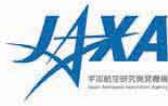


発表 4.

音響試験ハンドブックに関するトピック

試験センター 施 勤忠 主任研究員



試験センター

音響試験ハンドブックに関するトピック

JAXA基幹システム本部・試験センター
施 勤忠

第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



試験センター

1. 音響試験ハンドブックの作成目的及び審議状況

目的・範囲：

試験に係る技術根拠の明確化;試験の効率化;試験の信頼性向上

概要：

- 現在の衛星一般試験標準(JERG-2-002)を、衛星のシステム・サブシステムに対する明確な原則(Philosophy)とも呼べる試験要求(Standard)と、その構成要素である各試験に対するガイダンス、具体論、方法論(Methodology)であるハンドブックに分ける。
- JAXA独自の経験や取得データを反映したハンドブックを各環境試験毎に制定する。
- 試験センターで実施している試験検証業務の成果を盛り込み作成した音響試験ハンドブックの原案を、関係者のレビューを行って制定する。

効果：

標準の裏に隠れている技術的根拠を把握した上で試験を計画・実施することにより、効率の良い、信頼性の高い試験を計画・実施することが可能となる。

項目	年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度
衛星一般試験標準の整備						整備完了△
(その1-3)音響試験ハンドブックの制定	部内作業		▽	▽▽▽	▽	-----

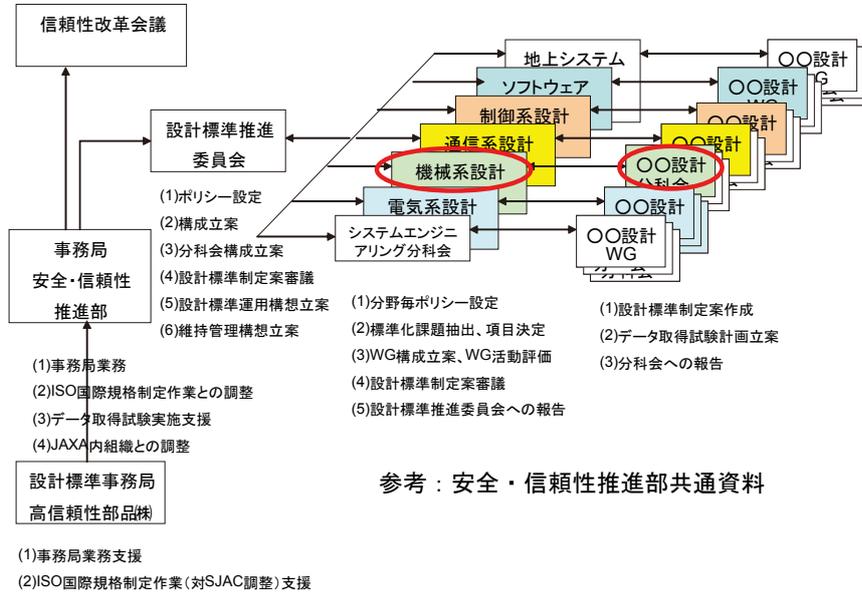
(計6回)

制定

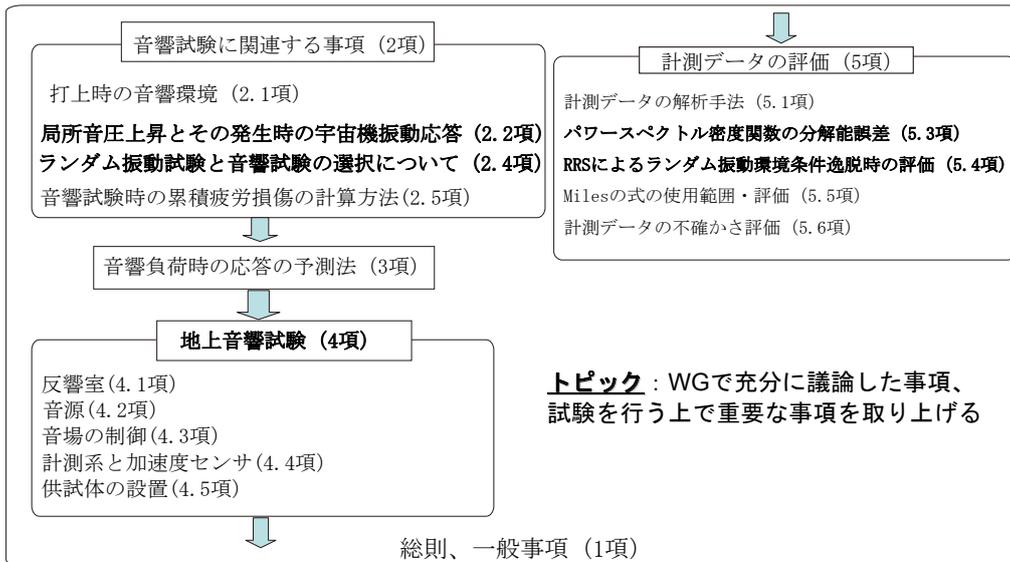
第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



