

環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどり」運用異常に係る
原因究明の検討状況について

- 異常部位の推定 -

1. 故障の木解析(FTA)の概要

運用異常の発生電力低下に対する故障の木解析(FTA)の概要を図1-1に示す。故障の木解析(FTA)では、発生電力低下としてテレメトリに現れている下記の事象を頂上事象として位置づけた。

発生電力が約3分間に約6kWから約1kWに低下

1系及び2系が、ほぼ同期して、約100Wの倍数で低下。
シャント温度、パドル駆動機構温度が電力低下後に低下。

また、テレメトリデータを詳細に分析した結果、約6kWから約1kWへの発生電力低下時の下記の事象についても頂上事象と位置づけた。

最終的に発生電力低下が終了した段階では、1系で6回路、2系で5回路が残存。

約6kWから約1kWに発生電力が低下する前後を含め、太陽電池パドルの温度、ストロークモニタ、張力モニタ、加速度計等、太陽電池パドルの挙動を示す信号に異常なし。

故障の木解析(FTA)においては、

- (1) 太陽電池パドル系及び電源系において、故障が発生する可能性のある箇所を、上流から『太陽電池パドル』『太陽電池パドル電力ライン』『太陽電池パドルハーネス』『パドル駆動機構電力ライン』『パドル駆動機構接続ハーネス』『電源系サブシステム』とし、それぞれを構成する部位を図1-2のとおり定義した。

- (2) それぞれの部位について、上記事象を起こす可能性のある原因現象を識別した。
- (3) 電気回路における故障モードである「開放」または「短絡」を生じさせる要因として、10 ヶ月の経年変化(熱サイクル、振動、放射線、電子線、原子状酸素)、設計または製造不良、デブリによる破損、突発的な宇宙環境の変化(太陽フレア)による破損、帯電/放電等を想定した。

2. 故障の木解析(FTA)の詳細

故障の木解析(FTA)における評価理由を表 2-1 に示す。主な検討結果(判断根拠)は以下のとおり。

『太陽電池パドル』

- (1) 太陽電池パドルの指向異常、衛星姿勢変動の可能性の検討
テレメトリデータにより、約 6kW から約 1kW に発生電力を低下させるような太陽電池パドルの指向方向の異常、及び衛星の姿勢変動はなかったことを確認しており、これらの機能は正常に動作していたと考える。
- (2) 太陽電池セルの故障の可能性の検討
太陽電池セルは、55,680 枚ある。これらのセルを約 3 分間で、全体の約 5/6 を故障させる要因として考えられる大量の放射線、大量なデブリ、または大きな磁場変化等は観測されていないため、発生電力を約 1/6 にするような大量な太陽電池セルの故障の可能性は低いと考える。
- (3) 太陽電池パドルの機械的な破断の可能性の検討
発生電力低下が太陽電池パドル上での機械的な破断により発生するケースについて検討するため、太陽電池パドルの挙動を示す各テレメトリにより、太陽電池パドルの主要振動モードごとの固有振動数と強度について評価した。

太陽電池パドルの主要振動モードの概要を図 2-1 に示す。
 パドル主要振動モードにおけるパドル各部位の変形を以下にまとめる。

パドル主要振動モードにおけるパドル各部位の変形

主要振動モード (解析周波数)	パドル各部位の変形
ねじり1次モード (0.097Hz)	ブランケット中央がブランケット長手軸(Y軸)廻りにねじれるモードである。 マスト、ブームのねじれはブランケットと比較して小さく、ブランケットの振動が支配的であるため、衛星本体の動きは他の振動モード時と比較して小さい。
面外1次モード (0.10～0.11Hz)	ブーム、マスト、ブランケットともにパドル面外方向に振動するモードである。 マストとブランケットが同位相で変形する。
面内1次モード (0.11～0.13Hz)	ブームの回転ヒンジ廻りのパドル面内方向に振動するモードである。 マスト、ブランケットの変形量は小さい。
面外2次モード (0.14～0.15Hz)	ブーム、マスト、ブランケットともにパドル面外方向に振動するモードである。 マストとブランケットが逆位相で変形する。
面外3次モード (0.22Hz)	ブーム、マスト、ブランケットともにパドル面外方向に振動するモードである。 マストの変形は小さい。 ブランケット先端部はマストと逆位相、ブランケットの衛星側の部分は同位相で変形する。

太陽電池パドルにおける荷重は、ブランケット根元のコンテナベースとブランケットの接合部のミニブランケット部のヒンジに発生するのが最も高く、バネヒンジより強度が低いガラス繊維強化プラスチック

ク(GFRP)製のピンヒンジの強度が標定となる。

バネヒンジの搭載場所と構造を図 2-2 に示す。

以下にそれぞれの振動モードに対する強度評価の結果を示す。

ねじり振動に対する強度評価

軌道上の姿勢データからブランケット中央部両端の変位を算出した結果、最大変位は $\pm 46\text{mm}$ 以下であることを確認している。この変位に対応する発生荷重の増加は 0.01kgf 以下であり、 16kgf の強度をもつピンヒンジに対して十分なマージンがある。

面内振動に対する強度評価

軌道上においては最大の面内振動が発生する 20N スラスト噴射時においては、視覚モニタ(VMS)画像よりパドル先端の変位量が 440mm 程度であることを確認している。この変位量に対応する発生荷重は約 0.3kgf であり、 16kgf の強度を持つピンヒンジに対して約50倍のマージンを持つ。

図 2-3 に、20Nスラスト噴射時の VMS 撮像画像を示す。

面外振動に対する強度評価

面外振動はブランケットが面外方向に一様に変形するため、それによる荷重の増加は無視できるレベルである。

～ により、パドルの主要振動モードのブランケット荷重に関しては、ブランケットの部材強度に関して十分小さく、問題ないと考えられる。

太陽電池パドル各振動モードと定張力機構動作による健全性評価

太陽電池パドルの各振動モードは、日陰入り/日陰明けにおけるブランケット・マストの熱収縮/熱膨張や太陽電池パドルアレイトリム^(注)により励起される。これらの振動によるブランケットの張力変化は小さく、定張力機構の動作には影響しない。

図 2-4 に示すように定張力機構のストロークはなめらかに動作し

ている。

また、「ねじり1次」と「面外2次」の固有振動数は、定張力機構発生張力に依存するが、「パドル主要振動モードにおけるパドル各部位の変形」に示したノミナル張力 7kgfにおける解析値と固有振動数は整合しており、長期的にも安定した状況にある(図 2-5)。定張力機構発生張力に対する固有振動数の依存性を示す(図 2-6)。

(注)パドルアレイトリム:

1 周回に 1 回、パドル追尾用太陽センサ(SPSS)の信号を用いて、太陽電池パドルの太陽追尾誤差を最小にする動作。

ブランケットの一部が破断した場合の振動への影響

解析の結果、ブランケットの一部が、運用異常に至る発生電力低下を引き起こすのに必要な長さを破断した場合には、ねじり 1 次固有振動数は約 1%低下、面外 3 次は約 1.5%低下の影響がでるはずであるが、テレメトリデータより、発生電力低下後の面外 3 次モード振動数および加速度に変化が現れていない。

さらに、約 6kW から約 1kW への発生電力低下後も、ブランケット中央部に埋め込まれている太陽電池パドル上のパドル温度やストロークモニタの信号線からのデータは正常に届いており、断線していないことが確認されている。

また、ヒンジ部が破断したのであれば、半田接続部に荷重が加わることになる。ヒンジ部の半田接続までの余長は 14mm あり、発生電力が低下するには、さらに 2 つの半田接続部を含めた 32mm 以上拡がる必要がある。テレメトリのストロークデータは 2mm 以上の検出能力があるのが、このような挙動はテレメトリ上見られない。なお、一列破断でない部分破断の場合はストロークデータに表れないことも論理的には考えられるが、ヒンジ部の一部が 32mm も部分破断する破断モードは膜面として考えにくい。

以上の検討から、10月24日の運用異常は、平成9年6月に発生した「みどり」の軌道上事故の原因と異なり、太陽電池パドルの機械的破

断で発生した可能性は低いと考える。

『太陽電池パドル電力ライン』

(4) 太陽電池パドル電力ライン半田付け部における破断等の可能性の検討

太陽電池パドル上の電力ラインでは、以下の箇所では半田を用いている。これらの箇所における軌道上予測温度はすべて半田熔融温度以下である。また、太陽電池セル部およびブラケット接続部(挿み部)では、熱サイクル試験においても問題ないことを確認している。表 2-2 に使用半田の概要および予測温度等を示す。なお、コネクタはすべて圧着タイプのコネクタを使用しており、半田は使用していない。

- ・太陽電池セル部
 - ・セル間のインターコネクタ接続部
 - ・モジュール間のバスバー接続部
 - ・バスバーと銅ハーネスの接続部
- ・ブラケット間接続部
- ・ミニブラケット部

したがって、半田付け部における破断等による故障の可能性は低いと考える。

(5) 太陽電池パドル電力ラインが放電により開放 / 短絡する可能性の検討

太陽電池セル間や太陽電池セル / 銅ハーネス間、あるいは銅ハーネス半田付接続部において、トリガ放電 / 持続放電が発生し、それが約 50 回路分に波及する可能性は否定できないため、発生シナリオ(仮説)を設定し、さらに詳細な検討を進めた。

『太陽電池パドルハーネス』

(6) 太陽電池パドルハーネスが開放 / 短絡する可能性の検討

大電力ハーネス束(電力線 104 本 / 束)

太陽電池パドルハーネスにおいて、トリガ放電 / 持続放電が発生し、それが約 50 回路分に波及する、あるいは機械的な要因からハーネス約 50 回路分に損傷が及ぶ可能性は否定できないため、発生シ

ナリオ(仮説)を設定し、さらに詳細な検討を進めた。

約 6kW から約 1kW への発生電力低下では、太陽電池の動作回路数が 62 回路から 11 回路に減少したことになる。図 2-7 に示すとおり、太陽電池パドルハーネスの電力ライン 104 本のハーネス束(52 回路分)が開放 / 短絡をおこすという想定は、本事象とよく一致する。(詳細は調査 14-2-3: 2 章参照)

また、調査 14-2-3: 1 章で述べるように、発生電力低下時に発生した姿勢変動(事象 B)の解析において、今回の事象と関連して力が作用したと推定される作用点の範囲は太陽電池パドルのブームからブラケットの一部までであり、事象 B についてもよく一致している。

小電力ハーネス束(電力線 24 本 + 信号線 / 束)

約 6kW から約 1kW に発生電力が低下する前後において、太陽電池パドルの温度、ストロークモニタ、張力モニタ、加速度計等、太陽電池パドルの挙動を示す信号に異常は見られないことから(図 2-8)、小電力ハーネス束に異常が発生した可能性は低いと考える。

『パドル駆動機構電力ライン』

(7) パドル駆動機構電力ラインが故障の要因となる可能性の検討

パドル駆動機構電力ラインにおける故障の要因としては、次の要因が考えられる。

パドル駆動機構への入力側コネクタの開放 / 短絡

入力側コネクタ / スリップリング間ハーネスの開放 / 短絡

スリップリングでの短絡

スリップリング / ブラシ間の開放

ブラシホルダでの短絡

ブラシブロック / 出力側コネクタ間のハーネスの開放 / 短絡

シャント側への出力コネクタの開放 / 短絡

コネクタ部においては、ねじ止めされているコネクタ 5 個のうち 4 個において、約 3 分間にコネクタピンが順次はずれていく等の、故障 / 劣化が生じる可能性は低い。

