} + \Delta\mathrm{t}\,\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{n+\theta}} \tag{2.2.62}$$

ここで、 $\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{n+\theta}}$ は、

$$\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{n+\theta}} = (\,1 - \theta\,)\,\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{n}} + \theta\,\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{n+1}} \tag{2.2.63}$$

とする。また、クリープひずみ増分 $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}$ は、非線形方程式を単純化した

$$\mathbf{R}_{\mathrm{n+1}} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{n+1}} - \boldsymbol{c}^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{n+1}} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n}} - \Delta\mathrm{t}\,\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{n+\theta}} = \mathbf{0} \tag{2.2.64}$$

とする。

Newton-Raphson 法での反復計算では、初期値を $\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{n+1}} = \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{n}}$ および有限要素法から求められるひずみ増分として、反復解と増分解は次式とする。

$$\mathbf{R}^{(\mathrm{k+1})}_{\mathrm{n+1}} = \mathbf{0} = \mathbf{R}^{(\mathrm{k})}_{\mathrm{n+1}} - (\,\boldsymbol{c}^{-1} + \Delta\mathrm{t}\,\boldsymbol{c}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n+1}}\,)\,\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}^{(\mathrm{k})}_{\mathrm{n+1}} \tag{2.2.65}$$

ここで、

$$\boldsymbol{c}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n+1}} = \left.\frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}\right|_{\mathrm{n+\theta}} = \theta \left.\frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}\right|_{\mathrm{n+1}} \tag{2.2.66}$$

とする。式(2.2.66)と式(2.2.67)の解を使って残差 $\mathbf{R}$ が $\mathbf{0}$ になるまで反復解法を行うとき、応力 $\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{n+1}}$ と接線係数

$$\boldsymbol{c}^{*}_{\mathrm{n+1}} = [\,\boldsymbol{c}^{-1} + \Delta\mathrm{t}\,\boldsymbol{c}^{\mathrm{c}}_{\mathrm{n+1}}\,]^{-1} \tag{2.2.67}$$

を用いる。

式(2.2.57)の具体的な式として、本開発コードは、以下のような Norton モデルを適用している。

その構成式は下式のような相当クリップひずみ$\dot{\varepsilon}^{cr}$が mises 応力 q と時間 t の関数と表す。

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = Aq^n t^m \qquad (2.2.68)$$

ここでは、A,m,n は材料定数である。

2.2.3　接触解析手法

2 つの物体が接触すると、接触面を介して接触力 $\mathbf{t}_c$ が伝達される。仮想仕事の原理式（2.2.4）を以下のように書きかえる。

$$\int_{{}^{t'}v} {}^{t'}\boldsymbol{\sigma} : \delta^{t'}\mathbf{A}_{(L)} d^{t'}v = \int_{{}^{t'}s_t} {}^{t'}\bar{\mathbf{t}} \bullet \delta\mathbf{u} d^{t'}s + \int_{V} {}^{t'}\bar{\mathbf{b}} \bullet \delta\mathbf{u} d^{t'}v + \int_{{}^{t'}s_c} {}^{t'}\mathbf{t}_c \left[\delta\mathbf{u}^{(1)} - \delta\mathbf{u}^{(2)}\right] \qquad (2.2.69)$$

ここで、S_c は接触面積、$\mathbf{u}^{(1)}$と $\mathbf{u}^{(2)}$はそれぞれ接触物体 1 と接触物体 2 の変位を表している。

接触解析では、接触する可能性のある面を対にして指定する。この面の対の片方をマスター面、もう片方をスレーブ面とする。このマスタースレーブ解析手法では、接触拘束条件を以下のように仮定する。

1)　スレーブ節点は，マスター面を貫通しない。

2)　接触があった時、スレーブ節点は接触位置とし、この接触点を通じマスター面とスレーブ面が互いに接触力，摩擦力を伝達する。

式(2.2.54)の最後の項を有限要素により離散化して次式を得る

$$\int_{{}^{t'}s_c} {}^{t'}\mathbf{t}_c \left[\delta\mathbf{u}^{(1)} - \delta\mathbf{u}^{(2)}\right] \approx \delta\mathbf{U}\mathbf{K}_C \Delta\mathbf{U} + \delta\mathbf{U}\mathbf{F}_c \qquad (2.2.70)$$

ここでは、$\mathbf{K}_c$ と $\mathbf{F}_c$ はそれぞれ接触剛性マトリクスおよび接触力を表す。この式を式(2.2.20)あるいは(2.2.32)に代入すると、接触拘束を考慮した total Lagrange 法および updated Lagrange 法の有限要素法定式は以下のようになる。

$$\delta\mathbf{U}^T \left({}_0^t\mathbf{K}_L + {}_0^t\mathbf{K}_{NL} + \mathbf{K}_c\right)\Delta\mathbf{U} = \delta\mathbf{U}^T\, {}_0^{t'}\mathbf{F} - \delta\mathbf{U}^T\, {}_0^t\mathbf{Q} + \delta\mathbf{U}^T\mathbf{F}_c \qquad (2.2.71)$$

$$\delta\mathbf{U}^T \left({}_t^t\mathbf{K}_L + {}_t^t\mathbf{K}_{NL} + \mathbf{K}_c\right)\Delta\mathbf{U} = \delta\mathbf{U}^T\, {}_t^{t'}\mathbf{F} - \delta\mathbf{U}^T\, {}_t^t\mathbf{Q} + \delta\mathbf{U}^T\mathbf{F}_C \qquad (2.2.72)$$

本開発ソフトは変形体同士間の接触変形解析ができ､ユーザーから以下の解析機能を選択できる。

- 微小すべり接触問題：この解析では接触点の位置変化がないと仮定している。
- 有限すべり接触問題：この解析は、変形と伴い接触位置変化のある場合に対応している。
- 摩擦なし接触問題
- 摩擦あり接触問題：この解析は Coulomb 摩擦則に対応している。

ただし、微小変形線形弾性解析を選択した場合は、微小すべり摩擦なし問題となる。

また、現時点では一次ソリッド要素（要素番号 341,351,361）の接触解析のみ対応している。

2.3　固有値解析

2.3.1　一般化固有値問題

連続体の自由振動解析を行う場合、空間的離散化を行い、図 2.3.1 に示すような集中質点による多自由度系でモデル化さられる。減衰のない自由振動問題の場合、支配方程式（運動方程式）は以下のとおりである。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}+\mathbf{K}\mathbf{u}=0 \tag{2.3.1}$$

ただし、$\mathbf{u}$ は一般化変位ベクトル、$\mathbf{M}$ は質量マトリックス、$\mathbf{K}$ は剛性マトリックスである。ところで、固有角振動数を ω とし、a, b を任意定数、$\mathbf{x}$ をベクトルとして、関数

$$\mathbf{u}(t)=(a\sin\omega t+b\cos\omega t)\mathbf{x} \tag{2.3.2}$$

を定義する。ここで、この式と、この 2 階の微分、すなわち、

$$\ddot{\mathbf{u}}(t)=\omega(a\sin\omega t-b\sin\omega t)\mathbf{x} \tag{2.3.3}$$

を式(2.3.1)に代入すれば、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}+\mathbf{K}\mathbf{u}=(a\sin\omega t+b\cos\omega t)(-\omega^2\mathbf{M}+\mathbf{K}\mathbf{x})=(-\lambda\mathbf{M}\mathbf{x}+\mathbf{K}\mathbf{x})=0 \tag{2.3.4}$$

となる。すなわち、

$$\mathbf{K}\mathbf{x}=\lambda\mathbf{M}\mathbf{x} \tag{2.3.5}$$

を得る。つまり、方程式(2.3.5)を満たす係数 λ ($=\omega^2$) およびベクトル $\mathbf{x}$ を見つけられれば、関数 $\mathbf{u}$(t) は、方程式(2.3.1)の解となっている。係数 λ を固有値、ベクトル $\mathbf{x}$ を固有ベクトルと呼び、これらを式(2.3.1)から求める問題を一般化固有値問題と呼ぶ。

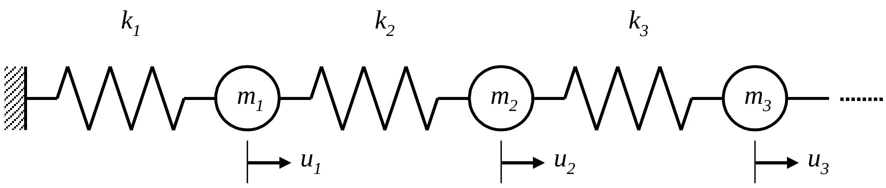


図 2.3.1　減衰のない自由振動の多自由度系の例

2.3.2　問題設定

式(2.3.5)は任意の次数に拡張でき、多くの場面で登場する。多くの物理問題を扱う上では行列はエルミート（対称）であることが多い。即ち、複素行列においては、転置行列が共役複素数になっており、実行列においては対称行列である。つまり、行列 K の ij 成分を k_{ij} とした時、k の共役複素数を $\bar{k}$ とおけば、

$$k_{ij} = \bar{k}_{ji} \qquad (2.3.6)$$

の関係にある。

このマニュアル内では、行列は対称で正定値を仮定する。正定値とは固有値がすべて正、言い換えれば下記の式(2.3.7)を常に満足する行列である。

$$\mathbf{x}^{\mathbf{T}}\mathbf{A}\mathbf{x} > 0 \qquad (2.3.7)$$

2.3.3　シフト付逆反復法

有限要素法による構造解析では、実用上、全ての固有値は必要とせず、高々数個の低次の固有値で十分な場合が多い。ところで、HEC-MW では大規模な問題を扱うことを想定しており、行列はサイズが大きく非常に疎（零要素が多い）である。したがって、この事を念頭に低次のモードの固有値を効率よく求めることが重要である。

固有値の下限をσとした時、式(2.3.5)を次式のように変形する（数学的には等価な式である）。

$$(\mathbf{K} - \sigma\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}\mathbf{x} = [1/(\lambda - \sigma)]\mathbf{x} \qquad (2.3.8)$$

この時、計算に当たっては次のような好都合な性質がある。

①　　モードが反転している。

②　　ρ　周辺の固有値が最大化されている。

実際の計算では最大固有値が最初に求まることが多い。そのため主要な収束計算を式(2.3.5)よりむしろ式(2.3.8)に適用し、ρ周辺の固有値から求めることを狙うものとする。この手法は、シフト付逆反復と呼ばれている。

2.3.4　固有値解法のための算法

古典的な方法では Jacobi 法がよく知られている。この方法は、行列サイズが小さく密行列である時、有効である。しかしながら、HEC-MW で扱う行列は大規模で疎であるため、この方法は採用せずランチョス(Lanczos)反復解法を採用している。

2.3.5　ランチョス法

1950 年台に C. Lanczos により提案されたこの手法は、行列を 3 重対角化する計算算法であり、下記のような特徴を有している。

①反復収束解法であり、行列を疎のまま計算を進めることができる。

②算法は行列、ベクトル積が中心となっており並列化に適している。

③有限要素メッシュに伴う幾何学的領域分割法に適している。

④求める固有値の個数やモード範囲を限定して効率よい計算を行える。

ランチョス法は、初期ベクトルからスタートして順次直交ベクトルを作成し部分空間の基底を求める計算を行うものである。この方法は、別の反復解法であるサブスペース法より高速であると言われ、有限要素法プログラムにて広く使われている。しかしこの手法では、計算機の誤差の影響を受けやすく、ベクトルの直交性が損なわれ、途中で破綻する恐れを避けられない。そのため誤差に対する対策は不可欠である。

2.3.6　ランチョス法が持つ幾何学的意味

式(2.3.8)を次のように変数変換することにより

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K} - \sigma\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}, \quad [1/(\lambda - \sigma)] = \zeta \tag{2.3.9}$$

問題を書き直すと

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \zeta\mathbf{x} \tag{2.3.10}$$

を得る。

適当なベクトル $\mathbf{q}_o$ に対して行列 $\mathbf{A}$ による一次変換を行う（図 2.3.2 参照）。

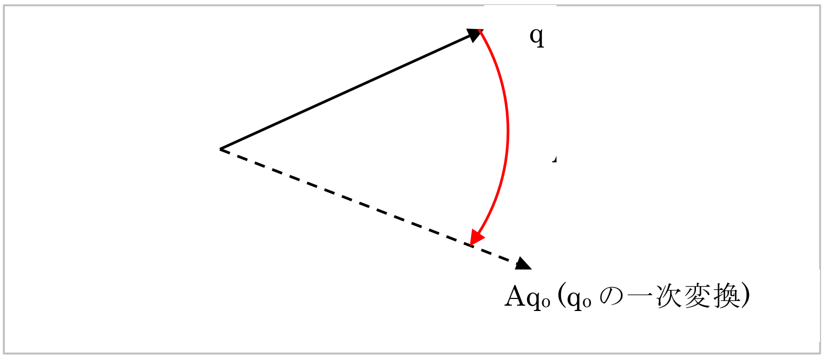


図 2.3.2　行列 **A** による $\mathbf{q}_0$ の一次変換

変換されたベクトルは、元のベクトルとつくる空間の中で直交化される。すなわち、図 2.3.2 のようないわゆるグラム・シュミットの直交化を行う。そうして得られたベクトルを $\mathbf{r}_1$ としてそれを正規化（長さ 1 に）して $\mathbf{q}_1$ を得る（図 2.3.3）。同様な算法により $\mathbf{q}_1$ から $\mathbf{q}_2$ を得る。このとき $\mathbf{q}_2$ は $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_o$ 両方に直交している（図 2.3.4）。同様の計算を続けると互いに直交するベクトルが最大行列の次数まで求まる。

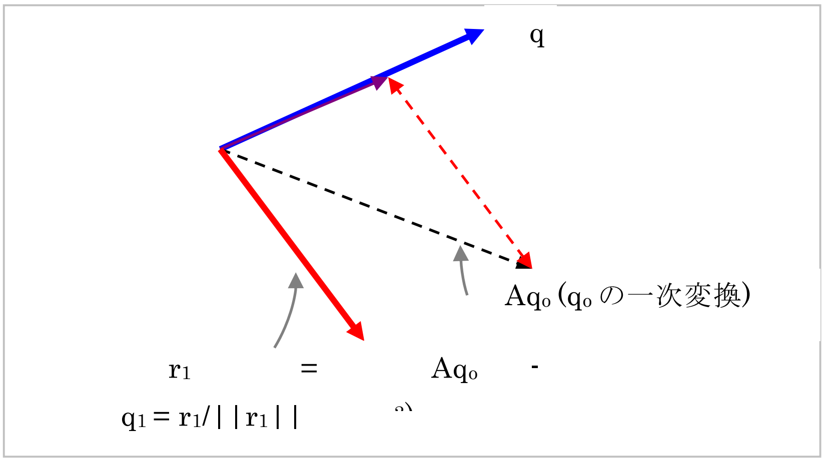


図 2.3.3　**qo に直交なベクトル q1**

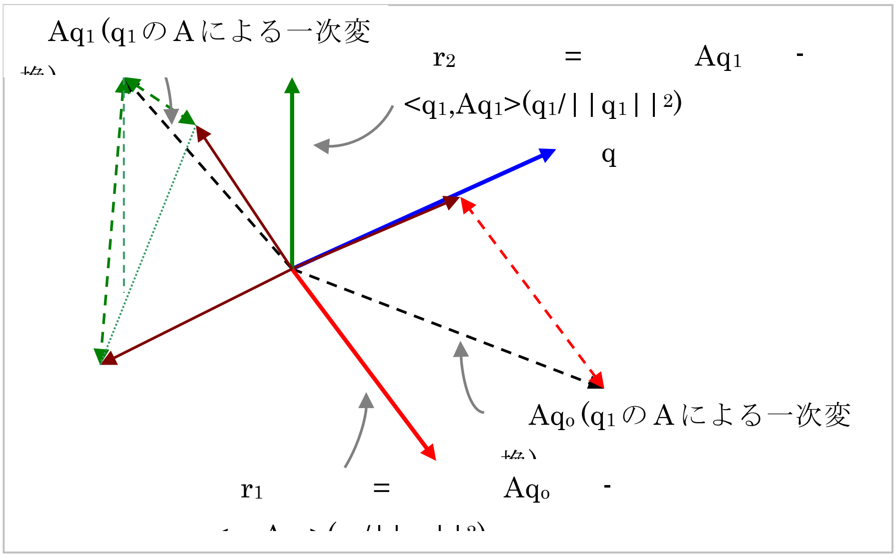


図 2.3.4　**q1 と qo に直交なベクトル q2**

特にランチョス法の算法はベクトル列 {**Aq_o, Aq_1, Aq_2, …** }言い換えて {**Aq_o, A^2q_o,A^3q_o, … , A^nq_o**} に対するグラム・シュミットの直交化である。このベクトル列を Krylov 列と呼び、それがつくる空間を Krylov 部分空間とよぶ。この空間においてグラム・シュミットの直交化を行うと、直近の２つのベクトルを用いることによりベクトルが求まる。これをランチョスの原理と呼ぶ。

2.3.7　三重対角化

上記繰り返しの中で i+1 番目の計算は

$$\beta_{i+1}q_{i+1} + \alpha_{i+1}q_i + \gamma_{i+1}q_{i-1} = Aq_i \qquad (2.3.11)$$

と表せる。ただし、

$$\beta_{i+1} = \frac{1}{|r_{i+1}|}, \quad \alpha_{i+1} = \frac{(q_i, Aq_i)}{(q_i, q_i)}, \quad \gamma_{i+1} = \frac{(q_{i-1}, Aq_i)}{(q_{i-1}, q_{i-1})} \tag{2.3.12}$$

である。これを行列表記すると

$$AQ_m = Q_m T_m \tag{2.3.13}$$

となる。ここで、

$$Q_m = [q_1 q_2 q_3 \ldots q_m], \quad T_m = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \gamma_1 & & & \\ \beta_2 & \alpha_2 & \gamma_2 & & \\ & \cdots & & & \\ & & & \beta_m & \alpha_m \end{pmatrix} \tag{2.3.14}$$

である。すなわち、式(2.3.13)で得られる 3 重対角行列について固有値計算を行うことにより固有値が得られる。

2.4 熱伝導解析

本開発コードで用いられる有限要素法（Finite Element Method）による固体についての熱伝導解析手法を示す。

2.4.1 基礎方程式

連続体中での熱伝導方程式は以下のようになる。

$$\rho \mathrm{c} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(kxx \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(kyy \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(kxx \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \tag{2.4.1}$$

ただし、

$\rho = \rho(x)$ 質量(密度)

$c = c(x, T)$ 比熱

$T = T(x, t)$ 温度

$\mathrm{K} = k(x, T)$ 熱伝導率

$Q = Q(x, T, t)$ 発熱量

である。ここでxは位置、T は温度、tは時間を表す。

考慮している領域をS 、その周囲をΓ とする。Γ 上では、Dirichet 型か Neumann 型のいずれかの境界条件が、いたるところで与えられるものと仮定すると境界条件は以下のようになる。

$$T = T_1(x,t) \qquad X \in \Gamma_1 \tag{2.4.2}$$

$$k\frac{\partial T}{\partial n} = q(x,T,t) \qquad X \in \Gamma_2 \tag{2.4.3}$$

ただし、T_1，q は関数形が既知とする。qは境界からの流出熱流束である。本プログラムでは、3 種類の熱流束が考慮できる。

$$q = -q_s + q_c + q_r \tag{2.4.4}$$

$$q_s = q_s(x,t) \tag{2.4.5}$$

$$q_c = hc(T - Tc) \tag{2.4.6}$$

$$q_r = hr(T^4 - Tr^4) \tag{2.4.7}$$

q_s は分布熱流束、q_c は対流熱伝達による熱流束、q_r は輻射熱伝達による熱流束である。ただし、

$Tc = Tc(x,t)$　対流熱伝達率雰囲気温度

$hc = hc(x,t)$　対流熱伝達係数

$Tr = Tr(x,t)$　輻射熱伝達率雰囲気温度

$hr = \varepsilon\sigma F = hr(x,t)$　輻射熱伝達係数

ε： 輻射率，σ： StefanBoltzmann 定数，F： 形態係数

2.4.2　離散化

方程式(2.4.1)を Galerkin 法によって離散化すると、

$$[\mathrm{K}]\{T\} + [\mathrm{M}]\frac{\partial T}{\partial t} = \{F\} \tag{2.4.8}$$

ただし、

$$[\mathrm{K}] = \int \left(kxx \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} + kyy \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} + kzz \frac{\partial \{N\}^T}{\partial z} \frac{\partial \{N\}}{\partial z} \right) dV$$

(2.4.9)

$$+ \int hc\{N\}^T \{N\} ds + \int hr\{N\}^T \{N\} ds$$

$$[\mathrm{M}] = \int \rho c\{N\}^T \{N\} dV \qquad (2.4.10)$$

$$\{F\} = \int Q\{N\}^T dV - \int q_s \{N\}^T dS + \int hcTc\{N\}^T dS$$

(2.4.11)

$$+ \int hrTr(T + Tr)(T^2 + Tr^2)\{N\}^T dS$$

$$\{N\} = (N^1, N^2 \cdots\cdots), \; Ni = Ni(x) \qquad (2.4.12)$$
：形状関数

方程式(2.4.8)は非線形かつ非定常の方程式である。いま、時間に関して後退オイラー法により離散化して、時刻 $t = t_0$ における温度が既知のとき時刻 $t = t_{0+⊿t}$ での温度を次式を用いて計算することにする。

$$[\mathrm{K}]_{t=t_{0+⊿t}} \{T\}_{t=t_{0+⊿t}} + [\mathrm{M}]_{t=t_{0+⊿t}} \frac{\{\mathrm{T}\}_{t=t_{0+⊿t}} - \{\mathrm{T}\}_{t=t_0}}{⊿t} = \{F\}_{t=t_{0+⊿t}} \qquad (2.4.13)$$

ここでの式(2.4.13)を近似的にみたす温度ベクトル $\{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}$ を改善して、精度の良い解

$\{T\}^{(i)+1}_{t=to+⊿t}$ を求めることを考える。

そのために、まず、温度ベクトルを次のようにあらわす。

$$\{T\}_{t=to+⊿t} = \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t} + \{⊿T\}^{(i)}_{t=to+⊿t} \qquad (2.4.14)$$

熱伝導マトリクスと温度ベクトルとの積、質量マトリクスなどを次式のように近似的にあらわす。

$$[\mathrm{K}]_{t=t_{0+⊿t}} \{T\}_{t=t_{0+⊿t}} \cong [\mathrm{K}]^{(i)}_{t=to+⊿t} \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}$$

$$+ \frac{\partial [\mathrm{K}]^{(i)}_{t=to+⊿t} \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}}{\partial \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}} \{⊿T\}^{(i)}_{t=to+⊿t} \qquad (2.4.15)$$

$$[\mathrm{M}]_{t=t_{0+⊿t}} \cong [\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+⊿t} + \frac{\partial [\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+⊿t}}{\partial \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}} \{⊿T\}^{(i)}_{t=to+⊿t} \qquad (2.4.16)$$

式(2.4.14) (2.4.15) (2.4.16)を式(2.4.13)に代入して二次以上の項を省略すると次式を得る。

$$\left(\frac{[\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+⊿t}}{⊿t} + \frac{\partial [\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+⊿t} \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}}{\partial \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}} \frac{\{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t} - \{T\}_{t=t0}}{⊿t} + \frac{\partial [\mathrm{K}]^{(i)}_{t=to+⊿t} \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}}{\partial \{T\}^{(i)}_{t=to+⊿t}} \right) \{⊿T\}^{(i)}_{t=to+⊿t} \qquad (2.4.17)$$

$$=\{F\}_{t=t0+\varDelta t}-[\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}\frac{\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}-\{T\}_{t=t0}}{\varDelta t}-[\mathrm{K}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}$$

さらに左辺の係数マトリクスを次式をもちいて近似評価する。

$$[\mathrm{K}^*]^{(i)}=\frac{[\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}}{\varDelta t}+\frac{\partial[\mathrm{K}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}}{\partial\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}}\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}$$

$$=\frac{[\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}}{\varDelta t}+[\mathrm{K}_{\mathrm{T}}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t} \tag{2.4.18}$$

ここで $[\mathrm{K}_{\mathrm{T}}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}$ は接線剛性マトリクスである。

結局次式を用いて反復計算を行うことによって時刻 $t=t0+\varDelta t$ での温度を計算することができる。

$$[\mathrm{K}^*]^{(i)}\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}$$

$$=\{F\}_{t=t0+\varDelta t}-[\mathrm{M}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}\frac{\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}-\{T\}_{t=t0}}{\varDelta t}-[\mathrm{K}]^{(i)}_{t=to+\varDelta t}\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t} \tag{2.4.19}$$

$$\{T\}^{(i+1)}_{t=to+\varDelta t}=\{T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}+\{\varDelta T\}^{(i)}_{t=to+\varDelta t}$$

特に定常解析においては次式を用いて反復計算を行う。

$$[\mathrm{K}_{\mathrm{T}}]^{(i)}\{\varDelta T\}^{(i)}_{\mathrm{t}=\infty}=\{F\}_{t=\infty}-[\mathrm{K}_{\mathrm{T}}]^{(i)}\{\varDelta T\}^{(i)}_{\mathrm{t}=\infty}$$

$$\{T\}^{(i+1)}_{\mathrm{t}=\infty}=\{T\}^{(i)}_{\mathrm{t}=\infty}+\{\varDelta T\}^{(i)}_{\mathrm{t}=\infty} \tag{2.4.20}$$

非定常解析において時間増分⊿tの選び方は、時間に関する離散化に陰解法を採用しているので、一般にその大きさの制約を受けない。ただし時間増分⊿tが大きすぎると、反復計算における収束回数は増加する。そこで本プログラムは、反復計算過程における残差ベクトルの大きさをつねにモニターし、反復計算の収束がおそすぎれば時間増分⊿tを減少させ、反復計算回数が少なくなると時間増分⊿tを増加される自動増分機能を備えている。

2.5 動的解析手法

本節では直接時間積分法を適用した動的問題解析手法について示す。以下に示すように、本開発コードでは、陰解法及び陽解法による時刻歴応答解析が可能である。

2.5.1 陰解法の定式化について

動的問題を対象として、下式に示す運動方程式の解法に直接時間積分法を適用した。

$$\mathbf{M}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})+\mathbf{C}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})+\mathbf{Q}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})=\mathbf{F}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) \tag{2.5.1}$$

ここでは、$\mathbf{M}$ と $\mathbf{C}$ は 質量マトリクスと減衰マトリクス、$\mathbf{Q}$ と $\mathbf{F}$ は内力ベクトルと 外力ベクトル

である。なお、本ソフトは質量の変化を考慮せず、質量マトリクスは非線形において変形によらず一定となる。

時間増分Δt 内での変位、速度及び加速度の変化は、Newmark-β法を用いて式(2.5.2)及び式(2.5.3)に示すように近似している。

$$\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) = \frac{\gamma}{\beta\Delta\mathrm{t}}\Delta\mathbf{U}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) - \frac{\gamma-\beta}{\beta}\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) - \Delta\mathrm{t}\frac{\gamma-2\beta}{2\beta}\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) \tag{2.5.2}$$

$$\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) = \frac{1}{\beta\Delta\mathrm{t}^2}\Delta\mathbf{U}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) - \frac{1}{\beta\Delta\mathrm{t}}\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) - \frac{1-2\beta}{2\beta}\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) \tag{2.5.3}$$

ここで、

γ,β：パラメータ

よく知られているように、γ及びβを以下の値にした場合、線形加速度法あるいは台形則に一致する。

γ=1/2、β=1/6（線形加速度法）

γ=1/2、β=1/4（台形則）

式(2.5.2)及び式(2.5.3)を式(2.5.1)に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}&\left(\frac{1}{\beta\Delta\mathrm{t}^2}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta\Delta\mathrm{t}}\mathbf{C} + \mathbf{K}\right)\Delta\mathbf{U}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})\\ &\quad = \mathbf{F}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) - \mathbf{Q}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) + \frac{1}{\beta\Delta\mathrm{t}}\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) + \frac{1-2\beta}{2\beta}\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) + \frac{\gamma-\beta}{\beta}\mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t})\\ &\quad + \Delta\mathrm{t}\frac{\gamma-2\beta}{2\beta}\mathbf{C}\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t})\end{aligned} \tag{2.5.4}$$

特に、線形問題に対しては $\mathbf{K}_L$ は線形剛性マトリクスとし、$\mathbf{Q}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t}) = \mathbf{K}_L\mathbf{U}(\mathrm{t}+\Delta\mathrm{t})$となり、この式を上式に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}&\left\{\boldsymbol{M}\left(-\frac{1}{(\Delta t)^2\beta}\boldsymbol{U}(t) - \frac{1}{(\Delta t)\ \beta}\dot{\boldsymbol{U}}(t) - \frac{1-2\beta}{2\beta}\ddot{\boldsymbol{U}}(t)\right)\right.\\ &\qquad \left. + \boldsymbol{C}\left(-\frac{\gamma}{(\Delta t)\ \beta}\boldsymbol{U}(t) + \left(1-\frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{\boldsymbol{U}}(t) + \Delta t\frac{2\beta-\gamma}{2\beta}\ddot{\boldsymbol{U}}(t)\right)\right\}\\ &\quad + \left\{\frac{1}{(\Delta t)^2\beta}\boldsymbol{M} + \frac{\gamma}{(\Delta t)\ \beta}\boldsymbol{C} + \boldsymbol{K}_L\right\}\boldsymbol{U}(t+\Delta t) = \boldsymbol{F}(t+\Delta t)\end{aligned} \tag{2.5.5}$$

尚､幾何学的境界条件として加速度が指定されている箇所では､式(2.5.2)から次式の変位を得る。

$$u_{is}(t+\Delta t) = u_{is}(t) + \Delta t\,\dot{u}_{is}(t) + (\Delta t)^2\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{u}_{is}(t) + (\Delta t)^2\beta\,\ddot{u}_{is}(t+\Delta t) \tag{2.5.6}$$

同様に、速度が指定されている箇所では、式(2.76)から次式の変位を得る。

$$u_{is}(t+\Delta t) = u_{is}(t) + \Delta t\frac{\gamma-\beta}{\gamma}\dot{u}_{is}(t) + (\Delta t)^2\frac{\gamma-2\beta}{2\gamma}\ddot{u}_{is}(t) + \Delta t\frac{\beta}{\gamma}\dot{u}_{is}(t+\Delta t) \tag{2.5.7}$$

ここで、

$u_{is}(t+\Delta t)$:時刻$t+\Delta t$における節点変位
$\dot{u}_{is}(t+\Delta t)$:時刻$t+\Delta t$における節点速度
$\ddot{u}_{is}(t+\Delta t)$:時刻$t+\Delta t$における節点加速度
i:節点自由度番号(1～1節点あたりの自由度数)
s:節点番号

また、質量項及び減衰項の取り扱いは次のとおりとした。

(1) **質量項の取り扱い**

質量マトリックスについては原則として集中質量マトリックスとして扱っている。

(2) **減衰項の取り扱い**

減衰項については式(2.5.8)で表される Rayleigh 減衰として扱っている。

$$\boldsymbol{C} = R_m \boldsymbol{M} + R_k \boldsymbol{K}_L \tag{2.5.8}$$

ここで、

R_m, R_k:パラメータ

2.5.2 陽解法の定式化について

陽解法では下式に示す時刻 t における運動方程式を基にする。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) + \mathbf{C}(\mathrm{t})\dot{\mathbf{U}}(\mathrm{t}) + \mathbf{Q}(\mathrm{t}) = \mathbf{F}(\mathrm{t}) \tag{2.5.9}$$

ここでは、時刻 t+Δt 及び時刻 t-Δt における変位を時刻 t における Taylor 展開により表し、Δt に関する 2 次項までとると、次のようになる。

$$\boldsymbol{U}(t+\Delta t) = \boldsymbol{U}(t) + \dot{\boldsymbol{U}}(t)(\Delta t) + \frac{1}{2!}\ddot{\boldsymbol{U}}(t)(\Delta t)^2 \tag{2.5.10}$$

$$\boldsymbol{U}(t-\Delta t) = \boldsymbol{U}(t) - \dot{\boldsymbol{U}}(t)(\Delta t) + \frac{1}{2!}\ddot{\boldsymbol{U}}(t)(\Delta t)^2 \tag{2.5.11}$$

式(2.83)及び式(2.84)の差及び和から次式が得られる。

$$\dot{\boldsymbol{U}}(t) = \frac{1}{2\Delta t}\left(\boldsymbol{U}(t+\Delta t) - \boldsymbol{U}(t-\Delta t)\right) \tag{2.5.12}$$

$$\ddot{\boldsymbol{U}}(t) = \frac{1}{(\Delta t)^2}\left(\boldsymbol{U}(t+\Delta t) - 2\boldsymbol{U}(t) + \boldsymbol{U}(t-\Delta t)\right) \tag{2.5.13}$$

式(2.5.12)及び式(2.5.13)を式(2.5.9)に代入すると次式が得られる。

$$\left(\frac{1}{\Delta \mathrm{t}^2}\mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta \mathrm{t}}\mathbf{C}\right)\mathbf{U}(\mathrm{t}+\Delta \mathrm{t}) = \mathbf{F}(\mathrm{t}) - \mathbf{Q}(\mathrm{t}) - \frac{1}{\Delta \mathrm{t}^2}\mathbf{M}[2\mathbf{U}(\mathrm{t}) - \mathbf{U}(\mathrm{t}-\Delta \mathrm{t})] - \frac{1}{2\Delta \mathrm{t}}\mathbf{C}\mathbf{U}(\mathrm{t}-\Delta \mathrm{t}) \tag{2.5.14}$$

特に、線形問題に対しては$\mathbf{Q}(\mathrm{t}) = \mathbf{K}_\mathrm{L}\mathbf{U}(\mathrm{t})$となり、上式は以下になる

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M}+\frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}\right)\mathbf{U}(t+\Delta t)=\mathbf{F}(t)-\mathbf{K}_L\mathbf{U}(t)-\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M}[2\mathbf{U}(t)-\mathbf{U}(t-\Delta t)]-\frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}(t-\Delta t)\mathbf{U} \tag{2.5.15}$$

ここで、質量マトリックス及び減衰マトリックスを次のようにおくと、式(2.5.15)は連立方程式の求解操作を不要とする。

$\boldsymbol{M}$：質量マトリックス
　集中質量マトリックス
$\boldsymbol{C}$：減衰マトリックス　(2.5.16)
　比例減衰　$\boldsymbol{C}=R_m\boldsymbol{M}$
　R_m：パラメータ

従って、式(2.5.15)から $\mathbf{U}$(t+Δt)は次式により求めることができる。

$$\mathbf{U}(t+\Delta t)=\frac{1}{\left(\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M}+\frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}\right)}\left\{\mathbf{F}(t)-\mathbf{Q}(t)-\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M}[2\mathbf{U}(t)-\mathbf{U}(t-\Delta t)]-\frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}(t-\Delta t)\mathbf{U}\right\} \tag{2.5.17}$$

2.6　周波数応答解析

2.6.1　定式化

減衰を考慮しない場合の周波数応答解析の運動方程式は式のようになる。

$$\mathbf{M}\,\ddot{\mathbf{U}}+\mathbf{KU}=\mathbf{0} \tag{2.6.1}$$

これを固有モードごとに展開すると、

$$\mathbf{U}=\mathbf{U}_j e^{i\omega_j t} \tag{2.6.2}$$

となる。これを式(2.6.1)に代入すると、

$$\mathbf{KU}_j=\omega_j^2\mathbf{MU}_j \tag{2.6.3}$$

を得る。この固有振動数が実数になることを以下のように証明する。$\omega_j^2=\lambda_j$とおき、式(2.6.3)の複素共役をとると式(2.6.4)を得る。

$$\begin{gathered}\mathbf{K}\,\mathbf{U}_\mathrm{j}=\lambda_j\mathbf{MU}_j\\ \mathbf{K}\overline{\mathbf{U}_j}=\overline{\lambda_j}\mathbf{M}\overline{\mathbf{U}_j}\end{gathered} \tag{2.6.4}$$

これに$\overline{\mathbf{U}_j}^{\mathrm{T}}$をかけると、

$$\begin{gathered}\mathbf{U}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\overline{\mathbf{U}_j}=\overline{\lambda_j}\mathbf{U}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\overline{\mathbf{U}_j}\\ \overline{\mathbf{U}_j}^{\mathrm{T}}\mathbf{KU}_j=\lambda_j\overline{\mathbf{U}_j}^{\mathrm{T}}\mathbf{MU}_j\end{gathered} \tag{2.6.5}$$

を得る。式(2.6.5)より、

$$0=\left(\lambda_j-\overline{\lambda_j}\right)\overline{\mathbf{U}_j}^{\mathrm{T}}\mathbf{MU}_j \tag{2.6.6}$$

となる。ここで、質量マトリクスは正定値対称なのでゼロベクトルでない固有ベクトルについて

$$\overline{\mathbf{U}_j}\,\mathbf{M}\mathbf{U}_j > 0 \tag{2.6.7}$$

が成り立つ。ゆえに、

$$\lambda_j = \overline{\lambda_j} \tag{2.6.8}$$

となり、$\omega_j^2 = \lambda_j$は実数となる。ここで、2 つの違うモードについて考える。

$$\begin{aligned} \mathbf{K}\mathbf{U}_i &= \lambda_i\,\mathbf{M}\,\mathbf{U}_i \\ \mathbf{K}\mathbf{U}_j &= \lambda_j\,\mathbf{M}\,\mathbf{U}_j \end{aligned} \tag{2.6.9}$$

これより、

$$(\lambda_i - \lambda_j)\mathbf{U}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\mathbf{U}_i = 0 \tag{2.6.10}$$

が得られ、固有値が異なる場合には、

$$\mathbf{U}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\,\mathbf{U}_i = 0 \tag{2.6.11}$$

となる。すなわち異なる固有モードは質量マトリクスについて直交する。同じモードについては質量マトリクスについて規格化する(式(2.6.12))ことによって取り扱いが容易になる利点がある。

$$\mathbf{U}_i^{\mathrm{T}}\,\mathbf{M}\mathbf{U}_i = 1 \tag{2.6.12}$$

次に、減衰を考慮した場合の周波数応答解析についての定式化を示す。対象とする運動方程式を式(2.6.13)に示す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \tag{2.6.13}$$

ここでの減衰項は Rayleigh 型を想定して(2.6.14)のようにして表せるものとする。

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \tag{2.6.14}$$

固有値解析で得られた固有ベクトルにより変位ベクトルは時刻 tにおいて式(2.6.15)のように展開できる。

$$\mathbf{U}(t) = \sum_i b_i(t)\mathbf{U}_i \tag{2.6.15}$$

このとき、外力項が調和振動子式の

$$\mathbf{F}(t) = \{\mathbf{F}_R + i\mathbf{F}_I\}e^{i\Omega t} \tag{2.6.16}$$

場合において $b_i(t)$ を決定する。運動方程式(2.6.13)は強制振動の形になるので

$$b_j(t) = (b_{jR} + b_{jI})e^{i\Omega t} \tag{2.6.17}$$

が成り立つ。$b_i(t)$ の展開係数の実部および虚部を求めると式(2.6.18)および式(2.6.19)の形になる。

$$b_{jR} = \frac{\mathbf{U}_j{}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_R(\omega_j{}^2 - \Omega^2) + \mathbf{U}_j{}^T\mathbf{F}_I(\alpha + \beta\omega_j{}^2)\Omega}{(\omega_j{}^2 - \Omega^2)^2 + (\alpha + \beta\omega_j{}^2)^2\Omega^2} \tag{2.6.18}$$

$$b_{jI} = \frac{\mathbf{U}_j{}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}_I(\omega_j{}^2 - \Omega^2) - \mathbf{U}_j{}^T\mathbf{F}_R(\alpha + \beta\omega_j{}^2)\Omega}{(\omega_j{}^2 - \Omega^2)^2 + (\alpha + \beta\omega_j{}^2)^2\Omega^2} \tag{2.6.19}$$

となる。

参考文献

・久田・野口、非線形有限要素法の基礎と応用、丸善(1995).

・O.C.Zienkiewicz, R.L.Taylor: The Finite Element Method, 6th Ed., Vol.2: McGraw-Hill, 2005

・計算力学ハンドブック　第 I 巻　有限要素法（構造編)、日本機械学会(1998).

・鷲津久一郎・宮本博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦、有限要素法ハンドブック,（I 基礎編)、培風館(1982).

・森正武・杉原正顕・室田一雄、線形計算、岩波書店(1994).

・Lois Komzsik:The Lanczos Method Evolution and Application:Siam、2003.

