

Advance/FrontSTRによるリファイナーを利用した大規模解析

末光 啓二* 徳永 健一* 松原 聖* 加藤 国男**

Large-Scale Simulation by Advance/FrontSTR, REVOCAP

Keiji Suemitsu*, Ken-ichi Tokunaga*, Kiyoshi Matsubara* and Kunio kato**

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR は、並列計算環境における大規模解析をひとつの特徴としている。大規模解析を行うための支援機能として、アセンブリ機能（部品を組み合わせることで全体のモデルを作成する機能）およびリファイナー機能（メッシュ細分化機能）を有している。Advance/FrontSTR のリファイナーについては、これまで、[1]等で報告してきた。本稿では、リファイナー機能を利用した大規模計算の事例を示す。ここでは、ユーザー事例、およびリファイナーを利用して従来の報告よりもさらに大規模解析の2つの事例を報告する。前者では、リファイナーを利用することで、比較的容易に数千万自由度の実用問題の解析を行うことができ、並列計算機ではその解析が数時間で可能であることを示す。後者では、節点数で1億、自由度で3億を超える大規模な解析事例について示す。

Key word: 構造解析、大規模解析、並列計算、メッシュ細分化

1. はじめに

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。ここでは、大規模解析を行う仕組みの1つであるメッシュ細分化機能「リファイナー」を利用した大規模解析について報告する。

当社では、これまでもリファイナー機能を利用した大規模解析に取り組んできたことを報告している[2][3][4]。また、リファイナーを利用した大規模解析の事例について報告してきた[5][6]。その後も、当社では解析事例を経験し、その効果を確認してきた。

本稿では、2節でリファイナーの機能を示し、3節および4節でリファイナーを利用した2つの大規模解析の事例を示す。

*アドバンスソフト株式会社 第1事業部

Computational Science and Engineering Division I,
AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 総合企画部

General Planning Division, AdvanceSoft Corporation

2. REVOCAP_Refiner とは

2.1. リファイナーの機能

はじめにリファイナー機能について説明する。REVOCAP_Refiner は Advance/FrontSTR に組み込まれて、解析モデルの細分を行うライブラリである。粗い解析モデルから細かい解析モデルにオンメモリで細分するので、解析者は、わずかな手間で（設定ファイルのリファイナーの設定を有効にするだけでよい）大規模解析による精度の向上の恩恵を受けることができる。以下では、REVOCAP_Refiner を利用して解析モデルを細分することを単にリファイナーと呼ぶことにする。

2.2. リファイナーのアルゴリズム

リファイナー機能では、四面体、六面体、三角柱、四角錐のそれぞれの要素を、それら辺に中点を追加して（必要に応じて、面の中心、要素の中心にも追加して）8個または10個の要素に細分する。四面体を8分割する方法について説明する。はじめに、四面体の6つの辺に中点を追加し、その中点を通る面によってもとの四面体の頂点を切り取ることで4つの小さい四面体と、中心に八

面体が得られる。

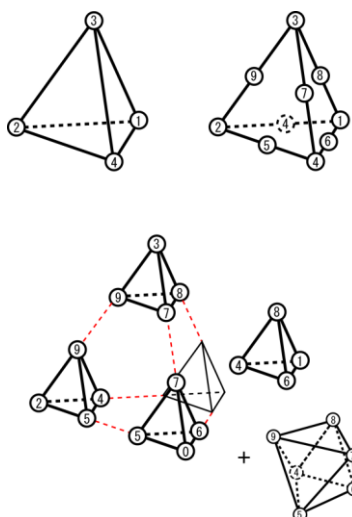


図 1 四面体の分割 (その 1)

中心の八面体については、対角線を追加することで 4 つの四面体に分割することができるが、対角線の選び方によって、3 通りの分割方法がある。分割によって得られる要素の品質を考慮して対角線の長さが最も短くなるものを選ぶようにする。

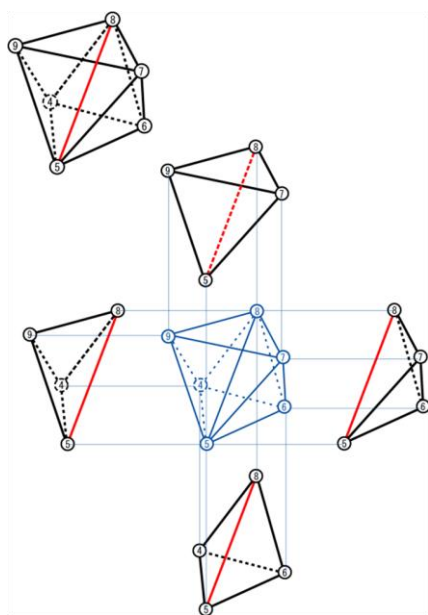


図 2 四面体の分割 (その 2)

