

環境観測技術衛星(ADEOS-)「みどり」の運用異常の原因究明に係る試験の実施状況について

平成15年12月9日
独立行政法人
宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

前回までの調査部会では、FTAの解析結果等をもとに、故障部位として下記の3箇所の可能性が高いことを示した。

なお、パドル構造系、パドル駆動機構、シャント等の部位における故障の可能性、並びに運用異常発生時の姿勢変動についても、再度検討を進めている。

太陽電池パドルの電力ラインの開放または短絡
太陽電池パドルハーネス(パドルとパドル駆動機構間の電力ライン)
の開放または短絡
パドル駆動機構接続ハーネス(パドル駆動機構とシャント間の電力ライン)の開放

第6回調査部会では、～ の部位に関する発生シナリオや、この検証を目的とした予備試験等を中心に、以下の内容について報告する。

- (1) 現在推定している発生シナリオを再整理する。
- (2) これらの発生シナリオの検証のために実施している予備試験について、計画及びこれまでに得られた速報結果を示す。
- (3) 試験結果から考察される事項を整理するとともに、今後の検討の進め方(案)について示す。

2. 異常事象の発生シナリオの整理

これまで、FTA の検討結果等により可能性高いと推定される3箇所の故障部位ごとに、故障に至るまでの複数の仮説を検討し、発生シナリオとして整理してきた。

太陽電池パドルの電力ラインの開放または短絡：仮説 1-1 から 1-4
太陽電池パドルハーネスの開放または短絡： 仮説 2-1 から 2-5
パドル駆動機構接続ハーネスの開放： 仮説 3-1

上記の仮説の詳細を表 2 - 1 に示す。

上記の仮説が実際に起こるためには、以下の発生要因の何れかが存在し、それらが単独あるいは複合して関与することが必要である。

ハーネスの温度上昇
帯電/放電の発生
デブリ等による物理的損傷
環境プラズマ 等

発生シナリオの仮説と発生要因の関係を図 2 - 1 に示す。

したがって、これらの発生要因の存在の可能性を検証することにより、仮説の絞込みが可能である。

このため、現在、仮説の絞込みを目的として、以下の予備試験を実施し、発生要因の存在可能性の検証に必要な基礎データの取得や解析を行っているところである。予備試験 の詳細は次章で述べる。

なお、予備試験 については前回報告の通り、MLI 最内層の帯電を確認済みである。

ブーム/ハーネス温度特性予備試験

検証対象となる仮説： 仮説 2-1、2-2、2-3、2-4、2-5、3-1 の検証

MLI 帯電予備試験

検証対象となる仮説： 仮説 2-1、2-2、2-5、3-1 の検証

太陽電池パドルハーネスと MLI 間の帯電/放電予備試験

検証対象となる仮説： 仮説 2-1、2-2、2-5 の検証

太陽電池パドル銅ハーネス接続部の帯電/放電予備試験

検証対象となる仮説： 仮説 1-2、1-3 の検証

表 2 - 2 に予備試験の概要、図 2 - 2 に試験スケジュールを示す。

3. 試験の進捗状況とこれまでに得られた試験結果(速報)

3.1 ブーム/ハーネス温度特性予備試験

(1) 試験の目的

様々な仮説の前提となるハーネスの軌道上温度を正確に予測するために熱平衡試験を実施した。得られた各部温度は、ブーム/ハーネス熱数学モデルの各種パラメータの設定に使用する。

(2) 供試体

- ・「みどり」のブーム熱構造モデル(STM)
 - ・「みどり」実機と同じ作業者が新規製作したハーネス
- 注:いずれも、「みどり」の実機と熱的な同等品

(3) 試験概要

供試体を真空チャンバ内に設置し、軌道上平均熱入力相当の熱量を供試体外部から与えた状態において、熱平衡試験を実施する。ハーネス内の局所的な温度分布を把握するために、ケーブル長手方向に11箇所および半径方向に2箇所熱電対を設置する。NEC 東芝スペースシステム(株)の試験設備を使用する。

図3-1に、試験コンフィギュレーションを示す。

表3-1に、通電状況を示す。

(4) 試験結果

ハーネス束の温度分布としては、長手方向に7.8℃ / 半径方向に1.3℃の温度差があった。

図3-2に、過渡モードにおける実測温度を示す。

(5) 熱数学モデルのパラメータ設定

熱数学モデルとしては、設計時のモデルに対して局所的な温度分布や発熱量の温度依存性等を反映できるように改良した詳細熱数学モデルを準備した。

試験で得られた温度を使用して、モデル解析温度と実測温度の差が5℃以内に一致するように、この詳細熱数学モデルのパラメータを設定できた。

(6) 軌道上温度予測(一次評価)

