

アドバンスソフトの連成解析事例と今後の展望

松原 聖* 大西 陽一** 富塚 孝之*** 尾川 慎介****

Case Examples of Coupled Analysis with Advance/Front-series

Kiyoshi Matsubara*, Youichi Ohnishi**, Takayuki Tomizuka*** and Shinsuke Ogawa****

産業界では、流れ・温度・変形・応力・音響・振動等が相互に関連しているような現象の課題を解決するために、研究課題や設計課題として連成問題への取り組みが開始されている。例えば、連成解析を利用しなければ解けない現象として、流れによる薄板の振動、爆発による変形・破壊現象、構造物振動による音響の放射等の現象がある。

当社は設立以来、プラント等を対象とした爆発現象をはじめとし自動車・原子力・電機等の分野において、連成解析の実績を積み重ねてきた。そのような背景から、当社主催で 2015 年 5 月 15 日に「製品説明会;アドバンスソフトの連成解析セミナー」を実施し、流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red、高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を用いた連成解析事例について報告を行った。本稿は、本セミナーで示した内容を中心にまとめ、今後の展望とともに示したものである。

Key word: 連成解析、流体解析、構造解析、音響解析、マッピング、一方向連成、双方向連成

1. はじめに

当社では、流体解析は Advance/FrontFlow/red [8]、構造解析は Advance/FrontSTR [9]、音響解析は Advance/FrontNoise の 3 つのソフトウェア等を自社商品として取り扱っている。このうち、流体解析と構造解析のソフトウェアは国のプロジェクトで開発され当社で事業化・商品化したソフトウェアであり、音響解析のソフトウェアについては、当社で独自開発したものである。また、高速流を解析用に開発した Advance/FrontFlow/FOCUS も当社独自開発のソフトウェアである。

*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 2 事業部

2nd 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

****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

われわれは、お客さまの要望に応じてソフトウェアをカスタマイズしながら、進化させている。

本稿では、まず、当社で実施している連成解析の概要について示し、そのあとに、流体解析ソフトウェア・構造解析ソフトウェア・音響解析ソフトウェアのいくつかの連成事例について示す。

2. 連成解析事例の概要

2.1. 利用する用語の定義

連成解析については、アルゴリズムや物理量のやりとりに対して、一方向連成・双方向連成・強連成・弱連成等の用語が利用されている。しかし、これらの用語の意味は、本分野で必ずしも統一されているとはいえない。本節では、本稿で利用する用語の定義を述べる。

一方向連成と双方向連成の用語の定義について示す。まず、A から B への一方向連成とは、B の解析結果が A の解析結果に影響を及ぼさない連成方式である。一般には、連成すべき物理量については、解析ソフトウェア間をファイル経由で渡すことが多い。例えば、流体力による構造物の

応力を求める解析では、構造物の変形による流れへの影響は少ないとして本方式を適用できるケースである。次に、A と B の双方向連成とは、A と B とで相互に物理量を交換しながら解析を実施する方式である。決められたひとつの計算点において物理量を相互に交換し、相互の結果が影響を及ぼし合う手法である。例えば、流体力による構造物の変形が大きいケースに適用でき、十分にタイムステップを小さくすることにより流れと変形を同時に求めることができる。

次に、弱連成と強連成の用語について示す。弱連成とは、A と B の連成計算を行う場合にある計算点の中でお互いの物理量を別々に求める連成方式である。1 つの計算点の中では、連成計算ではない個別の解析と同じ処理をすることになる。次に、強連成とは、A と B の連成計算を行う場合に、1 つの計算点の中で、お互いの物理量を関連付けて同時に求める連成方式である。1 つの計算点ですべての物理量を、整合性を持って求める必要がある。したがって、1 つの計算点の中で同時に行列を解く手法や反復計算が利用される。

これらの用語を組み合わせ、連成解析については、「一方向弱連成」、「双方向弱連成」、「(双方向) 強連成」の3つのパターンに分類することができる（ここで一方向強連成ということは原理的にないため、1つのパターンを除いた）。本稿では、これらの3つのパターンに分類して述べる。

2.2. 連成解析対象と当社商品

本節では、冒頭に示した当社で取り扱いを行っている4つのソフトウェア

- ・ 流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red
 - ・ 高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS
 - ・ 構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR
 - ・ 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise
- の組み合わせを利用した代表的な連成解析のパターンについて説明する。

