

## 音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoiseによる大規模解析 —続報—

松原 聖\*

## Large-Scale Acoustic Simulation of Advacne/FrontNoise

Kiyoshi Matsubara\*

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、当初、流体解析ソフトウェアや構造解析ソフトウェアとの連成を行うために開発が開始され、主として内部問題に適用してきた。その後、そのソフトウェアをベースに、大規模計算向けのソルバーとして発展させてきた。このたび、億のオーダーのモデルを取り扱うことを目標として改良を行った。

本稿では、収束性を改善するためにソルバーを整備し、合わせて、いくつかの性能について計測したことを報告する。これまでも大規模な解析の報告を行ってきた[1]。今回、改良したソルバーとそれを利用して、さらに大規模な解析が可能となったので、その内容について報告する。本稿で報告するモデルの最大規模は、4 億 2000 万要素、7000 万節点、1 億 4000 万自由度である。このモデルを、48 並列の計算機で、1 周波数当たり処理時間 8 時間で解析可能となった。

Key word: 音響解析、並列計算機、並列化、大規模計算

## 1. はじめに

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シミュレーションのニーズが高まっている。

また、計算機の性能向上および価格の低下により、大規模な計算により精度の高い解析が可能となってきた。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を実現するためのソフトウェアの開発に取り組んできた。

この方針のもと、当社では、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を独自に開発し、これまで、機械による環境騒音低減[2][3]や騒音低下のための機器設計[4]の一環として、音響シミュレーションに関するサービスを提供してきた。また、音響シミュレーションについては、構造解析における固有値の観点から別のアプローチも行ってきた[5]。

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise Ver. 1.0 は、2005 年に境界要素法 BEM による定式化を利用して開発されてきた。また、そこでは、大規模を目指して並列処理のプログラムとして開発した。ところが、当時のハードウェアでは、並列計算を行っても BEM の処理時間の面で表面節点 1 万点程度ほぼ限界となった、また、BEM の場合には処理時間は節点数の 3 乗に比例するため、解析規模の面で将来的な発展を見込むことができなくなった。そこで我々は有限要素法 FEM の定式化で開発を行い、FEM と BEM を精度と処理時間の比較等を行った。

表 1 境界要素法と有限要素法の比較

| 比較項目     | 有限要素法 | 境界要素法 |
|----------|-------|-------|
| 処理速度     | ○     | △     |
| 使用記憶容量   | ○     | △     |
| 放射問題対応   | △     | ◎     |
| 非均一媒体    | ○     | ×     |
| 定式化      | 容易    | 困難    |
| 境界条件モデル化 | 容易    | 困難    |

\*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

その結果、ほぼ精度は同等で、処理時間が圧倒的に早い有限要素法を Ver. 2.0 から採用することとした。さらに有限要素法では、(当社の他の分野のソルバーでも利用している)疎行列の反復解法が利用できるため、高速化・大規模化にも有利であると考えた。また、有限要素法についても、Ver. 3.0 からは並列計算機能を実装し、大規模問題に取り組んできた。今回リリースする Ver. 4.1 においては、ソルバーについて改良し、より大規模な計算を行うための機能を用意した。

本稿では、2 節において整備したソルバーの内容について示し、3 節で 1 つの事例において収束性を確認した事例を示す。4 節では実施した大規模計算の結果を示す。

## 2. 線型ソルバーの整備

### 2.1.1. 線型ソルバーの選択肢

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では、複素係数の大規模な連立一次方程式を解く必要がある。本ソフトウェアの開発段階では、いくつかの反復解法および前処理の適用を試みた。現在は、そのうちで最も有望である手法をデフォルトとして設定し、いくつかの手法の組み合わせを環境変数の設定で利用可能としている。その手法を決定した経緯は次の通りである。

Ver. 2.0 までは、シングル CPU の計算で実績のある手法を選択肢として、反復解法は BiCGSTAB、前処理は SOR を採用した。Ver. 3.0 では、領域分割による並列手法を導入し、比較的大規模な内部問題の並列計算に有効な手法として、反復解法は GMRES を用い、前処理は SOR を利用する方法を採用した(その性能の比較については、[1]に示した)。この手法は、その後、比較的安定に利用することができた。

この手法で、Ver. 4.0 まで利用したが、Ver. 4.1 では、次のように改善した。その後のテストで、収束が難しい問題および並列度が上がった場合の収束性に対応するため、最も頑強なアルゴリズムとして、反復解法は GMRES を用い、前処理は Schwarz を利用することをデフォルトとしてい

る。

表 2 利用可能なソルバーオプションの指定

| 手法     | Schwarz | SOR | Jacob1 | Jacob2 | ILU |
|--------|---------|-----|--------|--------|-----|
| GMRES0 | ○       | ○   | ○      | ○      | ○   |
| GMRES1 | ○       | ○   | ○      | ○      | ○   |
| GMRES2 | ◎       | ○   | ○      | ○      | ○   |
| BiCG1  | ○       | ○   | ○      | ○      | ○   |
| BiCG2  | ○       | ○   | ○      | ○      | ○   |
| CR     | ○       | ○   | ○      | ○      | ○   |
| TFQMR  | ○       | ○   | ○      | ○      | ○   |

※ ◎はデフォルト、○が利用可能

## 2.2. メッシュの品質と精度・収束性

### 2.2.1. 問題設定

メッシュの品質と収束性および精度に関する基本データを得るために、次のような解析対象に対して、テストを行った。ここで実施する解析のパラメータは、メッシュの品質である。

ここでは、3 種類のメッシュの品質 (3 ケース) につきテストを実施した。テストデータでは、球の一部に非常に歪んだメッシュを設定し、そのメッシュでどの程度の結果に差異が出てくるかを比較した。

そのように設定したメッシュを利用して、メッシュの縦横比では、1.00、0.10、0.01 のメッシュを利用した。メッシュサイズは、同程度としたため、その収束性と精度を比較することが可能である。解析ケースの一覧を示す。

表 3 解析ケース一覧

| case | D<br>[m] | R<br>[m] | L<br>[m] | $\Delta x$<br>[m] | 縦横<br>比[-] |
|------|----------|----------|----------|-------------------|------------|
| 1A   | 0.5      | 1.5      | 0.5      | 0.1               | 1.0        |
| 1B   | 0.05     | 1.5      | 0.5      | 0.1               | 0.1        |
| 1C   | 0.005    | 1.5      | 0.5      | 0.1               | 0.01       |

