

FrontISTR チュートリアル/例題集

FrontISTR Commons

2019年11月8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	7
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）	8
1.6.1	解析対象	8
1.6.2	解析内容	9
1.6.3	解析結果	9
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	10
1.7.3	解析結果	10
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3）	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。

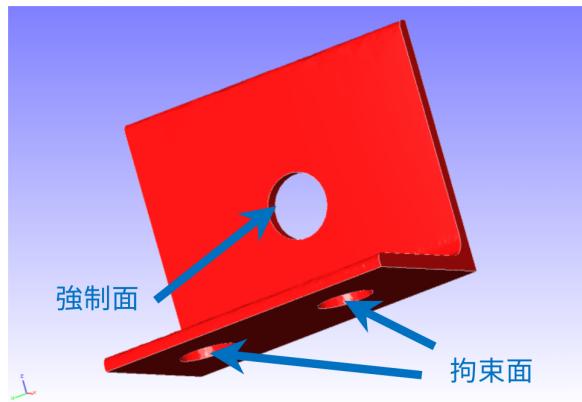


図 4.1.1 ヒンジ部品の形状

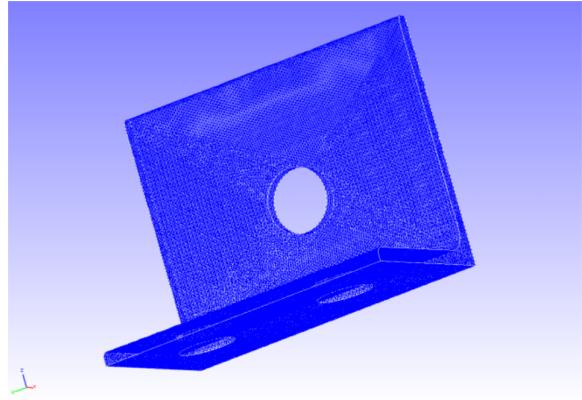


図 4.1.2 ヒンジ部品のメッシュデータ

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。

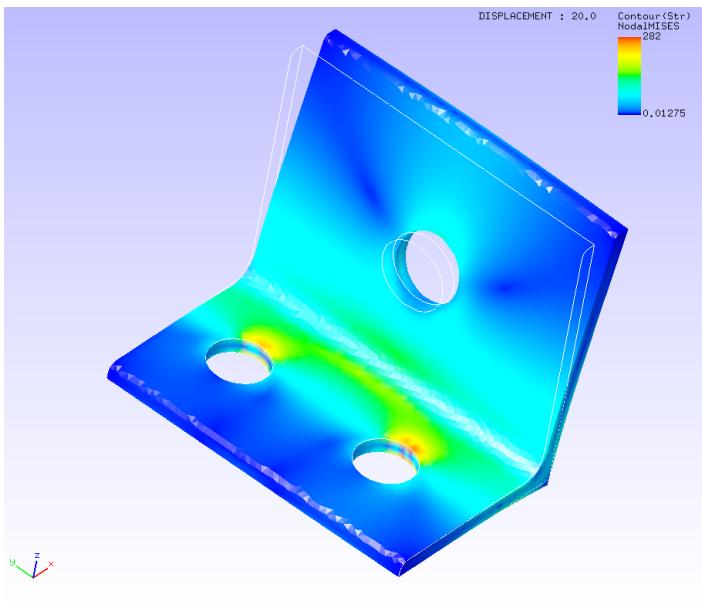


図 4.1.3 ミーゼス応力の解析結果

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。

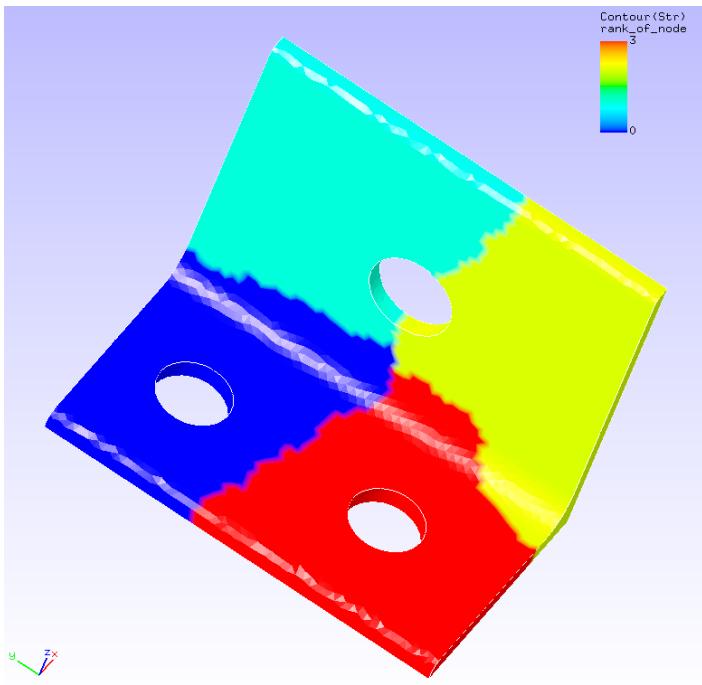


図 4.2.1 各ノードの計算領域

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。
6

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。

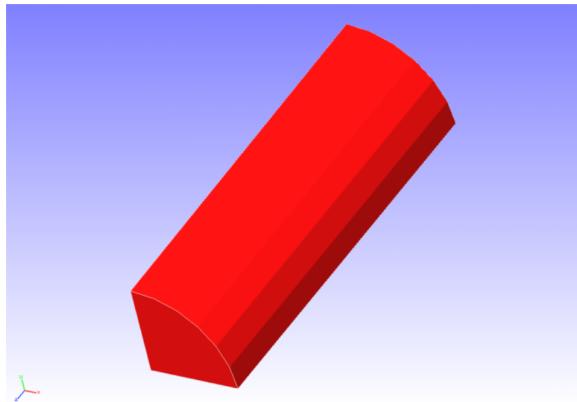


図 4.3.1 丸棒 (1/8 モデル) の形状

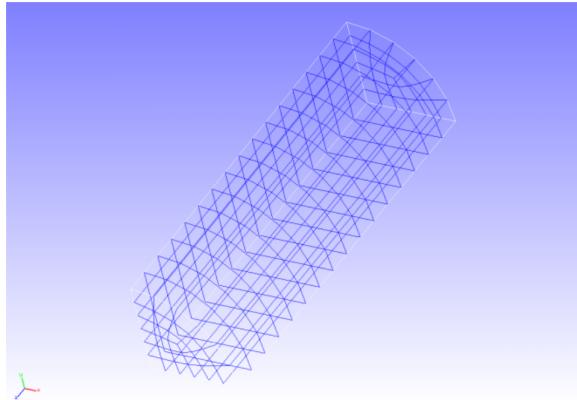


図 4.3.2 丸棒 (1/8 モデル) のメッシュデータ

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 REVOCAPI_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。

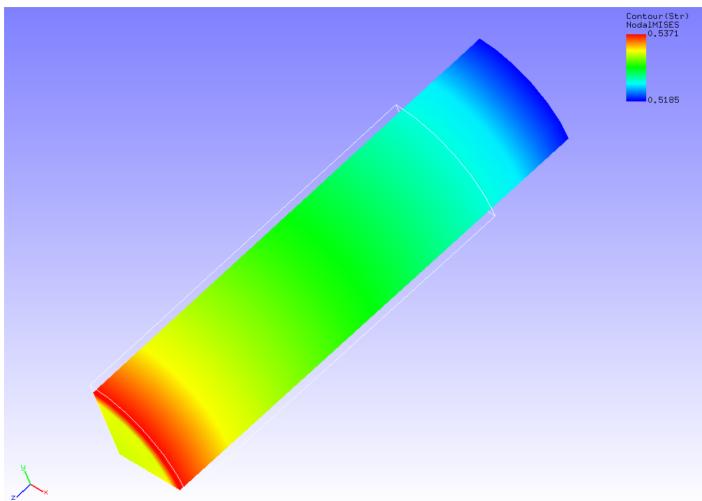


図 4.3.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

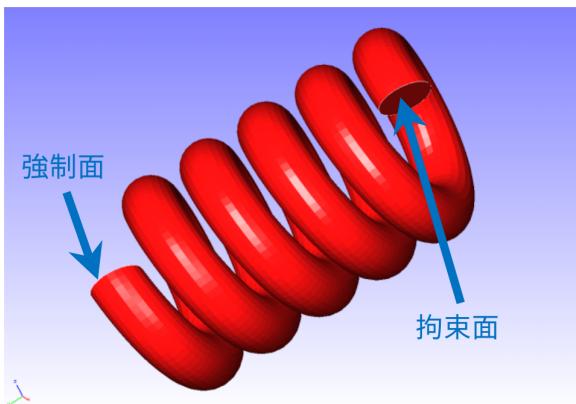


図 4.4.1 スプリングの形状

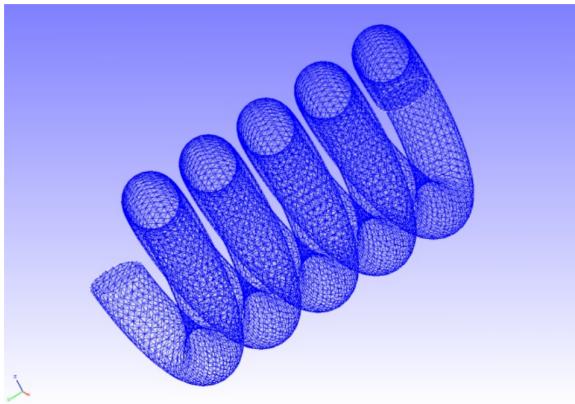


図 4.4.2 スプリングのメッシュデータ

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。

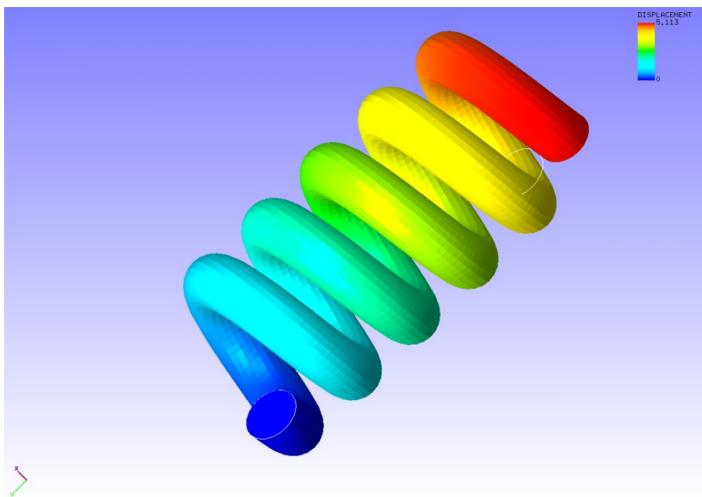


図 4.4.3 変形および変位の解析結果

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 REVOCAP_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。