・戸川隼人、有限要素法による振動解析、サイエンス社(1997)

・矢川元基・宮崎則幸、有限要素法による熱応力・クリープ。熱伝導解析、サイエンス社（1985）

3. 解析の流れと入出力ファイル

3.1 解析の流れ

構造解析コード FrontISTR の入力および出力ファイルを図 3.1.1 に示す。

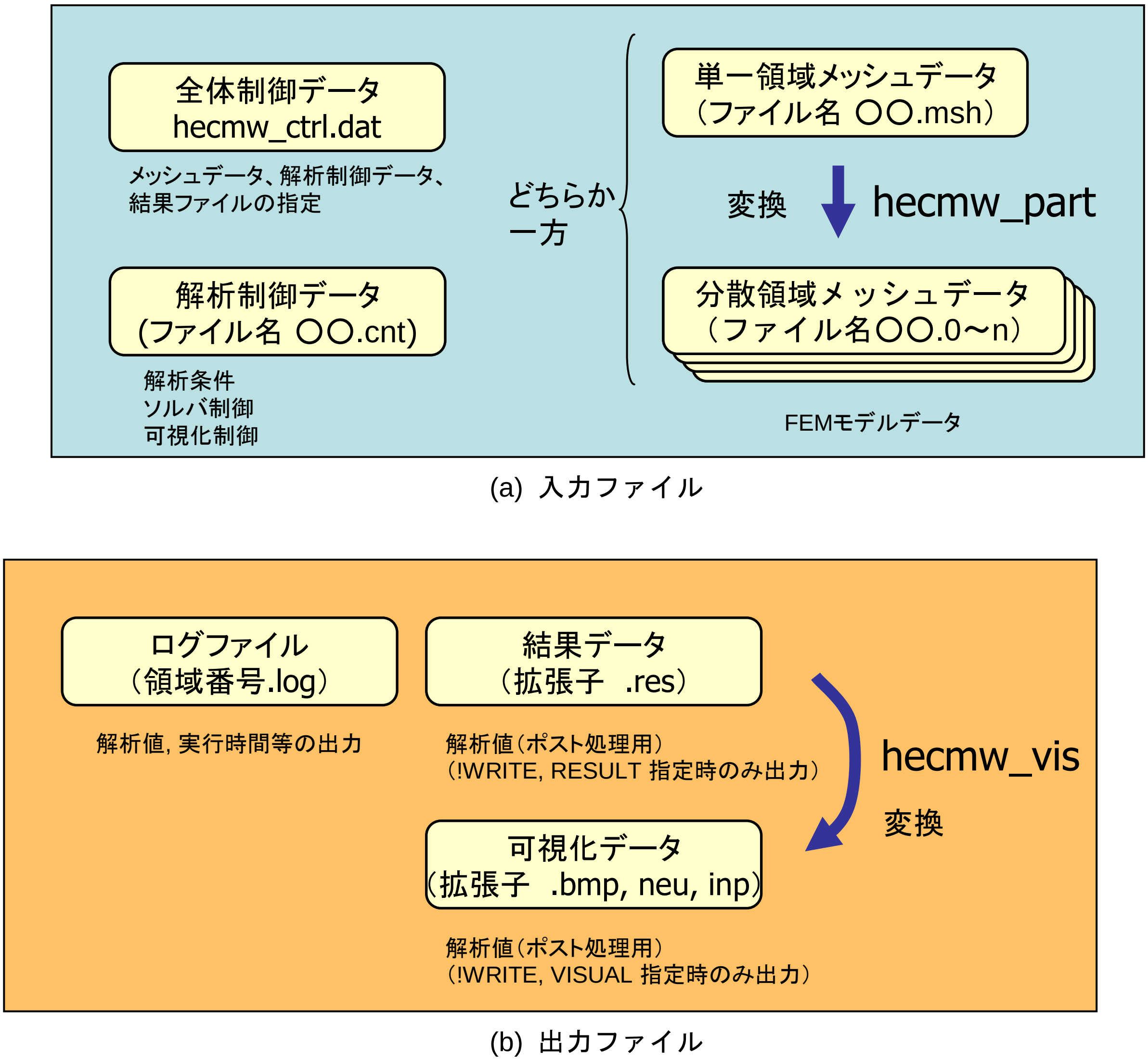


図 3.1.1 FrontISTR 入出力ファイル

FrontISTR は入力ファイルとして、全体制御データ、メッシュデータおよび解析制御データの 3 つのファイルが必要である。モデル全体を単体の CPU で解析する場合には、単一領域メッシュファイルを使用する。複数の CPU で並列実行する場合には、HEC-MW の領域分割ツールである hecmw_part プログラムにより、予め単一領域メッシュデータを領域分割し、その結果としての分散領域メッシュデータを用いる。hecmw_part の詳細は HEC-MW 領域分割マニュアルを参照すること。全体制御データ、解析制御データおよび単一領域メッシュデータはテキストデータであり、

ユーザーはこのマニュアルの説明にしたがって、適当なエディタを用いて作成、編集することが可能であるが、FrontISTR の付属のツールとして、市販のプリポストプロセッサである Femap のサポートするニュートラルファイル（*.neu）を FrontISTR 入力データに変換する neu2fstr を用いて作成することもできる。neu2fstr の詳細は neu2fstr マニュアルを参照すること。

FrontISTR の実行により、ログデータファイルと結果データファイルおよび可視化データを出力する。これらの出力の有無、内容は、解析制御ファイル中の記述および解析内容に依存する。

可視化データは FrontISTR の実行後、作成された結果ファイルより、HEC-MW 付属のツールである hecmw_vis プログラムにより生成することも出来る。hecmw_vis の詳細は HEC-MW 可視化マニュアルを参照すること。

以下、上記入出力ファイルの概要について説明する。

3.2 全体制御データ

このファイルは、メッシュデータと解析制御データの入力ファイルおよび結果出力ファイルを指定する。

全体制御データの詳細は第 5 章に記載する。

（例）

!MESH, NAME=fstrMSH,TYPE=HECMW-DIST

・・・・・分散メッシュデータファイルのヘッダーの定義（領域分散モデルでは必須）

Foo_P16

!MESH, NAME=fstrMSH,TYPE=HECMW-ENTIRE

・・・・・メッシュデータファイル名の定義（単一領域モデルでは必須）

Foo.msh

!CONTROL,NAME=fstrCNT ・・・・・解析制御データファイル名の定義（必須）

Foo.cnt

!RESULT,NAME=fstrRES,IO=OUT ・・・・・解析結果データファイル名の定義（任意）

Foo.res

!RESULT,NAME=vis_out,IO=OUT ・・・・・可視化データファイル名の定義（任意）

Foo.vis

3.3 メッシュデータ

このファイルは有限要素メッシュを定義し、その材料データとセクションデータを定義する。また、解析制御データにて使用するグループデータを定義する。

メッシュデータの詳細は第 6 章に記載する。

（例）

```
!HEADER                                 ---------    メッシュタイトルの設定
TEST MODEL A361
!NODE                                   ---------    節点座標の定義
0.0,0.0,0.0
!ELEMENT, TYPE=361                      ---------    要素コネクティビティの定義
1001,1,2,3,4,5,6,7,8
!SECTION, TYPE=SOLID, EGRP=ALL, MATERIAL=M1    ----   セクションデータの定義
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=1              ---------    材料データの定義
!ITEM=1, SUBITEM=2
4000.,      0.3
!NGROUP, NGRP=FIX, GENERATE             ---------    節点グループの定義
1001, 1201, 50
!EGROUP, EGRP=TOP, GENERATE             ---------    要素グループの定義
1001, 1201, 1
!END
```

3.4　解析制御データ

このファイルは解析の種別、変位境界条件、集中荷重など解析制御データを定義する。またソルバーの制御やビジュアライザーの制御データも、解析制御データに含まれる。

解析制御データの詳細は第 7 章に記載する。

（例）

```
!!Analysis Type
!SOLUTION, TYPE=STATIC                  ---------  解析の種別の指定
!! Analysis control data
!BOUNDARY                               ---------  変位境界条件の定義
FIX,1,3,0.0
!CLOAD                                  ---------  集中荷重条件の定義
CL1,1,-1.0
!DLOAD                                  ---------  分布荷重条件の定義
ALL,BX,1.0
!REFTEMP                                ---------  参照温度の定義
20.0
!TEMPERATURE                            ---------  熱荷重（温度）条件の定義
ALL,100.0
!! Solver Control Data
```

```
!SOLVER,METHOD=CG,PRECOND=1,TIMELOG=YES, ITERLOG=YES
                                        ---------  ソルバーの制御
10000,2
1.0e-8,1.0,0.0
!! Post Control Data
!WRITE,RESULT              -------  結果データ出力
!WRITE,VISUAL              -------  メモリ渡しビジュアライザ制御
!! Visualizer
!visual                                 -------  以下、ビジュアライザーの制御データ
!surface_num =1
!surface_style =1
!END
```

3.5 出力ファイル

実行が終了すると、ログファイル(拡張子 .log)が出力される。また、出力の指示により可視化用解析結果ファイル（拡張子 .res）が出力される。

ログファイルは、以下に示す内容が出力される。

- 変位、ひずみ、応力成分の最大・最小値
- 固有値
- 固有ベクトル値

3.6 実行方法

(1) FrontISTR の準備

FrontISTR の本体（Linux 版は fistr1、Windows 版は fistr1.exe）をパスの通ったディレクトリまたは実行時のカレントディレクトリに格納する。

(2) 入力ファイルの準備

3 種類の入力ファイル hecmw_ctrl.dat、解析制御データおよび（単一または分散領域）メッシュデータ用意し、hecmw_ctrl.dat に解析制御データとメッシュデータのファイル名（パス名）を記述する。必要ならば、解析結果データファイルおよび可視化データファイルの指定も行っておくこと。

(3) 単一領域の解析実行

Linux のターミナルもしくは Windows のコマンドプロンプトを立ち上げ、入力ファイルのあるディレクトリへカレントディレクトリを移動し、下記のように実行する（ただし '>' はプロンプト

を表す）

例）　Linux の場合

> ./fistr1

例）　Window の場合

> fistr 1

(4)　　Linux 上での並列実行

Linux 版では予め MPI をインストールした環境で、並列実行用にコンパイルしなければならない。コンパイル方法の詳細はインストールマニュアルを参照のこと。実行は、MPI の実行環境の設定に依存する。以下に 4 領域での実行例を示す。

> mpirun -np 4 ./fistr1

(5)　　Windows 上での並列実行

Windows 版では、MPICH2 のライブラリを下記 URL よりダウンロードし、インストールする必要がある。並列実行の方法については MPICH2 のマニュアルを参照すること。

http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/

(6)　　並列接触解析の実行

FrontISTR の並列実行では、入力データとして hecmw_ctrl.dat、解析制御データおよび分散領域メッシュデータを準備するが、接触解析のみ分散領域メッシュデータではなく、単一領域メッシュデータを準備する。それに伴い並列実行であっても hecmw_ctrl.dat 中のメッシュデータファイル名の定義では単位領域モデルの指定を行う必要がある。

!MESH, NAME=fstrMSH,TYPE=HECMW-ENTIRE

その他の FrontISTR の準備、入力ファイルの準備、Linux および Windows 上での並列実行手順は通常の FrontISTR の実行と同様である。

3.7　実行時の制約

FrontISTR Ver.3.5 において、正常実行が確認できている機能と要素タイプを表 3.7.1 に示す。

表 3.7.1　解析機能別対応要素一覧

要素番号	線形静解析	固有値解析	熱伝導解析	線形動解析	周波数応答解析	材料・幾何学的非線形静／動解析	境界非線形静／動解析
111	×	×	○	×	×	×	×
112	×	×	×	×	×	×	×
231	○	○	○	○	×	×	×
232	○	○	○	○	×	×	×
241	○	○	○	○	×	×	×
242	○	○	○	○	×	×	×
301	○	×	×	○	×	○	○
341	○	○	○	○	○	○	○
342	○	○	○	○	○	○	×
351	○	○	○	○	○	○	○
352	○	○	○	○	○	○	×
361	○	○	○	○	○	○	○
362	○	○	○	○	○	○	×
541	×	×	○	×	×	×	×
542	×	×	×	×	×	×	×
611	○	×	×	○	×	×	×
641	○	×	×	○	×	×	×
731	○	○	○	○	×	×	×
732	×	×	×	×	×	×	×
741	○	○	○	○	×	×	×
743	○	○	×	○	×	×	×
761	○	×	×	×	×	×	×
781	○	×	×	×	×	×	×

注）○：対応×：未対応

- 線形動解析では要素番号 731、741、743 で並列計算は未対応であるが、それ以外の要素番号での並列計算は可能である。
- 接触解析についての並列計算は直接法のみ対応している。
- 要素番号 611 は熱応力、重力、圧力、遠心力を考慮した解析には対応していない。
- 要素番号 641 は圧力、遠心力を考慮した解析には対応していない。
- 梁要素をソリッド要素と混在して解析を行う場合、利用可能な梁要素は要素番号 641 である。

- シェル要素をソリッド要素と混在して解析を行う場合、利用可能なシェル要素は要素番号 761 および 781 である。

4. 要素ライブラリおよび材料データ

4.1 要素ライブラリ

FrontISTR は、表 4.1.1 に示す要素群を解析に使用することができる。FrontISTR はメッシュデータを HEC−MW を使用して入力するので、以下の要素ライブラリの記述は HEC−MW の説明に準じたものである。要素ライブラリを図 4.1.1 に、要素コネクティビティおよび面番号の定義を図 4.1.2 に示す。

表 4.1.1 要素ライブラリ一覧

要素種類	要素番号	説 明
線要素	111	2 節点リンク要素
	112	3 節点リンク要素
平面要素	231	3 節点三角形要素
	232	6 節点三角形二次要素
	241	4 節点四角形要素
	242	8 節点四角形二次要素
ソリッド要素	301	2 節点トラス要素
	341	4 節点四面体要素
	342	10 節点四面体二次要素
	351	6 節点五面体要素
	352	15 節点五面体二次要素
	361	8 節点六面体要素
	362	20 節点六面体二次要素
インターフェース要素	541	四角形断面一次要素
	542	四角形断面二次要素
梁要素	611	2 節点梁要素
	641	2 節点梁要素(3 自由度節点 4 点による)
シェル要素	731	3 節点三次元一次要素
	732	6 節点三次元二次要素
	741	4 節点三次元一次要素
	743	9 節点三次元二次要素
	761	3 節点三次元一次要素(3 自由度節点 6 点による)
	781	4 節点三次元一次要素(3 自由度節点 8 点による)

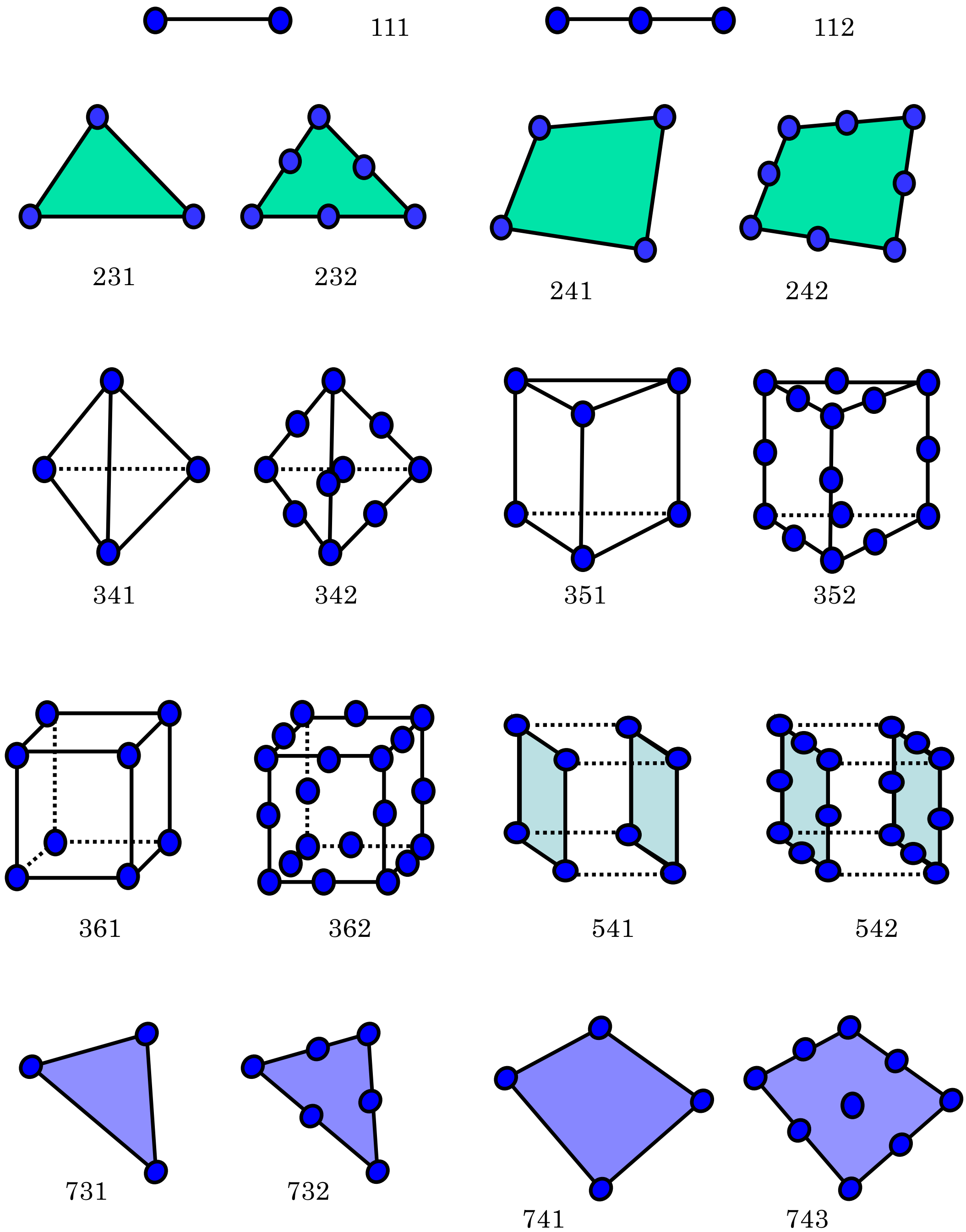
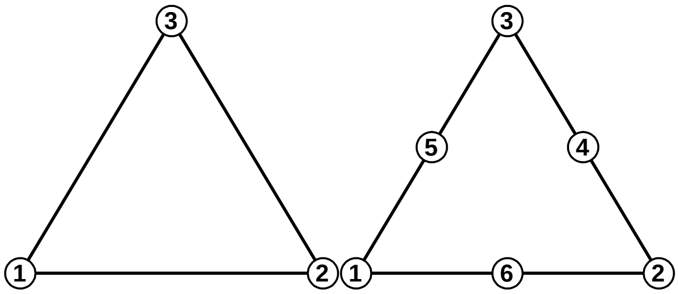


図 4.1.1　要素ライブラリ

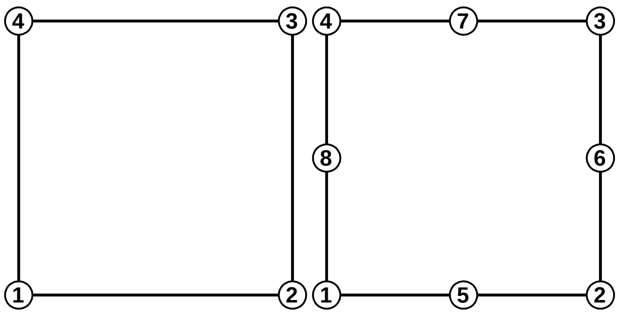
（　線要素　）

（　三角形平面要素　）



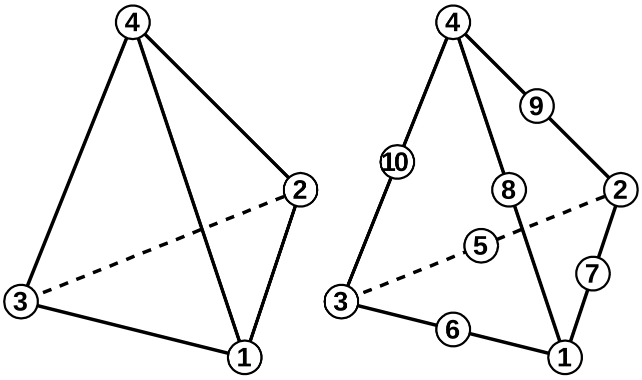
面番号	一次	二次
1	1 - 2	1 - 6 - 2
2	2 - 3	2 - 4 - 3
3	3 - 1	3 - 5 - 1

（　四角形平面要素　）



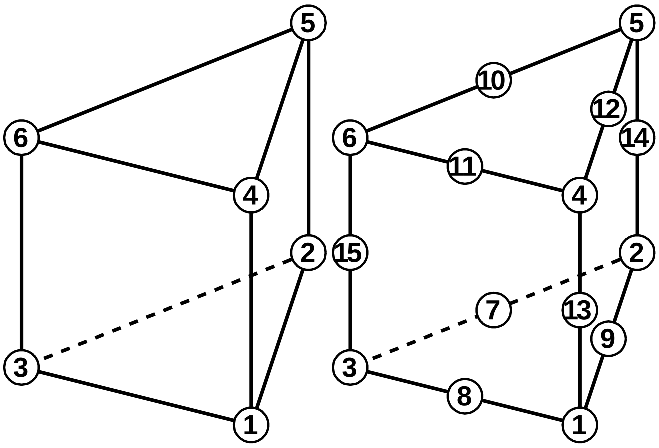
面番号	一次	二次
1	1 - 2	1 - 5 - 2
2	2 - 3	2 - 6 - 3
3	3 - 4	3 - 7 - 4
4	4 - 1	4 - 8 - 1

（　四面体要素　）



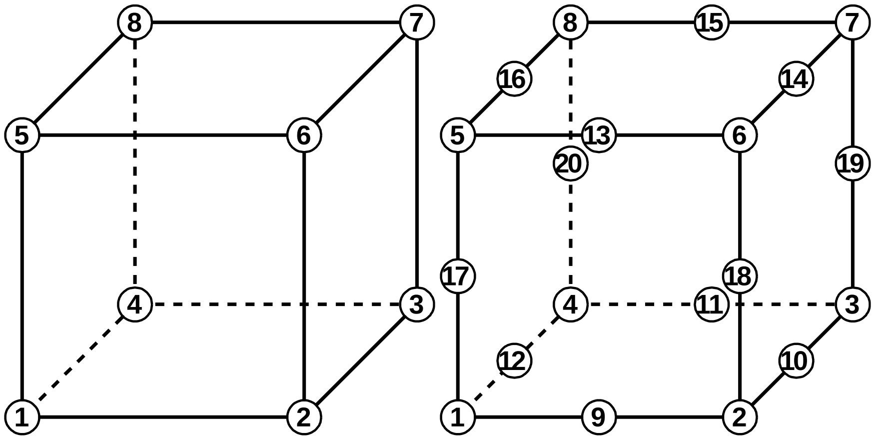
面番号	一次	二次
1	1 - 2 - 3	1 - 7 - 2 - 5 - 3 - 6
2	1 - 2 - 4	1 - 7 - 2 - 9 - 4 - 8
3	2 - 3 - 4	2 - 5 - 3 - 10 - 4 - 9
4	3 - 1 - 4	3 - 6 - 1 - 10 - 4 - 8

（　五面体要素　）



面番号	一次	二次
1	1 - 2 - 3	1 - 9 - 2 - 7 - 3 - 8
2	4 - 5 - 6	4 - 12 - 5　 - 10 - 6 - 11
3	1 - 2 - 5 - 4	1 - 9 - 2 - 14 - 5 - 12 - 4 - 13
4	2 - 3 - 6 - 5	2 - 7 - 3 - 15 - 6 - 10 - 5 - 14
5	3 - 1 - 4 - 6	3 - 8 - 1 - 13 - 4 - 11 - 6 - 15

（ 六面体要素 ）



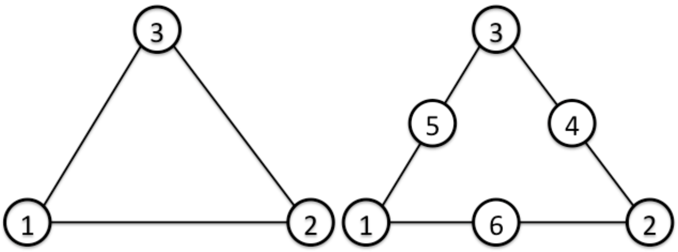
面番号	一次	二次
1	1 - 2 - 3 - 4	1 - 9 - 2 - 10 - 3 - 11 - 4 - 12
2	5 - 6 - 7 - 8	5 - 13 - 6 - 14 - 7 - 15 - 8 - 16
3	1 - 2 - 6 - 5	1 - 9 - 2 - 18 - 6 - 13 - 5 - 17
4	2 - 3 - 7 - 6	2 - 10 - 3 - 19 - 7 - 14 - 6 - 18
5	3 - 4 - 8 - 7	3 - 11 - 4 - 20 - 8 - 15 - 7 - 19
6	4 - 1 - 5 - 8	4 - 12 - 1 - 17 - 5 - 16 - 8 - 20

（ 梁要素 ）

（ 3 自由度節点による梁要素 ）

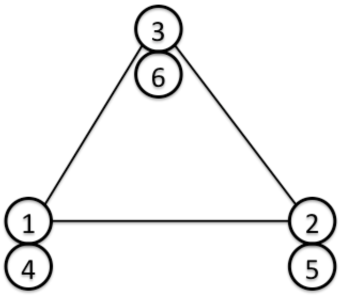
節点 1, 2 は並進自由度、節点 3, 4 は回転自由度

（　三角形シェル要素　）



Surface No.	Linear	Quadratic
1	1 － 2 － 3 [front]	1 － 6 － 2 － 4 － 3 － 5 [front]
2	3 － 2 － 1 [back]	3 － 4 － 2 － 6 － 1 － 5 [back]

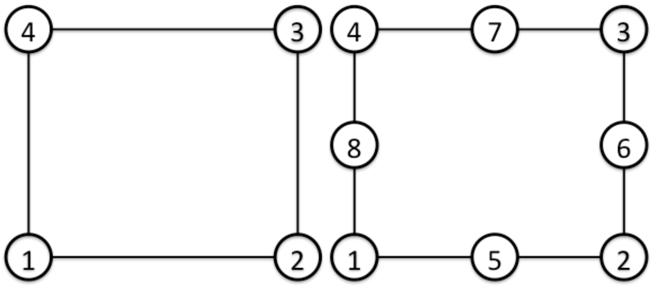
（　3 自由度節点による三角形シェル要素　）



節点 1, 2, 3 は並進自由度、節点 4, 5, 6 は回転自由度

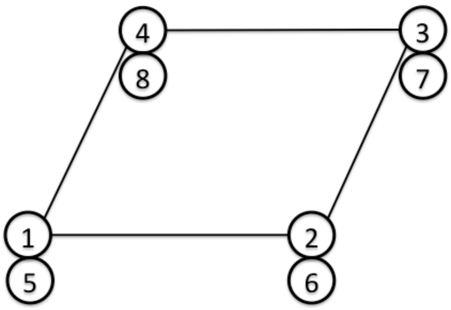
Surface No.	Linear
1	1 － 2 － 3 [front]
2	3 － 2 － 1 [back]

（ 四角形シェル要素 ）



Surface No.	Linear	Quadratic
1	1 － 2 － 3 － 4 [front]	1 － 5 － 2 － 6 － 3 － 7 － 4 － 8 [front]
2	4 － 3 － 2 － 1 [back]	4 － 7 － 3 － 6 － 2 － 5 － 1 － 8 [back]

（ 3 自由度節点による四角形シェル要素 ）



節点 1, 2, 3, 4 は並進自由度、節点 5, 6, 7, 8 は回転自由度

Surface No.	Linear
1	1 － 2 － 3 － 4 [front]
2	4 － 3 － 2 － 1 [back]

図 4.1.2　コネクティビティおよび面番号

4.2　材料データ

4.2.1　弾性静解析、線形動的解析および固有値解析

FrontISTR の弾性静解析および固有値解析では、等方性弾性材料を使用し、要素ごとにヤング率、ポアソン比、密度、線膨張係数を定義する必要がある。これらの材料物性値はメッシュデータのヘッダー !SECTION と !MATERIAL にて定義する。以下にその例を示す。

（例）

!SECTION, TYPE=SOLID, EGRP=ALL, MATERIAL=M1　　----　SECTION の定義

上記の!SECTION,では、ソリッドタイプの要素で、グループ名 = ALL に所属する要素の、材料データ名を M1 とすることを意味する。

次に材料データの定義方法を示す。

（例）

!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=3　　---　材料名 M1 の材料では 3 種の物値を定義の意
!ITEM=1, SUBITEM=2　　---　!ITEM=1 ではヤング率とポアソン比を定義（必須）
4000.,　　0.3
!ITEM=2　　---　!ITEM=2 で質量密度を定義すること（ITEM=3 のときには必須）
8.0102E - 10
!ITEM=3　　---　!ITEM=3 で線膨張係数を定義すること
1.0E - 5

各 ITEM の番号と物性種別が対応しており、ITEM 番号さえ正しければ定義する順番は任意である。ただし、ITEM=1 内ではヤング率、ポアソン比の順に定義しなければならない。

4.2.2　熱伝導解析

FrontISTR の熱伝導解析では、温度依存性を考慮した等方性材料が使用できる。定義する物性値はリンク、平面、ソリッドおよびシェル要素では、密度、比熱および熱伝導率を、インターフェース要素ではギャップ熱伝達係数とギャップ輻射係数である。これらの物性値の定義方法の例を以下に示す。

(1)　リンク、平面およびソリッド要素の場合

!SECTION と!MATERIAL ヘッダーにて定義する。

（例）

```
!SECTION, TYPE=SOLID, EGRP=ALL, MATERIAL=M1   ---  セクションの定義
```

上記の!SECTION では、ソリッドタイプの要素で、グループ名=ALL に所属する要素の、材料データ名を M1 とすることを意味する。以下、その材料データの定義方法である。

（例）

```
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=3          ---  材料名 M1 の材料では 3 種の物値を定義の意
!ITEM=1, SUBITEM=1                  ---  !ITEM=1 では密度と温度を定義（必須）
7850.,   300.
7790.,   500.
        7700.,   800.
!ITEM=2                             ---  !ITEM=2 では比熱と温度を定義（必須）
0.465,   300.
0.528,   500.
        0.622,   800.
!ITEM=3                             ---  !ITEM=3 では熱伝導率と温度を定義（必須）
43.,     300.
38.6,    500.
        27.7,    800.
```

FrontISTR では各 ITEM の番号により物性の種類を識別しているので、両者の整合がとれていれば定義する順番は任意である。

(2)　インターフェース要素の場合

!SECTION ヘッダーで定義する。（材料データは不要）

（例）

```
!SECTION, TYPE=INTERFACE, EGRP=GAP          --- セクションの定義
1.0, 20.15, 8.99835E-9, 8.99835E-9
```

上記の!SECTION では、インターフェース要素で、グループ名=GAP に所属する要素のギャップパラメータを定義している。

第 1 パラメータ　:　ギャップ幅
第 2 パラメータ　:　ギャップ熱伝達係数
第 3 パラメータ　:　ギャップ輻射係数１
第 4 パラメータ　:　ギャップ輻射係数２

(3)　シェル要素の場合

!SECTION と MATERIAL ヘッダーで定義する。

（例）

```
!SECTION, TYPE=SHELL, EGRP=SH, MATERIAL=M2--- セクションの定義
10.0, 5
```

上記の!SECTION では、シェルタイプの要素で、グループ名=SH に所属する要素の、シェル特性を定義している。

第 1 パラメータ　:　シェル厚さ
第 2 パラメータ　:　厚さ方向積分点数

また、同グループに所属する要素の材料物性を、材料データ名を M2 とすることを意味する。

材料物性の定義方法は、等方性材料による単層シェルの場合は、ソリッド要素の場合と全く同様の指定方法が可能である。ソリッド要素の説明を参照のこと。

これに加え、異方性材料や、積層シェルのために、以下に示す定義方法が可能である。

（例）等方性材料　単層の場合

```
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=1
!ITEM=1,SUBITEM=4
0,   200000,    0.3,    2.0
```

第 1 パラメータ　:　等方性 0
第 2 パラメータ　:　ヤング率
第 3 パラメータ　:　ポアソン比
第 4 パラメータ　:　シェル厚さ

(例)等方性材料　複層の場合(2 層)

```
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=1
!ITEM=1,SUBITEM=7
0,   200000,     0.3,     2.0,     200000,      0.3,      2.0
```

第 1 パラメータ　:　等方性 0
第 2 パラメータ　:　ヤング率(第 1 層)
第 3 パラメータ　:　ポアソン比(第 1 層)
第 4 パラメータ　:　シェル厚さ(第 1 層)
第 5 パラメータ　:　ヤング率(第 2 層)
第 6 パラメータ　:　ポアソン比(第 2 層)
第 7 パラメータ　:　シェル厚さ(第 2 層)

積層数分の材料定数を入力することで，自動的に積層シェルを考慮した解析を行う.

シェルの総厚さは，自動的に各層の総和が入力される．積層順は，シェル法線方向，上から順に積層される.

(例)異方性材料　単層の場合

```
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=1
!ITEM=1, SUBITEM=9
1,   28600.,   0.15, 32.3 ,   28600.,   12434.,   12434.,   12434.,   0.0
```

第 1 パラメータ　:　異方性 1
第 2 パラメータ　:　ヤング率 E1
第 3 パラメータ　:　ポアソン比 12
第 4 パラメータ　:　シェル厚さ
第 5 パラメータ　:　ヤング率 E2
第 6 パラメータ　:　せん断係数 G12
第 7 パラメータ　:　せん断係数 G23
第 8 パラメータ　:　せん断係数 G13
第 9 パラメータ　:　異方性角度 θ

異方性角度は θ [degree]で指定する.

(例)異方性材料　複層の場合(2 層)

!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=1

!ITEM=1, SUBITEM=17

1,　28600.,　0.15, 32.3 ,　28600.,　12434.,　12434.,　12434.,　0.0,　28600.,　0.15, 32.3 , 28600.,　12434.,　12434.,　12434.,　0.0

第 1 パラメータ　:　異方性 1

第 2 パラメータ　:　ヤング率 E1(第 1 層)

第 3 パラメータ　:　ポアソン比 12(第 1 層)

第 4 パラメータ　:　シェル厚さ(第 1 層)

第 5 パラメータ　:　ヤング率 E2(第 1 層)

第 6 パラメータ　:　せん断係数 G12(第 1 層)

第 7 パラメータ　:　せん断係数 G23(第 1 層)

第 8 パラメータ　:　せん断係数 G13(第 1 層)

第 9 パラメータ　:　異方性角度 θ (第 1 層)

第 10 パラメータ　:　ヤング率 E1(第 2 層)

第 11 パラメータ　:　ポアソン比 12(第 2 層)

第 12 パラメータ　:　シェル厚さ(第 2 層)

第 13 パラメータ　:　ヤング率 E2(第 2 層)

第 14 パラメータ　:　せん断係数 G12(第 2 層)

第 15 パラメータ　:　せん断係数 G23(第 2 層)

第 16 パラメータ　:　せん断係数 G13(第 2 層)

第 17 パラメータ　:　異方性角度 θ (第 2 層)

4.2.3　非線形静解析

FrontISTR の非線形静解析では、4.2.1 に示した!SECTION と!MATERIAL にて定義する方法の他、解析制御データ中の!ELASTIC、!HYPERELASTIC、!PLASTIC なども定義することができる。以下にその例を示す。

（例） 超弾性材料の定義

```
!MATERIAL
!HYPERELASTIC, TYPE=NEOHOOKE       ---  Neo Hooke 超弾性材料の定義
1000.0, 0.00005                    ---  C10 と D を定義（必須）
```

（例） 弾塑性材料の定義

```
!MATERIAL
!ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC           ---  等方性弾性材料の定義
21000.0, 0.3                       ---  ヤング率とポアソン比を定義（必須）
!PLASTIC, TYPE=DRUCKER-PRAGER      ---  Drucker-Prager 塑性材料の定義
500.0, 4.0, 10.0                   ---  粘着力、摩擦角および硬化係数を定義（必須）
```

5. 全体制御データ

5.1 全体制御データ概要

全体制御データは、FrontISTR に対する入出力ファイルのファイル名を定義するものである。
全体制御データファイルの特徴は以下のとおりである。

- 自由書式に基づく ASCII 形式のファイルである。
- 「!」で始まるヘッダーとそれに続くデータから構成されている。
- ヘッダーの記述の順番は基本的に自由である。
- データの区切り記号には「,」を使用する。

5.2 入力規則

全体制御データファイルは、ヘッダー行、データ行、コメント行から構成される。
ヘッダー行には必ず一つのヘッダーが含まれる。

＜ヘッダー＞
全体制御データファイル内で、データの意味とデータブロックを特定する。
行頭が「!」で始まる場合、ヘッダーであるとみなされる。

＜ヘッダー行＞
ヘッダーとそれに伴うパラメータを記述する。
ヘッダー行はヘッダーで始まっていなければならない。パラメータが必要な場合は、「,」を用いてその後に続けなければならない。パラメータが値をとる場合は、パラメータの後に「=」が続き、その後に値を記述する。
ヘッダー行を複数行にわたって記述することはできない。

＜データ行＞
ヘッダー行の次の行から開始され、必要なデータを記述する。
データ行は複数行にわたる可能性があるが、それは各ヘッダーで定義されるデータ記述の規則により決定される。
データ行は必要ない場合もある。

＜区切り文字＞
データの区切り文字にはカンマ「,」を用いる。

＜空白の扱い＞

空白は無視される。

＜名前＞

名前に使用可能な文字は、アンダースコア「_」、ハイフン「-」、英数字「a-z　A-Z　0-9」であるが、最初の一文字は「_」または英字「a-z　A-Z」で始まっていなければならない。大文字小文字の区別はなく、内部的にはすべて大文字として扱われる。

また、名前の最大長は 63 文字である。

＜ファイル名＞

ファイル名に使用可能な文字は、アンダースコア「_」、ハイフン「-」、ピリオド「.」、スラッシュ「/」、英数字「a-z　A-Z　0-9」である。

ファイル名は、特に記述がない限りパスを含んでもよい。相対パス、絶対パスのいずれも指定可能である。

また、ファイル名の最大長は 1023 文字である。

＜浮動小数点データ＞

指数はあってもなくてもよい。指数の前には、「E」または「e」の記号をつけなければならない。

「E」または「e」どちらを使用してもかまわない。「D」または「 d 」は使用不可。

＜!!, #　　コメント行＞

行頭が「!!」または「#」で始まる行はコメント行とみなされ、無視される。

コメント行はファイル中の任意の位置に挿入でき、その数に制限はない。

5.3　ヘッダー一覧

全体制御データは以下のヘッダーによって構成されている。

ヘッダー名	内容
!CONTROL	解析制御データ定義
!MESH	メッシュデータ定義
!RESTART	リスタートデータ定義
!RESULT	解析結果データ定義
!SUBDIR	サブディレクトリ分割指示

各ヘッダーには，パラメータとそれぞれのヘッダーに対応したデータの項目がある。

以下，上記各ヘッダーについてデータ作成例とともに説明する。

(1) !CONTROL

解析制御データファイルを指定する。

1 行目

!CONTROL, NAME=<name>

パラメータ	
NAME	識別子（必須）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	fstrCNT	解析制御データ

2 行目以降

（2 行目）file

変数名	内容
file	解析制御データファイル名（相対パス、絶対パス共に指定可能。相対パスの場合はカレントディレクトリからのパスとなる）

使用例

!CONTROL, NAME=fstrCNT

myctrl.cnt

(2) !MESH

メッシュデータファイルを指定する。

1 行目

!MESH, NAME=<name>, TYPE=<type> [,optional parameter]

パラメータ	
NAME	識別子（必須）
TYPE	メッシュタイプ（必須）
IO	入出力指定（省略可）
REFINE	メッシュ細分化指定（任意）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	fstrMSH	Solver 入力データ
	part_in	Partitioner 入力データ
	part_out	Partitioner 出力データ
TYPE	HECMW-DIST	HEC-MW 分散メッシュデータ
	HECMW-ENTIRE	HEC-MW 単一領域メッシュデータ
IO	IN	入力用（デフォルト）
	OUT	出力用
REFINE	<integer>	メッシュ細分化回数

2 行目以降

（2 行目）fileheader

変数名	内容
fileheader	メッシュデータファイル名のヘッダー（相対パス、絶対パス共に指定可能。相対パスの場合はカレントディレクトリからのパスとなる）

注意

IO パラメータの有無、パラメータ値は動作に何も影響を与えない。

TYPE が HECMW-DIST の場合、データ行に指定する fileheader はファイル名末尾の「.<rank>」を除いたものである。

使用例

!MESH, NAME=fstrMSH, TYPE=HECMW-DIST, REFINE=1
Mesh.in

(3)　!RESTRAT

リスタートデータファイルを指定する。

1 行目

!RESTART, NAME=<name>, IO=<io>

パラメータ	
NAME	識別子（必須）
IO	入出力指定（必須）

パラメータ名	パラメータ値	内容
NAME	<name>	ユーザー識別子
IO	IN	入力用
	OUT	出力用
	INOUT	入出力兼用

2 行目以降

（2 行目）fileheader

変数名	内容
fileheader	リスタートデータファイル名のヘッダー（相対パス、絶対パス共に指定可能。相対パスの場合はカレントディレクトリからのパスとなる）

注意

この定義によって生成されるファイル名は、fileheader+.<rank>となる。

使用例

!RESTART, NAME=restart-in, IO=IN

restart.in

(4)　!RESULT

解析結果データファイルを指定する。

1 行目

!RESULT, NAME=<name> [,optional parameter]

パラメータ	
NAME	識別子（必須）
IO	入出力指定（省略可）
TYPE	出力形式（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内容
NAME	fstrRES	Solver 出力データ、Visualizer 入力データ
	fstrTEMP	温度入力データ（熱伝導解析結果）
	vis_out	Visualizer 出力データ
IO	IN	入力用
	OUT	出力用
TYPE	TEXT	テキスト形式（デフォルト）
	BINARY	バイナリー形式

2 行目以降

（2 行目）fileheader

変数名	内容
fileheader	解析結果データファイル名のヘッダー（相対パス、絶対パス共に指定可能。相対パスの場合はカレントディレクトリからのパスとなる）

注意

この定義によって生成されるファイル名は、fileheader+.<rank>となる。

使用例

!RESULT, NAME=fstrRES, IO=OUT, TYPE=BINARY

result.out

(5) !SUBDIR

ファイル格納のサブディレクトリ分割を指定する。

1 行目

!SUBDIR, ON [,optional parameter]

パラメータ	
ON	有効（必須）
LIMIT	ファイル数（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内容
ON	なし	
LIMIT	<integer>	1 ディレクトリあたり最大ファイル数 （デフォルト：5000）

2 行目以降

なし

注意

この定義によって、複数ファイルで構成される入出力データは自動的にサブディレクトリ配下となる。

並列数が LIMIT を超える場合、さらに TRUNK0、TRUNK1、・・・・のサブディレクトリ配下となる。

使用例

!SUBDIR, ON, LIMIT=8000

6. 単一領域メッシュデータ

6.1　単一メッシュデータ概要

FrontISTR のメッシュデータ取得には、単一領域メッシュデータファイルを入力する方法と並列処理するために分散メッシュデータファイルを入力する方法の二通りがある。ここでは、単一領域メッシュデータについて記述する。

単一領域メッシュデータの特徴は以下のとおりである。

- 自由書式に基づく ASCII 形式のファイルである。
- 「!」で始まるヘッダーとそれに続くデータから構成されている。
- ヘッダーの記述の順番は基本的に自由である。
- データの区切り記号には「,」を使用する。

6.2　入力規則

単一領域メッシュデータファイルは、ヘッダー行、データ行、コメント行から構成される。

ヘッダー行には必ず 1 つのヘッダーが含まれる。

＜ヘッダー＞

単一領域メッシュデータファイル内で、データの意味とデータブロックを特定する。

行頭が「!」で始まる場合、ヘッダーであるとみなされる。

＜ヘッダー行＞

ヘッダーとそれに伴うパラメータの内容を記述する。

ヘッダー行はヘッダーで始まっていなければならない。パラメータが必要な場合は、「,」を用いてその後に続けなければならない。パラメータが値をとる場合は、パラメータの後に「=」が続き、その後に値を記述する。ヘッダー行を複数行にわたって記述することはできない。

＜データ行＞

ヘッダー行の次の行から開始され、必要なデータを記述する。

データ行は複数行にわたる可能性があるが、それは各ヘッダーで定義されるデータ記述の規則により決定される。

データ行は必要ない場合もある。

＜区切り文字＞

データの区切り文字にはカンマ「,」を用いる。

＜空白の扱い＞

空白は無視される。

＜名前＞

名前に使用可能な文字は、アンダースコア「_」、ハイフン「-」、英数字「a-z　A-Z　0-9」であるが、最初の一文字は「_」または英字「a-z　A-Z」で始まっていなければならない。大文字小文字の区別はなく、内部的にはすべて大文字として扱われる。

また、名前の最大長は 63 文字である。

＜ファイル名＞

ファイル名に使用可能な文字は、アンダースコア「_」、ハイフン「-」、ピリオド「.」、スラッシュ「/」、英数字「a-z　A-Z　0-9」である。

ファイル名は、特に記述がない限りパスを含んでもよい。相対パス、絶対パスのいずれも指定可能である。

また、ファイル名の最大長は 1023 文字である。

＜浮動小数点データ＞

指数はあってもなくてもよい。指数の前には、「E」または「e」の記号をつけなければならない。

「E」または「e」どちらを使用してもかまわない。「D」または「 d 」は使用不可。

＜!!, #　　コメント行＞

行頭が「!!」または「#」で始まる行はコメント行とみなされ、無視される。

コメント行はファイル中の任意の位置に挿入でき、その数に制限はない。

6.3 単一領域メッシュデータのヘッダー一覧

単一領域メッシュデータは以下のヘッダーにより構成されている。

ヘッダー名	内容	説明番号
!AMPLITUDE	非定常荷重	M1-1
!EGROUP	要素グループ	M1-2
!ELEMENT	要素情報	M1-3
!EQUATION	拘束点情報	M1-4
!HEADER	メッシュデータのタイトル	M1-5
!INITIAL CONDITION	初期条件	M1-6
!MATERIAL	材料情報	M1-7
!NGROUP	節点グループ	M1-8
!NODE	節点情報	M1-9
!SECTION	セクション情報	M1-10
!SGROUP	面グループ	M1-11
!ZERO	絶対零度	M1-12
!CONTACT PAIR	接触面ペア	M1-13
!END	読み込み終了	M1-14

