

A05 ペイロードフェアリングの低騒音化検討

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

打ち上げ時のロケットは、エンジンの燃焼ガスによって発生する高いレベルの圧力変動にさらされる。ロケットの先端部分を形成するペイロードフェアリングは、空力的な役割だけでなく機体にかかる圧力変動から内部の衛星および電子機器を守る役割も担っている。機体の外側の表面から衛星に至る振動の主たる伝達経路を図1に示す。伝達経路には、機体の振動が構造を伝わって伝達する経路と、一度内部の圧力変動となって伝達する2種類の経路がある。ロケットでは、経験的に内部の圧力変動による寄与が高いとされており、フェアリング内部の低騒音化は重要な課題である。

ペイロードフェアリング表面にかかる圧力変動は広い周波数範囲のホワイトノイズに近い特性を持っており、内部の音圧も多数の周波数成分を有している。現在、400~500Hz以上では、実験データをもとにしたSEAによる予測と低騒音化検討が実用化されている。一方、ここで検討の対象としている低い周波数域は、ペイロードフェアリングを円筒で近似し、解析解を用いた検討が行われてきた⁽¹⁾。実測データとこれらの検討結果より、低周波域では構造系のリングモードが内部の音圧レベルと相関が高いとされている⁽²⁾。

しかしながら、リングモードは面外の曲げのモードと比較して固有振動数が高いため、実験による厳密な検証はできていない。また、有限要素法などによる検討においても、実機と同等の大きさのモデルでは固有値解析がネックとなっていたため、過去報告されている事例の解析の上限周波数はリング周波数に達していない場合が多い⁽³⁾。

本報告では、ペイロードフェアリングの低周波騒音について、内部の音と相関が高い音響と構造の固有モードを特定する方法と、構造変更による低騒音化を検討した結果について述べる。ロケットの場合、実機での検証実験が難しいため、実機の約1/20の模型を想定した検討を行っている。

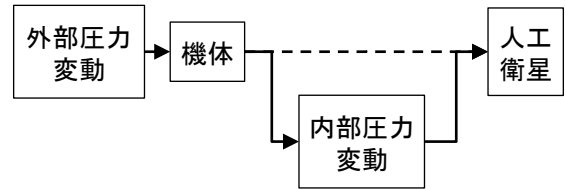


図1. 振動の主な伝達経路

2. 音に対して寄与の高い固有モードの特定

ロケットの外側の圧力変動はレベルが高いこと、また、流れを伴うため線形の音響理論で扱うことができない。一方、内部の圧力変動は130dB程度であり、線形の音響理論の範囲で実用的な精度の解析が可能である。ここでは、構造と内部音響が連成したときの音圧をモーダル周波数応答により計算した。

構造の各節点の変位を $\{U_s\}$ 、内部空間の各節点の音圧を $\{P_f\}$ 、構造へ入力を $\{F_s\}$ とすると、周波数領域における連成の方程式は次のようになる。

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ -A^T & M_f \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} B_s & 0 \\ 0 & B_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & A \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} U_s \\ P_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

ここで、 $[M_s]$ 、 $[K_s]$ 、 $[B_s]$ は構造の質量、剛性、減衰の行列、 $[M_f]$ 、 $[K_f]$ 、 $[B_f]$ は音響の質量、剛性、減衰の行列、 $[A]$ は構造と音響の連成関係を表す係数行列である。簡単のため、音響への入力は0としている。次に、速度ポテンシャル $\{Q_f\}$ を導入して行列を対称化する。

$$\{P_f\} = j\omega\{Q_f\}. \quad (2)$$

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & -M_f \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} B_s & A \\ A^T & -B_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & -K_f \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} U_s \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

更に、式(3)を構造と音響の非連成のモード形 $[\Phi_s]$ 、 $[\Phi_f]$ を用いてモード座標系に変換する。

$$\{U_s\} = [\Phi_s] \{\xi_s\}, \quad \{Q_f\} = [\Phi_f] \{\xi_f\}. \quad (4)$$

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & -m_f \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} b_s & a \\ a^T & -b_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & -k_f \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \xi_s \\ \xi_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_s^T F_s \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

