

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 氏



環境試験、宇宙への確かな道！

宇宙開発に関する海外試験標準及び試験技術の動向（続く）

概要

近年、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宇宙への活動が盛んでおり、開発コストと信頼性との両立性が重要な課題となっている中、欧米や日本では、試験標準の改定が活発となっている。本発表では、JAXAや海外における試験効果に関する検討並びに宇宙機試験標準改定の活動及び最新の試験技術動向について紹介する。

1. 日本・欧米・国際宇宙機の試験標準に関する動向
2. 宇宙機試験標準や試験方法の有効性に関する研究動向
3. 試験設備の最新動向（ロシア、DFAT）

JAXA 環境試験技術センター 施 勤忠

第11回 試験技術ワークショップ
H25年11月28日(木)



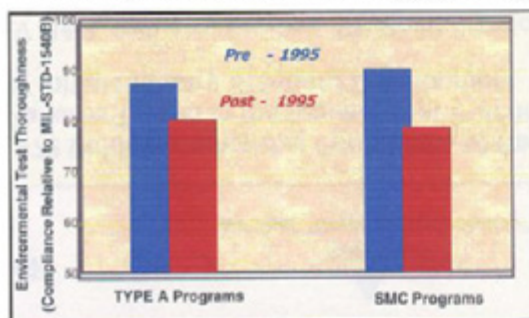
1. 宇宙機試験標準に関する動向

環境試験、宇宙への確かな道！

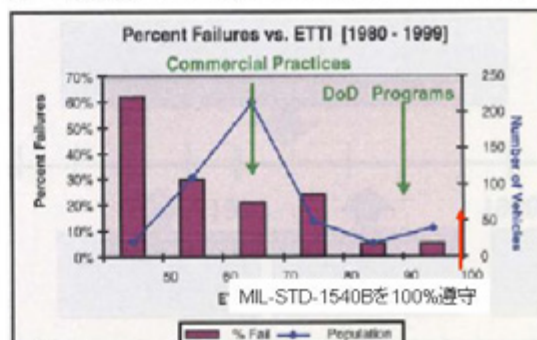
MIL-STD-1540近年の動向

1995年の'Acquisition Reform'に従い、コスト削減のため過酷な試験要求(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。企業のM&Aに起因する品質劣化もあり、我々の多くの衛星もしばしば痛い目にあっている。

- ✓ MIL-STD-1540D: 1540CをHDBK340Aへ、要求文書MIL-PRF-1540(Product Verification Requirement)
- ✓ 1540B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%。
- ✓ MIL-STD1540の遵守割合は50%以下のプログラムでは、軌道上の不具合率は高く、60%。
- ✓ 2000年MIL-1540を復活活動(Return to the Standard)開始、2006年9月ドラフト(TR-2004(8583) - 1 Rev.A
- ✓ 2013年MIL-STD-1540E - Rev.B活動(PFT熱サイクル数削減: 27→20、23TC&4TV→16TC&4TV)



D.E.Davis and W.P.Tosney "An Overview of National Security Space System Development Test Standards" 22nd Aerospace Testing Seminar
第11回 試験技術ワークショップ
H25年11月28日(木)





環境試験、宇宙への確かな道！

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)として常に過剰な要求であり、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Success保障する標準と位置付けられており、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1540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、試験用治具・制御及び公差、Unit vs. Subsystem vs. vehicle, operation vs. non-operation

第11回 試験技術ワークショップ
H25年11月28日(木)



環境試験 宇宙への確かな道！

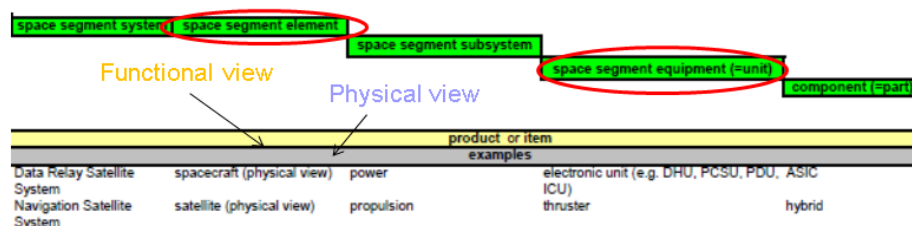
ECSS-E-ST-10-03の最新版と主な変更点

欧州宇宙機関、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。2012年6月リリース。

対象範囲 (Scope) : Space Segment Element、Space segment Equipment (Unit/Comp.相当)
環境試験、性能試験及びPrelaunchに関するQT,PFT,ATの試験要求。

