

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用した連成解析

第1事業部長 松原 聖

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise

最新動向セミナー

2013年6月13日(木)開催

アドバンスソフト株式会社

目次

- はじめに
- マッピング
- 構造音響連成解析
- 流体音響連成解析
- その他の事例
- まとめ

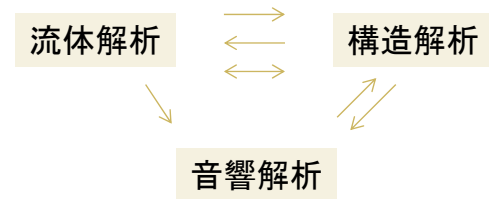
1. はじめに

当社における連成解析の実績

- 当社では、構造解析、流体解析、音響解析のソフトウェアのソースコードをハンドリングできる技術を有しており、お客様の具体的な問題に対して連成解析の実績を積んできました。
 - 流体→構造; 流れによるプラント構造物の振動解析
 - 流体→音響; 流れにより発生した音源の音響解析
 - 構造→流体; 振動源の流体挙動への影響評価
 - 音響→構造; 音源の構造物強度への影響評価
 - 構造→音響; 構造物の振動に起因する音響解析
- 本資料では、構造および流体解析ソフトウェアの結果を音響解析ソフトウェアの音源として利用する構造音響および流体音響連成解析について説明します。

連成解析に利用する主なソフトウェア

- 当社で開発・販売しているソフトウェア
 - 構造解析: Advance/FrontSTR
 - 流体解析: Advance/FrontFlow/red
 - 流体解析: Advance/FrontFlow/FOCUS
 - 音響解析: Advance/FrontNoise
 - その他、物理量のマッピングソフトを利用
- 共通する特徴
 - 大規模並列計算を得意とする
 - 1ライセンス1ジョブで並列数無制限



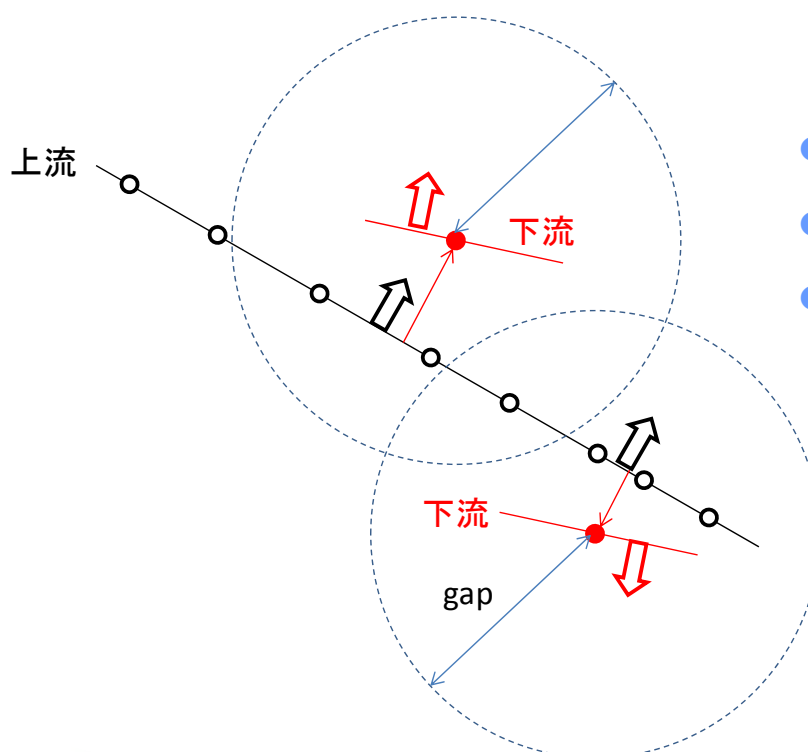
2. マッピング



連成解析での物理量のやりとり

- 格子系から異なる格子系に物理量を補間して渡す(マッピングと呼んでいる)
- 面から面へのマッピング
 - 上流の面から下流の節点へのマッピング
 - ギャップの概念の利用
 - 法線方向を利用する/しないの選択可能
- 体積から体積へのマッピング
 - 上流の節点から下流の節点へのマッピング
 - 近接点探索、バケット法を利用
 - 数百万節点から数百万節点のマッピングで1時間程度で処理可能