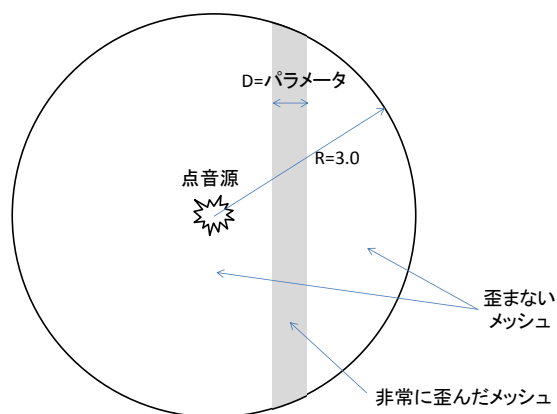


図 1 問題設定

表 4 解析ケース一覧

| case | 要素数     | 節点数    | 備考           |
|------|---------|--------|--------------|
| 1A   | 96,097  | 17,550 | 通常のメッシュに近い   |
| 1B   | 109,890 | 20,114 | かなり厳しいメッシュ   |
| 1C   | 112,105 | 20,511 | 普通は利用しないメッシュ |

## 2.2.2. 解析結果

3つのケースの音圧レベルの解析結果を示す。ケース 1A を正解として、ケース 1B とケース 1C がどの程度の結果に差異があるかを評価する。その結果、それぞれのケースにおける音圧レベルの差異は、0.1dB 程度であり、定性的には問題ないことが分かる。

従って、メッシュの品質は、解析結果に大きな影響は及ぼさないことが分かった。

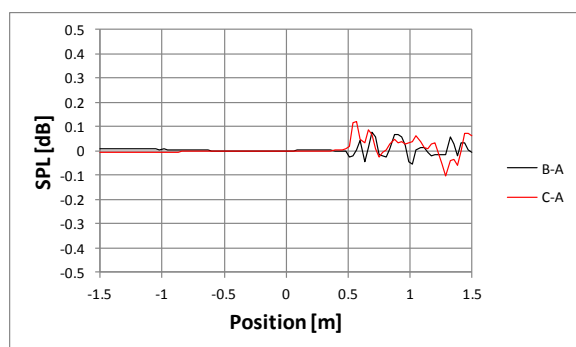


図 2 ケース 1B、1C と 1A との結果の差異

## 2.2.3. 収束性の比較

ここでは、メッシュの品質と並列度をパラメータとして、収束性の比較を行った。解法については、今回整備した各種の解法を利用し、並列度を 1、2、4、12 コアで比較した。比較したのは反復回数である。処理時間は反復数に依存するため、反復回数のみを比較すれば目的は達成できることになる。

この結果を表に示す。これらの結果から、メッシュの品質は解析結果には大きく影響しないが、ソルバーの反復回数には大きく影響があることが分かる。

表 5 各手法の収束までの反復回数

| 解法                | case | 1コア  | 2コア  | 4コア  | 12コア |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| GMRES1<br>Schwarz | 1A   | 158  | 167  | 167  | 183  |
|                   | 1B   | 296  | 340  | 348  | 451  |
|                   | 1C   | 918  | 1370 | 1194 | 2363 |
| GMRES1<br>Jacobi2 | 1A   | 168  | 347  | 384  | 451  |
|                   | 1B   | 296  | 652  | 755  | 1085 |
|                   | 1C   | 918  | 4512 | 4687 | ×    |
| GMRES1<br>ILU     | 1A   | 224  | 396  | 417  | 486  |
|                   | 1B   | 459  | 832  | 903  | 1172 |
|                   | 1C   | 2046 | 5927 | 4529 | 6563 |
| GMRES1<br>SOR     | 1A   | 213  | 378  | 403  | 475  |
|                   | 1B   | 459  | 844  | 909  | 1177 |
|                   | 1C   | 2269 | ×    | ×    | ×    |
| GMRES2<br>Schwarz | 1A   | 175  | 188  | 192  | 214  |
|                   | 1B   | 324  | 370  | 376  | 508  |
|                   | 1C   | 920  | 1395 | 1264 | 2275 |
| GMRES2<br>Jacobi2 | 1A   | 175  | 379  | 418  | 500  |
|                   | 1B   | 324  | 707  | 868  | 1160 |
|                   | 1C   | 920  | 2894 | 3086 | 5692 |
| GMRES2<br>ILU     | 1A   | 232  | 405  | 423  | 503  |
|                   | 1B   | 476  | 894  | 974  | 1223 |
|                   | 1C   | 2385 | ×    | ×    | ×    |
| GMRES2<br>SOR     | 1A   | 234  | 406  | 438  | 527  |
|                   | 1B   | 495  | 894  | 977  | 1233 |
|                   | 1C   | 2369 | 3901 | 4727 | 6264 |

表 6 各手法の収束までの反復回数の比

| 解法                | case | 1コア   | 2コア   | 4コア   | 12コア  |
|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| GMRES1<br>Schwarz | 1A   | 1.00  | 1.06  | 1.06  | 1.16  |
|                   | 1B   | 1.87  | 2.15  | 2.20  | 2.85  |
|                   | 1C   | 5.81  | 8.67  | 7.56  | 14.96 |
| GMRES1<br>Jacobi2 | 1A   | 1.00  | 2.07  | 2.29  | 2.68  |
|                   | 1B   | 1.76  | 3.88  | 4.49  | 6.46  |
|                   | 1C   | 5.46  | 26.86 | 27.90 | ×     |
| GMRES1<br>ILU     | 1A   | 1.00  | 1.77  | 1.86  | 2.17  |
|                   | 1B   | 2.05  | 3.71  | 4.03  | 5.23  |
|                   | 1C   | 9.13  | 26.46 | 20.22 | 29.30 |
| GMRES1<br>SOR     | 1A   | 1.00  | 1.77  | 1.89  | 2.23  |
|                   | 1B   | 2.15  | 3.96  | 4.27  | 5.53  |
|                   | 1C   | 10.65 | ×     | ×     | ×     |
| GMRES2<br>Schwarz | 1A   | 1.00  | 1.07  | 1.10  | 1.22  |
|                   | 1B   | 1.85  | 2.11  | 2.15  | 2.90  |
|                   | 1C   | 5.26  | 7.97  | 7.22  | 13.00 |
| GMRES2<br>Jacobi2 | 1A   | 1.00  | 2.17  | 2.39  | 2.86  |
|                   | 1B   | 1.85  | 4.04  | 4.96  | 6.63  |
|                   | 1C   | 5.26  | 16.54 | 17.63 | 32.53 |
| GMRES2<br>ILU     | 1A   | 1.00  | 1.75  | 1.82  | 2.17  |
|                   | 1B   | 2.05  | 3.85  | 4.20  | 5.27  |
|                   | 1C   | 10.28 | ×     | ×     | ×     |
| GMRES2<br>SOR     | 1A   | 1.00  | 1.74  | 1.87  | 2.25  |
|                   | 1B   | 2.12  | 3.82  | 4.18  | 5.27  |
|                   | 1C   | 10.12 | 16.67 | 20.20 | 26.77 |

