

5.8. 宇宙開発に関する海外試験標準 及び試験技術の動向

宇宙航空研究開発機構
環境試験技術センター
施 勤忠 主幹研究員

環境試験が導く、確かな未来！

環境試験技術センター

宇宙開発に関する海外試験標準及び試験技術の動向

概要

最近の宇宙開発は、従来の国家プロジェクトの位置付け以外に民間商用ベースの宇宙機や中小企業及び大学衛星など様々な活動への転換期であり、宇宙機の開発コスト低減は、重要な課題となっている。

従来からの地上での試験は、宇宙機の開発検証手法として宇宙機の信頼性保証に重点を置かれてきた。しかし、地上試験の重要性を強調することにより、宇宙機の開発コストが大幅に増加する側面がある。

今後は、宇宙機の設計製造信頼性を確保しながら、試験のコストを低減することが必要である。

本発表では、海外学会の参加、文献調査などを通じて海外の試験効率化、低コスト（費用対効果）試験設備及び試験標準の改定の動向について紹介する。

1. 海外主要宇宙機関の環境試験技術、試験標準の改定状況（MIL-STD-1540、ECSS-E-ST-10-03）
2. 試験設備の最新動向

JAXA 環境試験技術センター 施 勤忠

第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日

環境試験が導く、確かな未来！

1. 海外主要宇宙機関の環境試験技術、試験標準の改定状況

環境試験技術センター

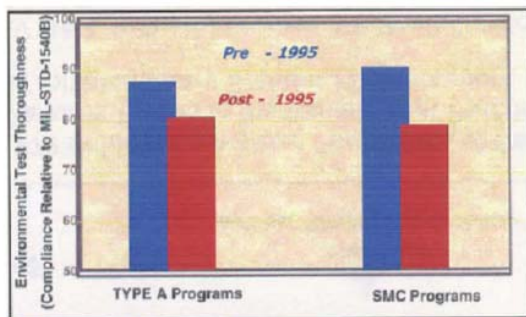
1.1 MIL-STD-1540改定の理由及び目的

・改定(制定)理由:

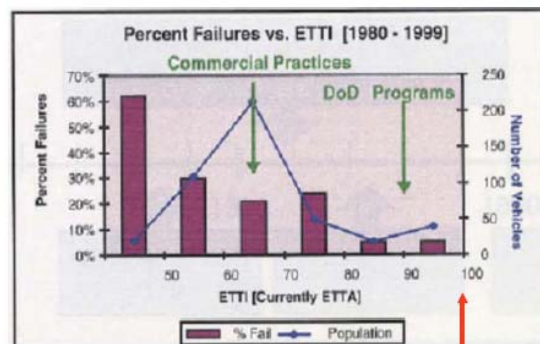
1995年の‘Acquisition Reform(宇宙機調達改革)’に従い、コスト削減のため過酷な試験要求(MIL-STD-1540B)は“商用プロジェクトの経験”(メーカ自社規定にお任せ)に置き換えられた。