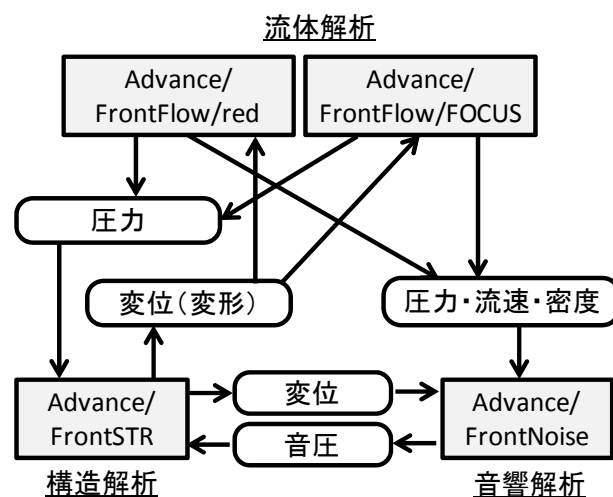


図 1 連成に関連する当社ソフトウェア

まず、1 つめの利用方法として、流れによる構造物への影響を考慮する流体構造連成について述べる。変形が少なく構造物の応力を評価する場合には Advance/FrontFlow/red の解析結果を利用した Advance/FrontSTR による流体構造一方向弱連成が利用可能である。

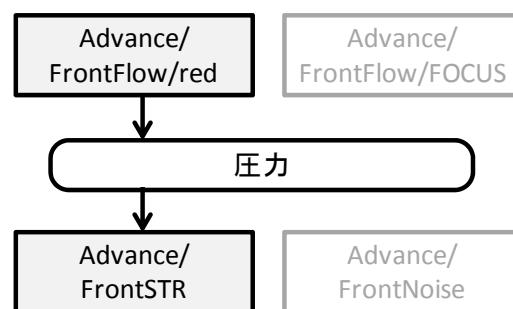


図 2 流体構造一方向弱連成

次に、変形が大きい弾性変形の範囲内の場合には、Advance/FrontSTR のモード（固有値・固有ベクトル）を利用した Advance/FrontFlow/red による流体構造双方向弱連成が利用可能である。

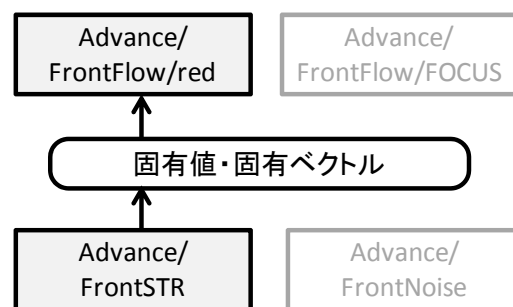


図 3 流体構造双方向弱連成

さらに、変形が大きく非線形の変形の場合には、Advance/FrontFlow/FOCUS と Advance/FrontSTR を

利用した流体構造双方向弱連成が利用可能である。ここでは、一部の機能（連成計算時のマッピング等の処理）に、汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP の機能を利用している。

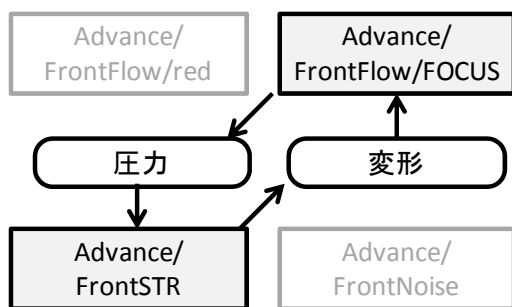


図 4 流体構造双方向弱連成

また、流体騒音による音響解析（流体音響連成解析）については、Advance/ FrontFlow/red の非定常解析結果および Advance/ FrontNoise による流体音響一方向弱連成機能を利用する。流体騒音の音源としては、流れから計算できる二重極・四重極音源として、Advance/ FrontNoise の連成オプション機能で音源に変換し、音響解析に用いる。

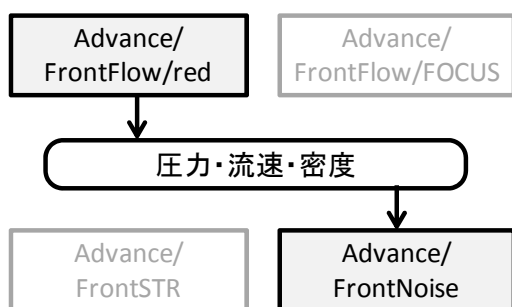


図 5 流体音響一方向弱連成

さらに、構造音響/音響構造連成による構造物から放射される音響解析の場合には、構造物の振動を音源として、Advance/ FrontSTR の時系列解析結果を利用した Advance/ FrontNoise による構造音響一方向弱連成が利用可能である。

