

## A12 詳細有限要素モデルによるペイロードフェアリングの騒音解析

丸山 新一 (JAXA), 堤 誠司 (JAXA), 高木 亮治 (JAXA), 寺島 啓太 (JAXA)

Shinichi Maruyama(JAXA), Seiji Tsutsumi(JAXA), Ryoji Takaki(JAXA), Keita Terashima (JAXA)

### 1. はじめに

打ち上げ時のロケットは、エンジンが原因となった高いレベルの圧力変動にさらされる。ペイロードフェアリング内部の騒音のピークは比較的低い周波数域に存在し、低周波騒音の低減は衛星と制御機器を守る上で重要な課題である。

ロケットのフェアリングのような軸対称に近い構造物では、リングモードの固有振動数とコインシデンス限界周波数の近傍で遮音特性が悪化することが知られている<sup>(1)</sup>。板材では、前者の周波数が後者よりも低い周波数域にあり、フェアリングの低周波騒音のピークはリングモードに起因すると考えられている<sup>(2)</sup>。しかし、ロケットの振動騒音の検討においては、実機を用いた実験の機会が少ないこと、特に実験時のデータが少ないことから、詳細な要因分析は出来ていない。騒音の原因と考えられているリングモードは、フェアリング全体の固有モードからすると100次以上の高次のモードであり、実験によるモード分離が事実上不可能であることも要因の分析を困難にしている。

こうした状況のなかで、打ち上げ時のフェアリング内部騒音を数値解析のみで予測することを目標に、CFDと有限要素法による構造音響解析を組み合わせた予測手法を検討している。フェアリング内部の音圧レベルは130dB程度であり、構造音響の部分は線形計算でも実用的には十分な精度が確保できると考えて、一般的な有限要素法ソフトウェアの線形解析機能を利用している。構造音響の計算はCFDによる外部圧力変動の計算に比べて計算量は少ないが、部品点数が多いこともあり詳細なモデルによりリング周波数までの計算結果を示した報告は見当たらない。

ここでは、ペイロードフェアリングの構造音響部分に絞り、簡易的なモデルと詳細なモデルで計算した騒音特性の比較結果と、数値解析のみで低周波の内部騒音を予測する方法の課題について述べる。

### 2. 騒音の発生要因と伝達経路

打ち上げ時の音圧は、リフトオフ直後と遷音速飛行時のレベルが高い。主たる騒音源は、①エンジンの振動、②燃焼ガスによってロケット周辺に生じた圧力変動、③流れによる圧力変動である。リフトオフ直後は①と②、遷音速飛行時は全ての騒音源があると推定されるが、その内訳は明確ではない。流れに起因する騒音源は、渦によるものと、密度変化によるものがある。低マッハ数の流れでは、渦による圧力変動は実効値のレベルから予想されるよりも内部騒音になり難いことが報告されているが<sup>(3)</sup>、より高速の流れについては分析が進んでいない。ロケットにかかる荷重の性質は内部騒音のレベルに大きな影響を持っていると推定されるため、CFDで検討すべき課題の一つとなっている。実機の試験に利用される残響室でフェアリングにかかる荷重は、表面におけるレベルの分布、各荷重間の相関が打ち上げ時とは明らかに異なるため内部騒音の予測の計算には適さない。

騒音源と衛星までの主要な伝達経路を図1に示す。騒音の伝達経路は、音響的な経路と構造の振動として構造物を振動させる経路に分類することができる。いずれの騒音源も、一旦機体の振動となって衛星を振動させる。最終的には、PAFを介して伝播する経路と内部の音響を介して伝播する経路の2種類に集約される。ここでは、フェアリングの外壁にかかる圧力変動に対して発生する低周波騒音を検討対

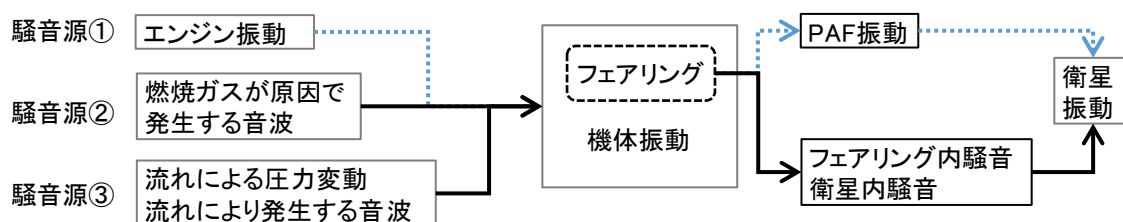


図1. 主要な伝達経路

象とした。前述のように荷重の性質が把握できていないので、評価関数は単位入力に対する音圧の感度を選択した。

PAFを介して伝播する成分の検討は報告が少なく、フェアリング内部の音響を介して伝播する成分との割合は明確になっていない。PAFと衛星の結合点の振動データを使って式(1)より寄与を予測する方法も用いられているが、加速度に対する音圧の周波数応答関数は計算以外で求めることが難しく、この経路の検討は今後の課題と考えている。