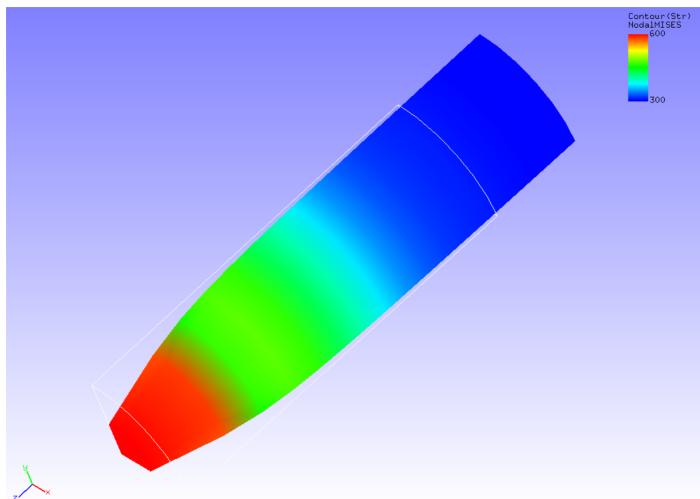


図 4.5.1 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

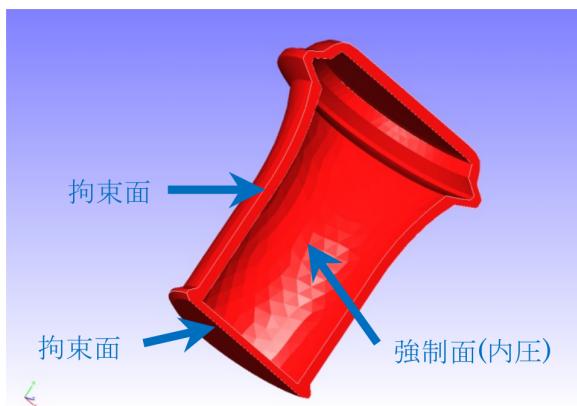


図 4.6.1 容器の形状

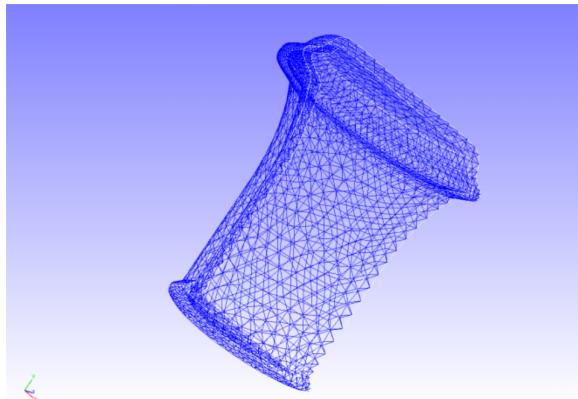


図 4.6.2 容器のメッシュデータ

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。

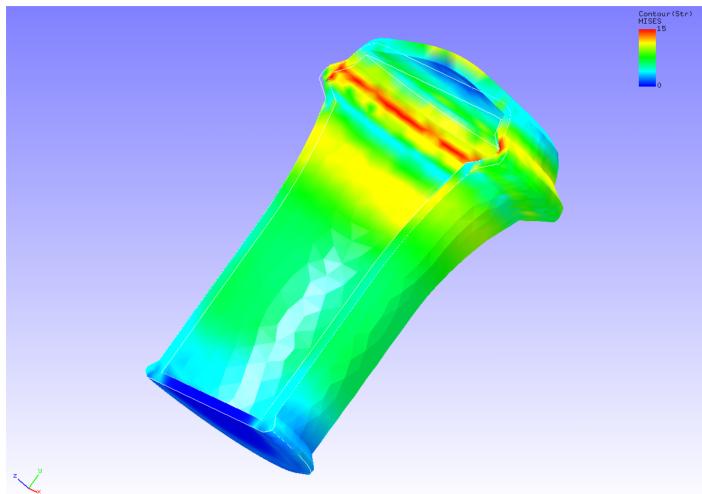


図 4.6.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

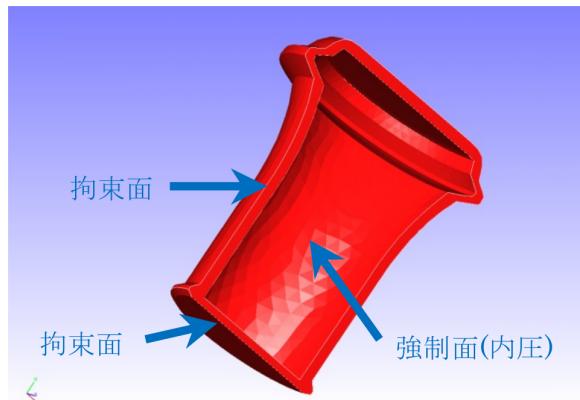


図 4.6.1 容器の形状

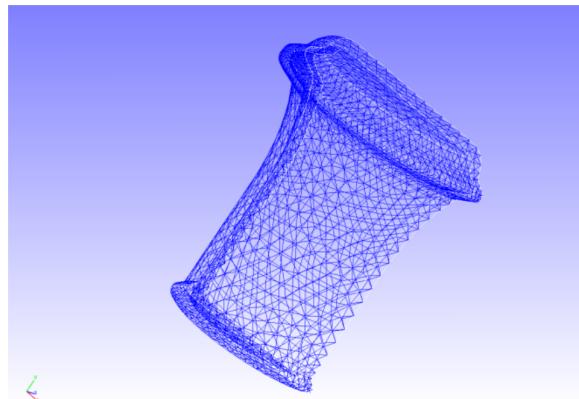


図 4.6.2 容器のメッシュデータ

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 REVOCAPI_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。

