

# 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の概要

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

## ご説明内容

- はじめに
- 開発の経緯
- 基礎方程式
- 境界条件
- 音源
- 数値解法
- まとめ

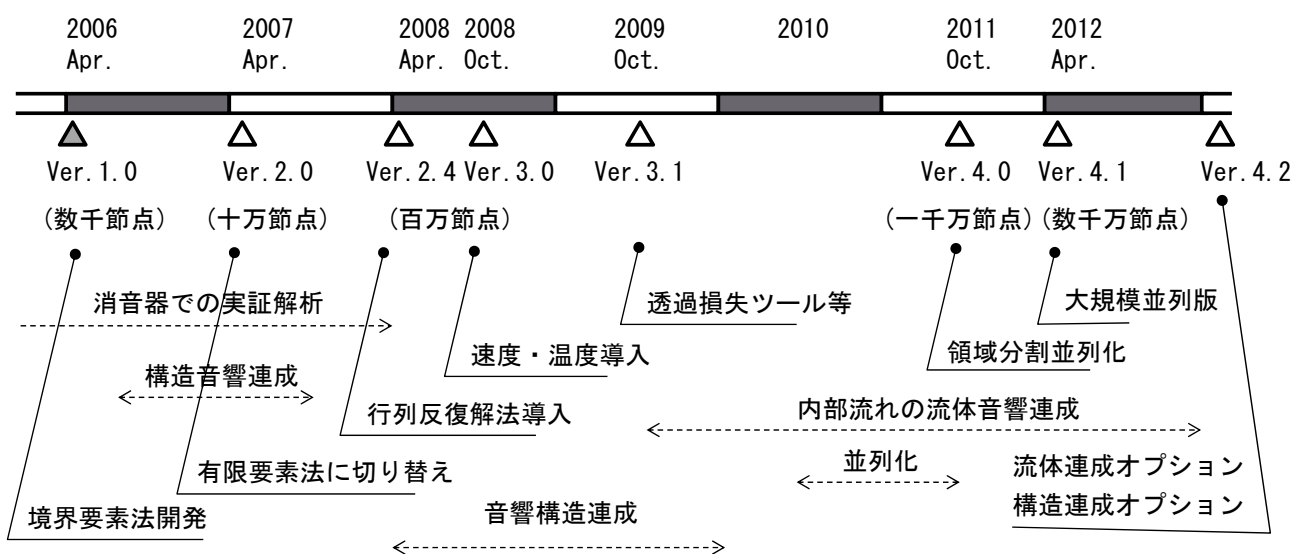
## 1. はじめに

## Advance/FrontNoiseで可能な音響解析

- 音の伝播する領域、解析対象とする周波数を定め、周波数領域での解析を行います。
- その領域を有限要素のメッシュを作成します。境界条件として、解析領域内の**音源の周波数と強さを与えます**。また、壁等には適切な境界条件を与えます。
- 指定された周波数に対して、解析領域内すべての点における音響速度ポテンシャル(音圧、粒子速度)を求めることができます。
- 解析の後処理として、空間の音圧レベルや対象機器の透過損失等を求めることなどができます。
- これらの処理を必要とする周波数の数だけ解析を行います。
- **一般的に音源が不明な場合(音源を与えることができない場合)には音響解析はできません。**

## 2. 開発の経緯

## Advance/FrontNoiseの開発経緯



### ■ 技術雑誌: アドバンスシミュレーション

- [1] 桑原匠史, "Advance/FrontNoiseを用いた音響解析" Vol.2(2010.9)
- [2] 松原聖・桑原匠史, "Advance/FrontNoiseによる大規模解析" Vol.9(2011.10)
- [3] 松原聖, "Advance/FrontNoiseによる大規模解析—続報—" Vol.13(2012.10)
- [4] 松原聖・戸田則雄, "Advance/FrontNoiseによる構造音響および流体音響連成解析" Vol.14(2013.1)

