

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise Ver. 4.3の機能追加

松原 聖* 尾川 慎介** 大家 史** 出浦 智之***

Complex Linear Solver and Acoustics Eigenvalues for Advance/FrontNoise Ver. 4.3

Kiyoshi Matsubara*, Shinsuke Ogawa**, Fumito Ohya** and Tomoyuki Deura***

アドバンスソフト株式会社では、2005 年から音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を継続的に開発し、ユーザーのニーズに基づき機能追加およびその性能を改良してきた[1]～[5]。このたび、Ver. 4.3 およびその後のバージョンアップにおける機能追加として、多孔質媒体の取り扱い、減衰項を含む構造音響強連成の機能、および、音響固有値の解析機能を追加した。さらに、性能改良として、線形ソルバーの反復解法に対するマルチグリッド前処理機能、および、直接解法を追加した。機能改良で解析の幅を広げるとともに、線形ソルバーの改良でその性能を向上させた。また、該当する機能を始めて利用するユーザーの利便性を向上させるため代表的な例題を利用したチュートリアルを作成した。本稿では、これらのバージョンアップの内容について述べる。

Key word: 音響解析、多孔質、固有値問題、直接法、マルチグリッド前処理、構造音響強連成解析

1. はじめに

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では、ユーザー様から要望の多い機能を中心に定期的にバージョンアップを行っている。本稿では、新たに 2014 年 4 月と 2014 年 10 月にバージョンアップを行った内容について記述する。

このうち、2014 年 4 月のバージョンアップでは、多孔質媒体の解析機能、固有値を利用した構造音響強連成機能、ソルバーの一部改良としてマルチグリッド前処理機能、リスタート時の不具合等のバグフィックス、チュートリアルの作成等のマニュアルの整備の機能追加を行った。また、同時期に別ソフトウェアとして、時間領域の解析を可能とした Advance/FrontNoise/TD の第 1 バージョンをリリースした。

*アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長
President, AdvanceSoft Corporation

**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

***アドバンスソフト株式会社 総合企画部
General Planning Division, AdvanceSoft Corporation

また、引き続き 2014 年 10 月バージョンアップでは、音響固有値の計算、直接法ソルバーの導入、構造音響強連成への減衰項の導入、ツールの機能補強を行った。本稿では、これら改良項目のうち、多孔質媒体の解析機能、線形ソルバーの改良（マルチグリッド前処理と直接法）、および、音響固有値の計算機能について述べる。その他の改良項目（構造音響強連成、および、時間領域解析機能）については、本雑誌の別記事にて紹介する。

2. Advance/FrontNoise の改良内容

2.1. Ver.4.3 の新機能（その 1）

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の Ver. 4.3 をリリースした。本バージョンでは新たに下記の機能を正式にリリースした。

- ① 多孔質媒体の解析機能
- ② 固有値を利用した構造音響強連成機能
- ③ ソルバーの一部改良としてマルチグリッド前処理機能
- ④ リスタート時の不具合等のバグフィックス

⑤ チュートリアル作成等のマニュアルの整備

このうち①では、Miki モデル等を想定した多孔質媒体の解析を可能とするため、複素数の音速または密度を材質毎または要素毎に設定可能な機能を設けた。これにより、消音器中の触媒等の多孔質媒体を含むシミュレーションが可能となった。②については、構造解析により計算された固有値と固有ベクトルを用いて、構造解析と音響解析の強連成機能である。ここでは、レーリー減衰での構造減衰を考慮することが可能である。③については、反復法ソルバーの前処理としてマルチグリッド機能を導入した。マルチグリッド処理については、有利な利用対象が絞り切れないため、今後、どのような問題が得意となるか検討し、ユーザーに指針を示す予定である。また、プログラムおよびドキュメントの整備として④と⑤を実施した。また、今回、チュートリアルについてもリリースしたが、今後ともその事例を増やし、特に初めてのユーザーの方、また、使いこまれているユーザーの方でも使ったことのない機能を利用する場合に有効な事例を入れていきたいと考えている。

2.2. Ver.4.3 の新機能（その 2）

また、2014 年度内のその後のバージョンアップの改良を実施し、そのリリースとして 2014 年 10 月末に

- ⑥ 音響固有値の計算
- ⑦ 直接法ソルバーの導入
- ⑧ 構造音響強連成への減衰項の導入
- ⑨ ツールの機能拡張の機能拡張
- ⑩ 時間領域ソルバーの並列化

の機能を持つソフトウェアを提供した。このうち、⑥は音響固有値の解析機能であり、共鳴周波数等の推定に利用できる。音響固有値については、現在では特定の用途での利用を想定して機能追加したが、今後、音響に関する多面的な検討という状況で利用されていくと考えている。また、⑦では複素行列の解法に直接法を導入した。本手法は、小規模から中規模のメッシュ規模の問題に適用

可能であり、特にこれまで収束しにくかった問題で解を得るために有効である。具体的には、100～300 万節点以下程度の中規模および小規模なケースに対し、計算機のメモリが十分にある環境で、直接法の適用が可能である。当社では、最大の解析規模として 1 ジョブで利用可能なメモリが 400GB の環境で 600 万節点・3500 万要素までの動作確認を行った。直接法を利用することで反復計算不要となるため、収束に非常に処理時間がかかっていた問題、収束しなかった問題に対して有効である。また、解析に先立ちあらかじめ処理時間を予測することができるメリットもある。もちろん、直接法に対しても並列計算が可能である。さらに、⑧では、2014 年 4 月にリリースした構造音響連成による透過音解析機能で構造減衰を考慮することを可能とした。ここでは、構造振動に対してレーリー減衰を考慮した計算を行うことができる。また、本機能に関し、減衰機能を利用しない場合についても、本機能を利用する場合のデータ構造を変更し、使用メモリを削減した。ただし、本改良は構造音響強連成機能を利用しない場合には影響はしない。⑨のツールの整備では、ファイル変換のツールに対して、いくつかのファイルフォーマットの取り扱いができるように拡張した。また、メッシュ細分化ツール（コマンド refine）の高速化を実施しおよび並列計算を可能とした。ここでは、ディスクを作業用領域として利用していた処理をメモリ内で処理することにより、また、内部の処理を変更することにより高速化した。シングルコアでも数倍から 10 倍の高速化が達成されている。同時に処理を MPI で並列化し、さらなる高速化を実現した。最後に⑩では、別ソフトウェアである時間領域ソルバー Advance/FrontNoise/TD のユーザーのみに関係する項目であるが、2014 年 4 月に提供した第 1 バージョンが並列計算可能となった。この並列計算では、ファイル出力を除き、12 コアで 8 倍程度の処理速度となっており、時間領域ソルバーについても、十分に並列計算機の性能を生かせるソフトウェアとなった。

3. 多孔質媒体の解析機能

3.1. 利用するモデル

多孔質媒体の解析を主目的として、音速および密度を解析領域のブロック（材質）毎に複素数で指定可能する機能を追加した。本ソフトウェアで想定している多孔質媒体の解析で利用する方法は、Miki モデル等により音響伝播を複素数の音速および実効密度を与えて、音響解析を行う方法である[6][7]。ここでは、ブロック（材質）毎に、音速および実効密度を複素数で定義する。ただし、本ソフトウェアにはそれらの物性に関するデータベース等については準備していないため、どのような入力データを与えるかをユーザーで検討する必要がある。ただし、本項目については、ユーザー様のご要望・ご意見を反映させ、いくつかのツール等を開発し、お客さまのニーズを実現する方向で進めている。

新規に追加した多孔質媒体の解析機能に関連する基礎式は下記に示した 3 つの式

$$\nabla^2 \phi(x) + k^{*2} \phi(x) = 0 \quad (1)$$

$$k = \frac{2\pi f}{c^*} \quad (2)$$

$$p(x) = i\omega \rho^* \phi(x) \quad (3)$$

である。ここで、上添字の「*」は複素数であることを強調するためにつけた。多孔質媒体の解析機能では、この基礎式に対して、音速と密度を複素音速と実効密度に変更する。

Miki モデル[6][7]では、さまざまな実験結果から、流れ抵抗 σ をパラメータとして、特性インピーダンスと伝播定数の 2 つの量を周波数 f の関数として表したモデルである。

$$z = \frac{Z_c}{\rho c} = R(f) + iX(f) \quad (4)$$

$$\gamma = \alpha(f) + i\beta(f) \quad (5)$$

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による音響解析では、ユーザーが特性インピーダンス z と伝播定数 γ を複素音速と実効密度に変換して、入力データファイルとして与えるという利用方法となる。ここで

$$R(f) = 1 + 0.070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \quad (6)$$

$$X(f) = -0.107 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \quad (7)$$

$$\alpha(f) = \frac{\omega}{c} \left\{ 0.160 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right\} \quad (8)$$

$$\beta(f) = \frac{\omega}{c} \left\{ 1 + 0.109 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right\} \quad (9)$$

である。これらを用いて、基礎式に利用する形にすると

$$\rho^* = \frac{\rho c}{c^*} (R + iX) \quad (10)$$

$$c^* = \frac{ic}{\alpha + i\beta} \quad (11)$$

となる。

3.2. 数値計算上の注意

本ソフトウェアのユーザーは特に注意する必要はないが、ここで数値計算上の注意事項を 1 つ示しておく。

多孔質媒体のみならず一般的に音響解析に対する物理的な要請は、音速・密度が空間内で不連続に変化しても、音圧が連続となることである。実際に異なる材質の境界では、音速・密度が空間内で不連続となる状況が発生する。

一方で、有限要素法等の数値計算においては、解くべき変数が連続となるように解を求めることができる。すなわち、速度ポテンシャルを基本変数とする通常の音響解析では、解としては連続な速度ポテンシャルを求めることができる。しかし、連続な速度ポテンシャルに対しては、密度が不連続な場所で（その結果として）音圧が不連続となる。これは明らかに物理的な要請を満たしていない。

従って、音圧が連続であるという物理的な要請を満たすためには、数値的な工夫をしなければならない。例えば、音圧を基礎変数として基礎方程式を書き直して解くことである。本ソフトウェアでは、この方針で解析を行っている。

3.3. 本機能を利用した解析事例

多孔質媒体の機能の利用にあたっては、本ソフトウェアでは、具体的に次のような使い方をします。まず、ユーザーが材質の物性（実行密度・複素音速）を決定する。多孔質媒体の解析を行うため環境変数を ON にし、ユーザーが決定した実効密度と複素音速は材質毎に与える。これらの物性については、材質番号をメッシュファイルで与える。また、これらの材質番号に対応して、Miki モデルで算出された材質番号に対応する実効密度と複素音速を、入力データとして、材料ファイル*.mat で指定する。