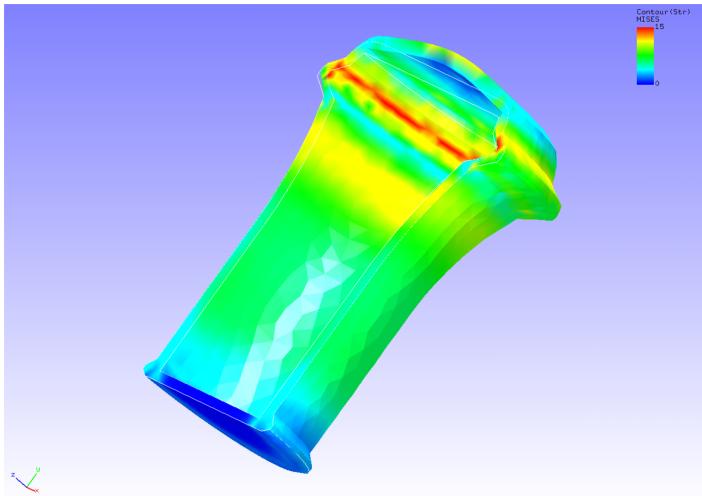


図 4.6.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

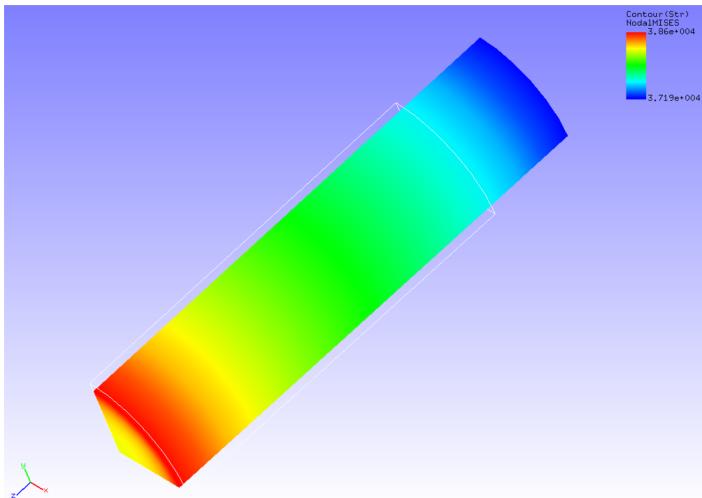


図 4.7.1 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

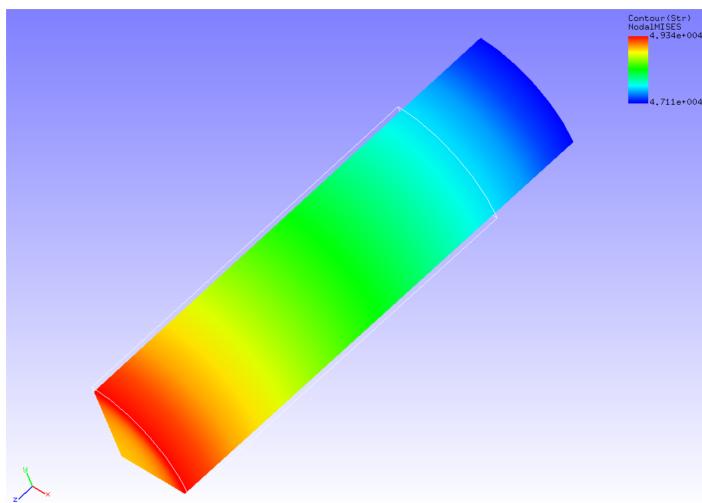


図 4.8.1 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

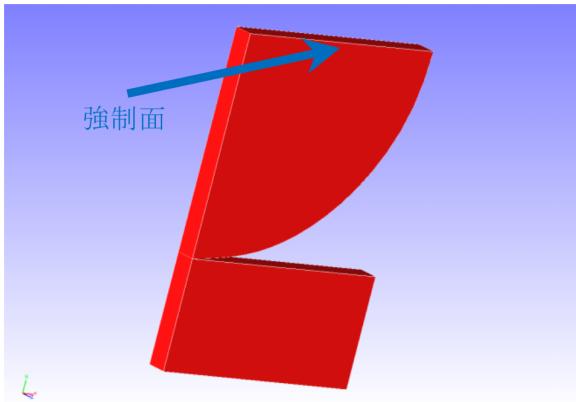


図 4.9.1 解析対象の形状

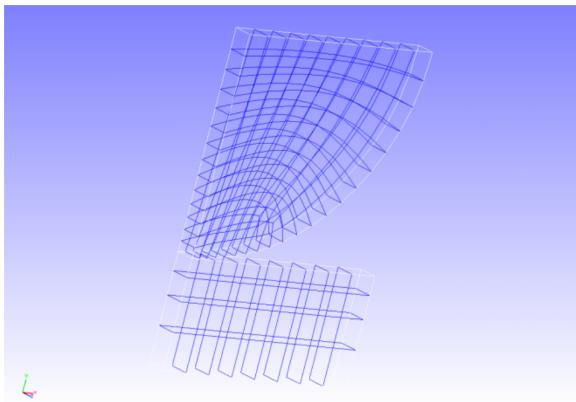


図 4.9.2 解析対象のメッシュデータ

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。

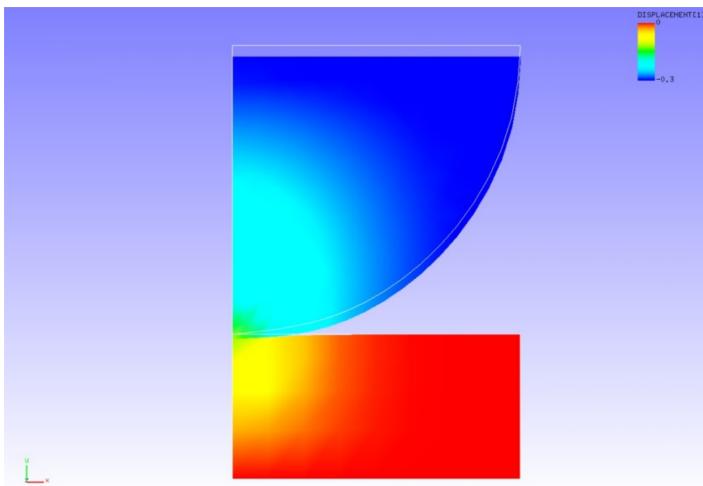


図 4.9.3 変形および y 方向変位の解析結果

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。

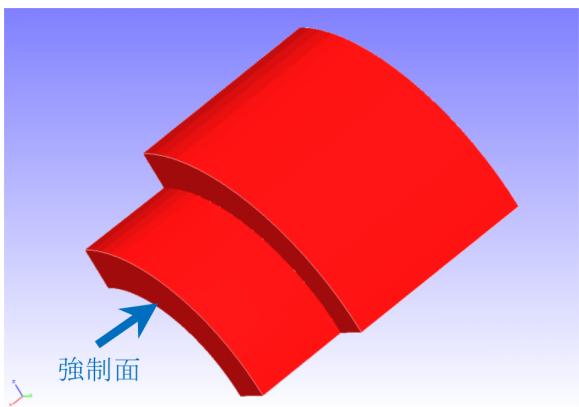


図 4.10.1 解析対象の形状

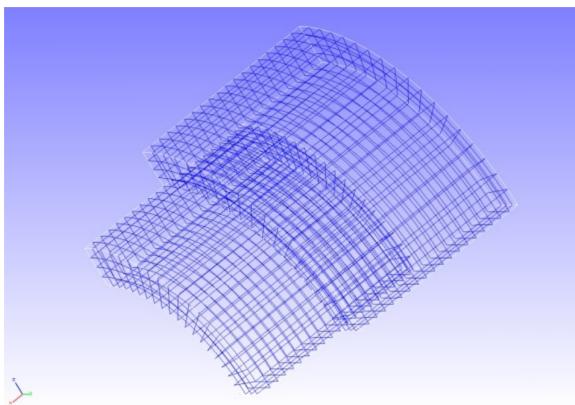


図 4.10.2 解析対象のメッシュデータ

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。

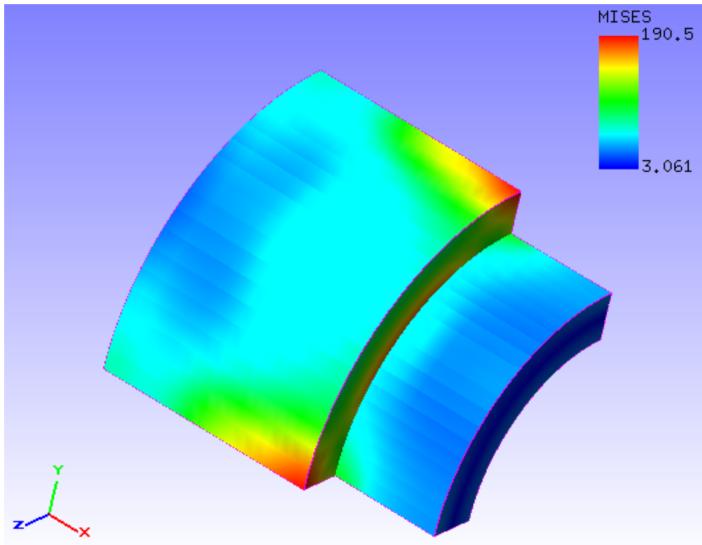


図 4.10.3 変形およびミーゼス応力の解析結果

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、メッシュ規格は要素数 80、節点数 252 です。

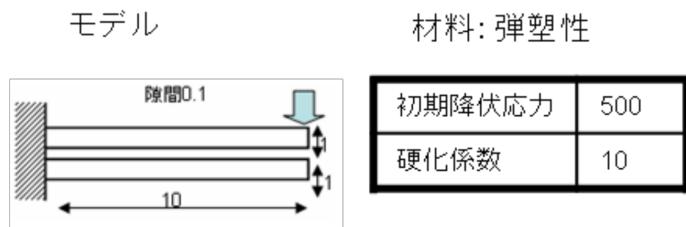


図 4.11.1 解析モデルの概要

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。

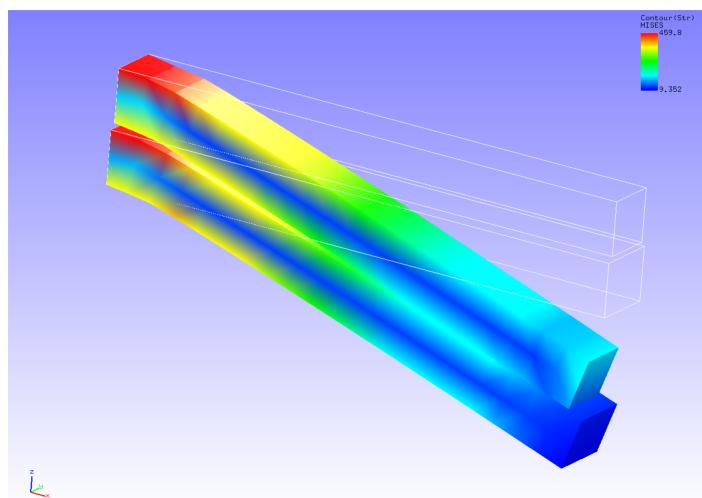


図 4.11.2 変形およびミーゼス応力の解析結果

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。

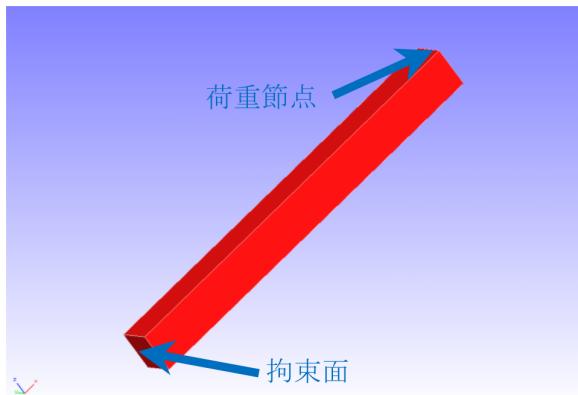


図 4.12.1 片持ち梁の形状

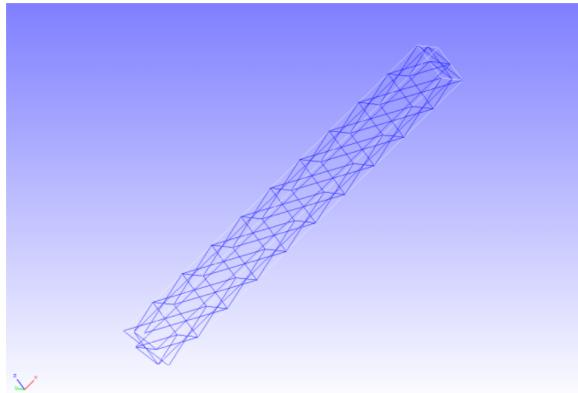


図 4.12.2 片持ち梁のメッシュデータ

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。

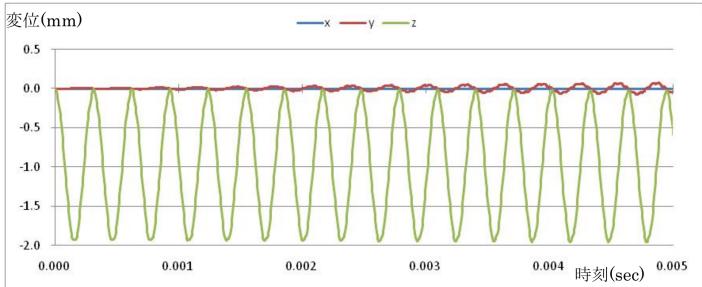


図 4.12.3 モニタリング節点の変位時系列

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。

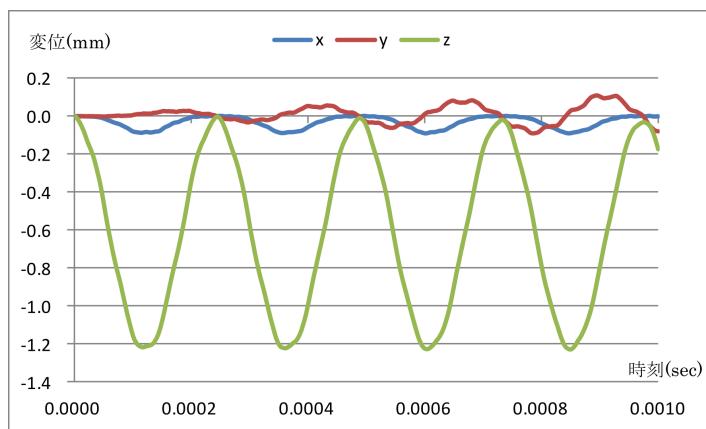


図 4.13.1 モニタリング節点の変位時系列

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。

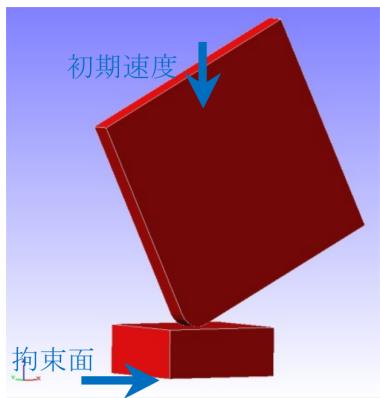


図 4.14.1 床面と角材の形状

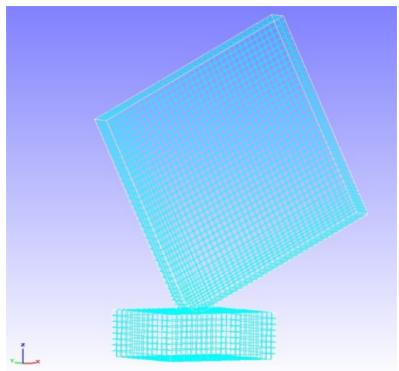


図 4.14.2 床面と角材のメッシュデータ

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。

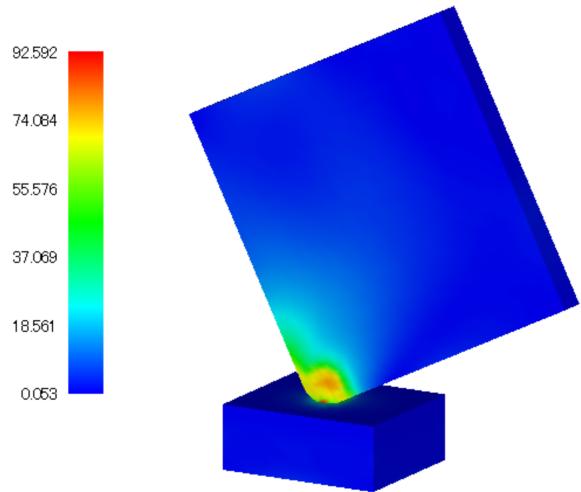


図 4.14.3 落下衝撃時のミーゼス応力

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。

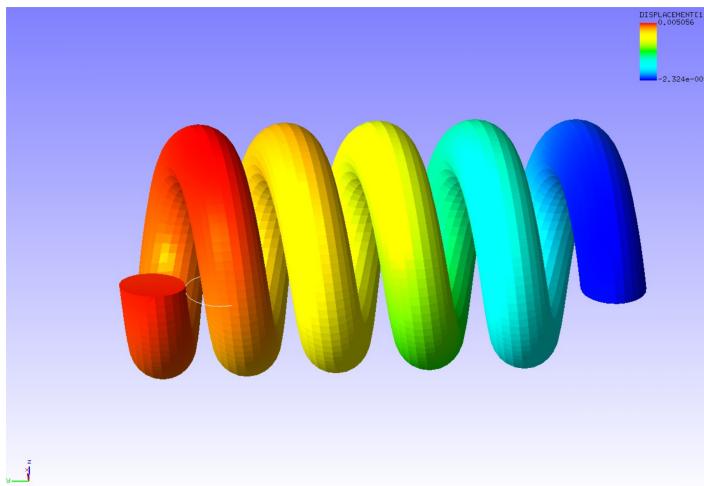


図 4.15.1 スプリングの 3 次振動モード

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。

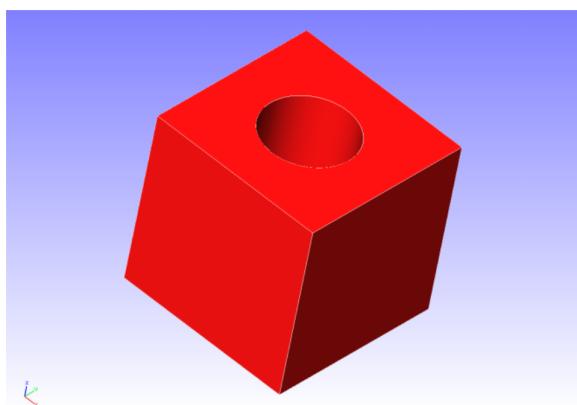


図 4.16.1 穴あきブロックの形状

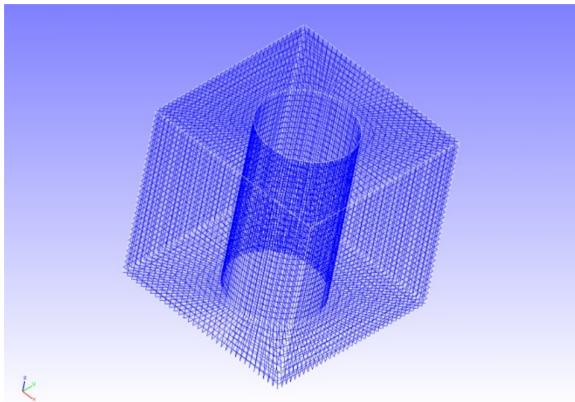


図 4.16.2 穴あきブロックのメッシュデータ

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。

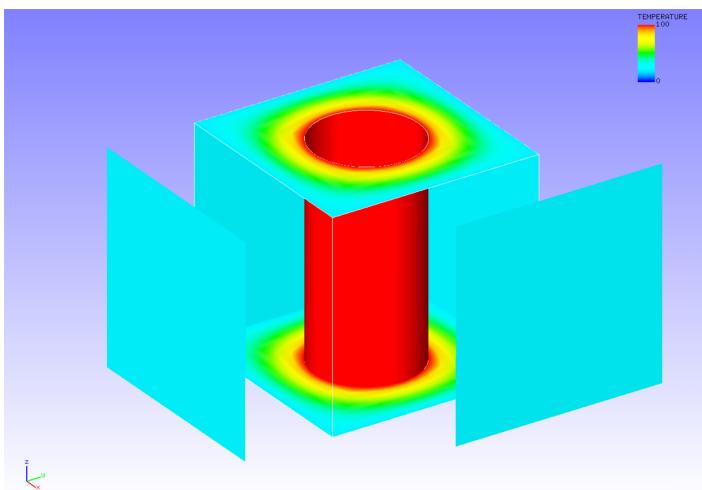


図 4.16.3 溫度の解析結果

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。

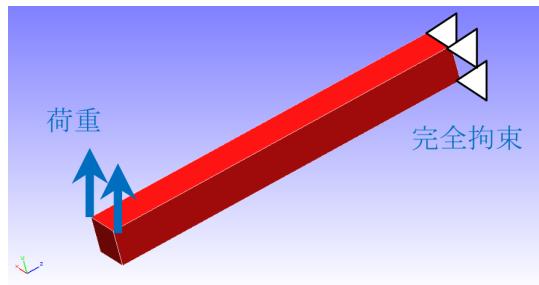


図 4.17.1 片持ち梁の形状

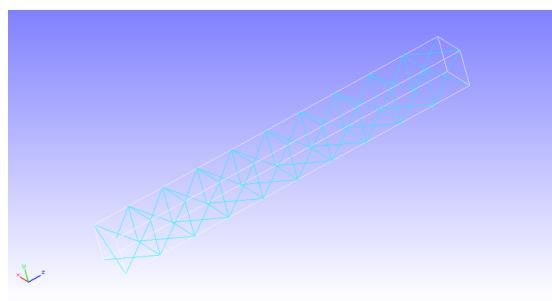


図 4.17.2 片持ち梁のメッシュデータ

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。

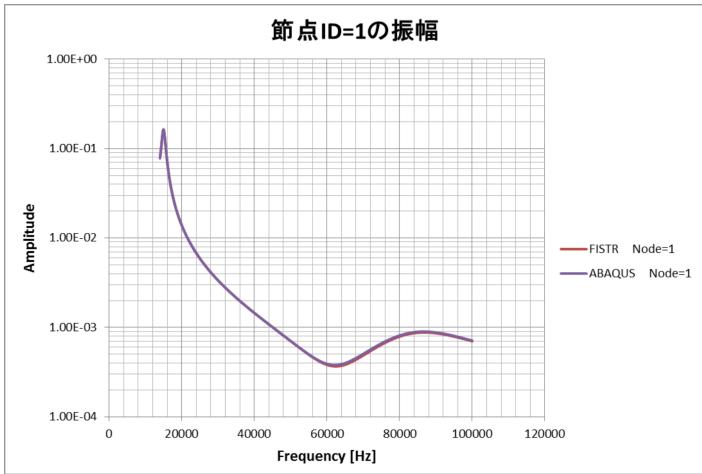


図 4.17.3 モニタリング節点の周波数と変位振幅の関係

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。

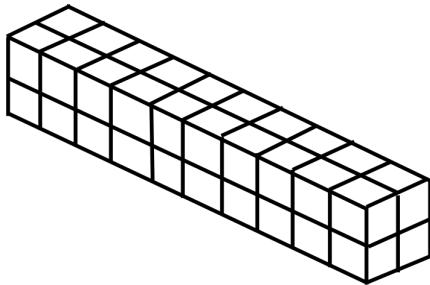
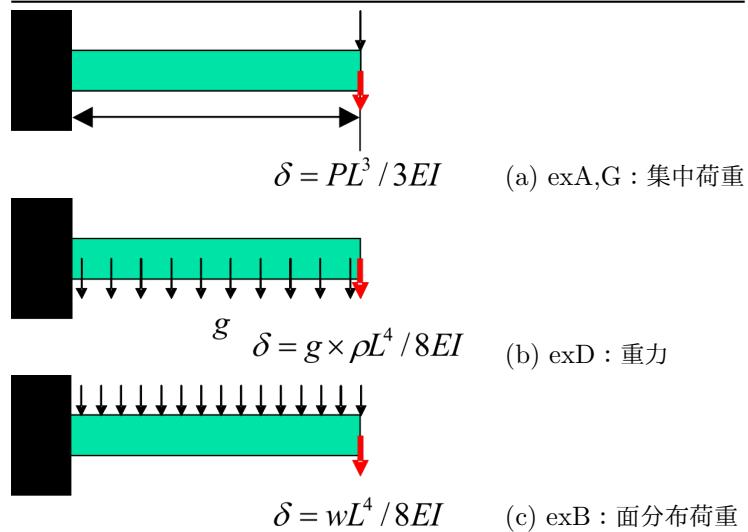
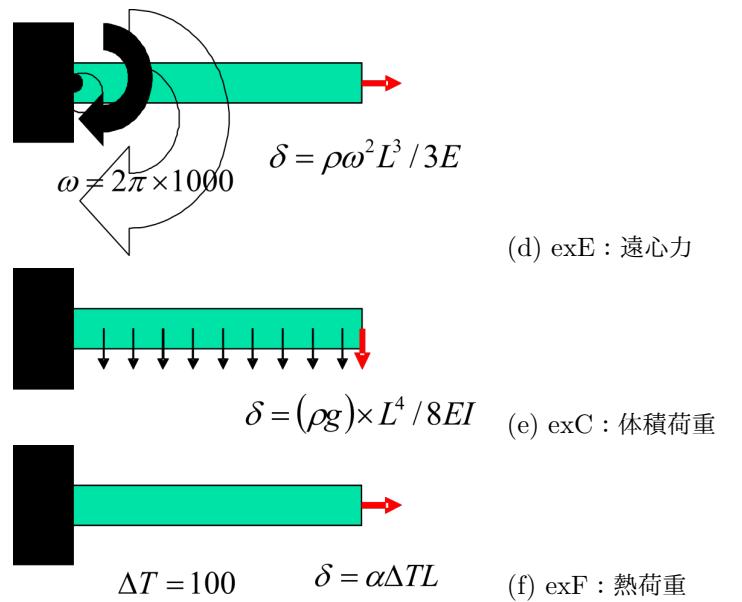