また、図 2-9 に示すとおり、電力低下発生後、パドル駆動機構の温度も低下していることから、パドル駆動機構内で短絡モードに至った可能性は低い。

スリップリング / ブラシ間の開放については、ブラシが冗長構成になっていることも考えると、約 50 個のブラシブロックが同時に開放モードに至った可能性は低い。

さらに、パドル駆動機構内部に用いている半田の軌道上予測温度は半田溶融温度以下である。(表 2-2)

以上より、パドル駆動機構が故障の要因となった可能性は低いと考える。

『パドル駆動機構接続ハーネス』

(8) パドル駆動機構接続ハーネスが開放 / 短絡する可能性の検討

パドル駆動機構部温度が電力低下後に低下していることから、パドル駆動機構接続ハーネスが短絡した可能性は低い。また、図 2-7 に示すハーネス構成から、約 50 回路分にも損傷が及ぶ可能性は低いと考える。さらに、後述する発生シナリオで想定している多層断熱材 (MLI) の帯電 / 放電について、当該箇所は MLI を接地しており、低い温度で維持されているため、放電が発生しやすい環境条件となっていない。

以上から、パドル駆動機構接続ハーネスが開放 / 短絡し、故障の要因となる可能性は低いと考える。

『電源系サブシステム』

(9) シャント回路が故障の要因となる可能性の検討

シャント回路における故障の要因としては、次の要因が考えられる。

シャントトランジスタの開放故障

シャントトランジスタの短絡故障

ブロッキングダイオードの開放故障

ブロッキングダイオードの短絡故障

シャントトランジスタの開放 / 短絡故障については、その故障が発生した場合でも発生電力低下には至らない。

ブロッキングダイオードの短絡故障についても、発生電力低下には至らない。

このことからシャント回路で今回の約 6kW から約 1kW への発生電力低下の要因の可能性となるのは、ブロッキングダイオードの開放故障のみである。以下にブロッキングダイオードの開放故障の可能性について検討した結果を示す。

1) 偶発的な故障によるブロッキングダイオードの開放故障の可能性

シャント回路の1系と2系は独立の筐体であり、偶発故障により、それぞれのブロッキングダイオードがほぼ同期して約3分間で約50個、開放故障する可能性は低い。

2) サージ電流によるブロッキングダイオードの開放故障の可能性

ブロッキングダイオードのサージ電流特性は図 2-10 の通りであり、この電流値以下であれば故障には至らない。

上記値を越すサージ電流がブロッキングダイオードに流れた場合でも、使用しているブロッキングダイオードはメタロジカルボンディングで接合したタイプ(溶接タイプ)であるため、過大なサージ電流による故障モードとしては短絡モードであることから、今回の発生電力低下には至らない。

3) ヒートスポットによるブロッキングダイオードの開放故障の可能性

シャントの発熱部位は、主にブロッキングダイオード及びシャントトランジスタであり、それらはアルミニウム合金製のシャシに並べて実装されている。当該ブロッキングダイオード部について、発熱量の異常な増大、熱抵抗の異常な上昇により異常発熱し、機器内に実装される部品が破損に至る可能性について検討を行った。

発熱量の異常な増大

1つのダイオードが定格ジャンクション温度上限(200)になったとしても、隣接するダイオードは最大7 程度しか上昇しない。

従って、1箇所のブロッキングダイオードが異常発熱した場合でも、

隣接ブロッキングダイオードが開放故障に至ることはないと考える。

熱抵抗の異常な上昇

部品からシャシへの熱抵抗が上昇したとしても、その発熱部品の温度が上昇するのみで、他部品へ影響を与えることはない。

従って、ある部品からシャシへの熱抵抗が異常上昇した場合でも、隣接のブロッキングダイオードが開放故障に至ることはないと考える。

以上より、シャント回路が故障の要因となった可能性は低いと考える。

(10) 電力制御器が故障の要因となる可能性

発生電力低下時のテレメトリが示す電力制御機能の動作としては、発生電流低下とともにシャント動作を制御することによりメインバス電圧は正常に定電圧制御されており、全シャント回路が動作停止後も、バッテリーの充電電流制御によりメインバス電圧を正常に制御している。さらなる発生電力低下に伴い、バッテリー放電による電力供給モードへの移行は、電力制御機能としては正常な動作であり、電力制御器が故障の要因となる可能性はないと考える。

3. 異常部位の推定

以上の発生電力低下に係わる故障の木解析(FTA)の結果、可能性のある故障部位及び発生事象として、以下のように推定した。

太陽電池パドルの電力ライン

太陽電池セルと銅ハーネス間の短絡

銅ハーネス接続部の短絡・開放

太陽電池セル間の短絡

太陽電池パドルハーネス

ハーネスの開放・短絡

なお、の「太陽電池パドルハーネス」については、前述の(6)の考察により、小電力ハーネス束(電力線 24 本 + 信号線 / 束)ではなく大電力ハーネス束(電力線 104 本 / 束)である可能性が高いと推定する。

環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどり」運用異常に係る
原因究明の検討状況について

- 異常部位の推定 -

図表集

平成16年5月21日

独立行政法人
宇宙航空研究開発機構

図1-1 故障の木解析(FTA)(1/2)

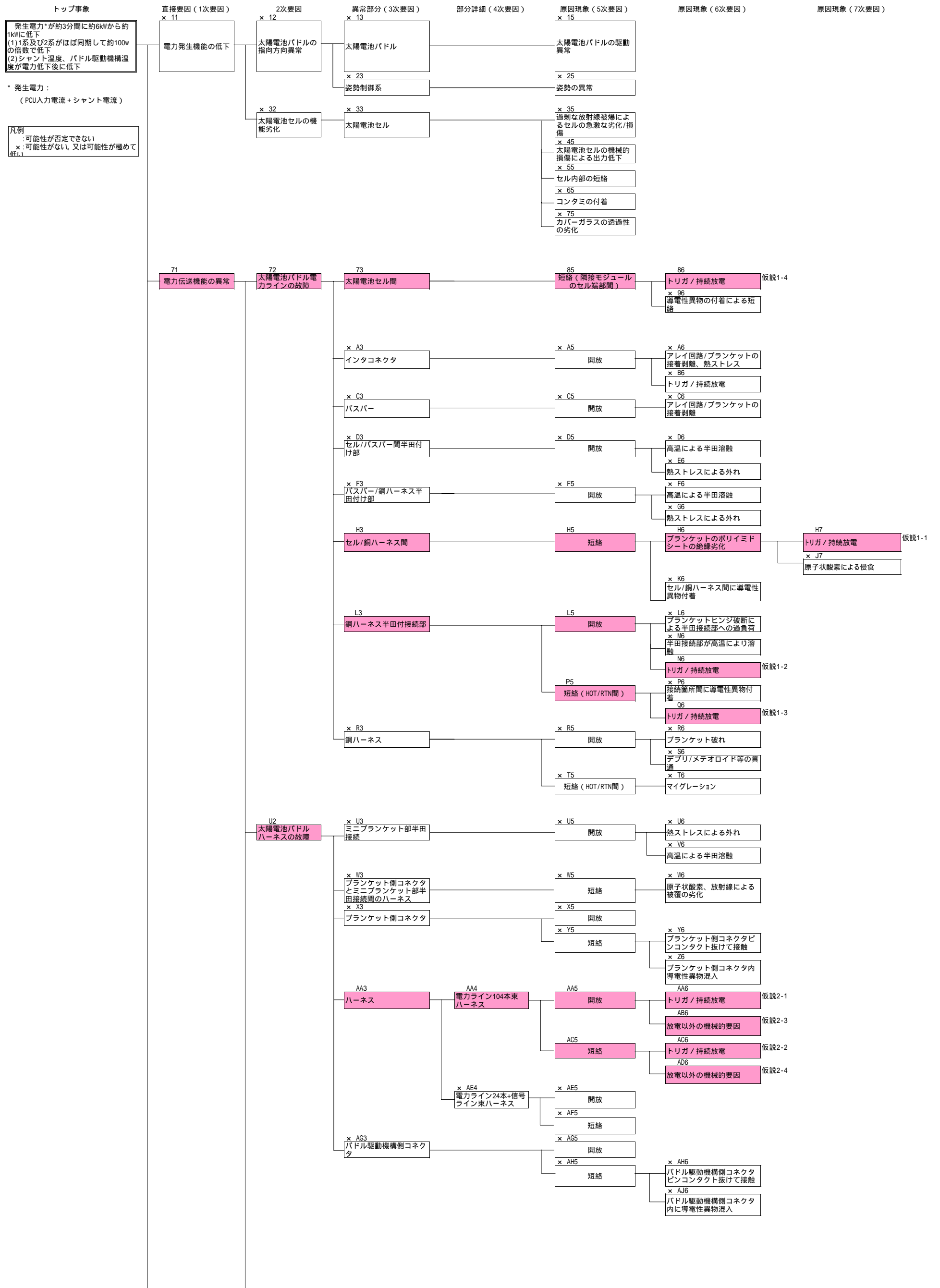
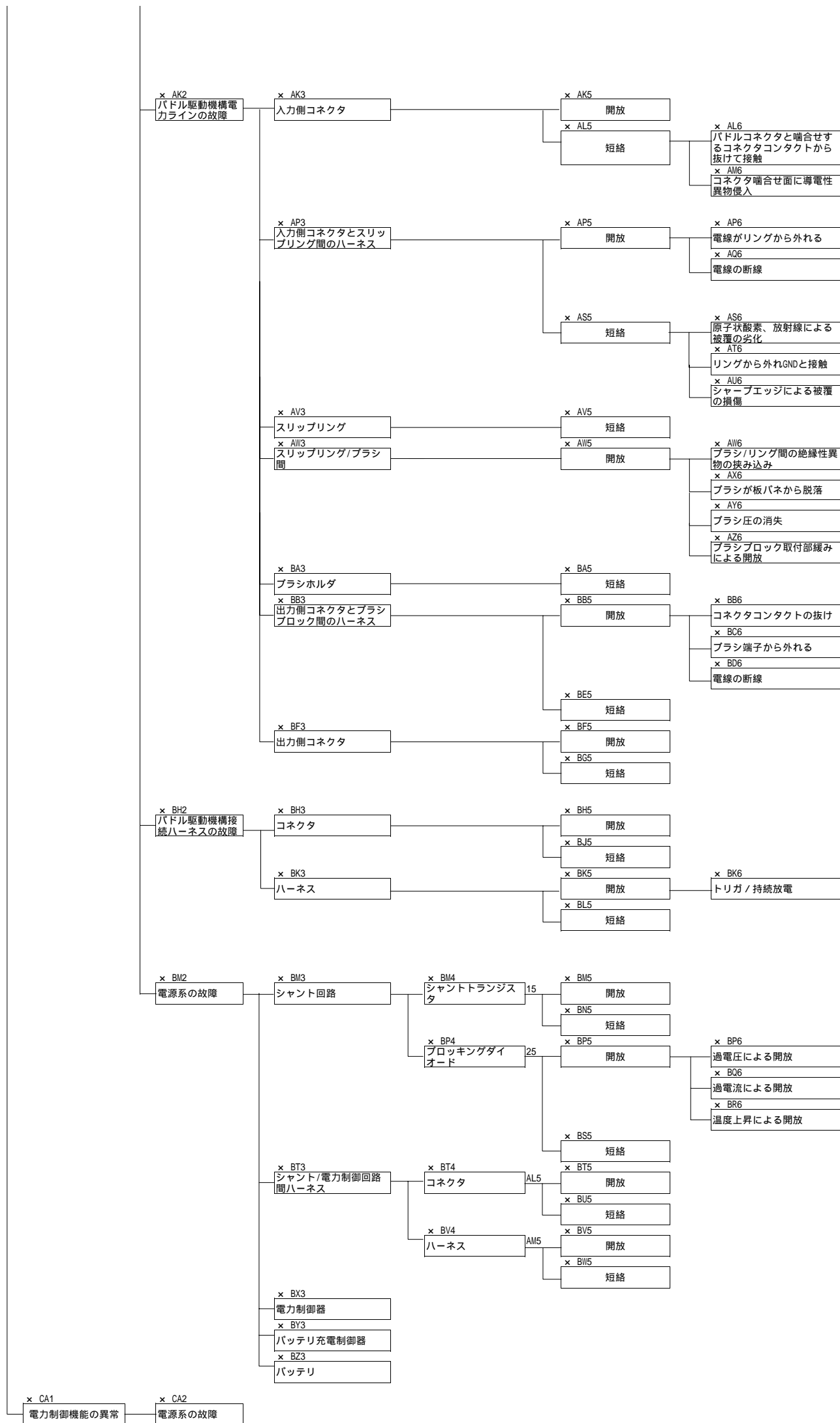


