

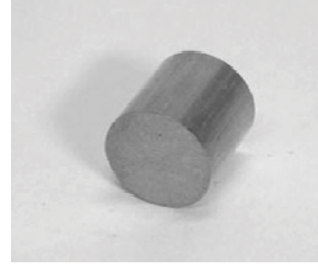
音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの解析事例

代表取締役社長 松原 聖

音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoise 最新動向セミナー
2014年6月3日（火）
アドバンスソフト株式会社

本日紹介する解析事例

- 円筒の共鳴問題の解析解との比較（理論解との比較）
 - 消音器の性能解析（内部問題）
 - 環境騒音の解析（外部問題）
 - 流れ場でのダクト開口端での反射率（流れ場での音響伝播）
 - 振動する棒からの音の伝播（構造音響連成）
 - 流れに起因する音源からの音の伝播（流体音響連成）
- ↓
- ユーザー様へ；ここに示した一部の例題はチュートリアルとして、データ一式を用意していますので、ご利用ください。また、本資料での公開事例については、Advance/FrontNoiseのデータをお渡しすることが可能です。



<https://hands.net>

円筒容器の共鳴周波数の解析

円筒内の共鳴 — 解析解との比較 —

- 円筒内の共鳴のシミュレーションを行い、共鳴周波数とその解析解とを比較する。
- 格子数と精度の関係を定量的に確認する。
- シミュレーション方法
 - 音源を円筒内の偏心した位置に配置する。
 - 節線に合わないよう観測点を設定する。
 - 周波数をスイープさせ、観測点の音圧レベルを求める。
 - 周波数は、10～5kHzで2Hz毎とし、約2500点の解析を行う。
 - メッシュサイズは、最大周波数の波長を1/10したサイズに対して、そのサイズの1/3で精度を確認する。その後、メッシュを粗くして、精度がどの程度得られるかを確認する。
- 理論的に得られる節直径および節半径の数および円筒方向の節線の数を、シミュレーション結果の音圧コンタで確認する。

解析解との比較 共鳴の問題

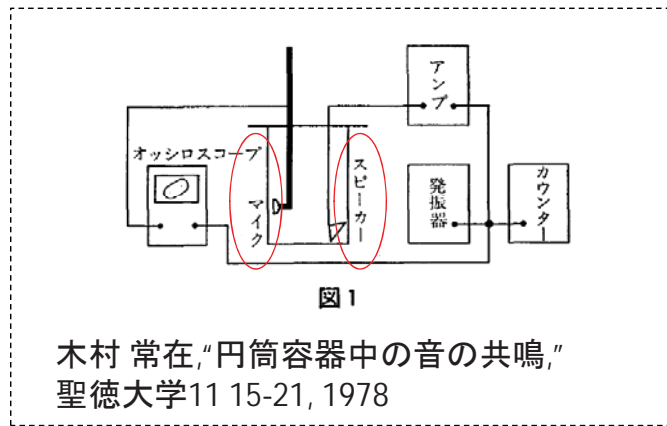
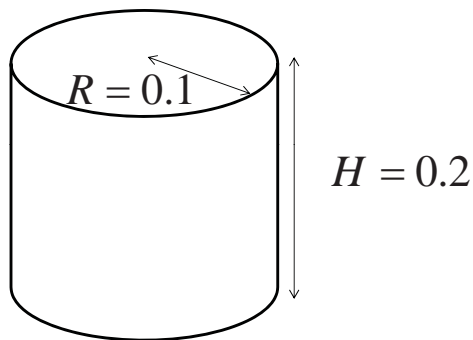
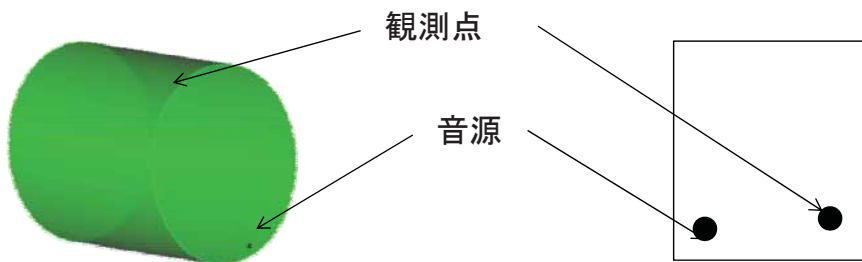


図1
木村 常在, "円筒容器中の音の共鳴,"
聖徳大学11 15-21, 1978



方程式と境界条件および解析解

<p>方程式</p> $\Delta\varphi + k^2\varphi = 0 \quad k = \frac{2\pi f}{c}$	<p>境界条件(全面完全反射)</p> $\frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0 \quad z = 0, H \quad r = R$
<p>円筒座標系</p>	<p>$J'_m(r)$ の零点</p> <p>$J_{m,1} \quad J_{m,2} \quad J_{m,3} \quad \dots$</p>
$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} + k^2\varphi = 0$	$l^2 = k^2 - n^2 \quad l = \frac{J_{m,s}}{R}$
<p>変数分離後、 Bessel関数の標準型に変換</p>	
$r'^2 \frac{\partial^2\varphi}{\partial r'^2} + r' \frac{\partial\varphi}{\partial r'} - (r'^2 + m^2)\varphi = 0$	$rl = r'$

共鳴周波数の解析解

- q, m, s を任意の正の整数として、共鳴周波数は次の通り。

$$k = \frac{2\pi f}{c}$$

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{J_{m,s}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi q}{H}\right)^2}$$

$$k^2 = l^2 + n^2$$

$$n = \frac{2\pi}{2H} \times q$$

$$l = \frac{J_{m,s}}{R}$$

すべての共鳴周波数

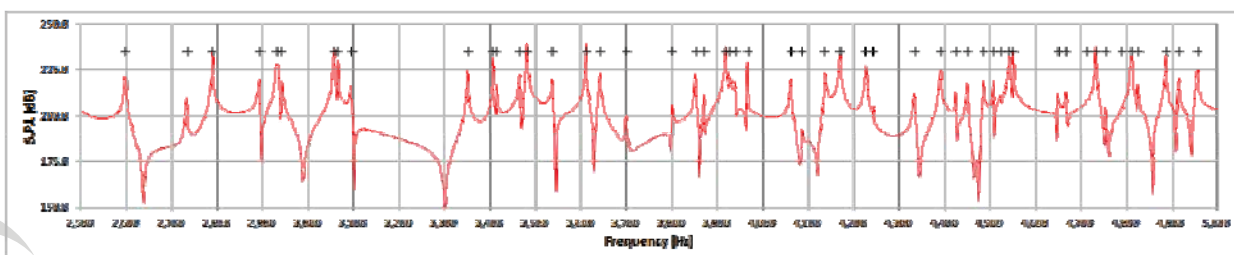
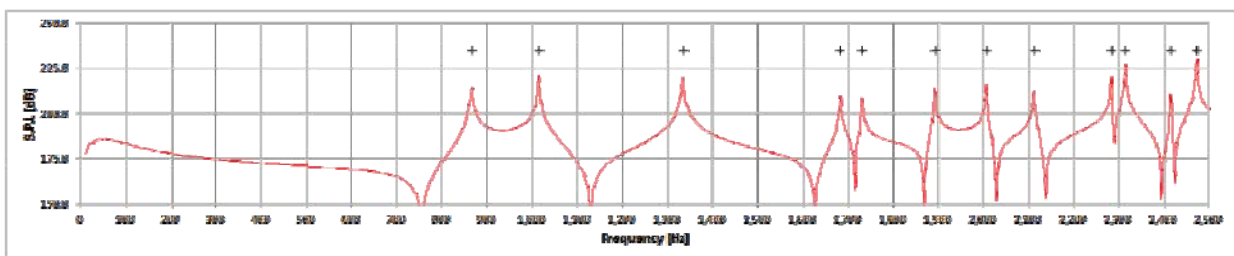
865.00Hz, 1013.90Hz, 1332.75Hz,
1681.87Hz, 1730.00Hz, 1891.28Hz,
2005.22Hz, 2110.03Hz, 2280.45Hz,
2313.50Hz, 2412.80Hz, 2469.92Hz,
2595.00Hz,