図 9.1.1 片持ち梁のメッシュ分割例（六面体要素）





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。

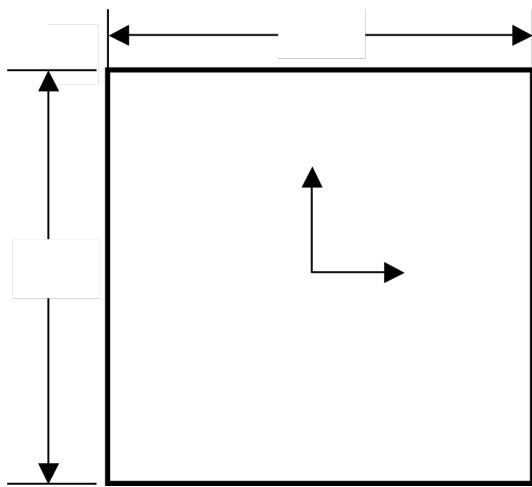


図 1 弾塑性変形解析モデル

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	0.25×10^{-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) [$H_i = 0 H_k = 0; H_i = 62.5 H_k = 0$])
ε_x		ε_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。

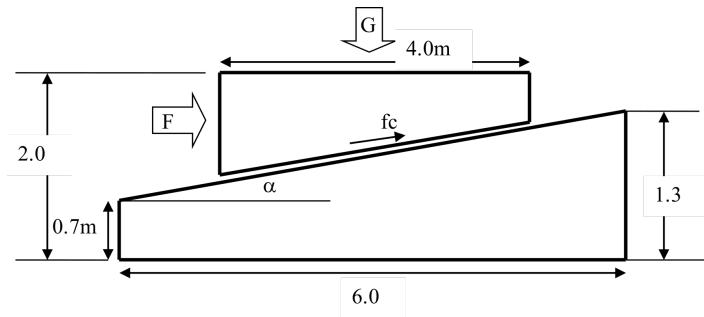


図 2 接触解析モデル

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。

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

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 及びポアソン比 ν 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。

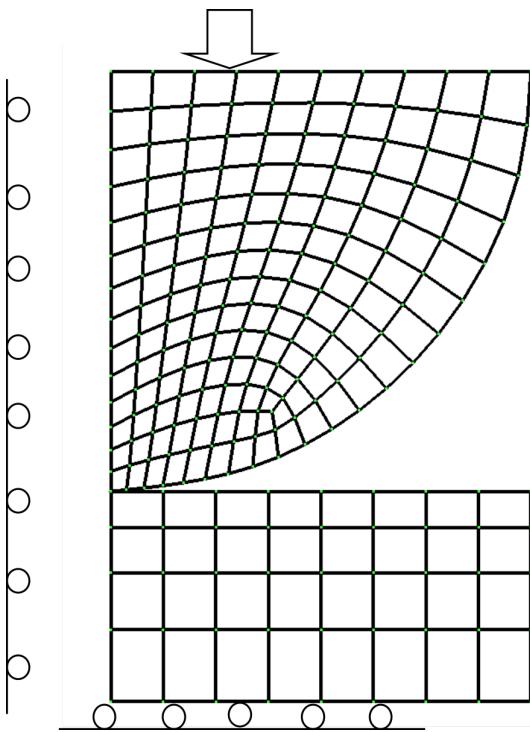


図 9.1.6 ヘルツ接触問題解析モデル

1.21.4.1 (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

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

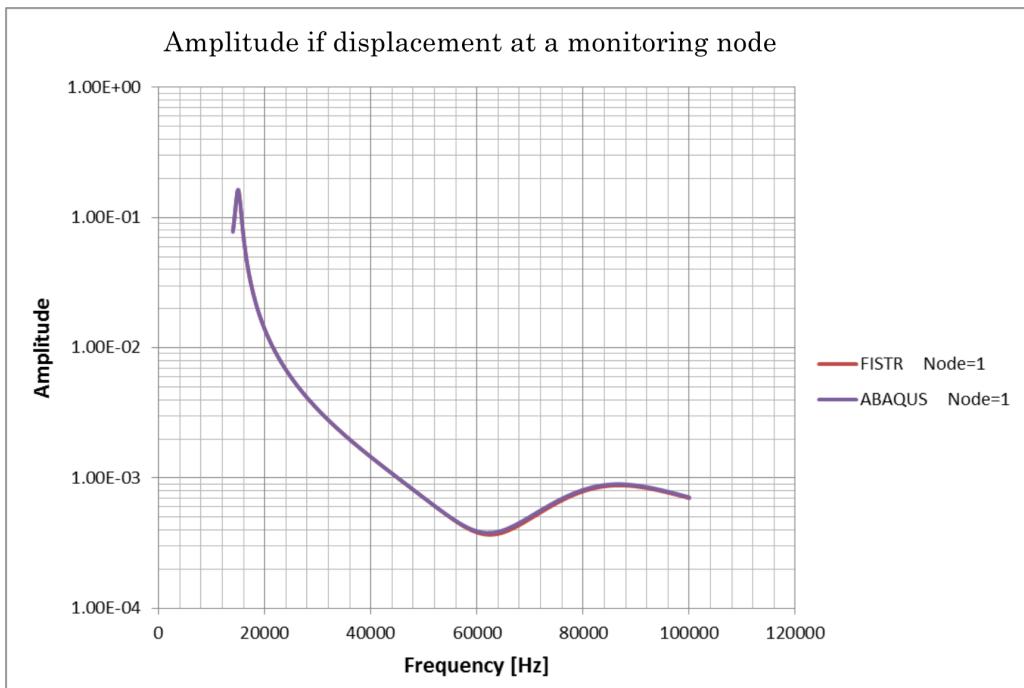


図 3 接触点の等価節点力分布

となる。これに対して、

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

の計算結果が得られた。

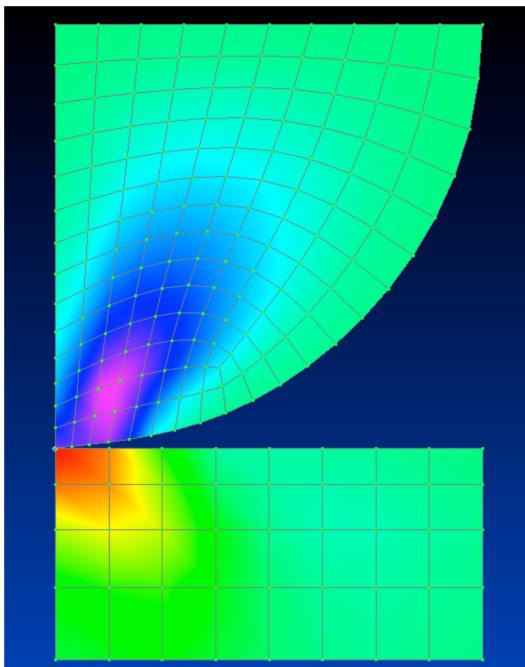


図 9.1.8せん断応力分布（最大値=15.6）

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 ⁴
E	4000.0kgf/mm ²
l	1.0/12.0mm ⁴
ω	7.85 * 10 ⁻⁶ kgf/mm ³
g	9800.0mm/sec ²

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）

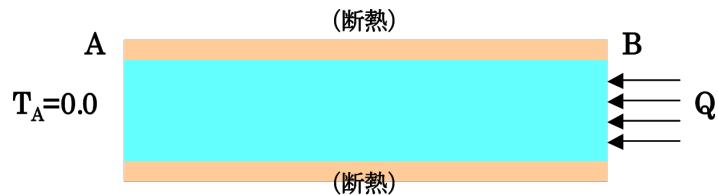
ケース名	要素数	予測値 : n2=2.262e4	備考	
		NASTRAN	FrontISTR	
J231	40	3.350e4	3.351e4	33 節点 / 平面応力状問題
J232	40	2.163e4	2.156e4	105 節点 / 平面応力状問題
J241	20	2.149e4	2.516e4	33 節点 / 平面応力状問題
J242	20	2.149e4	2.143e4	85 節点 / 平面応力状問題
J341	240	3.145e4	3.138e4	99 節点
J342	240	2.171e4	2.155e4	525 節点
J351	80	2.208e4	2.546e4	99 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。

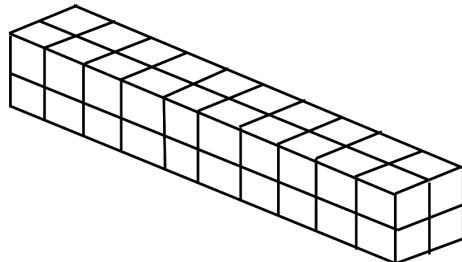
1.21.6 (4) 热伝導解析

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

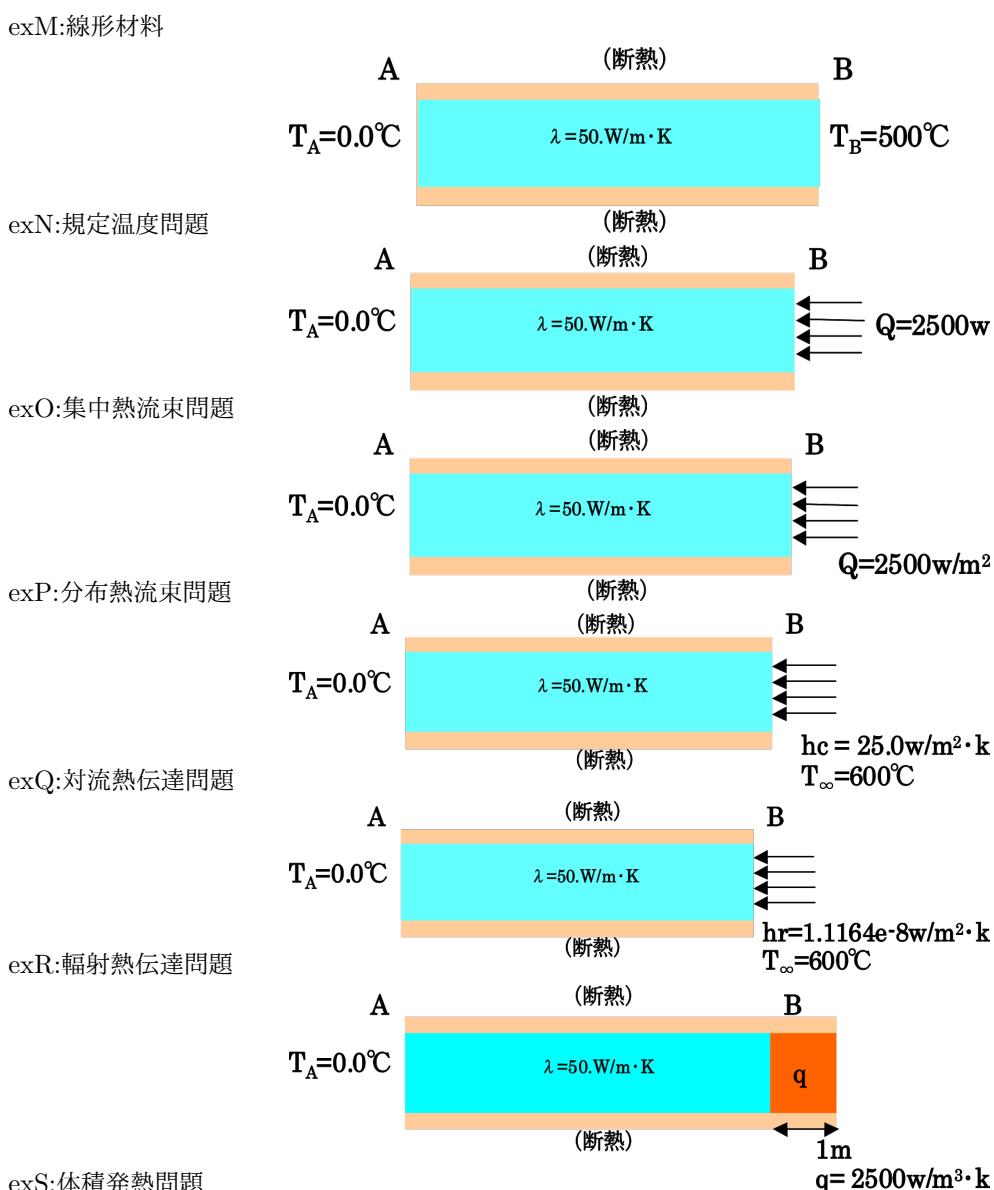
図 4 热伝導解析

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



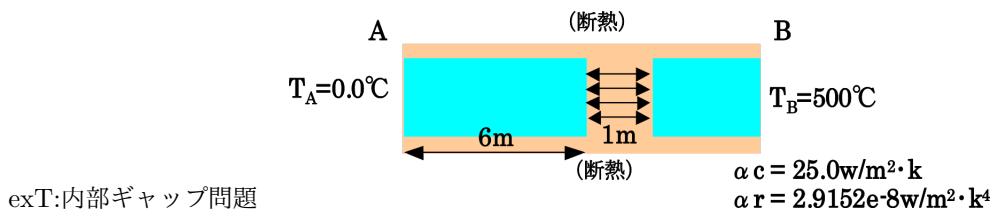


図 9.1.11 検証ケース別解析条件

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	

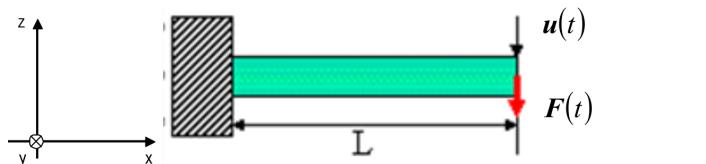
ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離 (m)	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S362	362	40 / 330	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S731	731	40 / 33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6
S741	741	20 / 33	0.0	103.2	213.7	333.3	464.8	612.6

