

5.5. 全球降水観測/二周波降水レーダ (GPM/DPR) における試験検証

宇宙航空研究開発機構 宇宙利用ミッション本部

GPM/DPR プロジェクトチーム

百束 泰俊 開発員



GPM Global Precipitation Measurement




GPM主衛星搭載/二周波降水レーダ(DPR)における試験検証

第8回 試験技術ワークショップ
平成22年11月12日 総合開発推進棟 大会議室

宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙利用ミッション本部
GPM/DPRプロジェクトチーム 百束泰俊




GPM Global Precipitation Measurement



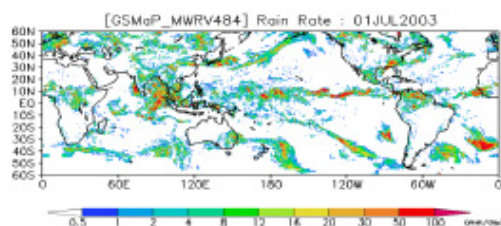
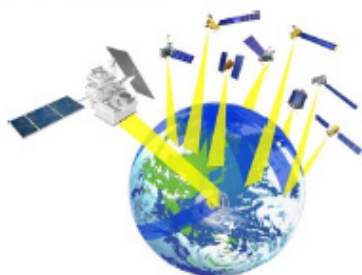

はじめに(1)

* GPMとは

Global Precipitation Measurement の略称

全球 降水 観測

- ・GPM主衛星と副衛星群を組み合わせ、**全球を3時間毎**に観測するという計画
- ・**日(JAXA)** **米(NASA)**が全体計画をリードし、NOAA、CNES-ISRO等も参加



はじめに(2)

GPMの意義・利用

- ・数値天気予報の精度向上
- ・台風予測精度向上
- ・洪水予測への貢献等の実利用及び現業利用
- ・風水害防災への利用等
- ・農業及び水資源管理 等など



台風の予測精度が向上すると
全世界で年間約100-500人の
人命を救える！



世界的には自然災害の3分の2
が洪水/豪雨災害！



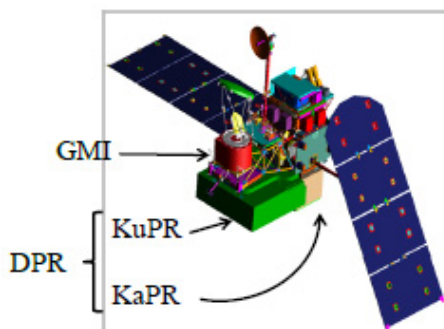
食は生活の基本！

2

はじめに(3)

GPM主衛星とは

- ・JAXAの開発するDPRと、NASAの開発するGMIを搭載
- ・主衛星(特にDPR)で観測されたデータが副衛星群を含めた全てのデータの基準となる重要な役割
- ・2013年夏期に種子島宇宙センターとかH-IIAロケットで打ち上げる



項目	仕様
ミッション機器	二周波降水レーダ(DPR) GPMマイクロ波放射計(GMI)
ロケット	H-IIAロケット
設計寿命	3年2ヶ月
質量	3,850 kg
軌道種別	太陽非同期円軌道
軌道高度	407 km
軌道傾斜角	65度



3

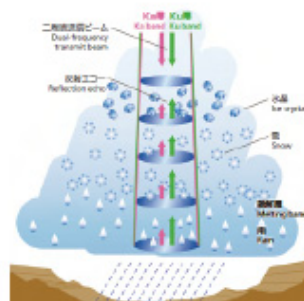
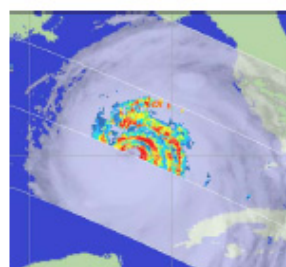
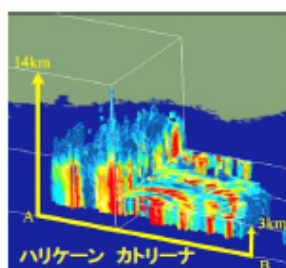
はじめに(4)

★ DPRとは

Dual-frequency Precipitation Radar の略称

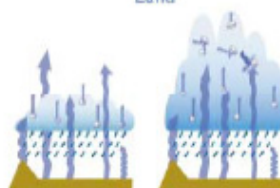
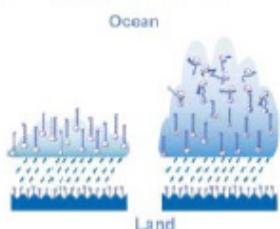
二周波 降水 レーダ

