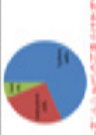


コンポーネント衝撃試験省略に向けた検討

背景

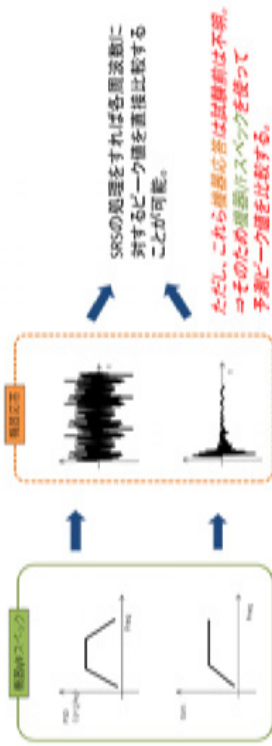
- コンポーネント衝撃試験の主目的は事象負荷性を確認することであるが、過去10年のJAXA衛星におけるコンポーネント衝撃試験起因の不具合の報告事例は極めて少ないのが実情である。
- 一方、コンポーネントの衝撃試験は、要求スペックを満足する試験系を組むこと自体が困難な場合も少なくなく、通負荷による供試体損傷の可能性やコスト増など開発現場の悩みの種にもなっている。
- 海外の例をみると、NASAではコンポーネント衝撃試験の省略ガイドラインがMIL-STD-1540E(試験標準)にて2008年頃から明記されている。
- 本検討では、理論と実試験のアプローチからコンポーネント衝撃試験の省略を検討し、そのガイドラインをJAXA宇宙機一般試験標準に明記することを目的とする。
- FY24から環境試験技術センターで行っている検討内容について紹介する。



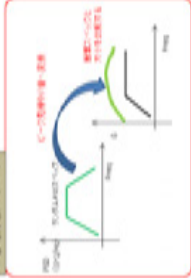
省略検討1

ランダム振動試験スペックとの比較による省略 1/2

- ランダム振動試験における機器応答が衝撃試験のそれよりも大きいことは、その場合のランダム振動試験スペックの方が衝撃試験スペックに比べて重要振動ポテンシャルが大きいことになり、機器応答は試験前にはわからないため、それぞれの試験の機器レスポンスから、予測応答ピーク値を見積もり、その結果を比較することで重要振動ポテンシャルの大小を見積もるといふ手順をとる必要がある。



- 機器の重要環境条件はSRSで規定される。ランダム環境条件についてはPSD(パワースペクトル密度)にて規定される。
- PSDで規定されるランダム環境条件については、SRSのように増系列ピーク値をベースとした規定方法ではないため、両者を単純比較することはできない。衝撃試験を省略可能かどうかの判断については、ランダム振動の環境条件から応答ランダム家のピーク予測値を見積もり、衝撃試験の環境条件と直接比較する方法をとる。
- ここでは、ランダム振動スペックからランダム振動のピーク値を見積もり方法を紹介します。見積もり精度について検証した結果を示す。



省略検討1

ランダム振動試験スペックとの比較による省略 2/2

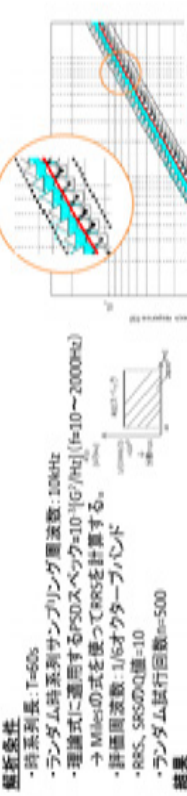
- ランダム振動のピーク値見積もり方法を下記4つ示す。立式の詳細は参考図書を参照。

方法	ピーク値算出式	参考図書
1	$pk = 1.2 \sqrt{PSD \cdot BW}$	RSD manual編、ソフトウェア開発の環境を参照。
2	$pk = 1.2 \sqrt{PSD \cdot BW}$	式 (B-43) C.A. Stone, Mechanical vibration and shock with random vibration, Butterworth, 2002
3	$pk = 1.2 \sqrt{PSD \cdot BW}$	式 (B-13) D. E. Chomskoy and M. J. Longuet-Higgins, The statistical distribution of the maximum of a random function, 1965
4	$pk = 1.2 \sqrt{PSD \cdot BW}$	式 (7-43) C.A. Stone, Mechanical vibration and shock with random vibration, Butterworth, 2002
5	$pk = 1.2 \sqrt{PSD \cdot BW}$	式 (7-43) C.A. Stone, Mechanical vibration and shock with random vibration, Butterworth, 2002
6	$pk = 1.2 \sqrt{PSD \cdot BW}$	式 (7-43) C.A. Stone, Mechanical vibration and shock with random vibration, Butterworth, 2002

- UN2, UN4, UN5, UN6について解析によってその予測性能を検証した。詳細を下記に示す。(UN3については、UN2とほぼ変わらない結果となることから割愛する。)

疑似ランダム増系列波形から直接ピーク値を求めて理論値と比較し、理論式の妥当性を確認する。

- ① 分数10Gのホワイトノイズ増系列(60s, サンプリング10kHz)をMersb2013のnormrnd関数を使って作成。
- ② 作成した増系列ランダム波をSRS解析する。(ランダム波形から直接ピーク値を抽出する)
- ③ n回試行し、SRS平均値を求める。
- ④ SRS平均値とUN2, UN4, UN5, UN6より求めたピーク予測値と各周波数で比較する。



- UN2とUN5は差が小さく、SRS平均値ともよく一致している。
- UN6 (URS a=0.95) の見積もりは、500回試行の下限付近、UN4 (URS a=0.01) については上限付近を示している。
- 理論で示された以上の結果は理論式の特徴と良く一致し、精度の有効性が確認された。(ただし、ランダム増系列波形データでも同じ結果が得られている。)