表 9.1.20 exT : 内部ギャップ問題の検証結果

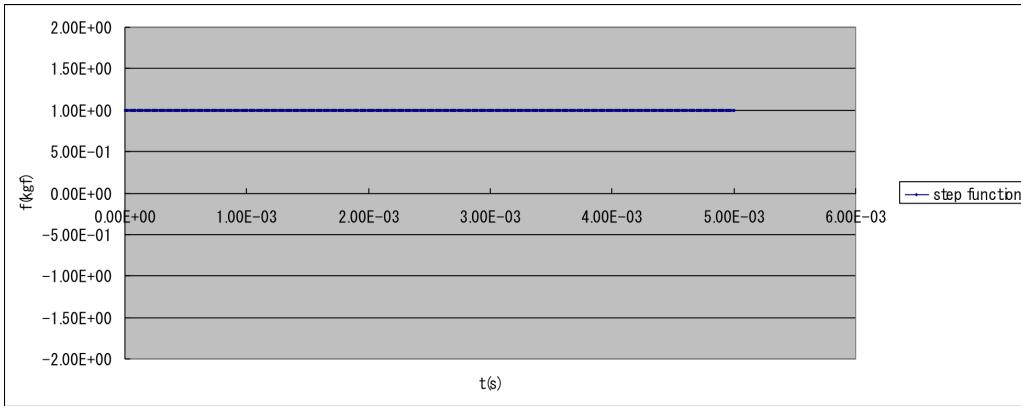
ケース名	要素タイプ	要素／節点数	A 端からの距離 (m)	A 端					B 端
				2.0	4.0	6.0	8.0		
ABAQUS	361	40 / 99	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0	
S231	231	40 / 33	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0	
S232	232	40 / 105	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0	
S241	241	20 / 33	0.0	88.6	182.4	282.6	387.7	500.0	
S242	242	20 / 85	0.0	88.6	182.4	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 ²
ポアソン比	ν	0.3
密度	ρ	1.0E-09 kgf s 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 $\beta = 1/4$

陽解法

減衰

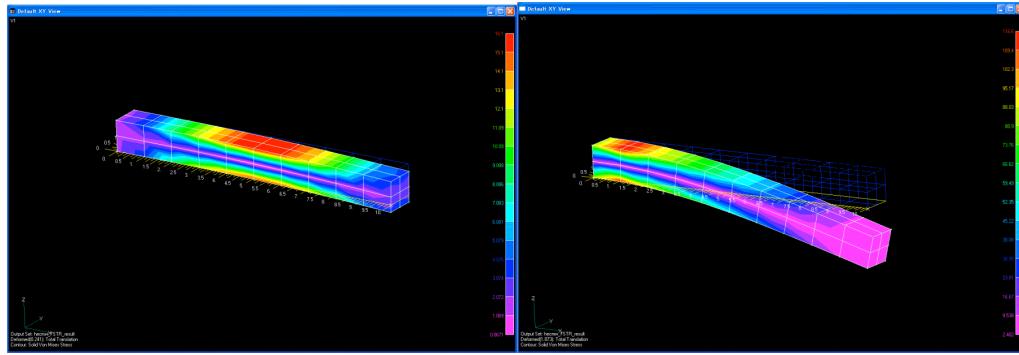
無し

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 Δt [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

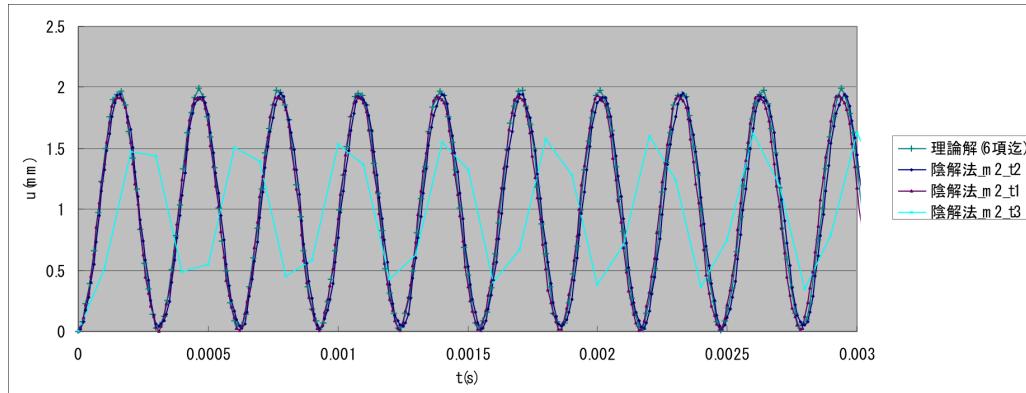
表 9.1.22 exW : 片持ち梁を対象とした線形動解析の検証結果

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

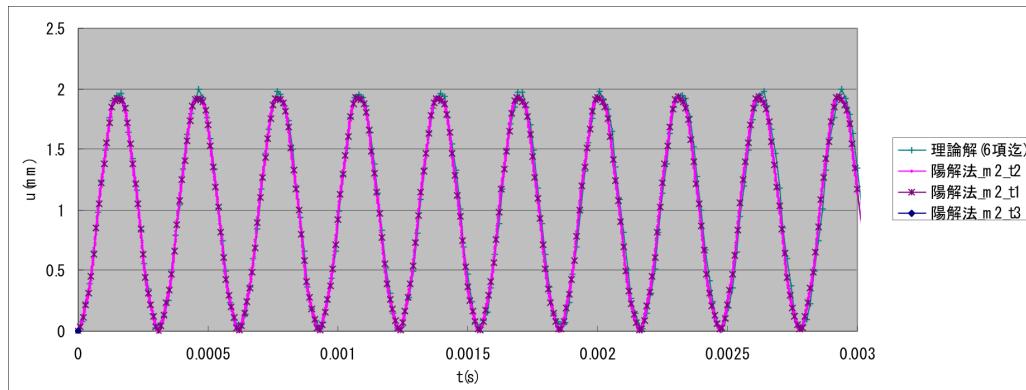


(a) $t=2.0E-03(s)$ (b) $t=4.0E-03(s)$

図 9.1.13 片もち梁の変形図及び相当応力分布

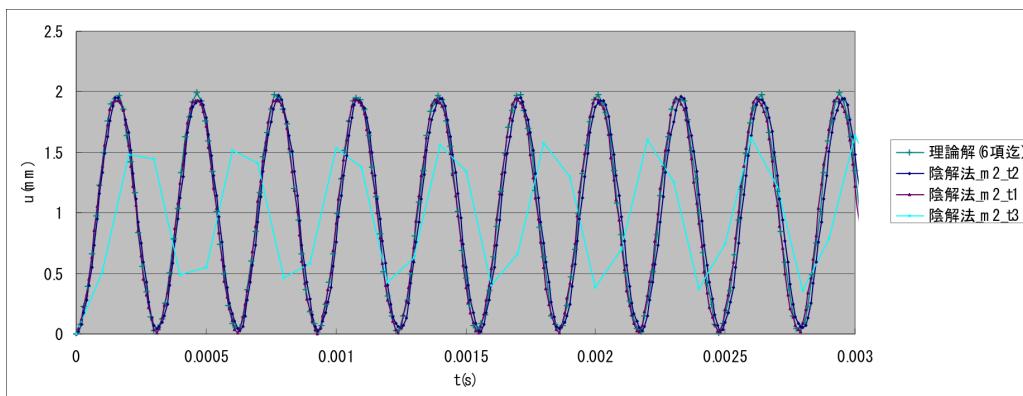


(a) 要素タイプ 361:陰解法

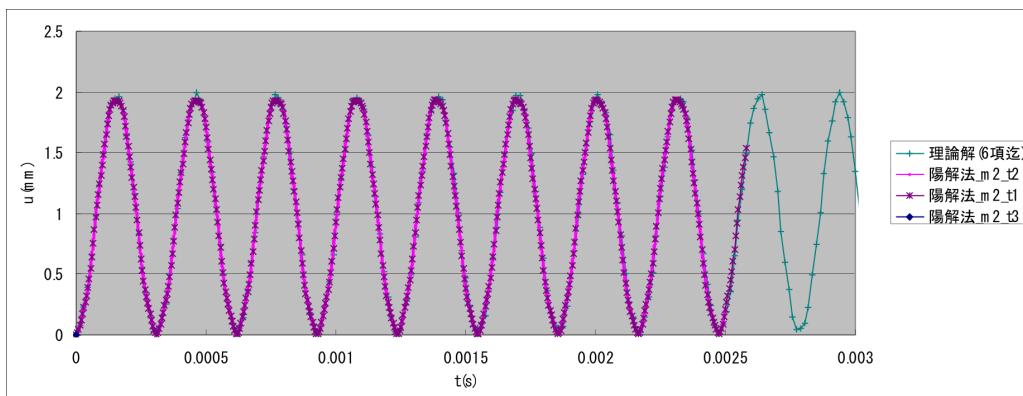


(b) 要素タイプ 361:陽解法

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

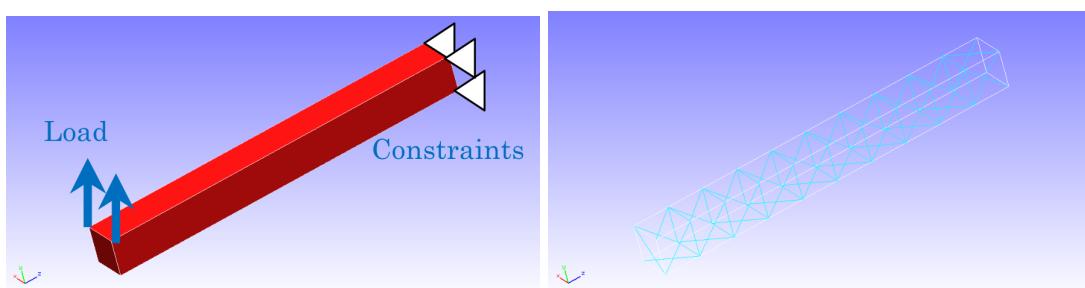


(b) 要素タイプ 342:陽解法

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 N/mm^2
ポアソン比	ν	0.3
密度	ρ	$7.89E - 09 \text{ t/mm}^3$
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	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

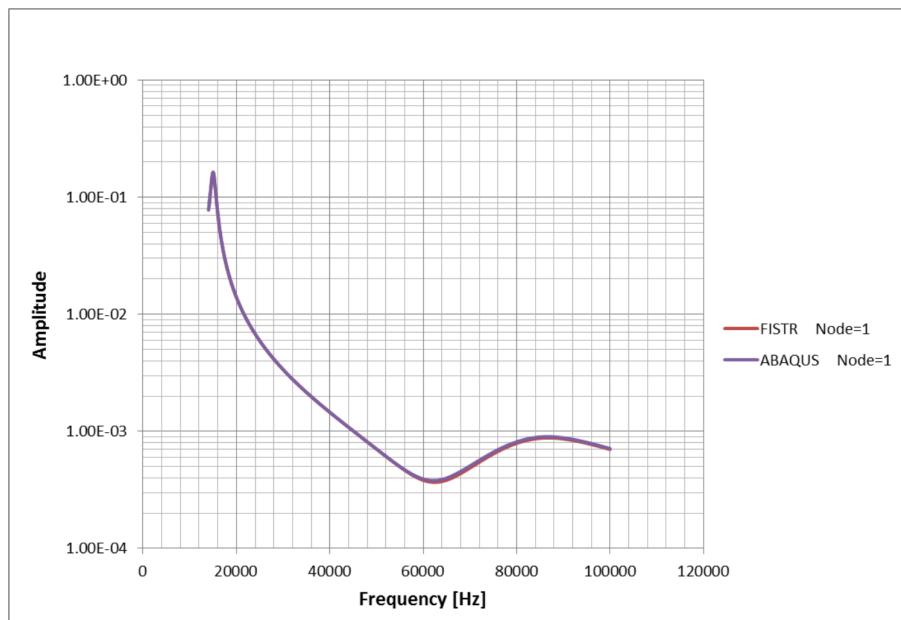


図 9.1.16 加振点の変位強度の周波数依存性

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

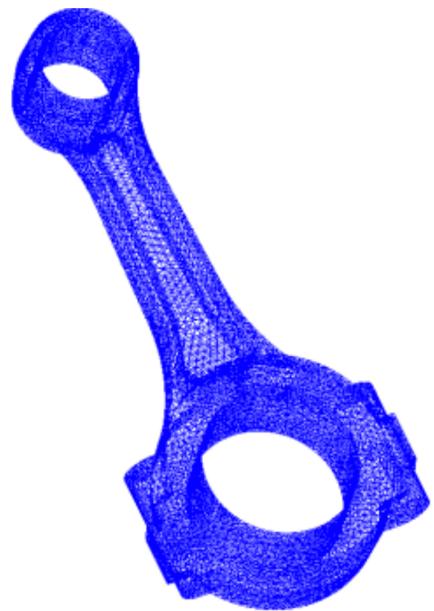


図 9.2.1 コンロッド (EX01A)