ここでは、ひとつの応用事例を示す。解析対象は下記に示す拡張型の消音器とし、消音器の途中に触媒等を模擬した多孔質媒体があることを想定したモデルとした。このために、まず流体抵抗を決定し、Miki モデルに基づき、実効密度と複素音速を算出する。

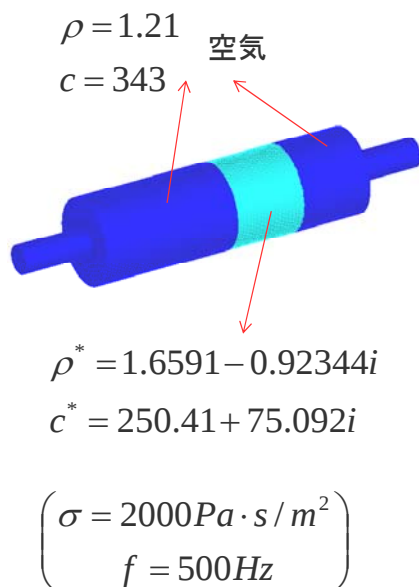


図 1 多孔質媒体機能の解析対象

ここで示したデータを利用して解析を実施した。これらの計算結果のうち、流れ抵抗 $\sigma = 2000$ のケースの軸上の音圧（実部・虚部）を示す。ここでは、音圧の傾きが不連続になっている部分（折れ曲がっている箇所）が、触媒の境界（触媒と空気の境目）となっている。この境界におけるグラフの傾きは、複素密度の比となっている。

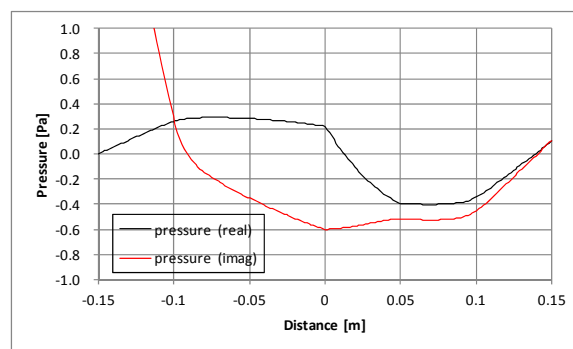


図 2 流れ抵抗 $\sigma = 2000$ のケースの軸上の音圧（実部・虚部）

また、このケースにおいて、参考までに流れ抵抗を 5 通りに変化させた解析を実施した。その音圧レベルを示す。

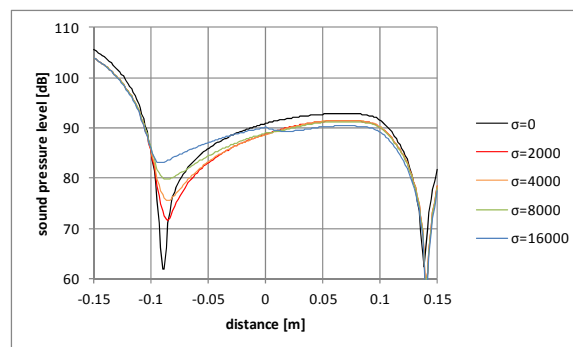


図 3 流れ抵抗を変化させた場合の軸上の音圧レベル

4. 線形ソルバ改良（その 1：マルチグリッド前処理の適用）

4.1. マルチグリッド前処理の実装

本節では、ソルバー高速化の 1 つの試みとして、マルチグリッド（MG）の前処理を取り入れたのでその内容について示す。マルチグリッド前処理に対して、反復法は GMRES 系・BiCGSTAB 系の手法について適用し性能を測定した。ここでは、マルチグリッド前処理が効果のあった GMRES 系列についてのみ報告する。

ここで、GMRES 法に対するマルチグリッド前処理の性能測定には、チュートリアルデータのうち、B1 と C2 を中心に利用した。これらの例題については、B1 は通常の収束状況を示す例題として実施し、C2 については収束が遅い例題としてテストを実施した。

なお、本改良のテストにおいて、上記の解法の

うち、BiCGSTAB 系の手法については MG の前処理では収束の改善が見られなかったことから、本資料では特に述べない。また、本ソフトウェアではその他のいくつかの反復法も利用できるが、GMRES 系以外の反復法についてはほとんど効果が見られなかった。ただし、ソフトウェアの機能としては、ユーザーはそれらの組み合わせを利用することが可能となっている。

※本ソフトウェアでは、3 種類の GMRES 法、2 種類の BiCGSTAB 法、および、CR 法、TFQMR 法が利用できる。また、これらの反復法に対して、それぞれ Schwarz 法、SOR 法、2 種類の Jacobi 法、ILU 法を前処理として利用することができることを付記しておく。

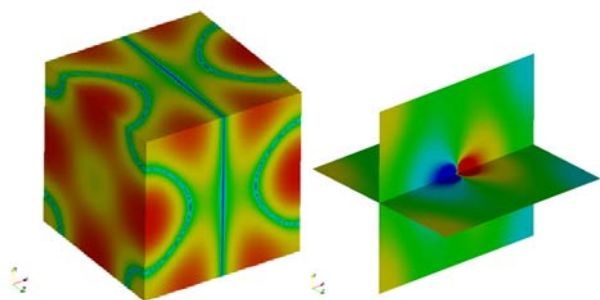


図 4 チュートリアル B1 の結果

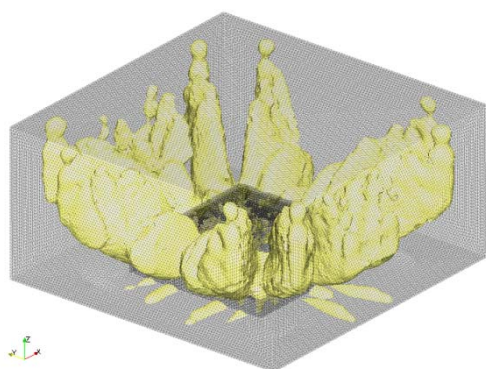


図 5 チュートリアル C2 の結果

表 1 テストデータのサイズ

	節点数	要素数	境界	境界面数	音源
B1	1,030,301	6,000,000	1	0	2
C2	389,312	2,184,299	1	68,870	1

表 2 テストデータの解析周波数

データ	開始周波数	終了周波数	間隔
B1	500	500	—
C2	50	50	—

表 3 テストデータで必要とする計算資源

データ	周波数	CPU 数	処理時間[sec]	使用メモリ [MB]
B1	1	4	152	4.0 GB
C2	1	4	2820	3.0 GB

4.2. 既存の反復法のうち GMRES のアルゴリズム

現在、Advance/FrontNoise には、3 つの GMRES の手法を取り入れている。これらはマニュアルには、GMRES0～2 と記述している手法である。現在、デフォルトは、GMRES2 すなわち一般的な名称では LGMRES を利用している。また、本ソフトウェアにおいて、現在の前処理法のデフォルトは、ASM (加法シュワルツ法) となっている。

表 4 利用可能な GMRES の手法

一般名	正式名称	文献
GMRES	the Generalized Minimal Residual method with restart	[1]
FGMRES	the Flexible Generalized Minimal Residual method	[2]
LGMRES	the Loose Generalized Minimal Residual method (the new restarted augmented GMRES)	[3]

4.3. ケース B1 での測定

ケース B1 は、600 万要素、120 万節点程度のデータである。閉じた領域での解析のため、比較的収束しやすいデータである。従来のデフォルト値である ASM+GMRES0 を基準として、MG の前処理を GMRES 系の 3 つの手法に対して適用した。まず、それぞれの手法反復法において、従来の手法である ASM と今回追加を行った手法である MG の効果の比較を示す。

表 5 ケース B1 における性能測定

前処理	反復法	並列数	反復数 [回]	処理時間 [sec]
ASM	GMRES2	1	376	293
MG	GMRES0	1	477	621
MG	GMRES1	1	479	538
MG	GMRES2	1	191	227
ASM	GMRES2	4	358	98
MG	GMRES0	4	999	338
MG	GMRES1	4	820	294
MG	GMRES2	4	257	105

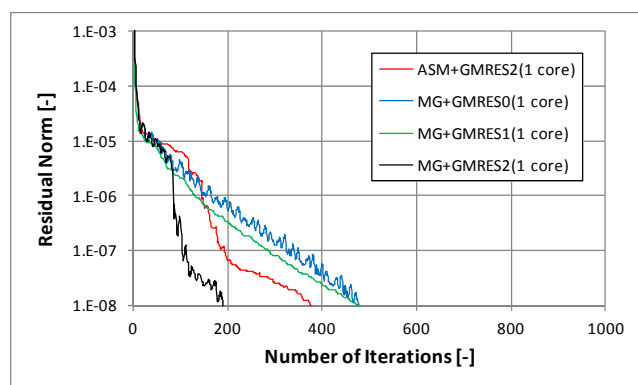


図 6 ケース B1 におけるシングルプロセッサでの性能測定

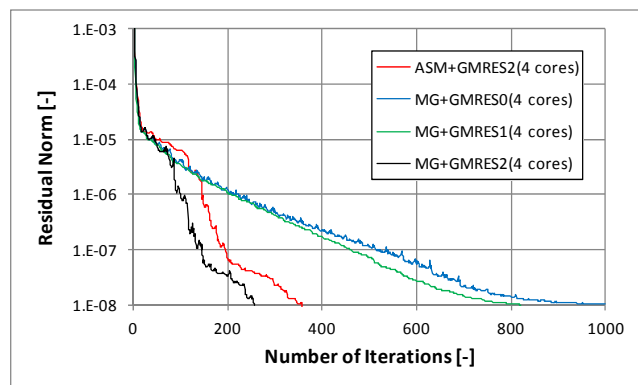


図 7 ケース B1 における並列計算 (4 プロセッサ) での性能測定

4.4. ケース C2 での測定

ケース C2 は、100 万要素、20 万節点程度のデータであるが、外部および内部を含む問題であるため、収束しづらいデータである。ここでも、従来のデフォルト値である ASM+GMRES0 を基準として、MG の前処理を GMRES 系の 3 つの手法に対して適用した。

表 6 ケース C2 における結果の比較
(リスタート数はデフォルトの 30)

前処理	反復法	並列数	反復数 [回]	処理時間 [sec]
ASM	GMRES2	4	11,260	1720
MG	GMRES0	4	14,017	2680
MG	GMRES1	4	14,233	2690
MG	GMRES2	4	11,760	1830

表 7 ケース C2 における結果の比較
(リスタート数は 300)

前処理	反復法	並列数	反復数 [回]	処理時間 [sec]
ASM	GMRES2	4	5643	2800
MG	GMRES0	4	14017	2850
MG	GMRES1	4	14052	2830
MG	GMRES2	4	5922	2930

