

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR

松原 聖* 袁 熙* 末光 啓二* 大家 史* 徳永 健一*

Advance/FrontSTR

Kiyoshi Matsubara*, Xi Yuan*, Keiji Suemitsu*, Fumito Ohya* and Ken-ichi Tokunaga*

大規模なプラントでは、プラント全体が相互に関係して、固有の複雑な事象が発生する。しかし、その全体を計算機上でシミュレーションした場合には、その対象の広さから大規模で複雑なシミュレーションを実施することとなり、非現実的な計算機リソースを必要とすると考えられてきた。従って、従来の数値解析では、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った。このような従来の手法に対して、近年の計算機能力の飛躍的向上、およびプラントの性能向上への要求等を背景として、プラント全体に対す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。このニーズに対応するためには、大規模な解析を可能にすること、複雑な解析対象の解析を可能にすること、という 2 つの課題がある。本稿では、当社の構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR[1][2]における、ここに示した 2 つの課題に対する取り組みについて述べる。

Key word: 構造解析、大規模解析、高速化、部品アセンブリ、メッシュ細分化、連成計算、並列計算機

1. はじめに

系全体が相互に関連して固有の複雑な現象が発生する大規模なプラントを対象としたシミュレーションのみならず、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製品全体に対す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。これまで、並列計算機を利用した大規模計算については、計算方法はほぼ確立され、多くの研究により成果が残されてきた。現状では、これらの研究成果を産業界への実用技術として、技術移転を推進させなければならない。そのために、現在では、安価となった並列計算機等のハードウェアでの大規模構造解析を、さらに手軽に実施できるソフトウェアを普及させる時期と考えられる。

このような時代背景のもと大規模で複雑なプラント等の解析を実用化するためには、シミュレーションソフトウェアには、①構造解析では数億自由度の大規模な可能にすること、および、②流体解析と

構造解析の連成解析等や解析対象自身が複雑な解析を可能にすることが要求される。この 2 つの課題を解決する必要がある。

まず、第 1 の課題を解決するために、構造解析において数億自由度程度の大規模解析を行う機能が必要となる。当社で販売している構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR[1][2]では、この課題に対し、本ソフトウェアの開発当時から大規模並列計算向けに設計され開発されてきたことと合わせ、リファイナー等の機能等の大規模な解析を実施するための幾つもの仕組みを有している[3][4][5]。

次に、第 2 の課題に対しては、複雑な解析対象に対するメッシュ作成の課題から始まり、原理の異なる幾つもの現象を取り扱う課題まで幅広い。この問題を解決するためのアプローチは幾つかある。当社では、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR にアセンブリ機能を実現していること、および、Advance/FrontSTR と他のソフトウェアを組み合わせた連成解析に取り組んでいる[6][7][8]。

本稿の 2 節では、Advance/FrontSTR の概要について述べ、3 節では第 1 の課題（大規模解析）への

*アドバンスソフト株式会社 技術第 5 部

5th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

取り組み、4 節では第 2 の課題（複雑解析）への取り組みについて述べる。

2. Advance/FrontSTR の概要

2.1. AdvanceFrontSTR の開発の経緯

汎用構造解析プログラム Advance/FrontSTR のベースとなる FrontISTR は、文部科学省の次世代 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」プロジェクトで、開発された。このプロジェクトの中で、アドバンスソフト株式会社は「構造解析ソフトウェア FrontISTR における材料・幾何学的非線形機能の作成」等の業務を担当し、従来の成果に加え、幾何非線形・材料非線形・接触非線形解析機能を開発した。

国のプロジェクトで開発されたソフトウェアは、<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/dl/> にて公開されている。アドバンスソフト株式会社では、このソフトウェアを実用化するために、プリポストと共に独自に改良を進め、商用パッケージソフトウェア Advance/FrontSTR Ver.4.0 として販売保守を行っている[1][2]。

公開されているソフトウェアと、当社で独自に改良および開発を継続している Advance/FrontSTR との違いは次の通りである。

- ① 非線形問題および線型ソルバーの収束性の強化、および、各種要素の開発および追加および強化を図っている。
- ② 公開版では、別々のプログラムとされている接触機能と非線形材料解析機能等をひとつにまとめ Advance/FrontSTR として統合している。
- ③ プリポスト Advance/REVOCAP と一体化した解析機能を提供している。特に、アセンブリ機能、リファイナー機能の実用化を中心に強化している。また、Advance/REVOCAP の 64bit 版も独自に提供している。

