

4.7 人工衛星の試験をめぐる最近の トピックス

宇宙利用ミッション本部

利用プログラム・システムズエンジニアリング室

前田 剛 主任開発員

人工衛星の試験をめぐる 最近のトピックス (一般配布用)

2008年11月21日

宇宙利用ミッション本部
利用プログラム・システムズエンジニアリング室
前田剛

1

最近のトピック

1. 最近の試験で興味深いもの
 - － 擾乱評価
 - － ダミー推薬の取扱い
2. 試験での確認が基本となりそうなもの
 - － End to End 試験としてのRF放射試験
3. 軌道上不具合分析から地上試験に求められるもの
 - － 最大EMI条件での電気試験

2

1. 最近の試験で興味深いもの

(1) 擾乱評価

- 経緯
- 宇宙機設計標準WG7「擾乱管理標準」より
- 微小擾乱の評価 ~GOSATの例~
- 軌道上運用フェーズの例 ~WINDS~

3

経緯

- ETS-VI、COMETS(ESA開発当初)
 - ー 70~90Hzでの共振に対する懸念は把握されていた。
 - ー ETS-VI RWの回転数上限は4600rpmだったが、COMETSで6000rpmまで引き上げられた為、ESAに干渉(共振)する可能性が出てきた。
 - ー COMETSも含めて干渉回避のため運用制約を設けることで対処した。
- SOLAR-B
 - ー RW擾乱によるIRU帯域外感度への干渉が問題となった。
- DRTS、ETS-VIII、ALOS
 - ー MW、RW回転の擾乱によるESA共振への影響を評価した。
 - ー DRTSは、ESA、RIGAとも問題なし。ETS-VIIIはRIGAに共振した。
 - ー ALOSは射場でも擾乱評価を実施し、ミッション機器への影響を評価した。特に問題なし。
 - ー ETS-VIIIは、問題の擾乱がノミナルでは使用しない範囲のRW回転数であったため、運用制約を設けることで対処した。
 - ー いづれも、軌道上運用においても問題なし。
- WINDS以降
 - ー ESA、IRUへの共振の有無をシステム試験で評価

4

宇宙機設計標準WG7 「擾乱管理標準」より

- 擾乱管理の目安
指向精度要求0.001deg以下、指向安定度要求0.0001 deg/s以下
制御系と擾乱源の帯域を1Decade以上離す
- 総合擾乱特性試験(PFMによる試験)
「…システムで実施する擾乱特性試験は技術的にも難しく、大規模なものになるので、関連する各分野を総合して入念な試験計画の立案が必要」
- 軌道上運用フェーズ、運用制約
「…パドル展開擾乱、アンテナスルー時の擾乱、サーマルスナップ振動の
静定等、運用制約となる場合が多い。これらの擾乱による運用制約を識別し、運用手順等に反映…」
「…万が一の場合には、運用での回避を試みる」

5

軌道上運用フェーズの例 ~WINDS~

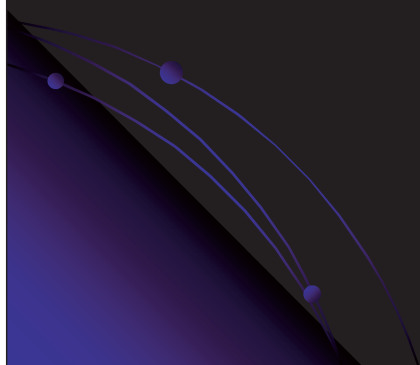
- 擾乱に起因するものと思われるESA振動が発生
 - TLM評価の結果、アンテナ指向制御器(APM)の自動追尾時のリミットサイクルが擾乱となり影響していることが判明
 - 姿勢制御系には影響ない(制御帯域外)
 - 地上での事前検証が不十分であった
- 地上での擾乱試験
 - ドーリ搭載状態で実施(電波試験棟RF放射試験時)
 - RWA、APMからの各擾乱を評価
 - APMスルー駆動は評価したがリミットサイクルは未実施