表 8 ケース C2 における結果の比較
(並列数 1、GMRES2)

前処理	反復法	リスタート数	反復数 [回]	処理時間 [sec]
ASM	GMRES2	300	5596	6750
MG	GMRES2	300	3340	5980
ASM	GMRES2	30	10916	4980
MG	GMRES2	30	7294	5570

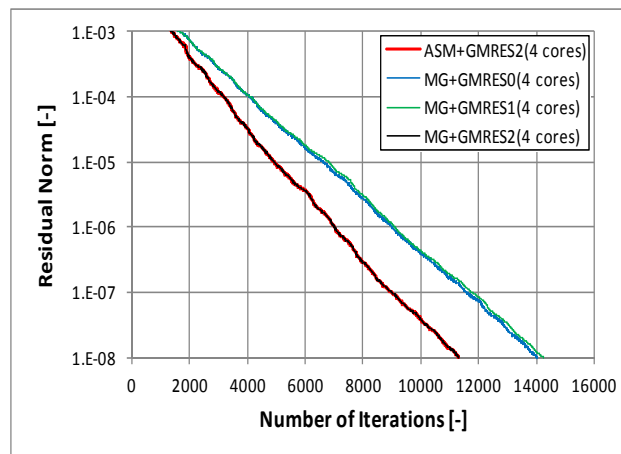


図 8 ケース C2 においてリスタート数 30 での解析結果

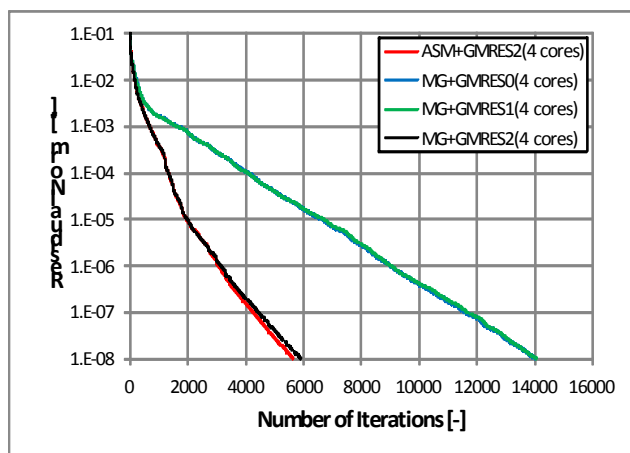


図 9 ケース C2 において
リストア数 300 での解析結果

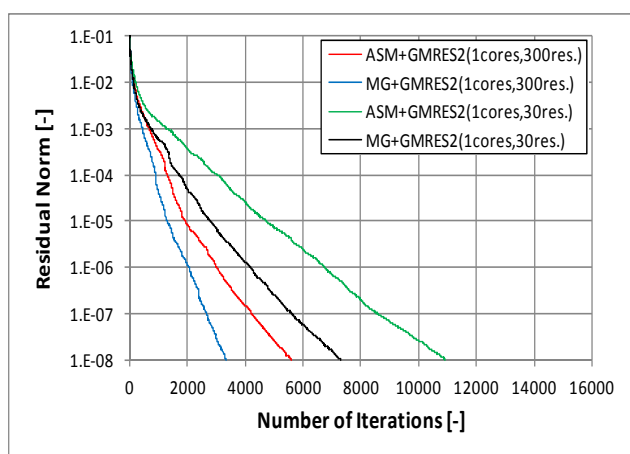


図 10 ケース C2 において
シングルプロセッサでの解析結果

4.5. まとめ

ソルバー改良のうち、マルチグリッド前処理の適用については、この結果、MG は GMRES 系と相性がいいことが確認できた。MG+GMRES で加速できる（処理時間が短縮できる）データもあるが、これまでのデフォルトの手法と同等程度である。また、BiCGSTAB 系の手法に対しては、MG の前処理は効果はないことが分かった。また、GMRES については、従来から、GMRES0、1、2 とマニュアルで呼んでいた 3 つの手法を取り入れている。これらの手法と MG を組み合わせると、従来からのデフォルトである GMRES2 がやはり有利であることが分かった。

ただし、現状では MG の適用実績が少ないため、MG が有利であるという設定にすることは行って

いない。デフォルトは現在のままとし、必要に応じて環境変数で MG を利用することを指定すれば、MG の前処理と反復法のアルゴリズム GMRES2 等の組み合わせが利用できるようにしている。今後、当社で実施する解析等で、性能を確認し、今後のバージョンで最適なデフォルトを決定する予定である。

5. 線形ソルバの改良(その2:直接法の適用)

5.1. 直接法の実装

これまで本ソフトウェアでは、複素数疎行列を係数行列とする大規模線形方程式を解く手法として、反復法のみを利用可能してきた。しかし、反復法では解析対象によっては収束が難しいケースがあった。これまでに経験した収束が困難なケースには内部外部を同時に解く問題・高周波領域の解析・構造音響強連成解析等があり、収束するまでに多くの反復回数を要していたため、検討課題となっていた。

ここでは、この課題を解決するためのひとつの試みとして、直接法を適用することを導入し検討した。高周波や構造音響問題等のこれまでに収束が困難な問題でも、直接法では収束性の問題がないため、直接法で解ける/解けないは解析規模にのみ依存する。言い換えると、使用計算機のメモリで制約されるあるサイズ以下の解析規模では必ず解くことができ、その処理時間はあらかじめ予測できる。今回の問題に対しても、一般的にも、直接法は、一千万節点（数千万要素）を超える規模には適用は困難であるが、百万～数百万節点以下の問題に対しては課題を解決できる可能性がある。

本資料では、本ソフトウェアの線形ソルバーとして複素数に対する直接法を実装し、その処理時間、使用記憶容量、および、並列性能を計測したので、その結果を報告する。

5.2. ベンチマーク例題の解析条件

直接法のベンチマーク例題としては、全体のサイズ 1m 程度の五角錐台を利用した。ここでは、本形状の 7 つの面は、いずれの面も平行ではない

ような形状とした。1面を無反射境界とし、その他の面を反射としたような内部の境界条件を設定し、1つの頂点付近に点音源を設置した。この形状に対して、数万節点から1000万節点の10通りのメッシュを作成した。メッシュの作成においては、3つの基本形状に対して、本ソフトウェアのツールであるリファイナー（細分化機能）を利用してメッシュを作成した。ベンチマーク計算におけるメッシュ数（節点数、要素数）およびその境界面の数のデータは下表に示す通りである。これらのデータに対して直接法を適用することにより、処理時間および使用記憶容量のデータを計測した。また、参考までにベンチマーク計算で得られるべき結果について示した。すべてのケースについて同様の結果が得られるはずである。

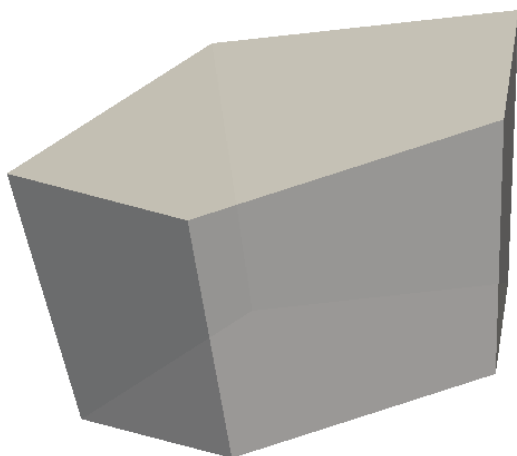


図 11 直接法の試計算の解析形状
(下面が無反射境界、その他の面は完全反射)

表 9 ベンチマーク計算におけるメッシュ数

case	節点数	要素数	境界面数
1	25,906	139,528	1,798
2	50,547	277,460	2,973
3	100,843	559,993	5,266
4	196,690	1,116,224	7,193
5	387,373	2,219,680	11,893
6	777,254	4,479,944	21,065
7	1,531,007	8,929,792	28,769
8	3,029,705	17,757,440	47,569
9	6,096,755	35,839,552	84,257
10	12,077,421	71,438,336	115,073

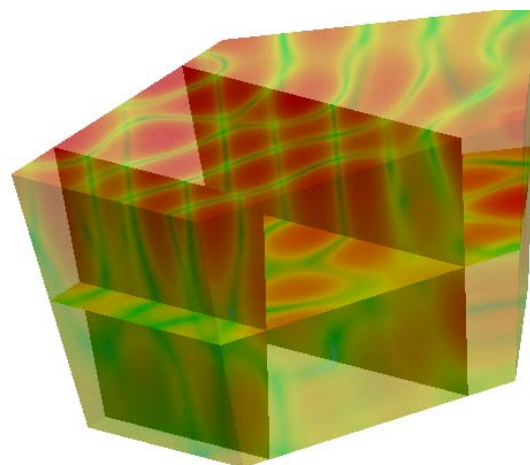


図 12 試計算で得られる結果（音圧レベル）

5.3. ベンチマーク例題の解析結果

ここでは、前節で設定したベンチマーク問題に対して、

- ・ 直接法での処理時間
- ・ 反復法(GMRES 法)での処理時間
- ・ 反復法(GMRES 法)での反復回数

を示した。反復法のデータについて、ユーザーが解法を選択する場合の参考になるため、同時に計測した。

5.4. まとめ

直接法における解析可能な解析規模（メッシュ数）は利用できる計算機資源の最大メモリに制限される。従って、まず、直接法で興味のあるデータは、どのくらいまでの節点数で処理可能であるかということである。下記に示すデータから、現在における通常的环境である 100GB 程度のメモリでは、150 万節点くらいまでは解析可能となることが分かる。しかし、大規模なメモリを搭載した 400GB 程度環境（今回利用した計算機資源の最大規模のメモリ）を利用しても、300 万節点から 600 万節点程度までの解析が限度であることが分かる。先に述べたように、これらの限界は利用する計算機資源の限界に起因するものであり、さらに大規模容量の計算機資源を利用することで大規模な解析は可能となる。

次に、直接法と反復法のそれぞれのメリットについて考えてみる。下記に示すデータから、100 万

節点程度までは、直接法と反復法がほぼ同程度の処理速度か、または、若干直接法の処理速度が速いことが分かる。ただし、数百万節点程度では若干処理速度が遅くなり、それ以上の節点数となると、ベンチマーク計算で利用した計算機環境では、メモリが不足するため直接法では解析不可能となる。

以上をまとめると、例えば、100GB 程度のメモリを利用できる環境であれば、100 万節点程度ま

表 10 直接法での処理時間 (単位: sec) ①

proc	1PE	2PE	4PE	6PE	8PE	12PE
node	1	1	1	1	1	1
mem.	96GB	96GB	96GB	96GB	96GB	96GB
1	3	2	2	2	1	2
2	11	7	4	4	3	2
3	40	24	15	12	10	8
4	148	99	58	42	31	25
5	571	386	219	155	135	91
6	2060	1230	762	590	453	328
7	8490	5810	3100	2370	1700	1320
8	NA	NA	NA	NA	NA	NA
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA

表 11 直接法での処理時間 (単位: sec) その 2

proc	24	4	8	24	48
node	2	4	4	4	4
mem.	192GB	384GB	384GB	384GB	384GB
1	1	1.58	1	1	2
2	4	3.95	3	4	5
3	9	11	8	10	12
4	19	32.9	21	21	25
5	59	116	68	70	80
6	175	388	225	208	259
7	566	1490	912	577	817
8	1720	5540	3430	2250	1850
9	NA	NA	13800	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA

では直接法で計算を行うが、それよりも大規模な計算になれば反復法を利用することが妥当であ

るといえる。また、収束しにくい 100 万節点以下の問題では、あらかじめ処理時間を予測できるという面でも圧倒的に直接法が安心であることが分かる。

表 12 比較計算で実施した反復法(GMRES 法)での処理時間 (単位: sec)

proc	1PE	4PE	12PE
node	1	1	1
mem.	96GB	96GB	96GB
rest	30	30	30
1	21	4	3
2	55.4	11	10
3	164	29	23
4	444	98	81
5	1180	257	232
6	2800	660	523
7	6210	1560	1190
8	14700	3390	2720
9	37200	8960	6960
10	80300	19600	15300

表 13 比較計算で実施した反復法(GMRES 法)での処理時間 (単位: sec)

proc	1PE	4PE	12PE
node	1	1	1
mem.	96GB	96GB	96GB
rest	300	300	300
1	3	2	1
2	10	5	2
3	28	14	6
4	117	45	18
5	428	139	55
6	1350	599	243
7	6190	2050	806
8	12500	4920	2310
9	31700	10900	7770
10	63400	27800	20600

表 14 反復法(GMRES 法)での反復回数

proc	1PE	4PE	12PE	1PE	4PE	12PE
node	1	1	1	1	1	1
mem.	96GB	96GB	96GB	96GB	96GB	96GB
rest	30	30	30	300	300	300
1	756	825	915	111	118	127
2	933	1101	1333	136	114	155
3	1180	1411	1432	169	179	191
4	1916	2053	2188	214	223	235
5	2456	2535	2998	263	273	286
6	2824	2978	3139	394	545	586
7	3356	3721	3647	896	896	990
8	3926	4026	4166	1261	1282	1246
9	5036	5137	5246	1765	1876	2202
10	6378	5548	5853	2684	2778	2781

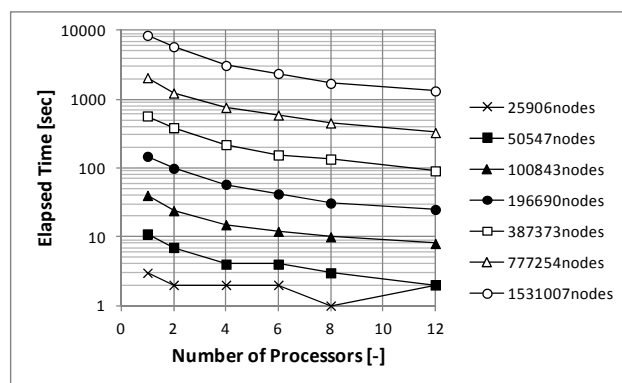


図 13 直接法並列処理プロセス数と処理時間

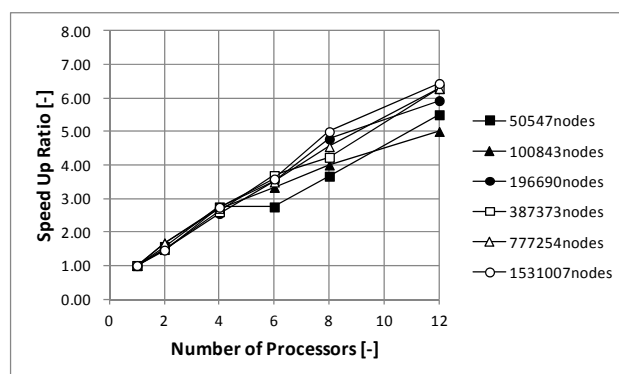


図 14 並列処理プロセス数と処理速度向上比

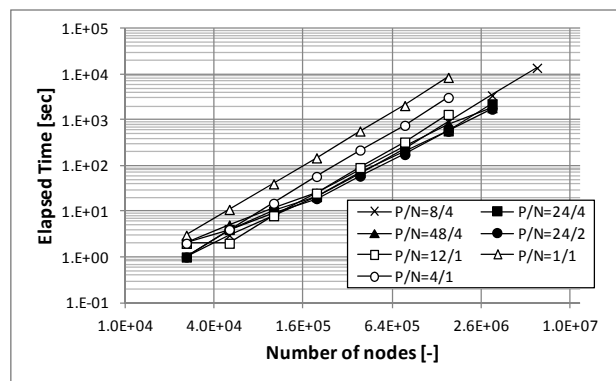


図 15 直接法の解析規模と処理時間

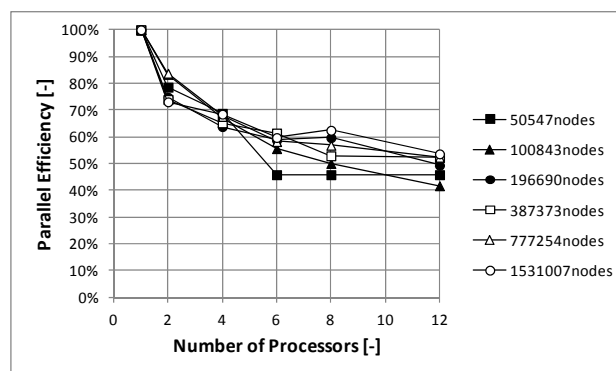
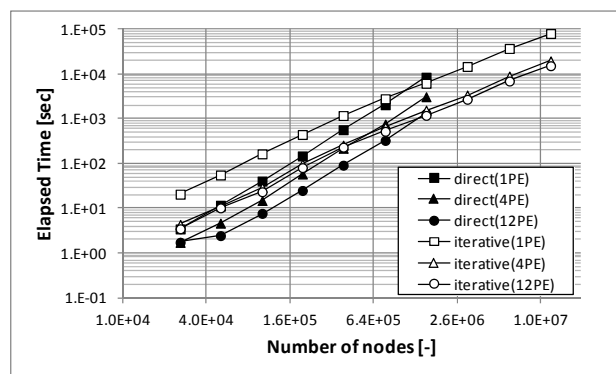
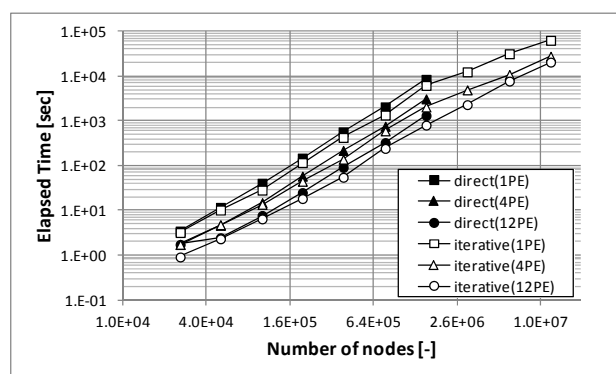


図 16 直接法の解析規模と並列化効率

図 17 直接法と反復法の処理時間の比較
(FNFEM_GMRES=30)図 18 直接法と反復法の処理時間の比較
(FNFEM_GMRES=300)

6. 音響固有値の解析機能

6.1. 解法

音響解析に対する固有値問題を解く機能を追加した。音響解析の基礎方程式から下記に示す一般化固有値問題となる。離散化されたのちには、疎行列に対する非対称行列に対する一般化固有値問題となる。

$$\nabla^2 \varphi(x) + k^2 \varphi(x) = 0 \quad (12)$$

$$\alpha(x)\varphi(x) + \beta(x)\frac{\partial \varphi(x)}{\partial n} = f(x) \quad (13)$$

今回のバージョンアップでは、有限要素法で離散化された行列に対して固有値手法を適用し、固有値および固有ベクトルを求める機能を実装した。ただし、現在の機能では、多孔質媒体・温度変化のある場合・流速を変化させた場合については本機能はまだ対応していない。今後のバージョンアップで対応予定である。

6.2. ベンチマーク問題の解析条件

固有値解析機能のベンチマーク問題として、解析解の知られている円筒内の音響問題における固有値について解析を実施した。

以下では、 $R = 0.1$ 、 $H = 0.2$ での共鳴する解を求め、前節で解析解とシミュレーション結果と比較する。音速は、 $c = 346\text{m/sec}$ とする。境界条件は完全反射（ノイマン条件）とし、境界での法線方向の微分をすべて0を与えた（有限要素法では何も設定しないと法線方向の微分0の条件となる）。また、メッシュは平均1.7mmのサイズの四面体一次要素とした。メッシュサイズは、要素数は370万要素、節点数は65万節点程度のメッシュとなった。

表 15 解析条件

項目	内容
メッシュサイズ	1.7mm
要素数	3,735,627
節点数	657,867
境界条件	完全反射

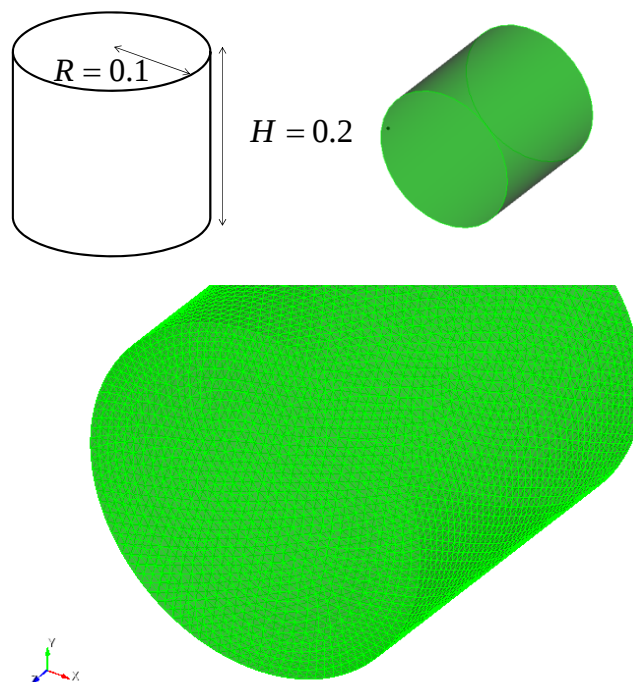


図 19 解析形状とケース1のメッシュ図

6.3. ベンチマーク問題の解析解

まず、ベンチマーク問題の解析解につき、教科書程度の確認から示す。ここでは、高さ H で半径 R の円筒を考え、その円筒中の音響の共鳴について考える。基礎方程式は、周波数を f として

$$\Delta \varphi + k^2 \varphi = 0, \quad k = \frac{2\pi f}{c} \quad (14)$$

であり、境界条件は、

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (r = R \text{ および } z = 0, H) \quad (15)$$