図1-1 故障の木解析(FTA)(2/2)



太陽電池パドル

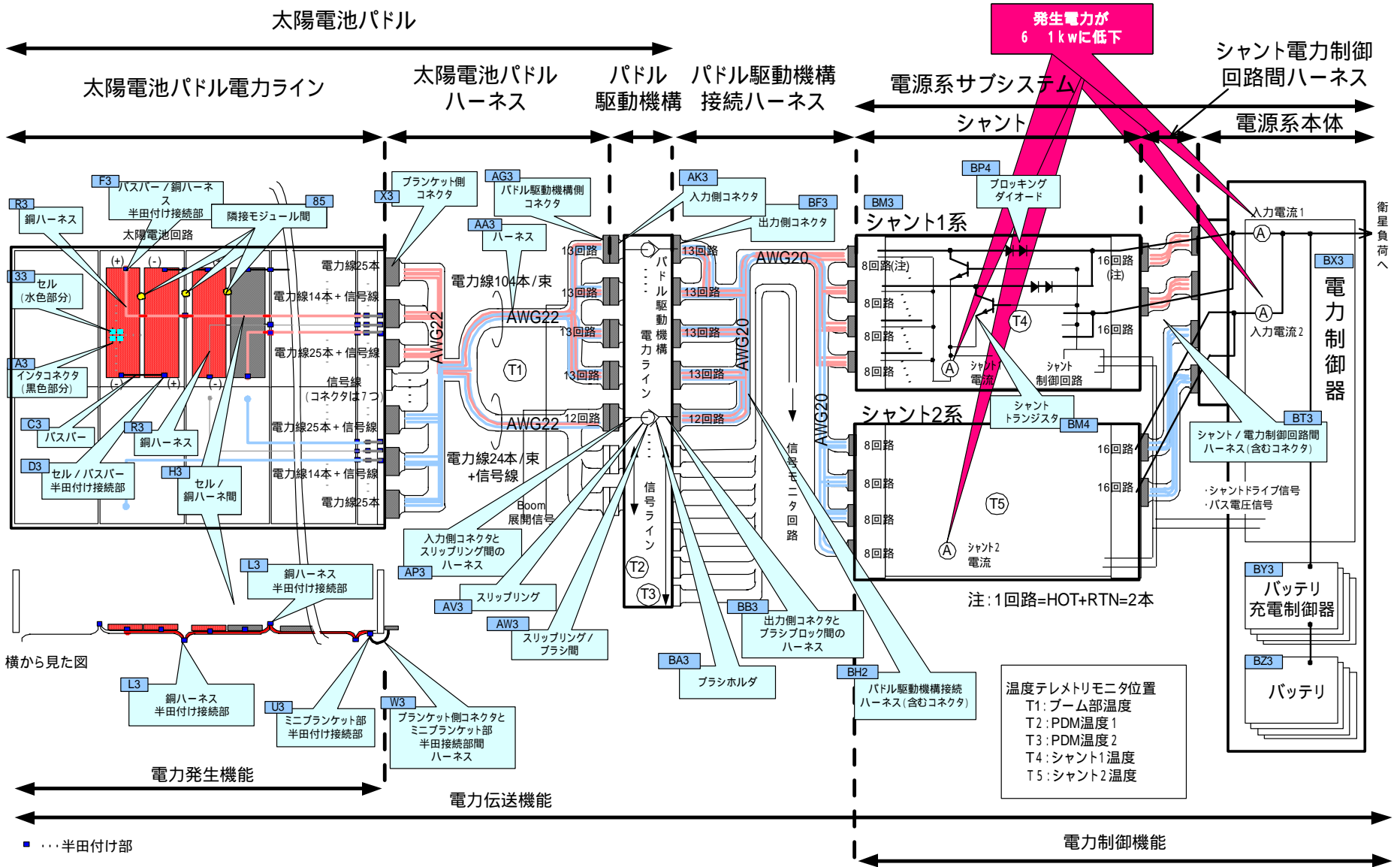


図1-2 FTAにおける故障検討部位

表2-1 故障の木解析(FTA) 評価理由(1/4)

異常部分(3次要因)	番号	評価	評価理由
太陽電池パドル	15	×	電力低下につながるレベルの角度変動がないことをテレメトリで確認した。
姿勢制御系	25	×	電力低下につながるレベルの姿勢変動がないことをテレメトリで確認した。
太陽電池セル	35	×	約3分間で発生電力を約1/5に低下させるような大量の放射線はTEDAにより観測されていないことを確認した。
	45	×	セルは55680枚あり、約3分間で発生電力を約1/5に低下させるような大量のセルの機械的損傷は考えにくい。
	55	×	セルは55680枚あり、約3分間で発生電力を約1/5に低下させるような大量のセルの短絡の要因としては、環境磁場の変動が考えられるが、観測された磁場変化により誘起される電圧は十分小さいことを解析で確認した。
	65	×	打上げ10ヶ月後に発生電力を約1/5に低下させるようなアウトガス発生源はない。スラスト噴射によりセルの発生電力低下は起こり得ない。(電力低下時にスラスト噴射がないこともテレメトリで確認している。)
	75	×	約3分間で発生電力を約1/5に低下させるような大量の紫外線や放射線は観測されていない。
太陽電池セル間	86		他衛星の試験結果では、1回路で放電が発生し短絡することはあり得ることが確認されている。1回路の放電が約50回路に波及する可能性は否定できない。(仮説1-4)
	96	×	導電性の異物が約3分間に50回路相当にほぼ同時に付着し、短絡する可能性は極めて低い。
インタコネクタ	A6	×	クーボンブランケット試験により、27000サイクルでも半田付けに問題ないことを確認しており、5000サイクル以下で外れることはない。アレー回路は5並列構成で、CICあたり3点の接続点を持っており、CICの開放が1回路の開放につながるには15箇所開放が必要であり、可能性は極めて低い。電力低下の傾向がシステム1とシステム2でほぼ同期して起こる事象に対しては、上段と下段の回路が同じ回路数ずつ破損し、これが3分にわたって連続的に起こらなければならないが、このような破損がパドルの機械的挙動に現れずに起きる可能性はない。約50回路の故障に及ぶようなテンション、温度は観測されていない。
	B6	×	アレー回路は5並列構成で、CICあたり3点の接続点を持っており、CICの開放が1回路の開放につながるには15箇所開放が必要であり、放電によりすべてが開放する可能性は極めて低い。
バスバー	C6	×	バスバーは8mm幅の銀メッシュでできている。約50回路が約3分間に続けて開放する可能性は極めて低い。電力低下の傾向がシステム1とシステム2でほぼ同期して起こる事象に対しては、上段と下段の回路が同じ回路数ずつ破損し、これが3分にわたって連続的に起こらなければならないが、このような破損がパドルの機械的挙動に現れずに起きる可能性は極めて低い。
セル/バスバー間半田付け部	D6	×	半田の融点は180程度であるが、そのような高温になる要因はない。アレー回路は5並列構成で、CICあたり3点の接続点を持っており、CICの開放が1回路の開放につながるには15箇所開放が必要であり、CICの開放が回路の開放につながる可能性は極めて低い。約50回路が約3分間に続けて開放する可能性は極めて低い。
	E6	×	クーボンブランケット試験により、27000サイクルでも半田付けに問題ないことを確認しており、5000サイクル以下で外れることはない。約50回路が約3分間に続けて開放する可能性は極めて低い。
バスバー/銅ハーネス半田付け部	F6	×	半田の融点は180程度であるが、そのような高温になる要因はない。2点で半田付けされている。約50回路が約3分間に続けて開放する可能性は極めて低い。
	G6	×	クーボンブランケット試験により、27000サイクルでも半田付けに問題ないことを確認しており、5000サイクル以下で外れることはない。2点で半田付けされている。約50回路が約3分間に続けて開放する可能性は極めて低い。
セル/銅ハーネス間	H7		他衛星の試験結果では、1回路で放電が発生し短絡することはあり得ることが確認されている。1回路の放電が約50回路に波及する可能性は否定できない。(仮説1-4)
	J7	×	ミッション期間中のポリイミドのAOによる侵食は数ミクロン以下と評価されており、アレイ/銅ハーネス間には25ミクロンのポリイミドシート及び接着剤層があることから、絶縁劣化はない。
	K6	×	信号ラインを除く約50回路を短絡させるほどの数の異物が混入することはあり得ない。打上げ前に短絡がないことを確認しており、打上げ10ヶ月後の約3分間に約50回路が異物により短絡することはあり得ない。
銅ハーネス半田付け接続部	L6	×	PSM出力のプロファイル及び固有振動数は電力低下前後で変化がないのでブランケットは伸びていない。従って、ブランケット間ヒンジが破断していることはなく、ヒンジ破断による半田付け部への過負荷はない。
	M6	×	パドル温度テレメトリデータは70度以下であり、広範囲にわたり高温となっていたことはない。半田の融点(180程度)まで余裕がある。約3分間に約50回路の半田付け部の温度が融点まで上昇する要因はない。
	N6		試験により、単発の放電発生は確認されたが、持続放電は見られなかった。1回路の放電が約50回路に波及する可能性は否定できない。(仮説1-2)
	P6	×	信号ラインを除く約50回路を短絡させるほどの数の異物が混入することはあり得ない。打上げ前に短絡がないことを確認しており、打上げ10ヶ月後の約3分間に約50回路が異物により短絡することはあり得ない。
	Q6		試験により、単発の放電発生は確認されたが、持続放電は見られなかった。1回路の放電が約50回路に波及する可能性は否定できない。(仮説1-3)

表2-1 故障の木解析(FTA) 評価理由(2/4)