6

軌道上の擾乱 ～ESA出力の様子～



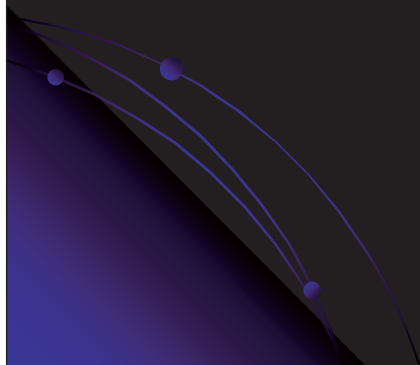
テレメトリグラフは、ワークショップ当日、会場発表のみ使用



7

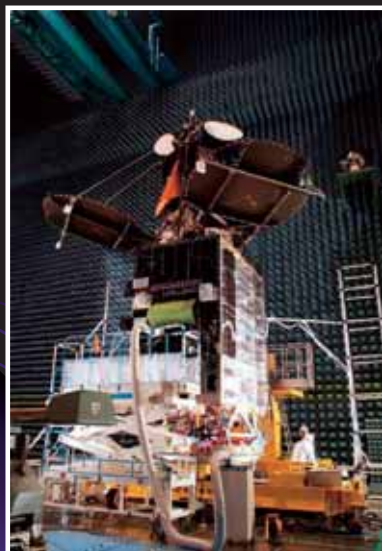
軌道上の擾乱 ～APM駆動の様子～

テレメトリグラフは、ワークショップ当日、会場発表のみ使用

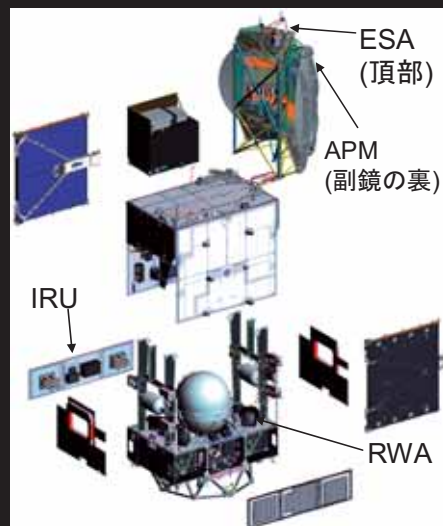


8

WINDS 擾乱試験の様子



RF放射試験と並行して擾乱試験を実施



9

擾乱評価に関する考察

- 設計標準として整理されており、今後のプロジェクトは標準に準拠した設計が求められる。
- 予測が困難な現象であり、システムレベルの何らかの直接的な評価試験が有効である。
- システムPFT、軌道上運用での実績を設計にフィードバックさせていくことが大切。

10

1. 最近の試験で興味深いもの

(2) ダミー推薬の取扱い

～ダミー推薬非搭載の正弦波振動試験～

➤ 経緯

➤ 準天頂衛星(QZS-1)の例

11

経緯

- 静止衛星は、推薬が打上げ質量の約半分を占めるため、振動試験でダミー推薬を搭載するが、スケジュール短縮などの観点から非搭載での実施も検討されてきた。以下、主な例を示す。

● DRTS

- ー 従来通り、ダミー推薬搭載を計画していたが、DRTS次号機での対応、振動試験設備更新による事前確認(*)を兼ねて、STMでは非搭載での試験も実施した。
- ー その結果、非搭載ではロールモードが多数顕在化し、また所定の負荷が加えられないことが判明したため、PFMでは従来どおり搭載状態で実施した。

(*) 旧振動試験設備から現在の大型振動試験設備に更新された際の確認

● ETS-VIII

- ー STMで推薬搭載と非搭載の2ケースを評価し、PFTでは非搭載で実施することが検討された。
- ー しかし、開発スケジュール等の制約から、STMでは推薬搭載のみを実施。
- ー PFTはダミー推薬を搭載して試験を実施した。

● WINDS

- ー STMで推薬搭載と非搭載の2ケースを評価し、PFTでは非搭載での実施を計画した。さらに、PFTでは正弦波のフル加振は行わず、モーダルのみを計画した。
- ー “自主点検”の結果、リスク低減策として、PFT正弦波フル加振を復活、かつ、ダミー推薬を搭載する計画に戻し、その通り実施した。

12

ダミー推薬を搭載しない例 ～準天頂衛星(QZS-1)～

➤ ダミー推薬非搭載でPFTを実施する理由

- リスク回避(配管へのコンタミ混入、ダミー推薬残留等)
- 作業短縮

➤ 技術検討

- 非搭載では十分負荷されない部位について
 - 一次構造(セントラルシリンダ)、推薬タンク取付部は静荷重で直接評価する
 - 二次部材、大型搭載物は、ダミー推薬非搭載時の負荷レベルを確認し、過小となる部位は静荷重で直接評価する。
- 構造数学モデルは、ETS-VIII以降、DS2000シリーズで高い精度を有することが実証されている。