ベッセル関数微分の正の零点

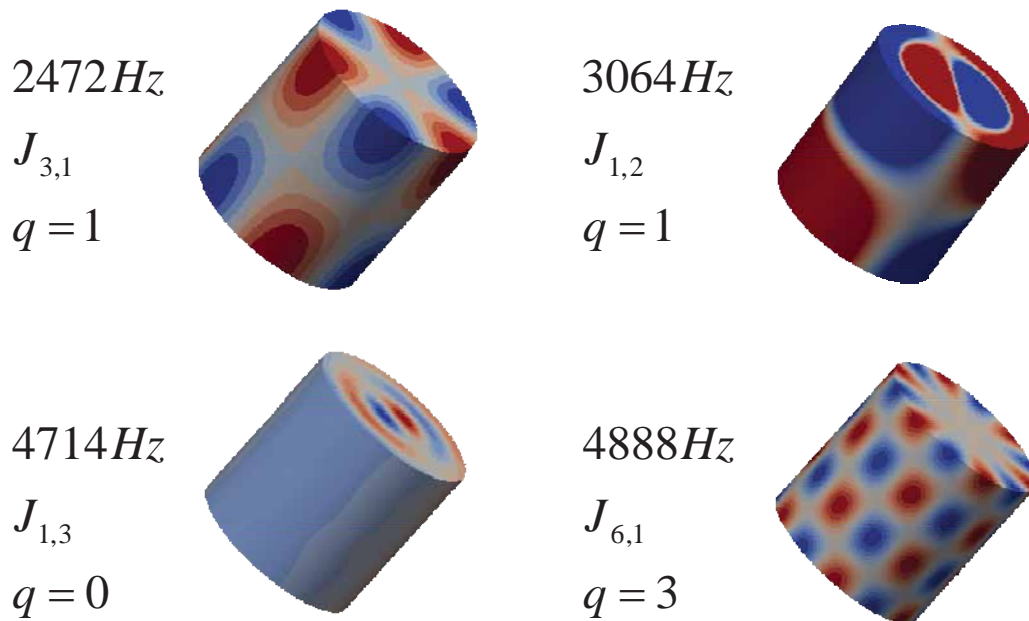
	m=0	m=1	m=2	m=3	m=4
s=1	3.832	1.841	3.054	4.201	5.318
s=2	7.016	5.331	6.706	8.015	9.282
s=3	10.174	8.536	9.970	11.346	12.682
s=4	13.324	11.706	13.170	14.586	15.964
s=5	16.471	14.864	16.348	17.789	19.196

解析結果

- 周波数をスイープさせた結果を示す。+印は、理論解を示す。
- 高周波までよく一致していることがわかる。

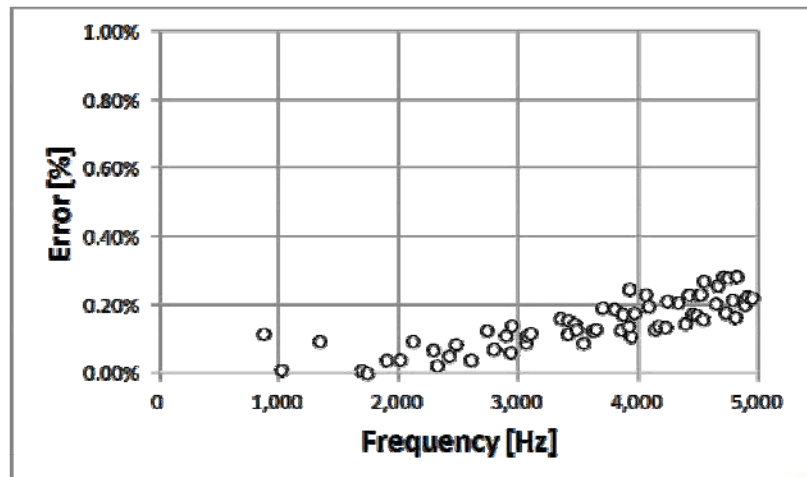
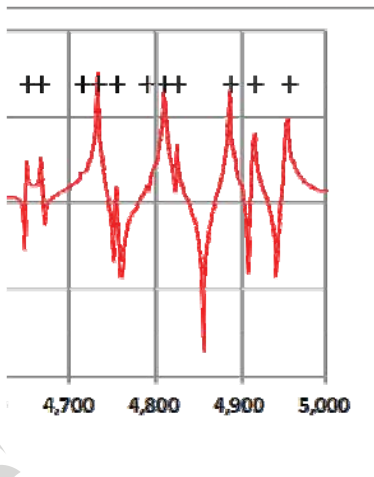