主な変更点 (改善)

- ✓ 文章体系との整合性を図った。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。
例えば、Equipment→Space segment Equipment, Space Segment Element→System。
- ✓ Post 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)、削除(地上試験を注目し、解析部分を検証要求02Cへ移行)。
- ✓ 各モデルの試験要求は表で纏める。
- ✓ テラーリング及び検証Verification Compliance Matrixについて付録Dに示す。





環境試験技術センター

JAXA宇宙機試験標準 (JERG-2-130)の活動

環境試験 宇宙への確かな道！

- 人工衛星及び探査機に一般的に実施される試験（環境試験、機能性能試験、測定）に対する標準。(有人機も基本の考え方は同等)
- JAXA宇宙機一般試験標準の歴史
- ✓ 最初の試験標準は米国の試験標準GETS,GEVSを基に制定、その後5年程度置き改定
- ✓ 1998年のSTD15Aから、実質的改訂がされず
- ✓ 2012年に13年ぶりにメジャーアップデート
- ✓ 2015年のA改訂を目標に作業中
- ✓ FY24議論を元にNotice-1を発行した

標準試験一般一環宙計

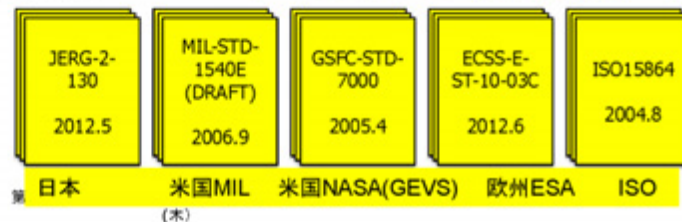
<< 2015.X JERG-2-130 A
 << 2014.X JERG-2-130 Notice-2
 << 2013.5 JERG-2-130 Notice-1
 << 2012.5 JERG-2-130

<< 2005~2010 試験ハンドブックの活動

(<< 2004.8 JERG-2-019
 科学衛星耐環境設計基準)

<< 2004.4 JERG-2-002
 << 1998.3 NASDA-STD-15A
 << 1994.3 NASDA-STD-15
 << 1989.12 NASDA-ESPEC-7B
 << 1983.1 NASDA-ESPEC-7A
 << 1979.3 NASDA-ESPEC-7

JERG-2-130の歴史と予定

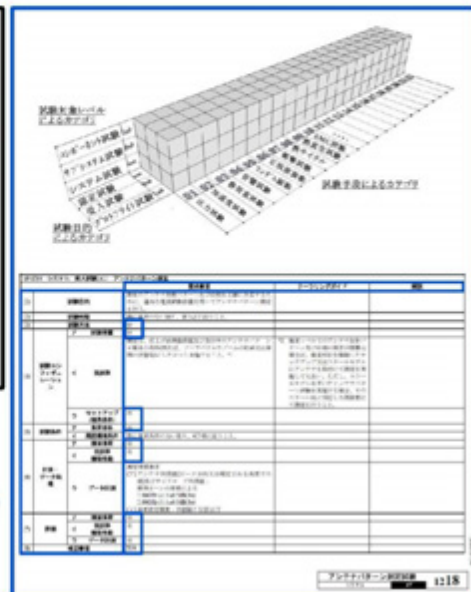
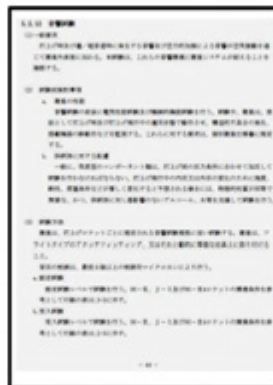


