

## 6.8. 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

宇宙航空研究開発機構

環境試験技術ユニット

施 勤忠 氏



# 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

## 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

環境試験技術ユニット 施 勤忠

### 概要:

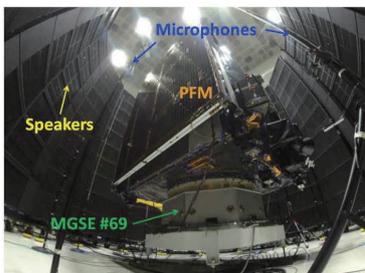
1. 背景
2. 進行場音響・拡散音響に関する音場モデル化
3. スピーカ群による音響試験の場合における音源、制御等への指針
4. 打上時の音響環境に対する音響試験方法の有効性
5. まとめ

第14回 試験技術ワークショップ  
2016年10月20日 JAXA 筑波宇宙センター

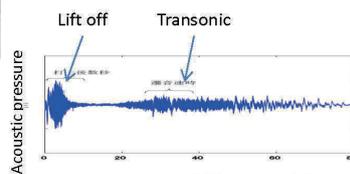
1

## 1. 背景

- ✓ 世界の宇宙機試験標準 (JAXA/ESA/NASA等) で宇宙機音響環境試験は拡散音場を用いて実施することになっており、最近、欧米でコストの安い音響試験方法としてスピーカ群で衛星を囲み、音響試験を実施する研究・検証活動が活発化されている (Orbital ATK、T.A.S.-F等、本WSで9、11回にて紹介した)。
- ✓ NASA標準の改定版 (NASA-HDBK-7010) では、直接音場音響試験 (DFAT) を認めるようにした。
- ✓ DFATは音響の空間均一度、無相関度等の改善を目標として、拡散音場に近づくように改善つつあるが、セットアップ等によって加振結果の変化や拡散音場での高い再現性の確保が課題。
- ✓ 拡散音場が打上音響環境を有効に模擬 (Test Effectiveness) できるかどうかという疑問が明らかになっていない (Under-test/Over-test?)。
- ✓ 本研究発表では、拡散音場での音響試験の有効性を明らかにすると共に、直接音場の試験セットアップ、音源への要求、制御に関する指針を示し、直接音場の実現性を示す。



Paul Billeloch, Test Analysis Comparison for a Spacecraft Direct Field Acoustic Test, Spacecraft and Launch Vehicles Dynamic Environments Workshop June 2-4, 2015



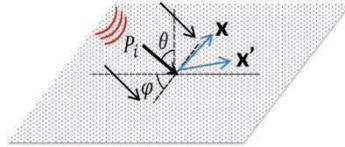
Ref: JERG-2-130-HB002音響試験ハンドブック



## 2. 進行場音響・拡散音響に関する音場モデル化



$$p_i(\omega) * \cos(kr \cos(\theta)) \sin \theta$$



入射角度 $\theta$ 、エレベーション角 $\phi$ 、から平面に入射される平面進行波 ( $k = \omega/c_0, c_0$ : speed of sound,  $\omega$ : frequency)

正規化Cross-Spectrum Density(CSD)(最大値=1.0):

- 平面進行波(直接音場)

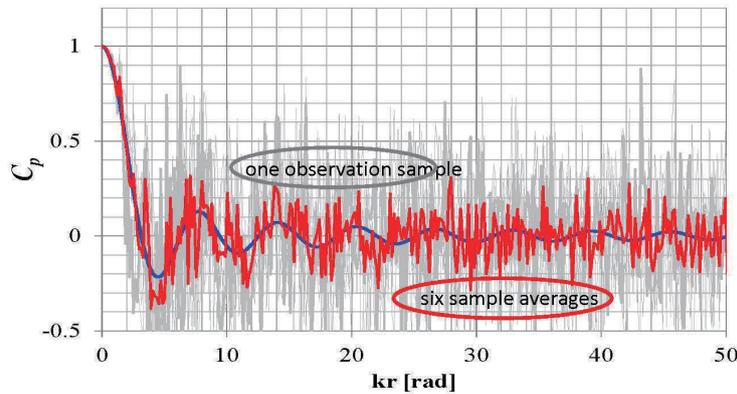
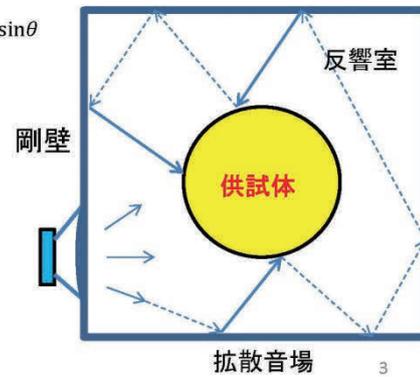
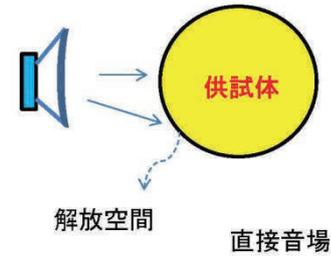
$$C_p(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) = \frac{p_i(\mathbf{x}, \omega) * p_i(\mathbf{x}', \omega)^*}{|p_i(\mathbf{x}, \omega) * p_i(\mathbf{x}', \omega)^*|} = \cos(kr \cos(\theta)) \sin \theta$$