- ・比較的強い雨の観測を得意とするKu帯のレーダ(アクティブフェーズドアレイ方式)と、弱い雨及び雪の観測を得意とするKa帯のレーダを組み合わせた宇宙機として**世界初の観測センサ**
- ・降水の**三次元構造**が観測可能



4

[参考]降水レーダ原理とその長所



Radar



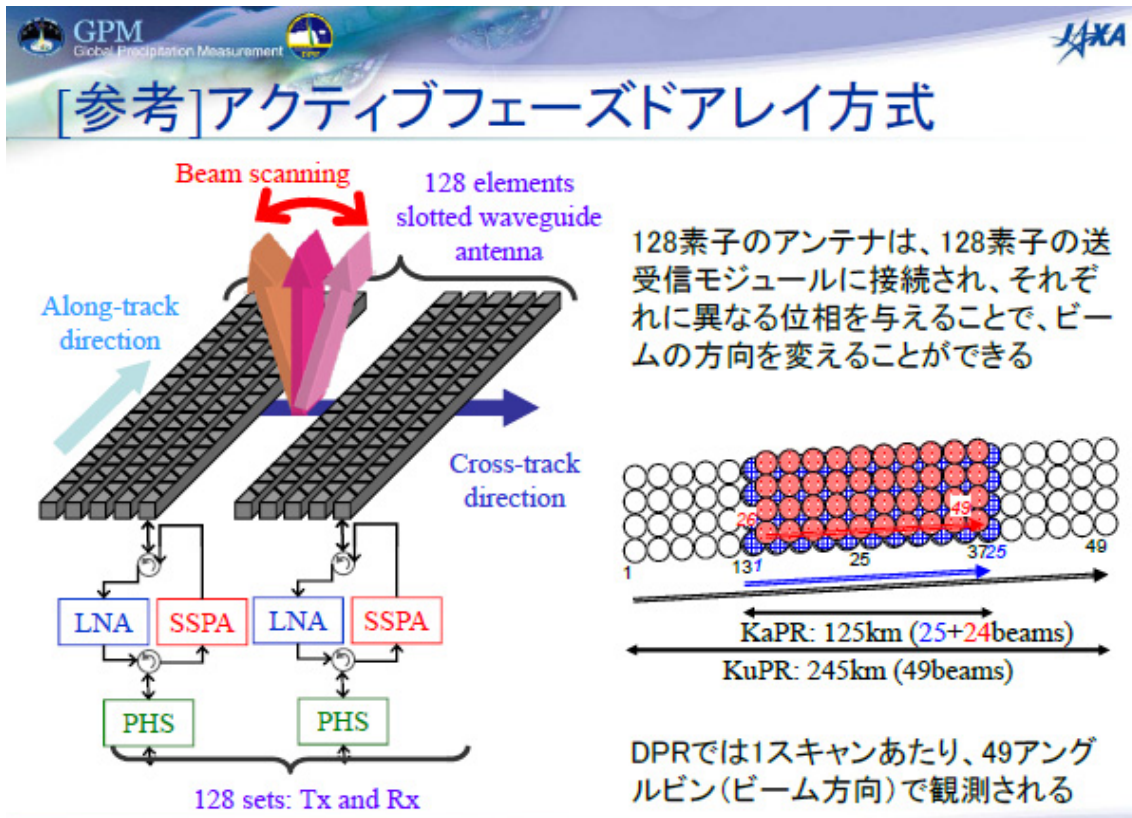
マイクロ波放射計、マイクロ波サウンダによる 降水量推定の原理

TMI は雨粒から常に放射されているマイクロ波の放射強度を測定して雨の強さを推定する装置です。雨粒の量が増えると放射されるマイクロ波の強度も強くなることを利用しています。但し、背景のマイクロ波放射が強い陸上ではこの原理が使えません。雨が非常に強くなると、下の方で放射されたマイクロ波自身が上の方の雨に吸収されるという事が起こるので、雨量のように上空からマイクロ波の強度を観測していると、下の方の雨の情報が得られなくなってきます。また、周波数が高くなると、上空にある雪や氷晶などによりマイクロ波が散乱される効果が大きくなります。複数の周波数におけるマイクロ波での放射を測定すると、周波数による吸収と散乱の効果の違いを利用して、降水システムの種類や高さ、降水の強度などを推定する事ができます。TMI では5つの周波数を使っていました。水平分解能はPR より劣りますが、観測幅がPRの3倍以上あります。

降水レーダによる降水量推定の原理

PR は発射した電波のうち雨粒に当たり反射し返ってきたもの(降雨エコー)を測定し、その強度から雨の強さを推定する装置です。電波を出してから降雨エコーが返ってくるまでの時間の遅れを利用して、高度別の降水強度が測定できるのが大きな特徴です。自ら発射している電波を信号源としているため、背景ノイズもほとんど影響されず、海上でも陸上でも同じようにデータが取得できます。観測幅は狭いですが、水平分解能が約4.5km、鉛直分解能が約250mと分解能が良い事も大きな利点です。

