

ロケット打上げ時の衛星音響振動に関する研究

Research Activities on Vibro-acoustics of Satellites during Rocket Launch

総合技術研究本部 計算科学研究グループ

Institute of Aerospace Technology Computational Science Research Group

非定常流セクション 村上桂一、稲田喜信、青山剛史

Unsteady Flow Section Keiichi MURAKAMI, Yoshinobu INADA and Takashi AOYAMA

数理モデルセクション 高橋孝、相曾秀昭

Mathematical Modeling Section Takashi TAKAHASHI and Hideaki AISO

## Abstract

A study to establish a prediction method for vibro-acoustics of satellites during rocket launch has been conducted using a multidisciplinary analysis method of fluid, acoustic, and vibration. This coupling method consists of following four elements: numerical analyses of (1) sound generation, (2) sound propagation, (3) sound permeation, and (4) vibro-acoustics of payload. In the sound generation analysis, it can be seen from FEM analysis of a simply modeled deflector that a strong resonance occurs at low frequency. From the sound propagation analysis using a hybrid code of an Euler flow solver and a Linearized Euler solver, the characteristic sound wave from the modeled deflector has low frequency. For the sound penetration analysis, a static analysis using a FEM solver is conducted to simulate the deformation of a modeled faring by acoustic pressure. A simply model of a satellite's primary structure with some stiffeners is constructed for solving eigen value problem and for analyzing transient response by the FEM solver. From these analyses, low modes of stiffener vibration are excited.

## 1. はじめに

H-IIA ロケット 204 形態及び H-II B ロケットなど、SRB (固体ロケットブースター) の増加及びメインエンジンのクラスター化に伴うロケット打上げ時の音響環境悪化が懸念されており、日本の射場やロケット形態にも適用可能な搭載衛星の音響振動に関する予測方法を確立することが重要である。そこで、国際的にもまだ例のないロケットフェアリング及び衛星の流体・音響・振動連成解析を行う事を目的とし、得られた結果から音響振動の低減策を提案できることを究極の目標とした研究が望まれている。このような背景の中、総合技術研究本部計算科学研究グループでは、以前から音響解析に関する世界の研究動向を調査しており、JAXA (宇宙航空研究開発機構) において求められる音響解析研究の方向性を踏まえ、「ロケットペイロードの音響振動」をターゲットと定めて研究計画を策定し、平成17年10月の組織改編後、本格的に本研究を始動した。当グループでは、今期 JAXA 中期計画中に、本研究に必要な要素技術の確立を目指した研究を推進している。具体的には、ロケットペイロードの音響振動に関する解析を以下の4段階に分けて考えている。「1. 音源解析」：プルームに起因する音源の解析、「2. 伝播解析」：反射や回折を含む音響の伝播特性の解析、「3. 透過解析」：フェアリングを透過する音波の解析、「4. 振動解析」：フェアリング内に伝わった音波がロケットペイロードに及ぼす影響の解析。最終的には全段階で数値シミュレーションのポテンシャルを十分に活用することで、「1.」から「4.」までを一括する「ロケットペイロード音響振動統合解析コード」を次期中期計画で確立することを目指している。本稿では、平成17年度に行った本研究の主な内容及びその成果を報告する。

## 2. 研究の概要

前述の各解析段階に対し、平成17年度は主に以下の項目について研究を行った。

### (1) 音源解析：低周波音源に成り得る煙道の周波数特性についての検討

様々な音源の中で、特に低周波音源に着目すると、排気プルームと大きな構造物との干渉が考えられる。ロケットの射場には、打上げ時の排気プルームが機体に及ぼす影響を軽減するために、煙道が設けられているが、プルームによる圧力波が煙道内で開口端反射を繰返し、煙道の大きさに依存する特定の低周波音が増幅されることが予測される。そこで、種子島宇宙センター大型ロケット発射場H-IIA射座に設けられているフレームデフレクタを含む煙道を極めて簡単にモデル化し、本解析の対象とした。モデル化した煙道の入口面内に、排気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、煙道を通して出口から放射される音圧を、FEM（有限要素法）による音響解析ソフトウェアACTRANを用いて解析した。本研究項目の解析目的は、煙道そのものが持つ周波数特性を調べる事である。

