

# ハイブリッド有限要素-波動ベース法に基づいたフェアリング内音響振動予測

高橋 孝

宇宙航空研究開発機構／研究開発本部

金田英和, 岩永則城

計算力学研究センター

堤 誠司

宇宙航空研究開発機構／情報・計算工学センター

## Vibroacoustic Predictions Inside a Payload Fairing Using the Hybrid Finite Element - Wave Based Approach

by

Takashi Takahashi (JAXA), Hidekazu Kaneda, Noriki Iwanaga (RCCM), and Seiji Tsutsumi (JAXA)

### ABSTRACT

This study considers the numerical prediction of sound transmission through a spacecraft payload fairing and the acoustic environment inside it. In general, a spacecraft is exposed to acoustic pressure loading on the fairing in a wide frequency range, thus numerical predictions and analyses of the acoustic environment inside the fairing are of crucial importance for reliable spacecraft developments. The authors have focused on the application of the wave based method (WBM), which is a deterministic approach and has been proposed for numerical predictions up to the mid-frequency range. In this study, a series of sound source, sound propagation and sound transmission predictions is applied to a rocket launch environment. Firstly, the sounds generated by a rocket engine are predicted by using computational fluid dynamics. Secondly, the sound propagation to a payload fairing is computed by the Ffowcs Williams and Hawkings approach. Then, thirdly, the vibroacoustic analysis of the fairing structure and an interior fairing is performed by the hybrid finite element - wave based approach, which is proposed to solve vibroacoustic problems by combining the strengths of both involved methods, namely the high computational efficiency of the WBM and the high geometrical flexibility of the finite element method. Moreover, in order to predict the fill-effect, which is recognized as the difference in the sound pressure level with and without payload, rigid payload models inside the fairing are also employed.

### 1. はじめに

ロケット打ち上げ時の轟音は、フェアリング構造を透過して、その中に搭載されている宇宙機に広い周波数成分（地上試験や設計・開発のフェーズにおいては、一般に2000[Hz]まで考慮される）を含む音圧荷重を与える。太陽電池パドルやアンテナなどの軽量で大きな面積の構造物は、比較的音響荷重に対する感度が高く、音響振動の影響は無視できない。また、宇宙機が搭載されフェアリング内の体積充填率が上がると局所的な音圧上昇が生じることが知られている（フィルエフェクト／フィルファクタ）<sup>1)</sup>。このような問題に関して、ロケット打ち上げ時の音源解析から音響伝搬、さらには、フェアリング構造の音響透過と宇宙機の音響振動といった一連の実験を行うことは不可能であり、特に、過去のフライトデータ蓄積がない新規開発ロケットに関して、数値シミュレーションによる予測手法を確立することは重要である。

従来は、打ち上げ時の音源を見積もるためには経験的な手法<sup>2)</sup>が用いられてきた。この方法は、単純な幾何形状の射場を考慮して、フライトデータや試験データに基づいているので、複雑形状の射場に直接適用することは難しい。よって近年では、数値流体力学(CFD)を利用した音源（近傍場）予測が行われてきている<sup>3),4)</sup>。しかし、フェアリング構造表面など音源位置から離れた遠方場の音響伝搬予測に関しては、非常に多くのメッシュが必要となる。そこで、流れ場には CFD、音場には FW-H(Ffowcs Williams and Hawkings)法<sup>5)</sup>やキルヒホッフ法などを利用する分離解法を

適用して、近傍場から遠方場を比較的簡易に予測することで、より高周波の音響伝搬予測が可能となることが示されている<sup>6)</sup>。

一方、音響透過や音響振動に関しては、通常、定常解析が行われる。この場合、既存の数値解析手法では、高周波側は統計的エネルギー法(SEA)などの確率統計的な手法、低周波側は有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)などの決定論的な要素ベース手法が適用される。ところが、その間の中間周波数帯は、上記の既存のアプローチでは精度の良い解析が困難であることが知られている。そこで、Desmet<sup>7)</sup>は、中間周波数帯までに適用可能な決定論的な波動ベース法(Wave Based Method (WBM))を提案し、定常内外部音響振動問題に対して成功裏に適用されている<sup>8)</sup>。これは間接トレフツ法に基づき、同次支配方程式の厳密解を用いて未知変数を展開する手法であり、空間を細かなメッシュに切る必要がないことから数値分散誤差がなく、要素ベース手法よりも小さな自由度で解析が可能である。

WBM を適用するには、問題領域を凸形状の部分領域に分けさえすれば良い。しかし、多くの部分領域を用いると WBM の長所である高い収束性が損なわれるため、幾何形状がそれほど複雑でない問題に適用が限定されていた。そこで、WBM の高い収束性と複雑形状へ対応可能な FEM の長所を合わせたハイブリッド有限要素(FE)-波動ベース(WB)法が提案された<sup>9)</sup>。これは、有限要素に分割する複雑形状まわりの領域は必要最小限に抑えることで、複雑形状を扱い、かつ数値分散誤差の拡大を抑えるという考え方に基づ