5



6



7



DPRの主要性能



	KuPR	KaPR
Frequency	13.597, 13.603 GHz	35.547, 35.553 GHz
Horizontal Resolution	5.2 km (at nadir)	5.2 km (at nadir)
Swath Width	245 km	120 km
Scan period	0.7 sec	0.7 sec
Range Resolution	250 m	250 m / 500 m
Observation altitude	Up to 19 km	Up to 19 km
Minimum Detectable Rainfall Rate	0.5 mm/hr	0.2 mm/hr
Measurement Accuracy	within ± 1 dB	within ± 1 dB
Beam-matching Accuracy	< 1000 m	
Data Rate	< 108.5 kbps	< 81.5 kbps
Mass	< 472 kg	< 336 kg
Power Consumption	< 446 W	< 344 W
Size	$2.5 \times 2.4 \times 0.6$ m	$1.2 \times 1.4 \times 0.8$ m



[参考]雨の強さ あれこれ



✧ 気象庁の基準

弱い雨 - 3mm未満

やや強い雨 - 10mm以上20mm未満

強い雨 - 20mm以上30mm未満

激しい雨 - 30mm以上50mm未満

非常に激しい雨 - 50mm以上80mm未満

猛烈な雨 - 80mm以上



✧ 感覚的には、

降水量一時間1mm未満の雨であれば短い距離を傘なしで歩くことができる

1mmを超えると一般に傘などの雨具が必要である



一時間3mm以上で、舗装されていない道に水溜りが発生する

DPRの最小降雨測定強度 **0.2 mm/hr 高感度!**



DPRの試験検証を語る上でのキーワード(1)

- ❖ GPMはJAXA-NASAの共同ミッションである
衛星とのI/FはICD(インタフェース管理仕様書)にて規定
(但し、I/F項目以外はJAXAの設計標準をもとに設計)
→①NASA特有の検証要求 サインバースト試験
- ❖ GPM主衛星は低軌道である
- ❖ H-II Aロケットで打ち上げる
低軌道で使用するMLIは原子状酸素への耐性が必要
最近H-II Aロケット打ち上げ時の減圧プロファイルが変更
→②DPRで使用するMLIの減圧試験



DPRの試験検証を語る上でのキーワード(2)

- ❖ DPRはフェーズドアレイレーダである
レーダとしての総合性能確認にはopen airでの折り返し動作が必要
→③電波試験設備でのIEPT/FEPT

フェーズドアレイ方式=複数の送受信コンポーネント

→④送受信コンポーネント振動試験(KuPR16台、KaPR16台)



①サインバースト試験



サインバースト試験(要求の根拠)(1)

- ✳ ICDにて以下の要求事項あり

3.2.9.6 DPR Structural Loads Qualification and Reliability

Qualification of the KuPR and KaPR instruments for the structural loads environment requires a combination of test and analysis. The DPR shall be designed to take the entire moment, from the shear load, at the spacecraft kinematic mount interface. A test-verified finite element model of the KuPR and KaPR instruments shall be used in the GPM model for coupled loads analyses of GPM/ELV. A stress analysis shall demonstrate positive margins of safety for yield and all ultimate failure modes. **Strength and reliability shall be demonstrated by load testing of the KuPR and KaPR instruments to 1.25 times the design limit loads for the structural thermal model (e.g. the engineering test unit or ETU) and) and 1.1 times the design limit loads for the flight unit. Strength testing may consist of acceleration testing, static load testing, or sine burst testing.**

要するに、

「信頼性を試験によって証明しろ(=プルーフ試験)」という要求。

フライト品に対しては $\text{limit load} \times 1.1$ のproof testを要求。





サインバースト試験(要求の根拠)(2)

- ✳ では、GEVS (General Environmental Verification Standard) にはどのように書いてあるのかというと、

2.4.1.4 Structural Reliability (Residual Strength Verification) - Structural reliability requirements are intended to provide a high probability of the structural integrity of all flight hardware. They are generally covered by the selection of materials, process controls, selected analyses (stress, and fracture mechanics/crack growth), and loads/proof tests.

All structural materials contain defects such as inclusions, porosity, and cracks. To ensure that adequate residual strength (strength remaining after the flaws are accounted for) is present for structural reliability at launch, a fracture control program, or a combination of fracture control and specific loads tests, shall be performed on all flight hardware as specified below.

