

Advance/FrontSTRの部品アセンブリ解析機能

末光 啓二* 徳永 健一*

The Assembly Analysis by Advance/FrontSTR

Keiji Suemitsu* and Ken-ichi Tokunaga*

近年の計算機能力の飛躍的向上を背景として、産業界での製品に対する品質向上への要求から設計における大規模構造解析シミュレーションのニーズが高まっている。そこでは、大規模なメッシュをどのように作成していくかという課題がある。この問題に対しては、当社で販売する汎用構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR では、幾つかの仕組みを用意している。ここでは、そのための仕組みのひとつである「アセンブリ解析機能」について報告する。本機能を利用することで、部品ごとに作成したメッシュを用いてまるごと解析が可能である。具体的には、部品間の接合境界面を指定することにより、各部品の個別メッシュをアセンブルする。アセンブルしたデータをまるごとソルバーに渡すことにより解析が可能となる。

ここでは、「アセンブリ解析機能」のアルゴリズムと基本性能、および、実用例題への適用事例について述べる。この内容を通して、プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP と汎用構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR を利用して、大規模なメッシュの作成方法および解析方法が実用化できていることを示す。

Key word: 構造解析、並列化、大規模、アセンブリ構造

1. はじめに

従来の構造解析は、あらかじめ設計上でクリティカルになる部位を設計者が想定し、その部位に対する解析を行うことが一般的である。ところが、近年の計算機能力の飛躍的向上により、製品や構造物をまるごと解析するというニーズが産業界で高まっている。この問題解決方法には幾つかのアプローチがあるが、これまで当社は大規模な構造解析を可能とするというアプローチをしてきた。また、一方で、大規模なメッシュをどのように作成していくかという課題がある。

当社では、この課題を解決すべく、当社のプリポストと構造解析ソフトウェアで「アセンブリ解析機能」を実現した。本機能を利用することで、部品ごとに作成したメッシュを用いて、まるごと解析を可能とする。具体的には、部品間の接合境界面を指定

することにより、部品ごとの個別メッシュをアセンブルする。アセンブルしたデータをまるごとソルバーに渡すことにより解析が可能となる。

2. 部品アセンブリのアルゴリズム

2.1. アルゴリズムの概要

Advance/FrontSTR では、部品をアセンブルするための方法として、節点のペアに対して拘束条件を設定する MPC 法を用いる。この方法を採用することで、接合面におけるメッシュについて整合性をとる必要がないという大きなメリットを得ることが可能となった。すなわち、ユーザーは、部品ごとに独立にメッシュを作成することが可能である。部品のメッシュが出来上がった段階で、必要に応じて全体を組み立てるという利用方法を想定している。

これまで、このような方法は幾つか提案されてきたが、一般的に、MPC 条件の組み込みに際しては、組み込みの容易さから、ペナルティ法が採用される

*アドバンスソフト株式会社 技術第 5 部

5th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

ことが多かった。一方、大規模問題を並列環境で解く場合、直接法の利用は不可能であり、反復法の利用が必須となる。しかし、ペナルティ法を利用した場合には、方程式が悪条件となり、反復法による求解が難しく、直接法の利用がより適している。という事情から、大規模化に課題があるというのが現状であった。

このため、Advance/FrontSTR では、ペナルティ法に替わる MPC 条件の組み込み方法として、自由度消去法（反復法における自由度消去 MPC 法；MPCCG 法[1]）を適用している。自由度消去法を用いた場合、MPC により接合される各パーツが一体のものとしてモデル化された場合と等価な方程式となるため、ペナルティ法のように方程式が悪条件となることがない。また、通常、自由度消去法による MPC 条件の組み込みは、マトリックスの非ゼロのプロファイルが変更される。HEC-MW のマトリックスは非ゼロ成分のみを保持している（CRS：Compressed Row Storage）ため、非ゼロのプロファイルを変更するためには煩雑な処理が必要となり、望ましくない。そこで、Advance/FrontSTR では、マトリックス自体には MPC 条件を組み込まず、ソルバーの各反復の中で MPC による拘束自由度を消去する方法を採用している。

2.2. MPCCG 法のアルゴリズム

Advance/FrontSTR で解くべき方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、第 1 式は力のつりあいの方程式であり、第 2 式は MPC による制約条件を表している。 $\mathbf{K}$ は係数マトリックス（ $N \times N$ ）、 $\mathbf{u}$ は未知数ベクトル（ $1 \times N$ ）、 $\mathbf{f}$ は右辺ベクトル（ $1 \times N$ ）、 $\mathbf{B}$ および $\mathbf{g}$ はそれぞれ多点拘束条件を表す係数マトリックスおよび定数ベクトルであり、多点拘束条件の数を M とすると、大きさはそれぞれ $M \times N$ および $1 \times M$ である。ここでは、 M 個の従属自由度を決め、それらを消去し、それ以外の独立自由度についての方程式を解くことを考える。

全自由度のうち、独立自由度のみが意味を持つ未知数ベクトルを $\mathbf{u}'$ （ $1 \times N$ ）、 $\mathbf{u}$ と $\mathbf{u}'$ との間の変換行列を $\mathbf{T}$ とすると拘束条件は

$$\mathbf{u} = \mathbf{T}\mathbf{u}' + \mathbf{u}_g \quad (3)$$

の形で表すことができる。ただし、 $\mathbf{u}_g$ は $\mathbf{B}$ および $\mathbf{g}$ から決まる定数ベクトルである。たとえば、 $N=5$ 、 $u_5 - u_4 = 1$ の場合、多点拘束条件は、次の形式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = [1] \quad (4)$$

また、行列の形式では、

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \\ u'_3 \\ u'_4 \\ u'_5 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

と表わされる。これを方程式に代入し、定数項を右辺に移項すると、

$$\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{u}' = \mathbf{f} - \mathbf{K}\mathbf{u}_g \quad (6)$$

さらに、係数行列を対称にするため、両辺の左から $\mathbf{T}^T$ をかけると

$$\mathbf{T}^T \mathbf{K} \mathbf{T} \mathbf{u}' = \mathbf{T}^T (\mathbf{f} - \mathbf{K} \mathbf{u}_g) \quad (7)$$

が得られる。対称にすることは、アルゴリズムの本質ではないが、数値解法として、従来の対称行列のアルゴリズムに組み込むことができるという大きな意味がある。この方程式が、最終的に解くべき、多点拘束を組み込んだ方程式である。本アルゴリズムでは、この方程式に対して反復解法を適用する。

反復法に利用する場合には、 $\mathbf{T}^T \mathbf{K} \mathbf{T}$ を陽には保持せず、 $\mathbf{T}$ や $\mathbf{T}^T$ との掛け算を必要に応じてその都度行う。図 1 に共役勾配法を適用した場合のアルゴリズムを示す。通常の反復法におけるマトリックス・ベクトル積 1 回について、本手法では $\mathbf{T}$ および $\mathbf{T}^T$ との積の計算が増えることになるが、 $\mathbf{T}$ はほとんど単位行列であるため、その計算コストは低く抑えることが可能である。

なお、定式化から分かるように、反復法で解いて

いる対象は、求めることが必要な自由度よりも大きな数の自由度となる。すなわち、 $\mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}$ の従属自由度に関する行および列にはすべて 0 が入ることになり、解が唯一ではない。これは、不自然に感じられる部分もあるが、反復法の数値計算の上では、次のように解決するため、問題とならない。すなわち、反復解法を適用した場合、未知ベクトルの初期値として従属自由度成分を 0 とすることで、修正ベクトル・残差ベクトルともに従属自由度成分は常に 0 となり、従属自由度成分を無視した形での求解が可能である。

```

 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{T}^T(\mathbf{f} - \mathbf{K}\mathbf{u}_g) - \mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{u}'_0$ 
 $\rho_0 = (\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_0)$ 
 $\mathbf{p}_0 = \mathbf{r}_0$ 
for  $k = 0, 1, \dots$ 
   $\mathbf{q}_k = \mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{p}_k$ 
   $\alpha_k = \frac{\rho_k}{(\mathbf{p}_k, \mathbf{q}_k)}$ 
   $\mathbf{u}'_{k+1} = \mathbf{u}'_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$ 
   $\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{q}_k$ 
  check convergence; continue if necessary
   $\rho_{k+1} = (\mathbf{r}_{k+1}, \mathbf{r}_{k+1})$ 
   $\beta_k = \frac{\rho_{k+1}}{\rho_k}$ 
   $\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{r}_{k+1} + \beta_k \mathbf{p}_k$ 
end
 $\mathbf{u} = \mathbf{T}\mathbf{u}' + \mathbf{u}_g$ 