注1: 540Bの試験要求遵守割合は、1995年以後は1割程度削減(DoDプログラム)、商用衛星は65%。

注: 遵守割合は50%以下のプログラムでは、軌道上の不具合率は高く、60%(母体数が少ないが)。

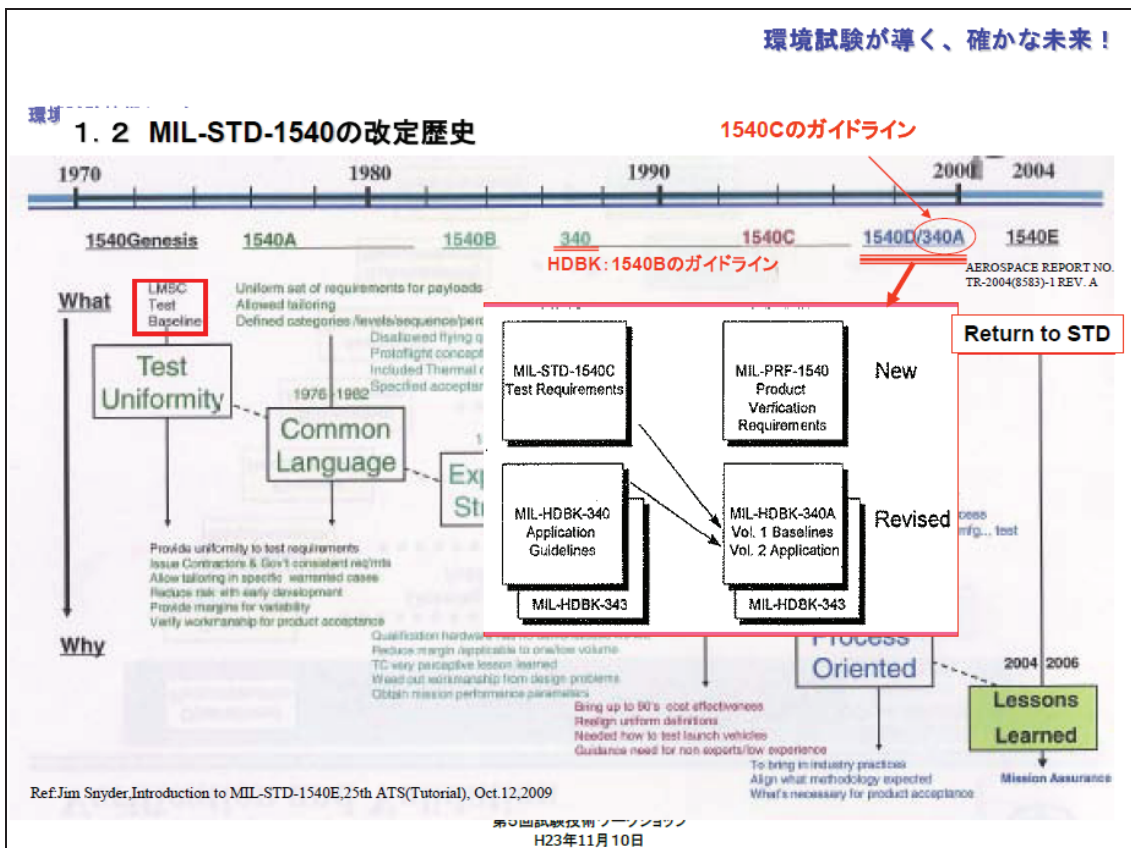


D.E.Davis and W.F.Tosney "An Overview of National Security Space System Development Test Standards" 22nd Aerospace Testing Seminar, March 2005



MIL-STD-1540Bを100%遵守

第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日



Unit Test **Ground ATP** **1st 3 Months**

1 out of 5 units fail during thermal cycling alone

System level thermal testing finds an added 0.58 unit failures per 10⁴ parts

環境試験が導く、確かな未来!

試験で発生する不具合の数は、ローレベル構成部品 (Unit)のほうが、ハイレベル構成部品 (System) より4倍程高い。

ローレベル構成部品は機械試験で発生する不具合は、熱真空試験より5倍程度高いが、ハイレベル構成部品では、機械試験と熱真空試験はほぼ同等。

フライト時においても機械環境と熱真空環境が原因となる不具合はほぼ同等な割合。

宇宙機の場合、不具合の修理費用はローレベル構成部品程安い。システムレベルの不具合修理費用は、部品レベルより1000倍、コンポレベルより10倍増加。

ローレベル構成部品の試験は現実より厳しいが、設計などの不具合が上位レベルへ持ち込まれることによってコストの大幅増加リスクを低減する。

Figure 1 Hardware Failure Costs vs. Assembly Level

試験の理念: 設計の検証及びworkmanship検出は、構成部品レベルが低ければ有効、ローレベルでの検証活動が次の構成部品レベルの不具合を最小化させる効果大きい。よって試験の要求はUnit、サブシステム、システムの順に規定する根拠が示される。

