

ロケット排煙溝に関する音響解析

村上桂一, 橋本敦, 北村圭一, 青山 剛史, 中村佳朗
JAXA, 名大院, 名大院, JAXA, 名大工

Acoustic Analysis of Rocket Frame Deflector

by

K. Murakami, A. Hashimoto, K. Kitamura, T. Aoyama and Y. Nakamura

ABSTRACT

This paper provides the results of numerical analysis on the sound radiation and frequency characteristics of a rocket frame deflector. In general, a deflector is built in a rocket launch pad (LP) in order to reduce the influences of exhaust plume on a rocket body. The rocket frame deflector is expected to be a low frequency sound source because of its large dimension. Since the low frequency sound wave is dangerous for rocket body at its natural frequency, it is necessary to make the frequency characteristics of deflector clear. The characteristic frequency analysis of a modeled rocket frame deflector is conducted using a FEM solver. It can be seen from the FEM analysis that the strong resonance occurs at low frequency in the modeled deflector. Three dimensional numerical analysis of sound radiation from deflector including rocket plume inflow is also conducted on a modeled LP using a hybrid code of an Euler flow solver and a Linearized Euler solver. From the sound radiation analysis, the characteristic sound wave from a modeled deflector has low frequency.

1. はじめに

ロケットの射場には、打上げ時の排気プルームの機体への影響を軽減するために、排煙溝（フレームデフレクタ）が設けられている。図1のように、ロケットが上昇していくときの主な音源として、（1）排気プルームそのもの、

（2）排煙溝に入らずに外に漏れたプルーム、（3）排煙溝を通して排出されるプルームが考えられる。（1）の音源から出た音は、ジェット騒音と同様にロケット後方に強い指向性を示し、それが、地面で反射してロケット軌道上へ伝播していくことが考えられる。（2）の音源から放射される音波は、地面を這うプルームの流量に依存すると考えるならば、ロケット上昇と共に強くなり、あるところでピークを向かえ、その後減少していくと考えられる。

（3）の音源では、出口から排気される噴流が音源になることと、排煙溝内部でプルームによる圧力波が開口端反射を繰り返し、特定の周波数の音が増幅されることが予測される。

プルームに起因する様々な音源から放射される音波によるロケットの音響加振は、大きく2つに分類できる。1つは、点火直後にノズル出口や排煙溝（フレームデフレクタ）出口から噴出するオーバープレッシャーによるものであり、もう1つは、打上げから数秒後に観測されるブロードバンドの音響振動である。後者は、ロケットがある程度上昇したときに最大になるとの報告¹⁾もあり、プルームと射場との様々な干渉など、射場に特有な原因が考えられる。しかし、その発生メカニズムは解明されておらず、特に、低周波音響振動の予測に問題がある。様々な低周波音源が考えられるが、そのうちの1つとして、その大きさ故に低周波音源に成り得る排煙溝に着目し、モデル化した排煙溝が有する周波数特性を数値計算によって調べた。本解析の目的は、排煙溝内で低周波音が共鳴して出口から放射されることを明らかにすることである。