```

図 1 MPCCG 法のアルゴリズム。

2.3. MPCCG 法における前処理アルゴリズム

本手法では、係数行列 $\mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}$ を保持していない。このため、ブロック ILU 前処理およびブロック SSOR 前処理に関しては、通常の前処理を適用することはできない。しかし、 $\mathbf{K}$ をもとにした前処理を適用することは可能である。 $\mathbf{K}$ と $\mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}$ の違いは、多点拘束条件のかかった自由度に関する行列成

分であるが、実際の多点拘束条件付き問題においては、全自由度に対して拘束自由度の数はそれほど大きくない。従って、 $\mathbf{K}$ と $\mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}$ が大きく異なるわけではなく、 $\mathbf{K}$ をもとにした前処理によって、前処理の効果を得ることは可能である。従って、Advance/FrontSTR の前処理（ブロック ILU 法およびブロック SSOR 法）では、 $\mathbf{K}$ をもとにした前処理を行うことを標準とする。ただし、ブロック対角スケール前処理に関しては、 $\mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}$ の対角ブロックだけを実際に計算・保持するコストは小さく、それを用いた対角スケール前処理を適用することにより、効果的な前処理が可能である。自由度消去による MPC を前処理付き共役勾配法に適用した場合のアルゴリズムを図 2 に示す。

```

 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{T}^T(\mathbf{f} - \mathbf{K}\mathbf{u}_g) - \mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{u}'_0$ 
for  $k = 0, 1, \dots$ 
  solve  $\mathbf{M}\mathbf{z}^k = \mathbf{r}^k$ 
   $\rho_k = (\mathbf{r}_k, \mathbf{z}_k)$ 
  if  $k \equiv 0$ 
     $\mathbf{p}_0 = \mathbf{r}_0$ 
  else
     $\beta_k = \frac{\rho_k}{\rho_{k-1}}$ 
     $\mathbf{p}_k = \mathbf{z}_k + \beta_k \mathbf{p}_{k-1}$ 
  endif
   $\mathbf{q}_k = \mathbf{T}^T\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{p}_k$ 
   $\alpha_k = \frac{\rho_k}{(\mathbf{p}_k, \mathbf{q}_k)}$ 
   $\mathbf{u}'_{k+1} = \mathbf{u}'_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$ 
   $\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{q}_k$ 
  check convergence; continue if necessary
end
 $\mathbf{u} = \mathbf{T}\mathbf{u}' + \mathbf{u}_g$ 

```

図 2 前処理付き MPCCG 法のアルゴリズム

2.4. MPC 条件を生成するアルゴリズム

Advance/FrontSTR では、MPC 条件を記述したデータを EQUATION データと呼ぶ。EQUATION データとは MPC 条件において、マスター面とスレーブ面が与えられているときにスレーブ面上の節点の座標をマスター面の節点の座標で表現するときの式のことである。

まず、スレーブ節点を $P=(x,y,z)$ とし、マスター節点を $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ とする (Q_i の座標を (x_i, y_i, z_i) とする)。このときスレーブ節点を

$$x = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \quad (8)$$

とあらわすような係数 α_i を求める。

FrontSTR ではこの係数を解析制御データの !EQUATION ヘッダーに記述する。

Advance/REVOCAP ではこの係数を以下の手順で計算する。

- ① スレーブ面の節点に対して、マスター面の要素で最も近いもの（マスター面の要素にスレーブ面の節点が含まれる場合はその要素）を選ぶ
- ② マスター面の要素の形状関数でスレーブ面の節点の座標を評価する式を解く
- ③ マスター面の要素の節点と対応する形状関数の値を出力する

ここで、①においては、幾何的な検索を高速化するため、あらかじめマスター面の要素をバケットに格納してから最も近いマスター面の検索を行う。面をバケットに登録した場合には、同一の面を複数のバケットに登録する可能性があること、また面が登録されていないバケットが存在することに注意する。従ってスレーブ面の節点が含まれるバケットに最も近い面が存在することが保証されておらず、このための処理の実装はかなり複雑であるのでまた別の機会で述べる。

②においては、通常はニュートン・ラプソン法で求解するが、スレーブ面の節点が要素の外にある場合にはまれに異なる点に収束してしまう場合があるので、ここでは減速ニュートン法で解いている。

3. 精度の検証

3.1. 解析モデル

ここでは、基本的な例題について、MPCCG 法が有効であり、精度の面でも問題なく、従来のアルゴリズムをリプレースするアルゴリズムであることを示す。

計算モデルは、矩形断面梁をふたつ重ねた片持ち梁で、下面に等分布荷重を負荷する。以下の矩形断面梁のメッシュを組み合わせせて、計算を実施する。

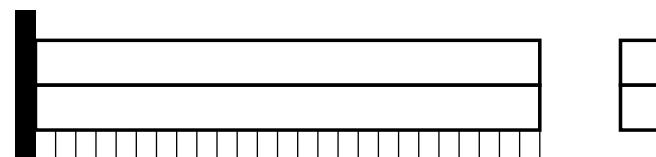


図 3 精度の検証における解析モデル

表 1 基本例題の問題サイズ

要素タイプ	記号	要素数	節点数
4 面体 1 次	AC	1600	525
	AF	3125	936
4 面体 2 次	BC	1600	3001
	BF	3125	5546
6 面体 1 次	CC	640	1025
	CF	1250	1836

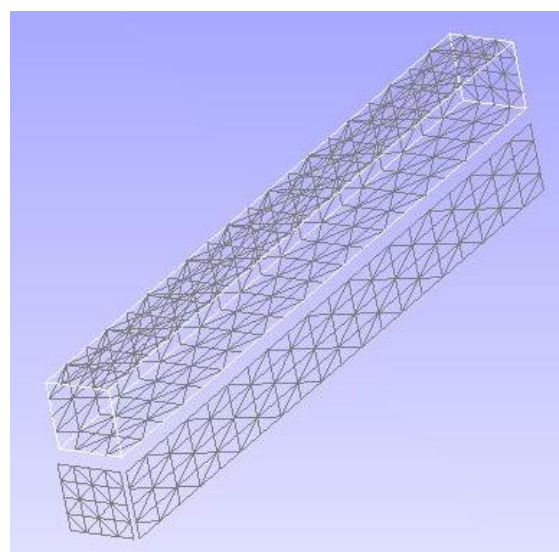


図 4 4 面体メッシュ図（基本例題）

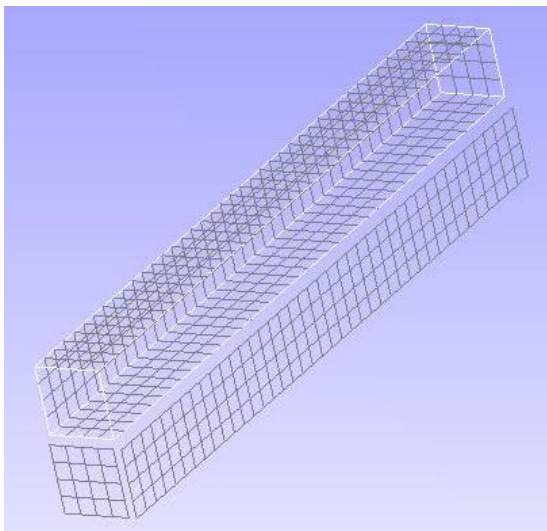


図 5 6 面体メッシュ図（基本例題）

3.2. 解析条件

本例題で利用した物性は、 $l = 1000$ 、 $b = 100$ 、 $h = 200$ 、 $A = 20000$ 、 $E = 70000$ 、 $\nu = 0.345$ 、 $P = 1000000$ 、 $p = 10$ 、 $l = 1000$ である。

