

オープンソース構造解析ツール FrontISTR による 構造解析の紹介

前田 朝樹^{*1} 藤原 理樹^{*2}
Maeda Tomoki Fujiwara Riki

オープンソース構造解析ツールである FrontISTR を用いて、ベンチマーク問題として3種類の構造解析を実施したので、その事例を報告する。今回報告するのは、基本的な問題であり、すべて弾性範囲のものである。解析結果に対し、理論値と比較すると共に、代表的な商用の有限要素法解析ソフトとの比較も行った。今回報告する事例においては、FrontISTR の精度は商用ソフトに遜色のないものであることを確認した。

キーワード：オープンソース、FrontISTR、有限要素法、解析例

1. 緒言

当社計測事業部の解析技術グループが保有する構造解析用ソフトウェアは数に限りがあり、ライセンス不足による解析待ちが発生することがある。しかし、商用の構造解析用ソフトウェアは1ライセンス当たり数百万から1千万円と非常に高価格であるため、簡単にライセンスの増強を図ることができないのが現状である。

また近年、パソコンのCPUはコアを複数個持っているのが普通になっており、プログラムを並行して実行させることが可能となっている。商用ソフトにおいてもこの並列化機能に対応しているが、1つのコアに対して、ライセンスが1つ必要である。今後はさらに多くのコアを持ったCPUが市場に出てくることが予想されるが、これらのCPUを最大限に活用するにはソフトのライセンスを増強する必要がある。

このライセンス不足を解消する方策の一つとして考えられるのが、オープンソース構造解析ツールの利用である。オープンソースによるこれらのソフトウェアは原則無料であるが、商用ソフトウェアのようにサポートが無いため、インストールを自己責任で行う必要がある上に、習得も自分で行わなければならない。またどの程度の実力を持っているのか、使ってみないとわからない面もある。

そこで、当グループでは、このオープンソース構造解析ツールとして FrontISTR（フロントアイスター）を選択し、構造解析の現場でどの程度まで使えるものなのかを検証し、当グループで使用する構造解析ツールの一つになりうるかを調査している。

現在までに実施した例題で見ると、線形解析や固有値解析においては商用の解析ツールと同等の性能を持つことが判明した。

*1：計測事業部 計測技術部 解析技術グループ 次長
*2：計測事業部 計測技術部 解析技術グループ

2. FrontISTR について

2.1 オープンソース構造解析ツールとは

そもそもオープンソースとは、ソースコードを無償で公開し、誰でもそのソフトウェアの改良、再配布が行えるようにすること、またはそのようなソフトウェアを指す。

このオープンソースを基本とした構造解析ツールがオープンソース構造解析ツールと呼ばれるものであり、代表的なものとして表 1 に掲げるものがある。

当グループでは、表 1 に掲げたオープンソース構造解析ツールの中から、以下の理由によって FrontISTR を選択し、その機能と性能を調査している。

- ・ オープン CAE 学会でセミナーが開かれている点や有識者により実際に計算が行われている点で、信頼性が高いと考えられる。
- ・ 大規模モデルに対応でき、接触問題対応やアセンブリ機能など、検討対象によっては必要となる機能を実装している。
- ・ 国内で開発されているため情報を得やすく、マニュアルも整備されている。
- ・ Windows で使用が可能である。
- ・ 当グループで使用しているプリ・ポストプロセッサである FEMAP による処理が可能である。

2.2 FrontISTR

FrontISTR は、Windows や Linux の PC クラスタはもとより、「京」などの超並列スーパーコンピュー

タにも対応可能な、有限要素法によるオープンソースの大規模構造解析プログラムである。

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」プロジェクトで開発され、2013 年 3 月に FrontISTR Ver.4.2 が公開された。

研究開発プロジェクト終了後は、FrontISTR 研究会を中心に、引き続き FrontISTR システム(プリ・ポスト REVOCAP_PrePost を含む)の利用促進、産業応用、ソフトウェア資産や解析データの維持管理、機能改良、等が進められている⁽¹⁾。