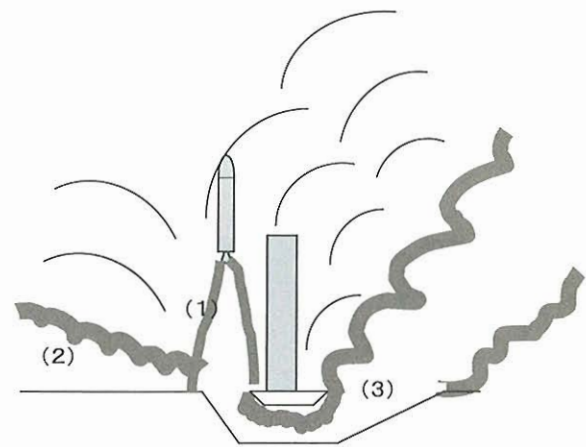


図1 ロケット排気プルームの模式図

2. 解法

2.1 解析対象のモデル化

周波数特性解析の対象である H-IIA 射場に設けられている排煙溝を図2のように簡易的にモデル化した。

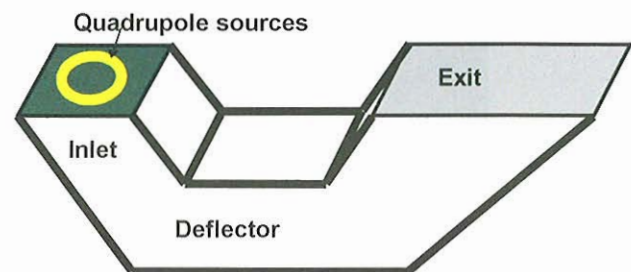


図2 簡易排煙溝モデル

2.2 周波数特性解析の手法

図2に示されるように、モデル化した排煙溝入口中央にプルームからの音の放射を模擬した4重極音源を円形状に配置したとき、排煙溝を通して出口から放射される音圧の解析に、FEMによる音響解析ソフト ACTRAN/LA (LA: Lighthill's analogy) を用いた。ACTRANの特徴は、速度ポテンシャル ϕ の時間変動部を周波数領域で解析することに

ある。内部領域の解析では反射境界条件を設定し、外部領域の解析では、近傍場に有限要素を、遠方場に Wilcox-Atkinson による無限要素を配置することによって音響解析を行う。

音響支配方程式は、連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

に、密度 ρ と速度ベクトル \mathbf{v} を平均値 (添え字 0) と音響変動 (添え字 a) に分解した式

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + \rho_a \\ \mathbf{v} &= \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_a \end{aligned} \quad (2)$$

を代入し、速度ポテンシャル ϕ_a を導入して整理すると次式のように得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\rho_0}{a_0^2} \frac{D\phi_a}{Dt} \right) + \nabla \cdot \left(\rho_0 \nabla \phi_a - \frac{\rho_0}{a_0^2} \frac{D\phi_a}{Dt} \mathbf{v}_0 \right) = 0 \quad (3)$$

ここで、式 (2) の音響場の密度変動 ρ_a は次式で表される。

$$\rho_a = -\frac{\rho_0}{a_0^2} \left(\frac{\partial \phi_a}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla \phi_a \right) = -\frac{\rho_0}{a_0^2} \frac{D\phi_a}{Dt} \quad (4)$$

前述のように、ACTRAN ではポテンシャル ϕ_a を次式

$$\phi_a(\mathbf{x}; t) = \tilde{\phi}_a(\mathbf{x}) e^{i\omega t} \quad (5)$$

のように変形し、時間変動部を周波数領域で解析する。

本解析に使用した計算領域の設定を図 3 に示す。排煙溝入口及び出口外側の外部領域に無限要素境界を設定した。排煙溝内壁面に完全反射条件を、出口面に開口端反射条件を設定している。