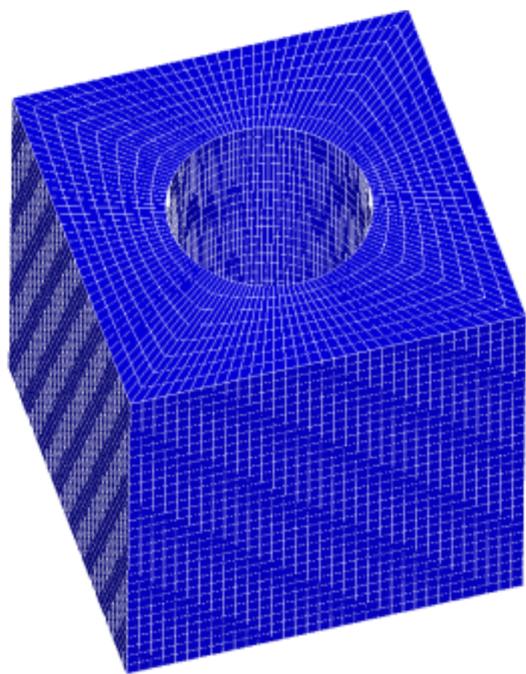


図 9.2.2 穴あきブロック (EX02)

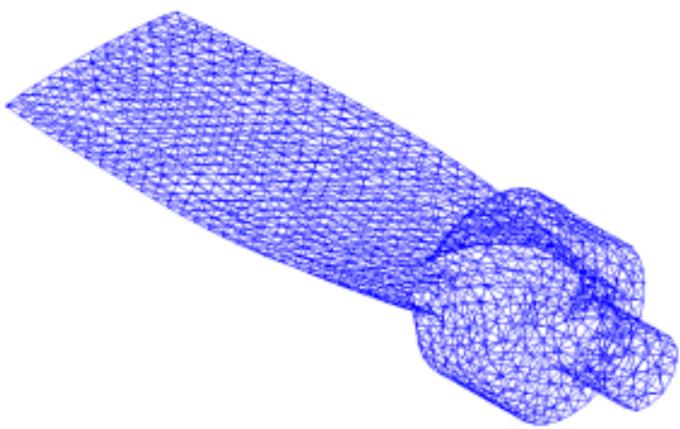


図 9.2.3 ターピンブレード (EX03, EX06)

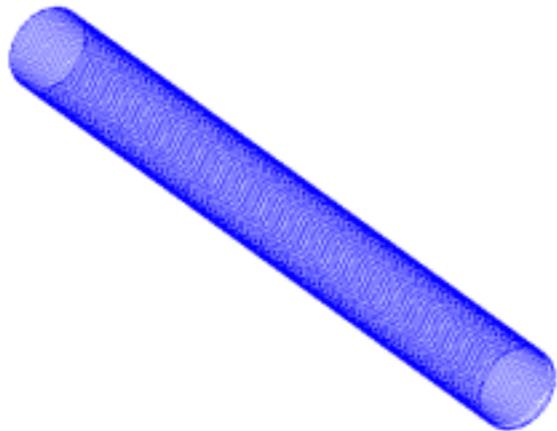


図 9.2.4 円筒シェル (EX04, EX09)

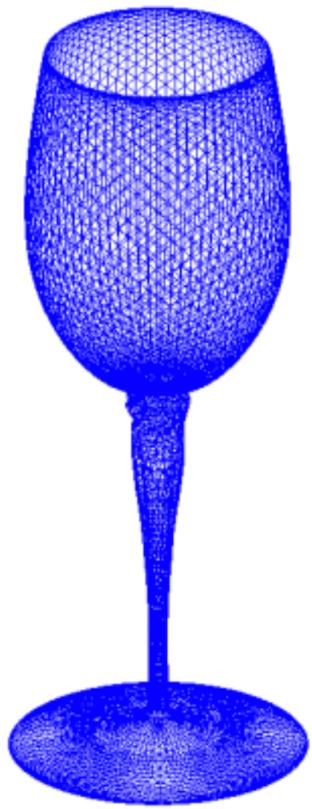


図 9.2.5 ワイングラス (EX05, EX10A)

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。

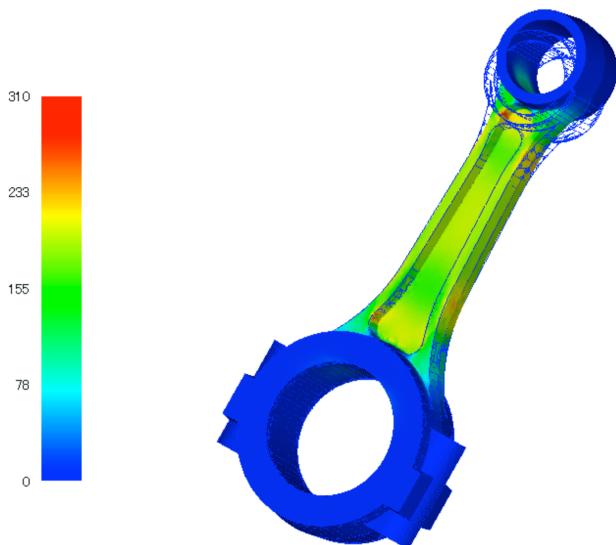


図 9.2.6 EX01A 解析結果 (Mises 応力と変形図 (10 倍))

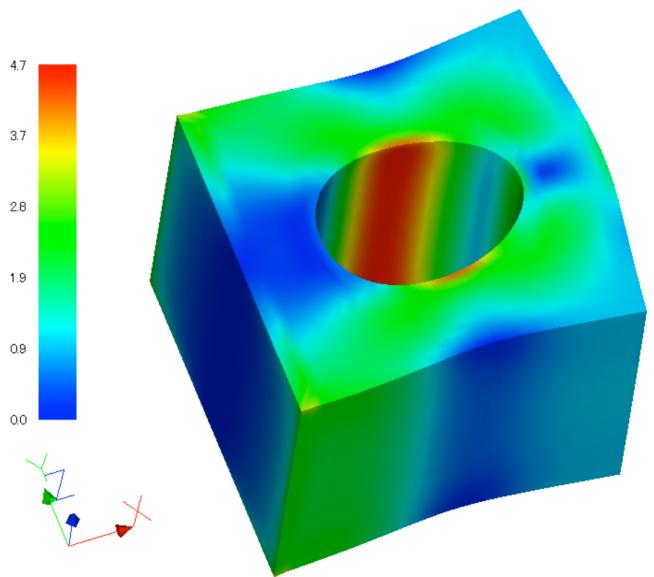


図 9.2.7 EX02 解析結果 (Mises 応力と変形図 (100 倍))

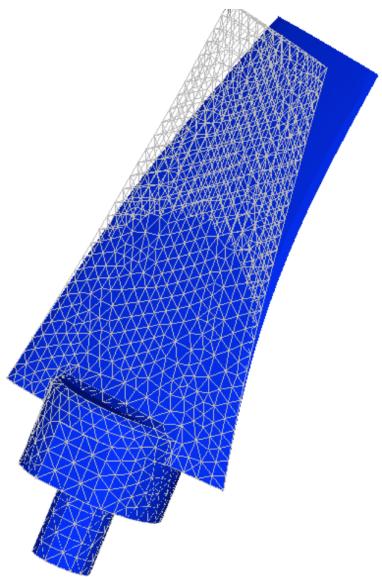
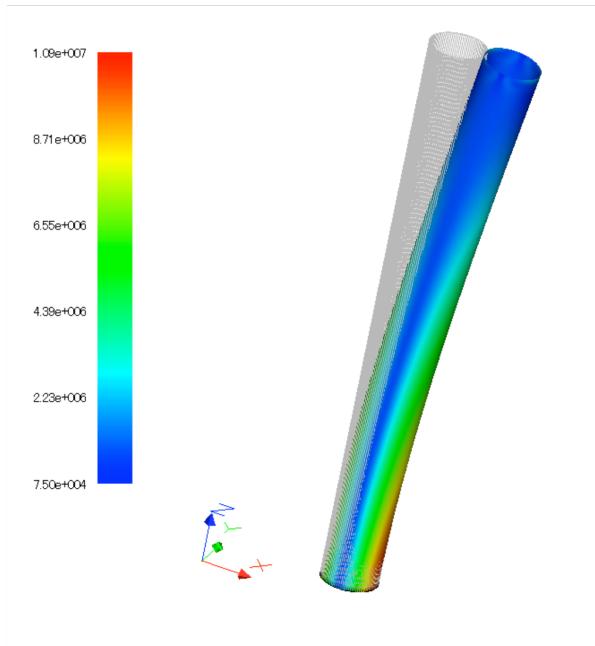


図 9.2.8 EX03 解析結果 (変形図 (10 倍))



