

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの解析事例

松原 聖* 桑原 匠史*

Application of Acoustic Simulation Software : Advance/FrontNoise

Kiyoshi Matsubara* and Takuhito Kuwabara*

アドバンスソフト株式会社は、戦略的基盤ソフトウェアの開発をきっかけに設立された。そのプロジェクトでは、大規模並列計算がひとつのキーワードとしたプロジェクトであった。そのプロジェクトの中で、構造解析ソフトウェア[1]、流体解析ソフトウェア[2]、第一原理計算ソフトウェア[3]等を開発し、当社で商品化し、実用化の取り組みを行ってきた。

一方で、それらのソフトウェアを産業界に普及するために必要となったソフトウェアも独自に開発し、連成解析等を実施してきた[4]。そのひとつが音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise である。他のソフトウェアと同様に大規模計算を特長とし、これまでいくつもの事例を積み重ねてきた。本稿では、その主要な事例について示す。また、事例と合わせ、それを裏付ける性能評価、および、大規模解析に関するデータについても示す。

Key word: 音響解析、周波数領域、大規模計算、並列計算、連成解析、内部問題、外部問題、有限要素法

1. はじめに

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、2005年の開発から、いくつもの事例を重ね、その中では、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も行ってきた。開発当初には、主として、消音器を対象とした音響の内部問題、および、構造解析との連成での環境騒音の問題に取り組んできた。その後には、ソフトウェアを改良しながら流体音響連成に取り組み、大規模解析を実施していくうちに、音響解析単独でも多くの事例を重ねることができた[5][6][7]。

本稿では、音響解析の適用分野、性能評価事例、大規模解析事例、適用事例について述べる。

2. 音響解析の適用分野

一般的な機器の設計において、騒音の対策としては、音源の音を小さくするか、音源からの伝播経路を工夫するかのどちらかである。

この事実に対応して、現状の音響のシミュレーションでは、①音源を求めること、②音源からの伝播した音を求めること、の2つの要素がある。音響解析を適用するにあたっては、まず、この区別について明確にする。まず、①の音源を求めることについては、通常、構造解析や流体解析で行うことができる。また、②の音の伝播については、音響シミュレーションの範疇となる。以下では、音響解析を適用できるいくつかの音響に関する話題について述べる。

近年、電気洗濯機は非常に静音になっている。各パーツの性能が上がり、電気洗濯機の動作時に聞こえる音は、40dBといわれているため、ほとんど水の音しか聞こえなくなった。これは、DDモータの成功が大きい。この経緯については、家電製造各社ホームページにも低騒音化の歴史が示されている[8]。これは、実験の積み重ねにより音源を小さくしていった歴史である。シミュレーションが実用化されていたとしても音響解析の出番ではなく、関連があるとしたら振動解析等を行う構造解析である。この音源と決定したのちに、その音が室内を伝播するケースでは、音響解析が

*アドバンスソフト株式会社 第1事業部
1st Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

役に立つ。そこでは、室内の配置、壁や床の吸音特性、および、壁面を透過する音響等が騒音を決定する要素になるであろう。さらに進めて、現状で残っている水の音を小さくする場合には、流体解析が役に立つであろう。しかし、流体解析により、洗濯機表面で発生する音響を正確に予測できるようになるには、まだ数年の技術の進歩をまたなければならないと思う。

次に、音の伝播が重要な課題となることがある事例について述べる。月面着陸したアポロ 11 号のサターン V 型ロケットを最初に試験飛行したアポロ 4 号では、発射時の騒音は予想していたものよりもはるかにすさまじく、発射場から 4 マイルも離れた場所の天井のタイルが音響振動により落下した話がある[9]。これは、発射場で発生する音（のエネルギー）をある程度推定していたのであれば、簡単な計算で推定できなかったのだろうか。

本記事が発行される直前の 2013 年 2 月 28 日にロシアのチェリャビンスク州において隕石落下が発生したでは、広い範囲に衝撃波による被害をもたらした。衝撃波による史上最大の現象もあった。包括的核実験禁止条約機関（CTBTO: Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization）が核実験の監視のために設置しているセンサーが、隕石の落下によって発生した音波を捉えたことを発表した。捉えたのは人間の聴覚で探知できる領域よりはるかに低周波の音波である超低周音波で、落下地点からほぼ反対側に相当する南極でもこの音波を捉えた。音波は約 32 秒間継続した。研究者らは、音波が約 32 秒間続いたことから推計して、爆発のエネルギーは 450 ~ 500 キロトンだったと試算しているとの報道があった[10]。

また、いくつかのプラントでは、音響で設備が破壊するという音響破壊という現象も報告されている。例えば、[11][12]に詳細に報告および音響解析されている原子炉の蒸気乾燥器音響振動である。これは、米国 BWR の Quad Cities 2 号機において、17.8% の出力向上時に蒸気乾燥器が高サイクル疲労で損傷する事例である。これは、

SRV 管台で流力音響共鳴による圧力変動が発生し、蒸気乾燥器まで伝播したためと報告されている。SRV 管台では、蒸气流速を過度に増加すると、音場の共鳴周波数と蒸气流による渦放出周波数が一致して共鳴し、フィードバック現象によって渦放出を促進する自励的な振動により、圧力変動が発生する。なお、国内 BWR の定格運転において同様の事象は発生していない。

さらに、[13]には音響による振動を減少させるための事例が示されている。人工衛星は、打上げ時や飛翔時の過酷な環境に耐えられるよう、ロケット先端のフェアリングに包まれて格納されている。外部音響などから衛星を守るためのカバーである衛星フェアリングからなっている。フェアリングは、打上げ時の大音響を受けて振動し、その振動がフェアリング内部にも高音響をもたらし、その音圧によって人工衛星を振動させる。日本では計画されていないが有人の飛行船では、最も設計で配慮すべき項目のひとつとなるであろう。

最後に示すのは、[14]に示された流体解析と音響解析の連成のニーズである。この文献に示された例は、燃焼器下流に複雑な形状のダクトが取り付けられていた場合、その部分が共鳴管として働くため、熱・音響カップリングの周波数に対して影響を及ぼすことになる。この周波数が正確に予測できない場合は、燃焼振動発生限界の正確な予測もできなくなるという事例である。このような熱・音響カップリングの燃焼振動の解析については、古くから研究が行われているようである。

以上で示したように、音響解析のニーズは広い分野で存在する。以下では、当社で取り組んだ音響解析の事例について示す。

3. 性能評価事例

3.1. メッシュの品質と精度・収束性

3.1.1. 解析条件

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 1 解析ケース一覧

case	D [m]	R [m]	L [m]	Δx [m]	縦横比[-]
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

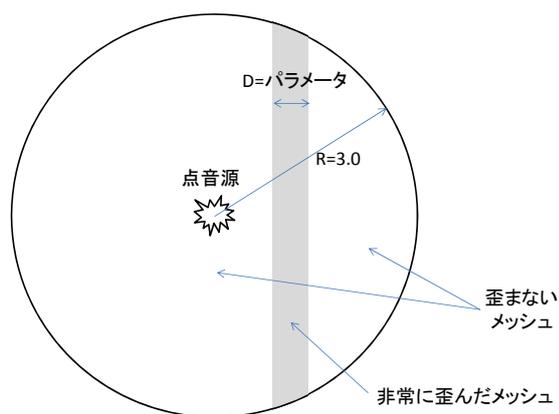


図 1 問題設定

表 2 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

3.1.2. 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。

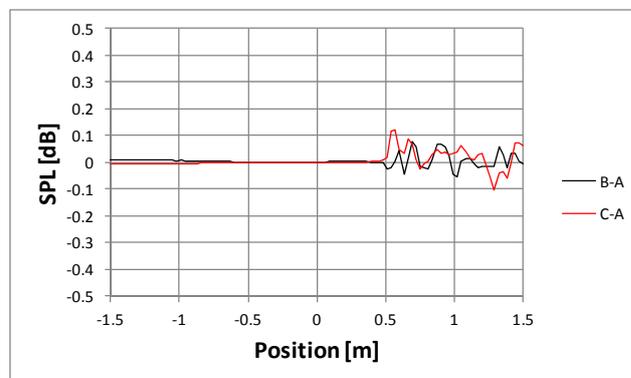


図 2 ケース 1B、1C と 1A との結果の差異

3.1.3. 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 3 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 Schwarz	1A	158	167	167	183
	1B	296	340	348	451
	1C	918	1370	1194	2363
GMRES1 Jacobi2	1A	168	347	384	451
	1B	296	652	755	1085
	1C	918	4512	4687	×
GMRES1 ILU	1A	224	396	417	486
	1B	459	832	903	1172
	1C	2046	5927	4529	6563

解法	case	1コア	2コア	4コア	12コア
GMRES1 SOR	1A	213	378	403	475
	1B	459	844	909	1177
	1C	2269	×	×	×
GMRES2 Schwarz	1A	175	188	192	214
	1B	324	370	376	508
	1C	920	1395	1264	2275
GMRES2 Jacobi2	1A	175	379	418	500
	1B	324	707	868	1160
	1C	920	2894	3086	5692
GMRES2 ILU	1A	232	405	423	503
	1B	476	894	974	1223
	1C	2385	×	×	×
GMRES2 SOR	1A	234	406	438	527
	1B	495	894	977	1233
	1C	2369	3901	4727	6264

3.1.4. 考察

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ぬ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も対しても、前処理については、Schwarz が頑強であることが分かる。

表 4 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 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 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 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 SOR	1A	1.00	1.77	1.89	2.23
	1B	2.15	3.96	4.27	5.53
	1C	10.65	×	×	×

解法	case	1コア	2コア	4コア	12コア
GMRES2 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 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 ILU	1A	1.00	1.75	1.82	2.17
	1B	2.05	3.85	4.20	5.27
	1C	10.28	×	×	×
GMRES2 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

3.2. メッシュサイズと精度

3.2.1. 解析条件

応力解析や流体解析と異なり、音響解析は、解析対象の周波数により、メッシュ幅の最大値が制限される。これは構造解析における振動解析のメッシュ幅の制限と同様である。従って、解析規模が大きくなれば、解析形状がたとえ単純であっても、メッシュ数は多くなる。

従って、実用的な処理時間の短縮のためには、メッシュをどのくらいまで粗くできるかが問題となる。ここでは、放射音の問題を例にとって、どの程度のメッシュサイズまで精度が保証できるかを検討する。

ここでは、点音源からの放射において解析解と計算値を比較することで、メッシュ幅の妥当性を検討した。

3.2.2. 解析結果

計算で求めることができた値と解析解を比較した図を示す。この結果から、800Hz までは解析解とは 0.5dB 程度の誤差に収まっている。それ以下の周波数であれば誤差はそれ以下である。また、高い周波数では、誤差は 800Hz の場合以上の誤差が見られる。ただし、誤差を多少許容すれば、若干は大きなメッシュを利用できるともいえるであろう。

3.2.3. 考察

800Hzという値は、1波長の中にメッシュが7.5個 (=300[m/sec]/800[1/sec]/0.05[m]) ある状況である。これは通常（内部問題を含む）の目安としている1波長に8つのメッシュという基準程度であり、どのような形状でも適用できる基準である。この基準は有限要素法でも、境界要素法でも同様である。ただし、他のソルバーでは2次要素を利用したソルバーもあり、この場合には、単純に要素数は半分になるが、原理的には同様の精度を得るためには同様のメッシュ幅が必要であるといえる。

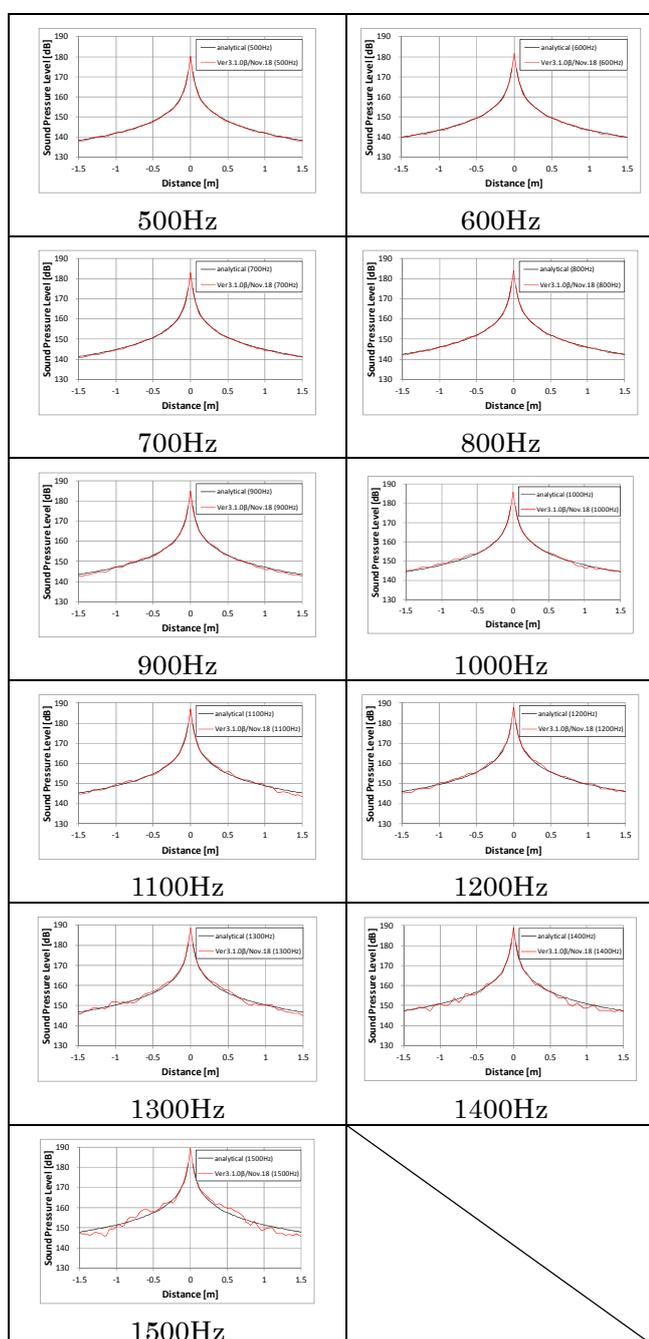


図3 波長に関する感度解析

3.3. 速度場での音響伝播 (1次元)

3.3.1. 解析解

定式化およびソフトウェアをチェックするため、前節で述べた3次元の方程式を、解析解のある1次元の方程式で考える。

1次元の方程式は、平面波、または、波長に対して十分に細い管の中の伝播をあらわす。1次元の方程式を記述する

$$(1 - M_x^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + 2ikM_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + k^2 \phi = 0 \quad (1)$$

となる。この方程式に対する解析解は、

$$\phi = \exp\left(\frac{ikx}{1+M}\right) \quad (2)$$

$$\phi = \exp\left(-\frac{ikx}{1-M}\right) \quad (3)$$

の2つである。これは、それぞれ簡単な計算

$$\begin{aligned} & (1 - M^2) \left(\frac{ik}{1+M}\right)^2 \phi + 2ikM \left(\frac{ik}{1+M}\right) \phi + k^2 \phi \\ &= k^2 \phi \left\{ -\frac{1-M^2}{(1+M)^2} - \frac{2M}{1+M} + 1 \right\} \\ &= \frac{k^2 \phi}{(1+M)^2} \left\{ -(1-M^2) - 2M(1+M) + (1+M)^2 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

および

$$\begin{aligned} & (1 - M^2) \left(\frac{ik}{1-M}\right)^2 \phi - 2ikM \left(\frac{ik}{1-M}\right) \phi + k^2 \phi \\ &= k^2 \phi \left\{ -\frac{1-M^2}{(1-M)^2} + \frac{2M}{1-M} + 1 \right\} \\ &= \frac{k^2 \phi}{(1-M)^2} \left\{ -(1-M^2) + 2M(1-M) + (1-M)^2 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

で確認できる。それぞれ、進行波と後退波に相当する。また、開放の境界条件は、

$$(1 - M_x^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + 2ikM_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + k^2 \phi = 0 \quad (6)$$

である。

3.3.2. 解析条件

1次元の解析解と解析結果を比較する。ここで

は、次のケースで確認する。それぞれ、平面波を模擬した細い管の領域での音の伝播に対して、3次元の各方向から風速を与えたケースである。音速 300m/sec を使用した。