速度ポテンシャル結果の一部



理論値との誤差

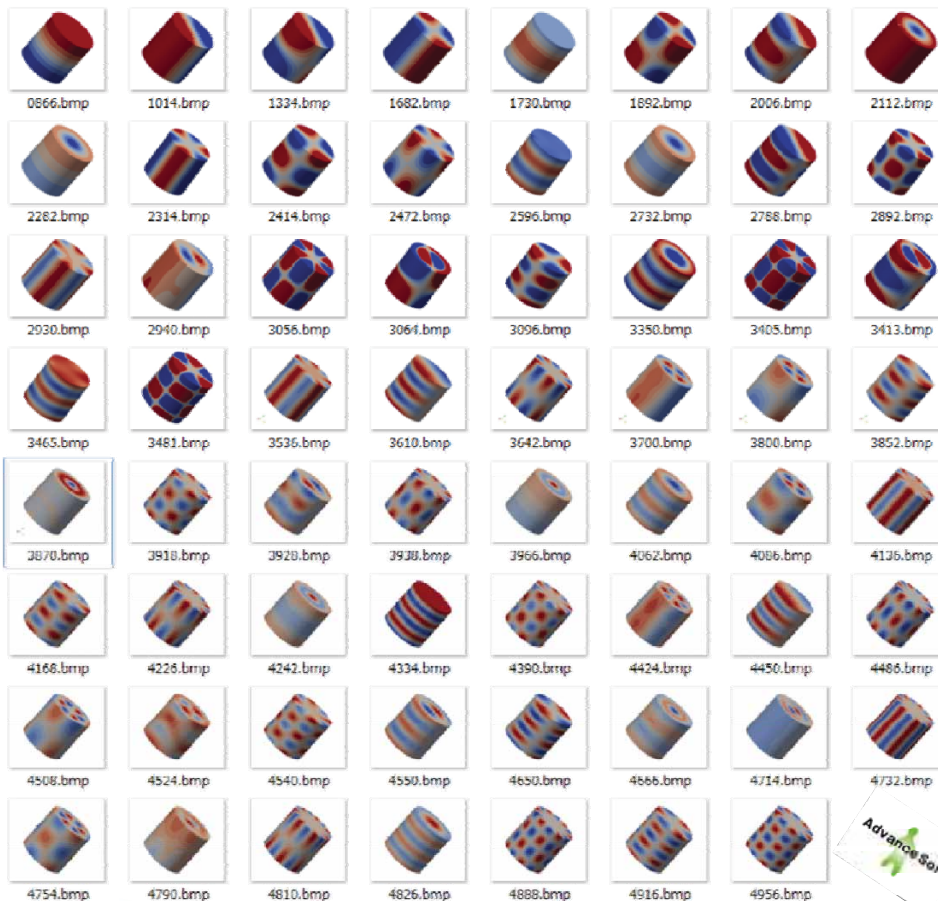
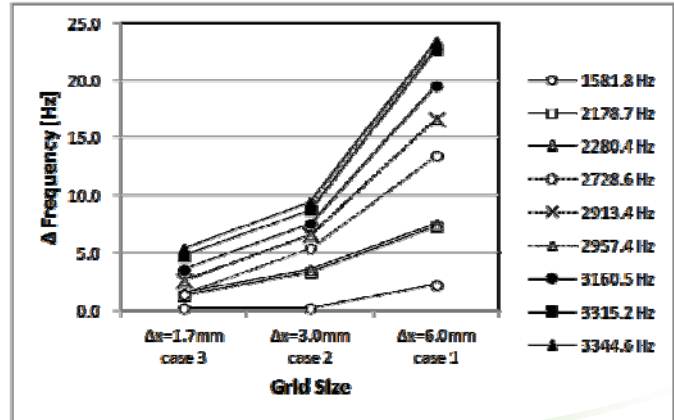
- シミュレーション結果と理論値を比較した。5kHz付近の共鳴周波数でも0.2%以下程度の誤差となっている。参考までに、左に5kHz付近の拡大図を示す。



精度と格子幅の関係

- 格子サイズを3つのサイズで実施した。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ました(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)。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ました。
- 粗いメッシュでは、低い周波数においては一致してますが、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程度となります。しかし、ケース2、ケース3とメッシュを細かくすると、解析解と一致がよくなります。

項目	ケース1	ケース2	ケース3
格子幅	6.0mm	3.0mm	1.7mm
要素数	173,021	939,254	3,735,627
節点数	31,773	167,923	657,867



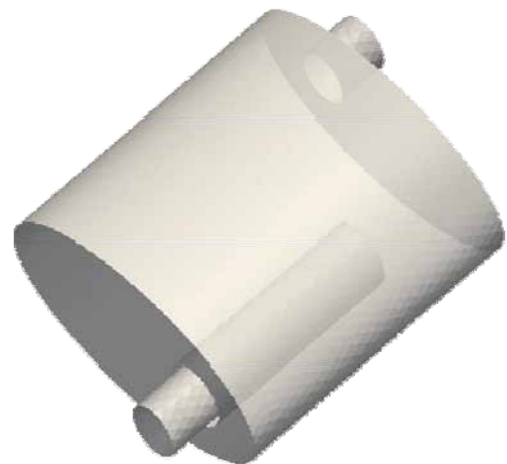


マフラーミュージアムにて撮影

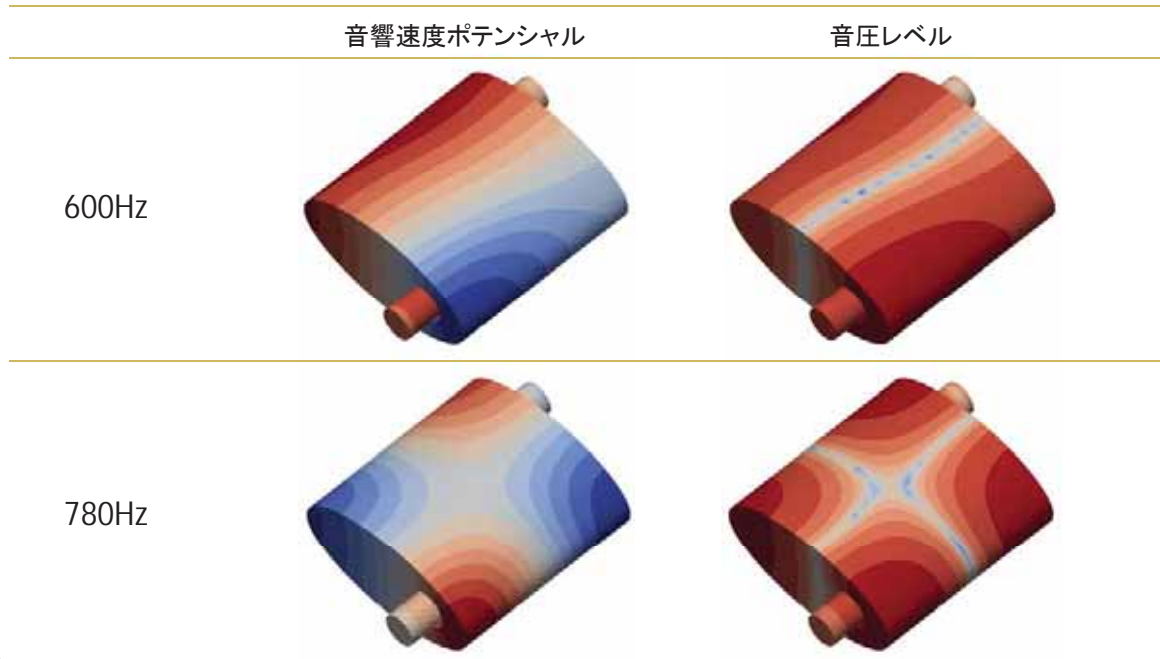
消音器の解析

簡易排気系の音響解析

- 解析条件
 - 単純形状、内部に構造は持たない
 - 内部に空気の流れはない
- 境界条件
 - 入り口には音圧を与え、出口にはダクト開口端の放射インピーダンスを与える。
- 透過損失を用いて、性能評価を行う。

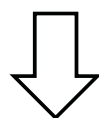
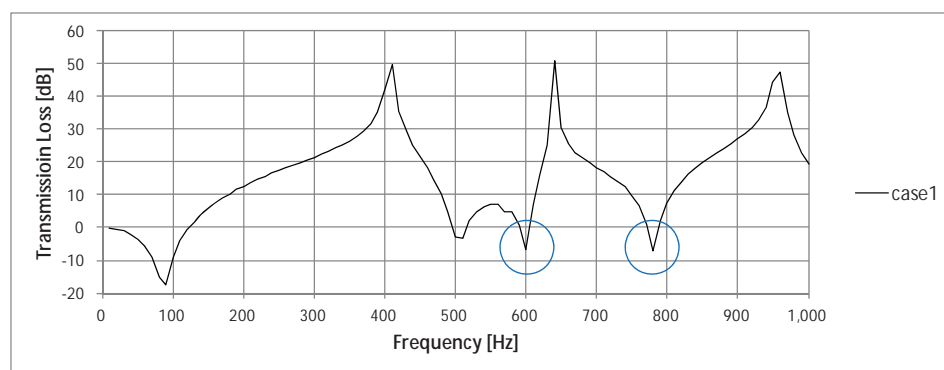


