

「そら」の技術を身近に感じて

そらとそら



# 空と宙

2009 JUL/AUG  
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577



次期固体ロケット

## 研究開発

人工衛星に快適な空の旅を  
— 燃焼試験編 —

人工衛星に快適な空の旅を  
— 数値解析編 —

## 設備紹介

マイクロホンアレイ

## 横路散歩

音の伝わり

## 空宙情報

ジェット飛行実験機導入

No. **31**

研究開発本部  
Aerospace Research and Development Directorate

## 人工衛星に快適な空の旅を— 燃焼試験編 —

## 次期固体ロケットの必要性

2006年9月、JAXAの前身機関のひとつである宇宙科学研究所が開発した固体ロケット「M-V(ミュー・ファイブ)」が最後の打上げを行い、その歴史に幕を閉じました。

M-Vは世界最大級、最高性能の多段式大型固体ロケットとして、天文観測衛星や惑星探査機を宇宙へ送り出してきました。一方、高頻度の成果創出、先行技術の実証、人材育成を目的とした、低コストで機動性の高い小型衛星ミッションが注目され、これに対応するための高頻度小型打上げシステムが求められています。

そこで、M-Vまでの半世紀で培われた技術を継承しつつ、固体ロケットの特徴を最大限活かした簡素な打上げシステムへ発展させ、小型衛星ミッションへ対応することを目的とした、「次期固体ロケット(図1)」の研究開発を進めています。



図1 次期固体ロケットのイメージ

## 射点設計のために

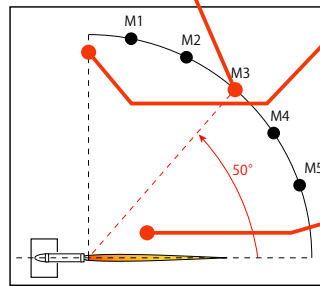
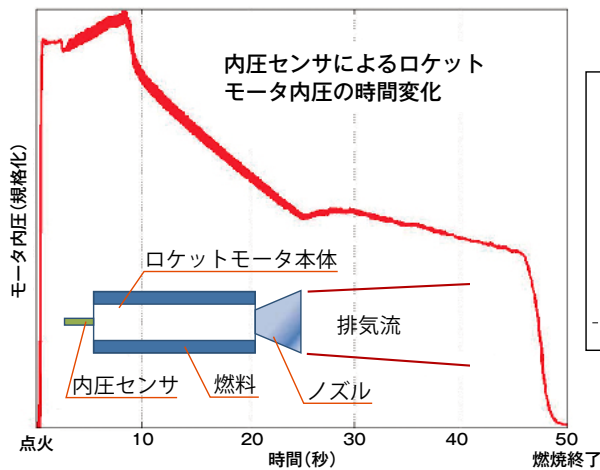
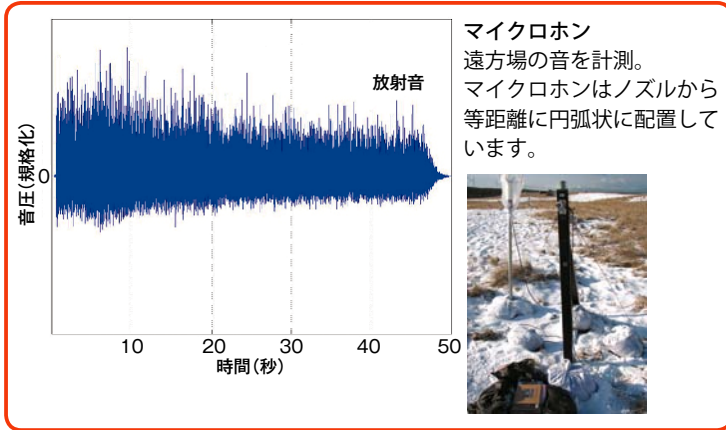
次期固体ロケットの射場を整備するにあたり考慮すべき要素のひとつに、打上げ時の轟音が空气中を伝播してフェアリングまで達することで、中に格納された人工衛星などの搭載物を振動させてしまう「音響振動」の問題があります。打上げ時に発生する音は、ロケットが設置され実際に打ち上がる場である射点の形状に大きく依存します。そのため、射点の形状を適切に設計することで音響振動を低減できると考えられます。射点は、試験や打上げ経験をもとに設計し、ロケットと射点の縮小モデルによる燃焼試験を行うことで、その妥当性を検証してきました。現在は、気流の状態や音の広がりなどを求める解析手法である「数値流体力学(CFD)」による解析が高性能化しており、射点設計ツールとしての適用可能性も高まってきています。