環境試験技術センター

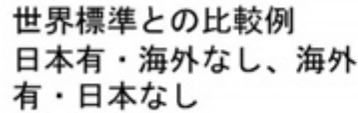
FY24年度までの成果

環境試験、宇宙への確かな道！

- ✓ 「要求」「テーラリングガイド」「解説」の識別、及び「目的」「方法」「コンフィギュレーション」「条件」「計測」等の項目分けで、記述内容が明確化・スクリーニングが可能になった。
- ✓ 他設計標準との整合性、用語や一般要求、試験項目表等統一
- ✓ FY22までの試験ハンドブックの活動結果を反映し、最新化(21項目)。
- ✓ 目次や記述事項を国内外標準と出来る限り整合を図った (MIL, ECSS, ISO, NASA)
- ✓ 識別の結果、空欄(TBD)となった要求事項を海外の標準と比較して反映すべき事項を精査
- ✓ 個別課題について信頼性・コスト効果によって優先順位を決め、審議完了した事項は、Noticeとして反映
- ✓ 要望の反映事項の検討、審議を完了し、改定する (FY26年度計画)



第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日 (木)



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

環境試験技術センター

環境試験、宇宙への確かな道！

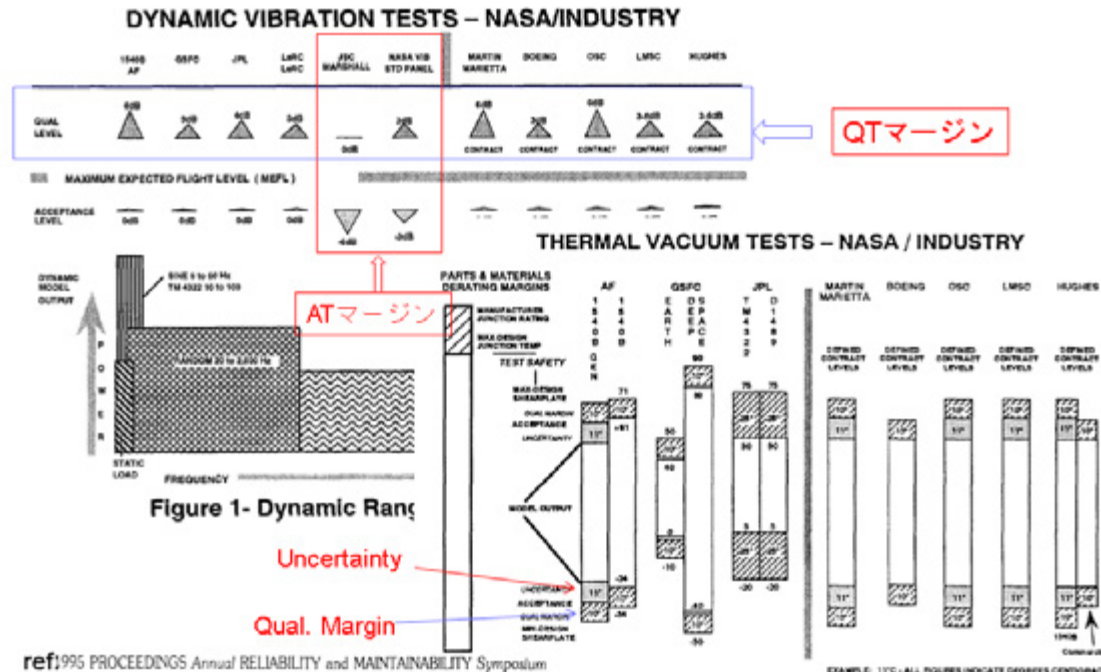
- Force Limited Vibration Test (FLVT) 技術の国際標準化
FLVTの目的は、振動試験（正弦、ランダム）時の起きる過負荷をC.O.G.加速度として制限する手法。
 - ✓ Developed by T.D. Scharon, K. Chang, D. Kern NASA JPL for the CASSINI Programm in the 90th
 - ✓ *Force Limited Vibration Testing Monograph*, NASA RP-1403 1997
 - ✓ NASA, "Force Limited Vibration Testing", NASA Technical Handbook (NASA-HDBK-7004), Jet Propulsion Laboratory, USA, 2003 (final)
 - ✓ EU first using FLVT - DLR CASSINI Cosmic Dust Analyzer 1994-96
 - ✓ DLR has supported some project (DLR Small Satellite BIRD 2001, Small Satellite TET-1 2010), proposed ECSS as Part of the Dynamic Testing HDBK(2008)
 - ✓ JAXA Force Limited Vibration Test Handbook (JERG-2-130-HB004 (2008), HB004A(2009)) 制定した。
 - ✓ 2011年5月、DLRより宇宙機国際標準ISOに提案され、現在審議中（JERG-2-130HB004との齟齬がないように修正要求）
 - ✓ 2013年10月SPICAプロジェクト化に向けたリスク低減検討で搭載計画の欧州の観測機器に対し適切なランダム振動環境条件（リミット条件）提示に適用（-12dBGrms）（ポスターセッションWP11-P03）
-
- Pre-NWIP(2012) : Space systems - Acoustic testing (China), 日本のみ30件修正要求提出
 - Pre-NWIP(2012): Space systems-Magnetic testing (Cina)、日本のみ16件修正要求提出
 - 15864: Space systems – General test standard for spacecraft, subsystems, and units (Japan based on JAXA JERG-2-130)は最新化審査終了（2013年10月）