いている。この従来提案されているハイブリッド法は音響 FE 領域と音響 WB 領域の組み合わせであったが、著者らはそれを拡張し、構造領域の FE モデルと音響領域の WB モデル化を組み合わせたハイブリッド構造 FE-音響 WB 法の手法の定式化を行い、ハニカム・サンドイッチ・パネルを通じた音響透過解析と実験とにより検証を行ってきた<sup>10)</sup>。

本論文では、固体ロケット打ち上げ時のプルーム近傍の既存の CFD の結果<sup>11)</sup>を音響近傍場のデータとして利用し、FW-H 法によりフェアリング構造外部表面における音圧場（遠方場）を予測する。さらに、その音圧データを簡易フェアリング構造の表面に加わる荷重として用い、ハイブリッド構造 FE-音響 WB 法を用いてフェアリング内部への音響透過及び内部音響振動の連成解析を行う。フェアリング内部のフィルエフェクトに関しては、通常、SEA に基づいて円筒状の宇宙機モデルを想定した簡易式<sup>1)</sup>を用いて予測するが、SEA の性質から、中間から低周波領域では信頼性が低くなるので、その領域では経験的な手法で補っているのが現状である。そこで、上記の解析において、フェアリングに宇宙機が搭載されていない空の場合と（剛な）宇宙機が搭載されている場合の内部音圧レベル(SPL)を比較し、上記の一連の数値解析手法を用いて宇宙機の存在がフェアリング内の音場に与える影響を予測できることを示す。

## 2. 音響伝搬の数値予測手法

ロケット打ち上げ時のプルーム近傍の音源がフェアリング構造外部表面へどのように伝搬するか予測するために、CFD と FW-H 法を組み合わせた分離解法を用いる。まず、図 1 に示すように積分検査面上の流れのデータを CFD により計算しておく。次に、遠方場の観測点における音圧を、次式を用いて計算する（FW-H 法）。

$$p(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial \{\rho u^n\}}{\partial t'} + \frac{1}{R} \frac{\partial \{\rho u^R u^n + p' \cos \chi\}}{c \partial t'} + \frac{1}{R^2} \{\rho u^R u^n + p' \cos \chi\} \right]_{t'=t-\frac{R}{c}} dS', \quad (1)$$

ここで、 $p$  は観測点における音圧、 $S'$  は音波を放射する積分検査面、 $p'$  は積分検査面上の音圧、 $\mathbf{x}$  は観測点位置ベクトル、 $t$  は観測点における現在時間、 $\mathbf{x}'$  は音源位置ベクトル、 $t'$  は積分検査面上での時間、 $\mathbf{R} (= \mathbf{x} - \mathbf{x}')$  は放射方向ベクトル、 $R = \|\mathbf{R}\|$ 、 $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R}/R = [\hat{R}_1 \ \hat{R}_2 \ \hat{R}_3]^T$ （演算子 T は行列の転置を表す）、 $\hat{\mathbf{n}} = [\hat{n}_1 \ \hat{n}_2 \ \hat{n}_3]^T$  は積分検査面上の外向きの単位法線ベクトル、 $\chi$  は  $\hat{\mathbf{R}}$  と  $\hat{\mathbf{n}}$  との間の角度、 $\rho$  は空気の密度、 $c$  は音速である。また、次の関係も用いた。

$$t = t' + R/c, \quad \cos \chi = \hat{\mathbf{n}}_i \hat{R}_i, \\ u^n = \hat{n}_i u^i, \quad u^R = \hat{R}_i u^i. \quad (2)$$

ここで、 $u^i$  ( $i=1,2,3$ ) は流体の速度成分である。

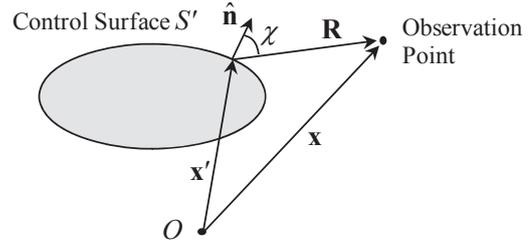


図 1 積分検査面と観測点との関係

## 3. ハイブリッド有限要素-波動ベース法

次に、本論文においてフェアリング構造とフェアリング内部音場の連成解析を行うために、音響 WB 部分領域と構造ソリッド FE を用いるハイブリッド法について簡単に説明する。