表 5 1次元の解析解との比較のためのケース

ケース名	周波数	M_x	M_y	M_z	解析解での波長[m]
3A	1.0Hz	0.0	0.0	0.0	300.0
3B	1.0Hz	0.2	0.0	0.0	360.0
3C	1.0Hz	-0.2	0.0	0.0	240.0
3D	1.0Hz	0.0	0.2	0.2	300.0
3E	1.0Hz	0.2	0.2	0.0	360.0

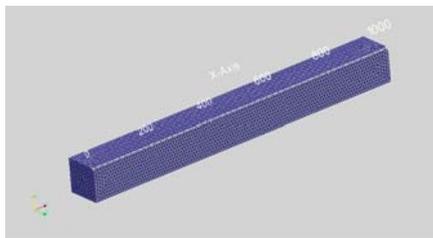


図 4 速度効果の試計算メッシュ図

3.3.3. 解析結果

以下に解析結果を示す。

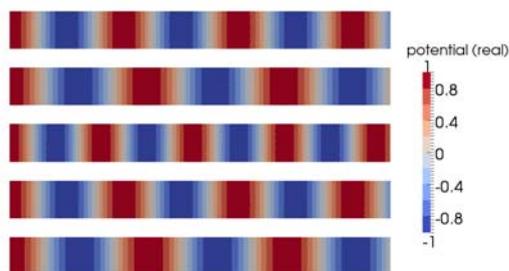
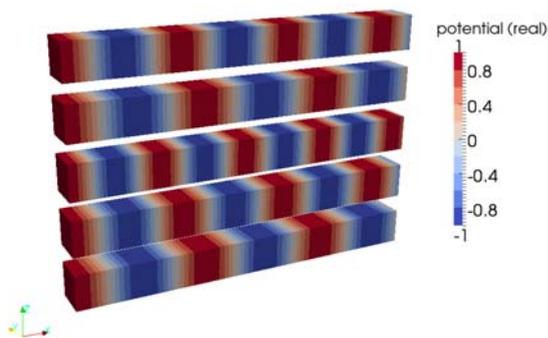


図 5 音響速度ポテンシャルの実部の解析結果 (上からケース 3A,3B,3C,3D,3E の順)

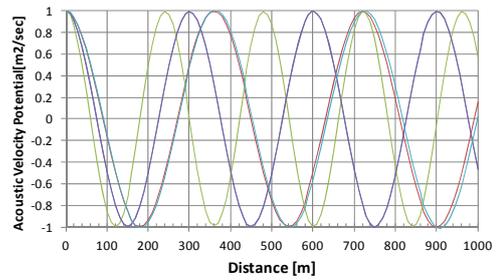


図 6 速度試計算の音響速度ポテンシャルの比較 (全ケース)

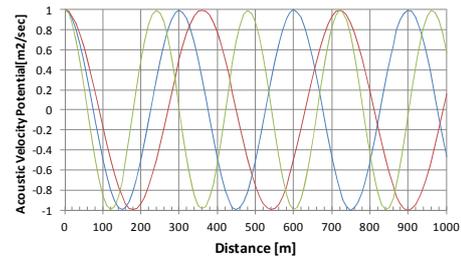


図 7 速度試計算の音響速度ポテンシャルの比較 (ケース 3A と 3B と 3C)

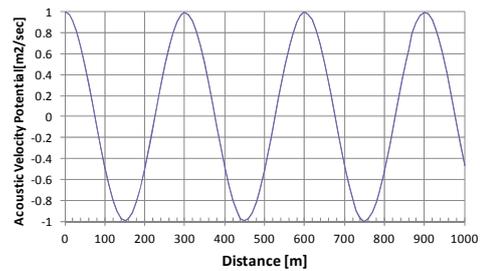


図 8 速度試計算の音響速度ポテンシャルの比較 (ケース 3A と 3D)

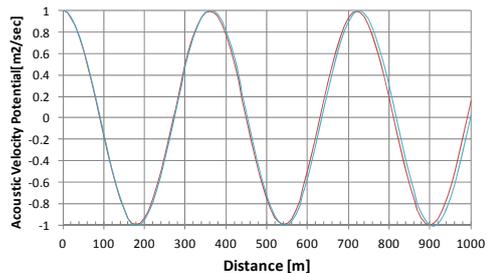


図 9 速度試計算の音響速度ポテンシャルの比較 (ケース 3B と 3E)

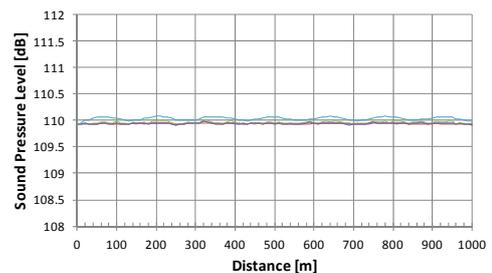


図 10 速度試計算の音圧レベルの比較

3.4. 速度場での音響伝播 (3次元)

3.4.1. 解析条件

点音源からの放射に対して、風速を与えた場合について試算を行った。風速がある場合とない場合とで波長が異なるため、メッシュへの感度が問題になる可能性があり、念のため風速がない場合のメッシュを変更したケースも実施した。風速は、30m/sec 相当の $M=0.10$ とした。

表 6 3次元速度場のケース

ケース名	M_x	M_y	M_z	備考
4A	0.00	0.00	0.00	
4B	0.10	0.00	0.00	



図 11 速度効果確認のための試算のメッシュ図

3.4.2. 解析結果

速度場がある場合とない場合の解析結果を比較して示す。

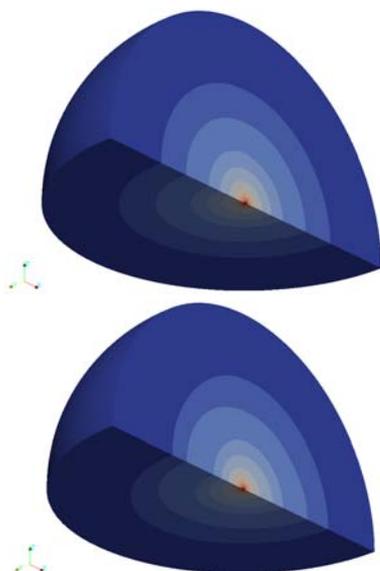


図 12 音圧レベルの解析結果 (ケース 4A と 4B)

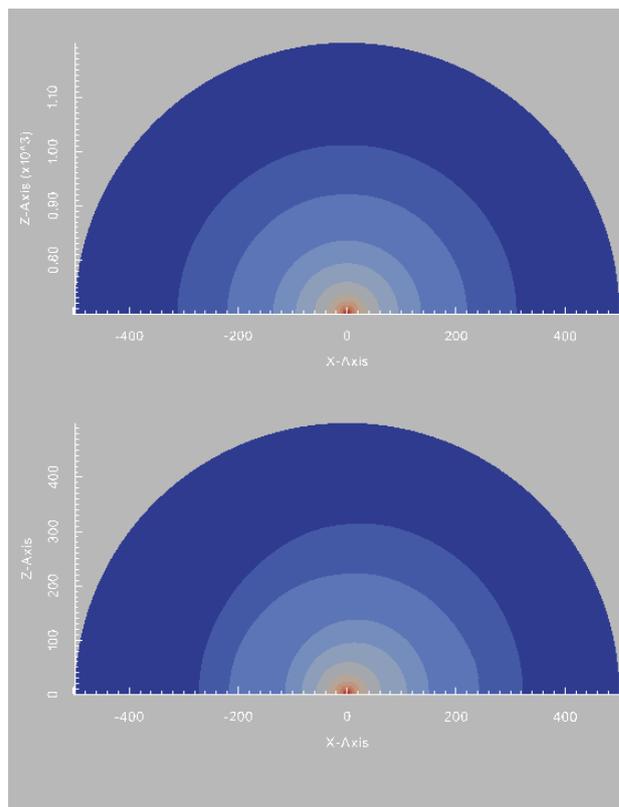


図 13 断面の音圧レベル解析結果 (ケース 4A と 4B)

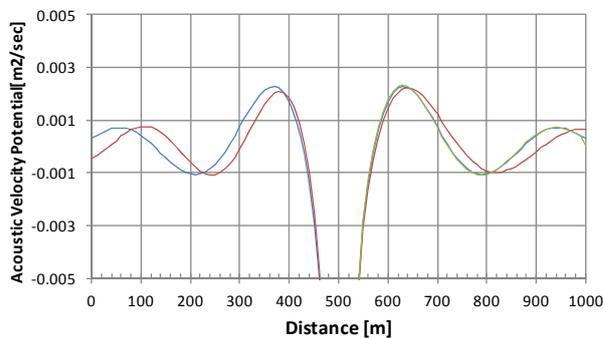


図 14 X軸上の音響速度ポテンシャル解析結果 (ケース 4A と 4B)

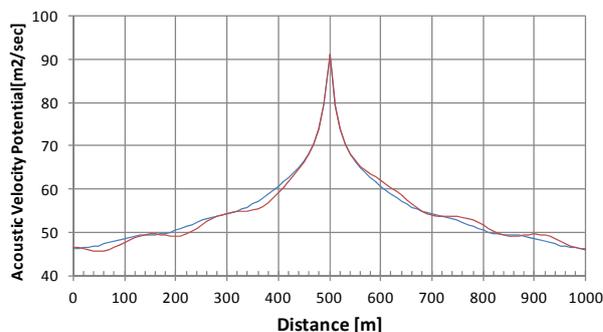


図 15 X軸上およびY軸上の音圧レベル (ケース 4A と 4B の鉛直方向)

3.5. 行列解法の評価

3.5.1. 目的

従来の並列化手法は前節で述べた通り周波数分割であり、並列化効率については、 n プロセッサでほぼ n 倍の処理速度を得ることができた。しかし、それぞれのプロセッサで 1 つの周波数を実行することが理由で、この方法は大規模化に対応できないことが課題である。

ここでは、新たに実装した領域分割による並列化機能について述べる。この並列化の目的は、周波数分割並列機能で不得意としていた部分を解決し、より大規模な計算を可能にすることである。

領域分割並列は、周波数分割の並列化手法ほどのスケーラビリティを得ることは期待できないが、どの程度まで並列性能を上げることが課題である。また、この手法で十分に効果を得ることができれば、将来的に周波数並列手法、領域分割並列手法を組み合わせ、計算機環境に最適な手法の選択をすることで、計算機資源を有効に活用することが可能となる。

3.5.2. 実装方法の検討

ここでは、従来の並列手法における課題を解決しつつ、従来の並列化手法のようなスケーラビリティを得ることができるか、すなわち、反復法を利用した線型ソルバーの部分のスケーラビリティを得ることが課題となる。すなわち、具体的には、

- ① 並列化により線型ソルバーの反復回数が増加しないようにすること
 - ② 並列化により反復解法の中で 1 回の反復計算が高速化できること
 - ③ ソルバーの並列化のために、前処理および後処理に負荷がかからないこと
- の 3 つの課題を解決することである。

3.5.3. 解決の方針

音響解析における複素行列に対して、Advance/FrontNoise で実績があり、頑強であった BiCG 系反復法に SOR の前処理を施した手法を中心にいくつかの反復法の手法を試み、領域分割による

並列計算に最適な手法の組み合わせを提供する。例えば、反復法では、BiCG 系、GMRES 系、QMR 系、マルチグリッド系を試し、前処理では、Jacobi 系、ILU 系、SOR 系、加法シュワルツ系、マルチグリッド系を試した。これらの手法はいずれも、現時点で実用化され、十分に汎用的になっている反復法のアルゴリズムの中から選択した。この多くの組み合わせの中から、いくつかのテストにより、次の 4 つの手法に絞ら込んだ。

表 7 試行した方法

方法	前処理法	反復法
方法 A	SOR 系	BiCG 系
方法 B	ILU 系	GMRES 系
方法 C	シュワルツ系	GMRES 系
方法 D	Jacobi 系	BiCG 系

3.5.4. 手法の選択

試作において手法の検討を行い、処理時間について、次のような結果を得た。処理時間については ILU の前処理を行い GMRES 法で処理した方法 B の結果が最も高速であった。ただし、従来から利用している SOR 系の前処理を行った BiCG 法を用いた方法 A も並列で安定に解くことができている。また、方法 C については、並列数が増えても反復回数の増加が少ないという利点があった。また、方法 D については、その他の手法と比較して特段の優位性を認めることができた点はなかった。

表 8 試行した方法と評価結果

方法	周波数並列	領域分割並列
方法 A	◎	○
方法 B	○	◎
方法 C	—	バックアップ
方法 D	—	バックアップ

方法 A は、従来から周波数方向の並列処理に向いており、これまでに実績がある方法である。方法 B は、今回のベンチマークにおいて、領域分割

並列手法に最も効果があることが分かった。方法 C は、並列数が増加しても反復回数が増加しない傾向にあるため、収束性は一番良好である。ただし、並列化の効率が低い。並列で収束しない場合のバックアップに利用できる。方法 D は、一般的に実績のある手法であり、この手法もバックアップとして用意しておく。

表 9 試行した 4 つの方法の処理時間

単位:秒

	方法 A	方法 B	方法 C	方法 D
1PE	848.665	196.312	372.95	756.79
2PE	601.238	113.751	226.232	355.086
4PE	548.944	102.679	108.727	426.55
8PE	245.635	102.5	100.454	220.273
16PE	190.523	86.447	89.561	174.965

マフラーの入り口に圧力の境界条件を与え、開空間には開放の境界条件を与えている。

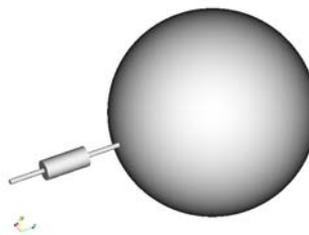


図 17 検証 A に利用したモデル

表 10 検証に利用したデータ

項目	内容
要素数	6,708,664
節点数	1,142,034
自由度数	2,284,068
周波数	100~500Hz の 5 周波数

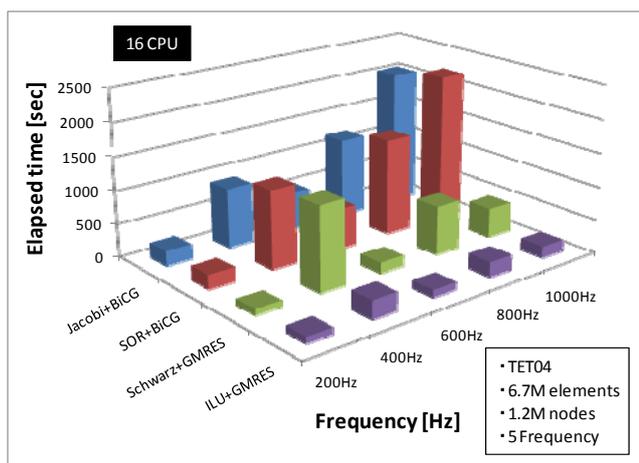


図 16 手法による処理時間の比較

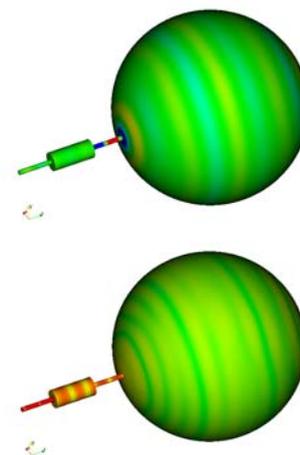


図 18 解析結果

(左：速度ポテンシャル、右：音圧レベル)

3.6. 並列化性能のための検証

3.6.1. 目的

本検証例題では、数百万要素のデータに対して、並列性能を計測することを目的とする。具体的には、並列処理に対するデータを比較検討し、問題なく大規模計算を実施することができることを確認する。

3.6.2. 解析モデル

テストデータとして、マフラーとその出口の開空間を対象としたデータを利用した。ここでは、

3.6.3. アルゴリズムの違いによる処理時間の比較

16CPU を利用することでプログラム全体の処理速度をほぼ 8 倍にできた。これまで実績のある方法 A よりも方法 B が高速であり、並列時の性能も低下しない。ここでは、方法 A および方法 B に関する各処理に必要とされる処理時間およびその並列化に関する処理時間について示す。