各ヘッダーには，パラメータとそれぞれのヘッダーに対応したデータの項目がある。

以下，上記各ヘッダーについてデータ作成例とともに簡単に説明する。データ作成例の右端に示している番号は上記表の説明番号である。

＜メッシュデータ例＞

```
!HEADER                                                        M1-5
 TEST MODEL CTLR10

!NODE                                                          M1-9
    1,  0.00000E+00,  0.00000E+00,  0.00000E+00
    2,  0.50000E+01,  0.00000E+00,  0.00000E+00
    3,  0.10000E+02,  0.00000E+00,  0.00000E+00

・・・・              ・・・・                ・・・・

!ELEMENT,TYPE=351                                              M1-3
    1,    1,    2,    4,   34,   35,   37
    2,    2,    5,    4,   35,   38,   37
```

```
    3,      2,      3,      5,     35,     36,     38

  ・・・・              ・・・・            ・・・・

!SECTION, TYPE=SOLID, EGRP=ALL, MATERIAL=M1                                M1-10
 1.0

!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=2                                                 M1-7
!ITEM=1, SUBITEM=2
 2.1E5,        0.3
!ITEM=2, SUBITEM=1
 7.8e-6

!NGROUP, NGRP=FIX, GENERATE                                                M1-8
           2 ,            2 ,            1
           3 ,            3 ,            1
           1 ,            1 ,            1
          69 ,           69 ,            1
          67 ,           67 ,            1

!NGROUP, NGRP=CL1                                                          M1-9
 50

!END                                                                       M1-14
```

(1) !AMPLITUDE（M1-1）

ステップ内での荷重条件を与える変数の時間変化の指定

1 行目

!AMPLITUDE, NAME=<name> [, optional parameter]

パラメータ	
NAME	名前（必須）
DEFINITION	タイプ（省略可）
TIME	時間の種類（省略可）
VALUE	値の種類（省略可）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	<name>	AMPLITUDE 名
DEFINITION	TABULAR	デフォルト（現版ではデフォルトのみ）
TIME	STEP TIME	デフォルト（現版ではデフォルトのみ）
VALUE	RELATIVE	相対値（デフォルト）
	ABSOLUTE	絶対値
INPUT	<filename>	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

（2 行目以降）VAL1, T1, VAL2, T2, VAL3, T3 ...（一行に四項まで）
以下繰り返し

変数名	属性	内容
VAL1	R	時間 T1 における値
T1	R	時間 T1
VAL2	R	時間 T2 における値
T2	R	時間 T2
VAL3	R	時 T3 における値
T3	R	時間 T3

(2)　!EGROUP（M1-2）

要素グループの定義

1 行目

```
!EGROUP, EGRP=<egrp> [, optional parameter]
```

パラメータ	
EGRP	要素グループ名（必須）
GENERATE	要素グループに属する節点の自動生成（省略可）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
EGRP	<egrp>	要素グループ名
GENERATE	なし	要素グループに属する節点の自動生成
INPUT	<filename>	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降（GENERATE を使用しない場合）

```
（2 行目）elem1, elem2, elem3 ...
（以下同様）
```

変数名	属性	内 容
elemX	I	要素グループに属する要素番号

2 行目以降（GENERATE を使用する場合）

```
（2 行目）elem1, elem2, elem3
（以下同様）
```

変数名	属 性	内 容
elem1	I	要素グループ内の最初の要素番号
elem2	I	要素グループ内の最後の要素番号
elem3	I	要素番号増分（省略可能、省略時は elem3=1 となる）

注意

- 1 行に任意の数の要素を入れることができる。また次のオプションが始まるまで、任意の数の行を挿入することができる。
- 指定する要素は「!EGROUP」より前に定義されている必要がある。
- 「!ELEMENT」オプションで定義されていない要素は除外され、警告メッセージが表示される。
- 指定された要素が既に同じグループ内に存在する場合は無視され、警告メッセージが表示される。
- すべての要素は、「ALL」という名前の要素グループに属している（自動的に生成される）。
- ひとつのグループを複数回にわけて定義できる。

使用例

```
!EGROUP, EGRP=EA01
1, 2, 3, 4, 5, 6
101, 102
205
!EGROUP, EGRP=EA02
101, 102
!EGROUP, EGRP=EA01              グループ「EA01」に「501, 505」が追加される。
501, 505
!EGROUP, EGRP=EA04, GENERATE   グループ「NA04」に
301, 309, 2                     「301,303,305,307,309,311,312,313」が追加される。
311, 313
```

(3) !ELEMENT（M1-3）

要素の定義

1 行目

!ELEMENT, TYPE=<type> [, optional parameter]

パラメータ	
TYPE	要素タイプ（必須）
EGRP	要素グループ名（省略可）
MATITEM	材料物性を要素ごとに定義する場合の物性項目数（セクションごとに物性を定義する場合は使用しない）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
TYPE	111	ロッド、リンク要素（一次）
	231	三角形要素（一次）
	232	三角形要素（二次）
	241	四角形要素（一次）
	242	四角形要素（二次）
	301	トラス要素（一次）
	341	四面体要素（一次）
	342	四面体要素（二次）
	351	三角柱要素（一次）
	352	三角柱要素（二次）
	361	六面体要素（一次）
	362	六面体要素（二次）
	541	インターフェース要素（四角形断面，一次）
	611	梁要素(一次）
	641	梁要素(一次，3 自由度節点 4 点による）
	731	三角形シェル要素（一次）
	741	四角形シェル要素（一次）
	743	四角形シェル要素（二次）
	761	三角形シェル要素（一次，3 自由度節点 6 点による）
	781	四角形シェル要素（一次，3 自由度節点 8 点による）
EGRP	〈egrp〉	要素グループ名（省略可）
INPUT	〈filename〉	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

（2 行目）ELEM_ID, nod1, nod2, nod3, ..., MAT1, MAT2, ...
（以下同様）

変数名	属 性	内 容
ELEM_ID	I	要素番号
nodX	I	コネクティビティ
MATy	R	要素ごとの物性値

注意

- 要素タイプ、コネクティビティの詳細は、「4 章　要素ライブラリ」を参照のこと。
- コネクティビティで指定する節点は「!ELEMENT」より前に定義されている必要がある。
- 要素番号は連続している必要はない。
- 「!ELEMENT」オプションは何回でも定義できる。
- 要素番号は自然数でなければならない。省略は不可。
- 同じ要素番号を重複して使用する場合、最後に入力した値が使用される。この場合、警告メッセージが出力される。
- 定義されていない節点をコネクティビティに使用することはできない。
- ひとつの要素の定義を複数行にわたって記述してもよい。

使用例

```
!ELEMENT, TYPE=231
1, 1, 2, 3
2, 4, 8, 5
4, 6, 7, 8
!ELEMENT, TYPE=361, EGRP=A
101, 101, 102, 122, 121, 201, 202, 222, 221
102, 102, 103, 123, 122, 202, 203, 223, 222
103, 103, 104, 124, 123, 203, 204, 224, 223
```

(4) !EQUATION（1-4）

拘束節点グループの定義

1 行目

```
!EQUATION [, optional parameter]
```

パラメータ	
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
INPUT	〈filename〉	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

```
（2 行目　　）NEQ, CONST
（3 行目以降）nod1, DOF1, A1, nod2, DOF2, A2 ...（一行に七項まで）
以下繰り返し
```

変数名	属 性	内 容
NEQ	I	方程式の項数
CONST	R	方程式の定数項（右辺値）
nod1	I/C	第 1 節点または節点グループ
DOF1	I	第 1 節点または節点グループの拘束自由度
A1	R	第 1 節点または節点グループの係数
nod2	I/C	第 2 節点または節点グループ
DOF2	I	第 2 節点または節点グループの拘束自由度
A2	R	第 2 節点または節点グループの係数

注意

- 「!NODE」で定義されていない節点、節点グループが指定された場合は無視され、警告メッセージが表示される。
- 「nod1=nod2」の場合は無視され、警告メッセージが表示される。
- 節点グループを指定した場合、節点数の整合性が取れない場合はエラーとなる。
- 自由度番号は解析のタイプ、要素によって異なる。整合がとれない自由度については無視され、警告メッセージが表示される。

使用例

```
!EQUATION
3
101, 1, 1.0, 102, 1, -1.0, 103, 1, -1.0
2
NG1, 2, 1.0, NG5, 2, -1.0
```

(5) !HEADER（M1-5）

メッシュデータのタイトル

1 行目

```
!HEADER
```

パラメータ

なし

2 行目以降

```
(2 行目)TITLE
```

変数名	属性	内容
TITLE	C	ヘッダータイトル

使用例

```
!HEADER
Mesh for CFD Analysis
```

注意

- 省略可能。
- ヘッダーは複数行にわたってもよいが、ヘッダーとして認識されるのは最初の行の 127 カラム目までである。
- 「!HEADER」を複数回定義すると、内容が更新され、警告メッセージが表示される。

(6)　!INITIAL CONDITION　（M1-6）

温度初期条件の定義

1 行目

!INITIAL CONDITION, TYPE=<type> [, optional parameter]

パラメータ	
TYPE	タイプ（必須）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内　容
TYPE	TEMPERATURE	温度
INPUT	〈filename〉	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

（2 行目以降）nod1, VAL1（1行に1組）

以下繰り返し

変数名	属　性	内　容
nod1	I/C	節点番号または節点グループ
VAL1	R	節点値

使用例

```
!INITIAL CONDITION,TYPE=TEMPERATURE
101,  25.0
NA01, 38.0
```

注意

- 「!NODE」で定義されていない節点、節点グループが指定された場合は無視され、警告メッセージが表示される。
- 同じ節点に対して再定義した場合はエラーとなる。

(7) !MATERIAL (M1-7)

材料物性の定義

物性が温度依存している場合は対応する温度ごとにテーブル入力が可能である。

1 行目

!MATERIAL, NAME=<name> [, optional parameter]

パラメータ	
NAME	材料名（必須）
ITEM	物性項目数（省略可、省略した場合は「1」となる）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	〈name〉	材料名
ITEM	〈ITEMnum〉	ユーザー定義による物性項目数
INPUT	〈filename〉	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

（2 行目） !ITEM=1, SUBITEM=<k>

（3 行目） VAL1-1-1, VAL1-1-2, … VAL1-1-k, TEMP1-1

（4 行目） VAL1-2-1, VAL1-2-2, … VAL1-2-k, TEMP1-2

・・

（L+2 行目）VAL1-L-1, VAL1-L-2, … VAL1-L-k, TEMP1-L

以下「!ITEM=<ITEMnum>」まで繰り返し定義する

サブパラメータ（「!ITEM」に対するもの）	
SUBITEM	各物性項目で定義されるサブ物性項目数（省略可、省略した場合は「1」となる。

サブパラメータ名	パラメータ値	内 容
SUBITEM	〈subITEMnum〉	ユーザー定義によるサブ物性項目数

【m 番目の物性が温度依存している場合】

温度依存のテーブルの項目数が N の場合、以下のように入力する:

```
!ITEM=m, SUBITEM=k
  VALm1-1, ..., VALm1-k, TEMPm1
  VALm2-1, ..., VALm2-k, TEMPm2
  ...
  VALmN-1, ..., VALmN-k, TEMPm-N
```

変数名	属 性	内 容
VALmn-k	R	物性値(温度依存)
TEMPmn	R	対応する温度

TEMPm1 < TEMPm2 < ... < TEMPmN でなければならない。
温度が TEMPm1 以下の場合は VALm1、TEMPmN 以上の場合は VALmN が使用される。

【m 番目の物性が温度依存していない場合】

```
!ITEM=m, SUBITEM=k
  VALm1-1, ..., VALm1-k
  VALm2-1, ..., VALm2-k
  ...
  VALmN-1, ..., VALmN-k
```

変数名	属 性	内 容
VALmn-k	R	物性値(温度依存なし)

注意

- 材料名が重複した場合はエラーとなる。
- 「!SECTION」オプションで参照されている MATERIAL が定義されていない場合はエラーとなる。
- 「!ELEMENT」オプションで、パラメータ「MATITEM」を使用して要素ごとに物性を入力した場合の値が優先して使用される。この場合、「!MATERIAL」オプションを使用して入力した物性値は使用されない。
- 「!ITEM=m」サブオプションの数と、パラメータ「ITEM」の数が整合しない場合、定義されていないサブオプションがある場合はエラーとなる。
- 「!ITEM=m」サブオプションは、m の小さい順番に並んでいなくてもよい。
- 「!SUBITEM=k」サブオプション、温度依存性を使用する場合、省略した値は「0.0」となる。
- 温度依存性を使用する場合、温度の低い順に定義しなければならない。
- 温度依存性を使用する場合、同じ温度を 2 回以上使用した場合はエラーとなる。

使用例

```
!MATERIAL, NAME= STEEL, ITEM= 2
!ITEM=1                温度依存性なし
35.0
!ITEM=2
40.0,   0.0
45.0, 100.0
50.0, 200.0
!MATERIAL, NAME= CUPPER       項目数＝1(デフォルト値)
!ITEM=1                温度依存性なし
80.0
```

誤った使用例

例 1【パラメータ「ITEM」と「!ITEM=m」サブオプションの数が整合していない-1】

```
!MATERIAL, NAME= STEEL, ITEM= 2
!ITEM=3
20.0
!ITEM=1
35.0
!ITEM= 2
40.0
```

例 2【パラメータ「ITEM」と「!ITEM=m」サブオプションの数が整合していない-2】

```
!MATERIAL, NAME= STEEL, ITEM= 3
!ITEM=3
20.0
!ITEM= 2
40.0
!MATERIAL, NAME= CUPPER
...
```

弾性静解析および固有値解析

```
!MATERIAL, NAME=<name>, ITEM=<ITEMnum>
!ITEM=1, SUBITEM=2
 <Young_modulus>, <Poisson_ratio>
!ITEM=2
 <Density>
!ITEM=3
 <Expansion_coeff>
```

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	<name>	材料名、!SECTION の MATELIAL と対応
ITEM	<ITEMnum>	ユーザー定義による物性項目数（1 以上） <Yang_modulus>・・・ヤング率（必須） <Poisson_ratio>・・・ポアソン比（必須） <Density>・・・質量密度（ITEMnum=2 のとき必須） < Expansion_coeff >・・・線膨張係数（ITEMnum=3 のとき）

（例）

```
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=3         ---  材料名 M1 の材料では 3 種の物値を定義の意
!ITEM=1, SUBITEM=2                 ---  !ITEM=1 ではヤング率とポアソン比を定義（必須）
4000.0,      0.3
!ITEM=2                            ---  !ITEM=2 で質量密度を定義すること（ITEM=2 のときには必須）
8.0102E-0
!ITEM=3                            ---  !ITEM=3 で線膨張係数を定義すること
1.0E-5
```

熱伝導解析

リンク、平面、ソリッド、3 次元板要素の場合

```
!MATERIAL, NAME=<name>, ITEM=3
!ITEM=1, SUBITEM=2
 <Density>, <Temperature>
!ITEM=2, SUBITEM=2
 <Specific_heat>, <Temperature>
!ITEM=3, SUBITEM=2
 <Conductivity>, <Temperature>
```

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	<name>	材料名、!SECTION の MATELIAL と対応
ITEM	<ITEMnum>	ユーザー定義による物性項目数(**常に** 3) <Density>・・・密度 <Specific_heat>・・・比熱 <Conductivity>・・・熱伝導率 <Temperature>・・・温度

(例)

```
!MATERIAL, NAME=M1, ITEM=3          ---  材料名 M1 の材料では 3 種の物値を定義の意
!ITEM=1, SUBITEM= 1               ---  !ITEM=1 では密度と温度を定義(必須)
7850.,   300.
7790.,   500.
        7700.,   800.
!ITEM=2, SUBITEM=1                ---  !ITEM=2 では比熱と温度を定義(必須)
0.465,   300.
0.528,   500.
        0.622,   800.
!ITEM=3                           ---  !ITEM=3 では熱伝導率と温度を定義(必須)
43.,     300.
38.6,    500.
        27.7,    800.
```

インターフェース要素の場合

!SECTION ヘッダーで定義する。(材料データは不要)

（例）

!SECTION, TYPE=INTERFACE, EGRP=GAP --- セクションの定義

1.0, 20.15, 8.99835E-9, 8.99835E-9

上記の!SECTION では、インターフェース要素で、グループ名=GAP に所属する要素のギャップパラメータを定義している。

第 1 パラメータ : ギャップ幅

第 2 パラメータ : ギャップ熱伝達係数

第 3 パラメータ : ギャップ輻射係数１

第 4 パラメータ : ギャップ輻射係数２

参考

```
      program TEST
      use hecmw
      implicit REAL*8 (A-H,O-Z)
      type (hecmwT_local_mesh) :: hecMESH

!C
!C    !MATERIAL, NAME=SUS304, ITEM=3
!C    !ITEM=1, SUBITEM= 3
!C       100.0, 200.0, 300.0, 0.00
!C       101.0, 210.0, 301.0, 1.00
!C       102.0, 220.0, 302.0, 2.00
!C       103.0, 230.0, 303.0, 3.00
!C    !ITEM=3, SUBITEM= 2
!C       1000.0,    , 0.00
!C       1001.0, 1., 1.00
!C       1002.0, 2., 2.00
!C       1003.0, 3., 3.00
!C    !ITEM=2
!C       5000.0
!C
!C    !MATERIAL, NAME=FEC, ITEM=2
!C    !ITEM=1, SUBITEM= 3
!C       2100.0, 2200.0, 2300.0, 0.00
!C       2101.0, 2210.0, 2301.0, 1.00
!C       2102.0, 2220.0, 2302.0, 2.00
!C       2103.0, 2230.0, 2303.0, 3.00
!C       3103.0, 3230.0, 2304.0, 4.00
!C    !ITEM=2
!C       6000.0, 10.0
!C       6500.0, 30.0
!C

      hecMESH%material%n_mat        =  2

      nn= hecMESH%material%n_mat
      allocate (hecMESH%material%mat_name(nn))
```

```
          hecMESH%material%mat_name(1)= 'SUS304'
          hecMESH%material%mat_name(2)= 'FEC'

        nn= hecMESH%material%n_mat
        allocate (hecMESH%material%mat_ITEM_index(0:nn))
          hecMESH%material%mat_ITEM_index(0)= 0
          hecMESH%material%mat_ITEM_index(1)= 3
          hecMESH%material%mat_ITEM_index(2)= hecMESH%material%mat_ITEM_index(1) + 2

          hecMESH%material%n_mat_ITEM=
hecMESH%material%mat_ITEM_index(hecMESH%material%n_mat)

        nn= hecMESH%material%n_mat_ITEM
        allocate (hecMESH%material%mat_subITEM_index(0:nn))
          hecMESH%material%mat_subITEM_index(0)= 0
          hecMESH%material%mat_subITEM_index(1)= 3
          hecMESH%material%mat_subITEM_index(2)= hecMESH%material%mat_subITEM_index(1) + 1
          hecMESH%material%mat_subITEM_index(3)= hecMESH%material%mat_subITEM_index(2) + 2
          hecMESH%material%mat_subITEM_index(4)= hecMESH%material%mat_subITEM_index(3) + 3
          hecMESH%material%mat_subITEM_index(5)= hecMESH%material%mat_subITEM_index(4) + 1

          hecMESH%material%n_mat_subITEM=
       &            hecMESH%material%mat_subITEM_index(hecMESH%material%n_mat_ITEM)

        nn= hecMESH%material%n_mat_subITEM
        allocate (hecMESH%material%mat_TABLE_index(0:nn))
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 0)= 0
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 1)= 4
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 2)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 1) + 4
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 3)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 2) + 4
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 4)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 3) + 1
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 5)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 4) + 4
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 6)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 5) + 4
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 7)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 6) + 5
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 8)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 7) + 5
          hecMESH%material%mat_TABLE_index( 9)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 8) + 5
          hecMESH%material%mat_TABLE_index(10)= hecMESH%material%mat_TABLE_index( 9) + 2

          hecMESH%material%n_mat_TABLE=
       &
hecMESH%material%mat_TABLE_index(hecMESH%material%n_mat_subITEM)

        nn= hecMESH%material%n_mat_TABLE
        allocate (hecMESH%material%mat_VAL (nn))
        allocate (hecMESH%material%mat_TEMP(nn))

          hecMESH%material%mat_VAL = 0.d0
          hecMESH%material%mat_TEMP= 0.d0

          hecMESH%material%mat_VAL ( 1)=   100.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP( 1)=     0.0d0
          hecMESH%material%mat_VAL ( 2)=   101.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP( 2)=     1.0d0
          hecMESH%material%mat_VAL ( 3)=   102.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP( 3)=     2.0d0
          hecMESH%material%mat_VAL ( 4)=   103.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP( 4)=     3.0d0

          hecMESH%material%mat_VAL ( 5)=   200.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP( 5)=     0.0d0

          hecMESH%material%mat_VAL (13)=  5000.0d0

          hecMESH%material%mat_VAL  (14)=  1000.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP (14)=     0.0d0
          hecMESH%material%mat_VAL  (15)=  1001.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP (15)=     1.0d0
          hecMESH%material%mat_VAL  (16)=  1002.0d0
          hecMESH%material%mat_TEMP (16)=     2.0d0
```

```
    hecMESH%material%mat_VAL  (17)=  1003.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (17)=     3.0d0

    hecMESH%material%mat_VAL  (18)=     0.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (18)=     0.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (19)=     1.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (19)=     1.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (20)=     2.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (20)=     2.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (21)=     3.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (21)=     3.0d0

    hecMESH%material%mat_VAL  (22)=  2100.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (22)=     0.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (23)=  2101.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (23)=     1.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (24)=  2102.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (24)=     2.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (25)=  2103.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (25)=     3.0d0
    hecMESH%material%mat_VAL  (26)=  3103.0d0
    hecMESH%material%mat_TEMP (26)=     4.0d0

    write (*,'(a,i10)') '%n_mat_ITEM    ',  hecMESH%material%n_mat_ITEM
    write (*,'(a,i10)') '%n_mat_subITEM', hecMESH%material%n_mat_subITEM
    write (*,'(a,i10)') '%n_mat_TABLE   ',  hecMESH%material%n_mat_TABLE

  end program TEST
```

(8)　!NGROUP　(M1-8)

節点グループの定義

1 行目

!NGROUP, NGRP=<ngrp> [, optional parameter]

パラメータ	
NGRP	節点グループ名（必須）
GENERATE	節点グループに属する節点の自動生成（省略可）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NGRP	<ngrp>	節点グループ名
GENERATE	なし	節点グループに属する節点の自動生成
INPUT	<filename>	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降（GENERATE を使用しない場合）

（2 行目）nod1, nod2, nod3

（以下同様）

変数名	属 性	内 容
nodX	I	節点グループに属する節点番号

2 行目以降（GENERATE を使用する場合）

（2 行目）nod1, nod2, nod3

（以下同様）

変数名	属 性	内 容
nod1	I	節点グループ内の最初の節点番号
nod2	I	節点グループ内の最後の節点番号
nod3	I	節点番号増分（省略可能、省略時は nod3=1 となる）

注意

- 1 行に任意の数の節点を入れることができる。また次のオプションが始まるまで、任意の数の行を挿入することができる。
- 指定する節点は「!NGROUP」より前に定義されている必要がある。
- 「!NODE」オプションで定義されていない節点は除外され、警告メッセージが表示される。
- 指定された節点が既に同じグループ内に存在する場合は無視され、警告メッセージが表示される。
- 全ての節点は、「ALL」という名前の節点グループに属している（自動的に生成される)。
- ひとつのグループを複数回にわけて定義できる。

使用例

```
!NGROUP, NGRP= NA01
1, 2, 3, 4, 5, 6
101, 102
!NGROUP, NGRP= NA02
101, 102
!NGROUP, NGRP= NA01            グループ「NA01」に「501, 505」が追加される。
501, 505
!NGROUP, NGRP= NA02            グループ「NA02」に「501, 505」が追加される。
501, 505
!NGROUP, NGRP= NA04,GENERATE   グループ「NA04」に
301, 309, 2                    「301,303,305,307,309,311,312,313」が追加される。
311, 313
```

(9) !NODE (M1-9)

節点座標の定義

1 行目

!NODE [, optional parameter]

パラメータ	
SYSTEM	座標系（省略可）
NGRP	節点グループ名（省略可）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内容
SYSTEM	R	デカルト座標系（デフォルト値）
	C	円筒座標系
NGRP	<ngrp>	節点グループ名（省略可）
INPUT	<filename>	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

（2 行目）NODE_ID, Xcoord, Ycoord, Zcoord

（以下同様）

変数名	属 性	内容
NODE_ID	I	節点番号
Xcoord	R	X 座標
Ycoord	R	Y 座標
Zcoord	R	Z 座標

注意

- 区切り記号を含めて節点座標を省略した場合、値は「0.0」となる。
- 既に定義されてる節点を再定義した場合、内容が更新され、警告メッセージが表示される。
- 「!ELEMENT」で参照されない節点は除外される。
- 「!ELEMENT」で定義される節点は「!ELEMENT」より前に定義されていなければならない。

使用例

```
!NODE, NGRP=TEST
1, 0.0, 0.0, 0.5
2, 0.0, 0.0, 1.0
3, 0.0,,1.5    Y座標は「0.0」
4,             X,Y,Z座標は「0.0」
```

(10) !SECTION (M1-10)

セクションの定義

1 行目

!SECTION, TYPE=<type>, EGRP=<egrp> [, optional parameter]

パラメータ	
TYPE	セクションタイプ（必須）
EGRP	要素グループ名（必須）
MATERIAL	ユーザー定義材料名（必須）
SECOPT	要素タイプ用補助パラメータ（省略可、省略した場合は=0 となる）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内容
TYPE	SOLID	ロッド，三角形，四角形，四面体，五面体，六面体要素
	SHELL	シェル要素
	BEAM	梁要素
	INTERFACE	インターフェース要素
EGRP	<egrp>	要素グループ名
MATERIAL	<material >	ユーザー定義による材料名
SECOPT	<secopt>	= 0：指定なし，平面応力
		= 1：平面ひずみ
		= 2：軸対称
		=10：0＋次数低減積分
		=11：1＋次数低減積分
		=12：2＋次数低減積分
INPUT	<filename>	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

【TYPE=SOLID】の場合

（2 行目）THICKNESS

変数名	属 性	内 容
THICKNESS	R	トラス要素の場合、断面積（必須）

「TYPE=SOLID」の場合、「THICKNESS」は省略可。

【TYPE=SHELL】の場合

（2 行目）THICKNESS, INTEGPOINTS

変数名	属 性	内 容
THICKNESS	R	シェル断面厚さ
INTEGPOINTS	I	シェル断面方向積分点

【TYPE=BEAM】の場合

（2 行目）vx,vy,vz,area,Iyy,Iz,Jx

変数名	属 性	内 容
vx,vy,vz	R	参考軸方向
area	R	断面面積
Iyy, Izz	R	断面二次モーメント
Jx	R	ねじり定数

【TYPE=INTERFACE】の場合

（2 行目）THICKNESS, GAPCON, GAPRAD1, GAPRAD2

変数名	属 性	内 容
THICKNESS	R	断面厚さ
GAPCON	R	ギャップ熱伝達係数(省略時 0)
GAPRAD1	R	ギャップ輻射熱伝達係数-1(省略時 0)
GAPRAD2	R	ギャップ輻射熱伝達係数-2(省略時 0)

注意

- パラメータ「TYPE」が要素タイプと整合していない場合はエラーとなる。
- SECTION 情報を持たない要素がある場合はエラーとなる。
- セクション名が重複した場合はエラーとなる。

使用例

```
!SECTION, EGRP=SOLID1, TYPE=SOLID, MATERIAL=STEEL
!SECTION, EGRP=SHELL2, TYPE=SHELL, MATERIAL=STEEL
 1.0, 5
```

(11)　!SGROUP　(M1-11)

面グループの定義

1 行目

```
!SGROUP, SGRP=<sgrp> [, optional parameter]
```

パラメータ	
SGRP	面グループ名（必須）
INPUT	外部ファイル名（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
SGRP	<sgrp>	面グループ名
INPUT	<filename>	外部ファイル名（省略可）、2 行目以降との併用も可能

2 行目以降

```
(2 行目) elem1, lsuf1, elem2, lsuf2, elem3, lsuf3, ...
(以下同様)
```

変数名	属 性	内 容
elemX	I	面グループに属する要素番号
lsufX	I	面グループに属する要素の局所面番号

注意

- 要素タイプと面番号については、「4 章　要素ライブラリ」を参照のこと。
- （要素、局所面番号）という組み合わせによって面を構成する。1 行に任意の数の面を入れることができる。また次のオプションが始まるまで、任意の数の行を挿入することができる。（要素、局所面番号）という組み合わせは必ず同一の行になければならない。
- 指定する要素は「!SGROUP」より前に定義されている必要がある。
- 要素が「!ELEMENT」オプションで定義されていない場合は無視され、警告メッセージが表示される。
- 「!ELEMENT」オプションで定義されていない要素を含む面は除外され、警告メッセージが表示される。
- 要素タイプと面番号の整合性が取れない面は除外され、警告メッセージが表示される。
- ひとつのグループを複数回にわけて定義できる。

使用例

```
!SGROUP, SGRP= SUF01
101, 1, 102, 1, 103, 2, 104, 2
201, 1, 202, 1
501, 1
!SGROUP, SGRP= SUF02
101, 2, 102, 2
!SGROUP, SGRP= EA01            グループ「SUF01」に「(601,1), (602,2)」が追加。
601, 1
602, 2
```

誤った使用例

例 1【(要素、局所面番号)の組が複数行にわたっている】

```
!SGROUP, SGRP= SUF01
101, 1, 102, 1, 103
1, 104, 1
```

例 2【局所面番号と要素タイプの整合性がとれない】

```
!ELEMENT, TYPE= 211, SECTION= A
101, 1, 2, 3
102, 2, 3, 4
...
!SGROUP, SGRP= SUF01
101, 1
101, 2
101, 4         三角形要素に第4面は存在しないので,この組み合わせは無視される
```

(12)　!ZERO　(M1-12)

絶対零度

1 行目

!ZERO

パラメータ

なし

2 行目以降

(2 行目)ZERO

変数名	属 性	内容
ZERO	R	絶対零度

注意

- 省略可能。省略された場合は「絶対零度＝0」となる。
- 「!ZERO」を複数回定義すると、内容が更新され、警告メッセージが表示される。

使用例

```
!ZERO
-273.16
```

(13) !CONTACT PAIR (M1-13)

接触解析に用いる接触面ペアの定義

1 行目

!CONTACT PAIR, NAME=<name> [,optional parameter]

パラメータ	
NAME	接触ペア名（必須）
TYPE	タイプ（省略可）

パラメータ名	パラメータ値	内 容
NAME	〈name〉	接触ペア名
TYPE	NODE-SURF	スレーブ面は節点グループ マスター面は面グループ（デフォルト）
	SURF-SURF	スレーブ面、マスター面とも面グループ

2 行目以降

（2 行目以降）SLAVE_GRP, MASTER_GRP

（以下同様）

変数名	属 性	内容
SLAVE_GRP	C	スレーブ面の節点/面グループ名
MASTER_GRP	C	マスター面の面グループ名

(14)　!END　（M1-14）

メッシュデータの終端

このヘッダーが表れると、メッシュデータの読み込みを終了する。

1 行目

!END

パラメータ

なし

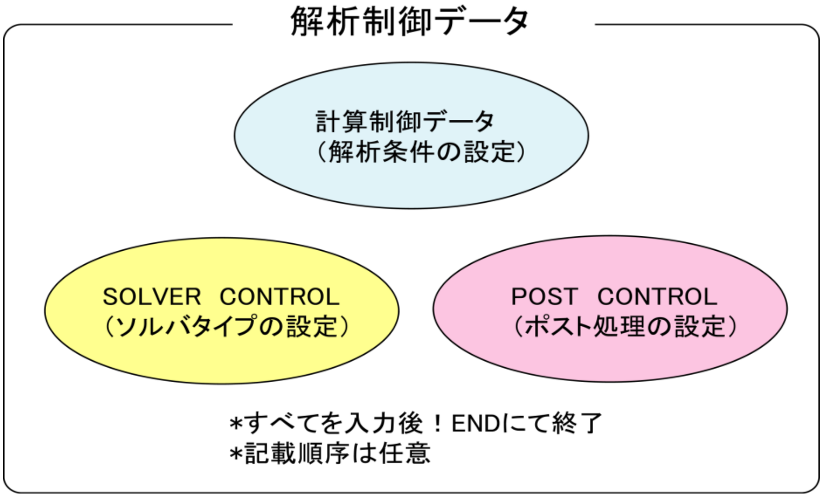
2 行目以降

なし

7. 解析制御データ

7.1 解析制御データ概要

FrontISTR は、解析制御データファイルを入力して、下図に示す計算制御データ、ソルバー制御データおよびポスト処理（可視化）制御データを取得し、解析計算を実施する。



解析制御データファイルの特徴は以下のとおりである。

- 自由書式に基づく ASCII 形式のファイルである。
- 「!」で始まるヘッダーとそれに続くデータから構成されている。
- ヘッダーの記述の順番は基本的に自由である。
- データの区切り記号には「,」を使用する。
- ファイル内は大きく分けて 3 つのゾーンに分かれている。
- ファイルの最後に「！END」を入力して終了とする。

＜解析制御データ例＞

```
### Control File for HEAT solver
!SOLUTION,TYPE=HEAT
!FIXTEMP
 XMIN,    0.0
 XMAX, 500.0                                              ①計算制御データ部分
--------------------------------------------------------------------------------
### Solver Control
!SOLVER,METHOD=CG,PRECOND=1,ITERLOG=NO,TIMELOG=NO
 100,   2
 1.0e-8,1.0,0.0                                           ②ソルバー制御データ部分
--------------------------------------------------------------------------------
```

```
### Post Control
!WRITE,RESULT
!WRITE,VISUAL
!VISUAL, method=PSR
!surface_num = 1
!surface 1
!surface_style = 1
!display_method   1
!color_comp_name     =     TEMPERATURE
!color_subcomp = 1
!output_type = BMP
!x_resolution = 500
!y_resolution = 500
!num_of_lights = 1
!position_of_lights =   -20.0, 5.8, 80.0
!viewpoint = -20.0   10.0   8.0
!up_direction = 0.0   0.0   1.0
!ambient_coef= 0.3
!diffuse_coef= 0.7
!specular_coef= 0.5
!color_mapping_style= 1
!!interval_mapping= -0.01, 0.02
!color_mapping_bar_on = 1
!scale_marking_on = 1
!num_of_scale = 5
!font_size = 1.5
!font_color   = 1.0   1.0   1.0
!END                                                      ③ポスト制御（可視化）データ部分
-------------------------------------------------------------------------------------
```

7.2　入力規則

解析制御データは、ヘッダー行、データ行、コメント行から構成される。
ヘッダー行には必ず一つのヘッダーが含まれる。

＜ヘッダー＞
解析制御データ内で、データの意味とデータブロックを特定する。
行頭が「!」で始まる場合、ヘッダーであるとみなされる。

＜ヘッダー行＞
ヘッダーとそれに伴うパラメータを記述する。
ヘッダー行はヘッダーで始まっていなければならない。パラメータが必要な場合は、「,」を用いてその後に続けなければならない。パラメータが値をとる場合は、パラメータの後に「=」が続き、その後に値を記述する。
ヘッダー行を複数行にわたって記述することはできない。

＜データ行＞
ヘッダー行の次の行から開始され、必要なデータを記述する。
データ行は複数行にわたる可能性があるが、それは各ヘッダーで定義されるデータ記述の規則により決定される。
データ行は必要ない場合もある。

＜区切り文字＞
データの区切り文字にはカンマ「,」を用いる。

＜空白の扱い＞
空白は無視される。

＜名前＞
名前に使用可能な文字は、アンダースコア「_」、ハイフン「-」、英数字「a-z　A-Z　0-9」であるが、最初の一文字は「_」または英字「a-z　A-Z」で始まっていなければならない。大文字小文字の区別はなく、内部的にはすべて大文字として扱われる。
また、名前の最大長は 63 文字である。

＜ファイル名＞
ファイル名に使用可能な文字は、アンダースコア「_」、ハイフン「-」、ピリオド「.」、スラッシュ「/」、英数字「a-z　A-Z　0-9」である。
ファイル名は、特に記述がない限りパスを含んでもよい。相対パス、絶対パスのいずれも指定可

能である。
　また、ファイル名の最大長は 1023 文字である。

　＜浮動小数点データ＞
　指数はあってもなくてもよい。指数の前には、「E」または「e」の記号をつけなければならない。
　「E」または「e」どちらを使用してもかまわない。

　＜!!, #　　コメント行＞
　行頭が「!!」または「#」で始まる行はコメント行とみなされ、無視される。
　コメント行はファイル中の任意の位置に挿入でき、その数に制限はない。

　< !END >
　メッシュデータの終端
　このヘッダーが表れると、メッシュデータの読み込みを終了する。

7.3　解析制御データ

7.3.1　計算制御データのヘッダー一覧

FrontISTR では、計算制御データに使用できる境界条件として以下のものがあげられる。

- 分布荷重条件（物体力，圧力荷重，重力，遠心力）
- 集中荷重条件
- 熱荷重
- 単点拘束条件（SPC 条件）
- ばね境界条件
- 接触
- 集中熱流束
- 分布熱流束
- 対流熱伝達境界
- 輻射熱伝達境界
- 規定温度境界

上記境界条件の定義方法は、メッシュデータ同様に！ヘッダーの形式で定義する。

以下、表 7.3.1 に全解析に共通な制御データのヘッダー一覧を示し、表 7.3.2 から解析種別別のヘッダー一覧を示す。

表 7.3.1　全解析に共通な制御データ

ヘッダー	意　　味	備　　考	説明番号
!VERSION	ソルバーバージョン番号		1-1
!SOLUTION	解析の種別の指定	必須	1-2
!WRITE,VISUAL	可視化データ出力の指定		1-3
!WRITE,RESULT	解析結果データ出力の指定		1-4
!WRITE,LOG	結果出力の指定		1-5
!OUPUT_VIS	可視化データ出力制御		1-6
!OUTPUT_RES	解析結果データ出力制御		1-7
!RESTART	リスタートの制御		1-8
!ECHO	エコー出力		1-9
!ORIENTATION	局所座標系の定義		1-10
!SECTION	セクションの局所座標系の定義		1-11
!END	制御データの指定の終了		1-12

表 7.3.2　静解析用制御データ

ヘッダー	意　　味	備　考	説明番号
!STATIC	静解析の制御		2-1
!MATERIAL	材料名		2-2
!ELASTIC	弾性材料物性		2-2-1
!PLASTIC	塑性材料物性		2-2-2
!HYPERELASTIC	超弾性材料物性		2-2-3
!VISCOELASTIC	粘弾性材料物性		2-2-4
!CREEP	クリープ材料物性		2-2-5
!DENSITY	質量密度		2-2-6
!EXPANSION_COEFF	線膨張係数		2-2-7
!USE_MATERIAL	ユーザー定義材料		2-2-8
!BOUNDARY	変位境界条件		2-3
!SPRING	ばね境界条件		2-3-1
!CLOAD	集中荷重		2-4
!DLOAD	分布荷重		2-5
!ULOAD	ユーザー定義外部荷重		2-6
!CONTACT_ALGO	接触解析アルゴリズム		2-7
!CONTACT	接触		2-8
!TEMPERATURE	熱応力解析における節点温度		2-9
!REFTEMP	熱応力解析における参照温度		2-10
!STEP	解析ステップ制御		2-11
!TRS	粘弾性温度依存性		2-12

表 7.3.3　固有値解析用制御データ

ヘッダー	意　　味	備　　考	説明番号
!EIGEN	固有値解析の制御	固有値解析で必須	3-1

表 7.3.4　熱伝導解析用制御データ

ヘッダー	意　　味	備　　考	説明番号
!HEAT	熱伝導解析の制御	熱伝導解析で必須	4-1
!FIXTEMP	節点温度		4-2
!CFLUX	節点に与える集中熱流束		4-3
!DFLUX	要素面に与える分布熱流束／内部発熱		4-4

!SFLUX	面グループによる分布熱流束		4-5
!FILM	境界面に与える熱伝達係数		4-6
!SFILM	面グループによる熱伝達係数		4-7
!RADIATE	境界面に与える輻射係数		4-8
!SRADIATE	面グループによる輻射係数		4-9
!WELD_LINE	溶接線		4-10

表 7.3.5　動解析用制御データ

ヘッダー	意　　味	備　　考	説明番号
!DYNAMIC	動解析の制御	動解析で必須	5-1
!VELOCITY	速度境界条件		5-2
!ACCELERATION	加速度境界条件		5-3
!COUPLE	連成面定義	連成解析で必要	5-4
!EIGENREAD	固有値・固有モードの指定	周波数応答解析で必須	5-5
!FLOAD	周波数応答解析用集中荷重の定義		5-6

各ヘッダーには、パラメータとそれぞれのヘッダーに対応したデータの項目がある。

以下、上記各ヘッダーについて、解析種別別にデータ作成例とともに説明する。上記表の説明番号はデータ作成例の右端に示している番号である。

(1)　全解析に共通な制御データ

＜解析制御データ例＞

```
###   Control File for FISTR
!VERSION                                        1-1
  3
!SOLUTION, TYPE=STATIC                          1-2
!WRITE, VISUAL                                  1-3
!WRITE, RESULT                                  1-4
!ECHO                                           1-9
!BOUNDARY                                       2-3
  FIX, 1,   3,    0.0
!CLOAD                                          2-4
  CL1,      3,   -1.0
!END                                            1-12
```

＜ヘッダーの説明＞

1-1　!VERSION

　ソルバーバージョンを示す。

1-2　!SOLUTION, TYPE=STATIC

◆TYPE＝解析の種類

1-3　!WRITE, VISUAL

◆メモリ渡しビジュアライザーによる可視化データの出力

記載するだけでファイルを出力

1-4　!WRITE, RESULT

◆解析結果データの出力

記載するだけでファイルを出力

1-6　!ECHO

◆節点データ、要素データおよび材料データをログファイルに出力

記載するだけでファイルに出力

1-8　!END

◆制御データの終わりを示す

(2)　　静解析制御データ

＜静解析制御データ例＞

###　Control File for FISTR	
!SOLUTION, TYPE=STATIC	1-2
!WRITE, VISUAL	1-3
!WRITE, RESULT	1-4
!ECHO	1-9
!MATERIAL, NAME=M1	2-2
!ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC	2-2-1
210000.0,　0.3	
!BOUNDARY	2-3
FIX, 1,　3,　0.0	
!SPRING	2-3-1
200, 1, 0.03	
!CLOAD	2-4
CL1,　　3,　-1.0	
!DLOAD	2-5

1,　P1,　1.0
!TEMPERATURE 2-9
1,　10.0
!REFTEMP 2-10
!STEP, CONVERG=1.E-5, MAXITER=30 2-11
!END 1-12

＜ヘッダーの説明＞

* 赤字は例に記載されている数値
* 表 2 行目の英字は変数名をあらわす。

2-1　!STATIC

◆静解析方法の設定

2-2　!MATERIAL

◆材料物性の定義

NAME=材料物性の名前

2-2-1　!ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC

◆弾性物質の定義

TYPE＝弾性タイプ

ヤング率	ポアソン比
YOUNG_MODULUS	POISSON_RATIO
210000.0	0.3

2-3　!BOUNDARY

◆変位境界条件の定義

節点番号または 節点グループ名	拘束自由度の開始番号	拘束自由度の終了番号	拘束値
NODE_ID	DOF_idS	DOF_idE	Value
FIX,	1,	3,	0.0