- 3D空間の拡散進行波(反響室)

$$C_p(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \cos(kr \cos(\theta)) \sin \theta \, d\phi d\theta$$

$$= \frac{\sin(kr)}{kr} = \text{sinc}(kr)$$

$r = |\mathbf{x}' - \mathbf{x}|$ は、2点間の距離。



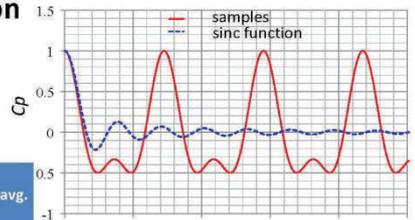
Plane acoustic waves from incident angles in infinite space (in case of 3 incident, 3 elevation waves)

拡散音場は、進行波に対してあらゆる「無相関」の入射角度 $\theta$ 、エレベーション角 $\phi$ がある平面進行波で生成できる。

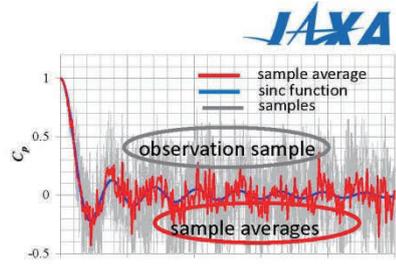
- $C_p$ が一つのサンプルの場合は、ランダム性(角度のランダム性による)があり、確率的な処理が必要である。全角度における積分は期待値(平均値)として一定の値になる。
- この平均は計測マイクロホン対の $C_p$ における平均値から求められる。計測点数が多い程、その平均値の変動が小さい。

Numerical simulation

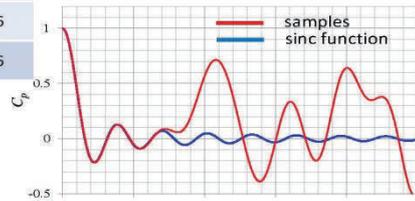
	No. plane waves	No. Mic. pairs	No. avg.
Case 1	3x3=9	100	6
Case 2	10x10=100	100	6
Case 3	33x33=1089	100	6



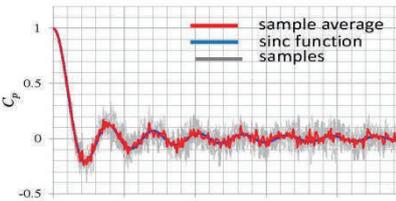
determined incidence and elevation angles(case1)



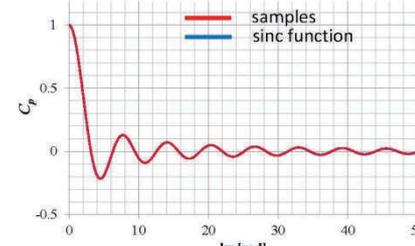
random incidence and elevation angles(case1)



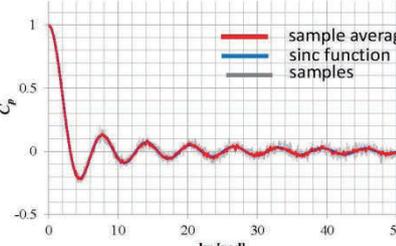
determined incidence and elevation angles(case2)



random incidence and elevation angles(case2)



determined incidence and elevation angles(case3)



random incidence and elevation angles(case3)