### 3.1. 幾何学的な関係

音響問題領域は、簡単のために同じ種類の流体（密度  $\rho$  と音速  $c$ ）で満たされる  $n_\Omega$  個の凸な部分領域に分けられると仮定する。部分領域の凸性は、WBM の解が収束することを保証するのに十分な条件である。そして、部分領域  $\Omega^{(\alpha)}$  ( $\alpha=1, \dots, n_\Omega$ ) における運動学的な関係式を記述するため、 $\Omega^{(\alpha)}$  におけるある点の絶対位置ベクトルと局所位置ベクトルを、それぞれ、 $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{r}^{(\alpha)}$  と書く（図 2 参照）。このとき、 $\mathbf{r}^{(\alpha)}$  から  $\mathbf{r}$  への変換を  $\mathbf{r}(\mathbf{r}^{(\alpha)})$  と表し、その逆を  $\mathbf{r}^{(\alpha)}(\mathbf{r})$  と書くことにする。各部分領域表面  $\Gamma^{(\alpha)}$  は、様々な境界面から成る。つまり、 $\Gamma^{(\alpha)} = \Gamma_p^{(\alpha)} \cup \Gamma_v^{(\alpha)} \cup \Gamma_z^{(\alpha)} \cup \Gamma_c^{(\alpha)} \cup \Gamma_{sh}^{(\alpha)}$  と表される。ここで、 $\Gamma_p^{(\alpha)}$ 、 $\Gamma_v^{(\alpha)}$ 、 $\Gamma_z^{(\alpha)}$ 、 $\Gamma_c^{(\alpha)}$ 、 $\Gamma_{sh}^{(\alpha)}$  は、それぞれ、圧力、法線方向速度、法線方向インピーダンス、WB 部分領域間のインターフェイス(I/F)、及び、ハイブリッド FE-WB の I/F である。 $\Gamma_c^{(\alpha)}$  上では、圧力と法線方向速度の連続性条件が課される。

一方、構造領域  $\Omega_s$  は、境界面  $\Gamma_s$  で囲まれた  $n_{se}$  個の構造 FE で分割されると仮定し、各 FE 領域を  $\Omega_s^e$  ( $e=1, \dots, n_{se}$ ) と表す。各 FE は、 $n_s^e$  個の節点を持ち、全節点数は  $n_{sn}$  個であるとする。 $\Omega_s$  内の運動学的関係を記述するために、 $\Omega_s$  におけるある点の絶対位置ベクトルと FE 全体位置ベクトルを、それぞれ、 $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{r}_F$  で表わす。そして、 $\mathbf{r}_F$  から  $\mathbf{r}$  への変換を  $\mathbf{r}(\mathbf{r}_F)$  と書き、その逆を  $\mathbf{r}_F(\mathbf{r})$  とする。

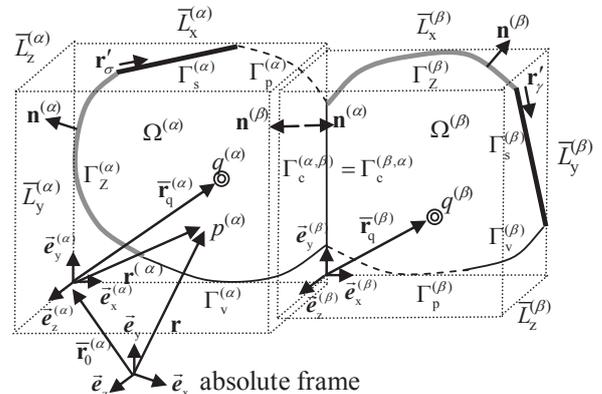


図 2 3次元内部音響モデル

### 3.2. 支配方程式

WB 部分領域  $\Omega^{(\alpha)}$  における定常音圧は、

$$\nabla^2 p^{(\alpha)}(\mathbf{r}) + k^2 p^{(\alpha)}(\mathbf{r}) = -j\rho\omega q^{(\alpha)} \delta(\mathbf{r}^{(\alpha)}, \bar{\mathbf{r}}_q^{(\alpha)}), \quad \mathbf{r} \in \Omega^{(\alpha)}, \quad (3)$$

で表わされるヘルムホルツ方程式によって支配される。ここで、 $\nabla$ は $[\partial/\partial x \ \partial/\partial y \ \partial/\partial z]^T$ で定義され、 $\omega$ を励振角振動数、 $k$ を音響波数、 $\delta$ をディラックのデルタ関数、 $\bar{\mathbf{r}}_q$ を単極子の位置ベクトルの絶対成分、 $q$ を単位体積あたりの体積速度、 $j$ を $\sqrt{-1}$ で定義される虚数である。

一方、一般的な構造問題の支配方程式は、次のような FE 全体位置  $\mathbf{r}_F$  における動的な釣り合い式である。

$$-\rho_s(\mathbf{r}_F) \omega^2 \mathbf{u}(\mathbf{r}_F) = \mathbf{S}^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}_F) + \mathbf{b}(\mathbf{r}_F), \quad \mathbf{r}_F \in \Omega_s, \quad (4)$$

ここで、 $\rho_s$ は構造の体積密度、 $\mathbf{u}$ は変位ベクトル、 $\mathbf{b}$ は物体力ベクトル、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 $\mathbf{S}$ は適当な微分演算子である。また、構造材料特性に依存した構成式も用いる。