第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日

1. 4 MIL-STD-1540E及びHDBK340A、Bの関係

- 1540Eは宇宙機及びこれらの構成するサブシステム、ユニットに関する地上試験criteriaの標準(ベースライン)として常にConservativeの要求であり、プロジェクト毎Tailoringが必要(Tailoring指針はHDBK340A)、試験項目は下記に示す。
- 1540Eは最も高いクラス(クラスA)のプログラムに適用し、最高の信頼性及びミッション成功に保障、他のクラス(DoD-HDBK343で規定、B-E)にはTailoringをする必要がある。
- HDBK340A、Vol.II(Guidance document)は1540Eのガイドライン(標準の解釈、要求の根拠、必要性、数値の算出方法、理論式、テラーリングガイドラインなど)を述べている。compliance適用文書としてはならない。

例えば、音響試験項目では、標準Criteria、音響試験の根拠(Rationale)、Stress Screening技術ベース、音響試験ガイダンス、試験用器具・制御及び公差、Unit vs. Subsystem vs. vehicle, operation vs. non-operation

環境試験が導く、確かな未来!

Tests Covered By MIL-STD-1540E

Unit	Sub-System	System
Inspection, Specification Performance, Leakage, Shock, Vibration, Acoustic, Acceleration, Thermal Cycle, Burn-In, Thermal Vacuum, Climatic, Pressure, EMC, Life, Burst Pressure, Proof Pressure, Proof Load, Static Load	Inspection, Specification Performance, Static Load, Shock, Random Vibration, Acoustic, Thermal Vacuum, Separation and Deployment, EMC, Mode Survey	Inspection, Specification Performance, Pressure/Leakage, EMC, Shock, Random Vibration, Acoustic, Thermal Balance, Thermal Vacuum, Mode Survey On Orbit

} 環境試験

環境試験が導く、確かな未来！

環境試験技術センター

1.5 MIL-STD-1540Eの主な新しい変更点

- ・設計はQual. Levelで、試験検証方法(ベースライン)には拘わらない。
- ・Protoqual.開発方式を正式に追加、強調された。(Protoqual.はレベル及び時間(P97/75)を減らしてFlightに使用、製作数は3機以内)
- ・技術的な内容を1540Cより深く記述。
- ・試験要求の定義と表現の変更(“Requirement”、“Shall”はなし)。
- ・ユニット、サブシステム、システムに関する規定はそれぞれ分けて記述。
- ・要求項目では曖昧さの表現“Optional”を“Evaluation Required”に変更、検証方法を明確に定義。
- ・各機器レベルに対して厳しい熱試験要求を緩和。
- ・EMCのAT要求を明確。
- ・特定の機能性能試験の定義を改善。
- ・ソフトウェア試験要求を導入。
- ・ランダム振動試験及び熱試験の要求に関する選択を簡略化
- ・ユニットに対するランダム振動試験の最小試験レベルを見直。

第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日

1.6 ESA試験標準(ECSS-E-ST-10-03)の改定理由及び主な変更点

ECSSの試験標準は、維持改定のフェーズとして要求の誤り及び欧州宇宙機関を始め、各国の政府機関や民間企業の商業プログラムに利用することで顧客のフィードバックを配慮した要求のため改定する。C改訂版の改定は2006年(改定目次)、2008-2009年(主な文書改定)、審査は難航して時間が要した。2011年末制定する予定。標準のScopeとしては、

- ・ Re-entry宇宙機を含み宇宙機、それらの構成品
 - ・ ランチャー及び地上Equipment及びその下位の構成品(Components,Material)
- に環境試験及び性能試験に関する試験要求

主な変更点(改善)

- 文章体系との整合性を図った。
- 顧客のlesson learned及び意見を反映した。
- ECSSの各文書(standards, handbooks and technical memoranda)との整合性(用語なども含め)、2重規定(冗長記述など)のない事を再点検した。
 - ・ In-orbit test、Post landing testの章を削除、Psot landing testはRe-testに移行、In-orbit testは検証要求ECSS-E-ST-10-02Cで記述(解析検証あり)。地上試験を注目し、解析部分を検証要求02Cへ移行。
- 検証要求(ECSS-E-ST-10-02C)や他の規定文書類とのリンクを図った(試験報告書、試験データ、試験手順、設備の記録)。
- Pre-tailoring便利性的ため、各分野の試験専門家向けの文書構成を再構築し、Pre-tailoringの5分野を指定した：
 - 1) Pressure test; 2)Thermal testのNo. of cycles, need for temperature stability, Temperature margin, Test level; 3) EMC and Corona; 4) Mechanical test, including shock and micro-vib.; 5)Solar Arry tests(need for Sine test and Thermal test

