

# 構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRの直接法ソルバの並列性能

大家 史\* 松原 聖\*

## Parallel Performance of the Direct Solver for Advance/FrontSTR

Fumito Ohya\* and Kiyoshi Matsubara\*

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った。近年の計算機能力の飛躍的向上を背景に、産業界では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へのニーズが高まっている。構造解析における大規模計算の行列解法は、ほとんどの場合に反復法が利用されている。しかし、接触解析やシェル要素等を利用した解析においては、反復法を適用した場合には収束性に問題があり、直接法の適用が必要なケースがある。このように、特定の問題領域において、直接法を利用した大規模解析への要請は高い。

以上の背景から、百万自由度を超える構造解析の行列解法に直接法を適用することを目的として、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の直接法を整備した。ここでは、直接法の並列機能を整備し、その性能（処理速度と使用記憶容量）を計測した。なお、本稿で報告する直接法を適用したモデルの最大規模は約 240 万自由度であり、16CPU を利用して数分の処理時間であった。

Key word: 音響解析、並列計算機、並列化、大規模計算

### 1. はじめに

近年の製造業における品質保証への要求に応えるため、精度の高い構造解析等のニーズが高まっている。また、計算機の性能向上および低価格化を背景として、大規模な計算により、精度の高い解析が可能となってきている。その 1 つの手段として、当社では、並列化を中心としたシミュレーションの大規模化および高速化に取り組み、それらを実現するためのソフトウェア開発を行ってきた[1][2][3][4][5][6]。

これまで当社では、ソリッド要素でのケースを中心に行き回る法による大規模計算について実施してきた。しかし、よく知られているように、接触やシェル要素を利用した解析等では反復法が収束しないことがある。このような場合には、直接法による大規模計算の実施が必要となる。直接法ソルバを利用した大規模解析の規模は、反復法を利用した

\*アドバンスソフト株式会社 技術第 5 部

5<sup>th</sup> Technical Division, AdvanceSoft Corporation

大規模解析の規模と比較すると 1/10～1/100 とオーダーが小さなものとなるが、反復法が収束しない場合に適用できる手法として直接法のソルバを利用した大規模解析のニーズがある。

本稿では、当社で開発を進めている構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR に実装された直接法の性能を述べる。また、このデータをもとに、本ソフトウェアのユーザーが、直面した問題に対して、直接法ソルバを利用できるかどうかの可否を判断する材料を提供することも目的とする。

### 2. Advance/FrontSTR の機能

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。この中で、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大規

模解析支援機能の開発を実施している。表 2.1 に、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR Ver.4.0 の解析機能一覧を示す。

表 2.1 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	Total Lagrange 法
非線形	／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- $\beta$ 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)
材料タイプ	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
要素タイプ	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)

当社では、先端的な機能として、大規模構造解析を実用化するための開発を行う一方で、比較的小規模の構造解析を簡易に行う機能を提供することにも注力している。そのことがシミュレーションのすそ野を広げることにつながると考えている。そのため、並列計算機能を除いた一連の構造解析がパソコンで簡単に実行できるようにした Advance/FrontSTR と汎用プリポスト Advance/REVOCAP

をセットにした普及版も提供している。

### 3. 簡易モデルでの検証

#### 3.1. 解析モデル

まず、直接法を簡易モデルで評価した。ここでは、サイズの異なる問題を自由に設定できるため、モデル形状がサイコロ型のモデルについて、連立方程式の求解部分のみの処理時間の計測を実施した。このモデルに対して、1万自由度から128万自由度まで2倍ずつサイズの異なる8ケースのモデルを設定した。

#### 3.2. 計算機環境

ベンチマークを実施した計算機の環境は表 3.1 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 3.1 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
使用記憶 容量	16GB/node( 4GB/Core )

#### 3.3. 並列性能

各自由度における処理時間を示す。処理時間については、直接法ソルバの実行部分だけの処理時間を計測している。時間の計測は、wall clock で行った(本稿で示す処理時間は、すべてこの基準に従っている)。並列性能は以下の通りである。

まず、処理速度は、10万自由度程度では1CPUで数分であり、並列化すると1分以内で処理を終えることができる。また、100万自由度を超えると3時間弱の処理時間を要するが、並列化すると十数分の処理時間となる。なお、この簡易モデルでは、性能測定のため非対称行列を直接法で解くモードで