## 検証データ取得試験

CFDが効果的な射点設計ツールになり得るかどうかの判断には、試験で得られたデータとの比較検証が欠かせません。そこで、2007年から2008年にかけて、検証に必要なデータの取得などを目的に固体ロケットモータ<sup>\*1</sup>の燃焼試験を行いました。

供試体には、規模の異なる3種類の固体ロケットモータ(NAL-735、M-24、KM-V1)を使用しました。燃焼試験はロケットモータを横倒しにした状態で実施し、デフレクタに反射する前のジェット(フリージェット)から発生する音の伝わる様子を調べるため、「遠方場の音」の計測を中心に「近接場の音」や「音の発生源」についても計測しました(図2)。その他にも、気流や温度など、音の伝わりと関係する項目についても計測しています。取得したデータは分析後、半経験的モデルの改良やCFD解析の検証(P.04

## 次期固体ロケット射点設計のための音響計測



マイクロホンアレイ(P.06参照)  
音の出所を計測。  
試験ごとに最適なものを製作しています。



ロケットを横倒しにし、ジェットの方先に干渉物のない「フリージェット」の状態で行いました。<sup>※2</sup>  
※2 M-24に関しては、ジェットの方向を変更するデフレクタが設置されている状態で試験を行いました。

図2 燃焼試験で得られた音響計測結果の一例(供試体: NAL-735)

供試体
NAL-735
M-24(M-V 2段目)
KM-V1(M-Vキックモーター)

参照)に使い、射点設計ツールの確立に役立てます。

今回の試験では、固体ロケットモータの性能評価のためのデータなど、ロケット開発のために必要な種々の基礎データも計測しています。今後も、射点設計のための基礎データの取得および固体ロケットモータ技術の維持・向上のためのデータの取得を

的に、定期的に試験を行う計画です。

※1 ロケットモータ: 固体ロケットの推進機関のこと。自動車や液体ロケットではエンジンと呼ばれている部分。



【M-24燃焼試験メンバー】

研究開発本部 ジェットエンジン技術センターの研究員が音響班の中心メンバーとして試験に参加しています。

## 人工衛星に快適な空の旅を—数値解析編—

## 固体ロケットが発する音を数値解析で求める

JAXAには数値シミュレーションなどの計算工学技術を専門に扱う「情報・計算工学センター（JEDIセンター）」という組織があります。JEDIセンターでは、JAXAが中心となって進める宇宙航空プロジェクトに計算工学を活用し、事業の効率化や宇宙機の信頼性向上を図っています。

2ページで紹介している次期固体ロケットの打上げ射点の設計でも、数値シミュレーションの使用を考えています。図1は、数値シミュレーションの解析手法のひとつであるCFDを使って求めた、ロケットのジェットから発生する音（音圧）の様子です。CFDを使うと、音も含めた気流の様子を詳細に得ることができます。しかし、複雑な気流状態を解析する場合、時間がかかりすぎてしまいプロジェクトで使用するには現実的ではありません。そのため、実際の射点設計では、気流の動きが激しい空間のみCFDで解析し、さらに外側の空間の流れは静止している、或いは一様であると仮定して音の伝播のみ求