スピーカを用いた簡易音響試験と反響室での音響試験の比較実験

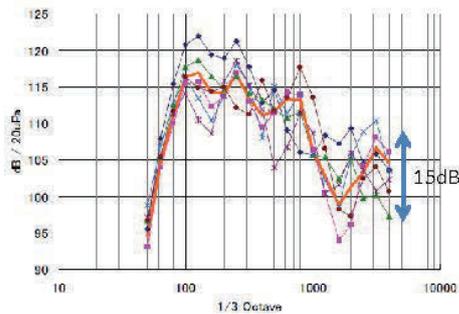
Ref:JERG-2-130-HB002音響試験ハンドブックより



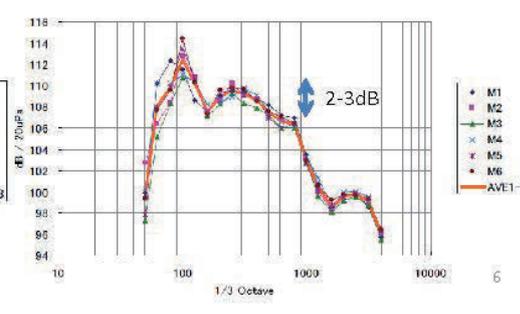
1/3 Oct. Spectrum Averaging



1/3 Oct. Spectrum Averaging



● M1  
 ● M2  
 ● M3  
 ● M4  
 ● M5  
 ● M6  
 斜めAVE1-3



● M1  
 ● M2  
 ● M3  
 ● M4  
 ● M5  
 ● M6  
 斜めAVE1-6



### 3. スピーカ群による音響試験の場合における音源、制御等への指針

- ✓ **スピーカの配置:** スピーカ群による直接音場(多くの進行波)を用いて拡散音場をすることができるが、各方向に配置又は反射面を設け、**多くの方向からの音場生成が重要**。供試体へのスピーカ配置を多くの方向に配置すれば、より拡散音場に一致する。
- ✓ **音源の要求:** スピーカの音源は**相関の無いランダム音源**(信号発生器)を用いることが直接音場方法として重要である。**多くの独立なランダム性の音源**によって拡散音場により近似することができる。
- ✓ **制御手法:** 音源の独立性を持たせるため、多くの入出力を制御する手法(MIMO:Multiple Input, Multiple Output)がスピーカ群による音響試験では不可欠。

7

### 4. 打上時の音響環境に対する音響試験方法の有効性

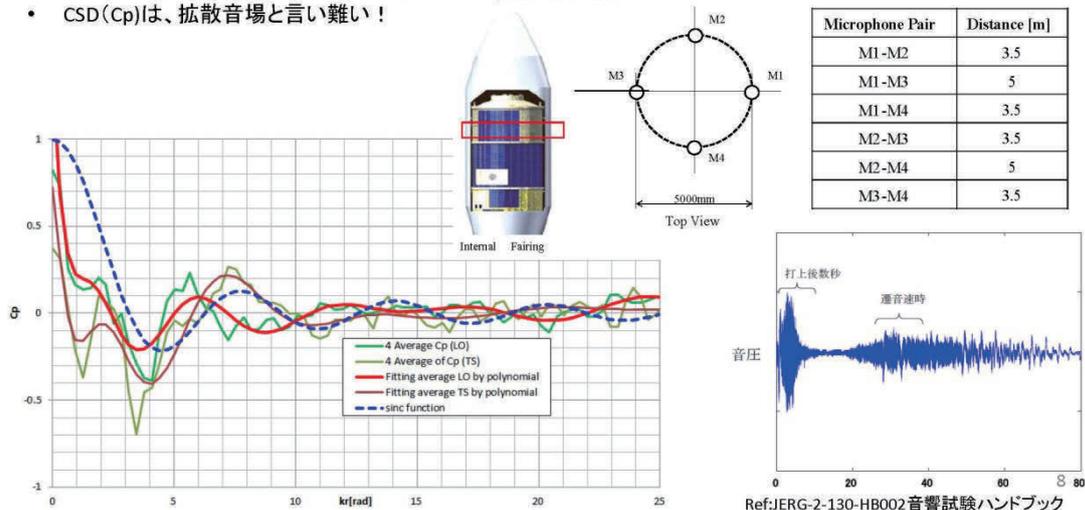


問(1): 打上時の音響環境は何音場?

問(2): どの音響試験法が打上時の音響環境試験として有効な試験方法か?