本解析に使用した計算格子を図 4 に示す。計算格子は、50Hz の音波を解析するのに十分な間隔で配置している。

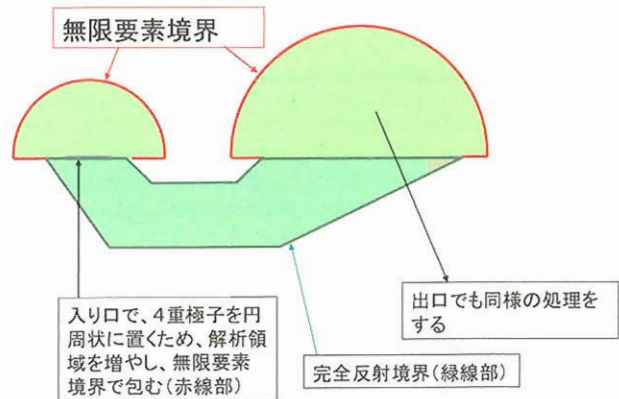


図 3 周波数特性解析の領域設定

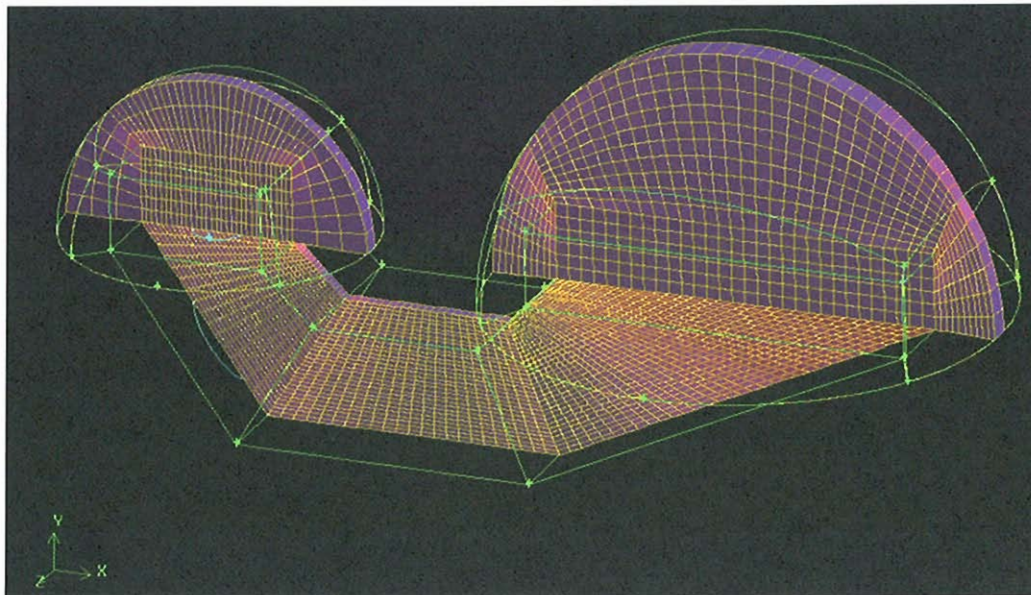


図 4 周波数特性解析用の計算格子

2. 3 モード解析の手法

解析対象が円管の場合には、特性周波数が解析的に求まる。この場合、モード次数 n 、音速 c 、円管の長さ L に対し、基本周波数を $f_1=c/4L=F[\text{Hz}]$ とすると、特性周波数 f_n は、入口を閉、出口を開とした場合、 $f_2=3F$, $f_3=5F$, ...、両端閉または開の場合、 $f_1=2F$, $f_2=4F$, $f_3=6F$, ... となる。しかし、本解析対象は、折れ曲がり矩形管であるので、モード解析にも ACTRAN を用いた。

2. 4 プルーム流れ解析の手法

前述の排煙溝モデルの周波数解析及びモード解析は、排煙構内に気流は無く、排煙溝モデルそのものが持つ周波数特性を明らかにすることが目的である。すなわち、音源がどうであれ、排煙構内で増幅される特性周波数を明らかにするための解析である。しかし、実際には排煙構内にロケットプルームによる気流があるので、その影響を評価するべくプルーム流れ解析を行った。その手法については、参考文献 2) と 3) に詳しいが、Euler/LEE ハイブリッド計算コードを用いており、解析は名古屋大学との共同研究で実施している。本論文で用いた解析コードは、空間の離散化に

MUSCL 法による最大 3 次精度のセル境界での物理量の内挿を用い、Roe の近似リーマン解法によって非粘性数値流束を計算する。また、時間積分には 3 段階 3 次精度の Runge-Kutta 法を用いる。解析コードの検証及び高精度化については参考文献 4) を参照されたい。

ブルーム流れ解析用の格子を図 5, 6 に示す。両図中の垂直な赤線は、Euler 領域と LEE 領域の境界を示す。排煙溝の外部領域にある灰色の直方体は、PST (Pad Service Tower) を単純形状でモデル化したものを示す。排煙溝入口面にジェットの流れ条件を設定し、ジェット領域以外の入口面は壁面と仮定した。計算格子は 20Hz の振動を捉えるのに十分な格子間隔を設定している。

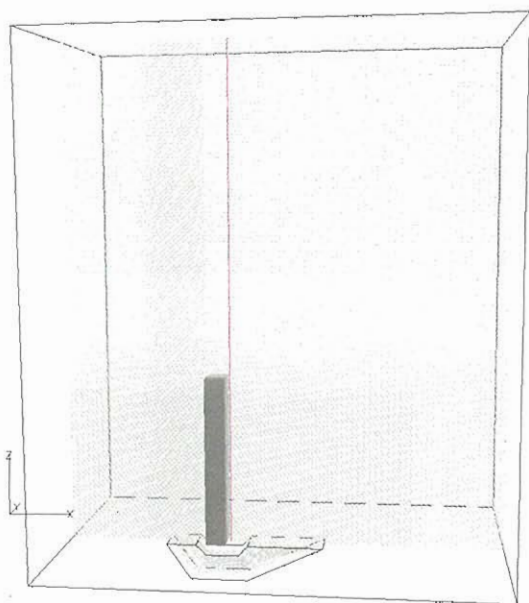


図 5 ブルーム流れ解析用格子 (全体図)