この後に、Beryllium、複合材、金属ハニカム、接着について要求が続く。金属ハニカムはクーポン試験、process controlsが許容されているものの、それ以外は基本的にlimit load $\times 1.25$ のproof testを要求。



サインバースト試験(要求の根拠)(3)

- ✳ さらに、機械設計標準にはどのように書いてあるかというと、

3.15.3.6 ブルーフ荷重試験

PFM 又は FM では一般に静荷重試験を実施しないので、構体に多少なりとも荷重が負荷されるのは正弦波振動試験に限られる。正弦波振動試験では複合荷重は模擬できず、構体各部に特定の荷重を負荷することも難しい。従って、検査だけでは製造上の欠陥をみつけにくい構造部材にはブルーフ荷重試験を個別に実施してワークマンシップの確認を行う必要がある。

試験対象：PFM 又は FM のすべての主構造及び2次構造部材について下記の条件を考慮してブルーフ荷重試験の要否を検討し、必要と判断されるものについては試験を実施すること。

原則として接着構造、接着継ぎ手、複合材構造、脆性材料やガラスなどの非構造材料の構造はブルーフ荷重試験を行うこと。荷重は制限荷重 $\times 1.20$ を基準とする。荷重は最も厳しい組み合わせ、及び方向*とする。複合荷重を同等以上の厳しさの単軸荷重に置き換えても良いものとする。

- * 例えば、層間剥離等の内在欠陥がクリティカルとなる複合材料構造は圧縮。クラックによる亀裂進展がクリティカルとなる低靱性材の場合は引張り試験、等



サインバースト試験(要求の根拠) (4)

以下の条件に該当する場合は必ずしもプルーフ荷重試験を実施しなくても良い。

- 通常の構造用金属材料（アルミニウム、チタン、ステンレスなど）でできていて、安全側の解析あるいは開発試験で強度が確認されており、製造公差による強度低下を考慮しても降伏、終極それぞれの M.S. が正である構造部材。
- 通常の構造用金属材料でできていて、安全側の解析あるいは開発試験で終極に対する M.S. が 0.25 以上であることが確認されているボルトやリベットなどによる機械的結合部。
- 単体あるいはシステムでの振動試験時の荷重が支配条件で、実際にそれらの試験で降伏荷重まで負荷される構造部材。
- 確立した製造手法で製作されたハニカムサンドイッチパネル（複合材表皮を含む）及びインサートで、万一破損しても衛星全体の破壊につながらない箇所に使われているもの。

フライト品に対して、静荷重試験を実施しない前提。また、要素単位でのプルーフ試験もしなくてよいというニュアンス。

実際、フライト品で静荷重試験を行うことはほとんど無い。



サインバースト試験(要求の根拠) (5)

❖ さらにさらに、衛星一般標準にはどのように書いてあるかというと、

6.2.18 サブシステムの認定/受入/プロトフライト試験に関する補足

6.2.18.2 構体サブシステム試験

(3) プロトフライト試験

プロトフライト試験以前に、構造モデル試験等によって、強度に対する設計検証が行われている場合には、プロトフライト用の構体サブシステムが正しく製造されたことを確認するために、必要により静的荷重を負荷し、その強度を実証する。

特に接着接手、複合材料及び低延性材のような目視では満足に検査しにくいものや、製造プロセスによって構造特性が比較的变化しやすい部材が対象となる。

そもそも補足の項目に書いてある。

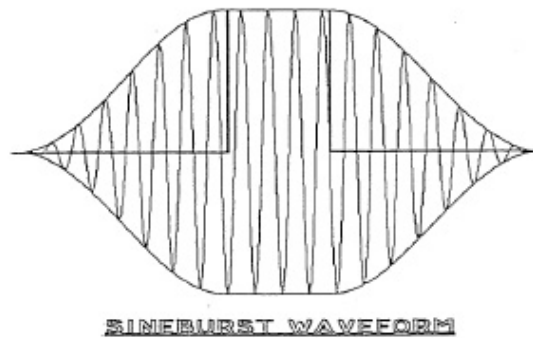
サインバースト試験 試験手法(1)

- NASA/GSFCの資料(GEVS等)によると、サインバーストの試験条件は以下の通り

供試体の固有値の1/3以下の周波数を使用

Hanning window function : $1 - \cos(\omega t)$

5 cycles @ full level

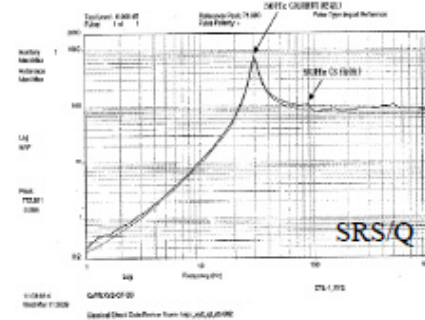
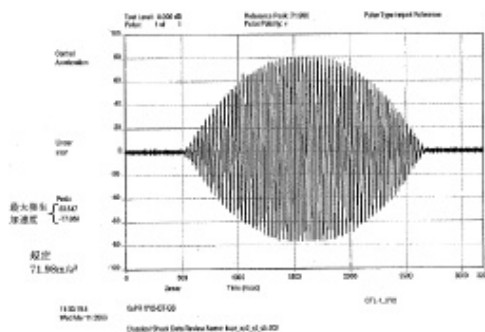