音響試験ハンドブック位置付け及び制定体制



2. 音響試験ハンドブックの内容及びトピック

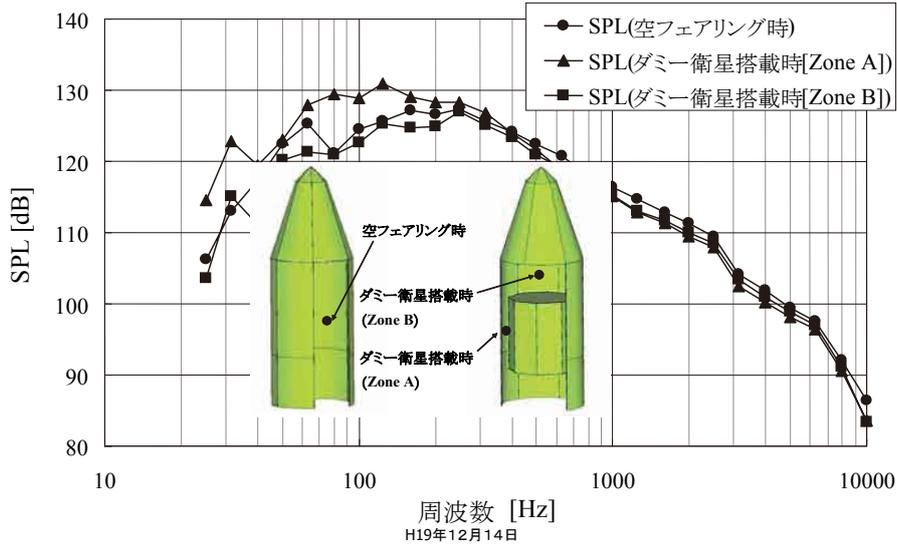




試験センター

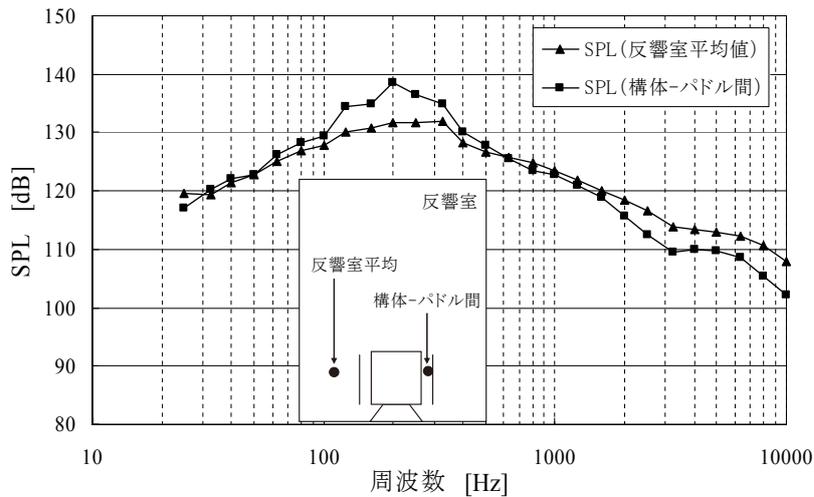
トピック-1:局所音圧上昇とその発生時の宇宙機振動応答 (2.2項)