# Advance/FrontNoise初期版の開発

鳥取大学 工学部 機械工学科  
西村正治教授

## 消音器の解析

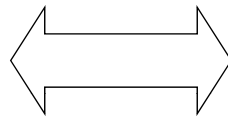
### ■ 物理モデル

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

### ■ 実験



http://www.mech.tottori-u.ac.jp/mcs/research/project/muffler.pdf



## アドバンスソフト

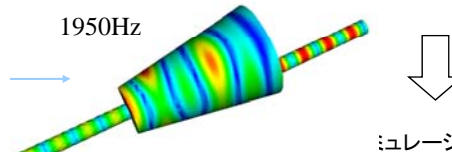
### ■ シミュレーションモデル

$$\frac{D_0}{Dt} \left( \frac{\rho_0}{a_0^2} \frac{D_0 \phi}{Dt} \right) - \nabla \cdot (\rho_0 \nabla \phi) = 0$$

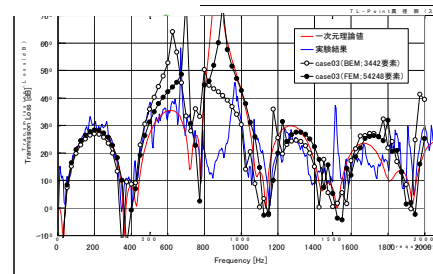
$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla$$

### ■ モデル組み込み

### ■ シミュレーション実施



## シミュレーションの比較



## 実機への適用

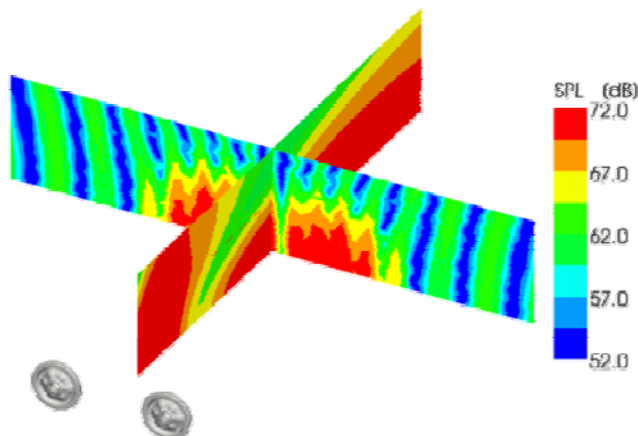
## 検討・評価

# Advance/FrontNoise Ver. 1.0 BEM版

## 車輪騒音の解析

### ■ シミュレーション実施

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



### ■ 実験

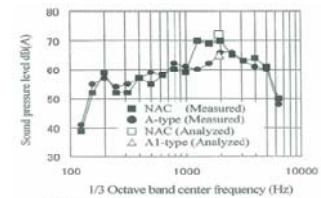
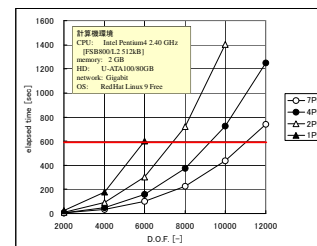
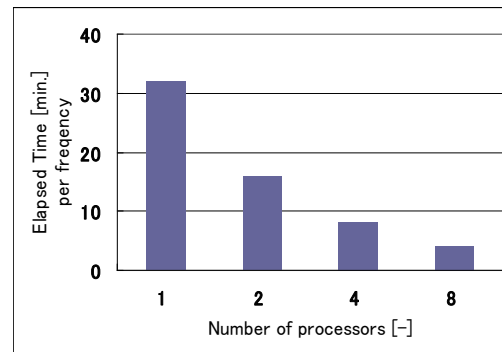
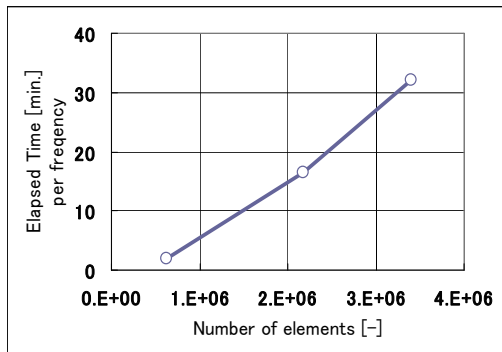
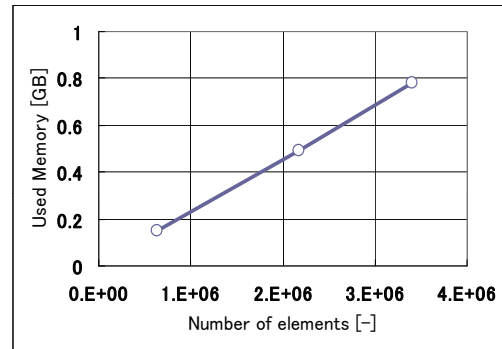