このケースにおける梁理論による理論解は次の通りである。断面 2 次モーメントは

$$I = \frac{bh^3}{12} = 6.667e+7 \quad (9)$$

であり、せん断弾性係数は

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 2.602e+4 \quad (10)$$

であることから、曲げたわみは、

$$w = \frac{Pa^3}{8EI} = 26.78 \quad (11)$$

であり、せん断たわみは、

$$w = \frac{Pa}{2GA} = 0.9607 \quad (12)$$

である。断面性補正をしたせん断たわみは

$$A' = \frac{5}{6}A \quad (13)$$

であることから、そのせん断たわみは、

$$w = \frac{Pa}{2GA} = 1.153 \quad (14)$$

である。ここでは、理論解の比較として、曲げたわみとせん断たわみを合わせた 27.75 の値を採用し、その値と解析結果を比較した。

また、計算ケースは以下の通りである。AF+AC、BF+BC、CF+CC は、MPC 面で座標が一致する節点と一致しない節点が混在する。

表 2 解析条件（4 面体 1 次要素）

計算ケース	要素数	節点数	MPC 節点数
AC+AC 一体	3200	945	—
AC+AC PC	3200	1050	105
AF+AF 一体	6250	1716	—
AF+AF PC	6250	1872	156
AF+AC PC	4725	1461	156

表 3 解析条件（4 面体 2 次要素）

計算ケース	要素数	節点数	MPC 節点数
BC+BC 一体	3200	5633	—
BC+BC MPC	3200	6002	369
BF+BF 一体	6250	10531	—
BF+BF MPC	6250	11092	561
BF+BC MPC	4725	8547	561

表 4 解析条件（6 面体 1 次要素）

計算ケース	要素数	節点数	MPC 節点数
CC+CC 一体	1280	1845	—
CC+CC MPC	1280	2050	205
CF+CF 一体	2500	3366	—
CF+CF MPC	2500	3672	306
CF+CC MPC	1890	2861	306

3.3. 解析結果

上記の条件のもとに解析を実施した。4 面体 1 次、4 面体 2 次、6 面体 1 次要素を利用したケースの結果を示す。この結果から、MPCCG 法を利用した解析の精度は、いずれの要素に対しても、問題がないことが分かった。

表 5 4 面体 1 次の解析結果

計算ケース	最大変位	最大 mises	反復回数
AC+AC 一体	25.07	580.8	139
AC+AC MPC	25.07	580.8	178
AF+AF 一体	25.87	612.4	318
AF+AF MPC	25.87	612.4	398
AF+AC MPC	25.46	599.7	1692
理論解	27.74	—	—
AC+AC MPC(8 並列)	25.07	580.8	328
AF+AC MPC(8 並列)	25.46	599.7	1741

表 6 4 面体 2 次の解析結果

計算ケース	最大変位	最大 mises	反復回数
AC+AC 一体	27.51	656.9	387
AC+AC MPC	27.51	656.9	909
AF+AF 一体	27.55	675.6	507
AF+AF MPC	27.55	675.6	1273
AF+AC MPC	27.53	668.4	10683
理論解	27.74	—	—
AC+AC MPC(8 並列)	27.51	656.9	996
AF+AC MPC(8 並列)	27.53	668.4	14981

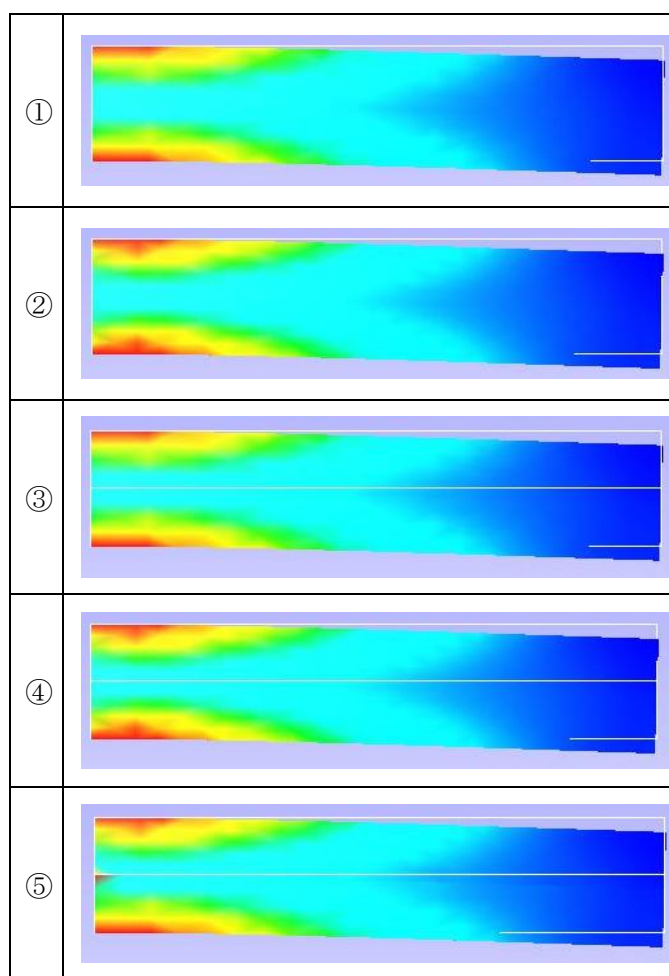


図 6 4 面体 1 次ミーゼス応力分布

①AC+AC 一体、②AF+AF 一体、③AC+AC MPC、
④F+AF MPC、⑤AF+AC MPC

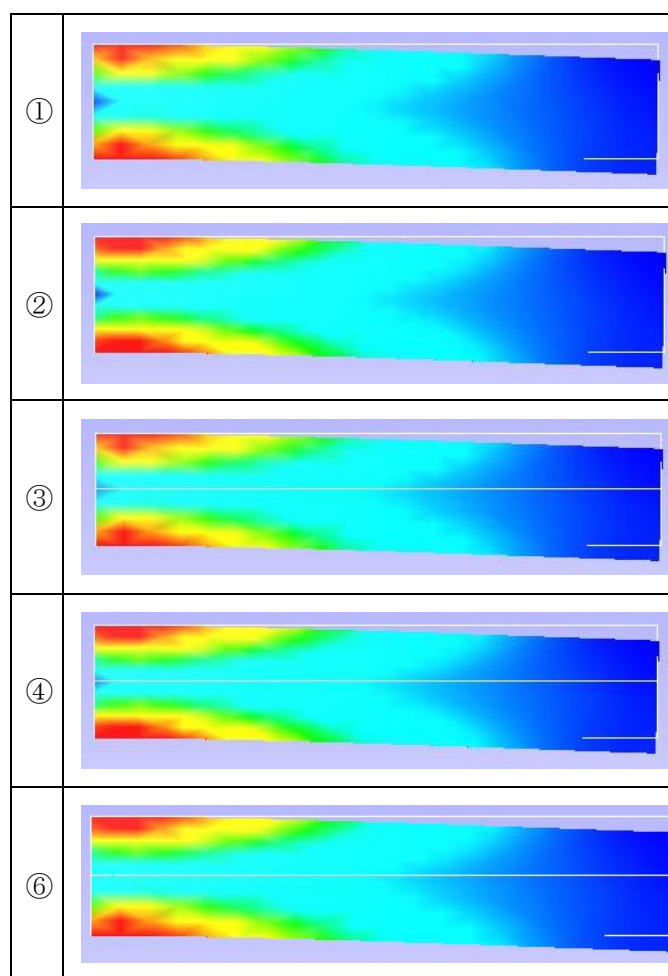


図 7 4 面体 2 次ミーゼス応力分布

①BC+BC 一体、②BF+BF 一体、③AC+AC MPC、
④BC+BC MPC、⑤BF+BF MPC

表 7 6 面体 1 次の解析結果

計算ケース	最大 変位	最大 mises	反復 回数
AC+AC 一体	27.52	601.9	126
AC+AC MPC	27.52	601.9	301
AF+AF 一体	27.56	623.0	151
AF+AF MPC	27.56	623.0	363
AF+AC MPC	27.54	616.9	1553
理論解	27.74	—	—
AC+AC MPC(8 並列)	27.52	601.9	315
AF+AC MPC(8 並列)	27.54	616.9	1603

