

6.6. ペイロードフェアリングの低周波騒音の検討

宇宙航空研究開発機構
情報・計算工学センター
丸山 新一 氏



第12回試験技術ワークショップ

ペイロードフェアリングの低周波騒音の検討

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

研究開発本部 情報・計算工学センター

○丸山 新一、堤 誠司、高木 亮治

宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系要素技術研究開発センター

寺島 啓太

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

1



目次

1. 背景
2. 目的
3. フェアリング内部騒音に関する従来の見解
4. 情報・計算工学センターの取り組み
5. 音に寄与の高い固有モードの明確化
6. リングモードの計測方法検討
7. まとめ

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

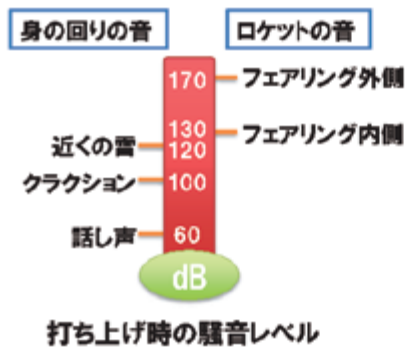
2



背景

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

フェアリングは、外部の圧力変動から人工衛星を守る役割も担っている



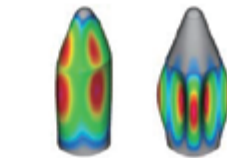
2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

3



目的

1. フェアリングの振動音響特性(構造+内部音響)が計算できるようにする
2. 音のレベルを決めている構造系の共振と音響系の空洞共鳴を明らかにする(本報告はここが中心)
3. 音のレベルを下げる方策を見つけ出す



中心が振動しないモードが多いため経路①の寄与は小

伝達経路

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

4

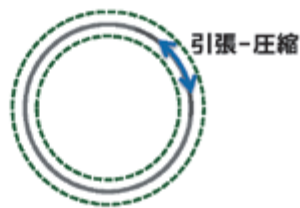


フェアリング内部騒音に関する従来の知見

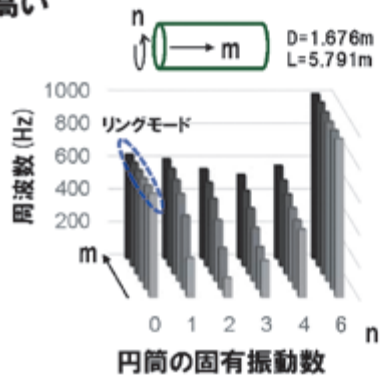
リングモードが支配的である

平板での検討結果がそのまま適用できる保証はない(曲げモードが支配的であるため)

リングモードは固有振動数が高い



リングモードのモード形状



2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

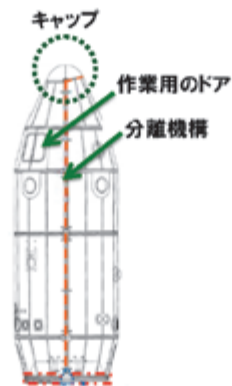
5



情報・計算工学センターの取り組み

簡易モデルと詳細モデルを使って、有限要素法による検討を実施中

モデル	狙い
簡易	寄与の高い固有モード明確化
	低騒音構造提案
詳細	デジタル設計の可能性検討
	モデル作成技術の開発 非軸対称部分の影響把握



主な非軸対称部分

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

6



音に寄与の高い固有モードの明確化

音響感度を支配している構造系と音響系の固有モードを、モード寄与解析により求めた

5S簡易モデルの検討事例を紹介する



5S簡易モデル

計算条件

項目	内容
境界条件	フェアリング下端を単純拘束
荷重条件	X軸上の点に単位入力
評価点	① 軸上、高さ3.337m
	② 壁際、高さ3.337m
備考	衛星、分離機構、作業用窓などは省略