方法 A および方法 B とともに、処理時間のほとんどを、反復法の処理に費やしている。また、反復に要する時間は、収束するまでの反復数に比例するため、並列数にのみ依存しない部分もある。

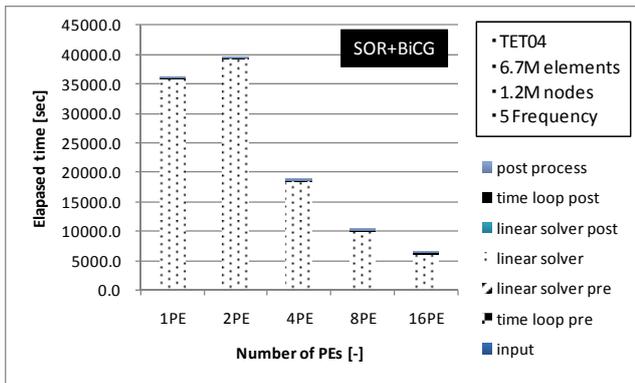


図 19 手法 A の並列化性能

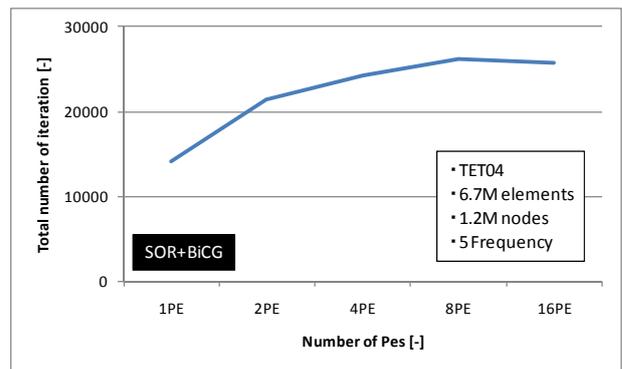


図 22 並列処理に伴う反復回数の変化

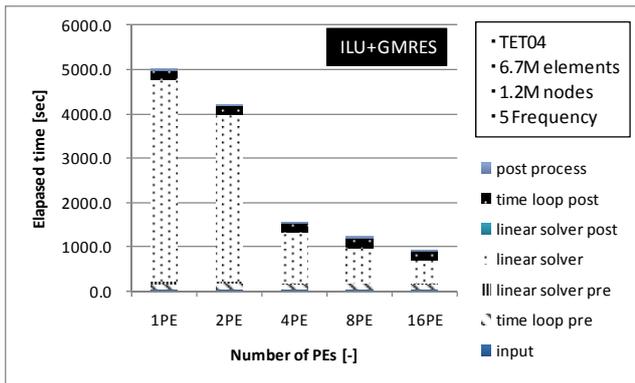


図 20 手法 B の並列化性能

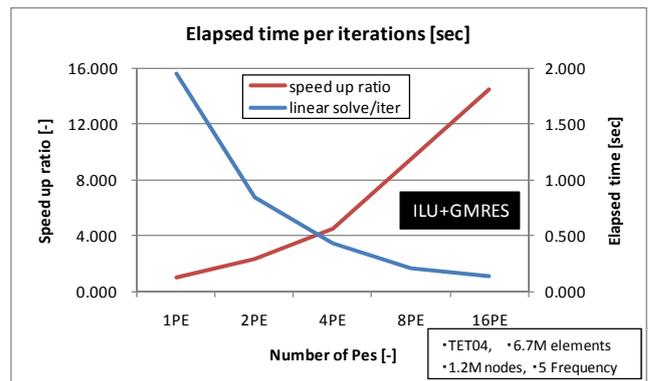


図 23 反復 1 回の処理の並列性能

方法 B は方法 A よりも数倍の処理速度となっている。また、方法 B において、「time loop post」という部分に時間を要し、かつ、並列数が上がっても処理時間が短縮されていない。これは、本計算ではすべての周波数で全点の結果を出力していることに起因しており、使う用途によっては削減可能な部分である。方法 A および方法 B とともに、並列数の増加により、同程度の反復回数の増加が見られる。また、方法 A および方法 B とともに反復 1 回あたりの並列性能については、十分に得られていると考えられる。

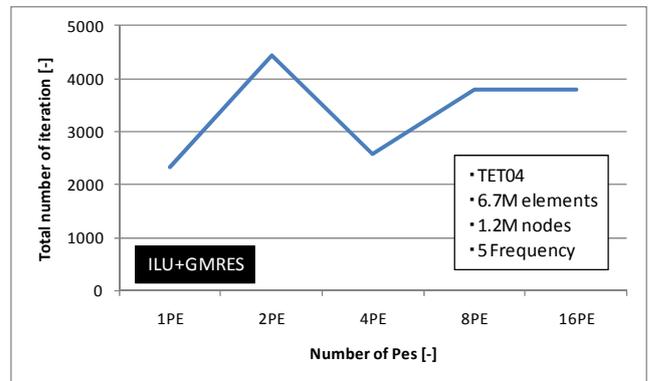


図 24 並列処理に伴う反復回数の変化

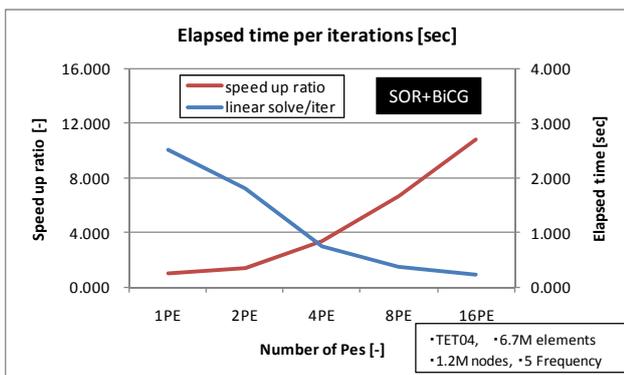


図 21 反復 1 回の処理の並列性能

3.6.4. 使用記憶容量

音響シミュレーションの大規模計算においては、処理速度のみならず、ユーザーの利用する環境の使用記憶容量の制限がボトルネックとなる。ここでは、並列計算を実施する場合の各プロセスに必要な使用記憶容量および全体に必要な使用記憶容量について示す。

並列化した場合には、もとのデータがそのまま等分に分割されるのではなく、各プロセスで重複して持たざるを得ないデータがある。従って、並列化をすることで、解析全体で利用する使用記憶

容量は増加する。今回計測したデータでは、16プロセスを利用することにより1プロセスの場合の約2倍の使用記憶容量が必要である。しかし、重要なことは並列数を上げることで1つのプロセスの使用記憶容量が減少していくことであり、これにより大規模計算が可能となる。

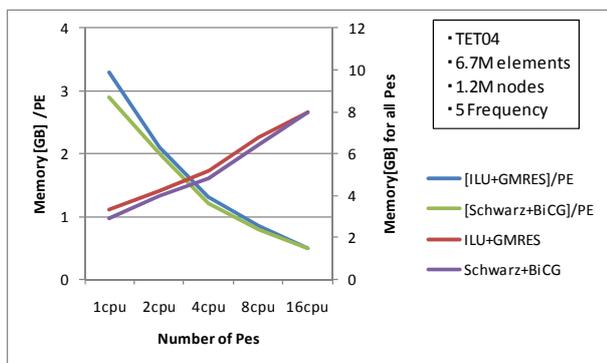


図 25 全プロセスと各プロセスの使用記憶容量

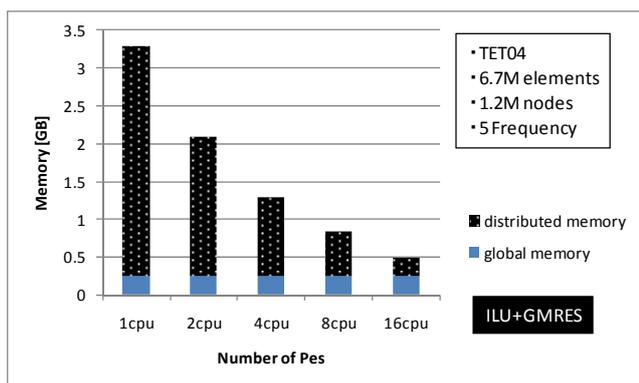


図 26 各プロセスの使用記憶容量

1/100 とした中心角が 3.6° の扇形を底面とする柱である。両者の領域の半径は 1 : 10 であり、両者の領域の体積は等しい。従って、同じ大きさのメッシュを作成すると同じ要素数・節点数の問題になるように設定した。音源は、いずれも青い領域の軸にあたる直線上の節点に対して音源を設定している。また、境界条件は無反射境界を利用している。

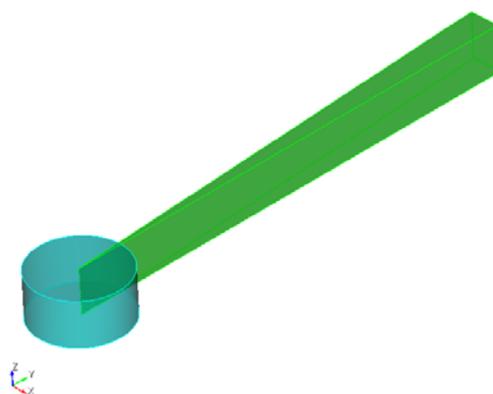


図 27 2つの解析対象

3.7.3. メッシュ情報

次のような要素数と節点数となるメッシュを作成して、解析を実施した。

表 11 2つのケースの要素数と節点数

	要素数	節点数
cylinder	1,023,207	180,113
1/100 sector	966,217	179,584

3.7. 細長い領域に対する反復法の収束性

3.7.1. 目的

Advance/FrontNoise は、周波数領域の解析における複素数の連立方程式の解法（以下、ソルバと呼ぶ）には、反復法を利用している。アスペクト比が 1 に近い領域と、アスペクト比が大きく細長い領域に関し、その反復法の収束性について確認した。

3.7.2. 解析条件

下図において、青い領域（以下、「cylinder」と呼ぶ）と緑の領域（以下、「1/100 sector」と呼ぶ）の2つの計算対象に対するソルバーの収束性について確認した。後者については、角度を全周の

3.7.4. ソルバーの収束状況

収束状況を示す。

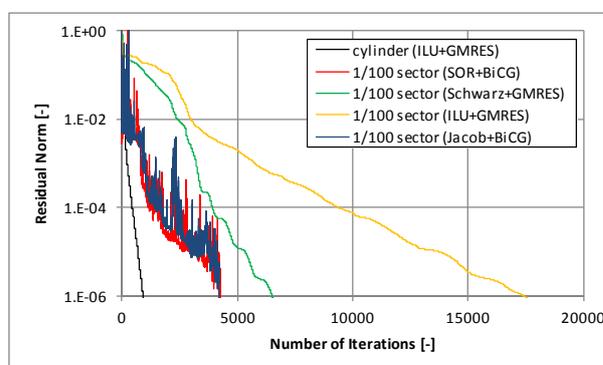


図 28 ソルバーの収束性

ここで、cylinder については、ILU を前処理とする GMRES 法を利用した。また、1/100 sector に

については、ILU を前処理とする GMRES 法、および、その他の手法に関する収束性も確認し、それぞれの収束状況を示した。

3.7.5. 考察

予想通り、cylinder の方が収束は速い。一方、1/100 sector の収束性の収束が遅いが、発散の傾向は全く見られない。また、他の反復法を利用することで、収束が遅くなる状況がある程度回避できる場合もあることが分かった。従って、適切な前処理と反復法を利用することで、細長い領域に対しても本ソフトウェアは利用可能であると考えられる。

4. 大規模解析事例

4.1. 数千万要素の解析

4.1.1. 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。

4.1.2. 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。

表 12 検証例題の規模

No.	要素数	節点数	自由度
①	6,000,000	1,030,301	2,060,602
②	12,002,256	2,048,383	4,096,766
③	23,665,872	4,019,679	8,039,358
④	48,000,000	8,120,601	16,241,202
⑤	58,802,064	9,938,375	19,876,750
⑥	71,114,112	12,008,989	24,017,978
⑦	82,944,000	13,997,521	27,995,042

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。

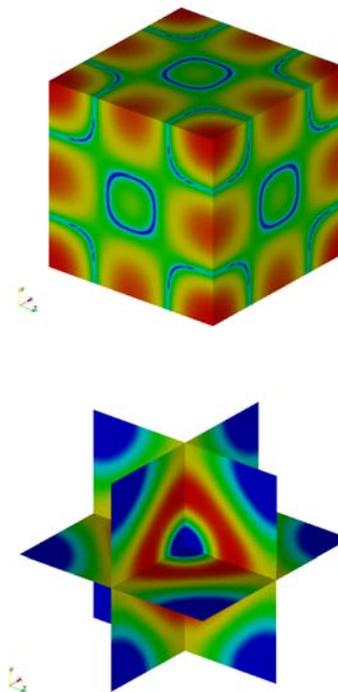


図 29 単極子の結果（左；立方体表面の速度ポテンシャル分布、右；中央断面の音圧レベル）

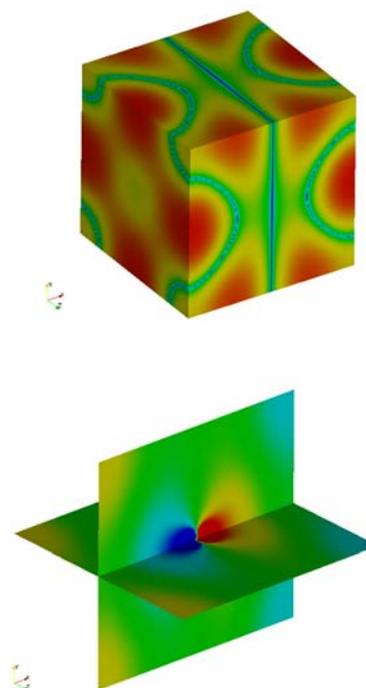


図 30 双極子の結果（左；立方体表面の速度ポ

テンシヤル分布、右；中央断面の音圧レベル)

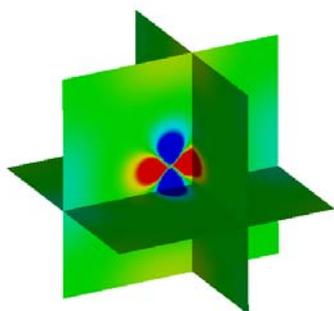
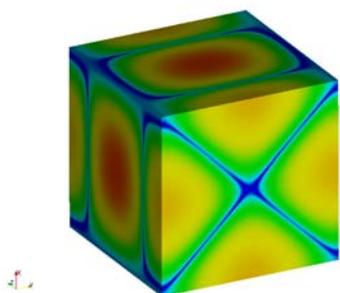


図 31 四重極の結果（左；立方体表面の速度ポテンシヤル分布、右；中央断面の音圧レベル)

4.1.3. 処理時間

本検証では、3節に示した計算機の16CPUを利用して実施した。その経過時間および収束までに要する反復回数を示す。経過時間は、処理が開始されてから終了するまでの実時間を計測している。

表 13 16CPU における処理時間

単位：秒

自由度	経過時間 [sec]	ソルバー [sec]	入出力 [sec]	反復数 [回]
1,000,000	118.00	43.76	74.25	551
2,000,000	225.00	83.86	141.14	547
4,000,000	608.00	334.29	273.71	959
8,000,000	1,830.00	1,276.31	553.69	1,759
10,000,000	3,150.00	2,114.36	1,035.64	1,204
12,000,000	5,030.00	3,794.80	1,235.20	2,488
14,000,000	6,570.00	5,138.70	1,431.30	1,908