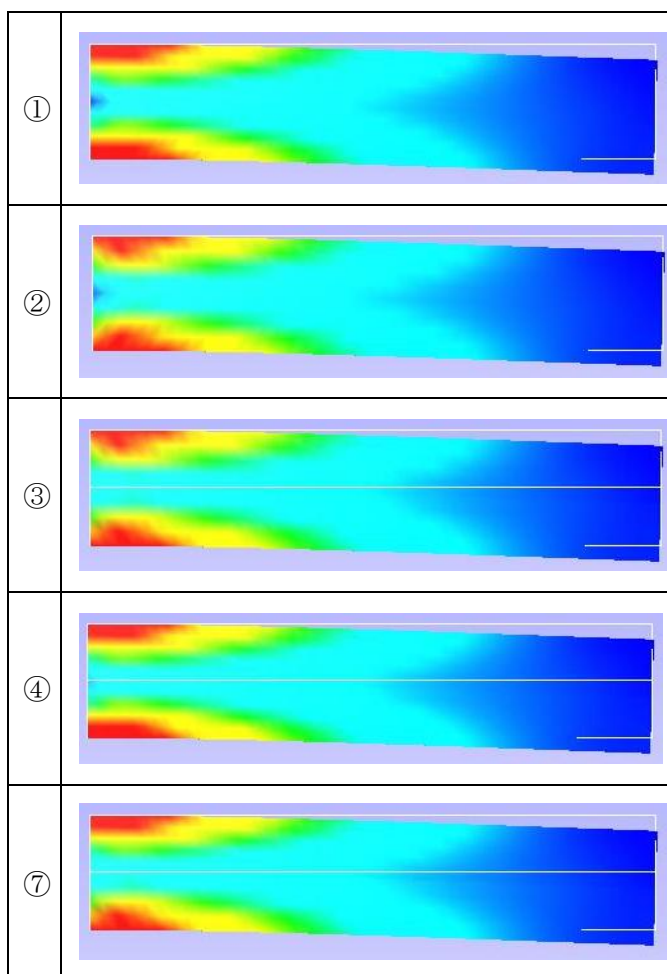


図 8 6 面体 1 次ミーゼス応力分布

①CC+CC 一体、②CF+CF 一体、③CC+CC MPC、
④CF+CF MPC、⑤CF+CC MPC

4. 処理速度の検証

4.1. 解析モデル

ここでは、3つのモデルに対して MPCCG 法を適用した。本節での検証の目的は処理速度であり、MPCCG 法の処理速度とペナルティ法 (ペナルティ数=10⁴) と比較した。ここでは、両者の収束判定値等を一致させ、その結果、反復回数・計算時間を計測した。

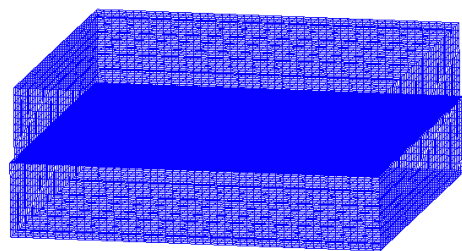


図 9 接合するブロック

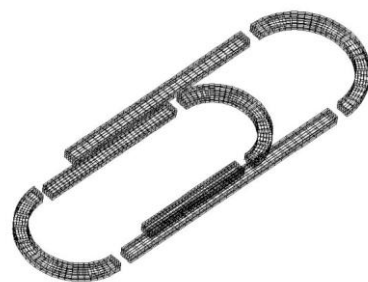
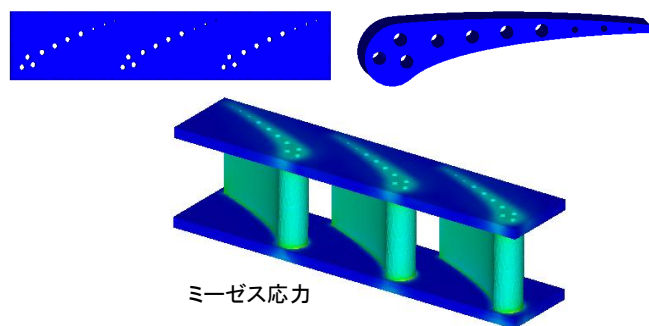


図 10 クリップ



ミーゼス応力

図 11 タービン翼

※上記の3つの解析については、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」において実施された内容である。

4.2. 解析結果

3モデルともに、MPCCG法について良好な結果を得た。解析結果についてはいずれも一致し、精度の面ではまったく問題はない。また、処理速度について、50～90%程度減少することを確認した。

表 8 6面体1次の解析結果

手法	反復回数	処理時間(sec)	処理時間 / 1反復(sec)
MPCCG法	165	6.21	3.76×10^{-2}
Penalty法	1,075	37.35	3.47×10^{-2}

表 9 6面体1次の解析結果

手法	反復回数	処理時間(sec)	処理時間 / 1反復(sec)
MPCCG法	33,349	143	4.18×10^{-3}
Penalty法	69,365	279	3.97×10^{-3}

表 10 6面体1次の解析結果

手法	反復回数	処理時間(sec)	処理時間 / 1反復(sec)
MPCCG法	14,203	3,456	2.46×10^{-1}
Penalty法	171,354	40,841	2.38×10^{-1}

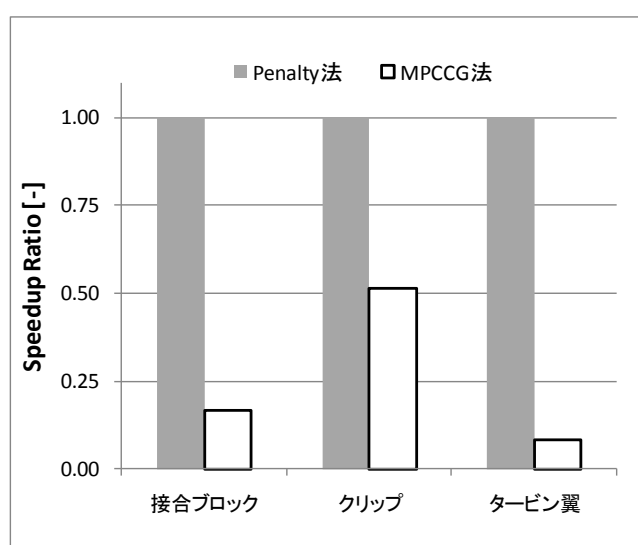


図 12 接合するブロック

5. 実用例題による検証(その1)

5.1. 計算モデル

計算モデルは、5つのパイプ部品を組み合わせたパイプラインである。計算ケースは、一体型と MPC 接合型の2ケースである。接合面ですべての節点の座標が一致している。

表 11 パイプライン (4面体1次)

項目	内容
解析の種類	弾性静解析
要素タイプ	4面体1次要素
節点数	346162
要素数	1205239
材料物性	スチール
境界条件	下部固定、右端に上方向 5mmの強制変位
アセンブリ構造	パイプ間 MPC 接続

表 12 パイプライン (4面体1次)