局所音圧上昇（現象1）：フェアリング内の音圧は衛星搭載によって狭い隙間の音圧レベル大きくなる



試験センター

局所音圧上昇（現象2）：宇宙機構体と太陽電池パドル間のような狭い空間の音圧が音響試験時の反響室の負荷音圧より大きくなる



第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日

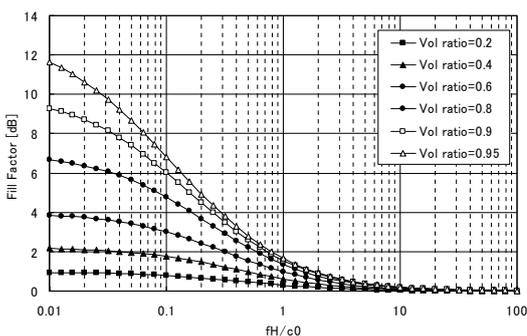


現状：

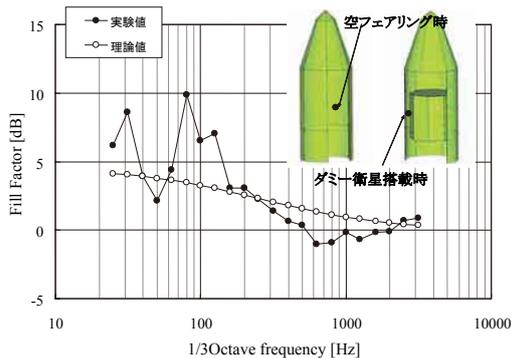
NASAでは音響振動試験基準にフィルエフェクト(Fill Effect)と称し試験基準が規定されている(NASA-STD-7001)。この基準では、簡易式により予測した音圧レベルの上昇分を加えた音響試験を実施すべきであると規定されている。

問題点：

音圧レベルの上昇分を加えた音響試験を実施すべきか。



音圧レベル上昇分の計算結果 (NASA-STD-7001)



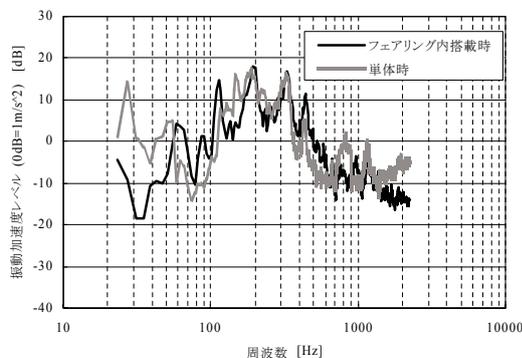
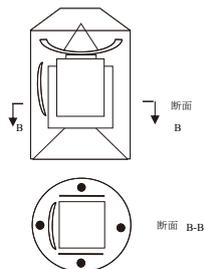
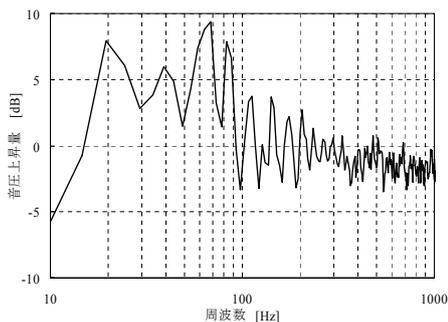
大きな相違

第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



フェアリング内の試験の結果：

100HZで約4dB音圧上昇 (NASA-STD-7001)、振動レベルは下がる傾向！

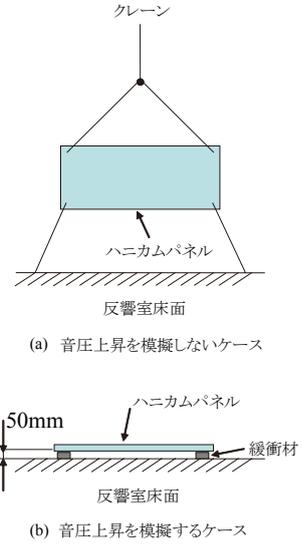
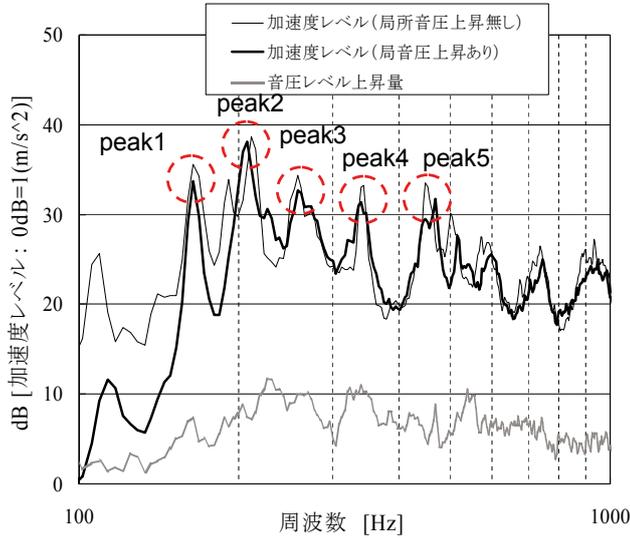