環境試験、宇宙への確かな道！

各機関の試験標準

- ✓ Dynamic : ATはほぼ統一 (MEFL)、QTマージンは異なる
- ✓ Thermal Vacuum : 大きく異なる



環境試験、宇宙への確かな道！

2. 宇宙機試験標準や試験方法の有効性に関する研究動向

試験の有効性 (Test Effectiveness) :

試験項目・方法・試験要求を最適化にし、製品開発から運用終了までのトータルコストが最小化する。

$$C/C_F = P_{\text{over-test}}(C_T/C_F) + P_{\text{under-test}}(C_F/C_F)$$

C : HWの総コスト、C_F : HWのフライト不具合コスト、C_T : 試験による不具合の費用 (修理、再試験など)

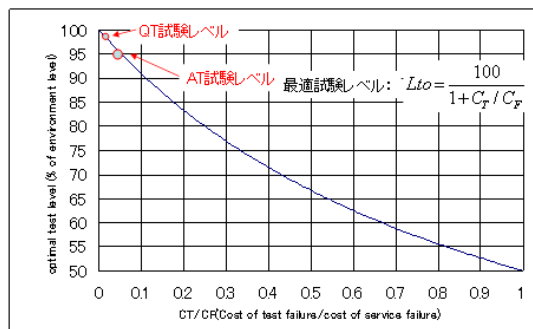
P_{over-test} : Over-testの確率、P_{under-test} : under-testの確率

試験の有効性 (Test effectiveness) とは、**地上試験は予測されたLife time中の環境をOver test又はUnder testがなく精度よく実現し、不具合を確実に発見する能力**

TE=試験時の不具合/トータル不具合

それを実現する技術は、試験技術であり、過剰・過小がなく最適な環境予測や試験精度要求を規定するものは試験標準である。

- ✓ 試験レベルは、試験対象の費用対トータル費用の比によるものであり、コストの割合が小さい程、試験レベルは厳しい (コンポはシステムより厳しい)
- ✓ ミッションの影響 (社会的、国家の名誉、安全保障等) が大きい程、試験レベルが高い



出典: A.G. Piersol, et al, Investigation of statistical Techniques to Select Optimal Test Levels for Spacecraft Vibration Tests, Digitek Corporation Report, NASA CR-115778, May 1971