ただし、

$$[m_s] = [\Phi_s]^T [M_s] [\Phi_s], \quad [m_f] = [\Phi_f]^T [M_f] [\Phi_f], \quad (6)$$

$$[b_s] = [\Phi_s]^T [B_s] [\Phi_s], \quad [b_f] = [\Phi_f]^T [B_f] [\Phi_f], \quad (7)$$

$$[k_s] = [\Phi_s]^T [K_s] [\Phi_s], \quad [k_f] = [\Phi_f]^T [K_f] [\Phi_f], \quad (8)$$

$$[a] = [\Phi_s]^T [A] [\Phi_f]. \quad (9)$$

内部の音圧の周波数応答は、式(5)を $\{\xi_s\}$ と $\{\xi_f\}$ について解き、式(2)と(4)を使って各固有モードが作る寄与の総和として求めることができる。実際の計算には市販のソフトウェアを用いている⁽⁴⁾。

主要な固有モードは、計算に用いた全てのモードで合成した応答と、特定のモードを取り除いた場合の応答との差を指標として求めた。図2参照。この指標でソートすることで、各モードの寄与を調べるよりも簡単に抑制すべき固有モードを知ることができる。特に、複数のモードを同時に対策しようとする場合は有効である。

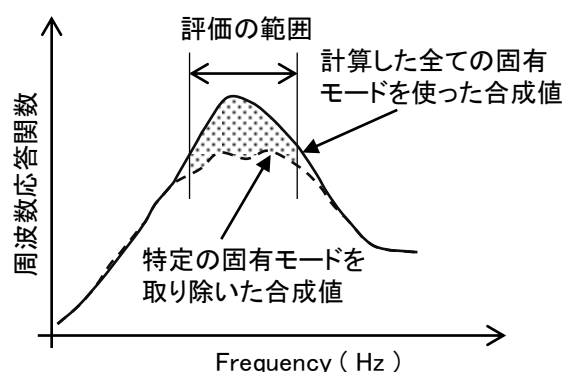


図2. 音に対する各固有モードの寄与の分析

3. スケールモデルの計算結果

3. 1 有限要素モデル

図3に加振点と評価点、および、境界条件を示す。加振力は法線方向に単位入力を与えた。評価点1は軸上、加振点2は壁際の点である。軸方向の座標は、加振点、評価点1、2とも同一である。

図4に要素分割を示す。構造部分は一辺が約0.002mのシェル要素、音響部分は一辺が約0.005mの四面体要素で分割した。リング周波数は曲げモードの固有振動数に比べて高いとされることから、通常の振動解析よりも詳細な要素分割を行った。構造の材料特性は厚さ0.003mのアルミ相当、音響の特性は常温の空気相当とした。モード減衰は、構造6%、音響8%としている。実際のロケットは、アルミハニカムをコアとしたサイドリッチ構造の板材で作られているが、加工が困難であるため、ここではアルミ材の削り出しで容易に製作可能な構造を想定した。

3. 2 内部音圧の計算結果と主要な固有モードの特定

10000Hzまでの音圧の周波数応答関数を図5に示す。応答解析では構造20000Hz、音響15000Hzまでの固有モードを使い、構造に関しては剰余剛性を考慮している。

軸上の評価点1は、約8000Hzにピークがあるのに対して、加振点に近い壁際的评价点2は低い周波

数からレベルが高く、評価点1よりもほぼ全ての周波数域でレベルが高く。これらの計算結果は、点荷重に対する音の応答を表しており、鳥が衝突するような条件では軸上よりも壁近傍の音圧レベルが大幅に高くなることを示している。

図6に構造および音響の単体の固有値の分布を示す。図の中で白抜き丸がリングモードを表わしている。リングモードは約7900Hzから出現し、評価点1でピークとなっている8000Hz付近の密度が高い。図7に全体の127次、130次にあるリングモードと近い固有値を持つ固有モードのモード形を示す。リングモードの固有振動数は高いが、曲げモードに比べて比較的単純なモード形状であることが分かる。