第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



太陽電池パドルの試験の結果：

200~400Hzで約10dB音圧上昇、振動レベルは下がる傾向！

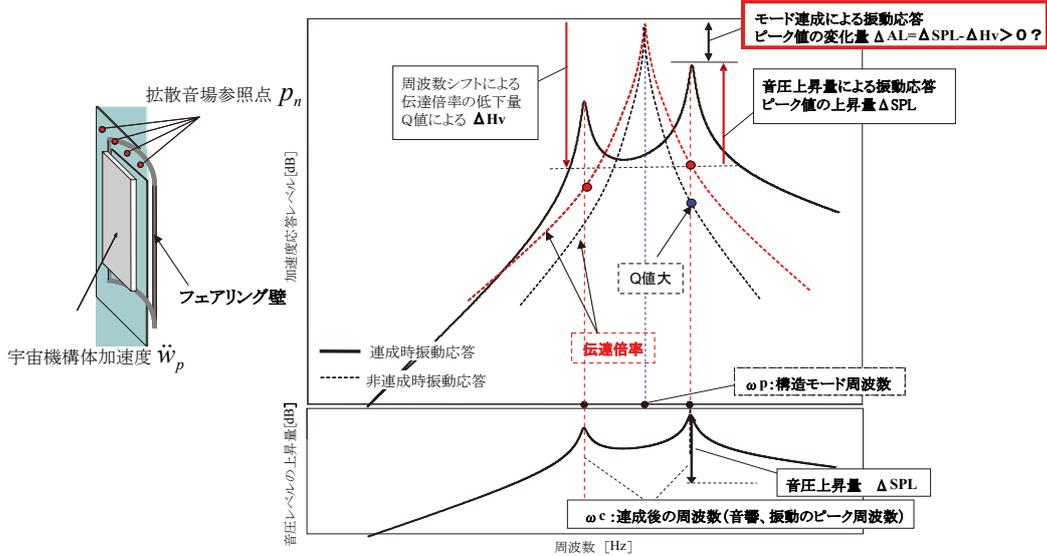


第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



振動レベルは必ず上がらないか？

振動が上がる場合、音圧レベルの上昇分を加えた音響試験を実施すべきか。



第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



検討解析の前提条件：

1. 音響上昇分 Δ SPLは、与えられた値である。
2. 音響の音場による構造加振方式を無視し、音圧レベルのみは音響試験の負荷すべきレベルとする。
3. 規定された音圧上昇の周波数範囲内、構造モードの正確な周波数を事前に推定することが困難であることから、構造の振動応答に対して最も厳しい、あらゆる周波数に構造モードが存在することを仮定しており、振動応答のピーク値を評価する。
⇒ 厳しめで音響試験負荷すべきレベルの上限値であるが、NASA-STD7001により、伝達倍率低下量分が緩和する。
⇒ 伝達低下量が音響上昇量より大きい場合は、局所音響上昇の考慮は不要。
⇒ Appendix Bに基づいた構造と音響の詳細な連成解析、または、開発実績に基づいた技術判断より、振動応答のピーク値の上昇がないことを示せる場合においては、音響試験レベルに発生する音圧上昇量を加える必要はない。
⇒ 本ハンドブックの手順に従い、専門知識が必要としなく音響試験の加音レベルを簡単に求められる。

第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



トピック-2: ランダム振動試験と音響試験の選択について(2.4項)

試験法選択の基本：「試験法がフライト環境を模擬出来ているか」

フライト時の供試体搭載位置における、ランダム振動の主要伝達パスが、フェアリング内部音響が取付点からのランダム振動かによる。

基本的な現象：

振動試験：供試体の振動台取付面から加振機による負荷が入力され、供試体の1次モード以上の周波数では、有効質量が急激に低下し、加速度応答が低下する（高周波でのローパスフィルター効果によって主要周波数以上の高周波では負荷が伝わりにくい）。

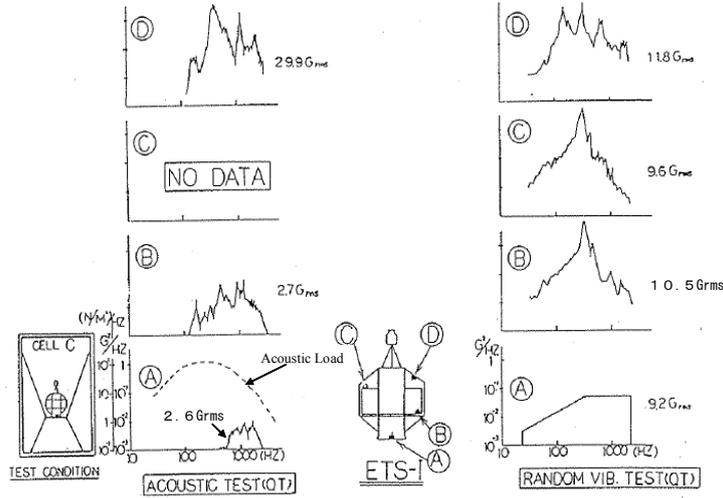
音響試験：入力構造の表面（特に広い表面）に直接作用するため、ローパスフィルター効果がなく、供試体に対して高周波（～10kHz）まで負荷を与えることが出来る。面密度の小さいコンポーネント（太陽電池パドル、アンテナ、燃料タンク、圧力タンク）に適用が多い。