18

サインバースト試験 DPR STM@TKSC(1)

- 筑波で実施したSTMのサインバースト試験の条件は以下の通り

加振周波数: 30Hz、5 cycles @ full level、立上がり/立下り 各30cycles



高調波成分がローカルな共振を励起しないか、供試体側の応答に注意する必要がある

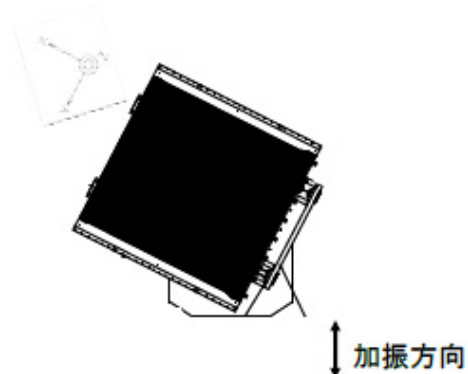
サインバーストは開ループ制御のため、徐々に試験レベルを上げながら制御特性及び重心位置の加速度(入力フォース)を確認する必要がある

19



サインバースト試験 DPR STM@TKSC(2)

- 最小MSを発生させる荷重方向を模擬するために、Z周りに回転させた試験コンフィグレーションとなった



20



[参考]フライト品の静荷重試験@NASA

- GPM主衛星の場合、フライト品の静荷重試験は、サインバーストではなく、旋回腕試験装置 (centrifuge facility) を使う



衛星搭載部



21

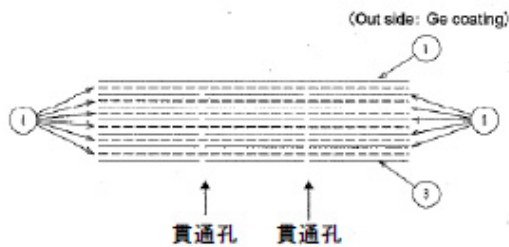


②MLIの減圧試験

22



- ✳ DPRでは、原子状酸素に対する耐性を確保するため、MLIの最外層に**通気孔の無い**設計を採用している



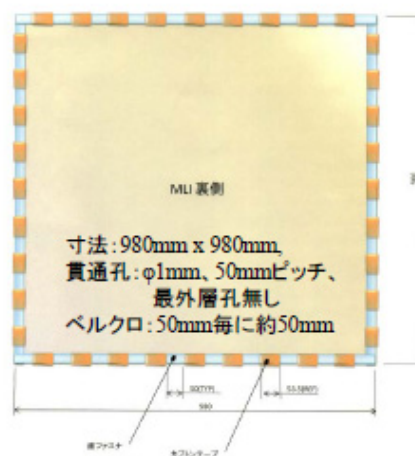
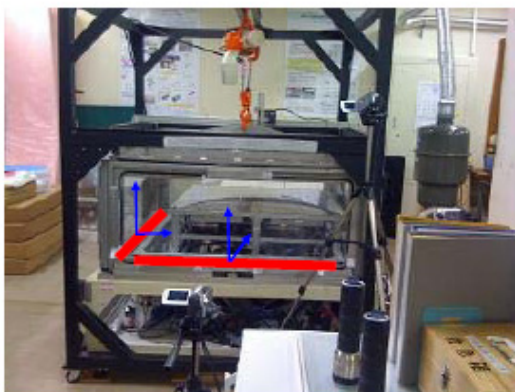
符号	名称	製品番号	層数	備考
①(最外層)	Ge蒸着 黒色ポリイミドFIL	(Sheldahl P/N: 160826)	1	穿孔なし 厚み 40.6 μ m (耐原子状酸素性、導電性)
②(内層)	AL/ポリエステル/AL	(Sheldahl P/N: 140406)	5	穿孔あり 厚み 8.3 μ m フライト実績あり
③(最内層)	AL/ポリエステル/AL	(Sheldahl P/N: 140417)	1	穿孔あり 厚み 25.4 μ m フライト実績あり
④(内層)	ポリエステルネット	(Sheldahl P/N: 147695)	6	フライト実績あり

- ✳ MLI剥離防止設計標準では、最外層に通気孔の無いMLIについても試験により剥離しないことが確認されているものの、相対的には危険側の設計であること、またH-II Aロケット打ち上げ時の減圧プロフィールが変更されたことを受けて、試験により検証を行うこととした

