

# FrontISTR チュートリアル/例題集

FrontISTR Commons

2019年7月30日

## 目次

|        |                        |    |
|--------|------------------------|----|
| 1      | FrontISTR チュートリアルマニュアル | 3  |
| 1.1    | マニュアルリスト               | 3  |
| 1.2    | 本マニュアルの記載内容            | 4  |
| 1.3    | 静解析（弾性）                | 4  |
| 1.3.1  | 解析対象                   | 5  |
| 1.3.2  | 解析内容                   | 5  |
| 1.3.3  | 解析結果                   | 5  |
| 1.4    | 静解析（弾性、並列）             | 6  |
| 1.5    | 静解析（超弾性その1）            | 6  |
| 1.5.1  | 解析対象                   | 6  |
| 1.5.2  | 解析内容                   | 7  |
| 1.5.3  | 解析結果                   | 7  |
| 1.6    | 静解析（超弾性その2）            | 7  |
| 1.6.1  | 解析対象                   | 8  |
| 1.6.2  | 解析内容                   | 8  |
| 1.6.3  | 解析結果                   | 8  |
| 1.7    | 静解析（弾塑性その1）            | 9  |
| 1.7.1  | 解析対象                   | 9  |
| 1.7.2  | 解析内容                   | 9  |
| 1.7.3  | 解析結果                   | 9  |
| 1.8    | 静解析（弾塑性その2）            | 10 |
| 1.8.1  | 解析対象                   | 10 |
| 1.8.2  | 解析内容                   | 11 |
| 1.8.3  | 解析結果                   | 11 |
| 1.9    | 静解析（弾塑性その2）            | 11 |
| 1.9.1  | 解析対象                   | 12 |
| 1.9.2  | 解析内容                   | 12 |
| 1.9.3  | 解析結果                   | 12 |
| 1.10   | 静解析（粘弾性）               | 13 |
| 1.10.1 | 解析対象                   | 13 |

|        |                        |    |
|--------|------------------------|----|
| 1.10.2 | 解析内容 . . . . .         | 13 |
| 1.10.3 | 解析結果 . . . . .         | 13 |
| 1.11   | 静解析（クリープ） . . . . .    | 14 |
| 1.11.1 | 解析対象 . . . . .         | 14 |
| 1.11.2 | 解析内容 . . . . .         | 14 |
| 1.11.3 | 解析結果 . . . . .         | 14 |
| 1.12   | 接触解析（その 1） . . . . .   | 14 |
| 1.12.1 | 解析対象 . . . . .         | 14 |
| 1.12.2 | 解析内容 . . . . .         | 15 |
| 1.12.3 | 解析結果 . . . . .         | 15 |
| 1.13   | 接触解析（その 2） . . . . .   | 16 |
| 1.13.1 | 解析対象 . . . . .         | 16 |
| 1.13.2 | 解析内容 . . . . .         | 17 |
| 1.13.3 | 解析結果 . . . . .         | 17 |
| 1.14   | 接触解析（その 3） . . . . .   | 17 |
| 1.14.1 | 解析対象 . . . . .         | 18 |
| 1.14.2 | 解析内容 . . . . .         | 18 |
| 1.14.3 | 解析結果 . . . . .         | 18 |
| 1.15   | 線形動解析 . . . . .        | 18 |
| 1.15.1 | 解析対象 . . . . .         | 19 |
| 1.15.2 | 解析内容 . . . . .         | 19 |
| 1.15.3 | 解析結果 . . . . .         | 19 |
| 1.16   | 非線形動解析 . . . . .       | 20 |
| 1.16.1 | 解析対象 . . . . .         | 20 |
| 1.16.2 | 解析内容 . . . . .         | 20 |
| 1.16.3 | 解析結果 . . . . .         | 20 |
| 1.17   | 非線形接触動解析 . . . . .     | 21 |
| 1.17.1 | 解析対象 . . . . .         | 21 |
| 1.17.2 | 解析内容 . . . . .         | 21 |
| 1.17.3 | 解析結果 . . . . .         | 21 |
| 1.18   | 固有値解析 . . . . .        | 22 |
| 1.18.1 | 解析対象 . . . . .         | 22 |
| 1.18.2 | 解析内容 . . . . .         | 22 |
| 1.18.3 | 解析結果 . . . . .         | 22 |
| 1.19   | 熱伝導解析 . . . . .        | 23 |
| 1.19.1 | 解析対象 . . . . .         | 23 |
| 1.19.2 | 解析内容 . . . . .         | 24 |
| 1.19.3 | 解析結果 . . . . .         | 24 |
| 1.20   | 周波数応答解析 . . . . .      | 24 |
| 1.20.1 | 解析対象 . . . . .         | 25 |
| 1.20.2 | 解析内容 . . . . .         | 25 |
| 1.20.3 | 解析結果 . . . . .         | 25 |
| 1.21   | 単純形状モデルによる検証 . . . . . | 26 |
| 1.21.1 | 弾性静解析 . . . . .        | 26 |

|        |                   |    |
|--------|-------------------|----|
| 1.21.2 | 非線形静解析            | 30 |
| 1.21.3 | 接触解析(1)           | 33 |
| 1.21.4 | 接触解析(2): ヘルツの接触問題 | 33 |
| 1.21.5 | (3) 固有値解析         | 35 |
| 1.21.6 | (4) 熱伝導解析         | 38 |
| 1.21.7 | 線形動解析             | 43 |
| 1.21.8 | 周波数応答解析           | 47 |
| 1.22   | 弾性静解析用実モデル例題      | 48 |
| 1.22.1 | 解析モデル             | 48 |
| 1.22.2 | 解析結果              | 51 |
| 1.23   | 固有値解析用実モデル例題      | 56 |
| 1.23.1 | 解析モデル             | 56 |
| 1.23.2 | 解析結果              | 57 |
| 1.24   | 熱伝導解析用実モデル例題      | 61 |
| 1.24.1 | 解析モデル             | 61 |
| 1.24.2 | 解析結果              | 63 |
| 1.25   | 線形動的解析用実モデル例題     | 64 |
| 1.25.1 | 解析モデル             | 64 |
| 1.25.2 | 解析結果              | 65 |

## 1 FrontISTR チュートリアルマニュアル

本ソフトウェアは文部科学省次世代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」プロジェクトによる成果をシーズとして、継続的に開発されている並列有限要素解析プログラムです。本ソフトウェアを無償または営利目的でご使用になる場合、「MITライセンス」をご了承頂くことが前提となります。



| 項目       | 説明  |
|----------|---|
| ソフトウェア名称 | FrontISTR   |
| バージョン    | 5.0   |
| ライセンス形態  | MIT License   |
| 問い合わせ先   | 一般社団法人 FrontISTR Commons 東京都文京区弥生二丁目 11 番 16 号 (東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構内) E-mail : support@frontistr.com |

### 1.1 マニュアルリスト

- イントロダクション

- インストールマニュアル
- 理論マニュアル
- 解析マニュアル
- チュートリアル

本マニュアルでは、大規模並列 FEM 非線形構造解析プログラム FrontISTR の例題とチュートリアルの実行方法を説明します。

## 1.2 本マニュアルの記載内容

- PDF
- チュートリアル:
  - 静解析 (弾性)
  - 静解析 (弾性、並列)
  - 静解析 (超弾性 1)
  - 静解析 (超弾性 2)
  - 静解析 (弾塑性 1)
  - 静解析 (弾塑性 2)
  - 静解析 (粘弾性)
  - 静解析 (クリープ)
  - 接触解析 (1)
  - 接触解析 (2)
  - 接触解析 (3)
  - 線形動解析
  - 非線形動解析
  - 非線形接触動解析
  - 固有値解析
  - 热伝導解析
  - 周波数応答解析
- 例題:
  - 単純形状モデルによる検証
  - 弹性静解析用実モデル例題
  - 固有値解析用実モデル例題
  - 热伝導解析用実モデル例題
  - 線形動的解析用実モデル例題

## 1.3 静解析（弾性）

本解析の実施には、tutorial /01\_elastic\_hinge のデータを用います。

### 1.3.1 解析対象

解析対象はヒンジ部品で、形状を図 4.1.1 に、メッシュデータを図 4.1.2 に示します。メッシュには四面体 2 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 49,871、節点数 84,056 です。

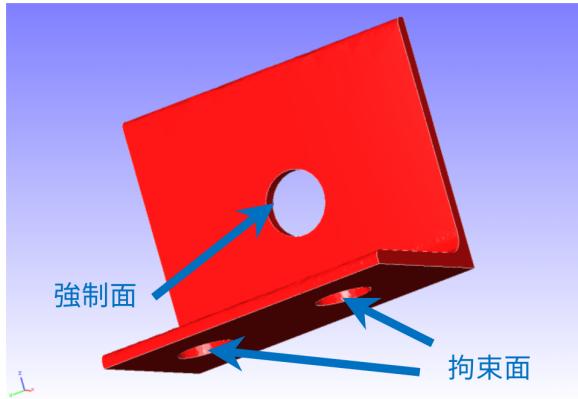


図 4.1.1 ヒンジ部品の形状

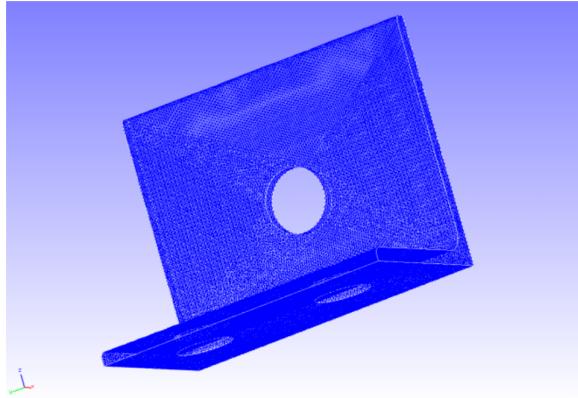


図 4.1.2 ヒンジ部品のメッシュデータ

### 1.3.2 解析内容

図 4.1.1 に示す拘束面の変位を拘束し、強制面に集中荷重を負荷する応力解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.3.3 解析結果

ミーゼス応力のコンター図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.1.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

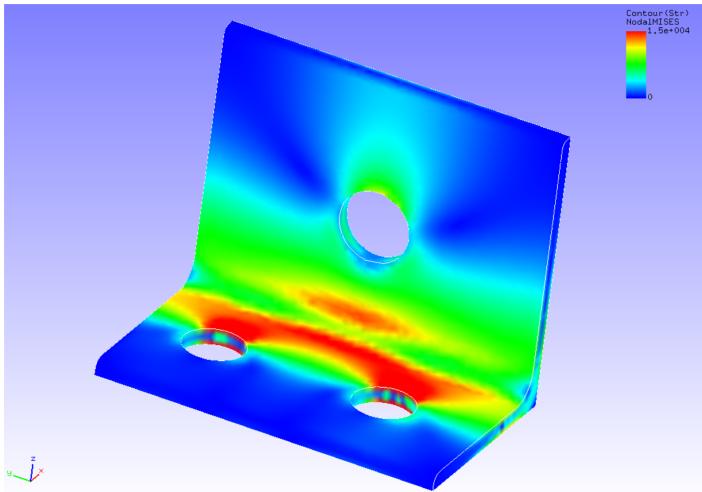


図 4.1.3 ミーゼス応力の解析結果

## 1.4 静解析（弾性、並列）

4.1 節の解析を 4 並列で実施するには、`tutorial/02_elastic_hinge_parallel` のデータを用います。

## 1.5 静解析（超弾性その 1）

本解析の実施には、`tutorial/03_hyperelastic_cylinder` のデータを用います。

### 1.5.1 解析対象

解析対象は丸棒の 1/8 モデルで、形状を図 4.3.1 に、メッシュデータを図 4.3.2 に示します。メッシュには六面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 432、節点数 629 です。

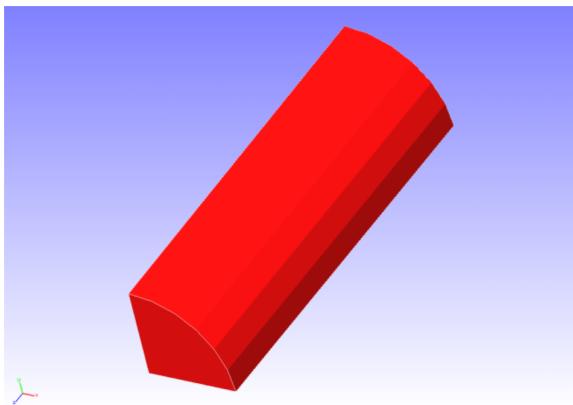


図 4.3.1 丸棒 (1/8 モデル) の形状

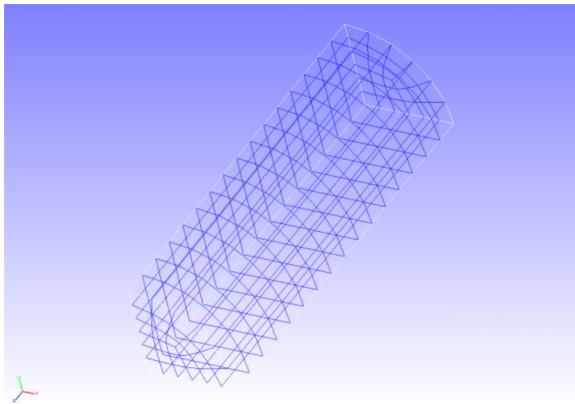


図 4.3.2 丸棒 (1/8 モデル) のメッシュデータ

### 1.5.2 解析内容

丸棒に軸方向の引張変位を与える応力解析を実施します。超弾性の材料構成式には Mooney-Rivlin モデルを用います。解析制御データを以下に示します。

### 1.5.3 解析結果

5 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.3.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

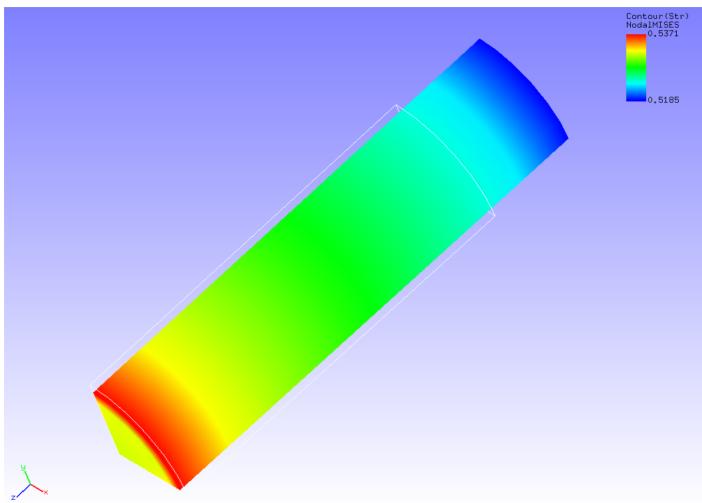


図 4.3.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.6 静解析（超弾性その 2）

本解析の実施には、tutorial/04\_hyperelastic\_spring のデータを用います。

### 1.6.1 解析対象

解析対象はスプリングで、形状を図 4.4.1 に、メッシュデータを図 4.4.2 に示します。メッシュには四面体 2 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 46,454、節点数 78,771 です。

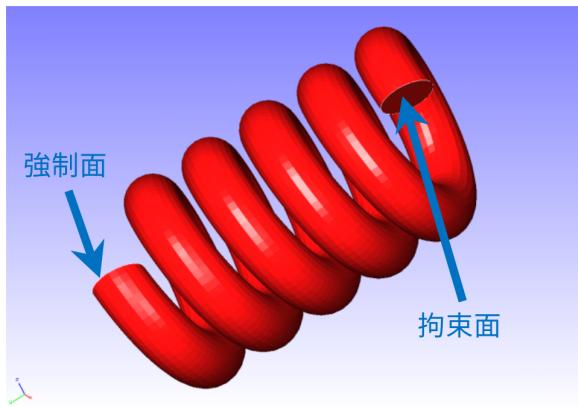


図 4.4.1 スプリングの形状

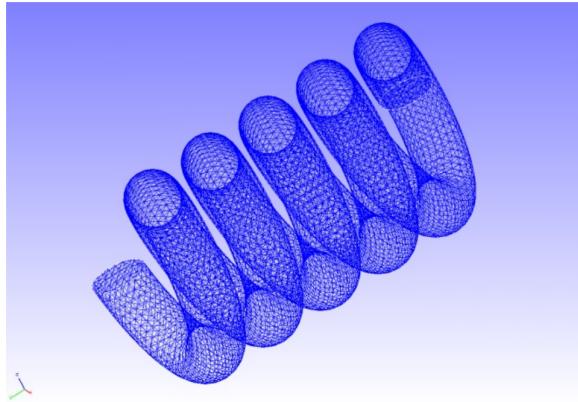


図 4.4.2 スプリングのメッシュデータ

### 1.6.2 解析内容

図 4.4.1 に示す拘束面の変位を拘束し、強制面に変位を与える応力解析を実施します。超弾性の材料構成式には Arruda-Boyce モデルを用います。解析制御データを以下に示します。

### 1.6.3 解析結果

変位のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.4.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

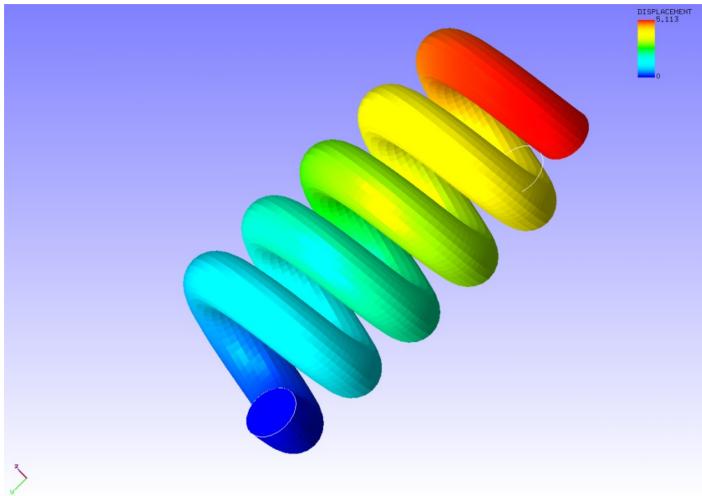


図 4.4.3 変形および変位の解析結果

## 1.7 静解析（弾塑性その 1）

本解析の実施には、tutorial /05\_plastic\_cylinder のデータを用います。

### 1.7.1 解析対象

解析対象は、4.3 節の静解析（超弾性その 1）と同一の丸棒 1/8 モデルです。

### 1.7.2 解析内容

塑性変形による丸棒の Necking 現象を解析します。降伏関数には Mises モデルを用います。解析制御データを以下に示します。

### 1.7.3 解析結果

35 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAPI\_PrePost で作成して図 4.5.1 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