第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



試験センター

音響試験と振動試験の比較例1：O.A.値（実効値Grms）

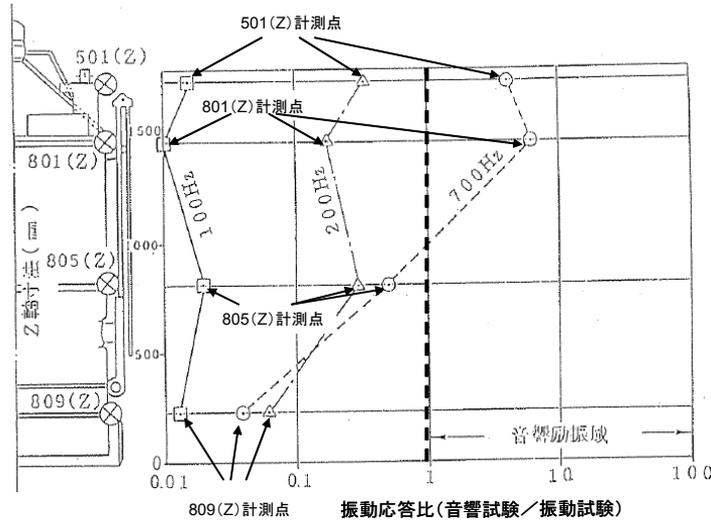


80kg級の衛星（ETS-I）の比較結果：音響試験技術、宇宙開発事業団技術研究本部 試験部GCR-95029、1995年より
 第5回試験技術ワークショップ
 H19年12月14日



試験センター

音響試験と振動試験の比較例2：周波数の観点



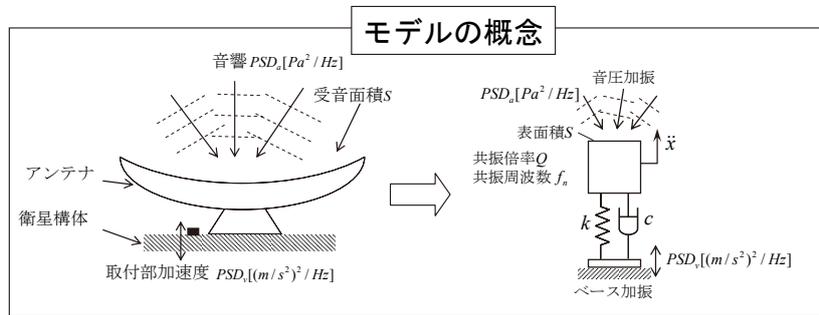
400kg級（ETS-III）の比較結果：音響試験について—人工衛星の音響環境およびその構造応答、
 宇宙開発事業団技術研究本部 試験部RQ-R93032 より
 第5回試験技術ワークショップ
 H19年12月14日



小型衛星、衛星システムの構成機器やコンポーネントなどの取り付けにおいてランダム振動のPSD_vと音響環境の音圧レベル（SPL）が分っている場合、供試体の面密度によって音響と振動のどちらかが主要パスであり、試験として有効であるかを簡易計算法を示す。

音響試験がランダム振動試験よりも供試体に大きな負荷の面密度条件は

$$\frac{m}{S} < \frac{\sqrt{PSD_a(f_n)}}{\sqrt{PSD_v(f_n)}}$$



第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



異なるパスを模擬する場合の注意点：

1. 面密度条件により見積もりの上、模擬試験の負荷レベルを計算し、過負荷レベル（量）を確認する。
2. 例えば音響パスをランダム振動試験により代替する場合、音響試験と同等の振動応答を得るために必要となる振動負荷レベルは、供試体に対し過大負荷となることが多い。フライト時に発生しない不具合が発生しかねない。
3. やむ得なく振動試験で音響試験を代替する場合は、リミット制御により過大な負荷を低減することも一手段である。