(Under-testもOver-testも少ない?)

- HTV#1打上時フェアリング内音響計測(4点)データを用いて打上時の音響をモデル化にする。計測点が少ないため、4点計測データを6ペアーの組み合わせを作成し、それらの平均値、多項式を用いてスムーズ化によって平均値の変動を低減する。
- 打上時の音響レベルの評点(Lift off, Transonic)を解析する。
- CSD(Cp)は、拡散音場と言い難い!



### 音響負荷時の構造振動応答解析

- 構造表面に音響負荷PSD (power spectrum density)  $S_p(x, \omega)$  における構造部位  $x$  の振動加速度 (PSD)  $S_a(x, \omega_r)$  を下記のモード足算で求める。

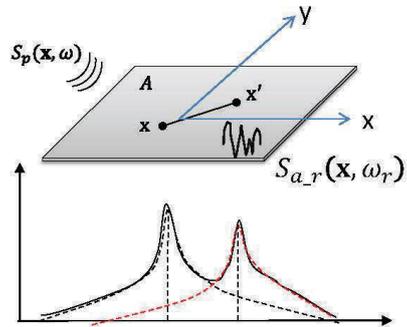
$$S_a(x, \omega_r) = \left( \sum_{r=1}^{\infty} \frac{A^2 4 S_p(\omega_r) j_{rr}(\omega_r)}{A_r^2 |Z_r(\omega_r)|^2} \varphi_r^2(x) + \sum_{r \neq s} \frac{A^2 4 S_p(\omega_r) j_{rs}(\omega_r)}{A_r A_s Z_r(\omega_r) Z_s^*(\omega_r)} \varphi_r(x) \varphi_s(x) \right) \omega^4$$

- Joint acceptance  $j_{rr}$  は音響加振に対して構造振動モード応答への寄与度であり、構造振動と音響連成の度合いを示す。

$$j_{rr}(\omega) = \frac{1}{A^2} \int_A \int_{A'} \varphi_r(x) C_p(x, x', \omega) \varphi_r(x') dx dx'$$

$$Z_r(\omega) = -\omega^2 + j2\zeta_r \omega \omega_r + \omega_r^2$$

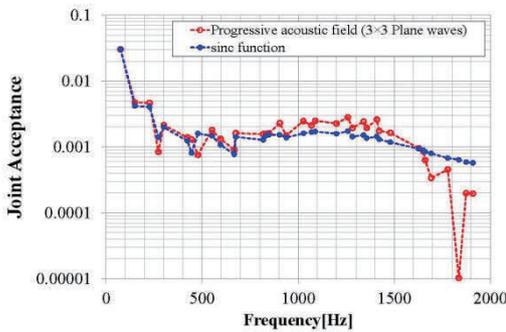
$\varphi_r(x)$  is r-th structural mode shape



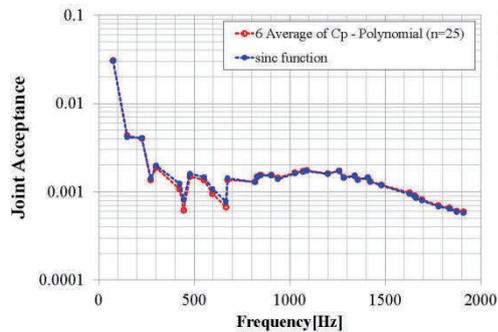
- 各振動モードのピーク値 (共振周波数において) 対象モードの共振周波数において他モードの裾部分を無視

$$S_{a,r}(x, \omega_r) \cong \frac{4A^2 S_p(x, \omega_r) j_{rr}(\omega_r)}{A_r^2 \cdot 4\zeta_r^2}$$

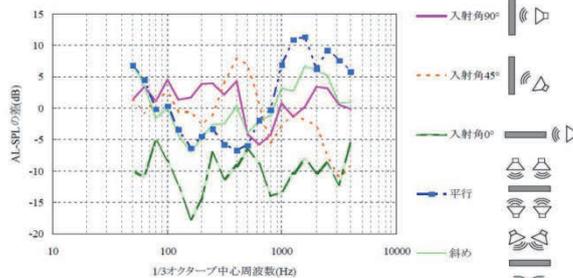
Where,  $\omega_r$  is the rth mode frequency,  $\zeta_r$  is rth mode damping ratio,  $A_r$  is rth mode mass of structure.