FrontISTR のもつ解析機能は、以下のとおりである。

- ・ 線形静解析、非線形静解析、大変形解析
- ・ 材料非線形解析(弾塑性、超弾性、粘弾性、クリープ、ユーザ定義材料)
- ・ 接触解析(ラグランジュ法、拡張ラグランジュ法)
- ・ 陰的時間積分法による過渡解析(衝突解析)
- ・ 動的陽解法(非接触のみ)

また使用できる要素を以下に示す。

- ・ 二次要素: 三角形要素(1次、2次)、四角形要素(1次、2次)
- ・ 三次要素: 四面体要素(1次、2次)、五面体要素(1次、2次)、六面体要素(1次、2次)、三角形シェル要素(1次)、四角形シェル要素(1次)

上に挙げた要素以外に伝熱用として 1 次元要素(棒要素)が用意されているが、応力解析用の 1 次元要素(梁要素)は用意されていない。

表 1 オープンソース構造解析ツールの代表的なもの

ツール名	内容	ライセンス
FrontISTR	大規模構造解析ツール	独自
Calculix	ABAQUS 的非線形構造解析	GPL ^(*)
CodeAster	非線形構造解析	GPL
Impact	陽解法非線形解析	GPL
WARP3D	き裂解析	GPL
Elmer	連成解析ソフト	GPL

(*) GPL (GNU General Public License): ソフトウェアの利用許諾条件などを定めたライセンスの一つ。

3. FrontISTR による解析例

3.1 紹介する例題

FrontISTR を用いた構造解析の例として、以下の3つを紹介する。これらはすべて理論解が知られているものであり、FrontISTR の精度検証の目的で実施したものである。

- (1) Prob-1 有孔平板の応力解析
- (2) Prob-2 平板の曲げ応力解析
- (3) Prob-3 片持ち梁の固有値解析

Prob-1 は円孔をもつ有限幅の板に対して面内引張荷重を載荷した際に、孔周りに生じる応力集中を求めるものであり、有限要素法の例題としてよく使われるものである。

Prob-2 は、面外荷重を受ける矩形平板のたわみと応力を求めるものである。

Prob-3 は、単純な断面形状の片持ち梁の固有周期を求めるものである。

なお、これらの例題では使用したモデルの材料は構造用鋼材を想定し、物性値として以下の値を使用した。

- ・ ヤング率 : 205 [GPa]
- ・ ポアソン比 : 0.3

また、商用ソフトとの比較も合わせて行った。使用した商用ソフトは

- ・ MSC/Nastran v2012 MSC 社
- ・ ABAQUS v6.6.5 ダッソー社

なお、メッシュ分割などのプリ処理と結果整理のポスト処理は、当グループが所有する FEMAP を用いている。

3.2 例題 Prob-1

3.2.1 解析モデル

図1に示すように、中央に円孔を有する有限幅帯板を解析対象とした。この有孔平板を図に示すように引張った場合に、円孔周りには応力集中

が生じることが知られている。解析モデルは、形状の対称性を考慮し、1/4モデルとした。また要素分割の粗密による影響を見るため、解析モデルは、粗いメッシュ分割のもとと密なメッシュ分割のものを作成した。解析に用いたモデルを図2に示す。

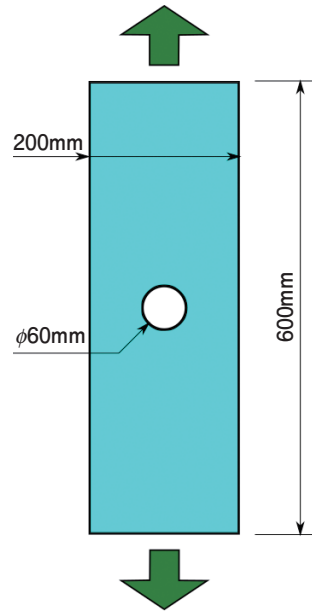


図1 解析の対象である $\phi 60\text{mm}$ の有孔平板

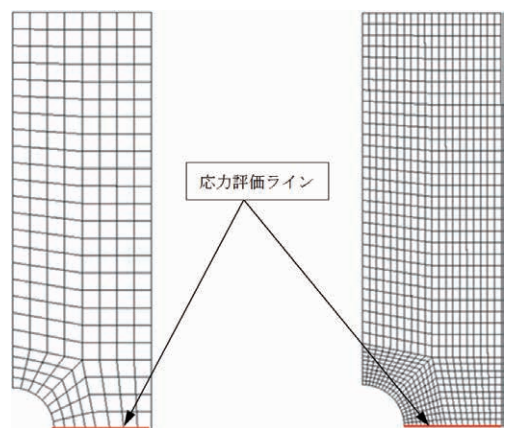


図2 作成した解析モデル
(左：粗メッシュモデル、右：密メッシュモデル)