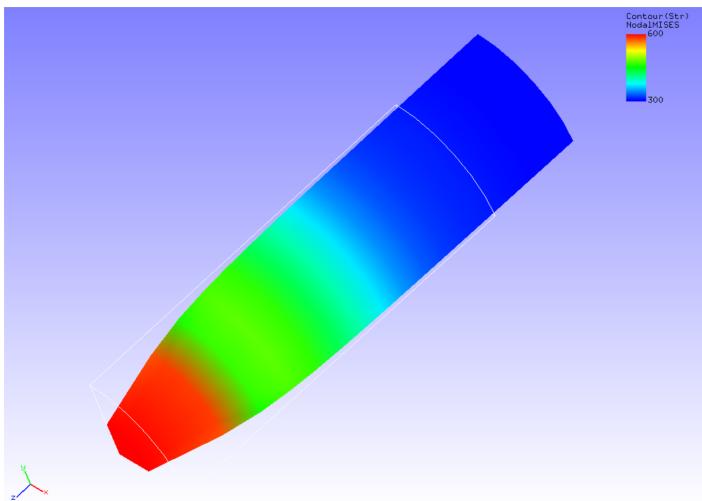


図 4.5.1 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.8 静解析（弾塑性その 2）

本解析の実施には、tutorial /06\_plastic\_can のデータを用います。

### 1.8.1 解析対象

解析対象は容器の 1/2 モデルで、形状を図 4.6.1 に、メッシュデータを図 4.6.2 に示します。メッシュには四面体 2 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 7,236、節点数 14,119 です。

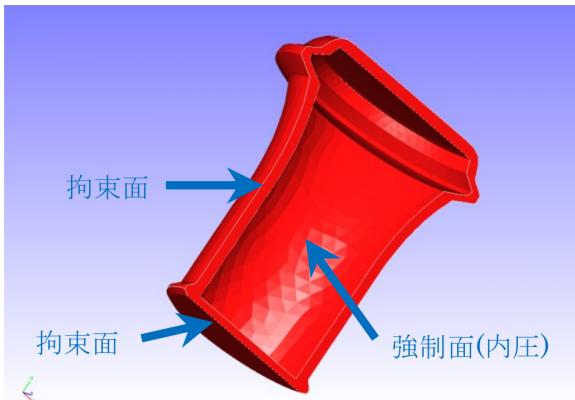


図 4.6.1 容器の形状

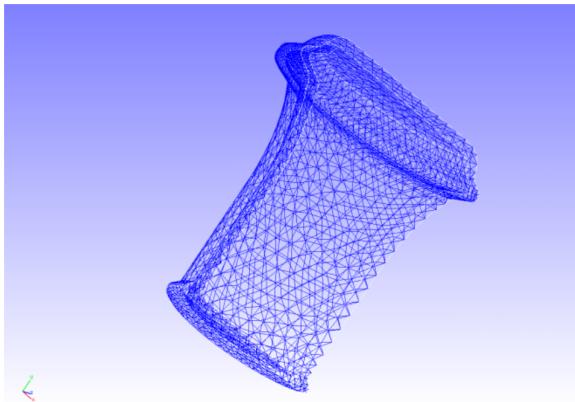


図 4.6.2 容器のメッシュデータ

### 1.8.2 解析内容

図 4.6.1 に示す拘束面の変位を拘束し、容器内部を強制面とし分布荷重を負荷する応力解析を実施します。降伏関数には Drucker-Prager モデルを用います。解析制御データを以下に示します。

### 1.8.3 解析結果

10 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.6.3 に示します。変形倍率を 30 としています。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

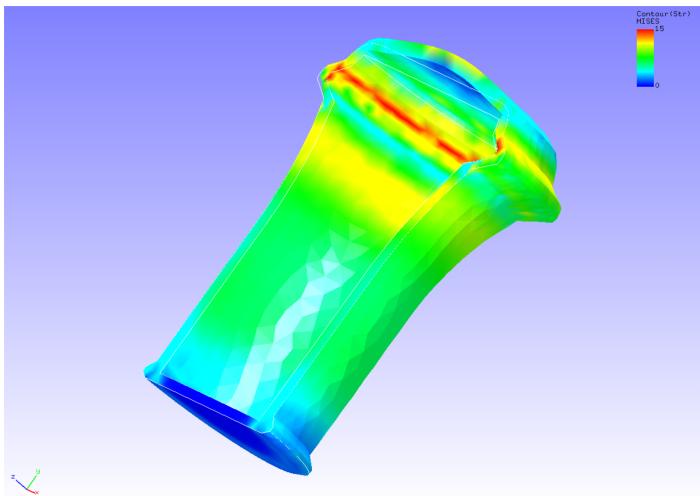


図 4.6.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.9 静解析（弾塑性その 2）

本解析の実施には、tutorial/06\_plastic\_can のデータを用います。

### 1.9.1 解析対象

解析対象は容器の 1/2 モデルで、形状を図 4.6.1 に、メッシュデータを図 4.6.2 に示します。メッシュには四面体 2 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 7,236、節点数 14,119 です。

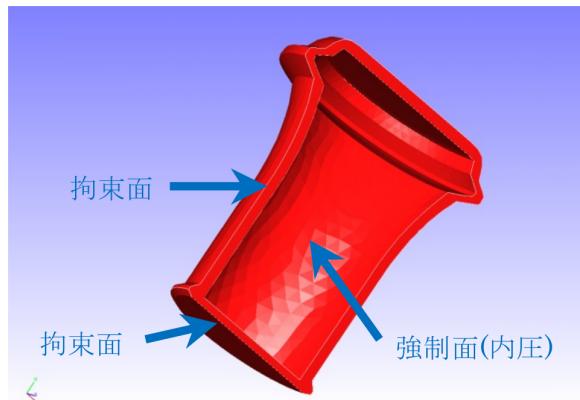


図 4.6.1 容器の形状

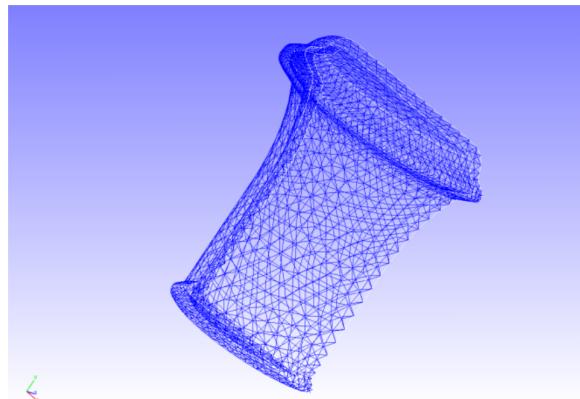


図 4.6.2 容器のメッシュデータ

### 1.9.2 解析内容

図 4.6.1 に示す拘束面の変位を拘束し、容器内部を強制面とし分布荷重を負荷する応力解析を実施します。降伏関数には Drucker-Prager モデルを用います。解析制御データを以下に示します。

### 1.9.3 解析結果

10 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVCAP\_PrePost で作成して図 4.6.3 に示します。変形倍率を 30 としています。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

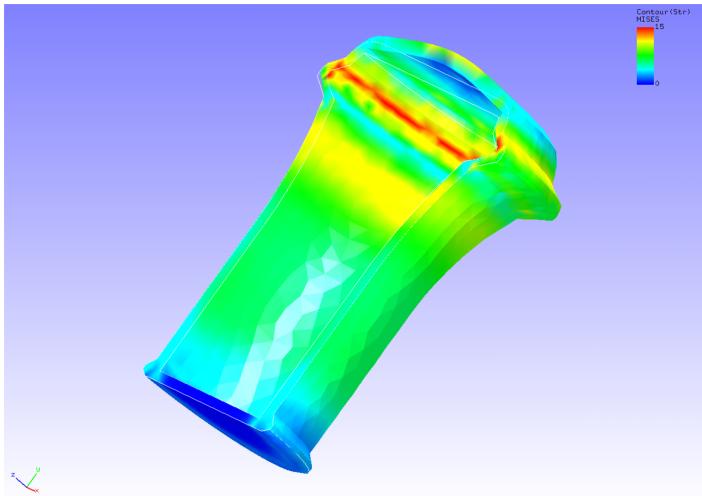


図 4.6.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.10 静解析（粘弾性）

本解析の実施には、tutorial /07\_viscoelastic\_cylinder のデータを用います。

### 1.10.1 解析対象

解析対象は、4.3 節の静解析（超弾性その 1）と同一の丸棒 1/8 モデルです。

### 1.10.2 解析内容

丸棒に軸方向の引張変位を与え、応力緩和解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.10.3 解析結果

ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.7.1 に示します。2 秒後（10 ステップ目）の解析結果です。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

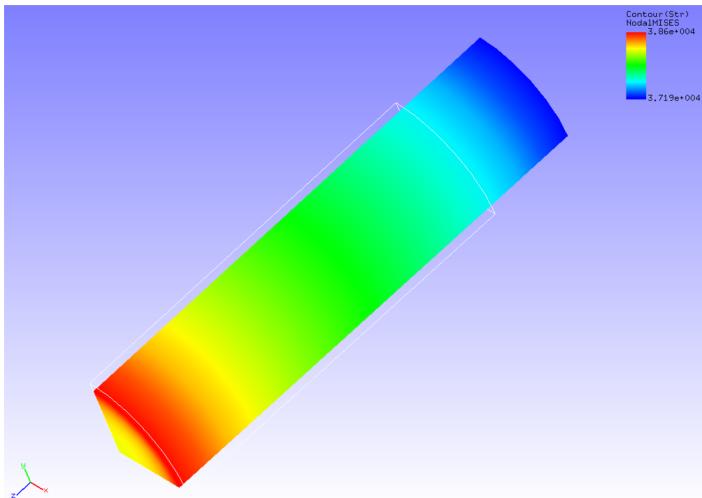


図 4.7.1 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.11 静解析（クリープ）

本解析の実施には、tutorial /08\_creep\_cylinder のデータを用います。

### 1.11.1 解析対象

解析対象は、4.3 節の静解析（超弾性その 1）と同一の丸棒 1/8 モデルです。

### 1.11.2 解析内容

丸棒に軸方向の引張変位を与え、クリープ挙動解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.11.3 解析結果

5 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.8.1 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

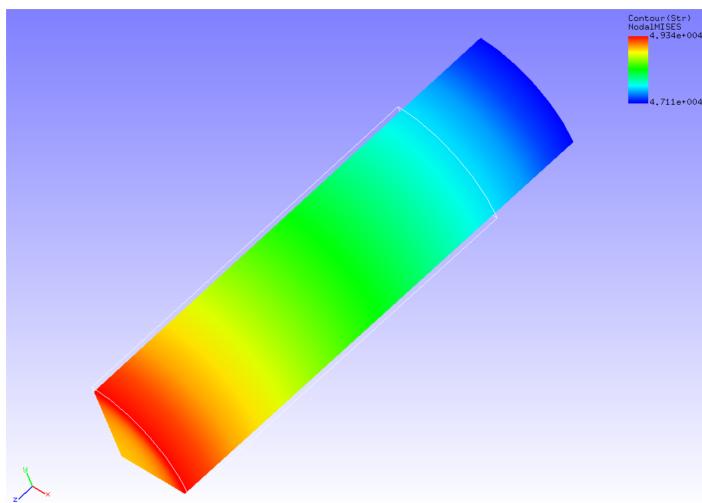


図 4.8.1 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.12 接触解析（その 1）

本解析の実施には、tutorial /09\_contact\_hertz のデータを用います。

### 1.12.1 解析対象

解析は Herz 接触問題で、解析対象の形状を図 4.9.1 に、メッシュデータを図 4.9.2 に示します。メッシュには六面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 168、節点数 408 です。

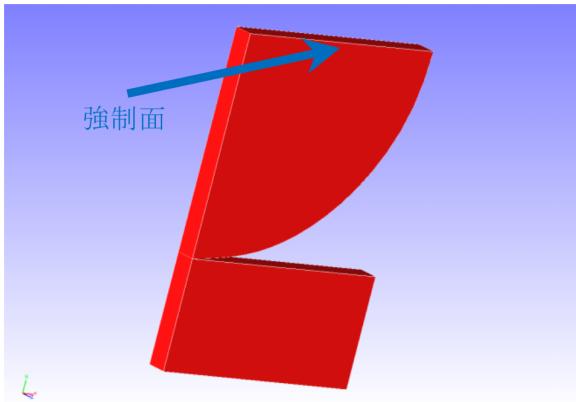


図 4.9.1 解析対象の形状

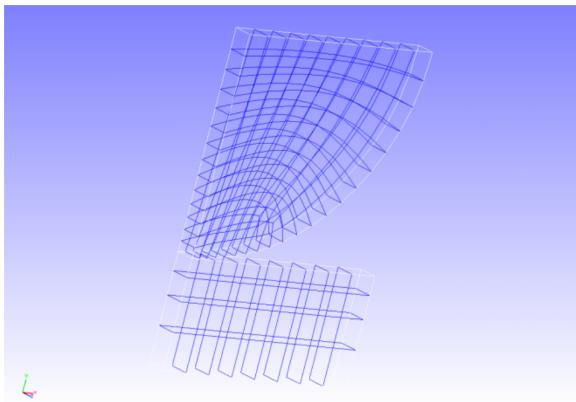


図 4.9.2 解析対象のメッシュデータ

### 1.12.2 解析内容

円板の  $1/4$  モデルの上面に圧縮方向の強制変位を与える接触解析を拡張ラグランジュ乗数法で実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.12.3 解析結果

5 サブステップ目の解析結果について、y 方向変位のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.9.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

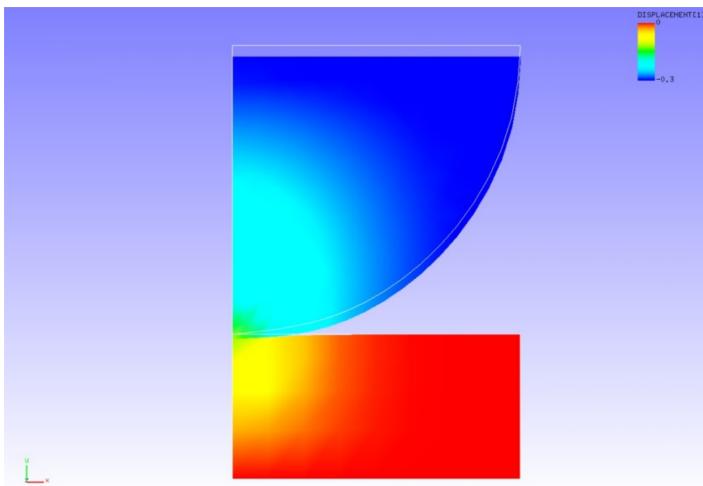


図 4.9.3 変形および y 方向変位の解析結果

## 1.13 接触解析（その 2）

本解析の実施には、tutorial/10\_contact\_2tubes のデータを用います。

### 1.13.1 解析対象

解析は円筒の押し込み問題で、解析対象の形状を図 4.10.1 に、メッシュデータを図 4.10.2 に示します。メッシュには六面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 2,888、節点数 4,000 です。

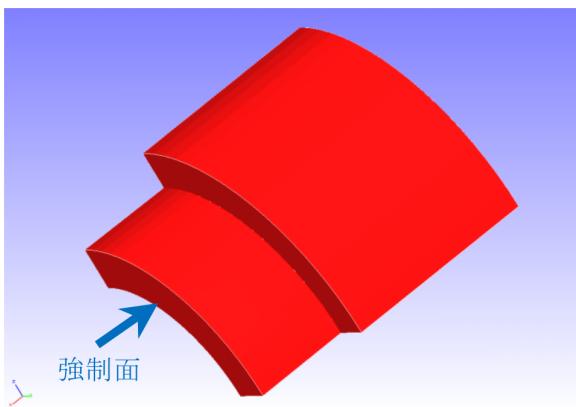


図 4.10.1 解析対象の形状

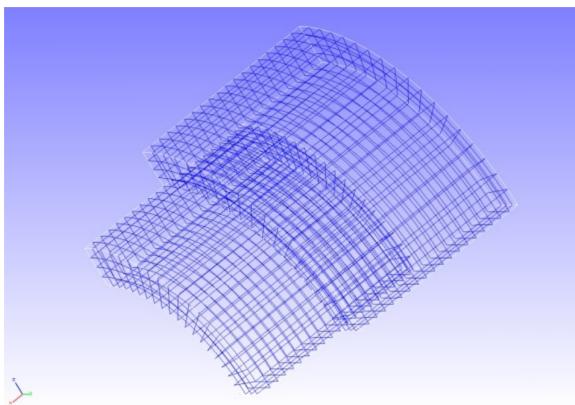


図 4.10.2 解析対象のメッシュデータ

### 1.13.2 解析内容

図 4.10.1 に示す強制面に押し込み方向の強制変位を与える接触解析をラグランジュ乗数法で実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.13.3 解析結果

4 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.10.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