### (2) 伝播解析：煙道から放射される圧力波の伝播解析

ロケット打上げ時には、複数の音源から出た音が、射場周囲の地形やPST（射点整備塔）などの射場建造物による反射や回折を経て、ロケット軌道上に到達し、干渉する。これらの影響を考慮した音響伝播解析のために、前述の音源解析手法の高度化と合わせて、煙道内のプルーム流れの影響を考慮可能なEuler/LEE（線形オイラー方程式）ハイブリッド計算コードを用いた音響解析を、名古屋大学への共同研究として実施した。本解析コードは、空間をMUSCL法（保存則に対する単調風上法）による最大3次精度で離散化し、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<sup>[1]</sup>。本解析コードを用いて、研究項目(1)でモデル化した煙道入口に、境界条件としてLE-7Aの排気プルームを模擬したジェットを与えた場合の計算を実施した。計算領域は、ロケット打上げ軌道上空200mまでとした。

### (3) 透過解析：音響透過解析手法についての検討

ロケット打上げ時には、数1000Hzに及ぶ広い周波数帯域を有する音響負荷がフェアリングを透過して衛星に加わる。この音響負荷は、固有振動数が数100Hzと高い衛星搭載機器や軽量で大面積の二次構造（太陽電池パドル、アンテナ等）などに影響を与える可能性がある<sup>[2]</sup>。この物理現象の評価手法を検討するために、簡易フェアリングFEMモデルを作成し、初期段階の解析としてこれに音圧を模擬した静荷重をかけた場合の解析を実施して、外圧によるフェアリング内壁の変位量評価手法を検討した。本解析には構造解析ソフトウェアNASTRANを用いている。

### (4) 振動解析：簡易衛星構造モデルの静荷重解析及び過渡応答解析

従来、衛星の音響振動に関する解析には、統計的エネルギー解析(SEA)などが計算速度の速さなどの長所を利用して適用されてきた<sup>[3]</sup>。ただし、SEAはあくまで統計的に高周波帯域の大局的な応答レベルを把握するものであり、搭載機器配置などの局所的な影響を検討することは難しく、モード密度の低い低周波においては精度が劣る。一方、FEMは高周波帯域における解析精度が問題となる<sup>[4]</sup>ものの、100Hz程度以下の低周波における構造解析では、FEMが現時点で殆ど唯一の解析手法として用いられている。特に重要な搭載機器の固有振動数を含む少なくとも数100Hz程度までの帯域に対応し、かつ二次構造や機器レベルの局所的な応答に関してより詳細な解析を行うためには、決定論的なFEMを採用する必要がある。また、FEMにはフェアリング内・外部の音場との連成を考慮する場合に拡張性がある。本研究では、従来行われていない衛星全体に関する詳細な音響構造解析を実施することを目指し、衛星モデル構築、構造振動解析に関するFEM解析の有効性の検討を行った。平成17年度は、初期の衛星振動解析の対象として、3t級静止衛星の外壁などの主構造と内部スティフナ（補強材）から構成される簡易衛星構造FEMモデルを構築した。そして、本簡易衛星構造モデルの妥当性や共振現象等の確認を行うために、固有値解析や外部表面圧力を入力とした過渡応答解析を、NASTRANを用いて実施した。

### 3. 成果の概要

#### (1) 音源解析：低周波音源に成り得る煙道の周波数特性についての検討

モデル化した煙道を Fig. 1 に示す。5Hz から 25Hz までの音源周波数に対する煙道出中央での音圧のグラフを Fig. 2 に示す。Fig. 2 から 5Hz 以上の周波数で特徴的な音圧のピークが 7Hz の入力に対して最初に現れていることが分かる。このことは煙道内部の音圧分布にも現れており、Fig. 3 に示されるように 7Hz の音に共鳴して強い音が放出されている。従って、本解析では様々な仮定やモデル化がなされているものの、H-II A ロケット射座に設けられている煙道から低周波音が発生している事が確認できた。