また、Advance/REVOCAP は流体解析と構造解析が共通のプリポストとして利用可能なシステムで

あり、このことは特に連成解析では重要である。

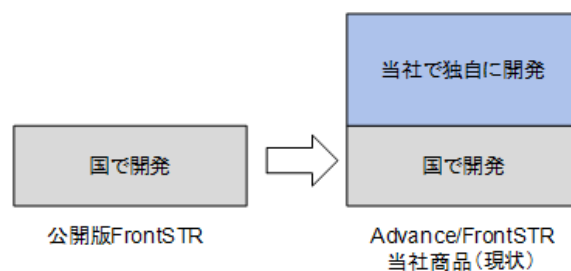


図 1 当社で販売する Advance/FrontSTR

2.2. AdvanceFrontSTR の特長

Advance/FrontSTR は、大規模並列計算汎用有限要素法構造解析プログラムであり、静解析、固有値解析、熱解析および動解析に関する 3 次元解析が可能であり、先進性と実用性を兼ね備えた汎用構造解析ソフトウェアとして、進化を続けている。

先にも述べたように、Advance/FrontSTR により大規模構造解析をより手軽に実行することを目的として独自の開発を実施している。その特長は次の 5 つの項目である。

- ① 大規模並列計算が可能で、高い並列効率。
- ② 多くの CPU（コア）を利用しても、追加料金がかからないシンプルな価格体系。
- ③ 低価格にもかかわらず、必要な機能を提供。
- ④ 開発者によるサポートおよびカスタマイズサービスを提供。
- ⑤ PC 上の 1CPU 版として手軽な解析も可能。

以下では、この特長に関して述べる。

第 1 の特長として、大規模並列計算における優れた並列性能がある。並列計算用に設計されているため、従来ソフトウェアに比べて非常に高い並列化効率を実現している。例えば、線型静解析 2 億自由度の問題を、1,152 コアの並列計算機を利用して、経過時間 30 分で解析した実績がある。

また、第 2 の特長は、並列計算実行時に多数の CPU を利用してもライセンス料金は増加しない価格体系である。この特長により、ユーザは所有している計算機資源を有効に利用できる。

第3の特長は、低価格にもかかわらず、必要な機能の提供を提供していることである。例えば、接触機能、および、大規模並列計算向けの機能であるアセンブリ機能・リファイナー機能を提供している。また、汎用の非線形材料および幾何学的非線形の機能も有する。

第4の特長は、開発者によるサポートおよびカスタマイズサービスの提供である。当社はソフトウェアを開発した技術者を有するため、ソースコードを改良することが可能である。従って、お客さまのニーズに合わせた改良が可能である。また、このことが、連成解析をも可能としている。お客さまの問題毎に Advance/FrontSTR のソースコードを改良して、流体・音響解析等のソフトウェアと連成させた解析を実施した多くの実績がある。

最後に、第5の特長として、Advance/FrontSTR では、お手元のパソコンでの1CPU版として手軽な構造解析環境も提供している。

2.3. Advance/FrontSTR の機能

Advance/FrontSTR の解析機能の計算手法は、幾何学的／材料非線形／境界非線形静解析においては Total Lagrange 法および Updated Lagrange を、固有値解析にはランチョス法を、線形動解析の過渡応答問題には直接積分法を採用している。また、非線形問題では、ニュートン・ラフソン法による繰り返し計算手法を用いている。

また、従来からの解析機能に加え、熱弾塑性／粘弾性／粘塑性、動解析における材料非線形／幾何学的非線形、また、要素もシェル要素（3角形／4辺形、1次／2次、MITC要素）、梁要素（1次／2次／3次、MITC要素）、トラス要素（1次／2次／3次）、マス要素を充実させた。これらの詳細については、本誌の技術ノート「接触要素の開発」で詳細に述べる。