第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日

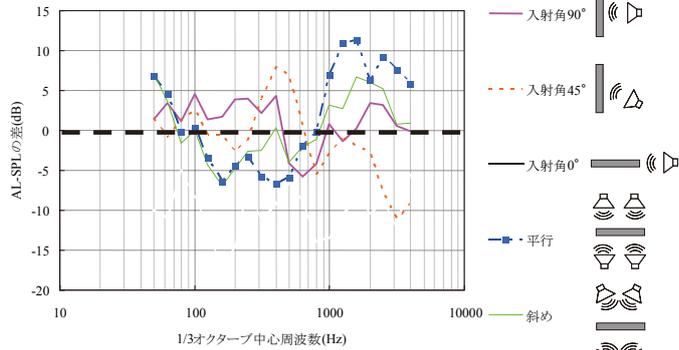


トピック-3:「地上音響試験」に関する項目:理論と試験説明

1. 音場：拡散音場

拡散音場：構造の振動モードは偏りがなく均一的に加振される。

進行波音場：構造の振動モードは偏りが大きく、数の少ない個別なモードのみが加振される。
=>スピーカでの簡易音響試験の場合、試験レベルを決める音圧計測にばらつきが大きく、スピーカ配置や周波数によって過大・過小な負荷となる。



第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



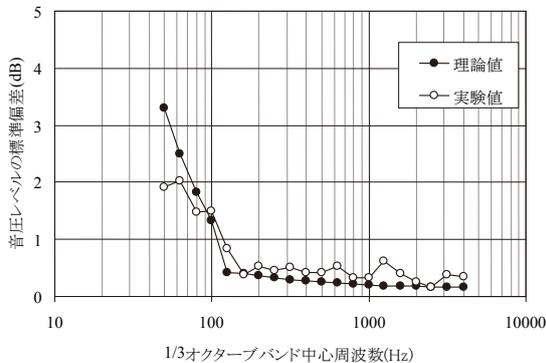
2. 空間音場の均一度：

反響室内の空間二乗平均音圧の正規分散（分散を平均値の二乗で除した値）、

1600m3音響試験設備では100Hz以下で空間の標準偏差が1dB以上となる（6個のマイク）

$$\sigma_{p^2}^2 / m_{p^2}^2 = \begin{cases} 11.4/n\Delta, & (M < 1) \\ \pi\omega\eta/\Delta, & (M > 1) \end{cases} \quad \Delta : \text{バンド幅}, n : \text{モード密度 (単位周波数のモード数)}$$

$$n = \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c_0^3} + \frac{A\omega}{8\pi c_0^2} + \frac{P}{16\pi c_0}$$





試験センター

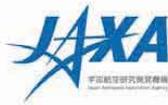
3. 音響試験で使用するマイクの数

任意の3個以上のマイクロホンの平均値を制御に用いれば、全30試験の全ての周波数バンドで試験公差内の制御が可能

マイクロホンの 組合せ個数 [個]	全30試験のうち試験公差内となった試験の数									
	1/1オクターブ中心周波数 [Hz]									
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	O.A.
1	28	28	26	30	30	29	29	30	25	29
2	30	29	30	30	30	30	29	30	28	30
3	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
4	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
5	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
6	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

↓
3個以上

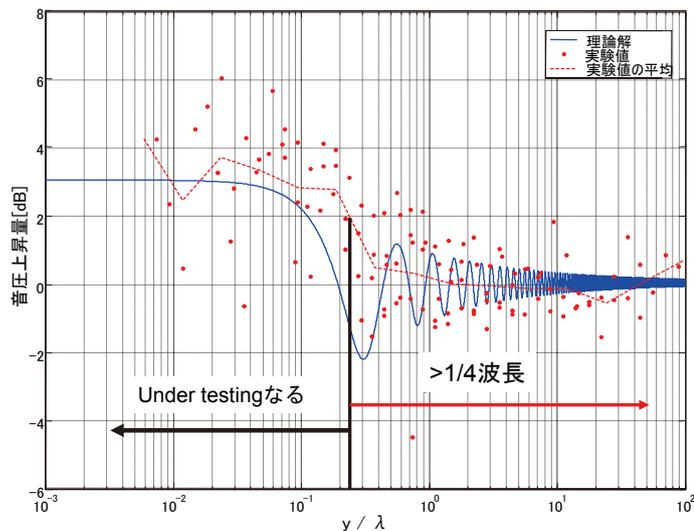
第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



試験センター

4. マイク設置位置と供試体の距離 (>1/4波長)