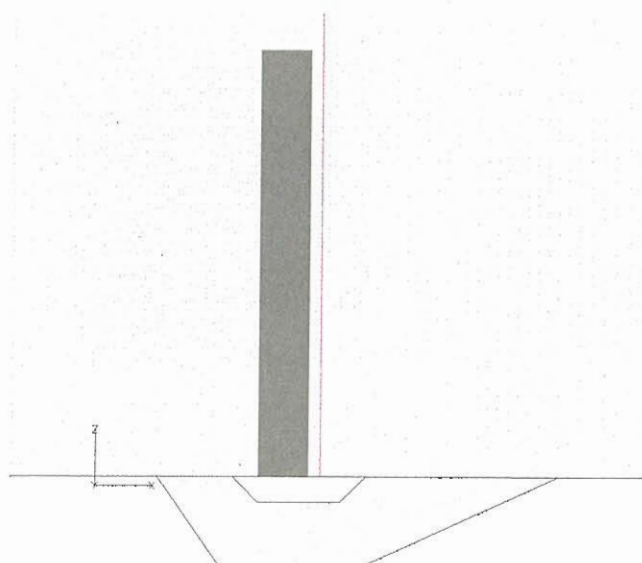


図 6 ブルーム流れ解析用格子 (排煙溝部の拡大図)

3. 結果および考察

3.1 周波数特性解析

音源の周波数を、5 から 50Hz まで 1Hz 刻みで入力して解析した結果を図 7 a) から c) に示す。図 7 a) は観測点の位置を示しており、出口に近いほうが観測点 0 である。図 7 b)

は本周波数特性解析の全解析結果を示している。図 7 c) は、入力音源 25Hz までの排煙溝出口中央 (観測点 0) での音圧を示しており、最初の特徴的なピークが 7Hz の入力に対して現れていることが分かる。図 8 に示される排煙構内の音圧分布図から、この排煙溝モデルは明らかに 7Hz の音に共鳴しており、この時に強い音が排煙溝出口から放出されることが示されている。ここで、

- ・極めて簡易的に音源を与えている
- ・ブルームによる流れ場の影響が考慮されていない

など、本解析では様々な仮定をしているが、少なくとも排煙溝から低周波の音が発生していることは分った。また、周波数が 1Hz 刻みなので、0.1Hz 刻みにすると、7Hz 付近に更に鋭いピークが現れる可能性もある。なお、図 7 の縦軸に示される SPL は、実際の打上げ時の音圧を再現しているものではないことに注意する必要がある。これは、本解析が排煙溝そのものの周波数特性を調べることが目的であるので、ブルーム音源の強さが不明なこともあり、入力音源の強さを適当に設定しているからである。

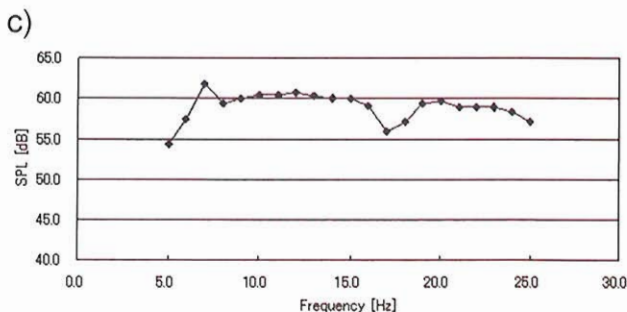
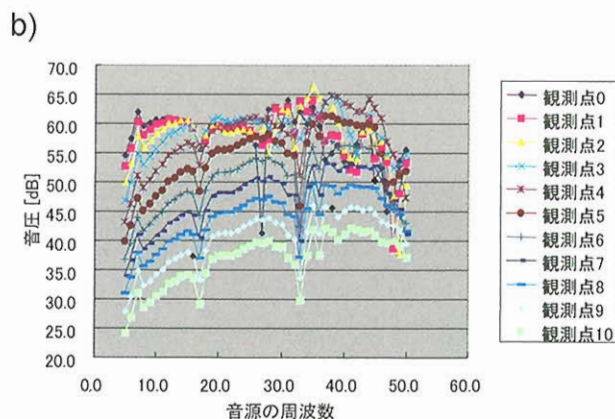
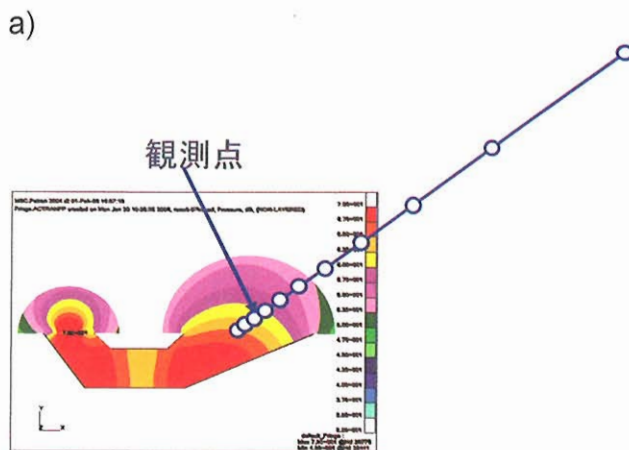