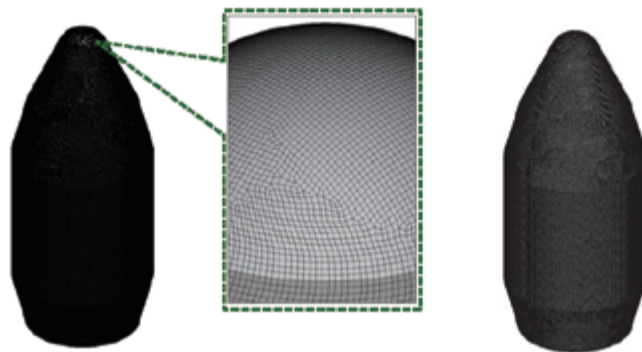
2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

7



有限要素モデル

構造は約30mmのSHELL要素、音響は約80mmの4角形要素で分割した



構造モデル

音響モデル

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

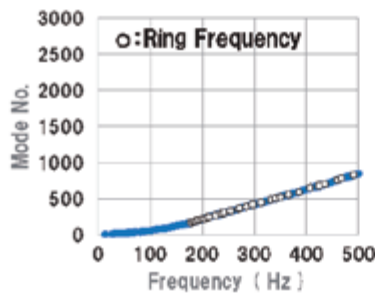
8



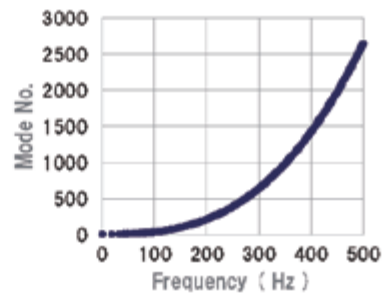
固有値解析の結果

リングモードは200Hz付近の密度が高い

構造系は1.5個/Hz程度。音響系は周波数が高くなると急激に密度が上がり、500Hz付近では5個/Hz以上になる



構造系の固有値密度



音響系の固有値密度

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

9



固有モードのモード形状

リングモードは、比較的単純なモード形状を持つ

音響モードは、壁よりも中心部の係数が大きいモードの割合が高い

重根は一方を表示

	166次、178Hz	167次、179Hz	168次、179Hz	170次、180Hz
構造系				
音響系				

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

10



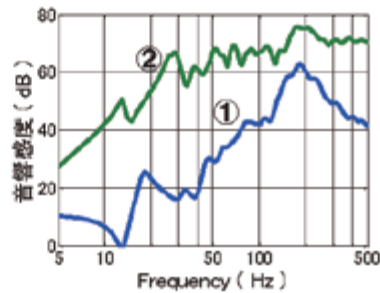
音響感度の計算結果

軸上の評価点は、リングモードの密度の高い周波数域にピークがある

加振点に近い壁際の点は、軸上に比べてレベルが高い



加振点と評価点



音響感度

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

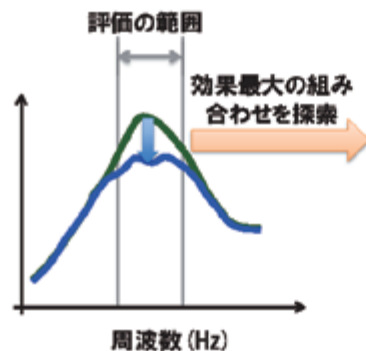
11



音響感度を支配する固有モードの特定

NASTRANのモード寄与分析機能を活用し、次のように求める

- ・ 固有モードを削除した時の効果で評価
- ・ 削除するモードを複数として、効果が最大となる組み合わせを探索



条件	モード形状
1モード削除	
2モード削除	
3モード削除	

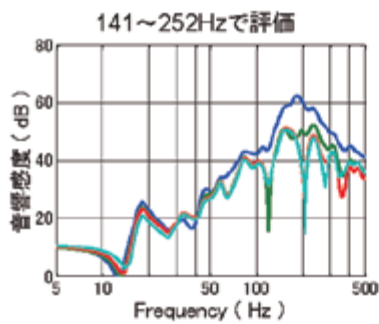
2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