### 2.3. まとめ

メッシュの品質は解析結果には、0.1dB 程度の影響しかない。ただし、メッシュの品質は収束性に影響してくるため、処理時間が非常に大きくなる場合には、メッシュの品質を改善しなければならないケースもあると考えられる。

また、利用したソルバーの中では、メッシュの品質および並列度のいずれに対しても、前処理については、Schwarz が頑強であることが分かる。

## 3. 内部外部問題と収束性

### 3.1. 問題設定

建屋の中の騒音源が敷地境界への影響評価を目的とした計算を想定して、音響シミュレーションを実施した。建屋の大きさは、1辺の長さ 20m、高さ 10m のサイズであり、4側面に、解放した窓、または、解放した扉が設置されている。また、建屋の回りに、1辺の長さ 30m の高さ 5m の壁を設置する予定である。敷地は 60m 四方であり、その敷地境界の音圧レベルを評価する。解析範囲は、60m 四方および高さ 30m の領域とする。

音源は、建屋内部の中心に設置した 1辺 1.5m で高さ 1.5m の四角錐の頂点に対して、点音源で与える。ここでは、周波数は 50Hz のみを対象とする。四面体メッシュサイズは、50Hz に合わせて、 $\Delta x=0.6[m]$ を標準とした。解析範囲の外側には、 $\rho c$ 境界を設定した。床と地面および壁は、剛（完全反射）としている。

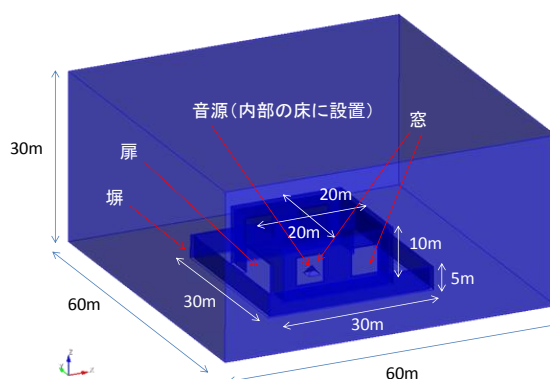


図 3 解析対象

表 7 ケース条件一覧

| ケース名   | 塀   | 塀吸音材 | 窓扉面積比 | 内壁吸音材 |
|--------|-----|------|-------|-------|
| ケース 2A | NO  | NO   | 1.00  | NO    |
| ケース 2B | YES | NO   | 1.00  | NO    |
| ケース 2C | YES | NO   | 1.00  | YES   |
| ケース 2D | YES | YES  | 1.00  | NO    |
| ケース 2E | YES | NO   | 0.25  | NO    |

表 8 解析結果 (その 1)

