

音響振動応答予測手法の検討および試験実証

概要

宇宙機開発の設計解析において、**音響負荷時の構造振動応答**を求める問題は、宇宙開発初期から長年の難しい課題となっている。これは、音響加振による**ランダム振動環境**が数十Hzから数kHzと広帯域であり、有限要素解析(Finite Element Analysis, FEA)により作成した構造数学モデルに不確実性が生じる周波数帯を含むためである。



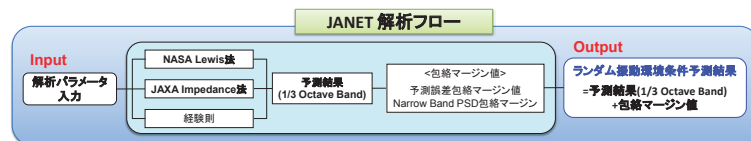
この課題の解決のため、環境試験技術センターではJANET(JAXA Acoustic analysis Network system)の開発を初めとする、**衛星機体パネル上の搭載機器インタフェース部ランダム振動応答の環境設計条件を高精度に予測する手法**を検討してきた。これらの手法および試験実証について紹介する。

JANET(JAXA Acoustic Network Analysis)

音響振動解析システム(JANET):

衛星機体パネル上に搭載される機器のインタフェース部のランダム振動応答の包絡値(**ランダム振動環境条件**)を予測する解析ツール

インターネットを介して利用可能(JAXA環境試験技術センターサーバ)であり、解析に必要なパラメータは、機体パネル(ハニカムパネル)の仕様(寸法・材質等)と搭載機器の質量のみ



統計的エネルギー解析(Statistical Energy Analysis, SEA)理論に基づき導出された
機体パネルの振動エネルギー予測手法

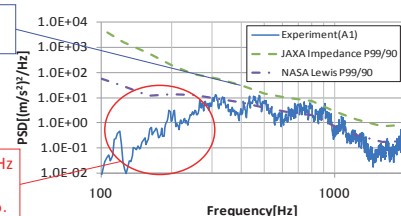
→NASA Lewis法, JAXA impedance法, 経験則

予測誤差やPSDを包絡するためのマージン値

→JAXA衛星(9機:加速度点数約400)を用いた統計処理を行い、**P95/50・P99/90のマージン値**を算出

(※) JANET予測式の理論及び操作方法に関するマニュアルは利用者がサーバからダウンロード可能

300Hz以上の高周波では、精度良く予測され試験結果を包絡している。



SEA手法の性質上、モード密度の低い300Hz以下の低周波域では過大予測となる傾向があり、個別モードの予測が不可能である。

JA (Joint Acceptance)を用いた予測手法

低周波域の個別モードピーク値の予測が可能な、**ジョイントアクセプタンス**を用いた簡易音響振動解析の方法
サブシステムや小型衛星の構造有限要素法モデルのみを用いて、音場をモデル化しない非線成モデルにて、**拡散音場における振動応答のPSD値**を計算する手法



ジョイントアクセプタンス:

$$j_{rr}(\omega) = \frac{1}{A^2} \int_A \int_A \phi_r(\mathbf{x}) C_p(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) \phi_r(\mathbf{x}') d\mathbf{x} d\mathbf{x}'$$

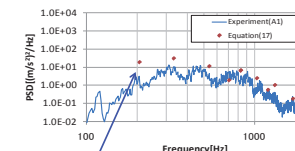
拡散音場音圧に対する構造物の応答のしやすさを表す

$S_p(\omega)$ 音圧PSD(拡散音場)

ジョイントアクセプタンスを用いた加速度PSD:

$$S_{acc}^{diff}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{A^2 S_p(\omega_r) 4 j_{rr}(\omega_r)}{\Lambda_r^2 |Z_r(\omega_r)|^2} \phi_r^2(\mathbf{x})$$

応答ピークに注目
モード重ね合わせを無視
固有振動数 ω_r
本検討で使用する式(グラフ上:Equation)



個別モードが精度良く予測されている。

拡散音場のクロススペクトル:

$$C_p(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \omega) = \frac{\sin(k_0 |\mathbf{x}' - \mathbf{x}|)}{k_0 |\mathbf{x}' - \mathbf{x}|} = \text{sinc}(k_0 |\mathbf{x}' - \mathbf{x}|)$$

前提条件:
音響と構造の非線成モデルを利用
構造の隣接モードの寄与を無視
構造による音場の回折を無視

FEA-SEA統合法を用いた予測手法

低周波数(JA), 高周波数(JANET)に適した解析手法はあるが、FEA・SEA適用外の中周波数(200Hz-400Hz)では信頼性の高い解析ができていない

この欠点を克服し、中周波数の音響振動を高精度に解析するための手法として、宇宙機の打上げ時に遭遇する全周波数を対象とした**FEA-SEA統合法**に着目、宇宙機音響負荷時の構造振動応答における適用法を検討

FEA-SEA統合法:

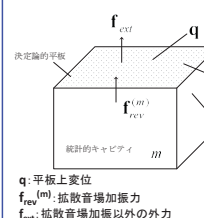
平板はFEA、キャビティはSEAを用いてモデル化、直接場への放射(FEA⇒SEA)と反響場負荷(SEA⇒FEA)が等しいとする相反性を前提、パワーフロー平衡を考慮し、SEAサブシステムがランダムに変化するときの平板応答を求める手法(自由度毎)

外力のクロススペクトルマトリクス

$$\langle S_{ff} \rangle = S_{ext} + \sum_m \{ \alpha_m \text{Im}(\mathbf{D}_{dir}^{(m)}) \}$$

変位応答のクロススペクトルマトリクス

$$\langle S_{qq} \rangle = \mathbf{D}_{tot}^{-1} \langle S_{ff} \rangle \mathbf{D}_{tot}^{-H}$$

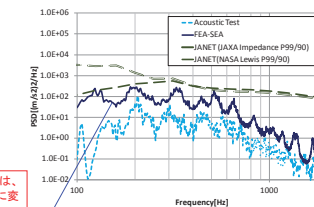


$$\alpha_m = \frac{4E_m}{\pi \omega n_m}$$

キャビティ(SEA)のエネルギー
キャビティ(SEA)のモード密度

\mathbf{D}_{tot} : 平板の動剛性+放射減衰

FEA-SEA統合法で求める決定論的サブシステムの応答は、決定論的応答ではなく、統計的サブシステムがランダムに変化するときのアンサンブル平均応答である



宇宙機パネルを模擬した、ハニカムパネルの音響試験結果と、統合法、JANETとの比較
⇒中周波数を含む全周波数で精度良く予測されている。

今後は、モデルの違いによる精度検証やマージン値の検討等、宇宙機に適したFEA-SEA統合法の検討を行い、JANETの適用外周波数の補充、さらに宇宙機の音響構造振動応答予測手法としての実用化を目指す。