

Advance/FrontSTRのメッシュ細分化機能「リファイナー」

末光 啓二* 徳永 健一*

Mesh Refinement 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メッシュ細分化機能「リファイナー」について報告する。本機能を利用することで、高精度な解析を簡単に実行することが可能となる。さらに、並列計算機を利用した高速処理が可能な Advance/ FrontSTR を利用することで、高精度かつ高速の構造解析を実施することが可能となった。

ここでは、「リファイナー」のアルゴリズムと基本性能[1][2][3]、および、「リファイナー」を利用した標準的な CT 試験片の応力集中解析を効率的に実施できることについて述べる。また、本稿の最後には、この「リファイナー」を利用した超大規模な（1 億 8000 万自由度）解析を実施したことを報告する[4][5]。これらの内容を通して、高精度かつ高速な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、メッシュ生成

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 Advance/REVOCAP および構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR で「リファイナー」を実現した。本機能を利用することで、高精度な解析を実施することができる。具体的には、ひとつの条件を指定するのみで、メッシュを細分化した解析を

行することが可能となった。ここでは、Advance/FrontSTR に実装されているメッシュ細分化機能を検証するために、標準的な CT 試験片の応力集中解析を行った。また、「リファイナー」を利用した超大規模計算（1 億 8000 万自由度）を実施したことを報告する。

2. リファイナーの機能と性能

2.1. リファイナーの特長

リファイナーは、メッシュを自動的に細分化する機能を持つ[1][2][3]。ユーザーから与えられた情報に従い、その階層数だけメッシュを細分化する。ユーザーは、その階層数だけを、ソルバーの制御データとして与えるのみである。従って、細分化によるユーザーの負担はほとんどない。

リファイナーの特長は次の通りである。

- ① 形状適合性の向上
- ② 境界条件設定の負担増がない

*アドバンスソフト株式会社 技術第 5 部

5th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

- ③ プリポスト側の計算機資源の負担増がない
- ④ 領域分割処理の負担増がない

以下、その特徴について述べる。

このうち、最初に示した第 1 の特長は CAD 形状の曲面データを用いて細分後の形状に適合させることができることである。すなわち、メッシュで解析精度を向上させると同時に、形状解像度を向上させたデータを利用して解析を実施することが可能となる。

次に、第 2 の特長については、境界条件が与えられた解析モデルをクラスタ環境で細分化することである。ここでは、あらかじめ細分化前のモデルに境界条件を設定しておくことで、細分後の大規模モデルの境界条件の設定が不要である。すなわち、境界条件を設定する際には、ユーザーは、サイズの大きなデータやモデルを取り扱う必要がない。

第 3 の特長は、ソルバー組み込み型であり、クライアントーサーバー方式の計算環境においては、サーバー側での処理となる。従って、プリポストを実行するクライアントには、処理の負担を増やさないようにすることが可能である。

最後に第 4 の特長は、次の通りである。大規模データになると、並列化のための領域分割の処理速度が課題になることがある。しかし、「リファイナー」の利用により、領域分割した後にモデルの細分化するため、領域分割ツールへの負荷が少ない。従って、ユーザーは細分化後の領域分割を気にする必要がなくなる。

2.2. リファイナーのシステム構成

次に「リファイナー」のシステム構成について示す。まず、細分化する前のデータで、構造モデルを領域分割して、それぞれの領域のファイルに分ける。そのファイルをソルバー側にファイル転送する。このときに CAD 形状データも合わせて転送する。その後、ソルバーの環境（計算サーバーを想定）において、それぞれの領域のメッシュがリファインされる。その際に、リファイナーは CAD 形状データを参照しながらメッシュの細分化を行う。すなわち、