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。

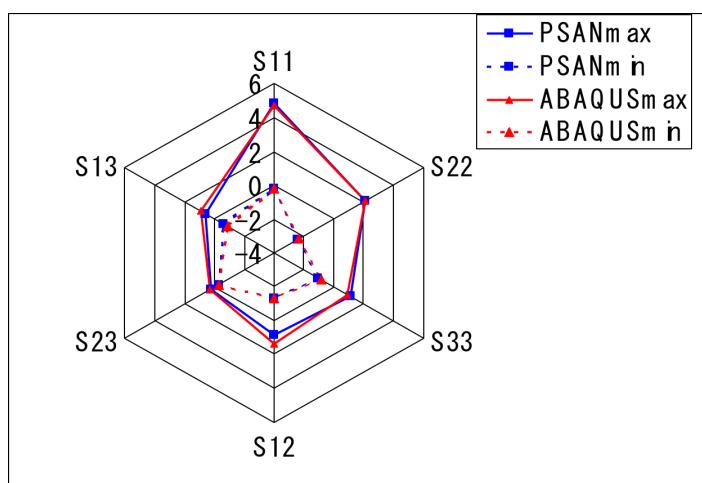


図 9.2.10 EX02 における汎用ソフトとの応力成分の比較

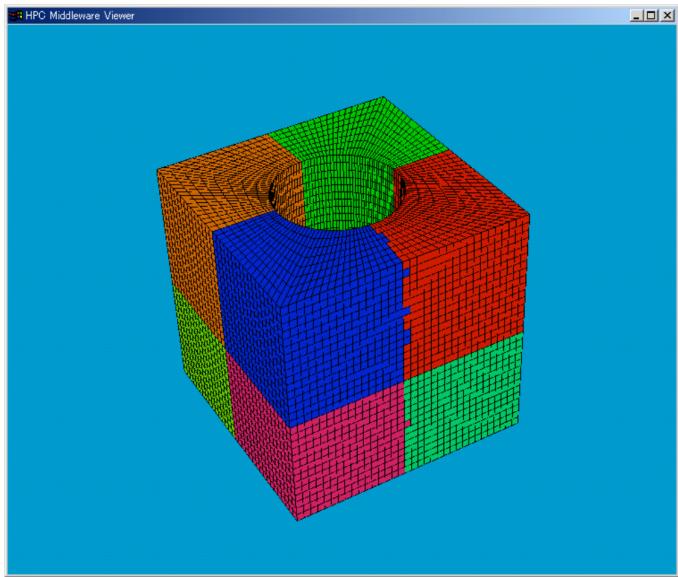


図 9.2.11 RCB 法による EX02 の 8 領域分割結果

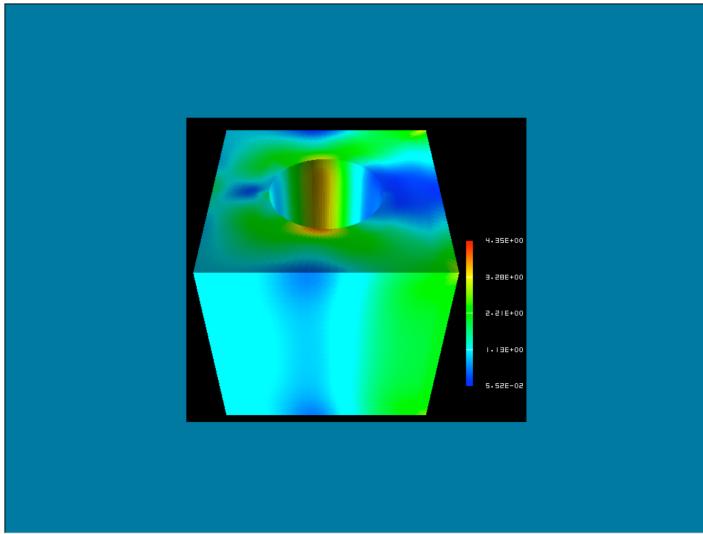


図 9.2.12 領域分割によるミゼス応力分布の相違

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

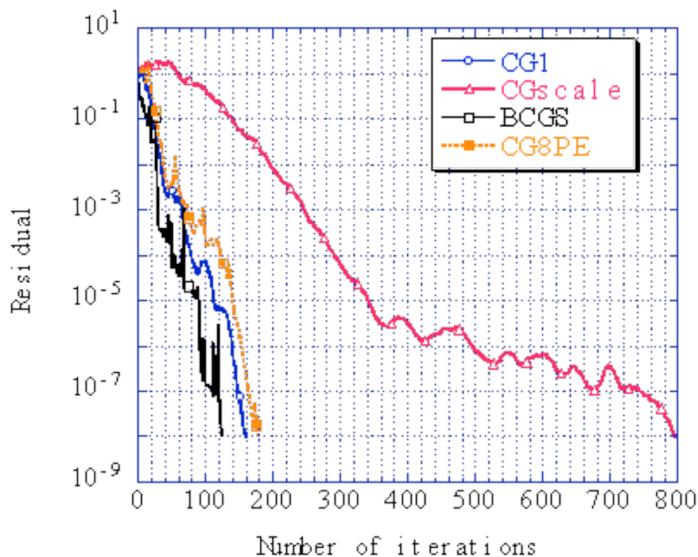


図 9.2.13 HEC-MW ソルバーによる収束履歴の比較（収束判定閾値： 1.0×10^{-8} ）

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。

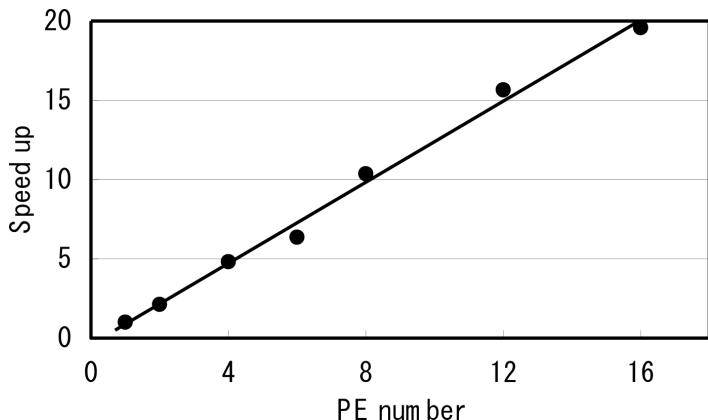


図 9.2.14 領域分割による増速効果

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

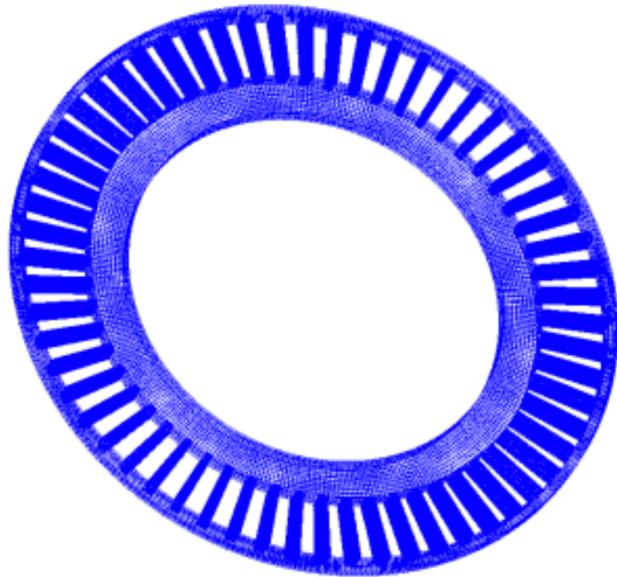


図 9.3.1 タービンロータ (EX07)

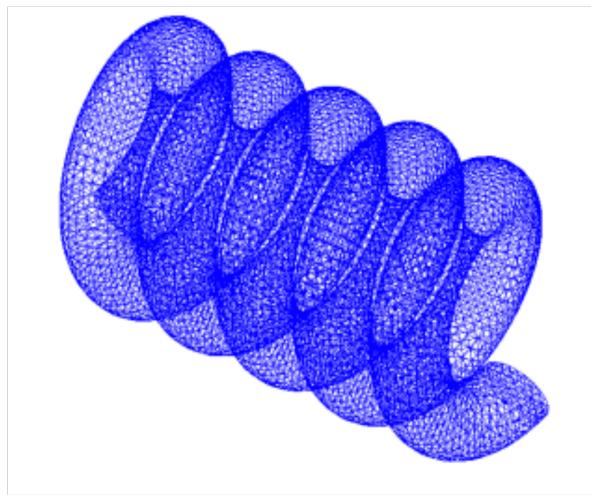


Figure 9.3.2: Spring (EX08)

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

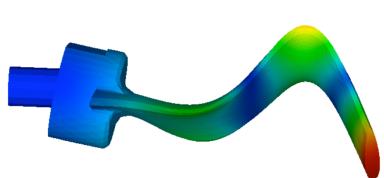
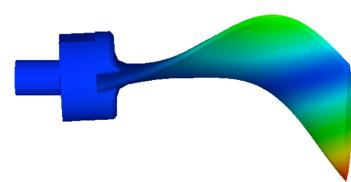
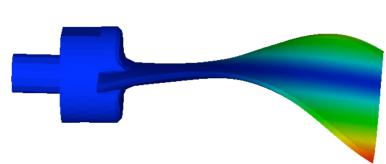
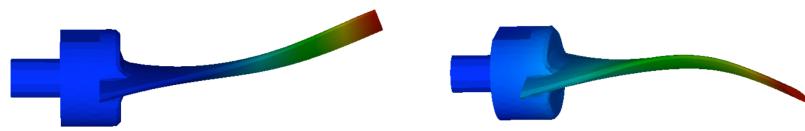


図 9.3.3 EX06 タービンブレード振動モード

1.23.2.2 EX07 タービンロータ

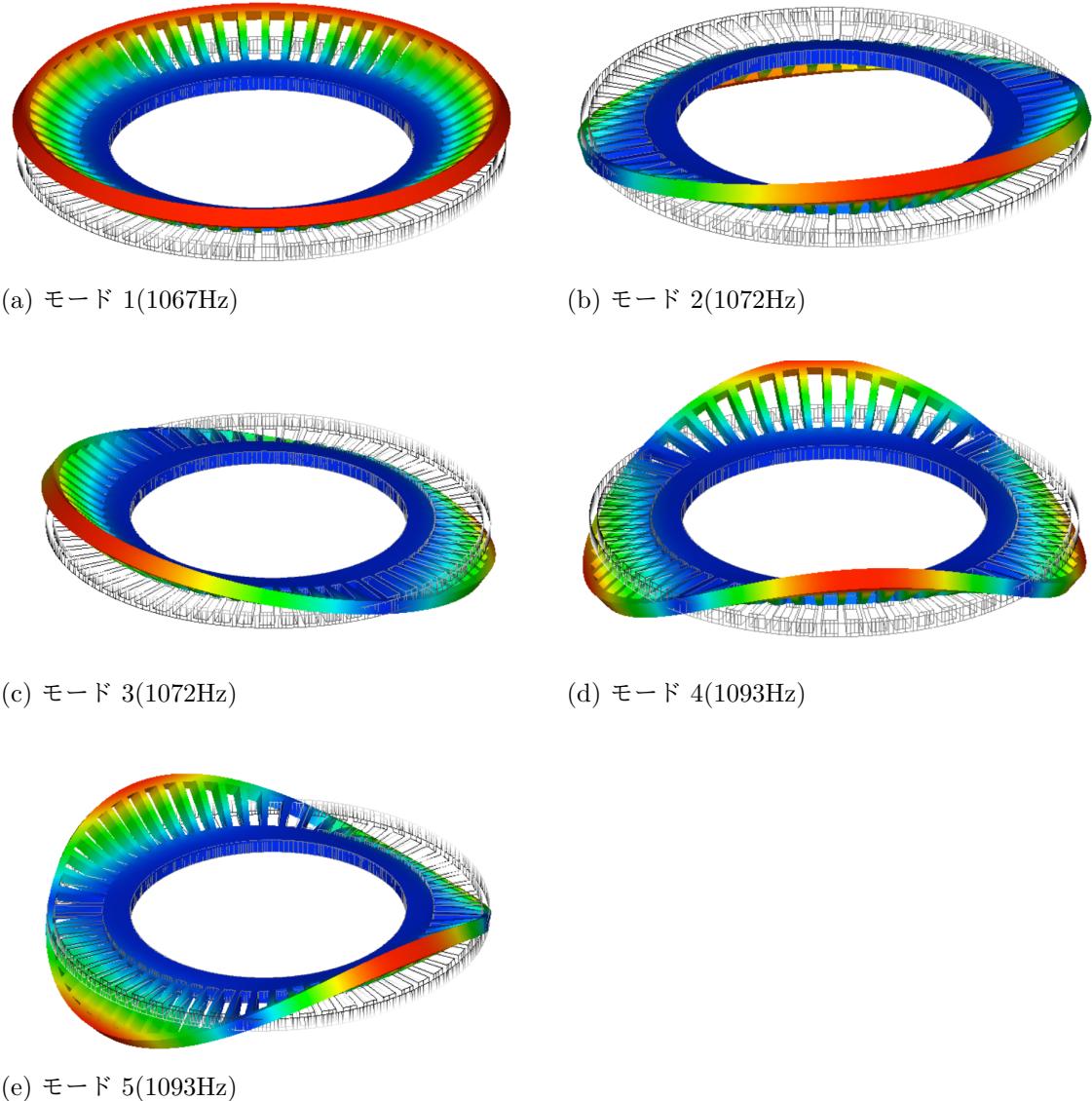
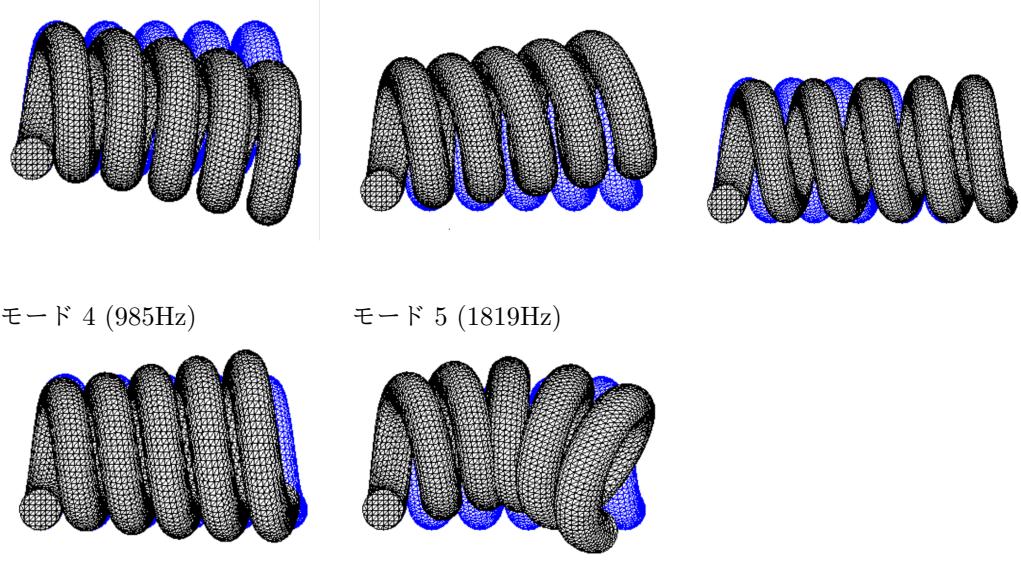


図 9.3.4 EX07 タービンロータ振動モード

1.23.2.3 EX08 スプリング

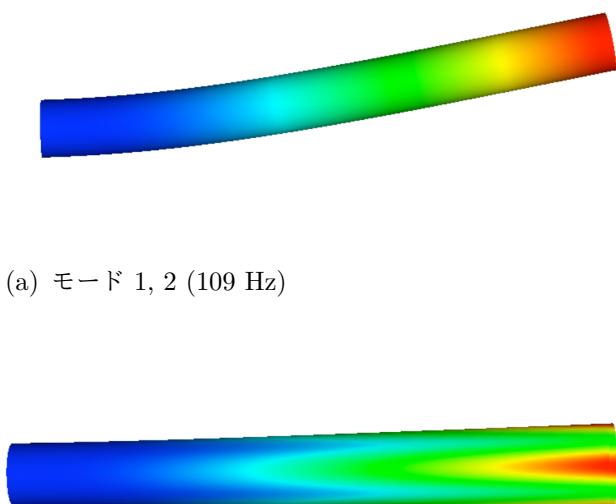
モード 1 (445Hz) モード 2 (446Hz) モード 3 (908Hz)



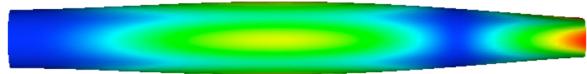
	FrontISTR	NASTRAN
1	445 Hz	445 Hz
2	446 Hz	446 Hz
3	908 Hz	908 Hz
4	985 Hz	986 Hz
5	1810 Hz	1810 Hz

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



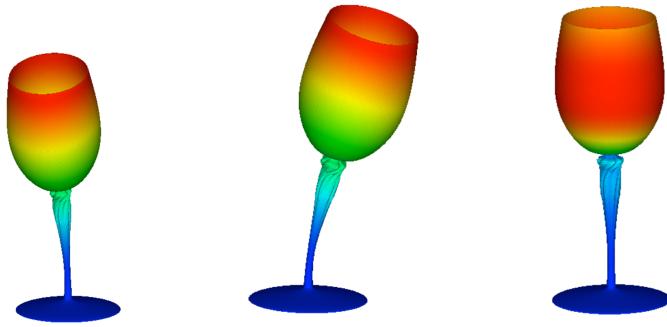
(b) モード 3,4(570Hz)



(c) モード 5(615Hz)

