

A03 ロケットフェアリング透過音に対するコインシデンス効果の影響

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

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

1. はじめに

リフトオフ直後のフェアリング内低周波騒音の低減は、衛星、制御機器を振動による障害から護る上で重要な課題である。フェアリングに荷重として作用する圧力変動は、ホワイトノイズに近い周波数特性を有しているのに対して内部騒音のピークの周波数は 200 から 300Hz 程度に存在する。一方、フェアリングの大きさはロケットにより、時には搭載するペイロードの寸法によって異なっており、構造音響の連成系としての固有系には大きな差がある。ピークの周波数と構造差が対応していない点に関して明確な原因は分かっていない。

構造物を特定の周波数の騒音が透過するときのメカニズムの説明として、「コインシデンス効果」あるいは「コインシデンス現象」という言葉が使われることがある^{(1),(2)}。これは、荷重として作用する圧力変動（通常は音波）の位相速度と構造物の振動の位相速度が一致すると、構造側の振動レベルが上昇し、結果として内部騒音のレベルが上がる現象である。有限の構造物では進行波とはならないが、振動形状の波長と音波の波長が一致した場合も、透過音のレベルが上がるため、「コインシデンス効果」として扱われる。板構造では、曲げ剛性と面密度から決まるコインシデンス限界周波数と呼ばれる周波数があり、この周波数の近傍で透過音のレベルが上昇する事例が多数報告されている。コインシデンス限界周波数は無限の平板を仮定して求めているが、有限であっても、多少の曲率がある場合にも適用できるとされている。

しかし、フェアリングの材料として使われている 40mm 程度のアルミハニカムの板材のコインシデンス限界周波数は、300Hz よりも高い周波数域にある。40mm 程度のアルミハニカムを使っている場合、ロケットの寸法に関わらずコインシデンス限界周波数は近い値となるが、フェアリングの内部騒音のピークが 200 から 300Hz の間にあることは説明できない。

ここでは円筒形状で特徴的に見られるリングモードに注目し、平板と見なした場合と異なる「コインシデンス効果」が透過音のレベルに影響を与えるかを検討している。具体的には、フェアリングの外側に設定した音源の位置と内部騒音の関係を計算し、内部騒音の変化を調査している。

2. コインシデンス現象とは

2. 1 リフトオフ直後のフェアリング周辺の状況

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く、図 1 に示すように、そのピークの周波数は多くのロケットで 200 から 300Hz の間にある。ここで扱っているリフトオフ直後では、フェアリング表面での流れは遅く、荷重として作用する圧力変動は図 2 のように音波の成分が多くを占めていると考えられている。音源のほとんどは地面に近い部分にあり、音波がフェアリングに到達した状態では、ロケットの軸方向に進行する平面進行波に近いと推測される。ロケットエンジンと地面の間ではマッハ波が存在し、地面から反射して軸方向に平行でない音波がフェアリングに到達している可能性もあるとされているが、詳細に分析された結果は報告されていない。

2. 2 平板の「コインシデンス現象」とリングモードの「コインシデンス現象」

コインシデンス現象は、図 3 に示すように構造の進行波の位相速度と音波の位相速度が一致する状態で発生する。音速は媒質の特性が変化しない場合一定であるが、位相速度は進行方向と構造の位置関係により変化するため、構造側の振動の速度と音速が一致ないときもコインシデンス現象は起こりうる。

現実の世界では構造は有限であり、振動は進行波ではなく定在波になっている。この場合は、図 4 のように定在波の形状から形式的に計算した位相速度が音波の位相速度と一致したときに構造側の振動レベルが上昇する。一般的にはこれもコインシデンス現象としていたため、ここでは「コインシデンス現象」と表記している。