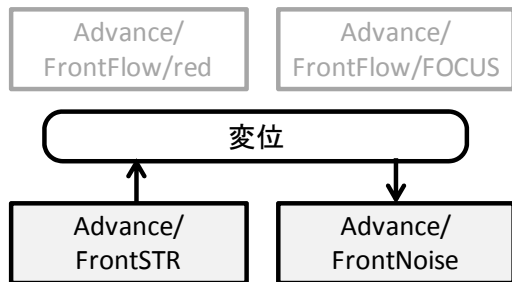


図 6 構造音響一方向弱連成

最後に、構造物振動と音響振動が強く関連して

いる場合には、Advance/ FrontSTR のモード（固有値・固有ベクトル）を利用した Advance/ FrontNoise による構造音響双方向強連成が利用可能である。

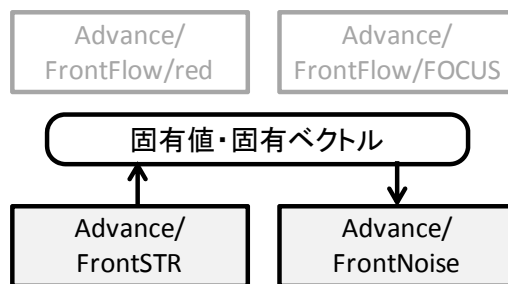


図 7 構造音響双方向強連成

2.3. 連成解析の実績

これまで本雑誌に掲載した[1]～[13]の連成計算の事例を下記の表にまとめる。いずれも当社ソフトウェアを利用またはカスタマイズして連成解析を実施した事例である。

表 2.1 当社の連成解析実績とソフトウェア

Ref	FFr	FFF	Str	FN	Net	Eve	他
[1]	○		○	○			
[2]						◎	◎
[3]			☆		☆		
[4]						◎	◎
[5]		◎	◎				
[6]			○	○			
[7]		◎					◎
[8]	○		○	○			
[9]	◎		◎				
[10]		○		○			
[11]		◎	◎				
[12]			○	○			
[13]			☆	☆			

※ 表中の記号は下記の通りである。

○:一方向連成、◎:双方向連成、☆:強連成

FFr : Advance/ FrontFlow/red

FFF : Advance/ FrontFlow/FOCUS

Str : Advance/ FrontSTR

FN : Advance/ FrontNoise

Net : Advance/ FrontNet

Eve : Advance/ EveSAYFA

3. Advance/FrontFlow/red の連成解析事例

3.1. 機能

まず、当社の流体解析ソフトウェア Advance/FlontFlow/red を中心とした連成機能について述べる。まず、流体解析中の構造変形は無視できるとする仮定の「一方向連成解析」について説明する。ここでは、あらかじめ流体解析で得られた固体表面上の圧力分布・温度分布をファイルに出力し、構造解析の境界条件として利用する。また、一方で流体構造相互の影響を考慮しなければならないケースにおいては、格子変形機能とモード解析を用いた「双方向連成解析」を仮定する。このときには、構造変形量を流体解析の計算格子にフィードバックする仕組みとなる。すなわち、双方向連成解析では、構造のモード解析と ALE を用いた連成解析が利用可能である。

Advance/FlontFlow/red の双方向解析を行う場合には構造解析部分のみで固有値解析を行い、固有値・固有ベクトルをあらかじめ算出しておく。これらの情報からモード解析を行うためのモジュールは本ソフトウェアには組み込まれている。ここでは、流体解析から得られた構造表面の圧力データから構造解析用の荷重を算出し、組み込まれたモジュールでモード解析を行い変形量を得ることができ、ALE 手法を用いてメッシュを更新する。適用範囲は線形弾性の範囲に限られるが、手軽に双方向連成解析の可能な手法である。

3.2. 事例

流れの中の薄板振動について実施した解析について示す。連成解析で利用した物性を下記に示す。解析対象は図 8 の通りであり。ここでは、構造解析で得られた 10 個の振動モードを利用した。振動はこれらのモードの線形和として表現される。

表 3.1 流体構造双方向弱連成に利用した物性値

項目	内容
流体物性	密度 1.18[kg/m ³]
	粘性係数 1.82[Pa・s]
構造物物性	密度 100[kg/m ³]
	ヤング率 0.25[MPa]
	ポアソン比 0.35