図 9.3.6 EX09 円筒シェル振動モード

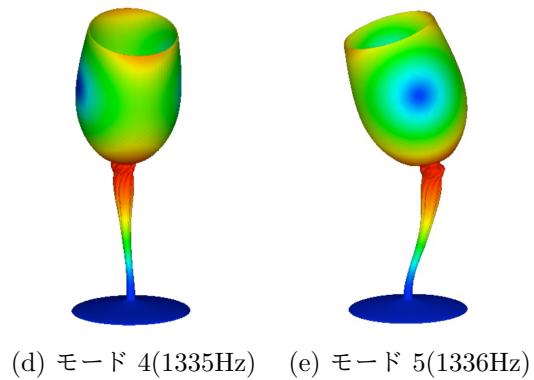
1.23.2.5 EX10A ワイングラス



(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

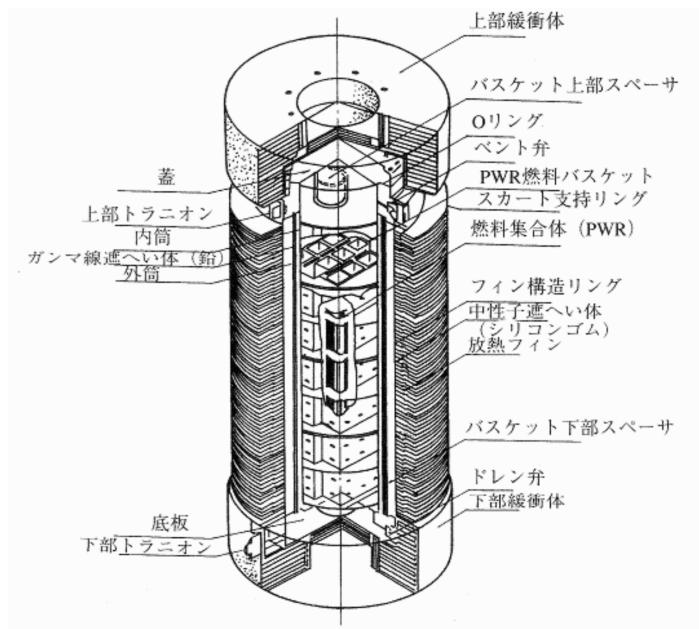
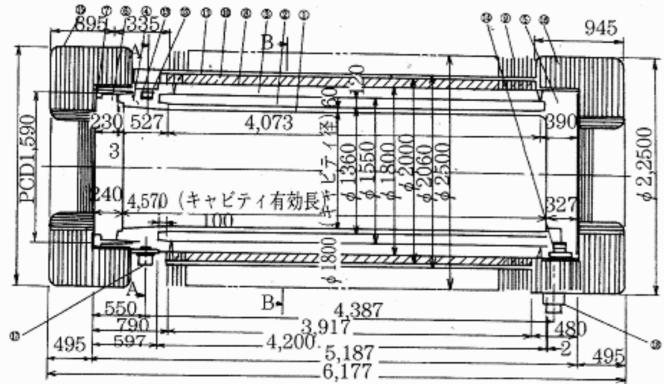


図9.4.1 使用済核燃料輸送容器



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

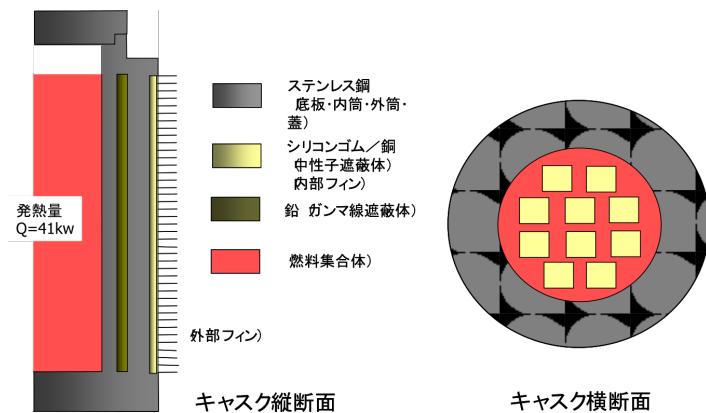


図 9.4.3 モデル概念図

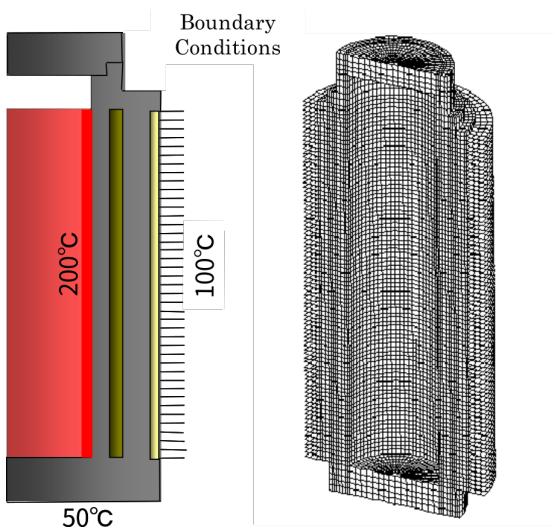


図 9.4.4 モデル境界条件とメッシュ分割図 (EX21A)

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。

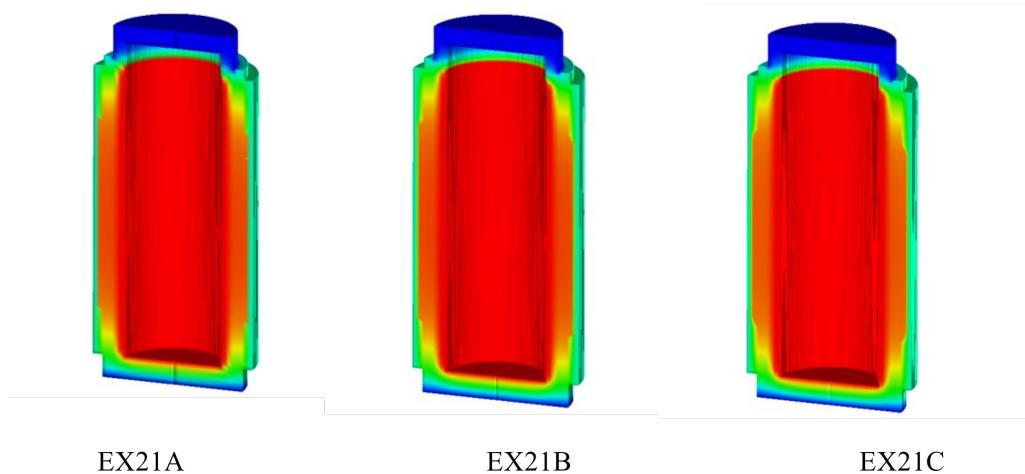


図 9.4.5 溫度分布図

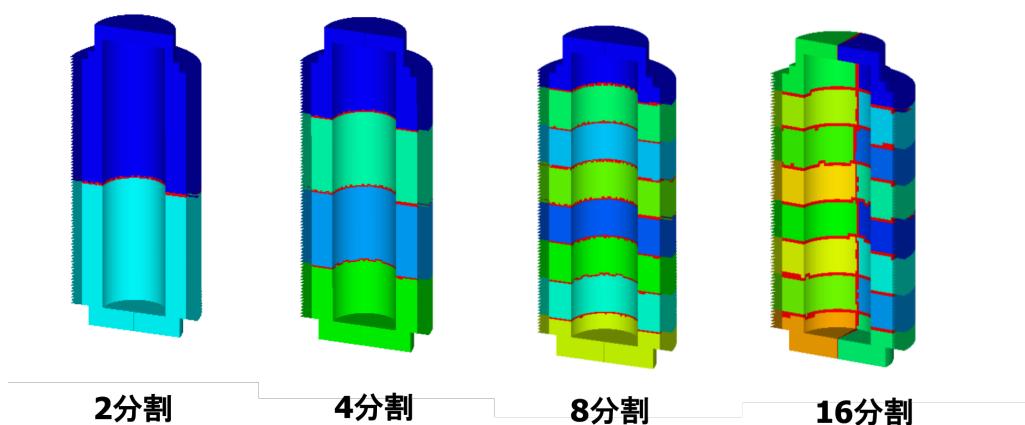


図 9.4.6 分散モデル図

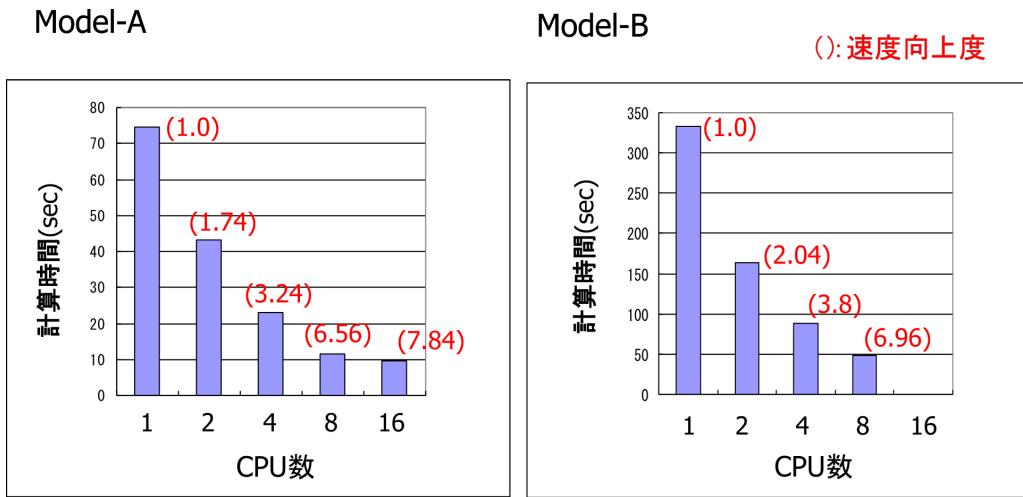


図 9.4.7 分散処理による速度向上度

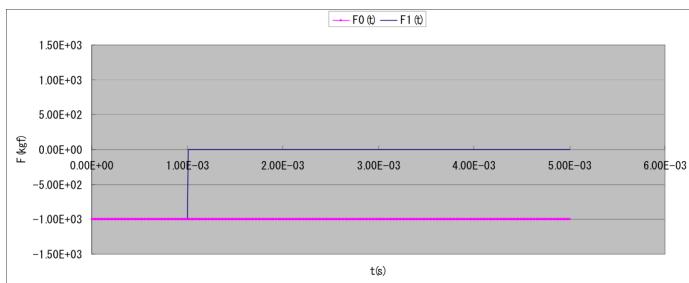
1.25 線形動的解析用実モデル例題

1.25.1 解析モデル

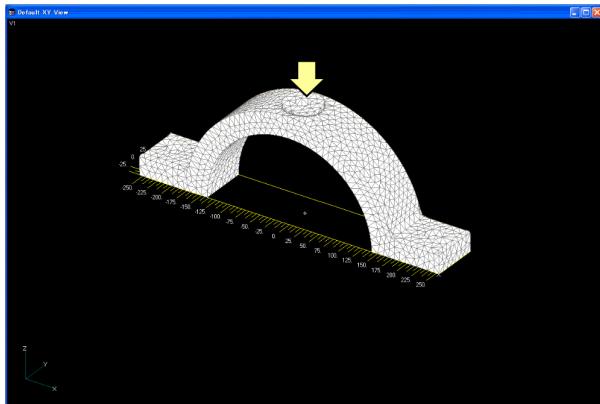
線形動的解析では、実モデルとして図 9.5.1 に示す機械部品を対象とする。この実モデルについて、荷重条件及び減衰係数の異なる 4 ケースに対して検証例題を設定する。その一覧を表 9.5.1 に示す。

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。

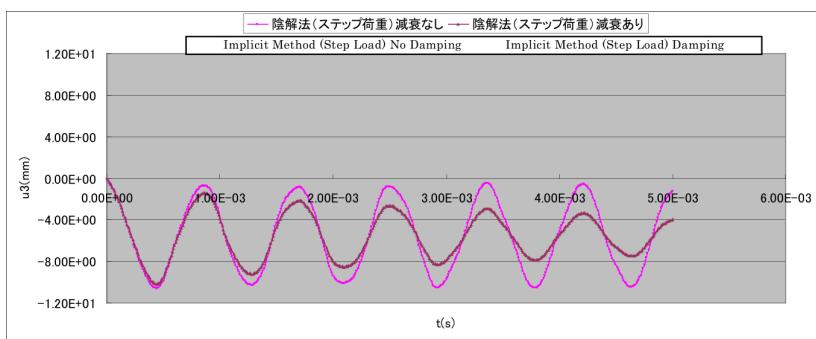


図 9.5.2 加振点変位 u_z の時刻歴

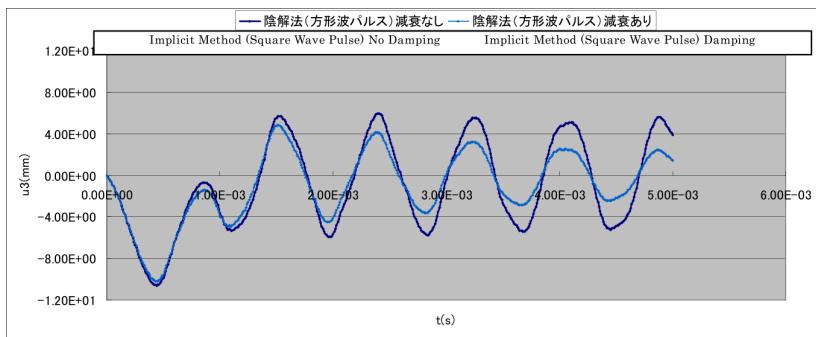


図 9.5.3 変形図及び相当応力分布 (変形倍率 5.0) : EX31C