とする。この基礎方程式を直交座標系から円筒座標系に変換して

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k^2 \varphi = 0 \quad (16)$$

である。ここでは、この方程式の変数分離解を

$$\varphi = \varphi(r) e^{im\theta} e^{inz} \quad (17)$$

として求める。ここで、解は θ 方向の周期境界であるため、 m は整数である必要がある。以下、では特に断らない限り、 φ は $\varphi(r)$ を意味するものとする。円筒座標系の音響基礎方程式にこの変数分離解を代入して、

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) e^{im\theta} e^{inz} - \frac{m^2}{r^2} \varphi e^{im\theta} e^{inz} - n^2 \varphi e^{im\theta} e^{inz} + k^2 \varphi e^{im\theta} e^{inz} = 0 \quad (18)$$

となる、すなわち

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \left(\frac{m^2}{r^2} + n^2 - k^2 \right) \varphi = 0 \quad (19)$$

となり

$$r^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + r \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \left((k^2 - n^2) r^2 - m^2 \right) \varphi = 0 \quad (20)$$

と変形する。ここで、

$$\begin{aligned} l^2 &= k^2 - n^2 \\ rl &= r' \end{aligned} \quad (21)$$

の変数変換を行えば、

$$r'^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r'^2} + r' \frac{\partial \varphi}{\partial r'} + (r'^2 - m^2) \varphi = 0 \quad (22)$$

となって、 m 次のベッセル関数の標準形となる。先に述べたように、 θ 方向の周期境界からの要請により、 m は整数である。ここで、境界条件

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (r = R, \text{すなわち、} r' = lR) \quad (23)$$

を満たすためには、 $r' = lR$ が m 次のベッセル関数 J_m の微分 J'_m の零点であればいい。実軸上の正の零点は無限個あり、ここでは小さい方の零点から、

$$J'_{m,1}, J'_{m,2}, J'_{m,3}, \dots \quad (24)$$

と書くことにする。この記号を利用すると、 s を整数として、

$$l = \frac{J'_{m,s}}{R} \quad (25)$$

の場合に境界条件を満たす。ここで、 m は円の中心を通る節線（節直径）の数である。一方、 s は零点の個数であるため、解においては同心円となる節線の数となっていることが分かる。また、境界条件

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (z = 0, H) \quad (26)$$

は、 e^{inz} において、 q を整数として、

$$n = \frac{2\pi}{2H} \times q \quad (27)$$

であれば、条件を満たすことができる。

以上をまとめると、 m 、 s 、 q を任意の正の整数として、

$$\begin{aligned} k^2 &= l^2 + n^2 \\ l &= \frac{J'_{m,s}}{R} \\ n &= \frac{2\pi}{2H} \times q \end{aligned} \quad (28)$$

を満たす $k = \frac{2\pi f}{c}$ が共鳴する周波数となる。ひとつの式にすると、

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{J'_{m,s}}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi q}{H} \right)^2} \quad (29)$$

となる。

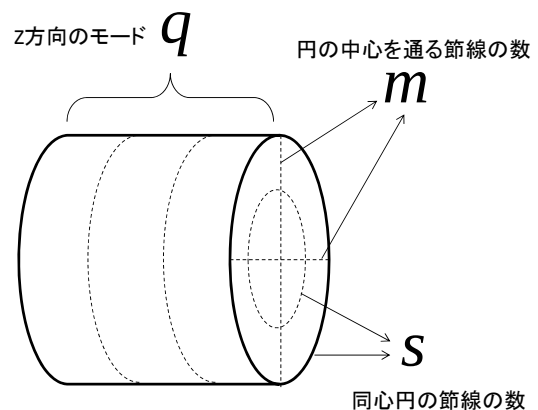


図 20 記号とモードの対応

6.4. 解析解の算出

上記で理論解を算出することができたため、次には、具体的な数値で解析解を求める。

まず、ここではベッセル関数の零点を求めることから始める。インターネットの発展した現在では、特殊関数の値を求める場合には、従来から利用されている数表等ではなく、いくつかの非常に有用なサイトでベッセル関数を数値的に求める機能を利用することが可能である。また、Microsoft 社の Excel でもベッセル関数の機能が提供されており、一昔前と比較すると、特殊関数

を利用した試計算が格段に身近にできるようになった。本ベンチマークでもインターネットの恩恵を受け、非常に短時間に数値解と比較するためのデータを得ることができたことを付記しておく。ベッセル関数の零点は次の通りである。

表 16 ベッセル関数の零点
(数値は <http://mathworld.wolfram.com> より)

	m=0	m=1	m=2	m=3	m=4
s=1	3.83	1.84	3.05	4.20	5.32
s=2	7.02	5.33	6.71	8.02	9.28
s=3	10.17	8.54	9.97	11.35	12.68
s=4	13.32	11.71	13.17	14.59	15.96
s=5	16.47	14.86	16.35	17.79	19.20

※ m は節直径の数、s は節同心円数

共鳴する周波数を求めるために、 $J_{m,s}$ を小さい順番に並べ最初の 6 個を選び、また、z 方向に対して $q=1,2,\dots,5$ で、共鳴する周波数を求める。このうち、3.5kHz までをシミュレーションの対象として計算を行うものとする。また、下記に対応する本書で利用する記号を記述する。

表 17 解析対象の共鳴周波数

	q=0	q=1	q=2	q=3	q=4
$J_{0,0}'$	-	865	1730	2595	3460
$J_{1,1}'$	1014	1333	2005	2786	3606
$J_{2,1}'$	1682	1891	2413	3092	3847
$J_{0,1}'$	2110	2280	2729	3345	4053
$J_{3,1}'$	2314	2470	2889	3477	4162
$J_{4,1}'$	2928	3053	3401	3913	4533
$J_{1,2}'$	2936	3061	3408	3918	4538

※ q は高さ方向の節数、灰色部分は単根

表 18 ベッセル関数の零点に対応する
本資料での記号

	m=0	m=1	m=2	m=3	m=4
s=1	$J_{0,1}'$	$J_{1,1}'$	$J_{2,1}'$	$J_{3,1}'$	$J_{4,1}'$
s=2	$J_{0,2}'$	$J_{1,2}'$	$J_{2,2}'$	$J_{3,2}'$	$J_{4,2}'$
s=3	$J_{0,3}'$	$J_{1,3}'$	$J_{2,3}'$	$J_{3,3}'$	$J_{4,3}'$
s=4	$J_{0,4}'$	$J_{1,4}'$	$J_{2,4}'$	$J_{3,4}'$	$J_{4,4}'$
s=5	$J_{0,5}'$	$J_{1,5}'$	$J_{2,5}'$	$J_{3,5}'$	$J_{4,5}'$

※ m は節直径の数、s は節同心円数

6.5. 解析結果

前節までに解析解を示したが、音響固有値を求める際に注意すべきことが重根である。 $m \neq 0$ については円周方向と半径方向の解の積となっている。このうち円周方向の解については、節線の位置に自由度がある。すなわち、節線については、底面の円板内でどの角度となってもいい自由度があるため重根となる。一方、 $m=0$ については、円周方向の解は定数であるため高さ方向のみに依存する解となり重根ではなくなる。すなわち、ここで利用した記号では、 $J_{0,s}$ は単根であり、 $m \neq 0$ に対して $J_{m,s}$ は重根となる。ここでは、3500Hz までの 26 個の相異なる固有値まで解析するものとする、その範囲では、

865Hz、1730Hz、2595Hz、3460Hz

2110Hz、2280Hz、2729Hz、3345Hz

の 8 つの固有値のみが単根となる。その他の 18 個の固有値は重根である。すなわち、3500Hz までには 44 個の固有値が存在することになる。

固有値解析の計算結果を次に示す。ここでは、固有値 λ に対して、

$$f = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \quad (30)$$

を周波数として出力している。この周波数を理論解と比較することにより、本ソフトウェアの結果は理論値とほぼ一致することが確認できた。その誤差は 0.1% 程度であることから正しい値が計算できていることが分かった。

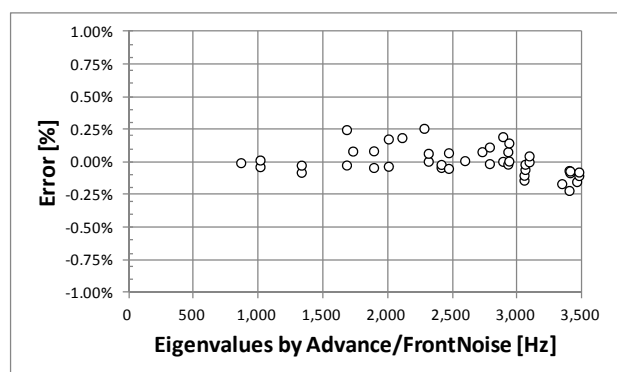


図 21 計算値の誤差

また、本解析においては、単根と重根についても正しく計算できていることが分かる。また、固有ベクトルについては、それぞれのモードの節線が計算できていることにより、正しく求められてい

ることが確認できた。この固有ベクトルの図については、次の節に示す共鳴周波数の音響ポテンシャルのコンタ図と同等のものが得られていることを報告しておく。

以上の結果から、本ソフトウェアに組み込んだ固有値解析機能が正しく動作していることが確認できた。本機能では、固有値計算実行を計算時に環境変数で指示することにより、通常の入力データをそのまま利用して固有値解析が可能である。また、固有値計算においては、解析で求める固有値の個数とシフト量をパラメータとして与えることができる。また、固有ベクトルの出力数をファイルに指定することが可能であり、固有ベクトルを可視化できる。