計測している。次の節に述べる実モデルによる検証では、モデルからの要請の通りの対称行列として処理を行っている。従って、4節で述べる実モデルの処理時間が、本簡易モデルの計算より処理時間が短い場合がある。

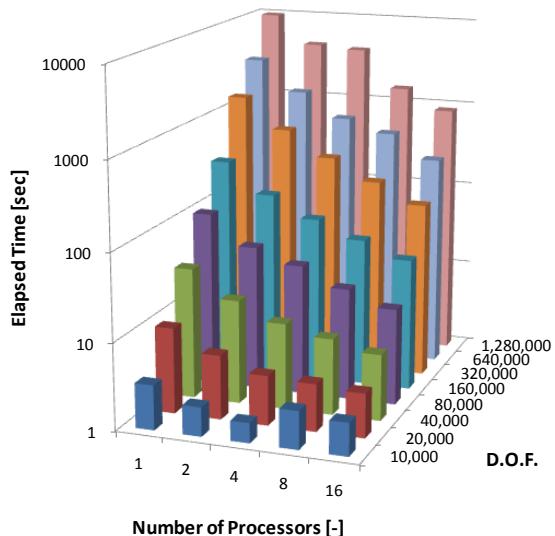


図 3.1 処理速度 (簡易モデル)

表 3.2 簡易モデルの処理速度

単位 : 秒

自由度	1	2	4	8	16
10,000	3.2	2.1	1.6	2.7	2.3
20,000	9.6	5.4	3.7	3.5	3.2
40,000	32.2	15.7	9.7	7.5	5.7
80,000	101.6	46.2	31.7	19.3	12.8
160,000	316.2	140.8	80.6	51.4	33.6
320,000	1450.8	642.7	326.0	185.3	109.2
640,000	3316.3	1456.8	754.0	541.2	284.4
1,280,000	9739.0	4507.6	4144.4	1503.4	879.1

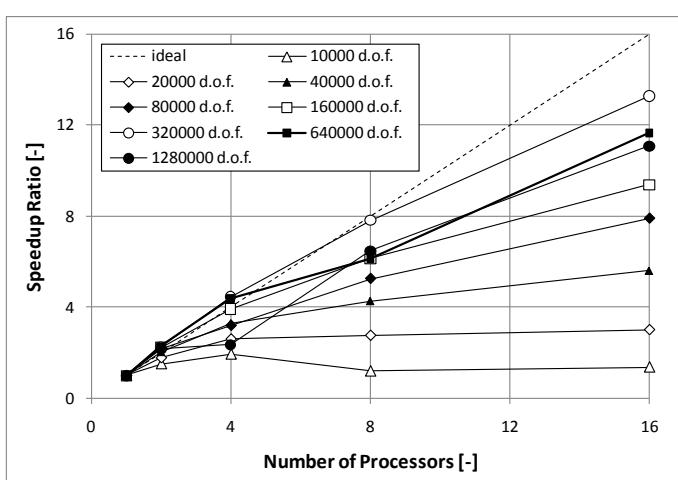


図 3.2 簡易モデルの並列化による速度向上

並列化性能については、数万自由度程度の小規模解析では、4CPUにおいて2倍程度の速度向上で飽和してしまう。すなわち、十分に並列の性能が出ない。しかし、数十万自由度の中規模解析であれば、16CPUで8倍以上の性能を得ることができた。一部のデータでは、16CPUで10倍以上の性能が計測できた。

表 3.3 並列化による速度向上比 (簡易モデル)

単位 : 秒

自由度	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
10,000	1.00	1.52	1.93	1.20	1.37
20,000	1.00	1.78	2.60	2.76	3.01
40,000	1.00	2.05	3.31	4.28	5.61
80,000	1.00	2.20	3.20	5.26	7.89
160,000	1.00	2.25	3.92	6.15	9.39
320,000	1.00	2.26	4.45	7.83	13.28
640,000	1.00	2.28	4.40	6.13	11.66
1,280,000	1.00	2.16	2.35	6.48	11.08