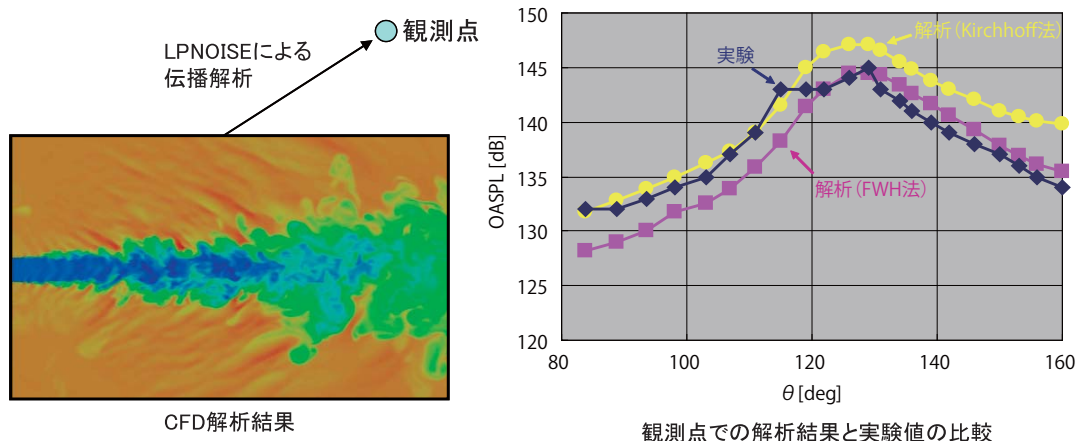
める手法を用いています。

この手法はヘリコプタの騒音解析の研究などで実績のある手法です。プロジェクトでも利用できる新しい解析手法を開発するのは、研究開発本部 数値解析グループの仕事です。

## フェアリング内の音の様子を捉えるための一歩

ジェットから直接、または射点で反射して空気中を伝播したロケットの轟音は、人工衛星が格納されているフェアリングまで達し、中の衛星を振動させます。この現象を低減するためには、伝播してきた音がフェアリングをどの様に透過し、どの様に衛星を振動させるのかを知ることが重要です。そこで、それを調べるための解析ツールの開発を以前より進めています（『空と宙』20号参照）。

現在は、3次元で音響透過を解析するツールを開発し、フェアリングを簡略化したドーム形状の構造物に平面状の規則的な音が透過する際のシミュレーションを行っています（図2）。実際のフェアリングに比べ、現時点ではまだ壁に厚みがありますが、伝



観測点を含む全空間をCFDで解析する手法に対し、ある面上（例えば、ジェットを覆う円筒面など）のCFD解析結果を利用して、より外側の部分は音だけを求める解析ツール（LPNOISE:数値解析グループにて開発中）を使うことで、効率的に現実的な解析を行うことができます。各手法で得られた値をいくつかの観測点で比較することで、LPNOISEの精度を検証できます。また、実験結果とも比較検証を行い、射点設計に使えるかを検証しています。

図1 ロケットジェットにより発生する音の解析結果と実験値との比較



播してきた音がドーム内へ透過する様子や、その音によってドームが振れることで発生した音が外部に伝播する様子が良く捉えられています。

## 音の透過実験

数値解析による音響振動の予測精度を高めるためには、コンピュータに計算を行わせるためのプログラムである「解析コード」の検証が不可欠です。そこで、板に平面音波が入射した時に音がどれだけ透過するかを調べる試験を名古屋大学との共同研究の中で行い、解析結果と比較しました。

図3に試験および解析の結果を示します。構造物はそれぞれが振動しやすい周波数（固有振動数）を持っており、その周波数の音は透過損失\*が低くなります。実験はもちろん、解析でもこの様子が捉えられているのが分かります。