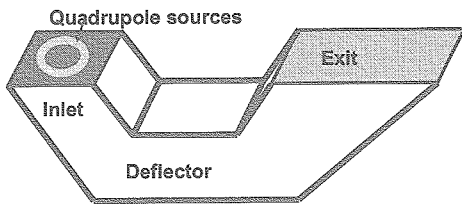


Fig. 1 Modeled deflector

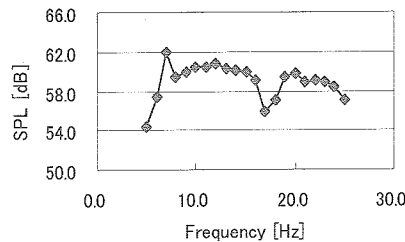


Fig. 2 Sound pressure level at the center of exit

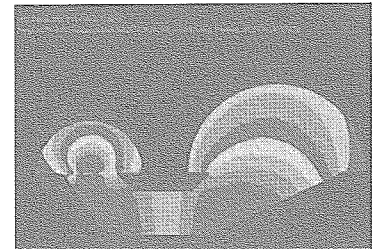


Fig. 3 Sound pressure contours of 7Hz sound source

#### (2) 伝播解析：煙道から放射される圧力波の伝播解析

本研究項目の解析対象領域を Fig. 4 に、その計算結果から得られた圧力分布を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から、高さ 68m の PST に対して圧力の高い領域が 4 層続くと見ると、音速 340m/s としたとき、約 20Hz の低周波圧力波が見られる。本解析は今年度も継続実施しており、噴射開始から 8 秒超までの圧力変動履歴に対する FFT (高速フーリエ変換) 解析の結果にも数 Hz の低周波成分が現れていることを、ANSS (航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム) 2006 にて発表している<sup>[5]</sup>。

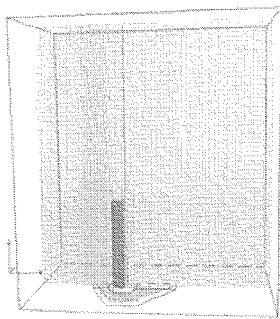


Fig. 4 Calculation domain

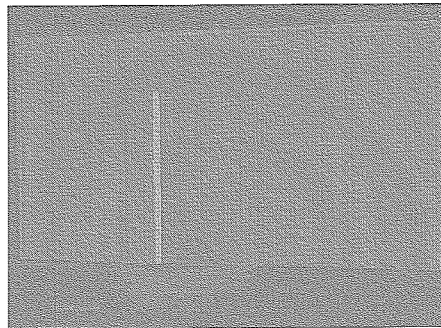


Fig. 5 Pressure contour of modeled deflector flow calculation

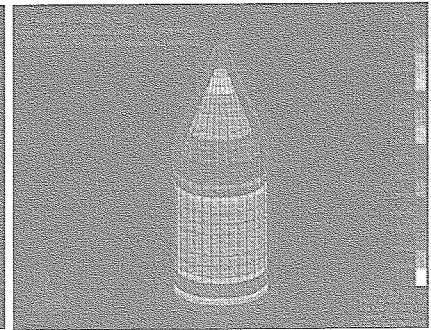


Fig. 6 Static structural analysis of modeled faring

#### (3) 透過解析：音響透過解析手法についての検討

Fig. 6 は簡易フェアリングモデルに対する静荷重解析の結果を示しており、線画はフェアリングモデルの初期形状を、着色面は強調された変位後の形状とミーゼス応力分布を表わしている。本研究項目で検討した既存 FEM ソフトウェアによる静荷重解析は、今後の応答解析や自作ソフトを含む他の手法による解析との比較に用いる。