### 3.3. FE-WB 間インターフェイス条件

ハイブリッド FE-WB I/F  $\Gamma_{sh}^{(\alpha)}$  上では、構造の法線方向速度と法線方向音響速度が、次のような条件で関連づけられていなければならない。

$$\frac{j}{\rho\omega} \frac{\partial p^{(\alpha)}(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}^{(\alpha)}} = -j\omega \mathbf{n}_s(\mathbf{r}_F(\mathbf{r}))^T \mathbf{u}(\mathbf{r}_F(\mathbf{r})), \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{sh}^{(\alpha)}, \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{n}_s$ は構造表面の外向き法線ベクトルである。

### 3.4. 変数展開

WBM では、動的な変数を、その同次支配方程式の厳密解である波動関数を用いて展開する。式(3)で支配される音響問題に対しては、WB 部分領域  $\Omega^{(\alpha)}$  における音圧変数  $p^{(\alpha)}$  が、次のように展開される。

$$\begin{aligned} p^{(\alpha)}(\mathbf{r}) &\approx \hat{p}^{(\alpha)}(\mathbf{r}) \\ &= \sum_{i=1}^{n_a^{(\alpha)}} p_i^{(\alpha)} \Phi_i^{(\alpha)}(\mathbf{r}^{(\alpha)}(\mathbf{r})) + p_q^{(\alpha)}(\mathbf{r}^{(\alpha)}(\mathbf{r})) \\ &= \Phi^{(\alpha)} \mathbf{p}^{(\alpha)} + p_q^{(\alpha)}, \quad \mathbf{r} \in \Omega^{(\alpha)} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $p_q^{(\alpha)}$ は式(3)の特解であり、 $n_a^{(\alpha)}$ は音響波動関数の打ち切り数、 $\Phi_i^{(\alpha)}$  ( $i=1, \dots, n_a^{(\alpha)}$ )は既知の音響波動関数、 $p_i^{(\alpha)}$ は未知の音響波動関数の寄与係数、 $\Phi^{(\alpha)}$ は  $1 \times n_a^{(\alpha)}$  の波動関数行列、 $\mathbf{p}^{(\alpha)}$ は  $n_a^{(\alpha)} \times 1$  の未知の寄与係数行列である。

ソリッド構造要素を用いる変位型の FEM の定式化では、要素領域  $\Omega_s^e$  ( $e=1, \dots, n_{se}$ ) 内の絶対位置  $\mathbf{r}$  における構造の定常変位ベクトル  $\mathbf{u}(\mathbf{r}_F(\mathbf{r}))$  が、局所的に定義される単純な (通常は多項式) 要素形状関数を用いて展開される。全体形式では、この変位ベクトルは、次のように展開できる。

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}_F) \approx \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{r}_F) = \mathbf{N}(\mathbf{r}_F) \mathbf{u}_F, \quad \mathbf{r}_F \in \Omega_s, \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{N}$  と  $\mathbf{u}_F$  は、それぞれ、全体形状関数と節点変位ベクトルである。

### 3.5. ハイブリッド構造 FE-音響 WB アプローチの定式化

未知の行列  $\mathbf{p}^{(\alpha)}$  ( $\alpha=1, \dots, n_\Omega$ ) と  $\mathbf{u}_F$  を決めるために、重み付き残差法を適用する。このとき、FEM の定式化では、支配方程式と (幾何学的拘束を除く) 境界条件(BC)の両方が弱形式を満たすように近似されるのに対して、WBM の定式化では、波動関数が支配方程式を厳密に満たすことから、BCのみが近似されるという違いに注意したい。

#### 3.5.1. 音響 WB 部分領域の重み付き残差式

まず、重み付き残差式を、 $\Omega^{(\alpha)}$  における音響 BC に適用する。そのためにまず、 $\Gamma_p^{(\alpha)}, \Gamma_v^{(\alpha)}, \Gamma_z^{(\alpha)}, \Gamma_c^{(\alpha)}$  上の残差関数を、それぞれ、 $R_p^{(\alpha)}, R_v^{(\alpha)}, R_z^{(\alpha)}, R_c^{(\alpha)}$  と置く。また、 $\Gamma_{sh}^{(\alpha)}$  上の残差関数  $R_{sh}^{(\alpha)}$  は、式(5)の右辺と左辺の差によって与えられる。これらの関数は、 $n_\Omega$  個全ての WB 部分領域で定義できる。ゆえに、全ての残差関数と重み関数を適用すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_p^{(\alpha)}} \check{L}_v^{(\alpha)} [\check{p}^{(\alpha)}] R_p^{(\alpha)} d\Gamma + \int_{\Gamma_v^{(\alpha)}} \check{p}^{(\alpha)} R_v^{(\alpha)} d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_z^{(\alpha)}} \check{p}^{(\alpha)} R_z^{(\alpha)} d\Gamma + \int_{\Gamma_c^{(\alpha)}} \check{p}^{(\alpha)} R_c^{(\alpha)} d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_{sh}^{(\alpha)}} \check{p}^{(\alpha)} R_{sh}^{(\alpha)} d\Gamma = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、重み関数は、 $\check{p}^{(\alpha)} = \Phi^{(\alpha)} \check{\mathbf{p}}^{(\alpha)}$  のように Galerkin 法により定義される。