人工衛星が音によって加振されるのを低減するため、フェアリングの内側には吸音材が貼られています。

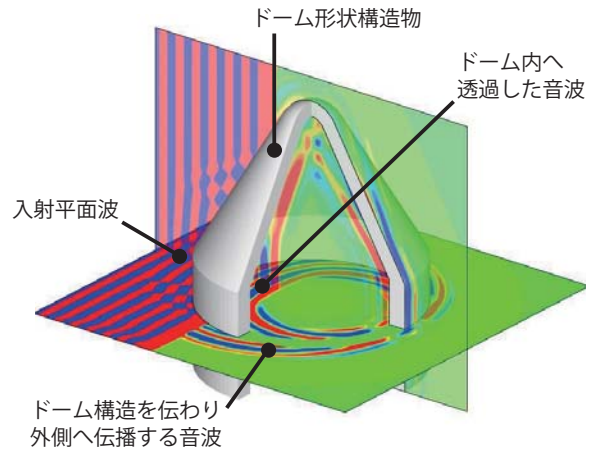


図2 フェアリングを模擬したドームに対する音の伝わり方

す。この吸音材の評価を解析に反映するため、今年度は吸音材を貼り付けた板を供試体とした試験を行う予定です。

\* 透過損失：入射する音と透過する音の強さの比。値が大きいほど損失も大きい（遮音性が高い）ことを表す。

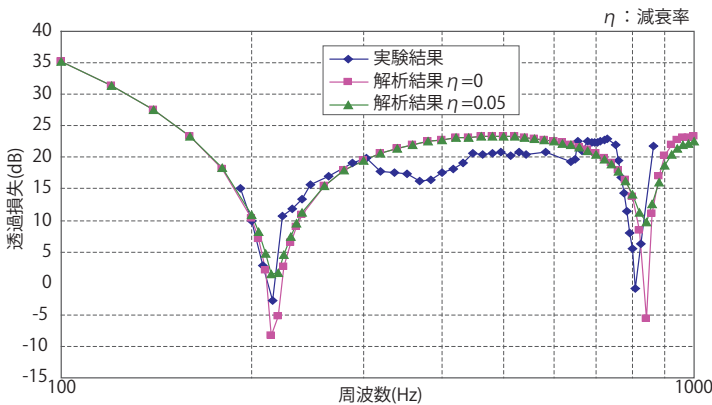
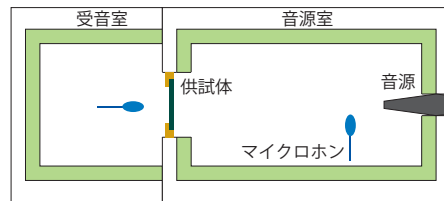
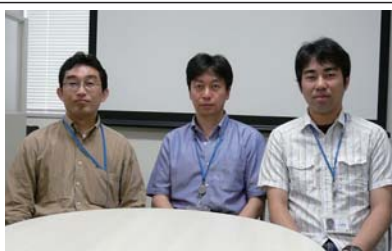


図3 解析と実験結果との透過損失比較



### 実験装置

音を発する「音源室」と音が透過する側の「受信室」があり、その間に供試体（今回はアルミの板）を固定します。供試体の前後で音を計測し、音がどれだけ透過したかを調べます。音源室および受信室内は壁などで音が反射して干渉しあわないよう吸音材が施されています。



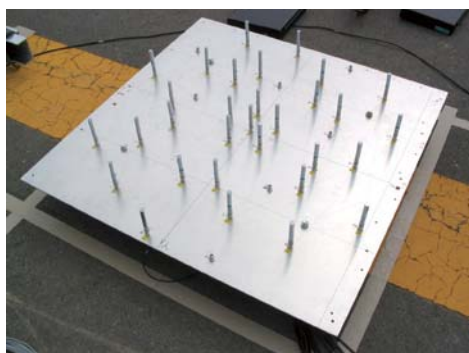
【数値解析グループ】

(左より) 青山 剛史、村上 桂一、橋本 敦

## 設備紹介

## マイクロホンアレイ

「マイクロホンアレイ」は多数のマイクロホンを二次元配置させた構造をしています（図1）。音源から発せられた信号（音）が各マイクロホンに到達するときに生じる位相差などの空間情報を用いて、信号処理を行う事で対象とする周波数の音源が存在するかを調べます。



多数のマイクロホンを配置した構造をしています。

図1 マイクロホンアレイ

マイクロホンアレイは、マイクロホンの数や配置パターンにより性能が大きく変わるため、精度の高い計測を行うためには供試体に対して適切な配置を行う必要があります。これを「マイクロホンアレイの最適設計」と呼んでいます。

