

環境観測技術衛星(ADEOS-)「みどり」の
運用異常について(その2)

平成15年11月7日
独立行政法人
宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

環境観測技術衛星(ADEOS-)「みどり」に、平成15年10月25日(日本時間)に生じた運用異常(太陽電池パドル発生電力の低下及びその後の通信途絶)の原因究明作業について、現在までに判明した状況を報告する。

2. 運用異常の経緯及びデータ取得状況

表2 - 1に、「みどり」の運用異常の経緯を示す。

図2 - 1に、異常発生前後の発生電力の状況を示す。

表2 - 1 「みどり」の運用異常の経緯

10月 25日	0:07(JST) 頃	パース局	テレメトリデータを正常に受信した。
	6:04 頃	アラスカ局	ミッション(地球観測)データを正常に受信した。(ミッションデータの送信時には、テレメトリデータを多重化して送信している。)
	6:22 頃	鳩山局	データ中継技術衛星「こだま」経由の「みどり」のミッションデータを正常に受信した。(データ中継衛星と「みどり」の間の通信は正常であった。)
	7:28 頃	筑波局	データ中継衛星と「みどり」の間の通信ができなかった。
	7:28 頃	鳩山局	データ中継衛星経由の「みどり」のミッションデータを受信できなかった。
	8:00 頃	筑波宇宙センター	運用担当者が緊急時の手順に基づき、「みどり」の状態を把握するため、臨時に、マスパロマス局における「みどり」との交信を手配した。
	8:30 頃	筑波宇宙センター	関係者を緊急招集した。
	8:49 頃	マスパロマス局	状況を把握するため、臨時にマスパロマス局でテレメトリデータの受信を行ったところ、「みどり」が軽負荷モードになっていることが判った。また、受信途中(8:55 頃)で、テレメトリデータが途切れ、「みどり」との通信が出来なくなった。
	9:00 頃	筑波宇宙センター	可能な限り地上局を確保することを決定した。
	9:23 頃	勝浦局	「みどり」と地上局との通信を回復するための送信機オンコマンド信号を送信したが、「みどり」との通信は復旧しなかった。
	10:00 頃	筑波宇宙センター	それまでに取得したテレメトリデータを解析した結果、10月25日午前1時13分頃から「みどり」の太陽電池パドルの発生電力が約6kwから約1kwに低下していることが判明した。(注1)
	11:05 頃 11:23 頃 12:49 頃 13:34 頃	沖縄局 パース局 沖縄局 サンチャゴ局	「みどり」と地上局との通信を回復するための送信機オンコマンド、及び衛星の負荷電力を減らすためのミッション機器/ヒータオフコマンドなどを送信したが、「みどり」との通信は復旧しなかった。
	15:00 頃	筑波宇宙センター	それまでに取得したテレメトリデータを解析した結果、10月25日午前7時18分頃に軽負荷モードに移行したことが判明した。
			以降、衛星復旧のコマンドを打ち続けるが、「みどり」との通信は復旧していない。

注1： 10月25日 6:04のアラスカ局で受信したテレメトリを解析し、確認した。

3. 運用異常の状況

(資料中の時刻は、以後、世界標準時(UT)で示しており、[]で日本標準時(JST)を示している。)

- (1) 10月24日16:12[10月25日01:12]頃より太陽電池パドルからの発生電力低下が始まり、16:13[01:13]からの約3分間で、シャント電流1及び2が約25Aから0Aに、電力制御回路(PCU)への入力電流1及び2が約28Aから10Aに低下した。この低下は、発生電力に換算して、約6kwから約1kwへの低下に相当する。

図3 - 1に、内部回路を主体とした電源系の系統図を示す。

図3 - 2に、シャント電流及びPCU入力電流の低下状況を示す。

- (2) この間、姿勢制御系の姿勢角変化率(レート)及び太陽電池パドルに搭載されている温度センサ等のデータからは、急激な姿勢変化やパドルからのセンサデータの途絶は認められない。

(平成9年6月に生じた地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)「みどり」では太陽電池パドル破断により姿勢の急激な変化やパドルからのセンサデータの途絶が生じた。)

図3 - 3にハーネスを主体とした電源系の系統図を示す。

- (3) 太陽電池パドルからの供給電力が低下したことにより、日照中においてもバッテリーからの放電状態が継続し、10月24日22:18[10月25日07:18]頃に衛星は低電圧検知により軽負荷モードに移行した。

図3 - 4に、軽負荷モード移行時刻の推定を示す。

- (4) 緊急に手配したマスパロマス局におけるデータ受信中に、10月25日23:55[10月25日08:55]、衛星の電源電圧低下に伴う通信機器動作停止により、衛星からの通信が途絶した。

図3 - 5に、マスパロマス局可視中の電源(メインバス)電圧とテレメトリ送信機の出力(USB送信電力)を示す。

4. テレメトリデータによる衛星状態の詳細評価

運用異常時の状況、搭載計算機による衛星各部へのコマンド履歴、ミッション(地球観測)機器の温度状況等を確認した結果、以下に示す事項が明らかになった。その他に、運用異常に結びつく異常なデータは確認されなかった。軽負荷モード移行に伴う各搭載機器の動作も正常であった。

4.1 電源系及び太陽電池パドル系

- (1)「みどり」の太陽電池パドル発生電力低下時に加えて、打上げ(平成14年12月14日)以後の太陽電池パドル系及び電源系のデータを調査・分析した結果は次のとおりである。