表 19 計算結果と解析解の比較

番号	計算値 Hz	解析解 Hz	差異%	番号	計算値 Hz	解析解 Hz	差異%
A	864.9	865.0	-0.01%	O	2785.6	2786.0	-0.01%
B	1013.5	1013.9	-0.04%	O	2789.2	2786.0	0.11%
B	1014.0	1013.9	0.01%	P	2888.9	2888.8	0.00%
C	1331.7	1332.8	-0.08%	P	2894.4	2888.8	0.19%
C	1332.5	1332.8	-0.02%	Q	2927.7	2928.2	-0.02%
D	1681.5	1681.9	-0.02%	Q	2930.5	2928.2	0.08%
D	1686.1	1681.9	0.25%	R	2936.1	2935.9	0.01%
E	1731.4	1730.0	0.08%	R	2940.2	2935.9	0.14%
F	1890.5	1891.3	-0.04%	S	3049.0	3053.3	-0.14%
F	1892.9	1891.3	0.08%	S	3050.2	3053.3	-0.10%
G	2004.5	2005.2	-0.03%	T	3058.9	3060.7	-0.06%
G	2008.7	2005.2	0.18%	T	3060.1	3060.7	-0.02%
H	2113.9	2110.0	0.19%	U	3092.4	3092.4	0.00%
I	2286.3	2280.4	0.26%	U	3093.8	3092.4	0.05%
J	2313.6	2313.5	0.00%	V	3339.0	3344.6	-0.17%
J	2315.0	2313.5	0.07%	W	3393.7	3401.1	-0.22%
K	2411.8	2412.8	-0.04%	W	3398.9	3401.1	-0.07%
K	2412.3	2412.8	-0.02%	X	3404.9	3407.7	-0.08%
L	2468.7	2469.9	-0.05%	X	3405.3	3407.7	-0.07%
L	2471.6	2469.9	0.07%	Y	3454.8	3460.0	-0.15%
M	2595.2	2595.0	0.01%	Z	3472.9	3476.5	-0.10%
N	2730.7	2728.6	0.08%	Z	3473.8	3476.5	-0.08%

7. 事例 1：共鳴周波数の解析

7.1. 解析概要

前節では、本ソフトウェアの固有値計算機能を利用して、音響固有値となる周波数を計算した。本節では固有値計算機能を利用するのではなく、既存の周波数解析機能を利用して、共鳴する点を求める計算ができることを示す。ここでは、円筒内に適切な音源と観測点を設定して音響解析を実施した。その観測点における音圧レベルを周波数毎にプロットし、音圧レベルの高くなる点を共鳴周波数とみなした。音源および観測点に位置の設定については、解析対象とする周波数領域では、節点にならないような点を選択した。この結果、前節で計算した値と同じ共鳴点を得ることができ、本ソフトウェアの機能が確認できた。

7.2. 解析形状と音源の位置

解析形状は、前節と同じである。音源には、節にならない点を候補として、 $(-0.09174, 0.01507, 0.09664)$ に設定した。

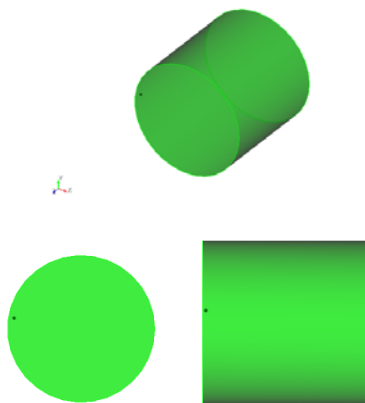


図 22 解析形状と音源の位置（黒い点）

7.3. 解析条件

解析結果の誤差を見積るために、メッシュサイズの異なる 3 ケースについて解析を実施した。解析周波数については、10Hz から上限周波数を 3.5kHz として 2Hz 間隔と設定した。すなわち、1745 周波数をスウィープして計算を行った。また、解析結果の観測点については、音源と同じく節点にならないような位置として $(0.062813, 0.052813, 0.042813)$ を与えた。

表 20 解析条件

項目	内容
メッシュサイズ	1.7mm
要素数	3,735,627
節点数	657,867
境界条件	すべての境界で速度ポテンシャルを 0 に固定
音源位置	$(-0.0917, 0.0151, 0.0966)$
観測位置	$(0.06281, 0.05281, 0.04281)$
周波数	10Hz から 3.5kHz まで 2Hz 刻み (全周波数 1745 点)

7.4. 解析結果

まず、音圧レベルのピークとして得られる共鳴点の計算結果を示す。この結果を前節と比較する場合の注意を 1 点示す。ここで得られる解析結果では、前節で述べた固有値解析における重根に対応する概念はない。1 つの共鳴点は重なっており本解析ではそれ以上の分離ができないためである。

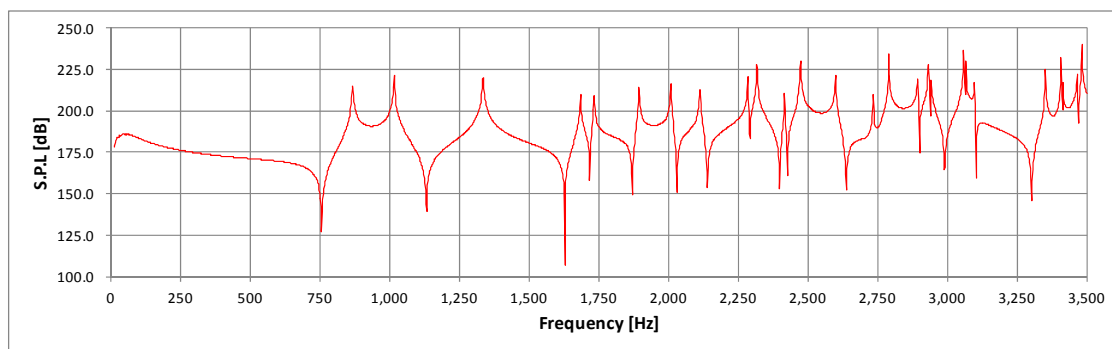


図 23 ケース 1 の解析結果

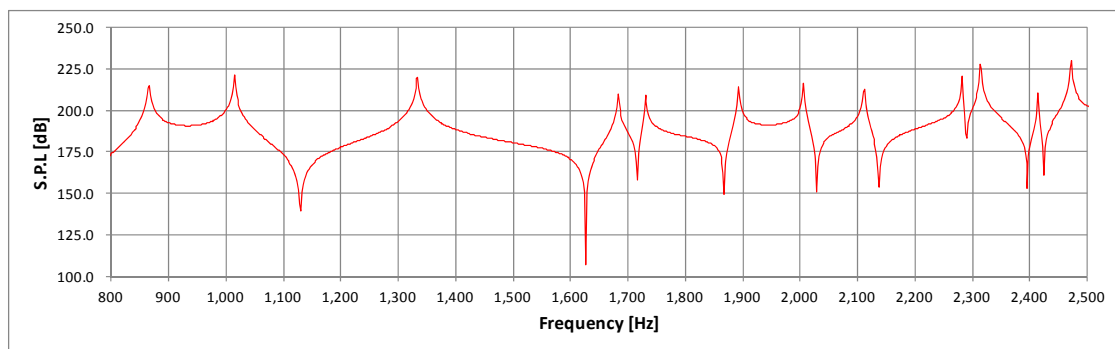


図 24 ケース 1 の解析結果（低周波数部分の拡大）

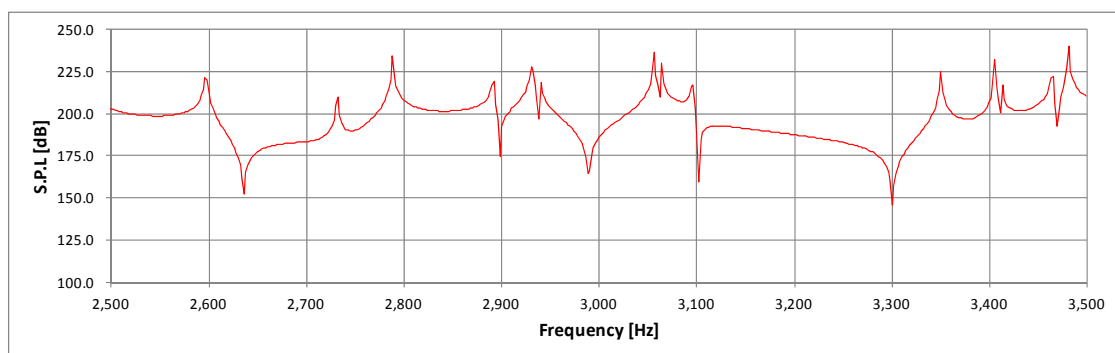


図 25 ケース 1 の解析結果（高周波数部分の拡大）

前記に示した共鳴点に関する解析結果を表に示す。解析では **2Hz** 間隔で周波数をスweepさせたため、本手法では、その間隔（**2Hz**）以下の精度を得ることはできない手法である。すなわち、その周波数間隔が最低限度の誤差として現われる。下記に、得られた解析結果と理論解との比較を示す。**2Hz** の精度が限度という前提でも、解析結果と理論解の誤差がほぼ **0.1%**程度であることが分かる。以上の結果から、固有値解析機能と合わせ本ソフトウェアの機能確認ができた。

表 21 計算結果と解析解の比較

番号	計算値 Hz	解析解 Hz	差異%
A	866.0	865.0	0.12%
B	1014.0	1013.9	0.01%
C	1334.0	1332.8	0.09%
D	1682.0	1681.9	0.01%
E	1730.0	1730.0	0.00%
F	1892.0	1891.3	0.04%
G	2006.0	2005.2	0.04%
H	2112.0	2110.0	0.09%

I	2282.0	2280.4	0.07%
J	2314.0	2313.5	0.02%
K	2414.0	2412.8	0.05%
L	2472.0	2469.9	0.08%
M	2596.0	2595.0	0.04%
N	2732.0	2728.6	0.13%
O	2788.0	2786.0	0.07%
P	2892.0	2888.8	0.11%
Q	2930.0	2928.2	0.06%
R	2940.0	2935.9	0.14%
S	3056.0	3053.3	0.09%
T	3064.0	3060.7	0.11%
U	3096.0	3092.4	0.12%
V	3350.0	3344.6	0.16%
W	3405.0	3401.1	0.12%
X	3413.0	3407.7	0.16%
Y	3465.0	3460.0	0.14%
Z	3481.0	3476.5	0.13%