JAXAで行うマイクロホンアレイを使った音響計測（音源探査）試験では、各試験で使用する供試体が発する周波数帯に合わせて、40から80個のマイクロホンを低サイドローブ\*のマイクロホンアレイとなるように、事前にシミュレーションを行い、最適な配置を決めています。

一連の試験を通して、音源探査試験技術の向上を図ることで、より効率的に航空機・宇宙機の騒音低減の研究を進めています（図2）。

※ サイドローブ：目的方向以外の音が強調されること。



図2 マイクロホンアレイを使った騒音低減のための音源探査試験

## 音の伝わり

音は物質が振動することで発生します。例えば、手を叩くことでその場所の空気の圧力を大気圧に対して変化させたとします。すると、その圧力差(音圧)を元に戻そうと空気は振動し、この振動が波となって空気中を伝わっていき私たちの耳に届くことで音として認識されます(図1)。音は空気以外にも、様々な物質中を伝わります。そのため、ロケットの打上げの際に燃焼流(ジェット)から出た音が空気中を伝播してフェアリングに伝わり、その中でも伝播して収納されている人工衛星まで振動させるという現象が起きます(P.04参照)。

音の伝わる速さは物質の硬さ(弾性率)や重さ(密度)によって異なります。地上近くの空気中では約340m/sです。速度は温度によっても変化します。通常、温度が高いほど速くなるため、地上より気温が低く密度の小さい高度10000m(大型旅客機の巡航高度)での音の速さは300m/s程度になります。

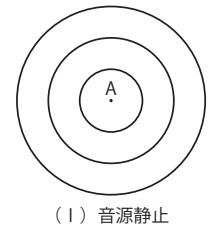
では、音の速さ(音速)を超えて移

動するとどうなるのでしょうか？

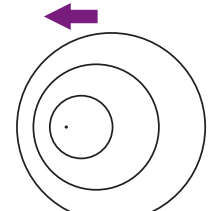
音がある点Aで発生したとします(図2)。Aが止まっている時、音は周りの空間に均一に伝わっていきます(I)。もし、音源がある速度で動いていると、音の伝わり方は変化します(II)。音源が音速を超えて、つまり“超音速で”移動すると、発生した音は音源の進む方向より前方には伝わりません。後方であってもマッハコーンと呼ばれる円錐の部分内に留まります(III)\*。この時、Aの前方には「衝撃波」と呼ばれる高圧力の空気の壁が発生しています。この衝撃波が地上に届くと、「ドンッ」という大きな衝撃音(ソニックブーム)となります。流れが音速を超えて吹き出す場合、例えばロケットノズルからジェットが吹き出す場合などにもジェット騒音と呼ばれる衝撃音が発生します。

衝撃音を伴う流れは、宇宙航空の分野では必ず出てくる代表的なものです。JAXAでは静粛超音速機の研究なども行っており、ソニックブームなどの衝撃音を解析できる手法の確立なども目指して超音速流れに関する研究を進めています。

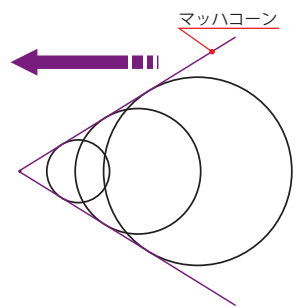
\* 音源は移動しているため、実際にはマッハコーン内に入った時点で音が聞こえてきます。