#### 3.5.2. 構造 FE 領域の重み付き残差式

次に、従来の構造 FE アプローチに従うと、式(4)から良く知られる弱形式が得られる。そして、重み関数を、Galerkin 法により  $\check{\mathbf{u}} = \mathbf{N} \check{\mathbf{u}}_F$  のように選択する。

このとき、音圧荷重は表面力として導入され、そこで式(6)を適用する。ゆえに、表面力ベクトルの列行列である  $\mathbf{t}$  は、次のように表せる。

$$\mathbf{t} = -p \mathbf{n}_s = -\mathbf{n}_s \sum_{\alpha=1}^{n_\Omega} \hat{p}^{(\alpha)} = -\mathbf{n}_s \sum_{\alpha=1}^{n_\Omega} (\Phi^{(\alpha)} \mathbf{p}^{(\alpha)} + p_q^{(\alpha)}), \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{sh}. \quad (9)$$

#### 3.5.3. 行列方程式

重み付き残差式は、それぞれ任意の  $\check{\mathbf{p}}^{(\alpha)}$  と  $\check{\mathbf{u}}_F$  に対して成り立つので、FEM の定式化部分で幾何学的構造 BC に対応する行と列を削除した後で、ハイブリッド構造 FE-音響 WB 法のシステム方程式が、次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{C}_{sah} \\ j\omega \mathbf{C}_{sah}^T & \mathbf{A}_a + \mathbf{A}_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_F \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} + \mathbf{f}_h \\ \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_{ph} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

ここで、行列  $\mathbf{Z}$  と  $\mathbf{f}$  は、それぞれ、純粋な構造 FEM に対する動剛性行列と外力ベクトルであり、一方、行列  $\mathbf{A}_a$  と  $\mathbf{f}_p$  は、それぞれ、純粋な音響 WBM に対する係数行列と外部励振ベクトルである。他の部分は構造 FE と音響 WB 部

分領域とが連成する影響を表しており、次のように定義される。

$$\mathbf{C}_{\text{sah}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\text{sah}}^{(1)} & \cdots & \mathbf{C}_{\text{sah}}^{(n_\alpha)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_{\text{sah}}^{(\alpha)} = \int_{\Gamma_{\text{sah}}^{(\alpha)}} \mathbf{N}^T \mathbf{n}_s \Phi^{(\alpha)} d\Gamma \quad (12)$$

$$\mathbf{f}_h = \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} \mathbf{f}_h^{(\alpha)} = - \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} \int_{\Gamma_{\text{sah}}^{(\alpha)}} \mathbf{N}^T \mathbf{n}_s p_q^{(\alpha)} d\Gamma \quad (13)$$

最後に、システム方程式(10)は、疎行列部分と密行列部分に分解して、それぞれを専用のソルバを適用することにより効率的に解くことができる。

#### 4. 数値シミュレーション

フェアリング内に宇宙機が搭載されている場合とされていない場合のフェアリング内部の SPL の差であるフィルエフェクトについて調べるために、CFD による詳細な近傍場予測、FW-H によるフェアリング構造外部表面における音圧（遠方場）予測、及び、フェアリング構造を通じた音響透過とフェアリング内部音場予測を組み合わせたアプローチを適用する。

##### 4.1. フェアリングへの音響伝搬解析

音響近傍場（音源）モデルとしては、CFD により事前に数値解析された結果を用いる<sup>11)</sup>。この音源モデルは、傾斜のあるデフレクタに沿った排気ブルームの流れを囲んだ検査体積で表される。そして、この体積の表面を、FW-H 法によってフェアリング構造外部表面上の音響遠方場を予測するための入力（積分検査面）データとして用いる。

そして、積分検査面から約 30[m]離れたフェアリング構造外表面の音圧を予測するために FW-H 法を適用した。FW-H 法から直接得られた音圧の時系列データは、高速フーリエ変換(FFT)を利用して周波数データに変換する。この結果、フェアリング構造上の観測点において、図3に示すような SPL が得られた。図4は、参考のため、フェアリング構造外部表面の垂直な直線上の観測点列に沿ったオーバーオール SPL(OASPL)を示したものである。図4の横軸の左から右が、フェアリングの下端から上端にほぼ一直線に並べた観測点列を表しており、音源から離れるほど OASPL が下がっていく様子が理解できる。

##### 4.2. フェアリング構造モデルを用いた内部音響振動解析

次に、FW-H 法により計算された外部音場の予測値を用いて、フェアリングの内部音場を予測するために、ハイブリッド構造 FE-音響 WB アプローチを適用する。

ここで用いる簡易フェアリング構造は、図5(a)に示す。この構造の高さは約 6.36[m]、円筒分の内径が 2.5[m]、厚みは 29.6[mm]、材質はアルミ(A5052)である。今回は、一連のアプローチを組み合わせるフェアリング内部の音響環境まで予測できるかを検討する初期段階であるため、ハニカム・サンドイッチ構造や補強材等は考慮しない。そして、この構造を、29,097 個の線形アイソパラメトリック六面体