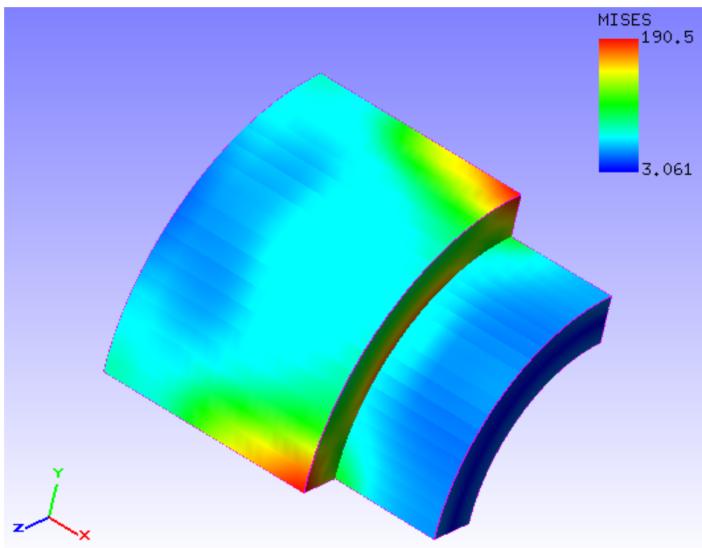


図 4.10.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.14 接触解析（その3）

本解析の実施には、tutorial/11\_contact\_2beam のデータを用います。

### 1.14.1 解析対象

解析はふたつの梁の接触問題で、解析モデルの概要を図 4.11.1 に示します。メッシュには六面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 80、節点数 252 です。

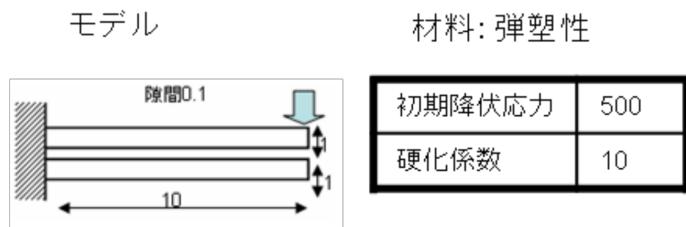


図 4.11.1 解析モデルの概要

### 1.14.2 解析内容

上側の梁の先端面に強制変位を与える接触解析をラグランジュ乗数法で実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.14.3 解析結果

100 サブステップ目の解析結果について、ミーゼス応力のコンターを付加した変形図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.11.2 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

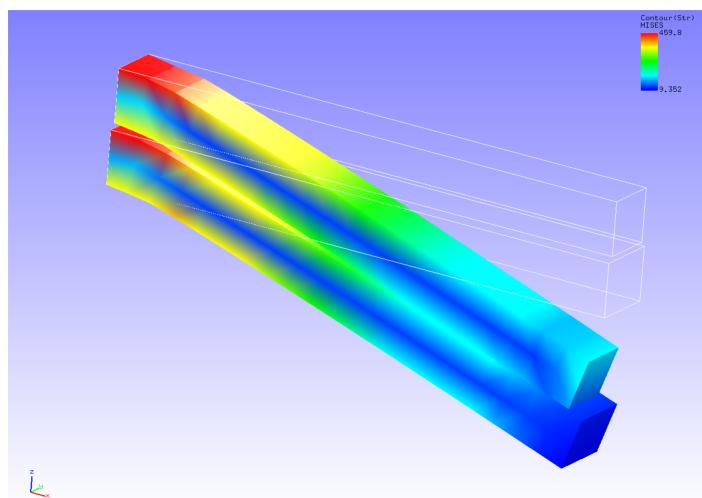


図 4.11.2 変形およびミーゼス応力の解析結果

## 1.15 線形動解析

本解析の実施には、tutorial /12\_dynamic\_beam のデータを用います。

### 1.15.1 解析対象

解析対象は片持ち梁で、形状を図 4.12.1 に、メッシュデータを図 4.12.2 に示します。メッシュには四面体 2 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 240、節点数 525 です。

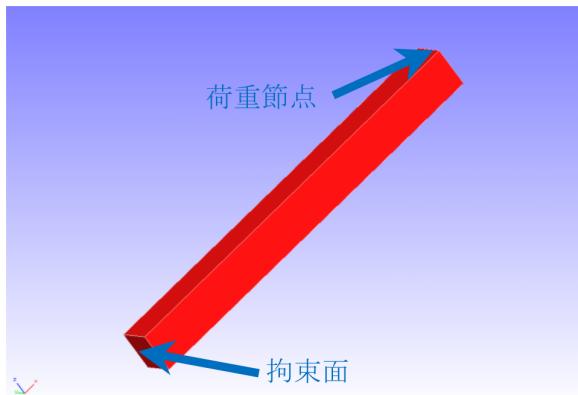


図 4.12.1 片持ち梁の形状

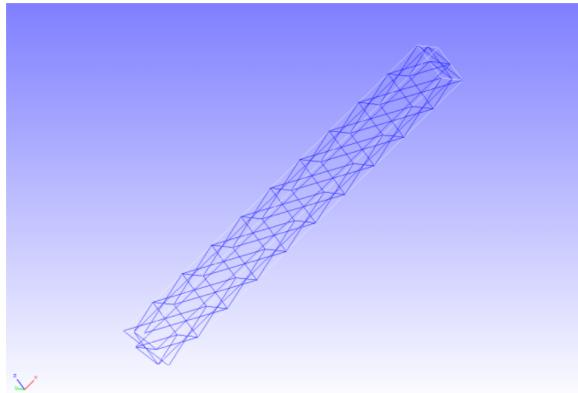


図 4.12.2 片持ち梁のメッシュデータ

### 1.15.2 解析内容

図 4.12.1 に示す拘束面の変位を拘束し、荷重節点に集中荷重を負荷した後の線形動解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.15.3 解析結果

解析制御データで指定したモニタリング節点（荷重節点、節点番号 3121）の変位の時系列表示を Microsoft Excel で作成して図 4.12.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、モニタリング節点の変位出力ファイル (dyna\_disp\_p1.out) の一部を以下に示します。

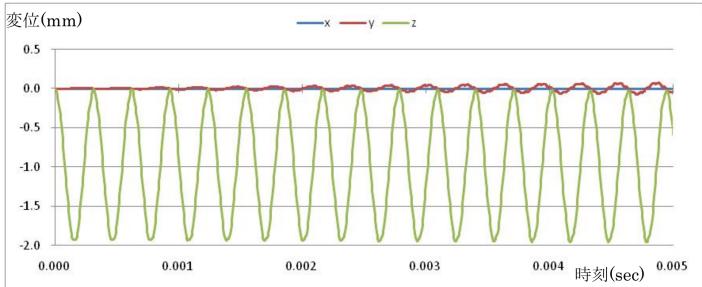


図 4.12.3 モニタリング節点の変位時系列

## 1.16 非線形動解析

本解析の実施には、tutorial /13\_dynamic\_beam\_nonlinear のデータを用います。

### 1.16.1 解析対象

解析対象は、4.12 節の線形動解析と同一の片持ち梁です。

### 1.16.2 解析内容

図 4.12.1 に示す拘束面の変位を拘束し、荷重節点に集中荷重を負荷した後の非線形動解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.16.3 解析結果

解析制御データで指定したモニタリング節点（荷重節点、節点番号 3121）の変位の時系列表示を Microsoft Excel で作成して図 4.13.1 に示します。また、解析結果の数値データとして、モニタリング節点の変位出力ファイル (dyna\_disp\_p1.out) の一部を以下に示します。

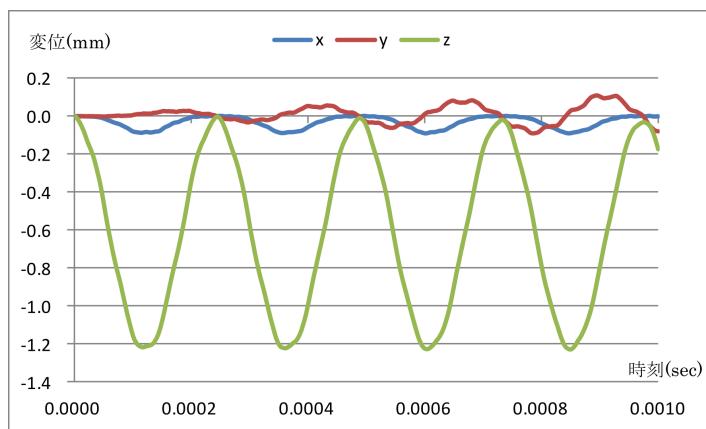


図 4.13.1 モニタリング節点の変位時系列

## 1.17 非線形接触動解析

本解析の実施には、tutorial /14\_dynamic\_plate\_contact のデータを用います。

### 1.17.1 解析対象

解析対象は床面への角材の落下衝撃解析で、形状を図 4.14.1 に、メッシュデータを図 4.14.2 に示します。メッシュには六面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 8,232、節点数 10,712 です。

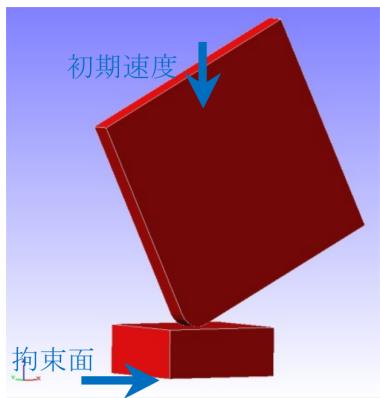


図 4.14.1 床面と角材の形状

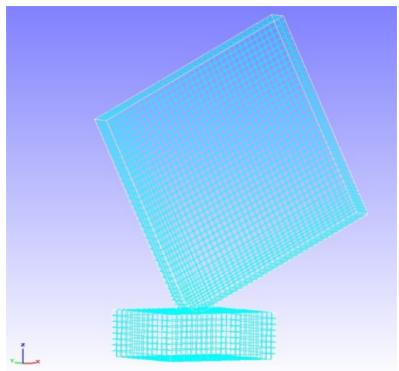


図 4.14.2 床面と角材のメッシュデータ

### 1.17.2 解析内容

解析対象の角材に初期速度 4427mm/s を設定し、接触動解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.17.3 解析結果

落下衝撃時のミーゼス応力のコンター図を図 4.14.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、モニタリング節点のエネルギー出力ファイル (dyna\_energy.txt) の一部を以下に示します。

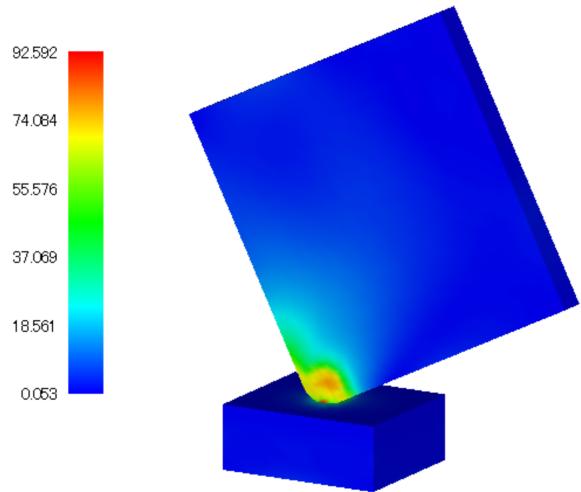


図 4.14.3 落下衝撃時のミーゼス応力

## 1.18 固有値解析

本解析の実施には、tutorial /15\_eigen\_spring のデータを用います。

### 1.18.1 解析対象

解析対象は、4.4 節の静解析（超弾性その 2）と同一のスプリングです。

### 1.18.2 解析内容

図 4.4.1 に示す拘束面の変位を拘束し、5 次までの固有値解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.18.3 解析結果

解析結果データファイル spring.res.0.3 を用いて、3 次の振動モード（スプリングの y 方向圧縮伸長）を REVO-CAP\_PrePost で作成して図 4.15.1 に示します。変形倍率を 1000 としています。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルに出力された固有振動数リストを以下に示します。

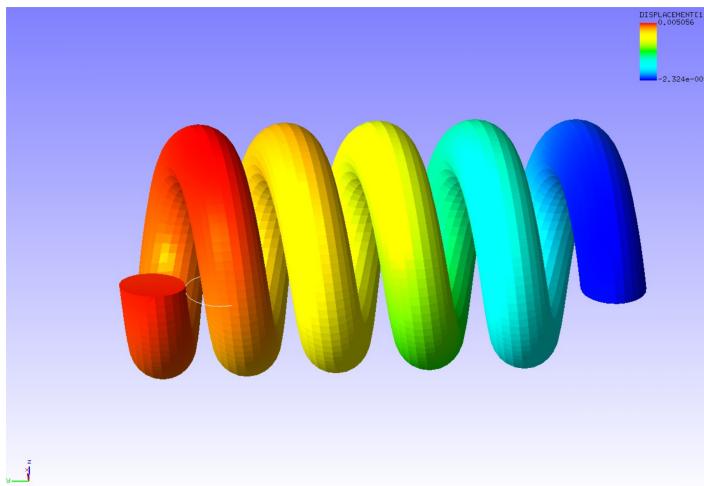


図 4.15.1 スプリングの 3 次振動モード

## 1.19 热伝導解析

本解析の実施には、tutorial /16\_heat\_block のデータを用います。

### 1.19.1 解析対象

解析対象は穴あきブロックで、形状を図 4.16.1 に、メッシュデータを図 4.16.2 に示します。メッシュには六面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 32,160、節点数 37,386 です。

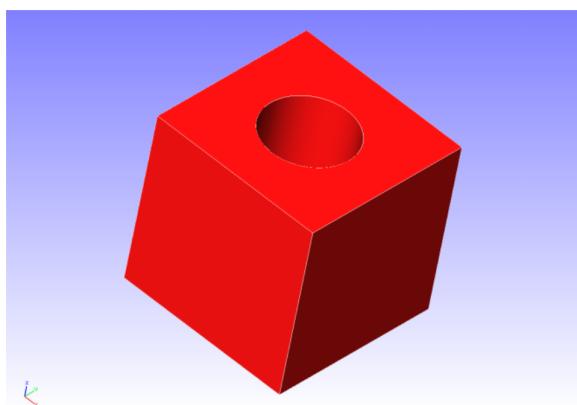


図 4.16.1 穴あきブロックの形状

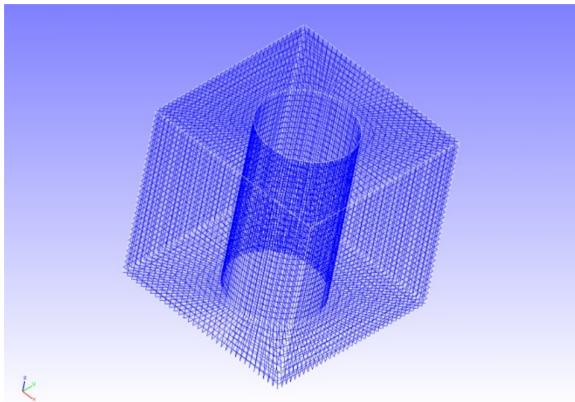


図 4.16.2 穴あきブロックのメッシュデータ

### 1.19.2 解析内容

解析対象の円筒状内面に熱源を与える定常熱伝導解析を実施します。解析制御データを以下に示します。

### 1.19.3 解析結果

温度のコンター図を REVOCAP\_PrePost で作成して図 4.16.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

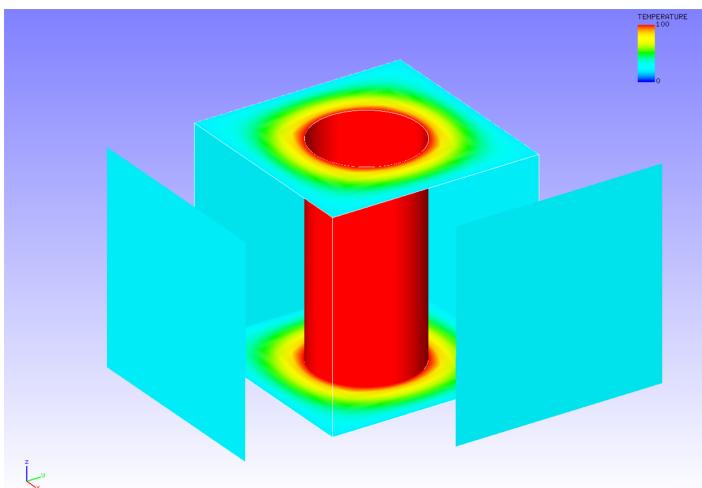


図 4.16.3 溫度の解析結果

## 1.20 周波数応答解析

本解析の実施には、tutorial/17\_freq\_beam のデータを用います。解析手順として、まず固有値解析用の全体制御データ hecmw\_ctrl\_eigen.dat を hecmw\_ctrl.dat と変更し固有値解析を行い、周波数応答解析用の全体制御データ hecmw\_ctrl\_freq.dat を hecmw\_ctrl.dat、固有値解析の解析結果ログファイル 0.log を eigen\_0.log（周波数応答解析用の解析制御データ内で指定されている）と変更し、周波数応答解析を行います。

### 1.20.1 解析対象

解析対象は片持ち梁で、形状を図 4.17.1 に、メッシュデータを図 4.17.2 に示します。メッシュには四面体 1 次要素を用い、メッシュ規模は要素数 126、節点数 55 です。

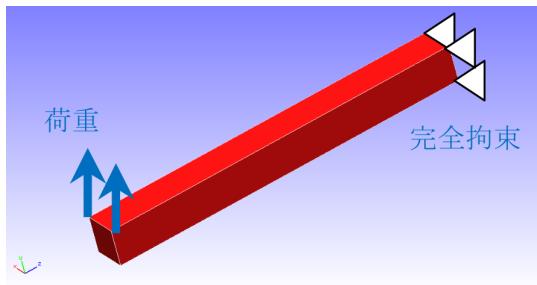


図 4.17.1 片持ち梁の形状

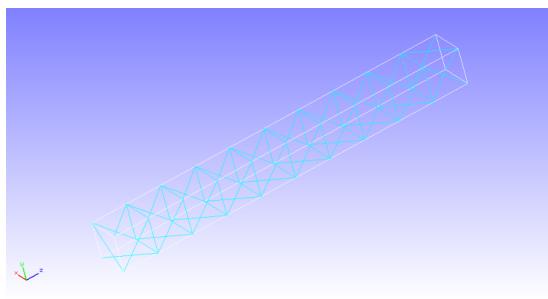


図 4.17.2 片持ち梁のメッシュデータ

### 1.20.2 解析内容

解析対象の片持ち梁の端部を完全拘束し、反対側の端部の 2 節点に集中荷重を加えた周波数応答解析を実施します。手順として同じ境界条件での 10 次までの固有値解析を実施した後、5 次までの固有値、固有ベクトルを使い解析を実施します。周波数応答解析用の解析制御データを以下に示します。