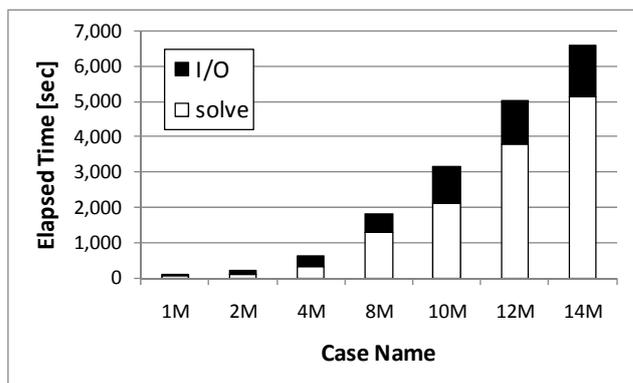


図 32 解析規模と経過時間（16CPU）

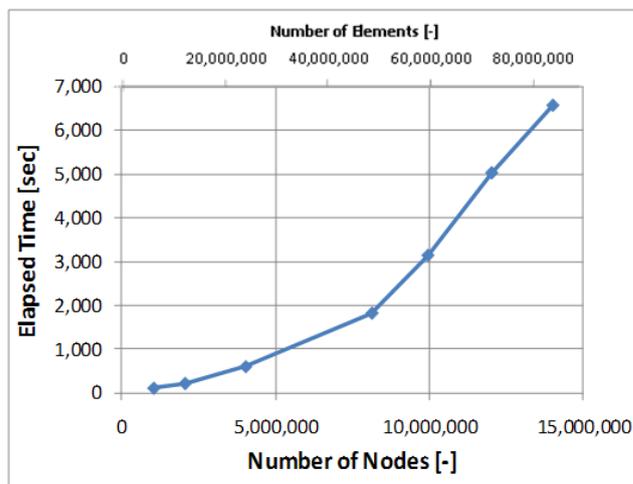


図 33 節点数と処理時間

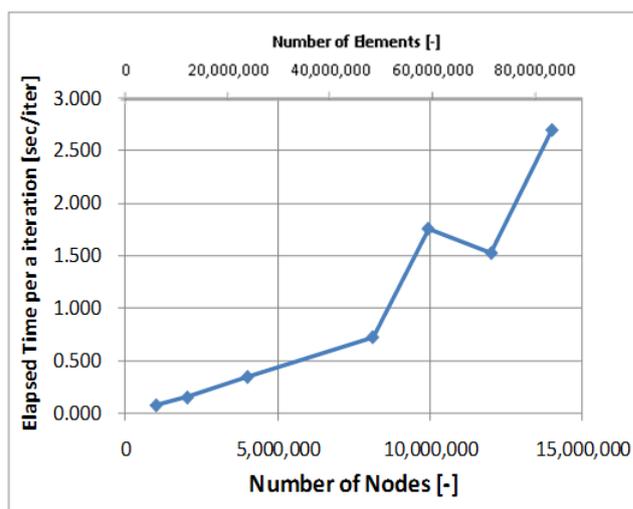


図 34 節点数と1反復当たりの処理時間

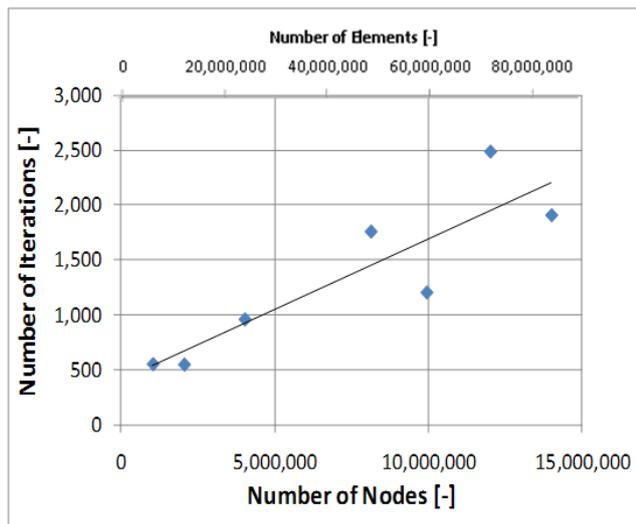


図 35 節点数と反復回数

4.1.4. 使用記憶容量

16CPU を利用した場合の使用記憶容量を下記に示す。ここで利用した 16CPU で 64GB の使用記憶容量の計算機では、要素数 82,944,000、節点数 13,997,521、自由度数 27,995,042 のモデルが実行できた。使用記憶容量については、下記のグラフにより容易に見積もることができる。また、1CPU における使用記憶容量については、6 節の内容から見積もることができる。

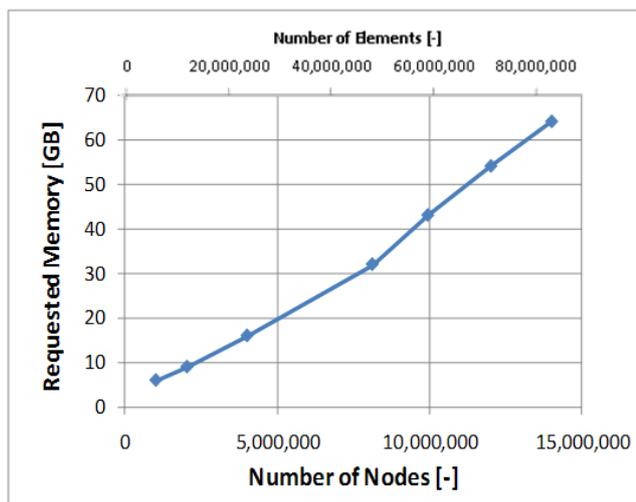


図 36 使用記憶容量 (16CPU 利用時)

4.2. 数億要素の大規模解析

4.2.1. 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。

4.2.2. 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 14 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

4.2.3. 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。

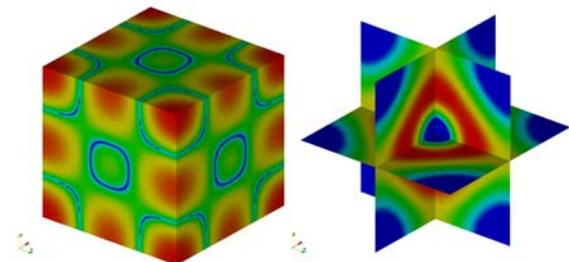


図 37 単極子の結果 (左; 立方体表面の速度ポテンシャル分布、右; 中央断面の音圧レベル)

表 15 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

4.2.4. 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。

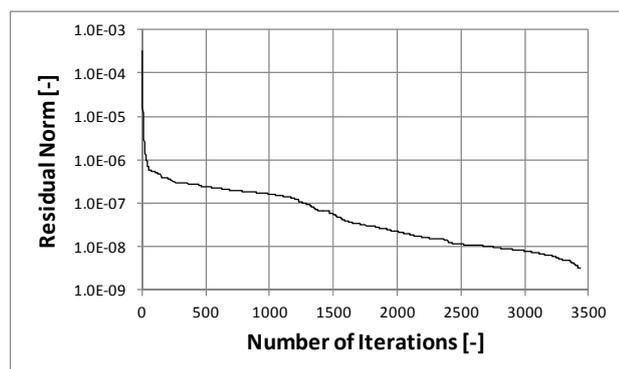


図 38 収束履歴 (1.6 億要素)

4.2.5. 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。

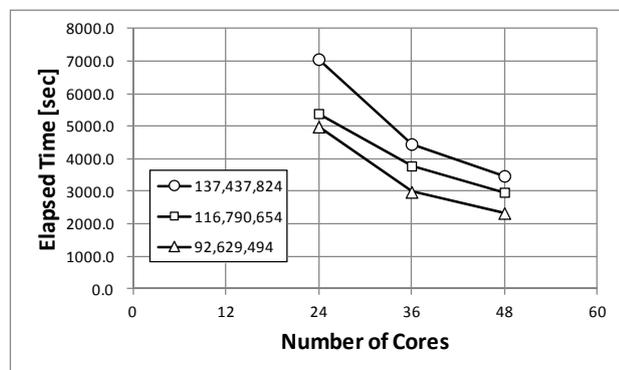


図 39 並列性能 (数字は要素数)

4.2.6. 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、図 40 と図 41 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、△印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。

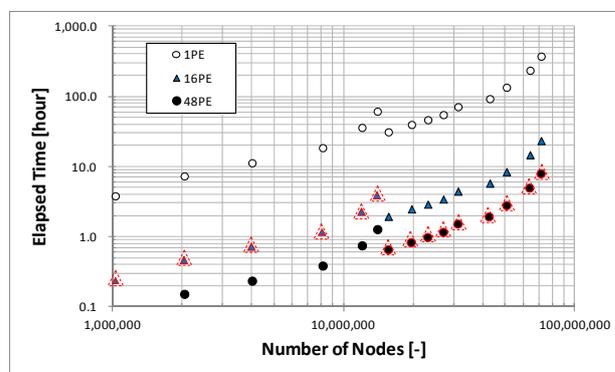


図 40 節点数と処理速度

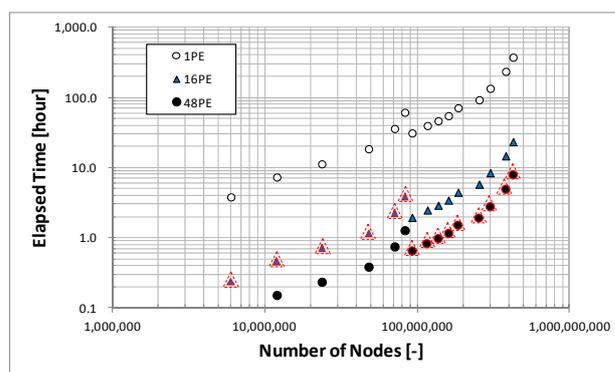


図 41 要素数と処理速度

メモリについては、図 42 と図 43 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△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。

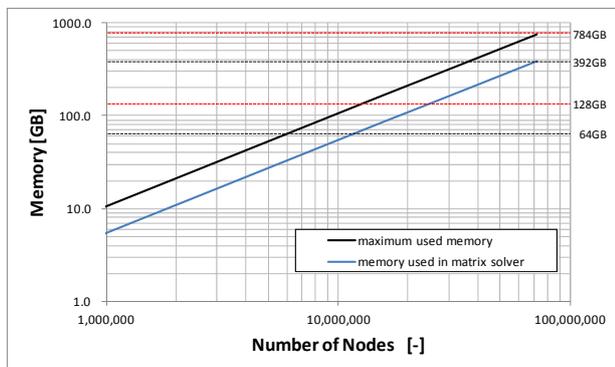


図 42 節点数と使用記憶容量

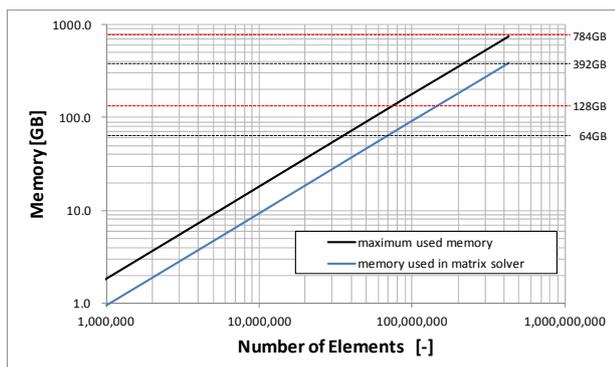


図 43 要素数と使用記憶容量

5. 解析事例

5.1. 単純拡張管モデル

5.1.1. 解析条件



図 44 単純拡張管モデル
(黒丸は透過損失測定点を示す)

上記単純拡張管モデルについて、左側の管先端から音が入力する場合の数値音響解析を行い、サイレンサーとしての性能を解析解と実機を用いて行った実験値と比較する。さらに、ここで得られた結果と、流体計算を実施して得られた定常流れを音響解析に取り込み得られた結果の比較を行う。

境界条件として、粒子速度 $= \partial \tilde{\phi}(x) / \partial n = 1.0 \times 10^{-3}$ を与えた。この条件は、入り口において、それぞれの周波数 ω に対して $v(x, t) = 1.0 \times 10^3 e^{i\omega t} [m/s]$ の振幅を与えていることになるが、本計算では、透過損失を評価するため、ここで与える境界条件の絶対値は無関係となり、ここでは、 $\alpha(x) = 0$ として、 $\partial \tilde{\phi}(x) / \partial n$ のみに値を与えることに意味がある。粒子速度ではなく、圧力の振動で与える場合には、 $\partial \tilde{\phi}(x) / \partial n$ の代わりに $\tilde{\phi}(x)$ に値を与えればいいが、本計算では、どちらの条件も等価と考え、粒子速度に対する境界条件とした。また、右側の管の先端出口面に対しては、ダクト開口端の放射インピーダンス z を与える[1]。

$$z = \rho c \zeta_r = \rho c (\theta_r + i \chi_r) = \rho c \left(1 - \frac{J_m(2ka)}{ka} + i \frac{H_m(2ka)}{ka} \right) \quad (1)$$

ここで、 $J_m(\cdot)$ と $H_m(\cdot)$ はベッセル関数、シュトルーベ関数、また

$$\theta_r \approx \frac{1}{2} (ka)^2, \quad \chi_r \approx \frac{8}{3\pi} ka \quad (ka < 0.6) \quad (2)$$

である。次に、開口端の放射インピーダンス z を境界条件として与える方法について説明する。一般的に、物理的に与えられるインピーダンス z は、圧力 P と速度 v を用いて

$$z = \frac{P}{v} \quad (3)$$

である。壁に対して normal 方向の成分が有効であるため、 n を壁での法線ベクトルとして、

$$z = \frac{P(x,t)}{n \cdot v(x,t)} = \frac{-\rho \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t}}{n \cdot \text{grad}(\phi(x,t))} = \frac{-\rho \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t}}{\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial n}} \quad (4)$$

が成り立つ。ここで、Fourier 変換の定義式を利用すると

$$\sum_{\nu=1,\infty} z \frac{\partial \tilde{\phi}(x)}{\partial n} e^{-i\omega t} = \sum_{\nu=1,\infty} i\omega \rho \tilde{\phi}(x) e^{-i\omega t} \quad (5)$$

となる。従って、周波数成分毎に、

$$z \frac{\partial \tilde{\phi}(x)}{\partial n} = i\omega \rho \tilde{\phi}(x) \quad (6)$$

が成り立ち、境界条件の表現で記述すると、

$$\alpha(x) = i\omega \rho, \quad \beta(x) = -z, \quad f(x) = 0 \quad (7)$$

となる。

また、入口と出口以外の壁面については粒子速度が 0 の境界条件を与えた。すなわち、 $\partial \tilde{\phi}(x) / \partial n = 0$ とした (インピーダンス境界の $Z = \infty$ に相当する)。

計算条件は、表 16 を用い、計算は、25[Hz] から 2000[Hz]まで 25[Hz]毎に行う。計算に用いた単純拡張管モデルの要素は 32184 である。

表 16 音響解析パラメータ

気温 T	22[K]
密度 ρ	$\rho = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15 + T} [\text{kg}/\text{m}^3]$
音速 c	$c = 331.5 + 0.61 \times T [\text{m}/\text{sec}]$

5.1.2. 解析結果

単純拡張管内に流れのないケースについて、数値実験により得られた透過損失、1次元解析解による透過損失、実機を用いた実験結果より得られた透過損失を図 45 に示す。点曲線が数値実験結果、曲線が 1次元理論値、振動している曲線が実機を用いた実験結果を示している。横軸は周波数 0[Hz]-2000[Hz]、縦軸は透過損失[dB]である。透

過損失は、サイレンサー等の消音性能を検討するために欠かせない量で、値が大きい程その周波数における消音性能が高いということを示す。図 45 を見ると、1000[Hz]辺りまでは概ね数値実験、1次元理論値、実機実験とも一致しているが、それ以上の周波数ではずれが大きくなっていく結果となっている。理由は、実機実験においては周波数が高くなるにつれて正確な測定が困難となってくる、1次元理論値においては周波数が高くなる程音波の波面が平面では表せなくなるといったことが考えられる。

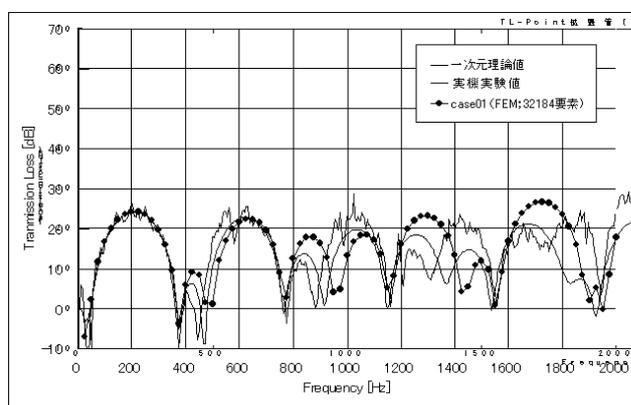


図 45 透過損失比較

次に、単純拡張管内に空気の流れがある場合についての透過損失と、流れ場がない場合の透過損失の比較を行う。まず最初に単純拡張管内の流れ場を流体計算により求め、その流れ場を音響解析に取り込み、数値実験を行った。流体計算により得られた単純拡張管内の速度場を図 46 に示す。入力速度を 30[m/s]として定常状態になるまで計算を行っている。