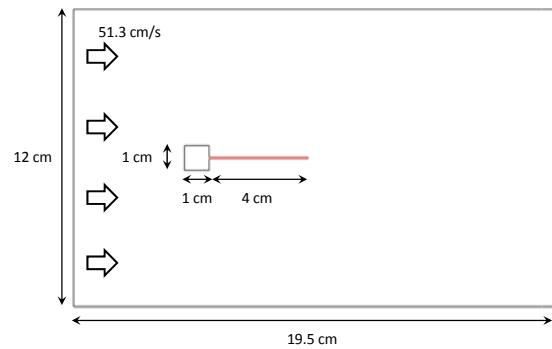


図 8 流体構造双方向弱連成の解析対象

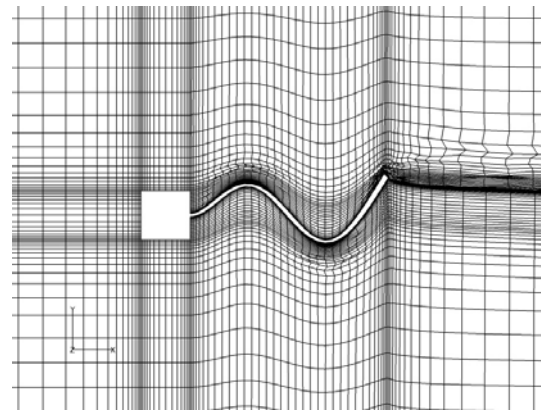


図 9 構造物変形とメッシュ変形

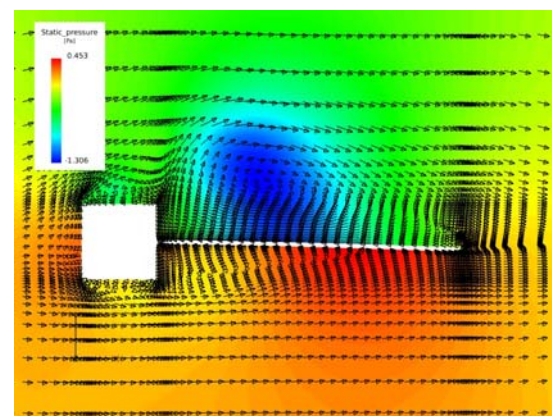


図 10 流体構造双方向弱連成の結果

3.3. まとめ

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red では、格子変形機能を用いることで、よりダイナミックな構造連成解析が可能である。また、モード解析機能を使うことで、より手軽に構造連成解析が可能である。Advance/FrontFlow/red は、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise との連成も可能である。今後とも、流体/構造/音響ソフトのソースコードレベルでの開発が可能な利点を生かして、さまざまな連成解析を実施していく予定である。

4. Advance/FrontFlow/FOCUS の連成解析事例

4.1. 機能

高速流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS は、超・遷・亜音速の高速流体をはじめ、燃焼流体を対象とした3次元流体解析ソフトウェアである、気相燃焼（爆燃、爆轟）に関するさまざまな燃焼モデルを持ち、さらに、火炎伝播モデルの機能が利用可能であるような衝撃波、爆風圧が高速に計算可能な流体ソルバーである。ここでは、Immersed boundary 法（埋込み境界法）より構造物の取込み、格子作成が容易となっている。連成解析の実施には当社の汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP を別途使用する。

Advance/FrontFlow/FOCUS は、直交格子ソルバー機能であり、流体の計算格子は立方体または直方体形状のみを使用する。また、物体表面の座標を取り込むためのメモリーを大幅に削減可能となっている。固体壁には、Immersed boundary 法（埋込み境界法）を採用しており、移動壁境界も可能であり、本機能を拡張して流体構造連成機能も可能となっている。現状では、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR または Dyna3D2000 と連成解析が可能となっている。

4.2. 事例

ビニールハウス内に水素混合気を形成し、その気体を着火、爆轟させ、コンクリート壁の影響を評価した実験を解析対象とした事例を示す。図 11 と図 12 に実験配置図および実験風景の概要を示す。いずれも参考文献[14]からの抜粋である。

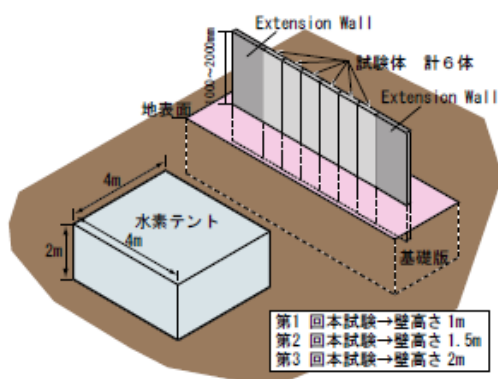


図 11 実験配置図[14]



図 12 実験風景[14]

ここでは、その実験結果と高速流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS による結果（コンクリート壁面中央における圧力の時系列変化）を比較した。0.005 秒で爆風圧はコンクリート壁に到達し、その圧力はほぼ 1MPa 程度となった。このシミュレーション結果は実験結果とよく一致した。