簡易排気系の解析結果

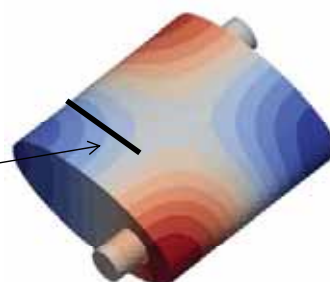


簡易排気系の解析結果(透過損失)

透過損失



壁を作ったらどうなるか？

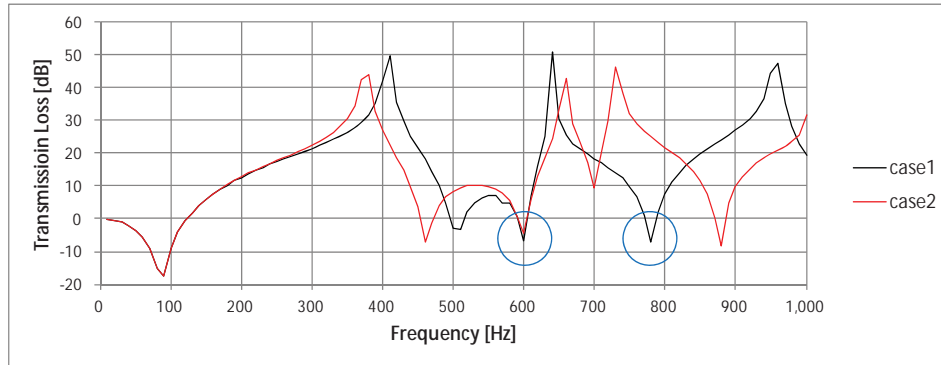


簡易排気系の透過損失(内壁あり)

壁を作った →



透過損失

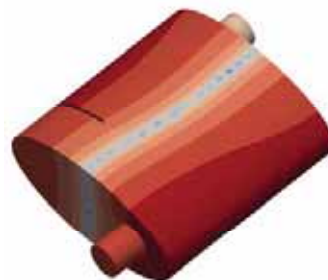
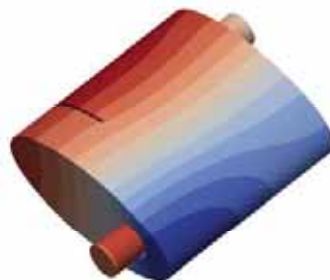


簡易排気系の解析結果(内壁あり)

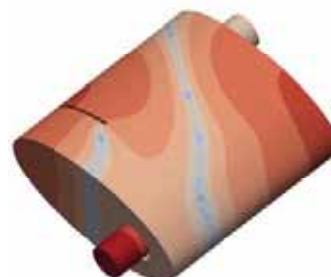
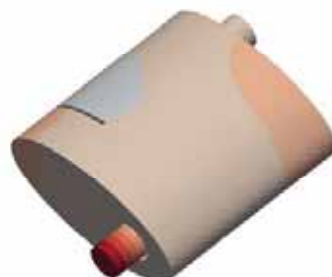
音響速度ポテンシャル

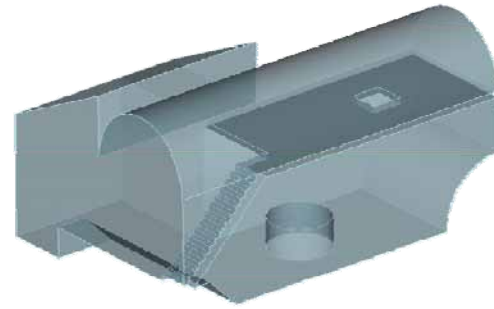
音圧レベル

600Hz



780Hz



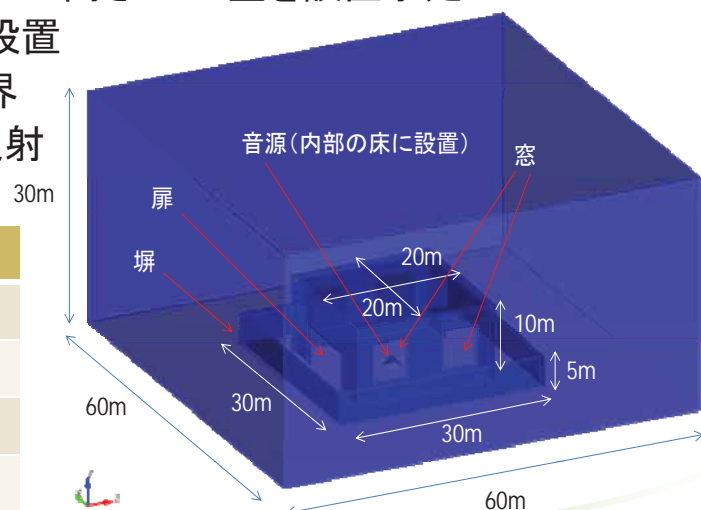


建屋からの騒音の環境評価

環境騒音の解析

- 建屋の中の騒音源が敷地境界への影響評価を目的
- 建屋の大きさは、1辺の長さ20m、高さ10mのサイズ
- 4側面に、解放した窓、または、解放した扉を設置
- 建屋の回りに、1辺の長さ30mの高さ5mの壁を設置予定
- 音源は、建屋内部の中心に設置
- 解析範囲の外側には、pc境界
- 床と地面および壁は、完全反射

ケース名	塀	塀吸音材	内壁吸音材	窓
ケースA	NO	NO	NO	普通
ケースB	YES	NO	NO	普通
ケースC	YES	NO	YES	普通
ケースD	YES	NO	NO	小

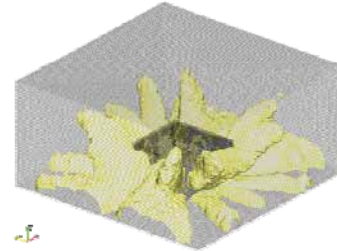
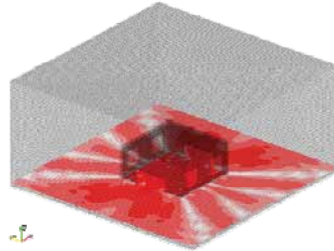


環境騒音の解析(上; 塀なし、下; 塀あり)

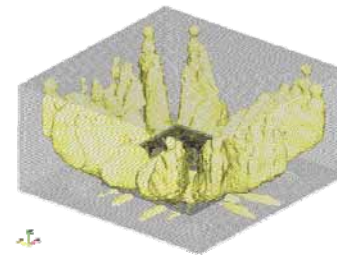
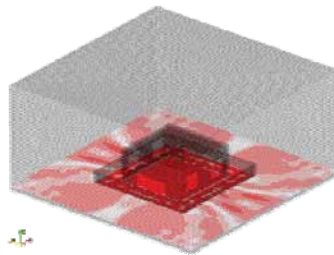
床上1mの騒音レベル

80dBの等値面

ケースA



ケースB

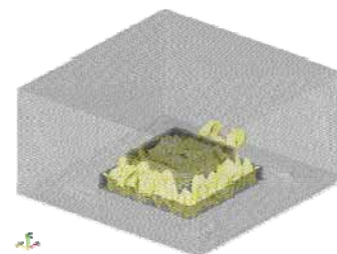
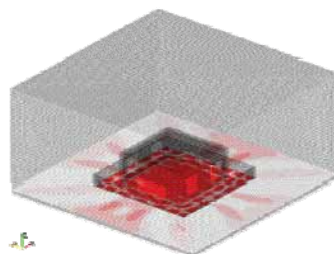