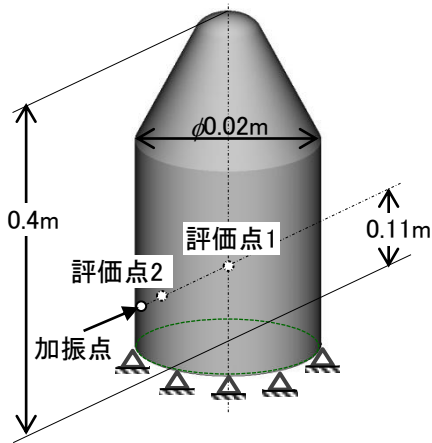


図3. 加振点, 評価点, 境界条件

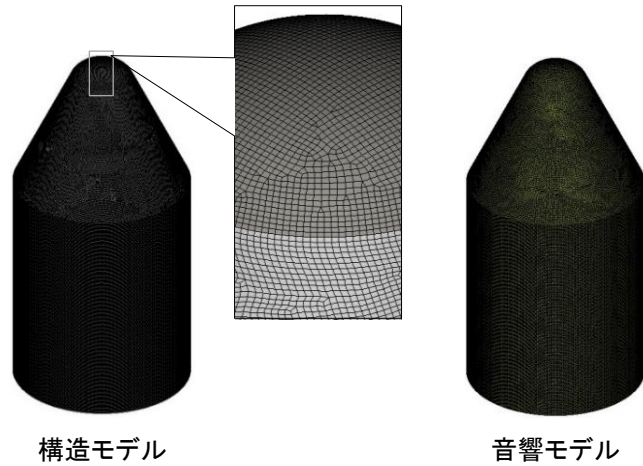


図4. 構造と音響の有限要素モデル

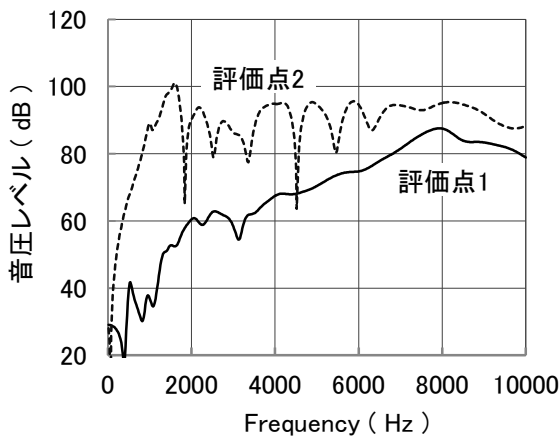


図5. 音圧の周波数応答関数計算結果

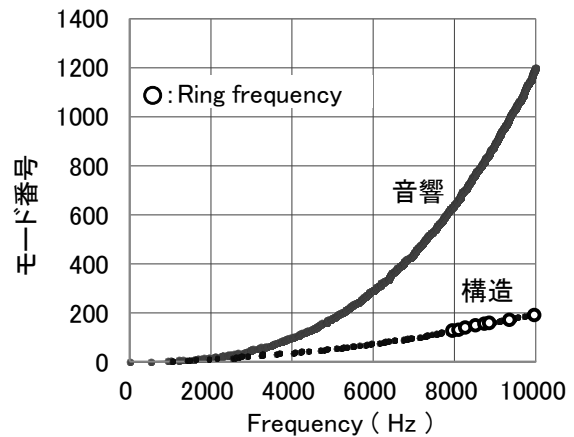


図6. 固有値の分布

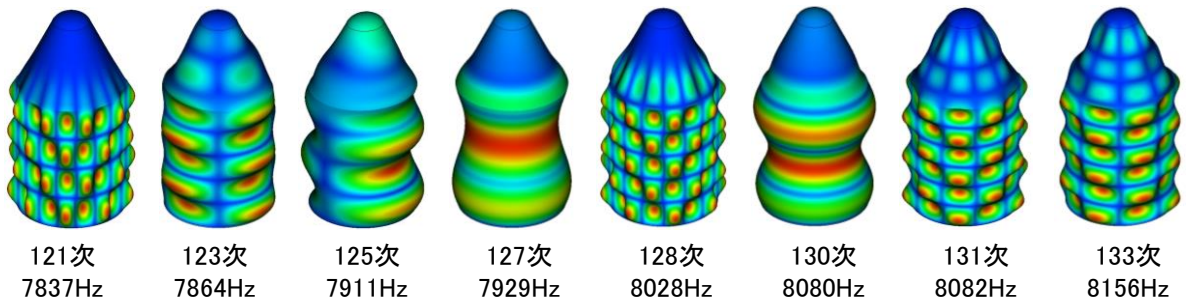


図7. 低次のリングモードの近くにある固有モード(重根は一方を表示)

主要な固有モードの探索は、評価点 1 については 7859～8061Hz の周波数範囲で、評価点 2 は 8079～8281Hz の範囲で行った。図 8, 9 に音と相関が高い構造の固有モードと周波数応答関数, 図 10, 11 に音響の固有モードと周波数応答関数を示す。