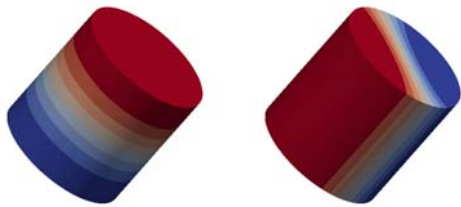


図 26 周波数 A と B での速度ポテンシャル

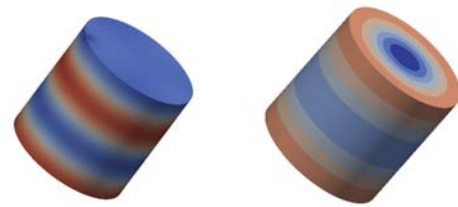


図 32 周波数 M と N での速度ポテンシャル

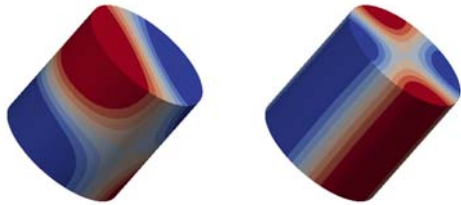


図 27 周波数 C と D での速度ポテンシャル

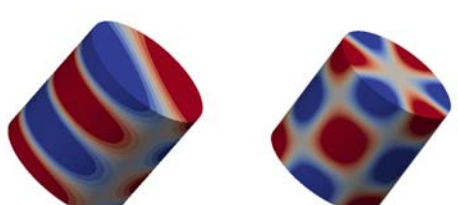


図 33 周波数 O と P での速度ポテンシャル

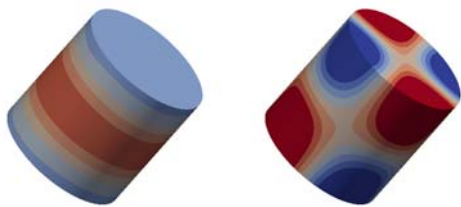


図 28 周波数 E と F での速度ポテンシャル

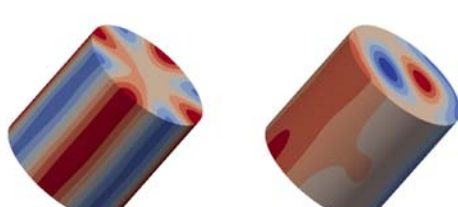


図 34 周波数 Q と R での速度ポテンシャル

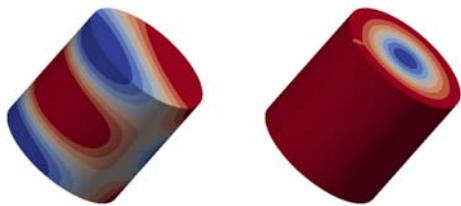


図 29 周波数 G と H での速度ポテンシャル

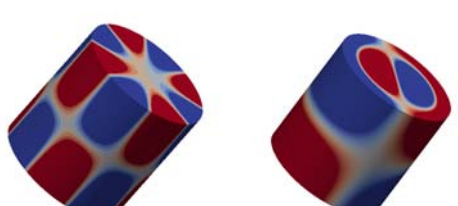


図 35 周波数 S と T での速度ポテンシャル

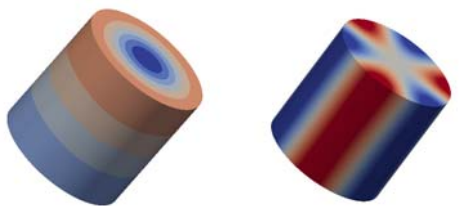


図 30 周波数 I と J での速度ポテンシャル

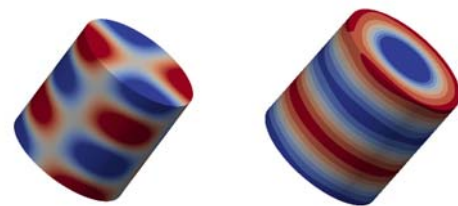


図 36 周波数 U と V での速度ポテンシャル

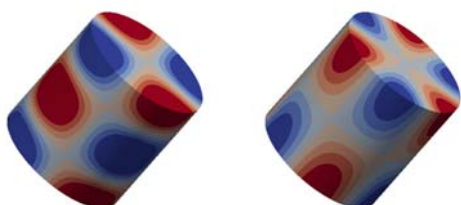


図 31 周波数 K と L での速度ポテンシャル

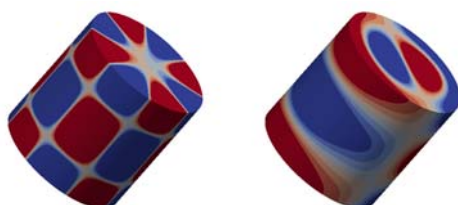


図 37 周波数 W と X での速度ポテンシャル

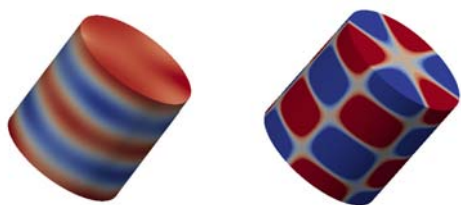


図 38 周波数 Y と Z での速度ポテンシャル

粗いメッシュでは、低い周波数においては一致しているが、高い周波数ではシミュレーション結果と解析解のずれが 20Hz 程度となる。しかし、ケース 2、ケース 3 とメッシュを細かくすると、解析解と一致してくる。このことから、周波数解析を行う本ソフトウェアの機能では、円筒内の共鳴が正しく計算できていることが確認できた。

7.5. 考察

円筒容器における共鳴周波数のシミュレーションを行い、解析解と比較した。シミュレーションでは、格子サイズを 3 つのサイズに変更して、精度の比較を行った。音響メッシュは、解析対象の波長に 10 程度の節点を配置する必要がある。いちばん粗いメッシュ（ケース 1）は 5kHz まで解析可能なメッシュサイズとした。すなわち、5kHz に対して 1 波長に 10 節点が配置される大きさのメッシュとした。ケース 2 はケース 1 の半分のメッシュサイズ、さらに、ケース 3 はさらにその半分程度のメッシュサイズとした。

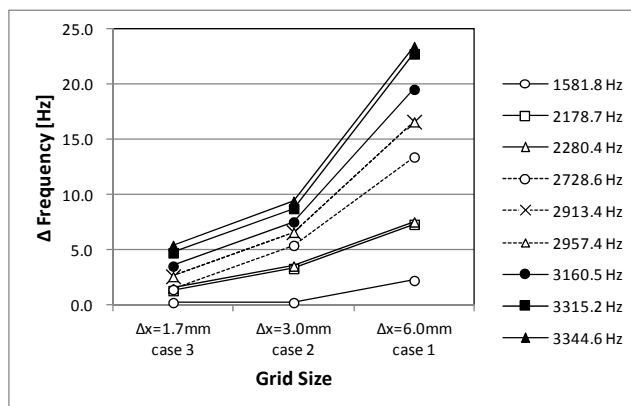


図 39 各周波数でのシミュレーション結果と解析解との差異

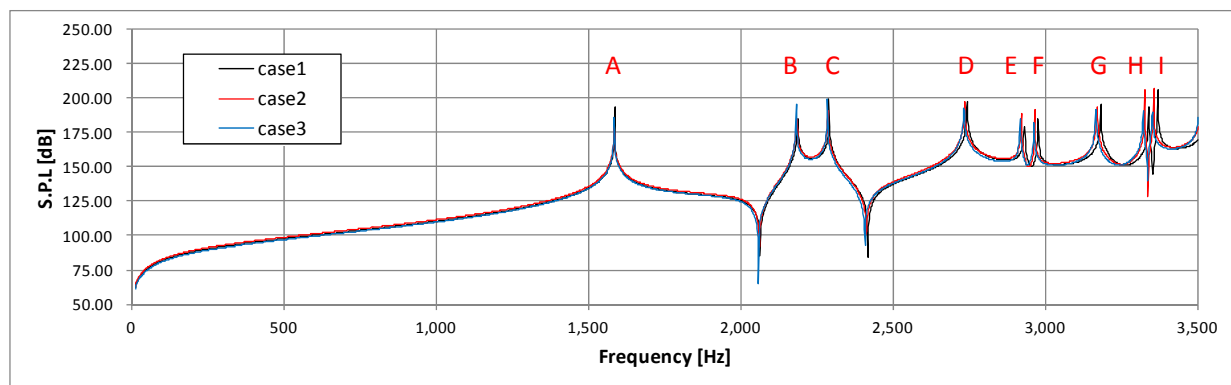


図 40 ケース 1 からケース 3 の重ね書き

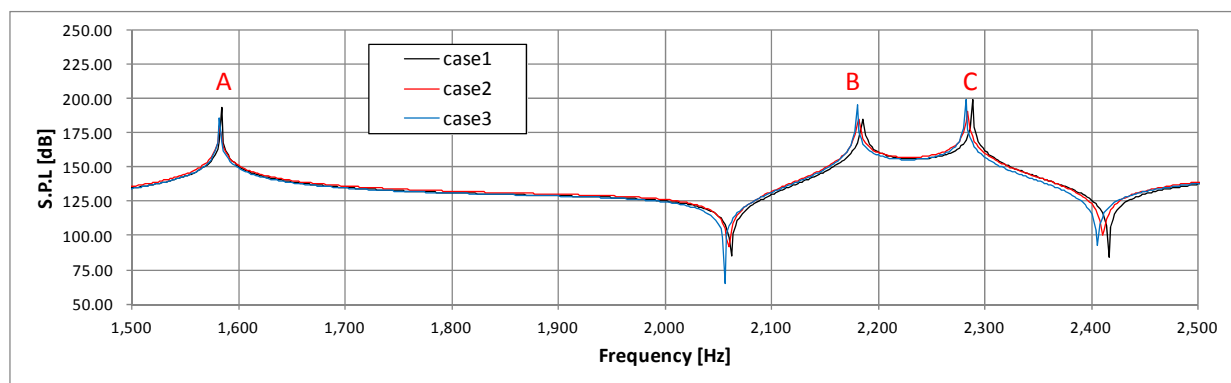


図 41 ケース 1 からケース 3 の重ね書き（拡大図その 2）

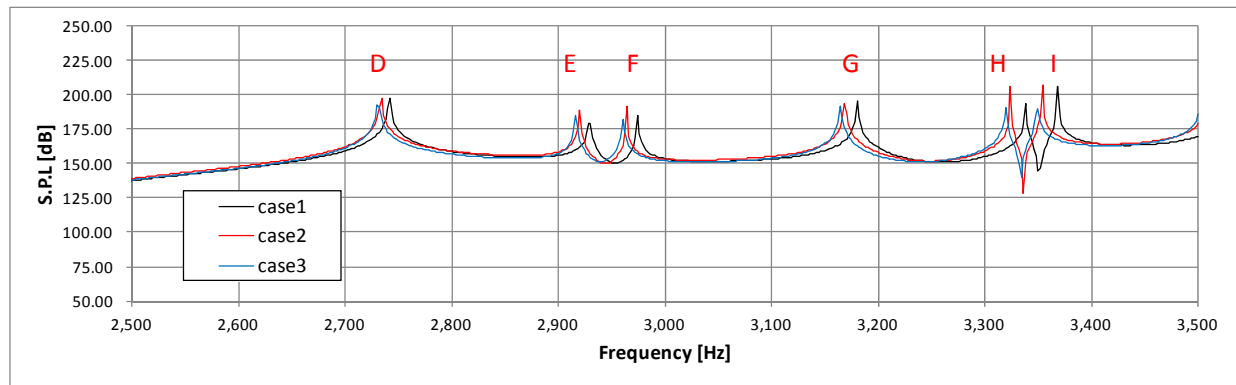


図 42 ケース 1 からケース 3 の重ね書き (拡大図その 2)