環境騒音の解析(上: 吸音材、下: 窓小)

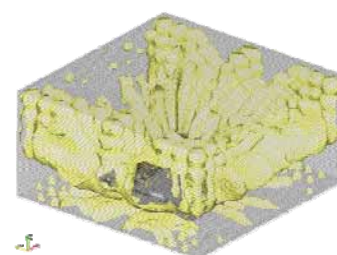
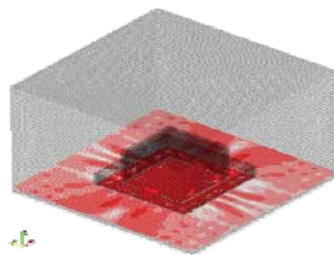
床上1mの騒音レベル

80dBの等値面

ケースC



ケースD





<https://hands.net>

ダクト開口端反射率

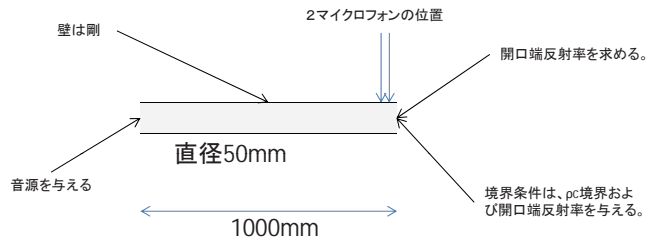


ダクト開口端の反射率

- ダクト出口における音響反射率を求める。
- 音響反射率が1をこえたという実験事実を再現する。
- $M=0.0, 0.2, 0.4$ 程度の条件で実施する。
- 流れについては、Advance/FrontFlow/FOCUSおよびGoertlerの式を利用した。
- 理論解については、Muntの論文と比較した
- 定性的には一致した結果を得られた。
- 定量的な比較が今後の課題である。



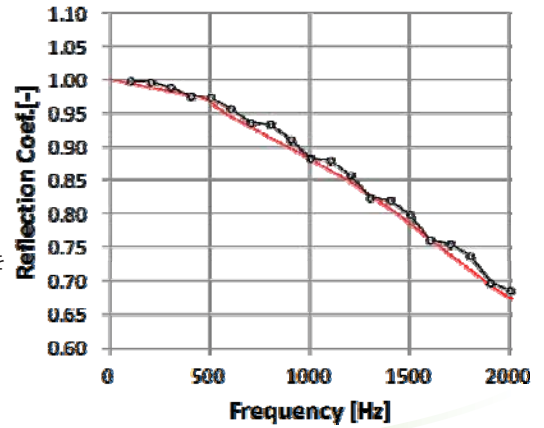
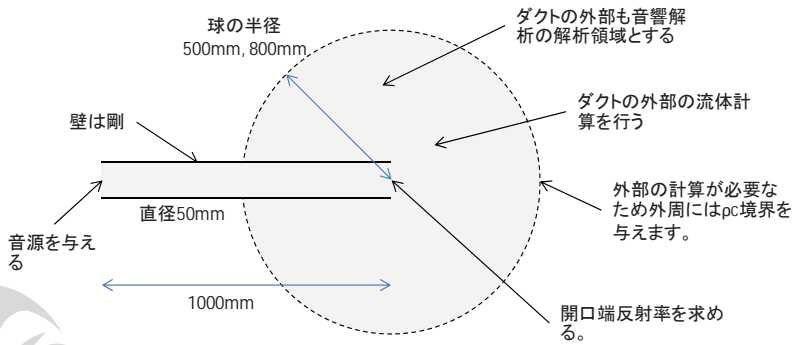
流れなしのダクト開口端反射率



$$z = \theta_r + i\chi_r = 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} + i \frac{H_1(2ka)}{ka}$$

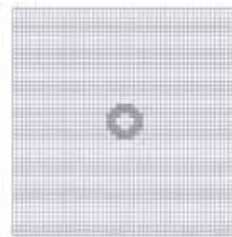
$$\theta_r = \sum_{n=1, \infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n!(n+1)!} (ka)^{2n}$$

$$\chi_r = \sum_{n=1, \infty} \frac{(-1)^n 2^{4n+6} (n+1)!(n+2)!}{(2n+2)!(2n+4)! \pi} (ka)^{2n+1}$$

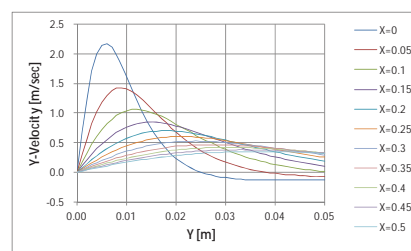
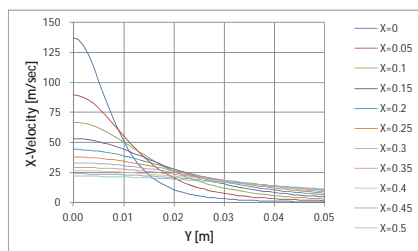


ダクト流れの音響伝播への影響

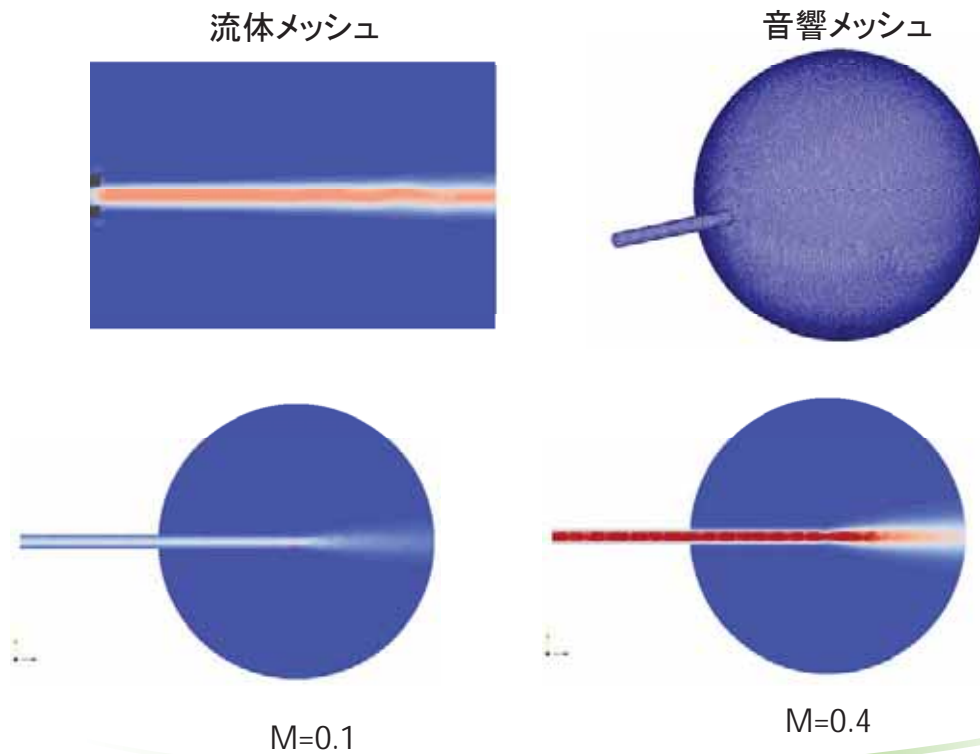
ケース1: Advance/FrontFlow/FOCUSを利用



ケース2: 解析解 (Goelrtlerの式) を利用



音響メッシュへの速度場のマッピング



反射率の結果

- 【成果】実験で確認されている1.0を超える反射率を再現でき、定性的な結果は再現できている。
- 【課題】マッハ数が高くなるとピークが高周波側にシフトする現象が再現できていない。