異常部分(3次要因)	番号	評価	評価理由
銅ハーネス	R6	×	周囲をダブルで補強してあるため、姿勢に表れない破断は考えられない。 信号線前で破断が止まるストッパがない。 1系、2系同時に切れることは考えられない。
	S6	×	幅1cmの銅ハーネスを3分間に50回路相当切断するほどの数のデブリが衝突することは考えられない。 信号ラインを除いてデブリが当たることは考えられない。
	T6	×	保管されていたブランケットサンプルでマイグレーションがないことを確認した。
ミニブランケット部半田接続	U6	×	約50回路が約3分間に続けて開放することはあり得ない。 ハーネスは十分なストレスリリーフを有している。
	V6	×	ハーネスのジュール熱により半田が溶融しないことを解析で確認した。 銅ハーネス半田付け接続部の放電試験で、持続放電は見られなかった。
ブランケット側コネクタとミニブランケット部半田接続部間のハーネス	W6	×	使用しているETFE被覆電線(宇宙空間に露出)は原子状酸素と放射線の複合環境に対して十分な耐性があるため、通常的环境条件・使用条件下では短絡・地絡に至る被覆劣化は生じ得ない。(放射線被曝量: $1 \times 10^7 \text{ rad} < \text{耐性} : 5 \times 10^8 \text{ rad}$) この事象が仮に発生したとしても時間的にも3分間で上記の現象が約50回路分の電線で徐々に起きる可能性はあり得ない。
ブランケット側コネクタ	X5	×	ねじ止めされている電力出力用コネクタ6個のコネクタが約3分間に順次、劣化/破損を生じて外れることはあり得ない。 信号線には異常が見られないため、6個のコネクタのうち信号線を含まない2個のコネクタの異常では、約5kWの電力低下にはならない。 コネクタコンタクトは圧着タイプである。
	Y6	×	開放から短絡に至るモード。AD5参照
	Z6	×	約3分間に約50回路が導電性の異物により短絡しなければならないが、その可能性はない。 信号線には異常が見られないため、6個のコネクタのうち信号線を含まない2個のコネクタの異常では、約5kWの電力低下にはならない。 コネクタはMLIで覆われており、異物混入の可能性は極めて低い。
ハーネス	AA6		電力ライン104本のハーネス束が開放すれば電力が約1kWに低下する事象を説明できる。放電が要因となる可能性について、検証試験で確認中。(仮説2-1)
	AB6		電力ライン104本のハーネス束が開放すれば電力が約1kWに低下する事象を説明できる。デブリ、熱サイクル、放射線等が要因として否定できない。(仮説2-3)
	AC6		電力ライン104本のハーネス束が短絡すれば電力が約1kWに低下する事象を説明できる。放電が要因となる可能性について、検証試験で確認中。(仮説2-2)
	AD6		電力ライン104本のハーネス束が短絡すれば電力が約1kWに低下する事象を説明できる。デブリ、熱サイクル、放射線等が要因として否定できない。(仮説2-4)
	AE5	×	電力ライン24本+信号ラインのハーネス束のうち、信号ラインのみを残して開放することはあり得ない。
	AF5	×	電力ライン24本+信号ラインのハーネス束のうち、信号ラインのみを残して短絡することはあり得ない。
パドル駆動機構側コネクタ	AG5	×	ねじ止めされている電力出力用コネクタ5個のうち、4個のコネクタが約3分間に順次、劣化/破損を生じて外れることはあり得ない。 コネクタコンタクトは圧着タイプである。
	AH6	×	開放から短絡に至るモード。U5参照
	AJ6	×	約3分間に約5kWの電力低下を起こすには、電力出力用コネクタ5個のうち、4個のコネクタの全ピンが導電性の異物により短絡しなければならないが、その可能性はない。
入力側コネクタ	AK5	×	ねじ止めされている電力出力用コネクタ5個のうち、4個のコネクタが約3分間に順次、劣化/破損を生じては外れる可能性はない。
	AL6	×	開放から短絡に至るモード。AK5参照
	AM6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力入力用D-subコネクタ5個のうち、4個のコネクタ噛合面に徐々に導電性の異物が混入しなければならないが、コネクタの噛合面は密封状態であり、異物が侵入する可能性はない。 この事象が仮に発生したとしても時間的にも3分間で上記の現象が徐々に起きる可能性はあり得ない。

表2-1 故障の木解析(FTA) 評価理由(3/4)

異常部分(3次要因)	番号	評価	評価理由
入力側コネクタとスリップリング間のハーネス	AP6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力用リング(HOT)64リングのうち、約80%にあたる約50リングのすべての電線、または電力用(RTN)5リングのうち、約80%にあたる約4リングのすべての電線(合計51本)が、徐々にリング内周面の端子(リングと一体加工)から外れて接触しなければならないが、そのようなことはあり得ない。 電線はこの端子に半田付けし、その周りは電線ごと樹脂で固めており、電線を引き抜くような外力は作用しない。 約3分間で上記の現象が徐々に起きる可能性はあり得ない。3分間のPDM回転角は約10度。 同じPDM内のコネクタにある同様の信号用リングを介するテレメトリには異常がない。 温度テレメトリの上昇は観測されていない。
	AQ6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力用リング(HOT)64リングのうち、約80%にあたる約50リングのすべての電線が断線しなければならないが、通常的环境条件・使用条件下では、電線が断線するような外力は作用しない。 同じPDM内のコネクタにある同様の信号用リングを介するテレメトリには異常がない。
	AS6	×	約5kWの電力低下を起こすには、電力用リング(HOT)64リングのうち、約80%にあたる約50リングのすべての電線とRTN側の電線の被覆が劣化し接触しなければならないが、スリップリングからPAD側ハーネスに使用しているETFE被覆電線(一部宇宙空間に露出)は原子状酸素と放射線の複合環境に対して十分な耐性があるため、通常的环境条件・使用条件下では短絡・地絡に至る被覆劣化は生じ得ない。 放射線被曝量: $1 \times 10^7 \text{ rad} < \text{耐性} : 5 \times 10^8 \text{ rad}$ この事象が仮に発生したとしても時間的にも3分間で上記の現象が約50リング分の電線で徐々に起きる可能性はあり得ない。 同じPDM内にある同様の信号用リングを介するテレメトリに異常がない。
	AT6	×	開放から短絡に至るモード。AP6参照
	AU6	×	電線と金属部品エッジが接触する部分は樹脂による保護を実施しており、通常的环境条件・使用条件下では被覆損傷は生じ得ない。 仮に、損傷して短絡した場合温度は上昇するが、近傍の温度センサは温度低下を示していることからテレメトリと一致しない。
スリップリング	AV5	×	パドル駆動機構の温度低下のテレメトリと整合しない。
スリップリング/ブラシ間	AW6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力用リング(HOT)64リングまたは電力用リング(RTN)5リングのうち、約80%にあたるリングのすべてが徐々に開放しなければならないが、1リング2ブラシ構成(パワーHOTリング、RTNは1リング6ブラシ構成)であり、オープン状態になるためにはブラシが2個ともブラシ/リング間異物を挟み込む必要があり、PDM内に、絶縁性の異物がいくつも入り込込む可能性は低い。 高抵抗での接触など完全に開放とならない場合は増加抵抗部分で発熱し、PDMの温度が上昇するため、PDM温度低下の事象と一致しない。
	AX6	×	スリップリングは、1リング2ブラシ構成(パワーHOTリング、RTNは1リング6ブラシ構成)であり、ブラシが2個とも脱落する可能性は低い。 また、徐々に約5kWの電力低下を起こすために、電力用リング(HOT)64リングまたは電力用リング(RTN)5リングのうち、約80%にあたるリングのすべてのブラシが脱落する可能性は極めて低い。
	AY6	×	スリップリングは、1リング2ブラシ構成(パワーHOTリング、RTNは1リング6ブラシ構成)であり、ブラシが2個ともブラシ圧を消失する可能性は低い。 また、徐々に約5kWの電力低下を起こすために、電力用リング(HOT)64リングまたは電力用リング(RTN)5リングのうち、約80%にあたるリングのすべてのブラシ圧が徐々に消失する可能性は極めて低い。
	AZ6	×	各ブラシは、ブラシブロック(RTN:1ブロック(5リング分)、HOT:3ブロック(22リング分))に取り付けられており、各ブラシブロックは高トルク(ロックタイトあり)の6本のネジで筐体に取り付けており外れる可能性はない。 仮に6本のねじ全てが外れ、ブラシがリングから離れたとしても、同時にRTNで5リング、HOTで22リング単位での電力低下が生じると考えられるため、約3分間で徐々にブラシ圧が低下する現象が起きる可能性はない。
ブラシホルダ	BA5	×	パドル駆動機構の温度低下のテレメトリと整合しない。
出力側コネクタとブラシブロック間のハーネス	BB6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力出力用D-subコネクタ5個のうち、4個のコネクタのコンタクトに抜けが生じなければならないが、電線はコネクタ近傍で束線され、ブラシブロック上の端子に配線されており、コンタクトがコネクタから引き抜くような外力は作用しない。
	BC6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力用リング(HOT)64リングのうち、約80%にあたる約50リングのすべての電線とRTN側の電線がブラシブロックの端子から外れなければならないが、電線は端子にハンダ接続された後、端子部は樹脂で電線と一緒に固定されており、電線が端子から外れる可能性はない。 通常的环境条件・使用条件下では、電線を端子から引き剥がすような外力は作用しない。
	BD6	×	徐々に約5kWの電力低下を起こすには、電力用リング(HOT)64リングのうち、約80%にあたる約50リングのすべての電線が断線しなければならないが、通常的环境条件・使用条件下では、電線が断線するような外力は作用しない。 約3分間で上記の現象が徐々に起きる可能性はあり得ない。 同じPDM内のコネクタにある同様の信号用リングを介するテレメトリには異常がない。
	BE5	×	パドル駆動機構の温度低下のテレメトリと整合しない。
出力側コネクタ	BF5	×	ねじ止めされている電力出力用コネクタ5個のうち、4個のコネクタが約3分間に順次、劣化/破損を生じて外れる可能性はない。 コネクタコンタクトはかしめタイプである。
	BG5	×	パドル駆動機構の温度低下のテレメトリと整合しない。
コネクタ	BH5	×	ねじ止めされている電力出力用コネクタ5個のうち、4個のコネクタが約3分間に順次、劣化/破損を生じて外れる可能性はない。 コネクタコンタクトはかしめタイプである。
	BJ5	×	パドル駆動機構の温度低下テレメトリと整合しない。
ハーネス	BK6	×	5個のハーネス束のうち、4個のハーネス束が約3分間に順次、劣化/破損をする可能性はない。 ハーネスが高温にならないことを解析により確認した。 MLIは接地されており、部分帯電しない。
	BL5	×	パドル駆動機構の温度低下テレメトリと整合しない。

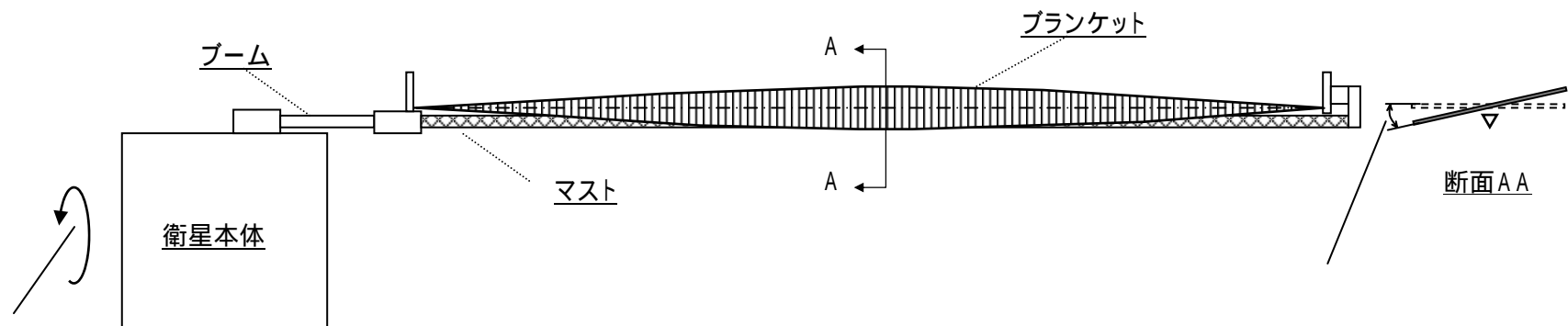
表2-1 故障の木解析(FTA) 評価理由(4/4)