Fig.14 Comparison of spectrums of noise



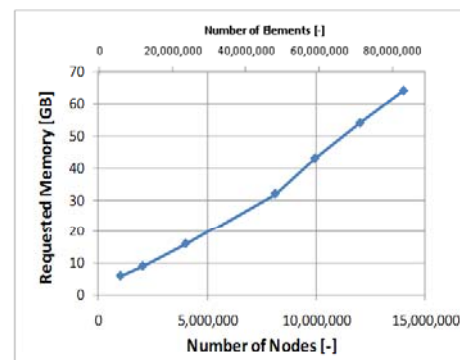
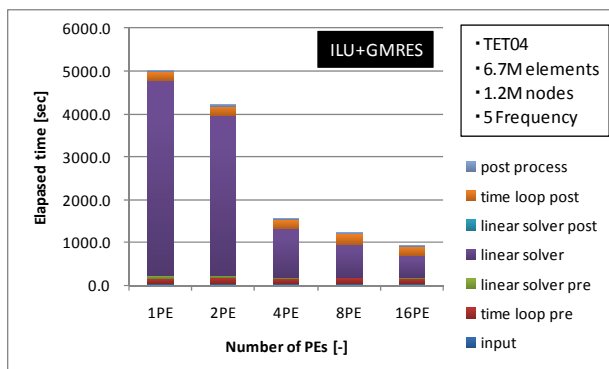
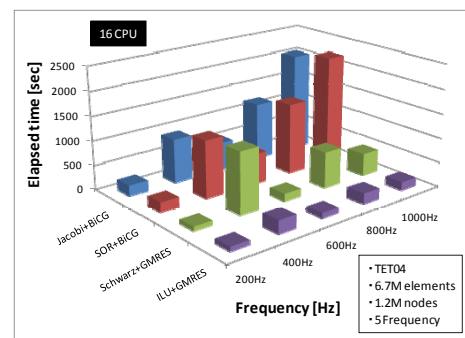
# Advance/FrontNoise Ver. 2.0 FEM版

- 四面体一次300万要素
- 1CPUで30分程度
- 周波数領域での並列化
  - メモリ大
  - 並列化効率高い



# Advance/FrontNoise Ver. 3.0 FEM版領域分割並列版

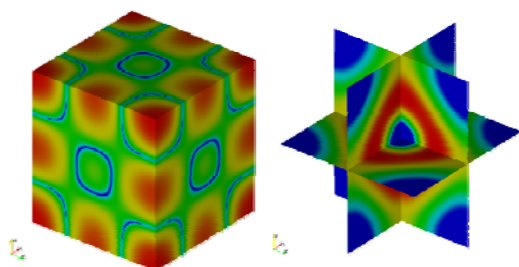
- 四面体一次
- 8000万要素、1500万節点
- 領域分割での並列化
  - メモリ節約し大規模解析可能
  - 並列化効率