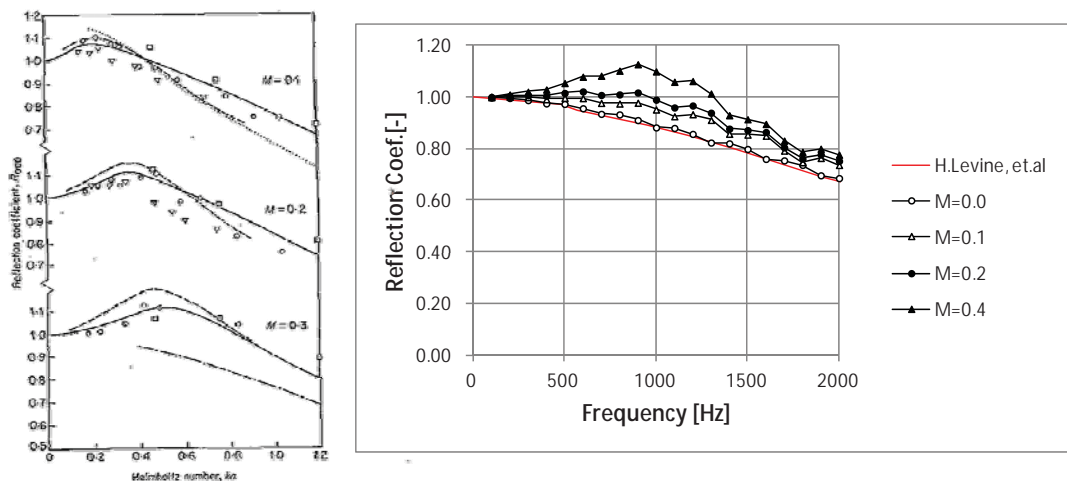


Figure 5. Comparison between theory and experiment for the plane wave reflection coefficient R_{theo} as a function of ka for $M=0.1, 0.2, 0.3$ with $\alpha=0$. —, Present theory; —, Savkar [6] ($M=0.3$); ---, Ranzberger [10]; ···, Mechel et al. [9] ($M=0.117$); □, Moore [16]; ∇, Afrodson and Davies [11]; ○, Bento Coelho [14].

連成解析への取り組み

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。

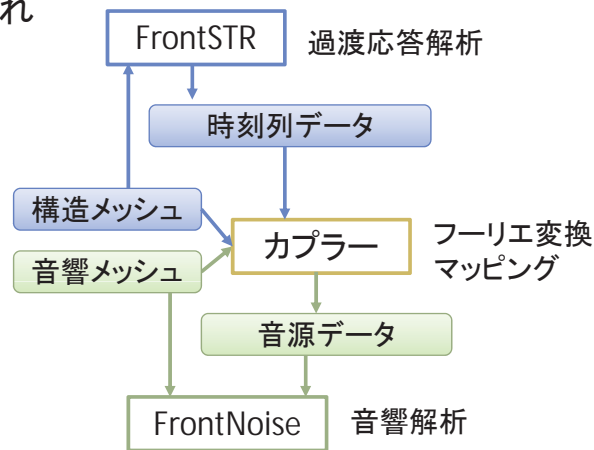
片方向連成の例 構造音響連成

- Advance/FrontSTR⇒Advance/FrontNoise

- 概要

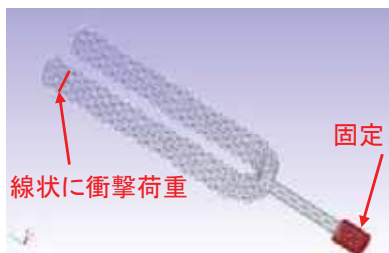
- 構造解析で求めることができた構造物表面の振動を周波数領域に変換し、音響解析の音源とする
 - 構造解析領域の外側を音響解析の解析領域となる

- 解析の流れ

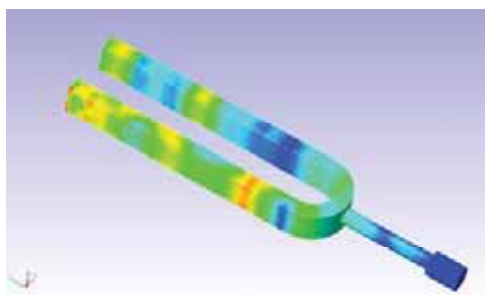


構造音響連成 構造解析

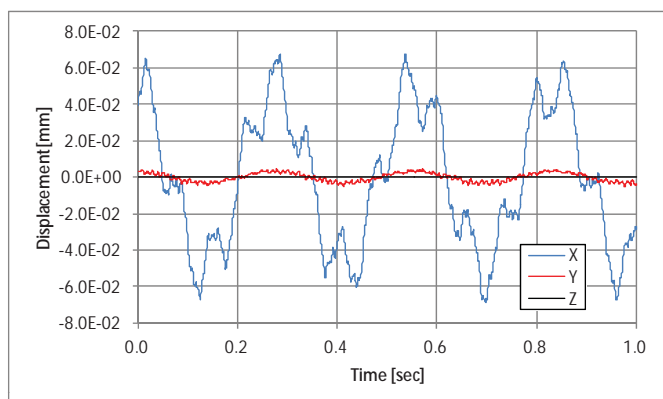
- 解析モデルと結果



棒を叩くモデル
 節点数:10447 要素数:6030
 材質:鋼
 Newmark-β法 Δt=0.0004(s)
 0.0~5.0(s)間解析し、4.0~5.0(s)を利用



変形図コンター (t=0.04)

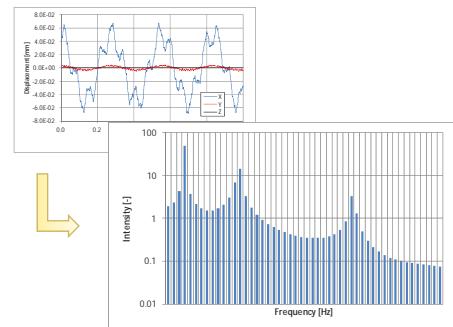
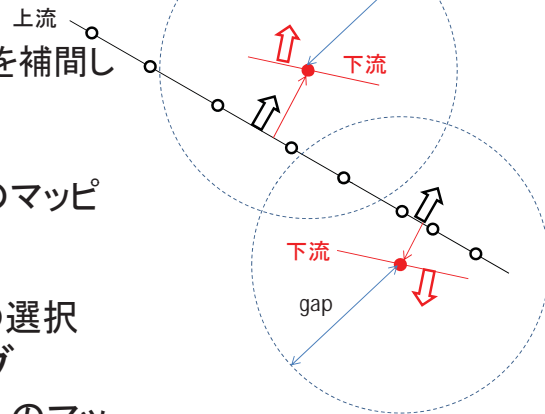


表面節点上の時刻歴応答

構造音響連成 カプラー

• マッピング

- 格子系から異なる格子系に物理量を補間して渡すこと
- 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
- 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