太陽電池パドルの発生電力低下時の電流値は、108A から 19A に減少している。

シャント1とシャント2の温度は、電流低下に伴って、低下している。

パドル駆動機構の温度は、電流低下を境として低下傾向である。

太陽電池パドルの発生電力は、平成15年3月から7月にかけて100w単位で断続的な変化が生じていたほかに、特記すべき事象はない。

太陽電池パドルの温度、ストロークモニタ及び張力モニタによる太陽電池パドルの挙動、並びに太陽追尾状態は、運用異常前後を含め、異常は見られない。

今後、15年3月から7月にかけて発生した100w単位の発生電力変動と今回の発生電力低下の関係について、更に詳細評価を行う。

図4.2-1に、シャント電流とシャント温度ならびにパドル駆動機構の温度を示す。

図4.2-2に、太陽電池パドル発生電力の長期トレンドを示す。

図4.2-3に、太陽電池パドルの温度、ストロークモニタ及び張力モニタ状況、太陽追尾状態を示す。

- (2)「みどり」の太陽電池パドル発生電力低下における電源系の状況は以下のとおりである。

16:12:25頃、太陽電池パドルの発生電力低下が開始した。

発生電力低下当初は、各シャント回路が順次オフされることにより、メ

インバス電圧が維持できた。

16:15:10 頃、全てのシャント回路のオフが終了した。

電源系は、全てのシャント回路がオフになっても必要な負荷電流を供給できず、バッテリーへの充電電流を絞ることによりメインバス電圧を維持した。

16:16:00 頃、充電電流が 0 となりバッテリーは放電を開始した。

16:16:30 頃、発生電力低下が止まった。

図 4.2 - 4 に、太陽電池パドル発生電力低下に伴う電源系動作を示す。

4.2 姿勢関係データの評価

(1) 姿勢制御系全般

通信途絶直前(テレメトリによる最後の確認時点)まで、太陽電池パドルの太陽追尾制御も含め、姿勢制御系は正常であり、制御モードとしては複合航法(注2)を維持していた。

(「みどり」事故で発生した姿勢異常検知による姿勢捕捉モードへの移行は発生していない。)

(注2) GPS 信号を用いた高精度姿勢制御状態

(2) 姿勢データの分析

「みどり」の姿勢データについて、回帰日数に相当する 4 日周期でほぼ同じ状態が繰り返されていることを考慮し、通信途絶前 4 日分の姿勢データを確認した。その結果、以下の 2 つの事象を除いて、特記すべき事項はなかった。

10 月 24 日 16:00 頃の姿勢変動(事象 A)

ヨー軸まわりの推定姿勢角に - 0.004 度程度の変動があり、日陰明け直後の 15:45 ~ 15:57 の間にトルクが作用したと推測する。

この現象は、太陽フレアによる太陽輻射圧や大気抵抗が衛星のヨー角に影響しやすい北極上空通過時に発生していることから、今後、その影響などを検討する。

10月24日16:15頃の姿勢変動(事象B)

16:13~16:17に、ロール/ピッチ/ヨーの3軸全ての姿勢角に変動が生じている。

電力低下が発生しているこの時間帯では、太陽電池パドルのアレイトリム動作、GLI(グローバル・イメージャ)のチルト動作、IOCS(軌道間通信系)アンテナの駆動動作が行われているが、これらの動作だけではこの姿勢変動事象の説明は困難で、トルクが作用していたと推測する。本現象について、トルク発生メカニズム等の詳細検討を行う。

図4.3-1に、発生電力低下前後の姿勢角を示す。

(1) 加速度データの分析

姿勢データと同様に4日間分の加速度データを確認した。その結果、以下の事象を除いて、特記すべき事項はなかった。

日照期間中に、ときおり、パドル取付け加速度計(PMA)1~3に0.3mG程度のバイアスが発生している。この現象は発生電力低下開始後の16:15前後にも10秒程度2回発生している。

このバイアスは、加速度データの固有振動数評価等に影響のないレベルであるが、通常の運用では予想されない衛星の挙動を示すものであり、過去のデータの確認も含めて詳細検討を行う。

図4.3-2に、発生電力低下直後の加速度データを示す。

(2) パドル固有振動数の解析

打ち上げから10月24日までの姿勢変化率データを用いて、衛星機体特性を評価した。この結果、今回の運用異常前後で主要なモード(パドル面内1次:0.13~0.14Hz、パドル面外1次:0.11~0.12Hz)には変化がないと判断している。

5. 軌道データの評価

(1) 通信リンク途絶前

「みどり」の軌道は、地上局からの測距データ及び搭載されている GPS 受信機 (GPSR) の GPS 観測データにより通信リンク途絶までモニタを継続していた。

高精度軌道決定システム (注3) による発生電力低下前日 (10月24日) の決定値による軌道伝播値と搭載 GPSR による単独航法解 (注4) を比較すると、発生電力低下と同じ10月24日16:15 [10月25日01:15] 頃から、スラスタが噴射していないにもかかわらず、衛星進行方向に差異が生じている。この差は、軌道長半径に換算して-2m (速度換算では、1mm/秒の減速) 程度に相当する。

注3 : 高精度軌道決定システム

地上 GPS 観測網データと搭載 GPSR データを使用して、GPS 衛星及びユーザ衛星 (「みどり」) の高精度軌道決定を行なう地上システム

注4 : 搭載 GPSR による単独航法解

搭載 GPSR がカルマンフィルタを用いて単独でリアルタイム軌道推定した結果 (軌道決定値)

図5 - 1に、直前の高精度軌道決定値による軌道伝播値と搭載 GPSR による単独航法解の差を示す。

(2) 通信リンク途絶後

通信リンク途絶以降は、NORAD 提供の2ライン軌道要素及び試験運転中の上斎原レーダー観測データにより評価した。

NORAD 軌道要素及び上斎原レーダー観測データによる軌道決定値の双方に、衛星が増速している (軌道長半径に換算して 30 ~ 40m 程度) ような状況も観測されている。

しかしながら、太陽面爆発に起因する大気抵抗の増加 (2m/日 ~ 9m/日) も発生しており、衛星自身の正確な増速量算出は困難である。

なお、テレメトリデータがないため推定となるが、通信途絶後でもバス電圧 20V 程度まではスラスタの動作が可能で、1次電源電圧低下によるミッション機器の回転停止に伴い、姿勢系の異常検知機能が働いてスラスタを噴射した可能性は否定できない。