8. 事例 2 : 高架橋付近の騒音解析

8.1. 解析の概要

高架橋上を列車が通過した場合に発生する高架橋付近の家屋における騒音レベルを評価することを目的として解析を行った。本ケースは、直接法の 1 つの適用事例としても解析を実施した。

ここでは、車輪付近の 2 カ所の音源（同位相で同じエネルギー）とし、音源から空气中を伝播した音のみを対象とした。ここでは、本解析では車両から構造物を伝播して発生する音は考慮していない。

本解析は、3 次元形状を利用して解析を実施したが、列車通過時を仮定しているため本質的に 2 次元の解析を行った。従来では、2 次元の解析は 3 次元のメッシュ数と比較して収束までの時間が多くかかっていた。しかし、本問題は 2 次元の比較的小規模なケースであるため、本稿で述べた直接法が有利なケースである。

8.2. 解析条件

ここでは、遮音壁の高さと吸収率を変化させて、家屋付近の騒音レベルを 3 ケースについてシミュレーションした。本ソフトウェアでは有限要素法を利用しているため、遮音壁の高さを変化させる等の形状変更は容易に可能であり、高さ 2m と高さ 5m の 2 種類を設定した。また、高架橋の遮音壁の材質を変化させた。ここでは、両極端なケースとして完全反射と完全吸収の 2 種類とした。また、周囲の境界は無反射境界（吸収境界）とした。

その他の境界はすべて完全反射とした。実際の解析では、壁面に対して吸収率（実際に指定するデータは複素インピーダンス）を指定することも可能である。

表 22 ケース一覧

ケース名	遮音壁高さ	遮音壁の吸収
ケース A	低い	反射
ケース B	高い	反射
ケース C	低い	完全吸収

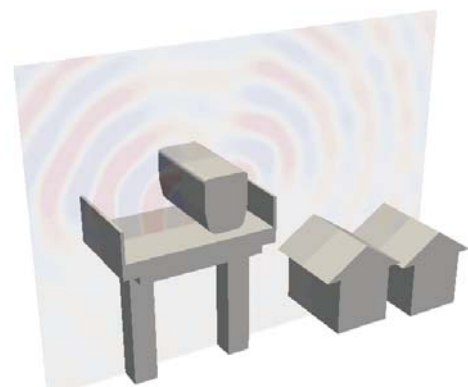


図 43 低遮音壁の解析形状

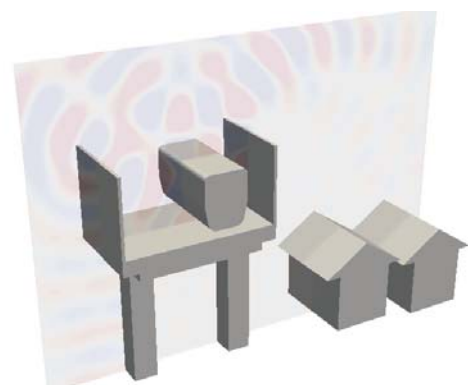


図 44 高低遮音壁の解析形状

8.3. 解析結果

ここでは、先に述べた 3 ケースの音響解析を実施した。解析結果として得られた音響速度ポテンシャルの分布および音圧レベルの分布を示す。これらのうち、前者は波面を確認するために利用することができる。また、後者は実際の観測点における実験等と比較することが可能である。これらの結果から、ケース A と比較して遮音壁を吸音としたケース C では遮音壁を高くしたケース B と

同程度の騒音レベルの低減になることが分かった。また、ケース B から、上り線通過時と下り線通過時の双方で騒音評価を行う必要があることが推測できる。ケース B 等では、低周波音の回り込みに注意が必要である。また、これらの結果から、いずれのケースも、周囲に高い建物がある場合の評価は別途実施する必要があることが分かる。

表 23 各ケースの解析結果

	低遮音壁、完全反射	高遮音壁、完全反射	低遮音壁、完全吸収
100Hz ポテンシャル			
100Hz 音圧レベル			
400Hz ポテンシャル			
400Hz 音圧レベル			

8.4. 考察

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用して、高架橋を列車が通過する場合の騒音評

価の解析を実施した。本解析の規模は、670 万要素、135 万節点であり、12core の計算機環境で 5 周波数 10 分で処理を行うことができた。有限要素

法の四面体要素を採用しているため、複雑な形状でも騒音評価が可能である。

ここでは、吸音壁の高さと吸音壁の材質を変更した3ケースの解析を実施した。それぞれのケースに対して、音の伝播の様子を確認することができ、騒音対策に有効な解析結果を得ることができた。この結果を見ながらシミュレーションでいくつもの条件を変更し、対策を検討することが可能である。本ソフトウェアでは四面体一次要素を利用しているため、メッシュを利用して形状の変更が非常に容易である。実物の解析対象への適用時には、下記の課題がある。

- ① 壁面の条件を決定すること：吸音パラメータ（壁面のインピーダンス）を決めることが難しいため、実験でいくつかの代表的な値が求められている程度を参考にして設定する必要がある。
- ② 解析規模をできるだけ小さくすること：解析規模（メッシュサイズ）は、モデルサイズ（解析領域の体積）に比例する。また、解析規模は周波数の3乗に比例して大きくなる。従って、現実的な処理時間で解析するために、できるだけ小さな解析領域とすることが必要である。

本ソフトウェアでは、風（定常流れ場）および温度を考慮した解析も可能であり、より現実にあった解析を実施することが可能である。

9. 外部計算機リソースでの利用環境整備

本ソフトウェアに関するトピックスを述べる。音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では、外部計算リソースでのサービス提供を開始している。ここでは、ユーザーが自身の計算機を所有することなく、外部の計算機資源を利用して、本ソフトウェアを利用できるという利用方法である。現時点では、本環境でのユーザーは少数ではあるが、本ソフトウェアの仕様範囲が広がり、解析規模が拡大してくることで、本サービスのニーズが高まってくると考えている。

現在では、外部計算機リソースでの利用環境整備として、下記の2つの環境で整備し、ユーザーに

よる利用が可能である。自社環境でのご利用と同じく、それぞれの機関で計算機をそれぞれの機関と契約の上で、当社とのライセンス契約をさせていただくことにより、ソフトウェアをご利用が可能となる。

- ・ 富士通 TC クラウド FUJITSU Technical Computing Solution TC クラウド：PaaS 型アプリケーション（音響解析）
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jhpc/tccloud/tccloud-proposal-201310.pdf>
- ・ 公益財団法人計算科学振興財団様における高度計算科学研究支援センター FOCUS スパコンシステム：音響解析分野動作検証済みアプリケーション
<http://www.j-focus.or.jp/focus/>

それぞれの計算機システムの詳細なデータは、いずれも web ページで確認いただける。従来から実施してきたライセンスによるユーザーの計算機における利用方法とともに、本サービスも拡大していく予定である。

10. おわりに

10.1. 実施した改良項目

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の Ver4.3 の新規機能として、多孔質媒体の解析機能、固有値を利用した構造音響連成機能、ソルバーの一部改良としてマルチグリッド前処理機能、リスタート時の不具合等のバグフィックス、および、チュートリアル作成等のマニュアルの整備を行った。また、その後のバージョンアップとして、音響固有値の計算、直接法ソルバーの導入、構造音響強連成への減衰項の導入、および、ツールの機能拡張の機能拡張を行った。また、別ソフトウェアである時間領域ソルバーの並列化を行った。いずれも、予定していた機能および性能を得ることができた。

これらの項目のうち、連成の機能、および、ソルバーの高速化については、取り組みを継続し、さらなる機能向上をユーザーから望まれているところである。本項目については、いくつかの取り組みの方法があり、可能な限り改良を続けてい

きたい。

その他の項目についても、引き続き、ユーザー様の要望に応じてバージョンアップを実施していく予定である。

10.2. 今後の予定

ユーザー様からの要望をもとに、2014 年度に開発を予定している項目は次の通りである。

- ・ 無反射境界機能の追加
- ・ 線形ソルバーの高速化
- ・ 流れ場の音響解析

これまで本ソフトウェアの無反射境界機能では、 ρc 境界で無反射境界を模擬していた。 ρc 境界は原理的に音が境界に対して垂直に入射する場合にのみ完全な無反射境界となる。複雑形状の場合およびできるだけ有限要素法の解析領域を小さくしたい場合等には、 ρc 境界以外の手法が必要となるケースがある。今回のバージョンアップの計画のひとつの項目としては ρc 境界以外の手法、例えば、PLM 等の手法の導入を検討する。

次に、線形ソルバーの高速化では、特に並列環境における高速化のための改良およびチューニングを行う。ここでは、構造解析固有値を用いた構造音響連成の収束性についても検討する。改良項目の部分で述べたように、本件については、本ソフトウェアをより大規模化・より高速化に対応できるようなソフトウェアにするための永遠の課題であり、最新の線形ソルバーの研究成果を取り込むように進めていく予定である。

最後に、流体との連成機能の整備では、流れを伴う場での音響計算を利用しやすいような改良を実施する予定であり、連成機能を含めた改良項目を予定している。また、高速流れを伴う音響問題にも解決すべき課題があり、このような課題に取り組んでいく予定である。

参考文献

[1] 松原 聖, 桑原 匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の現状”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5

[2] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の解析手法”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5

[3] 松原 聖, 桑原 匠史, 戸田 則雄, 大西 陽一, 大家 史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用した連成解析”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5

[4] 松原 聖, 桑原 匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の解析事例”, アドバンスシミュレーション Vol.15, 2013.5

[5] 松原 聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の透過音解析機能”, アドバンスシミュレーション Vol.16, 2013.8

[6] 富来礼次, “有限要素法を用いた残響室内音場の拡散性解明に関する研究”, 大分大学大学院工学研究科博士後期課程博士論文(2003)

[7] 安田洋介, 佐久間哲哉, “高速多重極 BEM による多孔質材内部音場の解析”, 日本音響学会講演論文集(春季)pp.1085-1088(2008.03)

[8] Y.Saad and M.H.Schultz, “GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems”, SIAM J. Sci. Stat. Comput., 7:856-869, 1986

[9] Y.Saad, “A flexible inner-outer preconditioned GMRES algorithm”, SIAM Journal on Scientific Computing archive. Volume 14 Issue 2, Pages 461-469, March 1993

[10] A.H. Baker, E.R.Jessup, T.Manteuffel, “A Technique for Accelerating the Convergence of Restarted GMRES”, SIAM JOURNAL ON MATRIX ANALYSIS AND APPLICATIONS, March 2004

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)