平板の場合、式 (1) に示す周波数をコインシデンス限界周波数と呼ぶ。フェアリングで使われてい

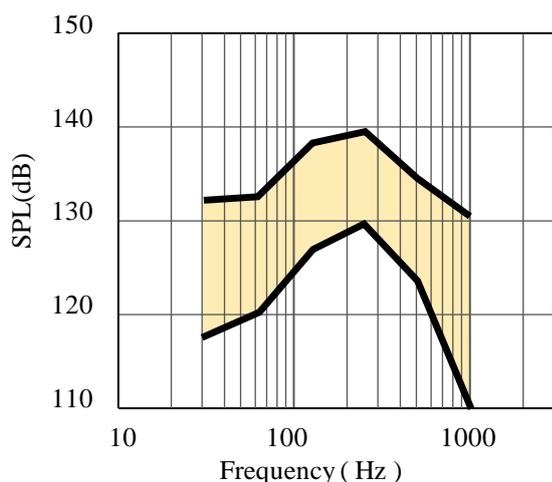


図1. 各種ロケットの内部騒音レベル

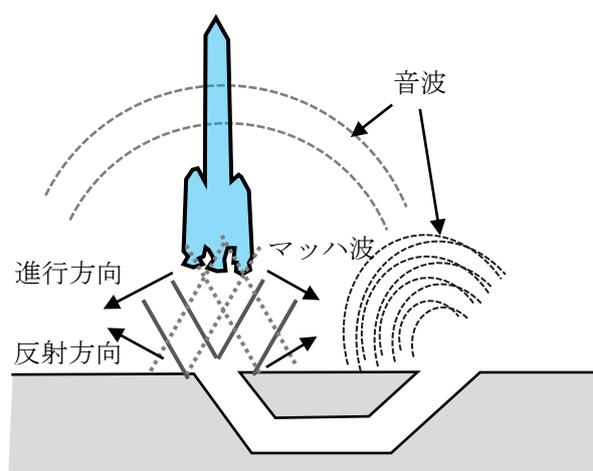


図2. リフトオフ直後の状況

る板材の特性を代入すると、周波数は約 400Hz となる．有限平板であっても、この周波数の近傍に固有モードがあると振動レベルの上昇が起こる．

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\sigma^2)}{E}} \quad (1)$$

ここで、 h は板の厚さ、 ρ は面密度、 E はヤング率、 σ はポアソン比、 c 音速である．

図5にリングモードの「コインシデンス現象」を示す．横から見たモード形の波長が音波の波長と一致したときに「コインシデンス効果」による内部音圧の上昇が起こると考える．

リングモードはフェアリングの周方向の引張・圧縮振動であり、固有振動数は基本的に板の材質と直径に依存する．フェアリングの固有値からすると 100 次よりも高い周波数域に存在する高次の固有モードである．リングモードのモード形は横からみると蛇腹状になっており、蛇腹の数が多数になるほど固有振動数は高くなる．

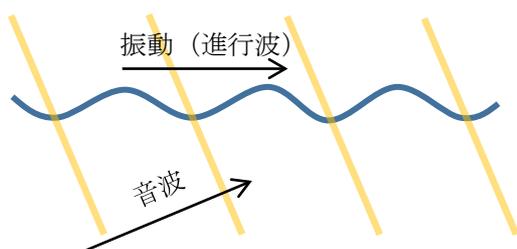


図3. コインシデンス現象

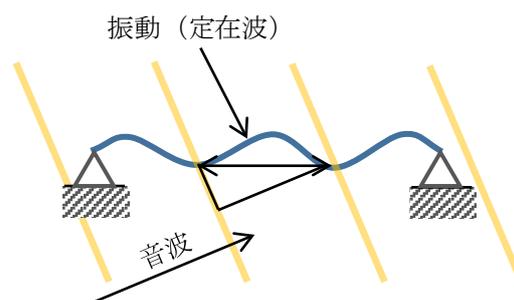


図4. コインシデンス現象と似た共振現象

3. 透過音の計算

3. 1 計算の方法

フェアリングの外部に点音源を置いて、内部の音圧レベルを計算する方法で音波の進行方向と内部音圧の関係を調べる．今回は、図6に示すように構造と音響の相反性を利用して、フェアリング内部の軸上の評価点に音源を置いて、外部の音圧の応答を計算した．