マッピングのアルゴリズム



- 上流・下流
- ギャップ
- 法線方向

3. 構造音響連成解析

構造音響連成解析

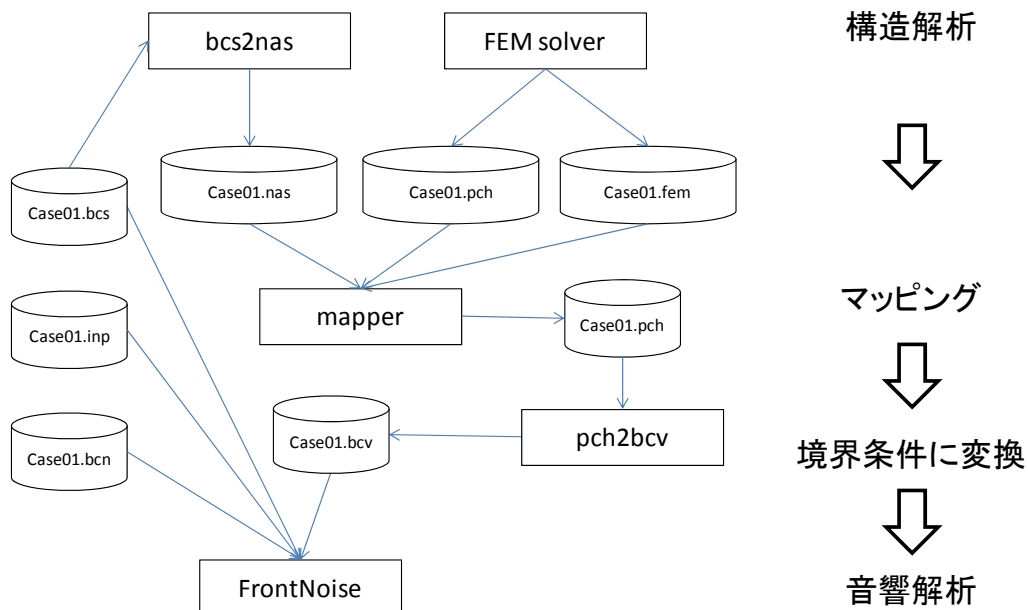
- 構造解析で求めることができた構造物表面の振動を周波数領域に変換し音響解析の音源とします。
- 一般には、構造解析領域の外側を音響解析の解析領域となります。
- 構造物中の透過音を求める機能は現在開発中です。

構造解析結果の利用(含予定)

- i. 構造解析ソフトウェアAdvance/FrontSTRの時系列ファイルを音源となる可能性のある場所で出力する。
- ii. 解析結果をフーリエ変換する。
- iii. 構造メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。
- iv. 係数を乗じて、境界条件を作成する。
- v. 音響解析を実施する。

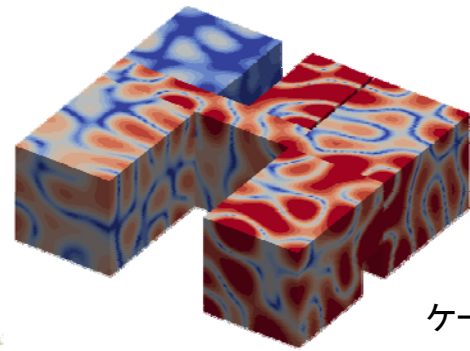
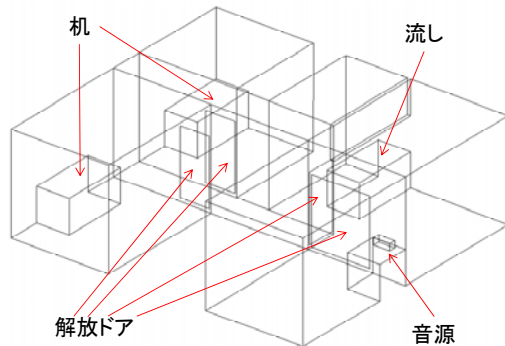
上記項目のうち、iii)~v)はすでにリリース済である。ただし、i)とii)については未リリース。