六面体、三角柱、四角錐についても同様の方法で要素を分割する。

リファイナー機能では元の解析モデルに与えられている境界条件は自動的に更新される。並列計算の場合は、領域分割を行った後に、それぞれの計算ノード上オンメモリで細分するため、大規

模モデル全体を一度に扱う必要がない。

モデルを細分する場合の形状解像度を上げるために、メッシュ生成するために使った CAD モデルの曲面情報を用いて、細分によって追加される中間節点をその曲面上に移動させる形状適合機能も備わっている。この場合はあらかじめ曲面とメッシュの対応関係を生成する前処理が必要であるが、この機能を使えば形状の解像度まで含めた大規模解析による精度の向上が期待される。

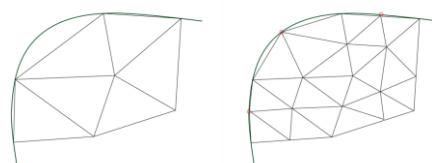


図 3 形状適合機能

形状適合機能は曲面情報が NURBS 曲面で与えられるとして、あらかじめ面上の節点に対してそこからの距離が最小となる曲面上の点に対応づけておき、リファイナー機能では NURBS 曲面のパラメータを用いて、曲面上に中点を生成する。NURBS 曲面は通常以下のような有理関数

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{n_u-1} \sum_{j=0}^{n_v-1} N_{m_u,i}(u) N_{m_v,j}(v) Q_{i,j} \omega_{i,j}}{\sum_{i=0}^{n_u-1} \sum_{j=0}^{n_v-1} N_{m_u,i}(u) N_{m_v,j}(v) \omega_{i,j}}$$

で与えられるので、節点と曲面を対応づけるためには、非線形の最適化計算を曲面上の節点の個数回だけ繰り返すことになる。単純な

Newton-Raphson 法では収束しない点があるので、修正 Newton-Raphson 法などを組み合わせて、最適化の解が robust に求められるような工夫を施している。

2.3. リファイナーの利用方法

Advance/FrontSTR のリファイナー機能を利用した解析を実施した。Advance/FrontSTR のリファイナーの機能では、プログラム内部でメッシュを自動的に細分化する機能が利用できる。パラメータを 1 つ設定することにより、解析に必要な微細メッシュを容易に作成することが可能とな

る。メッシュ細分化の例を下図に示す。

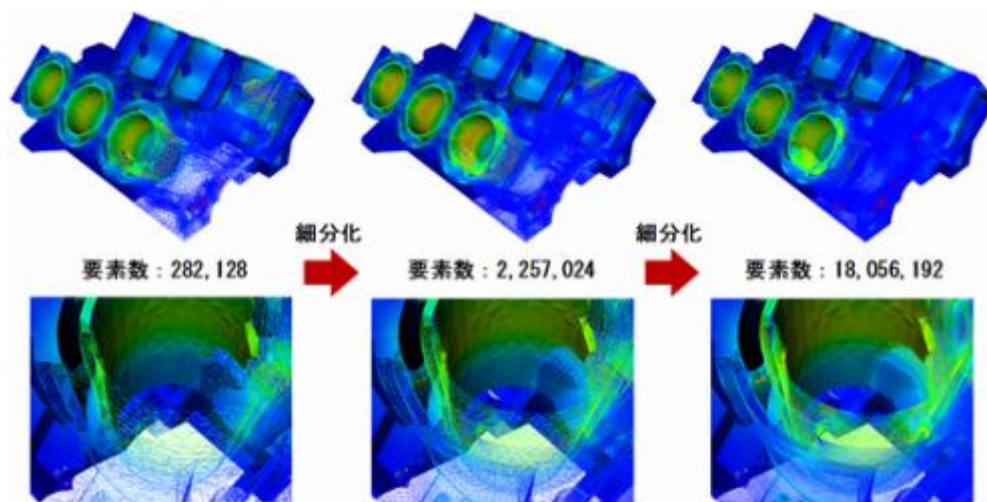


図 4 メッシュ細分化機能の応用例

2.4. 具体的な利用手順

具体的な利用手順については次の通りである。ここでは、最終的に数千万自由度の解析を実施したい場合を想定する。

1 回のリファインでメッシュ数、節点数はほぼ 8 倍になる。最終的なターゲットが数千万自由度であることから、CAD データから作成するメッシュを数百万自由度と設定することができる。