得られたブーム/ハーネス熱数学モデルを衛星モデルに組み込んで軌道

上の温度予測を実施した結果、電力ライン104本を含むハーネス束の中央部では、日照後半においてハーネス連続使用温度上限(200)を超える解析結果が出た。設計時の予測温度(143)と異なる結果が得られた原因については、MLIの実効放射率の影響等が考えられ、次項に示すMLI実効放射率の測定試験を実施中である。

なお、テレメトリで得られているブーム上のダンパ部温度については、実測値に対して予測値が10～20 程度低いことも判明している。この影響については、ハーネス束はMLIにより断熱されているためCFRP製のブームとの熱結合は弱く、ハーネス束の軌道上予測温度が大きく変化することはない。ダンパ部温度が整合していない理由については、現在調査中である。

(7)MLI実効放射率

MLIの実効放射率は、巻き方・温度等に影響を受けることが考えられるため、各種条件を変えた測定を実施中である。具体的には、真空チャンバ内にMLIを巻いた供試体を設置し、MLI内外温度を測定し算出している。

- (a)温度依存性 ; 測定完了
150 に対して250 で約20%程度上昇
- (b)温度サイクル負荷後の変化 ; 測定中
20サイクル(120～250)負荷後変化なし
- (c)MLIの巻き方の依存性
測定準備中

3.2 ハーネス等の部材特性について

(1)試験の目的

ハーネス温度が 200 を超える解析結果が出たため、ハーネス等の部材について、以下の基礎的な高温時の特性の測定を行った。

今後、さらに長期にわたる変化を調査する必要があると考えており、軌道上を模擬した熱環境に長時間曝して特性を評価する試験を計画している。これについては「4. 今後の検討の進め方(案)」に記述する。

(2)ハーネス電線絶縁抵抗

ハーネス電線の絶縁抵抗の温度変化を把握することを目的として、真空チャンバ内で、密着させたハーネスの導体間に100V電圧を印加し、温度を変化させて抵抗を測定した。

図3 - 3のとおり、250 まで絶縁抵抗の変動は見られなかった。

(3)ハーネス電線導体抵抗

ハーネス電線導体抵抗の温度変化を把握することを目的として、真空チャンバ内で、電線に定電流を通電した状態の電圧降下から導体抵抗を求める。現在測定中。

(4)ハーネス被覆の外観

温度サイクルを負荷したハーネス被覆の外観を確認することを目的とする。100 ~ 250 で18サイクルを負荷したところで真空チャンバから取り出し、外観を検査した。試験に供する前に比較して被覆の柔軟性が低下していたが、傷等は見られなかった。

(5)ハーネス被覆の質量変化

ハーネス被覆の高温での昇華を把握することを目的として、真空中でハーネス被覆を過熱して質量変化を連続的に測定した。

図3 - 4のとおりハーネス被覆は約 400 まででは質量変化はほとんどなく、400 から500 で質量が減少した。

3.3 帯電 / 放電に係る予備試験の進捗状況

太陽電池パドルハーネスと MLI 間の帯電 / 放電予備試験の進捗状況を以下に示す。

(1)試験の目的

ハーネスと MLI 間の放電をトリガとして、ハーネス間の持続的な放電が発生するか否かを確認する。前回の報告時は、ハーネスと MLI 間の放電が発生することまで確認できていた。