第11回 試験技術
H25年11月



環境試験、宇宙への確かな道！

Test Effectivenessについて過去と最新動向

- ✓ Test Effectivenessは試験標準で決められている要求事項の費用対効果を定量的な評価、不足や過剰部分を評価し、標準を改定する。
- ✓ 米国は80年代後半から、NASA、MIL (Aerospace Corporation Corp.)が研究、調査を始め、試験マージン、T/Vサイクル数等の環境試験を着目し、各試験要求（試験マージン、サイクル数等）のTEを一万個程のコンポとそれらで構成された衛星を用いて検討。最終的にMIL-STD-1540Bの順守具合ETTIと軌道上の不具合（信頼性）を統計的に示す。
- ✓ 欧州では、1991年より、ESAからT.A.I.社にMATES (Model and Test Effectiveness Study)を依頼、その結果、データベースMATEDを統計処理できるS/Wを完成、現在、26PJ（科学、通信、地球観測）、128Models等データベース化（Browserの対応、セキュリティ、データのUpload、Download便理性や解析手法の改善など）。PJの試験要求vs.ECSS-E-ST-003,試験順序、熱試験のサイクル数等の評価を使用するため改善を実施中

第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日(木)



環境試験 宇宙への確かな道！

Test Effectiveness分析結果による試験標準への反映

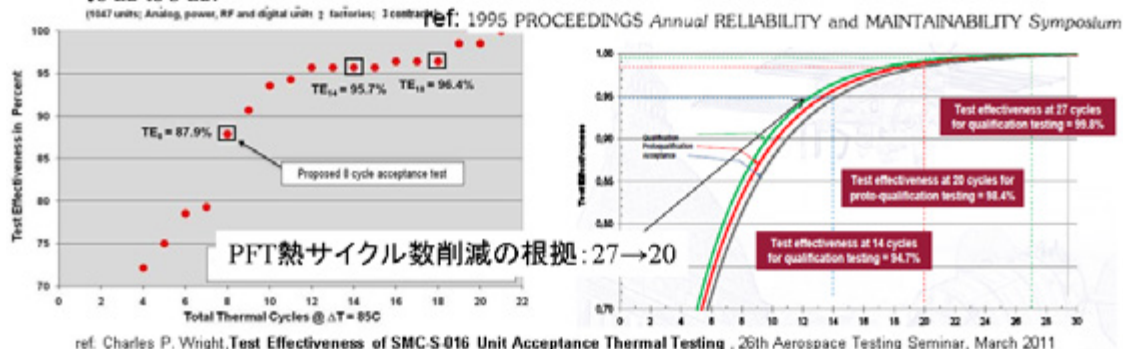
米国でTEデータ分析し、試験標準で規定している要求はOver test及びunder testのリスクが存在しており、これらを改善する必要があるとの提言

Dynamic modifications suggested include:

- revise modeling assumptions and/or
- change the 95/50 statistics rule for determining Maximum Expected Flight Levels (MEFL)
- eliminate the modal survey
- eliminate the sine vibration test
- upgrade analysis and equipment to permit force and fatigue limited tests
- reduce the qualification margin from .6 dB to 3 dB.

Thermal modifications suggested include:

- revise modeling assumptions and/or
- eliminate the 11° C uncertainty correction factor with a 10° C qualification margin
- add an acceptance margin of 5° C
- increase or decrease thermal cycling.

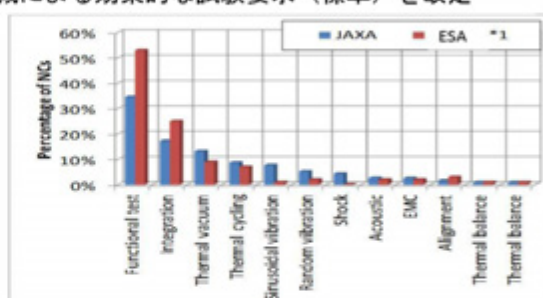
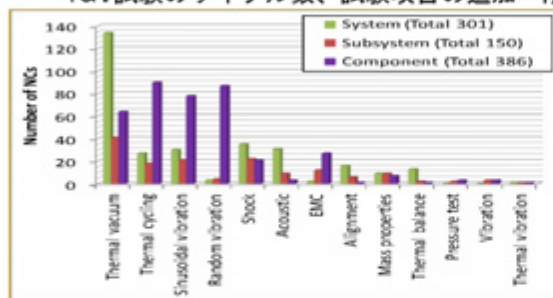




