

6.2. JAXA 試験標準改定への挑戦

宇宙航空研究開発機構

環境試験技術ユニット

高橋 大祐 氏

梶川 隆史 氏

JAXA試験標準改訂への挑戦

Test Effectiveness ～challenge to the next generation～

JAXA 環境試験技術ユニット
高橋大祐 / 梶川隆史



2015/12/18

1

発表内容



- 背景
 - 宇宙機一般試験標準
 - 試験標準 改訂の歴史と課題
- Test Effectiveness
 - Test Effectivenessの考え方
 - Test Effectiveness活動とその目的
- 課題と検討状況
 - 機械環境試験の有効性
 - 熱真空試験サイクル数
 - 環境試験順序
- まとめ

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

2

宇宙機一般試験標準



宇宙機一般試験標準

宇宙機システムおよびそれを構成するサブシステム・コンポーネントの環境試験（認定、受入、プロトフライト、開発試験）に対する一般要求を規定する文書。

試験標準の意義

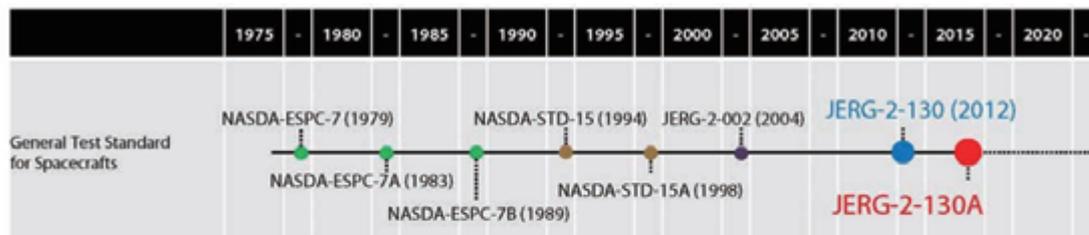
- 品質の均一化
一般化できる（共通的・網羅的）要求を規定し、品質を均一化
- 開発の効率化
ベースライン要求や、テーラリングガイドを定めることで、試験要求の検討を効率化
- 技術と経験の共有
設計技術の進歩、新規試験技術、（失敗を含めた）経験の反映
⇒ 技術の進歩に応じて維持改訂していく必要がある。

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

3

試験標準 改訂の歴史と課題



- 1979年に、当時のゴダードおよびMIL規格を参考に日本で最初の試験標準を制定。以降、衛星の大型化やPFM開発方式に対応するために維持改定を実施してきた。
- いくつかの改訂を重ねてきているものの、一部の要求は導入当初の技術根拠が不明確であり、見直し出来ずにいる。またそういった要求が、近年の低コスト&高品質化に対応できず、開発現場との乖離が見られてきている。
- とくに環境試験の要否をはじめとする開発コストの大きく寄与する要求ほど、その内容を見直せないでいる。
- こういった課題に対して、“試験の有効性 = Test Effectiveness”という観点に立ち返り、検討を行っている。

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

4



- 背景
 - 宇宙機一般試験標準
 - 試験標準 改訂の歴史と課題
- Test Effectiveness
 - Test Effectivenessの考え方
 - Test Effectiveness活動とその目的
- 課題と検討状況
 - 機械環境試験の有効性
 - 熱真空試験サイクル数
 - 環境試験順序
- まとめ

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

5

Test Effectivenessの考え方



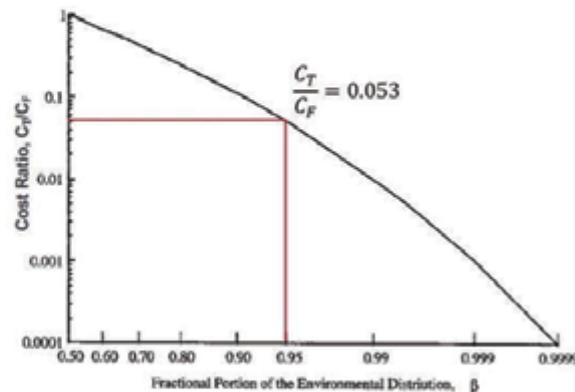
Test Effectiveness = 試験のコスト効果を最大化する試験条件の検討