## 4. 実モデルによる検証

### 4.1. 解析対象

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の弾性静解析機能のベンチマークを行う。利用した問題は、図 4.1 に示す容器の弾性静解析である。境界条件は底面を固定し、内面上部に分布荷重を設定した。ここでは同モデルに対して、次のようなサイズの異なるメッシュを作成して、解析を行った。計算機環境は前節に示した環境と同じである。

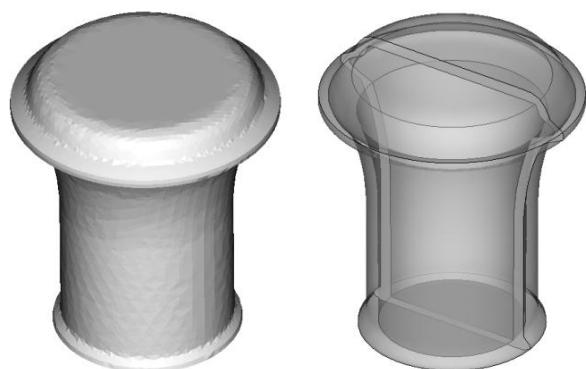


図 4.1 ベンチマークモデル  
(左 ; ソリッドモデル、右 ; 透視図)

## 4.2. 解析条件

メッシュサイズおよび計算機の並列数については、次の通りの解析条件で行った。

- 前述のモデルをもとに作成した5種類のサイズが異なるメッシュを利用する。
- 1CPUから16CPUの数のプロセッサを用いた並列計算を行う。

表 4.1 ベンチマークモデルサイズ (その 1)

名称	0050K	0100K	0200K
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 4.2 ベンチマークモデルサイズ (その 2)

名称	0400K	0800K
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

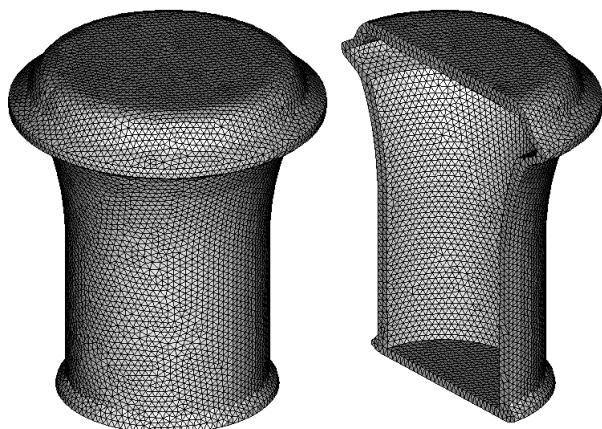


図 4.2 計算メッシュと断面図

## 4.3. 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 4.3 解析に必要な使用記憶容量 (1 プロセス)

ケース	単位 GB				
	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
0050K	1.00	0.62	0.31	0.20	0.12
0100K	2.40	1.50	0.86	0.46	0.28
0200K	5.90	3.50	1.90	1.20	0.76
0400K	—	7.00	4.25	2.70	1.35
0800K	—	—	10.37	6.30	4.00

表 4.4 解析に必要な使用記憶容量 (全プロセス)

ケース	単位 GB				
	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
0050K	1.00	1.23	1.24	1.57	1.98
0100K	2.40	3.00	3.43	3.70	4.45
0200K	5.90	7.00	7.60	9.60	12.13
0400K	—	14.00	17.00	21.60	21.60
0800K	—	—	41.48	50.37	64.00

ここでは、1プロセス当たりの使用記憶容量と全プロセスでの使用記憶容量を示す。前者については、対象とする計算機環境で実行できるかどうかを確認する場合に必須である。前者がクリアできれば、後者についてはクリアできるため、ユーザーは後者を意識することはあまりないと考えてよい。

また、1プロセス当たりの使用記憶容量と全プロセスでの使用記憶容量については、使用記憶容量の総和が一致しないため注意が必要である。すなわち、並列数が増えるとオーバラップが生じるため、並列計算では全プロセスの使用記憶容量は相対的に増加することになる。