3.2.2 解析結果

理論解を元に、有孔平板の応力集中箇所における最大応力を節点応力について評価した。その結果を表 2 に示す。また、FrontISTR および ABAQUS での計算結果の引張方向の応力分布図を図 3 に示

す。加えて、図 2 に示す評価位置における引張方向の直応力の比較を図 4 に示す。

FrontISTR での計算結果における応力分布は、Nastran および ABAQUS での計算結果とほぼ一致する結果となった。

表 2 有孔平板に生じる最大応力一覧

モデル名称	理論値[MPa]	最大応力[MPa]			理論値に対する割合[%]		
		FrontISTR	Nastran	ABAQUS	FrontISTR	Nastran	ABAQUS
粗メッシュモデル	335.7	324.0	325.2	324.9	96.5	96.9	96.8
密メッシュモデル		337.4	337.8	337.7	100.5	100.6	100.6

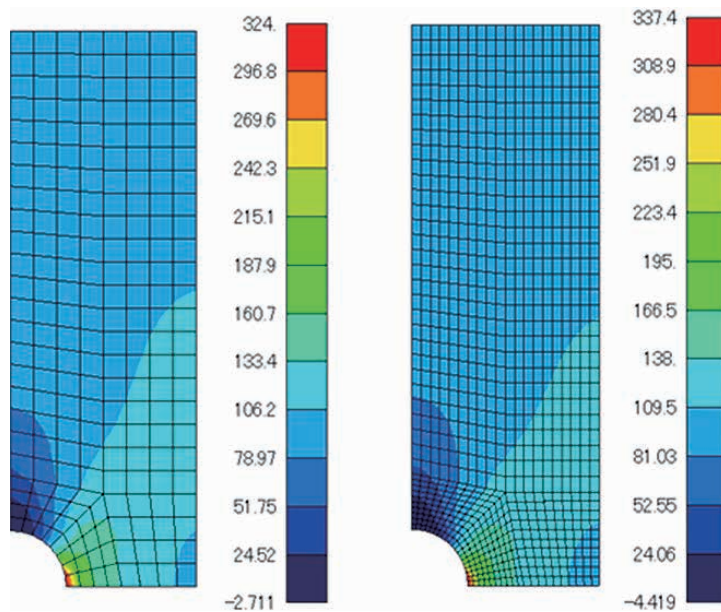


図 3 FrontISTR による引張方向応力図分布図

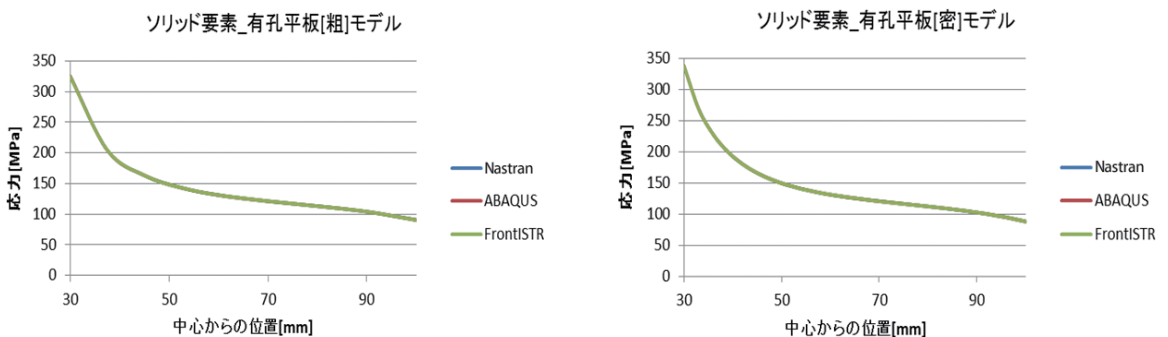


図 4 応力評ラインにおける引張方向の応力分布グラフ
(左：粗メッシュモデル、右：密メッシュモデル)