異常部分(3次要因)	番号	評価	評価理由
シャント回路	BM5	×	シャントトランジスタが開放しても、PCU側には電流は流れるため、発生電力低下は生じない。
	BN5	×	シャントトランジスタが開放しても、PCU側には電流は流れるため、発生電力低下は生じない。
	BP6	×	アレイ回路のHOT/RTN間にセル電圧以上の電圧が印可されたとしても、ブロッキングダイオードの両端の電圧は変化せず、また、順方向の電圧のため、故障を起こすことはない。 観測された磁場変化により誘起される電圧は十分小さいことを解析で確認した。 仮に1回路が故障しても、約50回路が約3分間に続けて開放することはあり得ない。 シャント回路の1系と2系は独立の筐体であり、それぞれのシャント電流及び電力制御回路入力電流がほぼ同期して低下する可能性は低い。 バス電圧テレメトリに過大なレベルは見られない。(テレメトリ更新周期0.5秒) 電力低下前後のシャント回路の動作が正常であることがテレメトリより確認されている。
	BQ6	×	ブロッキングダイオードはメタロジカルボンディングで接合したタイプ(溶接タイプ)であるため、過大なサージ電流による故障モードとしては、短絡モードであることから、今回の発生電力低下には到らない。 シャント回路の1系と2系は独立の筐体であり、それぞれのシャント電流及び電力制御回路入力電流がほぼ同期して低下する可能性は低い。 電力制御回路入力電流テレメトリに過大なレベルは見られない。(テレメトリ更新周期0.5秒) 電力低下前後のシャント回路の動作が正常であることがテレメトリより確認されている。
	BR6	×	1つのダイオードの定格ジャンクション温度上限(200)の熱解析を行い、隣接するダイオードは最大7程度しか上昇しないことを確認した。 シャント回路の1系と2系は独立の筐体であり、それぞれのシャント電流及び電力制御回路入力電流がほぼ同期して低下することは極めて考えにくい。 シャント温度テレメトリに過大なレベルは見られない。(テレメトリ更新周期16秒) 電力低下前後のシャント回路の動作が正常であることがテレメトリより確認されている。
	BS5	×	ブロッキングダイオードが短絡故障しても、PCU側には電流は流れるため、発生電力低下は生じない。 当該アレイ回路のブロッキングダイオードが短絡故障した後、シャントトランジスタがONするとバス短絡状態となり、バス電圧が低下するが、PCUによりバス電圧を上げるためシャントOFFし、次にバス電圧の復帰とともに再度シャントONになるため、これ以降はバス電圧の低下と復帰を繰り返すことになり、今回のような電力低下事象には至らない。
シャント/電力制御器間 ハーネス	BT5	×	各系の電力ラインが1本に結合されており、約100wの倍数で電力が低下する事象はあり得ない。
	BU5	×	パドル駆動機構の温度低下テレメトリと整合しない。
	BV5	×	各系の電力ラインが1本に結合されており、約100wの倍数で電力が低下する事象はあり得ない。
	BW5	×	パドル駆動機構の温度低下テレメトリと調整しない。
電力制御器	BX3	×	各系の電力ラインが1本に結合されており、約100wの倍数で電力が低下する事象はあり得ない。
バッテリー充電器	BY3	×	各系の電力ラインが1本に結合されており、約100wの倍数で電力が低下する事象はあり得ない。
バッテリー	BZ3	×	各系の電力ラインが1本に結合されており、約100wの倍数で電力が低下する事象はあり得ない。
(電源系)	CA2	×	電力低下発生初期はシャント回路を順次開くことによりメインバス電圧を維持し、途中からバッテリー充電電流を絞ることによりメインバス電圧を維持し、最終的にバッテリー放電を開始していることをテレメトリにより確認していることから、電力制御機能は正常である。

○ : 可能性を否定できない。 × : 可能性がない。または可能性が極めて低い。

ねじり1次モード

(注)変形を拡大表示している。

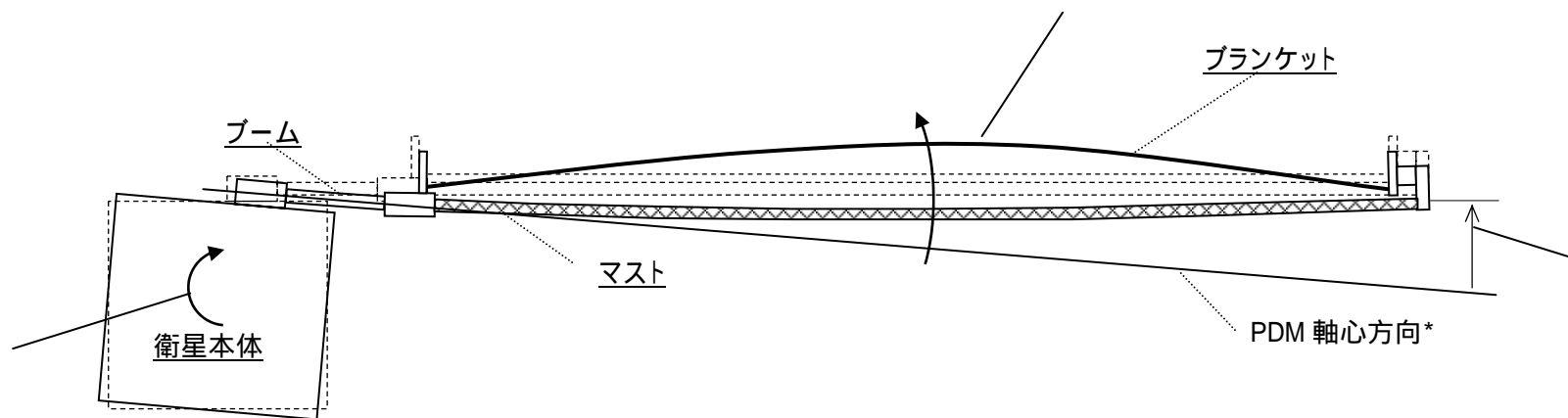


固有振動数		パドル各部位の変形	変形量(軌道上評価結果)
解析値(公差込み)	軌道上評価結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブランケット中央部がブランケット長手軸(Y 軸)廻りにねじれるモード。 ・ マスト、ブームのねじれはブランケットと比較して小さく、ブランケットの振動が支配的であるため、衛星本体の動きは他の衛星振動モード時と比較して小さい。 	ブランケット中央のねじれ角 約2度(縁での変位は約 46mm) 衛星本体の姿勢角変動 約 0.002 度
0.083 ~ 0.11 Hz	0.088 Hz		

図 2-1(1/5) 太陽電池パドル主要振動モード(ねじり1次モード)

面外1次モード

(注)変形を拡大表示している。



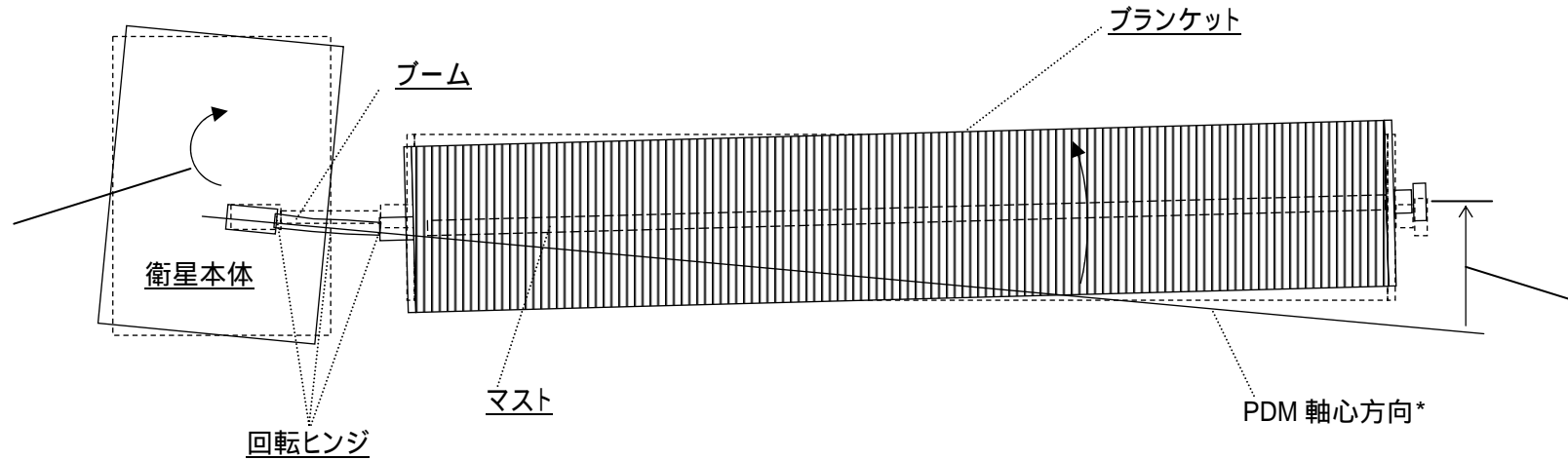
固有振動数		パドル各部位の変形	変形量(軌道上評価結果)
解析値(公差込み)	軌道上評価結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブーム、マスト、ブランケットともにパドル面外方向に振動するモード。 ・ マストとブランケットが同位相で変形する。 ・ 衛星本体はマストと逆向きに回転する。 	PDM 軸心方向*からのマスト先端変位 約 2.2mm ブランケット変位 約 1.2mm 衛星本体の姿勢角変動 約 0.005 度
0.089 ~ 0.13 Hz	0.11 Hz		

*: パドルと衛星本体との相対変位の基準。

図 2-1(2/5) 太陽電池パドル主要振動モード(面外1次モード)

面内1次モード

(注)変形を拡大表示している。



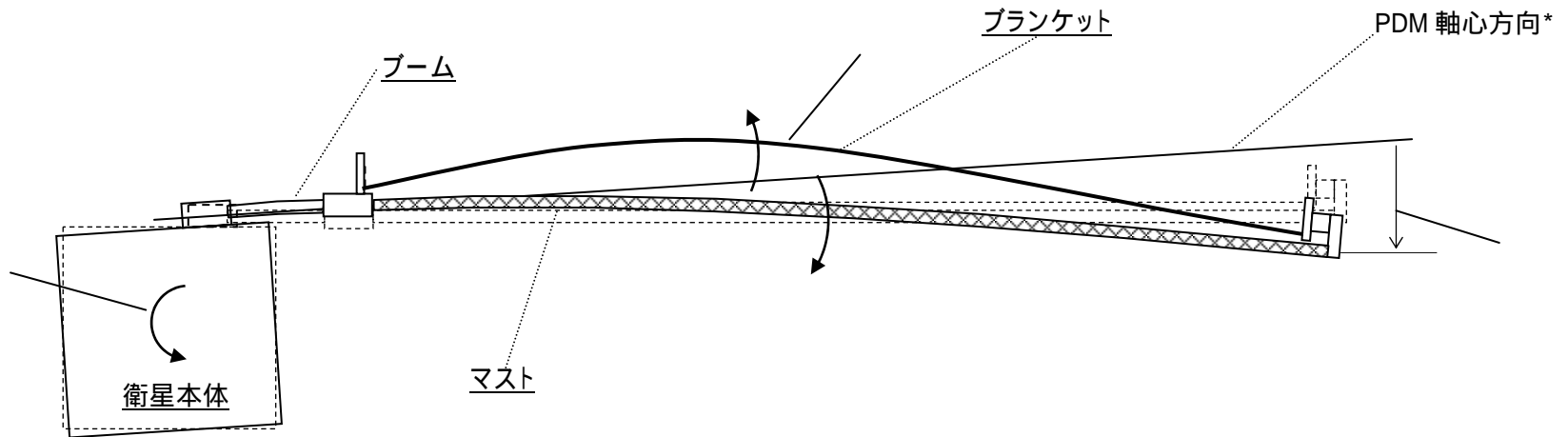
固有振動数		パドル各部位の変形	変形量(軌道上評価結果)
解析値(公差込み)	軌道上評価結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブームの回転ヒンジ廻りのパドル面内方向に振動するモード ・ マスト、ブランケットの変形量は小さい。 ・ 衛星本体はマストと逆向きに回転する。 	PDM 軸心方向*からのマスト先端変位 約 3.5mm 衛星本体の姿勢角変動 約 0.007 度
0.097 ~ 0.15 Hz	0.13 Hz		