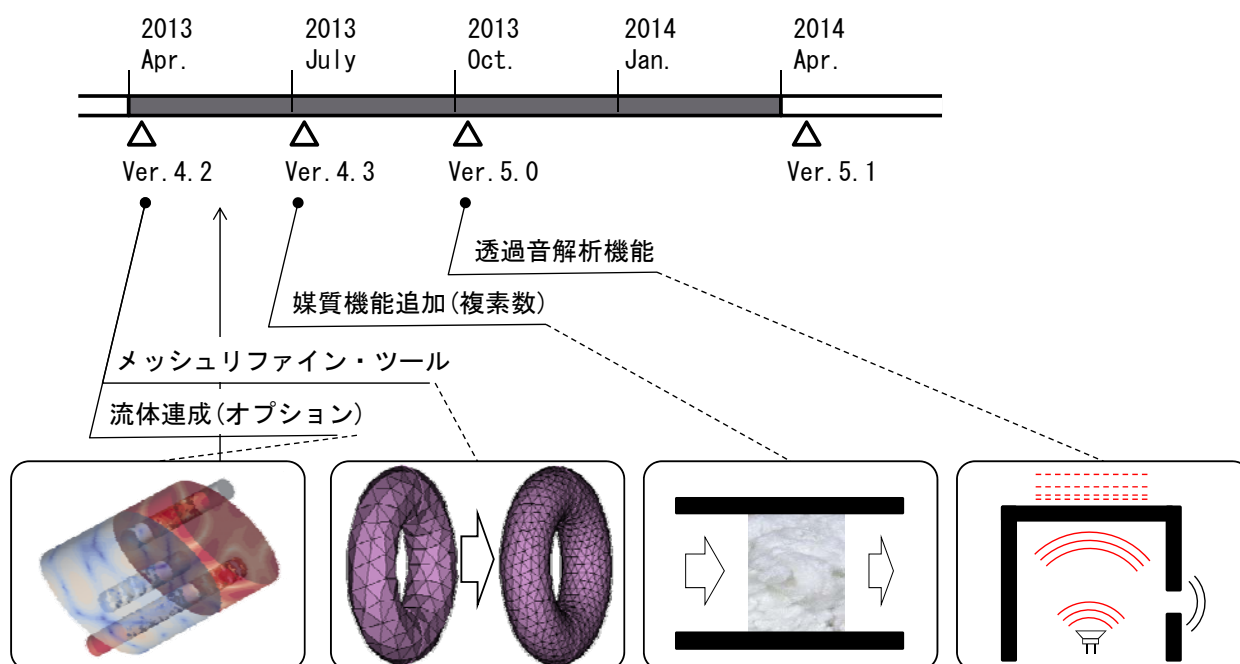
# Advance/FrontNoise Ver. 4.0 FEM 大規模解析対応並列版

- 四面体一次
- 4億要素、7000万節点
- 領域分割での並列化
- 48CPU,400GB
- 12時間/周波数

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



## 今後のバージョンアップ予定



- 2013年5月発行アドバンスシミュレーションVol.15は音響解析特集です。  
・Advance/FrontNoiseの現状とロードマップ、解析事例、連成解析等

## Advance/REVOCAP for Advance/FrontNoise

- これまでは、市販のメッシュ等との接続をユーザ様に依頼しており、非常に不便をおかけしました。
- 特に境界条件の設定が面倒でした。

↓ これを解決しました

- Advance/FrontNoiseと一体化したプリポストをリリースします。
- 音響解析ではほぼ均一なメッシュを作成することが多い。Advance/REVOCAPの自動メッシュの機能は、音響解析には非常に適合性が高い。
- 形状適合性の高い四面体ソルバ用のプリポストである。

## 技術雑誌：アドバンスシミュレーション

- [1] 桑原匠史, "Advance/FrontNoiseを用いた音響解析" Vol.2(2010.9)
- [2] 松原聖・桑原匠史, "Advance/FrontNoiseによる大規模解析", Vol.9(2011.10)
- [3] 松原聖, "Advance/FrontNoiseによる大規模解析—続報—", Vol.13(2012.10)
- [4] 松原聖・戸田則雄, "Advance/FrontNoiseによる構造音響および流体音響連成解析", Vol.14(2013.1)
- [5] 松原聖・桑原匠史, "音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの現状", Vol.15(2013.5)
- [6] 松原聖, "音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの解析手法", Vol.15(2013.5)
- [7] 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", Vol.15(2013.5)
- [8] 松原聖・桑原匠史, "音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseの解析事例", Vol.15(2013.5)

### 3. 基礎方程式

### 基礎方程式(実領域)

実領域(実空間)での基礎方程式

$$\nabla^2 \Psi(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 V(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 P(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial t^2}$$

音響速度ポテンシャル  $\Psi(x,t)$

粒子速度  $V(x,t) = \text{grad}(\Psi(x,t))$

音圧  $P(x,t) = -\rho \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$

音圧レベル  $SPL = 10 \cdot \log \left( \frac{P}{P_0} \right)^2$       $P_0 = 2 \times 10^{-5} [Pa]$

## 基礎方程式(周波数領域へ変換)

$$\nabla^2 \Psi(x, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial t^2}$$