FrontISTR による解析結果は、密なメッシュモデルにおける誤差が 0.5% であり、十分な精度があると考えられる。また、粗いメッシュモデルにおいては、3.5% ほどの誤差があるが、他 2 つの解析ソフトも同様の結果を示しており、同程度の精度があると判断できる⁽²⁾。

3.3 例題 Prob-2

3.3.1 解析モデル

図 5 に示す寸法の周囲を固定された矩形平板に対し、 $P=1.0\text{MPa}$ の面外荷重を載荷した場合の変位量、ならびに発生応力を求めた。解析モデルは、面内方向および板厚方向の粗密の異なる解析モデルを 4 種類作成し、計 8 種類のモデルについて計算結果の比較を行った。解析モデルの例として、寸法が $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ の正方形板で板厚方向の分割を 2 層とした場合のものを図 6 に示す。

3.3.2 解析結果

理論解を元に、長方形平板の最大たわみと、最大曲げ応力の節点応力について評価した。その結果を表 3、表 4 に示す⁽³⁾。また、 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 、板厚方向 2 層における変形図、ならびに Y 軸方向応力分布図を図 7 に示す。

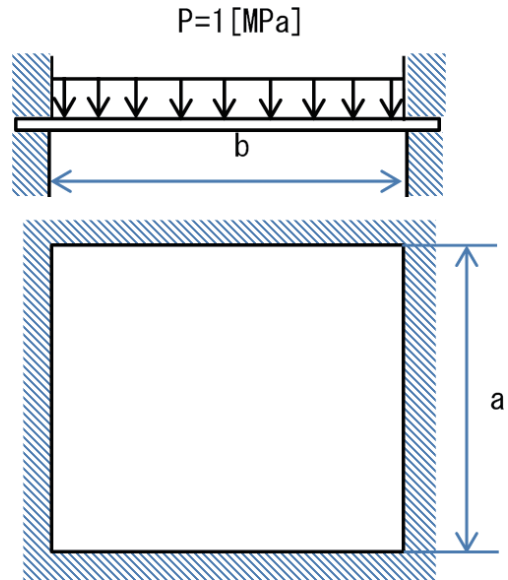


図 5 矩形平板解析対象
($a=1000\text{mm}$ 、 $b=1000\text{mm}$ と 2000mm)

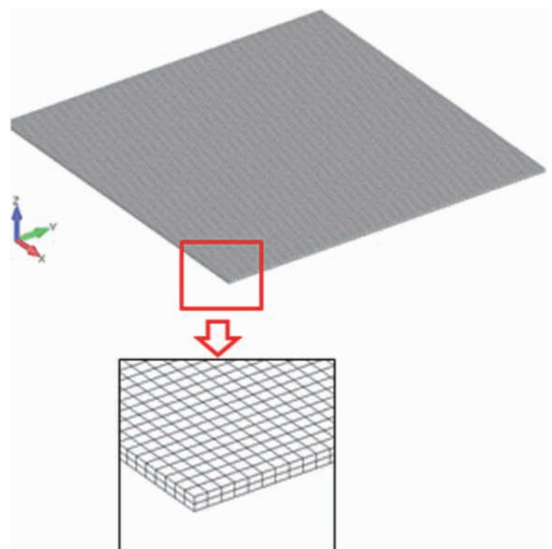
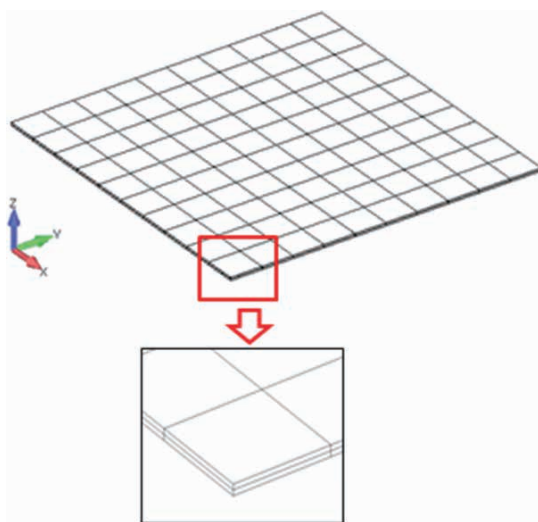