12



軸上評価点音響感度のモード寄与分析

リングモードの寄与が高い。従来の知見と一致
 主要なモードを削除すると、レベルが大きく下がる



モード削除時の音響感度変化

条件	モード形状
1モード削除	
2モード削除	
3モード削除	

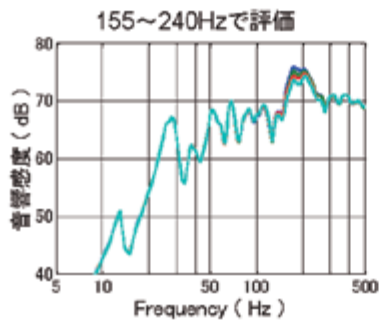
2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

13



壁際評価点音響感度のモード寄与分析

多数のモードに分散している。リングモードの寄与は小さい
 寄与大のモードを削除しても、レベルの上がり代は小さい



モード削除時の音響感度変化

条件	モード形状
1モード削除	
2モード削除	
3モード削除	

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

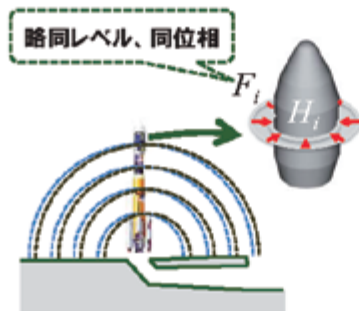
14



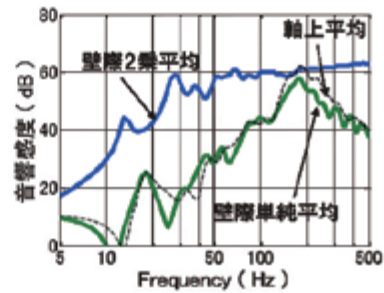
壁近傍の音圧レベルに関する考察

軸対称の圧力変動によって発生する音のレベルは、軸上に比べて高くなる可能性は低い

ランダムな圧力変動に対しては、軸上よりも高くなる可能性が高い



ロケット直下から伝播する圧力変動



音響感度の平均値



リングモード以外への対応

軸対称でないモードは数が多いので、全てを抑えることは出来ない。発音メカニズムを調査し、制振すべきモードを絞り込むことが必要であると考えている

リングモード以外の寄与が高くなると推測される状況

要因	内容	検討手段
構造的な要因	非軸対称な構造部分	詳細モデル
	衛星の形状	↑
荷重の形態	煙道出口からの圧力変動	CFDとの連携
	周辺構造物の反射	↑
	超音速飛行時の圧力変動	↑
その他	拡散音場での地上試験	?

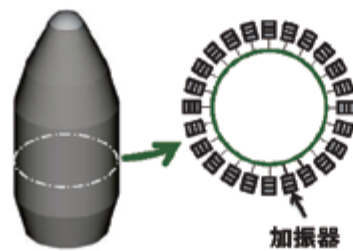


リングモードの計測方法検討

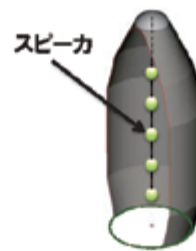
高次モードのため通常の加振実験によるモード抽出は不可能。実稼動モード (ODS) から推定する

加振方法としては2つが考えられる

- ・ 複数の点から同レベル、同位相の力で構造的に加振
- ・ 軸上からスピーカで音響的に加振



加振器を使った方法



スピーカを使った方法

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

17



実行可能性の比較

精度、費用、期間のほぼ全ての項目で、スピーカを使った音響加振法が優れている。実施には費用が障害となる

	項目	構造加振	音響加振
精度	ODSの質	× (1)	○
	加振力	○	△
	音との相関	△ (2)	○
費用	設備、供試体	×	△
	加振器、計測器、センサ	×	○
期間	準備	×	○
	計測	×	○