2-3-1　!SPRING

◆ばね境界条件の定義

節点番号または 節点グループ名	拘束自由度	ばね定数
NODE_ID	DOF_id	Value
200,	1,	0.03

2-4　!CLOAD

◆集中荷重の定義

節点番号または節点グループ名	自由度番号	荷重値
NODE_ID	DOF_id	Value
CL1,	3,	-1.0

2-5　!DLOAD

◆分布荷重の定義

要素番号または要素グループ名	荷重タイプ番号	荷重パラメータ
ELEMENT_ID	LOAD_type	param
1,	P1,	1.0

2-9　!TEMPERATURE

◆熱応力解析に用いる節点温度の指定

節点番号または節点グループ名	温度
NODE_ID	Temp_Value
1,	10

2-10　!REFTEMP

◆熱応力解析における参照温度の定義

2-11　!STEP

◆非線形静解析の制御（線形解析の場合省略可）

収束値判定閾値（デフォルト：1.0E-06）	サブステップ数（AMPがある場合、AMPが優先）	最大反復計算回数	時間関数名（!AMPLITUDEで指定）
CONVERG	SUBSTEPS	MAXITER	AMP
1.E-5	10	30	

(3)　固有値解析制御データ

＜固有値解析制御データ例＞

```
### Control File for FISTR
!SOLUTION, TYPE=EIGEN                                   1-2
!WRITE, VISUAL                                          1-3
!WRITE, RESULT                                          1-4
!ECHO                                                   1-9
!EIGEN                                                  3-1
  3,  1.0E-8,  60
```

!BOUNDARY 2-3
FIX, 1, 2, 0.0
!END 1-12

＜ヘッダーの説明＞

* 赤字は例に記載されている数値

3-1 !EIGEN

◆固有値解析のパラメータ設定

固有値数	許容差	最大反復数
NSET	LCZTOL	LCZMAX
3,	1.0E-8,	60

2-3 !BOUNDARY （静解析におけるものと同一）

◆変位境界条件の定義

節点番号または節点グループ名	拘束自由度の開始番号	拘束自由度の終了番号	拘束値
NODE_ID	DOF_idS	DOF_idE	Value
FIX,	1,	3,	0.0

(4) 熱伝導解析制御データ

＜熱伝導解析制御データ例＞

```
### Control File for FISTR
!SOLUTION, TYPE=HEAT                                   1-2
!WRITE, VISUAL                                         1-3
!WRITE, RESULT                                         1-4
!ECHO                                                  1-9
!HEAT                                                  4-1
!FIXTEMP                                               4-2
  XMIN,  0.0
  XMAX,  500.0
!CFLUX                                                 4-3
  ALL,  1.0E-3
!DFLUX                                                 4-4
  ALL,  S1,  1.0
!SFLUX                                                 4-5
  SURF,  1.0
!FILM                                                  4-6
  FSURF,  F1,  1.0,  800
```

!SFILM 4-7
 SFSURF, 1.0, 800.0
!RADIATE 4-8
 RSURF, R1, 1.0E-9, 800.0
!SRADIATE 4-9
 RSURF, R1, 1.0E-9, 800.0
!END 1-12

＜ヘッダーの説明＞

* 赤字は例に記載されている数値

4-1 !HEAT

◆計算に関する制御データの定義

!HEAT
（データなし） --- 定常計算
!HEAT
 0.0 --- 定常計算
!HEAT
 10.0, 3600.0 --- 固定時間増分非定常計算
!HEAT
 10.0, 3600.0, 1.0 --- 自動時間増分非定常計算
!HEAT
 10.0, 3600.0, 1.0, 20.0 --- 自動時間増分非定常計算

4-2 !FIXTEMP

◆節点グループ名または節点番号と固定温度

4-3 !CFLUX

◆節点にあたえる集中熱流束の定義

節点グループ名または節点番号	熱流束値
NODE_GRP_NAME	Value
ALL,	1.0E-3

4-4 !DFLUX

◆要素の面にあたえる分布熱流束と内部発熱の定義

要素グループ名または要素番号	荷重タイプ番号	熱流束値
ELEMENT_GRP_NAME	LOAD_type	Value
ALL,	S1,	1.0

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	作用面	パラメータ
BF	要素全体	発熱量
S1	第 1 面	熱流束値
S2	第 2 面	熱流束値
S3	第 3 面	熱流束値
S4	第 4 面	熱流束値
S5	第 5 面	熱流束値
S6	第 6 面	熱流束値
S0	シェル面	熱流束値

4-5　!SFLUX

◆面グループによる分布熱流束の定義

面グループ名	熱流束値
SURFACE_GRP_NAME	Value
SURF,	1.0

4-6　!FILM

◆境界面にあたえる熱伝達係数の定義

要素グループ名または要素番号	荷重タイプ番号	熱伝達係数	雰囲気温度
ELEMENT_GRP_NAME	LOAD_type	Value	Sink
FSURF,	F1,	1.0,	800.0

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	作用面	パラメータ
F1	第 1 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F2	第 2 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F3	第 3 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F4	第 4 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F5	第 5 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F6	第 6 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F0	シェル面	熱伝達係数と雰囲気温度

4-7　!SFILM

◆面グループによる熱伝達係数の定義

面グループ名	熱伝達率	雰囲気温度
SURFACE_GRP_NAME	Value	Sink

SFSURF,	1.0,	800.0	

4-8　!RADIATE

◆境界面にあたえる輻射係数の定義

要素グループ名または要素番号	荷重タイプ番号	輻射係数	雰囲気温度
ELEMENT_GRP_NAME	LOAD_type	Value	Sink
RSURF,	R1,	1.0E-9,	800.0

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	作用面	パラメータ
R1	第 1 面	輻射係数と雰囲気温度
R2	第 2 面	輻射係数と雰囲気温度
R3	第 3 面	輻射係数と雰囲気温度
R4	第 4 面	輻射係数と雰囲気温度
R5	第 5 面	輻射係数と雰囲気温度
R6	第 6 面	輻射係数と雰囲気温度
R0	シェル面	輻射係数と雰囲気温度

4-9　!SRADIATE

◆面グループによる輻射係数の定義

面グループ名	輻射係数	雰囲気温度
SURFACE_GRP_NAME	Value	Sink
SRSURF,	1.0E-9,	800.0

(5)　動解析制御データ

＜動解析制御データ例＞

```
### Control File for FISTR
!SOLUTION, TYPE=DYNAMIC                                         1-2
!DYNAMIC, TYPE=NONLINEAR                                        5-1
  1 ,   1
  0.0,   1.0,   500,   1.0000e-5
  0.5,   0.25
  1,   1,   0.0,   0.0
  100,   5,   1
  0,   0,   0,   0,   0,   0
!BOUNDARY, AMP=AMP1                                             2-3
  FIX,   1,   3,   0.0
!CLOAD, AMP=AMP1                                                2-4
```

CL1,　3,　-1.0
!COUPLE, TYPE=1 5-4
SCOUPLE
!STEP, CONVERG=1.E-6, ITMAX=20 2-11
!END 1-12

＜ヘッダーの説明＞

* 赤字は例に記載されている数値
* 表２行目の英字は変数名をあらわす。

5-1　!DYNAMIC

◆線形動解析の制御を行う。

運動方程式の解法	解析の種類
idx_eqa	idx_resp
11	1

解析開始時間	解析終了時間	全 STEP 数	時間増分
t_start	t_end	n_step	t_delta
0.0	1.0	500	1.0000e-5

Newmark-β法のパラメータγ	Newmark-β法のパラメータβ
ganma	beta
0.5	0.25

質量マトリックスの種類	減衰の種類	Rayleigh 減衰のパラメータ R_m	Rayleigh 減衰のパラメータ Rk
idx_mas	idx_dmp	ray_m	ray_k
1	1	0.0	0.0

結果出力間隔	モニタリング節点番号または節点グループ名	変位モニタリングの結果出力間隔
nout	node_monit_1	nout_monit
100	55	1

出力制御 変位	出力制御 速度	出力制御 加速度	出力制御 反力	出力制御 ひずみ	出力制御 応力
iout_list(1)	iout_list(2)	iout_list(3)	iout_list(4)	iout_list(5)	iout_list(6)
0	0	0	0	0	0

2-3　!BOUNDARY　（静解析におけるものと同一）

◆変位境界条件の定義

節点番号または 節点グループ名	拘束自由度の開始番号	拘束自由度の終了番号	拘束値
NODE_ID	DOF_idS	DOF_idE	Value
FIX,	1,	3,	0.0

2-4　!CLOAD　（静解析におけるものと同一）

◆集中荷重の定義

節点番号または節点グループ名	自由度番号	荷重値
NODE_ID	DOF_id	Value
CL1,	3,	-1.0

5-4　!COUPLE, TYPE=1

◆連成面の定義

連成する面グループ名

COUPLING_SURFACE_ID

SCOUPLE

2-11　!STEP, CONVERG=1.E-10, ITMAX=20

◆非線形静解析の制御（線形解析の場合省略可、陽解法の場合は不要）

収束値判定閾値 （デフォルト： 1.0E-06）	サブステップ数 （AMPがある場合、 AMPが優先）	最大反復計算回数
CONVERG	SUBSTEPS	ITMAX
1.E-10		20

(6)　動解析（周波数応答解析）制御データ

＜動解析（周波数応答解析）制御データ例＞

```
!SOLUTION, TYPE=DYNAMIC                          1-2
!DYNAMIC                                         5-1
 11 , 2
 14000, 16000, 20, 15000.0
 0.0, 6.6e-5
 1, 1, 0.0, 7.2E-7
 10, 2, 1
 1, 1, 1, 1, 1, 1
!EIGENREAD                                       5-5
```

eigen0.log
1, 5
!FLOAD, LOAD CASE=2 5-6
_PickedSet5, 2, 1.
!FLOAD, LOAD CASE=2
_PickedSet6, 2, 1.

＜ヘッダーの説明＞

* 赤字は例に記載されている数値
* 表 2 行目の英字は変数名をあらわす。

5-1 !DYNAMIC

◆周波数応答解析の設定を行う。

運動方程式の解法	解析の種類
idx_eqa	idx_resp
11	2

下限周波数	上限周波数	応答計算点数	変位を測定する周波数
f_start	f_end	n_freq	f_disp
14000	16000	20	15000.0

実時間での開始時間	実時間での終了時間
t_start	t_end
0.0	6.6e-5

質量マトリックスの種類	減衰の種類	Rayleigh 減衰のパラメータ R_m	Rayleigh 減衰のパラメータ Rk
idx_mas	idx_dmp	ray_m	ray_k
1	1	0.0	7.2E-7

時間空間でのサンプリング数	可視化データ出力指定 (1-モード空間,2-物理空間)	周波数空間モニタリング節点 ID
nout	vistype	nodeout
10	2	1

出力制御 変位	出力制御 速度	出力制御 加速度	出力制御 無視	出力制御 無視	出力制御 無視
iout_list(1)	iout_list(2)	iout_list(3)	iout_list(4)	iout_list(5)	iout_list(6)
1	1	1	1	1	1

5-5　!EIGENREAD

◆周波数応答解析に用いる固有値・固有モードの指定

固有値解析のログファイル名

eigenlog_filename

eigen0.log

固有値解析に使用する指定モード始点	固有値解析に使用する指定モード終点
start_mode	end_mode
1	5

5-6　!FLOAD

◆周波数応答解析用集中荷重の定義

節点番号または節点グループ名または面グループ名	自由度番号	荷重値
NODE_ID	DOF_id	Value
_PickedSet5	2	1.

7.3.2　ソルバー制御データ

＜ソルバー制御データ例＞

```
### SOLVER CONTROL
!SOLVER, METHOD=CG, PRECOND=1, ITERLOG=YES, TIMELOG=YES        6-1
  10000,   2                                                   6-2
  1.0e-8,   1.0,   0.0                                         6-3
```

＜ヘッダーの説明＞

* 赤字は例に記載されている数値

6-1　!SOLVER

METHOD＝解析方法

（DIRECT は直接法、そのほか CG、BiCGSTAB、GMRES、GPBiCG などがある）

DUMPTYPE＝行列ダンプ型式

DUMPEXIT＝行列ダンプ直後にプログラムを終了するか

以下のパラメータは解析方法で直接法を選択するとすべて無視される。

PRECOND＝前処理の手法

ITERLOG＝ソルバー収束履歴出力の有無

TIMELOG＝ソルバー計算時間出力の有無

SCALING＝行列の対角成分が 1 となるスケーリングの有無

USEJAD＝ベクトル機向けオーダリングの有無

MPCMETHOD=多点拘束処理の手法

（1：ペナルティ法、２：MPC-CG 法、３：陽的自由度消去法）

ESTCOND=条件数推定の頻度

（指定された反復回数ごと、および、反復終了時に推定を実施。0 の場合は推定なし。）

6-2

反復回数,	前処理の繰り返し数,	クリロフ部分空間数	マルチカラーの色数
NIER	iterPREMAX	NREST	NCOLOR_IN
10000	2		

6-3

打ち切り誤差,	前処理行列計算時の対角成分の倍率,	未使用
RESID	SIGMA_DIAG	SIGMA
1.0e-8,	1.0,	0.0

7.3.3　ポスト処理(可視化)制御データ

以下にポスト処理（可視化）制御データの例とその内容を示す。

＜可視化制御データ例＞

- 各説明番号（P1-0　P1-1 等）はのちの詳細説明の番号とリンクしている。
- **P1-**○は共通データ、**P2-**○はレンダリングのためのパラメータをあらわす。
  なおレンダリングについては output_type＝BMP のときのみ有効となる。
- surface_style が !surface_style = 2（等値面）!surface_style = 3 （ユーザー指定曲面）の場合、別途設定が必要となる。その記載については共通データ後にまとめて記載する。
  （**P3-**○は!surface_style =　2 における等値面での説明。
  P4-○は!surface_style = 3 におけるユーザー指定曲面での説明。）
- !!のように！が 2 つ記載されているものはコメント文と認識され解析に影響を及ぼさない。

### Post Control	説明番号
!VISUAL, method=PSR	P1-0
!surface_num = 1	P1-1
!surface 1	P1-2
!surface_style = 1	P1-3
!display_method = 1	P1-4
!color_comp_name　=　STRESS	P1-5
!colorsubcomp_name	P1-6
!color_comp　　　　7	P1-7
!!color_subcomp = 1	P1-8
!iso_number	P1-9
!specified_color	P1-10
!deform_display_on = 1	P1-11
!deform_comp_name	P1-12
!deform_comp	P1-13
!deform_scale = 9.9e-1	P1-14
!initial_style　= 1	P1-15
!deform_style = 3	P1-16
!initial_line_color	P1-17
!deform_line_color	P1-18
!output_type　= BMP	P1-19
!x_resolution = 500	P2-1
!y_resolution = 500	P2-2
!num_of_lights = 1	P2-3

!position_of_lights = -20.0, 5.8, 80.0	P2-4
!viewpoint = -20.0 -10.0 5.0	P2-5
!look_at_point	P2-6
!up_direction = 0.0 0.0 1.0	P2-7
!ambient_coef= 0.3	P2-8
!diffuse_coef= 0.7	P2-9
!specular_coef= 0.5	P2-10
!color_mapping_style= 1	P2-11
!!interval_mapping_num	P2-12
!interval_mapping= -0.01, 0.02	P2-13
!rotate_style = 2	P2-14
!rotate_num_of_frames	P2-15
!color_mapping_bar_on = 1	P2-16
!scale_marking_on = 1	P2-17
!num_of_scale = 5	P2-18
!font_size = 1.5	P2-19
!font_color = 1.0 1.0 1.0	P2-20
!background_color	P2-21
!isoline_color	P2-22
!boundary_line_on	P2-23
!color_system_type	P2-24
!fixed_range_on = 1	P2-25
!range_value = -1.E-2, 1.E-2	P2-26

共通データ一覧 ＜ P1-1 から P1-19 ＞

番号	キーワード	型	内容
P1-0	!VISUAL		可視化手法の指定
P1-1	surface_num		1 つのサーフェスレンダリング内のサーフェス数
P1-2	surface		サーフェスの内容の設定
P1-3	surface_style	integer	表面タイプの指定 (省略値: 1)
			1: 境界表面
			2: 等値面 3: 方程式によるユーザー定義の曲面
P1-4	display_method	integer	表示方法 (省略値: 1) 1. 色コードの表示 2. 境界線表示 3. 色コード及び境界線表示 4. 指定色一色の表示 5. 色分けにによる等値線表示
P1-5	color_comp_name	character(100)	変数名とカラーマップとの対応 (省略値: 第一変数名)
P1-6	color_subcomp_name	character(4)	変数がベクトルの時、表示するコンポーネントを指定する。 (省略値: x) norm: ベクトルのノルム x: x 成分 y: y 成分 z: z 成分
P1-7	color_comp	integer	変数名に識別番号をつける (省略値: 0)
P1-8	color_subcomp	integer	変数の自由度が 1 以上の時、表示される自由度番号を指定する。 0: ノルム (省略値:1)
P1-9	iso_number	integer	等値線数を指定する。 (省略値:5)
P1-10	specified_color	real	display_method = 4 の時のカラーを指定する。
			0.0 <specified_color < 1.0
P1-11	!deform_display_on	integer	変形の有無を指定する。 1: on 0: off (省略値:0)
P1-12	!deform_ comp_name	character(100)	変形を指定する際の採用する属性を指定する。 (省略値:DISPLCEMENT という名の変数)
P1-13	!deform_ comp	integer	変形を指定する際の変数の識別番号 (省略値: 0)

P1-14	!deform_scale	real	変形を表示する際の変位スケールを指定する。 Default:自動 standard_scale = 0.1 * $\sqrt{x\_range^2 + y\_range^2 + z\_range^2}$ /max_deform user_defined: real_scale= standard_scale * deform_scale
P1-15	!initial_style	integer	変形表示のタイプを指定する(省略値： 1) 0: 無 1: 実線メッシュ(指定がなければ青で表示) 2: グレー塗りつぶし 3: シェーディング (物理属性をカラー対応させる) 4: 点線メッシュ(指定がなければ青で表示)
P1-16	!deform_style	integer	初期、変形後の形状表示スタイルを指定する（省略値： 4) 0: 無 1: 実線メッシュ(指定がなければ青で表示) 2: グレー塗りつぶし 3: シェーディング (物理属性をカラー対応させる) 4: 点線メッシュ(指定がなければ青で表示)
P1-17	!initial_line_color	real (3)	初期メッシュを表示する際のカラーを指定する。これは実線、点線両者を含む。 (省略値： 青 (0.0, 0.0, 1.0))
P1-18	!deform_line_color	real (3)	変形メッシュを表示する際のカラーを指定する。これは実線、点線両者を含む。 (黄色 (1.0, 1.0, 0.0))
P1-19	output_type	character(3)	出力ファイルの型を指定する。 (省略値： AVS) AVS: AVS 用 UCD データ（物体表面上のみ） BMP: イメージデータ（BMP フォーマット） COMPLETE_AVS: AVS 用 UCD データ COMPLETE_REORDER_AVS: 節点・要素番号を並び替え SEPARATE_COMPLETE_AVS: 分割領域ごと COMPLETE_MICROAVS: 物理量スカラー出力 FSTR_FEMAP_NEUTRAL: FEMAP 用ニュートラルファイル

レンダリングデータ一覧　＜ P2-1 から P2-26　＞
(output_type = BMP の時のみ有効)

	キーワード	型	内容
P2-1	x_resolution	integer	最終図の幅を指定する。　(省略値：512)
P2-2	y_resolution	integer	最終図の高さを指定する。　(省略値：512)
P2-3	num_of_lights	integer	照明の個数を指定する。　(省略値:1)
P2-4	position_of_lights	real(:)	照明の位置を座標で指定する。(省略値：正面真上) 指定方法 !position_of_lights= x, y, z, x, y, z, … 例）!position_of_lights=100.0, 200,0, 0.0
P2-5	viewpoint	real(3)	視点の位置を座標で指定する。 (省略値：　$x = (x_{min} + x_{max})/2.0$ $y = y_{min} + 1.5 *(y_{max} – y_{min})$ $z = z_{min} + 1.5 *(z_{max} – z_{min})$　)
P2-6	look_at_point	real(3)	視線の位置を指定する。 (省略値:データの中心)
P2-7	up_direction	real(3)	Viewpoint, look_at_point and up_direction にてビューフレーム を定義する。(省略値：0.0, 0.0, 1.0)
P2-8	ambient_coef	real	周囲の明るさを指定する。(省略値：0.3)
P2-9	diffuse_coef	real	乱反射光の強さを係数にて指定する。 (省略値 0.7)
P2-10	specular_coef	real	鏡面反射の強さを係数にて指定する。 (省略値 0.6)
P2-11	color_mapping_style	integer	カラーマップの方法を指定する。　(省略値：1) 1: 完全線形マップ (全色をRGBに線形に写像する) 2: クリップ線形マップ (mincolor から maxcolor)を RGBカラースペースに写像する。 3: 非線形カラーマップ (全領域を複数の区間に分割し、区間ごとには線形マップを行う) 4. 最適自動調整 (データの分布を統計処理してカラーマップを決定する)
P2-12	interval_ mapping_num	integer	color_mapping_style = 3 の時の区間の数を指定する。
P2-13	interval_mapping	real(:)	color_mapping_style = 2 or 3 の時の区間位置とカラー番号を指定する。 color_mapping_style = 2 の場合 !interval_mapping = [minimum color], [maximum color] If color_mapping_style = 3 の場合

			!interval_mapping= [区間,対応するカラー値],･･･指定回繰り返し 注意:1 行内に記述すること。
P2-14	rotate_style	integer	アニメーションの回転軸を指定する。 1: x軸で回転する。 2: y軸で回転する。 3: z軸で回転する。 4: 特に視点を指定してアニメーションする。 (8 フレーム)
P2-15	rotate_num_of_frames	integer	アニメーションのサイクルを指定する。(rotate_style = 1, 2, 3) (省略値: 8)
P2-16	color_mapping_bar_on	integer	カラーマップバーの有無を指定する。 0: off 1: on 省略値:0
P2-17	scale_marking_on	integer	カラーマップバーに値の表示の有無を指定する。 0: off 1: on 省略値:0
P2-18	num_of_scale	integer	カラーバーのメモリの数を指定する。 (省略値:3)
P2-19	font_size	real	カラーマップバーの値表示の際のフォントサイズを指定する。 範囲: 1.0~4.0. (省略値:1.0)
P2-20	font_color	real(3)	カラーマップバーの値表示の際の表示色を指定する。 (省略値: 1.0, 1.0, 1.0 (白))
P2-21	background_color	real(3)	背景色を指定する。 (省略値: 0.0, 0.0, 0.0 (黒))
P2-22	isoline_color	read (3)	等値線の色を指定する。(省略値:その値と同じ色)
P2-23	boundary_line_on	integer	データの地域を表示の有無を指定する。 0: off 1: on 省略値:0
P2-24	color_system_type	integer	カラーマップのスタイルを指定する(省略値: 1) 1:（青－赤）(昇順に) 2: レインボーマップ (赤から紫へ昇順に) 3.（黒－白）(昇順に).
P2-25	fixed_range_on	integer	カラーマップの方法を他のタイムステップに対して保持するか否かを指定する。0: off 1: on (省略値 0)
P2-26	range_value	real (2)	区間を指定する。

surface_style の設定値別データ一覧

（等値面（surface_style=2）の場合）

	キーワード	型	内容
P3-1	data_comp_name	character(100)	等値面の属性に名前をつける。
P3-2	data_subcomp_name	character(4)	変数がベクトルの時、表示するコンポーネントを指定する。(省略値： x) norm: ベクトルのノルム x: x 成分 y: y 成分 z: z 成分
P3-3	data_comp	integer	変数名に識別番号をつける (省略値： 0)
P3-4	data_subcomp	integer	変数の自由度が 1 以上の時、表示される自由度番号を指定する。 0: ノルム (省略値:1)
P3-5	iso_value	real	等値面の値を指定する。

（ユーザーの方程式指定による曲面（surface_sytle = 3）の場合）

	キーワード	型	内容
P4-1	method	integer	曲面の属性を指定する。(省略値： 5) 1. 球面 2. 楕円曲面 3. 双曲面 4. 方物面 5. 一般的な 2 次曲面
P4-2	point	real(3)	method = 1, 2, 3, or 4 の時の中心の座標を指定する。(省略値： 0.0, 0.0, 0.0)
P4-3	radius	real	method = 1 の時の半径を指定する。(省略値： 1.0)
P4-4	length	real	method = 2, 3, 又は 4)の時の径の長さを指定する。 注意:楕円曲面の場合一つの径の長さは 1.0 である。.
P4-5	coef	real	method=5 の時、2 次曲面の係数を指定する。 coef[1]x^2 + coef[2]y^2 + coef[3]z^2 + coef[4]xy + coef[5]xz + coef[6]yz + coef[7]x + coef[8]y + coef[9]z + coef[10]=0 例： coef=0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, -10.0 これは y=10.0 という平面を意味する。

7.4　解析制御データのパラメータ詳細

7.3 で説明した各パラメータについて詳細を記述する。
解析制御データを
①共通制御データ
②静解析用制御データ
③固有値解析用制御データ
④熱伝導解析用制御データ
⑤動解析用制御データ
⑥ソルバー制御データ
⑦ポスト処理（可視化）制御データ
に分類する。

7.4.1　共通制御データ

(1)　!VERSION　(1-1)

ソルバーバージョン番号を指定する。現時点ではバージョン番号 3

使用例

```
!VERSION
  3
```

(2)　!SOLUTION　(1-2)

解析の種別を指定する。
必須の制御データ.

パラメータ

```
TYPE = STATIC       : 線形静解析
       NLSTATIC     : 非線形静解析
       HEAT         : 熱伝導解析
       EIGEN        : 固有値解析
       DYNAMIC      : 動解析
       STATICEIGEN  : 非線形静解析→固有値解析
       ELEMCHECK    : 要素形状のチェック
```

使用例

```
!SOLUTION, TYPE=STATIC
```

(3)　!WRITE, VISUAL　(1-3)

メモリ渡しビジュアライザーによる可視化データ出力を指定する。

パラメータ

FREQUENCY　=　出力するステップ間隔（デフォルト：1）

使用例

!WRITE, VISUAL, FREQUENCY=2

(4)　!WRITE, RESULT　(1-4)

解析結果データファイル出力を指定する。

パラメータ

FREQUENCY　=　出力するステップ間隔（デフォルト：1）

使用例

!WRITE, RESULT, FREQUENCY=2

(5)　!WRITE, LOG　(1-5)

ログファイル出力するステップ間隔を指定する。

パラメータ

FREQUENCY　=　出力するステップ間隔（デフォルト：1）

使用例

!WRITE, LOG, FREQUENCY=2

(6)　!OUTPUT_VIS　(1-6)

メモリ渡しビジュアライザーによる可視化データ出力の物理量を指定する。

!WRITE, VISUAL の指定が必要

パラメータ

なし

2 行目以降

（2 行目以降）　変数名、 ON／OFF

以下の変数名が指定可能である。

変数名	物理量
DISP	変位（デフォルト出力）
ROT	回転（761, 781 シェル要素のみ有効）
REACTION	節点反力
NSTRAIN	節点ひずみ
NSTRESS	節点応力（デフォルト出力）
NMISES	節点 Mises 応力（デフォルト出力）
TH_NSTRAIN	節点熱ひずみ（未実装）
VEL	速度
ACC	加速度

使用例

```
!OUTPUT_VIS
NSTRAIN, ON
NSTRESS, OFF
```

(7) !OUTPUT_RES (1-7)

解析結果データファイル出力の物理量を指定する。

!WRITE, RESULT の指定が必要

パラメータ

なし

2 行目以降

（2 行目以降） 変数名、 ON／OFF

以下の変数名が指定可能である。

変数名	物理量
DISP	変位（デフォルト出力）
ROT	回転（761, 781 シェル要素のみ有効）
REACTION	節点反力
NSTRAIN	節点ひずみ
NSTRESS	節点応力（デフォルト出力）
NMISES	節点 Mises 応力（デフォルト出力）
ESTRAIN	要素ひずみ
ESTRESS	要素応力（デフォルト出力）
EMISES	要素 Mises 応力（デフォルト出力）
ISTRAIN	積分点ひずみ
ISTRESS	積分点応力

PL_ISTRAIN	積分点塑性ひずみ
TH_NSTRAIN	節点熱ひずみ（未実装）
TH_ESTRAIN	要素熱ひずみ（未実装）
TH_ISTRAIN	積分点熱ひずみ（未実装）
VEL	速度
ACC	加速度

使用例

```
! OUTPUT_RES
ESTRESS, OFF
ISTRESS, ON
```

(8) !RESTART (1-8)

リスタートデータの入出力を指定する。

パラメータ

FREQUENCY = n ：出力するステップ間隔（デフォルト：0）

n>0 ：n ステップごとに出力

n<0 ：まずリスタートデータファイルを読み込み、その後 n ステップごとに出力

使用例

```
!RESTART, FREQUENCY=-2
```

(9) !ECHO (1-9)

節点データ，要素データおよび材料データをログファイルに出力する。

パラメータ

なし

(10) !ORIENTATION (1-10)

局所座標系を定義する。

パラメータ

NAME = 局所座標系名

DEFINITION = COORDINATES（Default 値）／NODES

・DEFINITION= COORDINATES の場合

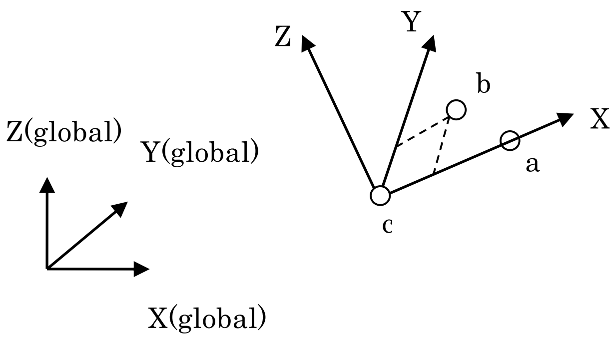
（2 行目） a1, a2, a3, b1, b2, b3, c1, c2, c3

変数名	属 性	内 容
a1, a2, a3	R	a 点の全体座標
b1, b2, b3	R	b 点の全体座標
c1, c2, c3	R	c 点の全体座標

・DEFINITION= NODES の場合

（2 行目） a, b, c

変数名	属 性	内 容
a, b, c	R	節点番号



(11) !SECTION (1-11)

セクションの局所座標系を指定する。

パラメータ

SECNUM = メッシュデータ中の!SECTION 入力順番号

ORIENTATION = 局所座標系名

(12) !END (1-12)

制御データの終わりを示す。

パラメータ

なし

7.4.2 静解析用制御データ

(1) !STATIC (2-1)

静的解析を行う。（Default値、省略可）

パラメータ
なし

(2) !MATERIAL (2-2)

材料物性の定義

材料物性の定義は!MATERIAL と以降に置く!ELASTICITY、!PLASTICITY などとセットで使用する。!MATERIAL の前に置く!ELASTICITY、!PLASTICTY などは無視される。

注：解析制御データで!MATERIAL を定義すると、メッシュデータ内の!MATERIAL 定義は無視される。解析制御データで!MATERIAL を定義しない場合は、メッシュデータ内の!MATERAIL 定義が用いられる。

パラメータ
NAME = 材料名

(3) !ELASTIC (2-2-1)

弾性材料の定義

パラメータ
TYPE = ISOTROPIC（Default値）／ORTHOTROPIC／USER
DEPENDENCIES = 0（Default値）／ 1

2 行目以降
・TYPE = ISOTROPICの場合
（2 行目） YOUNGS, POISSION, Temperature

変数名	属 性	内 容
YOUNGS	R	ヤング率
POISSON	R	ポアソン比
Temperature	R	温度(DEPENDENCIES=1の時に必要)

・TYPE= ORTHOTROPICの場合
（2 行目） E1, E2, E3, ν12, ν13, ν23, G12, G13, G23, Temperature

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\,\varepsilon_{12} \\ 2\,\varepsilon_{23} \\ 2\,\varepsilon_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ & \text{対称} & & & 1/G_{23} & 0 \\ & & & & & 1/G_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix}$$

・TYPE = USERの場合

（2 行目～10 行目）　v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10

(4)　!PLASTIC　(2-2-2)

塑性材料の定義

パラメータ

YIELD　=　MISES（Default 値）、Mohr-Coulomb、DRUCKER-PRAGER、USER

HARDEN　=　BILINEAR（Default 値）、MULTILINEAR、SWIFT、RAMBERG-OSGOOD、
KINEMATIC、 COMBINED

DEPENDENCIES　=　0（Default値）／ 1

2 行目以降

・YIELD = MISES の場合（Default 値）

＊HARDEN = BILINEAR（Default 値）の場合

（2 行目）　YIELD0, H

＊HARDEN = MULTILINEAR の場合

（2 行目）　YIELD, PSTRAIN, Temperature

（3 行目）　YIELD, PSTRAIN, Temperature

...続く

＊HARDEN = SWIFT の場合

（2 行目）　ε0, K, n

＊HARDEN = RAMBERG-OSGOOD の場合

（2 行目）　ε0, D, n

＊HARDEN = KINEMATIC の場合

（2 行目）　YIELD0, C

＊HARDEN = COMBINED の場合

（2 行目）　YIELD0, H, C

・YIELD = Mohr-Coulomb　または　Drucker-Prager の場合

＊HARDEN = BILINEAR,（Default 値）の場合

（2 行目）　c, FAI, H

＊HARDEN = MULTILINEAR の場合

（2 行目）　FAI

（3 行目）　PSTRAIN, c

（4 行目）　PSTRAIN, c

...続く

HARDEN = 他は無視され、Default 値（BILINEAR）になる。

変数名	属 性	内 容
YIELD0	R	初期降伏応力
H	R	硬化係数
PSTRAIN	R	塑性ひずみ
YIELD	R	降伏応力
ε0, K, n	R	$\bar{\sigma}=k(\varepsilon_0+\bar{\varepsilon})^n$
ε0, D, n	R	$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}+\varepsilon_0\left(\frac{\sigma}{D}\right)^n$
FAI	R	内部摩擦角
c	R	粘着力
C	R	線形移動硬化係数
Tempearture	R	温度(DEPENDENCIES=1 の時に必要)
v1, v2...v10	R	材料定数

・YIELD= USER の場合

(2 行目以降)　v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10

使用例

```
!PLASTIC, YIELD=MISES, HARDEN=MULTILINEAR, DEPENDENCIES=1
 276.0,   0.0,        20.
 296.0,   0.0018,     20.
 299.0,   0.0053,     20.
 303.0,   0.008,      20.
 338.0,   0.0173,   20.
 372.0,   0.0271,   20.
 400.0,   0.037,      20.
 419.0,   0.0471,   20.
 437.0,   0.0571,   20.
 450.0,   0.0669,   20.
 460.0,   0.0767,   20.
 469.0,   0.0867,   20.
 477.0,   0.0967,   20.
 276.0,   0.0,        100.
 276.0,   0.0018,     100.
 282.0,   0.0053,     100.
 295.0,   0.008,      100.
 330.0,   0.0173,   100.
 370.0,   0.0271,   100.
```

392.0, 0.037, 100.
410.0, 0.0471, 100.
425.0, 0.0571, 100.
445.0, 0.0669, 100.
450.0, 0.0767, 100.
460.0, 0.0867, 100.
471.0, 0.0967, 100.
128.0, 0.0, 400.
208.0, 0.0018, 400.
243.0, 0.0053, 400.
259.0, 0.008, 400.
309.0, 0.0173, 400.
340.0, 0.0271, 400.
366.0, 0.037, 400.
382.0, 0.0471, 400.
396.0, 0.0571, 400.
409.0, 0.0669, 400.
417.0, 0.0767, 400.
423.0, 0.0867, 400.
429.0, 0.0967, 400.

指定の温度また塑性ひずみに関する上記の入力データから内挿して、加工硬化係数を計算することになる。各温度値に対して、同じ PSTRAIN 配列を入力することが必要になる。

(5) !HYPERELASTIC (2-2-3)

超弾性材料の定義

パラメータ

TYPE = NEOHOOKE（Default 値）
MOONEY-RIVLIN
ARRUDA-BOYCE
USER

2 行目以降

・TYPE = NEOHOOKE の場合

（2 行目） C_{10}, D

変数名	属 性	内 容
C_{10}	R	材料定数
D	R	材料定数

・TYPE = MOONEY-RIVLIN の場合

（2 行目）　C_{10}, C_{01}, D

変数名	属 性	内　　容
C_{10}	R	材料定数
C_{01}	R	材料定数
D	R	材料定数

・TYPE = ARRUDA-BOYCE の場合

（2 行目）　mu, lambda_m, D

変数名	属 性	内　　容
mu	R	材料定数
lambda_m	R	材料定数
D	R	材料定数

・TYPE = USER の場合

（2 行目～10 行目）　v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10

(6)　!VISCOELASTIC　(2-2-4)

粘弾性材料の定義

パラメータ

DEPENDENCIES　=　依存する変数の数（未実装）

2 行目以降

（2 行目）　g, t

変数名	属 性	内　　容
g	R	せん断緩和弾性率
t	R	緩和時間

(7)　!CREEP　(2-2-5)

クリープ材料の定義

パラメータ

TYPE　=　NORTON（Default 値）

DEPENDENCIES　=　0（Default 値）／ 1

2 行目以降

（2 行目）　A, n, m, Tempearature

変数名	属 性	内　　容
A	R	材料係数
n	R	材料係数
m	R	材料係数
Tempearture	R	温度(DEPENDENCIES=1 の時に必要)

(8)　!DENSITY　(2-2-6)

質量密度の定義

パラメータ

DEPENDENCIES　=　依存する変数の数（未実装）

2 行目以降

（2 行目）　density

変数名	属 性	内　　容
density	R	質量密度

(9)　!EXPANSION_COEFF　(2-2-7)

線膨張係数の定義

パラメータ

TYPE　=　材質タイプ：　ISOTROPIC（等方性:デフォルト）／ORTHOTROPIC（直交異方性）

DEPENDENCIES　=　0（Default値）／ 1

2 行目以降

・TYPE=ISOTROPIC の場合

（2 行目）　expansion, Temperature

・TYPE=ORTHOTROPIC の場合

（2 行目）α11, α22, α33, Temperature

変数名	属 性	内　　容
expansion	R	線膨張係数
α11, α22, α33	R	線膨張係数
Tempearture	R	温度(DEPENDENCIES=1 の時に必要)

(10)　!USER_MATERIAL　(2-2-8)

ユーザー定義材料の入力

パラメータ

NSTATUS　=　材料の状態変数の数を指定する（デフォルト：1）

2 行目以降

（2 行目～10 行目）　v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10

(11)　!BOUNDARY　(2-3)

変位境界条件の定義

パラメータ

GRPID　=　グループ ID

AMP　=　時間関数名（!AMPLITUDE で指定、動解析で有効）

2 行目以降

（2 行目）　NODE_ID, DOF_idS, DOF_idE, Value

変数名	属 性	内　容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名
DOF_idS	I	拘束自由度の開始番号
DOF_idE	I	拘束自由度の終了番号
Value	R	拘束値（デフォルト：0）

使用例

```
!BOUNDARY, GRPID=1
1, 1, 3, 0.0
ALL, 3, 3,
※拘束値は 0.0
```

(12)　!SPRING　(2-3-1)

ばね境界条件の定義

パラメータ

GRPID　=　グループ ID

2 行目以降

（2 行目）　NODE_ID, DOF_id, Value

変数名	属 性	内 容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名
DOF_id	I	拘束自由度
Value	R	ばね定数

使用例

```
!SPRING, GRPID=1
1, 1, 0.5
```

(13) !CLOAD (2-4)

集中荷重の定義

パラメータ

GRPID = グループ ID

AMP = 時間関数名（!AMPLITUDE で指定、動解析で有効）

2 行目以降

（2 行目） NODE_ID, DOF_id, Value

変数名	属 性	内 容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名
DOF_id	I	自由度番号
Value	R	荷重値

使用例

```
!CLOAD, GRPID=1
1, 1, 1.0e3
ALL, 3, 10.0
```

(14) !DLOAD (2-5)

分布荷重の定義

パラメータ

GRPID = グループ ID

AMP = 時間関数名（!AMPLITUDE で指定、動解析で有効）

FOLLOW = YES（Default 値）／NO

（圧力荷重の方向を変形に追随させるか否かの指定、有限変形解析で有効）

2 行目以降

（2 行目）　ID_NAME, LOAD_type, param1, param2,…

変数名	属 性	内　　容
ID_NAME	I/C	面グループ名、要素グループ名または要素番号
LOAD_type	C	荷重タイプ番号
param*	R	荷重パラメータ（下記参照）

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	種類	パラメータ数	パラメータ並びとその意味
S	面グループで指定の面への圧力	1	圧力値
P0	シェル要素への圧力	1	圧力値
PX	シェル要素 X 方向への圧力	1	圧力値
PY	シェル要素 Y 方向への圧力	1	圧力値
PZ	シェル要素 Z 方向への圧力	1	圧力値
P1	第 1 面への圧力	1	圧力値
P2	第 2 面への圧力	1	圧力値
P3	第 3 面への圧力	1	圧力値
P4	第 4 面への圧力	1	圧力値
P5	第 5 面への圧力	1	圧力値
P6	第 6 面への圧力	1	圧力値
BX	X 方向への体積力	1	体積力値
BY	Y 方向への体積力	1	体積力値
BZ	Z 方向への体積力	1	体積力値
GRAV	重力	4	重力加速度,重力の方向余弦
CENT	遠心力	7	角速度，回転軸上の点の位置ベクトル、回転軸の方向ベクトル

使用例

```
!DLOAD, GRPID=1
1, P1, 1.0
ALL, BX, 1.0
ALL, GRAV, 9.8, 0.0, 0.0, -1.0
ALL, CENT, 188.495, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0
```

(15)　!ULOAD　(2-6)

ユーザー定義荷重の入力

パラメータ

FILE　=　ファイル名（必須）

(16)　!CONTACT_ALGO　(2-7)

接触解析アルゴリズムの指定

パラメータ

TYPE　=　SLAGRANGE　:　Lagrange 乗数法
　　　　　ALAGRANGE　:　拡張 Lagrange 乗数法

(17)　!CONTACT　(2-8)

接触条件の定義

パラメータ

GRPID　=　境界条件グループ ID

INTERACTION　=　SSLID（Default 値）
　　　　　　　　FSLID

NTOL　=　接触法線方向収束閾値（デフォルト：1.e-5）

TTOL　=　接触切線方向収束閾値（デフォルト：1.e-3）

NPENALTY　=　接触法線方向 Penalty（デフォルト：剛性マトリクス×1.e3）

TPENALTY　=　接触切線方向 Penalty（デフォルト：1.e3）

2 行目以降

（2 行目）　PAIR_NAME, fcoef, factor

変数名	属 性	内　容
PAIR_NAME	C	接触ペア名（!CONTACT PAIR にて定義）
fcoef	R	摩擦係数（デフォルト：0.0）
factor	R	摩擦のペナルティ剛性

使用例

```
! CONTACT_ALGO, TYPE=SLAGRANGE
! CONTACT, GRPID=1, INTERACTION=FSLID
CP1, 0.1, 1.0e+5
```

(18)　!TEMPERATURE　(2-9)

熱応力解析に用いる節点温度の指定

パラメータ

READRESULT　=　熱伝導解析の結果ステップ数。

指定された場合、熱伝導解析の結果ファイルから順次に温度を入力し、

2 行目以降は無視される。

SSTEP　=　熱伝導解析結果の読み込むを行う最初のステップ番号（デフォルト：1）

INTERVAL　=　熱伝導解析結果の読み込むを行うステップ間隔（デフォルト：1）

2 行目以降

（2 行目）　NODE_ID, Temp_Value

変数名	属 性	内　　容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名
Temp_Value	R	温度　（デフォルト：0）