23

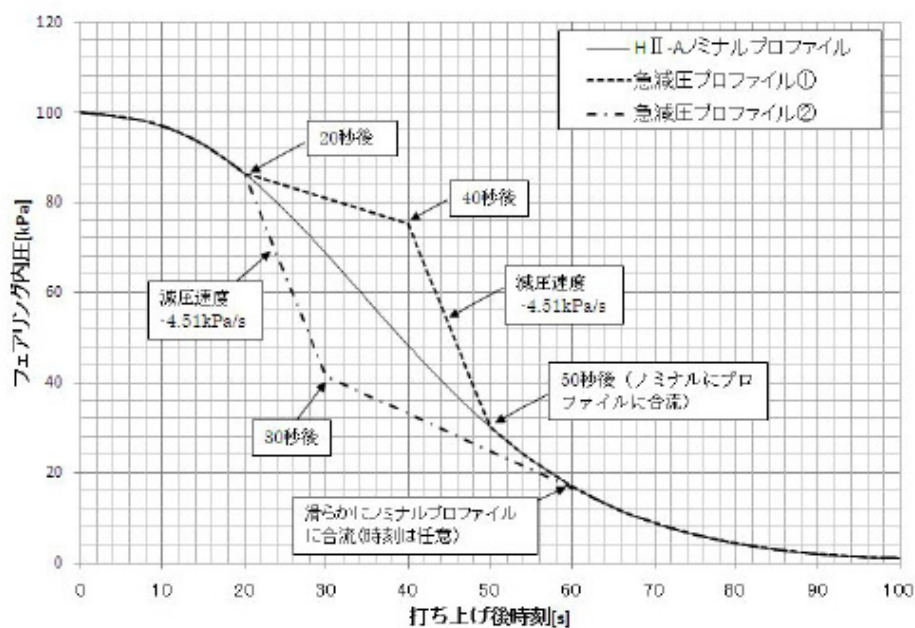
MLI減圧試験 試験条件

- 試験条件は以下の通り
- 減圧プロファイル: 3種
- 膨張高さ、各辺の水平/垂直荷重で評価



24

MLI減圧試験 減圧プロファイル



25



③電波試験設備でのIEPT/FEPT



電波試験設備でのIEPT/FEPT(1)

- ❖ レーダとしての総合性能確認にはopen airでの折り返し動作の検証が必要
- ❖ 下の写真はEMの時の試験風景



フライト品の試験はどうする・・・(清浄度/温室度の管理)



電波試験設備でのIEPT/FEPT(2)

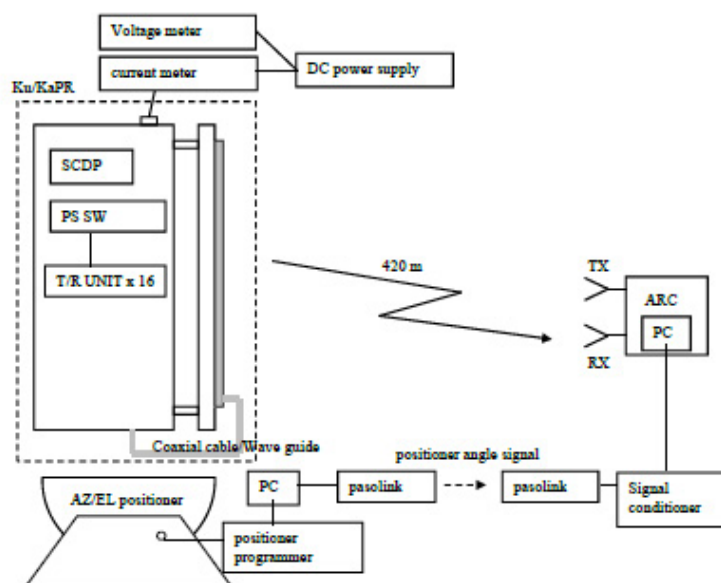
- ※ フライト品のIEPT/FEPTに使用するクリーンブースを製作
- ※ ビニールシートはKu帯、Ka帯の透過減衰測定を実施
- ※ 準備室の空気を取り込みフィルタを通してブース内に送風
- ※ 今月(2010年11月)のKuPR IEPTから使用予定
- ※ 試験時期(冬季)はブース内と外気との温度差が大きく、結露に要注意



28

電波試験設備でのIEPT/FEPT(3)