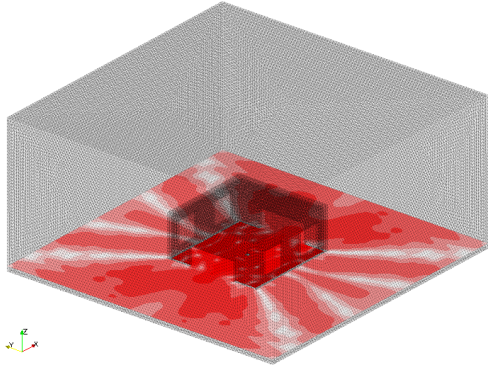
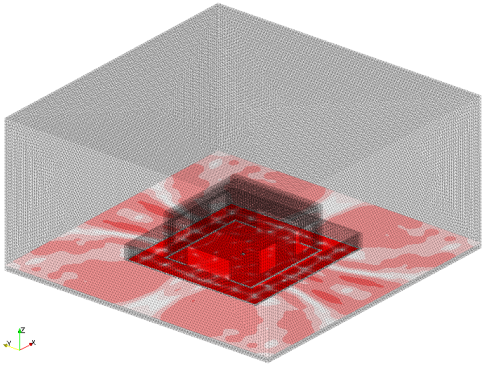
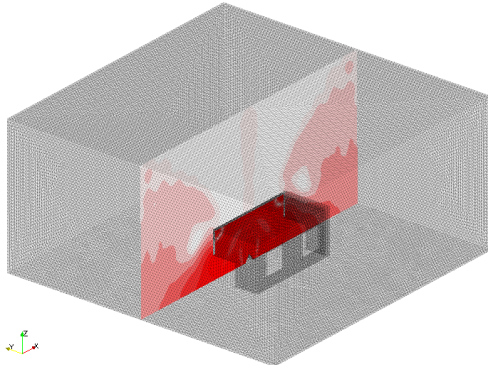
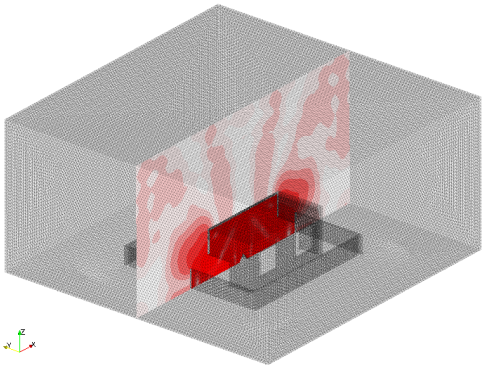
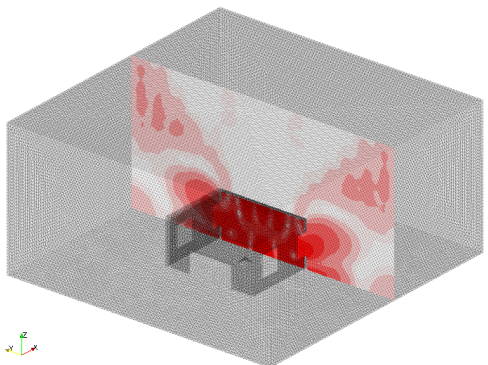
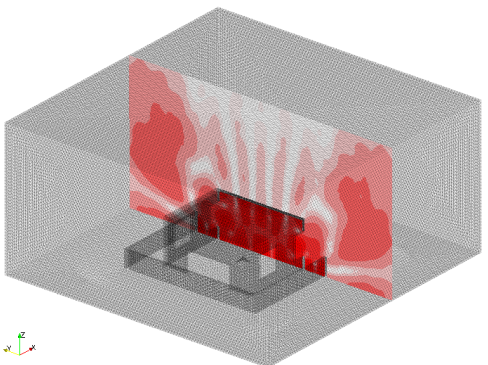
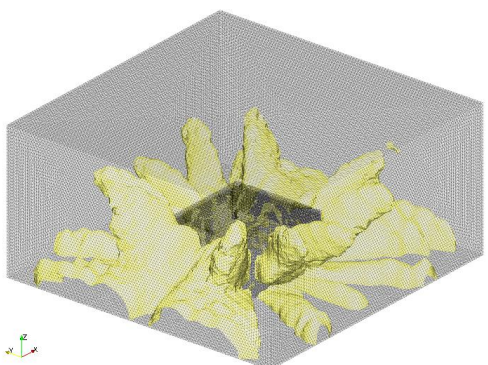
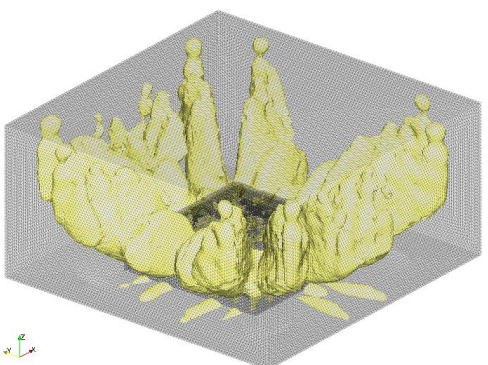
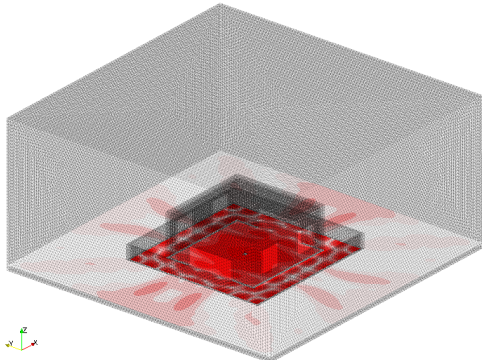
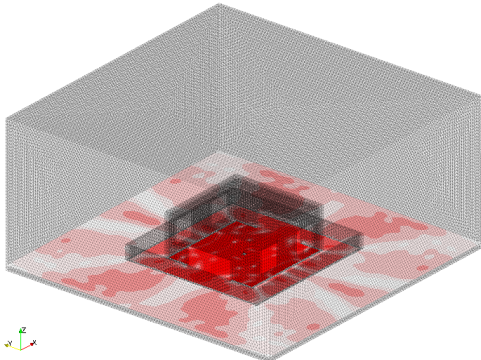
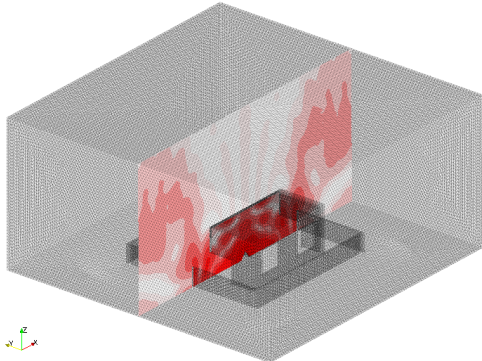
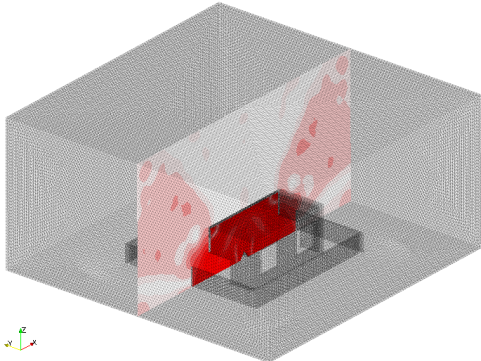
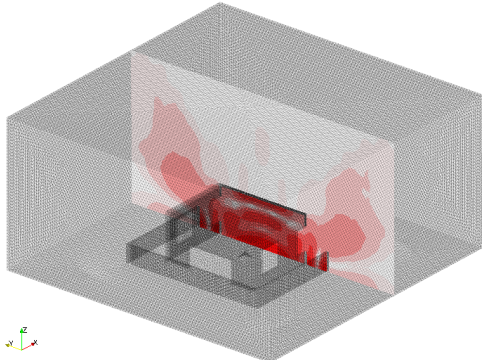
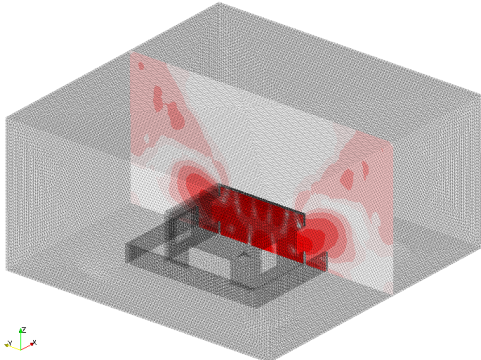
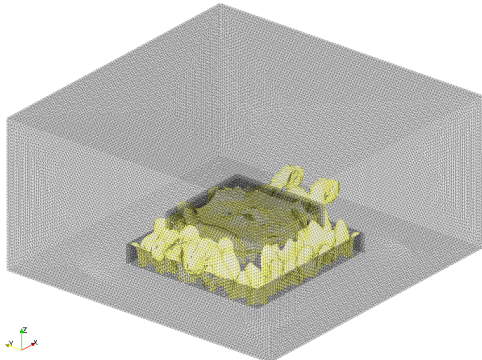
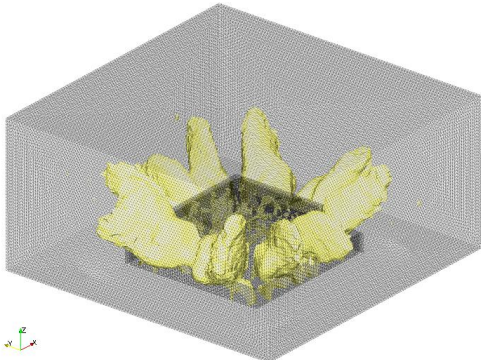
| 項目                            | ケース A                                                                               | ケース B                                                                                |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 床からの高さ<br>1m での<br>音圧レ<br>ベル  |    |    |
| 東西中<br>央断面<br>での音<br>圧レベ<br>ル |   |   |
| 南北中<br>央断面<br>での音<br>圧レベ<br>ル |  |  |
| 音圧レ<br>ベル<br>80dB の<br>等値面    |  |  |