*:パドルと衛星本体との相対変位の基準。

図 2-1(3/5) 太陽電池パドル主要振動モード(面内1次モード)

面外2次モード

(注)変形を拡大表示している。



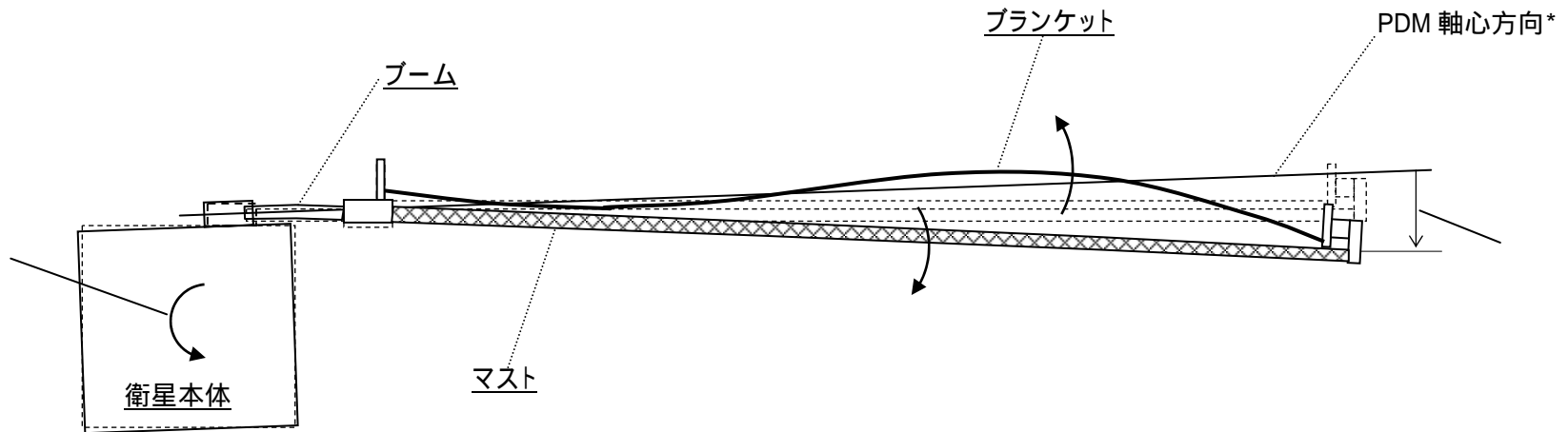
固有振動数		パドル各部位の変形	変形量(軌道上評価結果)
解析値(公差込み)	軌道上評価結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブーム、マスト、ブランケットともにパドル面外方向に振動するモード。 ・ マスト、ブランケットが逆位相で変形する。 ・ 衛星本体はマストと逆向きに回転する。 	PDM 軸心方向*からのマスト先端変位 約 1.2mm ブランケット変位 約 2.1mm 衛星本体の姿勢角変動 約 0.0027 度
0.12 ~ 0.17 Hz	0.14 Hz		

*: パドルと衛星本体との相対変位の基準。

図 2-1(4/5) 太陽電池パドル主要振動モード(面外2次モード)

面外3次モード

(注)変形を拡大表示している。



固有振動数		パドル各部位の変形	変形量(軌道上評価結果)
解析値(公差込み)	軌道上評価結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブーム、マスト、ブランケットともにパドル面外方向に振動するモード。 ・ マストの変形は小さい。 ・ ブランケット先端部はマストと逆位相、ブランケットの衛星側の部分は同位相で変形する。 ・ 衛星本体はマストと逆向きに回転する。 	PDM 軸心方向*からのマスト先端変位 約 0.6mm 以下 衛星本体の姿勢角変動 約 0.0013 度
0.19 ~ 0.25 Hz	0.23 Hz		

*:パドルと衛星本体との相対変位の基準。

図 2-1(5/5) 太陽電池パドル主要振動モード(面外3次モード)

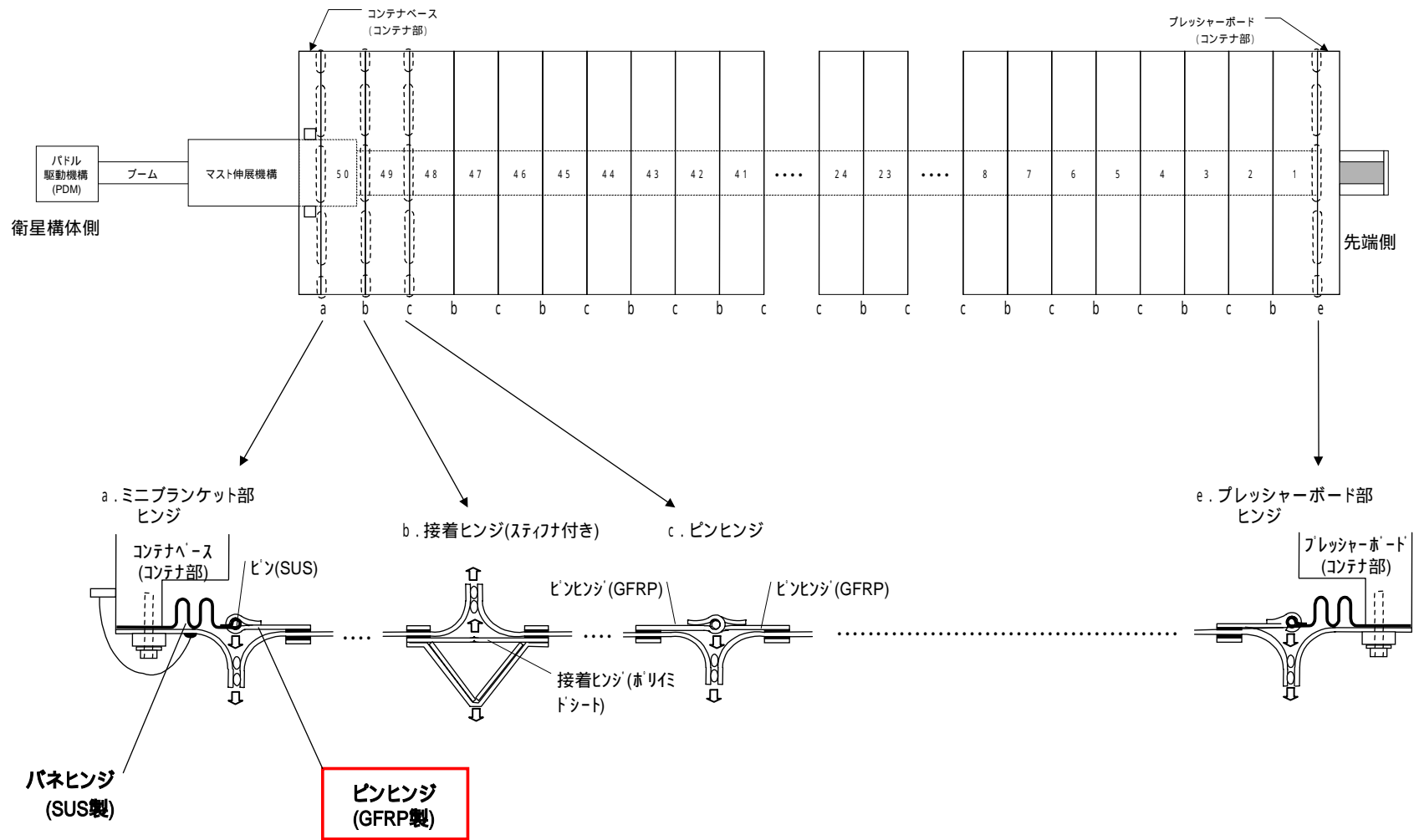
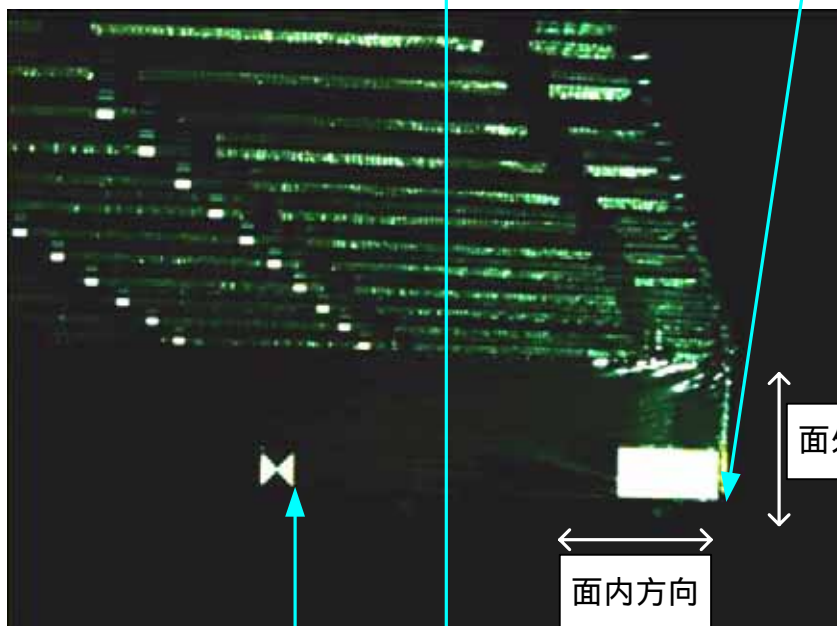