定常的な波を仮定する。右式を代入する。  
 $\Psi(x, t) = \sum_{\nu=1, \infty} \varphi_{\nu}(x) e^{-i\omega t} \quad \omega = 2\pi\nu$

$$\begin{aligned} \sum_{\nu=1, \infty} \nabla^2 \varphi_{\nu}(x) e^{-i\omega t} &= \frac{1}{c^2} \sum_{\nu=1, \infty} \varphi_{\nu}(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} e^{-i\omega t} \\ &= - \sum_{\nu=1, \infty} \frac{\omega^2}{c^2} \varphi_{\nu}(x) e^{-i\omega t} \end{aligned}$$

各周波数を比較して

$$\nabla^2 \varphi(x) + k^2 \varphi(x) = 0 \quad k = \frac{2\pi\nu}{c} \quad \text{※ } \varphi \text{ の添え字の } \nu \text{ を省略した}$$

## Advance/FrontNoiseでの基礎方程式

### 周波数領域での基礎方程式

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi(x) + k^2 \varphi(x) &= 0 \quad \text{in } \Omega \\ k &= \frac{2\pi\nu}{c} \end{aligned}$$

### 周波数領域での境界条件

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

## 基礎方程式(速度あり)

$$\frac{D_0}{Dt} \left( \frac{\rho_0}{c_0^2} \frac{D_0 \Psi}{Dt} \right) - \nabla \cdot (\rho_0 \nabla \Psi) = 0$$

Convected Wave Equation

$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla$$

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

$$\begin{aligned} & (1 - M_x^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (1 - M_y^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + (1 - M_z^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} & M_x &= \frac{u}{c} \\ & - \left( 2M_x M_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + 2M_y M_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} + 2M_z M_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} \right) & M_y &= \frac{v}{c} \\ & - 2ik \left( M_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + M_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + M_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + k^2 \phi = 0 & M_z &= \frac{w}{c} \end{aligned}$$

## 粒子速度と音圧(速度あり)

$$P(x, t) = -\rho \frac{D\Psi(x, t)}{Dt}$$

$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla$$

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

$$\begin{aligned} P(x, t) &= \sum_{\nu=1, \infty} p(x) e^{-i\alpha t} = \rho \frac{D}{Dt} \left( \sum_{\nu=1, \infty} \phi(x) e^{-i\alpha t} \right) \\ &= \rho \sum_{\nu=1, \infty} (-i\omega \phi + v_0 \cdot \nabla \phi) e^{-i\alpha t} \end{aligned}$$

$$p(x) = -\rho (-i\omega \phi(x) + v_0 \cdot \nabla \phi(x))$$

$$V(x, t) = \text{grad}(\Psi(x, t))$$

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

$$v(x) = \text{grad}(\phi(x))$$

# 基礎方程式(まとめ)

## 周波数領域での基礎方程式

$$\nabla^2 \varphi(x) + k^2 \varphi(x) = 0 \quad \text{in } \Omega$$

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

※ 速度ありの場合はつぎの修正項を加えることになる。

$$\begin{aligned} & (1-M_x^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (1-M_y^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + (1-M_z^2) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \\ & - \left( 2M_x M_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + 2M_y M_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} + 2M_z M_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial x} \right) \\ & - 2ik \left( M_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + M_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + M_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + k^2 \phi = 0 \end{aligned}$$

## 4. 境界条件

## 境界条件

周波数領域での境界条件(数学的には混合境界条件を与える)

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

下記の境界条件はどのように与えるか？

- ✓ 時系列圧力による境界条件(主に流体音響連成)
- ✓ 壁の時系列速度による境界条件(主に構造音響連成)
- ✓ 壁の時系列変位または加速度による境界条件(同上)
- ✓ 壁のインピーダンス条件
- ✓ 完全反射の境界条件
- ✓ 完全吸収(無反射)の境界条件



## 境界条件の取り扱い

境界条件	$\alpha(x)$	$\beta(x)$	$f(x)$	備考
時系列圧力	$i\omega\rho$	0	$-p_i(x)$	流体音響連成
時系列速度	0	1	$v_i(x)$	構造音響連成
時系列 変位・加速度	0	1	$-i\omega u_i(x)$ 、 $-\frac{1}{i\omega}a_i(x)$	構造音響連成
インピーダンス	$i\omega\rho$	$-Z$	0	壁面の境界
完全反射	0	1	0	デフォルト
完全吸収	$i\omega\rho$	$\rho c$	0	$\rho c$ 境界