### 1.20.3 解析結果

解析制御データで指定したモニタリング節点（節点番号 1）の周波数と変位振幅の関係を Microsoft Excel で作成して図 4.17.3 に示します。また、解析結果の数値データとして、解析結果ログファイルの一部を以下に示します。

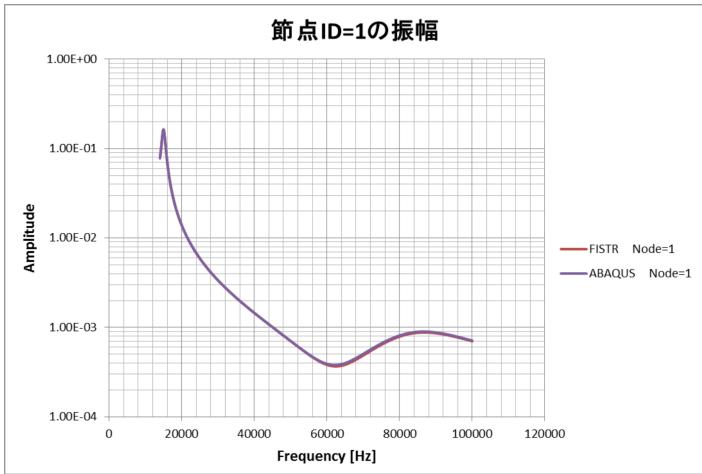


図 4.17.3 モニタリング節点の周波数と変位振幅の関係

## 1.21 単純形状モデルによる検証

### 1.21.1 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 と同じ荷重条件で、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。

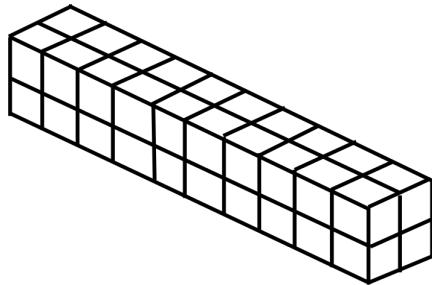
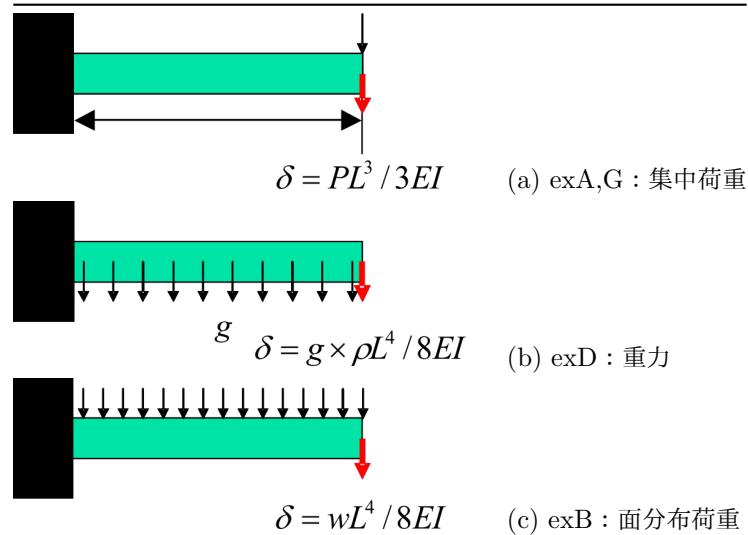
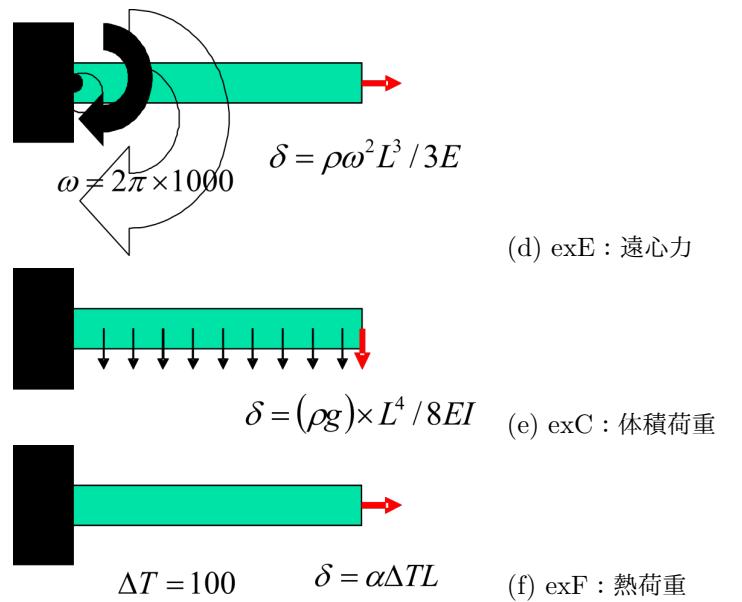


図 9.1.1 片持ち梁のメッシュ分割例（六面体要素）





| 項目        | 値  |
|-----------|--|
| ヤング率      | $E = 4000.0 \text{ kgf/mm}^2$                              |
| 長さ        | $L = 10.0 \text{ mm}$                                      |
| ポアソン比     | $\nu = 0.3$  |
| 断面積       | $A = 1.0 \text{ mm}^2$                                     |
| 質量密度      | $\rho = 8.0102 \times 10^{-10} \text{ kg s}^2/\text{mm}^4$ |
| 断面二次モーメント | $I = 1.0/12.0 \text{ mm}^4$                                |
| 重力加速度     | $g = 9800.0 \text{ mm/s}^2$                                |
| 線熱膨張率     | $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}$                              |

表 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 : $\delta_{max} = -1.000$ |        |           | 備考               |
|------|-----|-------------------------------|--------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN                       | ABAQUS | FrontISTR |                  |
| A231 | 40  | -0.338                        | -0.371 | -0.371    | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| A232 | 40  | -0.942                        | -1.002 | -1.002    | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| A241 | 20  | -0.720                        | -0.711 | -0.711    | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| A242 | 20  | -0.910                        | -1.002 | -1.002    | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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    | 220 節点           |
| A731 | 40  | -                             | -      | -0.991    | 33 節点 / 直接法      |

| ケース名 | 要素数 | 予測値 : $\delta_{max} = -1.000$ |   |        | 備考          |
|------|-----|-------------------------------|---|--------|-------------|
| 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 : $\delta_{max} = -3.750$ |        |           | 備考               |
|------|-----|-------------------------------|--------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN                       | ABAQUS | FrontISTR |                  |
| B231 | 40  | -1.281                        | -1.403 | -1.403    | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| B232 | 40  | -3.579                        | -3.763 | -3.763    | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| B241 | 20  | -3.198                        | -2.680 | -2.680    | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| B242 | 20  | -3.426                        | -3.765 | -3.765    | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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  | -0.3717                       | -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    | 220 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 : $\delta_{max} = -2.944^{-5}$ |           |           | 備考               |
|------|-----|------------------------------------|-----------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN                            | ABAQUS    | FrontISTR |                  |
| C231 | 40  | -                                  | -1.101e-5 | -1.101e-5 | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| C232 | 40  | -                                  | -2.951e-5 | -2.951e-5 | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| C241 | 20  | -                                  | -2.102e-5 | -2.102e-5 | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| C242 | 20  | -                                  | -2.953e-5 | -2.953e-5 | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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 | 220 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 : $\delta_{max} = -2.944^{-5}$ |        |           | 備考 |
|------|-----|------------------------------------|--------|-----------|----|
|      |     | NASTRAN                            | ABAQUS | FrontISTR |    |
|      |     |                                    | 28     |           |    |

| ケース名 | 要素数 | 予測値 : $\delta_{max} = -2.944^{-5}$ |           |           | 備考               |
|------|-----|------------------------------------|-----------|-----------|------------------|
| D231 | 40  | -1.101e-5                          | -1.101e-5 | -1.101e-5 | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| D232 | 40  | -2.805e-5                          | -2.951e-5 | -2.951e-5 | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| D241 | 20  | -2.508e-5                          | -2.102e-5 | -2.102e-5 | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| D242 | 20  | -2.684e-5                          | -2.953e-5 | -2.953e-5 | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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 | 220 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 : $\delta_{max} = 2.635^{-3}$ |          |           | 備考               |
|------|-----|-----------------------------------|----------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN                           | ABAQUS   | FrontISTR |                  |
| E231 | 40  | 2.410e-3                          | 2.616e-3 | 2.650e-3  | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| E232 | 40  | 2.447e-3                          | 2.627e-3 | 2.628e-3  | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| E241 | 20  | 2.386e-3                          | 2.622e-3 | 2.624e-3  | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| E242 | 20  | 2.387e-3                          | 2.627e-3 | 2.629e-3  | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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  | 220 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 : 热応力荷重問題の検証結果

| ケース名 | 要素数 | 予測値 : $\delta_{max} = 1.000^{-2}$ |          |           | 備考               |
|------|-----|-----------------------------------|----------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN                           | ABAQUS   | FrontISTR |                  |
| F231 | 40  | -                                 | 1.016e-2 | 1.007e-2  | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| F232 | 40  | -                                 | 1.007e-2 | 1.007e-2  | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| F241 | 20  | -                                 | 1.010e-2 | 1.010e-2  | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| F242 | 20  | -                                 | 1.006e-2 | 1.006e-2  | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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            |

| ケース名 | 要素数 | 予測値 : $\delta_{max} = 1.000^{-2}$ |          |          | 備考     |
|------|-----|-----------------------------------|----------|----------|--------|
| 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 | 220 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 : $\delta_{max} = -1.000$ |        |           | 備考               |
|------|-----|-------------------------------|--------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN                       | ABAQUS | FrontISTR |                  |
| G231 | 40  | -0.338                        | -0.371 | -0.371    | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| G232 | 40  | -0.942                        | -1.002 | -1.002    | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| G241 | 20  | -0.720                        | -0.711 | -0.711    | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| G242 | 20  | -0.910                        | -1.002 | -1.002    | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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    | 220 節点           |
| G731 | 40  | -                             | -      | -0.991    | 33 節点 / 直接法      |
| G741 | 20  | -                             | -      | -0.996    | 33 節点 / 直接法      |

## 1.21.2 非線形静解析

### 1.21.2.1 (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 | -   | -   | -   | -   | -   | 30  | -   | -   | -   | -   | -   |

| 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   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 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 |

### 1.21.2.2 (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。

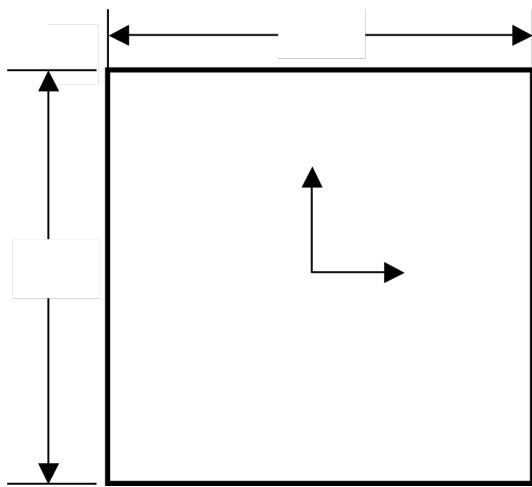


図 1 弾塑性変形解析モデル

図 9.1.4 弾塑性変形解析モデル

#### (1) 検証条件

| 項目      | 値                        |
|---------|--------------------------|
| 材料      | Mises 弾塑性材               |
| ヤング率    | $E = 250 GPa$            |
| ポアソン比   | $\nu = 0.25$             |
| 初期降伏応力  | $5 MPa$                  |
| 初期降伏ひずみ | $0.25 \times 10^{-4}$    |
| 等方硬化係数  | $H_i = 0$ または $62.5 GPa$ |

#### (2) 境界条件

| 項目     | 境界条件           | 値                                |
|--------|----------------|----------------------------------|
| 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 ( $\times 10^{-4}$ ) [ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ] |  | 相当応力 (MPa) [ $H_i = 0 H_k = 0; H_i = 62.5 H_k = 0$ ] |
|--|--|--|
| 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 ( $\times 10^{-4}$ ) [ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ] |  | 相当応力 (MPa) [ $H_i = 0 H_k = 0; H_i = 62.5 H_k = 0$ ]) |
|--|--|---|
| $\varepsilon_x$  |  | $\varepsilon_y$                                       |
| 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 (5.673 (-2.50%))                    |

### 1.21.3 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。

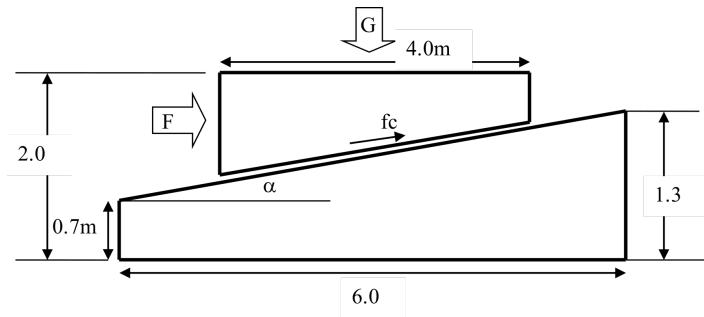


図 2 接触解析モデル

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。

| $\mu$ | 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    |

### 1.21.4 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  $R=8\text{mm}$  とし、変形体のヤング率  $E$  及びポアソン  $\nu$  比はそれぞれ  $1100\text{Mpa}$  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。

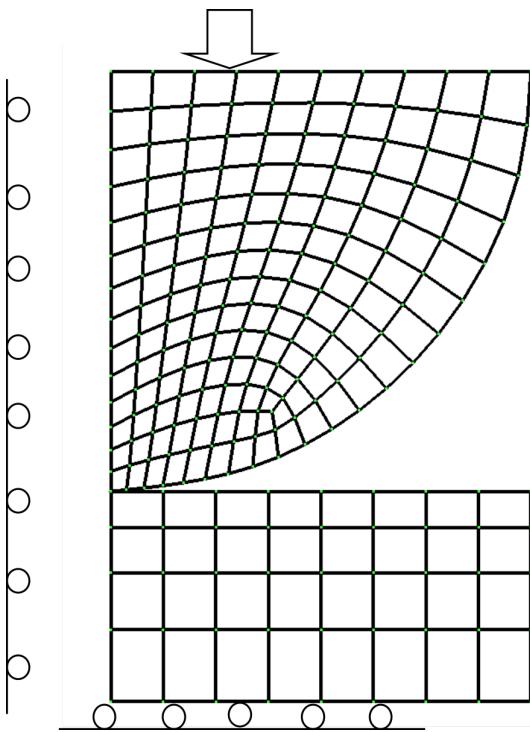


図 9.1.6 ヘルツ接触問題解析モデル

#### 1.21.4.1 (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

#### 1.21.4.2 (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

$$\tau_{\max} = 14.2$$

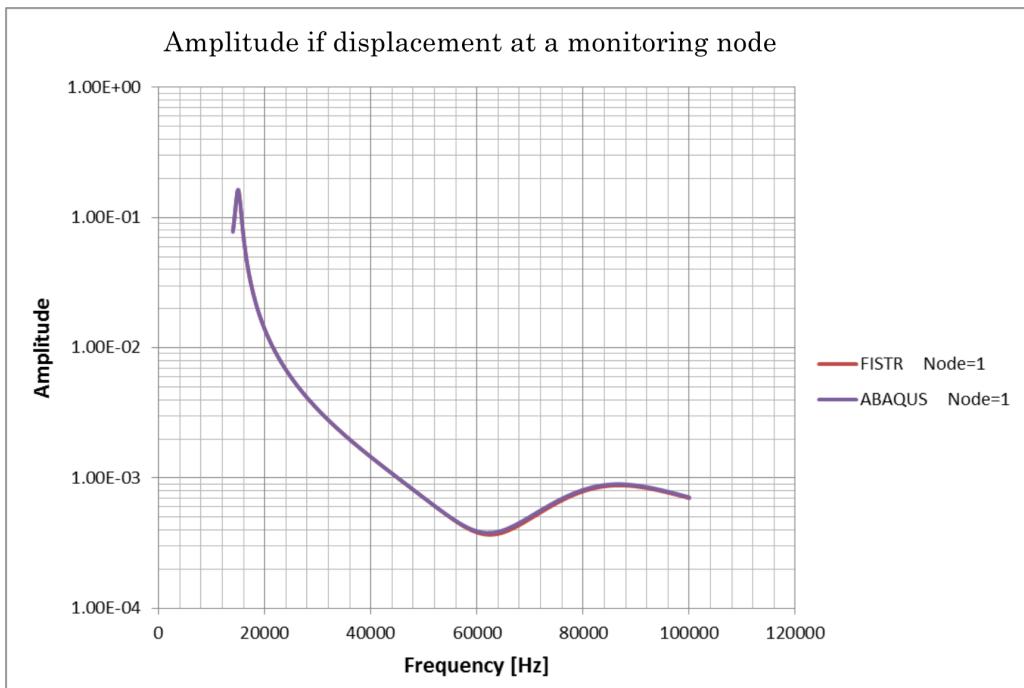


図 3 接触点の等価節点力分布

となる。これに対して、

$$\tau_{\max} = 15.6$$

の計算結果が得られた。

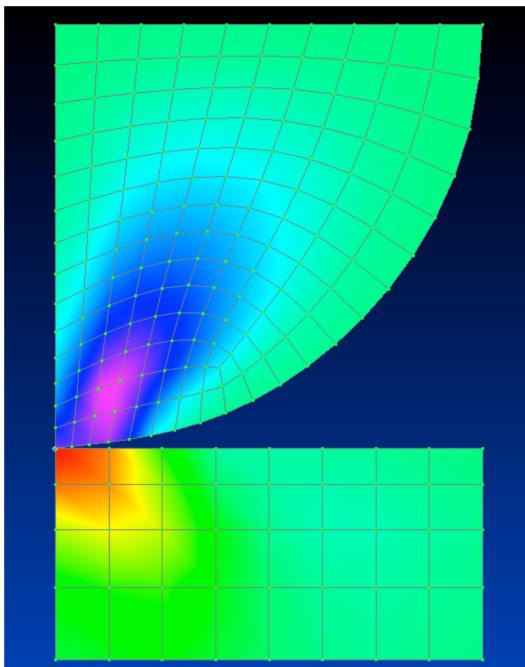


図 9.1.8せん断応力分布（最大値=15.6）

### 1.21.5 (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

$$n_1 = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{gEI}{\omega}}$$

第 2 次

$$n_2 = \frac{4.694^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{gEI}{\omega}}$$