$$|a_o(\omega)|^2 = \left| \sum_{i=1}^n H_i(\omega) a_i(\omega) \right|^2 \quad (1)$$

上式において、 $a_o(\omega)$ は衛星上の振動評価点の加速度、 $a_i(\omega)$ はPAFと衛星の結合点の加速度、 $H_i(\omega)$ は加速度に対する音圧の周波数応答関数、 $\omega$ は角振動数、 $n$ は結合点の数と自由度の積である。 $H_i(\omega)$ は*i*方向以外の自由度を拘束した状態で求める必要があり、実験による計測は困難である。

### 3. 詳細フェアリングのモデルの計算結果

#### 3.1 有限要素モデルの作成

図2にモデル全体と分離機構部の詳細を示す。今回解析したのは最大直径5mのペイロードフェアリングである。

構造、音響とも原則としてソリッド要素を用いて分割しており、構造部分の要素の寸法は20~30mm程度、音響部分は80mm程度とした。分離機構を最低限の忠実度で要素分割するため、通常、シェル要素でモデル化されるハニカムサンドイッチパネルにもソリッド要素を適用した。要素分割は主要な構造のみを対象としており、衛星、配管、吸音材などは省略している。ただし、ハニカムサンドイッチパネルを結合しているボルト、および、分離ボルトは全てモデル化した。ベントホールは単純に外気に開放するモデル化とした。

#### 3.2 内部音圧に対する音響感度の計算結果

図3にフェアリング下端から約3.4mの位置に単位入力を与えたときの軸上の音圧の周波数応答関数を示す。左の図は分離機構などを全て省略した軸対称の簡易モデルの結果を示している。計算には市販のソフト<sup>4)</sup>を利用し、500Hzまでの音響感度をモーダル周波数応答により求めている。構造と音響とも、750Hzまでの固有値を利用しており、構造に関しては剰余剛性を考慮している。計算結果より、詳細モデルの音響感度は簡易モデルとよく似た傾向となっていることが分かる。

図4に寄与分析により求めた音に対して寄与の高い固有モードのモード形の一例を示す。簡易モデルの場合、一見してリングモードであることが見て取れる。一方、詳細モデルでは高次の曲げモードと見える複雑なモード形となっており、500Hzまでの固有モードを確認しても、一見してリングモードと分かるモードは存在しない。なお、簡易モデルの周波数が低いのは、簡易モデルが非構造質量要素を使っ