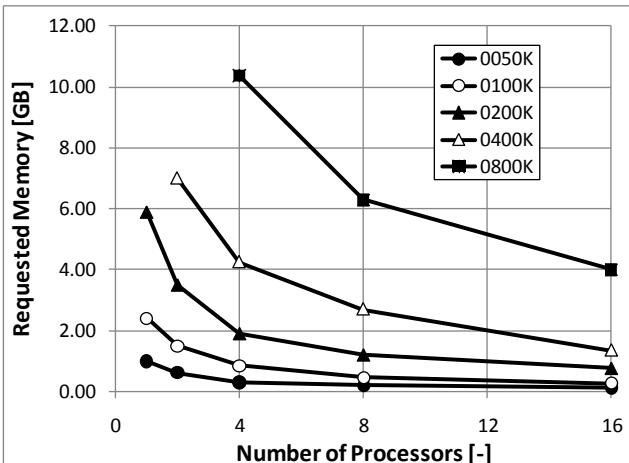


図 4.3 解析に必要な使用記憶容量 (1 プロセス)

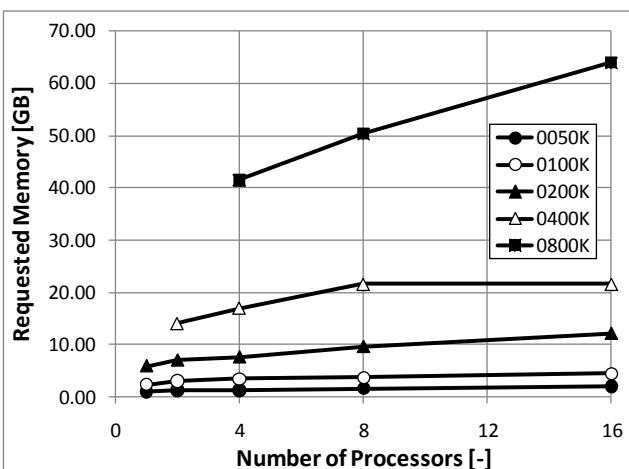


図 4.4 解析に必要な使用記憶容量 (全プロセス)

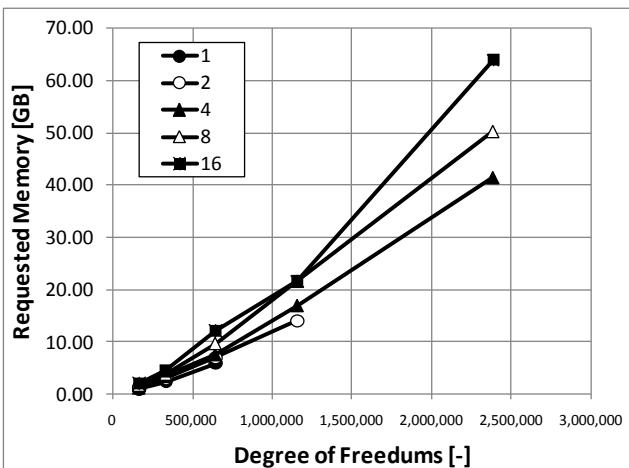


図 4.5 解析に必要な使用記憶容量

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。

#### 4.4. 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な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 4.5 実モデルの処理時間 (実モデル)

ケース	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
0050K	47.4	27.43	18.49	14.11	13.36
0100K	143.31	87.45	49.58	40.63	30.67
0200K	517.47	276.95	171.89	123	96.97
0400K	—	897.38	509.21	345.78	280
0800K	—	—	1149	1114.9	474.26

表 4.6 並列処理による速度向上比 (実モデル)

ケース	1PE	2PE	4PE	8PE	16PE
0050K	1.00	1.73	2.56	3.36	3.55
0100K	1.00	1.64	2.89	3.53	4.67
0200K	1.00	1.87	3.01	4.21	5.34
0400K	—	2.00	3.52	5.19	6.41