構造音響連成解析のフロー

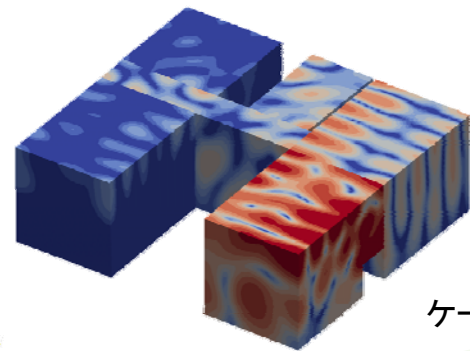


構造解析結果を音源とした音響解析例

● 室内の音圧レベルの解析



ケース1



ケース2

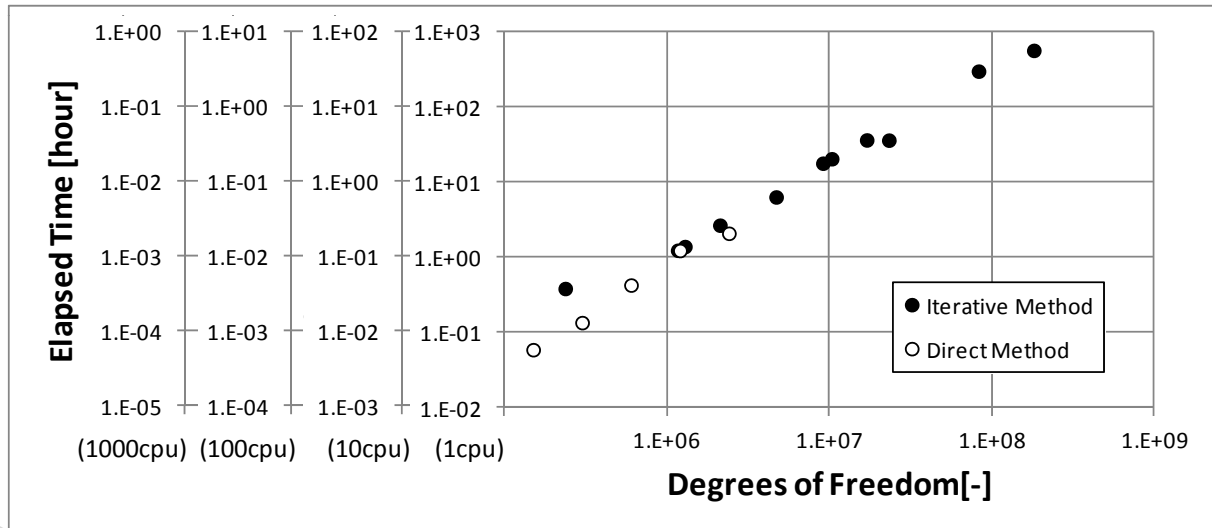
ケース名	音源	床	壁
ケース1	構造解析	完全反射	完全反射
ケース2	構造解析	完全吸収	完全反射

Advance/FrontSTRの特長

- 大規模並列計算が可能で、高い並列効率
→ 例えば、静解析1ステップの2億自由度を1000コアで30分
- 多くのCPU(コア)を利用しても、追加料金がかからないシンプルな価格体系
- 低価格で、必要な機能を提供
→ 例えば、接触解析、アセンブリ構造、リファイナーを装備
- 開発者によるサポートおよびカスタマイズサービスを提供

Advance/FrontSTRによる高速な処理

- 1ライセンスで並列数無制限実行可能
- 高いスケーラビリティ



4. 流体音響連成解析

流体音響連成解析

- 流体解析の結果から得られた二重極および四重極を音源として、音響解析を実施します。
- 一般に流体解析領域を含む大きな領域を音響解析の解析領域とします。
- 流体解析の時系列計算結果を利用する。したがって、流体解析領域のすべての結果を利用すると、その中間結果ファイルが膨大な量となります。→音源の領域を絞ることができれば、その領域の情報のみを対象とする。