ライセンスに関しては、従来と同じく、1ユーザのライセンスでのCPU利用数は無制限である。並列計算機をお持ちのお客さまは、すぐにでも処理時間の短縮が可能となる。

ここで示した機能を、表1に Advance/FrontSTR

Ver.4.0 の解析機能一覧としてまとめた。

表1 Advance/FrontSTR Ver.4.0 解析機能一覧

項目	内容
静解析	熱応力解析を含む応力解析
・幾何学的非線形	Total Lagrange 法 ／Updated Lagrange 法
・境界非線形（接触）	Augmented Lagrange 法、 有限すべり、摩擦
動解析	直接積分法（陽・陰解法）、 モード解析
・直接積分法	中央差分法／Newmark- β 法
・固有値解析	ランチョス法／その改良法／モード合成法
	時刻歴応答解析／モード解析
熱解析	定常／非定常解析（陰解法）
材料ライブラリ	温度依存性を含む材料
・弾性材料	弾性、超弾性、粘弾性
・非弾性材料	等方／移動／複合硬化等の弾塑性、 粘塑性、熱弾塑性
要素ライブラリ	連続体要素、構造要素
・ソリッド要素	4面体／6面体／プリズム／ピラミッド、1次／2次、 非適合モード、B-bar 要素など
・シェル要素	3角形／4辺形、1次／2次、MITC要素
・梁要素	1次／2次／3次、MITC要素
・トラス要素	1次／2次／3次
・その他	接触要素、マス要素
大規模解析支援	アセンブリ構造対応、 メッシュ細分化（リファイナー）

現状では、大規模解析を手軽に行いたいというニーズが多く、このようなユーザの要望も含め Advance/FrontSTR Ver.4.0 およびそのプリポストである Advance/REVOCAP では、大規模解析のためにいろいろな手段を提供している。このための代表的な機能が次の3機能である。

- ① リファイナー機能：自動的にメッシュを細分化する機能[3][4][5]
- ② アセンブリ機能：部分的に作成したメッシュを組み上げる機能[6][7][8]

③ 大規模解析向きソルバーの改良：並列計算向け機能の改良[9][10]

このうち、①および②は、プリポストの処理時間とソルバーの処理時間を含めたトータルな処理時間の短縮を実現する。また、③については、従来のソルバーの並列性能をさらに向上させた。これらの機能の組み合わせにより、ユーザそれぞれの方法での大規模構造解析を提案している。また、接触解析等の次世代に向けた独自のアルゴリズム開発も継続して実施している。

さらに、当社では、先端的な大規模構造解析を実用化すべく Advance/FrontSTR を開発しているが、設計に生かすことのできる大規模構造解析を行うためにも、シミュレーションのすそ野を広げなくてはならないと考えている。そのため、並列計算を除いた機能で、一連の構造解析がパソコンで簡単に動作できるようにした Advance/FrontSTR と Advance/REVOCAP をセットした普及版も提供している。

3. 大規模解析への取り組み

3.1. リファイナーを利用した超大規模解析

3.1.1. 解析の手順

2 億に近いメッシュ数となると、データのハンドリングだけでも結構やっかいな問題である。そこで、特に大規模解析の場合には、小規模での条件チェックが必須である。ここでは、Advance/FrontSTR のリファイナー機能を利用し、まずリファインなしのケースである程度の結果の妥当性を確認し、その後にリファイナーを利用した詳細解析を実施したケースにつき報告する[3][4][5]。

このような利用方法は、Advance/FrontSTR および Advance/REVOCAP 固有の機能であり、リファインなしのケースで妥当な解を得ることができれば、リファインについては、入力データを 1 行変更するのみで解析できる。ただし、このときには、どのような処理時間で計算が終わるか否かの情報を持っておくべきである。参考値として、1 回のリファインで、おおよそとのデータの 16 倍の計算時間を要する。

3.1.2. 解析条件

機械部品を解析対象として、4 面体 2 次要素を用いた静応力解析を行った。

解析は、財団法人 計算科学振興財団様の計算機で行った。この計算機の仕様は、ブレードサーバ「PRIMERGY BX922 S2」208 ノードによる、理論ピーク性能 22 テラフロップスの PC クラスタ型スーパーコンピュータを中核としたシステムとなる。ノード間は高速インターコネクトである