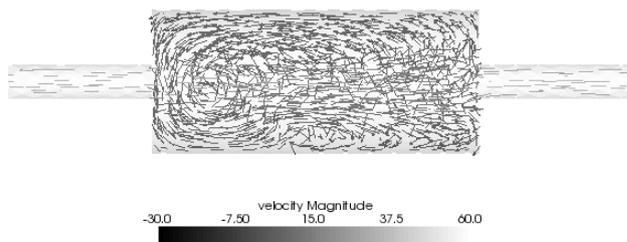


図 46 流体計算により得られた速度場 (単位は[m/s])

単純拡張管内に複雑な流れが発生していることが良く分かる、また細管軸付近程流れが早くなる構造があることが分かる。この流れを取り込み、数値実験を行い得られた結果と、流れなしの場合の結果を比較したものを図 47 に示す。

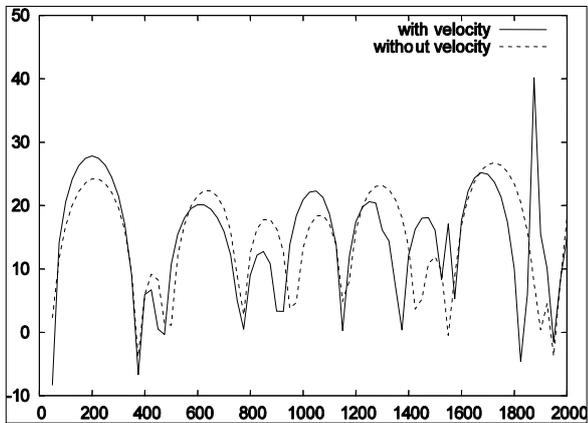


図 47 透過損失比較

曲線が速度場ありの結果、破曲線が速度場なしの結果を示している。速度場があると、透過損失値が高くなり消音性能の上がる周波数が高周波数領域程違いが大きいことが分かる。高周波数領域における性能評価については、30[m/s]程度の流れが存在する場合には、その影響を考慮することが重要なケースがあることが分かった。

5.2. 空調機コンプレッサの室内騒音評価

5.2.1. 解析概要

空調機では、コンプレッサーを音源としてその振動が空調機管内を伝播し室内に到達することが原因で室内の騒音が発生することが知られている。

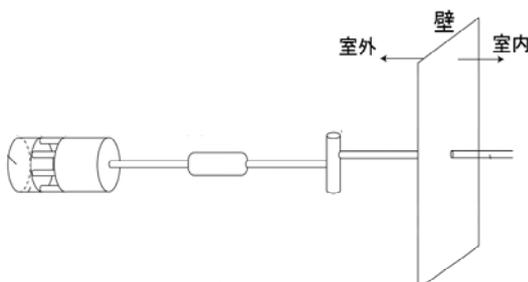


図 48 モデル概観 (左から、コンプレッサー、マフラー、四方弁、壁という順で配置されている)

この、空調機による室内騒音を数値音響解析に

より求めた結果と、実機を用いて測定した実験値との比較を行う。

数値音響解析は、3段階に分けて実施する。まず、音が伝播する経路の機器形状を3次的に詳細にモデル化することにより、その伝播経路の音響特性を求め、次に室内にある空調機管内の音響解析の結果を用いて、管の内面から管の表面への音響伝播を構造計算により評価し、最後に管表面から室内への音響放射を解析解により求め、室内の騒音レベルを算出する。

5.2.2. 音響解析の手法

以下に、解析対称となる機器の形状モデルを示す。なお、マフラーについては3つの形状についての性能評価を行うこととする。また、各機器の要素数を以下に示す。

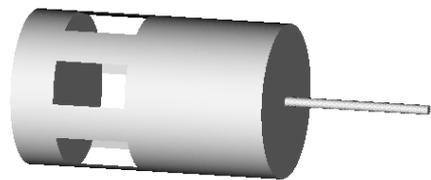


図 49 コンプレッサー



図 50 マフラー1



図 51 マフラー2

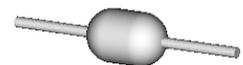


図 52 マフラー3

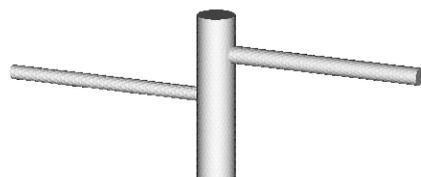


図 53 四方弁

表 17 機器の要素サイズ

機器名	要素数
コンプレッサー	726459
マフラー1	65021
マフラー2	282183
マフラー3	232905
四方弁	24333

これら個別の機器に関して透過損失を求め、得られた透過損失を足し合わせるにより、全体の音響特性を取得し、その結果を用いて実験により得られた入力音が系全体を通過した際の音圧値を求める。個別の機器の透過損失の計算については、入力はホワイトノイズとし、出口は単純拡張管モデルで用いたダクト開口端の放射インピーダンスを用いることとする。以下に、実験により得られた、ガス圧脈動データと、それをフーリエ変換したものを示す。

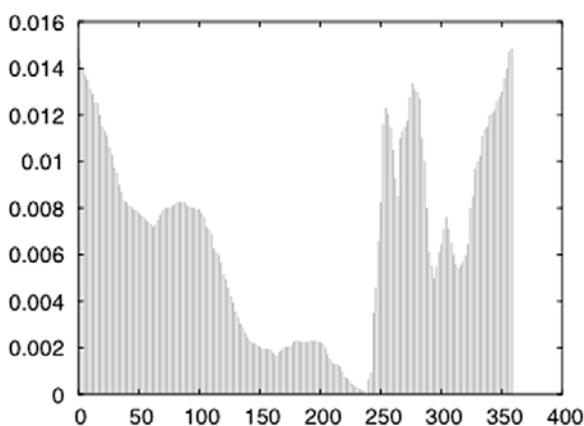


図 54 実験により得られた、ガス圧脈動データ
(縦軸：音圧[MPa]、横軸：角度[度](時間))

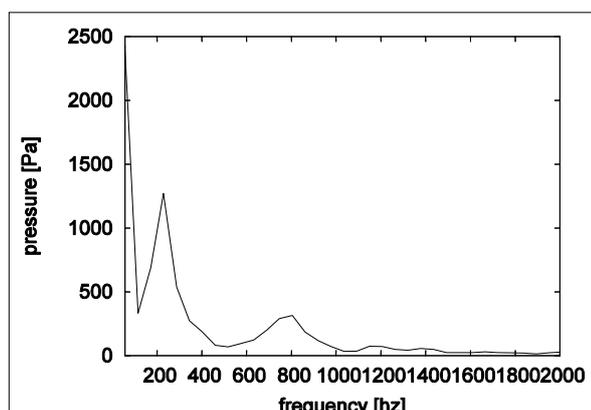


図 55 ガス圧脈動データのフーリエ変換結果

5.2.3. 構造解析の手法

室内に存在する管の振動特性を取得するために、構造解析を行う。管の内部に適当な圧力を加え、管の外壁がどのように振動するかが分かれば、内部の音圧変動の管外部への伝播を計算することが可能となる。

管の長さを内部の振動伝播に対して十分に長くとり（反射の影響を考慮しなくていい範囲）、中央部に単位圧力を与えて、管の外壁の振動を解析する。図 56 に示すように、解析形状は、管の1/4モデルを利用し、六面体2次要素を用い、厚み方向に7分割し7要素を設定した。また、境界条件については、1/4モデルであるため、対称の条件を設定した。

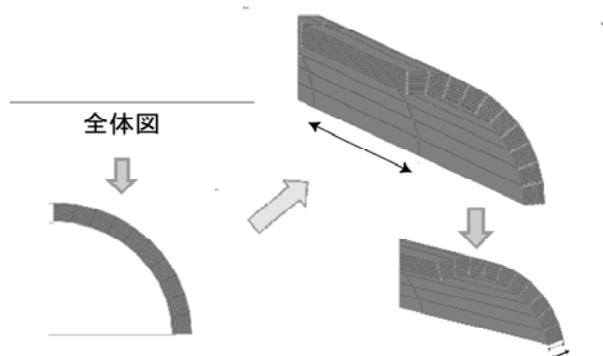


図 56 左上：直管モデル全体図、左下：断面図、
右上：長さ方向の1要素のサイズ=10[mm]、
右下：厚さ方向の1要素のサイズ=0.1[mm]

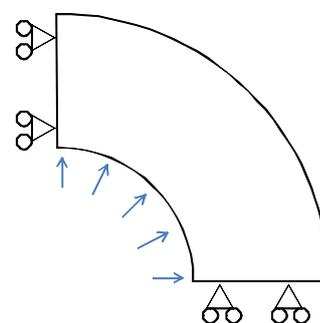


図 57 管壁伝播解析の境界条件

5.2.4. 解析解を用いた評価

管壁より離れた位置での音圧の求め方を以下に示す。

管壁より $r(=0.2[\text{m}])$ 離れた測定点での圧力は

$$P \approx \rho c \frac{a}{r} V_a \tag{8}$$

と近似できる。ここで、 a は管の半径(0.00952[m])、 V_a は管表面の振動速度、 c は音速である。また、管内の圧力分布は、

$$P_{in}(x,t) = |P_{in}^0| \exp(2\pi i f(t - x/c_L)) \tag{9}$$

と表すことができる。 $|P_{in}^0|$ は管へ入力する音の圧力振幅、 c_L は管内の音速である。これに対して、管の外側の変位は

$$U_{out} = U_{out}^0 \frac{|P_{in}^0|}{P_{1atm}} \exp(2\pi i f t) \tag{10}$$

と表すことができる。 U_{out}^0 は最大変位である。従って、管表面の振動速度は以下ようになる。

$$V_{out} = 2\pi i f U_{out}^0 \frac{|P_{in}^0|}{P_{1atm}} \exp(2\pi i f t) \tag{11}$$

この式と式(8)を利用して、観測点から見たときの管の外壁を積分すると、観測点の音圧は

$$\begin{aligned} P(t) &= \int_{-L}^{+L} \rho c \frac{a}{r} V_{out} \exp(2\pi i f(t - x/c)) \frac{2\pi i dx}{4\pi i} \\ &= \int_{-L}^{+L} \rho c \frac{1}{2r} 2\pi i f U_a \frac{|P_{in}^0|}{P_{1atm}} \exp(2\pi i f(t - x/c_L)) \exp(2\pi i f(t - x/c)) dx \end{aligned} \tag{12}$$

となる。ここで、 L は測定点から壁までの距離である。また、音圧レベルは

$$SPL = 20 \log \frac{|P|}{20 \times 10^{-6} [Pa]} \tag{13}$$

で計算する。

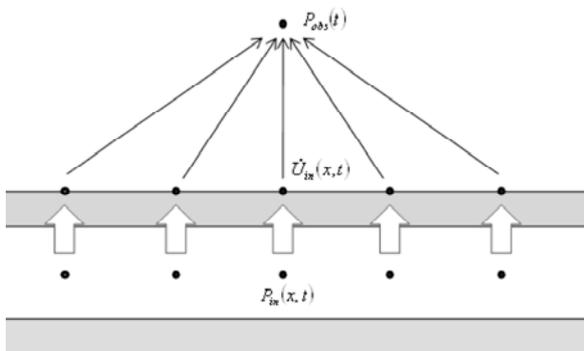


図 58 解析手法のイメージ図

5.2.5. 音響解析の実施

まず、個々の部品機器における透過損失の値を以下に示す。

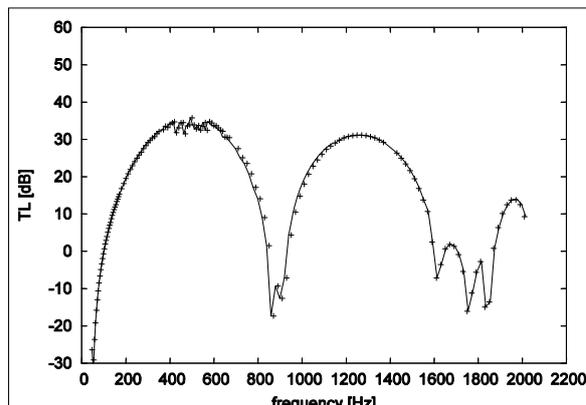


図 59 コンプレッサーの音響特性
(横軸：周波数、縦軸：透過損失)

図 59 は、コンプレッサーの透過損失の周波数依存性を示しており、500[Hz]と 1300[Hz]を中心に大きなピークが存在し、900[Hz]付近では透過損失がマイナスになり消音効果が 0 になる。また、1800[Hz]以上の高周波数領域においても、透過損失が小さく消音効果が小さいという特徴がある。

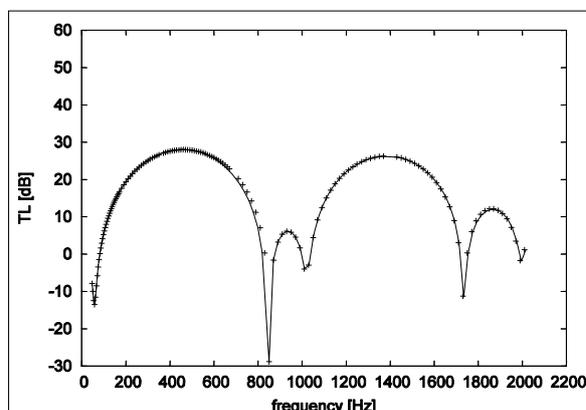


図 60 マフラー1の音響特性
(横軸：周波数、縦軸：透過損失)

図 60 は、マフラー1の透過損失の周波数依存性を示している。コンプレッサーのものと分布が似ており、900[Hz]近辺で消音効果がなくなる。このような特徴から、マフラー1とコンプレッサーを組み合わせる場合、900[Hz]近辺の音は減衰されることが予想される。

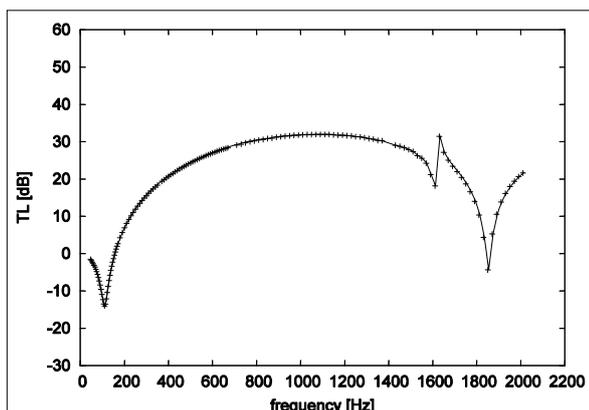


図 61 マフラー2の音響特性
(横軸：周波数、縦軸：透過損失)

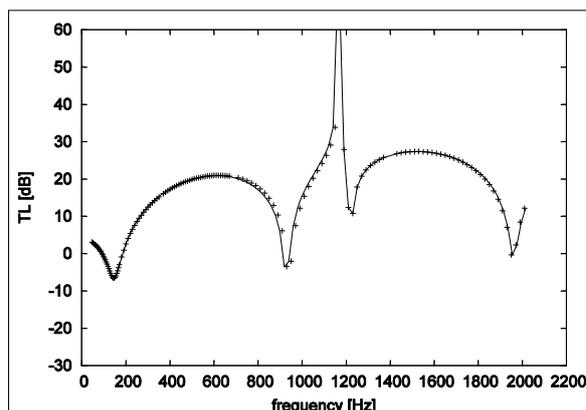


図 63 四方弁の音響特性
(横軸：周波数、縦軸：透過損失)