二重極音源

- 固体表面の流体圧力変動による音源

$$P_0(x, t) = -\rho \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\sum_{\nu=1, \infty} i\omega \rho \varphi(x) e^{-i\omega t}$$

$$P_0(x, t) = \sum_{\nu=1, \infty} p_i(x) e^{-i\omega t}$$



$$i\omega \rho \varphi(x) = -p_i(x)$$



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

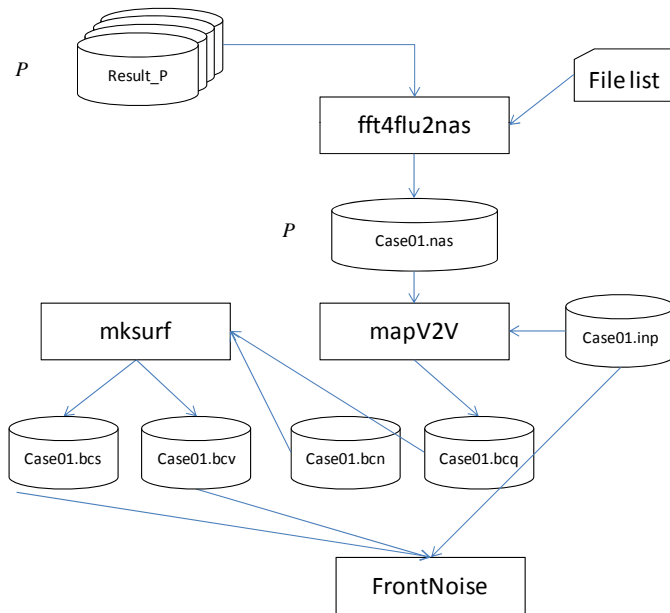
$$\alpha(x) = i\omega \rho$$

$$\beta(x) = 0$$

$$f(x) = -p_i(x)$$



二重極音源設定のフロー



流体解析圧力
↓
FFTで周波数に変換
↓
マッピング
↓
境界条件に変換
↓
音響解析

四重極音源の取扱い(方程式)

N-S eq.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right)$$

Euler eq.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i}$$

Lighthill's eq.

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} = -c^2 \nabla^2 \rho$$

$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s}$
 isentropic

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -c^2 \nabla^2 \rho$$

四重極音源の取扱い(音源項)

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad T_{ij} = \rho v_i v_j \quad \text{or} \quad T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} \left((p - p_0) - c^2 (\rho - \rho_0) \right)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

$$p - p_0 = c^2 (\rho - \rho_0)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$P = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

$$\frac{\rho}{c^2} \frac{\partial^3 \Psi}{\partial t^3} - \rho \nabla^2 \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$\Psi(x, t) = \sum_{\nu=1, \infty} \varphi_\nu(x) e^{-i\alpha t}$$

$$\frac{\rho}{c^2} i \omega^3 \varphi - \rho \nabla^2 (-i\omega) \varphi e^{-i\alpha t} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$\rho i \omega \left(\frac{\omega^2}{c^2} \varphi + \nabla^2 \varphi \right) = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \left(= \frac{2\pi\nu}{c} \right)$$

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = -i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