表 9 解析結果 (その 2)

| 項目                | ケース C                                                                               | ケース D                                                                                |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 床からの高さ 1m での音圧レベル |    |    |
| 東西中央断面での音圧レベル     |   |   |
| 南北中央断面での音圧レベル     |  |  |
| 音圧レベル 80dB の等値面   |  |  |

## 3.2. 収束性の検討

### 3.2.1. 収束状況

ここまでに実施した解析につき、解析条件をまとめ、その収束履歴について比較した。解析条件については、

- ・ 塀があるかないか
- ・ 塀の吸音材があるかないか
- ・ 壁の吸音材があるかないか
- ・ 窓と扉の面積の大小

をパラメータとした実施した計算である。ここで、解析条件における収束判定値はいずれも、 $1.0\text{e-}12$ である。

表 10 収束回数（収束判定値： $1\text{e-}12$ ）

| 反復解法   | BiCGSTAB | GMRES   |
|--------|----------|---------|
| 前処理    | SOR      | Schwarz |
| ケース 2A | 53,317   | 24,333  |
| ケース 2B | 54,973   | 25,702  |
| ケース 2C | 16,525   | 7,670   |
| ケース 2D | 55,703   | 25,534  |
| ケース 2E | 277,169  | 88,147  |

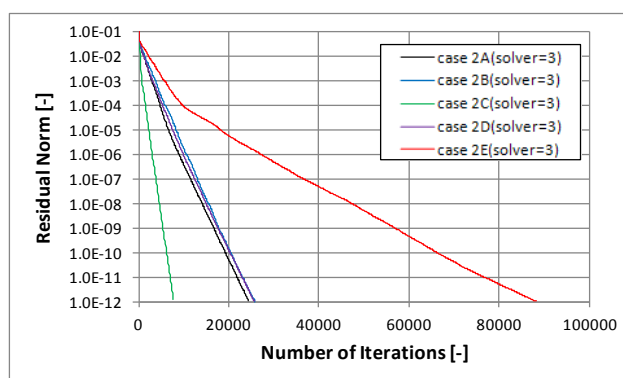


図 4 GMRES 法+Schwarz を利用した  
5 ケースの収束履歴

| 項目                | ケース E |
|-------------------|-------|
| 床からの高さ 1m での音圧レベル |       |
| 東西中央断面での音圧レベル     |       |
| 南北中央断面での音圧レベル     |       |
| 音圧レベル 80dB の等値面   |       |

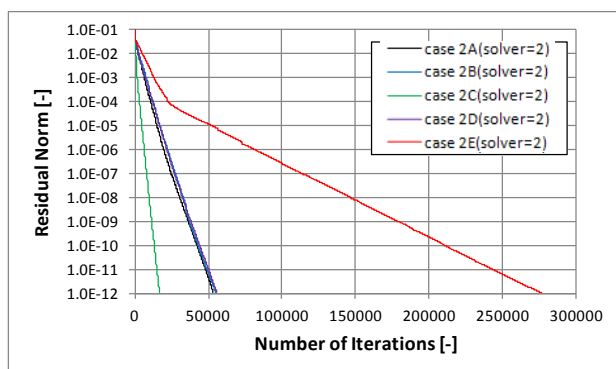


図 5 BiCGSTAB 法+SOR を利用した 5 ケースの収束履歴 (全体)

は、コンタと等値面による全体的な傾向を示す。

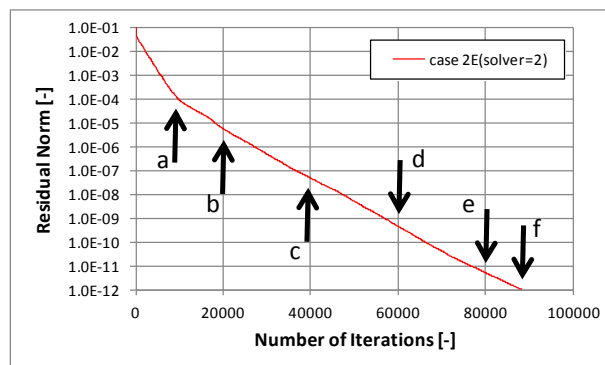


図 6 ケース 2E の収束状況と収束見極めのための検討ケース (FNFEM\_SOLVER=3)

### 3.2.2. 収束途中の解の検討

#### (1) 検討した内容

ここでは、収束の見極めの手法を検討するため、収束途中の解の検討を行った。ここでは、今回実施した内部外部問題のうち、最も収束の遅いケース 2E について、収束途中の解も含め検討を行った。

ケース 2E の収束状況は次の通りである。ここでは、収束回数が、10000 回、20000 回、40000 回、60000 回、80000 回、および、最終の解について比較する。下記の収束履歴のグラフに a から f の記号で示した。以下では、主として、a の状態と f の状態でどの程度の差異があるかを比較する。a の状態を以下では、ケース 2Ea と呼び、f の状態をケース 2E と呼ぶ。f の状態は  $1e-12$  まで収束しているため、ほぼ真の解と考えることができる。

ここでは、ケース 2Ea とケース 2E の床上 1.5m の音響ポテンシャルの実部と虚部を比較した。また、絶対値が分かりやすいため音圧レベルについても比較を行った。また、音圧レベルについては、空間の等値面も可視化した。音響ポテンシャルを表示した理由は、行列の反復解法で直接求めている物理量であるためである。

この結果、収束判定値で  $1e-4$  程度となる解でも、最終的な解と大きくは異ならない。解いている変数である音響ポテンシャルの相対値で、0.2% 程度である。また、音圧レベルで 0.5dB 程度の差異である。定量的な検討は次の節で行い、本節で