「InfiniBand (インフィニバンド) QDR」で接続され、高性能な並列計算環境を実現している。

表 2 リファイナーの基本性能

項目	リファインなし	リファイン 1 回	リファイン 2 回
要素数	684,807	5,478,456	43,827,648
節点数	1,008,911	7,707,758	60,089,084
自由度	3,026,733	23,123,274	180,267,252

3.1.3. 解析結果

解析結果については、リファインがない場合には応力集中が明確に現れなかった。しかし、リファイン 2 回を行ったケースでは、応力集中が明確に現れた。下図にその結果を示す。これは、リファイナー機能の非常に有効な利用方法の一例である。

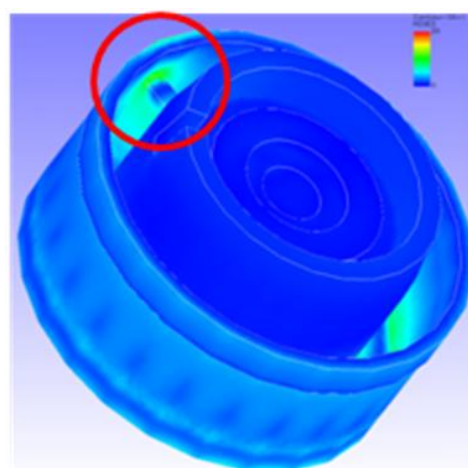


図 2 リファインなしの解析結果

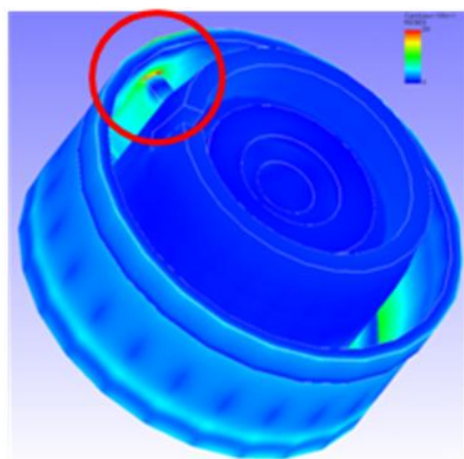


図 3 リファイン 2 回の解析結果

表 3 超大規模計算の処理時間

項目	リファイン 1 回	リファイン 2 回
自由度	23,123,274	180,267,252
100CPU	22 分	345 分
1100CPU	4 分	36 分

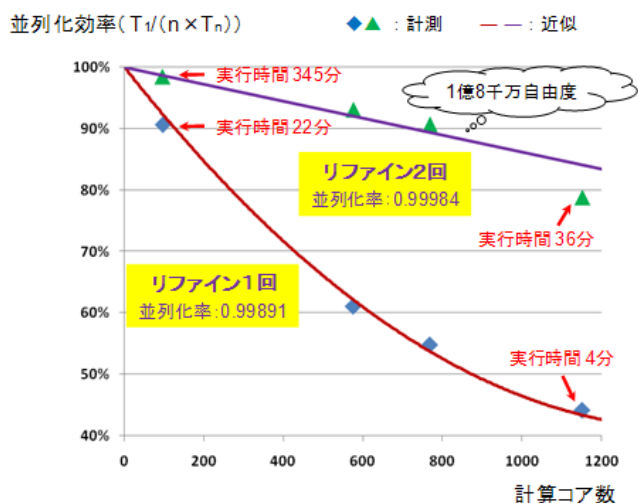


図 4 超大規模計算の並列性能

3.2. その他の大規模解析の実績

3.2.1. 解析対象

汎用構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の直接法による解析機能および固有値解析機能のベンチマークを行った。直接法および固有値計算については、通常の応力解析よりも、多大な使用記憶容量、処理時間、および、並列性能を要するため、

これらの項目に着目したベンチマークを行った。利用した問題は、図 5 に示す容器である。ここでは、本問題に対して、次のような大きさのサイズのモデルを作成して、解析を行った[9][10]。