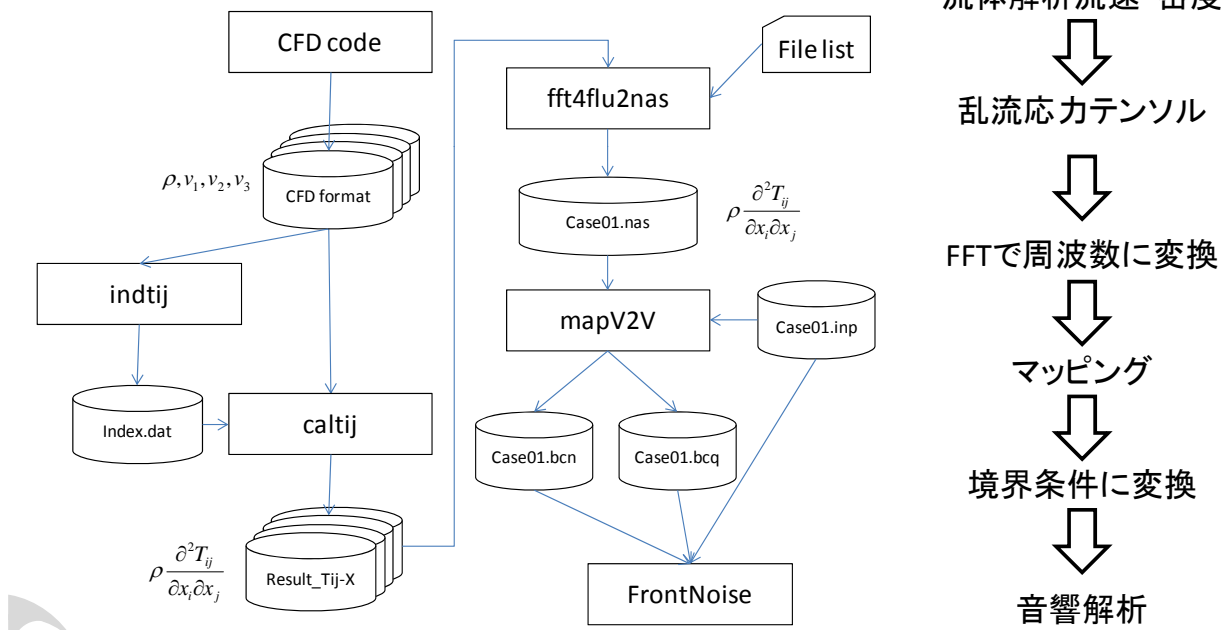
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

流体解析結果の利用(四重極)

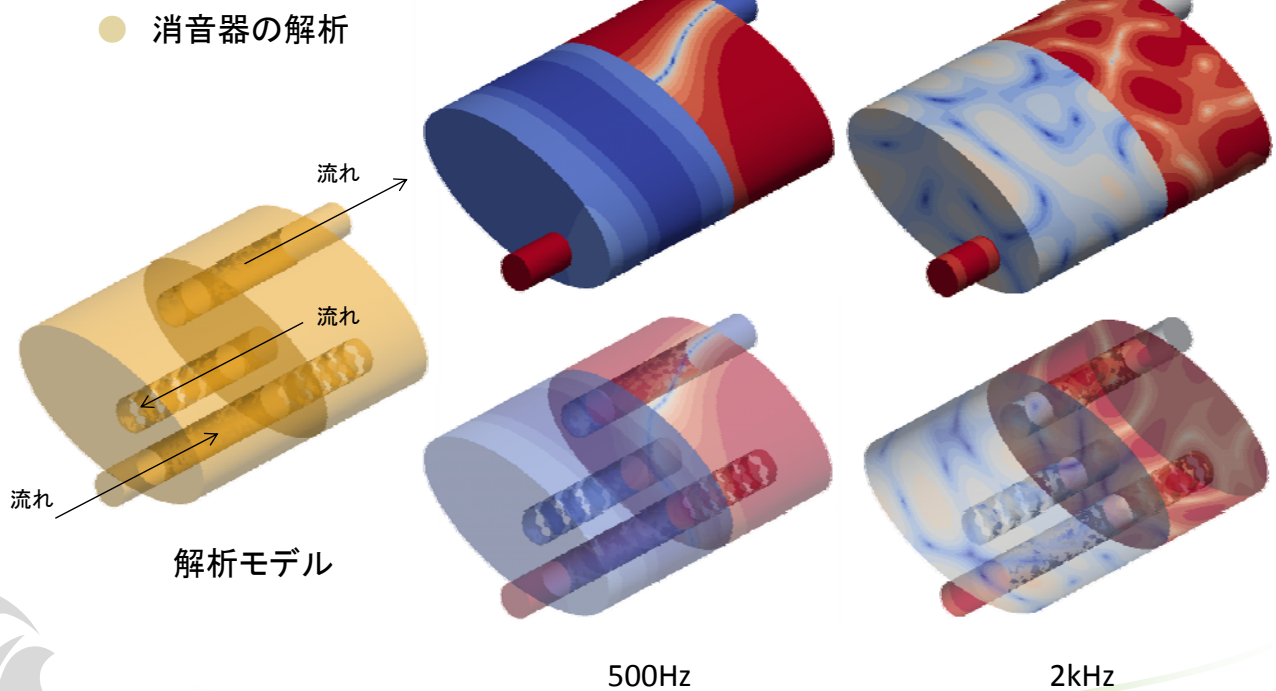
- i. 流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/redの時系列ファイルを音源となる可能性のある場所で出力する。 $T_{ij} = \rho v_i v_j$
- ii. 速度からLighthillの乱流応力カテンソルを求める T_{ij}
- iii. 乱流応力カテンソルの2階微分を求める。 $\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$
- iv. 乱流応力カテンソルの2階微分をフーリエ変換する。
- v. 流体メッシュから音響メッシュに物理量をマッピングする。
- vi. 係数を乗じて、基礎方程式の右辺に加える。