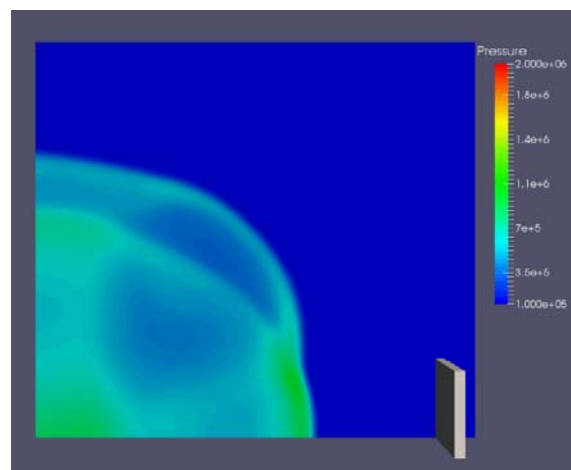


図 13 着火 0.004[sec]後の圧力分布

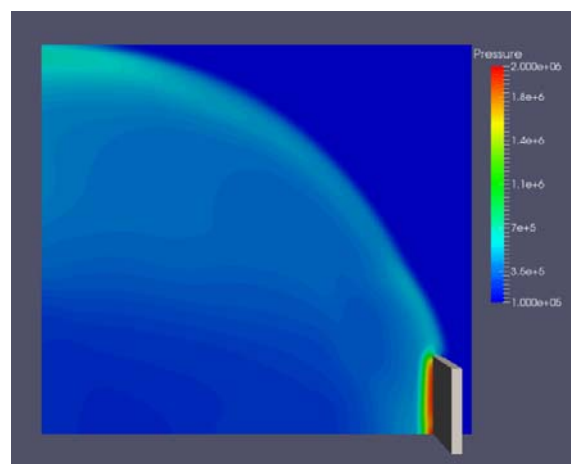


図 14 着火 0.005[sec]後の圧力分布

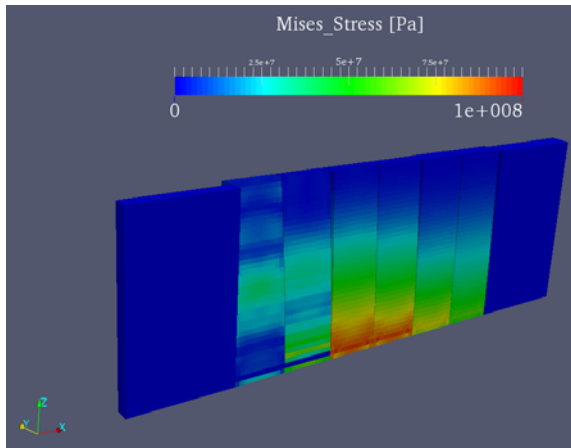


図 15 コンクリート壁での変位と応力分布

4.3. まとめ

水素爆風圧を受けるコンクリート壁の解析事例を示した。本事例では、実験結果とも良好な一致を見せており、実用的な流体構造の双方向弱連成が可能となっていることを確認した。また、Advance/FrontFlow/FOCUS を用いた連成解析事例では、2001 年 11 月 7 日に発生した浜岡原子力発電所の 1 号機の配管破断事故のシミュレーション（配管内での水素爆轟の解析事例）も実施しており、そのケースでも現象を定量的にもよく一致していることを確認した。

Advance/FrontFlow/FOCUS および連成機能については、Immersed Boundary 法を用いる有利さを生かし、今後とも大変形を伴う解析事例を積み重ねていく予定である。

5. Advance/FrontSTR の連成解析事例

5.1. 機能

構造解析で求めることができた振動（変位）を音源とした音響解析機能を Advance/FrontSTR の連成解析事例として示す。この機能は構造物の振動を音源として音波の空気中の伝播をシミュレーションする機能である。当社ではこれまで音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise に関する連成オプション機能として、構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR[1]との一方向の構造音響連成解析機能を提供してきた。ここでは、音波による空気の振動は構造物の振動に影響しないという仮定、すなわち、構造解析から音響解析への一方向

向の影響（一方向連成、弱連成）を仮定している。この機能は実用上有用であり、かなりのケースで利用されている。

5.2. 事例

大型の船舶設計においては、居住区における騒音を一定レベル以下とする国際的な規約改定がある。本節では、機関室の振動が引き起こす居住区の騒音の解析を行った。ここでは、居住区の節点変位の過渡応答を求めた構造解析結果をフーリエ変換を行い、寸法の異なるメッシュ間で値を補間し、音源データに変換した。また、振動源としては、周期的な機関室の振動を与えた。