#### (2) 収束途中 (反復 10000 回) と最終解 (ほぼ真の値) との比較

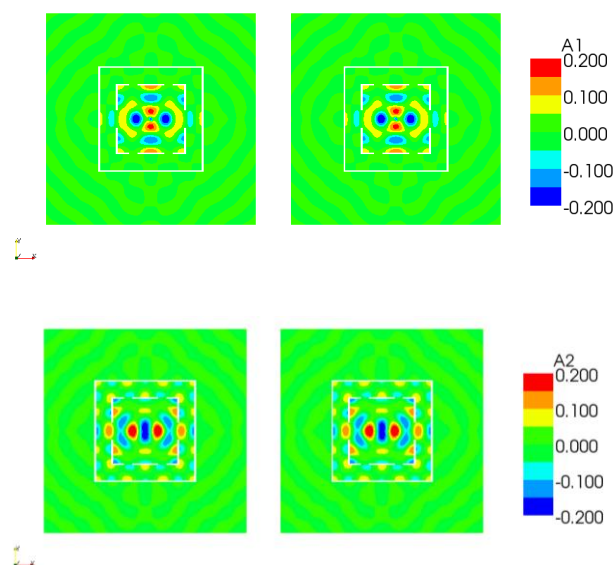


図 7 ケース 2Ea とケース 2E の結果の比較 (右: ケース 2Ea、左: ケース 2E、上段: 音響ポテンシャルの実部、下段: 虚部)

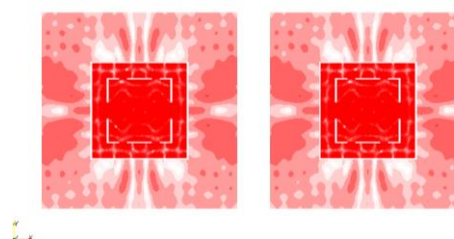


図 8 ケース 2Ea とケース 2E の比較 (音圧レベル: 単位 dB)

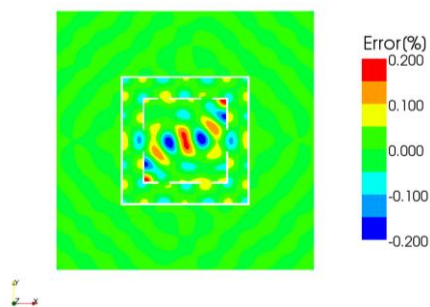


図 9 ケース 2Ea とケース 2E の  
音響ポテンシャルの実部の相対誤差

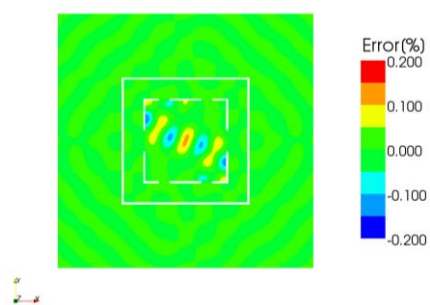


図 10 ケース 2Ea とケース 2E の  
音響ポテンシャルの虚部の相対誤差

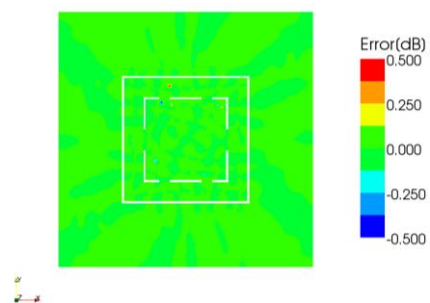


図 11 ケース 2Ea とケース 2E の  
音圧レベルの絶対誤差

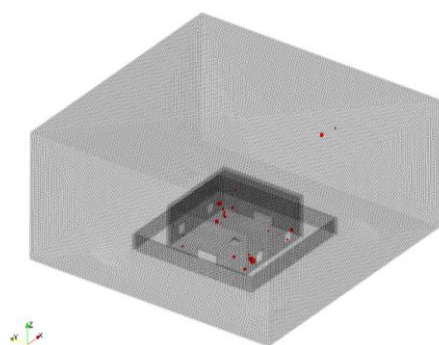


図 12 ケース 2Ea とケース 2E の音圧レベルの  
絶対誤差 0.5dB の等値面

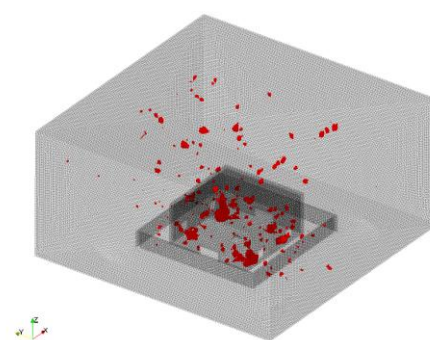


図 13 ケース 2Ea とケース 2E の音圧レベルの  
絶対誤差 0.1dB の等値面

(3) 収束途中（反復 10000 回）と収束途中（反復 20000 回）との比較

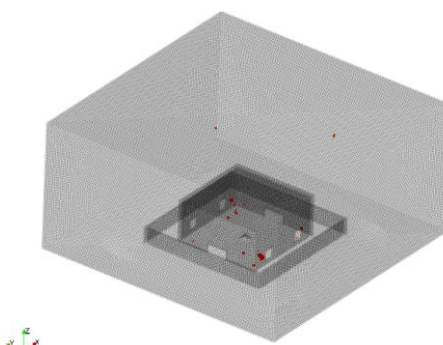


図 14 ケース 2Ea とケース 2Eb の音圧レベルの  
絶対誤差 0.5dB の等値面

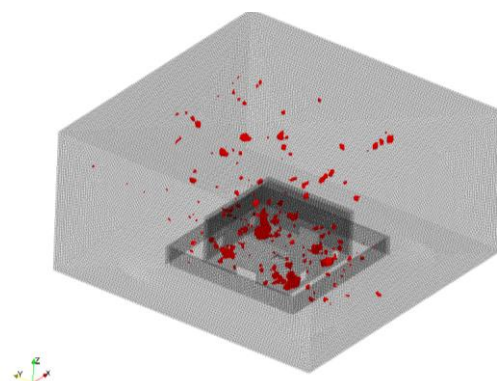


図 15 ケース 2Ea とケース 2Eb の音圧レベルの  
絶対誤差 0.1dB の等値面

### 3.3. 反復解法・前処理と収束性

開発段階では、いくつかの反復解法および前処理の適用を試みた。その手法を決定した経緯は次の通りである。まず、比較的大規模な内部問題の

並列計算に有効な手法をとして、デフォルトとして設定した[1]。さらに、シングル CPU の計算で実績のある手法を選択肢としている。デフォルトで、並列版をリリースしたのちに、比較的安定に利用できた。今回、内部外部問題のテストを行い、そのオプションを見直した。