smoothed 3x3 determined angle progressive plane waves and sinc functions



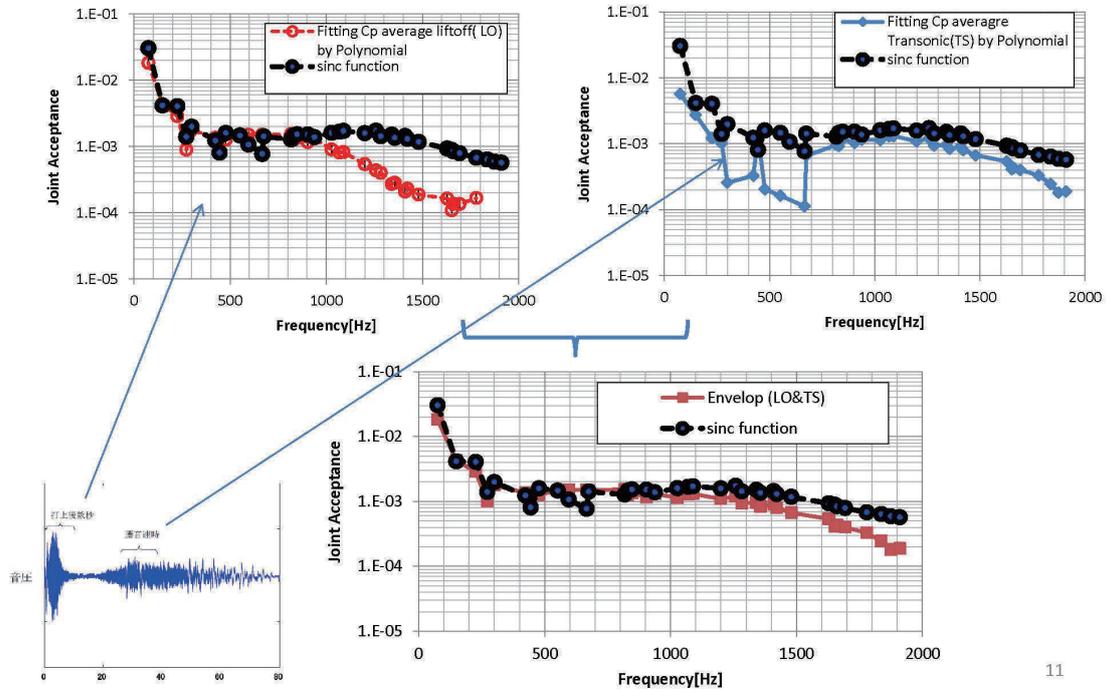
smoothed 100 random angles plane waves and sinc functions



スピーカ設置角度によって振動応答の変化 (試験結果)

- 相関性がある3x3の平面進行波による音響加振では拡散音場と比べ、Over-test (低周波)やUnder-test (高周波)があり、これらの現象は音響入射角 (スピーカの設置位置) によって  $j_{rr}$  が大きく変わることがある。
- 10x10=100個の無相関ランダム入射平面波による音響加振では拡散音場と一致し、数多くのあらゆる方向から入射されるため、供試体の設置位置に寄らなく、試験結果の再現性がよい。

- 打上時の音響は拡散音場ではなく、LO時は低周波振動モードが加振され、TS時は高周波振動モードが加振されるが、但し、LOとTSの包絡は拡散音場加振に近づく。
- 拡散音場は打上時の環境試験手法としてUnder-testがなく、高周波においてOver-testが僅かにあるものの、試験結果の再現性がよく手法の有効性を示した。



11

## 5. まとめ



- 打上時の音響環境は拡散音場ではなく、LO及びTSにおいて加振されるモード周波数がことなるが、拡散音場はLO及びTSにおける振動応答が包絡され、有効な試験手法であることを初めて示した。
- 拡散音場を生成する方法は反響室が従来の方法であるが、設備製作のコストや維持費等で大型サブシステム、アンテナ、SAP等の供給業者や新規参入者に対してコストの安いスピーカ群による試験方法は欧米では高いニーズがあり、その研究開発が活発になっている(本WSで9, 11回にて紹介した)。
- 本研究では、スピーカ群の将来性を有することを示し、設置方法、音源の要求及び制御等に関する指針を示した。

12

## 質疑応答

ワークショップ進行の都合上、質疑応答を割愛



図 6-3 ご講演の様子