- ⇒ 試験コストと、不具合が後工程に持ち越されることによる損失コストの期待値を最小化するという観点で試験条件を設定する。

コストによる試験条件最適化の例

- ✓ 試験コスト C_T
試験費用、Over testing による供試体修理・改修費用
- ✓ 損失コスト C_F
試験で検出できなかった不具合が、次工程で顕在化することによる損失

試験レベルを厳しくすれば損失コストは少なくなるものの、試験コストが増えるため、最適な試験条件がある。



試験コストと損失コストの比に対する最適な試験条件 (= フライト環境を何%包絡するか) の検討結果。試験条件がフライト環境の95%包絡は、試験コストに対して損失コストが20倍のときの最適解となる。

NASA-HDBK-7005 DYNAMIC ENVIRONMENTAL CRITERIA

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

6

Test Effectiveness活動とその目的



□ 地上試験不具合分析

試験で検出された不具合の原因/影響度分析により、試験有効性を評価

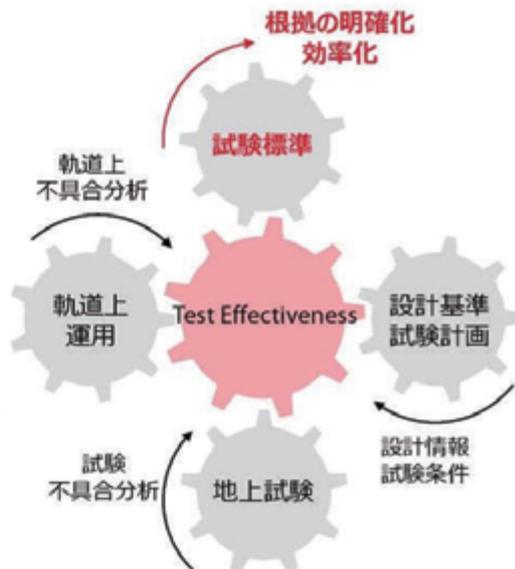
□ 軌道上不具合分析

軌道上まで持ち越された不具合の原因/影響度分析し、試験不足の有無を把握

□ 試験条件/設計情報の把握

地上・軌道上不具合の背後要因の整理

これらの結果から、**試験要求の根拠を明確にし**、効果的な試験プログラムになるように**試験要求を見直し**していくことがTest Effectivenessの目的である。



2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

7



● 背景

宇宙機一般試験標準
試験標準 改訂の歴史と課題

● Test Effectiveness

Test Effectivenessの考え方
Test Effectiveness活動とその目的

● 課題と検討状況

機械環境試験の有効性
熱真空試験サイクル数
環境試験順序

● まとめ

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

8

環境試験要否の要求 - 試験項目表 -



環境試験の要求は「個別要求表」に全て集約されている

表 5-2 システム受入試験項目

試験	試験順序	要求(R)又はオプション(O)
機能性能試験	1 ^{*)}	R
EMC試験	2	O
アンテナパターン測定試験	3	O ^{*)}
磁気試験	17	O ^{*)}
リーク試験	4,12,16	R
アライメント測定試験	5,11,15	R
質量特性試験	6	R
動的合い試験	18	O ^{*)}
モールドサーベイ試験	7	O
振動試験	8	R ^{*)}
音響試験	9	R ^{*)}
衝撃試験	10	O
熱平衡試験	13	O
熱真空試験	14	R

表 5-5 サブシステム/コンポーネント受入試験項目

試験順序	電気電子機器	分類											
		アンテナ	可動機器	太陽電池パドル	バッテリー	バルブ	推進装置	圧力容器	エアスタ	熱制御装置	光学装置		
機能性能試験	1,13 ^{*)}	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
熱真空試験	9	R ^{*)}	O	R	O	O	O	O	O	O	R	R	R
熱サイクル試験	8	R ^{*)}	O	O	O	O	O	O	-	-	-	-	-
モールドサーベイ試験	4	O	R	R	R	O	-	O	O	-	-	O	-
正弦波振動試験	5	O	O	O	O	-	-	O	O	-	-	O	-
ランダム振動試験	6	R	R ^{*)}	R	O ^{*)}	O	R	R	O	R	R ^{*)}	R ^{*)}	R ^{*)}
音響試験	6	O	R ^{*)}	-	O	-	-	-	-	-	R ^{*)}	R ^{*)}	-
衝撃試験	3	O ^{*)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	O ^{*)}
圧力試験	11	-	-	O ^{*)}	-	R ^{*)}	R	R	R	O	R ^{*)}	-	-
リーク試験	2,7,12	R ^{*)}	-	O ^{*)}	-	R ^{*)}	R	R	R	O	R ^{*)}	-	-
ならし試験	10	R	-	O	-	-	R	-	-	R	-	-	-