1/4波長の正規化距離（横軸で0.25以上）であれば、音圧上昇とばらつきが同程度となり、顕著な上昇が見られない



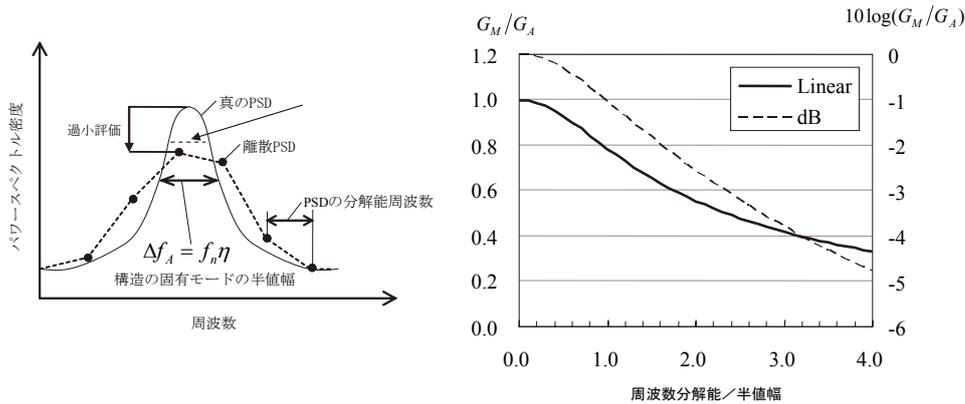


トピック-4: パワースペクトル密度関数(PSD)の分解能(5.3項)

PSDの周波数分解能 (4Hz、8Hz) :

周波数分解能が半値幅の2倍である場合、離散PSDのピーク値は約50%(-3dB)に過小評価される。

例えば、固有振動数が100Hz、減衰係数比が2%の時、半値幅は4Hzであり、PSDの分解能周波数が8Hzであれば、計測PSDの低下量は-2.57 dB。

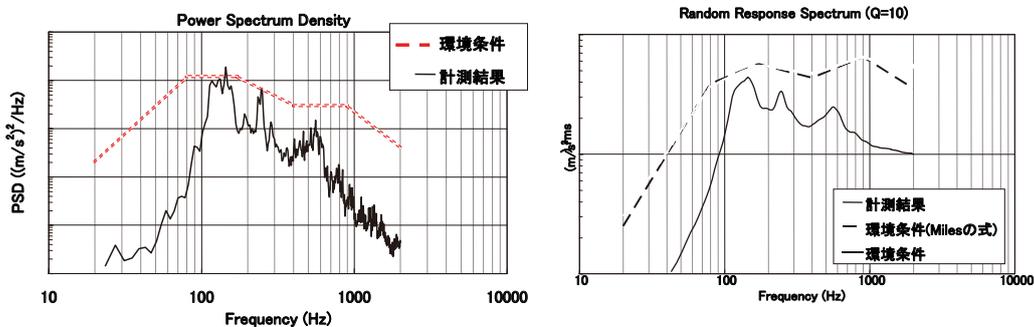


第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日



トピック-5: RRSによるランダム振動環境条件逸脱時の評価(5.4項)

ランダム応答スペクトラム(RRS, Random Response Spectrum) : 音響試験時に機器や構体のクリティカルな固有振動数の共振によって作用した力の実効値、細かい周波数分解による過大な評価を回避する手法である。



第5回試験技術ワークショップ
H19年12月14日

質疑応答

質問者①

問1:冒頭に出ましたトピック1のところに「音圧上昇と宇宙機振動」という図が有りますが、このデータは音響設備で取った実験データですよ。

答1:はい。これは平成12年か13年辺りに4Sフェアリングを使って、音響設備で取ったデータです。

問2:実環境におけるロケット内でのフィルエフェクト関連のデータがあればよいと思いますが実際の飛行時のフェアリングの中のデータというものは存在しないということでしょうか。

答2:詳しくはロケット専門の方によく確認していただきたいのですが、データとしては、たぶん最初のフライト時、1号機のものとはとってあると思うのですが、衛星を搭載してから取ったかどうかにつきましては把握しておりません。なぜかといいますと、音響データは2000Hzという高い周波数まで取らなければいけないのですが、通信系の負荷がかなりかかるので、なるべくとらないというのが実態のようです。

問2:フィルエフェクトの問題には、振動の問題もいろいろ関連していると思うのですが。実際の、実環境データみたいなものが今後の検討に絶対的に必要なのか、あるいはそういうものがなくても今進めている検討でそれなりにやっていけるのか、実際はどうなんでしょうか。