図 7 観測点での音圧 : a) 観測点位置、b) 全観測点での音圧、c) 出口中央 (観測点 0) での音圧

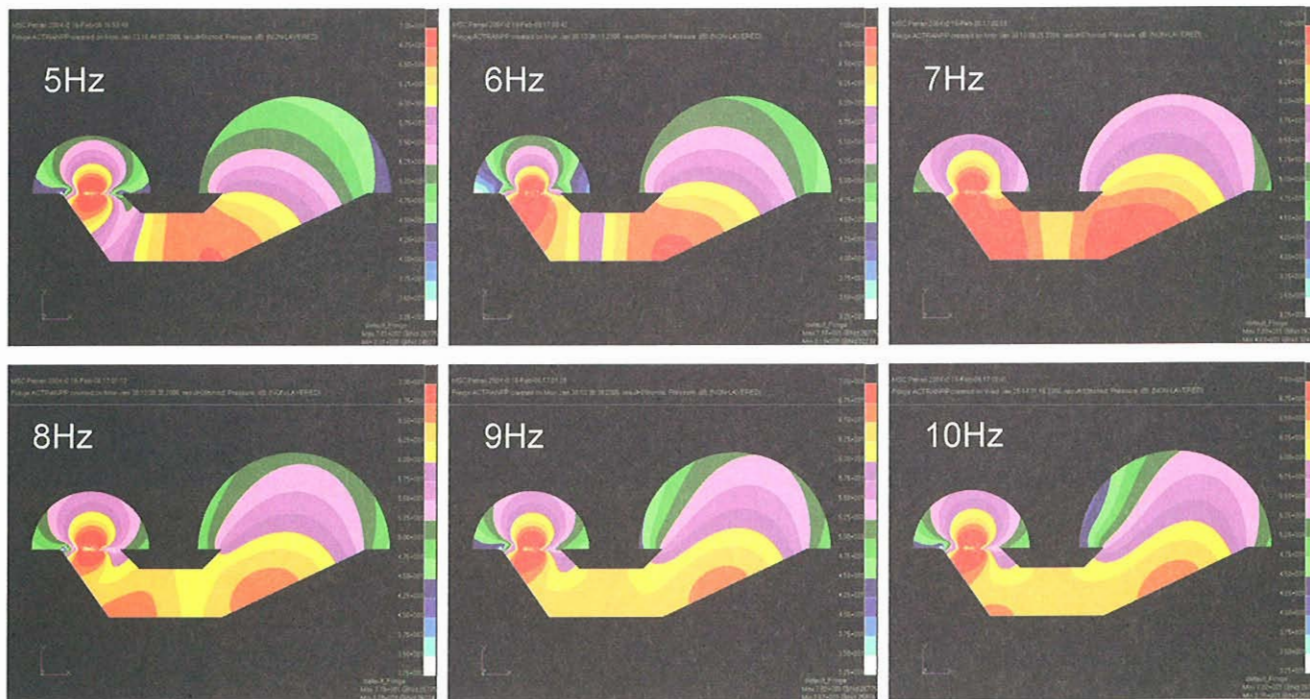


図8 排煙構内の音圧分布

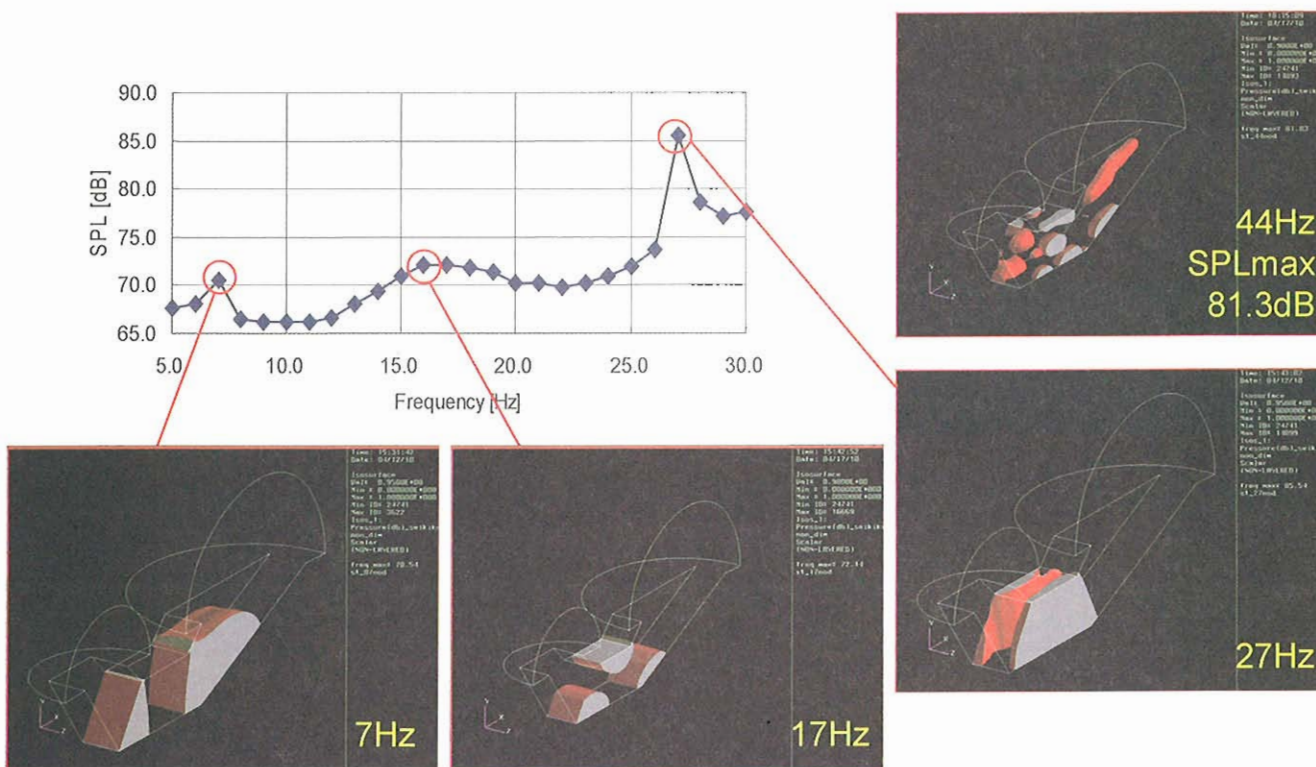


図9 排煙構内の音圧の最大値及び最大値で規格化された等音圧面

図9には、各音源周波数に対し、排煙構内音圧の最大値をプロットしたグラフと、その特徴的な周波数での等音圧面の図を示す。等音圧面は、最大値で規格化した値が0.95となる面を赤色面で表しており、この面で囲まれた領域で音圧が高いことを示す。図9内の各図を比較すると、音源周波数が高くなるにつれて、多次元の共鳴モードが励起されていくことが分かる。すなわち、7 Hzでは排煙溝の長手

方向の1次元モード、17 Hzでは、水平方向に分割された2次元モード、27 Hzでは、垂直方向に分割された2次元モードが見られる。参考までに示した44 Hzの図では更に複雑な高次モードが排煙溝中央部に見られる。これらの図から、低次モードほど排煙溝出口近くまで到達していることがわかる。