(1) リングモードだけを励起するのは困難。曲げモードが混じる

(2) 音と相関の低いモードも励起される

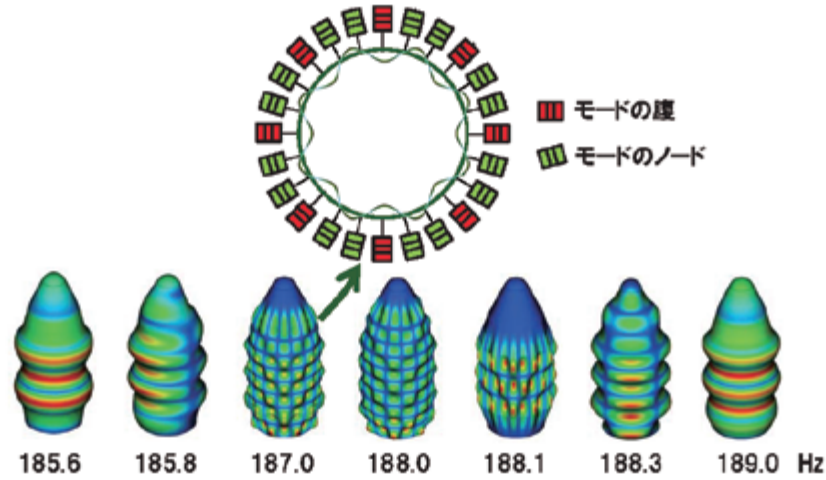
2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

18



構造加振で曲げモードが混じる理由

リングモードの近傍には、多数の高次曲げモードが存在するので、全てを避けることは難しい



2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

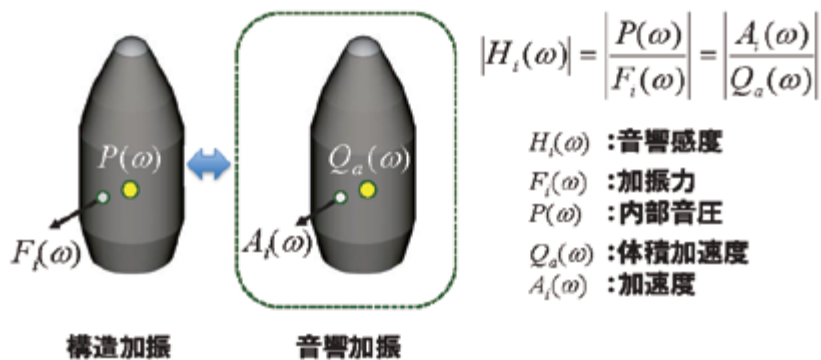
19



音響加振で得られる実稼動モードの特徴

音響感度は、スピーカで加振したときの構造加振点の加速度応答と一致する

→音響加振では音と相関の高いモードが励起される



構造加振

音響加振

$H_i(\omega)$: 音響感度

$F_i(\omega)$: 加振力

$P(\omega)$: 内部音圧

$Q_a(\omega)$: 体積加速度

$A_i(\omega)$: 加速度

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

20



期待される実稼動モード

計算で求めた簡易モデルのODSは、明らかにリングモードの重ね合わせになっている

高精度のカーブフィット手法を使えば、固有モードが分離できるようにも見える



軸上から加振したときのODS (184Hz)

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

21



まとめ

簡易FEモデルの解析より、次のようなことが分かった

- ・ フェアリングの低周波騒音は、従来の知見の通り、リングモードと相関がある
- ・ 非軸対称的な要因が存在する場合は、リングモード以外と相関が高くなる可能性がある

リングモードを実験により捉える方法を検討し、内部から音響的に加振する方法に可能性があることを示した

2014/12/11 第12回試験技術ワークショップ(筑波宇宙センター)