図 61 は、マフラー2の透過損失の周波数依存性を示している。マフラー1とは異なり、広がった分布を持っており、マフラー1に比べてより広い周波数帯域に対して消音性能を持っていることが分かる。1600[Hz]辺りで突然消音性能が良くなることと、1850[Hz]辺りに極端に消音性能が悪くなる箇所があるのが特徴である。

図 63 は、四方弁の透過損失の周波数依存性を示している。他の部品機器と異なり、1200[Hz]辺りに非常に大きな値を持ち、それを挟むようにして、600[Hz]と、1600[Hz]周辺に高い値を持つのが特徴である。

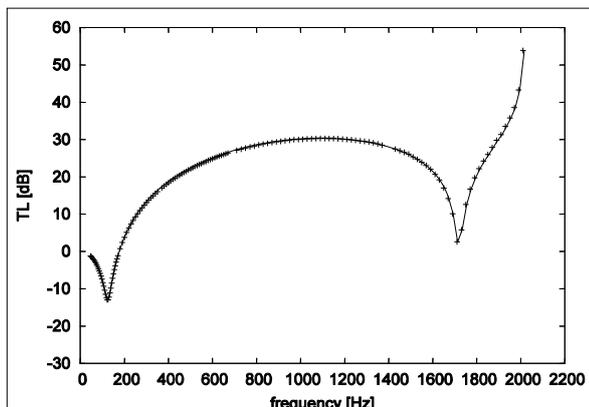


図 62 マフラー3の音響特性
(横軸：周波数、縦軸：透過損失)

図 62 は、マフラー3の透過損失の周波数依存性を示している。マフラー2とよく似た分布を持っており、広い周波数帯域に対して消音性能を持っており、マフラー2よりも1800[Hz]以上の帯域で高い消音性能を持っているのが特徴となっている。

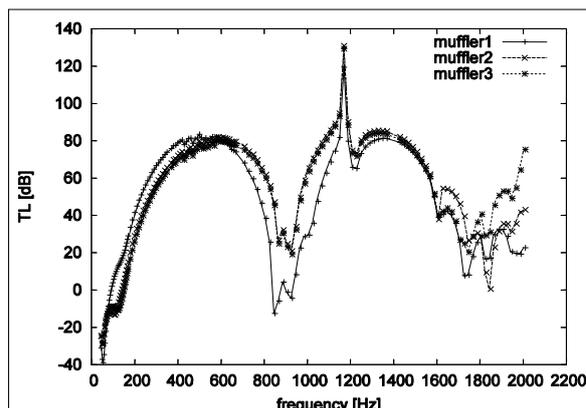


図 64 マフラーの違いによる、装置全体の音響特性(横軸：周波数、縦軸：透過損失)

図 64 は、図 48 に示したモデル全体の透過損失の周波数依存性をマフラー毎に示している。モデル全体の消音性能が一番高いのは、マフラー3を用いた場合となっていることが分かる。このモデル全体の透過損失を用いて、実験により得られたガス圧脈動データの音が全部品機器を通過した際の四方弁出口における音圧値を図 65 に示す。

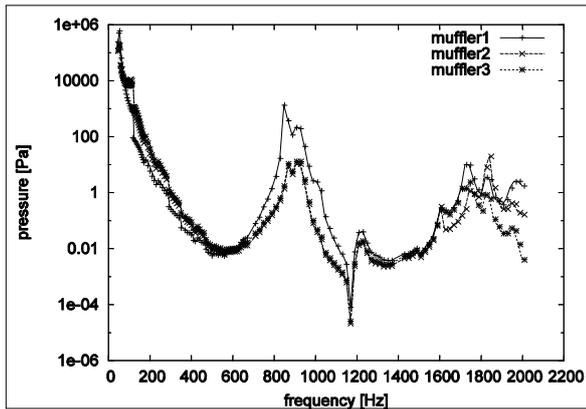


図 65 実験データを入力値とした場合の四方弁出口における音圧値

図 64 から分かるように、マフラー3を使用した場合に最も高い消音効果を得ることができる。

5.2.6. 構造解析の実施

直管の内壁に加えた圧力の中心点の外壁における振動結果を図 66 に示す。これより、直管の外壁の振動は2つの振動を合わせたモードになっていることが分かる。大きい振動は、圧力の入力波形そのもので、小さい振動が、直管半径方向の振動を示していると考えられる。この半径方向のモードの振動数は、17,200[Hz]であり、可聴域を超えている。確認のために固有値解析を行ったところ、振動数の小さい方から44番目のモードに17200[Hz]の振動があることを確認した。よって、直管半径方向の振動モードは今回の解析では考慮なくていいことが分かった。図 67 に17200[Hz]の固有振動モードを示す。

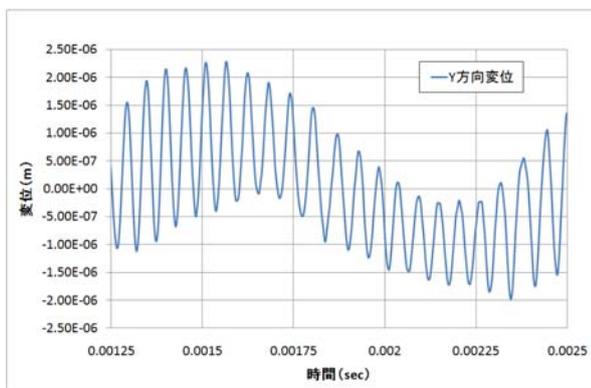


図 66 外壁変位の時間依存性



図 67 直管の半径方向の振動モード (17200[Hz])

結果として、直管の振動速度は、解析対象とする音波そのものの振動速度に構造解析より得られた最大変位を掛けた値となる。

5.2.7. 解析解を用いた評価の実施

四方弁の出口から先の7[m]の細い管の数値音響解析の実施は収束を得ることが難しいことが分かっている。また、剛壁の直管では、音響的な透過損失は0[dB]となるため、計測点近辺の内壁の振動の圧力を四方弁の出口圧力と同じとみなして計算結果を音響計算に適用する。

図 65 の解析結果から、マフラー1を用いた場合における四方弁出口の圧力は、57.5[Hz]～100[Hz]では 3.0×10^4 [Pa] であり、1[kHz]付近では 1.0×10^2 [Pa] である。マフラー2を用いた場合には、57.5[Hz]～100[Hz]では 3.0×10^4 [Pa] であり、1[kHz]付近では 1.0×10^1 [Pa] である。また、マフラー3を用いた場合では、57.5[Hz]～100[Hz]では 3.0×10^4 [Pa] であり、1[kHz]付近では 1.0×10^1 [Pa] である。式(8)–(13)を用いて得られる、直管から0.2[m]離れた測定点における音圧レベル値を図 68 に示す。

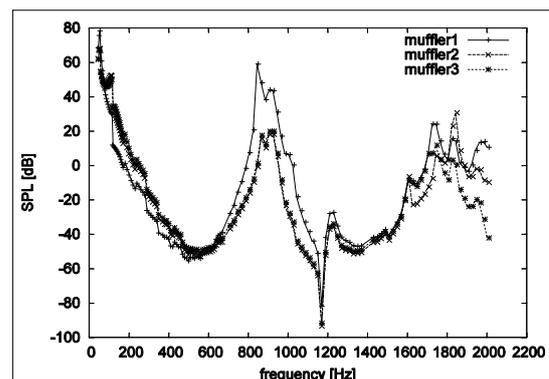


図 68 測定点での音圧レベル

実験により測定点で得られた音圧レベル値データは、マフラー1を用いた場合の結果のみが取得されており、52[Hz]において44[dB]、1[kHz]付近において20[dB]という値が得られている。図68のマフラー1の結果と比較してみると、同様の結果が数値実験によって得られていることが確認できる。

5.3. 建屋の環境騒音

5.3.1. 解析条件

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、四側面に、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、 ρc 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。

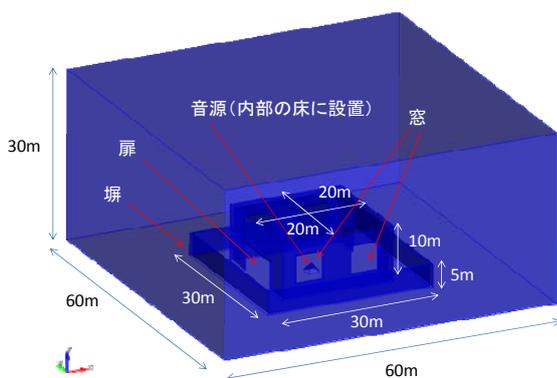


図 69 解析対象

表 18 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

5.3.2. 解析結果

ここまで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、 $1.0e-12$ である。

表 19 収束回数 (収束判定値: $1e-12$)

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

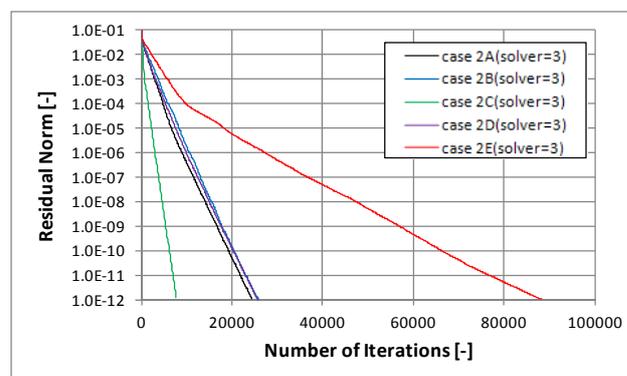


図 70 GMRES 法+Schwarz を利用した 5 ケースの収束履歴

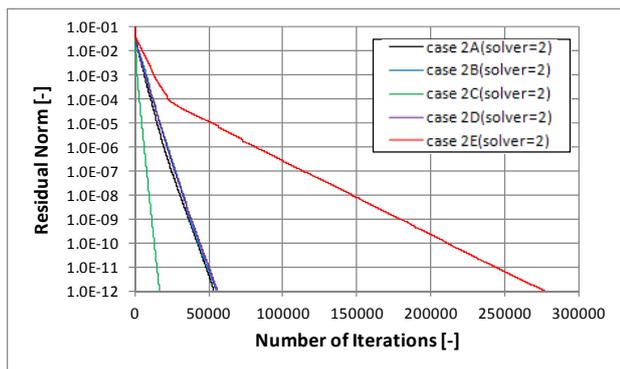


図 71 BiCGSTAB 法+SOR を利用した 5 ケースの収束履歴 (全体)

この収束状況から、窓とドアの小さいサイズのケースで最も収束が遅いことが分かる。これは、外部と内部のつながりが弱く、そのために収束に時間を要していると考えられる。また、C については、壁全体が吸音であるため、全体への影響が少なく、収束が速くなっている。

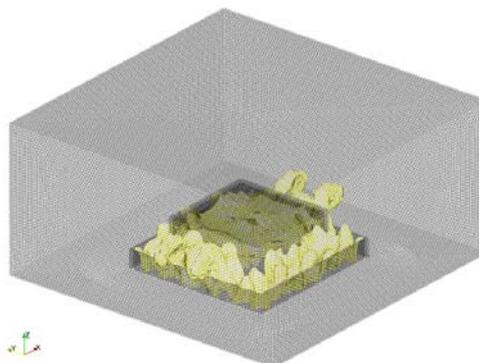


図 74 ケース 2C の結果

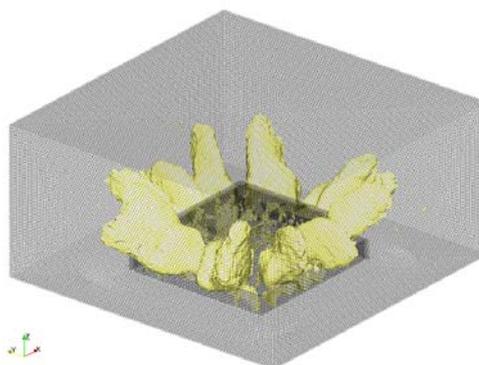


図 75 ケース 2D の結果

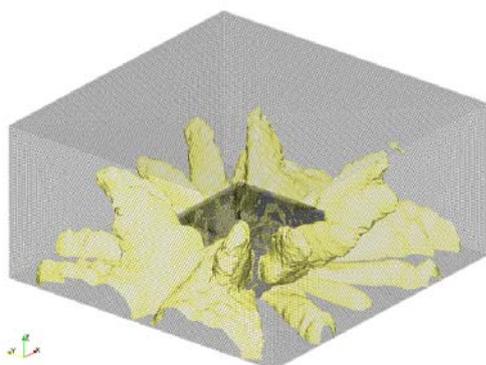


図 72 ケース 2A の結果

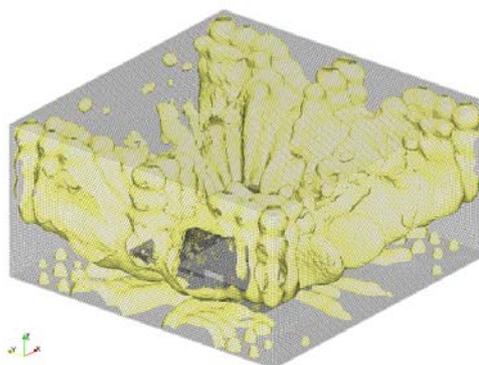


図 76 ケース 2E の結果

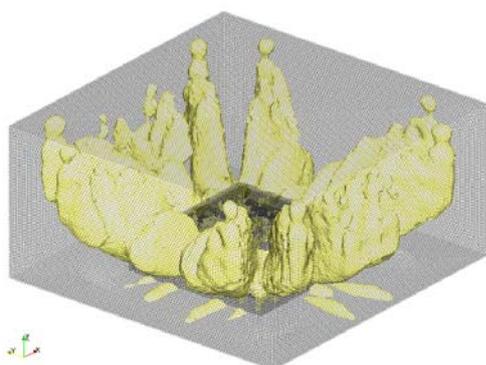


図 73 ケース 2B の結果

5.4. マフラー性能の形状依存性

5.4.1. 解析条件

本ケースは、マフラー性能の形状依存性の依存性を計算するための事例である。まず、下記の形状のマフラーの透過損失を計算する。そのために、Advance/FrontNoise を実行して、透過損失ツールにより透過損失を計算する。ここでは、800Hz 付近での共鳴を回避するための対策を検討している状況を想定する。

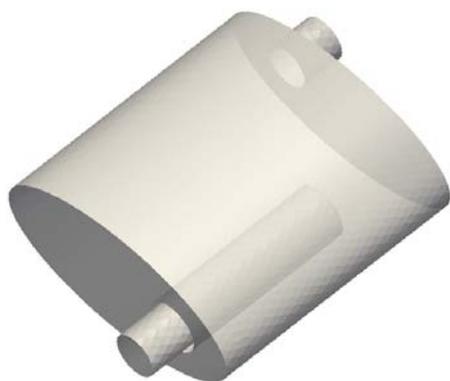


図 77 マフラーの基本形状

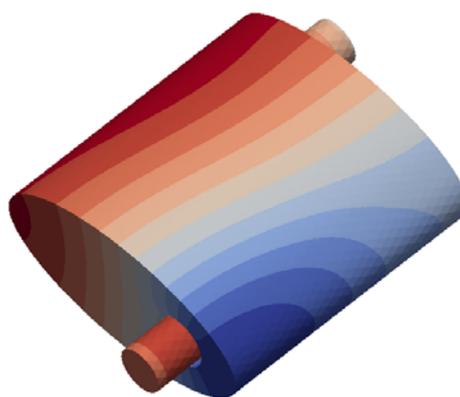


図 79 音響ポテンシャル (600Hz)

5.4.2. 透過損失の算出

求められた透過損失は次の通りとなった。縦軸が透過損失であり、値が高いほど、消音器で吸収されることを示している。しかし、値が低い部分では、共鳴等により音響振動が発生する可能性がある。以下では、ここで、音のエネルギーが増幅した 600Hz と 780Hz に着目する。