図2-2 太陽電池パドルのヒンジ構成

制御直前の画像



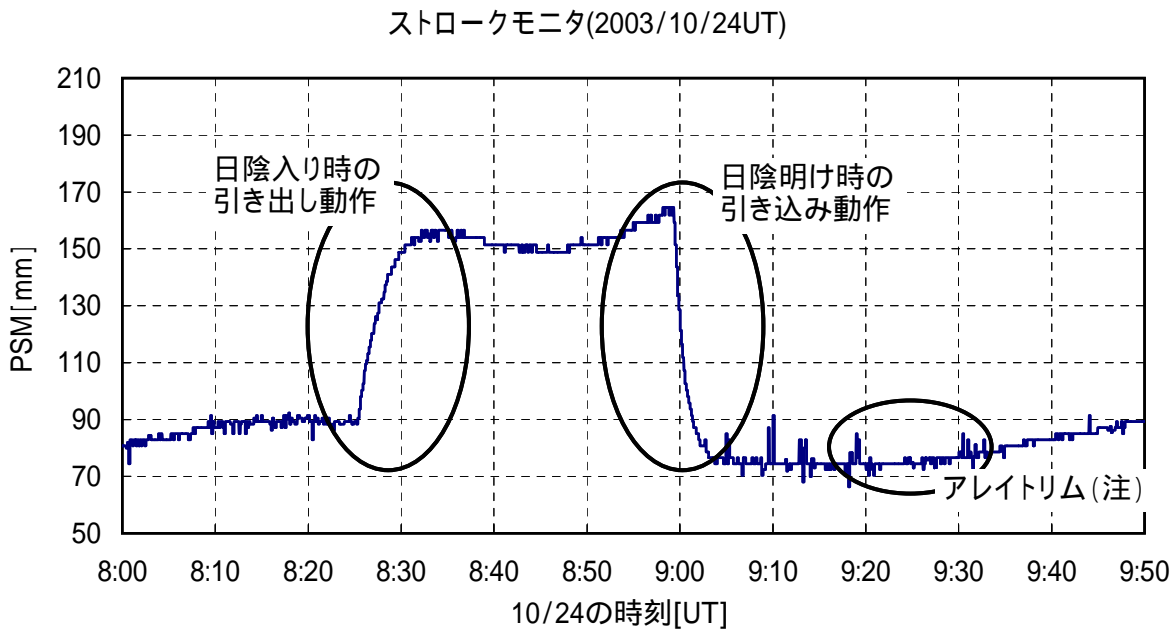
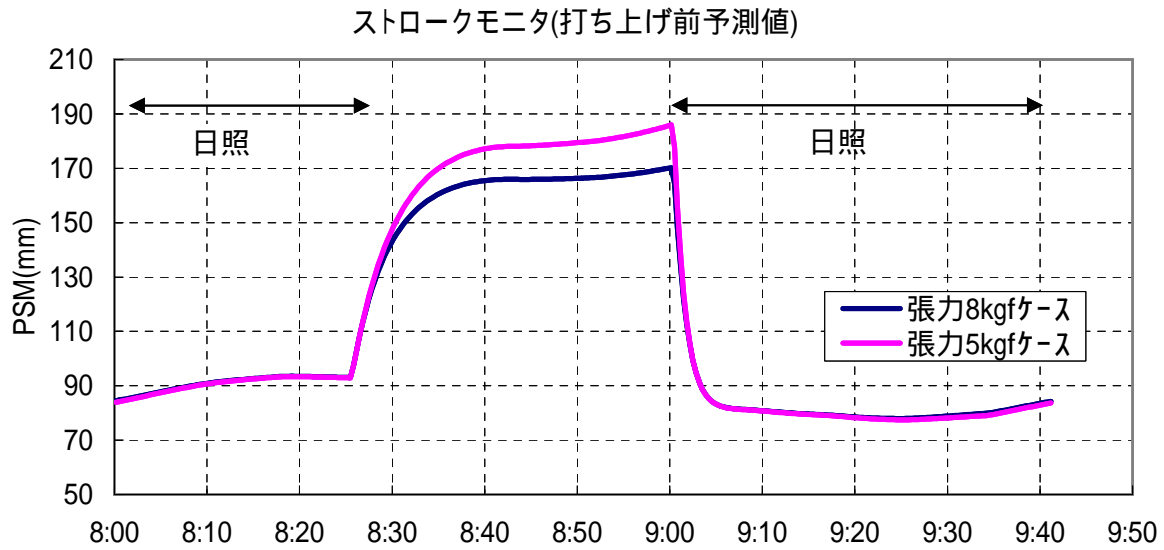
制御中最大
変位時の画像



パドル面内方向に
ずれている

面内方向の変位量は約40cm

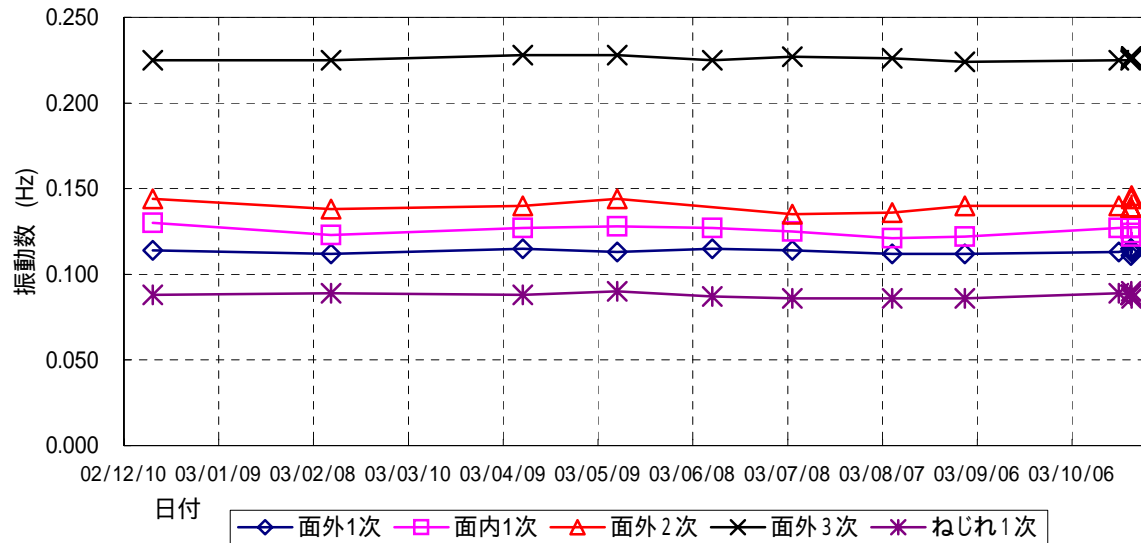
図2-3 20Nスラスト噴射時のVMS画像
(2002/12/23 第1回面外制御)



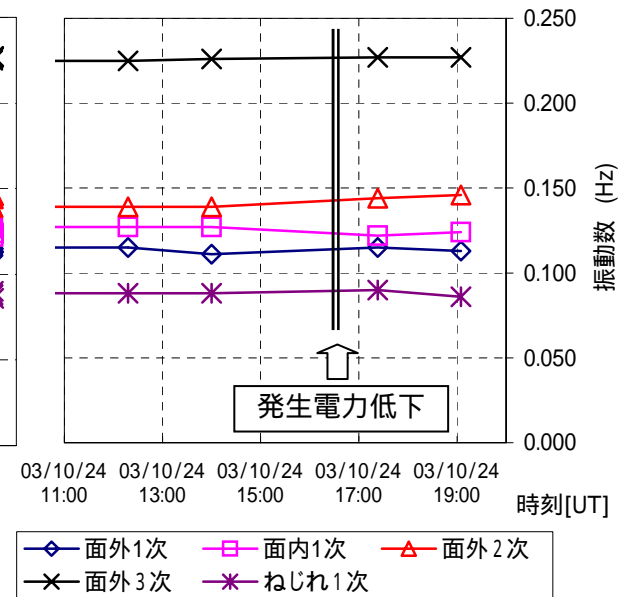
(注) パドルアレイトリム
1周回に1回、パドル追尾用太陽センサ(SPSS)の信号を用いて、太陽電池パドルの太陽追尾誤差を最小にする動作。

図2-4 軌道上ストロークと打ち上げ前予測

PDL周波数のトレンド



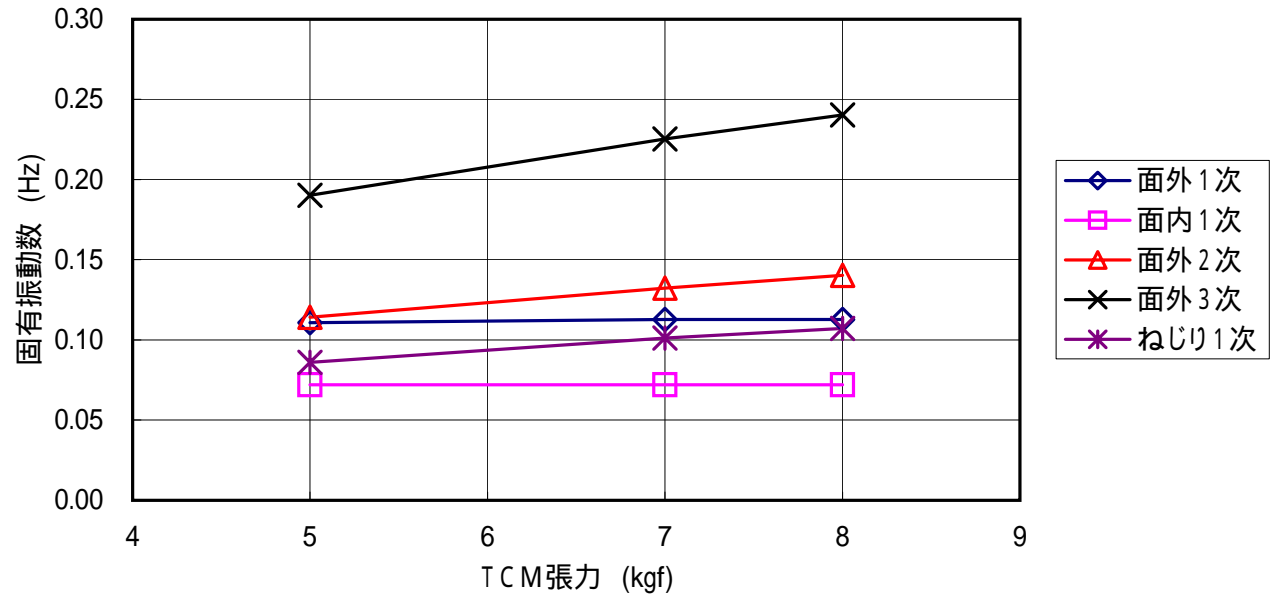
10/24の拡大図



	面外1次	面内1次	面外2次	面外3次	ねじれ1次
解析値 (TCM張力 7kgf)	0.10 ~ 0.11	0.11 ~ 0.13	0.14 ~ 0.15	0.22	0.097

(Hz)