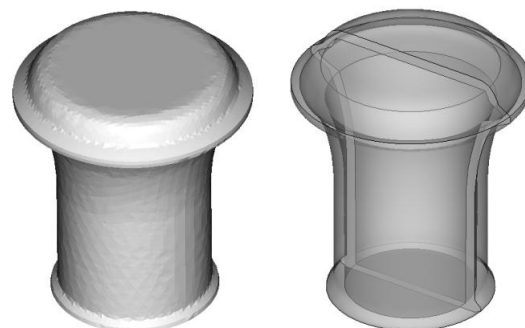


図 5 ベンチマークモデル

(左 ; ソリッドモデル、右 ; 透視図)

表 4 ベンチマークモデルサイズ (その 1)

名称	Case A	Case B	Case C
要素	4 面体	4 面体	4 面体
次数	2 次	2 次	2 次
要素数	31,474	66,159	135,265
節点数	54,558	110,681	214,136
自由度数	163,674	332,043	642,408

表 5 ベンチマークモデルサイズ (その 2)

名称	Case D	Case E
要素	4 面体	4 面体
次数	2 次	2 次
要素数	251,792	529,272
節点数	386,074	795,552
自由度数	1,158,222	2,386,656

3.2.2. 直接法による大規模解析

本モデルを対象として、直接法による解析を実施した。ここでは、使用記憶容量、処理速度、および、並列性能に着目した[10]。

ベンチマークを実施した計算機の環境は表 6 の通りである。この計算機環境は、特殊な計算機環境ではなく、比較的安価に企業で導入できる程度の計算機環境である。

表 6 解析に利用した計算機環境

項目	内容
OS	CentOS release 4.4 (Final)
CPU	Dual Core Opteron280(2.4GHz)
構成	16nodes(4Core/node)
	2nodes(interactive node)
	Total 72 Cores
メモリ	16GB/node(4GB/Core)

(1) 使用記憶容量

直接法を利用した解析に必要な使用記憶容量について述べる。直接法を利用した解析では、反復法による解析等よりもかなり大きな使用記憶容量を必要とする。それぞれのケースについて、次のような量の使用記憶容量が必要である。

表の中で空欄のものは、使用記憶容量が不足するため実行できなかったモデルである。直接法を利用した解析では、処理速度を上げる目的よりも、大規模モデルを実行する使用記憶容量を確保するために並列計算を行うこともある。このような利用方法も並列計算機の有効な利用方法である。

表 7 直接法の使用記憶容量 (1 プロセス) 単位 GB

ケース	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
CaseA	1.00	0.62	0.31	0.20	0.12
CaseB	2.40	1.50	0.86	0.46	0.28
CaseC	5.90	3.50	1.90	1.20	0.76
CaseD	—	7.00	4.25	2.70	1.35
CaseE	—	—	10.37	6.30	4.00

表 8 直接法の使用記憶容量 (全プロセス) 単位 GB

ケース	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
CaseA	1.00	1.23	1.24	1.57	1.98
CaseB	2.40	3.00	3.43	3.70	4.45
CaseC	5.90	7.00	7.60	9.60	12.13
CaseD	—	14.00	17.00	21.60	21.60
CaseE	—	—	41.48	50.37	64.00

また、解析に必要な使用記憶容量はほぼ問題サイズに比例しているが、若干比例よりも大きくなる。

ここでは、剛性行列の非零数は 1 行につき 100 程度のモデルである。

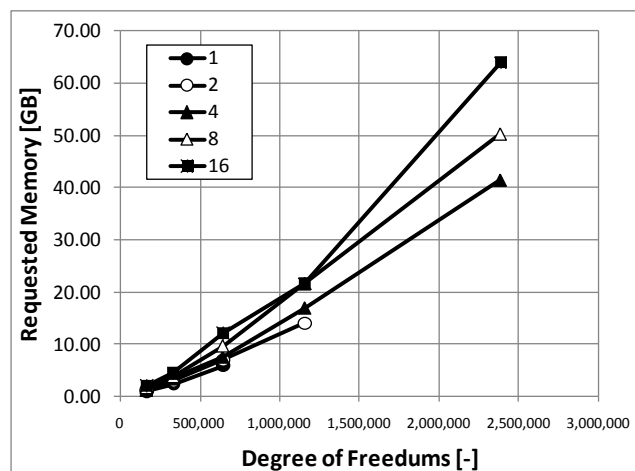


図 6 直接法の使用記憶容量

(2) 処理速度および並列性能

次に、実モデルでの処理時間を示す。先にも述べたように反復法ほどの並列化の性能は出ないものの、16CPU で 6 倍強程度の処理速度となる。また、240 万自由度程度の問題でも 16CPU を利用すれば処理時間数分で実行できることが分かる。