JAXAの研究状況と期待する成果

環境試験、宇宙への確かな道！

- ✓ JAPCASの不具合データベースを試験項目（T&V/Vib./Func.等）・ハードウェアレベル（Sys/Subsys/Comp.）を精査し、試験標準で規定される試験要求・項目の有効性について傾向的に考察
- ✓ T&V試験のサイクル数、試験項目の追加・削減による効果的な試験要求（標準）を改定



- System level: 半分以上のNCsはシステムのT&V環境試験で、SubsysとComp.では差異が見えない。T&V試験がH/W、S/WのI/Fや性能の検証に有効ではないか
- Subsystem level: 多くの不具合はT&V thermal (vacuum & cycling)で発生、次は正弦波、衝撃試験である
- unit level: T&Vと振動 (sine & random)は不具合発生が最も多く、ランダムとTCは最大で同等である
- 振動試験 (Sine&random)で発生する不具合は、高い構成品になるにつれ、急激に減少：Comp.の設計及びWorkmanship不具合はComp.単体試験で洗い出す効果大きい
- 不具合の統計は、傾向的にJAXAとESAが似ている

第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日 (木)



3.試験設備の最新動向：ロシア設備開発に関する基本問題とこれからの計画



✓ 試験設備：

- セントラル（モスコワ周辺）、ウラル、シベリアの3地域に集合、宇宙機試験設備の国と民間企業の役割分担
- 国：宇宙機システムレベル試験・インテグレーション、民間企業：宇宙機サブシステム、コンポーネント及びこれらの集合体、構造要素、部品
- ✓ 老朽化深刻

20年以上（半分以上）、5年未満（13%）

National Test Assets

	Spacecraft	Space Transportation	Launch Complex
1 System as a whole	-Integration and Complex tests at Environment Impact Weighting test	-Aerogas dynamics -Thermal Control -Mechanics -Environmental tests	-Aerogas dynamics -Thermal Control -Mechanics -Environmental tests
2 Subsystems	-Propulsion/RE -GNC -Therm. Control Sys. -Power Control Sys. - Onboard payload	-Propulsion/RE -GNC -Therm. Control Sys. -Power Control Sys. - Onboard facility	-Assembling Building -Launch pad -Propellant Facility -Launch Control - Power Supply
3 Units and aggregates	- Frame/Structures -Gyro -Battery -Pressure tanks etc.	- Structure -Fairing -Turbopump - Gas generator etc.	-Towers - Tanks - Lifting Facility - Control panels etc.
4 Components Materials	-Structural elements -EEE part etc.	- Structural elements - TPS etc.	-Structural elements -Propellant comp. etc.

Industrial Test Assets

第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日 (木)



環境試験、宇宙への確かな道！

環境 基本問題：

- ✓ 大・中型の設備の数が多く (>1500: strength - 400, RE - 300, onboard equipment - 200, environmental - 400)、需要以上重複している
- ✓ 設備は44の宇宙に企業に分散、時代遅れのhardware (60%)、データ処理系であり計画の試験データ解析能力が十分でない
- ✓ 設備保守、運用、開発予算が足りなく、試験や運用効率不十分
- ✓ 試験の経験者の高齢化に伴い、人員の技量低下

設備整備方針：

- ✓ 国の戦略Roadmapを実行できるように試験設備の保守・開発は宇宙活動の障害を乗り越え、予算上優先（50%超のR&Dに引き上げ）、効果的な設備Replacementを方針。
- ✓ 最適な統合を実施し、コスト効果や先進的な民生技術を導入する4つのCore国家試験センター（Moscow area:2; (Ural region:1)、(Siberian:1)を5カ年確立、コスト効果やサービスを重視してPPP原則で(government owned - private operated)運転を民間企業に。短期的に1,2個の運転企業を設立