まず、この設定では、CAD データで、2～3 百万要素の四面体 2 次要素でメッシュ作成することになる。必要であれば、この手順の前に、四面体 1 次要素でメッシュを作成し、百万自由度程度で境界条件等を確認することも有効である。ここで作成した要素は、数百万要素である。従って、通常のメッシュでもメッシュ作成が可能な範囲である。このメッシュに対して試計算を行い、解析条件等が間違いのないことを確認する。

次に、このメッシュを細分化して詳細計算を行う。指定するパラメータは、リファイン回数を指定するパラメータ 1 つのみである。ここで、1 回リファインすると、数千万要素のデータを作成することができる。リファインする場合には、メッシュデータを全く変更する必要がないため、メッシュのハンドリングも従来よりもはるかに容易となる。

従って、リファイナー機能を利用すると、下記のようなメリットがある。

- ・ 少ないメッシュ数で解析条件の確認ができる。
- ・ パラメータ 1 つで、おおよそひと桁の解析規模を大きくした詳細解析を実施することができる。
- ・ その時にデータのハンドリングは、少ないメッシュ数の場合と変わらないため、非常に容易である。

以下の節では、2 つの事例につき、この手順に従った解析内容を示す。

3. リファイナーを利用した熱応力解析

3.1. 解析対象

A 社では、Advance/FrontSTR を利用して、部品冷却時の応力解析を実施された。従来は、2 次元解析を実施し設計に問題のないことを確認していたが、形状が複雑になるに従って、3 次元の効果を確認する必要が出てきた。2 次元解析で利用している市販のソフトウェアでは、ライセンス上大規模解析が困難であるため、Advance/FrontSTR を利用した解析を実施することとなった。解析を実施した規模は次の通りである。

表 1 試計算の解析条件

ケース名	ケース 1	ケース 2
要素	四面体 1 次	四面体 2 次
要素数	3,147,621	3,147,621
節点数	545,170	4,281,602
自由度数	1,635,510	12,844,806
リファイン	0 回	0 回

表 2 最終ケースの解析条件

ケース名	ケース 3	ケース 4
要素	四面体 2 次	四面体 2 次
要素数	13,526,568	25,180,968
節点数	14,148,053	26,314,949
自由度数	42,444,159	78,944,847
リファイン	1 回	1 回

3.2. 計算機環境

次の計算機環境を利用した。次の仕様の 10 ノードの計算機システムのうち最大 4 ノードを利用して解析を実施した。

表 3 使用計算機の仕様

項目	内容
CPU	Intel Xeon X5660 2.80GHz
ノード構成	4 ノード×12 コア
メモリ	96GB／ノード
スワップ	96GB／ノード
キャッシュ	12MB／ノード

3.3. 解析結果

3.3.1. 収束判定値の決定

処理時間を短縮するために、収束判定値は、精度の影響のない範囲で大きくとることが有利である。収束判定値の妥当性の確認のため、いくつかの収束判定値（ $1.0\text{e-}5$ 、 $1.0\text{e-}10$ 、 $1.0\text{e-}12$ ）で解析結果を比較した。ここでは、本解析では、

$1.0\text{e-}5$ が妥当な値であることを確認し、最終的には、収束判定値を $1.0\text{e-}5$ とした。

表 4 収束判定値を決定するためのケース

ケース名	ケース 1a	ケース 1b	ケース 1c
要素	四面体	四面体	四面体
次数	2 次	2 次	2 次
要素数	3,658,795	3,658,795	3,658,795
節点数	2,678,832	2,678,832	2,678,832
自由度数	8,036,496	8,036,496	8,036,496
refine	0 回	0 回	0 回
使用 CPU 数	12CPU (1nodes)	12CPU (1nodes)	12CPU (1nodes)
処理時間	875 秒	2928 秒	3206 秒
収束判定値	$1.0\text{e-}5$	$1.0\text{e-}10$	$1.0\text{e-}12$
反復回数	1158	2444	2673