表 9 直接法の処理時間

ケース	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
CaseA	47.4	27.43	18.49	14.11	13.36
CaseB	143.31	87.45	49.58	40.63	30.67
CaseC	517.47	276.95	171.89	123	96.97
CaseD	—	897.38	509.21	345.78	280
CaseE	—	—	1149	1114.9	474.26

表 10 直接法の並列処理による速度向上比

ケース	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
CaseA	1.00	1.73	2.56	3.36	3.55
CaseB	1.00	1.64	2.89	3.53	4.67
CaseC	1.00	1.87	3.01	4.21	5.34
CaseD	—	2.00	3.52	5.19	6.41

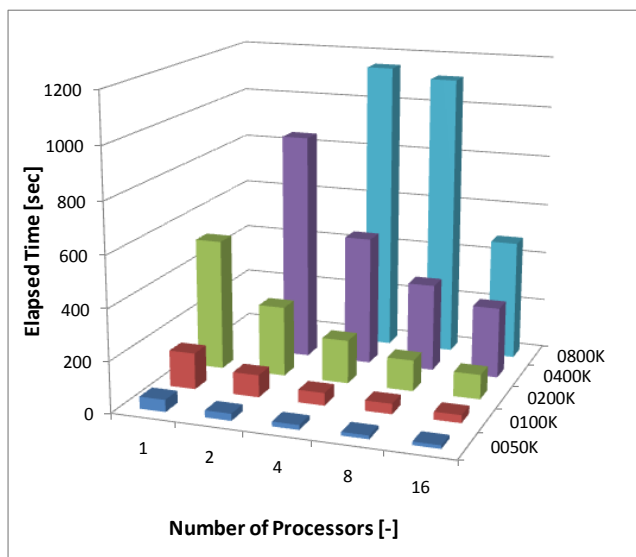


図 7 直接法の処理時間

3.2.3. 大規模な固有値解析

本モデルを対象として、固有値解析を実施した。ここでは、使用記憶容量、処理速度、および、並列性能に着目した[9]。

(1) 使用記憶容量

解析に必要な使用記憶容量について述べる。固有値解析では、通常の応力解析等よりもかなり大きなメモリが必要である。それぞれのケースについて、本ソフトウェアでは、次のような量のメモリが必要である。

表 11 固有値解析に必要な記憶容量 (単位:GB)

Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
2.2	2.9	15.9	32.0	62.7

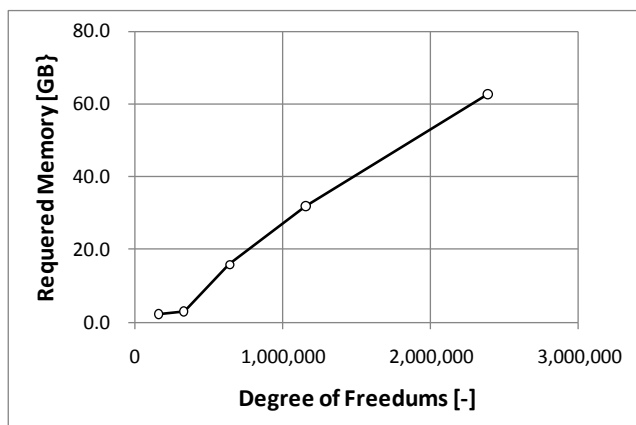


図 8 固有値解析に必要な記憶容量

(2) 処理時間

処理時間については、wall clock で測定した。まず、代表的な処理時間について示す。横軸に自由度数および縦軸に処理時間を示す。ここでは、代表的に、最も処理時間の速い 16CPU を利用したケースについて示した。240 万自由度の問題が 16CPU を利用して 3 時間程度で解けていることが分かる。ここでは、100 固有値を求めるケースを示した。