(2)供試体

「みどりII」実機と同等のハーネス及び MLI を使用する。

(3)試験概要

MLI ポテンシャル電位を徐々に下げて行き、ハーネスと MLI 間の放電発生及びそれをトリガとするハーネス間の持続的な放電発生をモニタする。

図3 - 5に、試験コンフィギュレーションを示す。JAXA 筑波宇宙センターの試験設備を使用する。

(4) 試験条件

試験条件は次のとおり。

項目	今回	前回	備考
バックグラウンド真空度	約 0.5torr	約 0.5torr	試験設備の能力による。高度 800km の真空度 (10^{-10} torr 程度) に比べて放電は起きやすい環境。
プラズマ密度	なし	なし	高度 800km の密度 ($10^{10} \sim 10^{12} \text{m}^{-3}$ 程度) に比べて放電は起き難い環境。
MLI ポテンシャル電位	約 -1.2kV 以下	約 -1.2kV 以下	試験設備の能力による。過去に DMSP 衛星 (高度約 840km) で最大約 -2000V、「みどり」で最大約 -700V の観測事例がある。
ハーネス間電位	約 60V	約 60V	「みどり II」実機とほぼ同じである。突入電流を防ぐためのアレイ回路電圧模擬用電源は使用していない。
軌道上環境模擬用外部コンデンサ容量	95nF	500nF	MLI 最内層と電線の間容量をもとに算出。NOAA-17 が 10/24 に観測したオーロラ帯における高エネルギー粒子のフラックスデータを考慮。

(5) 試験結果

前回報告時点では、ハーネスと MLI の間で極短時間の放電(トリガ放電)は確認されたが、ハーネス間の持続的な放電にまで至らなかった。

今回、NOAA-17 が観測した高エネルギー粒子フラックスデータを考慮して軌道上環境模擬用外部コンデンサ容量 (MLI 最内層と電線の間容量をもとに算出) を変更して試験を実施した。MLI ポテンシャル電位を -600V 程度まで下げたところでハーネスと MLI の間のトリガ放電が頻繁に発生した。トリガ放電の発生頻度は前回の試験より増加したが、これは軌道上環境模擬用外部コンデンサ容量を小さくしたことによる。その後、ハーネス被覆に故意に傷をつけた箇所においてハーネス間の持続的な放電に至り、隣接する無傷のハーネスに波及、短絡したことが確認された。

今後、突入電流を防止することができるアレイ回路電圧模擬用電源を使用するとともに、バックグラウンド真空度、プラズマ密度をより軌道上の環境に近づけたコンフィギュレーションでの試験を計画する。これについては「4. 今後の検討の進め方(案)」に記述する。

4. 今後の検討の進め方（案）

これまでの試験および解析の進捗を受けて、今後の検討を次の通り進めることとしたい。

4.1 ブーム/ハーネス熱サイクル試験

現在継続中のMLIの実効放射率測定および軌道上温度評価と並行して、熱サイクル試験を実施する。

(1) 試験目的

実機を模擬したブーム/ハーネスに対して、軌道上で遭遇した可能性のある熱サイクルを印加し、試験前後のハーネス束の特性変化を評価する。なお、本試験の準備段階としてハーネス温度150℃以上の熱平衡試験も合わせて実施し、熱数学モデルの最終確認を実施する。

(2) 供試体

- ・「みどり」のブーム熱構造モデル(STM)
 - ・「みどり」実機と同じ作業者が新規製作したハーネス
- 注：いずれも、「みどり」と同等品

(3) 試験概要

供試体を真空チャンバ内に設置し、軌道上平均熱入力相当の熱量を供試体外部から与えた状態において、軌道1周回を模擬したサイクル通電(日照模擬：67分通電、日陰模擬：33分非通電)による熱サイクル試験を実施する。通電電流としては、季節変動を考慮した場合に最大となる10月24日の日照中平均電流(1.78A)を通電する。NEC 東芝スペースシステム(株)の試験設備を使用する。

評価項目は以下の通り

評価項目	評価時期
絶縁抵抗	数日毎
ハーネス温度	常時
MLI実効放射率	数日毎
外観検査(被覆の破断、溶融等)	試験後
ハーネス曲げ部の被覆クリープ	試験後

(4) 試験条件

真空度	1×10^{-5} torr 以下(目標)
シュラウド温度	-180 以下

(5) 試験スケジュール

約200サイクル後(12月下旬)に試験を一時中断して上記項目を評価し、その後の継続の要否を判断するものとする。

4.2 帯電 / 放電に係る試験

(1) 試験の目的

太陽電池パドルハーネスと MLI 間の帯電 / 放電について、3.3 で報告した試験に引き続き、より実際の環境に近い条件での試験を実施し、仮説として考えている持続放電が発生し得るか否かを確認する。