開発計画の技術事項：

- ✓ 試験シミュレーション、計測設備、データ処理などを世界最新技術を引き上げ、優先設備は、ロケットエンジン&推進系、機械系試験（高・低温、強度、振動）、空力（M>10）、環境試験、GNC、光学試験設備（光学-電気、End-to-end path）、EEE部品検証試験
- ✓ 民生運転企業品質認定の標準整備として試験センター認証の導入、標準化（ISOでロシアが積極的提案: Accreditation of space test Centre (TC) and Laboratories- Process

第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日(木)



3.試験設備の最新動向：DFAT（直接音場音響試験）法 確かな道！ (2011年の発表更新)

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Maryland 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)。

DFAT: Direct Field Acoustic Testingは米国で研究、実用化されつつ、MSI (Maryland Sound Inc.)社が試験サービスを開始。方法はMIL-STD1540EやNASA-STD-7001Aで認められている。
メリット：試験サービス（3名、1週間程）による設備投資、保守、技能者保有するコスト不要、開発現場で対応でき供試体の輸送不要。

デメリット（拡散音場との比較）：セットアップは供試体によって異なり、事前確認や熟練者の対応が必要、音場の違いによって振動応答が異なり、面積/質量が大きい供試体に過負荷恐れがある。

システム諸元：

SPL=145dB (16kW供試体周り、TKSCの反響室75kW) $= (Pa \cdot Pa) A / pc$, Speaker Avg. Acoustic efficiency(5%~)
=350kW(電力) Random signal: 3倍 = 1.8MW-2.5MW, Speaker 5kW (300台~) = 1.5MW~



第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日(木)



環境試験、宇宙への確かな道！

(参考) DFATの歴史

- ✓ 1995: NASA/MSFC, Small Payloads, Classified Components & Science Experiments
 - ✓ 1998: NASA/GSFC/JPL, QuickScat, Ball Aerospace, 135dB OASPL
 - ✓ 1998: USAF/Fairchild, TSX-5, Fairchild Space, 135dB OASPL
 - ✓ 2000: NASA/JPL/Fairchild, ACRIM, Fairchild Space, 134dB OASPL
 - ✓ 2001: NASA/GSFC, Norsonic RTA Closed loop control
 - ✓ 2005: Sandia National Lab. DFAT SISO Controller development
 - ✓ 2009: Maryland Sound International, DFAT MIMO Controller development
 - ✓ 2011: Maryland Sound International, Significant Improvement in Spatial Uniformity and Low Coherence
 - ✓ 2001-2012: 85 DFAT test performed,
- Users include: NASA, DOD, OSC, Ball, Sandia, ITT, APL, Wyle, Goodrich
- Launch Vehicles includes: Arian, Atlas, Delta, Minotaur, Pegasus, Proton, Sea Launch, Soyuz, Taurus, Zenit, Antares, Falcon9

第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日(木)