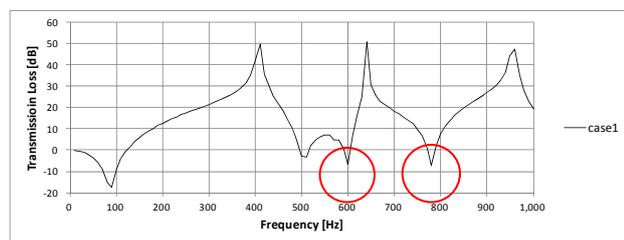


図 78 マフラーの基本形状の透過損失

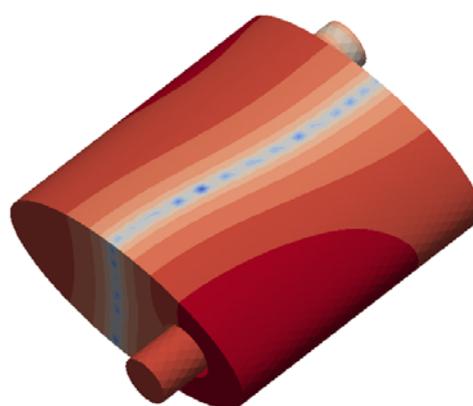


図 80 音圧レベル (600Hz)

5.4.3. 解析結果の可視化と対策

着目した 600Hz と 780Hz の音響ポテンシャルおよび音圧レベルを可視化してみる。ここでは、800Hz の共鳴を消すことのみを考える。通常、消音器では、流体の圧力損失はできるだけ小さくしたいため、流れに関係のないところで、対策をしたい。例えば、780Hz の左側の隅の波を邪魔して、共鳴をしないようにすることが考えられる。ただし、この対策は当然 600Hz の波には効かないはずである。

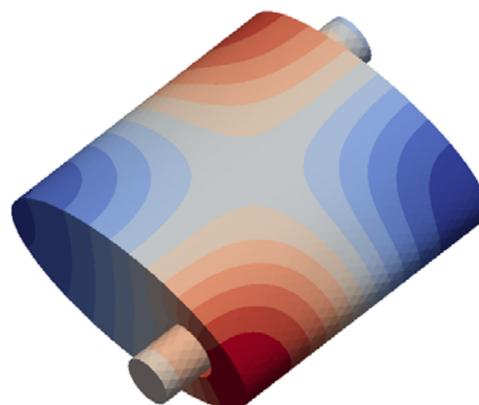


図 81 音響ポテンシャル (780Hz)

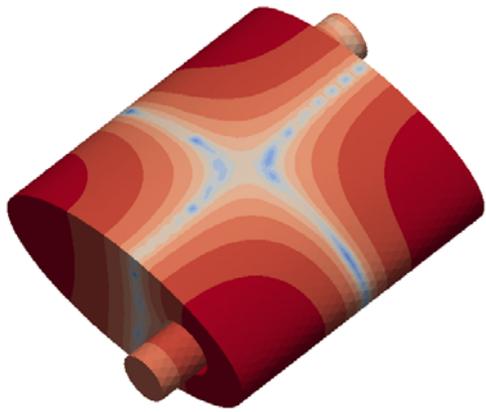


図 82 音圧レベル (780Hz)

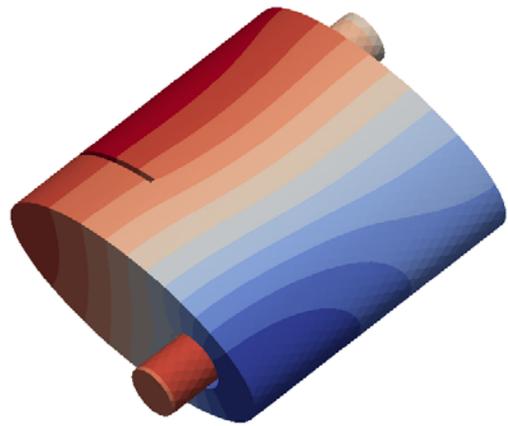


図 85 音響ポテンシャル (600Hz)

5.4.4. 新しいモデルの設定

対策を確認するためのモデルを作成する。ここでは、上記で検討したように縦板を設置する。



図 83 周波数 780Hz に対して対策したモデル

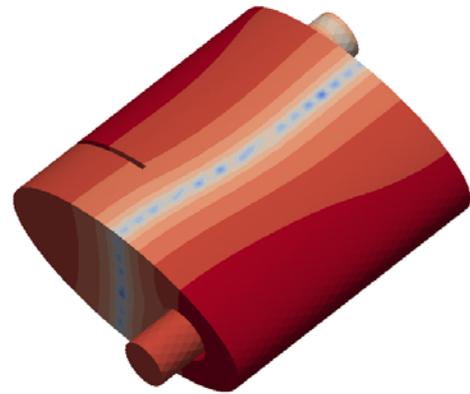


図 86 音圧レベル (600Hz)

5.4.5. 対策モデルの透過損失

対策したモデルに対して、求められた透過損失は次の通りとなった。予想通り、780Hz のピークはなくなり（シフトし）、600Hz のピークはなくならなかった（シフトしなかった）。

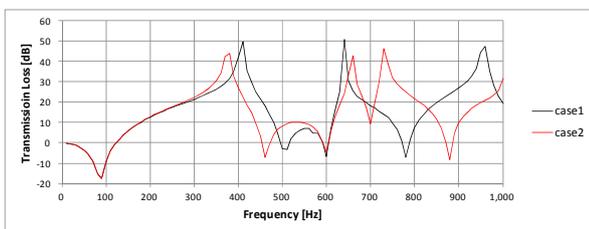


図 84 対策後の透過損失

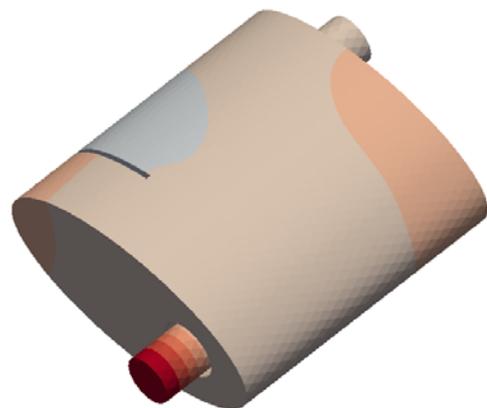


図 87 音響ポテンシャル (780Hz)

5.4.6. 対策モデルの可視化

対策を確認するため、音圧ポテンシャルと音圧レベルを可視化した。

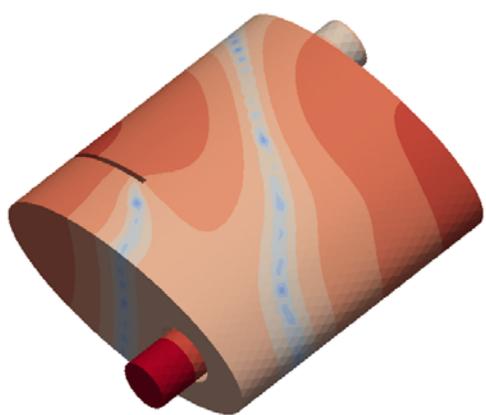


図 88 音圧レベル (780Hz)

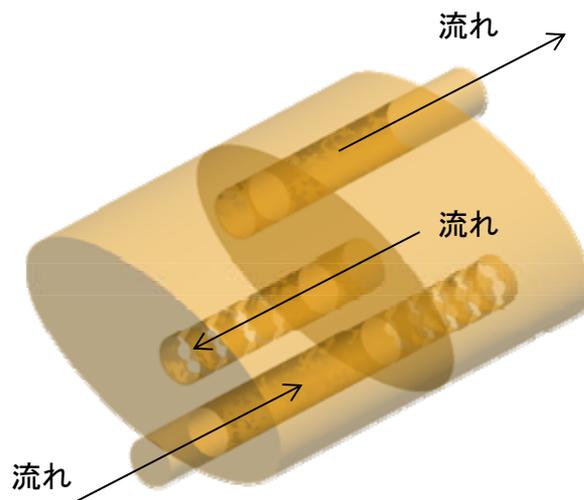


図 90 解析モデル

5.5. 流体音響連成

5.5.1. 解析モデル

流体音響解析の事例として、模擬的なマフラーの解析を実施した。これらの実施に関連するアルゴリズムは、[15][16][17]に基づいている。

解析モデルは下図の通りであり、図中の流れは左側から入り、右側に一度戻されてから左側の出口に向かう。いずれも、消音器内の流体の出口では、音の減衰効果を期待して、いずれもパンチングとなっている。

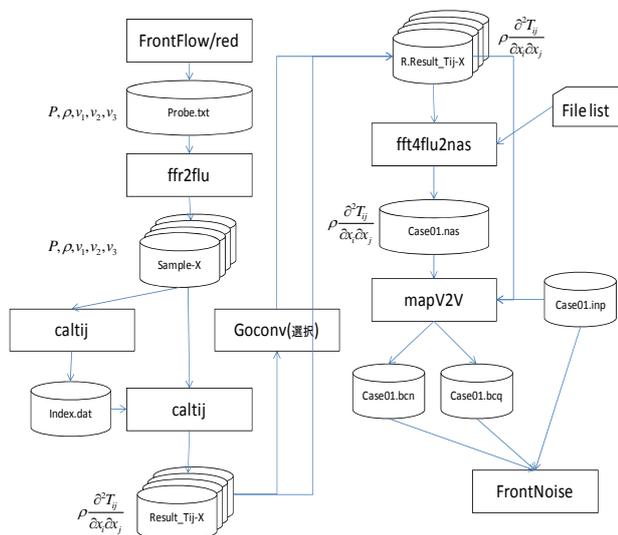


図 89 処理手順

表 20 解析条件

項目	内容
境界条件 (壁)	完全反射
境界条件 (入口音源)	入口からもマフラーの音源を与える。
音源 (パンチング周囲)	四重極音源
最大メッシュ幅	10mm
メッシュ数 (節点数)	500,000 節点
メッシュ数 (要素数)	4,000,000 要素
処理時間/周波数	約 10 分

5.5.2. 解析結果

次に、解析結果を示す。ここでは、流体解析を音源として、音響解析で求めることができた 500Hz および 2kHz の音圧レベルをコンタに表示している。ここでは、最大メッシュ幅を 10mm 程度としたため、最大で解析可能な周波数は、3kHz 程度と考えられる。さらに高い周波数の解析を実施したい場合には、メッシュを再作成する必要があることに注意する。

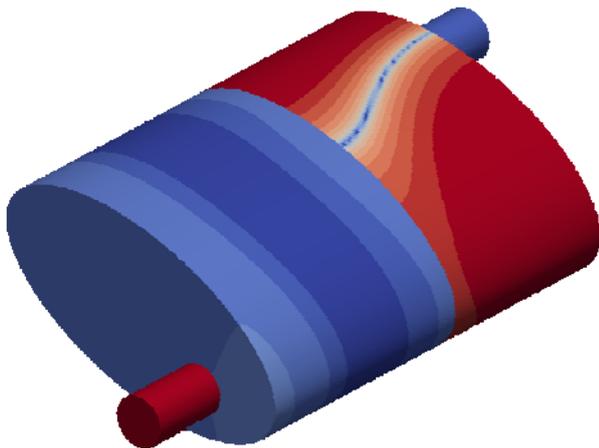


図 91 500Hz 音圧レベル (全体図)

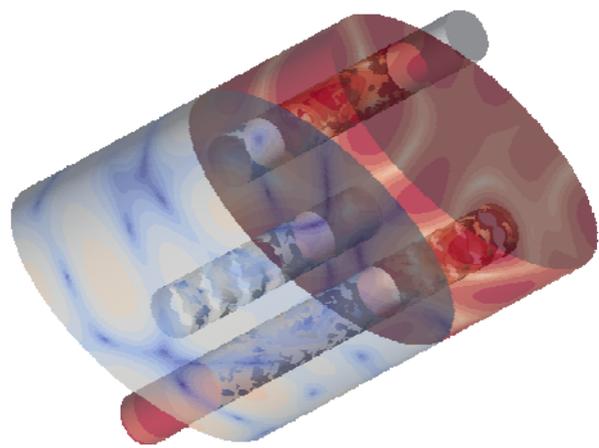


図 94 2kHz 音圧レベル (透視図)

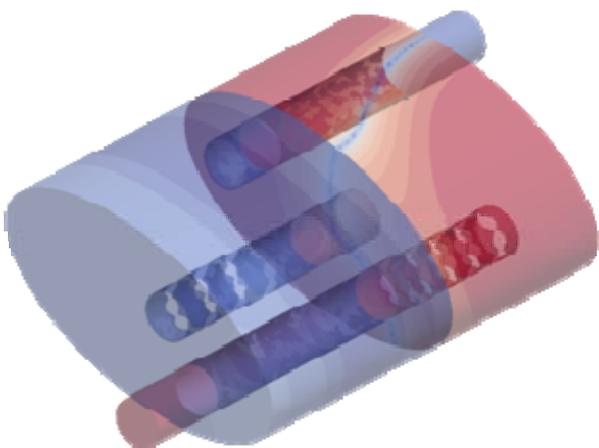


図 92 500Hz 音圧レベル (透視図)



図 93 2kHz 音圧レベル (全体図)

5.6. 構造音響連成

5.6.1. 解析モデル

構造音響解析の事例として、室内に振動する構造物（30cm×10cm×10cm の小さな箱）を机に置いたケースを想定した解析を実施した。目的は、構造物の振動が居室内に及ぼす騒音の影響を確認することである。この小さな箱については、構造解析ソフトで振動を求める計算を実施し、その結果を音響解析に利用するように設定した。室内の条件については、2 ケースの条件を適用した。1 つめは床を完全反射としたモデルであり、2 つめは床を完全吸収としたモデルである。また、2 つのケースとも共通に、室内に、壁、扉、台所、机、台等が設置されている。

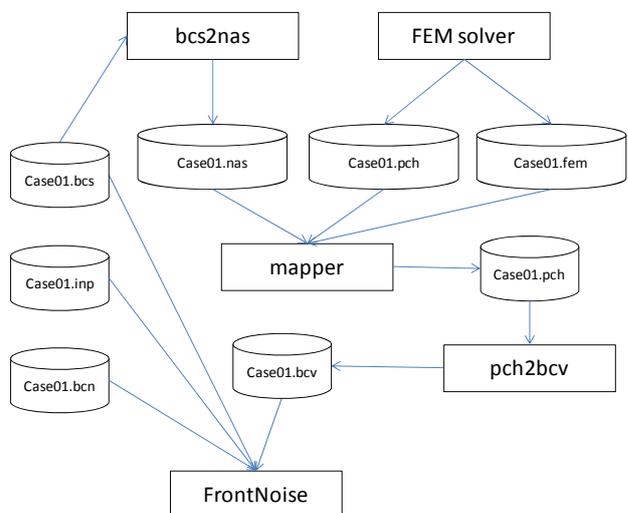


図 95 構造解析連成時のデータの流れ

5.6.2. 解析ケース

ここでは2ケースの解析について報告する。その1つは完全反射の床であり（ケース1）、もう1つは完全吸収の絨毯（ケース2）を想定して解析を行った。それぞれ、音響的には両極端なケースでの解析を実施したことになる。