もともと丸い形状は、細分化しても丸くなるという機能である。その後に、ソルバーの処理に入る。

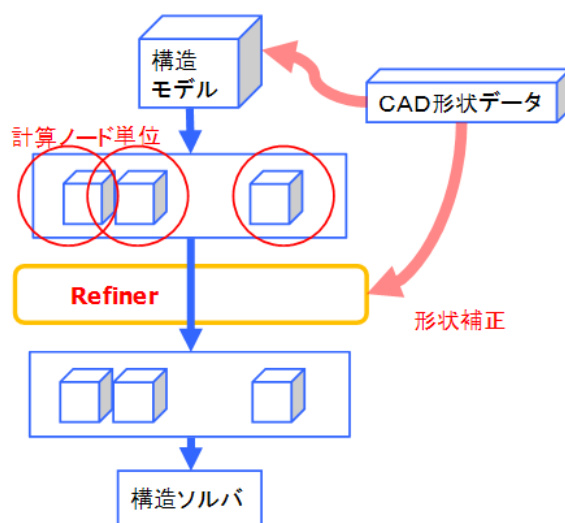


図1 リファイナーのシステム構成

2.3. 基本性能

大規模解析を実施する場合、以下の 2 通りを比較した。まず、Advance/REVOCAP に組み込まれた ADVENTURE_TetMesh で細かいメッシュを生成してから、FrontISTR (※) で解析した（ケース 1）。次に、Advance/REVOCAP に組み込まれた ADVENTURE_TetMesh で粗いメッシュを生成してから、REVOCAP_Refiner が組み込まれた FrontISTR を利用してオンメモリでモデルを細分して解析した（ケース 2）。

ここでは、このケース 1 とケース 2 を比較した。下表にこの結果を示す。ここで、ソルバーのプレ処理には、ファイル読み込み時間、オンラインのリファインの時間含む。

※ ここで紹介する性能については、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り、公開されているソフトウェアである FrontISTR を利用した。これらの性能は、当社の製品版 Advance/FrontSTR でも同等の結果を得ることができる。

表 1 リファイナーの基本性能

項目	ケース 1	ケース 2
要素数	292820	2290824
節点数	446320	3255492
メッシュ生成時間[s]	145	4527
リファイン回数	1 回	なし
リファイン後要素数	2343120	0
リファイン後節点数	3344152	0
ソルバープレ処理[s]	24	27
ソルバー解析時間[s]	7692	7469
トータル所要時間[s]	7861	12023

この結果から、ソルバーのプレ処理時間、解析時間はほぼ同等であることが分かった。また、メッシュ生成時間を考慮すると、Refiner の細分機能を使って大規模モデルを作成した方が約 35% の時間短縮になることが分かった。従って、リファイナーの目的は十分に達成できていることがこの結果から分かる。

また、実際のモデル作成時には、さらに、このスループットの時間の差が顕著になると考えている。それは、大規模モデルになるほど、ユーザーはハンドリングしにくく、コピーしたり、適当なフォルダに保存したり、整理したりすることに時間を要するからである。また、データの保存についても、容量の小さなファイルを格納すればいいため、ユーザーの負担は非常に軽くなる。

実際には、コピーやファイル転送時間にストレスを感じるユーザーは少なくない。大規模解析には、これらのことを含めたいきめ細かい対応が必要であり、そのことで大規模解析を普及させていくことができると考えている。

