1600㎥音響試験設備における地上音響試験データとロケット打上げ時における フライトデータの定量的比較による音響環境”拡散音場”模擬の妥当性検討

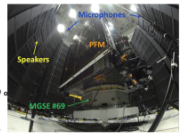
1.背景

➢ 1600㎥音響試験設備　反響室

➢ 現在、JAXAの宇宙開発において、宇宙機の音響試験はロケットで規定されている試験レベルと試験時間で反響室内に作りだした“拡散音場”において試験を行うことが要求されている。

➢ “拡散音場”とは、音のエネルギー密度が空間的に一様で、全ての方向に対するエネルギー流れが確率的に等しいとみなされる分布をしている音場である。音響試験の観点から言い表せば、“拡散音場”は宇宙機供試体の高次振動モードを励起することができ、また、反響室内での供試体の設置位置条件を守れば、非常に安定した試験を実現できる音場である。[1]（左図参照）

➢ 近年、コスト削減の観点から、反響室における“拡散音場”を用いた試験方法に代わる音響試験方法として、“直接音場”音響試験(Direct Field Acoustic Testing - DFAT)の研究・検証活動が活発化している。”直接音場”音響試験は、スピーカ群で供試体を囲み、マイクロホンによって計測した音圧によって音場環境を制御する。[2]（右図参照）



➢ DFAT　スピーカ加音

Paul Bielloch, **Test Analysis Comparison for a Spacecraft Direct Field Acoustic Test** ,Spacecraft and Launch Vehicles Dynamic Environments WorkshopJune 2–4, 2015

2.課題

➢ 地上音響試験の最適化において、フライトデータ、反響室内の地上音響試験データ及び”直接音場”地上音響試験データを定量的に評価し、過大・過小負荷なくフライト音響環境を模擬する有効な試験方法を実現することが重要である。

➢ これまでに、ジョイントアクセプタンスを用いて、「フライトデータ」、「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」及び「”直接音場”の数値シミレーション」の定量評価がなされ、「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」 が「フライトデータ」のジョイントアクセプタンスの包絡値(Lift Off直後及び遷音速飛行時)よりも厳しめであることや「”直接音場”の数値シミレーション」において”直接音場”音響試験にて”拡散音場”を実現するための指針がまとめられた。また、「1600㎥音響試験設備の反響室における地上音響試験データ」と「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」についても定量的な比較がなされている。 [2][3]　しかし、「1600㎥音響試験設備の反響室における地上音響試験データ」と「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」の定量的な比較においては、地上音響試験データのサンプル数が少なく(6サンプル)、反響室内の”拡散音場”模擬の妥当性を評価するうえで検討が不十分であった。

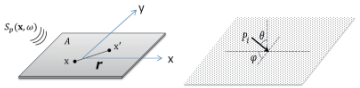
➢ 本検討では、 1600㎥音響試験設備の反響室における過去の地上音響試験データ90サンプル(試験11)を新たに抽出し、これらのデータを用いて「反響室内”拡散音場”音響試験データ」と「”拡散音場”の理論値-sinc関数-」及び「フライトデータ」との定量的な比較を行い、 1600㎥音響試験設備の反響室における”拡散音場”模擬の妥当性検討を行った結果を紹介する。

3.検討理論

◆拡散音場加振の正規化クロススペクトル

➢ 正規化クロススペクトル$C_{p_norm}(\mathbf{x},\mathbf{x}',\omega)$は、2点の計測点x及びx′におけるパワースペクトル密度$S_p(\mathbf{x},\omega)$及び$S_p(\mathbf{x}',\omega)$並びに、２点間のクロススペクトル密度 $C_p(\mathbf{x},\mathbf{x}',\omega)$ を用いて表す。また、平面進行波が入射角θで右図のように入射すると仮定すると、下記式の通り表される。

$$C_{p_norm}(x,x',\omega)=\frac{C_p(x,x',\omega)}{\sqrt{S_p(x,\omega)\cdot S_p(x',\omega)}}=Re\left(e^{-jk_0 r\cos(\theta)}\right)$$



➢ ここで、k_0は音場の波数（$=\omega/c_0$），c_0は空気中の音速，r は2点間の距離$|\mathbf{x}'-\mathbf{x}|$である。

➢ 拡散音場（Diffuse Acoustic Field，DAF）は場所によらず均質な音圧パワースペクトル$S_p(\mathbf{x},\omega)=S_p(\mathbf{x}',\omega)=S_p(\omega)$を有し，3次元の拡散音場における加振力の正規化クロススペクトル $C^{DAF}_{p_norm}(\mathbf{x},\mathbf{x}',\omega)$は，下式に示すsinc関数にて表すことができ，構造上2点間の距離$r=|\mathbf{x}'-\mathbf{x}|$にのみに依存する。なお，sinc(0)は同一点の相関を意味し，値は1となる。[4]