R: 要求 O: オプション -: 適用せず

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

9

環境試験要否の要求 - 試験項目表 -



試験順序はどのように規定すべきか？

表 5-2 システム受入試験項目

試験	試験順序	要求(R)又はオプション(O)
機能性能試験	1 ^{*)}	R
EMC試験	2	O
アンテナパターン測定試験	3	O ^{*)}
磁気試験	17	O ^{*)}
リーク試験	4,12,16	R
アライメント測定試験	5,11,15	R
質量特性試験	6	R
動的合い試験	18	O ^{*)}
モールドサーベイ試験	7	O
振動試験	8	R ^{*)}
音響試験	9	R ^{*)}
衝撃試験	10	O
熱平衡試験	13	O
熱真空試験	14	R

システムATでの正弦波振動、音響試験に不具合検出効果はあるか？

振動試験

音響試験

熱真空試験

システム熱真空試験のサイクル数、時間の効果は？

表 5-5 サブシステム/コンポーネント受入試験項目

試験順序	電気電子機器	分類											
		アンテナ	可動機器	太陽電池パドル	バッテリー	バルブ	推進装置	圧力容器	エアスタ	熱制御装置	光学装置		
機能性能試験	1,13 ^{*)}	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
熱真空試験	9	R ^{*)}	O	R	O	O	O	O	O	O	R	R	R
熱サイクル試験	8	R ^{*)}	O	O	O	O	O	O	-	-	-	-	-
モールドサーベイ試験	4	O	R	R	R	O	-	O	O	-	-	O	-
正弦波振動試験	5	O	O	O	O	-	-	O	O	-	-	O	-
ランダム振動試験	6	R	R ^{*)}	R	O ^{*)}	O	R	R	O	R	R ^{*)}	R ^{*)}	R ^{*)}
音響試験	6	O	R ^{*)}	-	O	-	-	-	-	-	R ^{*)}	R ^{*)}	-
衝撃試験	3	O ^{*)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	O ^{*)}
圧力試験	11	-	-	O ^{*)}	-	R ^{*)}	R	R	R	O	R ^{*)}	-	-
リーク試験	2,7,12	R ^{*)}	-	O ^{*)}	-	R ^{*)}	R	R	R	O	R ^{*)}	-	-
ならし試験	10	R	-	O	-	-	R	-	-	R	-	-	-

R: 要求 O: オプション -: 適用せず

熱真空試験を熱サイクル試験で代替できる条件は？

太陽電池パドルのATは熱真空・熱サイクルのどちらでもよいのか？

熱サイクル数は8でよいのか？

製造・組立不良の不具合検出として、ランダム振動・音響は有効か？

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ

10



- 背景
 - 宇宙機一般試験標準
 - 試験標準 改訂の歴史と課題
- Test Effectiveness
 - Test Effectivenessの考え方
 - Test Effectiveness活動とその目的
- 課題と検討状況
 - 機械環境試験の有効性
 - 熱真空試験サイクル数
 - 環境試験順序
- まとめ