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



## 音圧の境界条件

周波数毎に圧力を与える。または、時系列圧力をFourier変換して、その係数を与える。

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

音圧の定義より。

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

両辺を比較する。

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

混合境界条件に形式的に書き換えるとなつぎの通り。

$$\alpha(x)\phi(x) + \beta(x) \frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = f(x) \quad \text{on } \partial\Omega$$

$$\alpha(x) = i\omega \rho \quad \beta(x) = 0 \quad f(x) = -p_i(x)$$

## 粒子速度の境界条件

周波数毎に境界法線方向の速度を与える。または、境界法線方向の時系列速度をFourier変換して、その係数を与える。

$$V_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} v_i(x) e^{-i\alpha t}$$

音圧の定義より。

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

境界の法線方向で両辺を比較する。

$$\frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = v_i(x)$$

混合境界条件に形式的に書き換えるとなつぎの通り。

$$\alpha(x)\phi(x) + \beta(x) \frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = f(x) \quad \text{on } \partial\Omega$$

$$\alpha(x) = 0 \quad \beta(x) = 1 \quad f(x) = v_i(x)$$

## 変位または加速度の境界条件

周波数毎に境界法線方向の変位または加速度を与える。または、境界法線方向の時系列変位 $U_0$ または加速度 $A_0$ をFourier変換して、その係数を与える。

$$U_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} u_i(x) e^{-i\omega t}$$

$$V_0(x,t) = \frac{\partial U_0(x,t)}{\partial t} = \sum_{\nu=1,\infty} (-i\omega u_i(x)) e^{-i\omega t}$$

$$v_i(x) = -i\omega u_i(x) \longrightarrow \text{速度の境界条件に入れる。}$$

加速度も同様に下記の通り。

$$A_0(x,t) = \sum_{\nu=1,\infty} a_i(x) e^{-i\omega t} \quad v_i(x) = -\frac{1}{i\omega} a_i(x)$$

## インピーダンスで与える境界条件

インピーダンスは、つぎの定義である。

$$Z = \frac{p}{v} = \frac{i\omega\rho\phi(x)}{\frac{\partial\phi(x)}{\partial n}}$$

両辺を比較する。

$$Z \frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = i\omega\rho\phi(x)$$

混合境界条件に形式的に書き換えるとつぎの通り。

$$\alpha(x)\phi(x) + \beta(x) \frac{\partial\phi(x)}{\partial n} = f(x) \quad \text{on } \partial\Omega$$

$$\alpha(x) = i\omega\rho \quad \beta(x) = -Z \quad f(x) = 0$$

## 完全反射の境界条件

インピーダンスが $\infty$ のケースである。

$$Z = \infty$$

インピーダンス境界の条件を $-Z$ で割ると下記の通り。

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

$$\alpha(x) = 0 \quad \beta(x) = 1 \quad f(x) = 0$$

すなわち、下記の条件となる。これは、有限要素法で何も設定しない境界に対する境界条件となる。そのような背景から、本プログラムでは、この条件がデフォルトとなる(何も指定しなければ、剛体の境界条件となる)。

$$\frac{\partial\varphi(x)}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega$$

## 完全吸収(無反射)の境界条件

$\rho c$ 境界(1次元で完全吸収となる条件)を与える。  
3次元では完全吸収条件の近似とすることができる。

$$Z = \rho c$$

※  $\rho c$ 境界の根拠は下記の通り

$$\nabla^2\varphi(x) + k^2\varphi(x) = 0 \quad \text{基礎方程式}$$

$$\varphi(x) = \cos(kx) + i\sin(kx) \quad \text{1次元の解析解}$$

$$Z = \frac{i\omega\rho\varphi(x)}{\frac{\partial\varphi(x)}{\partial n}} = \frac{i\omega\rho(\cos(kx) + i\sin(kx))}{(-k\sin(kx) + ik\cos(kx))} = \frac{i\omega\rho(\cos(kx) + i\sin(kx))}{ik(i\sin(kx) + \cos(kx))} = \frac{i\omega\rho}{i\left(\frac{\omega}{c}\right)} = \rho c$$