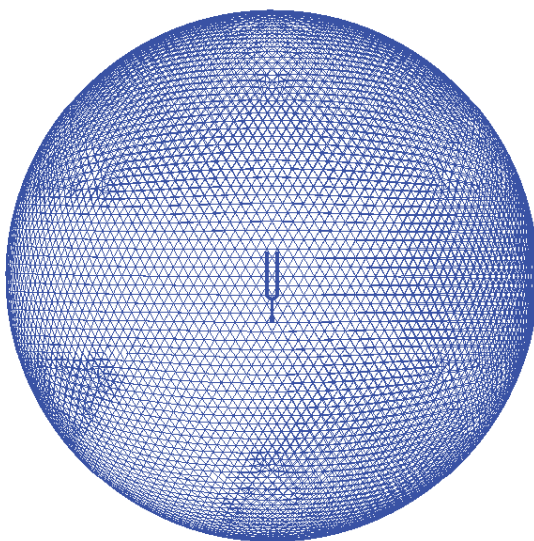


• フーリエ変換

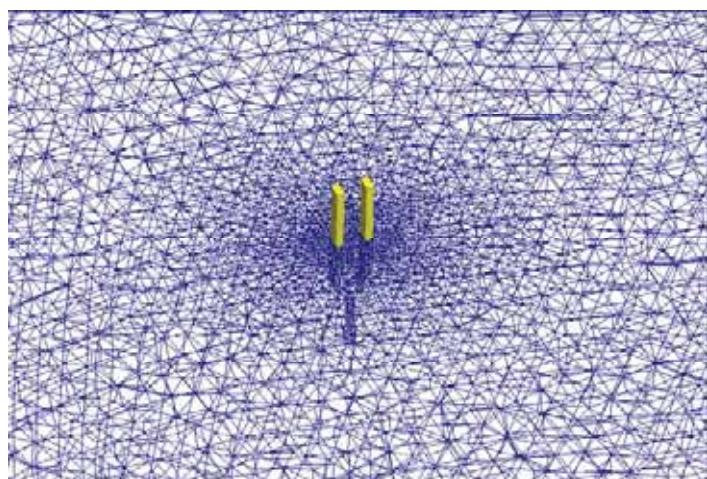
- 時刻歴データ⇒周波数データ

構造音響連成 音響解析

• 音響解析モデル

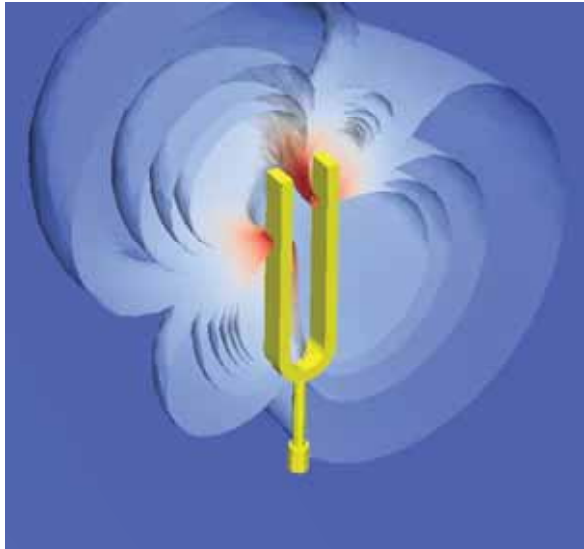


形状を模擬するため、および、音源の再現性を高めるために、音叉付近のメッシュを細分化

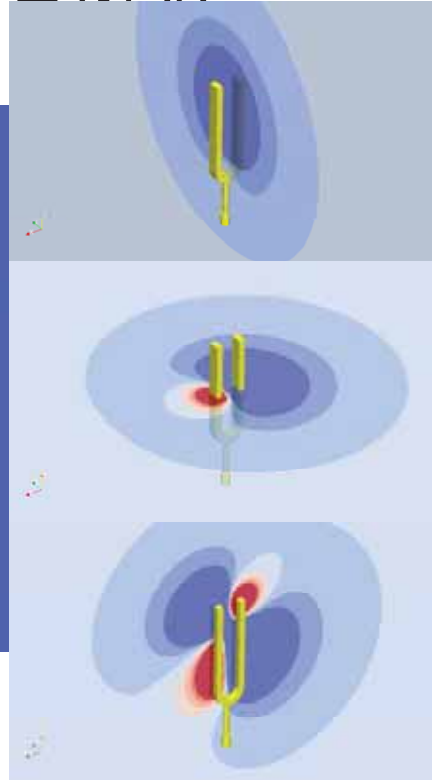


構造音響連成 音響解析

- 100Hz解析結果



音響速度ポテンシャル



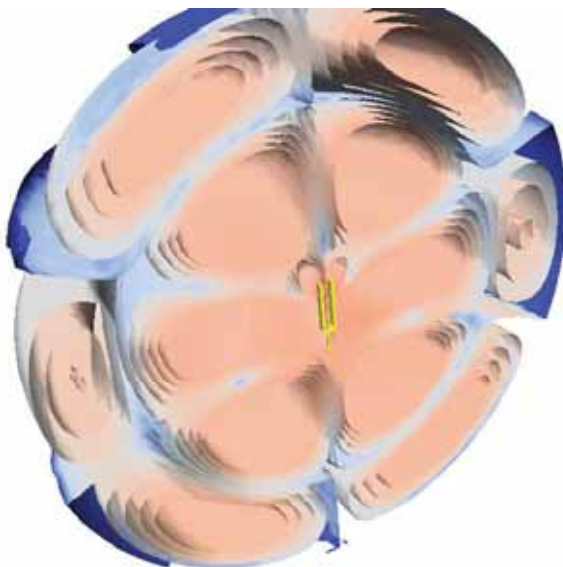
X方向断面

Y方向断面

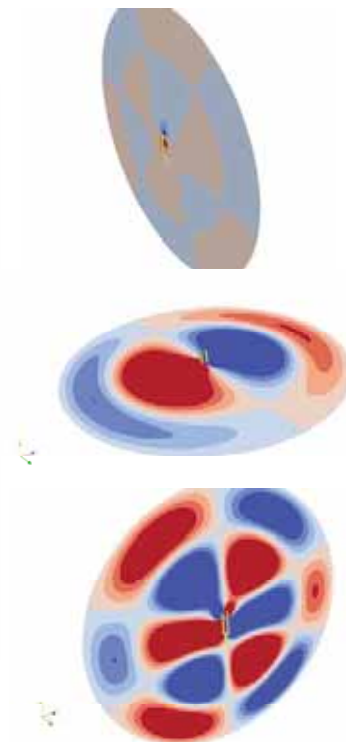
Z方向断面

構造音響連成 音響解析

- 1000Hz解析結果



音響速度ポテンシャル



X方向断面

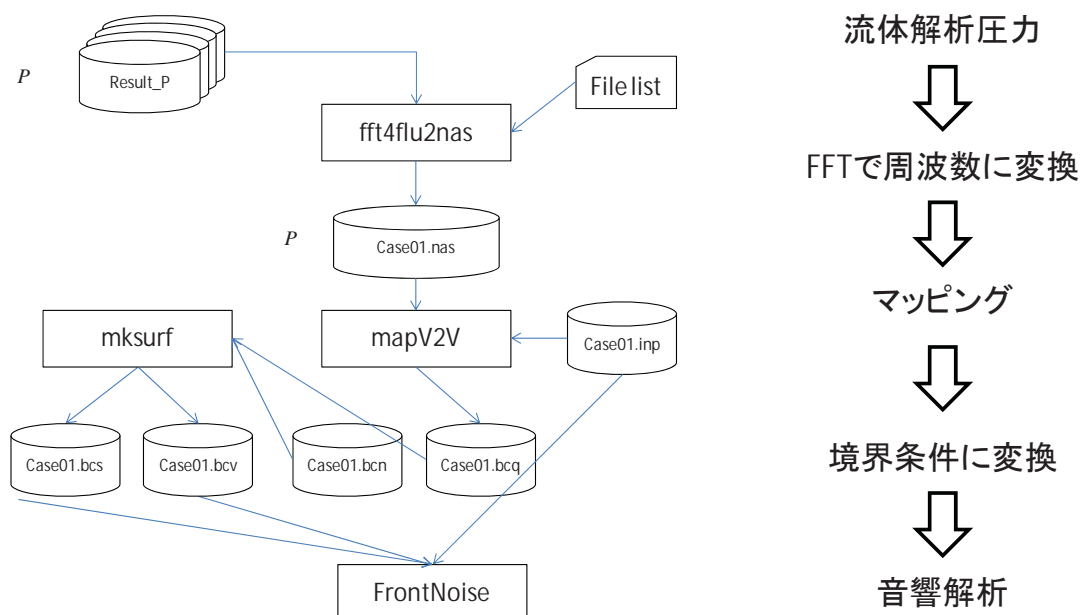
Y方向断面

Z方向断面

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。

二重極音源設定のフロー