13

ダミー推薬非搭載に関する考察

➤ 今後のシリーズ化衛星では、ダミー推薬非搭載でのPFT試験が増えることが予想される。

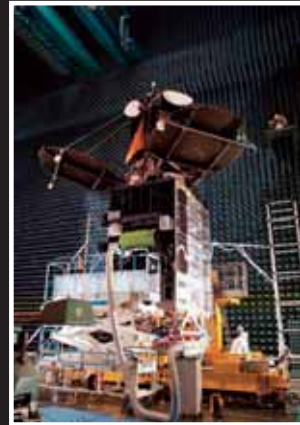
➤ ダミー推薬非搭載でも検証要求を満足できることを十分検討する必要がある。

14

最近のトピック2. 試験での確認が基本となりそうなもの

■ End to End 試験 ~WINDS、RF放射試験の例~

- MBA(マルチビームアンテナ)、APAA(アクティブフェーストアレイアンテナ)を搭載した状態で、通信ミッション系のKa帯RF放射を実施し、ミッション全系の健全性を確認した。
- アンテナリンクにてRF伝送が正常に行えること、RF干渉のないことを確認した。
(ユーザ側地上局も使用)



電波試験棟第1

WINDS RF放射試験

試験コンフィギュレーションの一例 (複雑なシステム、多くのI/F)

ミッション系系統図は、ワークショップ当日、会場発表のみ使用

WINDS RF放射試験での試験項目

WINDSの通信系ミッションの大部分の検証を実施できた。

(1) アンテナインタフェース確認

(2) APAA RF伝送試験

(3) RFリンク

検証項目詳細は、ワークショップ当日、会場発表のみ使用

(4) PIM試験

(5) RF干渉試験

(6) RWA擾乱

17

RF放射試験に関する考察

- End to End でミッション系の健全性確認ができた。
多くのI/Fを有する複雑な通信系システムの系としての動作確認を実施。
サブシステム試験でのI/F値確認だけでなく衛星システムとしての動作確認が出来た。
- 擾乱試験も実施
RW駆動、APMスルー駆動時の擾乱がESA/IRUIに影響しないことも評価したが、軌道上ではAPMリミットサイクルを擾乱としたESA振動が発生した。対象とすべきAPM動作パターンに漏れがあった。
- その他(棟間移動)
SITE～電波試験棟の棟間移動に伴う影響は無視できない。

18

トピック(3)

軌道上不具合分析から地上試験に求められるもの

- 衛星軌道上不具合分析・検討チーム報告(7/30 SAC報告)

- ー平成20年3月、信頼性推進本部下に衛星軌道上不具合分析・検討チームが発足
- ー利用衛星(7機、AMSR-E, DRTS, OICETS, ALOS, ETS-VIII, SELENE, WINDS)と科学衛星(4機、MUSES-C, ASTRO-EII, ASTRO-F, SOLAR-B)を対象。
- ー全不具合の分析(184件)、主要不具合の抽出(24件)、共通課題の整理を行った。

共通課題

- (1) 海外部品・コンポーネントの品質確保
- (2) 外部機関との共同開発品・支給品に関する信頼性・品質の確保

詳述⇒(3) 設計・解析／試験の充実

- (4) 電源部周りの対策(偶発故障(電子部品の故障)含む)強化
- (5) その他の共通課題(S/W不具合対策、運用不具合対策、ヒューマンエラー対策)

19

共通課題：設計・解析／試験の充実

設計・解析

1. システム・サブシステム・コンポーネント／解析・試験要素の適合性確認におけるピアレビューの強化・可視化
(解析・試験の境界、制約条件を加味した可視化による妥当性の詳細確認)
2. 安易に類似性・フライト実績を評価しない
(更なる技術成熟度(TRL)の評価と設計・検証の徹底)
3. 適切な冗長化による単一故障点の回避
重要ポイントではFTAとFMEAのクロスチェック等技術リスク評価の充実
4. 最新設計標準の適用の徹底

試験

1. 試験の境界条件の把握と結果の評価
2. 解析と試験の有効な組合せ(可能な限りのEnd to End試験の実施)
3. 寿命を考慮すべき要素の可視化と特定、試験モデルによる寿命試験(設計限界)の実施
4. 限界性能試験によるマージン評価

20

最大EMI条件による電気試験の重要性 ～WINDS運用事例～

1. 軌道上不具合「TLMにノイズが重畳」
 - － クリティカルフェーズの1stAOS運用にて、28V系電圧テレメのリップルが増加し、上限リミットを超過した。
 - － PFT～射場作業まで、打上げ前は異常を示さず。
2. 不具合原因(ノイズ源の特定)
 - － ノイズ発生時は、ミッション機器をONしておらず、衛星負荷が少なく、シャントにて多くの電力を消費する。
 - － 1stAOSにて、BATフル充電からトリクル充電に切替えた直後にノイズが増加した。(負荷を小さくするとノイズ増加)
 - － ノイズ発生はシャント#6の動作と同期していることを確認した。(シャント消費電力量に応じて、シャントの動作段数は増える。つまり、負荷が小さくなりシャント#6が動作する時に限られた現象)
3. 要因分析
 - － 地上試験
 - 外部電源装置(ソーラアレイシミュレータ;SAS)の供給能力の上限値が、PDL発生電力BOLを包絡できなくて、軌道上運用は完全に模擬できなかった。ゆえに、地上でのノイズ発生がなかった。