6. レーダー観測画像の解析

ドイツの応用自然科学研究協会 (FGAN) 高周波物理研究所 (FHR) の協力を得て、逆合成開口レーダーにより「みどり」の撮像を3回実施した。これにより以下の事実が判明した。

(「みどり」事故で観察されたような)パドルが完全に破断している状況は観測されなかった。

画像解析により得られたパドルへの太陽光の入射角は、3回の観測毎に異なる。

これらにより、衛星は軌道周期程度の周期でゆっくりと回転していると考えられるが、最終安定姿勢(重力傾斜姿勢)へはまだ入っていないと推定される。

図6 - 1に、FGANにより撮像された ADEOS- の画像を示す。

図6 - 2に、ADEOS- の最終安定姿勢(重力傾斜姿勢)を示す。

7. 異常事象の分析

今回の異常の根元事象として、

発生電力が約3分間に約6kwから約1kwに低下を位置づけ、この過程及びその後起こった以下の2つの特徴的な事象に着目して要因分析を行っている。(図7-1参照)。

太陽電池パドル系から電源系の電力制御回路(PCU)までの1系及び2系の電力が、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。

7.1 故障部位及び発生事象の推定

テレメトリデータを解析した結果、可能性のある故障部位及び発生事象を以下のとおり推定するに至った。

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

上記の推定に至った理由は以下による。

【電源系(シャント、電力制御回路、バッテリー充電制御器、バッテリー)】

- a) 電力低下後にパドル駆動機構の温度が低下していることから、パドル駆動機構より太陽電池パドル側で電流が止まっていると考えられるため、電源系における短絡故障はないと考えられる。(×)
- b) シャント回路の1系と2系は別筐体となっており、「太陽電池パドルの電力ラインの開放または短絡」の事象のように、それぞれに実装されている多数のブロッキングダイオードがほぼ同期して連続的に開放することは考えられない。(×)

- c) シャントより下流にある電力制御回路及び負荷側の機器については、シャント回路の出口で、1系及び2系のそれぞれの全電力ラインが電氣的に1つに接続されているため、ここで開放あるいは短絡が発生した場合には1系あるいは2系の電力が0wに落ちるはずであり、約100wの倍数で低下するようなことは考えられない。従って、電力制御回路及び負荷側の機器の開放及び短絡故障はないと考えられる。(×)

【太陽電池パドル系】

- a) 太陽電池パドルの電力ライン(アレイ回路、銅ハーネス)の開放または短絡により当該事象を生じる可能性がある。()
- b) 太陽電池パドルハーネスは、(電力ライン 52 回路 + ブーム展開信号ライン)と(電力ライン 12 回路 + 各種テレメトリ信号ライン)の2束にまとめられている。前者の開放又は短絡により、当該事象を生じる可能性がある。()
- c) 太陽電池パドル駆動機構内のスリップリング、ブラシブロック、コネクタ、ハーネスについて検討を行ったところ、導電性の異物混入によるHOT(太陽電池(+)側ライン)とRTN(太陽電池(-)側ライン)のリング同士が短絡する場合は考えられるが、約50回路分のHOTがRTNと短絡する可能性は極めて小さい。さらに、スリップリングとブラシブロック間の開放についても、約50個ものブラシブロックが同時に壊れる可能性は考えられない。したがって、パドル駆動機構内の開放及び短絡故障はないと考えられる。(×)

図7 - 2に、太陽電池パドルの断面図を示す。

図7 - 3に、接続ハーネス詳細図を示す。

図7 - 4に、パドル駆動機構詳細図を示す。

【接続ハーネス】

- a) 太陽電池パドル駆動機構接続ハーネスの電力ラインの開放により当該事象は生じる可能性がある。()

b) シャントと電力制御回路間のハーネスについては、シャント回路の出口で、1系及び2系のそれぞれの全電力ラインが電氣的に1つにまとめられているため、開放あるいは短絡が発生した場合には1系あるいは2系の電力が0wに落ちるはずであり、約100wの倍数で低下するようなことは考えられない。従って、シャントと電力制御回路間のハーネスの開放及び短絡故障はないと考えられる。(×)

7.2 想定される異常発生の変因

7.1項 ~ に示す開放または短絡を生ずる変因として以下のものが考えられる。

10ヶ月の経年変化(熱サイクル、振動、放射線、原子状酸素)による材料の特性変化から破損

設計、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

・高エネルギー陽子及び高エネルギー電子

・低エネルギー電子、イオン(オーロラ粒子)

・磁場変化、プラズマ

上記の複合による破損

なお、高エネルギー陽子及び高エネルギー電子による太陽電池アレイ回路の劣化は、搭載宇宙環境計測装置(TEDA)によりこれらの陽子及び電子の増加は観測されていないため除外した。

上記の変因について、故障の木解析(FTA)、試験、解析を行い、現在詳細に検討を進めている。

図7 - 1 異常事象分析

【事象】

- 発生電力が約3分間に約6kwから約1kwに低下
 (1)1系及び2系がほぼ同期して約100wの倍数で低下
 (2)シャント温度、パドル駆動機構温度が電力低下後に低下

電力供給回路の開放	
電源系の故障	(×)
└ シャント回路の故障	×
└ 電力制御回路の故障	×
└ バッテリー制御回路の故障	×
└ バッテリーの故障	×
太陽電池パドルの故障	()
└ パドルの故障	
└ 電力ラインの開放	
└ パドル駆動機構の故障	×
└ 電力ラインの開放	×
└ パドル/パドル駆動機構間ハーネスの故障	
接続ハーネスの故障	()
└ パドル駆動機構/シャント間のハーネス故障	
└ シャント/電力制御回路間のハーネス故障	×
電力供給回路の短絡	
電源系の故障	(×)
└ シャント回路の故障	×
└ 電力制御回路の故障	×
└ バッテリー制御回路の故障	×
└ バッテリーの故障	×
太陽電池パドルの故障	()
└ パドルの故障	
└ ハーネスの短絡	
└ パドル駆動機構の故障	×
└ 電力ラインの短絡	×
└ パドル/パドル駆動機構間ハーネスの故障	