図 6 作成した解析モデルの例 (左：粗メッシュモデル、右：密メッシュモデル)

表3 解析で得られた最大たわみの一覧

モデル名称	理論値[mm]	最大たわみ[mm]			理論値に対する割合[%]		
		FrontISTR	Nastran	ABAQUS	FrontISTR	Nastran	ABAQUS
固定1x1m(2層) 粗メッシュ	67.1	51.6	65.4	51.6	76.8	97.5	76.9
固定1x1m(2層) 密メッシュ		67.3	67.3	67.3	100.3	100.3	100.3
固定1x1m(4層) 粗メッシュ		51.3	65.0	51.4	76.5	96.9	76.5
固定1x1m(4層) 密メッシュ		67.3	67.3	67.3	100.3	100.3	100.3
固定1x2m(2層) 粗メッシュ	135.3	99.5	129.2	99.7	73.6	95.5	73.7
固定1x2m(2層) 密メッシュ		134.6	134.6	134.6	99.5	99.5	99.5
固定1x2m(4層) 粗メッシュ		99.1	128.3	99.1	73.2	94.9	73.2
固定1x2m(4層) 密メッシュ		134.6	134.6	134.6	99.4	99.4	99.4

表4 解析で得られた最大曲げ応力の一覧

モデル名称	理論値[MPa]	最大曲げ応力[MPa]			理論値に対する割合[%]		
		FrontISTR	Nastran	ABAQUS	FrontISTR	Nastran	ABAQUS
固定1x1m(2層) 粗メッシュ	3078	1626.4	2011.0	1584.4	52.8	65.3	51.5
固定1x1m(2層) 密メッシュ		2902.2	2901.8	2901.4	94.3	94.3	94.3
固定1x1m(4層) 粗メッシュ		1641.5	2034.5	1615.8	53.3	66.1	52.5
固定1x1m(4層) 密メッシュ		2949.0	2948.7	2948.5	95.8	95.8	95.8
固定1x2m(2層) 粗メッシュ	4974	2825.6	3569.5	2795.4	56.8	71.8	56.2
固定1x2m(2層) 密メッシュ		4737.0	4737.0	4736.8	95.2	95.2	95.2
固定1x2m(4層) 粗メッシュ		2857.9	3603.4	2836.4	57.5	72.4	57.0
固定1x2m(4層) 密メッシュ		4807.0	4807.0	4806.8	96.6	96.6	96.6