3. 実証解析

3.1. 解析モデル

本節では、リファイナーの検証を行うため、CT 試験片の応力拡大係数の解析を行った。解析対象の CT 試験片の形状を以下に示す。

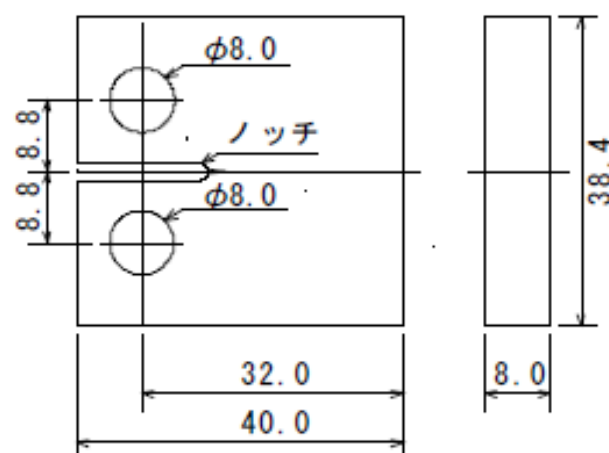


図 2 CT 試験片の解析形状

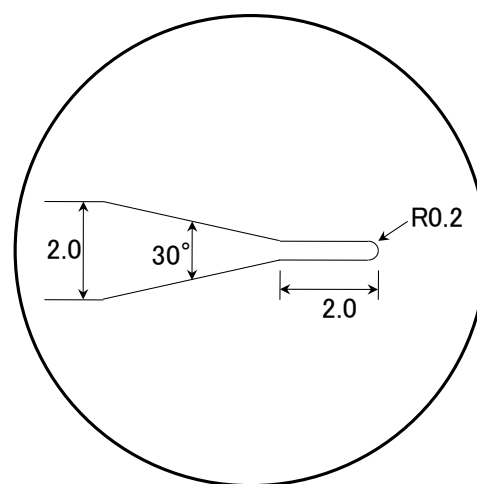


図 3 CT 試験片の解析形状（拡大図）

メッシュは、ノッチ先端部の R 中心を通る z 方向線分からの距離による密度制御を行い、4 面体 2 次要素で作成した。

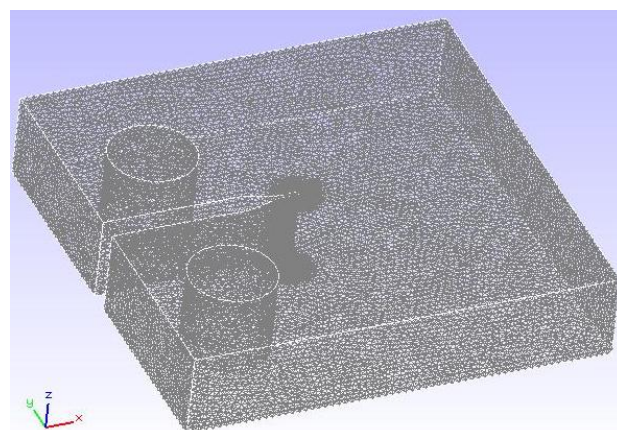


図 4 CT 試験片のメッシュ

作成したメッシュのサイズ一覧を以下に示す。メッシュの基準長さは、ノッチ先端部の R の円周の 1/2 となる 0.628mm とした。本メッシュ生成では、ノッチ先端における節点が z 軸上に並ぶようにしており、表中の平均辺長は、その線分上にある要素辺長の平均である。ここで、使用計算機は、OS: Windows XP, Core2, 1.86GHz, 2GB を利用している。

表 2 CT 試験片の解析条件 (その 1)

ケース名	密度係数	生成時間	表示時間	備考
DF2	2	30	8	円周 4 分割相当
DF4	4	34	9	円周 8 分割相当
DF6	6	53	14	円周 12 分割相当
DF8	8	121	32	円周 16 分割相当
DF11	11	275	59	円周 22 分割相当
DF12	12	365	85	円周 24 分割相当

表 3 CT 試験片の解析条件 (その 2)

ケース名	要素数	節点数	平均辺長
DF2	273,078	387,347	0.216
DF4	303,544	429,049	0.127
DF6	507,346	704,253	0.095
DF8	1,147,920	1,561,353	0.063
DF11	2,247,912	3,029,807	0.054
DF12	2,749,982	3,698,431	0.050

3.2. 解析ケース

解析に使用した境界条件を以下に示す。両側の円筒ボリウムに y 方向の体積力として、合計 80.4N の荷重をそれぞれ反対方向に負荷した。材質は、試験片がスチール、円筒ボリウムがダイヤモンド相当である。

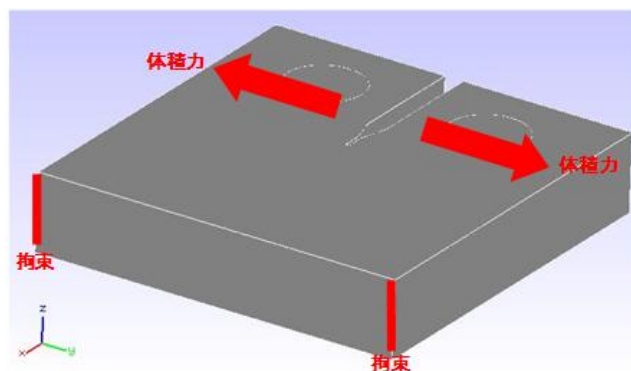


図 5 CT 試験片の境界条件

3.3. 解析結果

解析ケースの一覧を以下に示す。使用した計算機は、OSはLinuxで、Dual Core Opteron280, 2.4 GHz, 4GBの環境である。また、ここでの解析は、すべて32並列で実施した。その結果および、収束状況を以下に示す。細分化による悪影響は認められず、これらの結果を応力集中の観点から整理する。

表 4 CT 試験片の解析条件

No.	密度係数	リファイナー適用回数	反復回数
D2	2	0	1496
D4	4	0	1518
D4R1	4	1	2997
D4R2	4	2	5942
D6	6	0	1802
D6R1	6	1	3313
D8	8	0	1802
D11	11	0	1909