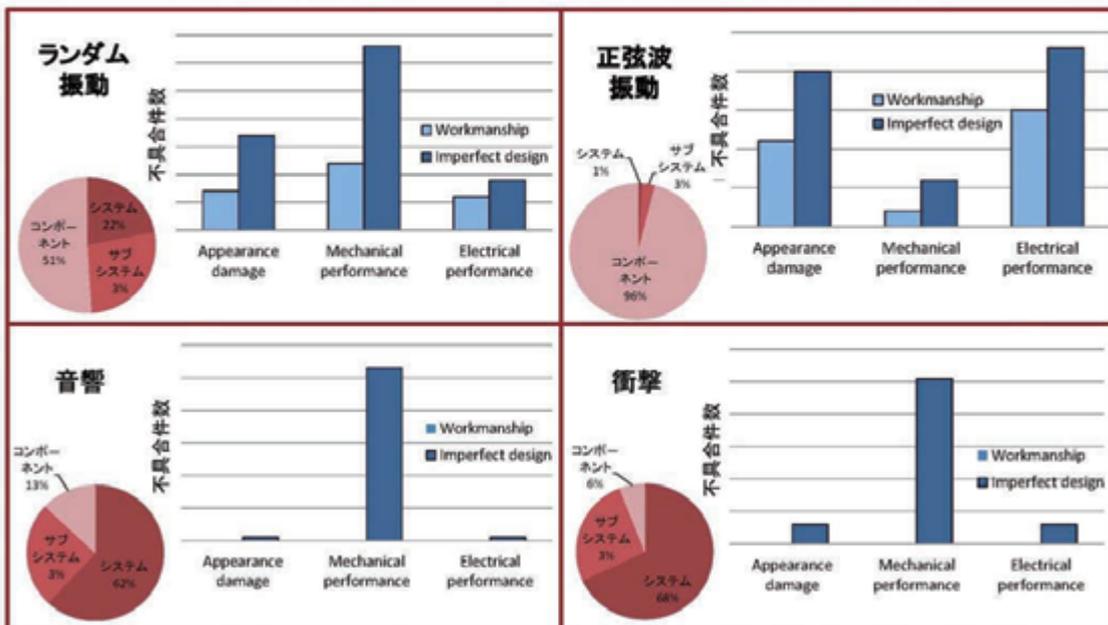
2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 11

機械環境試験の有効性



- 機械環境試験（ランダム、正弦波、衝撃、音響）の不具合件数整理



"Review JAXA test standard by the lesson's learned from ground test non-conformance database", T. NIWA Q. SHI, D. TAKAHASHI (JAXA), 28th Aerospace Testing Seminar, LA USA March 2014,

2015/12/18

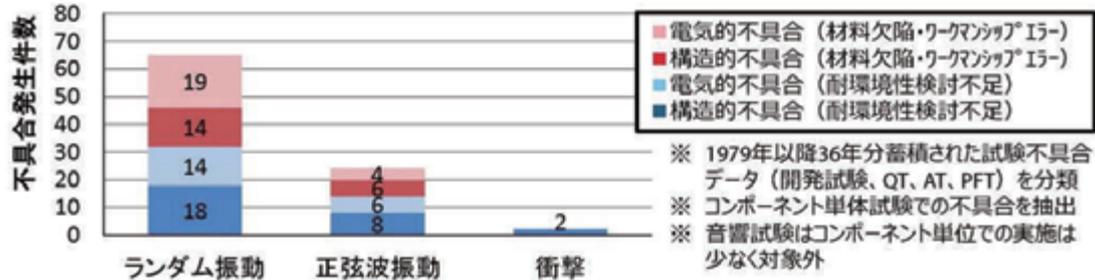
第13回 試験技術ワークショップ 12

機械環境試験の有効性



● JAXA衛星の開発実績と統計学的手法を用い、不具合検出効果のモデル化

①コンポーネント機械環境試験の不具合検出効果を定量化



二項分布を用いたコンポーネントの不具合発生確率の整理

		ランダム振動	正弦波振動	衝撃
実績	不具合発生件数k[件]	65	24	2
	宇宙機1機当たりのコンポーネント数n[個]	50	50	20
概算		2000	2000	1000
試験総数(概算値) N[件]				
宇宙機1機当たり各試験で不具合が1件以上発生する確率		80.8%	45.3%	3.9%

"Updating Activity of JAXA Spacecraft Test Standard for Test Effectiveness", T Niwa, S Shimazaki, T Kejikawa, Q Shi (JAXA), 29th Aerospace Testing Seminar, LA USA October 2015, 2015/12/18