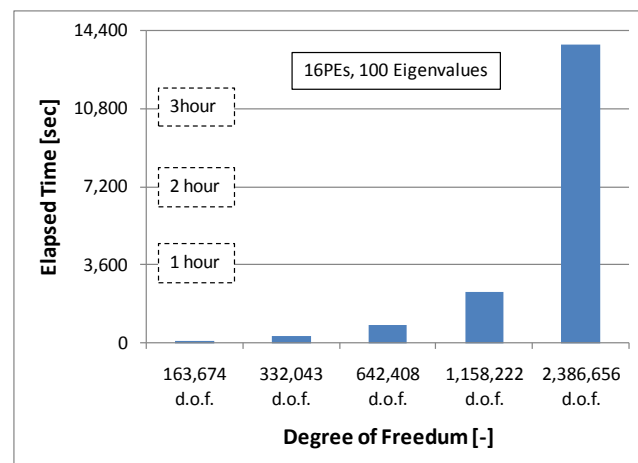


図 9 固有値解析の処理時間

代表的なケースにおける処理時間がどのように CPU に依存しているか、とその速度向上比を示した。このケースでは、16CPU で 12 倍の処理速度となっているため、有効に並列計算機の資源を利用しているといえる。

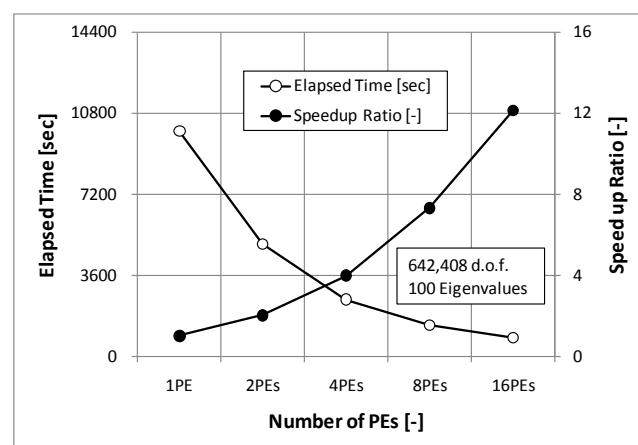


図 10 固有値解析の並列処理と処理時間

4. 複雑解析への取り組み

4.1. アセンブリ機能を利用した解析

4.1.1. 解析モデル

解析モデルは、3つの配管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して解析を実施した[5][6][7]。

表 12 アセンブリモデル条件

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 13 アセンブリモデル（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