- ※ 試験コンフィギュレーション



29



④コンポーネント振動試験



- ❖ フェーズドアレイ方式にてスキャンを行うDPRは、それぞれ128系統の送受信モジュールを備える
- ❖ 8系統をユニット化し、KuPRとして16台、KaPRとして16台の送受信ユニットを搭載
- ❖ それぞれ1台はPFT試験を実施し、残り15台はAT試験
- ❖ 機械環境：正弦波振動試験（PFT）、ランダム振動試験（PFT/AT）

Ku T/R UNIT 7kg程度



Ka T/R UNIT 6kg程度



コンポーネント振動試験 固有値のシフト(1)

- ※ ランダム振動試験条件 (KuT/R UNIT, KaT/R UNIT 共通)

周波数 [Hz]	加速度PSD [$(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$] [G^2/Hz]	
	AT	PFT
20~70	+6dB/Oct.	+6dB/Oct.
70~270	15.2 {1.6}	30.3 {3.1}
270~400	-6dB/Oct.	-6dB/Oct.
400~1000	6.9 {0.7}	13.9 {1.4}
1000~2000	-8dB/Oct.	-8dB/Oct.
実効値RMS	108.4 m/s^2 rms {11.1 Grms}	153.2 m/s^2 rms {15.6 Grms}

- ※ ランダム振動前後の固有値シフトについての考察
- ・KuT/R UNIT、Ka T/R UNITはランダム振動前後にモーダルサーベイ (0.5G、4oct/min) を行い、構造の健全性を確認している
 - ・一次固有値のシフト量について考察

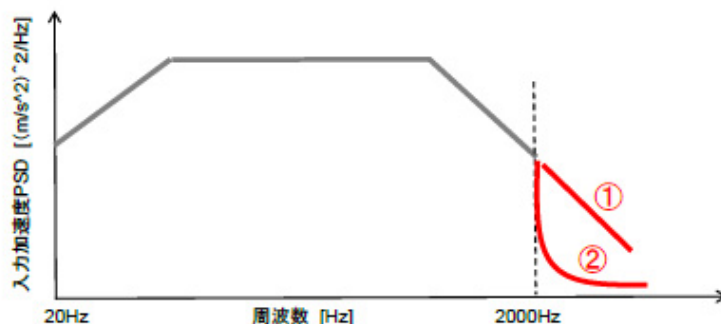
32

コンポーネント振動試験 設備特性(1)

- ※ ランダム振動試験における入力加速度PSD

試験上限周波数の先はどうなっている？

- ① 勾配を維持したまま低下
- ② フィルタがかかり急激に低下
- ③ その他



ランダム振動試験の試験条件の例

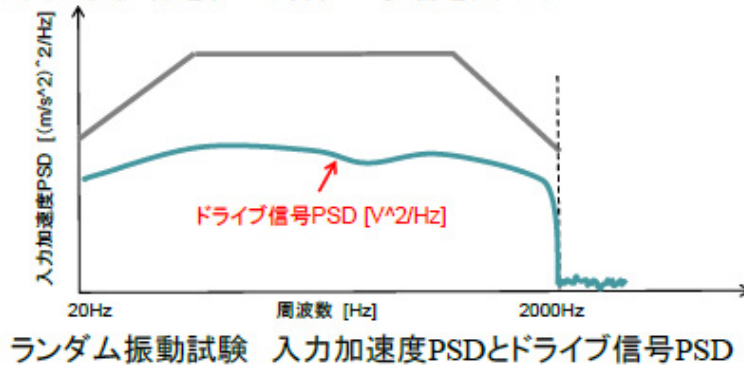
33

コンポーネント振動試験 設備特性(2)

※ 正解は、「③その他」

実は、計測してみないと分からない

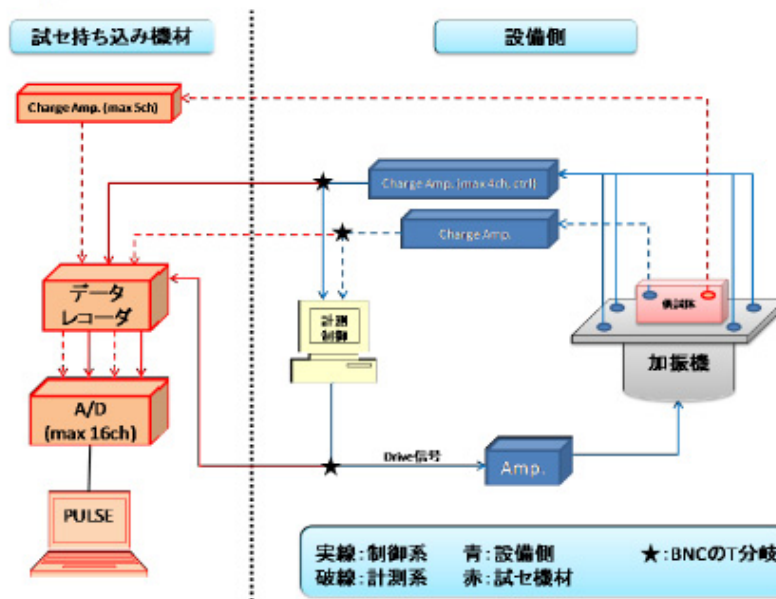
- ・試験周波数上限より先は、ドライブ信号にはフィルタがかかり入力がないが、加速度PSDをもとに制御されているわけではない
- ・加振機(治具や供試体を含む)特性の影響を受ける