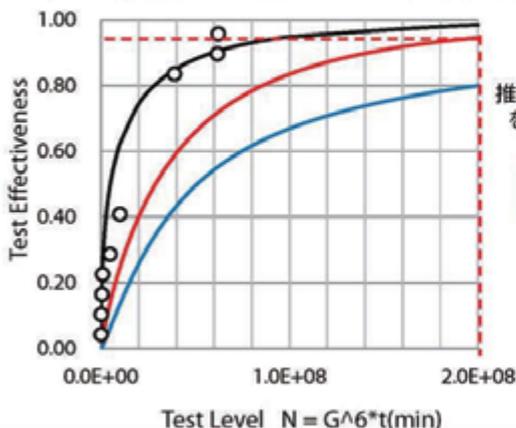
機械環境試験の有効性



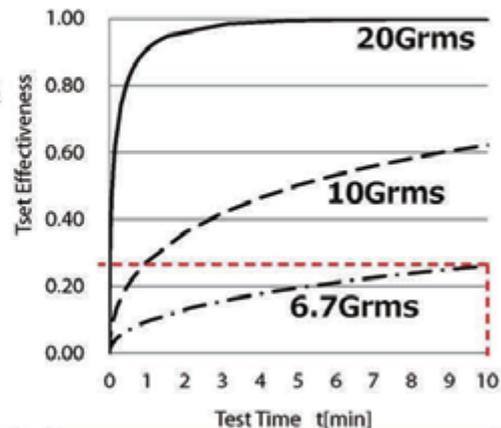
● JAXA衛星の開発実績と統計学的手法を用い、不具合検出効果のモデル化

②ワイブル分布と最尤推定法を用いたランダム振動試験条件と不具合検出効果の定量化

— 推定曲線 — 50%CI — 95%CI ○ 不具合実績



推定曲線を変換



P95/50の信頼性下限で95%の不具合検出を達成するためには $N = 2.0 \times 10^8$ (20Gで3分相当)が必要

6.7[Grms]では、10分加振したとしても不具合検出効果は95%に及ばない

不具合検出効果とその試験条件の定量化を図り、標準改訂の根拠とすることを旨す



- 背景
 - 宇宙機一般試験標準
 - 試験標準 改訂の歴史と課題
- Test Effectiveness
 - Test Effectivenessの考え方
 - Test Effectiveness活動とその目的
- 課題と検討状況
 - 機械環境試験の有効性
 - 熱真空試験サイクル数
 - 環境試験順序
- まとめ

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 15

コンポーネント熱サイクル数 不具合分析結果

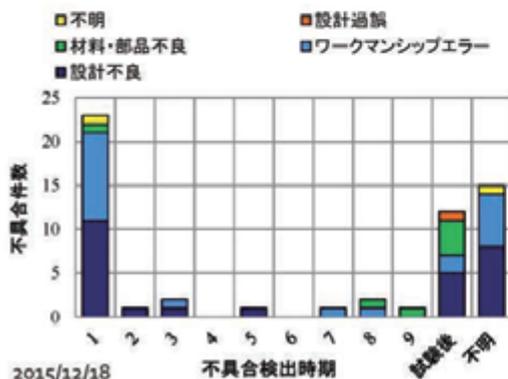


コンポーネント熱真空試験のサイクル数に対する不具合のスクリーニング効果のモデル化

⇒ コンポーネントあたりの不具合発生率と、サイクル数に対する累積不具合検出率を、不具合情報を用いてモデル化する。

- ① 不具合発生率：試験数に対する不具合数を二項分布で推定
- ② 累積不具合検出率：サイクル数に対する累積不具合検出率をある確率分布で推定

コンポーネント熱真空試験不具合の分析結果



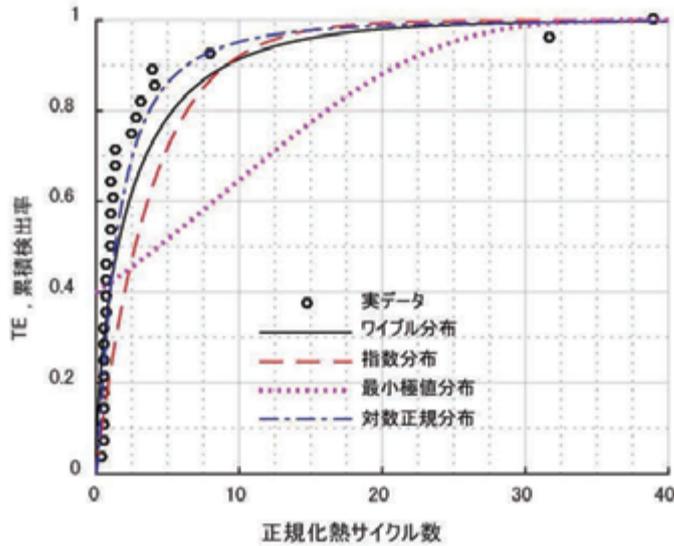
※ 近年JAXAが開発した衛星15機のコンポーネント熱真空・熱サイクル試験不具合を分析。
 ※ 試験で本来洗い出すべき不具合を抽出。(オペミス、設備不具合を排除)さらにインパクトの大きい不具合 = 改修・修理が必要になった不具合を抽出。