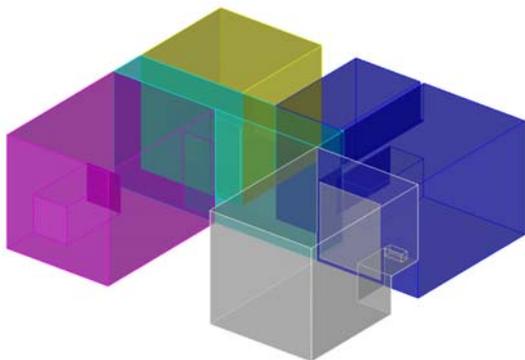


図 96 解析モデル

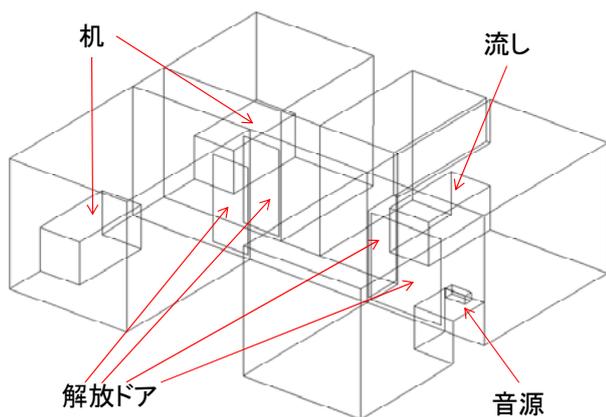


図 97 解析条件

表 21 解析ケースの条件

ケース名	音源	床	壁
ケース 1	構造解析	完全反射	完全反射
ケース 2	構造解析	完全吸収	完全反射

5.6.3. 解析結果

ケース 1 とケース 2 の結果を示す。

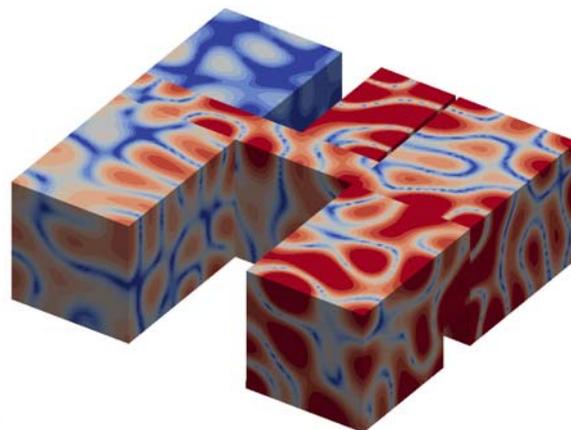


図 98 ケース 1（床反射）の音圧レベル

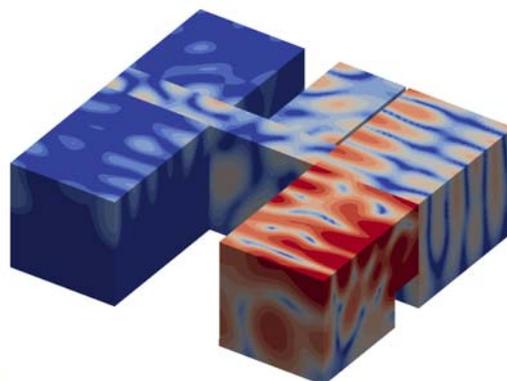


図 99 ケース 2（床吸収）の音圧レベル

6. 音響解析の関連するツール

6.1. 音響解析の関連するツール一覧

下記の一覧表の通り、メッシュのリファインツールや解析結果の評価ツールおよび透過損失の算出のツール等が整備されている。これらについては、ソルバーの周辺ツールとして、お客さまのニーズに応じて、作成し、改良を重ねてきた。ソルバー自身と同様に、ユーザーに利用いただくための必須のツールとなっている。

表 6.1 便利なツール一覧

項目	内容
メッシュ細分化	メッシュ幅を半分にしたメッシュと境界条件を作成する
計算結果粗視化	メッシュ細分化した解析結果をもとの粗いメッシュに戻す
二重極・四重極音源作成	1点で与えた二重極および四重極音源の条件を作成する

可視化ファイル変換	バイナリの解析結果を可視化ファイルに変換する。
結果編集	バイナリの解析結果から指定した部分の結果を取り出す
リスタートファイル作成	バイナリの解析結果からリスタートファイルを作成する
結果比較	バイナリの解析結果同士の解析結果の比較を行う
透過損失算出	解析結果から2マイクロフォン法で透過損失を算出する

6.2. 透過損失の算出ツール

(1) 評価方法

この4点の圧力を入り口側から順番に、 p_1, p_2, p_3, p_4 とする。これらの形状および、測定する物理量については、実験と一致させた。これらの量をもとに透過損失を求める（2マイクロフォン法による透過損失）。

いずれも、両端から、ある距離の部分で圧力（値と位相を含む複素数）を求めることができるようになっている。この4点の圧力を入り口側から順番に、 p_1, p_2, p_3, p_4 とする。これらの形状および、測定する物理量については、実験と一致させた。これらの量をもとに透過損失を求める（2マイクロフォン法による透過損失）。



図 100 2つのマイクロフォンの設定位置

次の式で等価損失を求める。以下、等価損失 TL 以外は複素数である。

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1}, H_{12r} = e^{-iks}, H_{12l} = e^{iks}, \tag{7}$$

$$H_{34} = \frac{p_4}{p_3}, H_{34r} = e^{-iks}, H_{34l} = e^{iks}$$

$$R_1 = -\frac{H_{12} - H_{12r}}{H_{12} - H_{12l}}, R_3 = -\frac{H_{34} - H_{34r}}{H_{34} - H_{34l}} \tag{8}$$

$$p_{1r} = -\frac{p_1}{1 + R_1}, p_{3r} = -\frac{p_3}{1 + R_3} \tag{9}$$

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{p_{1r}}{p_{3r}} \right| \tag{10}$$

ここで s は 2 点間の距離である。

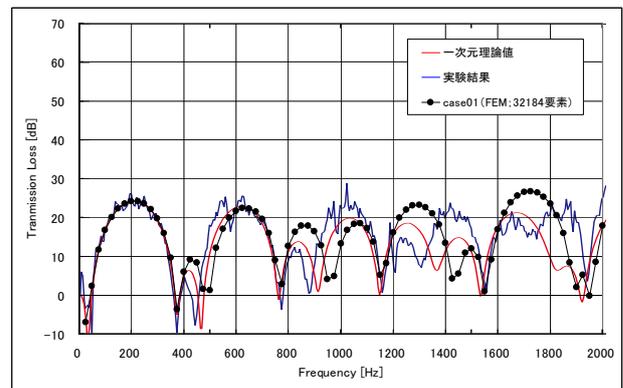


図 101 透過損失の解析結果

6.2.2. 二重極音源の処理アルゴリズムのひとつの可能性

ここで示すツールのアルゴリズムは、通常の音響解析では利用されないが、有限要素法で二重極音源を表現したい場合に利用可能な方法である。特殊な方法であるが、原理的に問題のない方法であり、利用を普及させたい。

ここで対象とする二重極の配置はメッシュ幅よりも短いことを想定する。また、メッシュ幅より大きな間隔の配置については、その目的のために節点を配置したメッシュをユーザー自身が作成することが妥当と考えている。

二重極の配置はメッシュ幅よりも短い場合に、既存の点音源を利用した設定方法では、うまくいかない場合がある。それは、下図のような場合で、メッシュの品質が下がるため、計算の収束性が悪くなる。従って、既存の方法をそのまま適用すること、および、既存の方法で自動的に従来のメッシュを設定する方法では、問題があることが分かる。

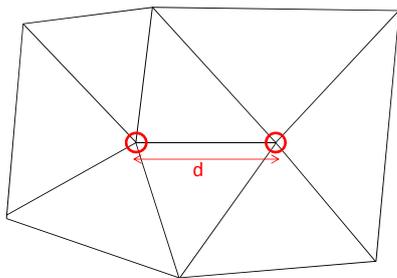


図 102 既存の機能で計算可能な二重極音源

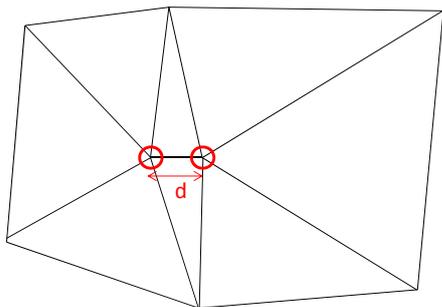


図 103 既存の機能を利用した設定で二重極音源の収束の悪くなるケース

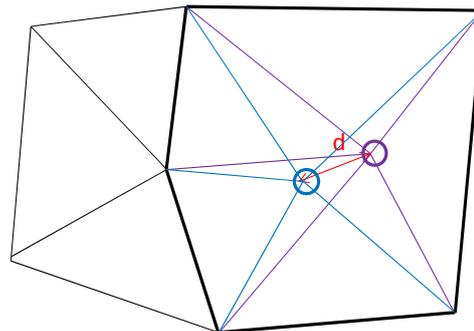


図 105 ツールで作成されるメッシュ

以下では、それを解決する方法を示す。まず、ユーザーは、設定したい二重極に対して、①二重極を設定したい節点、②二重極の間隔、および、③その方向を指定する。すなわち、下記のような情報を指定する。

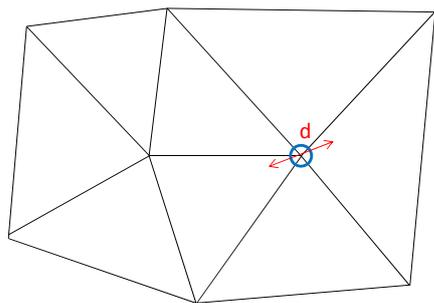


図 104 ユーザーが指定する項目
(位置、二重極音源の距離 d、その方向)

この情報を利用して、下記のような格子を本ツールで自動的に作成する。このメッシュは非常に特殊なメッシュである。新たに生成された部分（青い線と紫の線の2種類のメッシュが生成される）は、空間的に重なっているが、お互いに無関係なメッシュである。その両者は黒い太線の部分を共有する。このことで、青い丸の点音源からの

エネルギーは黒い太線を通して供給される。また、紫の丸の点音源からのエネルギーも黒い太線を通して供給される。従って、黒い太線より外側の領域では、ふたつの点音源からのエネルギーが供給され、黒い太線の内部を二重極音源として認知する。また、二重極音源の幅はメッシュ幅よりも小さいという前提であるので、メッシュの品質を落とすことはない。

6.3. メッシュのリファインツール

有限要素法や境界要素法を利用した音響解析では、解析周波数に格子幅が制限される。従って、スケールの大きな対象を解析する場合には、その解析対象の複雑さに依存せず、スケールが大きければ、大規模な計算にならざるを得ない。例えば、3kHzで、1辺が1mの立方体の解析を実施する場合には、音速300m/secとすると、ほぼ1cmのメッシュが必要となり、最低限100万要素が必要となる。また、同様の計算から、6kHzでは800万節点が必要であり、9kHzでは、2700万節点が必要となる。当社での大規模計算は、7000節点で4億要素までの実績がある。従って、9kHzでほぼ限界の周波数となる。また、3次元の解析では、周波数が2倍になるとメッシュ数は8倍となる。

従って、われわれは、大規模解析が可能なシミュレーションソフトウェアとするとともに、それを利用するためのツールも合わせて整備している。例えば、1kHzで解析が可能なメッシュと境界条件が存在する場合を考える。もう少し上の周波数まで解析を行いたい場合には、これまではメッシュを作成しなおす必要があった。しかし、大

規模なメッシュを作成する場合、特に 1000 万要素を超える場合には、市販のメッシャでは操作の面で処理速度が遅くなることや、処理速度が遅くなることでユーザーには非常に負荷がかかる。また、当社のメッシャの REVOCAP は大規模向けに開発されているソフトウェアであり、8GB のメモリの PC で 3000 万要素程度までのメッシュ作成は、1 時間程度で処理が可能である。

1kHz の解析のメッシュを利用して 2kHz の解析を行うためには、解析領域のメッシュ全体を半分にする必要がある。例えば、Advance/FrontNoise では四面体を利用している。1kHz 用の四面体の各辺を均等に 2 分割して、その中点を利用した 8 つの四面体に分割することができる。また、境界条件については、面の境界条件についても 4 分割することができる。それを新しい節点に対応させることで、リファインしたメッシュおよび境界条件を作成することができる。

また、リファインにおいて、その配置を既存の節点の後にくるように配置することで、節点に関する境界条件は変更しなくていいことが分かる。従って、Advance/FrontNoise の境界条件も自動的に作成できる。

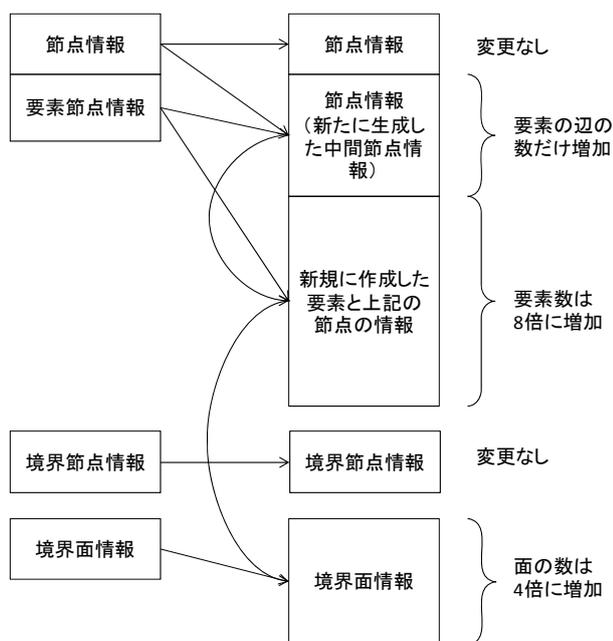


図 106 リファインツールの仕組み

6.4. 粗視化ツール

粗視化ツールは、ユーザーにとって、特に大規

模な解析結果の概要を可視化する場合に利用可能である。本ツールを利用することで、ポスト処理で全体像をつかみたい場合に有効である。ここで提供している粗視化ツールは細分化ツールの逆方法の処理であり、1 回の粗視化メッシュ数は 1/8 となる。

本ツールを利用してリファインした結果を戻すことができるというメリットもある。必要に応じて、そのメッシュ等を利用して再計算も可能となる。ただし、リファインした結果をもとに戻すと、存在している波が消えることがあることにも注意する。ただし、指定した観測点の音圧レベル等については、この手法で十分に評価可能であると考えられる。

7. おわりに

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、これまで、大規模解析および連成解析をはじめ、多くの事例を解析してきた。それとあわせて各種の解析を行うために、開発およびリリースを行ってきた。

今後とも、数多くの事例を重ねるとともに、お客さまのニーズに合わせソフトウェアを改良し、また、処理速度を高速化していきたい。そのことで、さらなる大規模化を目指すことができると考えている。

また、これらの点に力を入れて改良を重ねていくとともに、お客さまのご要望を取り入れながら、本ソフトウェアを進化させていく予定である。

参考文献

- [1] 杉中 隆史ら, “Advance/FrontFlow/red Ver.4.1 の概要と特徴”, アドバンスシミュレーション Vol.2, 2010.9
- [2] 松原 聖, 袁 熙, 末光 啓二, 大家 史, 徳永 健一, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR”, アドバンスシミュレーション Vol.10, 2011.12
- [3] 岡崎 一行, 横井 真人, 西原 慧径, 森 一樹, “材料設計における第一原理計算 - Advance/PHASE -”, アドバンスシミュレー

- ション Vol.14, 2013.01
- [4] 菊池 愛子, 戸田 則雄, “連成解析のためのデータ連携ツール Advance/MPLink Ver.1.7”, アドバンスシミュレーション Vol.4, 2010.11
- [5] 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
- [6] 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”, アドバンスシミュレーション Vol.9, 2011.10
- [7] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による大規模解析—続報—”, アドバンスシミュレーション Vol.13, 2012.10
- [8] “東芝電気洗濯機 75 年の歩み”,
"<http://www.toshiba.co.jp/living/exhibition/05/history/laundry.htm>
- [9] “ウィキペディア”, "<http://ja.wikipedia.org>
- [10] CNN, "<http://www.cnn.co.jp/fringe/35028886.html>
- [11] 石井一弥, 高橋志郎, 谷川尚司, 永吉拓至, 和田陽一, “地球環境・エネルギーセキュリティに貢献する原子力技術, 原子力プラントの高度シミュレーション”, 日立評論 Vol.91 No.02 218-219(2009.02)
- [12] 平川裕雅, “数値解析による BWR 上部プレナム内における音響共鳴現象評価”, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士論文 (2010)
- [13] 川崎重工, “音響解析シリーズ 4: ロケット打上げ時のフェアリング外部音響環境予測”, "http://www.kawaju.co.jp/techno-wm/bacnumber/bn_018/topics02.html
- [14] 加藤壮一, 藤森俊, 小林秀昭, “予混合型ガスタービン燃焼器における燃焼振動の線形 1 次元解析に及ぼす音響インピーダンスの影響”, 日本燃焼学会誌 第 50 巻 151 号 (2008 年) 72-80
- [15] P.M.Morse, K.U.Ingard, "Theoretical Acoustics", Princeton University Press, 1986
- [16] H.S.Howe, "Theory of Vortex Sound", Cambridge University Press, 2003
- [17] C.A.Wagner, T.Huttl, P.Sagaut, "Large-Eddy Simulation for Acoustics", Cambridge University Press, 2004