まとめ

ランダム振動PSDスペックからランダム振動予測ピーク値を見積もる方法は有効であることを解析で検証した。宇宙機一般試験標準への反映に向けて引き続き検討していく予定である。

「衝撃予測値(環境レスポンス)と、ランダム振動予測値から算出する予測ピーク値を比較し、衝撃予測値の方が小さい場合、衝撃試験ポテンシャルはランダム振動試験の方が大きいことから、衝撃試験は省略できる。」

コンポーネント衝撃試験省略に向けた検討

省略検討2 衝撃速度による省略 ～背景～

各国試験標準文書の比較

従来のJAXA標準文書に記述のなかった衝撃速度について反映を検討

標準文書	JERG-2-130	MIL-STD 1540E	ECSS shock Handbook (欧州)
規格記号	ERG-2-130-H001(日本)	MIL-STD-1540E(米)	MIL-HDBK-346A(米)
対象	記述なし	最大予振速度が周波数0.0018Hz (0.85-50m/sec)以下	最大予振速度が周波数0.018Hz (0.85-50m/sec)以下
対象体	記述なし	クリスタルやセラミックスなどの衝撃に弱い部材がないこと	構造部材に限る (電子コンポーネントは除く)

● 過去の検討
 海外標準の500m/sec衝撃速度閾値の妥当性を検証するため、過去10年間のコンポーネント衝撃試験の不具合調査結果を実施し、500m/secの閾値で試験体へ損傷が生じることが確認。ただし、56個と試験体数が少なく、統計的な閾値設定は難しい。

→ F025検討
 構造体への適用を目指し、材料・構造的な観点から衝撃試験の省略について検討を行う

省略検討2 衝撃速度による省略 ～理論背景の整理～

■ 1次元モデルでの導出
 本図の1次元モデルにおいて、正弦加速の場合や単一のモードが支配的なランダム加振・衝撃加速の場合の最大応力値を考えると、この時、最大応力と速度の関係は以下のよう導出できる。

$$\sigma_{max} = \sqrt{E\rho} \dot{v}_{max} \quad \sigma_{max} = \frac{E}{\sqrt{E\rho}} \dot{v}_{max}$$

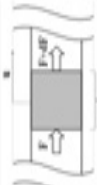
1軸引張の降伏応力を考えると、それに相当する降伏速度 (severe velocity) を導出することが可能

$$\sigma_{max} = \sqrt{E\rho} v_{max} \quad \sigma_{max} = \frac{E}{\sqrt{E\rho}} v_{max}$$

■ 一般機器構造の場合
 一般機器の構造に関しては、部材の形状・応力集中などを考慮した係数Cを用いた以下の式で計算する。

$$\sigma_{max} = \sqrt{E\rho} C v_{max}$$

*Cは一般に、 $4 < C < 8$ とされる。(Pienol, Allan G. "Preliminary design procedures for equipment exposed to random vibration environments." Journal of the EST 44.1 (2001): 23-27.)



材料	密度 ρ [kg/m³]	弾性率 E [GPa]	降伏強度 σ _y [MPa]	降伏速度 v _y [m/s]
Aluminum 6061	2.70	70	270	12.7
Steel	7.85	200	420	17.1
Copper	8.96	120	210	10.5
NiTiTiAl	8.96	120	210	10.5
Carbon Fiber	1.6	140	140	6.3
FRP	1.6	140	140	6.3

省略検討2 衝撃速度による省略 ～手法検討と速度閾値設定～

省略手法の検討

① 使用している各部材の降伏(破断)応力、ヤング率・密度より最大速度(降伏速度)を算出し、供試体内部の最大加速度へ変換する。

$$v_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho}}$$

$$a_{max} = \frac{v_{max}}{t} = \frac{\sqrt{\sigma_y / \rho}}{t}$$

材料	降伏強度 σ _y [MPa]	密度 ρ [kg/m³]	降伏速度 v _y [m/s]	降伏加速度 a _y [g]
Aluminum 6061	270	2.70	12.7	0.000127
Steel	420	7.85	17.1	0.000171
Copper	210	8.96	10.5	0.000105
NiTiTiAl	210	8.96	10.5	0.000105
Carbon Fiber	140	1.6	6.3	0.000063
FRP	140	1.6	6.3	0.000063

$a_{max} = 2\pi f v_{max} / \sqrt{0.89}$
 MIL-1540Eの速度値 500m/sec (1.27m/s) を用いると
 $a_{max} = 2\pi \times 1.27 \times 10^3 \times 6.3 / \sqrt{0.89}$

② 上位システムから提示された衝撃試験スペクトルと、供試体が想定している0周より、入力する加速度SRSを算出
 上位システムから提示された衝撃試験スペクトル

③ 評価周波数において高レベルのSRSの比較により、衝撃試験の可否検討が可能
 構造体に対し...

■ 今後の課題
 材料物性値からの速度閾値の検討
 ・ 過去のコンポーネント試験から統計的な速度閾値を算出することが難しい。そのため、材料の物性値から降伏速度を計算し、速度閾値を検討する。

適用範囲の検討
 ・ 本手法の適用対象は、歪による破壊がクリティカルとなる構造体
 ・ 考慮する材料の断面(脆性部材や物性値のばらつきが多い部材などの取扱い)

まとめ
 衝撃速度を用いたコンポーネント衝撃試験の省略に向け、理論背景と手法の検討を行った。今後は理論速度の設定や宇宙機一般試験標準への反映に向け、検討・議論を行っていく。