表 11 各手法の収束回数(ケース 2E, 単位千回)

| 手法     | Schwarz | SOR  | Jacob1 | Jacob2 | ILU  |
|--------|---------|------|--------|--------|------|
| GMRES0 | 93      | >300 | 218    | >300   | >300 |
| GMRES1 | 92      | >300 | 216    | >300   | >300 |
| GMRES2 | 68      | 247  | 145    | >300   | 267  |
| TFQMR  | 85      | >300 | 218    | >300   | >300 |

表 12 ケース 2E における各手法の処理時間  
(h は時間, m は分)

| 手法     | Schwarz   | SOR       | Jacob1    | Jacob2    | ILU       |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| GMRES0 | 2h<br>00m | 3h<br>58m | 2h<br>39m | 3h<br>48m | 4h<br>21m |
| GMRES1 | 1h<br>58m | 3h<br>56m | 2h<br>38m | 3h<br>48m | 4h<br>21m |
| GMRES2 | 1h<br>26m | 3h<br>15m | 1h<br>47m | 3h<br>50m | 3h<br>55m |
| TFQMR  | 1h<br>23m | 2h<br>27m | 1h<br>35m | 2h<br>18m | 2h<br>30m |

## 4. 大規模解析

### 4.1. 目的

本検証では、ここで利用している計算機環境において、どの程度の規模までの解析が実行でき、また、さらなる大規模化に対する課題等について検討するための材料を示すことを目的とした。

### 4.2. 利用した計算機

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 13 使用計算機の仕様

| 項目    | 内容                       |
|-------|--------------------------|
| CPU   | Intel Xeon X5660 2.80GHz |
| ノード構成 | 10 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                 |

### 4.3. 解析モデル

1 辺 1m の立方体の内部に音源を設定するモデルで、メッシュサイズを自由に設定できるモデルとした。音源には、立方体の中央位置に単極子音源、双極子音源、四重極音源を設定した。また、立方体の周囲は完全反射の壁とした。

解析モデルの規模としては、次のような大きさの規模のデータを用いた。

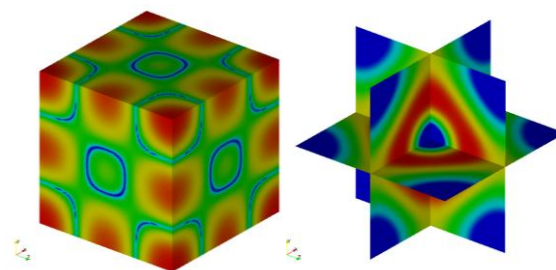


図 16 単極子の結果(左; 立方体表面の速度ポテンシャル分布、右; 中央断面の音圧レベル)

表 14 検証例題の規模

| 要素数         | 節点数        | 自由度         |
|-------------|------------|-------------|
| 92,629,494  | 15,625,000 | 31,250,000  |
| 116,790,654 | 19,683,000 | 39,366,000  |
| 137,437,824 | 23,149,125 | 46,298,250  |
| 160,385,394 | 27,000,000 | 54,000,000  |
| 185,754,864 | 31,255,875 | 62,511,750  |
| 255,051,294 | 42,875,000 | 85,750,000  |
| 301,460,454 | 50,653,000 | 101,306,000 |
| 381,127,194 | 64,000,000 | 128,000,000 |
| 425,747,664 | 71,473,375 | 142,946,750 |

#### 4.4. 解析結果

ここで示す処理時間等の測定結果は、双極子の問題で計測した数字である。単極子音源、双極子音源、四重極音源のいずれの場合にも下記のような妥当な結果を得ており、データをとるためには妥当な問題であることが分かる。

図に、1.6 億要素の場合の収束履歴を示す。収束履歴においては、このケースでは、特に問題ないことが分かる。

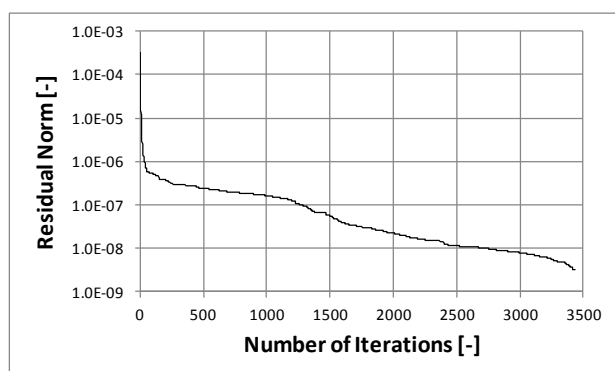


図 17 収束履歴 (1.6 億要素)

#### 4.5. 並列性能

ここでは、24 コア、36 コア、48 コアでの並列性能の比較を示す。24 コアでは、192GB の主記憶容量が利用可能であり、このサイズで処理可能な 1.4 億要素までのデータに限定して、この 3 つのケースの処理時間を測定した。

この結果、24 コアと 48 コアを比較した場合には、ほぼ倍程度の処理速度が出ており、並列性能は、ほぼ問題ないと考えられる。

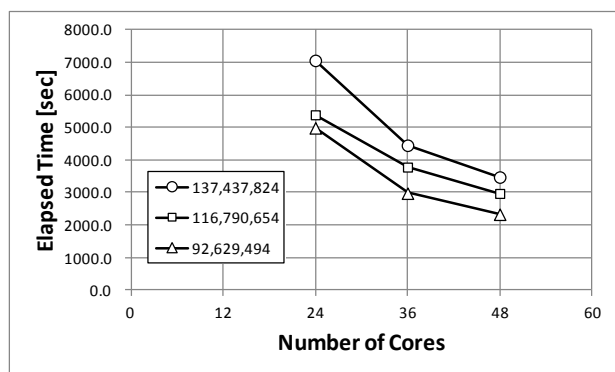


図 18 並列性能 (数字は要素数)

#### 4.6. 処理速度とメモリ

Advance/FrontNoise の大規模データに対する処理速度とメモリを計測した。ここでは、3 系列のデータを示した。

処理速度については、下記に示す通りである。1 つのデータは、1PEs で実行に換算した結果である。2 つめのデータは 12PE で実行した結果である。3 つめのデータは 48PE で計測したデータである。このうち、赤い枠の印が実際に実行したデータをとった値である。その他については、他のデータから補間等を行ったデータである。