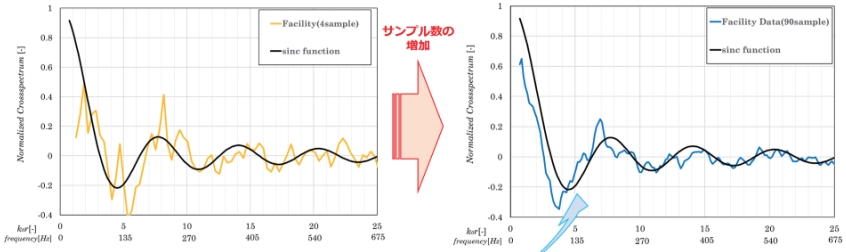
$$C^{DAF}_{p_norm}(\mathbf{x},\mathbf{x}',\omega)=\frac{1}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\cos(k_0 r\cos(\theta))\sin\theta\, d\varphi d\theta=\frac{\sin(k_0 r)}{k_0 r}=\mathrm{sinc}(k_0 r)$$

➢ 本検討では、上式を「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」と言い表し、「反響室内音響試験データ」及び「フライトデータ」の正規化クロススペクトル vs K_0rを算出し、比較した結果を示す。

4.データ分析

◆「反響室内音響試験データ」と「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」の比較

(左下図：4sample平均値，右下図：90sample平均値)



➢ 反響室内音響試験設備データのサンプル数増加するに従って、「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」に近づくことがわかる。
⇒つまり、1600㎥音響試験設備の反響室は”拡散音場”の模擬に対して妥当性があると定量的に言える。

◆「反響室内音響試験データ」と「フライトデータ」の比較

音響試験データ抽出　Facility data（1600㎥音響試験設備）

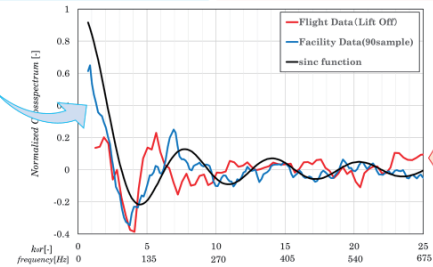
① 1600㎥音響試験設備の過去11試験の制御用マイクロフォン計測データ90サンプルを抽出
② 抽出データにおいて正規化クロススペクトルを算出
③ 正規化クロススペクトルをk_0r軸にプロットし平均値を算出

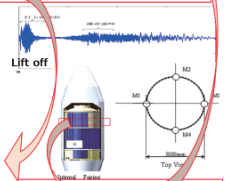
フライトデータ抽出　Flight data　Lift Off直後（ H-IIB1号機）

① H-IIB1号機打上げ時のフェアリング内音響計測4点6サンプルを抽出
② 抽出データにおいて正規化スペクトルを算出
③ 正規化クロススペクトルをk_0r軸にプロットし平均値を算出

解析条件

・サンプリング周波数　64kHz
・Overlap　50%
・Hanning window





解析条件

・サンプリング周波数　9.6kHz
・Overlap　50%
・Hanning window

➢ 「Lift Off直後のフライトデータ」は、「反響室内音響試験データ」及び「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」に近いとは言えず、正規化クロススペクトルの比較の観点においては、Lift Off直後の音響環境は”拡散音場”であるとは言い難い。

5.結論と今後の展望

◆結論

➢ 「1600㎥音響試験設備における地上音響試験データ」と「ロケット打上げ時におけるフライトデータ」を用いて、 「”拡散音場の理論値-sinc関数-”」と比較した結果、 “1600㎥音響試験設備の反響室は”拡散音場”を模擬に対して妥当性があること”及び” Lift Off直後の音響環境は”拡散音場”とは言い難いこと”を示した。

◆今後の展望

➢ フライト環境のLift Off直後だけでなく、遷音速飛行時のフライト環境の正規化クロススペクトルを評価する。また、フライトデータのsample数を増やす。
➢ 地上試験とフライト環境において、正規化クロススペクトルの観点だけでの評価ではなく、“波数空間における特徴”や“尖度”の違いなどを評価する。
➢ 上述の評価結果を用いて、”直接音場”音響試験の理論検討・適用検討など、過大・過小負荷なくフライト音響環境を模擬する有効な試験方法の実現に資する検討を続けていく。

<参考文献>
[1]JERG-2-130-HB002A 音響試験ハンドブック
[2]施 勤忠 ,スピーカ群による低コストの音響試験方法に関する有効性, 第14回試験技術ワークショップ（2016.10.20）
[3]Qinzhong Shi , Hiroki Akagi , Shigemasa Ando , *The effectiveness of reverberant acoustic test by investigating the sound characteristics and vibration responses in comparison between test and flight telemetry acoustic data* , 29th Aerospace Testing Seminar (October 2015)
[4]赤城 弘樹,安藤 成将,施 勤忠, 一様デルタ相関加振の適用による拡散音場加振時の構造振動応答計算法

This document is provided by JAXA.