図2-5 パドル固有振動数長期トレンド

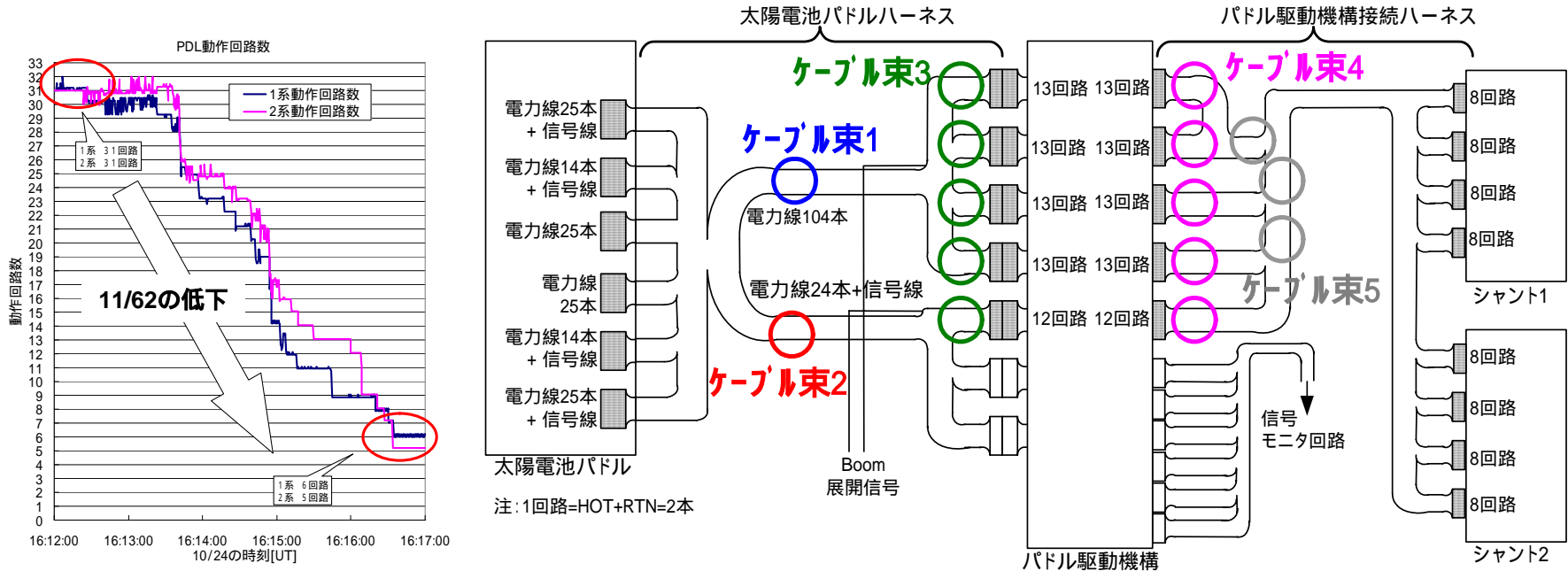


(注) CDR時点の解析結果を示す。衛星質量特性、面内1次モードの剛性を見直し前の解析結果であることから絶対値としては図2-5を参照のこと。

図2-6 TCM張力に対する固有振動数の変化

表 2-2 使用半田の概要および予測温度

部位	半田種別	半田熔融温度	軌道上予測温度 (熱解析結果等)	備考
太陽電池セル部	Sn62-Pb36-Ag2	190	-105 ~ +101 (セル) -106 ~ +92 (バスバー)	クーポンブランケットによる熱サイクル試験
ブランケット間接続部 (挿み部)	Sn62-Pb36-Ag2	190	-102 ~ 86	ADEOS ブランケット接続部の熱サイクル試験
ミニブランケット部	Sn62-Pb36-Ag2	190	-17 ~ 93	半田付け工程基準 (NASDA-STD-3)
PDM (スリップリング部)	Sn63-Pb37	183	33 ~ 77	半田付け工程基準 (NASDA-STD-3)
PDM (ブラシ部)	Sn60-Pb40 Sn62-Pb36-Ag2	190	32 ~ 70	半田付け工程基準 (NASDA-STD-3)
シャント	Sn60-Pb40	190	0 ~ 52.6	半田付け工程基準 (NASDA-STD-3)



太陽電池パドルハーネス破断のケース
一束破断の場合

	残存回路	低下量	電力低下との 一致性
ケーブル束1の破断	12回路	12/62	
	11回路	11/62	
	10回路	10/62	
ケーブル束2の破断	50回路	50/62	×
	51回路	51/62	×
	52回路	52/62	×

複数束破断の場合 (代表例)

	残存回路	低下量	電力低下との 一致性
ケーブル束3の破断	11回路	11/62	
	12回路	12/62	
	26回路	26/62	×
	39回路	39/62	×

パドル駆動機構接続ハーネス破断のケース
一束破断の場合 (代表例)

	残存回路	低下量	電力低下との 一致性
ケーブル束4の どれかひとつの破断	49回路	49/62	×
	50回路	50/62	×
	52回路	52/62	×
ケーブル束5のうち どれかの破断	39回路	39/62	×
	26回路	26/62	×
	24回路	24/62	×

複数束破断の場合 (代表例)

	残存回路	低下量	電力低下との 一致性
ケーブル束4の複数破断	13回路	13/62	×
	12回路	12/62	
	11回路	11/62	
	25回路	25/62	×

図2-7 ハーネスの結束単位と電力変動の一致性

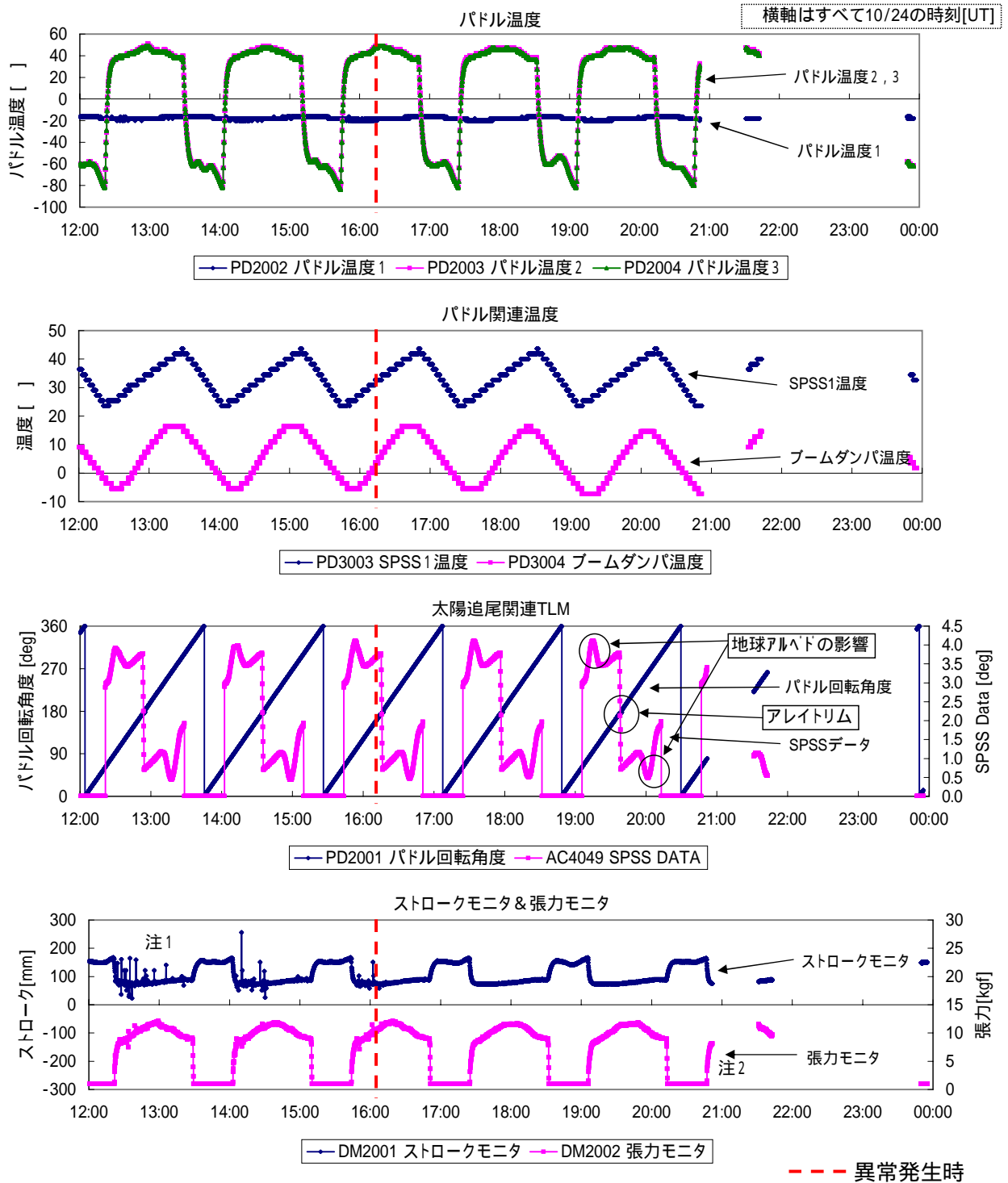
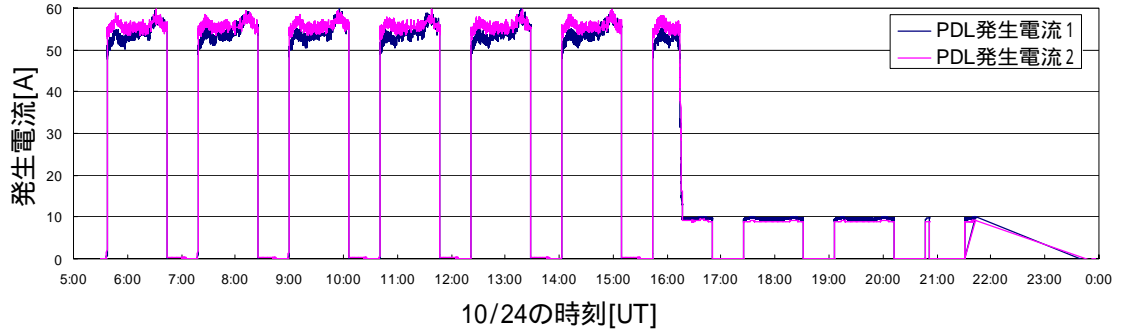


図2-8 太陽電池パドルの温度、追尾状態、ストローク&張力モニタ

- 注1 発生電力低下後のストロークモニタのスパイクノイズの消滅は、シャント動作の停止による。
 注2 日陰における張力モニタの固定値出力は、歪みセンサー一部剥離による0点校正不良による。

発生電流



PDM温度

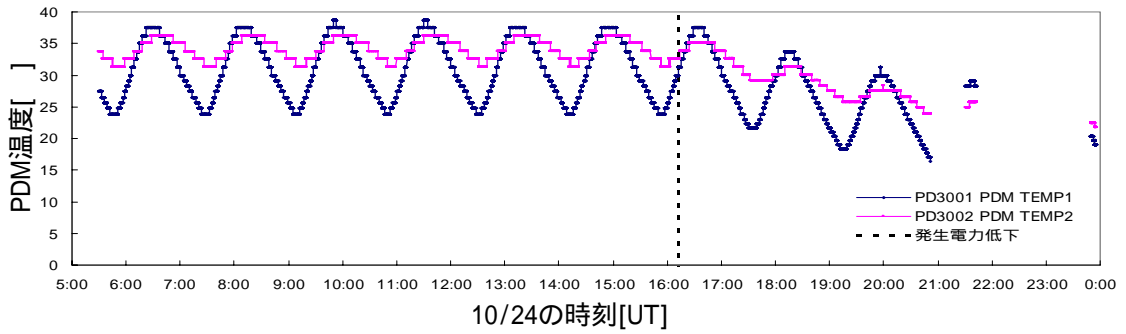


図2-9 発生電力低下に伴うパドル駆動機構の温度傾向

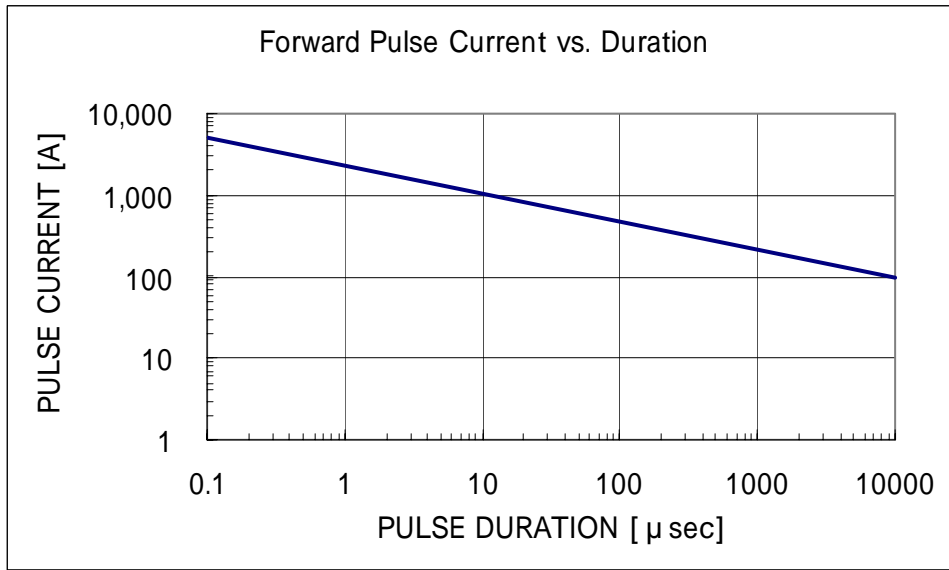


図 2-10 ブロッキングダイオードのサージ電流特性