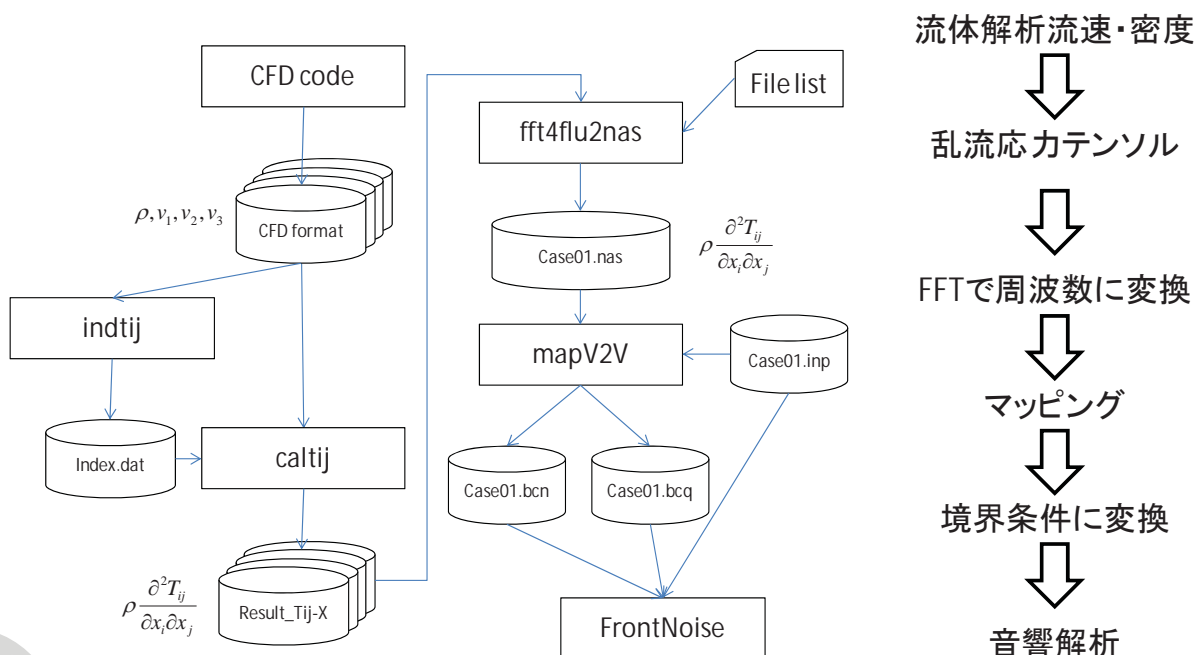
流体解析結果の利用(四重極)

- 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の乱流応力カテナソルを求める。
- iii. 乱流応力カテナソルの2階微分を求める。 $\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$
- iv. 乱流応力カテナソルの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。

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

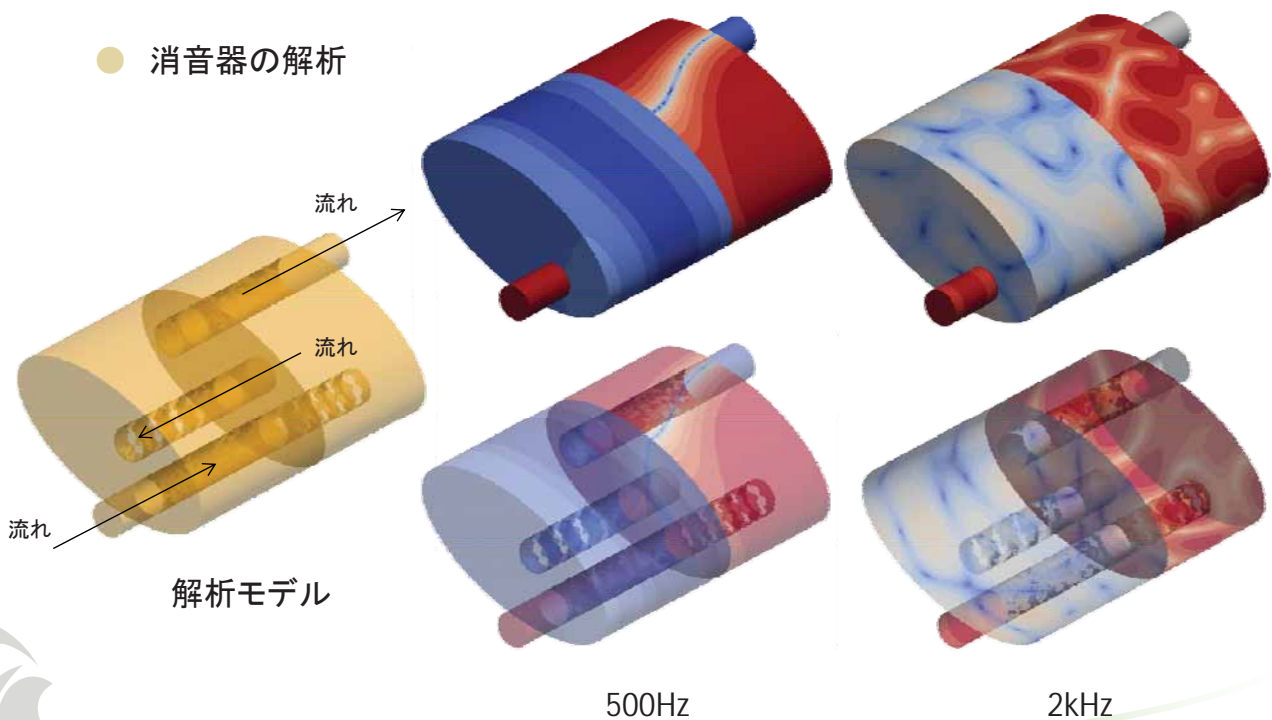
- vii. 音響解析を実施する。

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

● 消音器の解析



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すぎない、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。