表 5 リファイナーの基本性能

No.	ソルバー時間	解析時間	経過時間
D2	108	130	141
D4	123	147	158
D4R1	2085	2282	2339
D4R2	32609	33893	34216
D6	246	289	304
D6R1	3750	4062	4151
D8	598	691	722
D11	1680	1958	2034

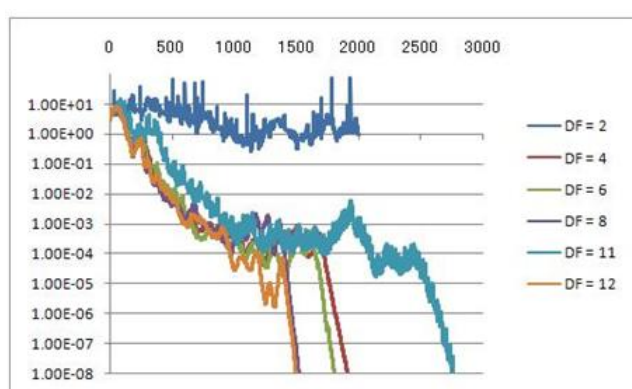


図 6 CT 試験片の収束状況 (その 1)

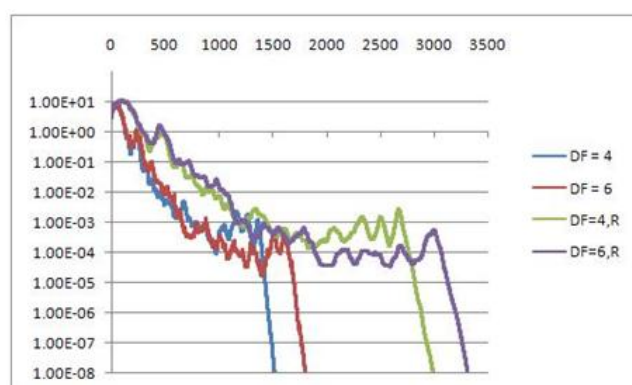


図 7 CT 試験片の収束状況 (その 1)

解析された試験片全体のミーゼス応力分布の一例 (No.5) を以下に示す。ノッチ先端部に明瞭な応力集中が見られる。そこで、ノッチ先端を通る $y=0$ の断面でのミーゼス応力分布を示す。

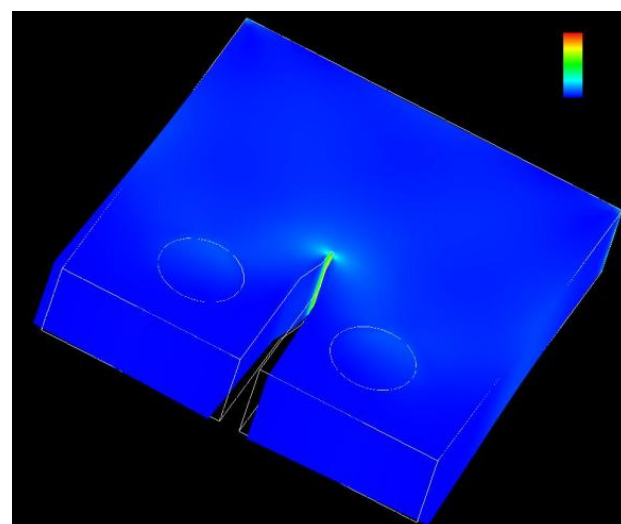
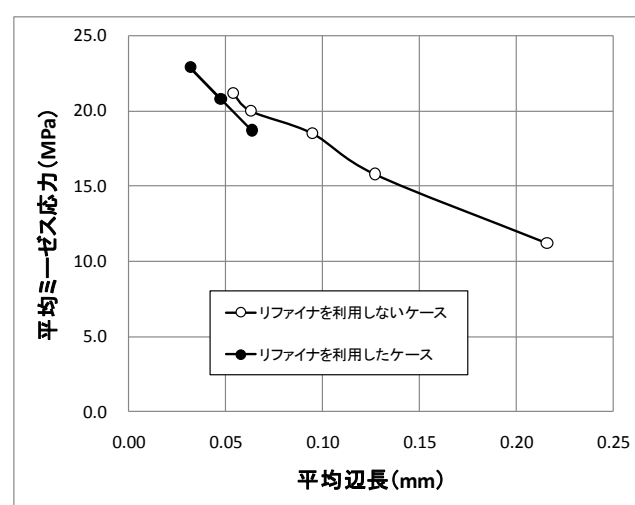