└─	接続ハーネス	(×)
└─┬─	パドル駆動機構/シャント間のハーネス故障	×
└─└─	シャント/電力制御回路間のハーネス故障	×
└─	太陽電池アレイ回路の機能劣化	×
└─	太陽電池パドルの指向方向変動	
└─┬─	太陽電池パドルの駆動異常	×
└─└─	姿勢の異常	×

8. 今後の計画

現時点は、状況の一次把握がほぼ終了した段階であり、今後は以下の作業を中心に原因の絞込みを実施していく予定である。

- (1) 故障の木解析(FTA)の詳細検討、原因の絞込み
- (2) FTA 等に応じたデータの二次評価
- (3) 姿勢・軌道データの変動要因の分析
- (4) 100w 単位の断続的な変動との共通事項の分析
- (5) 「みどり」事故との共通事項の分析

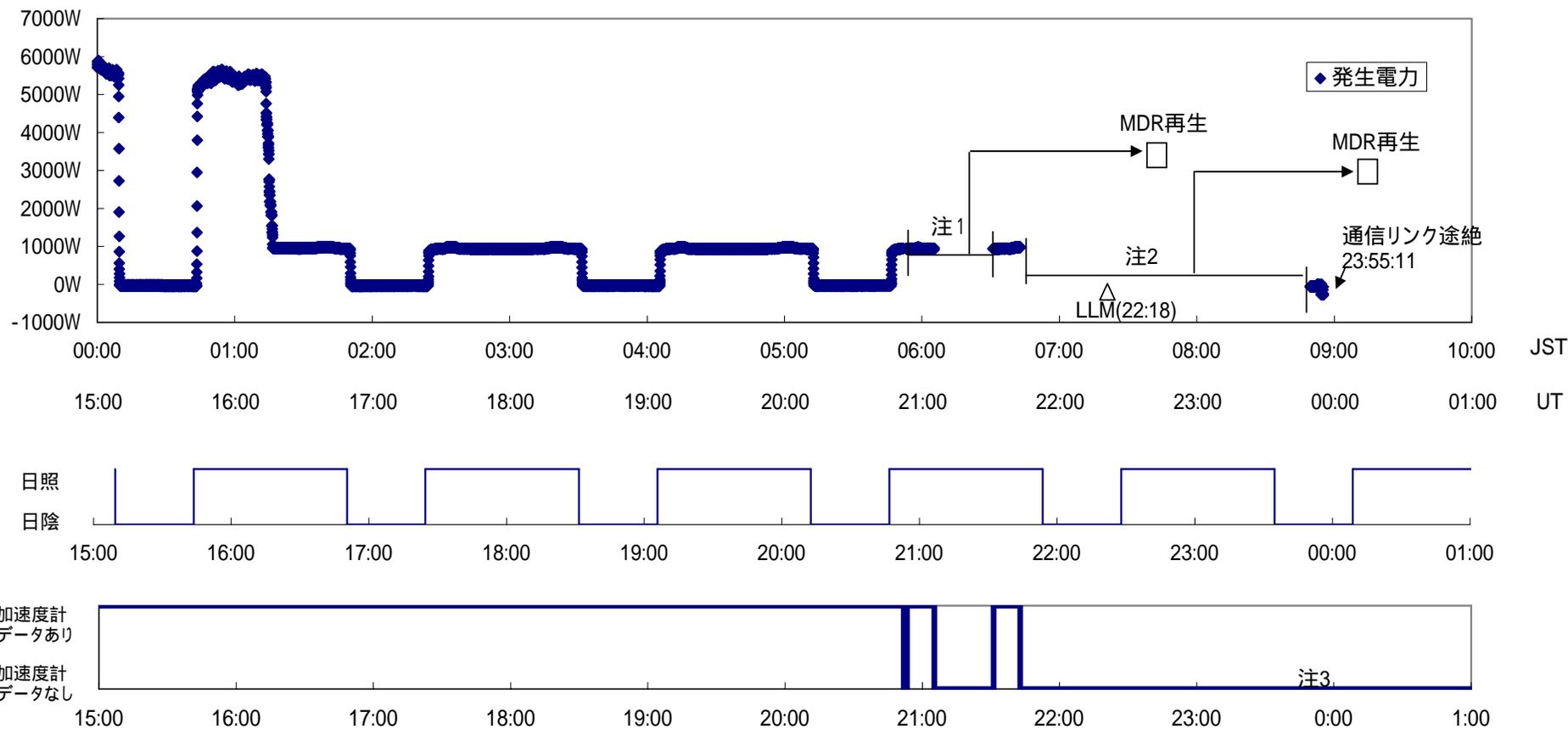
環境観測技術衛星(ADEOS-)「みどり」の
運用異常について(その2)

図表集

平成 15 年 11 月 7 日

独立行政法人

宇宙航空研究開発機構



注1 : 20:51:51-20:53:17,21:05:14-21:31:11のテレメトリデータは22:28頃取得予定であったが、軽負荷モード(LLM)発生のため取得できず。
 注2 : 21:42:49-23:49:38までのテレメトリデータは10/25 00:15以降に取得予定であったが、「みどりII」とリンクが取れず、取得出来ていない。
 注3 : マスパロマス局(23:49-23:55)はHK運用であるため、加速度計データは取得されていない