3. 2 モード解析

本ロケット排煙溝モデルのモード解析の結果を表1に示す。1次モードの周波数は、排煙溝の両端を開とした場合、3.34Hz、入口を閉、出口を開とした場合、2.25Hzとなり、本解析で用いた排煙溝モデルはかなり低い周波数特性を有しているといえる。排煙溝の長手方向の長さ、最小値（上面に沿う場合）と最大値（下面に沿う場合）があり、第2次モードはこの最大値に、第3次モードは最小値に関係している可能性がある。前述の周波数特性解析では5Hz以上の音源に対してのみ解析を行ったので、1次モードに対応する周波数の音源を入力した周波数特性解析と比較すると、興味深い結果が得られると思われる。

表1 モード解析結果一覧

端面の条件	モード周波数 [Hz]		
	1次	2次	3次
両端開	3.34	6.21	8.90
入口を閉、 出口を開	2.25	6.56	10.02

3. 3 プルーム流れ解析

排煙溝入口に H-IIA ロケットのメインエンジンである LE-7A の排気プルームを模擬したジェットを流入条件として計算した。ただし、流体は全て比熱比 1.4 の完全気体と仮定した。時間刻み幅 Δt は全領域で一定とし、 $\Delta t = 8.82 \times 10^{-5}$ 秒（音速で無次元化した無次元時間 0.03 に相当）に設定した。計算結果から得られた圧力分布を図10に示す。図10には、排煙溝出口から放射されるオーバープレッシャーに続く圧力波が見られる。PSTの高さが約68mなので、出口から波面先頭まで圧力の高い赤い層が4つ見えるとすると、波長17mの圧力波が排煙溝出口から放射されていることになる。すなわち、音速を340m/sとすると、約20Hzの低周波圧力波が見られる。

図5と6に赤線で示される位置に Euler 計算領域と LEE 計算領域の境界を設けてハイブリッド計算を実行した結果から、ロケット打上げ軌道上空120mの所に設定した観測点での圧力変動履歴を、図11に示す。図11の縦軸は観測点での圧力から大気圧を引いた値を表しており、横軸は計算開始からの実時間を表している。図11に見られる初期の大きな圧力変動は、排煙溝から放出されるダクトオーバープレッシャーである。この影響は1.5秒まで続いている。ダクトオーバープレッシャーは過渡的な現象なので、排煙溝の周波数特性を表しているとはいえない。そこで、その影響を排し、2秒から8秒までの圧力変動履歴をFFT解析することによって、モデル化した排煙溝の周波数特性を調べた。その結果を図12に示す。図12から、特徴的な周波数として、0.5Hz、2Hz、7Hzを読み取ることができる。更に3Hz、9Hzにも小さなピークがみられる。これらは、本解析で使用した排煙溝モデルの特性周波数と考えられる。特に2Hzはモード解析の結果にも見られる。また、7Hzは周波数解析の結果にも見られた特性周波数であり、モード解析の結果得られた2次モードの周波数に近い。