29th Aerospace Testing seminar Review of JAXA thermal vacuum and cycle test requirement by the statistical study using non-conformance data

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 16

コンポーネント熱サイクル数 確率分布による不具合累積検出率の推定

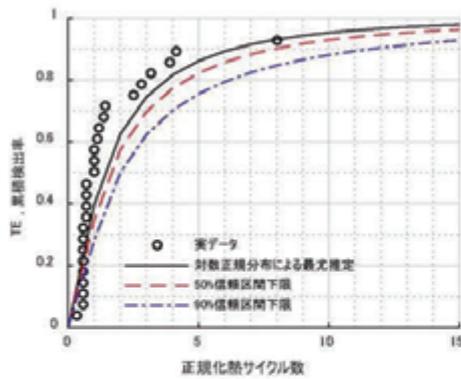


熱サイクルによる不具合検出効果を最もよく推定できる確率分布を評価

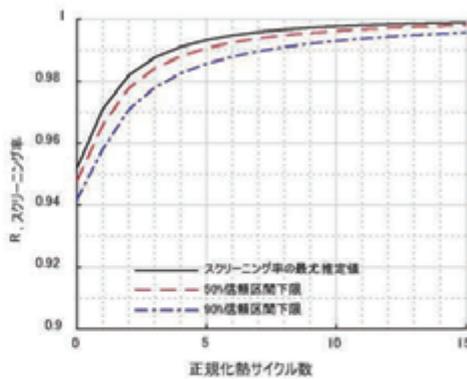
29th Aerospace Testing seminar Review of JAXA thermal vacuum and cycle test requirement by the statistical study using non-conformance data
2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 17

コンポーネント熱サイクル数



- 不具合の累積検出率は、8サイクルで約90%に到達。
- ⇒ 不具合をスクリーニングする上で熱サイクルは有効。



- 熱サイクル数に対する、不具合を有していないコンポーネントの割合は8サイクルで約99%に到達。
- ⇒ コンポーネントによってはそもそも熱サイクルでスクリーニングできる不具合を有していないものがある。

29th Aerospace Testing seminar Review of JAXA thermal vacuum and cycle test requirement by the statistical study using non-conformance data
2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 18



- 背景
 - 宇宙機一般試験標準
 - 試験標準 改訂の歴史と課題
- Test Effectiveness
 - Test Effectivenessの考え方
 - Test Effectiveness活動とその目的
- 課題と検討状況
 - 機械環境試験の有効性
 - 熱真空試験サイクル数
 - 環境試験順序
- まとめ

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 19

環境試験順序の有効性



JAXAの試験標準では、環境試験に対する試験順序の要求が定められているものの、

- 要求される試験順序の根拠が不明確
- 根拠が不明確であるため、試験順序を変更する場合の評価ポイントが分からない

といった課題がある。

システムPFT試験順序

試験	試験順序	要求(R)又はオプション(O)
機能性能試験	1 ¹⁾	R
EMC試験	2	R
アンテナパターン測定試験	3	O ¹⁾
漏気試験	17	O ¹⁾
リーク試験	4,12,16	R
アライメント測定試験	5,11,15	R
質量特性試験	6	R
動的合い試験	18	O ¹⁾
モールドサーベイ試験	7	R
振動試験	8	R ²⁾
音響試験	9	R ²⁾
衝撃試験	10	R
熱平衡試験	13	R
熱真空試験	14	R

2015/12/18

Test Effectivenessの観点で、環境試験順序はどうあるべきか？

Test Effectiveness = コスト最適化

1. 軌道上に不具合を持ち込ませない
 - ⇒ 軌道上に不具合を持ち込ませないために、試験順序に依存する不具合や、特定の環境（熱真空の高温・低温等）でしか検出されない不具合に留意する必要がある。
2. 有効な試験から着手する
 - ⇒ 有効な試験 = コストあたりの不具合検出効果が高い試験から着手する。