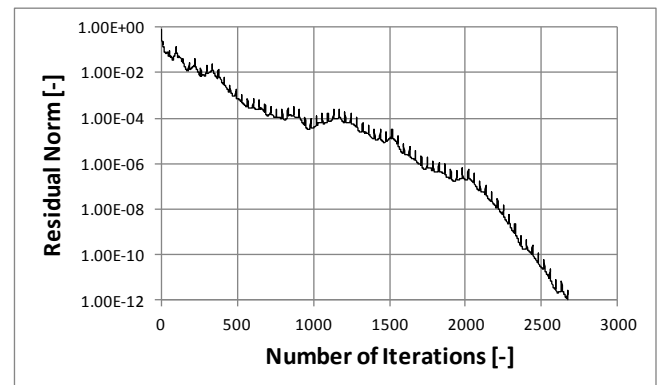


図 5 反復解法の収束状況（ケース 1c）

3.3.2. 解析処理時間

試計算と詳細計算を実施した。詳細計算では、7800 万自由度の大規模計算となったが、48CPU を利用することで、2 時間半で結果を得ることができた。このことから、48 コアの計算機環境を利用して、数千万自由度の解析が手軽にできることを示した事例といえる。

表 5 試計算

ケース名	ケース 1	ケース 2
要素	四面体 1 次	四面体 2 次
要素数	3,147,621	3,147,621
節点数	545,170	4,281,602
自由度数	1,635,510	12,844,806
リファイン	0 回	0 回
使用 CPU 数	12CPU	12CPU
使用メモリ	96GB 以下	96GB 以下
処理時間	57 秒	2174 秒
収束判定値	1.0e-5	1.0e-5
反復回数	619	1,494

表 6 最終目標としたケース

ケース名	ケース 3	ケース 4
要素	四面体 2 次	四面体 2 次
要素数	13,526,568	25,180,968
節点数	14,148,053	26,314,949
自由度数	42,444,159	78,944,847
リファイン	1 回	1 回
使用 CPU 数	12CPU	48CPU
使用メモリ	96GB 以下	192GB 以下
処理時間	16993 秒	8842 秒
収束判定値	1.0e-5	1.0e-5
反復回数	2,274	2,735

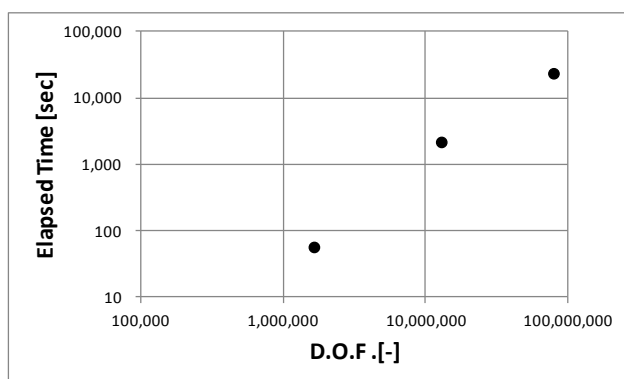


図 6 自由度と処理時間（12 コア換算）

4. リファイナーを利用した超大規模解析

リファイナーを利用して、1 億節点を超える超大規模解析を実施した。

解析モデルは、図 7 に示す CT 試験片の線形静解析である。

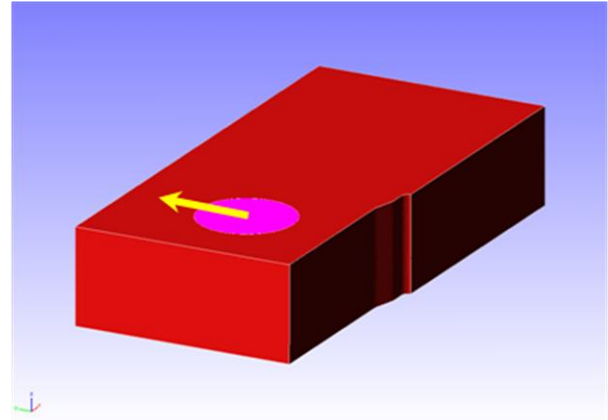


図 7 解析モデル

四面体 2 次要素による比較的小規模の 2 つのオリジナルメッシュに対して、それぞれリファイン 1 回とリファイン 2 回で大規模メッシュを生成した。解析に使用したメッシュ規模を表 7 に示す。

表 7 解析に使用したメッシュ規模

No.	リファイン	要素数	節点数
1	0	830,903	1,140,334
	1	6,647,224	9,017,227
	2	53,177,792	71,569,589
2	0	1,280,262	1,748,022
	1	10,242,096	13,859,575
	2	81,936,768	110,141,661