1次元の解析解は任意の点でこの式を満たす。

## 5. 音源



## 音源の取扱い

音源	単独の音源	分布する音源
点音源	基礎方程式の右辺のソース項として与える。	同左
	音源条件として*.bcnファイル、*.bcqファイルとして与える。	同左
二重極音源	1点を指定することで、二重極音源の計算条件を設定する。	壁の境界条件として、取り扱う。圧力または粒子速度の境界条件として入力する。
	入力ファイルを変換するツールpsgenを提供する。	境界条件として*.bcsファイル、*.bcvファイルを与える。
四重極音源	1点を指定することで、四重極音源を計算条件を設定する。	空間に分布する音源として取り扱う。Lighthillテンソルの2階微分の音源を点音源として設定する。
	入力ファイルを変換するツールpsgenを提供する。	流速からLighthillテンソルの2階微分に変換し、*.bcnファイルと*.bcqファイルを作成するツールを提供



# 点音源の取扱い

$$\nabla^2 \phi(x) + k^2 \phi(x) = 0$$

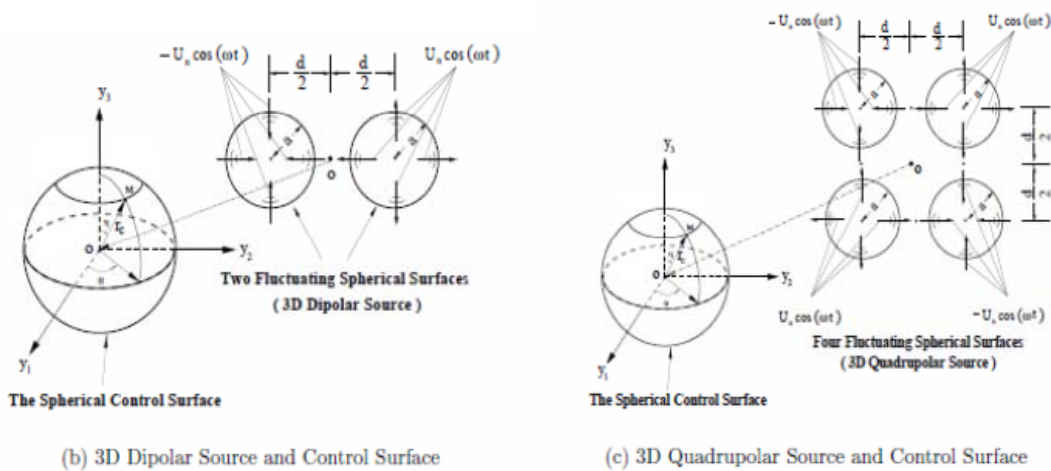


$$\nabla^2 \phi(x) + k^2 \phi(x) = q_0 \delta(x - x_0)$$

$q_0$  は体積速度であり、単位は  $m^3 / \text{sec}$

$$\int_{\Omega_{|x-x_0|<\varepsilon}} \{ \nabla^2 \phi(x) + k^2 \phi(x) \} dv = q_0$$