ソリッド要素と 25,600 個の節点から成る FE で離散化した。一方、フィルエフェクトについて調べるために、フェアリング内部の音響領域について、図5(b), (c), (d)に示すような3つのモデルを用意した。つまり、(1) 宇宙機のないモデル（モデル A : 図5(b)）、(2) 小さな剛な宇宙機が搭載されたモデル（モデル B : 図5(c)）、(3) 大きな剛な宇宙機が搭載されたモデル（モデル C : 図5(d)）である。モデル B と C においては、これら上下面が正方系の直方体形状である剛な宇宙機モデルの高さは同じ 3[m]であるが、正方形の一边の長さは、それぞれ、フェアリング体積に対する宇宙機の体積の比を 0.2 と 0.4 になるように決めた（図5参照）。フェアリング内部の音響領域は、モデル A の場合はすでに凸形状なのでこれ以上分割する必要はなく、モデル B と C に関しては図5(c)と(d)に示すように5つの凸部分領域に分割した。

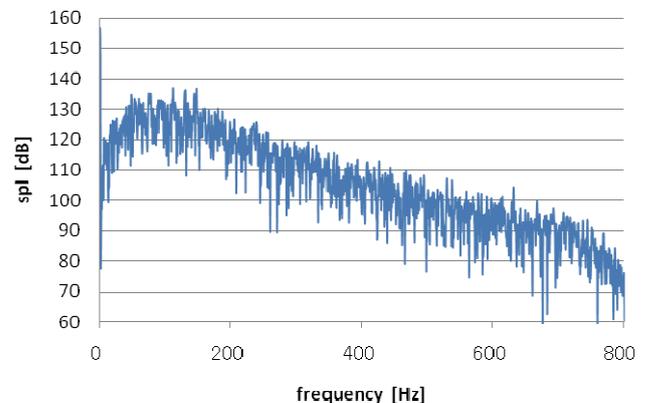


図3 フェアリング上のある観測点における SPL

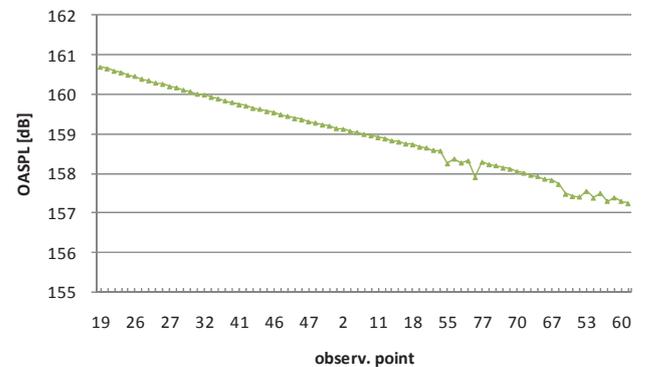


図4 フェアリング構造上の観測点における OASPL

これらの解析モデルを用いて、ハイブリッド FE-WB 法によりフェアリング構造と内部音響との連成解析を行った結果を図6と図7に示す。図6は、例として励振周波数 140[Hz]のときのフェアリング内部音圧場とフェアリング構造の変位場（変形図は分かりやすいように変位を拡大している）を示したものである。宇宙機のサイズによって、フェアリング構造の変形形状が大きく変わることが分かる。同時に、この周波数においては、宇宙機が搭載されていない空のフェアリング内の音圧よりも、宇宙機が搭載された場合のほうが局所的に音圧が上昇している様子が分かる。図7は、宇宙機とフェアリング構造に挟まれた空間における2つの観測点（図5(b), (c),(d)のそれぞれの部分領域 1

における上の赤点が観測点 1、下の赤点が観測点 2) における SPL を励振周波数に対してプロットしたものである。この例においては、励振周波数が低いほどフェアリングと衛星（剛）の表面との間の SPL に差が生じる、つまり、衛星表面とフェアリング構造間の SPL が上昇することが分かる。