図2 - 1 発生電力と取得データの期間

電源系システム

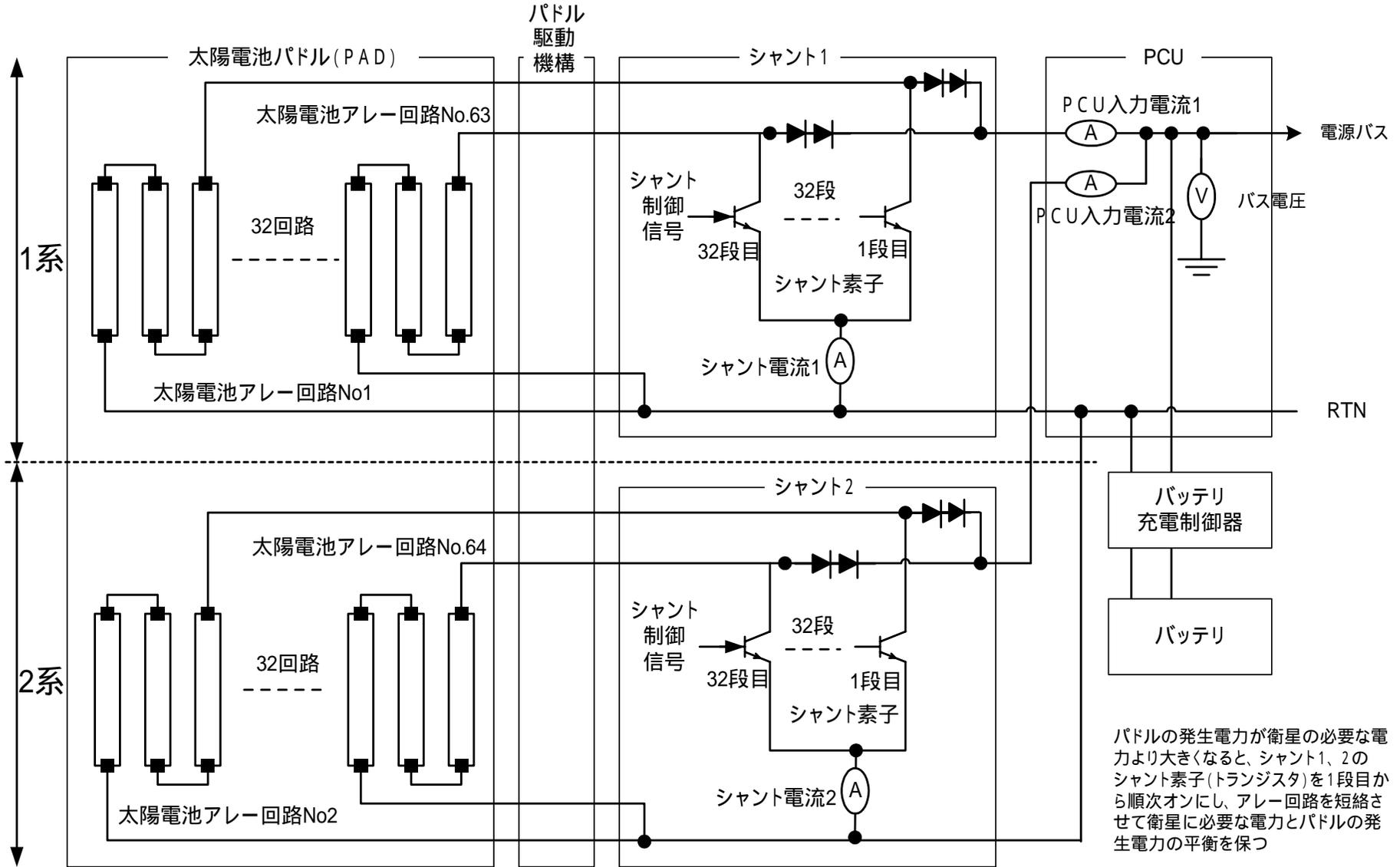


図3 - 1 内部回路を主体とした衛星電源系 系統図

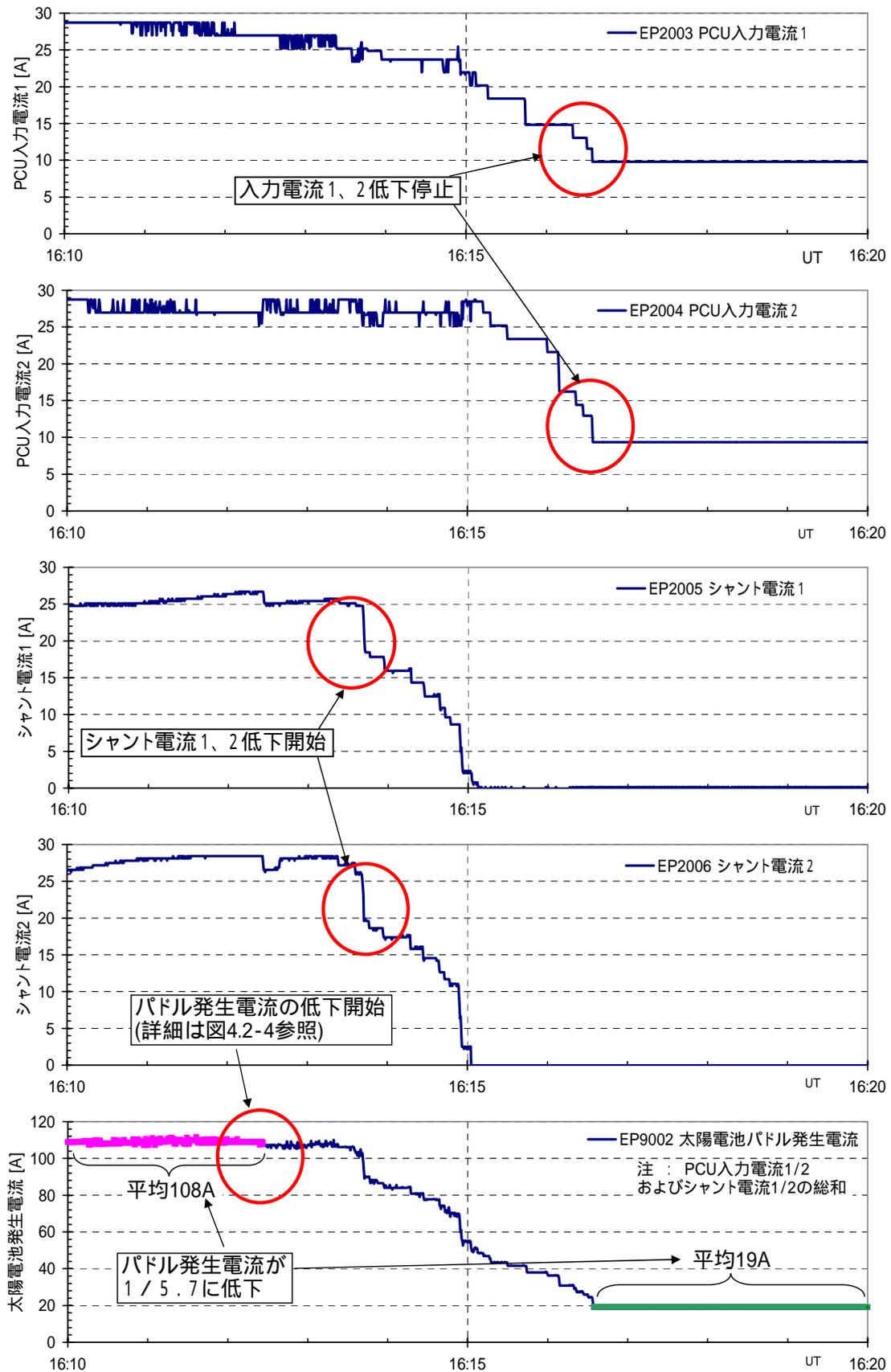


図3 - 2 シャフト電流およびPCU入力電流の低下状況

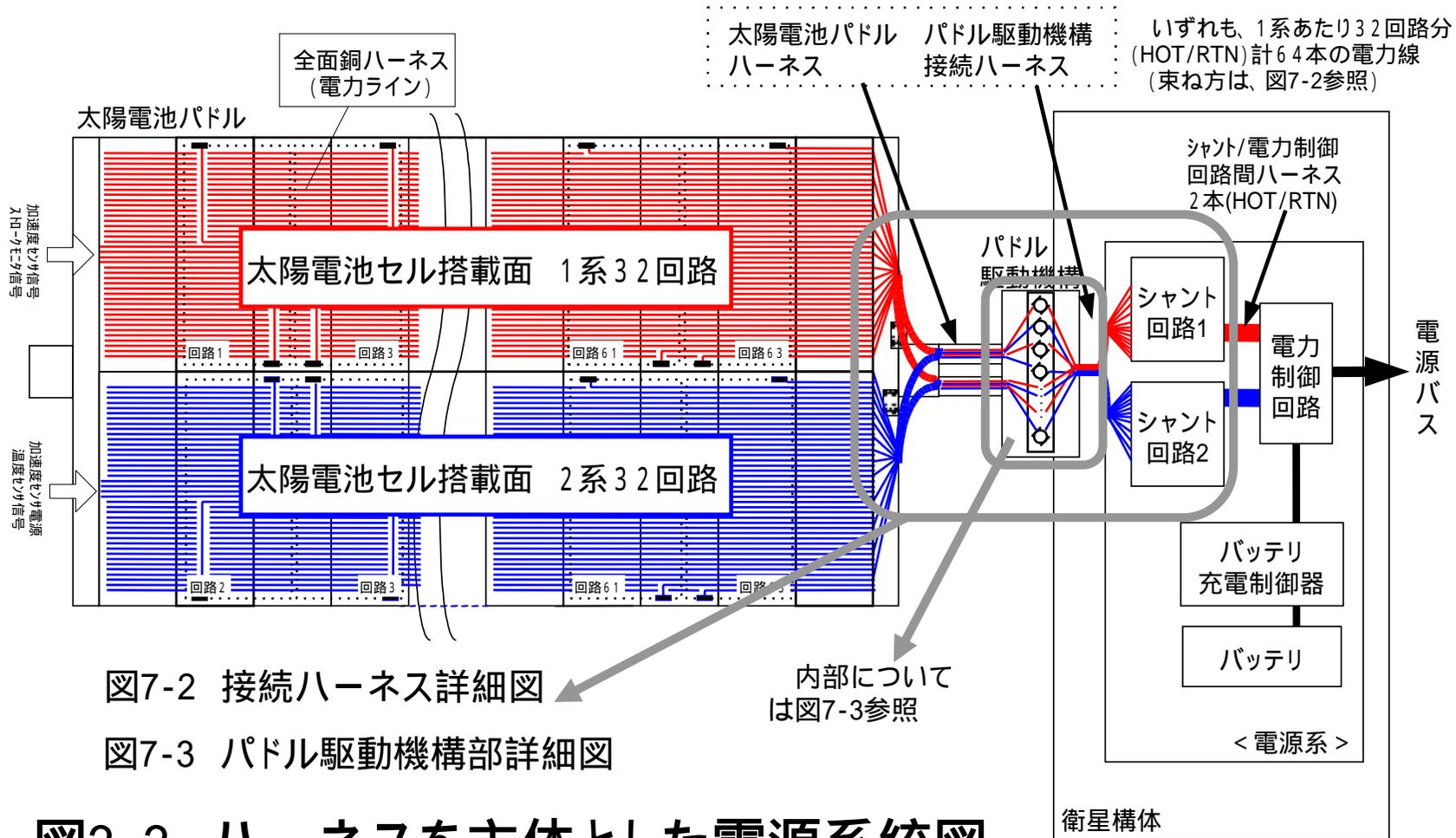