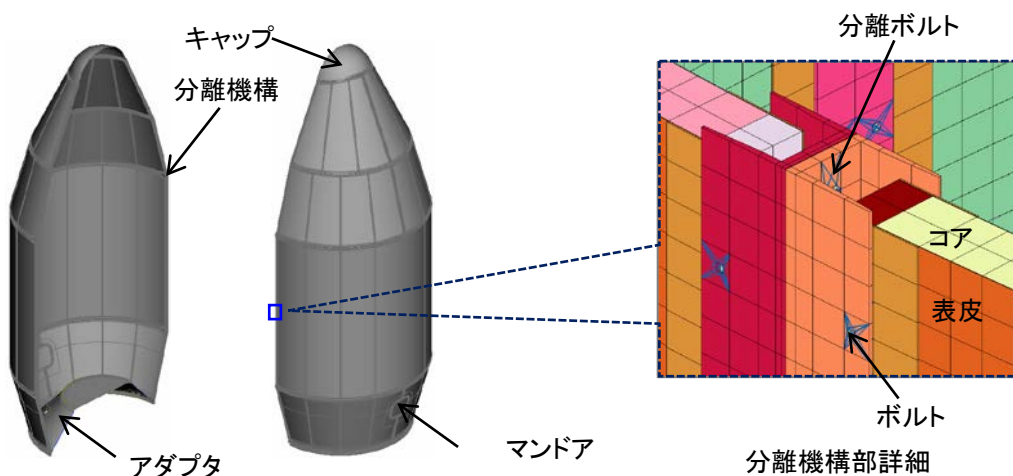


図2. ペイロードフェアリング詳細有限要素モデル

て総質量を合わせているのに対して、詳細モデルは要素分割した部分の質量のみで計算していることが一因である。

リングモードのモード形が変化する要因の分析はできていないが、軸対称でない部材の影響が大きいことは分かっている。図5は最大直径4mのフェアリングの簡易的なモデルについて、分離機構およびコーン部と円筒部を結合する部材を梁要素として組み込んだときの結果を示している。結果より、フェアリングの軸方向に組み込まれている分離機構相当の梁要素が、リングモードのモード形に与える影響が大きいことが分かる。簡易モデルであっても、梁要素を追加したことによる変化は顕著であり、一見してリングモードと分かる固有モードは存在しない。音に対して寄与の高いモードを探索すると、モード形の一部にリングモードの特徴が認められた。簡易モデル、詳細モデルともモードアニメーションを見てリングモードを探すことは容易ではない。

軸対称でない部品がモード形に与える影響の予想は難しく、モード形を正確に予測するためには詳細なモデルとして組み込むこと以外の方法がないと考えている。また、モード形から音になるモードか否かを判定するのは困難であり、リングモードが内部騒音の主要な要因であるという過去の知見を実機に適用する際は注意が必要である。

なお、ここで示した音になるモードは、通常の振動解析では高次モードとして扱われる領域の固有モ

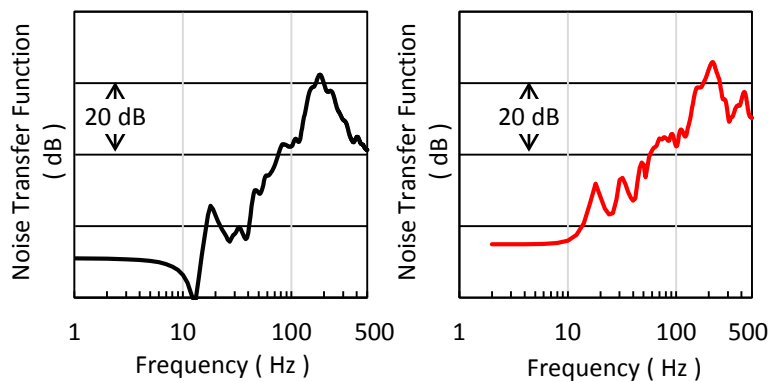


図3. 音響感度の計算結果  
(左：簡易モデル，右：詳細モデル)

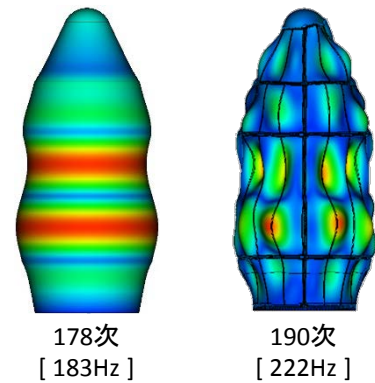


図4. 音に対して寄与の高いモード  
(左：簡易モデル，右：詳細モデル)