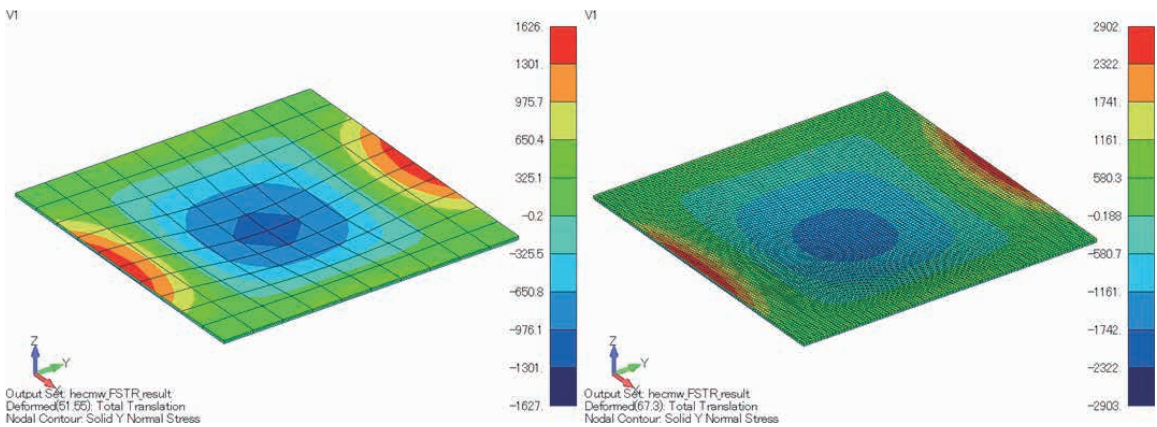


図7 解析結果の例（変形図ならびに y 軸方向応力分布図）

FrontISTR での解析結果を見ると、粗いモデルでは最大たわみ、最大曲げ応力とも数十%の誤差がある。これは、ABAQUS の解析結果と同程度である。厚さ方向の要素の大きさが面内方向に比べてかなり小さいため、要素のアスペクト比が悪い。それが原因となり、せん断ロックと呼ばれる現象が発生し、変形が小さくなったためと考えられる。密なモデルにおける誤差は、最大たわみは 1% 以下、最大曲げ応力は 5% 程度に収まっており、十分な精度があるといえる。

2 層および 4 層でのモデル化における結果には大差は見られなかった。

以上の結果より、FrontISTR は Nastran には及ばないものの、ABAQUS と同程度の解析精度を持っていると判断できる。また、薄板構造のようなものに対しては、要素のアスペクト比が悪くなるため、解析精度を上げるためには、面内で密なメッシュを使用すべきと考えられる。

3.4 例題 Prob-3

3.4.1 解析モデル

図 8 に示す寸法の片持ち梁に対して固有値解析を実施した。粗密の異なる 2 種類の解析モデルを作成し、解析結果の比較を行った。解析に用いたモデルを図 9 に示す。

3.4.2 解析結果

片持ち梁の固有振動数は、せん断変形を考慮し

ない場合の 1 次から 2 次までは以下となる⁽⁴⁾。

$$N_1 = 53.15 \text{ Hz (弱軸周り)}$$

$$N_1 = 118.34 \text{ Hz (強軸周り)}$$

$$N_2 = 333.13 \text{ Hz (弱軸周り)}$$

$$N_2 = 741.67 \text{ Hz (強軸周り)}$$

梁の高さ（この場合 100mm）が梁の長さの 1/10 以下である場合には、せん断変形を考慮しなくても精度の良い結果が得られるとされている。

解析では固有次数を弱軸周り、強軸周りのそれぞれで 2 次までを抽出した。その結果を表 5 に示す。また、モード変形図を図 10 に示す。

理論値との比較においては、FrontISTR はじめ他の 2 つのソフトもほぼ同じ結果となり、強軸周り 2 次の場合を除いて理論ともよく合う。先に述べたように理論値は、せん断変形を考慮していないため、高次になるとその差が大きくなること