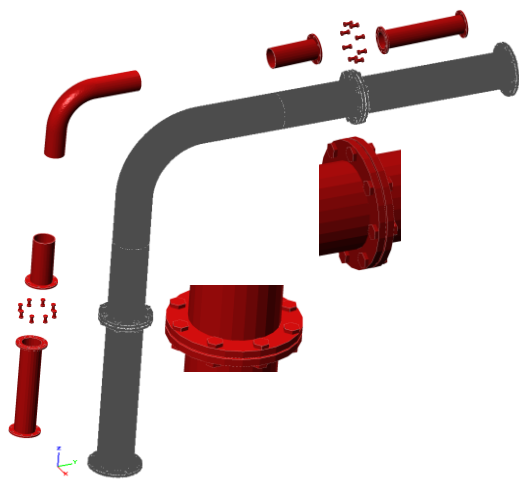


図 11 アセンブリモデル全体図

4.1.2. 解析結果

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、2,672 秒であった。

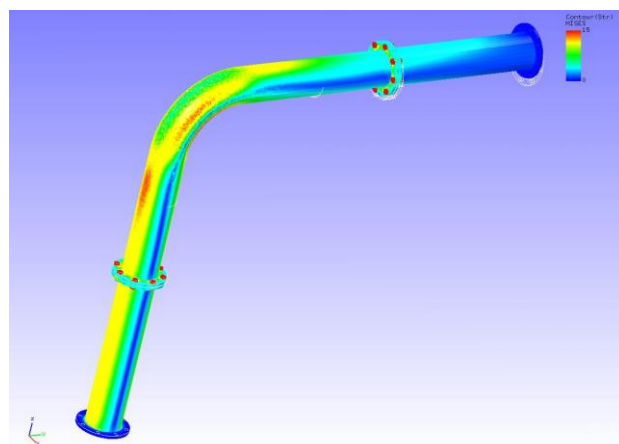


図 12 全体のミーゼス応力分布

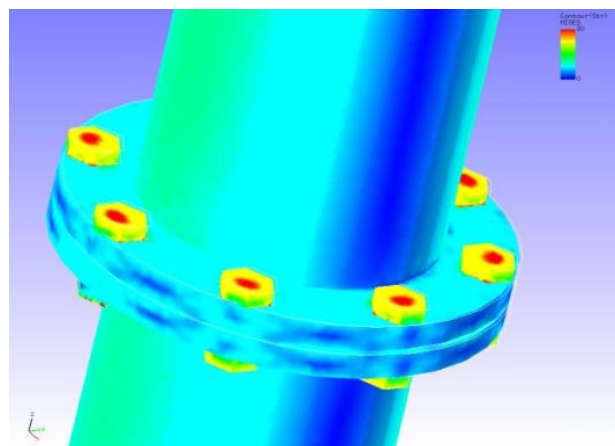


図 13 ボルト部分のミーゼス応力分布

4.2. 連成解析の実績

当社では、流体解析と構造解析の連成解析をはじめ、各種ソフトウェアとの連成解析を実施してきた。そのような解析を通して、それらのノウハウを連成のためのツール Advance/MPLink とし集約し、ユーザ毎のカスタマイズのベースとなるソフトウェアとしてきた。Advance/MPLink では、2つのシミュレーションソフトの異なるメッシュ間の物理量を面と面の間で補間すると共に、連成に関する各種処理を行う。連成解析が必要とされる解析は多岐にわたり、その組み合わせも多い。下記に、当社の連

成解析の実績を示す。

表 14 一方向連成解析の主要な実績

解析	概要	適用分野
流体解析 →構造解析	流れによる構造物の振動解析	機械分野 原子力分野
構造解析 →音響解析	車輪の振動に起因する騒音解析	鉄道分野
流体→構造 →音響	火力発電所ポンプの流れによる環境騒音	機械分野
音響解析 →構造解析	振動による構造物強度への影響評価	原子力分野
構造解析 →流体解析	起振源の流体挙動への影響評価	機械分野
流体解析 →音響解析	流れによる騒音発生の解析	機械分野
分子動力学 →構造解析	ミクロな相分離構造結果を利用した応力解析	化学分野

表 15 双方向連成解析の主要な実績

解析	概要	適用分野
流体解析 ⇔構造解析	超音速圧縮性流体と大変形構造解析	機械分野
流体解析 ⇔構造解析	表面を持つ流れと大変形構造解析	機械分野
流体解析 ⇔構造解析	商用ソフトウェア同士の連成制御手法開発	機械分野

5. まとめ

大規模プラントの健全性のシミュレーションには、大規模解析を高速に実施することが必要であること、および、複雑な形状をハンドリングできることが必須である。当社では、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の開発および販売への取り組みを通して、大規模プラントの大規模複雑解析の課題を解決し、実用化すべく、リファイナ機能を利用した数億自由度程度の大規模解析の取り組み、複雑形状へのアセンブリ構造での取り組み、および適切な連成解析のためカスタマイズの取り組みを進めていることを本稿で報告した。今後もこの取り組みを継続する計画である。

参考文献

- [1] 袁熙, “Advance/FrontSTR Ver. 3.0 の非線形解析機能について”, アドバンスシミュレーション, Vol.4 (2010)
- [2] 袁熙, “Advance/FrontSTR Ver.4.0 解析機能の拡張”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [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)
- [5] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR のメッシュ細分化機能「リファイナ」”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [6] アドバンスソフト株式会社, “Advance/Front Flow/red, Advance/FrontSTR のご紹介”, 第 32 回関西 CAE 懇話会, (2011.5)
- [7] 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)
- [8] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR の部品アセンブリ解析機能”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [9] 松原 聖, 大家 史, “Advance/FrontSTR の固有値解析機能のベンチマーク解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [10] 大家 史, 松原 聖, “Advance/FrontSTR の直接法ソルバの並列性能”, アドバンスシミュレーション, Vol.9 (2011)