(I) 音源静止



(II) 音源移動



(III) 音源超音速で移動

図2 超音速の音

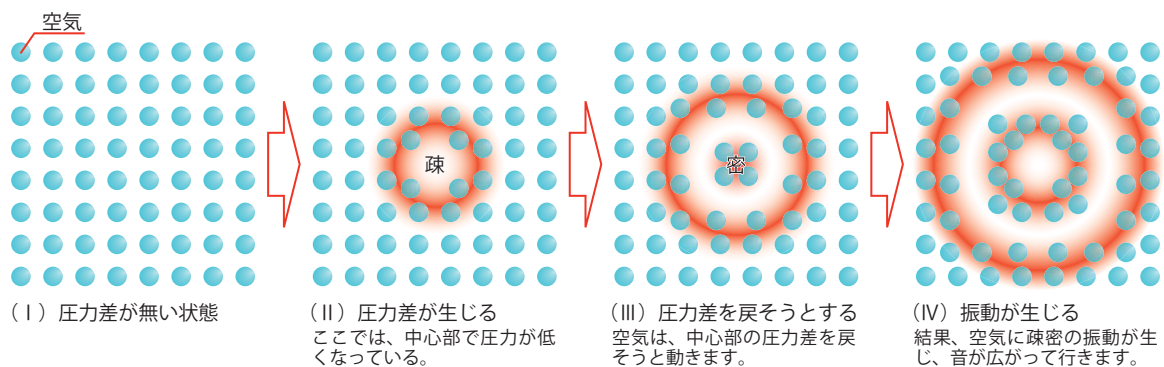


図1 音の広がり。圧力が低い(空気が薄い)「疎」の部分と、圧力が高い(空気が濃い)「密」の部分が交互に生じ、振動することで音が伝わって行きます。



# 空 宙 情 報

## ジェット飛行実験機導入

航空技術の研究開発では、航空機システム、要素技術を問わず、設計、製作、地上での機能・性能試験を行った後、飛行試験による実飛行環境での機能・性能検証、すなわち「飛行実証」を行います。世界的に見ても、航空技術は飛行実証を経て初めて実用性のある技術として認められています。そのため、飛行実証の意義は大きいのですが、実証に必要な航空機は規模が大きく、また搭載する特殊な計測装置などの開発に高度な専門技術が必要であるため、民間企業などが簡単に導入できるものではありません。そこで、公的航空技術研究機関の責務として、JAXA 研究開発本部の飛行技術研究センターにおいて飛行実証用の航空機を保有・運用するとともに、飛行シミュレータや北海道の大樹航空宇宙実験場も活用し、機構内外の飛行実証ニーズに対応しています。現在、飛行実証用の航空機として、プロペラ機2機とヘリコプタ1機を運用しています。

このような中、近年の航空輸送はジェット機が主流であり、それに対応してジェット機の運用領域である高速・高空域における飛行実証が特に要望されていますが、JAXA 現有のプロペラ機とヘリコプタではこのような領域の飛行はできないため、内外のニーズに十分に対応しきれない状況です。そこで、これを可能とする「ジェット飛行実験機（ジェットFTB：Flying Test Bed）」の開発・運用が、機構内外から望まれてきました。なお、現在の民間航空機市場において大きなシェアを有するアメリカ、ヨーロッパ、カナダの公的研究機関では、いずれもジェットFTBを有しており\*、自国の航空技術の発展および航空産業の育成に貢献しています。

このような背景から、JAXAは、諸外国に伍する飛行実証環境を確保し、我が国の航空技術が世界規模で実用化することに資するため、新たに中型ビジネスジェット機を母機としたジェットFTBを導入することとしました。

ジェットFTBの導入により、JAXAにはジェット機、プロペラ機、ヘリコプタという異なる特性を持った3種類の飛行実証用航空機が揃うことになり、機構内外の幅広い飛行実証ニーズへの対応が可能となります。このジェットFTBを活用し、JAXAは我が国航空技術の発展への一層の貢献を目指します。

(飛行技術研究センター 柳原 正明)

\*アメリカ航空宇宙局（NASA）では、更に高速の超音速領域での実証能力を持つ機体も有しています。

### 導入母機

セスナ サイテーション ソブリン  
(正式名称 セスナ式680型)

### 導入時期

今後約2年間で母機の製造とFTBへの改造を行い、2011年度初頭に飛行開始

### 導入後の活用先

- ・型式証明のための飛行試験技術など、国産旅客機開発に関連する基盤技術の確立
- ・超音速機や次世代運航システムなど、JAXA先進航空技術研究に関連する飛行実証
- ・電子機器など、新規開発の航空機搭載機器の飛行実証
- ・人工衛星との同期観測など、宇宙プロジェクト支援 他



図 セスナ サイテーション ソブリン（セスナ式680型）