#### (4) 振動解析：簡易衛星構造モデルの静荷重解析及び過渡応答解析

Fig. 7 に示す簡易衛星構造 FEM モデルに対し、表面圧力を入力とする静構造解析を実施した。また、同モデルに対する固有値解析では、Fig. 8 に示すように、簡易モデルの低次モードとして主構造全体よりもスティフナの局所的な揺れが顕著に現れた。また、スティフナを入れることにより剛性が大きくなることも確認できた。更に、実際には場所ごとに異なる入射音波を簡易的に模擬して、衛星の壁面ごとに異なる表面圧力 (60~100Pa) を、±5Pa の振幅の正弦波 (100Hz) として入力した過渡応答解析を実施した。Fig. 9 は、その結果として最大主応力を表示したものである<sup>[6]</sup>。

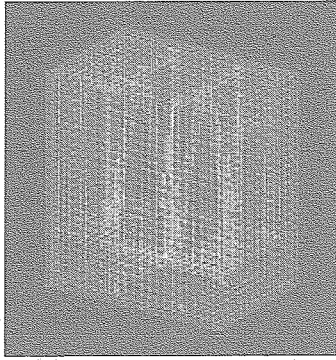


Fig. 7 Simplified model of satellite primary structure with stiffener

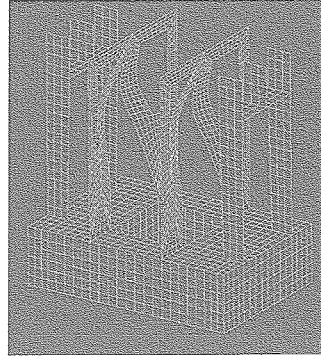


Fig.8 First mode

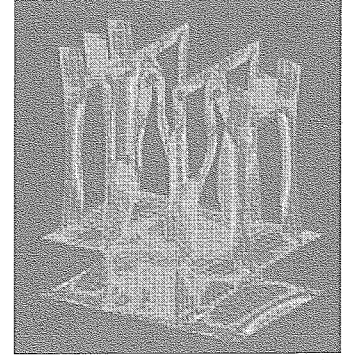


Fig.9 Displacement and maximum principal stress contour

#### 4. まとめ

平成 17 年度に得られた成果に対する自己評価をすると、本研究を本格的始動した初年度にも拘らず、H-IIA 射場の煙道から低周波音が放射されることを確認したり、音響・構造連成解析のための基礎技術が検討できたりと有意義な成果が得られたと思われる。

今後の課題は、「1. はじめに」で述べた「ロケットペイロード音響振動統合解析コード」を構築する目標に対し、4 つの要素技術それぞれの解析手法を高度化することである。「(1) 音源解析」では、地面で反射してロケットに到達する音波の音源として考えられているロケットの排気プルームそのものや、煙道入口から溢れたプルームなど、他の主要な音源の評価方法或いはモデル化が課題である。

「(2) 伝播解析」では、本研究の解析対象領域が広く、多くの格子点を配置した詳細メッシュによる計算は JAXA のスーパーコンピュータを駆使すれば可能ではあるが実用的ではないので、音響伝播手法を更に高次精度化し、ある程度の格子点数でも音波の減衰が少ない計算手法の確立が必要である。「(3) 透過解析」では、流体音響伝播と固体内弾性波伝播を連成して解析する手法を構築し、高度化することが課題である。「(4) 振動解析」では、太陽電池パドルなどの 2 次構造等のモデル化とそれに対する既存の FEM 解析が次の課題として挙げられ、更に、将来的に実施予定の流体（音響）・構造振動連成解析で予測される膨大な計算負荷の増加や予測精度の低減を克服できるように、効率的な決定論的手法についての検討も必要である。

#### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] Sarafin, and Larson, *Spacecraft Structures and Mechanisms – From Concept to Launch*, Kluwer Academic, 1995.
- [3] 吉田, 小泉: 音響加振下における多層ハニカムパネルの振動応答, *機論 C*, Vol.58, No.545, pp.25-29, 1992.
- [4] W.Desmet, Mid-frequency vibro-acoustic modelling: challenges and potential solutions, *Proc. of ISMA 2002*, Vol.II, pp.835-862.
- [5] 村上桂一ほか: ロケット排煙溝に関する音響解析, ANSS2006 論文集, 2006.
- [6] 高橋孝ほか: 音響によるロケットペイロードの構造振動に関する研究, ANSS2006 論文集, 2006.