ケース	要素数	節点数	MPC 節点数
一体型	1,119,375	322,322	—
MPC 型	1,119,375	325,536	3,214

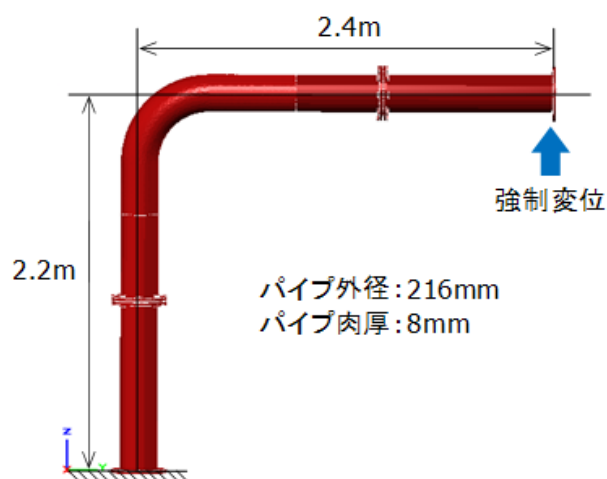


図 13 パイプライン

5.2. 計算結果

解析は、東京大学様の Altix450 を使用して、8コア並列で実施した。実行時間は、一体型で 942

秒、MPC 接合型で 1848 秒であった。

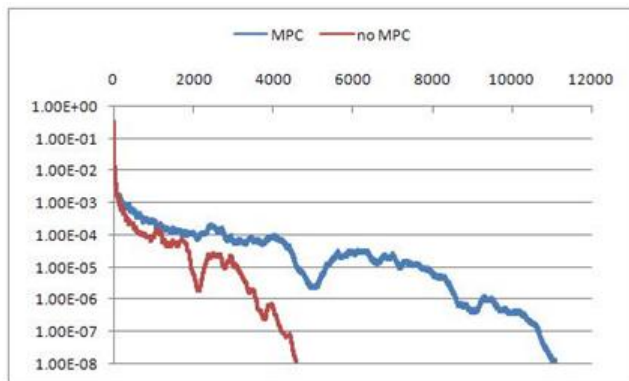


図 14 収束状況

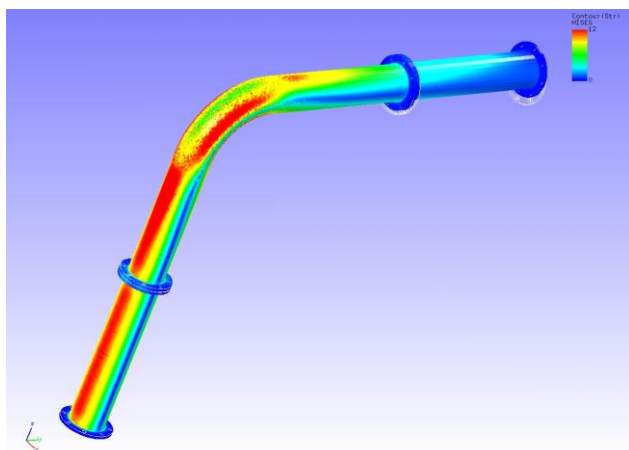


図 15 一体型のミーゼス応力分布

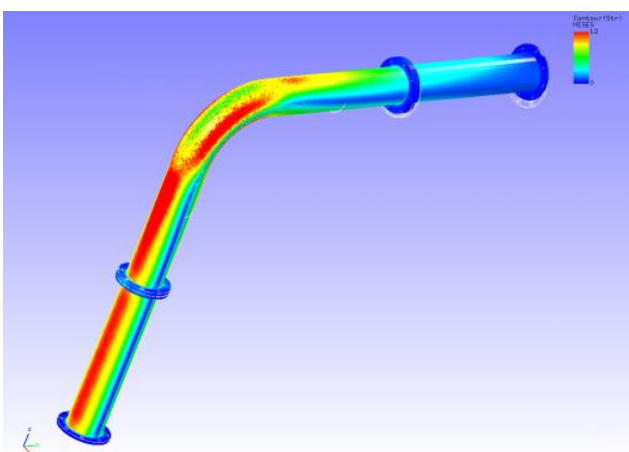


図 16 MPC 接合型のミーゼス応力分布

6. 実用例題による検証（その 2）

6.1. 計算モデル

計算モデルは、前節のモデルにボルトを付加したものである。ボルトは MPC で接合し、締付軸力に相当する分布荷重をボルトヘッドの両面に負荷する。計算ケースは、MPC 接合型の 1 ケースである。

表 13 パイプライン（4 面体 1 次）

項目	内容
解析の種類	弾性静解析
要素タイプ	4 面体 1 次要素
節点数	346162
要素数	1205239
材料物性	スチール
境界条件	下部固定、右端に上方向 5mm の強制変位、ボルト・ナットのヘッドに 1MPa の圧縮分布荷重（軸力）
アセンブリ構造	ボルトパイプ間 MPC 接続

表 14 パイプライン（4 面体 1 次）

ケース	要素数	節点数	MPC 節点数
MPC 型	1,547,231	414,512	10,053

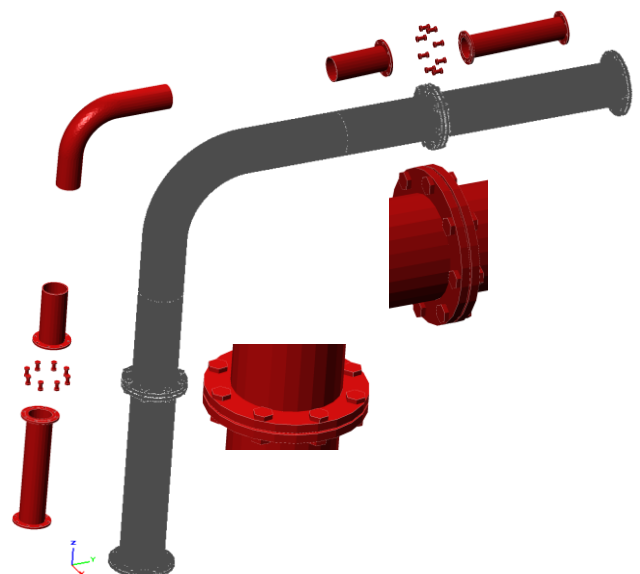


図 17 パイプライン

6.2. 計算結果

解析は、東京大学様の Altix450 を使用して、8 コア並列で実施し、妥当な結果を得た。実行時間は、2672 秒であった。

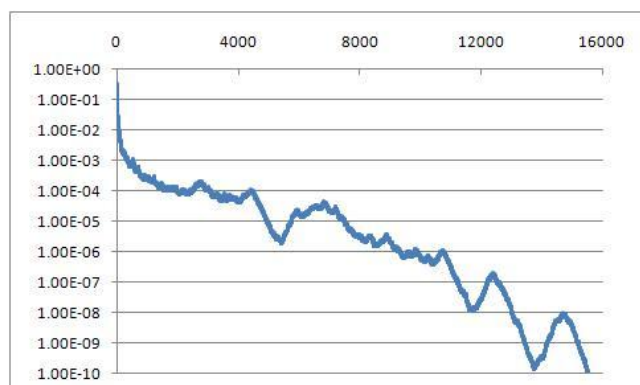


図 18 収束状況

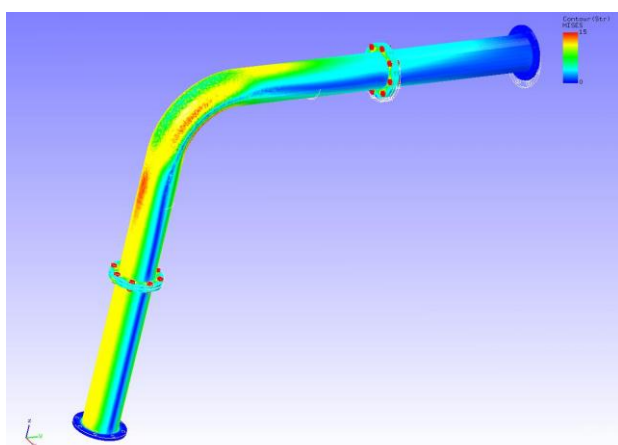


図 19 全体のミーゼス応力分布

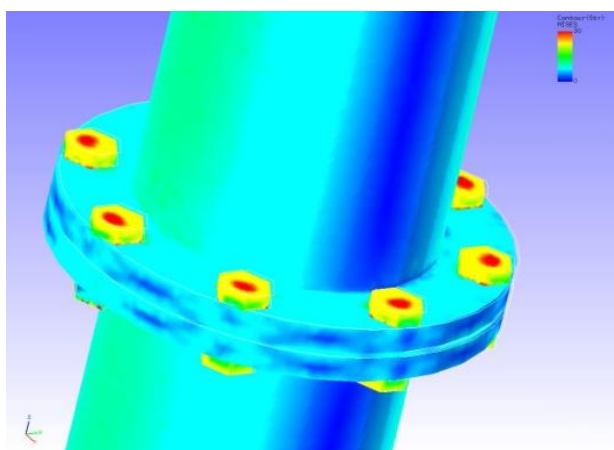


図 20 ボルト部分のミーゼス応力分布

7. 解析方法

7.1. 「アセンブリ解析機能」利用方法

「アセンブリ解析機能」を利用するためには、まず、部品ごとにメッシュを作成する。ユーザーはメッシュを作成しやすいように、解析対象全体を幾つもの部品に分解しても、本ソフトウェアを利用することでまるごと解析が可能である。次に、プリポスト(Advance/REVOCAP)を利用して、部品の接合面を定義する。

すなわち、プリポスト(Advance/REVOCAP)で MPC (MPC : 多点拘束条件 Multiple Point Constraint) 条件を自動生成する。そこで完成した入力データをソルバー(Advance/FrontSTR)に渡す。ここでは、MPC 条件に大規模計算向け自由度消去法を利用して、高速な大規模並列計算を行う。