図 8 リファイナーの形状適合性

3.4. 集中応力の比較

密度係数を変えて作成したメッシュの各解析結果を比較して以下に示す。メッシュ細分化を行った各解析結果を比較して以下に示す。ノッチ先端 z 軸上のミーゼス応力の平均値について、その線分上の平均辺長を横軸にして以下に示す。

全体のケースの比較を図 9 に示した。リファインにより応力集中が顕著にみられることが分かる。またそれぞれのケースの応力のコンタを示す。ここでは、リファイナーにより解像度が上がることで、応力集中をとらえており、リファイナー機能に期待した通りの結果が得られた。

図 9 ノッチ先端 z 軸上のミーゼス応力分布

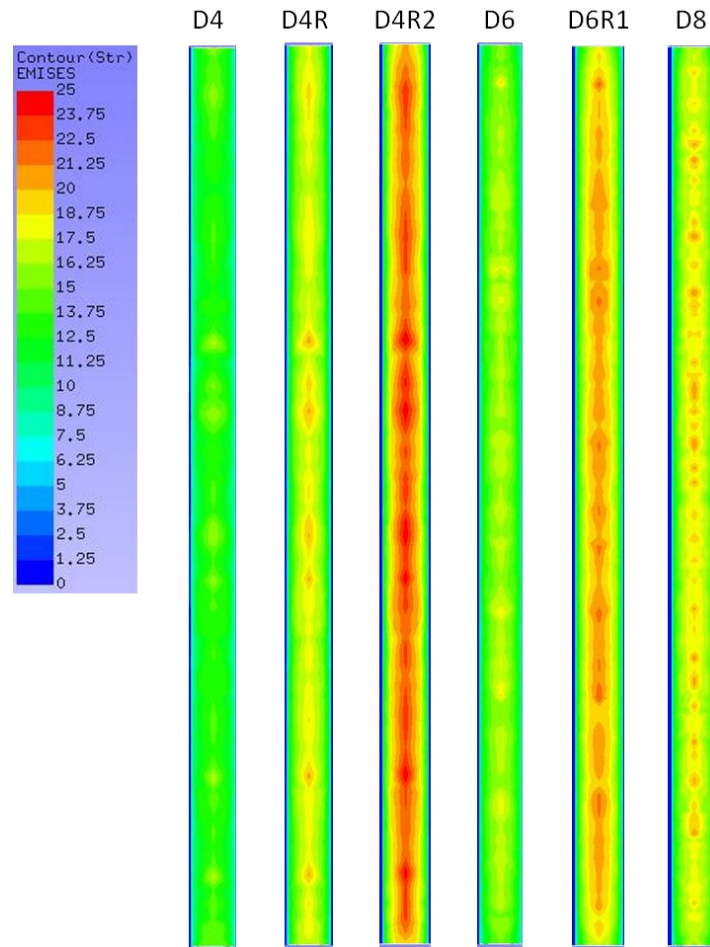


図 10 ノッチ先端表面の z 方向ミーゼス応力分布

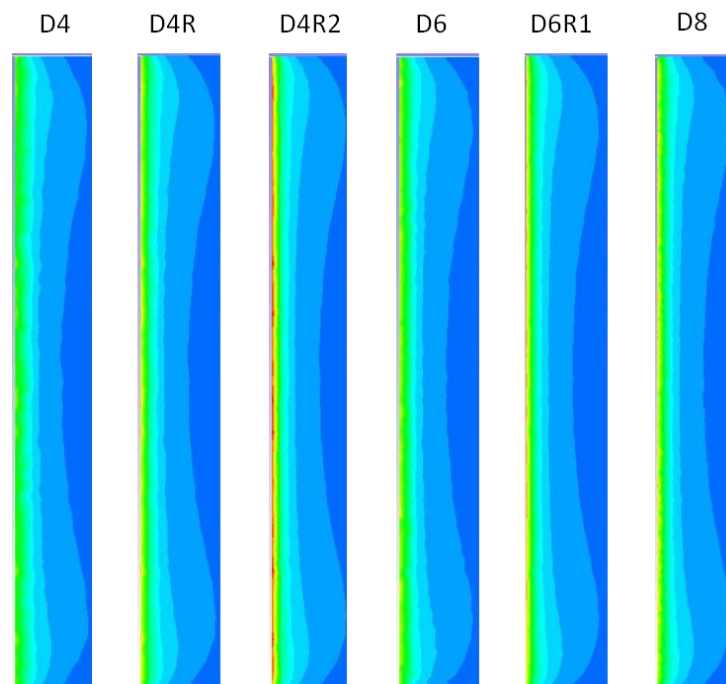


図 11 ノッチ先端断面の z 方向ミーゼス応力分布

4. リファイナーを利用した超大規模解析

4.1. 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、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。