第 3 次

$$n_3 = \frac{7.855^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{gEI}{\omega}}$$

検証モデルの特性値は

| 項目       | 値   |
|----------|---|
| $I$      | 10.0mm <sup>4</sup>                         |
| $E$      | 4000.0kgf/mm <sup>2</sup>                   |
| $l$      | 1.0/12.0mm <sup>4</sup>                     |
| $\omega$ | 7.85 * 10 <sup>-6</sup> kgf/mm <sup>3</sup> |
| $g$      | 9800.0mm/sec <sup>2</sup>                   |

である。従って 3 次までの固有値は次のとおりである。

| モード番号 | 値       |
|-------|---------|
| $n_1$ | 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 / 平面応力状問題  |
| J232 | 40  | 3.596e3          | 3.593e3   | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| J241 | 20  | 3.586e3          | 4.245e3   | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| J242 | 20  | 3.590e3          | 3.587e3   | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| J341 | 240 | 5.442e3          | 5.429e3   | 99 節点            |
| J342 | 240 | 3.621e3          | 3.595e3   | 525 節点           |

| ケース名 | 要素数 | 予測値 : n1=3.609e3 |         | 備考     |
|------|-----|------------------|---------|--------|
| 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 | 220 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 : n2=2.262e4 |           | 備考               |
|------|-----|------------------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN          | FrontISTR |                  |
| J231 | 40  | 3.350e4          | 3.351e4   | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| J232 | 40  | 2.163e4          | 2.156e4   | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| J241 | 20  | 2.149e4          | 2.516e4   | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| J242 | 20  | 2.149e4          | 2.143e4   | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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   | 220 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 / 平面応力状問題  |
| J232 | 40  | 3.596e3          | 3.593e3   | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| J241 | 20  | 3.586e3          | 4.245e3   | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| J242 | 20  | 3.590e3          | 3.587e3   | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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   | 220 節点           |
| J731 | 40  | -                | 3.606e3   | 220 節点           |
| J741 | 20  | -                | 3.594e3   | 220 節点           |

表 9.1.12 exK : 直接法での検証結果（2次固有値）

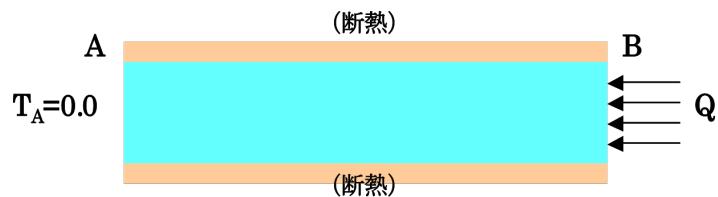
| ケース名 | 要素数 | 予測値 : n2=2.262e4 | 備考        |                  |
|------|-----|------------------|-----------|------------------|
|      |     | NASTRAN          | FrontISTR |                  |
| J231 | 40  | 3.350e4          | 3.351e4   | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| J232 | 40  | 2.163e4          | 2.156e4   | 105 節点 / 平面応力状問題 |
| J241 | 20  | 2.149e4          | 2.516e4   | 33 節点 / 平面応力状問題  |
| J242 | 20  | 2.149e4          | 2.143e4   | 85 節点 / 平面応力状問題  |
| 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   | 220 節点           |
| J731 | 40  | -                | 2.156e4   | 220 節点           |
| J741 | 20  | -                | 2.153e4   | 220 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。

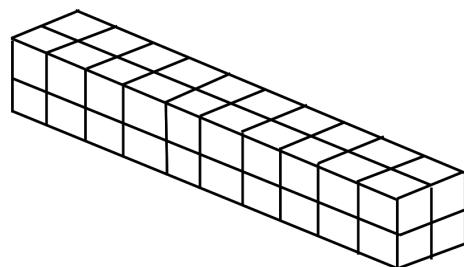
#### 1.21.6 (4) 热伝導解析

定常热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

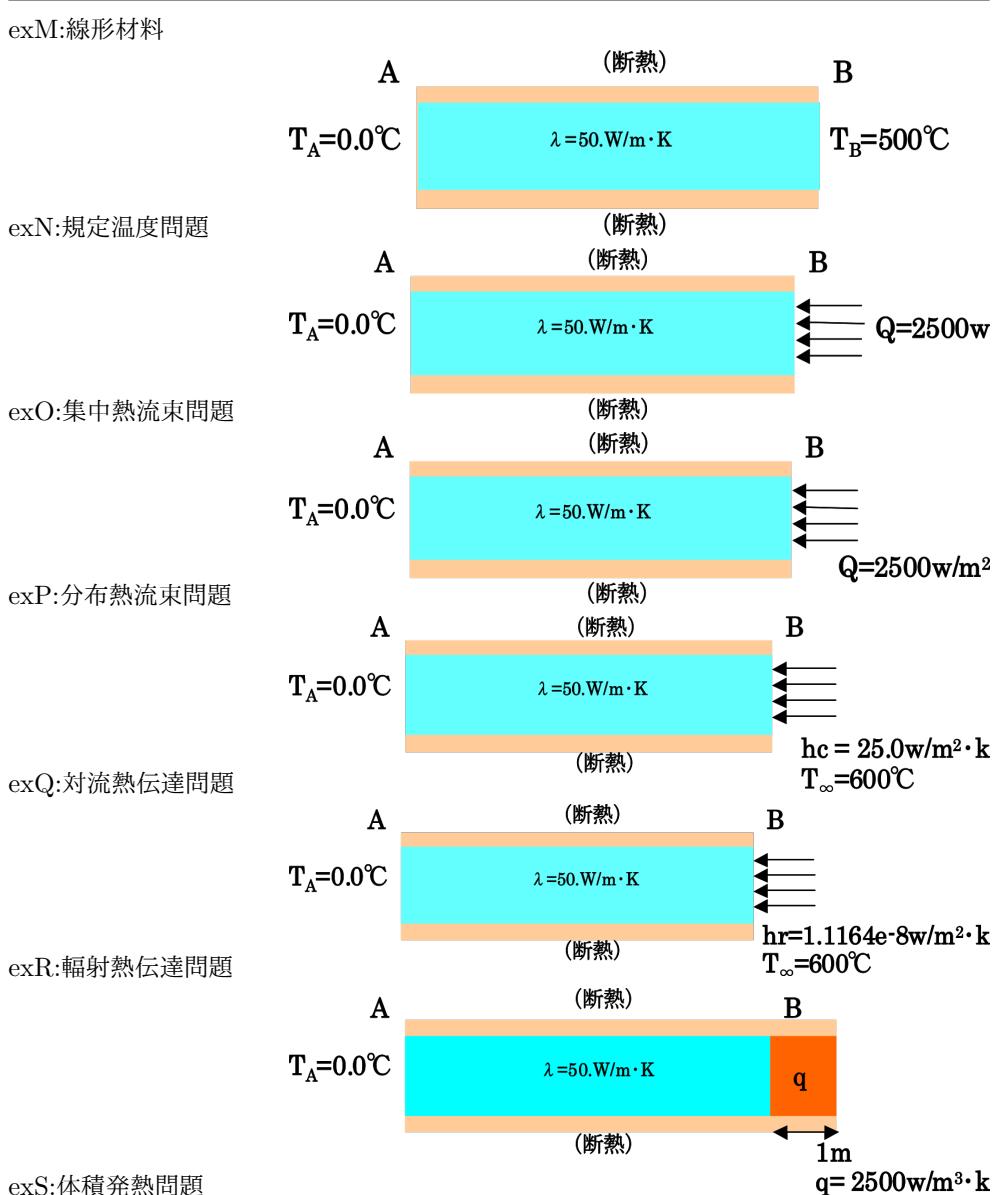
図 4 热伝導解析

|        |               |
|--------|---------------|
| AB 間長さ | $L = 10.0m$   |
| 断面積    | $A = 1.0mm^2$ |

熱伝導率の温度依存性

| 熱伝導率 $\lambda(W/mK)$ | 温度 ( $^{\circ}C$ ) |
|----------------------|--------------------|
| 50.0                 | 0.0                |
| 35.0                 | 500.0              |
| 20.0                 | 1000.0             |

図 9.1.10 定常熱伝導解析の検証条件



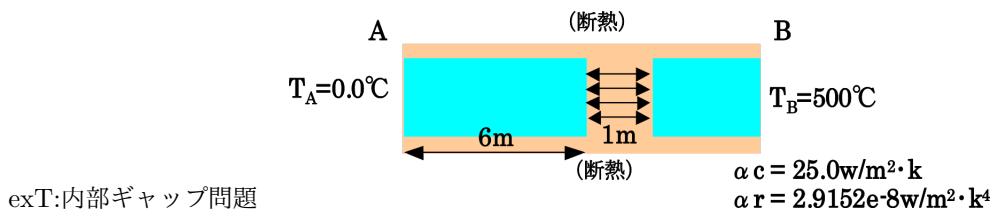


図 9.1.11 検証ケース別解析条件

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          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| M361B | 361   | 40 / 105 | 0.0          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| M361C | 361   | 20 / 33  | 0.0          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| M361D | 361   | 20 / 85  | 0.0          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| M361E | 361   | 240 / 99 | 0.0          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| M361F | 361   | 24 / 525 | 0.0          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| M361G | 361   | 80 / 99  | 0.0          | 100.0 | 200.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |

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 | 500.0 |
| N231   | 231   | 40 / 33  | 0.0          | 87.2 | 179.5 | 278.0 | 384.1 | 500.0 |
| N232   | 232   | 40 / 105 | 0.0          | 86.0 | 178.3 | 276.8 | 382.9 | 500.0 |
| N241   | 241   | 20 / 33  | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N242   | 242   | 20 / 85  | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N341   | 341   | 240 / 99 | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N342   | 342   | 24 / 525 | 0.0          | 87.9 | 179.9 | 278.0 | 383.6 | 500.0 |
| N351   | 351   | 80 / 99  | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N352   | 352   | 80 / 381 | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N361   | 361   | 40 / 99  | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N362   | 362   | 40 / 330 | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N731   | 731   | 40 / 33  | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |
| N741   | 741   | 20 / 33  | 0.0          | 87.3 | 179.7 | 278.2 | 384.3 | 500.0 |

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 |
|      |       | 40     |              |     |     |     |     |     |

| ケース名   | 要素タイプ | 要素／節点数   | A 端からの距離 (m) |       |       |       |       |       |
|--------|-------|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 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 |
|        |       |          | 41           |      |       |       |       |       |

| ケース名 | 要素タイプ | 要素／節点数   | A 端からの距離 (m) | -    | -     | -     | -     | -     | - |
|------|-------|----------|--------------|------|-------|-------|-------|-------|---|
| Q341 | 341   | 240 / 99 | -            | -    | -     | -     | -     | -     | - |
| Q342 | 342   | 24 / 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   | 24 / 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 |     |

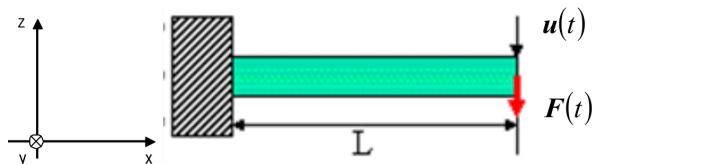
| ケース名 | 要素タイプ | 要素／節点数   | A 端からの距離 (m) | 103.2 | 213.7 | 333.3 | 464.8 | 612.6 |
|------|-------|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S362 | 362   | 40 / 330 | 0.0          | 103.2 | 213.7 | 333.3 | 464.8 | 612.6 |
| S731 | 731   | 40 / 33  | 0.0          | 103.2 | 213.7 | 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

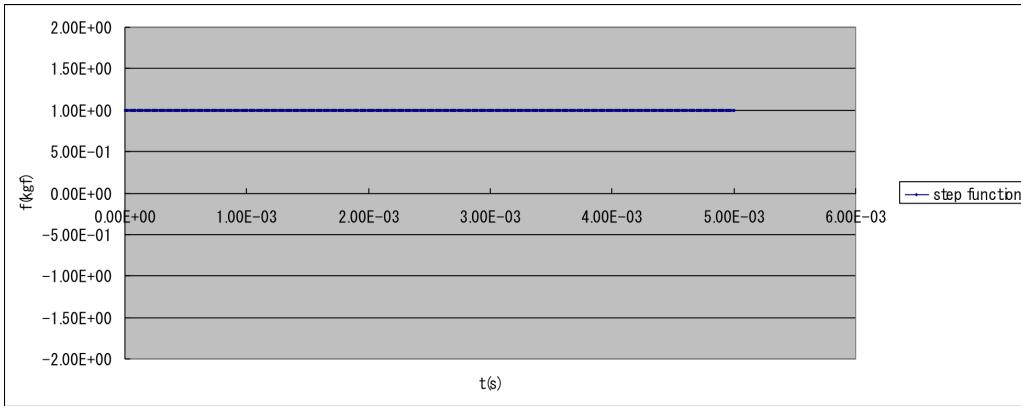
| ケース名   | 要素タイプ | 要素／節点数   | A 端からの距離 (m) | A 端  |       |       |       |       | B 端 |
|--------|-------|----------|--------------|------|-------|-------|-------|-------|-----|
|        |       |          |              | 2.0  | 4.0   | 6.0   | 8.0   |       |     |
| ABAQUS | 361   | 40 / 99  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S231   | 231   | 40 / 33  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S232   | 232   | 40 / 105 | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S241   | 241   | 20 / 33  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S242   | 242   | 20 / 85  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S341   | 341   | 240 / 99 | -            | -    | -     | -     | -     | -     |     |
| S342   | 342   | 24 / 525 | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S351   | 351   | 80 / 99  | -            | -    | -     | -     | -     | -     |     |
| S352   | 352   | 80 / 381 | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S361   | 361   | 40 / 99  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S362   | 362   | 40 / 330 | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S731   | 731   | 40 / 33  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |
| S741   | 741   | 20 / 33  | 0.0          | 88.6 | 182.4 | 282.6 | 387.7 | 500.0 |     |

### 1.21.7 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:

$$F(t) = F_0 I(t)$$

ここで、

$$F_0 : \text{Constant vector}$$

$$I(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & 0 \leq t \end{cases}$$

$$u(t) = \frac{F_0 l^3}{EI} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1 - \cos \omega_i t}{\lambda_i^4} \left\{ \cosh \lambda_i - \cos \lambda_i - \frac{\cosh \lambda_i + \cos \lambda_i}{\sin \lambda_i + \sinh \lambda_i} (\sinh \lambda_i - \sin \lambda_i) \right\}^2$$

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 <sup>2</sup>                  |
| ポアソン比 | $\nu$  | 0.3   |
| 密度    | $\rho$ | 1.0E-09 kgf s <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> |
| 重力加速度 | $g$    | 9800.0 mm/s <sup>2</sup>                    |
| 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- $\beta$ 法のパラメータ $\gamma$ | 1/2        |

Newmark- $\beta$  法のパラメータ  $\beta = 1/4$

陽解法

減衰

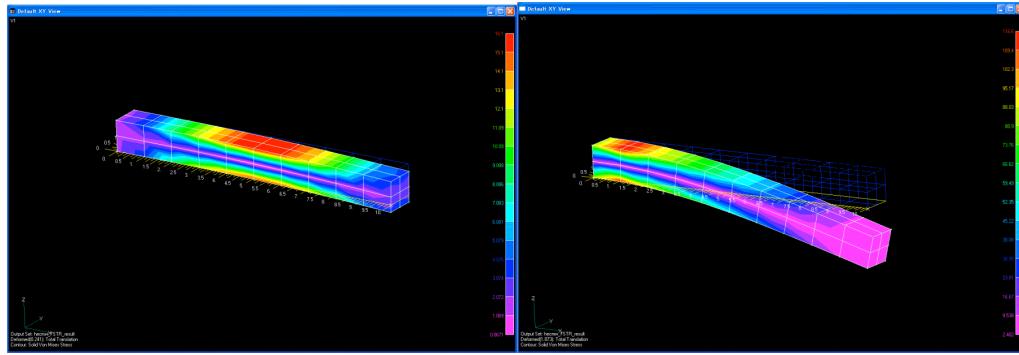
無し

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 $\Delta t$ [sec] |
|------------------|-------|-----|-----|-----|-----------------------|
| 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  | 陰解法 | 1.0E-08               |
| W361_c0_ex_m2_t2 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.0E-07               |
| W361_c0_ex_m2_t3 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.0E-06               |
| W342_c0_im_m2_t1 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.0E-06               |
| W342_c0_im_m2_t2 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.0E-05               |
| W342_c0_im_m2_t3 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 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               |