環境試験が導く、確かな未来！

環境試験技術センター

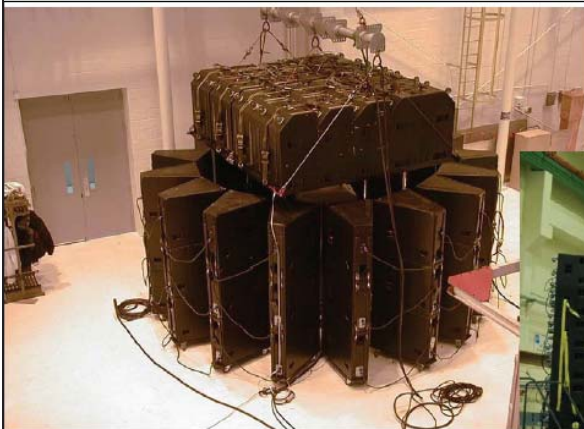
2. 試験設備の最新動向

第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日

環境試験が導く、確かな未来！

2.1 低コスト・可搬型音響試験設備

近年、試験の低コストや設備の小規模投資などの利点で1998年、NASA/JPLのQuicksatを始め、以降米国において可搬型のスピーカラックを用いた音響試験について研究検討が盛んになっている。JPL、Aerospace Corp.、JHU/APL、Orbital Science等がこのシステムについて拡散音場試験結果の比較など、理論、試験などで検討している。現在Marryland Sound Instr.社が商品及び試験サービスを提供しており、70個の供試体を使っている(2010年まで)。



(a) Loudspeaker Arrangement During Early DFAT

Ref. Jerry W. Rouse, Mikhail Mesh, and Eric C. Stasiunas
Engineering Sciences Center, Sandia National Laboratories, Analytical
Modeling of the Acoustic Field during a
Direct Field Acoustic Test, 26th ATS, March 29-31, 2011



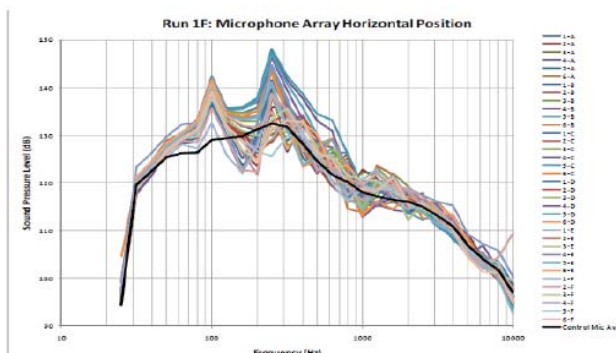
(b) Current Loudspeaker Arrangement

H23年11月10日

環境試験が導く、確かな未来!

スピーカでの簡易音響試験の特長

- 1) 最大のメリットは、最大148.3dBの音響環境の生成が可能、装置安い、可搬で供試体の移動費用は不要。但し、スピーカ試験における下記の問題について指摘されている。
- 2) 音場の空間音圧のバラツキは、公差範囲よりはるかに大きく、中周波数(200-500Hz)において10-20dBとなり、公差要求を逸脱することがある。
- 3) 現行の単一音源(加音信号源)加音により生成される音場は相関音場であり、音場のバラツキ問題が解決できない。無相間の複数音源を用いる手法は以上の問題を解決できると期待され、研究は進行中。
- 4) 音場のバラツキがある状態での供試体表面に負荷される音圧は不明であり、Over-test及びUnder-testの見積もりが困難である。相関音場と構造の強い連成により特定のモードが大きく加振され、過負荷になる。
- 5) 音場のバラツキ及び供試体振動の差異を許容できる供試体には、スピーカによる音響試験が適用できる。