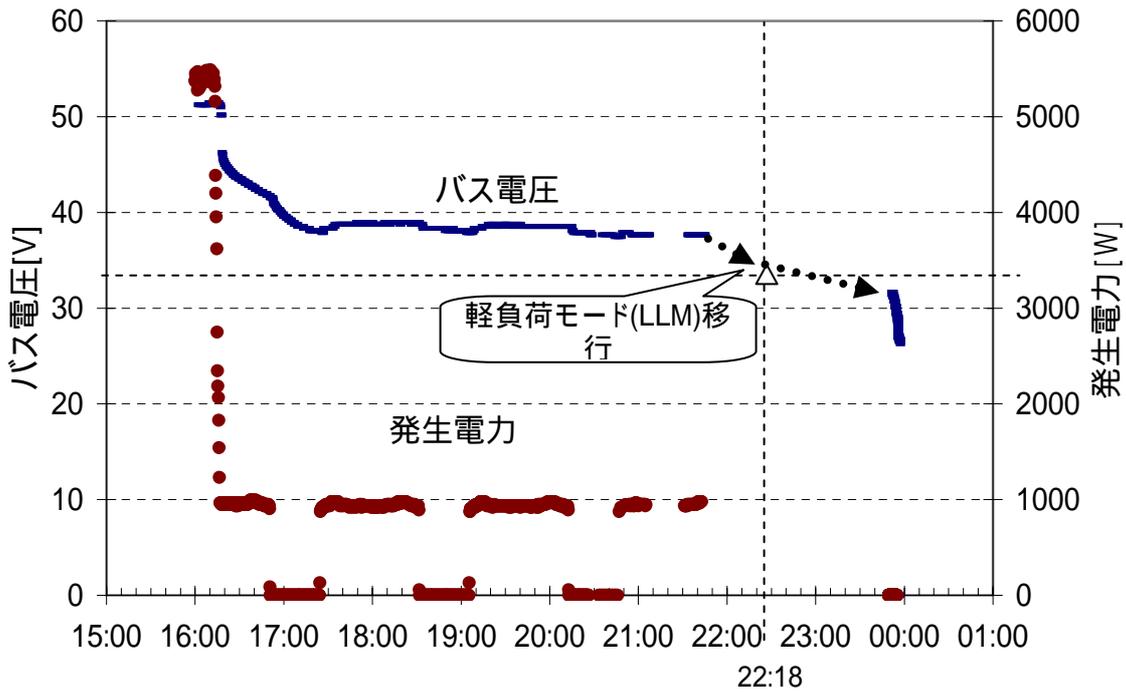
図7-2 接続ハーネス詳細図

図7-3 パドル駆動機構部詳細図

内部については
図7-3参照

図3-3 ハーネスを主体とした電源系統図

HOT: 太陽電池 (+)側ライン
 RTN: 太陽電池 (-)側ライン
 シャット: 余剰電力調整装置



LLMシーケンスによるHKMU動作

記録開始

マスパロマス局で得られたHKMU記録アドレスから、記録時間を逆算してLLM発生位置を特定した

軽負荷モードとは

異常発生時に衛星が消費する電力を抑え、安全なモードに自動移行するモード。基本的にはミッション機器ヒータとバス機器等の必要最低限な機器のみがONであるモード。

以下の異常に対して実施される。本事象では により軽負荷モードに移行した。

- バッテリー電圧低下
- 姿勢異常
- 自動制御用オンボードコンピュータの異常
- テレメトリ・コマンド系コンピュータの異常
- テレメトリ・コマンド用信号の応答時間超過