答2:ロケット関係者と話をしたことがあるのですが、技術テレメトリーの取得においてはまず基本テレメトリーを保証しなければなりません。基本テレメトリーデータについては、ロケットと衛星搭載部の加速度、つまり彼らが言うところのCLAの範疇で、正弦波100Hzまでのデータを、必ず毎機取っています。もちろんフェアリングの辺りとか音響とかはとっておりますけれども、中はランダム振動すらとっておりません。つまり、設備の制限が大きいわけです。データを取ることに限ってはロケット側もずっと努力をされているとは思いますが、衛星が載ると、衛星側でチャンネルのほとんど使われている状況で、リアルタイムでデータを落とす方式が必要になりますので、なかなか取りたくても取れないというのが現状なのではないかと思えます。ただし、これからデータを取ろうという動きがありますので、いつになるかは分かりませんが、努力はしていると考えております。

質問者②

問3：太陽電池パドルの試験のところの評価についてですが、実際の衛星の場合ですと、床面のほうは非常に剛性が高いですが、衛星の場合そこは同じ板になるのではないかと思うのですが、板と板の間の音圧上昇と実験をやった結果との違いが、実際はあるのではないかと思うのですが、その辺りの評価というのはどのようなになるのでしょうか。

答3：昔発表した際に質問されたことがあるのですが、本来はその衛星本体と衛星パドルの間のデータがあるはずなのですが、唯一データを見つけた DRTS の試験は、サンプルにフライト品ではなく何か別の板を使ってやっている試験でした。しかし、そこと比較しても良かったかもしれません。まず、ここが弾性体になったらどうなるか、という質問に先に答えさせていただきますと、結果的にはシフトするわけですが、なぜシフトするのかということにつきましては音響ハンドブックに詳しく書いてあります。つまり、弾性体と音響のカップリングによるシフトです。というのは、もしここが剛体であれば、この音圧のピーク値が上がり、音圧レベルも上がります。その上がった音圧レベルの周波数は、このキラビティ、つまり狭い空間の音響モードに一致します。しかし、もしここが弾性体だとすると、ここの振動は音響モードとパネルの振動モードが連成したものとなり、それによって、音圧の周波数が変わります。ハンドブックの中では、そういった内容を説明しています。ではここを弾性体にしたらどうなるかという、さらにこの音響とここの弾性体が連成し、その結果、さらにシフトします。つまり、シフトの量が違うだけで、現象は変わらない、ということです。下がる場合はさらに下がり、上がる場合はさらに上がる、ということが理論的に説明できると思います。

質問者③

問4：フィルエフェクトによる音圧上昇の現象とそれに対する緩和の考え方と、先の長濱さんのフォースリミットの考え方は、なんとなく根本が同じであるような気がするのですが。基本的に連成系というように考えて、その時にソース側のほうの条件がかかってくるという意味において、考えは全く同じだと思うのですが。

答4：まったくおっしゃるとおりです。全部こちらでフォースリミットは同じ、まあこっちも同じなんですけれども（「太陽電池パドルの試験の結果」のページを指しながら）、本来は上昇するはずのピークが飛び飛びの周波数に存在していて、振動も同様なのですが、フライト時に飛び飛びのピークがあるので、そこをスペックすることによって過負荷を軽減します。スペックするというのはフラットにする、無差別にする、ということです。実際、ピークの共振周波数のところには連成の影響によって大きい負荷がかからない、という点

で、長濱さんの発表と同じです。共振周波数の高いところにはピークは無く、ずれた低いところに最大のピーク値が来るというのは連成のせいなのですが、これは同じ原理によるものです。

問5: フォースリミットというのが NASA から提唱されていますが、フィルエフェクト解析の本家本元の NASA の方があまりその辺り深く立ち入っていないという感じがするのですが。

答5: そうですね。NASA のフィルエフェクトはどちらかというと音響試験のもともとのナロバンドを見る目的ではなくて、1/3 オクトバンドとか 1/1 オクトバンドを解析しようという趣旨だとは思いますが、どうしてもナロバンドを見られない、ディップとかカップリングを見ることができない、という結果になってしまっているのではないかと、という推測しか私からは説明できません。NASA の規定は、ブロードバンドといいますが 1/3 オクトバンドの SEA から結果を引用したものかもしれません。フォースリミットに関しましては、NASA は初期のナロバンドで自由度 (モード) のカップリングを成功させようと努力しているという現状ではないかと思えます。