計算は2段階に分けており、始めにフェアリングと内部の空気の部分を MSC/Nastran⁽³⁾の構造音響連

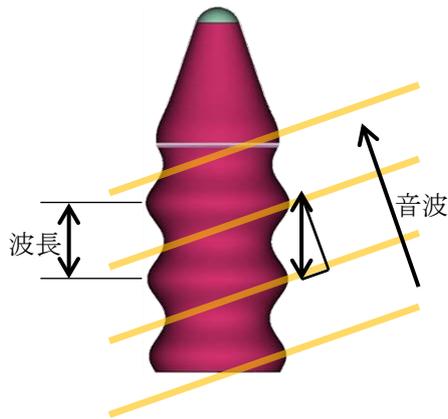


図5. フェアリングの「コインシデンス現象」

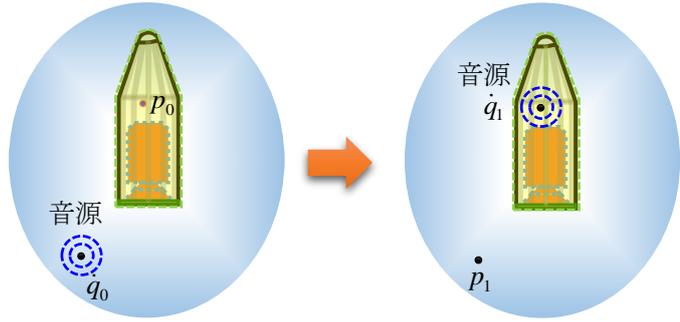


図6. 相反性を利用した内部騒音の計算

成機能により計算した。フェアリング表面からの音の放射については、MSC/Actran⁽⁴⁾により求めている。手順を図7に、評価点の位置を図8に示す。なお、外部空間との構造との間には相互作用はないとした。

3. 2 計算結果

図9に計算結果を示す。計算には、直径4mの4Sフェアリング程度の大きさで、全てをSHELLで要素分割した軸対称の有限要素モデルを使った。

計算結果より、軸上の内部音圧が上昇するのはフェアリングと音源の位置が70°になっている場合であることが分かる。リフトオフ時にはロケットの中心軸と地面との交点の周辺に音源が集中していると推定されているが、軸対称形状のフェアリングでは内部騒音の原因にはなり難いことが分かった。

図10にリングモードの波長で形式的に計算した位相速度と音波の位相速度を示す。200から300Hzの間で両者に交点はなく「コインシデンス現象」は発生しない可能性が高いことがわかる。

次に、フェアリングに分離機構相当の梁要素追加した場合の結果を図11に示す。軸対称性が崩れると、リングモードのモード形状は図12に示すように大きな影響を受けるが、透過音のレベル自体の変化は小さいことがわかる。ただし、軸対称の形状と比較すると、10°前後でもリングモードの周波数で音圧がピークになる傾向が見える。より現実の構造に近い場合、更にリングモードのモード形状が複雑になるため、内部騒音になり易い音源位置は変化する可能性がある。今後の課題であると考えている。

また、マッハ波の反射が高いレベルで起こっていると、進行波の方向がロケットの軸方向とは異なる可能性があり、「コインシデンス効果」によって透過音の上昇する可能性がある。マッハ波の反射波についても、今後検討すべき課題であると考えている。