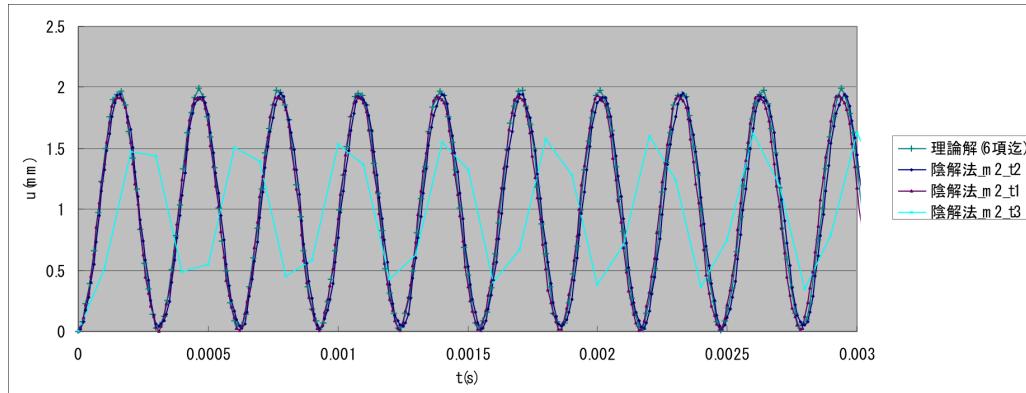
表 9.1.22 exW : 片持ち梁を対象とした線形動解析の検証結果

| ケース名             | 要素タイプ | 節点数 | 要素数 | 解法  | 時刻 $t=0.002$ sec における z 方向変位 [mm] |
|------------------|-------|-----|-----|-----|-----------------------------------|
| W361_c0_im_m2_t1 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.9753                            |
| W361_c0_im_m2_t2 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.9753                            |
| W361_c0_im_m2_t3 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.9753                            |
| W361_c0_ex_m2_t1 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.9753                            |
| W361_c0_ex_m2_t2 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.9753                            |
| W361_c0_ex_m2_t3 | 361   | 99  | 40  | 陰解法 | 1.9753                            |
| W342_c0_im_m2_t1 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.9753                            |
| W342_c0_im_m2_t2 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.9753                            |
| W342_c0_im_m2_t3 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.9753                            |
| W342_c0_ex_m2_t1 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.9753                            |
| W342_c0_ex_m2_t2 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.9753                            |
| W342_c0_ex_m2_t3 | 342   | 525 | 240 | 陽解法 | 1.9753                            |

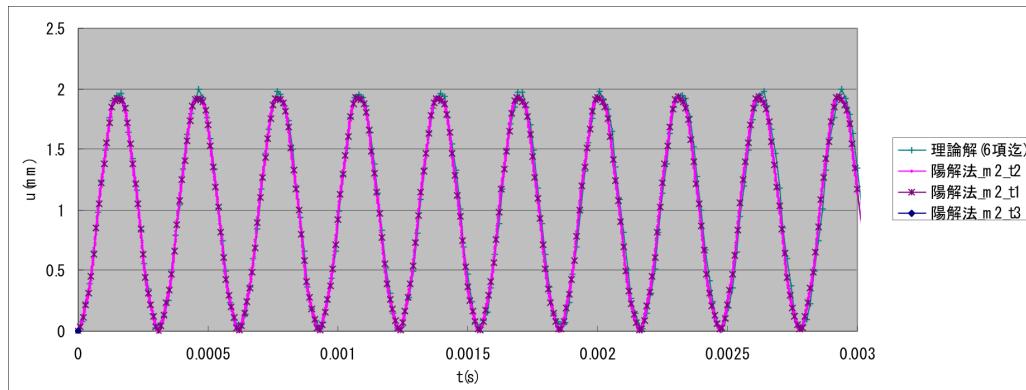


(a)  $t=2.0E-03(s)$  (b)  $t=4.0E-03(s)$

図 9.1.13 片もち梁の変形図及び相当応力分布

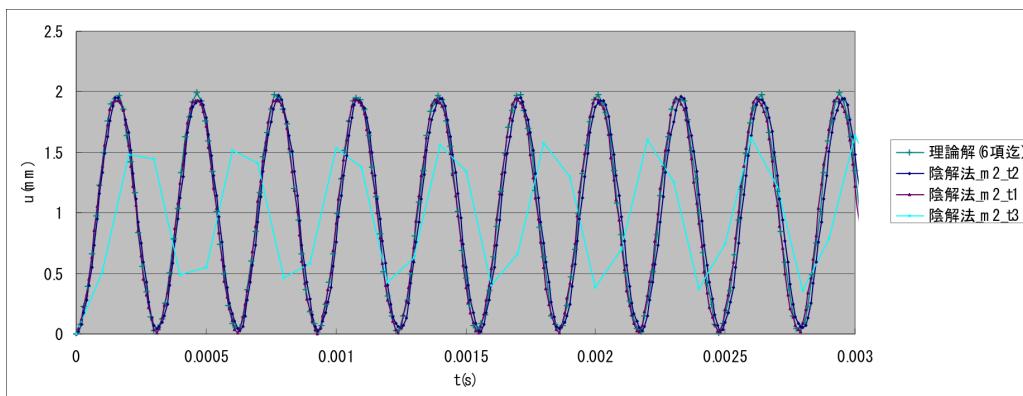


(a) 要素タイプ 361: 陰解法

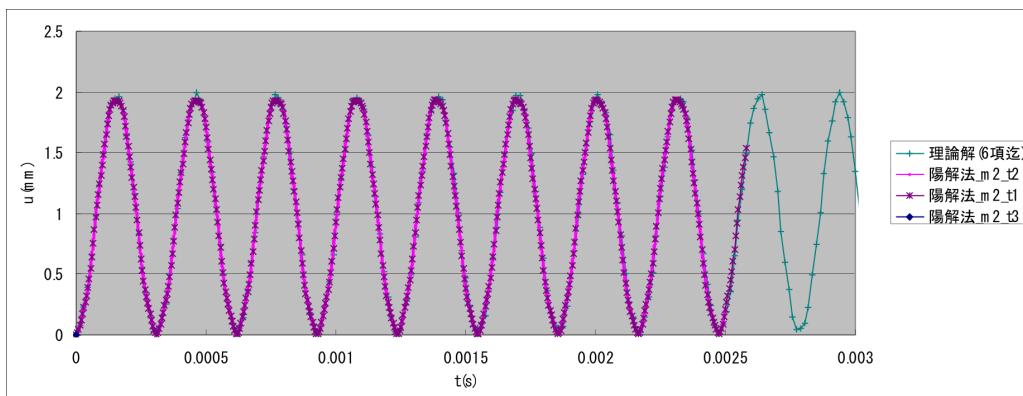


(b) 要素タイプ 361: 陽解法

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

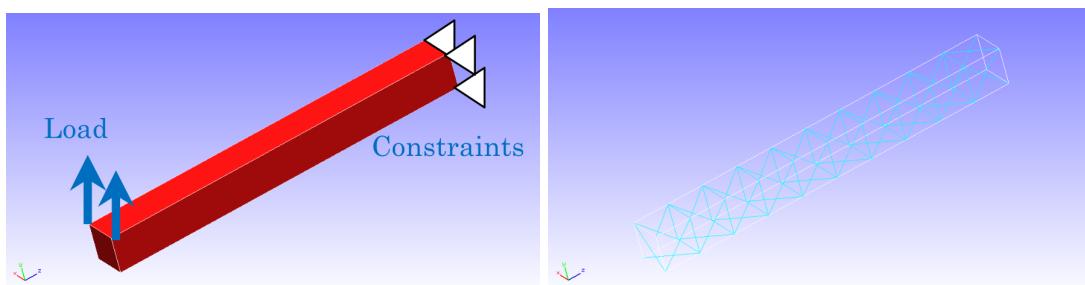


(b) 要素タイプ 342:陽解法

図 9.1.14 加振点変  $u_z$  位の時刻歴

### 1.21.8 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。



解析条件:

|       |        |                             |
|-------|--------|-----------------------------|
| 縦弾性係数 | $E$    | $210000 \text{ N/mm}^2$     |
| ポアソン比 | $\nu$  | 0.3                         |
| 密度    | $\rho$ | $7.89E - 09 \text{ t/mm}^3$ |
| 重力加速度 | $g$    | $9800.0 \text{ mm/s}^2$     |
| 荷重    | $F_0$  | 1.0 N                       |

|                   |       |             |
|-------------------|-------|-------------|
| Rayleigh 減衰のパラメータ | $R_m$ | 0.0         |
| Rayleigh 減衰のパラメータ | $R_k$ | $7.2E - 07$ |

図 9.1.15 解析モデル (4 面体 1 次要素 (要素数 126、節点数 55))

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 |

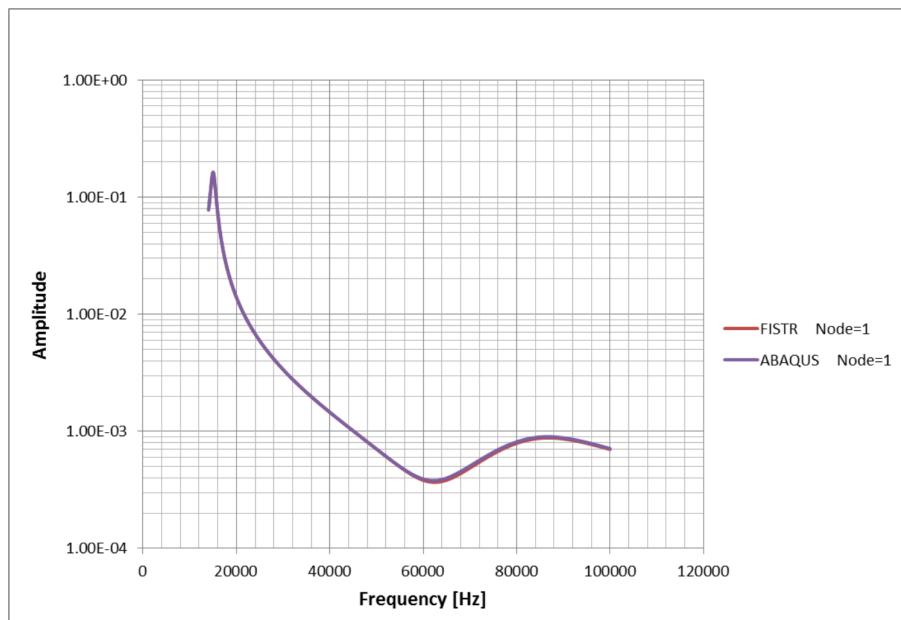


図 9.1.16 加振点の変位強度の周波数依存性

## 1.22 弾性静解析用実モデル例題

### 1.22.1 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 |

| ケース名  | 要素タイプ | 検証モデル           | 節点数     | 自由度数    |
|-------|-------|-----------------|---------|---------|
| 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 |

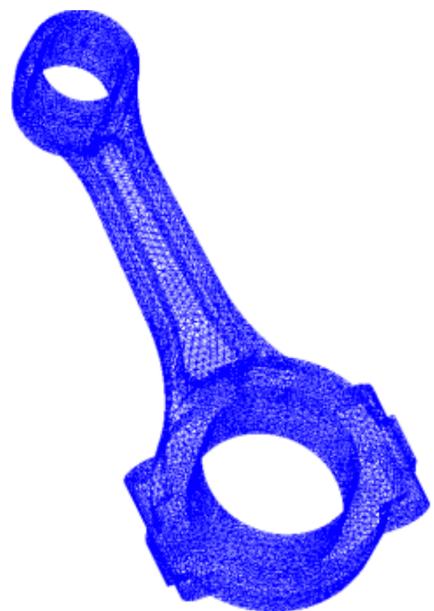


図 9.2.1 コンロッド (EX01A)

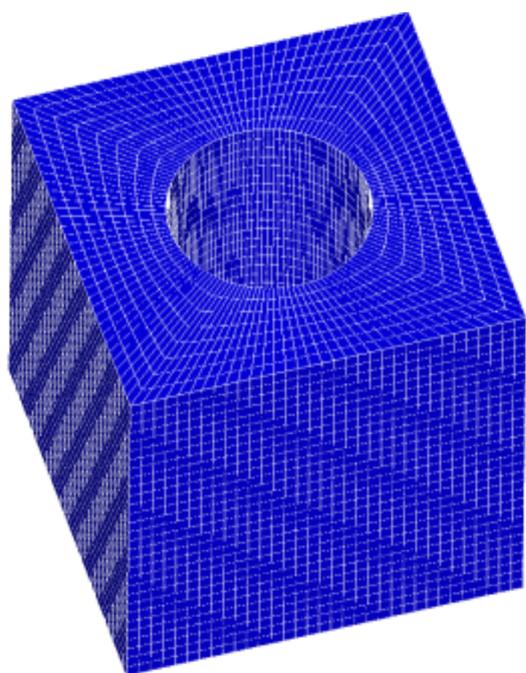


図 9.2.2 穴あきブロック (EX02)

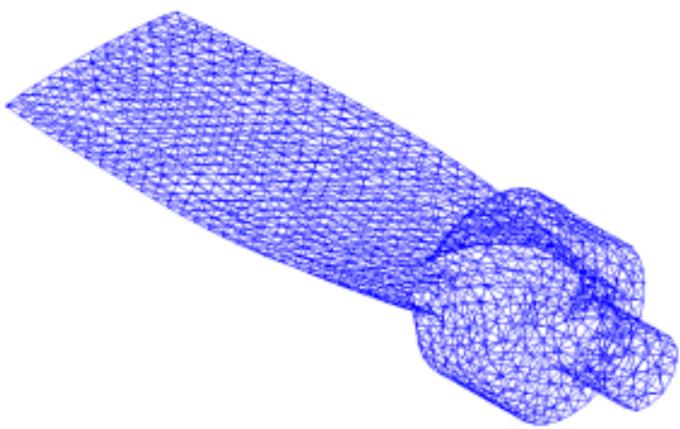


図 9.2.3 ターピンブレード (EX03, EX06)

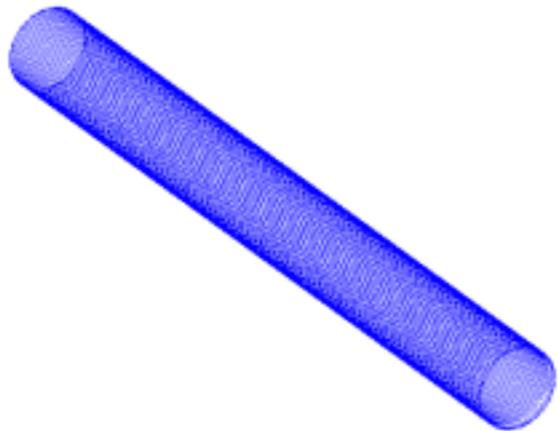


図 9.2.4 円筒シェル (EX04, EX09)

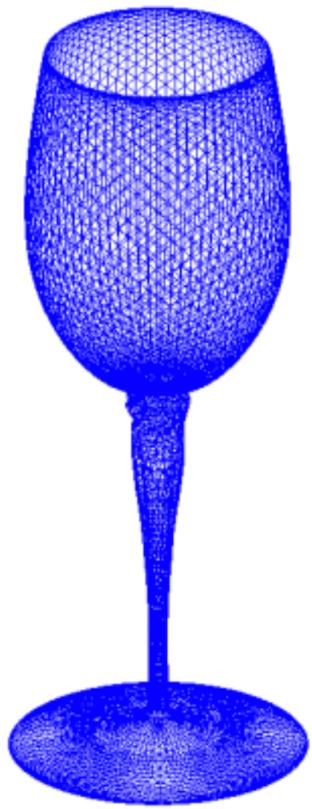


図 9.2.5 ワイングラス (EX05, EX10A)

## 1.22.2 解析結果

### 1.22.2.1 解析結果例

解析結果の例を図 9.2.6～図 9.2.9 に示す。

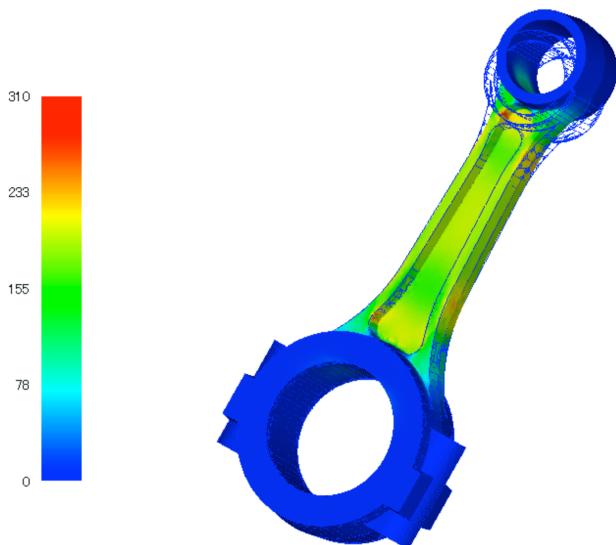


図 9.2.6 EX01A 解析結果 (Mises 応力と変形図 (10 倍))

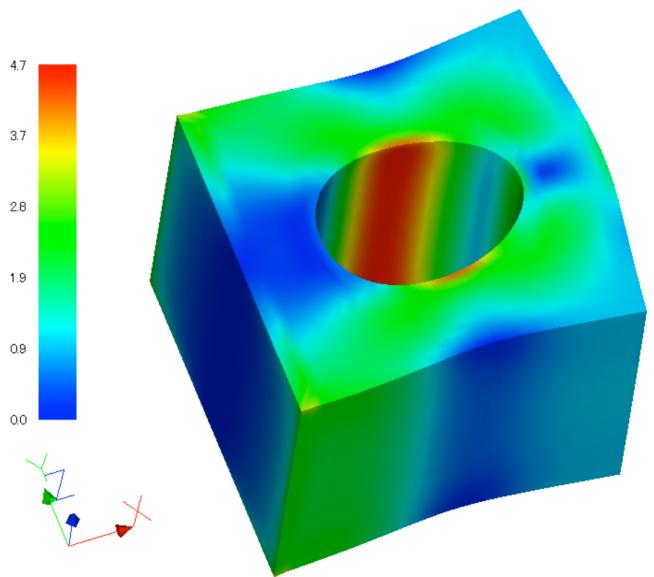


図 9.2.7 EX02 解析結果 (Mises 応力と変形図 (100 倍))