使用例

```
!TEMPERATURE
1, 10.0
2, 120.0
3, 330.0
!TEMPERATURE
ALL, 20.0
!TEMPERATURE, READRESULT=1, SSTEP=1
```

(19)　!REFTEMP　(2-10)

熱応力解析における参照温度の定義

パラメータ

なし

2 行目以降

（2 行目）　Value

変数名	属 性	内　　容
Value	R	参照温度（デフォルト：0）

(20)　!STEP　(2-11)

解析ステップの設定

非線形静解析、非線形動解析では必須

上記以外の解析でこの定義を省略すると、すべての境界条件が有効になり、1 ステップで計算

材料特性が粘弾性およびクリープの場合、TYPE=VISCO を指定し、計算時間条件を設定

パラメータ

TYPE = STATIC（default 値）／ VISCO （準静的解析）

SUBSTEPS = 境界条件の分割ステップ数（デフォルト：1）

CONVERG = 収束判定閾値（デフォルト：1.0e-6）

MAXITER = 非線形解析における最大反復計算回数（デフォルト：50）

AMP = 時間関数名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目） DTIME, ETIME （TYPE=VISCO の場合に指定）

変数名	属 性	内 容
DTIME	R	時間増分値（デフォルト： 1）
ETIME	R	本ステップ時間増分の終値（デフォルト： 1）

（3 行目以降）

BOUNDARY, id　　id=!BOUNDARY で定義した GRPID

LOAD, id　　id=!CLOAD, !DLOAD, !TEMPERATURE で定義した GRPID

CONTACT, id　　id=!CONTACT で定義した GRPID

使用例

```
! STEP, CONVERG=1.E-8
0.1, 1.0
BOUNDARY, 1
LOAD, 1
CONTACT, 1
```

(21) !TRS (2-12)

熱レオロジー単純化（Thermorheological Simplicity）による粘弾性材料の温度依存性の定義

この定義は!VISCOELASTIC の後ろに置かなければならない。前にある場合は、この定義が無視される。

パラメータ

DEFINITION = WLF（Default 値）／ARRHENUS

2 行目以降

（2 行目） θ_0, C_1, C_2

変数名	属 性	内 容
θ_0	R	参照温度
C_1, C_2	R	材料定数

7.4.3　固有値解析用制御データ

(1)　!EIGEN　(3-1)

固有値解析のパラメータ設定

パラメータ

なし

2 行目以降

（2 行目）　NGET, LCZTOL, LCZMAX

変数名	属 性	内　容
NSET	I	固有値数
LCZTOL	R	許容差　（デフォルト：　1.0e-8）
LCZMAX	I	最大反復数　（デフォルト：　60）

使用例

```
!EIGEN
3, 1.0e-10, 40
```

7.4.4　熱伝導解析用制御データ

(1)　!HEAT　(4-1)

計算に関する制御データの定義

パラメータ

なし

2 行目以降

（2 行目）　DT, ETIME, DTMIN, DELTMX, ITMAX, ESP

変数名	属 性	内　容
DT	R	初期時間増分
		≦ 0 :　定常計算
		＞ 0 :　非定常計算
ETIME	R	非定常計算時間（非定常計算時必須）
DTMIN	R	最小時間増分
		≦ 0 :　固定時間増分

		＞ 0 ： 自動時間増分
DELTMX	R	許容変化温度
ITMAX	I	非線形計算最大反復数 （デフォルト： 20）
EPS	R	収束判定値 （デフォルト： 1.0e-6）

使用例

```
!HEAT
（データなし）            --- 定常計算
!HEAT
0.0                       --- 定常計算
!HEAT
10.0, 3600.0              --- 固定時間増分非定常計算
!HEAT
10.0, 3600.0, 1.0         --- 自動時間増分非定常計算
!HEAT
10.0, 3600.0, 1.0, 20.0   --- 自動時間増分非定常計算
```

(2) !FIXTEMP (4-2)

規定温度の定義

パラメータ

AMP = 流束履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目） NODE_GRP_NAME, Value

変数名	属 性	内 容
NODE_GRP_NAME	C/I	節点グループ名または節点番号
Value	R	温度（デフォルト：0）

使用例

```
!FIXTEMP
ALL, 20.0
!FIXTEMP, AMP=FTEMP
ALL, 1.0
```

(3) !CFLUX (4-3)

節点にあたえる集中熱流束の定義

パラメータ

AMP = 流束履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目） NODE_GRP_NAME, Value

変数名	属 性	内 容
NODE_GRP_NAME	C/I	節点グループ名または節点番号
Value	R	熱流束値

使用例

```
!CFLUX
ALL, 1.0E-3
!CFLUX, AMP=FUX1
ALL, 1.0
```

(4) !DFLUX (4-4)

要素の面にあたえる分布熱流束と内部発熱の定義

パラメータ

AMP = 流束履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目） ELEMENT_GRP_NAME, LOAD_type, Value

変数名	属 性	内 容
ELEMENT_GRP_NAME	C/I	要素グループ名または要素番号
LOAD_type	C	荷重タイプ番号
Value	R	熱流束値

使用例

```
!DFLUX
ALL, S1, 1.0
!DFLUX, AMP=FLUX2
ALL, S0, 1.0
```

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	作用面	パラメータ

BF	要素全体	発熱量
S1	第 1 面	熱流束値
S2	第 2 面	熱流束値
S3	第 3 面	熱流束値
S4	第 4 面	熱流束値
S5	第 5 面	熱流束値
S6	第 6 面	熱流束値
S0	シェル面	熱流束値

(5)　!SFLUX　(4-5)

面グループによる分布熱流束の定義

パラメータ

AMP　=　流束履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目）　SURFACE_GRP_NAME, Value

変数名	属 性	内　容
SURFACE_GRP_NAME	C	面グループ名
Value	R	熱流束値

使用例

```
!SFLUX
SURF, 1.0
!SFLUX, AMP=FLUX3
SURF, 1.0
```

(6)　!FILM　(4-6)

境界面にあたえる熱伝達係数の定義

パラメータ

AMP1　=　熱伝達係数履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

AMP2　=　雰囲気温度履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目）　ELEMENT_GRP_NAME, LOAD_type, Value, Sink

変数名	属 性	内　容
ELEMENT_GRP_NAME	C/I	要素グループ名または要素番号

LOAD_type　　　　　　　C　　　荷重タイプ番号
Value　　　　　　　　　R　　　熱伝達係数
Sink　　　　　　　　　 R　　　雰囲気温度

使用例

```
!FILM
FSURF, F1, 1.0, 800.0
!FILM, AMP1=TFILM
FSURF, F1, 1.0, 1.0
```

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	作用面	パラメータ
F1	第 1 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F2	第 2 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F3	第 3 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F4	第 4 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F5	第 5 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F6	第 6 面	熱伝達係数と雰囲気温度
F0	シェル面	熱伝達係数と雰囲気温度

(7)　!SFILM　(4-7)

面グループによる熱伝達係数の定義

パラメータ

AMP1　=　熱伝達係数履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）
AMP2　=　雰囲気温度履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目）　SURFACE_GRP_NAME, Value, Sink

変数名	属 性	内　　容
SURFACE_GRP_NAME	C	面グループ名
Valu	R	熱伝達率
Sink	R	雰囲気温度

使用例

```
!SFILM
SFSURF, 1.0, 800.0
!SFILM, AMP1=TSFILM, AMP2=TFILM
```

SFSURF, 1.0, 1.0

(8) !RADIATE (4-8)

境界面にあたえる輻射係数の定義

パラメータ

AMP1 = 輻射係数履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

AMP2 = 雰囲気温度履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降

（2 行目） ELEMENT_GRP_NAME, LOAD_type, Value, Sink

変数名	属 性	内 容
ELEMENT_GRP_NAME	C/I	要素グループ名または要素番号
LOAD_type	C	荷重タイプ番号
Value	R	輻射係数
Sink	R	雰囲気温度

使用例

```
!RADIATE
RSURF, R1, 1.0E-9, 800.0
!RADIATE, AMP2=TRAD
RSURF, R1, 1.0E-9, 1.0
```

荷重パラメータ

荷重タイプ番号	作用面	パラメータ
R1	第 1 面	輻射係数と雰囲気温度
R2	第 2 面	輻射係数と雰囲気温度
R3	第 3 面	輻射係数と雰囲気温度
R4	第 4 面	輻射係数と雰囲気温度
R5	第 5 面	輻射係数と雰囲気温度
R6	第 6 面	輻射係数と雰囲気温度
R0	シェル面	輻射係数と雰囲気温度

(9) !SRADIATE (4-9)

面グループによる輻射係数の定義

パラメータ

AMP1　=　輻射係数履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）
AMP2　=　雰囲気温度履歴テーブル名（!AMPLITUDE で指定）

2 行目以降
（2 行目）　SURFACE_GRP_NAME, Value, Sink

変数名	属 性	内　容
SURFACE_GRP_NAME	C	面グループ名
Value	R	輻射係数
Sink	R	雰囲気温度

使用例

```
!SRADIATE
RSURF,   1.0E-9, 800.0
!SRADIATE, AMP2=TSRAD
RSURF, 1.0E-9, 1.0
```

(10)　!WELD_LINE　(4-10)

溶接線（直線）の定義

パラメータ
なし

2 行目
（2 行目）　I, U, Coef, V

変数名	属 性	内　容
I	R	電流
U	R	電圧
Coef	R	入熱効率
V	R	溶接トーチの移動速度

3 行目
（3 行目）　EGROUP, XYZ, C1, C2, H, tstart

変数名	属 性	内　容
EGROUP	C	入熱する要素グループ名
XYZ	I	溶接トーチの移動方向（自由度番号）
C1	R	溶接トーチの始点座標
C2	R	溶接トーチの終点座標
H	R	溶接源の幅、この幅範囲内の要素は入熱を受ける

tstart	R	溶接開始時刻

7.4.5 動解析用制御データ

(1) !DYNAMIC (5-1)

動解析の制御

!BOUNDARY、!CLOAD、!DLOAD で指定された各!AMPLITUDE における時刻 t は、0.0 から始まっていなければならない。

パラメータ

TYPE = LINEAR／NONLINEAR（ 線形動解析／非線形動解析）

2 行目以降

（2 行目） idx_eqa, idx_resp

変数名	属 性	内 容
idx_eqa	I	運動方程式の解法（直接時間積分法） （デフォルト：1） 1：陰解法（Newmark-β法） 11：陽解法（中央差分法）
idx_resp	I	解析の種類（デフォルト：1） 1：時刻歴応答解析 2：周波数応答解析

・idx_resp=1 の場合(時刻歴応答解析)

（3 行目） t_start , t_end , n_step, t_delta

変数名	属 性	内 容
t_start	R	解析開始時間（デフォルト：0.0)、未使用
t_end	R	解析終了時間（デフォルト：1.0)、未使用
n_step	I	全 STEP 数（デフォルト：1）
t_delta	R	時間増分（デフォルト：1.0）

（4 行目） ganma , beta

変数名	属 性	内 容
ganma	R	Newmark-β法のパラメータγ（デフォルト：0.5）
beta	R	Newmark-β法のパラメータβ（デフォルト：0.25）

（5 行目） idx_mas ,idx_dmp , ray_m ,ray_k

変数名	属 性	内 容
idx_mas	I	質量マトリックスの種類（デフォルト：1） 1：集中質量マトリックス

		2：consistent 質量マトリックス
idx_dmp	I	1：Rayleigh 減衰（デフォルト：1）
ray_m	R	Rayleigh 減衰のパラメータ Rm（デフォルト：0.0）
ray_k	R	Rayleigh 減衰のパラメータ Rk（デフォルト：0.0）

（6 行目）　nout, node_monit_1, nout_monit

変数名	属 性	内　　容
nout	I	未使用
node_monit_1	I	モニタリング節点番号（グローバル）または節点グループ名
nout_monit	I	モニタリングの結果出力間隔（デフォルト：1）

注）本行で指定したモニタリング節点の情報は、節点のグローバル番号を *NID* として、変位についてはファイル＜dyna_disp_*NID*.txt＞へ出力され、その並びは、step 番号、当該時間、*NID*、u_1、u_2、u_3 である。速度および加速度についても、それぞれファイル＜dyna_velo_*NID*.txt＞、＜dyna_acce_*NID*.txt＞へ同様の並びで出力される。節点ひずみについてはファイル＜dyna_strain_*NID*.txt＞へ出力され、その並びは、step 番号、当該時間、*NID*、e_{11}、e_{22}、e_{33}、e_{12}、e_{23}、e_{13} である。節点応力についてはファイル＜dyna_stress_*NID*.txt＞へ出力され、その並びは、step 番号、当該時間、*NID*、s_{11}、s_{22}、s_{33}、s_{12}、s_{23}、s_{13}、s_{mises} である。節点グループを用いて複数節点のモニタリングを指定した場合、上記の各ファイルは節点ごとに別ファイルに出力される。また、この出力を指定した場合、解析モデル全体の運動エネルギー、変形エネルギーおよび全エネルギーが＜dyna_energy.txt＞へ出力される。

（7 行目）　iout_list(1), iout_list(2), iout_list(3), iout_list(4), iout_list(5), iout_list(6)

変数名	属 性	内　　容
iout_list(1)	I	変位の出力指定（デフォルト：0）
		0：出力しない、1：出力する
iout_list(2)	I	速度の出力指定（デフォルト：0）
		0：出力しない、1：出力する
iout_list(3)	I	加速度の出力指定（デフォルト：0）
		0：出力しない、1：出力する
iout_list(4)	I	反力の出力指定（デフォルト：0）
		0：出力しない、1：出力する
iout_list(5)	I	ひずみの出力指定（デフォルト：0）
		0：出力しない（要素ベース及び節点ベース）、1：出力する
		2：出力する（節点ベース）
		3：出力する（要素ベース）
iout_list(6)	I	応力の出力指定（デフォルト：0）
		0：出力しない（要素ベース及び節点ベース）、1：出力する
		2：出力する（節点ベース）

3：出力する（要素ベース）

使用例

```
!DYNAMIC, TYPE=NONLINEAR
1 , 1
0.0, 1.0, 500, 1.0000e-5
0.5, 0.25
1, 1, 0.0, 0.0
100, 55, 1
0, 0, 0, 0, 0, 0
```

・idx_resp=2 の場合(周波数応答解析)

(3 行目) f_start, f_end, n_freq, f_disp

変数名	属 性	内 容
f_start	R	下限周波数
f_end	R	上限周波数
n_freq	I	応答計算点数
f_disp	R	変位を測定する周波数

(4 行目) t_start, t_end

変数名	属 性	内 容
t_start	R	実時間での振動開始時間
t_end	R	実時間での振動終了時間

(5 行目) idx_mas, idx_dmp, ray_m ,ray_k

変数名	属 性	内 容
idx_mas	I	質量マトリクスの種類（ 1 固定(集中質量マトリクス））
idx_dmp	I	1 :Rayleigh 減衰
ray_m	R	Rayleigh 減衰のパラメータ Rm(デフォルト :0.0)
ray_k	R	Rayleigh 減衰のパラメータ Rk(デフォルト :0.0)

(6 行目) nout, vistype, nodeout

変数名	属 性	内 容
nout	I	時間空間でのサンプリング数
vistype	I	可視化データ出力指定(1-モード空間,2-物理空間)
nodeout	I	周波数空間モニタリング節点 ID

(7 行目) iout_list(1), iout_list(2), iout_list(3), iout_list(4), iout_list(5), iout_list(6)

変数名	属 性	内 容
iout_list(1)	I	出力制御 変位（1-出力する 、0-出力しない）
iout_list(2)	I	出力制御 速度（1-出力する 、0-出力しない）
iout_list(3)	I	出力制御 加速度（1-出力する、0-出力しない）
iout_list(4)	I	無視

iout_list(5)	I	無視
iout_list(6)	I	無視

使用例

```
!DYNAMIC
11 , 2
14000, 16000, 20, 15000.0
0.0, 6.6e-5
1, 1, 0.0, 7.2E-7
10, 2, 1
1, 1, 1, 1, 1, 1
```

(2) !VELOCITY (5-2)

速度境界条件の定義

パラメータ

TYPE = INITIAL （初期速度境界条件）

= TRANSIT（!AMPLITUDE で指定した時間歴速度境界条件；デフォルト）

AMP = 時間関数名（!AMPLITUDE で指定）

!AMPLITUDE で時間 t と係数 f(t)の関係を与える。

下記 Value に係数 f(t)を乗じた値がその時刻の拘束値になる

（指定しない場合：時間と係数関係は f(t) = 1.0 となる）。

2 行目以降

（2 行目） NODE_ID, DOF_idS, DOF_idE, Value

変数名	属 性	内 容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名
DOF_idS	I	拘束自由度の開始番号
DOF_idE	I	拘束自由度の終了番号
Value	R	拘束値（デフォルト：0）

使用例

```
!VELOCITY, TYPE=TRANSIT, AMP=AMP1
1, 1, 1, 0.0
ALL, 3, 3
※拘束値は 0.0
!VELOCITY, TYPE=INITIAL
1, 3, 3, 1.0
2, 3, 3, 1.0
```

3, 3, 3, 1.0

注）速度境界条件の場合、変位境界条件の場合とは異なり、複数の自由度をまとめて定義できないため、DOF_idS と DOF_idE は同一番号でなければならない。
TYPE が INITIAL の場合、AMP が無効になる。

(3) !ACCELERATION (5-3)

加速度境界条件の定義

パラメータ

TYPE = INITIAL（初期加速度境界条件）
= TRANSIT（AMPLITUDE で指定した時間歴加速度境界条件；デフォルト）
AMP = 時間関数名（!AMPLITUDE で指定）
!AMPLITUDE で時間 t と係数 f(t)の関係を与える。
下記 Value に係数 f(t)を乗じた値がその時刻の拘束値になる
（指定しない場合：時間と係数関係は f(t) = 1.0 となる)。

2 行目以降

（2 行目） NODE_ID, DOF_idS, DOF_idE, Value

変数名	属 性	内 容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名
DOF_idS	I	拘束自由度の開始番号
DOF_idE	I	拘束自由度の終了番号
Value	R	拘束値（デフォルト：0）

使用例

```
!ACCELERATION, TYPE=TRANSIT, AMP=AMP1
1, 1, 3, 0.0
ALL, 3, 3
※拘束値は 0.0
! ACCELERATION, TYPE=INITIAL
1, 3, 3, 1.0
2, 3, 3, 1.0
3, 3, 3, 1.0
```

注）加速度境界条件の場合、変位境界条件の場合とは異なり、複数の自由度をまとめて定義できないため、DOF_idS と DOF_idE は同一番号でなければならない。
TYPE が INITIAL の場合、AMP が無効になる。

(4) !COUPLE (5-4)

連成面の定義 （連成解析でのみ使用）

パラメータ

TYPE = 1 ：片方向連成（FrontISTR はデータ受信から開始）
2 ：片方向連成（FrontISTR はデータ送信から開始）
3 ：Staggered 双方向連成（FrontISTR はデータ受信から開始）
4 ：Staggered 双方向連成（FrontISTR はデータ送信から開始）
5 ：分離反復双方向連成（FrontISTR はデータ受信から開始）
6 ：分離反復双方向連成（FrontISTR はデータ送信から開始）

ISTEP = ステップ数
解析初期からここで指定したステップ数まで流体力を 0 倍から 1 倍まで線形関数を乗じて増大させ、それ以降は入力流体力をそのまま適用する

WINDOW = >0 ：流体力にウィンドウ関数(*)を乗じて適用

(*) $\frac{1}{2}\left(1-\cos\frac{2\pi i}{N}\right)$,（$i$: 現ステップ、$N$: 現在の解析の総ステップ数）

2 行目以降

（2 行目） COUPLING_SURFACE_ID

変数名	属 性	内 容
SURFACE_ID	C	面グループ名

使用例

```
!COUPLE , TYPE=1
SCOUPLE1
SCOUPLE2
```

(5) !EIGENREAD (5-5)

周波数応答解析に用いる固有値・固有モードの指定

パラメータ

なし

2 行目以降

（2 行目） eigenlog_filename

変数名	属 性	内 容
eigenlog_filename	C	固有値解析のログファイル名

（3 行目） start_mode, end_mode

変数名	属 性	内 容
start_mode	I	固有値解析に使用する指定モード始点
end_mode	I	固有値解析に使用する指定モード終点

使用例

```
!EIGENREAD
eigen_0.log
1, 5
```

(6) !FLOAD (5-6)

周波数応答解析用集中荷重の定義

パラメータ

LOAD CASE = （実部の指定:1, 虚部の指定:2）

2 行目以降

（2 行目） NODE_ID,DOF_id,Value

変数名	属 性	内 容
NODE_ID	I/C	節点番号または節点グループ名または面グループ名
DOF_id	I	自由度番号
Value	R	荷重値

使用例

```
!FLOAD, LOAD CASE=2
_PickedSet5, 2, 1.0
```

7.4.6　ソルバー制御データ

(1)　　!SOLVER　(6-1)

ソルバーの制御

必須の制御データ.

パラメータ

METHOD　=　解法（CG、BiCGSTAB、GMRES、GPBiCG、DIRECT、DIRECTmkl、MUMPS）

DIRECT：接触解析以外での直接法（逐次処理のみ）

DIRECTmkl：接触解析における Intel MKL による直接法（逐次処理のみ）

MUMPS：並列直接法パッケージ MUMPS による直接法

直接法を選択したとき、データ行は無視される。

1、2 自由度問題では、CG、DIRECT、MUMPS のみ有効

シェル要素は、DIRECT、MUMPS のみ有効

3 自由度用の反復法は OpenMP によるスレッド並列が利用可能

PRECOND　=　反復法の前処理手法（1、2、3、5、10、11、12）

1, 2：（Block）SSOR　（3 自由度用のみマルチカラーオーダリング付き）

3：（Block）Diagonal Scaling

5：　マルチグリッド前処理パッケージ ML による AMG（試験的）

10: Block ILU(0)

11: Block ILU(1)

12: Block ILU(2)

10、11、12 は 3 自由度問題でのみ利用可能

OpenMP によるスレッド並列時は SSOR または Diagonal Scaling を推奨

ITERLOG　=　反復法ソルバー収束履歴出力の有無（ YES/NO ）（デフォルト：NO）

TIMELOG　=　ソルバー計算時間出力の有無（ YES/NO ）（デフォルト：NO）

USEJAD　=　ベクトル機向けオーダリングの有無（ YES/NO ）（デフォルト：NO）

3 自由度問題で反復法使用時のみ有効

SCALING　=　行列の対角成分を 1 とするスケーリングの有無（ YES/NO ）（デフォルト：NO）

3 自由度問題で反復法使用時のみ有効

DUMPTYPE　=　行列ダンプ型式（NONE、MM、CSR、BSR）（主にデバッグ用）

NONE：ダンプしない（デフォルト）

MM：マトリックスマーケット型式

CSR：Compressed Sparse Row（CSR）型式

BSR：Blocked CSR 型式

DUMPEXIT　=　行列ダンプ直後のプログラム終了（ YES/NO ）（デフォルト：NO）

MPCMETHOD　=　多点拘束条件の処理手法（1、2、3）

1：　ペナルティ法

2： MPC-CG 法

3： 陽的自由度消去法（デフォルト）

3 自由度問題で反復法使用時のみ有効

（直接法および反復法（１，２自由度）では常にペナルティ法、反復法（4，6自由度）では常に MPC-CG 法が採用される）

ESTCOND = 条件数推定の頻度（試験的）

指定された反復ごと、および、反復終了時に条件数推定を実施

0 の場合は推定を行わない

2 行目以降

（2 行目）NIER, iterPREmax, NREST, NCOLOR_IN

変数名	属 性	内 容
NIER	I	反復回数 （デフォルト：100）
iterPREmax	I	Additive Schwarz による前処理の繰り返し数 （デフォルト：1） （推奨値は、逐次計算、前処理に対角スケーリングを用いる場合、および、MPC を含むモデルの計算では 1、その他の並列計算では 2）
NREST	I	クリロフ部分空間数（デフォルト：10） （解法として GMRES を選択したときのみ有効）
NCOLOR_IN	I	マルチカラーオーダリングにおける目標色数（デフォルト：10） （OpenMP のスレッド数が 2 以上の時のみ有効）

（3 行目）RESID, SIGMA_DIAG, SIGMA

変数名	属 性	内 容
RESID	R	打ち切り誤差 （デフォルト値：1.0e-8）
SIGMA_DIAG	R	前処理行列計算時に対角成分にかける倍率（デフォルト値： 1.0）
SIGMA	R	未使用（デフォルト値： 0.0）

使用例

```
!SOLVER, METHOD=CG, PRECOND=1, ITERLOG=YES, TIMELOG=YES
10000, 2
1.0e-8, 1.0, 0.0
```

7.4.7　ポスト処理（可視化）制御データ

(1)　　!VISUAL（P1-0）

可視化手法を指定する。

METHOD　=　PSR　：サーフェスレンダリング

visual_start_step　：可視化処理を始めるタイムステップ番号の指定（デフォルト：1）

visual_end_step　：可視化処理を終了するタイムステップ番号の指定（デフォルト：すべて）

visual_interval_step　：可視化処理を行うタイムステップ間隔の指定（デフォルト：1）

(2)　　!surface_num, !surface, !surface_style（P1-1～3）

!surface_num（P1-1）

1 つのサーフェスレンダリング内のサーフェス数

例：　図 7.4.1 は 4 つのサーフェスがあり、2 つは等値面で pressure=1000.0 と pressure=-1000.0、 2 つは平面の切り口で z= -1.0 と z=　1.0 である。

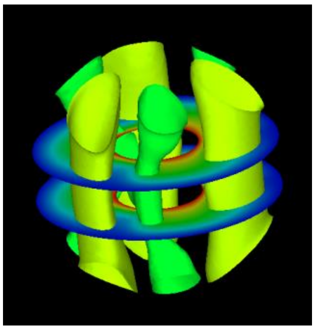


図 7.4.1　surface_num の設定例

!surface（P1-2）

サーフェスの内容を設定する。

例：　図 7.4.2 は 4 つのサーフェスがありその内容は以下の通りである。

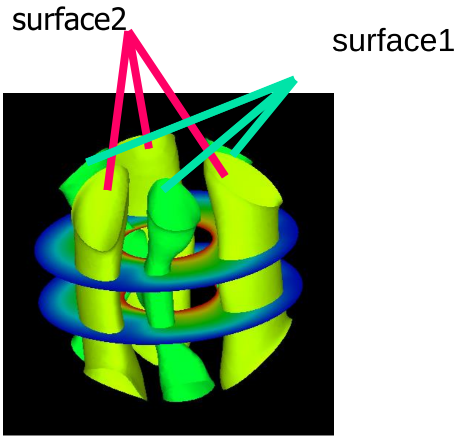


図 7.4.2　surface の設定例

```
!surface_num = 2
!SURFACE
!surface_style=2
!data_comp_name   =      press
!iso_value   =   1000.0
!display_method = 4
!specified_color = 0.45
!output_type    =   BMP
!SURFACE
!surface_style=2
!data_comp_name   =      press
!iso_value   =   -1000.0
!display_method = 4
!specified_color = 0.67
```

!surface_style（P1-3）

サーフェスのスタイルを指定する。

1: 境界面

2: 等値面

3: 任意の 2 次曲面

coef[1]x2 + coef[2]y2 + coef[3]z2 + coef[4]xy + coef[5]xz + coef[6]yz + coef[7]x + coef[8]y + coef[9]z + coef[10]=0

図 7.4.3　surface_style の設定例

(3)　　!display_method（P1-4）

表示方法（省略値： 1）

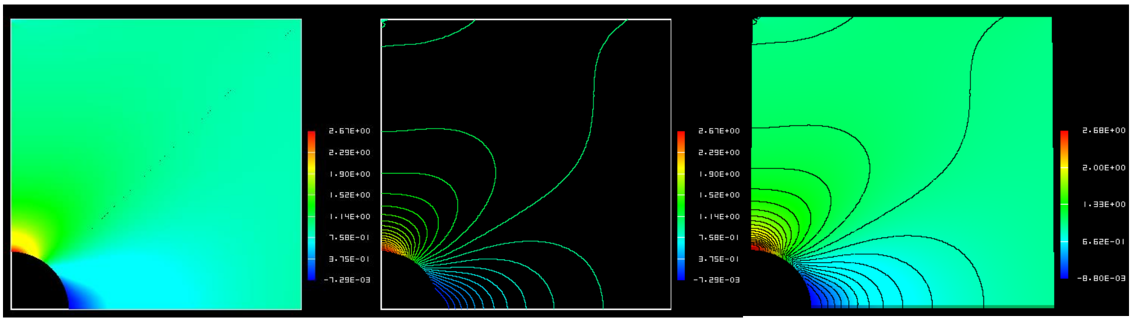
1.　色コードの表示

2. 境界線表示

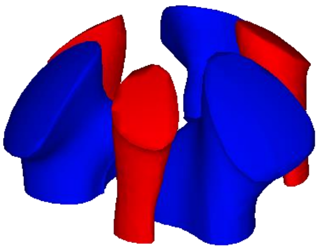
3. 色コード及び境界線表示

4. 指定色一色の表示

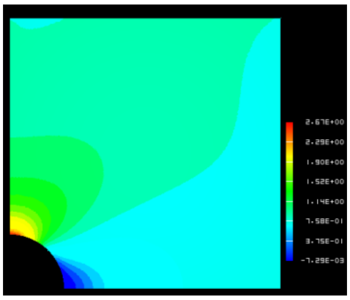
5. 色分けにによる等値線表示



!display_method=1　　　　!display_method=2　　　　!display_method=3



!display_method=4



!display_method=5

図 7.4.4　display_method の設定例

(4)　　!color_comp_name　!color_comp　!color_subcomp　（P1-5　P1-7　P1-8）

物理量からマラマップへの対応を指定する。必要な物理量やその自由度番号に名前をつける。これにより結果データの構造体 node_label(:)や nn_dof(:)に名前がはいる。

Then you can define which one you hope to map into color by

!color_comp_name (文字列、省略値：初めの変数)

例：　!color_comp_name = pressure

静解析では　=DISPLASEMENT：結果変位データの指定

=STRAIN　：ひずみデータの指定

=STRESS　：応力データの指定

伝熱解析では=TEMPERATURE： 結果温度データの指定

!color_comp (整数、省略値：0)

物理量の識別番号 (0 以上の整数)

例： !color_comp = 2

結果データ種別の識別番号指定と成分名ですが、未実装。

!color_subcomp (整数、省略値：1)

物理量がベクトル量のような自由度数 1 以上の時、その自由度番号

例： !color_subcomp = 0

!color_comp_name=DISPLACEMENT 指定の場合

1：X 成分　　2：Y 成分　　3：Z 成分

!color_comp_name=STRAIN 指定の場合

1：εx　　2：εy　　3：εz

4：εxy　　5：εyz　　6：εzx

!color_comp_name=STRESS 指定の場合

1：σx　　2：σy　　3：σz

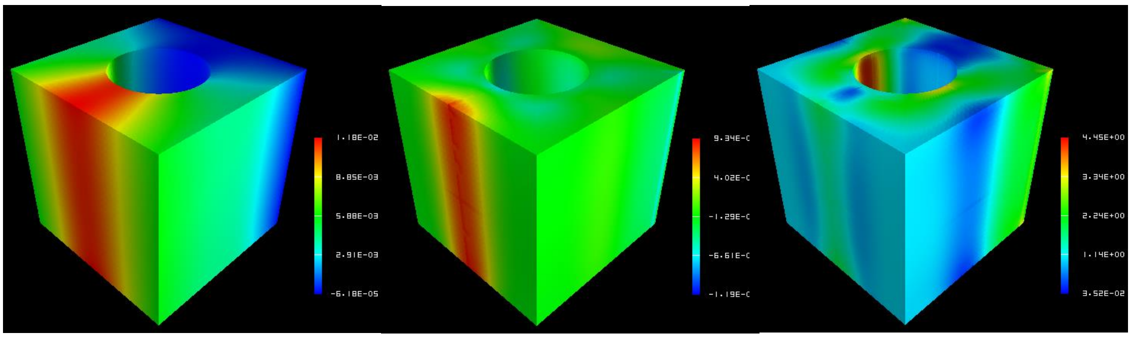
4：τxy　　5：τyz　　6：τzx

!color_comp_name=TEMPERATURE 指定の場合

1： 温度

構造解析において例えば

物理量	変位	ひずみ	応力
自由度数	3	6	7



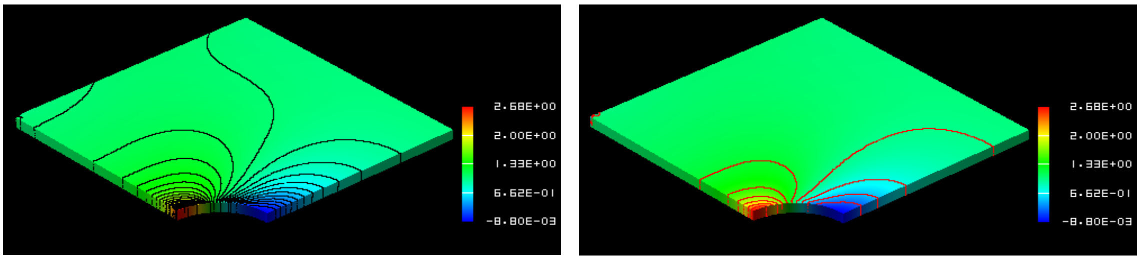
!color_comp_name=displacement　!color_comp_name=strain　!color_comp = 3

!color_subcomp = 1　!color_subcomp_name = 1　!color_subcomp = 7

図 7.4.5　color_comp, color_subcomp および color_comp_name の設定例

(5)　!isoline_number　!isoline_color（P1-9　P2-22）

display_method=2,3 または 5 の時



!isoline_number = 30

!isoline_color = 0.0, 0.0, 0.0

!isoline_number = 10

!isoline_color = 1.0, 0.0, 0.0

図 7.4.6　isoline_number と isoline_color の設定例

(6)　!initial_style　!deform_style　（P1-15　P1-16）

初期の形状、変形後の形状の表示スタイルを指定する。

0:　無

1:　実線メッシュ(指定がなければ青で表示)

2:　グレー塗りつぶし

3:　シェーディング

(物理属性をカラー対応させる)

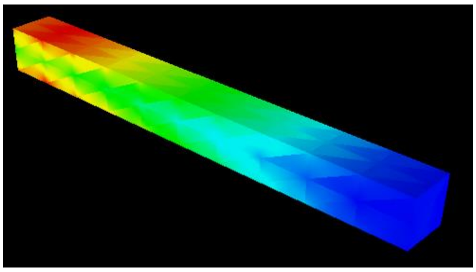
4: 点線メッシュ(指定がなければ青で表示)

(7)　!deform_scale　（P1-14）

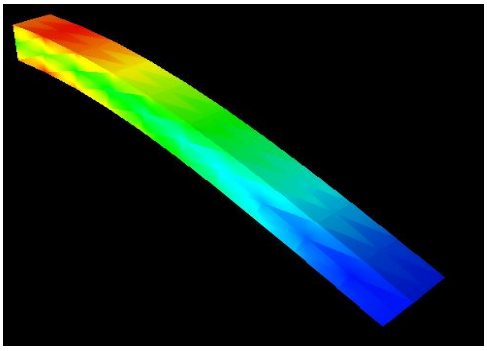
変形を表示する際の変位スケールを指定する。

Default:自動

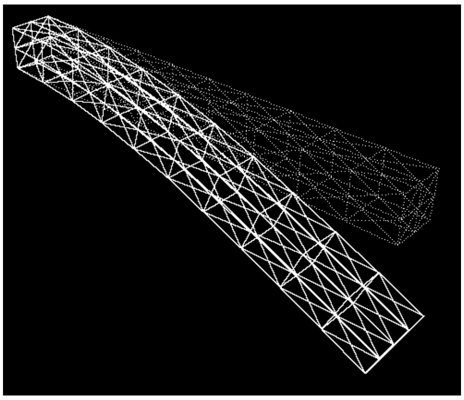
standard_scale = 0.1 * $\sqrt{x\_range^2 + y\_range^2 + z\_range^2}$ /max_deform



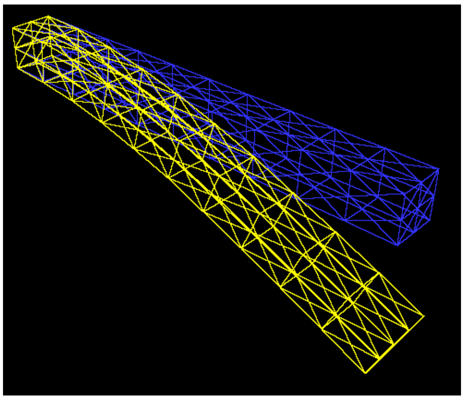
!initial_style=2
!deform_style = 0



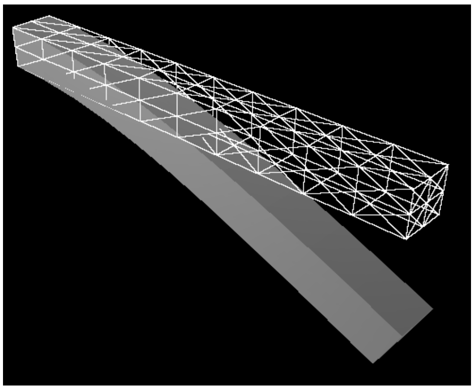
!initial_style=0
!deform_style = 2



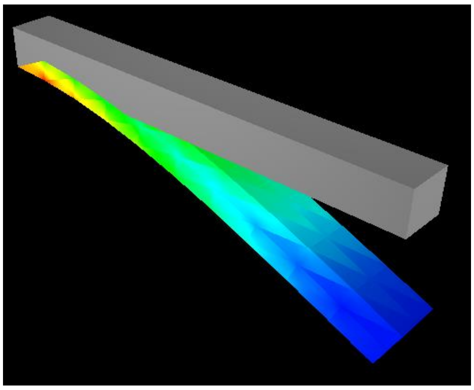
!initial_style=4
!deform_style = 1
!initial_line_color = 1.0, 1.0, 1.0



!initial_style=1
!deform_style = 1 **NASTRAN style**
!initial_line_color = default

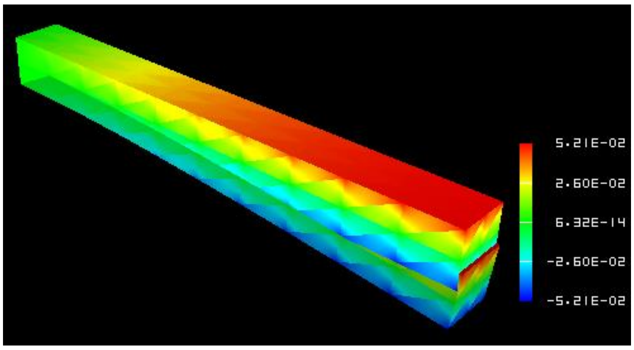


!initial_style=1
!deform_style = 2

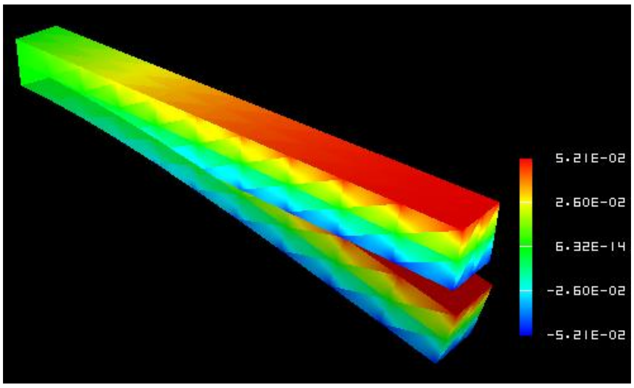


!initial_style=2
!deform_style = 3

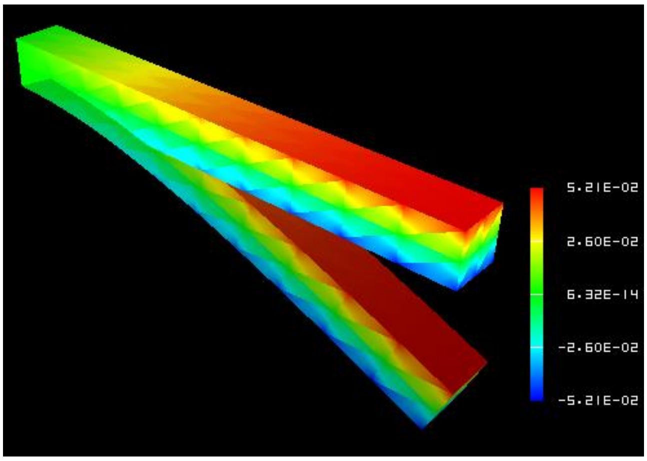
図 7.4.7 display styles の設定例



!deform_scale=1.0



!deform_scale=2.0



!deform_scale=4.0

図 7.4.8　deform_scale の設定例

(8)　!output_type（P1-19）

出力ファイルの型を指定する。　(省略値：　AVS)

AVS　：AVS 用 UCD データ（物体表面上のみ）

BMP　：イメージデータ（BMP フォーマット）

COMPLETE_AVS　：AVS 用 UCD データ

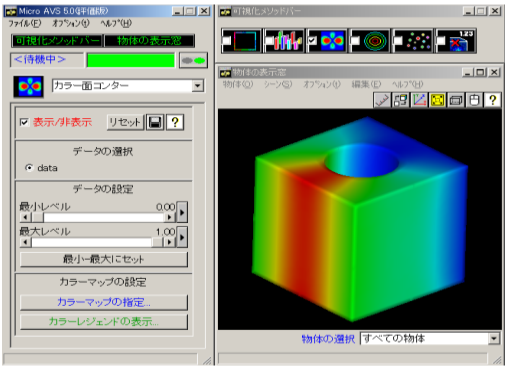
COMPLETE_REORDER_AVS　：AVS 用 UCD データで 節点・要素番号を並び替える

SEPARATE_COMPLETE_AVS　：分割領域ごとの AVS 用 UCD データ

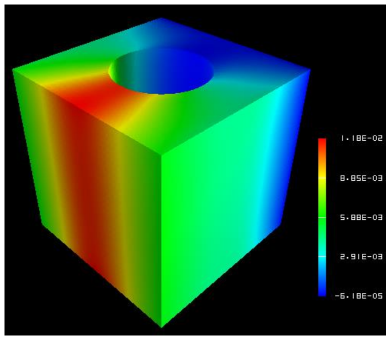
COMPLETE_MICROAVS　：AVS 用 UCD データで物理量をスカラーで出力する

BIN_COMPLETE_AVS　：COMPLETE_AVS をバイナリー形式で出力する

FSTR_FEMAP_NEUTRAL:　FEMAP 用ニュートラルファイル



!output_type = AVS

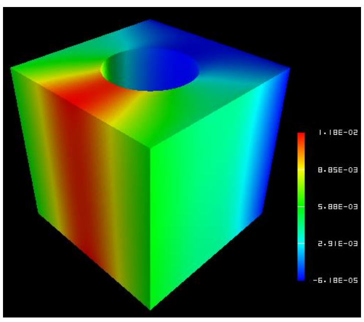


!output_type=BMP

図 7.4.9　output_type の例

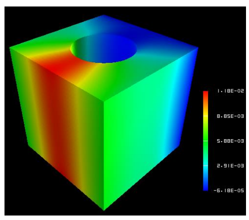
(9)　!x_resolution　!y_resolution（P2-1　P2-2）

output_type=BMP の時、解像度を指定する。



!x_resolution=500

!y_resolution=500



!x_resolution=300

!y_resolution=300

図 7.4.10　x_resolution と y_resolution の設定例

(10)　!viewpoint　!look_at_point　!up_direction（P2-5　P2-6　P2-7）

viewpoint:　視点の位置を座標で指定する。

省略値：　x = (xmin + xmax)/2.0,

y = ymin + 1.5 *(ymax – ymin),

z = zmin + 1.5 *(zmax – zmin)

look_at_point: 視線の位置を指定する。

(省略値：データの中心)

up_direction:　Viewpoint, look_at_point と up_direction にてビューフレームを指定する。

default: 0.0 0.0 1.0

View coordinate frame:

原点：　　　　look_at_point

z 軸：　　　viewpoint – look_at_point

x 軸：　　　up × z axis

y 軸：　　　z axis × x axis

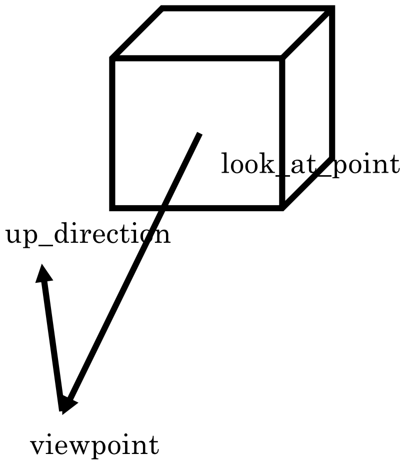
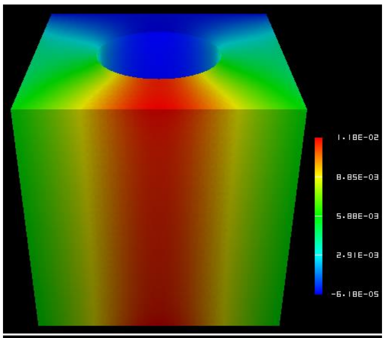
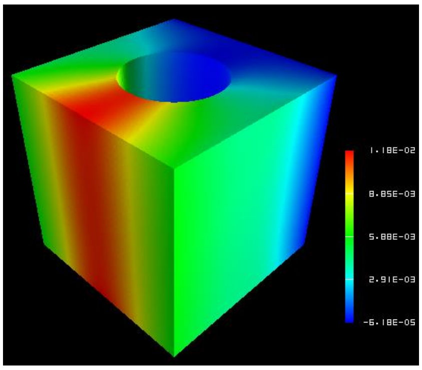


図 7.4.11　ビューフレームの決定法

!viewpoint= **300.0, 50.0**, 200.0

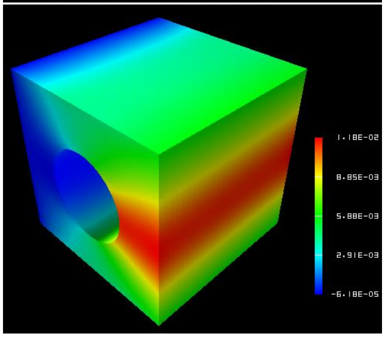
!up_direction=0.0, 0.0, 1.0





!viewpoint=200.0, 200.0,200.0

!up_direction=0.0, 0.0, 1.0



!viewpoint=200.0, 200.0, 200.0

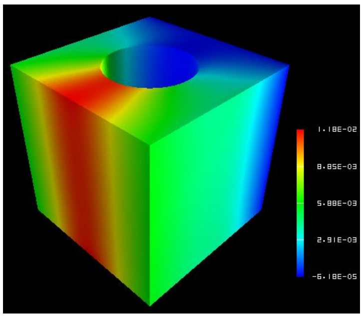
!up_direction=0.0, **1.0, 0.0**

図 7.4.12 !viewpoint, !look_at_point と up_direction の設定例

(11) !ambient_coef !diffuse_coef !specular_coef（P2-8 P2-9 P2-10）

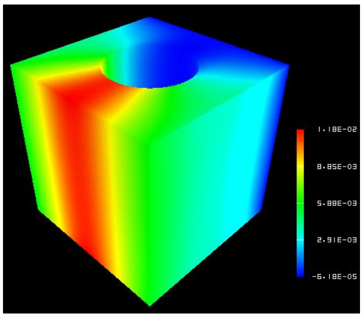
照明モデルの係数設定

ambient_coef,を増加すると 3 次元の奥行き方向の情報が損なわれる。



!ambient_coef = 0.3

!diffuse_coef = 0.7



!ambient_coef = 0.9

!diffuse_coef = 0.1

図 7.4.13 照明モデルパラメータの設定例

(12)　!color_mapping_bar_on !scale_marking_on !num_of_scales(P2-16 P2-17 P2-18)

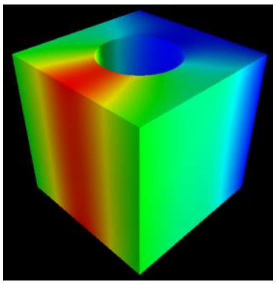
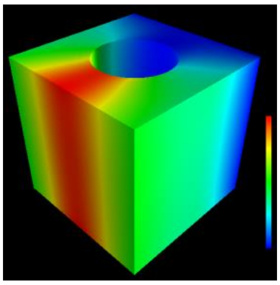
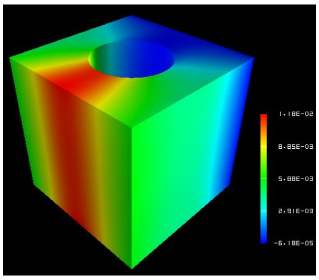
!color_mapping_bar_on:　color mapping bar の表示有無を指定する。

0: off　　1: on　　(省略値：0)

!scale_marking_on:　color mapping bar のメモリの有無を指定する

0: off　　1: on　　(省略値：　0)

!num_of_scales:　メモリの数を指定する。　(省略値：　3)

!color_mapping_bar_on=0
!scale_marking_on =0

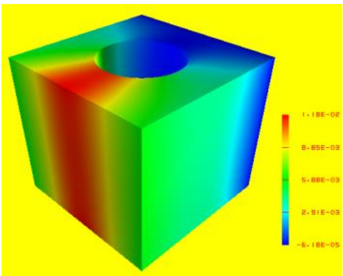
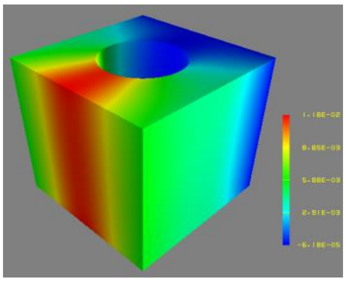
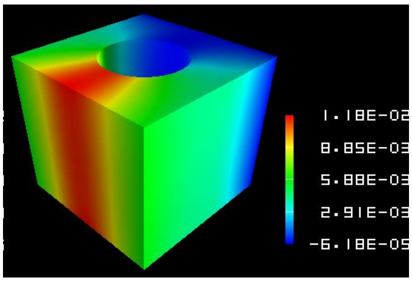
!color_mapping_bar_on =1
!scale_markig_on =0

!color_mapping_bar_on =1
!scale_marking_on=1
!num_of_scale = 5

図 7.4.14　color mapping bar の表示の例

(13)　!font_size !font_color !backgroud_color（P2-19　P2-20　P2-21）

背景色や文字フォントを指定する。

!background_color =1.0,1.0,0.0
!font_color=1.0, 0.0, 0.0
!font_size=1.5

!background_color =0.5, 0.5, 0.5
!font_color=1.0, 1.0, 0.0
!font_size =1.5

!background_color =0.0, 0.0,0.0
!font_color=1.0, 1.0, 1.0
!font_size=2.5

図 7.4.15　background と font の設定例

(14)　!data_comp_name　!data_comp　!data_subcomp（P3-1　P3-3　P3-4）

surface_style=2 の時、可視化する等値面の物理量を指定する。

!data_comp_name=pressure

!data_comp_name=vorticity
!data_subcomp=3

図 7.4.16　data_comp,data_subcomp 及び data_comp_name の設定例

(15)　!method（P4-1）

面との切り口を指定する際、その面の設定方法を指定する。

```
!surface_num =2
!surface
!surface_style = 3
!method=5
!coef=0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, -0.35
!color_comp_name = temperature
!surface
!surface_style = 3
!method=5
!coef=0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.35
!color_comp_name = temperature
```

図 7.4.17　method の設定例

これにより平面 z=0.35 と z=-0.35. の切り口が可視化される。

8. ユーザーサブルーチン

ユーザーが FrontISTR の機能をプログラミングにより拡張するためのインターフェースを提供すする。これらのインターフェースは、基本的にサブルーチンヘッダを含む FORTRAN サブルーチンで、入出力変数の記述とこれらの変数のための宣言文である。ルーチンの主要部は、ユーザーによって書かなければならない。

FrontISTR は以下のユーザサブルーチンインターフェースを提供している。

8.1 ユーザー定義材料の入力

ユーザー定義材料を使用する場合、最大 100 のユーザー定義材料定数が使用可能である。材料定数の入力は以下のように、制御データファイル内の 1 行 10 数値、最大 10 行まで入力可能である。

<u>2 行目～最大 10 行目</u>

v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10

……

8.2 弾塑性変形に関わるサブルーチン（uyield.f90）

弾塑性剛性マトリクスおよび応力の return mapping を計算するためのサブルーチンを提供している。ユーザー定義降伏関数を利用する場合、まず入力ファイルに!PLASTIC, TYPE=USER を設定して必要な材料定数を入力し､次にサブルーチン uElastoPlasticMatrix および uBackwardEuler を作成する必要がある。

（1）弾塑性剛性マトリクスの計算サブルーチン

```
subroutine uElastoPlasticMatrix( matl, stress, istat, fstat, D )
    REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)   :: matl(:)
    REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)   :: stress(6)
    INTEGER, INTENT(IN)            :: istat
    REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)   :: fstat(:)
    REAL(KIND=kreal), INTENT(OUT) :: D(:,:)
```

matl:　材料定数を保存する配列（最大 100）

stress: 2nd Piola-Kirchhoff 応力

istat:　降伏状態(0: 未降伏； 1: 降伏した)

fstat: 状態変数.　fstat(1)=塑性ひずみ、fstat(2:7)= back stress(移動または複合硬化時)

D: 弾塑性マトリクス

（２）応力の Return mapping 計算サブルーチン

```
subroutine uBackwardEuler ( matl, stress, istat, fstat )
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)          :: matl(:)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(INOUT)   :: stress(6)
      INTEGER, INTENT(INOUT)                   :: istat
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)           :: fstat(:)
```

matl: 材料定数を保存する配列（最大 100）

stress: trial stress 弾性変形を仮定し得られた 2nd Piola-Kirchhoff 応力

istat:　降伏状態(0: 未降伏；　1: 降伏した)

fstat: 状態変数.　fstat(1)=塑性ひずみ、fstat(2:7)= back stress(移動または複合硬化時)

8.3　弾性変形に関わるサブルーチン（uelastic.f90）

弾性および超弾性問題の弾性剛性マトリクスおよび応力の更新計算をするためのサブルーチンを提供している。ユーザー弾性または超弾性構成式を利用する場合、まず入力ファイルに!ELASTIC, TYPE=USER または!HYPERELASTIC, TYPE=USER を設定して必要な材料定数を入力し、次にサブルーチン uElasticMatrix および uElasticUpdate を作成する必要がある。

（１）弾性剛性マトリクスの計算サブルーチン

```
subroutine uElasticMatrix( matl, strain, D )
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)       :: matl(:)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)       :: strain(6)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(OUT)    :: D(6,6)
```

matl: 材料定数を保存する配列（最大 100）

strain: Green-Lagrange ひずみ

D: 弾性マトリクス

（２）応力の計算サブルーチン

```
subroutine uElasticUpdate ( matl, strain, stress )
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)       :: matl(:)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)       :: strain(6)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(OUT)    :: stress(6)
```

matl: 材料定数を保存する配列（最大 100）

strain: Green-Lagrange ひずみ

stress:　応力

8.4　ユーザー定義材料に関わるサブルーチン（umat.f）

弾性、超弾性、弾塑性材に拘らず一般的な材料の変形解析のインターフェースを提供する。

（１）剛性マトリクスの計算サブルーチン

```
subroutine uMatlMatrix( mname, matl, ftn, stress, fstat, D, temperature, dtime )
      CHARACTER(len=*), INTENT(IN)      :: mname
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)      :: matl(:)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)      :: ftn(3,3)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)      :: stress(6)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)      :: fstat(:)
      REAL(KIND=kreal), INTENT(OUT)     :: D(:,:)
      REAL(KIND=kreal), optional        :: temperature
      REAL(KIND=kreal), optional        :: dtime
```

mname: 材料名

matl: 材料定数を保存する配列（最大 100）

ftn: 変形勾配テンソル

stress: 2nd Piola-Kirchhoff 応力

fstat: 状態変数

D: 構成式

temperature: 温度

dtime: 時間増分

（２）ひずみおよび応力の更新計算サブルーチン

```
subroutine uUpdate( mname, matl, ftn, strain, stress, fstat, temperature, dtime )
      character(len=*), intent(in)        :: mname
      real(KIND=kreal), intent(in)        :: matl
      real(kind=kreal), intent(in)        :: ftn(3,3)
      real(kind=kreal), intent(inout)     :: strain(6)
      real(kind=kreal), intent(inout)     :: stress(6)
      real(kind=kreal), intent(inout)     :: fstat(:)
      real(KIND=kreal), optional          :: temperature
      real(KIND=kreal), optional          :: dtime
```

mname: 材料名

matl: 材料定数を保存する配列（最大 100）

ftn: 変形勾配テンソル

strain: ひずみ

stress: 2nd Piola-Kirchhoff 応力

fstat：状態変数

temperature：　温度

dtime：時間増分

8.5　ユーザー定義外部荷重の処理サブルーチン（uload.f）

ユーザー定義外部荷重を処理するインターフェースを提供する。

ユーザー定義外部荷重を利用するため、まず外部荷重を定義するための数値構造 tULoad を定義し、入力ファイルの!ULOAD を利用してその定義を読み込む。その後、以下のインターフェースを利用して、外部荷重を組み込む。

（１）外部荷重の読み込みサブルーチン

```
integer function ureadload( fname )
      character(len=*), intent(in)      :: fname
```

fname：外部ファイル名。このファイルからユーザー定義外部荷重を読み込む。

（２）外部荷重を全体荷重ベクトルへ組み込むサブルーチン

```
subroutine uloading( cstep, factor, exForce )
      integer, INTENT(IN)                   :: cstep
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)          :: factor
      REAL(KIND=kreal), INTENT(INOUT) :: exForce(:)
```

cstep：現時点の解析ステップ数

factor：現ステップの荷重係数

exForce：全体荷重ベクトル

（３）残差応力の計算サブルーチン

```
subroutine uResidual( cstep, factor, residual )
      integer, INTENT(IN)                   :: cstep
      REAL(KIND=kreal), INTENT(IN)          :: factor
      REAL(KIND=kreal), INTENT(INOUT) :: residual(:)
```

cstep：現時点の解析ステップ数

factor：現ステップの荷重係数

residual：全体残差力ベクトル

9. 例題検証

9.1 単純形状モデルによる検証

(1) 弾性静解析

本検証においては、片持ち梁を図 9.1.1 のようにメッシュ分割したものを対象とした。検証条件については図 9.1.2 に示す荷重条件を変えた exA～exG の 7 条件について解析を行った。なお、exG は、exA とは荷重条件は同じで、直接法ソルバーを使用した場合の検証ケースである。

表 9.1.1～表 9.1.7 にケース別検証結果を示す。

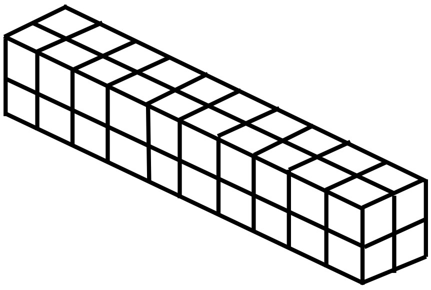
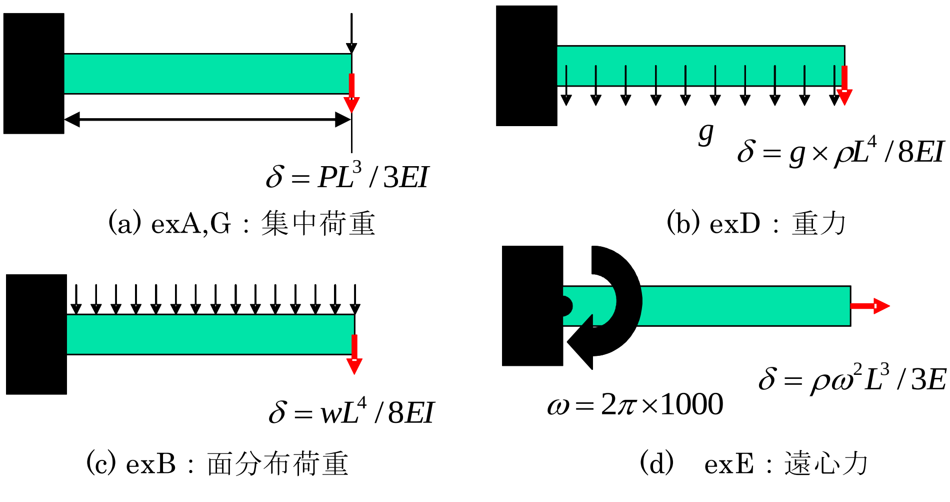
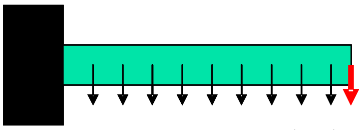


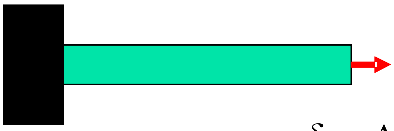
図 9.1.1　片持ち梁のメッシュ分割例（六面体要素）





$\delta = (\rho g) \times L^4 / 8EI$

(e) exC：体積荷重



(f)　exF：熱荷重

ヤング率：E = 4000.0 kgf/mm^2

ポアソン比：ν　= 0.3

質量密度：ρ =8.0102x10^{-10} kgs^2/mm^4

重力加速度：g = 9800.0 mm/s^2

長さ：L = 10.0 mm

断面積：A = 1.0 mm^2

断面二次モーメント：I = 1.0/12.0mm^4

線熱膨張率：α　= 1.0x10^{-5}

図 9.1.2　片持ち梁モデルの検証条件

表 9.1.1　exA：集中荷重問題の検証結果

ケース名	要素数	予測値：δ max= -1.000			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
A231	40	-0.338	-0.371	-0.371	33 節点／平面応力問題
A232	40	-0.942	-1.002	-1.002	105 節点／平面応力問題
A241	20	-0.720	-0.711	-0.711	33 節点／平面応力問題
A242	20	-0.910	-1.002	-1.002	85 節点／平面応力問題
A341	240	-0.384	-0.384	-0.386	99 節点
A342	240	-0.990	-0.990	-0.999	525 節点
A351	80	-0.353	-0.355	-0.351	99 節点
A352	80	-0.993	-0.993	-0.992	381 節点
A361	40	-0.954	-0.985	-0.984	99 節点
A362	40	-0.994	-0.993	-0.993	330 節点
A731	40	-	-	-0.991	33 節点／直接法
A741	20	-	-	-0.996	33 節点／直接法

表 9.1.2　exB：面分布荷重問題の検証結果

ケース名	要素数	予測値：δmax=-3.750			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
B231	40	-1.281	-1.403	-1.403	33 節点／平面応力問題
B232	40	-3.579	-3.763	-3.763	105 節点／平面応力問題
B241	20	-3.198	-2.680	-2.680	33 節点／平面応力問題
B242	20	-3.426	-3.765	-3.765	85 節点／平面応力問題
B341	240	-1.088	-1.449	-1.454	99 節点
B342	240	-3.704	-3.704	-3.748	525 節点
B351	80	-3.547	-1.338	-1.325	99 節点
B352	80	-.3717	-3.716	-3.713	381 節点
B361	40	-3.557	-3.691	-3.688	99 節点
B362	40	-3.726	-3.717	-3.717	330 節点
B731	40	-	-	-3.722	33 節点／直接法
B741	20	-	-	-3.743	33 節点／直接法

表 9.1.3　exC：体積荷重問題の検証結果

ケース名	要素数	予測値：δmax= -2.944e-5			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
C231	40	–	-1.101e-5	-1.101e-5	33 節点／平面応力問題
C232	40	-	-2.951e-5	-2.951e-5	105 節点／平面応力問題
C241	20	-	-2.102e-5	-2.102e-5	33 節点／平面応力問題
C242	20	-	-2.953e-5	-2.953e-5	85 節点／平面応力問題
C341	240	-	-1.136e-5	-1.140e-5	99 節点
C342	240	-	-2.905e-5	-2.937e-5	525 節点
C351	80	-	-1.050e-5	-1.039e-5	99 節点
C352	80	-	-2.914e-5	-2.911e-5	381 節点
C361	40	-	-2.895e-5	-2.893e-5	99 節点
C362	40	-	-2.915e-5	-2.915e-5	330 節点
C731	40	-	-	-2.922e-5	33 節点／直接法
C741	20	-	-	-2.938e-5	33 節点／直接法

表 9.1.4　exD：重力問題の検証結果

ケース名	要素数	予測値：δmax= -2.944e-5			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
D231	40	-1.101e-5	-1.101e-5	-1.101e-5	33 節点／平面応力問題
D232	40	-2.805e-5	-2.951e-5	-2.951e-5	105 節点／平面応力問題
D241	20	-2.508e-5	-2.102e-5	-2.102e-5	33 節点／平面応力問題
D242	20	-2.684e-5	-2.953e-5	-2.953e-5	85 節点／平面応力問題
D341	240	-1.172e-5	-1.136e-5	-1.140e-5	99 節点
D342	240	-2.906e-5	-2.905e-5	-2.937e-5	525 節点
D351	80	-1.046e-5	-1.050e-5	-1.039e-5	99 節点
D352	80	-2.917e-5	-2.914e-5	-2.911e-5	381 節点
D361	40	-2.800e-5	-2.895e-5	-2.893e-5	99 節点
D362	40	-2.919e-5	-2.915e-5	-2.915e-5	330 節点
D731	40	-	-	-2.922e-5	33 節点／直接法
D741	20	-	-	-2.938e-5	33 節点／直接法

表 9.1.5　exE：遠心力問題の検証結果

ケース名	要素数	予測値：δmax= 2.635e-3			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
E231	40	2.410e-3	2.616e-3	2.650e-3	33 節点／平面応力問題
E232	40	2.447e-3	2.627e-3	2.628e-3	105 節点／平面応力問題
E241	20	2.386e-3	2.622e-3	2.624e-3	33 節点／平面応力問題
E242	20	2.387e-3	2.627e-3	2.629e-3	85 節点／平面応力問題
E341	240	2.708e-3	2.579e-3	2.625e-3	99 節点
E342	240	2.639e-3	2.614e-3	2.638e-3	525 節点
E351	80	2.642e-3	2.598e-3	2.625e-3	99 節点
E352	80	2.664e-3	2.617e-3	2.616e-3	381 節点
E361	40	2.611e-3	2.603e-3	2.603e-3	99 節点
E362	40	2.623e-3	2.616e-3	2.616e-3	330 節点
E731	40	-	-	2.619e-3	33 節点／直接法
E741	20	-	-	2.622e-3	33 節点／直接法

表 9.1.6　exF：熱応力荷重問題の検証結果

ケース名	要素数	予測値：δmax= 1.000e-2			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
F231	40	-	1.016e-2	1.007e-2	33 節点／平面応力問題
F232	40	-	1.007e-2	1.007e-2	105 節点／平面応力問題
F241	20	-	1.010e-2	1.010e-2	33 節点／平面応力問題
F242	20	-	1.006e-2	1.006e-2	85 節点／平面応力問題
F341	240	-	1.047e-2	1.083e-2	99 節点
F342	240	-	1.018e-2	1.022e-2	525 節点
F351	80	-	1.031e-2	1.062e-2	99 節点
F352	80	-	1.015e-2	1.017e-2	381 節点
F361	40	-	1.026e-2	1.026e-2	99 節点
F362	40	-	1.016e-2	1.016e-2	330 節点

表 9.1.7　exG：直接法の検証結果（集中荷重問題）

ケース名	要素数	予測値：δmax=-1.000			備考
		NASTRAN	ABAQUS	FrontISTR	
G231	40	-0.338	-0.371	-0.371	33 節点／平面応力問題
G232	40	-0.942	-1.002	-1.002	105 節点／平面応力問題
G241	20	-0.720	-0.711	-0.711	33 節点／平面応力問題
G242	20	-0.910	-1.002	-1.002	85 節点／平面応力問題
G341	240	-0.384	-0.384	-0.386	99 節点
G342	240	-0.990	-0.990	-0.999	525 節点
G351	80	-0.353	-0.355	-0.351	99 節点
G352	80	-0.993	-0.993	-0.992	381 節点
G361	40	-0.954	-0.985	-0.984	99 節点
G362	40	-0.994	-0.993	-0.993	330 節点
G731	40	-	-	-0.991	33 節点
G741	20	-	-	-0.996	33 節点

(2)　非線形静解析

(2-1)　exnl1: 幾何学非線形解析

検証ケース exI の検証モデルは検証ケース exA～G のモデルと同一のものである。図 9.1.3 に検証モデルの概念図を示す。このモデルについて幾何学的非線形解析を実施する。また、検証結果を表 9.1.8 に示す。

非線形計算は、最終荷重 1.0P に対して、荷重増分値 0.1P, 10 ステップとする。

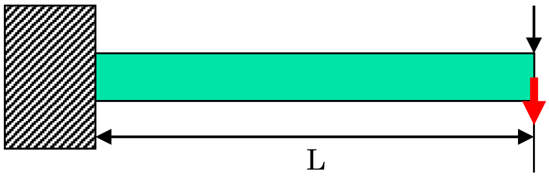


図 9.1.3　検証モデル

表 9.1.8　exI：検証結果（最大たわみ量履歴）

ケース名	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	線形解
I231	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I232	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I241	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I242	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I341	0.039	0.077	0.116	0.154	0.193	0.232	0.270	0.309	0.348	0.386	0.386
I342	0.099	0.200	0.300	0.400	0.499	0.599	0.698	0.797	0.896	0.995	0.999
I351	0.035	0.070	0.105	0.141	0.176	0.211	0.246	0.281	0.316	0.351	0.351
I352	0.099	0.198	0.298	0.397	0.496	0.595	0.693	0.792	0.890	0.987	0.992
I361	0.070	0.139	0.209	0.278	0.348	0.417	0.487	0.556	0.625	0.694	0.984
I362	0.099	0.197	0.298	0.397	0.496	0.595	0.694	0.793	0.891	0.988	0.993

(2-2)　exnl2: 弾塑性変形解析

本検証問題は National Agency for Finite Element Methods and Standards (U.K.): Test NL1 from NAFEMS を参考し､幾何学的非線形および複数の硬化則を取り入れ弾塑性変形解析を行った。図 9.1.4 に解析モデルを示す。

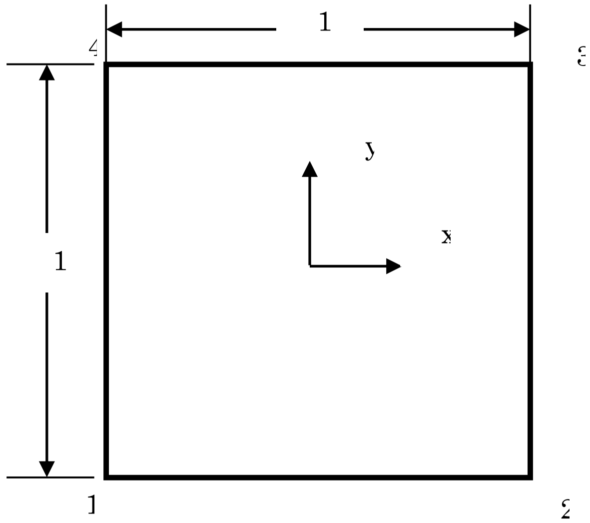


図 9.1.4　弾塑性変形解析モデル

（１）検証条件：

材料：Mises 弾塑性材

縦弾性係数	E	250	GPa
ポアソン比	ν	0.25	
初期降伏応力		5	MPa
初期降伏ひずみ		0.25×10^{-4}	
等方硬化係数 H_i		0 または 62.5 GPa	

（２）境界条件

ステップ１： 節点 2 と 3 に強制変位 $u_x = 0.2500031251 * 10^{-4}$

ステップ２： 節点 2 と 3 に強制変位 $u_x = 0.25000937518 * 10^{-4}$

ステップ３： 節点 3 と 4 に強制変位 $u_y = 0.2500031251 * 10^{-4}$

ステップ４： 節点 3 と 4 に強制変位 $u_y = 0.25000937518 * 10^{-4}$

ステップ５： 節点 2 と 3 に強制変位 $u_x = -0.25000937518 * 10^{-4}$

ステップ６： 節点 2 と 3 に強制変位 $u_x = -0.2500031251 * 10^{-4}$

ステップ７： 節点 3 と 4 に強制変位 $u_y = -0.25000937518 * 10^{-4}$

ステップ８： 節点 3 と 4 に強制変位 $u_y = -0.2500031251 * 10^{-4}$

ここで示していない節点はすべて完全拘束される。

この問題の理論解は以下のとおりである

ひずみ（×10^{-4}）			相当応力(MPa)	
ε_x	ε_y	ε_z	H_i =0 H_k =0	H_i =62.5 H_k =0
0.25	0	0	5.0	5.0
0.50	0	0	5.0	5.862
0.50	0.25	0	5.0	5.482
0.50	0.50	0	5.0	6.362
0.25	0.50	0	5.0	6.640
0	0.50	0	5.0	7.322
0	0.25	0	3.917	4.230
0	0	0	5.0	5.673

これに対して、計算結果は以下のとおりである。

ひずみ（×10^{-4}）			相当応力(MPa)	
ε_x	ε_y	ε_z	H_i =0 H_k =0	H_i =62.5 H_k =0
0.25	0	0	5.0(0.0%)	5.0(0.0%)
0.50	0	0	5.0(0.0%)	5.862(0.0%)
0.50	0.25	0	5.0(0.0%)	5.482(0.0%)
0.50	0.50	0	5.0(0.0%)	6.362(-0.05%)
0.25	0.50	0	5.0(0.0%)	6.640(-0.21%)
0	0.50	0	5.0(0.0%)	7.322(-0.34%)
0	0.25	0	3.824(-2.4%)	4.230(-2.70%)
0	0	0	5.0(0.0%)	5.673(-2.50%)

(2-3)　接触解析(1)

本検証問題は National Agency for Finite Element Methods and Standards (U.K.): 接触パーチテスト問題 CGS-4 を参考し、摩擦ありの有限すべり接触問題機能をテストするものである。図 9.1.5 に解析モデルを示す。

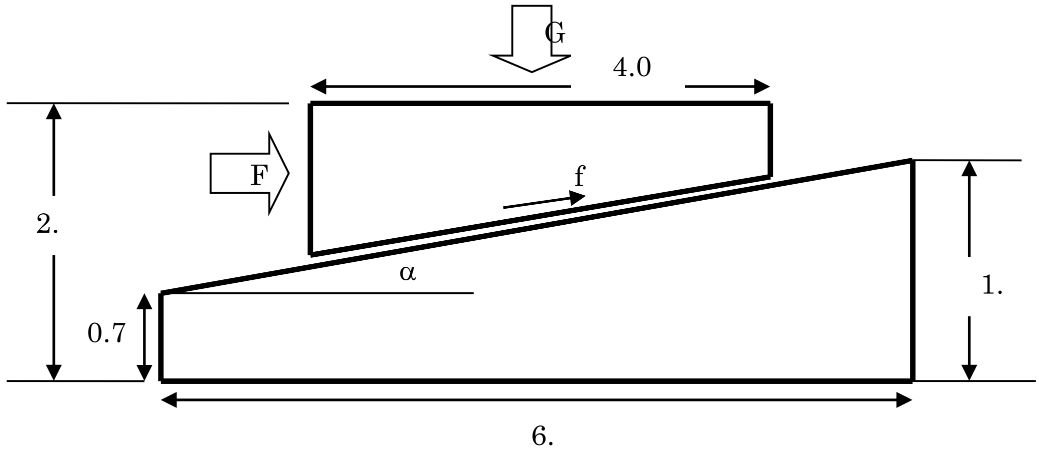


図 9.1.5　接触解析モデル

この問題の釣り合い条件は以下のとおりである。

$$F\cos\alpha - G\sin\alpha = \pm f_c$$

粘着摩擦段階では摩擦力は$f_c = E_t \Delta u$であり、すべり摩擦段階では$f_c = \mu(G\cos\alpha + F\sin\alpha)$となる。

計算結果と解析解との比較は以下のとおりである。

μ	F/G 解析解	F/G 計算結果
0.0	0.1	0.1
0.1	0.202	0.202
0.2	0.306	0.306
0.3	0.412	0.412

(2-4)　接触解析(2)　：ヘルツの接触問題

本検証では無限長さ円柱と無限平面のヘルツ接触問題を解析した。

円柱の半径を R=8mm とし、変形体のヤング率 E 及びポアソン μ比はそれぞれ 1100Mpa と 0.0 である。また、接触面積は円柱の半径と比べ十分小さいと仮定し、問題の対称性も考慮して、円柱の四分の一モデルにより解析を行った。

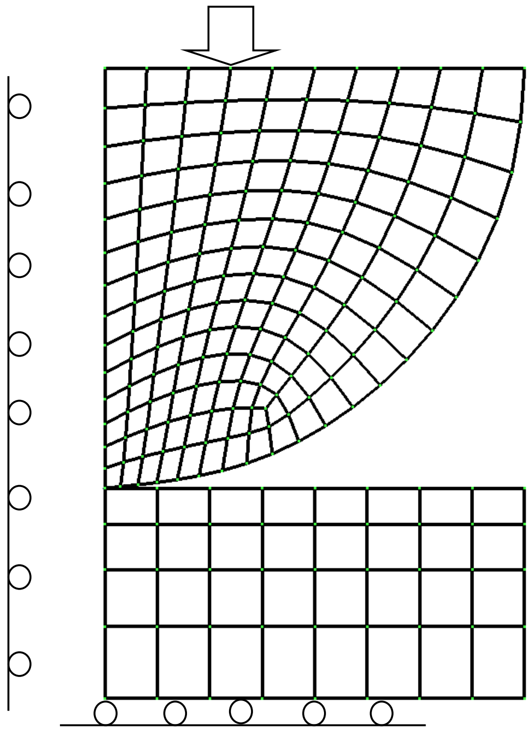


図 9.1.6 ヘルツ接触問題解析モデル

（1）接触半径の検証結果

接触半径を計算する理論式は以下のとおりである。

$$a = \sqrt{\frac{4FR}{\pi E^*}}$$

ここで、$E^* = E/2(1-\mu^2)$ である。本計算では圧力 F=100 の時、接触半径 a=1.36 となる。

図 9.1.7 では接触点の等価節点力を示している。この節点力分布を外挿して、接触半径が得られる。

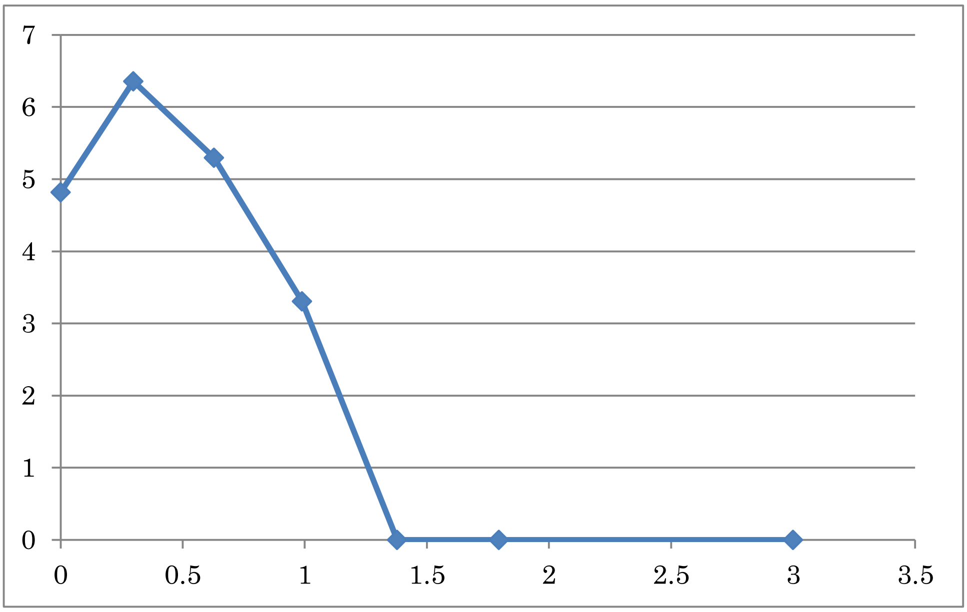


図 9.1.7　接触点の等価節点力分布

（２）最大せん断応力の検証結果

理論解では、接触位置 $z = 0.78a$ において最大せん断応力が $\tau_{max} = 0.30\sqrt{\frac{FE^*}{\pi R}}$ である。本計算条件では $\tau_{max} = 14.2$ となる。これに対して、$\tau_{max} = 15.6$ の計算結果が得られた。

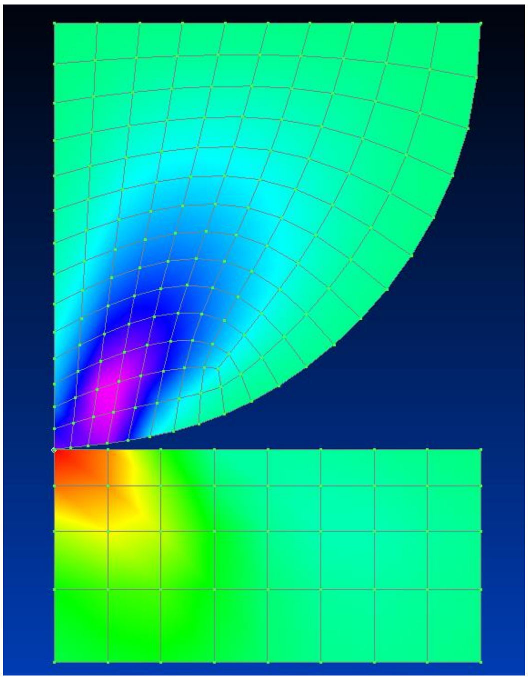


図 9.1.8　せん断応力分布（最大値=15.6）

(3)　　固有値解析

検証ケース exJ～K の検証モデルは検証ケース exA～G のモデルと同一のものである。図 9.1.9 に検証モデルの概念図を示す。このモデルについて固有値解析を実施する。求める固有値は 1 次～3 次固有値とする。なお、exJ では反復法ソルバーを、exK では直接法ソルバーを使用するものとする。また、検証結果を表 9.1.9～表 9.1.12 に示す。

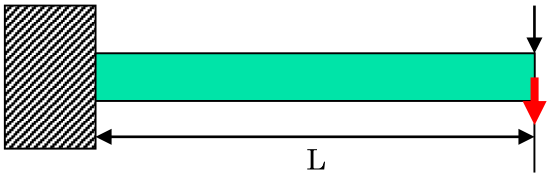


図 9.1.9　検証モデル

片持ち梁の振動固有値は次式で求まる。

第 1 次　：
$$n_1 = \frac{(1.875)^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{gEI}{\omega}} \tag{9.1}$$

第 2 次　：
$$n_2 = \frac{(4.694)^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{gEI}{\omega}} \tag{9.2}$$

第 3 次　：
$$n_3 = \frac{(7.855)^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{gEI}{\omega}} \tag{9.3}$$

検証モデルの特性値は

$$\begin{aligned}
&l = 10.mm \\
&E = 4000.kgf/mm^2 \\
&I = 1./12.mm^4 \\
&\omega = 7.85x10^{-6}kgf/mm^3 \\
&g = 9800.mm/\sec^2
\end{aligned} \tag{9.4}$$

である。従って 3 次までの固有値は次のとおりである。

n_1 = 3.609e3
n_2 = 2.262e4
n_3 = 6.335e4

表 9.1.9 exJ：反復法での検証結果（１次固有値）

ケース名	要素数	予測値：n1=3.609e3		備考
		NASTRAN	FrontISTR	
J231	40	5.861e3	5.861e3	33 節点／平面応力問題
J232	40	3.596e3	3.593e3	105 節点／平面応力問題
J241	20	3.586e3	4.245e3	33 節点／平面応力問題
J242	20	3.590e3	3.587e3	85 節点／平面応力問題
J341	240	5.442e3	5.429e3	99 節点
J342	240	3.621e3	3.595e3	525 節点
J351	80	3.695e3	4.298e3	99 節点
J352	80	3.610e3	3.609e3	381 節点
J361	40	3.679e3	3.619e3	99 節点
J362	40	3.611e3	3.606e3	330 節点

表 9.1.10 exJ：反復法での検証結果（２次固有値）

ケース名	要素数	予測値：n1=2.262e4		備考
		NASTRAN	FrontISTR	
J231	40	3.350e4	3.351e4	33 節点／平面応力問題
J232	40	2.163e4	2.156e4	105 節点／平面応力問題
J241	20	2.149e4	2.516e4	33 節点／平面応力問題
J242	20	2.149e4	2.143e4	85 節点／平面応力問題
J341	240	3.145e4	3.138e4	99 節点
J342	240	2.171e4	2.155e4	525 節点
J351	80	2.208e4	2.546e4	99 節点
J352	80	2.156e4	2.149e4	381 節点
J361	40	2.202e4	2.168e4	99 節点
J362	40	2.154e4	2.144e4	330 節点

注）三次元モデルでは１次と２次が重根となるので、表中の２次の値には、３次の計算値を記述している。

表 9.1.11　exK：直接法での検証結果（１次固有値）

ケース名	要素数	予測値：n1=3.609e3		備考
		NASTRAN	FrontISTR	
J231	40	5.861e3	5.861e3	33 節点／平面応力問題
J232	40	3.596e3	3.593e3	105 節点／平面応力問題
J241	20	3.586e3	4.245e3	33 節点／平面応力問題
J242	20	3.590e3	3.587e3	85 節点／平面応力問題
J341	240	5.442e3	5.429e3	99 節点
J342	240	3.621e3	3.595e3	525 節点
J351	80	3.695e3	4.298e3	99 節点
J352	80	3.610e3	3.609e3	381 節点
J361	40	3.679e3	3.619e3	99 節点
J362	40	3.611e3	3.606e3	330 節点
J731	40	-	3.606e3	33 節点
J741	20	-	3.594e3	33 節点

表 9.1.12　exK：直接法での検証結果（２次固有値）

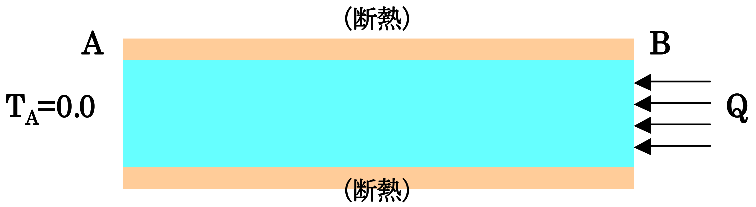
ケース名	要素数	予測値：n1=2.262e4		備考
		NASTRAN	FrontISTR	
J231	40	3.350e4	3.351e4	33 節点／平面応力問題
J232	40	2.163e4	2.156e4	105 節点／平面応力問題
J241	20	2.149e4	2.516e4	33 節点／平面応力問題
J242	20	2.149e4	2.143e4	85 節点／平面応力問題
J341	240	3.145e4	3.138e4	99 節点
J342	240	2.171e4	2.155e4	525 節点
J351	80	2.208e4	2.546e4	99 節点
J352	80	2.156e4	2.149e4	381 節点
J361	40	2.202e4	2.168e4	99 節点
J362	40	2.154e4	2.144e4	330 節点
J731	40	−	2.156e4	33 節点
J741	20	-	2.153e4	33 節点

注）三次元モデルでは１次と２次が重根となるので、表中の２次の値には、３次の計算値を記述している。

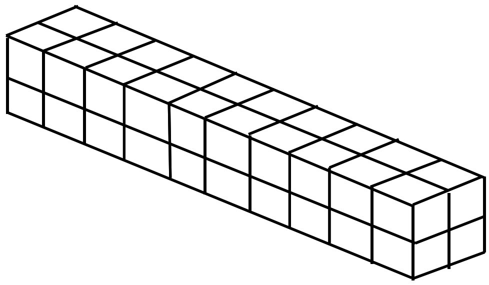
(4)　　熱伝導解析

　定常熱伝導解析の共通する条件を図 9.1.10 に示す。検証ケース exM〜exT の個別の条件を図 9.1.11 に示す。メッシュ分割は、exA と同等のものを使用することとする。

　表 9.1.13〜表 9.1.20 にケース別に検証結果である温度分布テーブルを示す。



(1) モデル



(2) メッシュ分割

AB 間長さ：L=10.0m

断面積　 ：A=1.0mm²

熱伝導率の温度依存性

熱伝導率λ(W/mK)	温度（℃）
50.0	0.
35.0	500.
20.0	1000.