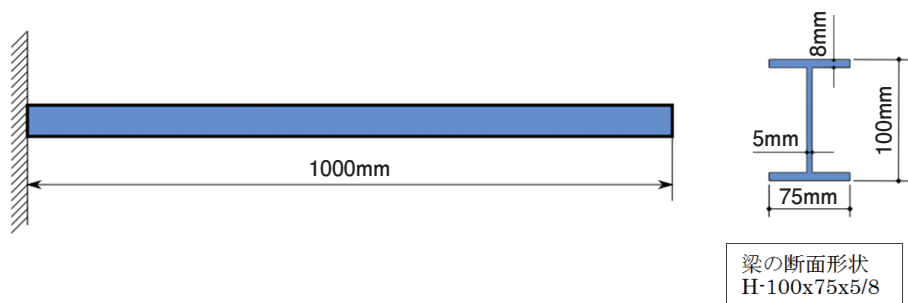


図 8 解析の対象である長さ 1000mm の片持ち梁

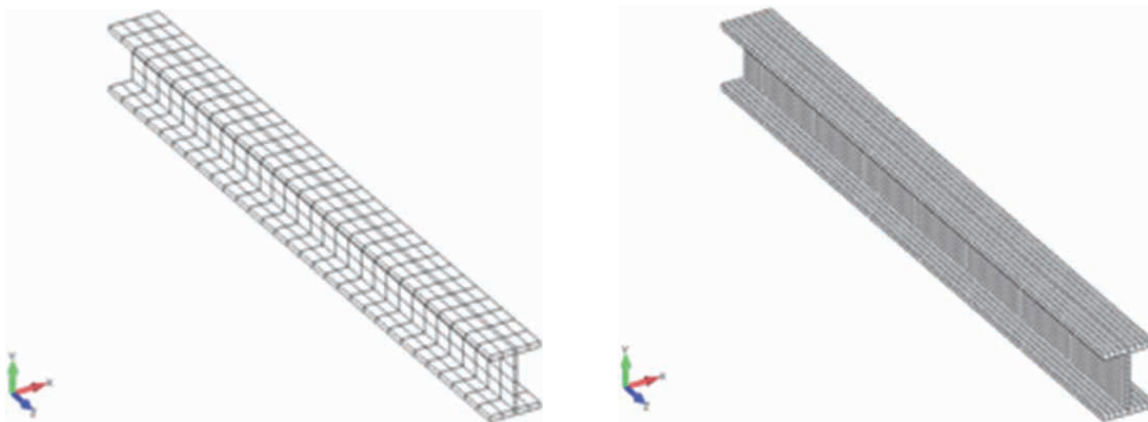


図 9 作成した解析モデル（左：粗メッシュモデル、右：密メッシュモデル）

表 5 固有値解析の結果

		理論値[Hz]	固有振動数[Hz]			理論値に対する割合[%]		
			FrontISTR	Nastran	ABAQUS	FrontISTR	Nastran	ABAQUS
粗メッシュ	弱軸周り 1次	53.15	53.19	53.19	53.19	100.07	100.07	100.07
	弱軸周り 2次	333.13	324.77	324.74	324.75	97.5	97.5	97.5
	強軸周り 1次	118.34	114.45	114.45	114.45	96.7	96.7	96.7
	強軸周り 2次	741.67	594.88	594.83	594.87	80.2	80.2	80.2
密メッシュ	弱軸周り 1次	53.10	53.03	53.03	53.03	99.8	99.8	99.8
	弱軸周り 2次	333.10	323.50	323.50	323.50	97.1	97.1	97.1
	強軸周り 1次	118.30	114.14	114.14	114.14	96.5	96.5	96.5
	強軸周り 2次	741.70	593.51	593.51	593.51	80.0	80.0	80.0