計算結果については、従来からのプリポスト(Advance/REVOCAP)の機能で高速表示(2GBのPCで1000万自由度程度の表示)が可能である。

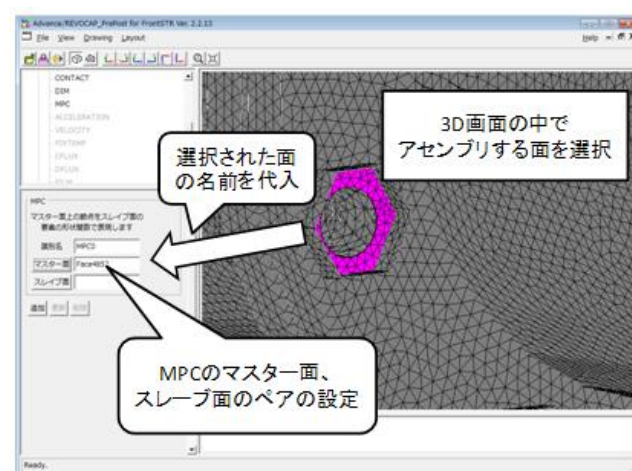


図 21 「アセンブリ解析機能」利用イメージ

7.2. プログラムの起動

Advance/FrontSTR 用の Advance/REVOCAP を起動する。Windows インストーラでインストールした場合は、デスクトップ上のショートカットまたは [スタートメニュー]⇒[プログラム]⇒[AdvanceSoft]⇒[Advance/REVOCAP]⇒REVOCAP_PrePost_AFstr.exe を起動する。正しく起動されると以下のような画面が表示される。

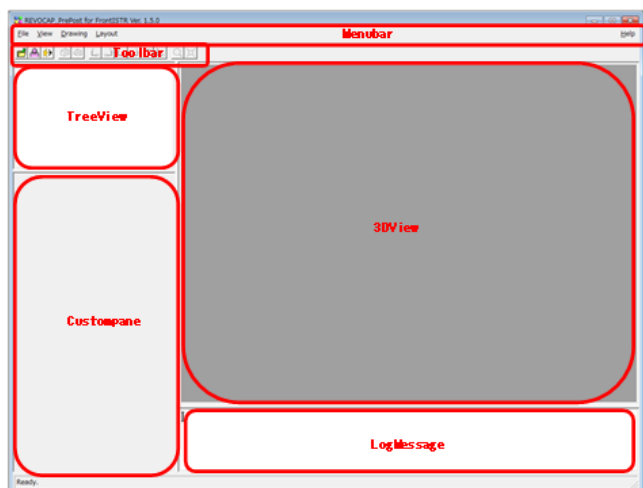


図 22 Advance/REVOCAP 起動画面

7.3. メッシュの読み込み

ここでは部品ごとに作成された 7 個のメッシュファイルを読み込む。インストールされたディレクトリの Fstr/data/Pipe サブディレクトリにある ADVENTURE_TetMesh 形式のメッシュファイルを読み込む。読み込む順番は任意であるが、最初に読み込むメッシュと 2 番目以降に読み込むメッシュとでは、手順が若干異なる。

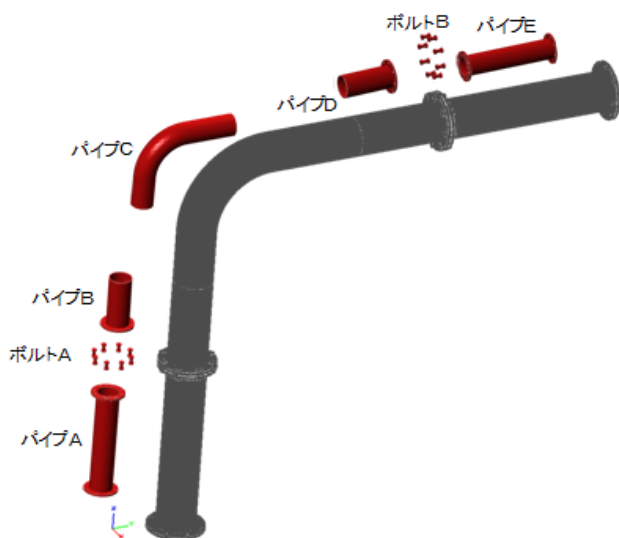


図 23 部品ごとのメッシュの概要

最初のメッシュは通常の手順と同じく、メニューから [File]⇒[OpenMesh] を選んで読み込む。ここでは pipeA.msh を読み込む。

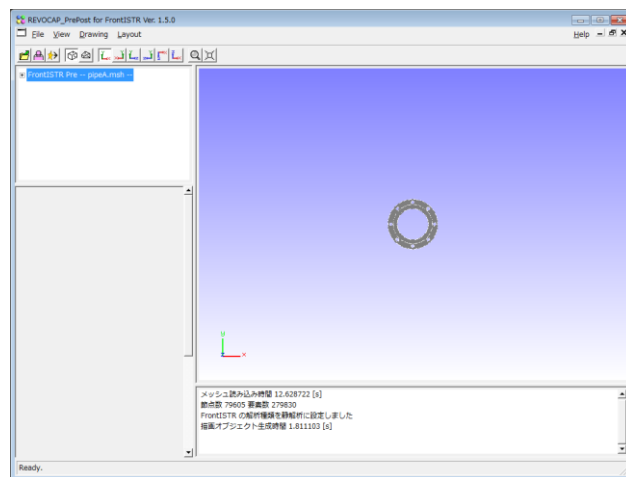


図 24 pipeA.msh を読み込んだ画面

TreeView の一番上の項目の前のプラスの記号をクリックすると、項目が展開される。「計算格子」の項目を選択すると、CustomPane にメッシュファイルの追加のボタンが現れる。

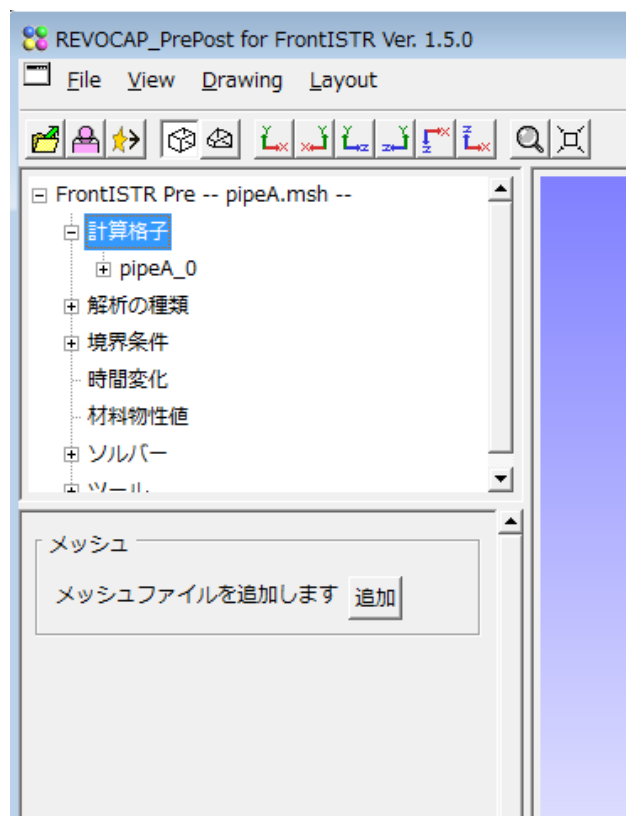


図 25 メッシュファイルの追加ボタン

このボタンを押すと、今開いているプレ処理用の画面の中に別のメッシュを追加することができる。pipeB.msh、pipeC.msh、pipeD.msh、pipeE.msh を読み込み、さらに boltallA.msh、boltallB.msh を読み込む。