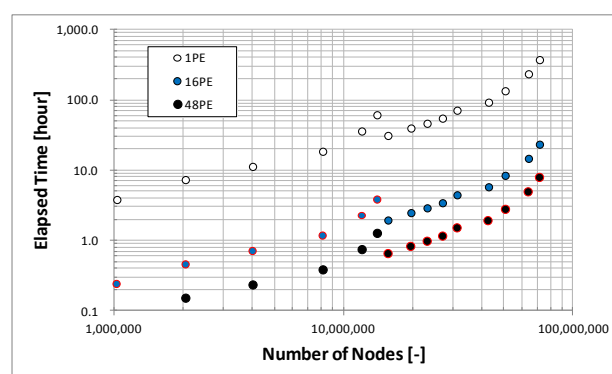


図 19 節点数と処理速度

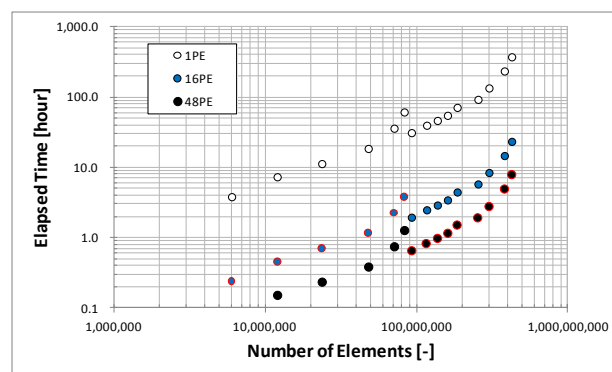


図 20 要素数と処理速度

メモリについては、図 4 の通りである。ここでは、48CPU、392GB のメモリ (+同程度のスワップ 392GB) の計算機環境で実施した。黒い線が必要なメモリ量であり、当社の環境では、この値がメモリ+スワップで、784GB 以下であれば、データを実行できる。すなわち、グラフから読み取ると、7 千万節点、4 億要素まで実行できることが分かる。実際に、71,473,375 節点、425,747,664 要素のデータを実行することができた。

ただし、次のことに注意しなければならない。一般的なことではあるが、スワップを利用するようになると極端に処理速度が落ちることが分かる。この表で実際に計測した値は赤い枠の印であり、16PE の測定系列はメモリ 64GB（スワップ 64GB）の環境で実行したものである。スワップを利用する領域になると処理速度が落ちることが分かる。また、48PE の系列は下記に示す 392GB（スワップ 392GB）の環境で実行したものであり、これについても、スワップを利用する領域になると処理速度が落ちることが分かる。スワップの設定がなければ、メモリの限界まで処理速度が落ちることはない。

例えば、本資料に示したデータから、メモリが 512GB でありスワップの設定がない環境におけるデータサイズのぎりぎり上限を考えると、5 千万節点、2 億 5 千万要素程度まで解析可能であることが分かる。

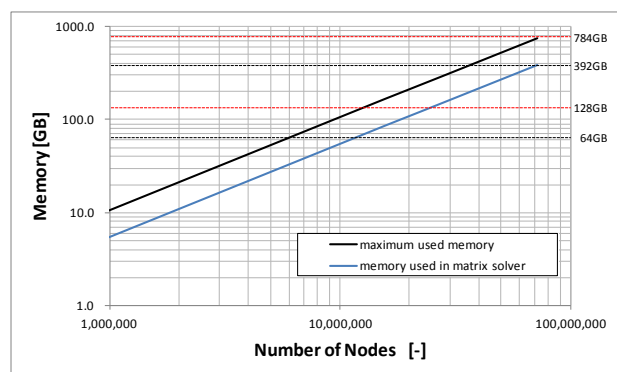


図 21 節点数と使用記憶容量

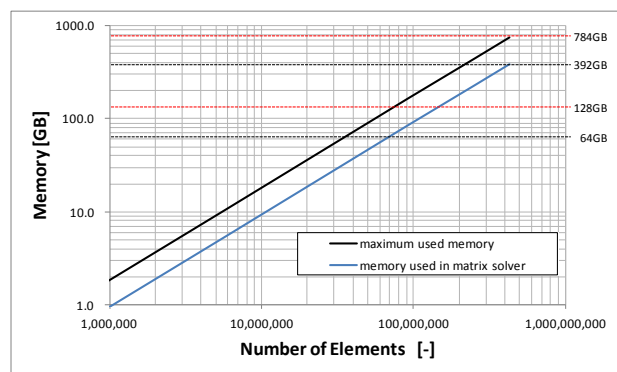


図 22 要素数と使用記憶容量

流体解析、構造解析[6][7][8]、音響解析ともに、複雑な解析対象について大規模解析が実施できることを 1 つの特長としている。音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise も、大規模解析を行うために、頑強で並列効率を得ることができる実用的な並列アルゴリズムを実装している。

本稿の実施内容により、4 億 2000 万要素、7000 万節点、1 億 4000 万自由度である。このモデルを、48 並列の計算機で、1 周波数当たり処理時間 8 時間で解析可能となった。Advance/FrontNoise に関して、引き続き、大規模計算のための取り組みを継続していく。

## 参考文献

- [1] 松原聖, 桑原匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による大規模解析”, Vol.9(2011.10)
- [2] 赤間誠他, “鉄道用低応力・低騒音軽量車輪の開発,” 日本機械学会論文誌 A, Vol.73, No.730, (2007.07)
- [3] M.Akama, et al., "Design and analysis of low-stress and low-noise lightweight railway wheel," Proc. IMechE Vol. 223 Part F: J. Rail and Rapid Transit, (June, 2008)
- [4] 桑原匠史, “Advance/FrontNoise を用いた音響解析,” アドバンスシミュレーション, Vol. 2, (2010.9)
- [5] 松原聖, 桑原匠人ら, “数千万自由度を対象とした大規模並列固有値ソルバー,” 日本機械学会, 第 19 回計算力学講演会, (2006.11.05)
- [6] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR の部品アセンブリ解析機能”, Vol.8(2011.07)
- [7] 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)
- [8] 末光啓二, “Advance/FrontSTR による並列接触解析”, アドバンスシミュレーション, Vol. 13(2012)

## 5. まとめ

当社で開発・販売しているソフトウェアでは、