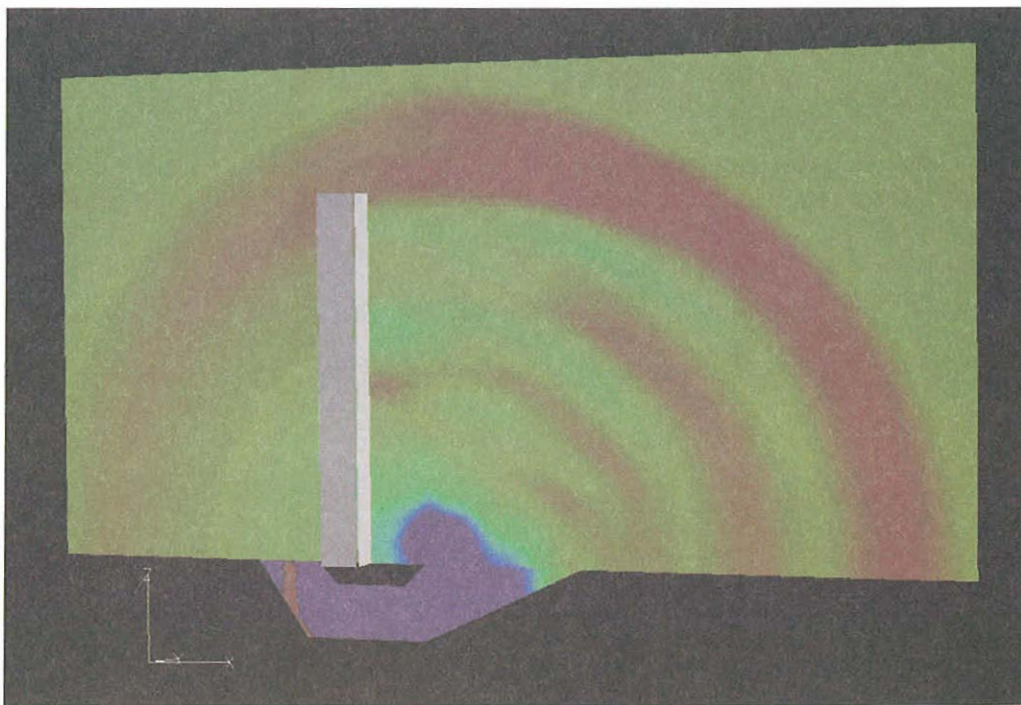


図10 プルームを考慮した Euler 計算の圧力波

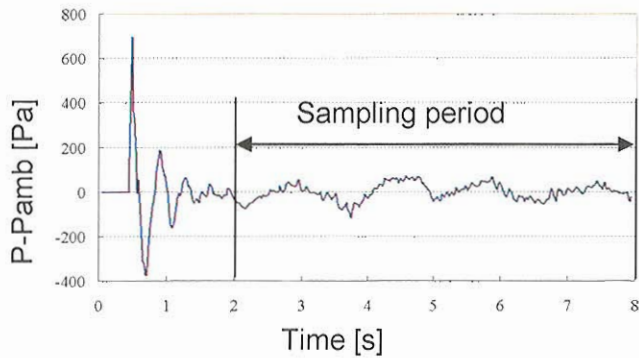


図 1.1 圧力変動履歴

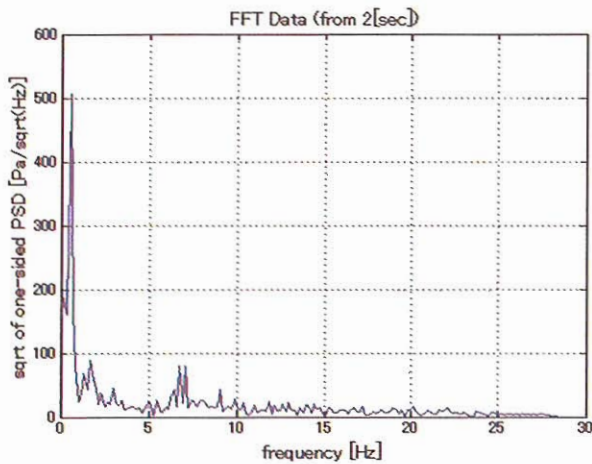


図 1.2 圧力変動履歴の FFT 解析結果

4. まとめ

H-IIA 射場に設けられている排煙溝をモデル化し、FEM を用いた周波数特性解析やモード解析、及び Euler/LEE ハイブリッドコードを用いたプルーム流れ解析を実施した結果、排煙溝簡易モデル内で低周波共鳴現象が起きることが分かった。

今後の課題として、プルーム流れ解析の高度化が挙げられる。実際の H-IIA ロケットの排気プルームは、メインエンジンである液体ロケットエンジンの既燃ガスとアルミナ粒子を含む固体ロケットブースターの既燃ガスから成るので、これらを考慮した解析をどのように行うかを検討する必要がある。また、打上げ時に排気プルームに対して散水することによる音響低減効果が知られており、これに対する解析手法の構築も課題である。

参考文献

- 1) G. Dumnov, D. Mel'nikov and V. Komarov, Acoustics Loads on Rockets During Launching, AIAA Paper 2000-3742, 2000.
- 2) I. Men'shov and Y. Nakamura, "Implementation of the Variational Riemann Problem Solution for Calculation of Propagation of Sound Waves in Nonuniform Flow Fields," Journal of Computational Physics, 182, pp.118-148, 2002.
- 3) T. Saito, T. Nakamura, M. Kaneko, I. Men'shov and Y. Nakamura, Numerical Investigation of SRB Ignition Overpressure, AIAA Paper 2004-2342, 2004.
- 4) 北村圭一, 橋本敦, 村上桂一, 青山剛史, 中村佳朗, Euler/LEE ハイブリッド法による超音速ジェットの影響解析, ANSS2006, 2006.