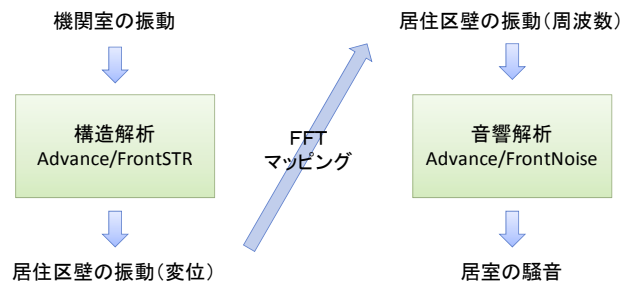


図 16 構造音響一方向弱連成

ここでは、まず、周波数の上限 1.5 kHz と設定し、構造解析のメッシュサイズを 0.2m と決めた。なお、金属中の音速 5 km/sec であり、時間刻みは 0.1 msec とした。また、要求分解能 10 Hz（構造解析時間 0 は最低限度 1 sec）ここでは、過渡解析からの定常状態を抽出し、実際には、1 秒間の解析から 0.5 秒間の解析を実施した。

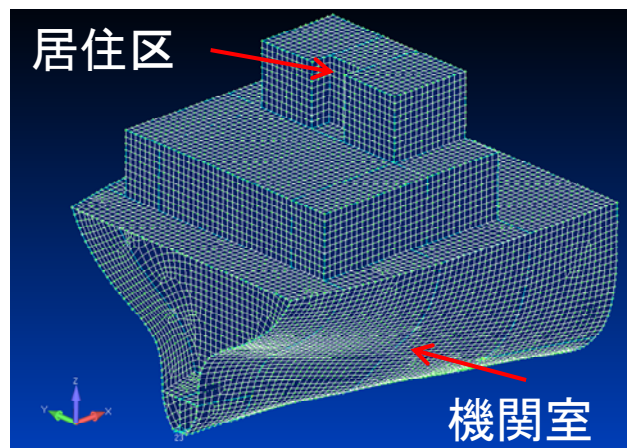


図 17 構造解析メッシュ

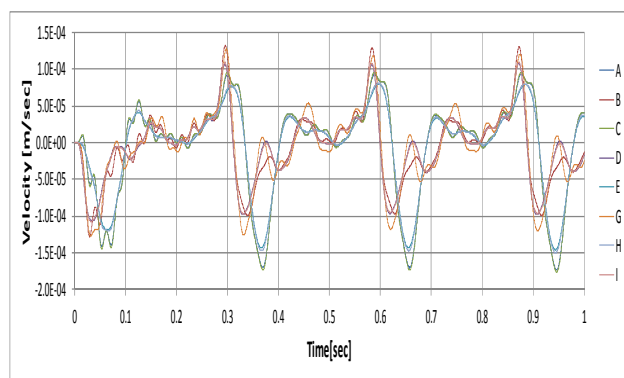


図 18 観測点での振動レベル

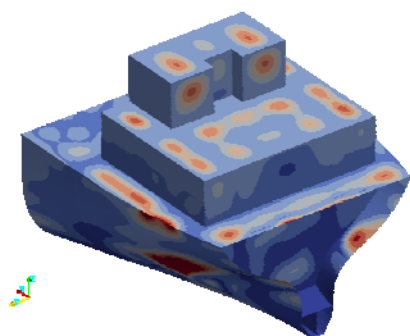


図 19 0.6 秒後結果

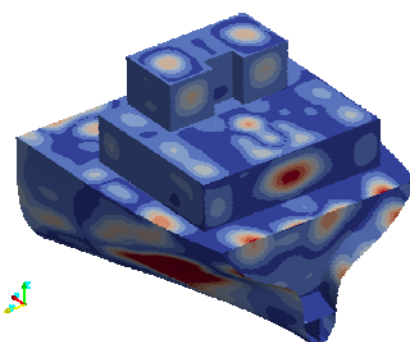


図 20 0.7 秒後結果

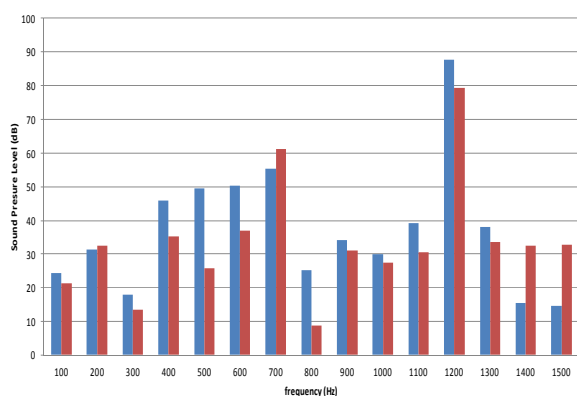


図 21 居住区での音圧レベル

5.3. まとめ

本節では、構造解析ソフトウェア Advance/ FrontSTR を利用した構造振動による音響評価を目的とした連成解析を紹介した。前節および次の節で示す構造物中の透過音を含む構造振動と音響の連成問題や振動解析と流体解析を利用した衝撃圧の評価等も解析可能である。今後とも、Advance/ FrontFlow/red および Advance/ FrontFlow/FOCUS で紹介した事例も合わせ、連成解析では Advance/ FrontSTR の大規模並列解析の特徴を生かした連成解析を実施していく計画である。