22

質疑応答

質問者① 三菱重工業株式会社 河野様

2点教えて下さい。1つ目は音響系のモデルを組む際に、モデルにはペイロードの容積分の影響は加味されているのかという点です。今回の解析では入れ込んではいないように見えるのですが、それでも評価として十分だという風にお考えなのでしょうか。もしくは今後組み込んでいくことを想定されているのでしょうか。2つ目はリングモードを実験的に捉えようとする目的は何になるのかという点です。音に対して支配的なモードを見たいということに対して音でそのモードを発生させるというのは、どういう位置付けとして考えておられるのか教えて頂けますでしょうか。

発表者

まず1点目について、音響モードを見て頂くと分かる通り中心部の音圧レベルが高いことから衛星の有無による影響は非常に大きいと思われれます。ただし、衛星も衛星内部まで考慮しなければ正しい答えは得られないと考えられます。フィルエフェクトに関しては大規模計算をしている訳ではないですが今後機会があれば取り組んでいきたいと考えています。ちなみに、中をヘリウムに変えた場合の計算も行っており、音速が変わるので音響系も変わりますがピークの位置がリングモードの周波数しか出なかったのも、構造は音響系が変わってもリングモード等が支配的だと考えられます。次に2点目の音響加振についてですが、1つ目のリングモードは200番目にあり普通にシェイカーで加振しても全くリングモードを見ることはできません。実験ができないためにリングモードが合っているのか間違っているのか確認ができず、もし実験的に確認するのであれば音響加振をして軸対称の荷重を印加してリングモードのみを励起するという必要があります。加えて、フェアリング表面に力Fをかけた時の軸上の音というのは、中からスピーカで加振した時の表面の加速度に一致します。したがって中から音響的に加振して見えているモードというのは100%音と相関があります。以上のような理由から音響加振を実施しており、これ以外にリングモードを出す方法はないと考えています。

質問者

要は、リングモードが明らかに関与が高いというのは解析的には見えており、それを可視化して本当にそういうモードがあるかを実証するという目的でこういった検討をされているということでしょうか。

発表者

リングモード自体は50年前から言われていることですが、どういう形をしているかという絵や計算結果がどこにもないため、本当にものとして存在するのかを知りたいということ

が位置付けになります。

質問者② JAXA イプシロンロケットプロジェクトチーム 宇井様

イプシロンロケットも昨年度試験機が打ち上がり評価を行っていますが、1/1 オクターブバンド 250Hz 帯のところの音の下がり具合が開発試験時よりも悪くどういう影響かを検討しています。リングモードの相関もあるかと考えていますが今のところ原因がきちんとわかってはいません。開発試験時は拡散音場ではありますがフライト中の音場というのは進行波が気になりますので、それによってリングモードと音との関係が変わる、というような考えがとおりであればお聞かせください。

発表者

イプシロンロケットの結果についてですが、直径の関係から約 200Hz というのは少し低すぎると思われます。リングモード自体はもう少し高いところにあるため、リングモードは引っ張られるモードであるためどこかに剛性の不連続な点があると私自身は思っております。そのあたり、構造がよく分からないのできちんとしたお答えをすることができません。また拡散音場に関してはご指摘の通りで、拡散音場の試験を通過しなければフライトはできませんが、実際にフライトで受ける荷重は拡散音場とは違います。そのあたりをどうしていくかは欧米でもきちんとできていないように思われますので、試験センターの方で整備して頂ければと思います。

JAXA 環境試験技術センター 施様

コメントさせていただきます。このリングモードというのはここまで解析されて明確化されたのは初めてかと思えます。地上試験の拡散音場でのデータを取得して透過率がかなり高いということが分かっており、フライト時のテレメトリデータでもそのような結果が得られています。

発表者

打上げ時の荷重では十分静かだが拡散音場の試験をすると NG になることや、その逆もまたあると考えられます。そういうところを実際のフライト環境にふさわしい荷重条件で評価できるような方向に検討して頂けるとありがたいと思います。