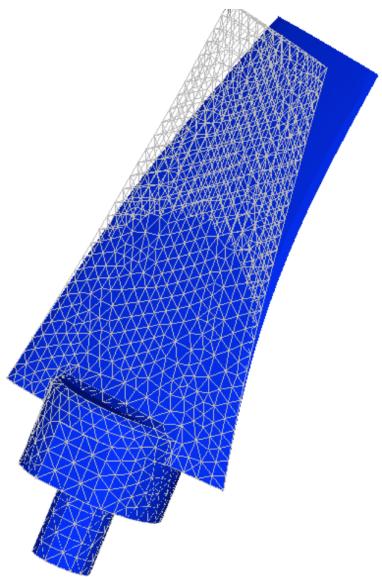
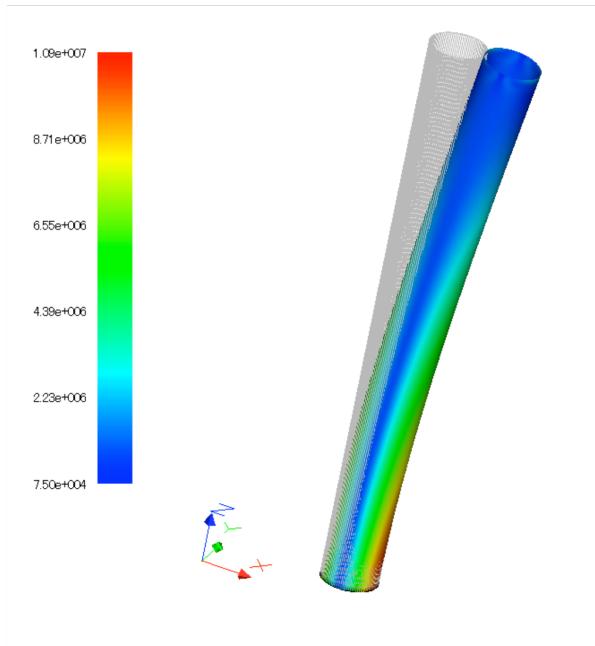


図 9.2.8 EX03 解析結果 (変形図 (10 倍))



9.2.9: EX04 Analysis Results (Deformed Figure (100 times))

図 9.2.9 EX04 解析結果（変形図（100 倍））

### 1.22.2.2 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。

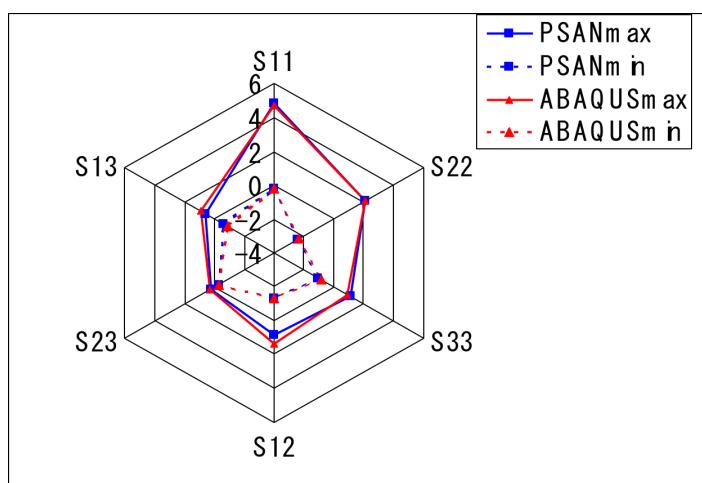


図 9.2.10 EX02 における汎用ソフトとの応力成分の比較

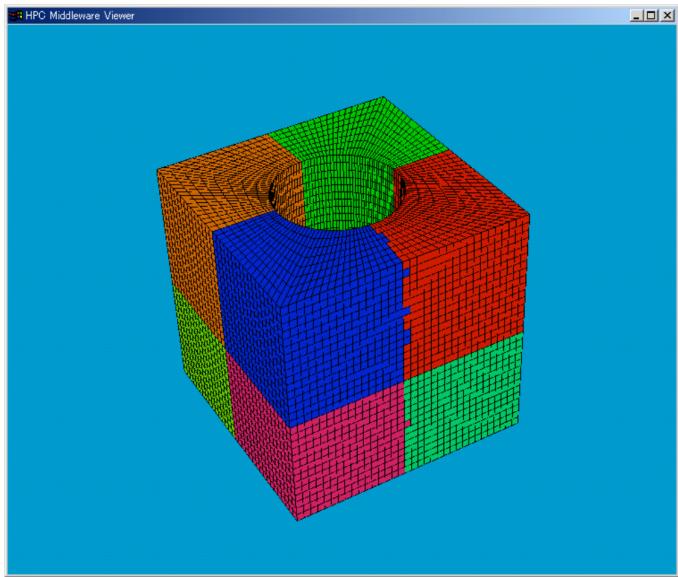


図 9.2.11 RCB 法による EX02 の 8 領域分割結果

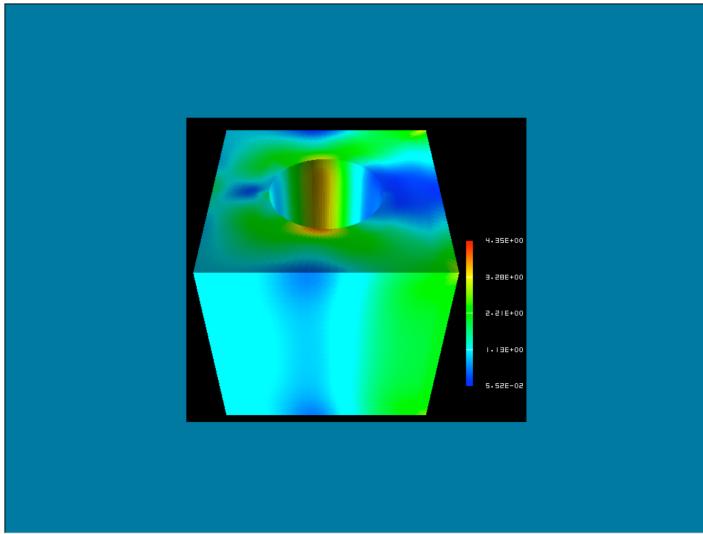


図 9.2.12 領域分割によるミゼス応力分布の相違

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     |

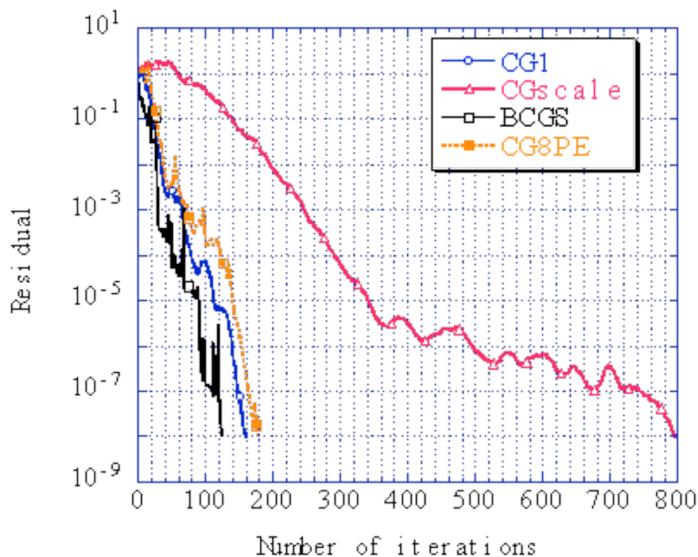


図 9.2.13 HEC-MW ソルバーによる収束履歴の比較（収束判定閾値： $1.0 \times 10^{-8}$ ）

### 1.22.2.3 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。

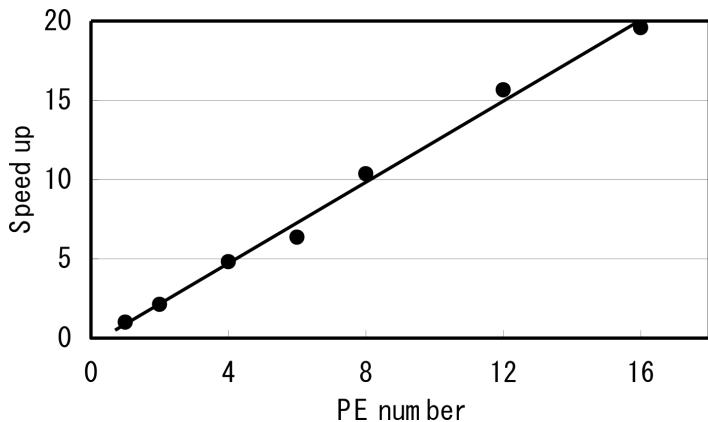


図 9.2.14 領域分割による増速効果

表 9.2.3 計算時間の計算機による比較 (1CPU)

| CPU         | Frequency [GHz] | OS      | CPU Time [sec] | solver time [sec] |
|-------------|-----------------|---------|----------------|-------------------|
| Xeon        | 2.8             | Linux   | 850            | 817               |
| Pentium III | 0.866           | Win2000 | 2008           | 1980              |
| Pentium M   | 0.760           | WinXP   | 1096           | 1070              |
| Pentium 4   | 2.0             | WinXP   | 802            | 785               |
| Pentium 4   | 2.8             | WinXP   | 738            | 718               |

| CPU       | Frequency [GHz] | OS      | CPU Time [sec] | solver time [sec] |
|-----------|-----------------|---------|----------------|-------------------|
| Celeron   | 0.700           | Win2000 | 2252           | 2215              |
| Pentium 4 | 2.4             | WinXP   | 830            | 804               |

## 1.23 固有値解析用実モデル例題

### 1.23.1 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（タービンロータ）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 |

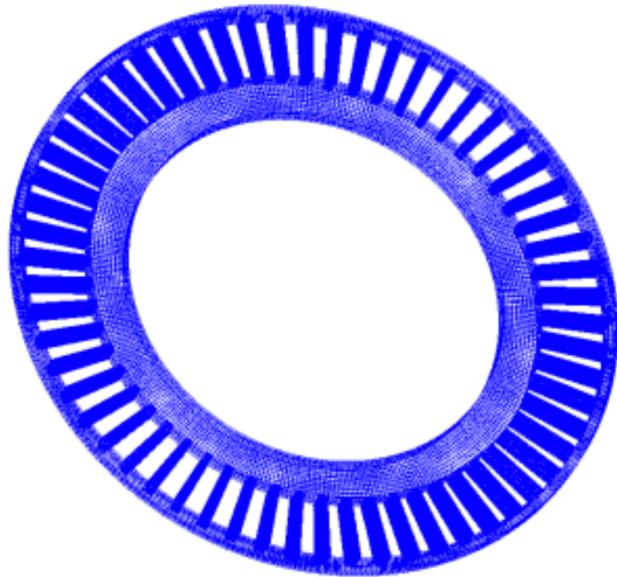


図 9.3.1 タービンロータ (EX07)

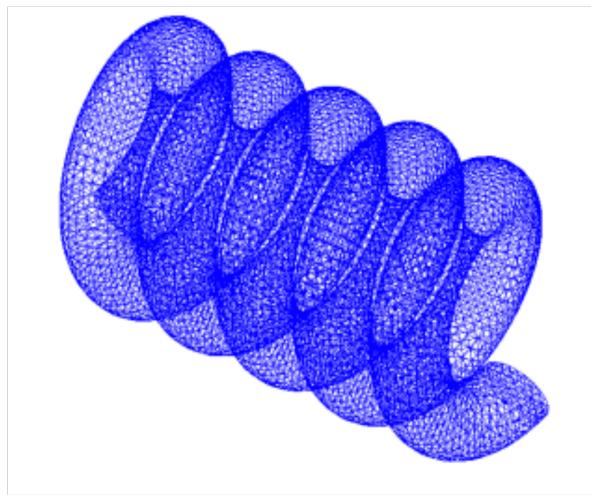


Figure 9.3.2: Spring (EX08)

図 9.3.2 スプリング (EX08)

### 1.23.2 解析結果

振動モードおよび固有振動数を以下に示す。

#### 1.23.2.1 EX06 タービンブレード

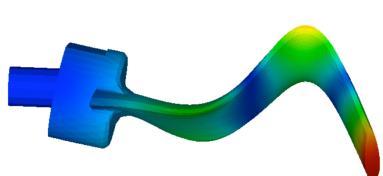
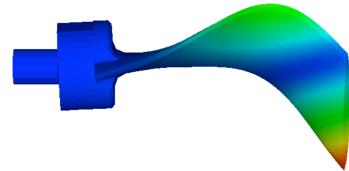
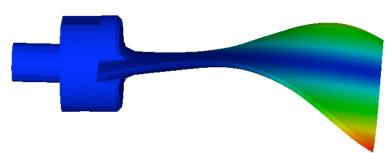
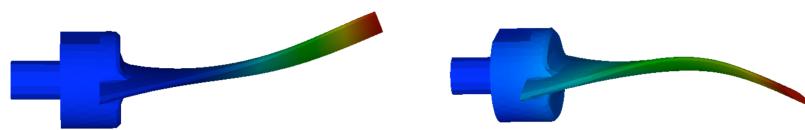


図 9.3.3 EX06 タービンブレード振動モード

1.23.2.2 EX07 タービンロータ

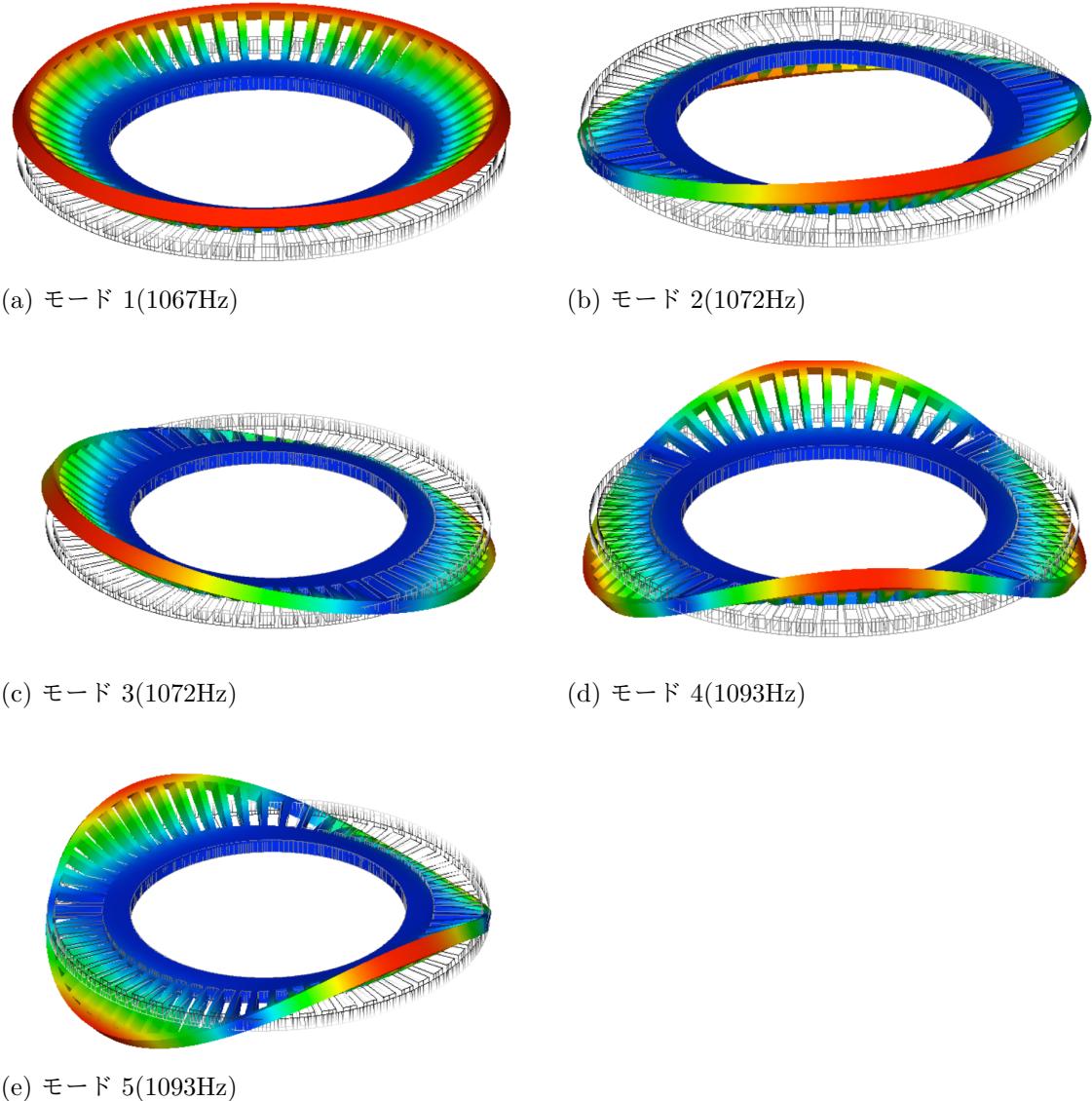


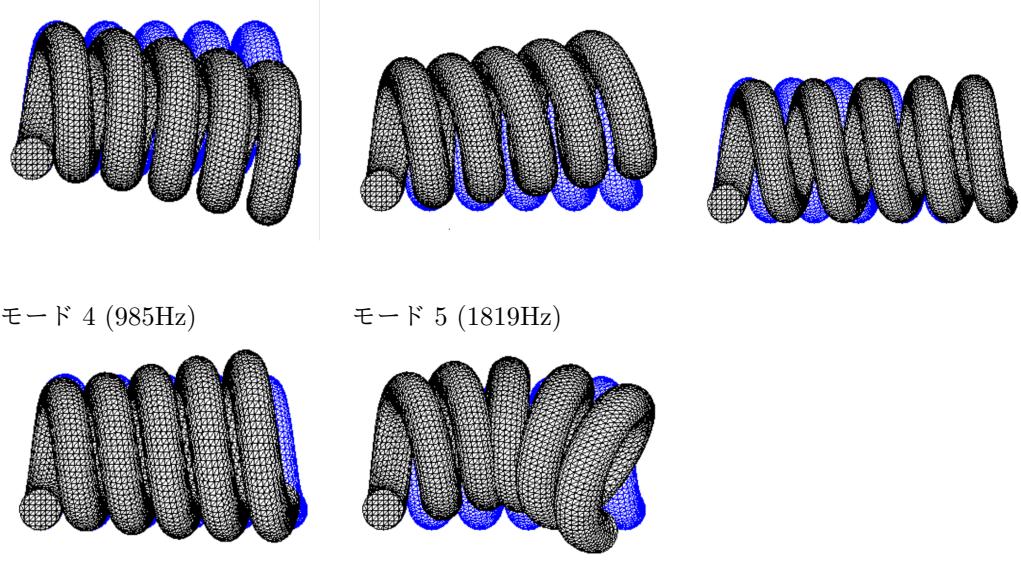
図 9.3.4 EX07 タービンロータ振動モード

1.23.2.3 EX08 スプリング

---

モード 1 (445Hz)      モード 2 (446Hz)      モード 3 (908Hz)