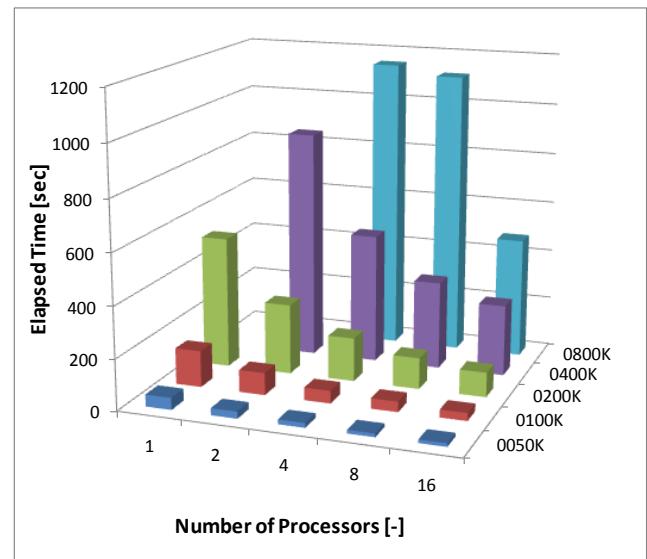


図 4.6 実モデルの処理時間

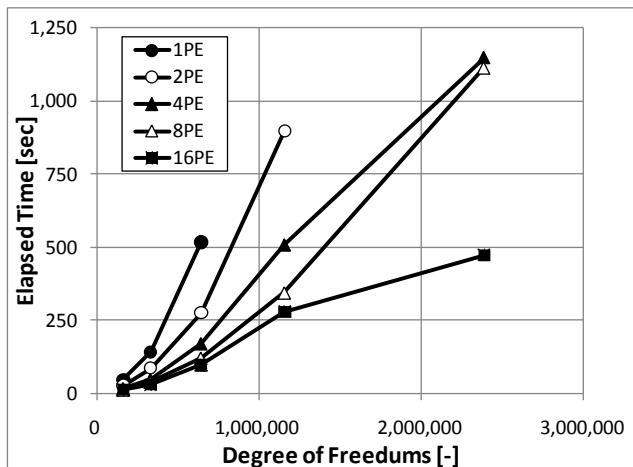


図 4.7 実モデルの処理時間

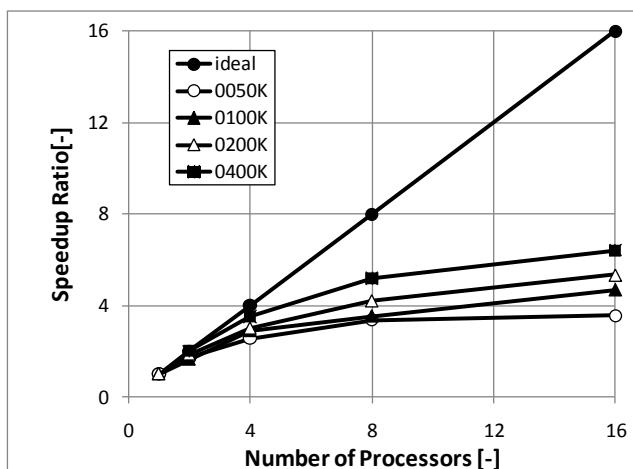


図 4.8 実モデルの速度向上比

## 5. まとめ

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR Ver. 4.0 に実装した直接法ソルバについて、並列計算時におけるその処理速度と使用記憶容量を評価した。

まず、処理速度については、数十万自由度の問題では、16CPU で 6 倍強程度の高速化が可能となった。また、最大自由度で 240 万程度のモデルの解析を行い、16CPU を利用した場合には数分で処理できることが分かった。

次に、使用記憶容量については、次の通りとなった。実行可能なモデルの大きさは、ユーザーの計算機環境において使用できる使用記憶容量に制約される。本評価では、計算機は 64GB の使用記憶容量まで利用可能な環境を利用したため、その制約条件から 240 万自由度の解析が可能となった。

また、本稿の結果により、大規模計算を実施する

ためには、使用記憶容量がボトルネックとなっていることが分かる。本稿の結果を外挿することで、1000 万自由度の問題に対しては、300GB 程度の使用記憶容量があればよいことが分かる。近年では、計算機資源の低価格化がさらに進んでおり、使用記憶容量の大きな計算機の利用に対する障壁は低くなっている。大規模な解析における直接法の利用を拡大するためにも、ハイスペックの計算機環境を利用してさらに大規模の問題を直接法で解くことを試行してみたいと考えている。

最後に、ここに示した使用記憶容量と処理時間のデータから、Advance/FrontSTR のユーザーは自分自身のモデルに対して直接法の最大規模を求めることができる。

## 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] 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)
- [3] 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, (2011.7)
- [4] 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」”, アドバンスシミュレーション, Vol. 8, (2011.7)
- [5] 徳永健一, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR 用 汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP の紹介”, アドバンスシミュレーション, Vol. 8, (2011.07)
- [6] 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, (2011.07)