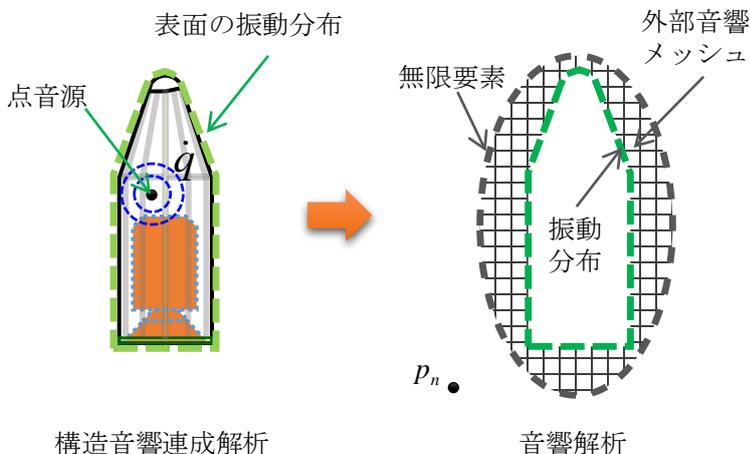


図7. 透過音計算の手順

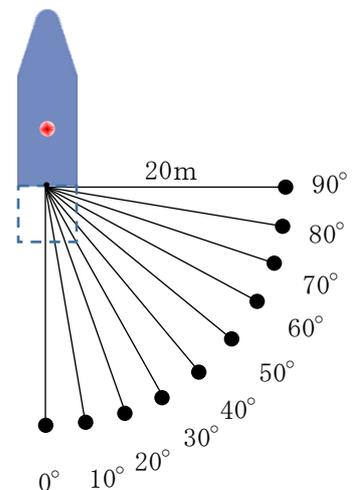


図8. 音圧評価点

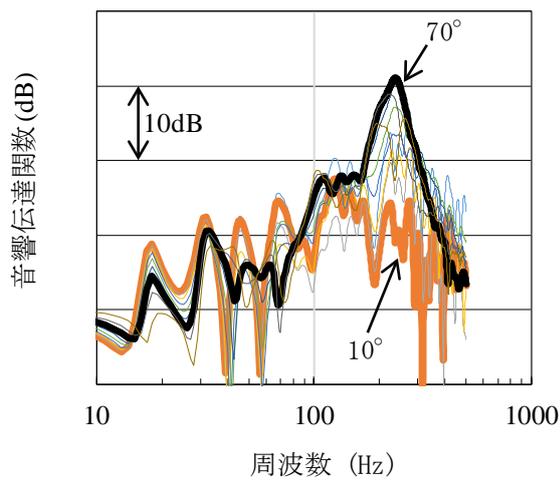


図9. 音源位置による内部騒音レベルの変化

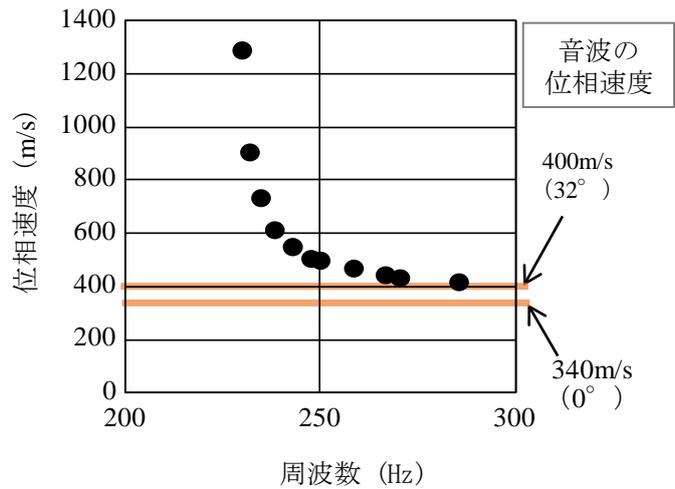


図10. リングモードと音波の位相速度

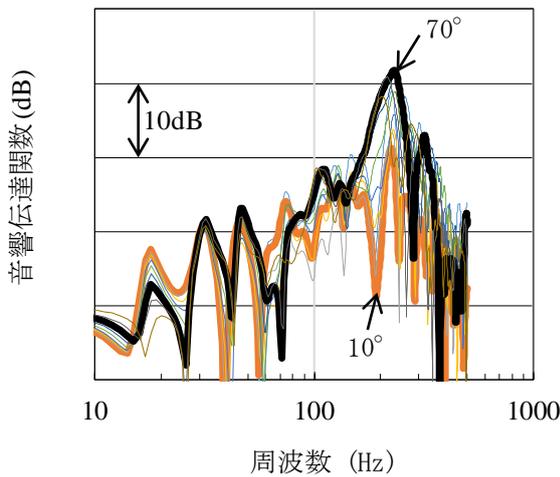


図11. 音源位置による内部騒音レベルの変化

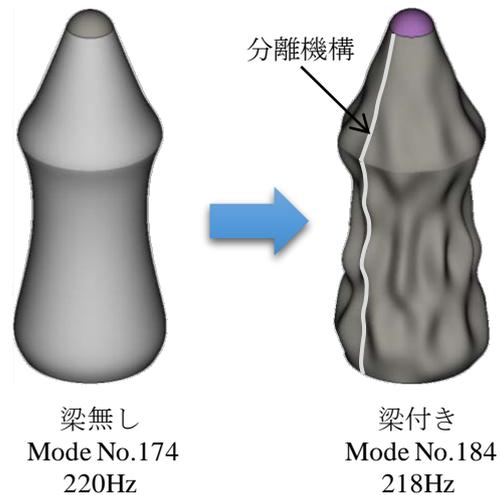


図12. 水平分離機構によるリングモードの変化

4. おわりに

リフトオフ時のフェアリング騒音に関して、コインシデンス現象が影響するかを簡易的なモデルで検討した。

- (1) 音源位置と内部騒音の関係より、軸対称のフェアリングでは「コインシデンス現象」の影響は小さいと推定される。
- (2) 分離機構をモデルに組み込むと、ロケット直下の音源に対して200から300Hzの透過音のレベルが上昇する。構造を更に詳細に要素分割したモデルでの検討が必要である。

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) MSC Software, MSC Nastran 2014.1 Documentation.
- (4) MSC Software, MSC Actran 16.0 User's Guide.