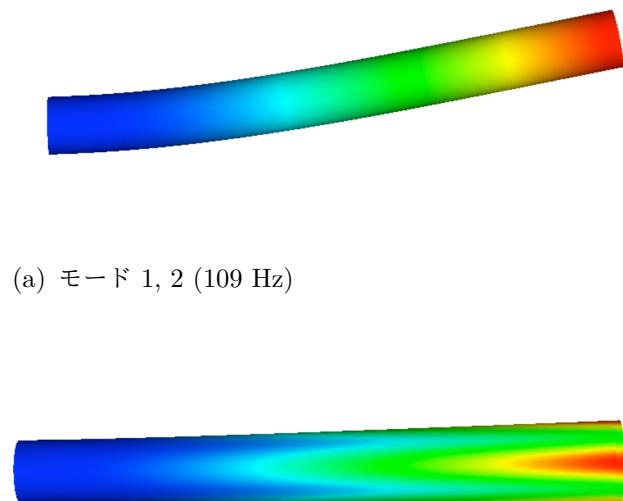
---



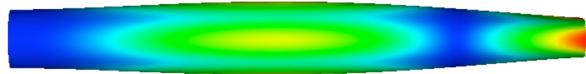
|   | FrontISTR | NASTRAN |
|---|-----------|---------|
| 1 | 445 Hz    | 445 Hz  |
| 2 | 446 Hz    | 446 Hz  |
| 3 | 908 Hz    | 908 Hz  |
| 4 | 985 Hz    | 986 Hz  |
| 5 | 1810 Hz   | 1810 Hz |

図 9.3.5 EX08 スプリング振動モード

#### 1.23.2.4 EX09 円筒シェル



(b) モード 3,4(570Hz)

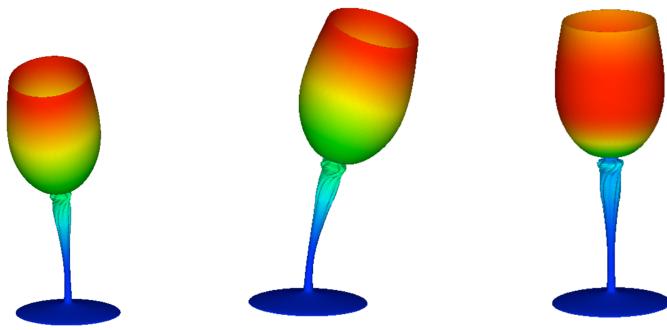


(c) モード 5(615Hz)

図 9.3.6 EX09 円筒シェル振動モード

#### 1.23.2.5 EX10A ワイングラス

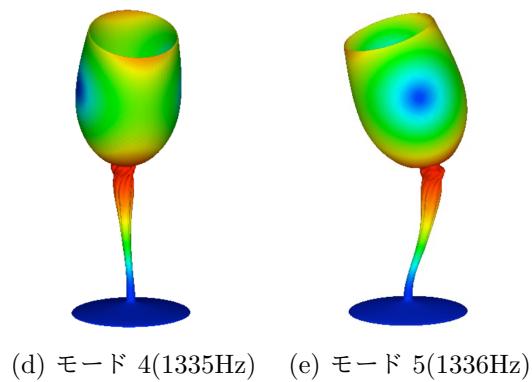
---



(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

## 1.24 热伝導解析用実モデル例題

### 1.24.1 解析モデル

热伝導解析では、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 热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 |

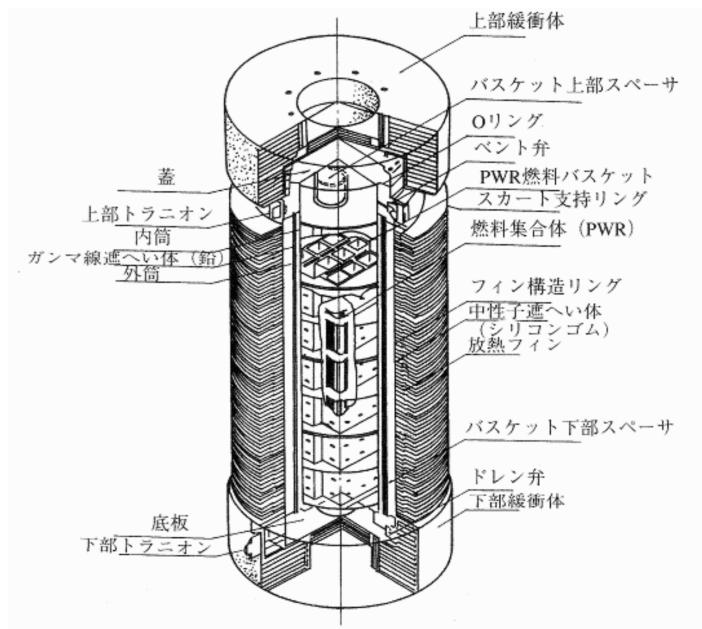
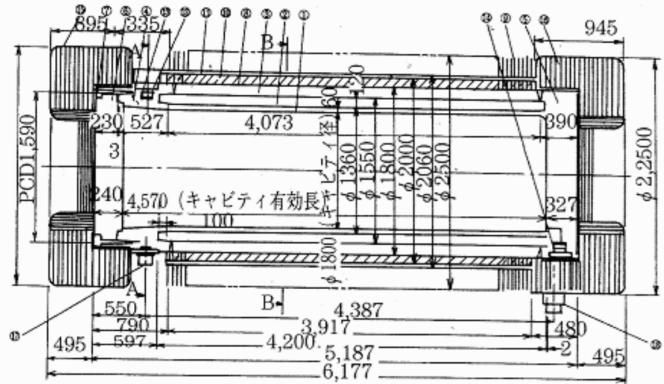


図9.4.1 使用済核燃料輸送容器



| 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  | フイン構造リング      |
| 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 热 材     |
| 13 | ベント弁 部        |
| 14 | ドレン弁 部        |
| 15 | 上 部 緩 衡 体     |
| 16 | 下 部 緩 衡 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

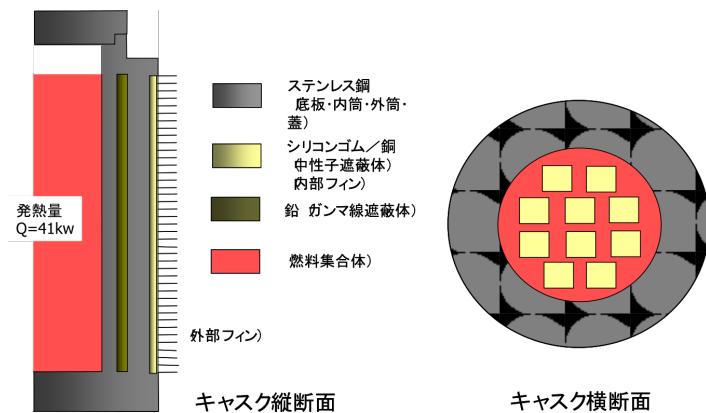


図 9.4.3 モデル概念図

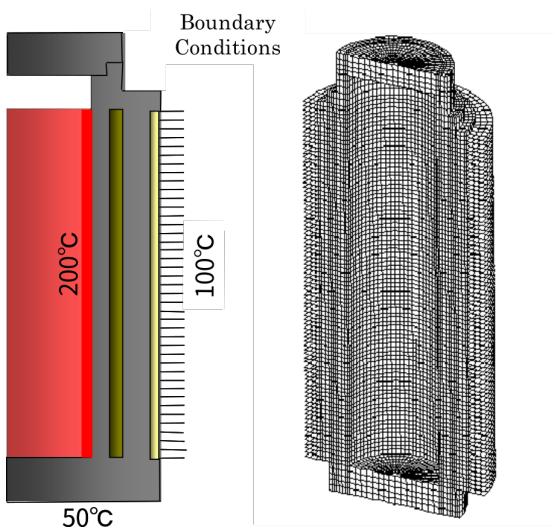


図 9.4.4 モデル境界条件とメッシュ分割図 (EX21A)

#### 1.24.2 解析結果

解析結果の例を図 9.4.5～図 9.4.7 に示す。

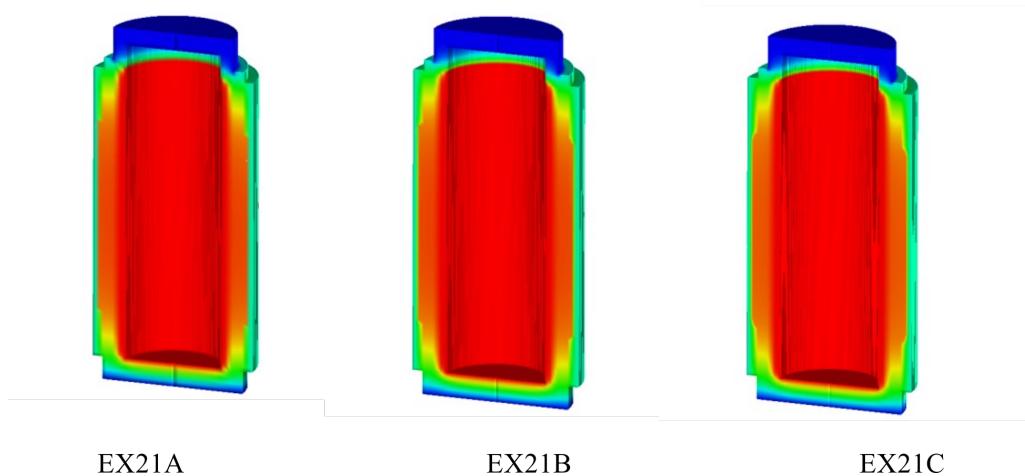


図 9.4.5 溫度分布図

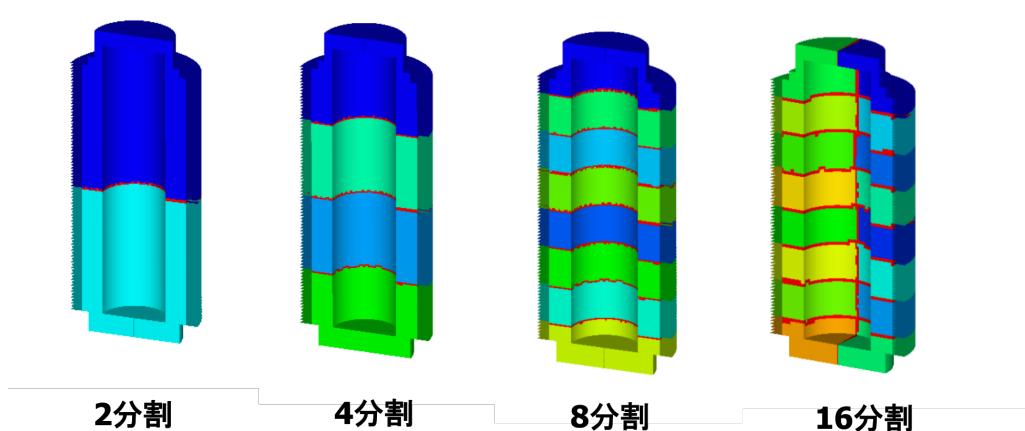


図 9.4.6 分散モデル図

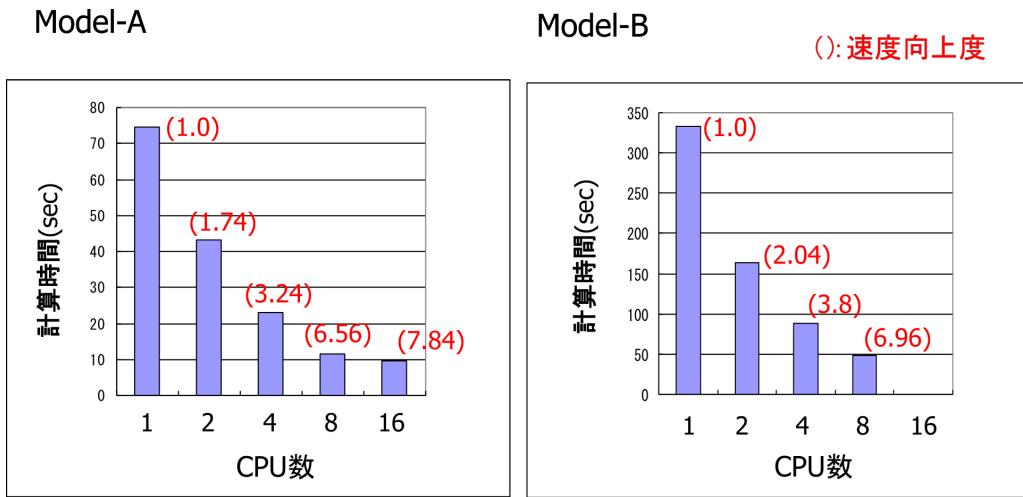


図 9.4.7 分散処理による速度向上度

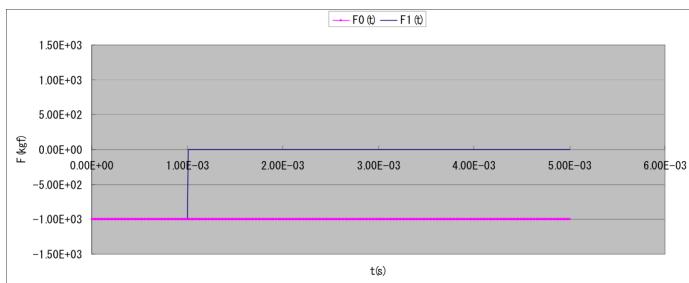
## 1.25 線形動的解析用実モデル例題

### 1.25.1 解析モデル

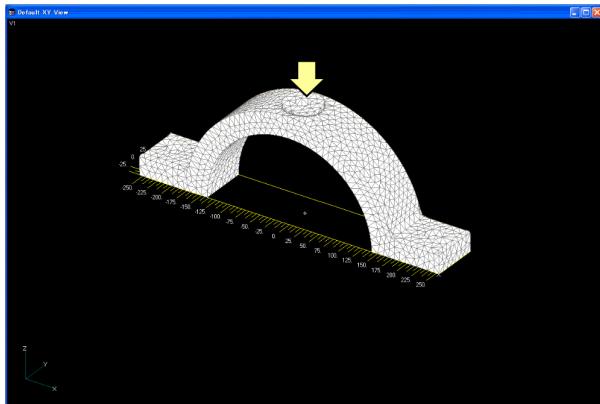
線形動的解析では、実モデルとして図 9.5.1 に示す機械部品を対象とする。この実モデルについて、荷重条件及び減衰係数の異なる 4 ケースに対して検証例題を設定する。その一覧を表 9.5.1 に示す。

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

## 1.25.2 解析結果

解析結果の例を図 9.5.2～図 9.5.3 に示す。

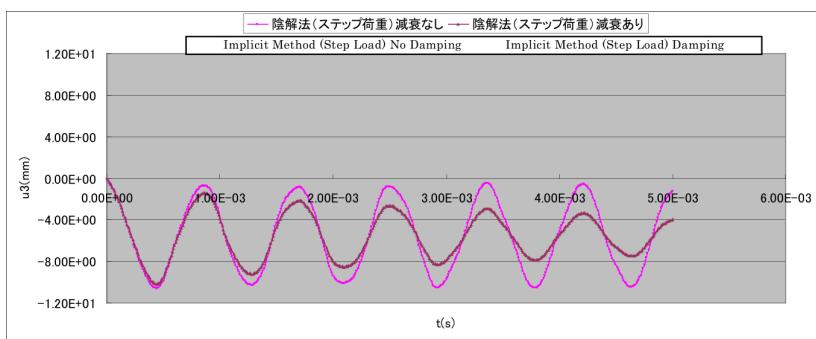


図 9.5.2 加振点変位  $u_z$  の時刻歴

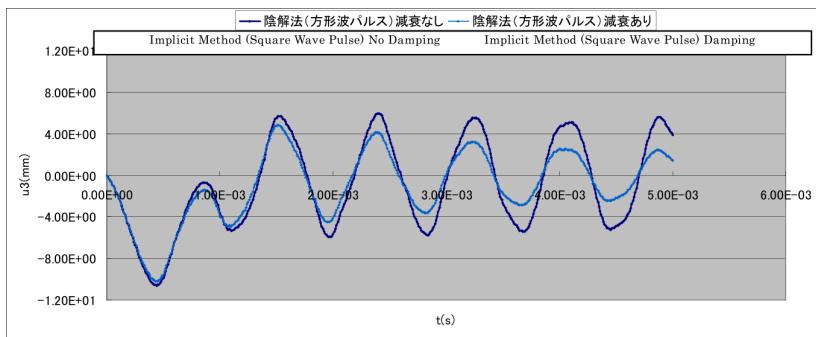


図 9.5.3 変形図及び相当応力分布 (変形倍率 5.0) : EX31C