6. Advance/ FrontNoise の連成解析事例

6.1. 機能

音響解析ソフトウェア Advance/ FrontNoise では、有限要素法により音響解析を行う。ここでは音源を与え解析領域の粒子速度のポテンシャルを解く。周波数領域/時間領域の解析が可能であり、大規模並列計算（8 億要素解析の実績あり）を特徴している。また流れ場、温度を設定した領域での音響解析が可能であり、多孔材を含む領域の音響解析および音響固有値解析が可能である。また、行列計算には反復法/直接法を利用している。

Advance/ FrontSTR および Advance/ FrontFlow/red と組み合わせた構造音響双方向強連成機能、および、構造-音響、流体-音響の一方方向連成が可能である。ここでは、構造音響双方向強連成について示す。

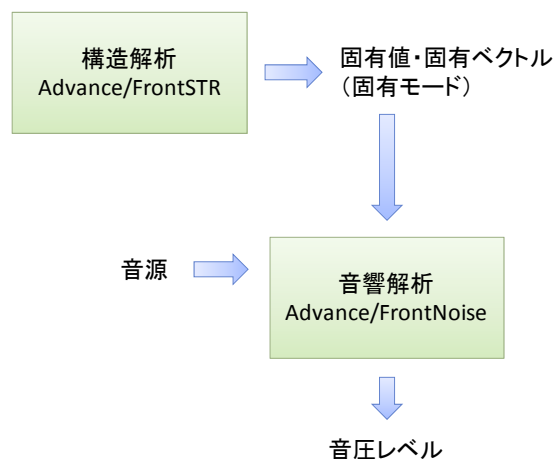


図 22 構造音響双方向強連成機能

6.2. 事例

本節では、構造音響強連成解析機能を用いたマフラー（消音器）の評価の解析例を示す。ここでは、音響による構造物の振動（減衰を含む）も考慮した。境界条件については、入口は音源を設置し、出口は ρc 境界を設定した。構造物には音源としては振動を与えないが、音により振動する。また、周波数は 5Hz 間隔で 100Hz～1.2kHz の解析を行った。ここで、解析ケースは音響解析のみ、構造減衰なしの連成、構造減衰ありの連成のケースを実施した。解析モデルは下記の通りである。

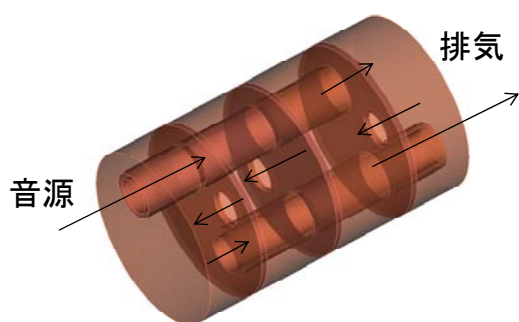


図 23 解析モデル

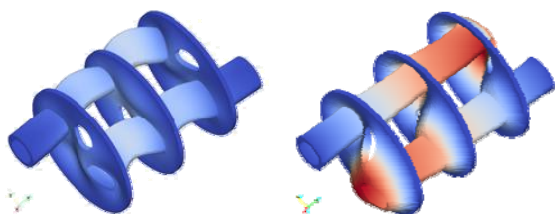


図 24 利用した構造解析の振動モード（一部）

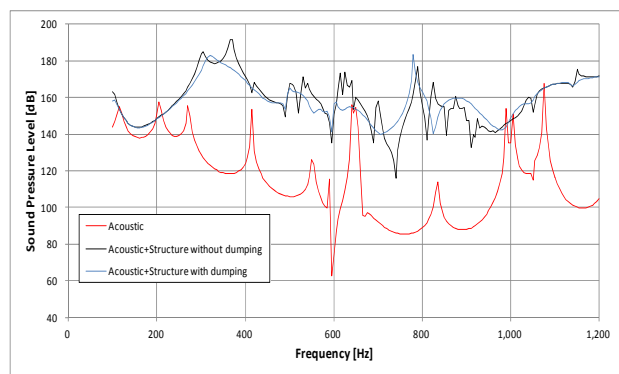


図 25 構造音響双方向強連成解析結果

連成解析により、このモデルでは内部の壁を透過する振動が生じ、音圧レベルが全体的に上昇し

た。また、本ソフトウェアでは、形状や材質のほか、触媒（多孔質媒体）の影響を考慮した解析も可能である。

6.3. まとめ

ハードウェアの性能向上により、構造解析や流体解析を利用した音源の解析が実用的になってきた。それに従い、流体解析や構造解析のポスト処理としての音響解析のニーズが増えてきた。音響解析ソフトウェア Advance/ FrontNoise では、当社で従来から取り組んできた構造解析との連成に加え、音響の大規模解析の適用により、流体音響連成が可能となった。構造-音響、および、流体音響連成の実績を重ね、その解析手順を音響解析ソフトウェアのツールとして整備した。