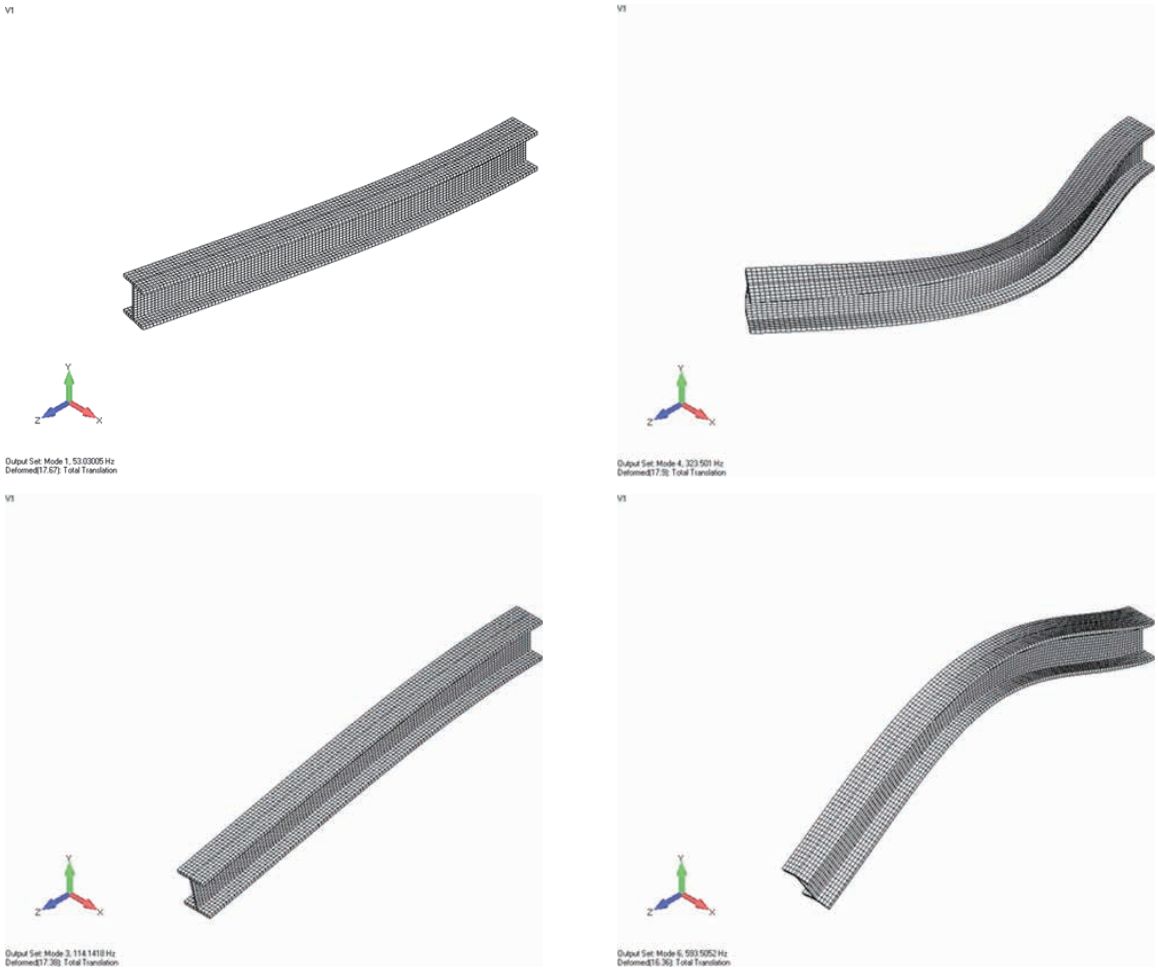


図 10 固有値解析の結果
 (上：弱軸周りの1次と2次モード、下：強軸周りの1次と2次モード)

わかっている。さらに、理論値は梁の断面形状が変形しないことを前提にして導出されているが、実際には高次モードになるほど断面形状が変形す

ることになる。これらのことにより、2次モード以降の固有振動数は理論値との乖離が大きくなる。

4. 結言

今回紹介したような単純な形状に対しては、FrontISTR は商用のソフトと比較しても遜色ない精度をもっていることがわかった。今回紹介した例はすべてソリッド要素によるものであるが、シェル要素についても同様の解析を実施しており、粗メッシュの場合は精度にやや難があるものの、密なメッシュを用いれば十分な精度を持っていることを確認している。

また FrontISTR は高度な並列化を売りにしており、「京」のようなスーパーコンピュータを用いれば、大規模問題（数千万要素）まで対応できると言われている。現在のパソコンは廉価なものでも複数のコアを持っており、パソコン上においても並列処理させることが可能である。

当グループにおいては、FrontISTR を用いて 30 万要素規模の問題に対して試解析を実施しているが、それ以上の規模の問題については実施していない。今後、並列化機能を用いて 100 ～ 200 万要素規模の問題に対して試解析を実施していく予定である。

謝辞

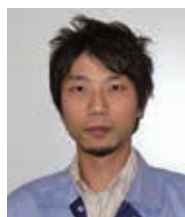
当グループに在籍された沢本（旧姓米沢）奈美様の多大なご協力のおかげで、本稿を完成させることができました。ここに心より感謝をいたします。

参考文献

- (1) http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/files/FrontISTR_leaflet.pdf
- (2) 西田正孝：応力集中 増補版、森北出版株式会社、2001 年、pp.258-264
- (3) Timoshenko, Woinowsky-Krieger：Plates and Shells Second Edition, McGRAW-HILL, 1959, pp.197-202
- (4) 関西造船協会編：造船設計便覧 改訂版、海文堂、1968 年、pp.118-119



計測事業部
計測技術部
解析技術グループ 次長
前田 朝樹
TEL. 045-759-2127
FAX. 045-759-2534



計測事業部
計測技術部
解析技術グループ
藤原 理樹
TEL. 045-759-2127
FAX. 045-759-2534