図 9.1.10　定常熱伝導解析の検証条件

exM：線形材料

exN：規定温度問題

exO：集中熱流束問題

exP：分布熱流束問題

exQ：対流熱伝達問題

exR：輻射熱伝達問題

exS：体積発熱問題

exT：内部ギャップ問題

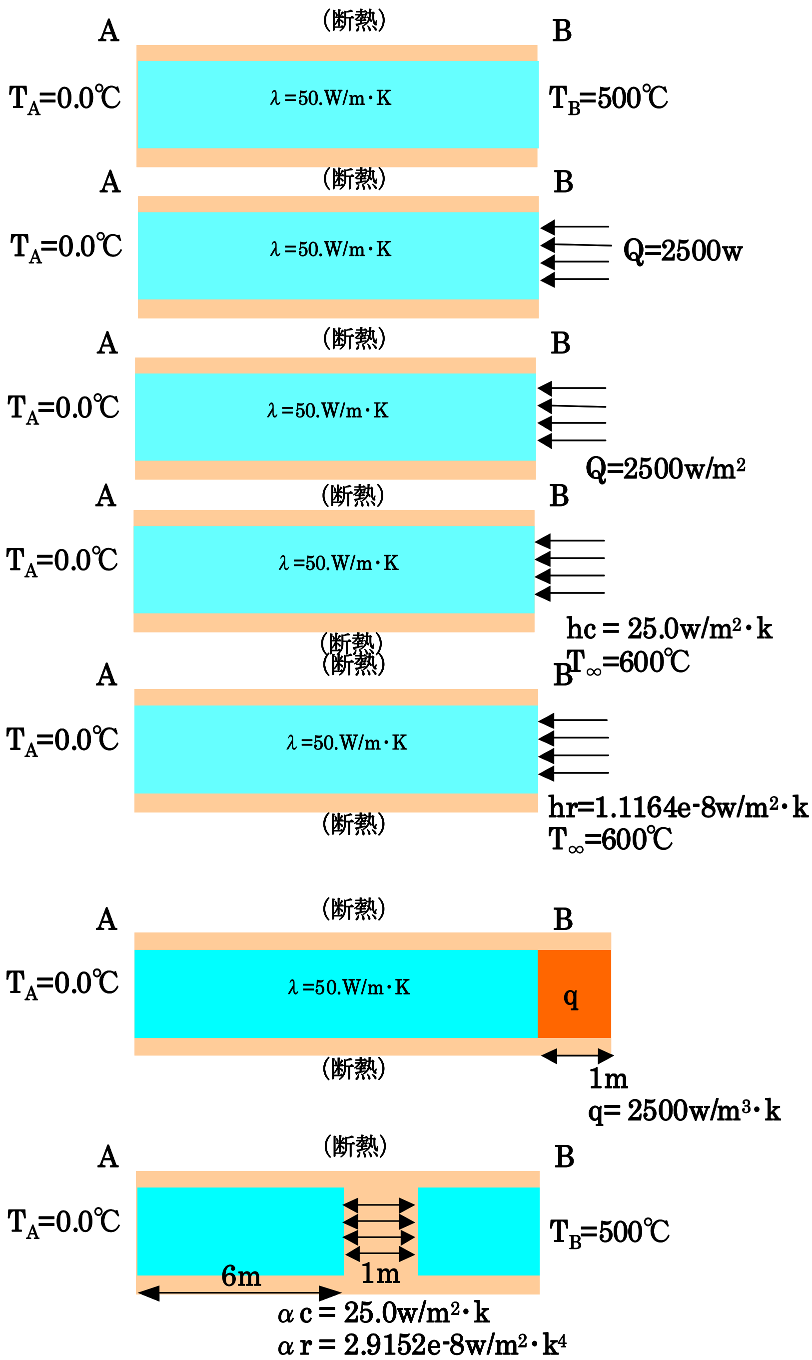


図 9.1.11　検証ケース別解析条件

表 9.1.13　exM：線形材料による定常計算の検証結果

ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
M361A	361	40／33	0.0	100.	200.	300.	400.	500.
M361B	361	40／105	0.0	100.	200.	300.	400.	500.
M361C	361	20／33	0.0	100.	200.	300.	400.	500.
M361D	361	20／85	0.0	100.	200.	300.	400.	500.
M361E	361	240／99	0.0	100.	200.	300.	400.	500.
M361F	361	24／525	0.0	100.	200.	300.	400.	500.
M361G	361	80／99	0.0	100.	200.	300.	400.	500.

表 9.1.14　exN：規定温度問題の検証結果

ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N231	231	40／33	0.0	87.2	179.5	278.0	384.1	500.
N232	232	40／105	0.0	86.0	178.3	276.8	382.9	500.
N241	241	20／33	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N242	242	20／85	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N341	341	240／99	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N342	342	24／525	0.0	87.9	179.9	278.0	383.6	500.
N351	351	80／99	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N352	352	80／381	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N361	361	40／99	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N362	362	40／330	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N731	731	40／33	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.
N741	741	20／33	0.0	87.3	179.7	278.2	384.3	500.

表 9.1.15　exO：集中熱流束問題の検証結果

ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
O231	231	40／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
O232	232	40／105	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
O241	241	20／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
O242	242	20／85	0.0	103.2	213.7	333.4	465.2	618.0
O341	341	240／99	-	-	-	-	-	-
O342	342	24／525	0.0	104.4	214.9	334.7	466.3	614.6
O351	351	80／99	-	-	-	-	-	-
O352	352	80／381	0.0	103.2	213.7	333.3	465.0	624.2
O361	361	40／99	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
O362	362	40／330	0.0	103.2	213.7	333.4	465.5	623.5
O731	731	40／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.5
O741	741	20／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6

表 9.1.16　exP：分布熱流束問題の検証結果

ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P231	231	40／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P232	232	40／105	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P241	241	20／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P242	242	20／85	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P341	341	240／99	-	-	-	-	-	-
P342	342	24／525	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P351	351	80／99	-	-	-	-	-	-
P352	352	80／381	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P361	361	40／99	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
P362	362	40／330	0.0	103.2	213.7	333.4	465.5	612.6
P731	731	40／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.5
P741	741	20／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6

表 9.1.17　exQ：対流熱伝達問題の検証結果

ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q231	231	40／33	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q232	232	40／105	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q241	241	20／33	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q242	242	20／85	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q341	341	240／99	-	-	-	-	-	-
Q342	342	240／525	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q351	351	80／99	-	-	-	-	-	-
Q352	352	80／381	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q361	361	40／99	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q362	362	40／330	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q731	731	40／33	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2
Q741	741	20／33	0.0	89.2	183.8	284.8	393.9	513.2

表 9.1.18　exR：輻射熱伝達問題の検証結果

ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R231	231	40／33	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R232	232	40／105	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R241	241	20／33	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R242	242	20／85	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R341	341	240／99	-	-	-	-	-	-
R342	342	240／525	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R351	351	80／99	-	-	-	-	-	-
R352	352	80／381	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R361	361	40／99	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R362	362	40／330	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R731	731	40／33	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2
R741	741	20／33	0.0	89.5	184.4	285.8	395.3	515.2

表 9.1.19　exS：体積発熱問題の検証結果

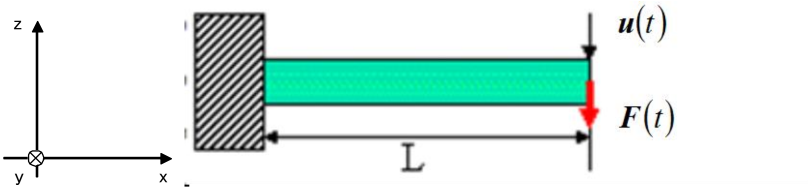
ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S231	231	40／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S232	232	40／105	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S241	241	20／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S242	242	20／85	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S341	341	240／99	-	-	-	-	-	-
S342	342	24／525	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S351	351	80／99	-	-	-	-	-	-
S352	352	80／381	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S361	361	40／99	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S362	362	40／330	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S731	731	40／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S741	741	20／33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6

表 9.1.20　exT：内部ギャップ問題の検証結果

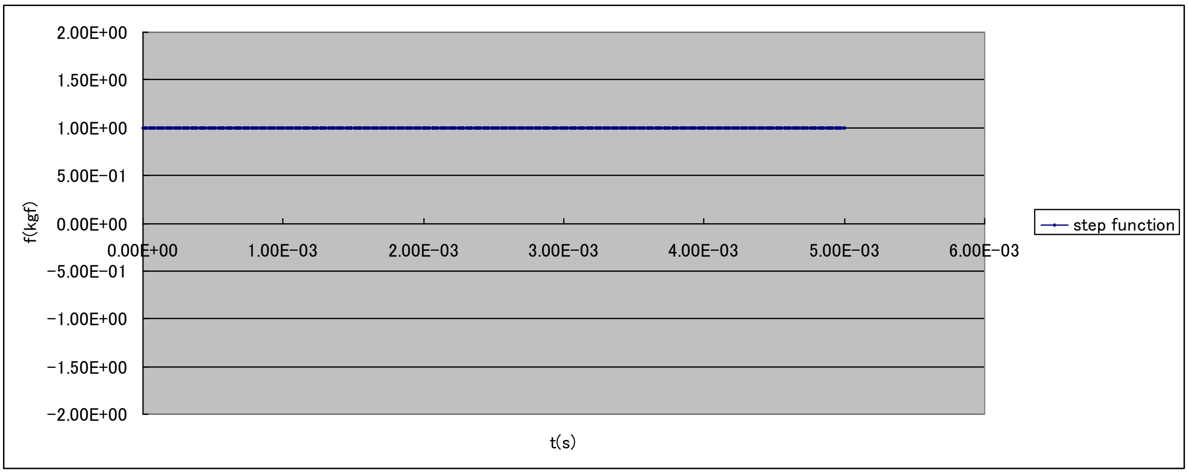
ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離（m）					
			A 端	2.0	4.0	6.0	8.0	B 端
ABAQUS	361	40／99	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T231	231	40／33	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T232	232	40／105	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T241	241	20／33	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T242	242	20／85	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T341	341	240／99	-	-	-	-	-	-
T342	342	24／525	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T351	351	80／99	-	-	-	-	-	-
T352	352	80／381	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T361	361	40／99	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T362	362	40／330	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T731	731	40／33	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0
T741	741	20／33	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0

(5)　　線形動解析

exWでは(1)項と同様の片持ち梁を対象に線形動解析を行った。図 9.1.12に検証条件を示す。ここでは、同一のメッシュ分割に対して、時間増分が結果へ及ぼす影響を検証した。動的解析手法として、陰解法及び陽解法の両手法を使用し、要素タイプは 361 及び 342 を使用した。表 9.1.22 及び図 9.1.13～図 9.1.15 に検証結果を示す。



解析モデル



外力 F の時刻歴

加振点変位の理論解：

$\boldsymbol{F}(t) = \boldsymbol{F}_0 I(t)$

ここで、

$\boldsymbol{F}_0$:定数ベクトル

$$I(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & 0 \le t \end{cases}$$

$$u(t) = \frac{F_0 l^3}{EI} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1-\cos\omega_i t}{\lambda_i^4} \left\{ \cosh\lambda_i - \cos\lambda_i - \frac{\cosh\lambda_i + \cos\lambda_i}{\sinh\lambda_i + \sin\lambda_i} (\sinh\lambda_i - \sin\lambda_i) \right\}^2$$

図 9.1.12　線形動解析の検証条件

検証条件：

長さ	L	10.0	mm
断面幅	a	1.0	mm
断面高さ	b	1.0	mm
縦弾性係数	E	4000.0	kgf /mm^2
ポアソン比	ν	0.3	
密度	ρ	1.0E-09	kgfs^2/mm^3
重力加速度	g	9800.0	mm/s^2
外力	F_0	1.0	kgf

要素　　　　6 面体 1 次要素

4 面体 2 次要素

解法　　　　　　陰解法

Newmark-β 法のパラメータ γ　　1/2

Newmark-β 法のパラメータ β　　1/4

陽解法

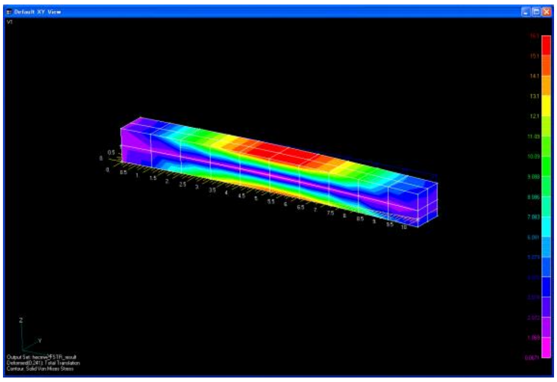
減衰　　　　なし

表 9.1.21　線形動解析の検証条件（続き）

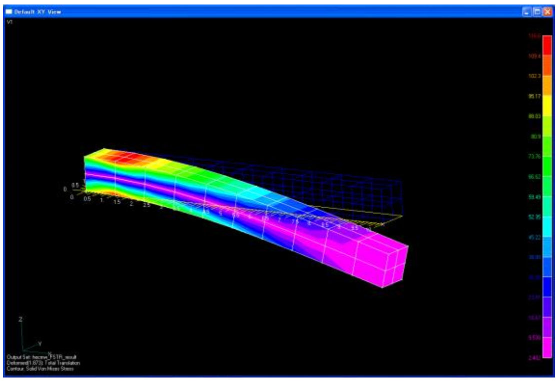
ケース名	要素タイプ	節点数	要素数	解法	時間増分 Δt(s)
W361_c0_im_m2_t1	361	99	40	陰解法	1.0E-06
W361_c0_im_m2_t2	361	99	40	陰解法	1.0E-05
W361_c0_im_m2_t3	361	99	40	陰解法	1.0E-04
W361_c0_ex_m2_t1	361	99	40	陽解法	1.0E-08
W361_c0_ex_m2_t2	361	99	40	陽解法	1.0E-07
W361_c0_ex_m2_t3	361	99	40	陽解法	1.0E-06
W342_c0_im_m2_t1	342	525	240	陰解法	1.0E-06
W342_c0_im_m2_t2	342	525	240	陰解法	1.0E-05
W342_c0_im_m2_t3	342	525	240	陰解法	1.0E-04
W342_c0_ex_m2_t1	342	525	240	陽解法	1.0E-08
W342_c0_ex_m2_t2	342	525	240	陽解法	5.0E-08
W342_c0_ex_m2_t3	342	525	240	陽解法	1.0E-07

表 9.1.22　exW：片持ち梁を対象とした線形動解析の検証結果

ケース名	要素タイプ	節点数	要素数	解法	時刻 t = 0.002(s)における z 方向変位：uz(mm)	
					6 次迄重ね合せた理論解	FrontISTR
W361_c0_im_m2_t1	361	99	40	陰解法	1.9753	1.9302
W361_c0_im_m2_t2	361	99	40	陰解法	1.9753	1.8686
W361_c0_im_m2_t3	361	99	40	陰解法	1.9753	0.3794
W361_c0_ex_m2_t1	361	99	40	陽解法	1.9753	1.9302
W361_c0_ex_m2_t2	361	99	40	陽解法	1.9753	1.9247
W361_c0_ex_m2_t3	361	99	40	陽解法	1.9753	発散
W342_c0_im_m2_t1	342	525	240	陰解法	1.9753	1.9431
W342_c0_im_m2_t2	342	525	240	陰解法	1.9753	1.8719
W342_c0_im_m2_t3	342	525	240	陰解法	1.9753	0.3873
W342_c0_ex_m2_t1	342	525	240	陽解法	1.9753	1.9359
W342_c0_ex_m2_t2	342	525	240	陽解法	1.9753	1.9358
W342_c0_ex_m2_t3	342	525	240	陽解法	1.9753	発散

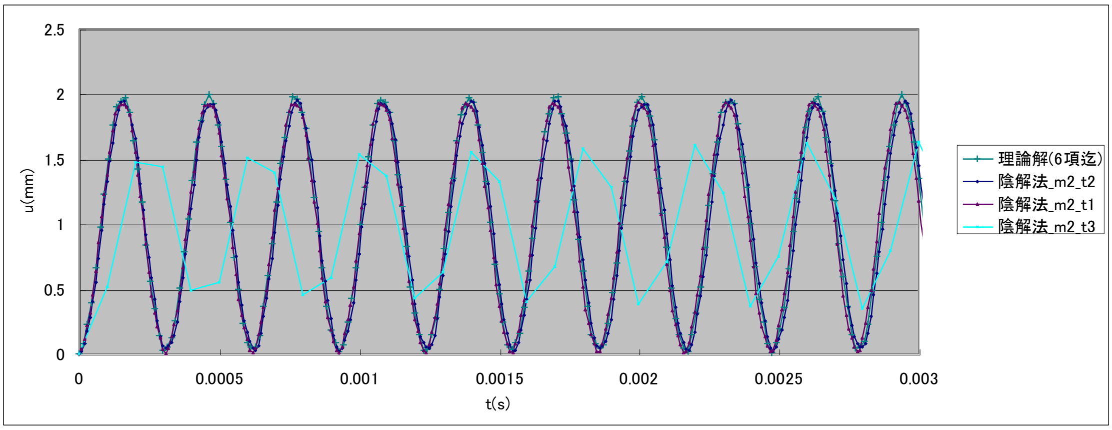


(a)　t=2.0E-03(s)

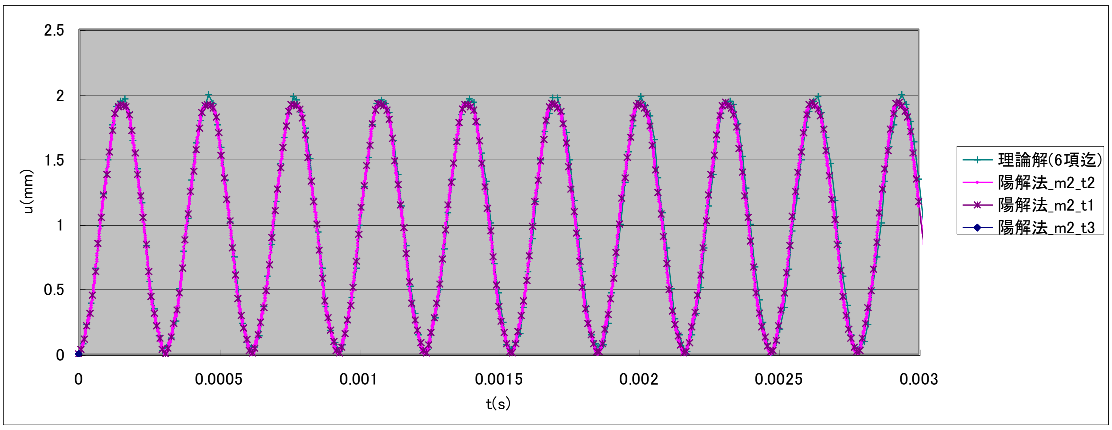


(b)　t=4.0E-03(s)

図 9.1.13　片もち梁の変形図及び相当応力分布（W361_c0_im_m2_t2）

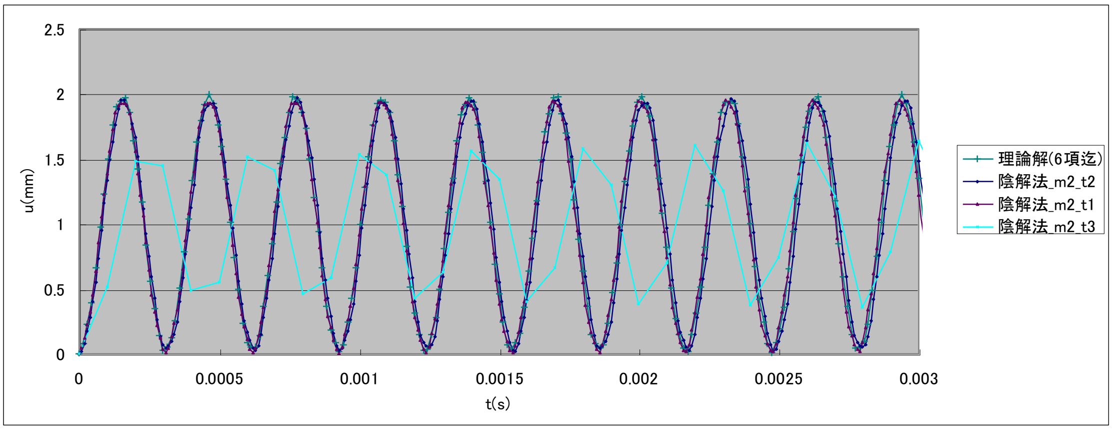


(a)　要素タイプ 361：陰解法

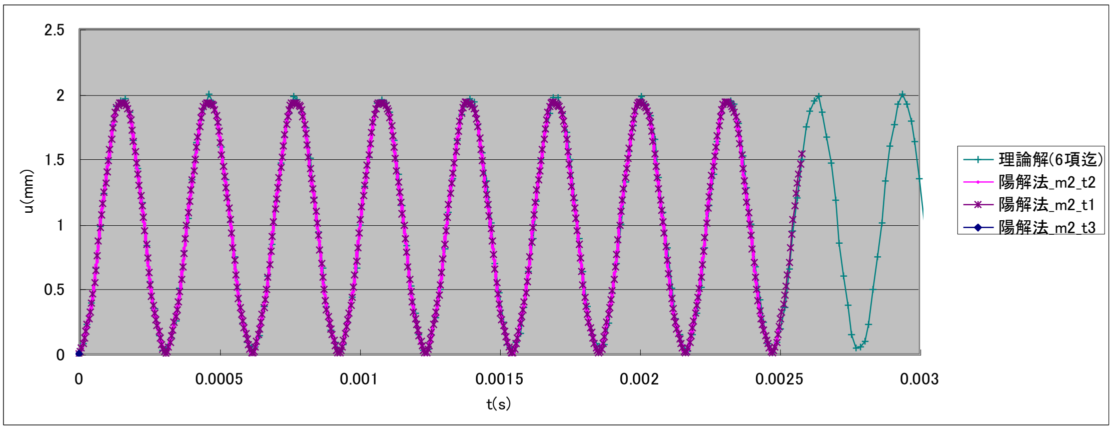


(b)　要素タイプ 361：陽解法

図 9.1.14　加振点変位 u_z の時刻歴



(a)　要素タイプ 342：陰解法

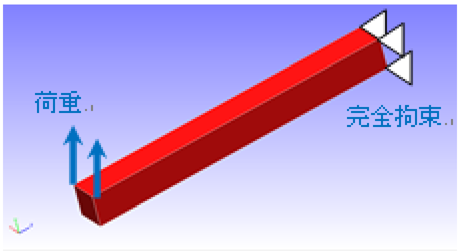


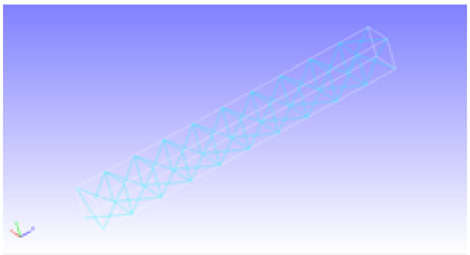
(b)　要素タイプ 342：陽解法

図 9.1.15　加振点変位 u_z の時刻歴

(6)　周波数応答解析

本検証では片持ち梁を対象に周波数応答解析を行い、汎用ソフト ABAQUS の結果と比較することで検証を行った。解析モデル、検証条件を示す。





解析モデル(4 面体 1 次要素(要素数 126、節点数 55))

検証条件：

縦弾性係数	E	210000	N/mm^2
ポアソン比	ν	0.3	
密度	ρ	7.89E-09t/mm³	
重力加速度	g	9800.0	mm/s^2
荷重	F_0	1.0	N

Rayleigh 減衰のパラメータ Rm　0.0

Rayleigh 減衰のパラメータ Rk　7.2E-07

固有値解析から得られた 5 次までの固有値と加振点の周波数応答を示す。

モード	FrontISTR	ABAQUS
1	14952	14952
2	15002	15003
3	84604	84539
4	84771	84697
5	127054	126852

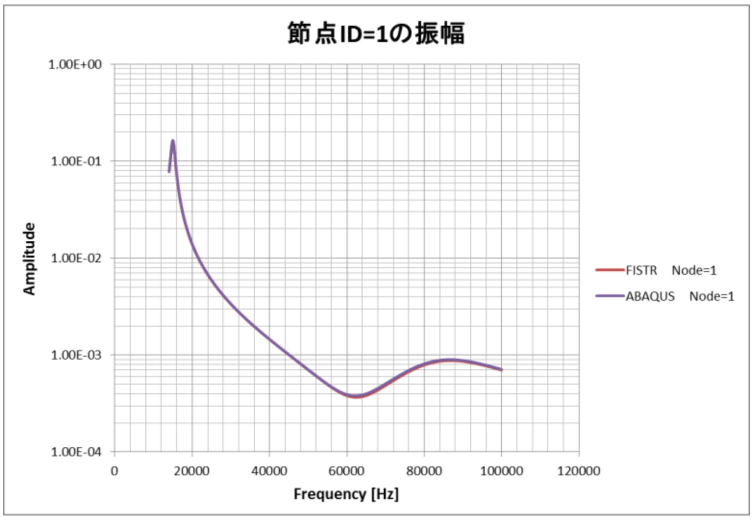


図 9.1.16　加振点の変位強度の周波数依存性

9.2　弾性静解析用実モデル例題

9.2.1　解析モデル

弾性静解析を対象とした実モデル検証例題の一覧を表 9.2.1 に示す。また、モデルの形状（一部を除く）を図 9.2.1～図 9.2.5 に示す。なお、要素タイプ 731 および 741 の例題を実行するには、別途直接法ソルバーが必要である。

表 9.2.1　弾性静解析用実モデル検証例題

ケース名	要素タイプ	検証モデル	節点数	自由度数
EX01A	342	コンロッド(10 万節点)	94,074	282,222
EX01B	342	コンロッド(33 万節点)	331,142	993,426
EX02	361	穴あきブロック	37,386	112,158
EX03	342	タービンブレード	10,095	30,285
EX04	741	円筒シェル	10,100	60,600
EX05A	731	ワイングラス(coarce)	7,240	43,440
EX05B	731	ワイングラス(midium)	48,803	292,818
EX05C	731	ワイングラス(fine)	100,602	603,612

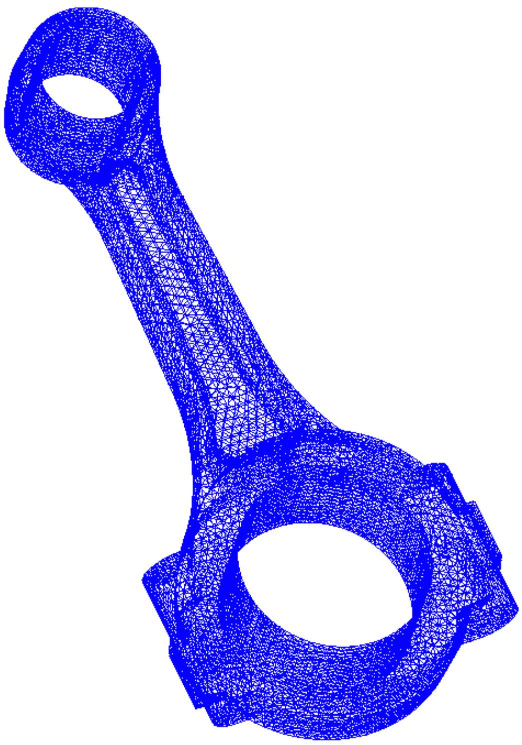


図 9.2.1　コンロッド（EX01A）

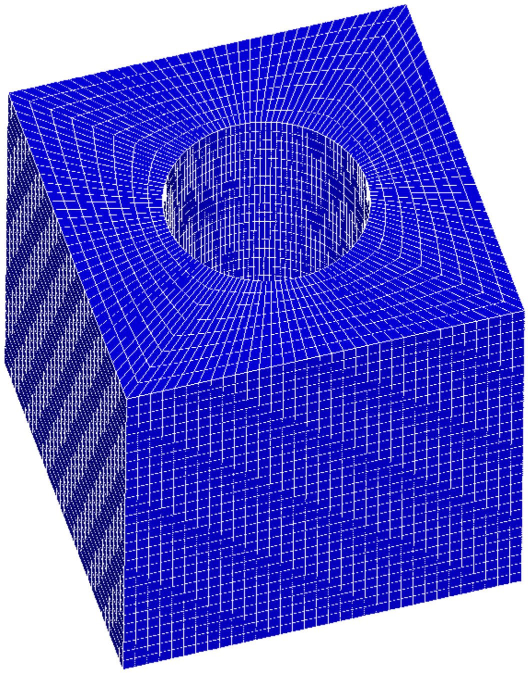


図 9.2.2　穴あきブロック（EX02）

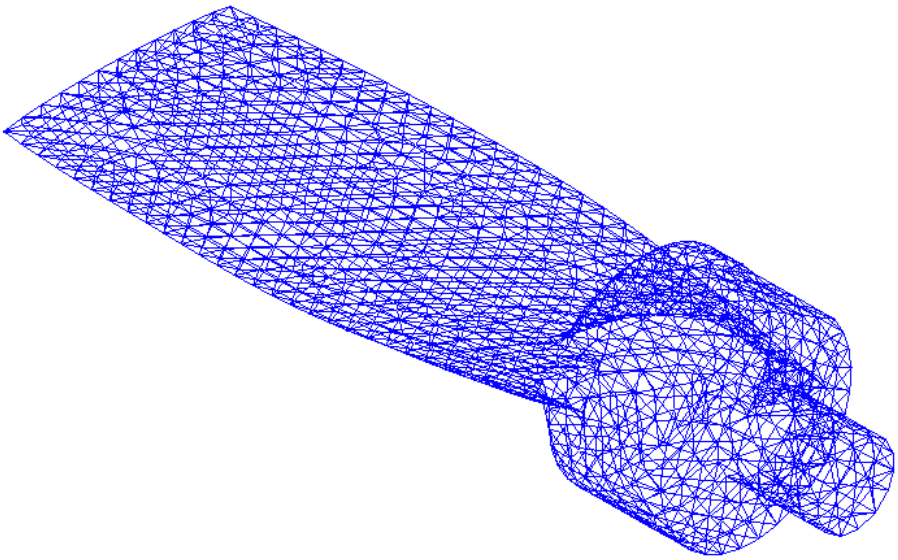


図 9.2.3　タービンブレード（EX03，EX06）

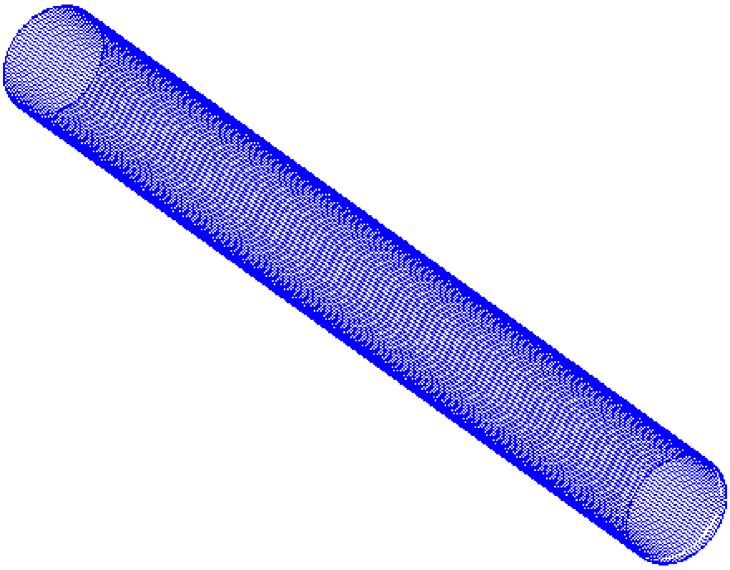


図 9.2.4　円筒シェル（EX04，EX09）

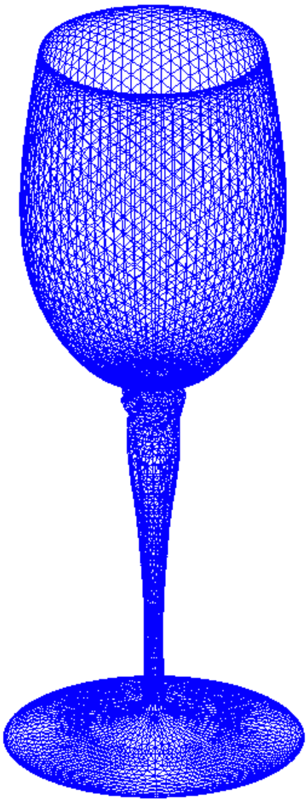


図 9.2.5　ワイングラス（EX05，EX10A）

9.2.2　解析結果

9.2.2.1　解析結果例

解析結果の例を図 9.2.6～図 9.2.9 に示す。

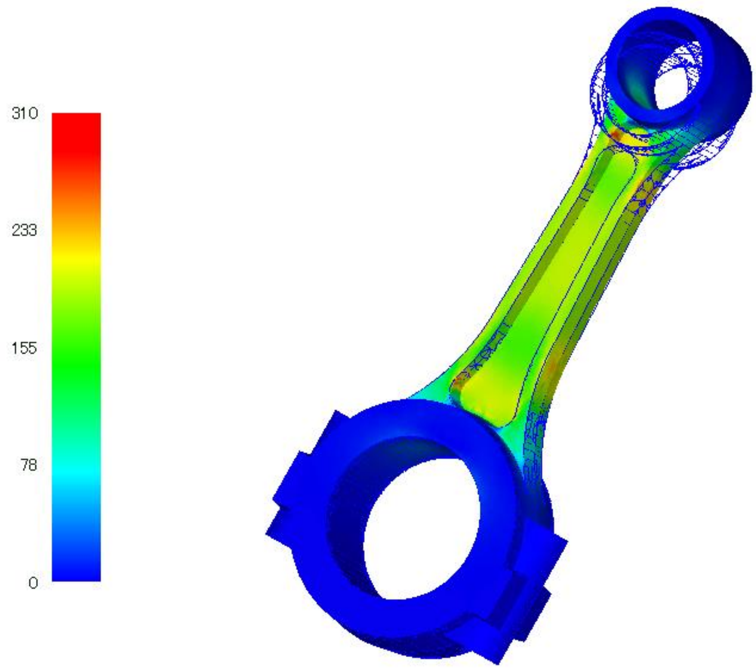


図 9.2.6　　EX01A 解析結果（Mises 応力と変形図(10 倍)）

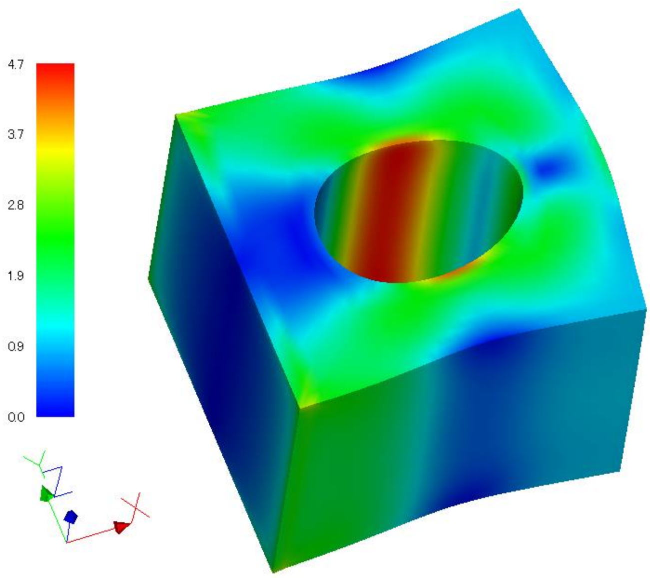


図 9.2.7　　EX02 解析結果（Mises 応力と変形図(100 倍)）

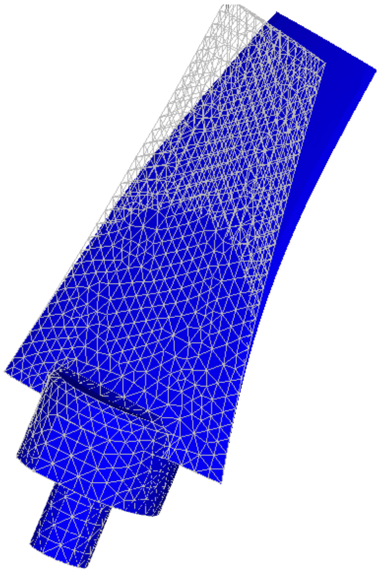


図 9.2.8　 EX03 解析結果（変形図(10 倍)）

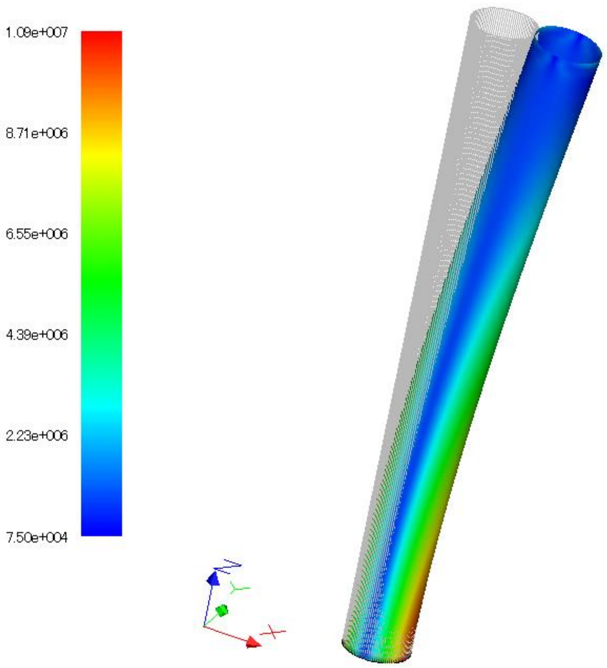


図 9.2.9　 EX04 解析結果（変形図(100 倍)）

9.2.2.2　検証例題 EX02 による解析性能の検証結果

検証例題 EX02 穴あきブロックモデルと同等のモデルを用い汎用商用ソフト ABAQUS による解析を行った。FrontISTR と応力成分の最大値、最小値を比較した結果を図 9.2.10 に示す。同図より応力成分は非常によく一致していることが分かる。

次に、応力分布への領域分割の影響を調べた結果を示す。領域分割は RCB 法により行い、X、Y、Z それぞれの軸方向に 2 分割し、全体で 8 領域に分割した。図 9.2.11 に分割状態を示す。図 9.2.12 には単一領域と 8 領域分割による解析結果の応力分布を示す。

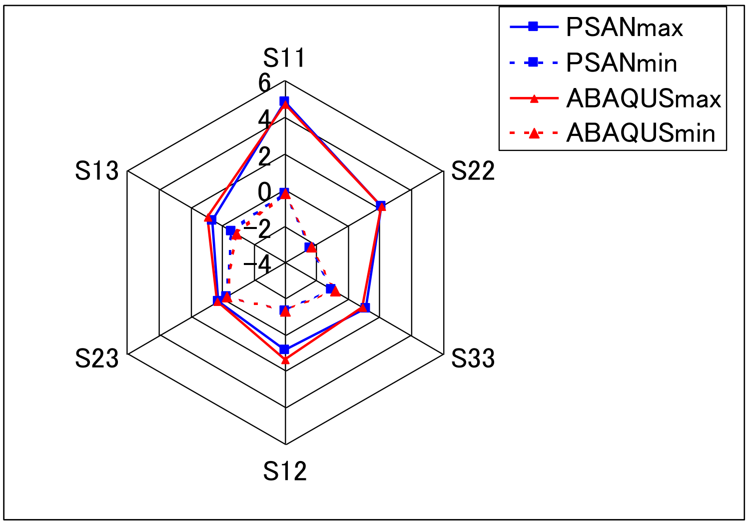


図 9.2.10　EX02 における汎用ソフトとの応力成分の比較

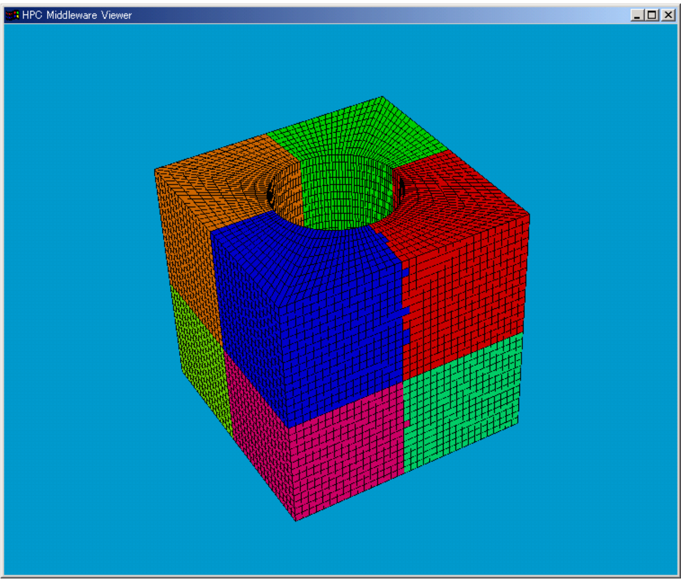
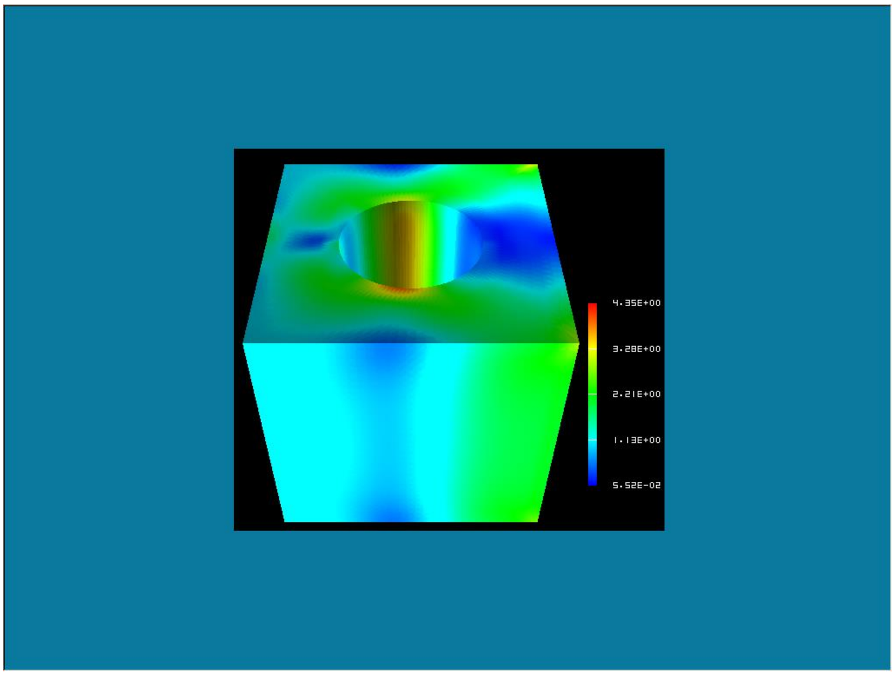
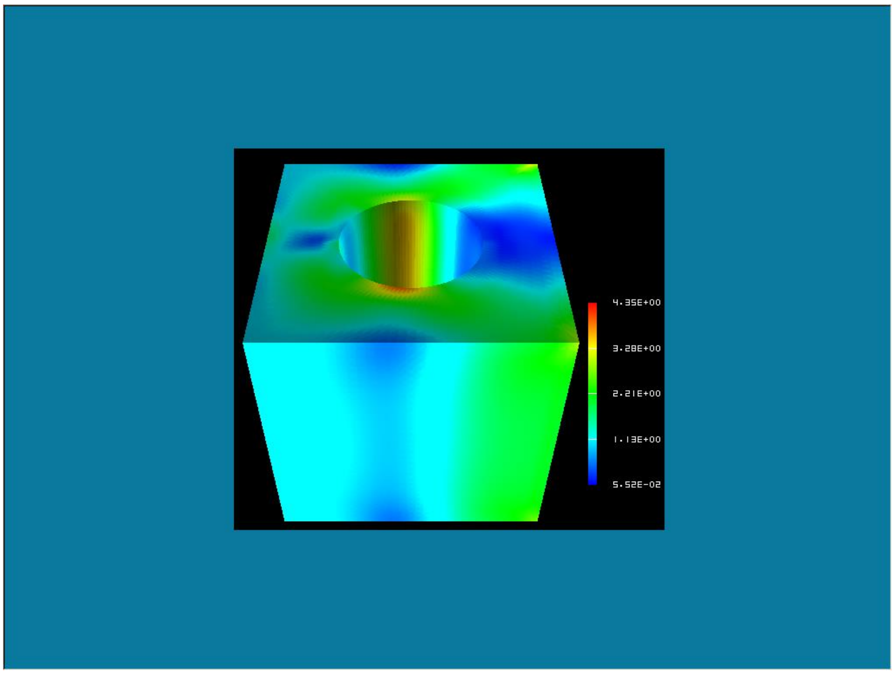