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。

4.2. 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[4]。

表 6 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

4.3. 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。[5]

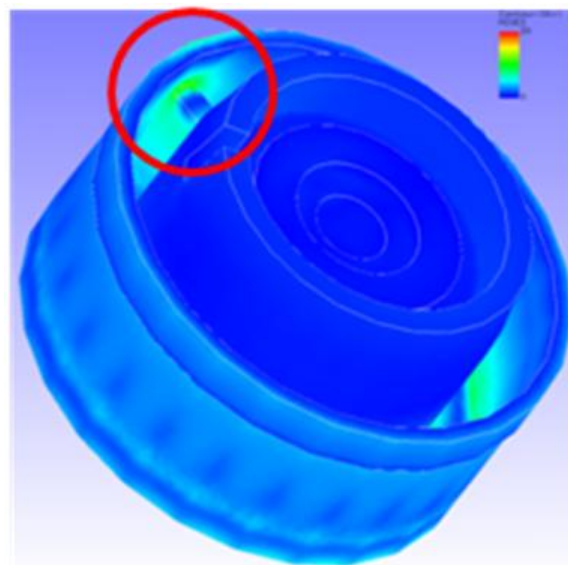


図 12 リファインなしの解析結果

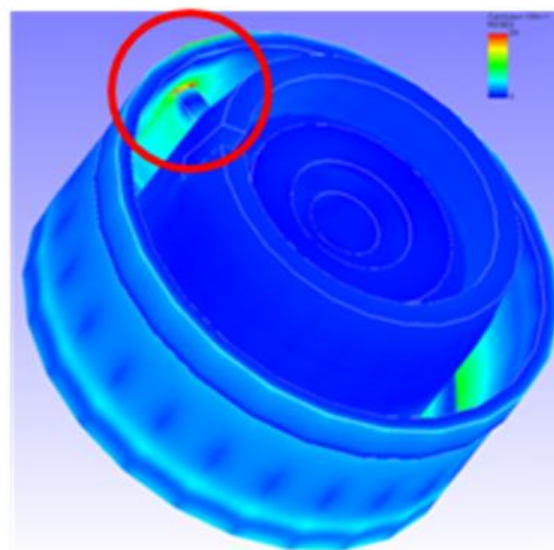


図 13 リファイン2回の解析結果

表 7 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

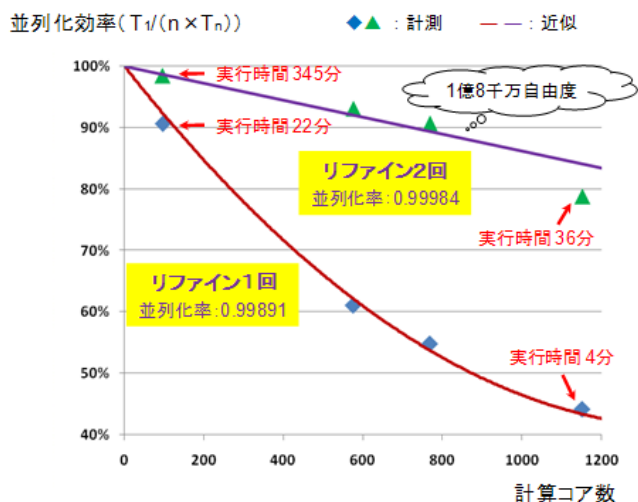


図 14 超大規模計算の並列性能

- [5] アドバンスソフト, “Advance/FrontFlow/red, Advance/FrontSTR のご紹介”, 第 32 回関西 CAE 懇話会(2011.5)

5. 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期待し、また、今後とも改良を継続する計画である。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 計算科学振興財団, “FOCUS スパコンの利用について”, (2011.4.26)
http://www.j-focus.or.jp/spacon/about_spacon.pdf