評価点 1 の結果より、構造は従来の知見の通りリングモードが、音響は構造との連成面でのモード形がリングモードと似ている固有モードが主要なモードとなっていることが分かった。また、低い周波数域においてもリングモードの影響は大きく、低周波の音の予測にもリングモードを考慮する必要があることも確認できた。これに対して加振点に近い壁近傍の評価点 2 の音は、相関の高い固有モードが多数あり、1 つの固有モードを対策しても音のレベルを下げることは難しいことが分かる。

3. 3 音圧抑制の検討

打ち上げ時にペイロードフェアリングに加わる荷重は、図 12 に示すようにロケット直下から伝播する圧力変動が大きく、荷重の分布は軸対称的である。厳密に軸対称の荷重を周方向に加えたときの平均音圧は、周上の各点に法線方向の単位入力を与えたときの音圧応答の単純平均で計算することができる。図 13 に実機の簡易モデルで計算した軸上音圧と壁際音圧の平均値の計算結果を示す。この結果より、壁際の音圧レベルが軸上の音圧レベルに比べて高くなる可能性が低いことが分かったため、音圧抑制検討は軸上の評価点を対象とすることにした。

具体的には、音と関連が強い 130 次のモードの腹の位置にリング状の補剛部材を追加して、音圧の周波数応答関数の変化を調べた。補剛部材の軸方向の位置は、加振点とほぼ同一である。図 14 に追加した補剛部材の補剛位置と断面を、図 15 に周波数応答関数の結果を示す。

リング周波数は基本的に材料特性と半径によって決まるため、対象としている構造物と同じ材料の補剛部材を適用すると、音のピークの周波数変化は小さく、レベルだけが下がる結果となる。図 15 において、破線は補剛部材の剛性を変えずに質量のみを 0 とした場合の結果を示している。この場合、ピークの周波数は高い位置に移動し、ピークのレベルを下げる効果も増加する。実機に使われているハニカムサンドイッチ構造の板材は、コアとなっているハニカムが面内の剛性に殆ど関与しないので、表皮と同一の材料で補剛した場合、破線で示した結果と同様の傾向になると考えられる。

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、構造を単純化した 1/20 のスケールモデルを用いた騒音低減検討を行い次の結果を得た。

- (1) 内部騒音は従来からの知見の通り構造のリングモードとの相関が高く、打ち上げ時の音のピークはリングモードが密に存在する周波数域にあると推定される。
- (2) 音に対して寄与の高いリングモードの腹の位置にリング状の補剛部材を設定することで、音のレベルを下げる事が可能である。
- (3) 対象としている構造を構成する部材よりも軽く剛性が高い部材で補剛すると、より大きな低減効果が得られる。

5. 参考文献

- (1) Leissa, A. W. (1973), Vibration of shells. SP-288. NASA.
- (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) Pirk R., Desmet W., Pluymers B., Sas P. and Goes L. C. S., Vibro-acoustic Analysis of the Brazilian Vehicle Satellite Launcher (VLS) fairing, Proceedings of the ISMA, 2006.
- (4) MSC Software, MSC Nastran 2013.1.1 Documentation.