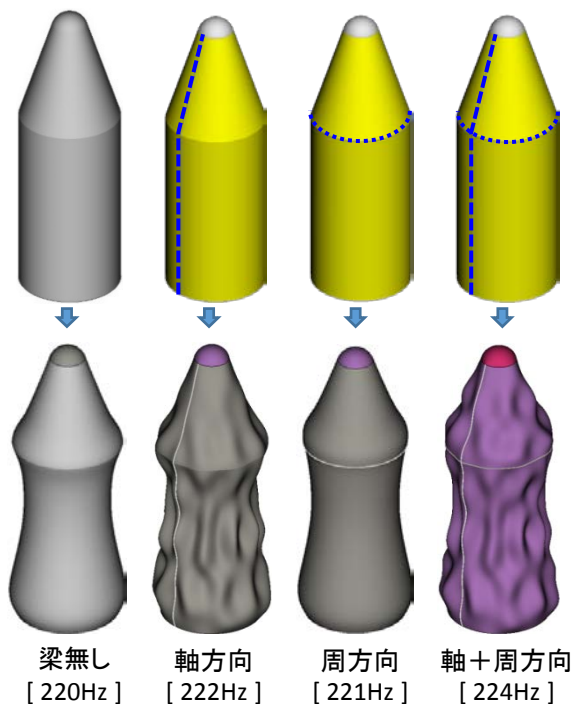


図5. 梁要素の位置によるリングモードの変化

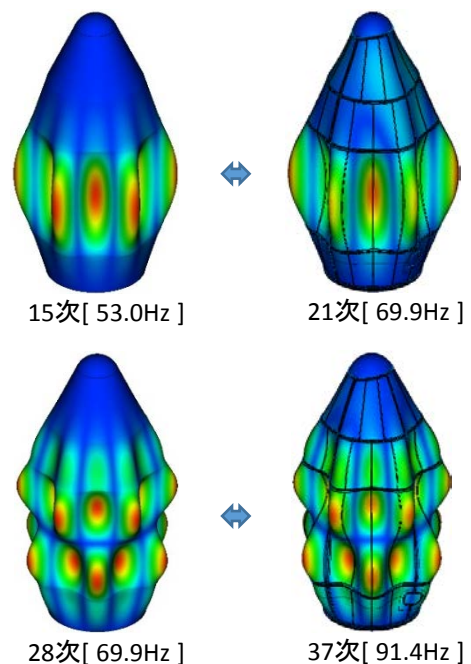


図6. 低次モードのモード形の比較  
(左：簡易モデル，右：詳細モデル)

ードであり、詳細なモデル化によって全ての固有モードのモード形が大きく変化するわけではない。50次程度までの比較的低次の固有モード（図6）で比較すると、似通ったモード形を持つ固有モードが存在することが確認できている。図6に示した結果の固有振動数の差が大きいのは、簡易モデルと詳細モデルでは質量が異なるためである。

今回はフェアリングの主要な構造についてのみ検討しているが、音の周波数領域においては、衛星、配管、吸音材、断熱材などモデルに含まれていない構造もリングモードのモード形を変える可能性があり、音響感度が変わると考えている。また、ボルトのモデル化、ハニカム材の動的な材料特性、CFDとの連携方法など基本的な課題も多数あり、今後検討していく予定である。

### 3.3 詳細モデルを用いた騒音検討に関する課題

打ち上げ時の低周波騒音を数値計算のみで予測し設計検討に反映させていくためには、計算に関する技術的な課題以外にも次のような課題があると考えている。

- ① 音に関しては残響室を利用した実験が多く、計算精度の確認に使えるデータが少ない。残響室は設備間の特性差が無視できないこと、直接比較できる計算が難しいなどの課題があるため、無響室での実験データの取得が望まれる。
- ② 計算可能、打ち上げ時の騒音レベルの予測に適用可能、理想的には計測可能で目標値設定が容易な特性を指標としてある程度設計が出来る仕組みの構築が必要と考えられる。例えば、残響室での特性を数値計算時の評価関数とした場合、そもそも計算が難しいということが問題となる。
- ③ 詳細モデルの作成には、必要なCADデータを開発スケジュールに合わせて収集する仕組みの構築が必要になる。詳細な有限要素モデルを作成しなければ必要のない面データなどを集めることは想像以上に難しく、最も困難な課題となり得る。

### 4. おわりに

ペイロードフェアリングの低周波内部騒音に関して、詳細な有限要素モデルによる検討を行い次の結果を得た。

- (1) 音響感度の周波数に対するレベルの変化は、簡易モデルの傾向と似ている。しかし、音になる固有モードのモード形は簡易モデルの単純なリングモードとは大きく異なる。
- (2) リングモードのモード形は分離機構などに大きな影響を受けるが、そのメカニズムは明確にはなっていない。精度よく内部騒音を予測するためには、実機構造に忠実で詳細な有限要素モデルが必須と考えられる。
- (3) 数値計算による内部騒音予測を設計検討に活用するためには、技術課題以外にも多くの解決すべき課題がある。

### 5. 参考文献

- (1) White, P. H., Sound transmission through a finite, closed, cylindrical shell, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 40, No. 5 (1966), 1124-1130.
- (2) Cockburn, J. A. and Robertson, J. E., Vibration response of spacecraft shrouds to in-flight fluctuating pressures, Journal of Sound and Vibration (1974) 33(4), 399-425.
- (3) 福島忠孝, 高木均, 榎本俊夫, 金原俊一, 金田知幸, 田中秀典, 佐藤満, 空力騒音の起振源と応答系の評価法, 自動車技術会 2015 春季大会学術講演会講演予稿集.
- (4) MSC Software, MSC Nastran 2013.1.1 Documentation.