図 9.2.11　RCB 法による EX02 の 8 領域分割結果



(a) 単一領域モデル



(b) 8 領域分割モデル

図 9.2.12　領域分割によるミゼス応力分布の相違

図 9.2.12 より、両者の違いは見られず、完全に一致していることが分かる。

次に、使用した HEC-MW ソルバーの設定による実行時間を比較した結果を表 9.2.2 に示す。また、図 9.2.13 求解までの収束履歴を示す。

表 9.2.2　HEC-MW ソルバーによる実行時間の比較

ソルバー	実行時間(s)
CGI	38.79
CGscale	52.75
BCGS	60.79
CG8	6.65

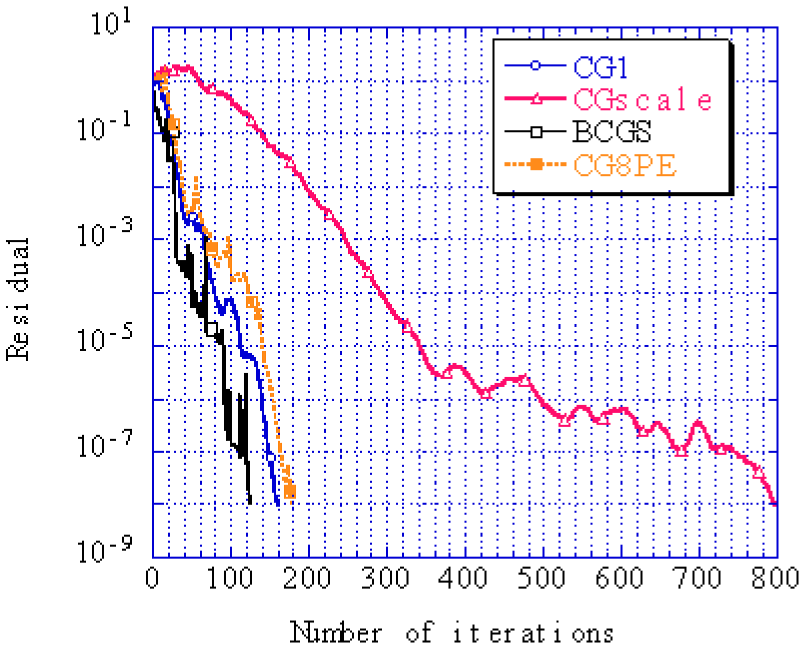


図 9.2.13　HEC-MW ソルバーによる収束履歴の比較

（収束判定閾値：$1.0\text{x}10^{-8}$）

9.2.2.3　検証例題 EX01A による計算時間の比較

検証例題 EX01A（コンロッド）を用い、領域分割による計算速度の増速率について検証した。計算には Xeon 2.8GHz　24 ノードクラスタ計算機を用いた。結果を図 9.2.14 に示す。同図より計算速度は領域数と比例して増速することが分かる。

また、計算時間の計算機環境による差も調べた。結果を表 9.2.3 に示す。

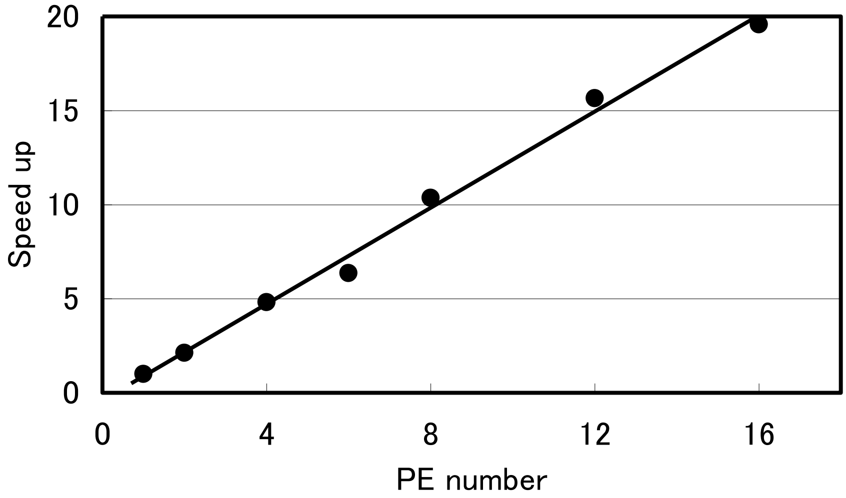


図 9.2.14　領域分割による増速効果

表 9.2.3　計算時間の計算機による比較（1CPU）

CPU	(GHz)	OS	CPU Time(s)	(solver)
Xeon	2.8	Linux	850	(817)
Pentium Ⅲ	0.866	Win2000	2008	(1980)
〃 M	0.760	WinXP	1096	(1070)
〃 4	2.0	WinXP	802	(785)
〃 4	2.8	WinXP	738	(718)
Celeron	0.700	Win2000	2252	(2215)
Pentium 4	2.4	WinXP	830	(804)

9.3　固有値解析用実モデル例題

9.3.1　解析モデル

固有値解析を対象とした実モデル検証例題の一覧を表 9.3.1 に示す。また、これらのうち、EX07（タービンローダ）および EX08（スプリング）のモデル形状を図 9.3.1、図 9.3.2 に示す。そのほかのモデル形状は検証内容が一致する弾性静解析用検証例題と同じ形状であり、すでに示してある。なお、要素タイプ 731 および 741 の例題を実行するには、別途直接法ソルバーが必要である。

表 9.3.1　固有値解析用実モデル検証例題

ケース名	要素タイプ	検証モデル	節点数	自由度数
EX06	342	タービンブレード	10,095	30,285
EX07	361	タービンロータ	127,440	382,320
EX08	342	スプリング	78,771	236,313
EX09	741	円筒シェル	10,100	60,600
EX10A	731	ワイングラス (coarse)	7,240	43,440
EX10B	731	ワイングラス (midium)	48,803	292,818

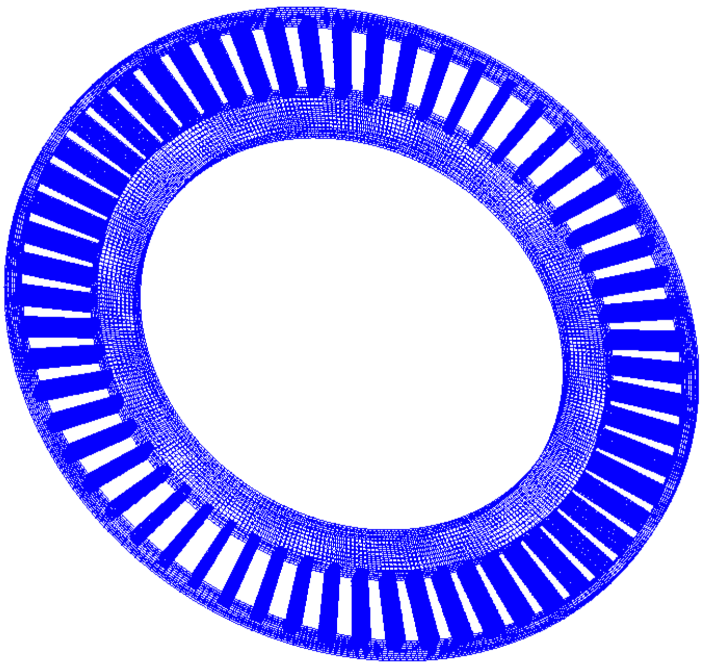


図 9.3.1　タービンロータ（EX07）

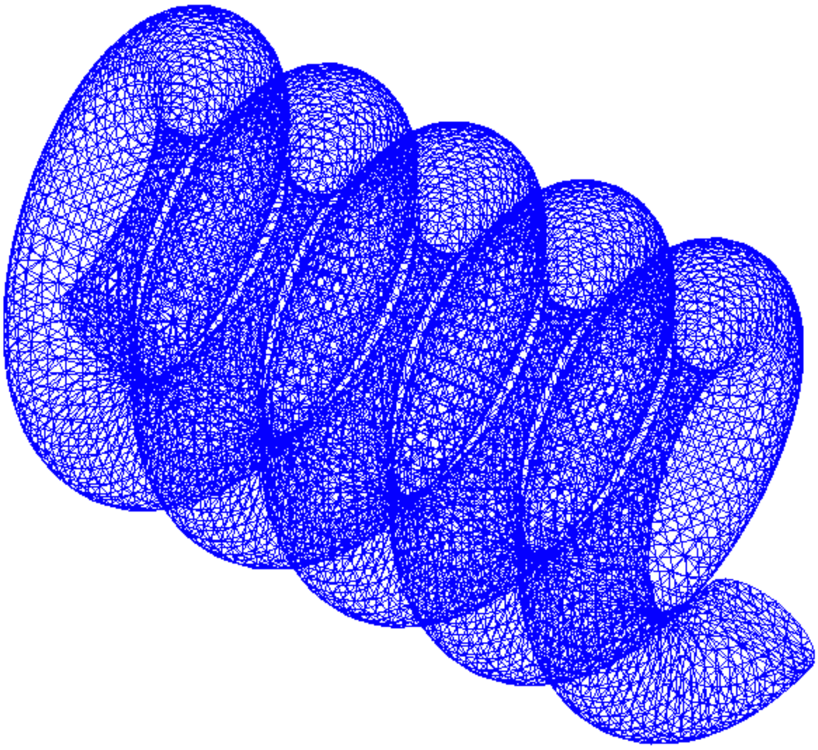
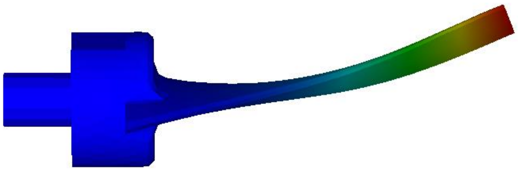


図 9.3.2　スプリング（EX08）

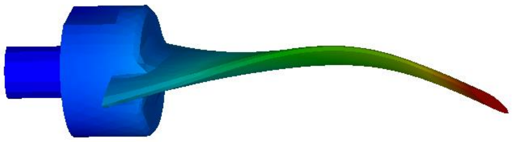
9.3.2　解析結果

振動モードおよび固有振動数を以下に示す。

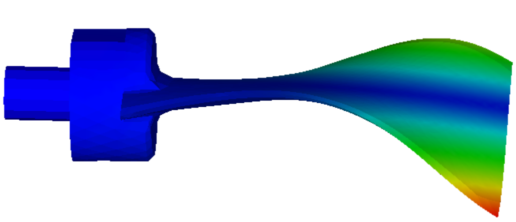
(1)　　EX06 タービンブレード



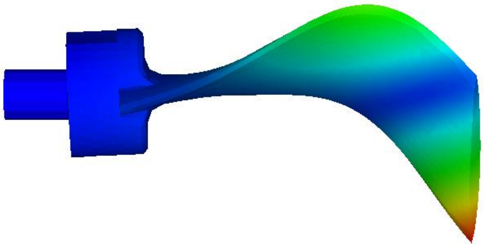
(a) モード 1（1170kHz）



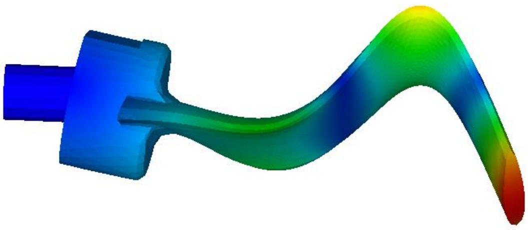
(b) モード 2（3250kHz）



(c) モード 3（4130kHz）



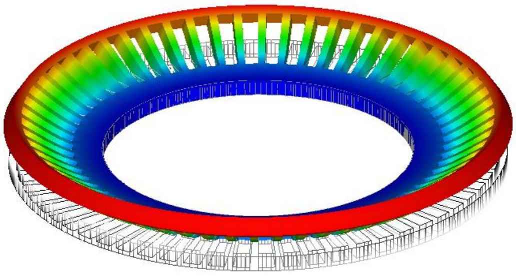
(d) モード 4（4140kHz）



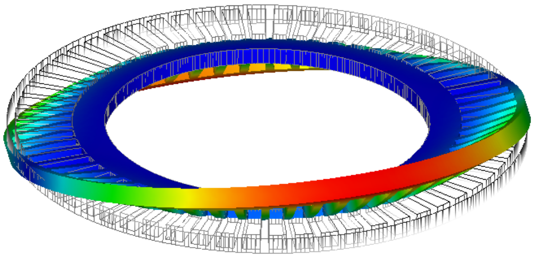
(e) モード 5（8210kHz）

図 9.3.3　EX06 タービンブレード振動モード

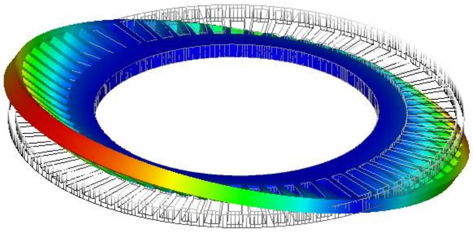
(2)　EX07 タービンロータ



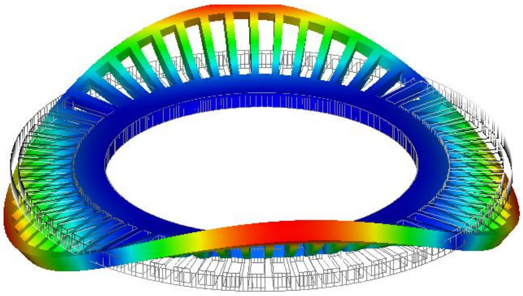
(a) モード 1（1067Hz）



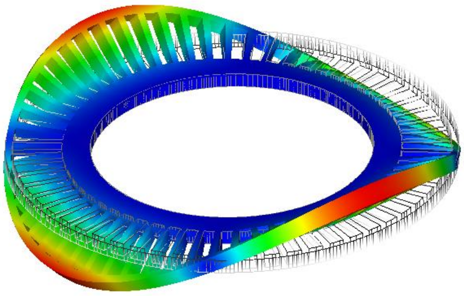
(b) モード 2（1072Hz）



(c) モード 3（1072Hz）



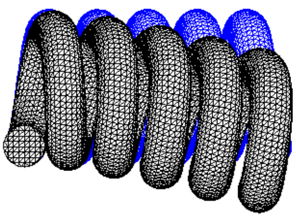
(d) モード 4（1093Hz）



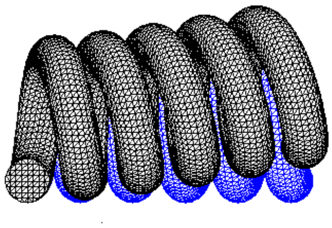
(e) モード 5（1093Hz）

図 9.3.4　EX07 タービンロータ振動モード

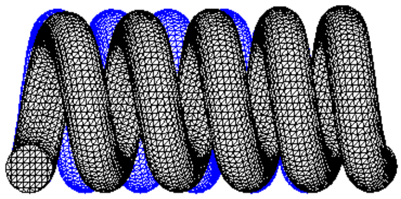
(3) EX08 スプリング



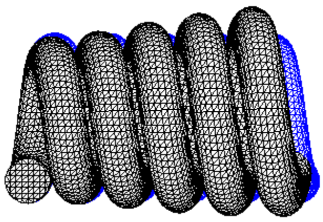
モード1（445Hz）



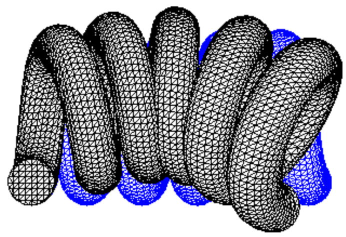
モード2（446Hz）



モード3（908Hz）



モード4（985Hz）



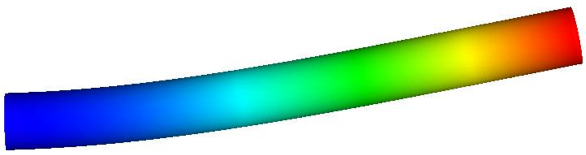
モード5（1810Hz）

振動固有値

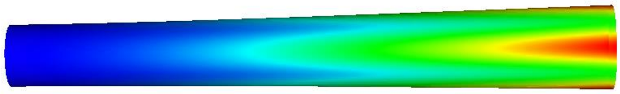
	FrontSTR	NASTRAN
1	445 Hz	445 Hz
2	446 Hz	446 Hz
3	908 Hz	908 Hz
4	985 Hz	986 Hz
5	1810 Hz	1810 Hz

図 9.3.5 EX08 スプリング振動モード

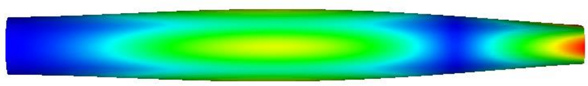
(4)　EX09 円筒シェル



(a) モード 1,2（109Hz）



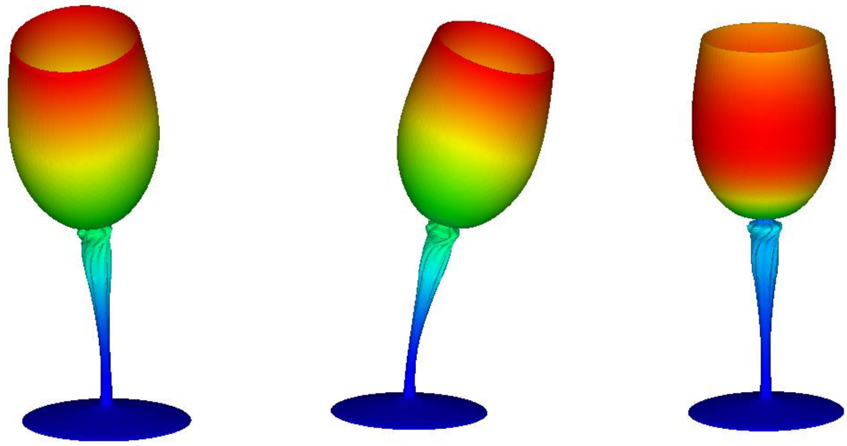
(b) モード 3,4（570Hz）



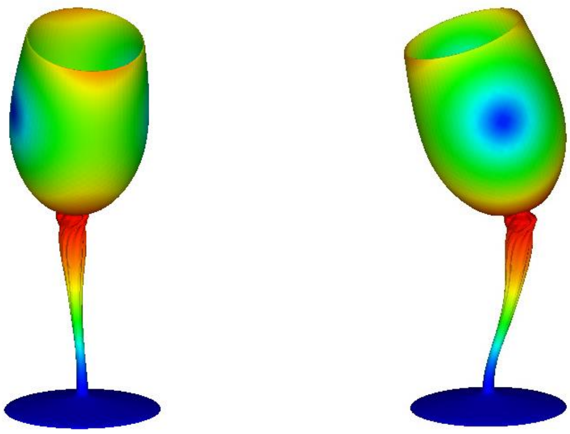
(c) モード 5（615Hz）

図 9.3.6　EX09 円筒シェル振動モード

(5)　EX10A ワイングラス



(a) モード 1（101Hz）　(b) モード 2（102Hz）　(c) モード 3（354Hz）



(d) モード 4（1335Hz）　(e) モード 5（1336Hz）

図 9.3.7　EX10A ワイングラス振動モード

9.4　熱伝導解析用実モデル例題

9.4.1　解析モデル

熱伝導解析では、実モデルとして使用済核燃料輸送容器を対象とする。この実モデルについて、メッシュの粗さを変えた3種類の検証例題を設定する。その一覧を表 9.4.1 に示す。また、モデルの形状を図 9.4.1～図 9.4.4 に示す。

表 9.4.1　熱伝導解析用実モデル検証例題

ケース名	要素タイプ	検証モデル	節点数	自由度数
EX21A	361	使用済核燃料輸送容器	88,938	79,920
EX21B	361		309,941	289,800
EX21C	361		1,205,765	1,159,200

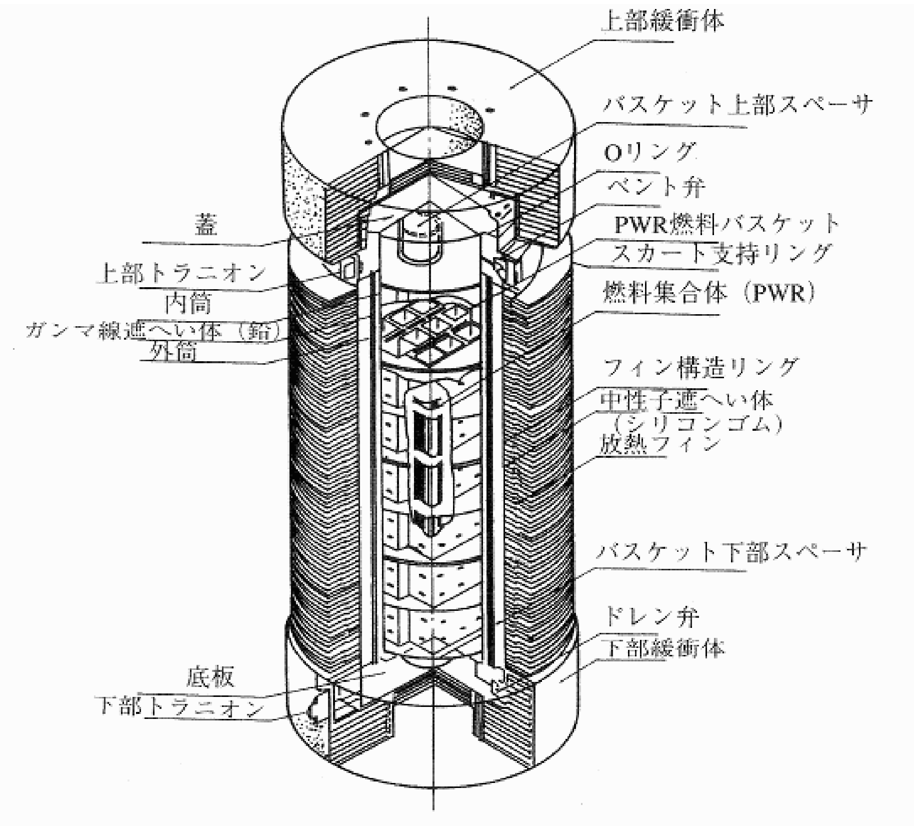
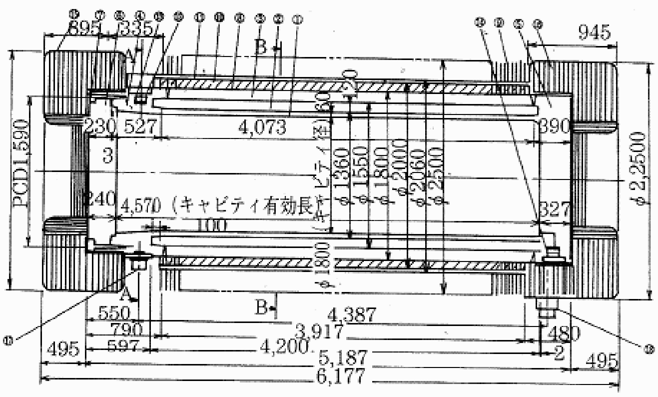


図 9.4.1　使用済核燃料輸送容器

参考資料：核燃料輸送工学（日刊工業新聞社）1998 年



番号	名　　称
1	内　筒
2	ガンマ線遮へい体
3	外　筒
4	上端部
5	底　板
6	ふ　た
7	ふた締付けボルト
8	フィン構造リング
9	放熱ファン
10	中性子遮へい体
11	中性子遮へい断熱材
12	上部断熱材
13	ベント弁部
14	ドレン弁部
15	上部緩衝体
16	下部緩衝体
17	上部トラニオン
18	下部トラニオン

名　称	重量（ton）
ふ　た	4.4
本　体	75.2
バスケット	7.1
燃料集合体	6.6
冷却水	3.1
上部／下部緩衝体	8.0
合　計	104.4

図 9.4.2　使用済核燃料輸送容器の寸法

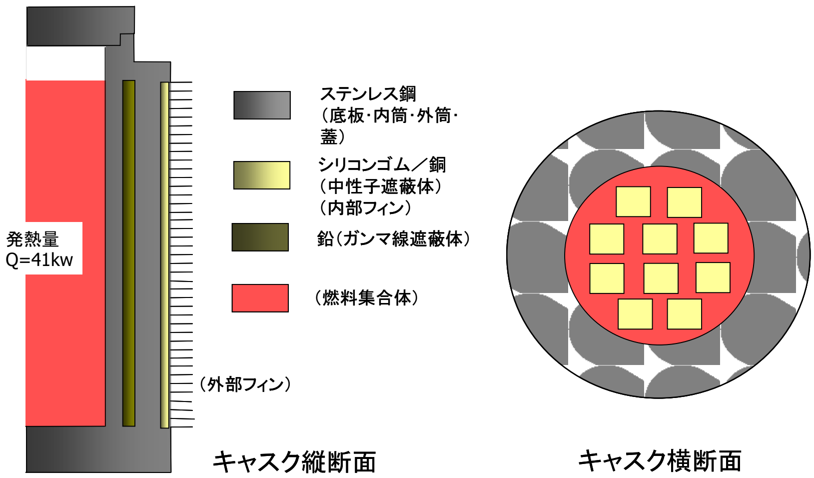


図 9.4.3　モデル概念図

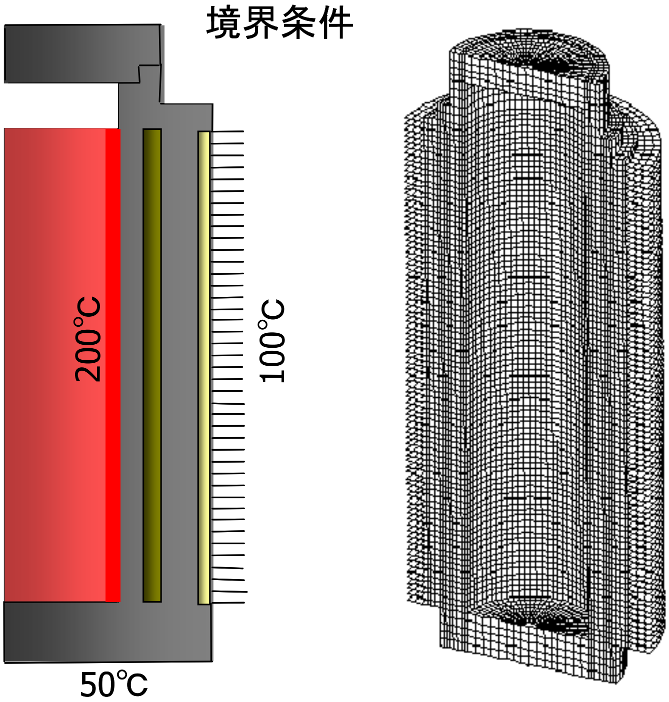
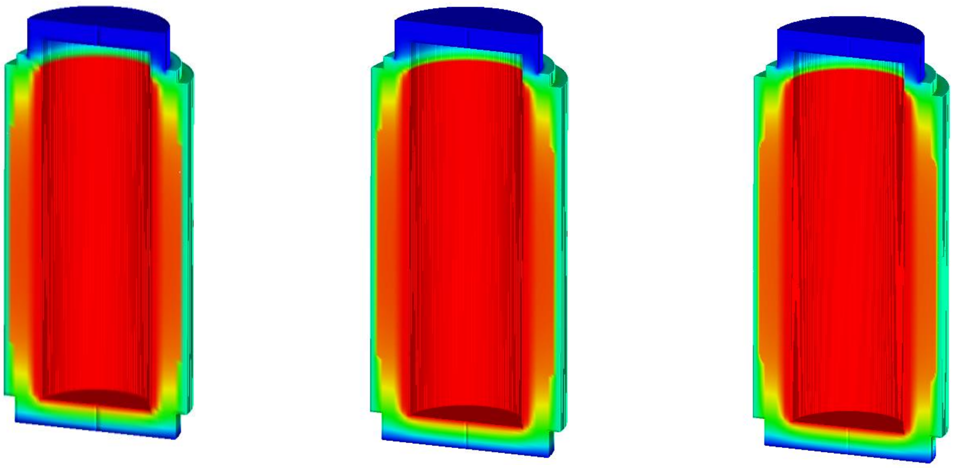


図 9.4.4　モデル境界条件とメッシュ分割図（EX21A）

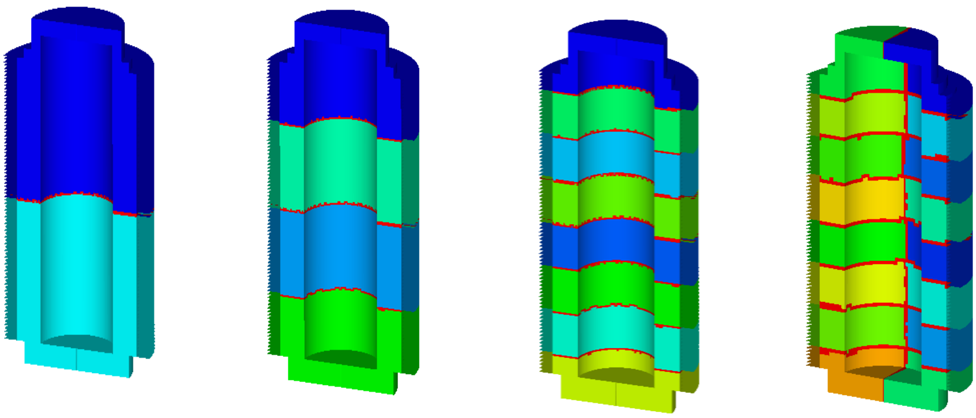
9.4.2　解析結果

解析結果の例を図 9.4.5～図 9.4.7 に示す。



EX21A　　EX21B　　EX21C

図 9.4.5　温度分布図



2分割　　**4分割**　　**8分割**　　**16分割**

図 9.4.6　分散モデル図

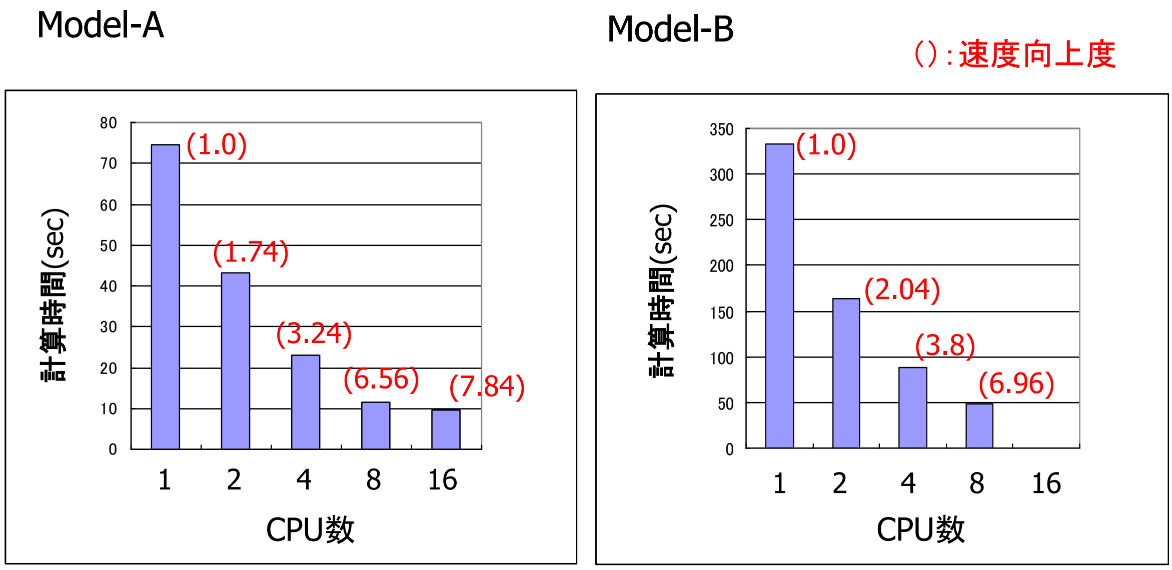


図 9.4.7　分散処理による速度向上度

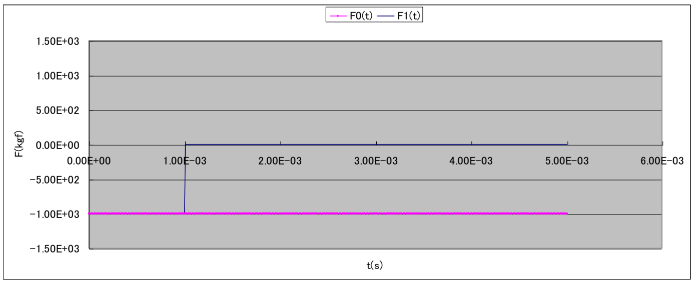
9.5　線形動的解析用実モデル例題

9.5.1　解析モデル

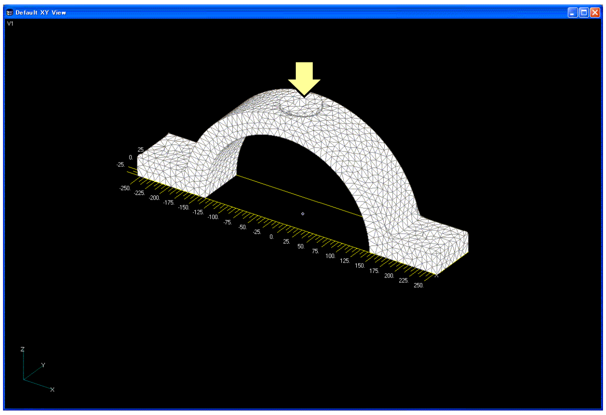
線形動解析では、実モデルとして
図 9.5.1 に示す機械部品を対象とする。この実モデルについて、荷重条件及び減衰係数の異なる 4 ケースに対して検証例題を設定する。その一覧を表 9.5.1 に示す。

表 9.5.1　線形動的解析用実モデル検証例題

ケース名	要素タイプ	検証モデル	荷重条件	減衰条件	節点数	自由度数
EX31A	342	かみ合いモデル	ステップ荷重(F0)	なし	15,214	45,642
EX31B	342		ステップ荷重(F0)	あり	15,214	45,642
EX31C	342		方形波パルス(F1)	なし	15,214	45,642
EX31D	342		方形波パルス(F1)	あり	15,214	45,642



荷重条件

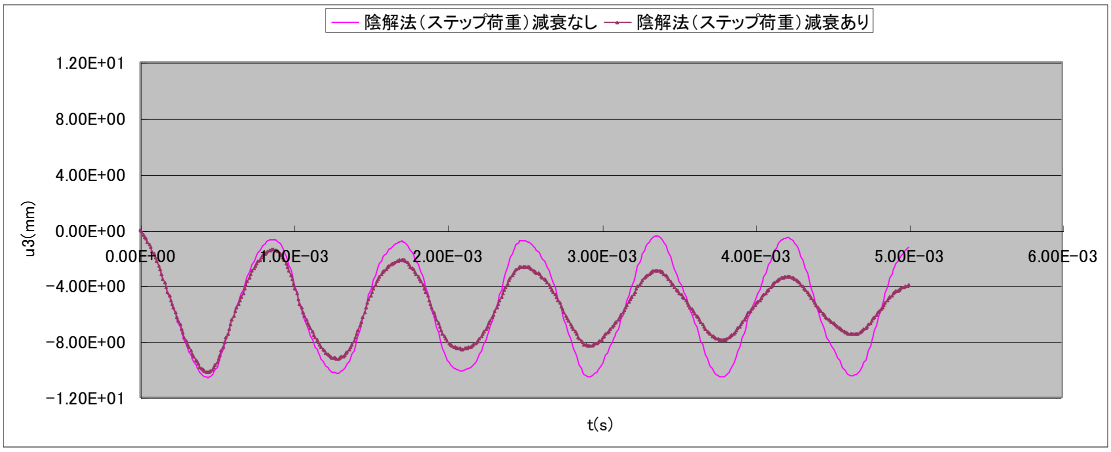


メッシュ図

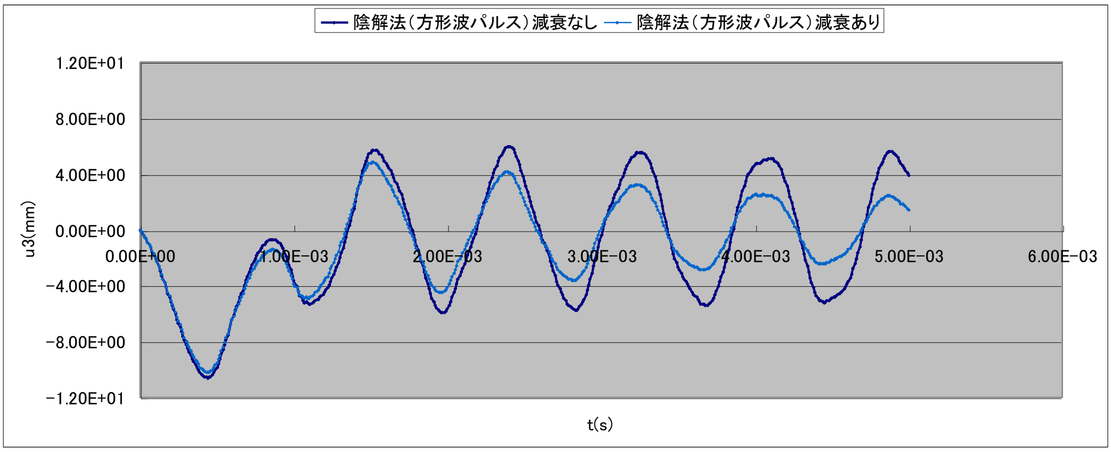
図 9.5.1　かみあいモデル

9.5.2　解析結果

解析結果の例を図 9.5.2～図 9.5.3 に示す。

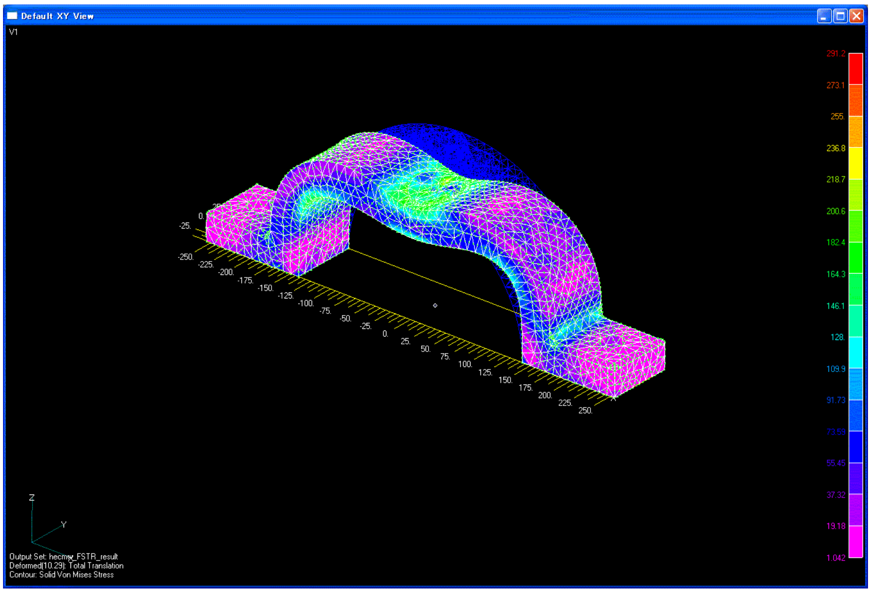


(a)　ステップ荷重の場合

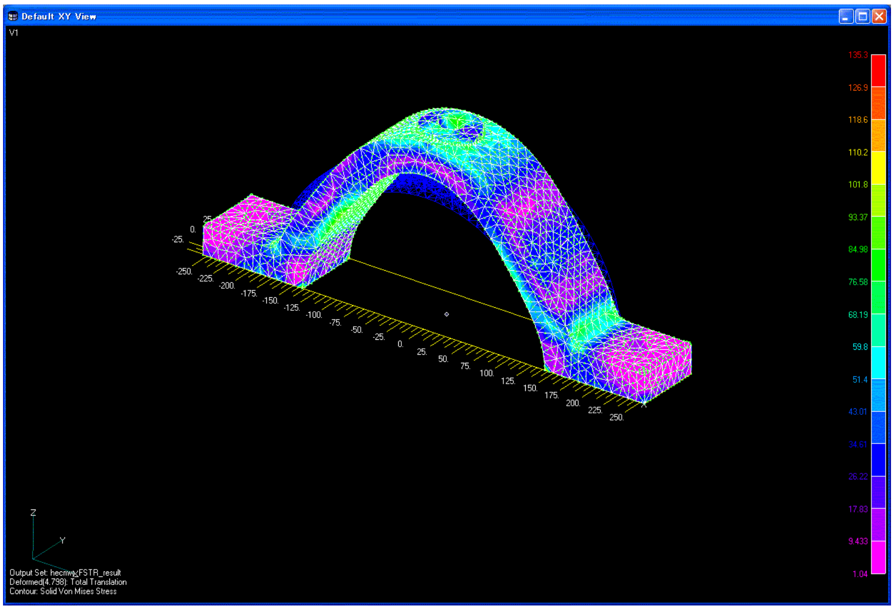


(b)　方形波パルス荷重の場合

図 9.5.2　加振点変位 u_z の時刻歴



(a)　t=5.0E-04(s)



(b)　t=4.0E-03(s)

図 9.5.3　変形図及び相当応力分布(変形倍率 5.0)　：EX31C