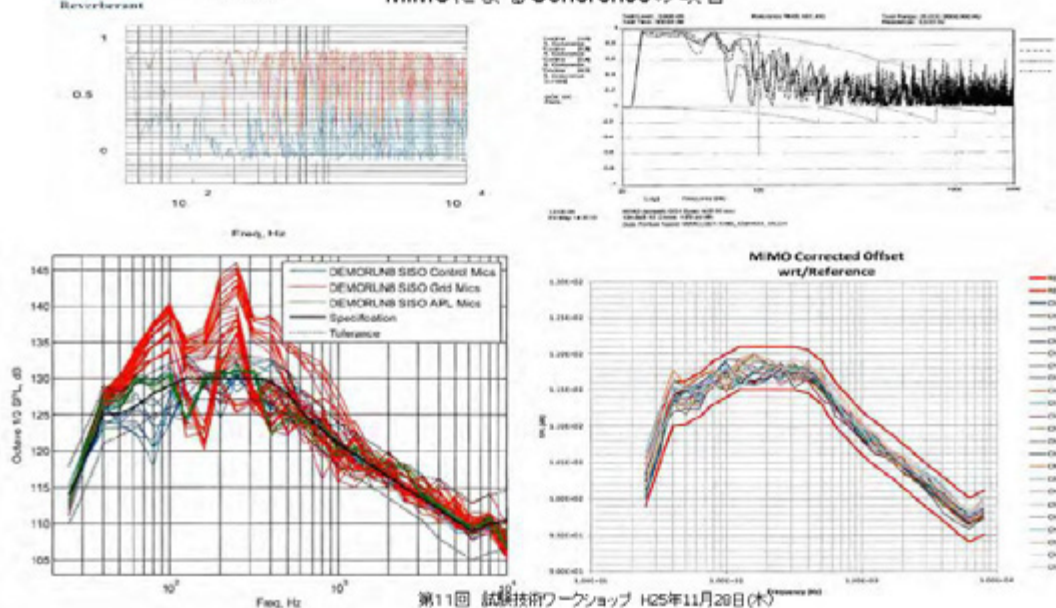
環境試験、宇宙への確かな道！

2011年からの改善点

Ref Paul A. Larkin, Direct Field Acoustic Testing, 27th Aerospace Testing Seminar, Tutorial Session, March 2012

- ✓ 多数の無相関音源発生、音圧分布を制御する (MIMO)技術の導入により、音圧の空間均一度改善、拡散音響とDFATでの加速度PDSの比較を実施した (10%の差異)。
- ✓ 面積/質量が大きい供試体への過負荷防止としてPSDリミット機能を追加。

MIMOによるCoherenceの改善



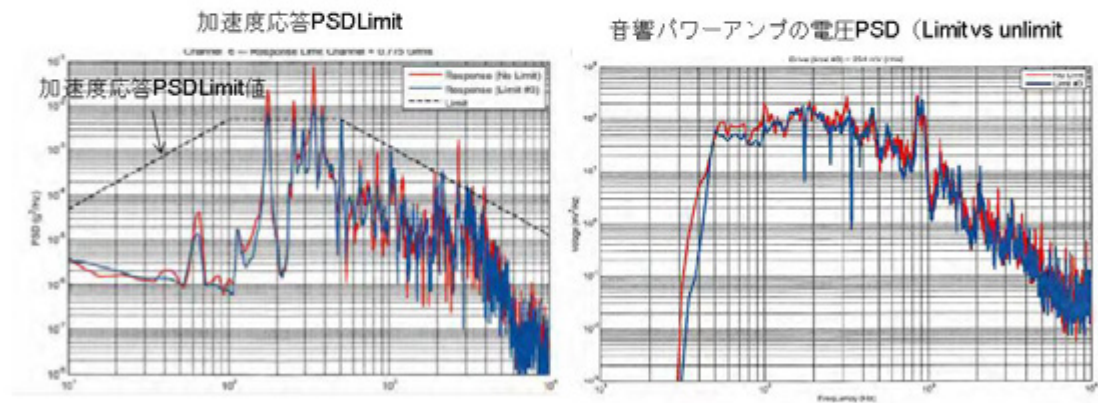
第11回 試験技術ワークショップ H25年11月28日(木)



DFATの現状纏め

環境試験、宇宙への確かな道！

DFAT試験法は、米国で試験標準の方法として認めつつであり、この2年では、MIMOの導入などで音場の均一度やCoherence、供試体の振動応答は拡散音場に近づくになり、将来の音響試験の低コスト手法として注目すべきである。



第11回 試験技術ワークショップ H25年11月20日(木)

質疑応答

質問者① JAXA 安倍部 角様

海外標準との比較はどれくらいマンパワーがかかるか。設計標準全体でも海外との比較はメーカーからも要望が上がっており是非教えていただきたい。

発表者

私一人でやっても 1 年間では終わられない。非常にボリュームがある。大変な作業であるが、試験センターの若手 5, 6 人が中心となって頑張ってくれている。文章を読みながら照らし合わせていくため、機械的な作業では進められないという点が大きい。しかし海外との比較は JAXA との違いなど勉強になる。