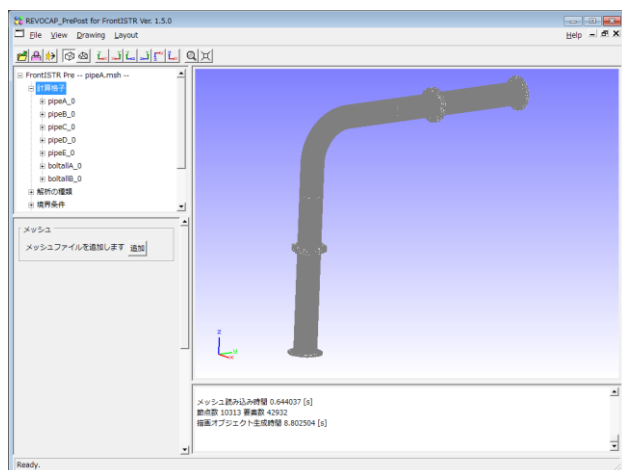


図 26 メッシュを読み込んだ状態

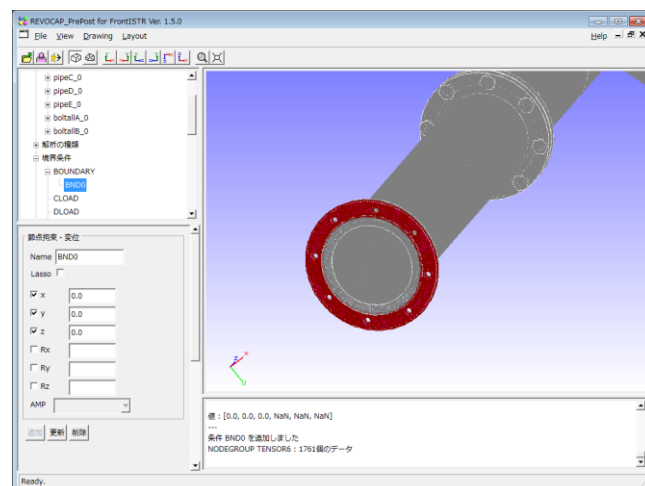


図 27 下部の固定拘束条件の設定

7.4. 解析の種類の設定

TreeView の計算格子の下に「解析の種類」がある。これを選択すると、解析の種類を設定することができる。設定できる種類は以下の通りである。ここでは弾性静解析を行うので、規定値のままの **STATIC** を選択する。

表 15 解析種類の設定

選択肢	解析の種類
STATIC	静解析
EIGEN	固有値解析
HEAT	熱伝導解析
DYNAMIC	動解析

7.5. 拘束条件の設定

パイプの下部に拘束条件を与える。3DView の画面の中でモデルを回転し、拘束条件を与えたい面をクリックして選択状態（色がマゼンタに変わる）にする。Advance/FrontSTR の拘束条件は境界条件の **BOUNDARY** の項目で与えることができる。面が選択された状態で、TreeView の **BOUNDARY** を選択して、追加ボタンを押す。これは **x**、**y**、**z** 座標をすべて 0 で拘束するという意味である。ボタンを押すと、TreeView の **BOUNDARY** の下に **BND0** という項目が現れ、3DView では拘束条件のマーカーが表示される。

右端には強制変位を与える。強制変位も Advance/FrontSTR では境界条件の **BOUNDARY** で与えることができる。TreeView の「境界条件」の **BOUNDARY** を選択し、今度は **z** に 5.0 を与えて、右端の面を 3DView で選択して「追加」ボタンを押す。

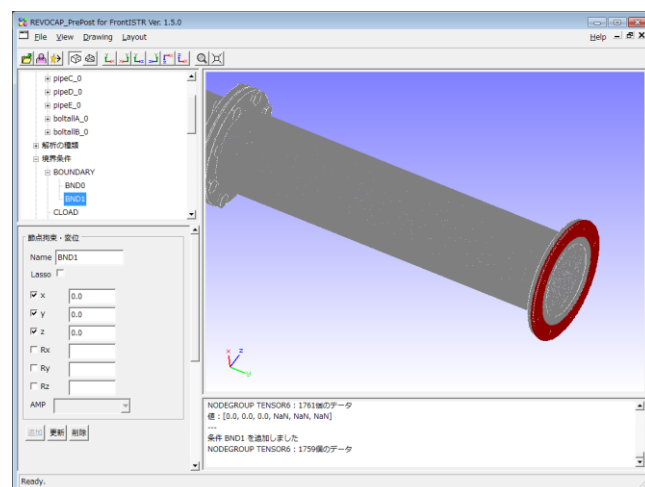


図 28 右端の強制変位の設定

7.6. 荷重条件の設定

次のボルトの軸力を与える。ここではボルトとナットのヘッドにそれぞれ 1MPa の圧力を与えることにする。圧力は Advance/FrontSTR では **DLOAD** で与えることができる。

TreeView の境界条件の **DLOAD** の項目を表示し、Value に 1.0e6 を与える。3DView でボルトの表面を選択し（シフトを押しながら選択すると、複数の面が選択できる）、**DLOAD** の追加ボタンを押す。

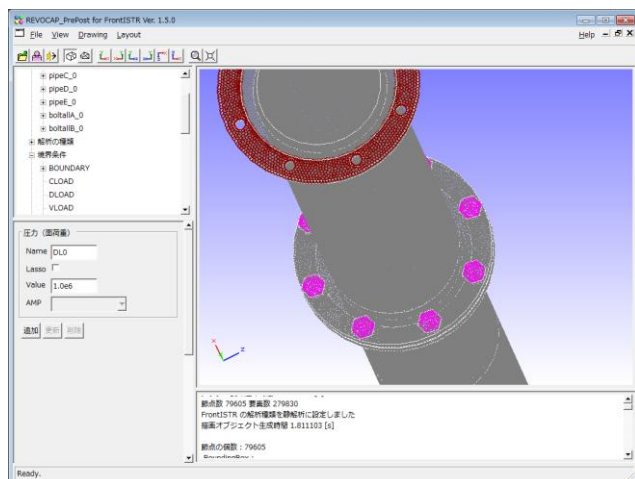


図 29 圧力の設定画面

これをすべてのボルトとナットの面に対して与える。

7.7. アセンブリ条件の設定

Advance/FrontSTR でアセンブリ条件を与えるには、境界条件の MPC で面のペアを定義することが必要になる。

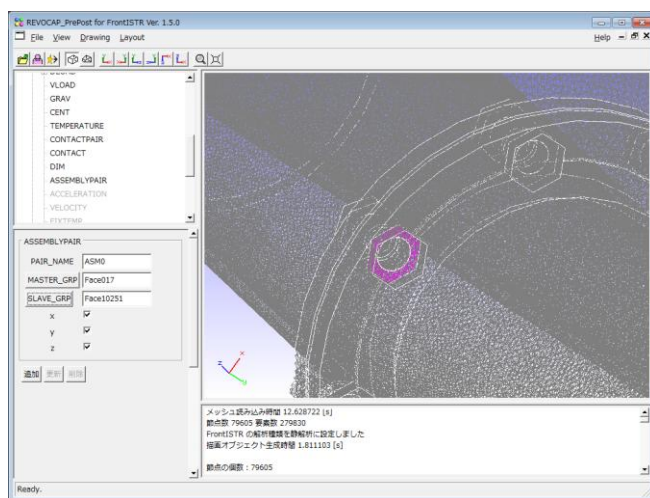


図 30 アセンブリペアの設定

ASEMBLYPAIR の項目を選択すると、面のペアの選択画面が CustomPane に表示される。3D View 画面の中で、マスター面を選択した状態で「MASTER_GRP」ボタンを押し、スレーブ面を選択した状態で「SLAVE_GRP」ボタンを押す。ここでは、パイプの接合部において、ボルトに接するパイプの面をマスター面とし、ボルトのヘッドの下面（パイプに接する面）をスレーブ面として与える。

REVOCAP_PrePost では、隠れている面を選択するには、手前にある面を選択してマウスでドラッグしてずらすことで、内部の面を見ることができるのでその機能を使うとよい。

同様の処理を全てのボルトの下面とパイプの接合面に与える。

7.8. 材料物性値の設定

材料物性値は物性値データベースで、属性値の値を与え、それに名前を与えておいて、メッシュの領域に対してその名前を対応させることで設定する。ここではあらかじめ登録されているスチールの物性値を使うが、データベースの値も確認しておくことにする。TreeView の材料物性値を選択し、CustomPane に材料データベースが表示される。ここでは材料の名前として Iron を選んで、データベースの値を確認する。ポアソン比が 0.29、ヤング率が $2.06 \times 10^{11} [\text{Pa}]$ 、密度が $7860 [\text{kg/m}^3]$ 、線膨脹係数が $1.2 \times 10^{-5} [1/\text{K}]$ である。