最大規模は約 1 億 1 千万節点で、自由度数では 3 億を超える。なお、本メッシュは生成時の密度制御を行わず、均一条件で生成した。

本解析は、スーパーコンピューティング技術産業応用協議会主催の HPC 産業応用スクール構造解析実践コースの準備作業として、東京大学革新的シミュレーションセンターのクラスター計算機 CX1000 を用いて実施した。CX1000 の仕様を表 8 に示す。

表 8 使用計算機の仕様

項目	内容
CPU	Intel Xeon X5670 2.93GHz
ノード構成	2CPU (2×6 コア)
メモリ	48GB/ノード
ネットワーク	InfiniBand QDR

リファイナーを利用した場合の解析結果は、オリジナルのメッシュにマッピングし、間引きした状態でポスト処理を行う。このため、PC でのポスト処理が可能となっている。解析結果の一例として、メッシュ最大規模のミーゼス応力分布を図 8 に示す。

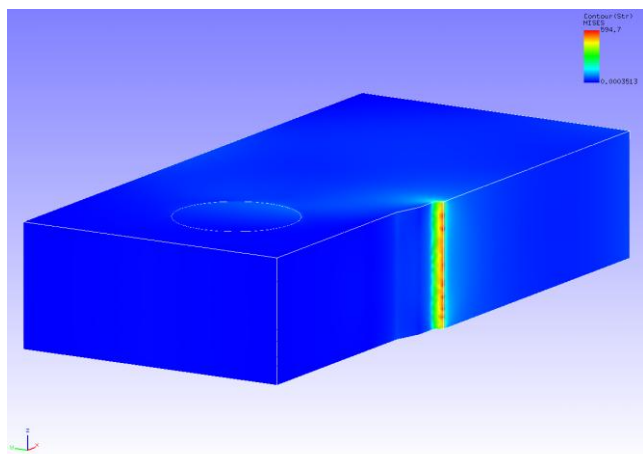


図 8 メッシュ最大規模の場合の解析結果

実行性能を表 9 に示す。

表 9 実行性能

No.	並列数	経過時間(分)	CG 法時間(分)	反 復 回 数
1-0	72	2.0	1.9	1284
1-1	144	13.8	13.4	2371
1-2	144	205.1	202.8	4667
2-0	72	4.2	4.0	1864
2-1	144	23.3	22.7	2714
2-2	144	373.2	369.7	5337

本解析は大規模を主眼に均一なメッシュとし

たが、実務上の応力集中解析ではメッシュ生成時の密度制御と形状適合リファインを組み合わせることにより、効率的かつ精度よい解析を実施することができる。

5. まとめ

これまでにいくつか行った構造解析ソフトウェア Advance/ FrontSTR を利用した大規模解析の処理時間について図 9 に示す。また、ほとんどスケーラブルな並列性能については、本稿で別途示した。従って、Advance/ FrontSTR を利用して構造解析を行う場合には、ユーザーが利用可能な計算資源をベースに、図 9 のグラフをもとにして処理時間を推定することが可能となる。

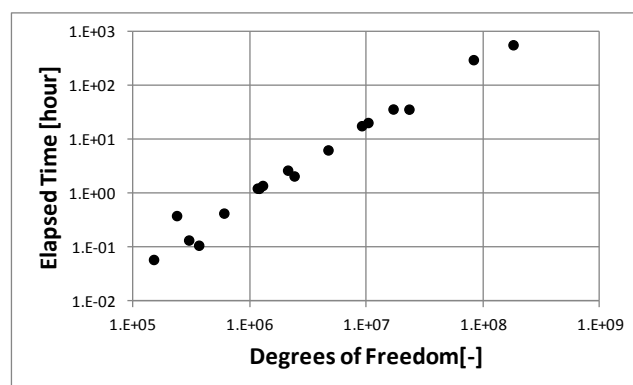


図 9 シングルコアでの Advance/FrontSTR の処理時間めやす（スケーラブルな並列性能については別途示している）

6. おわりに

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR のリファイナーを使うことで、数千万自由度の解析を比較的容易に行うことができ、並列計算機での処理時間も数時間であることを示した。また、リファイナーを利用して節点数で 1 億、自由度で 3 億を超える解析も可能であることを示した。今後も大規模解析に取り組む中で、リファイナー等の大規模解析を支援する機能を充実させる予定である。

参考文献

[1] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR

のメッシュ細分化機能「リファイナー」 ,
Vol.8 (2011.07)

- [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] 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_spac
on.pdf](http://www.j-focus.or.jp/spacon/about_spacon.pdf)
- [6] 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)