(2) 供試体

「みどり II」実機と同等のハーネス及び MLI を使用する。

(3) 試験概要

MLI ポテンシャル電位を徐々に下げて行き、ハーネスと MLI の間の放電発生及びそれをトリガとするハーネス間の持続的な放電発生をモニタする。

図4 - 1 に、試験コンフィギュレーションを示す。九州工業大学の試験設備を使用する。

(4) 試験条件

試験条件は次のとおり。

項目	今回	前回	備考
中性ガス密度	10^{18}m^{-3} 目標	約 0.5torr	試験設備の能力による。 10^{-4}torr 程度に相当、前回 (0.5torr) より放電は起き難い環境。
プラズマ密度	10^{10} $\sim 10^{12}\text{m}^{-3}$	なし	高度 800km 程度とほぼ同等。
MLI ポテンシャル電位	約 -1.7kV 以下	約 -1.2kV 以下	試験設備の能力による。過去に DMSP 衛星 (高度約 840km) で最大約 -2000V、「みどり」で最大約 -700V の観測事例がある。
ハーネス間電位	約 60V	約 60V	「みどり II」実機とほぼ同じである。突入電流を防ぐためアレイ回路電圧模擬用電源を使用する。
軌道上環境模擬用外部コンデンサ容量	95nF	95nF	MLI 最内層と電線間の容量をもとに算出。NOAA-17 が 10/24 に観測したオーロラ帯における高エネルギー粒子のフラックスデータを考慮。

(5) 試験スケジュール

2週間程度を予定。

5. まとめ

これまで行われた予備試験結果(速報)及び今後の検討の進め方(案)について報告した。

今後は、さらに詳細に発生条件やメカニズム等を解析や検証試験を進めるとともに、その他の要因についても FTA の検討を深めていきたい。

帯電 / 放電に係る予備試験の環境条件の根拠

前回報告した帯電 / 放電に係る予備試験の環境条件の根拠を以下に示す。

(1) MLI 帯電予備試験の環境条件

前回報告した試験環境条件の根拠を示す。

- ・電子エネルギー 200keV (*)
- ・電流値 10nA

(*) 電子ボルト:真空中において1Vの電位差を横切ることによって電子の得る運動エネルギー、 $1\text{eV}=10^{-19}\text{joule}$

本試験コンフィギュレーションで電流値=10nA はフラックスに換算すると 10^8 [electron/cm²/str/sec]オーダーとなる。NOAA-17 が10/24に観測したデータによれば、高度約830kmのオーロラ帯における100keV以上のエネルギーを有する粒子のフラックスは $10^6 \sim 10^7$ オーダーであった。すなわち、本試験環境は、電子エネルギーはほぼ軌道上と同等であり、電流値は大きめであったものの、MLIが帯電し得ることを確認する目的は達せられたと判断する。

(2) 太陽電池パドル銅ハーネス接続部の帯電 / 放電予備試験の環境条件

前回報告した試験環境の根拠を示す。

中性ガス密度 : 10^{18}m^{-3}

高度800km付近の中性ガス密度(10^{13}m^{-3} 程度)に比較して大きい値となっているが、試験設備の制約によるもので、下記プラズマ密度を達成する過程で中性ガス密度が増大した。

プラズマ密度 : $10^{10} \sim 10^{12}\text{m}^{-3}$

高度800km付近とほぼ同等である。

ポテンシャル電位 : -60V ~ -1000V

DMSP衛星(高度約840km)で、過去に最大約-2000Vの観測事例あり。また、「みどり」では、電位測定用絶縁体サンプルで、最大約-700Vの電位を観測している。

アレイ回路電位 : 60V
ADEOS-II 実機とほぼ同じである。

(3) 太陽電池パドルハーネスと MLI 間の帯電 / 放電予備試験の環境条件

前回報告した試験環境の根拠を示す。

バックグラウンド真空度 : 0.5torr

試験設備の能力による。高度 800km の真空度 (10^{-10} torr 程度) に比べて放電は起き易い環境。

プラズマ密度 : なし

高度 800km では $10^{10} \sim 10^{12} \text{m}^{-3}$ 程度。

MLI ポテンシャル電位 : $\sim -1.2\text{kV}$

DMSP 衛星 (高度約 840km) で、過去に最大約 -2000V の観測事例あり。また、「みどり」では、電位測定用絶縁体サンプルで、最大約 -700V の電位を観測している。

ハーネス間電位 : 60V

ADEOS-II 実機とほぼ同じ。

軌道上環境模擬用外部コンデンサ容量 : 500nF

NOAA-17 が 10/24 に観測したオーロラ帯における高エネルギー粒子のフラックスデータを考慮して算出した値 (95nF) に比べて大きかったため、エネルギーの大きいトリガ放電が少ない回数発生していたと考えられる。