34

コンポーネント振動試験 設備特性(3)

※ 計測コンフィグレーション



35



コンポーネント振動試験 設備特性(5)

- ❖ 高周波の意図せぬ入力が気になる場合(例えば供試体にとって無視できない周波数が2000Hz以上にある場合など)は計測・評価が必要
- ❖ 無負荷/負荷状態では特性が異なることに注意
- ❖ 加振機能力に対して、相対的に重めの供試体の場合は要注意
- ❖ EMとPFMで試験設備を変えるときは要注意

36



まとめ

DPRにて実施した以下の試験について、試験要求(とその根拠)や試験で得られた知見を報告した。

- ①NASA特有の検証要求 サインバースト試験
- ②DPRで使用するMLIの減圧試験
- ③電波試験設備でのIEPT/FEPT
- ④コンポーネント振動試験

今月(2010年11月)から、DPR PFMのPFTを筑波宇宙センターにて実施する計画である。

37




最後に DE部門との協力体制

- ✳ GPM/DPRでは、要素試験～システム試験まで様々な専門グループの協力を得て、開発を進めています。

試験名称	協力部門	協力内容
サインパースト試験	環境試験技術センター	試験仕様の検討、データ評価
コンポーネントランダム振動試験	環境試験技術センター	メーカ試験設備の評価
熱制御材料の耐宇宙環境試験	電子部品・デバイス・材料グループ	紫外線照射試験、AO照射試験等の実施、データ評価
放電試験	電源グループ	試験の実施、耐放電パラメータの取得、データ評価
MLI剥離試験	熱グループ	試験の実施、データ評価

今後ともご協力をお願いします。

質疑応答

質問者①

電波試験設備第 2 無反射室でクリーンブースを設けて清浄度を保ったまま試験をすることですが、GPM/DPR 程の大きさの供試体を対象とした電波試験で、過去に同様にクリーンブースを設けて試験を実施した例があるでしょうか。また、環境試験技術センターに対して何か要望がありますでしょうか。

発表者

GPM/DPR は TRIM の PR という開発方式を踏襲して開発を実施していますが、TRIM の PR についてはクリーンブースを使用したという話は聞いていません。ミッション機器の開発側としては最終コンフィギュレーションを構築して End to End で機能試験を行いたいため、今後も第 2 無反射室（オープンエア）を使用したファーフールド電波試験のニーズはあると考えます。環境試験技術センターへの要望としては、第 2 無反射室に空調設備を導入して清浄度及び温湿度を管理できるようにしていただきたいです。

質問者②

サインバースト振動試験について、NASA はセントリフュージュで静荷重試験を実施することですが、サインバースト振動試験とセントリフュージュで行う静荷重試験との違いはなんでしょうか。

発表者

サインバースト振動試験は剛体と見なすことができる周波数領域で加振するものの、動的な荷重を入力するため、意図しない高周波領域の加振入力が増加する危険性があります。

質問者②

セントリフュージュによる静荷重試験が最も簡便な方法なのでしょうか。

発表者

サインバースト試験とセントリフュージュによる静荷重試験とでどちらが簡便な方法かというのは、一概には言えません。サインバースト振動試験は複合荷重を考慮する必要があり、ランダム振動試験や正弦波振動試験の試験コンフィギュレーションをそのまま使用できるとは限らず、サインバースト振動試験専用の治具が必要になる可能性があります。一方、同じ振動試験設備を使用できる場合は、設備間の移動が不要、設備運用側の付帯作

業が不要等の理由により、サインバースト振動試験が簡便となる可能性もあります。

質問者③

NASA はセントリフュージュを使用して静荷重試験を実施するとのことですが、NASA がセントリフュージュにこだわる理由は为什么呢。

発表者

NASA がフライト品に対してもセントリフュージュを使用した静荷重試験を実施する理由は、振動試験で全ての部位に対して全ての負荷が入力されるとは限らず、また、接着部材・複合材等については材料自体の欠陥を検証してフライト品の信頼性を保証しているからです。

質問者③

NASA でのセントリフュージュを使用した静荷重試験では、機軸方向に対しても荷重を負荷するのでしょうか

発表者

その通りです。