# (単独の) 二重極音源と四重極音源



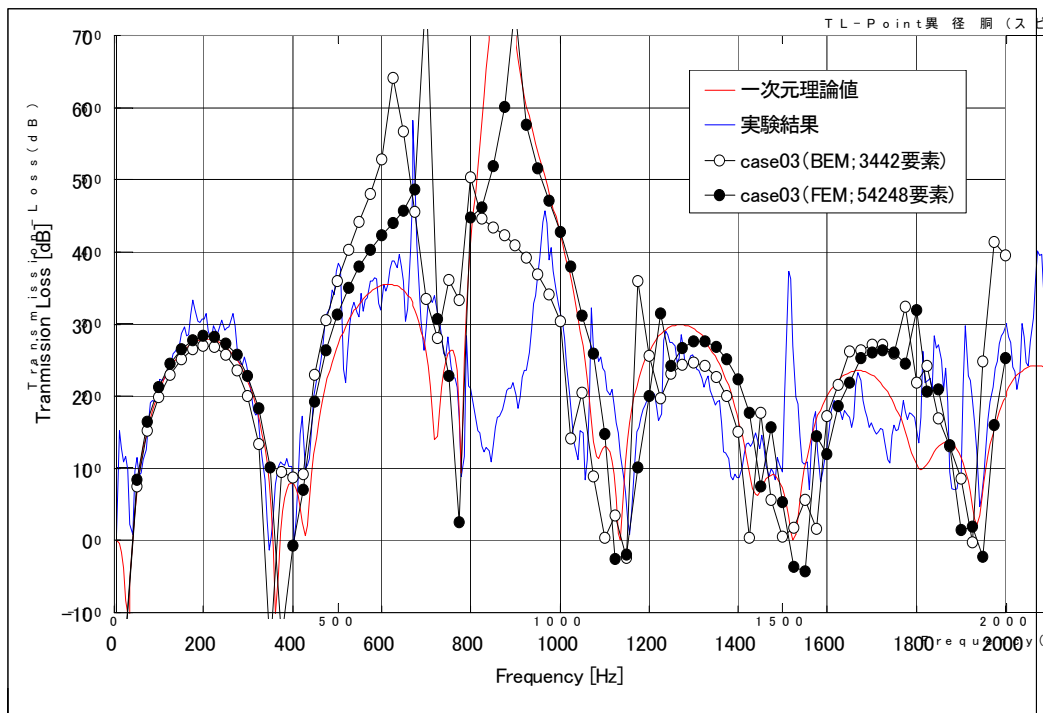
K.Tang; "Numerical Simulation of Flow-Induced Noise by Means of the Hybrid Method with LES and Aeroacoustics Analogy," D論, Fachbereich Maschinentechnik der Universität Siegen(2004)より抜粋

## 6. 数値解法

### 有限要素法を採用した経緯

- Advance/FrontNoise Ver1.0は、境界要素法BEMによる定式化を利用して開発された。また、当初から大規模を目指して並列処理のプログラムとして開発した。
- ところが、BEMの処理時間では、境界節点1万点でほぼ限界となり、また、処理時間は節点数の3乗に比例するため、将来的な発展を見込むことができなくなった。
- 有限要素法FEMの定式化で開発を行い、精度と処理時間の比較等を行った。その結果、精度は同等で、処理時間が圧倒的に早い有限要素法をVer2.0から採用することとした。

# 有限要素法と境界要素法の比較



# 有限要素法と境界要素法

比較項目	有限要素法	境界要素法
処理速度	○	△
使用記憶容量	○	△
放射問題対応	△	◎
非均一媒体	○	×
定式化	容易	難解
境界条件モデル化	容易	難解



## 有限要素法の定式化

- 四面体要素のみを利用する。
  - 形状適合性が高い。
  - 容易にメッシュを作成することが可能である。
  - 問題規模は(要素数ではなく)節点数に依存するため、四面体が不利になることはない(四面体を利用したからといって、問題規模が大きくなることはない)
- 四面体1次要素を利用する。
  - ポテンシャルを解くのみなので、四面体2次要素を利用するメリットがない。
- 定式化にはGalerkin法を利用する。
- 境界条件は混合境界条件のみ。

## 数値解法

- 方程式の解法
  - 有限要素法を適用して離散化する。
  - 離散化した基礎方程式は、複素係数の大規模連立一次方程式となる。複素数の変数の数は、節点数と等しい。
  - その連立方程式は、大規模解析にも実績のある疎行列用反復解法を適用する。
  - ひとつの周波数に対して、1回の線型方程式を解く。
- 並列化の方式
  - 疎行列用反復解法の処理を中心に並列化した。
  - 大規模問題に適用できるデータ構造とした。
  - 並列化で利用する領域分割は、ユーザが意識する必要はない。

## 7. まとめ

## Advance/FrontNoise概要のまとめ

- Advance/FrontNoiseの開発経緯について示すことにより、その実績を示しました。
- Advance/FrontNoiseは、音響解析の基礎方程式を解くために、有限要素法により定式化されたソフトウェアである。
  - 音響の基礎方程式を示しました。
  - 境界条件を示しました。
  - 音源項を示しました。
- Advance/FrontNoiseで採用している数値解法の概略を示し、その特徴について説明しました。