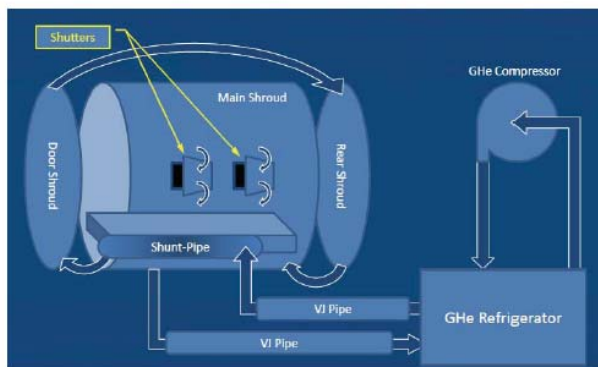
Ref: Jerry W. Rouse, Mikhail Mesh, and Eric C. Stasiunas
Engineering Sciences Center, Sandia National Laboratories, Analytical Modeling of the Acoustic Field during a Direct Field Acoustic Test, 26th ATS, March 29-31, 2011

環境試験が導く、確かな未来!

熱系設備の海外動向

環境試験技術センター

- 1) 極低温化
米国・カナダではJWST^(※)の試験のため、極低温(20K)で試験ができるチャンバの整備が盛んに行われている。
 - ・ Heシュラウドを整備し、運用を開始している。
 - ・ Lessons Learned: シュラウドの黒色塗装剥れ、配管継目からのHeリーク



※ JWST (James Webb Space Telescope)
: ハッブル宇宙望遠鏡の次世代機。赤外領域における天文観測を目的としている。

Heシュラウドを持つチャンバのフロー概要図

第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日

環境試験が導く、確かな未来！

環境試験技術センター

2) 高温化

BepiColomboの熱試験のため、ハイソーラ用ソーラシミュレータの整備が進められている。

スペック

- $\Phi 0.6\text{m}$, Max20sc。
- 1灯式反射鏡のみで実現目標。
- LSSの予備用窓レンズ使用(圧力試験実施済)



第5回試験技術ワークショップ
H23年11月10日

質疑応答

質問者①

1540E は正式に制定されているのでしょうか。

発表者

正式に制定されています。

質問者②

スライド5枚目のグラフの根拠は何でしょうか。

発表者

統計結果です。

質問者③

可搬型音響試験設備の消費電力はどのくらいなのでしょう。また試験を行う上で騒音は問題にならないのでしょうか。

発表者

記憶は鮮明では無いのですが、大電力を使用します。パワーアンプなどで大きな熱が発生するため、長時間の試験を行うことはできません。

試験は工場などで行うようです。イヤーマフを装備すれば騒音はそれほど問題にはならないらしいです。

質問者④

可搬型音響試験設備の空間音圧のばらつきは、伝達関数を調べる等、解析的に評価できると思います。Mechanical Vibration Facility は油圧、動電どちらでしょうか。

発表者

動電です。可搬型音響試験の空間音圧のばらつきですが、JPL や JHU の音響試験設備と比較した結果が学会で発表されています。

質問者⑤

MIL-STD では今回の E 改訂において、部品、コンポーネント等、構成品要素に対して試験の理念が書かれている一方で、ESA の方は文書体系や他の標準との整合性を捉える形で改定されていると講演の趣旨を伺いましたが、ESA の方では構成品要素に対する試験要求は書かれていないのでしょうか。

発表者

今回の改訂は各利益関係者の意見を反映する形で行われており、各ハードウェアのレベルは従来のもので大きな変更点はありません。ただ大きな動きとしては、Test Effectiveness と称し、ハードウェアのどのレベルで、どの試験で不具合を多く洗い出せるかに取り組んでいます。また地上試験と軌道上不具合の関係も行おうとしています。

質問者⑥

ESA の方はステークホルダーの利害調整の結果、うまくまとめられる方向に改訂が進んでいるのに対し、MIL の方は定量的なデータを含めた上で理念を取り込んだ形で改訂が進んでいるという理解でよろしいでしょうか。

発表者

その通りです。

質問者⑦

可搬型音響試験設備は大電力を使用すると伺いましたが、可搬型音響試験設備のメリットとは何でしょうか。

発表者

大きいメリットとしては整備コストが安いことです。可搬型音響試験設備のハードウェアとソフトウェアあわせても数千万円です。