21

AOS直後のノイズ発生の様子

テレメトリグラフは、ワークショップ当日、会場発表のみ使用

22

ノイズ発生とSHUNT#6動作が同期している様子

テレメトリグラフは、ワークショップ当日、会場発表のみ使用

23

最大負荷によるシステムEMI実施に関する考察

1. 地上試験では、End to End の実施が困難な場合が多い。
(PDL～負荷の End to End 試験)
2. 地上試験では、全ての機器の運用条件を網羅することが困難な場合があり、注意が必要。試験装置の能力についても注意。
(SAS使用条件が軌道上運用条件を網羅できない)
3. 軌道上不具合分析・検討チームの報告内容をよく理解し、今後の開発計画に反映することが大切。

電源部周りの偶発故障対策としては、熱真空サイクル数を規定とおりにコンポ8+システム4で実施することの重要性も議論されている。

24

質疑応答

問 1

擾乱に関してお伺いしたいのですが、まとめの際に擾乱の軌道上における運用実績を設計にフィードバックさせることが大切だとおっしゃっていましたが、実際に擾乱に関する軌道上での実績が設計にフィードバックされたような例が過去にあれば教えていただきたいと思います。

答 1

WINDS プロジェクトに関して申し上げますと、アンテナ指向制御系の設計が非常に難しいということが分かっておりましたので、シミュレーションもかなり打ち上げ前にやっておりました。ただしリットサイクルの頻度等は正確にシミュレートできておりませんので、今回のテレメトリを用いてフィードバックをかけています。他のプロジェクトについては申し訳ないのですが把握しておりません。

問 2

軌道上不具合分析から地上試験に求められることとして、可能な限りの **end-to-end** 試験の実施が大切であるということをおっしゃられていて、発表の中で挙げられていたのは RF 放射の **end-to-end** の試験でしたが、これに宇宙の環境を加えつつ、実環境に近い **end-to-end** の試験を行うということが、今後求められるということもあるのでしょうか。その辺を教えていただければと思います。

答 2

何から何まですべて宇宙と同じようにシミュレーションするのは不可能だということは皆さんご存じの通りだと思います。衛星システムレベルで実環境を全部模擬して RF を出すということになると大変大きな技術上の問題が生じると思います。

問 3

以前 WINDS のときに、13mΦスペースチャンバの中で RF 放射をしたいと希望していらっしゃるというお話をお伺いしたのですが、それはまた別の理由によるものだったのでしょうか。

答 3

システムレベルの試験ではなく、アンテナ単体のサブシステムの PFT での実施を検討しました。大きさが違いますので、チャンバの中で RF を出すことは可能ではないかと検討しました。単純に RF 放射の実現性の検討だけではなく、チャンバ自体にも問題がない

ことも確認したうえで試験を行わなければならないということを、いろいろなケースを通して検討したのですが、電波吸収体を準備するのが難しいという理由であきらめました。仮にそういう試験設備に対して問題を与えず、かつ自分自身（供試体）に対しても問題が起きないような状態で試験を行えるのであれば、アンテナは通信ミッションですから、一番直接的に評価できるため、電波を出すことは非常に有意義だと思いますので、試験を行えるのであれば行うべきだと思っております。

問4

軌道上の不具合分析に関していろいろな事象を見ますと、最初に設計条件と言いますかスペックを立てるところから、マージン等の検討に不十分なところがあって、そのために想定していなかった不測の事態が起きてしまい、軌道上で慌ててしまうということがあるように思うのですが、分析の過程で、例えば設計審査などをやる時にベースライン文書そのものがちゃんとできているのかといったところをまず疑ってかかる。今は、どちらかというベースライン文書に対する「適合性」という観点でしか審査していないような気がするのですが、そのベースライン文書そのものを疑ってみるというような議論はなかったのでしょうか。

答4

そういった議論の場に私は参加していませんが、私が所属しているシステムエンジニアリング室は、SEの手法を充実させる方向をとっておりまして、また全社的にもシステムエンジニアリングに基づいた活動を行うという流れにあります。特に、プロジェクトの立ち上げ段階においてしっかりと技術的なレビューを行い、今コメントいただいたような、要求仕様が妥当なのか、ということをいくつかのレベルに分けてしっかりレビューしようという方向性が、従来のプロジェクトに比べてより強くなっております。端的に言うと、審査会でしっかりレビューをしていこうという姿勢になってきておりますので、そういった過程で今コメントいただいたようなことも、審査の対象になるのではないかと考えております。