第13回 試験技術ワークショップ 20

環境試験順序の有効性



JAXA衛星の地上試験の不具合情報を分析すると、

試験順序による不具合

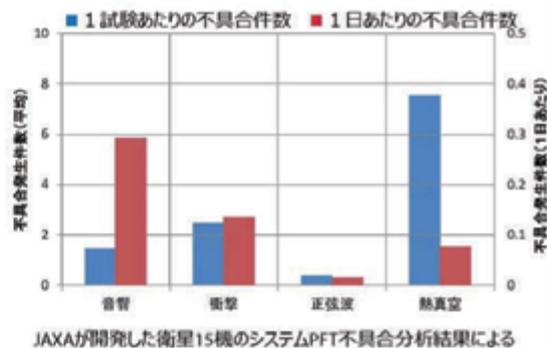
JAXA衛星の地上試験不具合分析によると、機械環境試験で発生した不具合が、その後の熱真空試験の高温または低温環境で発見された例が少なくとも3件ある。

⇒ 熱真空試験を環境試験の最初に実施する場合は上記のリスクを考慮する必要がある。

各環境試験のコスト効果

不具合件数としては熱真空試験が最も多いが、コスト効果は？

例えばコストの一指標である試験スケジュールで不具合件数を正規化すると？



2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 21

まとめ



- 試験標準の要求根拠の明確化や、効果的な試験要求を定めるために行っている試験の有効性評価（Test Effectiveness）活動について、検討状況の紹介を行った。
 - 各機械環境試験の不具合分析を行い、見直すべき点を明らかにした。
 - ランダム振動試験のレベル・時間と不具合検出効果の定量化を行った。
 - 熱真空試験のサイクル数による不具合検出効果を定量化し、熱サイクルの有効性を示した。
 - 不具合情報による試験順序の評価方法を示した。
- 今後も長年見直すことができなかった課題に対して、Test Effectivenessの観点でアプローチを行い、有効な環境試験を実現させるために挑戦を続けていく。

2015/12/18

第13回 試験技術ワークショップ 22

Test Effectiveness ～challenge to the next generation～

ご清聴ありがとうございました。

各検討の詳細はポスターセッションでも紹介しています。

WS13-P01 熱真空試験の有効性検討 (Test Effectiveness)

WS13-P02 機械環境試験の有効性検討 (Test Effectiveness)



質疑応答

質問者① IHI エアロスペース 竹内様

JAXA の試験標準が最初に制定された際、MIL 規格等を参考にしたとあったが、MIL 規格を制定した米国はその要求の根拠を持っているはずであり、それを聞くことはできなかったのか。

発表者

米国として MIL 規格の根拠は持っていたと推測している。しかし、規格にはあくまで要求しか記述されていないため、その根拠まで把握することは試験標準制定当時にできなかったと考えている。また、MIL 規格も Test Effectiveness という観点で要求が規定されていると考えているが、Test Effectiveness は設計内容や品質保証プログラムにも影響されるので、日本独自の Test Effectiveness 検討による試験標準の根拠を得ることが重要だと考えている。

質問者

日本独自で技術的なエビデンスを得ることは重要だと考えており、引き続き検討を行って頂きたい。

質問者② 元 JAXA 三津間様

お話のとおり、試験標準制定時に最も参考にしたのは当時の Goddard Space Flight Center の標準であった。その標準も一部は MIL 規格を参考にしており、その MIL 規格は米国の企業の案をたたき台としている。したがって、JAXA 標準を最初に制定したときに MIL 規格の根拠を聞くことは難しかったのが実情であると考えている。

私自身も Test Effectiveness に関する検討を行っていたが、その中で重要なのは、軌道上で不具合を起こさないことだと考えている。そのために、まずは軌道上で発生した不具合の原因をつかむことが重要だと考える。また、軌道上で不具合を起こさないためには試験だけでなく、冗長化等の設計での考え方もある。試験だけですべての不具合を洗い出すことは難しく、設計やプロジェクトマネジメント等、広い視点でこの問題をとらえた方が良い。

発表者

我々としても環境試験技術ユニットができるのは、試験でどこまで不具合をスクリーニングできるかを定量的に示すことまでだと考えている。その為、一部の検討については試験の観点だけでなくプロジェクトマネジメントの観点でも議論するワーキンググループを立ち上げ、議論を行っている。他の検討についても同様に議論の場を設けていく予定であり、その際は関係者のご協力を頂きたいと考えている。