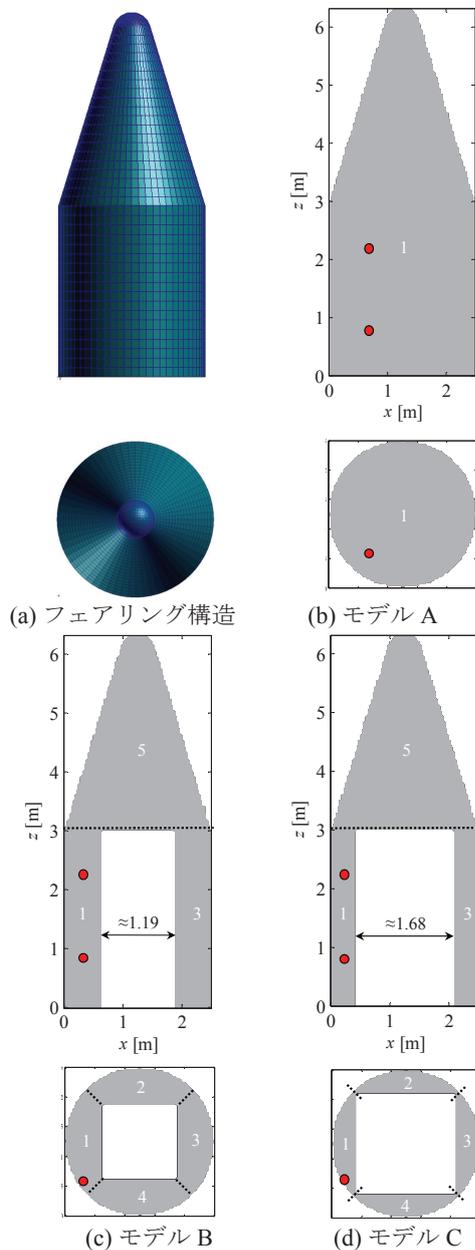


図 5 フェアリング構造と内部音響との連成解析を行うためのモデル

### 5. 結論

本論文では、音源解析、音響伝搬、及び、構造物を介した音響透過と構造物内部の音場の連成という一連の現象を予測するために、それぞれ、CFD、FW-H 法、及び、ハイブリッド構造 FE-音響 WB 法を組み合わせ、ロケット打ち上げ時の音響問題に適用した。このとき、フェアリング内部の音場予測には、簡易フェアリング構造の FE モデルと内部音響領域の WB モデルを組み合わせ、宇宙機が搭載されている場合とされていない場合のモデルをそれぞれ解

析し比較することにより、一連の解析手法を組み合わせることでフェアリング内部の音場まで予測可能であることを示した。

今後は、実機のフェアリング構造を詳細にモデル化するとともに、搭載宇宙機の弾性変形の影響も考慮した解析を行い、最終的に局所的な音圧上昇によって宇宙機構造が過度に振動することがあるのか、つまり、地上音響試験においてフィルエフェクトが考慮に値する現象なのかどうかを検査していく予定である。

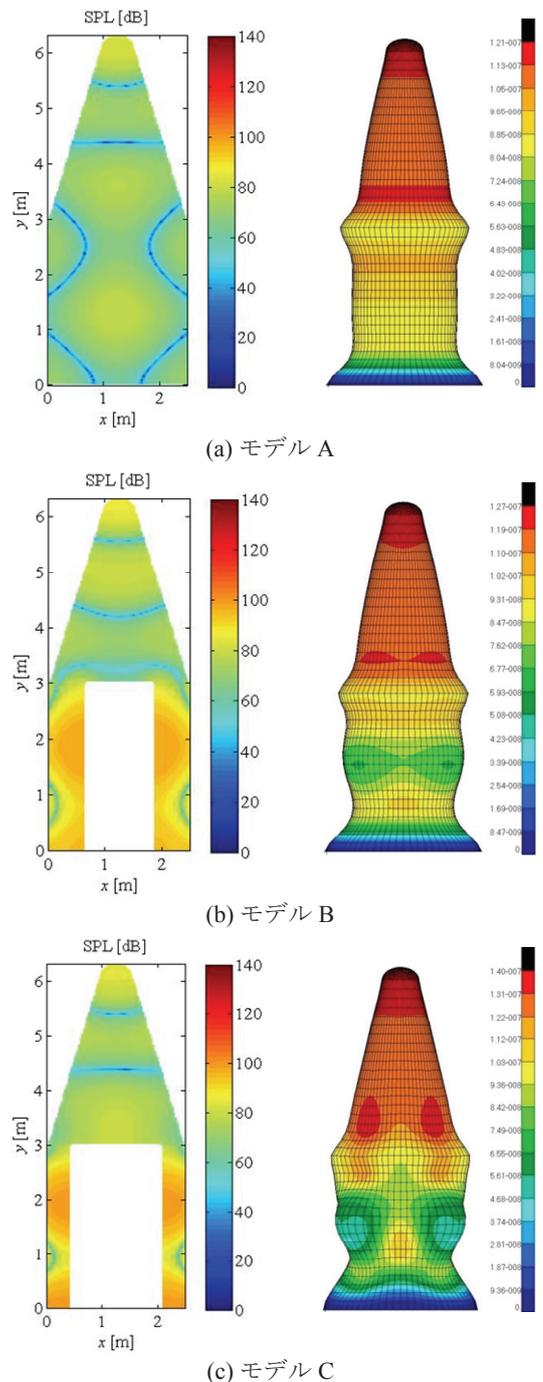


図 6 140[Hz]におけるフェアリング内 SPL (左) と構造変位場 (右)