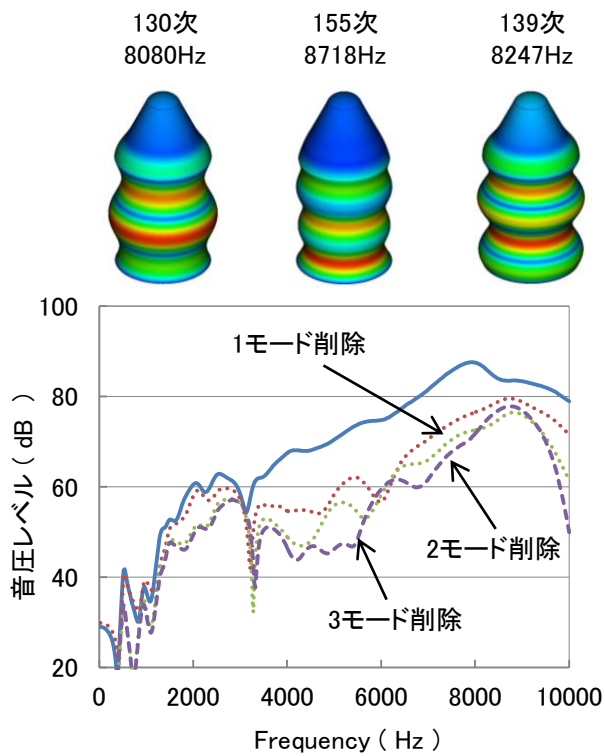


図8. 評価点1で寄与の高い構造の固有モード

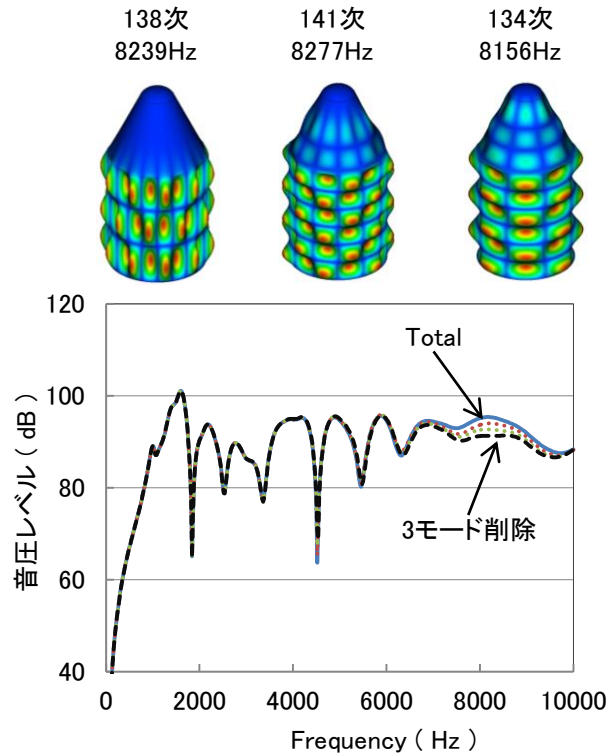


図9. 評価点2で寄与の高い構造の固有モード

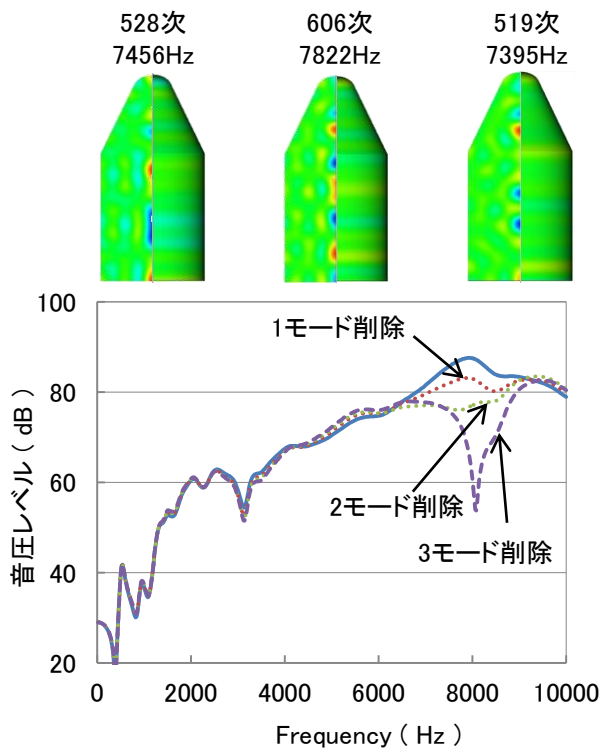


図10. 評価点1で寄与の高い音響の固有モード

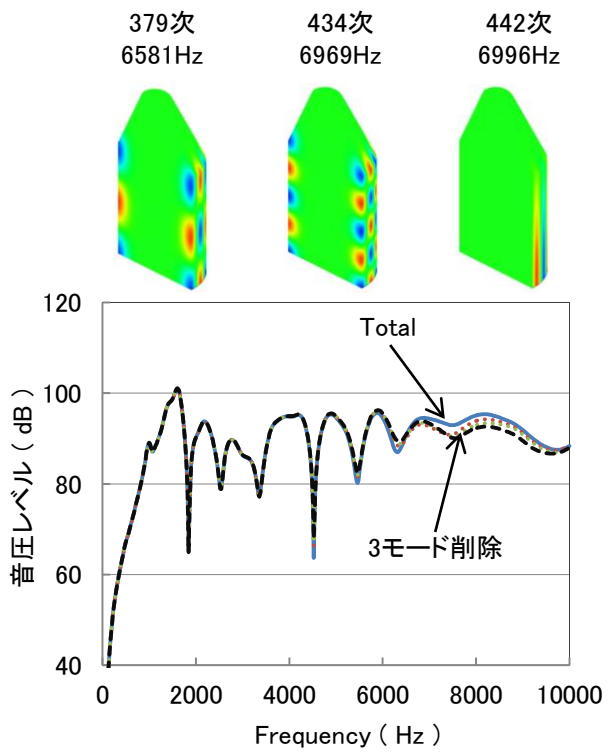