7. 今後の展望

連成解析の難しさは、複数のソフトウェア間でやりとりすべき物理量の種類の多さ（ケース毎に保存させる物理量について慎重に検討する必要がある）と、複数のソフトウェアの解析結果の整合性をとることの難しさ（収束させることの難しさ）の2点と考えている。

まず、前者については、当社の数年間の実績によりかなりパターン化されてきたと考えている。ただし、補間の考え方の困難さは本質的に難しく、連成面におけるメッシュ粗密の大きな違いに対してはケースバイケースで保存させる量をどのようにするかを考えなくてはならない。これに対しては、当社のマッピングソフトにおいて補間のオプションをいくつか提供することである程度対応できるようになってきた。

また、後者については、汎用的に解決手段を提供することは困難であるが、当社のソフトウェアに共通する大規模高速化の利用を生かしながら、いくつかのケースで収束の工夫および場合によっては双方向弱連成を利用することで、処理を高速化することが考えられる。

いずれにしても、今後これらの困難さを克服することで、連成解析のニーズは限りなく拡大し、将来的には連成解析を意識しないで実行すると

いう時代も到来すると考えている。しかし、単独のアプリケーションの高速化とともに、連成解析の収束性の飛躍的な向上・高速化が実現できると考えている。

一方では、現実の世界では一瞬のうちに、全体のバランスが取れ、各種物理量が保存されながら、各種の現象が進んでいく。その中では、シミュレーションでは再現の難しい連成解析が数多くある。連成解析のアルゴリズムが今後とも多様な研究・開発において進展する中で、いくつかは解決されると予想している。しかし、実際には具体的な課題のひとつとなる連成解析の収束性等についてもそれを解決することはなかなか容易ではない。これらの課題は、永遠の課題であるともいえる。

今後とも、当社では、解析ソフトウェアおよび連成ツール群を実用問題に適用していくとともに、多種多様な解析ソフトウェアのソースコードをハンドリングできる当社の利点を生かして、ユーザー様からのニーズに応えた連成解析を実施していく予定である。

参考文献

- [1] 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)
 - [2] 「換気系を持つ施設での急激火災 3 次元詳細解析—EVE SAYFA と FDS による火災連成解析—」アドバンスシミュレーション Vol.6, (2010.12)
 - [3] 「1 次元気液二相流管路系解析シミュレータ Advance/FrontNet/TP」アドバンスシミュレーション Vol.7, (2011.4)
 - [4] 吉岡 逸夫, 浜野 明千宏, 三橋 利玄「建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA 2.0」アドバンスシミュレーション Vol.10, (2011.12)
 - [5] 中森 一郎, 原田 昌紀, 塩谷 仁「高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS と流体—構造の連成解析機能の紹介」アドバンスシミュレーション Vol.10, (2011.12)
 - [6] 松原 聖, 戸田 則雄「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による構造音響および流体音響連成解析」アドバンスシミュレーション Vol.14, (2013.1)
 - [7] 中森 一郎「高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS と Dyna3D2000 を用いた爆発解析の紹介」アドバンスシミュレーション Vol.14, (2013.1)
 - [8] 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)
 - [9] 「流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red を用いた流体—構造連成解析」アドバンスシミュレーション Vol.17, (2013.12)
 - [10] 松原 聖, 中森 一郎「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による流れを伴うダクト開口端反射率の評価 (第 1 報)」アドバンスシミュレーション Vol.17, (2013.12)
 - [11] 田中 洋一, 末光 啓二, 徳永 健一, 桑原 匠史, 中森 一郎「高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS を用いた流体—構造連成による爆発解析」アドバンスシミュレーション Vol.19, (2014.10)
 - [12] 加藤 國男, 大家 史, 松原 聖「船舶居住区騒音を対象とした構造音響連成解析手法」アドバンスシミュレーション Vol.19, (2014.10)
 - [13] 松原 聖「音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の構造音響強連成による減衰を含む透過音の解析」アドバンスシミュレーション Vol.19, (2014.10)
 - [14] 水素爆風圧を受ける RC 壁の応答性状に関する実験的研究 (大林組技術研究所報 No.69 2005)
- ※ 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。)