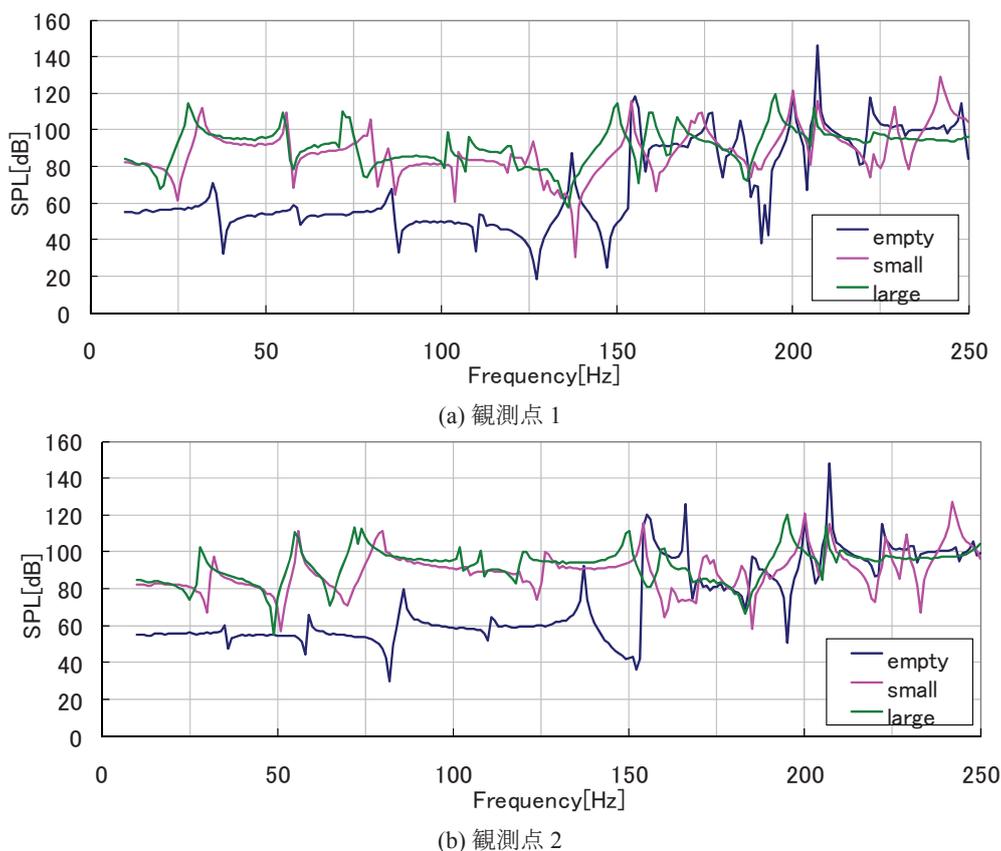


図7 搭載宇宙機の存在と大きさによる内部 SPL の違い

## 参考文献

- 1) Payload vibroacoustic test criteria, NASA-STD-7001, 1996.
- 2) Acoustic loads generated by the propulsion system, NASA SP8072, 1971.
- 3) Kitamura, K., Hashimoto, A., Murakami, K., Aoyama, T., and Nakamura, Y., "High resolution CFD/CAA hybrid analysis of supersonic jet interacting with walls", AIAA-2007-3871, 2007.
- 4) Tsutsumi, S., Takaki, R., Shima, E., Fujii, K., Arita, M., "Generation and propagation of pressure waves from H-IIA launch vehicle at lift-off", AIAA-2008-390, 2008.
- 5) Ffowcs Williams, J. E., and Hawkings, D. L., "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A264, 321-342, 1969.
- 6) Iwanaga, N., Hashimoto, A., Aoyama, T., Murakami, K., Tsutsumi, S., Fukuda, K., and Shima, E., "Rocket Acoustic Prediction Code Using FW-H/Kirchhoff Method", *6th Asia Workshop on Computational Fluid Dynamics (6AWCFD)*, Tokyo, Japan, 2010.
- 7) Desmet, W., *A wave based prediction technique for coupled vibro-acoustic analysis*, Ph.D thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 1998.
- 8) Vanmaele, C., et al., "An efficient wave based prediction techniques for plate bending vibrations", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (CMAME)*, 196 (33-34), 3178-3189, 2007.
- 9) Van Hal, B., et al., D., Hybrid finite element - wave based method for steady-state interior structural-acoustic problems, *Computers & Structures*, Vol. 83, 167-180 (2005).
- 10) Takahashi, T., Kaneda, H., Aoyama, T., Pluymers, B., and Desmet, W., "Sound transmission analysis using the hybrid finite element - wave based approach for coupled vibroacoustic problems", *ISMA2010*, Leuven, Belgium, 2010.
- 11) Tsutsumi, S., Fukuda, K., Takaki, R., Shima, E., Fujii, K. and Ui, K., "Numerical study on acoustic radiation for designing launch-pad of advanced solid rocket", AIAA-2008-5148, 2008.