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = -i \frac{1}{\rho c k} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$
- vii. 音響解析を実施する。

四重極音源設定のフロー



流体解析結果を音源とした音響解析例



5. その他の解析事例

列車の車輪振動による環境騒音

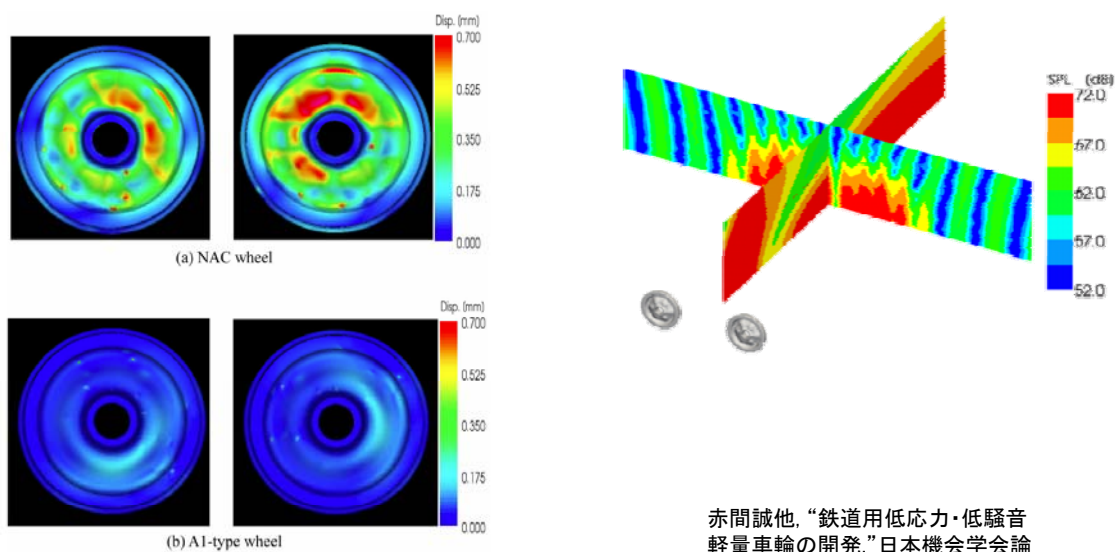


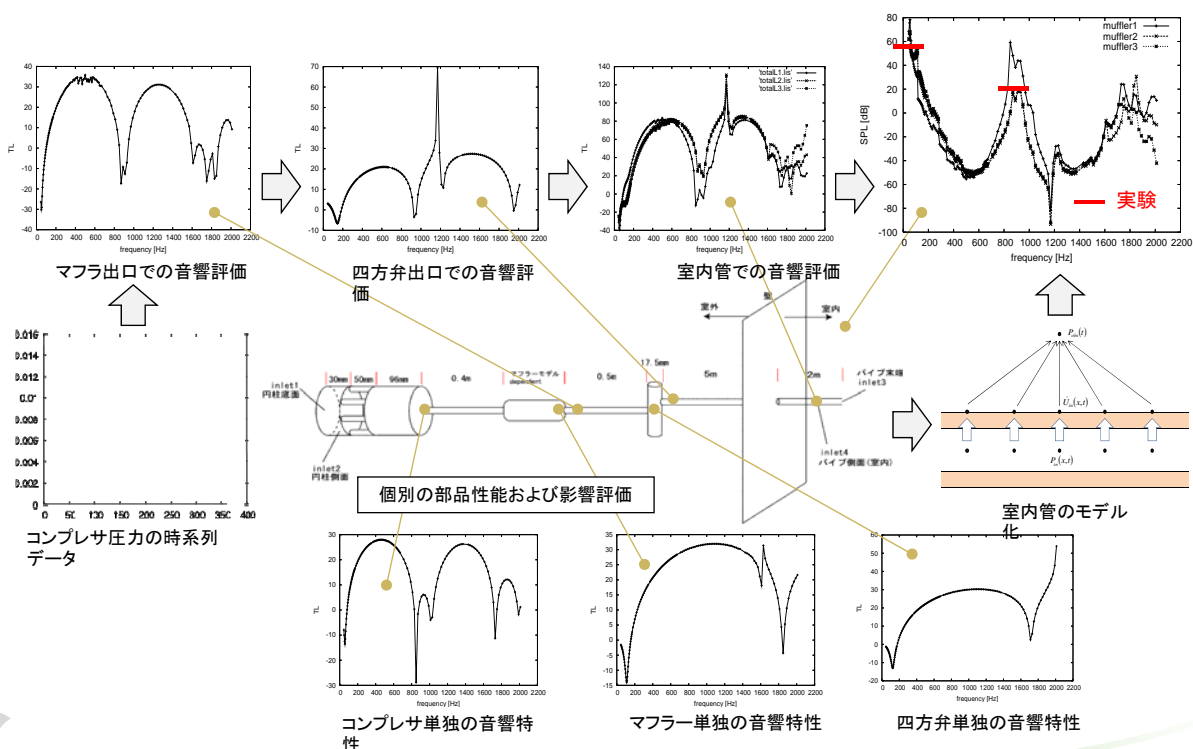
Fig. 10 Distributions of the vibration displacement (wheel load, 59 kN; train speed, 100 km/h)

赤間誠他, “鉄道用低応力・低騒音
 軽量車輪の開発,” 日本機学会論文
 文誌A, Vol.73, No.730, (2007.07)

空調機の騒音評価

- 空調機による室内騒音の評価を実施した。ここでは、コンプレッサを音源として空調機管内を伝播し、室内に到達することが原因で、騒音が発生する
- 実験から得られたコンプレッサの時系列のガス圧脈動データを音源とした。
- 途中機器の形状を詳細にモデル化することにより、音響特性を評価した。
- 管内の音響結果を用いて、管の内面から外面への音響伝播と管表面からの解析解による音響放射を適用して、室内における騒音レベルを評価した。
- 室内での騒音レベルを、実験と比較し、非常によく一致する結果を得た。

空調機の騒音評価



6. まとめ

Advance/FrontNoise連成解析のまとめ

- ハードウェアの性能向上により、構造および流体解析を利用した音源の解析が実用的になるにしたがい、そのポスト処理としての音響解析のニーズが増えてきた。
- 当社の音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoiseでは従来から取り組んできた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。
- 今後とも、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。

- 構造解析: Advance/FrontSTR
- 流体解析: Advance/FrontFlow/red
- 音響解析: Advance/FrontNoise

- プリポスト: Advance/REVOCAP



参考文献

- 音響
 - P.Morse, K.Ingard, "Theoretical Acoustics," Princeton(1968)
 - M.Howe, "Theory of Vertex Sound," Cambridge(2003)
 - 西村正治ら, "機械音響工学," コロナ社(2004)
 - 城戸健一, "基礎音響工学," コロナ社(1977)
- 流体
 - C.Wagner, "Large-Eddy Simulation for Acoustics," Cambridge(2007)
 - その他、論文
- 数値解法
 - S.Kirkup, "The Boundary Element Method in Acoustics," Integrated Sound Software(1998)