図11. 評価点2で寄与の高い音響の固有モード

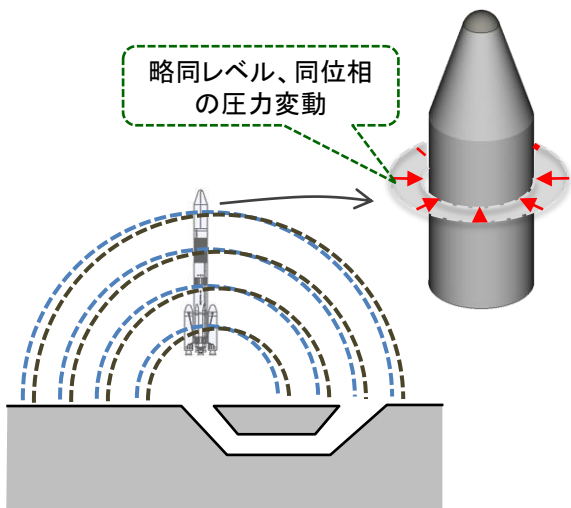


図12. 打ち上げ時の主要な荷重の形態

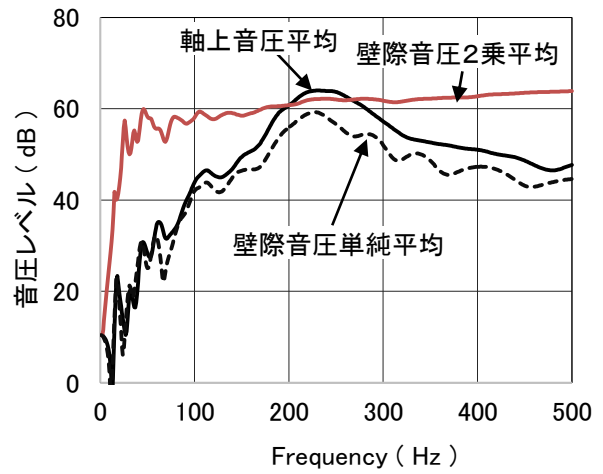


図13. 軸対称荷重を加えたときの音圧応答

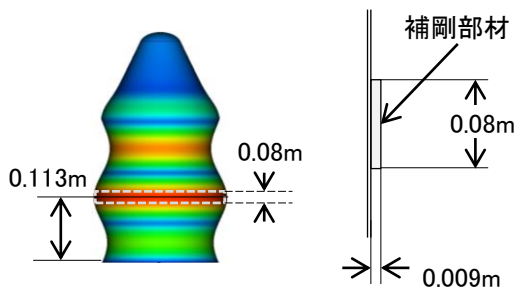


図14. 補剛位置と補剛部材の断面

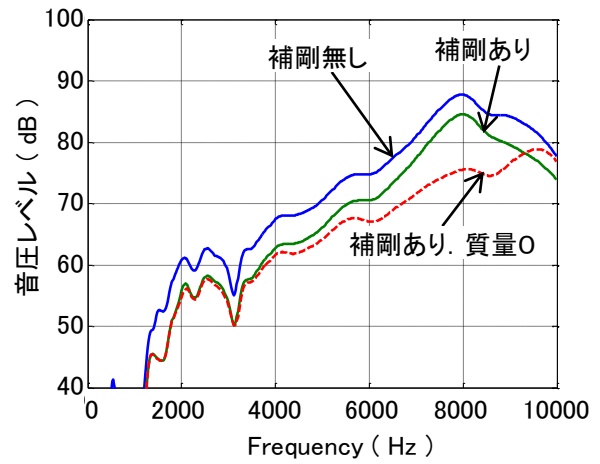


図15. 補剛効果