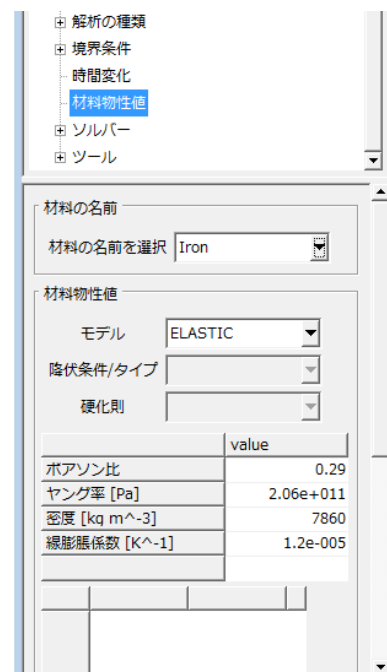


図 31 材料データベースの確認

物性値の値をメッシュに割り当てるには、TreeView の「計算格子」を展開する。その 1 つ下の階層がメッシュの領域を表している。pipeE_0 を

選択すると、その場所 (BoundingBox) が半透明で確認できる。ここではすべての領域に ELASTIC モデルの Iron を与える。

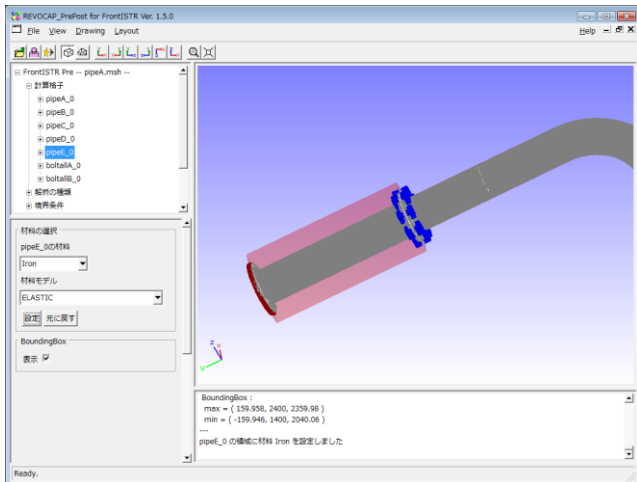


図 32 材料の設定

7.9. 解析モデルの保存

ここでは、ソルバーの設定はデフォルトのままとし、解析モデルを保存する。メニューの [File]⇒[SaveModel] を選択して、モデルを保存する。ディレクトリを選択すると、そこにメッシュファイル、解析制御ファイル、全体制御ファイルを出力する。ディレクトリの選択画面で新しいディレクトリを作成する場合には右クリックをするとよい。

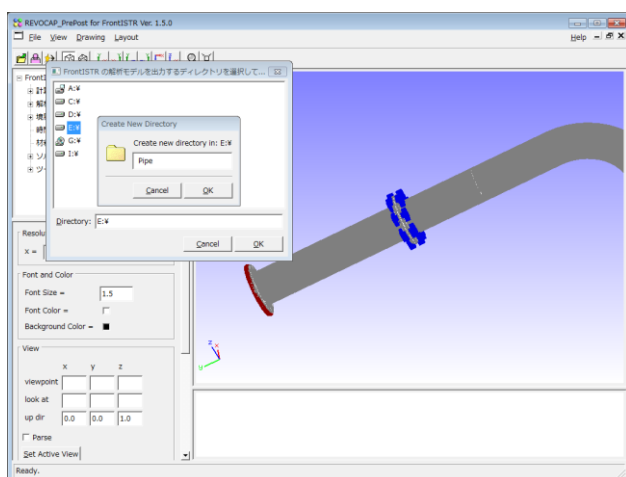


図 33 解析モデルの保存

7.10. 解析の実行

ここでは Windows 上で実行する場合を説明する。

Linux 上の並列環境で実行する場合は、並列実行のチュートリアル、または Advance/FrontSTR のマニュアルに別途記述した。

TreeView のソルバーの項目の下に Execute という項目がある。それを選択すると、CustomPane に「FrontSTR 実行」ボタンが現れる。このボタンを押すと、保存したモデルを Windows 上で実行することができる (ここではすでに解析モデルの保存を行っているので、ここで改めてモデルの保存をする必要はない)。

7.11. 計算結果の可視化

ソルバーの実行が正常に終了すると、結果ファイルが生成されている。このチュートリアルの設定では、MicroAVS の UCD 形式のファイルが生成されている。ここではそれを読み込むことにする。メニューから [File]⇒[OpenResult] を選択し、FileFilter で MicroAVS UCD (*.inp) を選択して、結果ファイルを読み込む。

ここではミーゼス応力についてのコンター表示と変形表示を行う。計算結果ファイルを読み込んで 3DView にモデルが表示されたら TreeView から「Contour」を選択する。設定画面が CustomPane に表示されるので、Item に MISES を選択し、Max に 30 を、Min に 0 を与えて設定ボタンを押す。

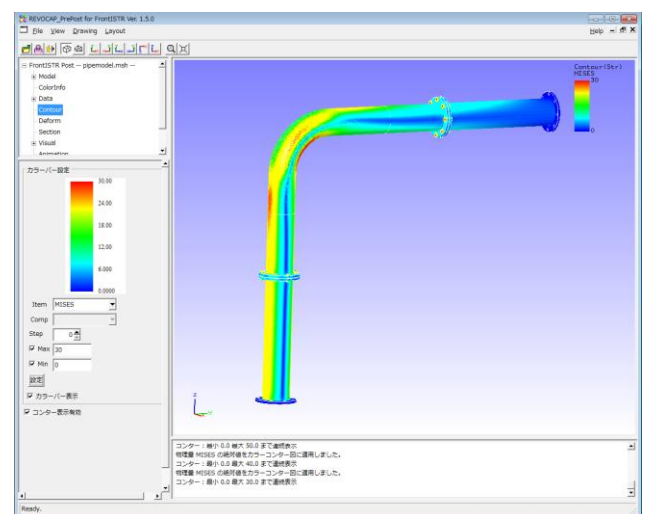


図 34 ミーゼス応力図

次に変形図を表示するために TreeView から

「Deform」を選択し、変形倍率を 10.0 として
「Apply」ボタンを押すと、モデルの変形が適用さ
れる。

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」
(2011.02.25)

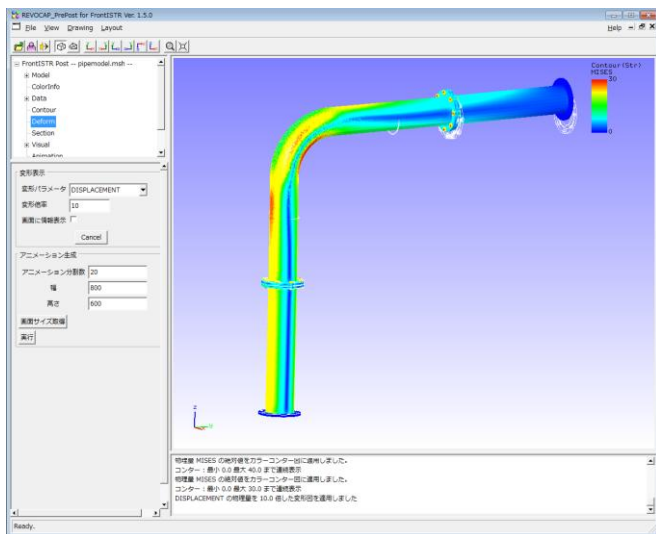


図 35 ミーゼス応力+10 倍変形図

8. まとめ

本稿では、Advance/FrontSTR を利用した大規模解析の手法のひとつである部品アセンブリ解析機構を紹介した。本機能により、大規模解析の工数が大幅に削減されることを確信している。また、今後とも改良を継続する計画である。

参考文献

- [1] 奥田洋司, 志賀淳二, “アセンブリ構造解析のための多点拘束前処理付き並列反復解法”, 第 14 回日本計算工学講演会(2009.5)
- [2] 末光啓二, “FrontISTR の機能紹介”, 第 3 回統合ワークショップ(次世代ものづくり), 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」(2011.02.25)
- [3] 吉村忍, 徳永健一ほか, “並列連成解析システム REVOCAP を用いた流体構造連成解析”, 第 59 回理論応用力学講演会(2010.6)
- [4] 徳永健一, “REVOCAP_PrePost と REVOCAP_Refiner”, 第 3 回統合ワークショップ(次世代ものづくり), 文部科学省次世代 IT 基盤構築の