図3 - 4 軽負荷モード移行時刻の推定

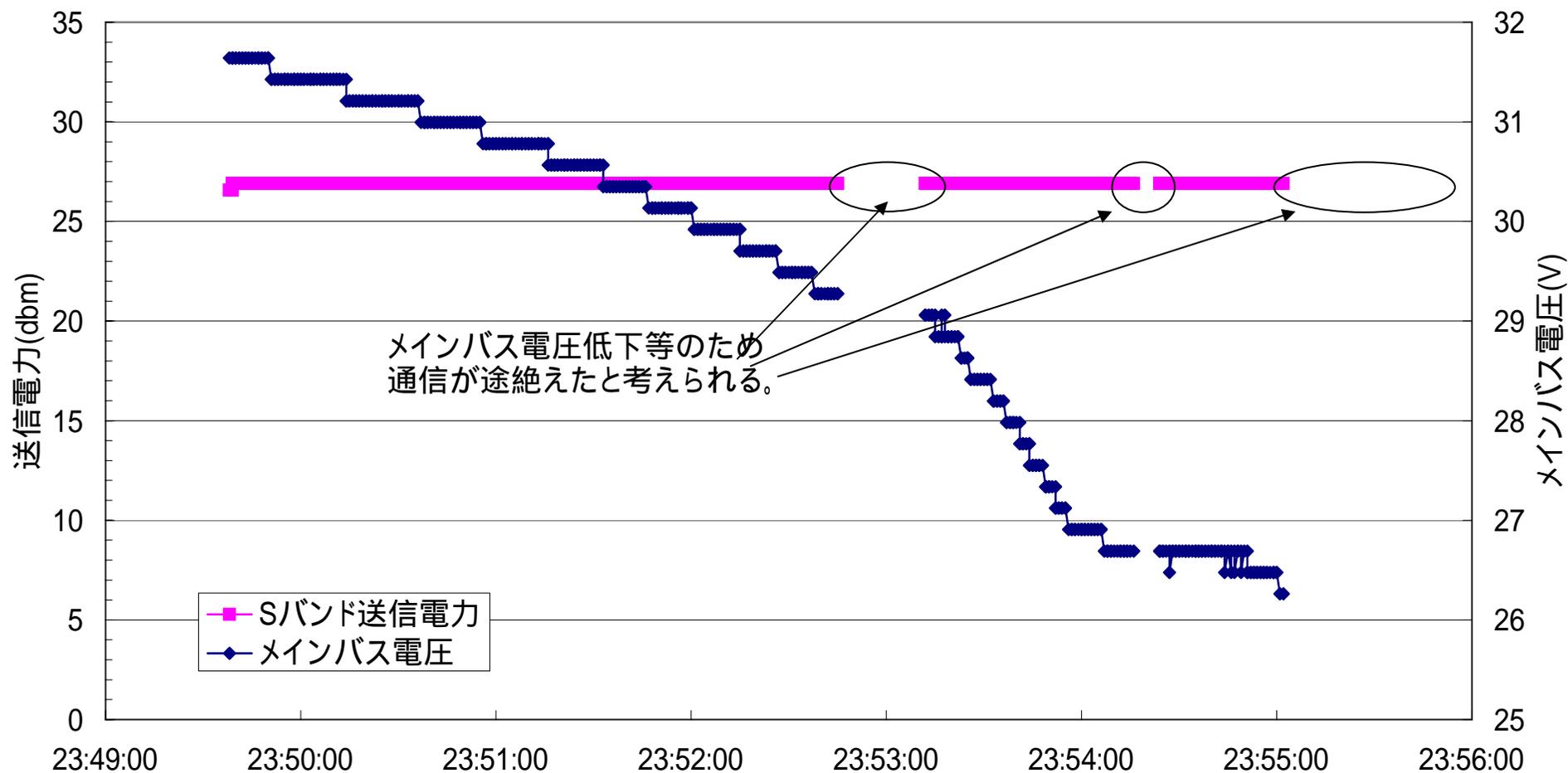


図3 - 5 マスパロマス局可視中のメインバス電圧とUSB送信電力

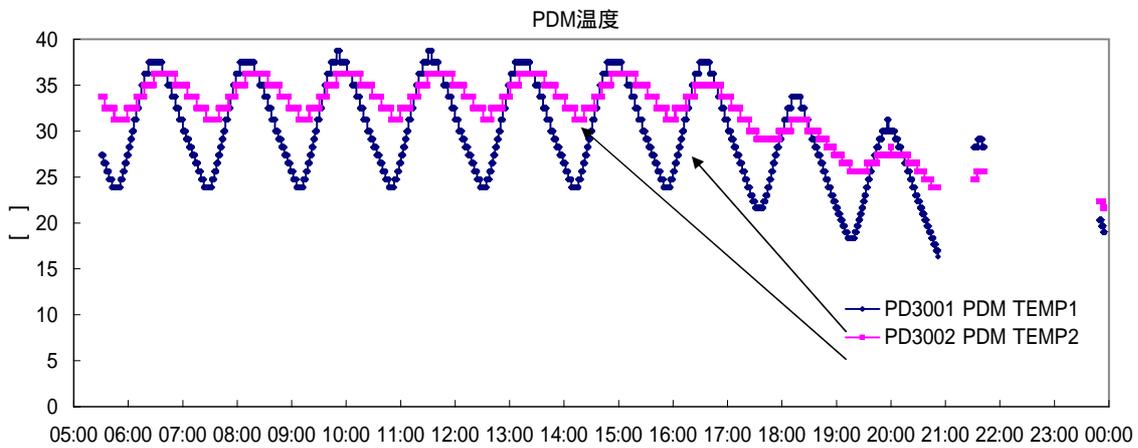
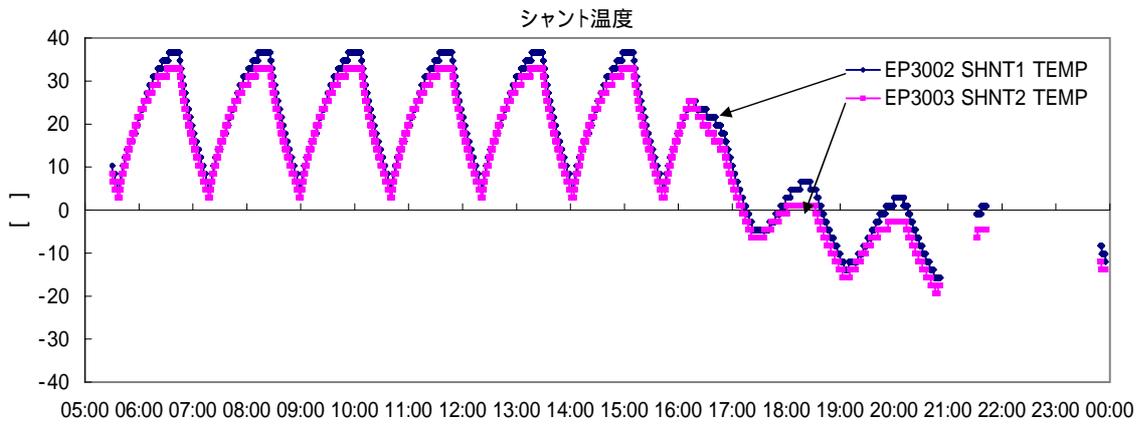
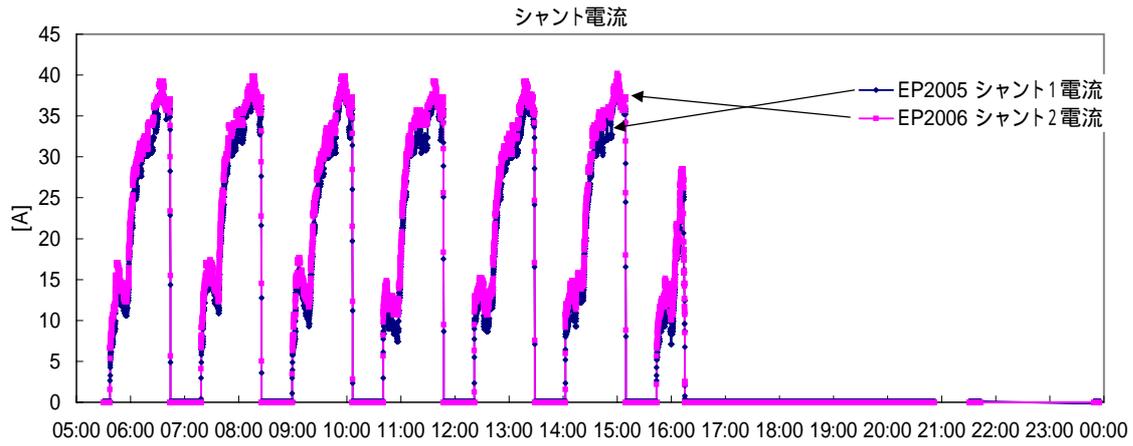


図4.2 - 1 シャント電流とシャント温度、パドル駆動機構温度

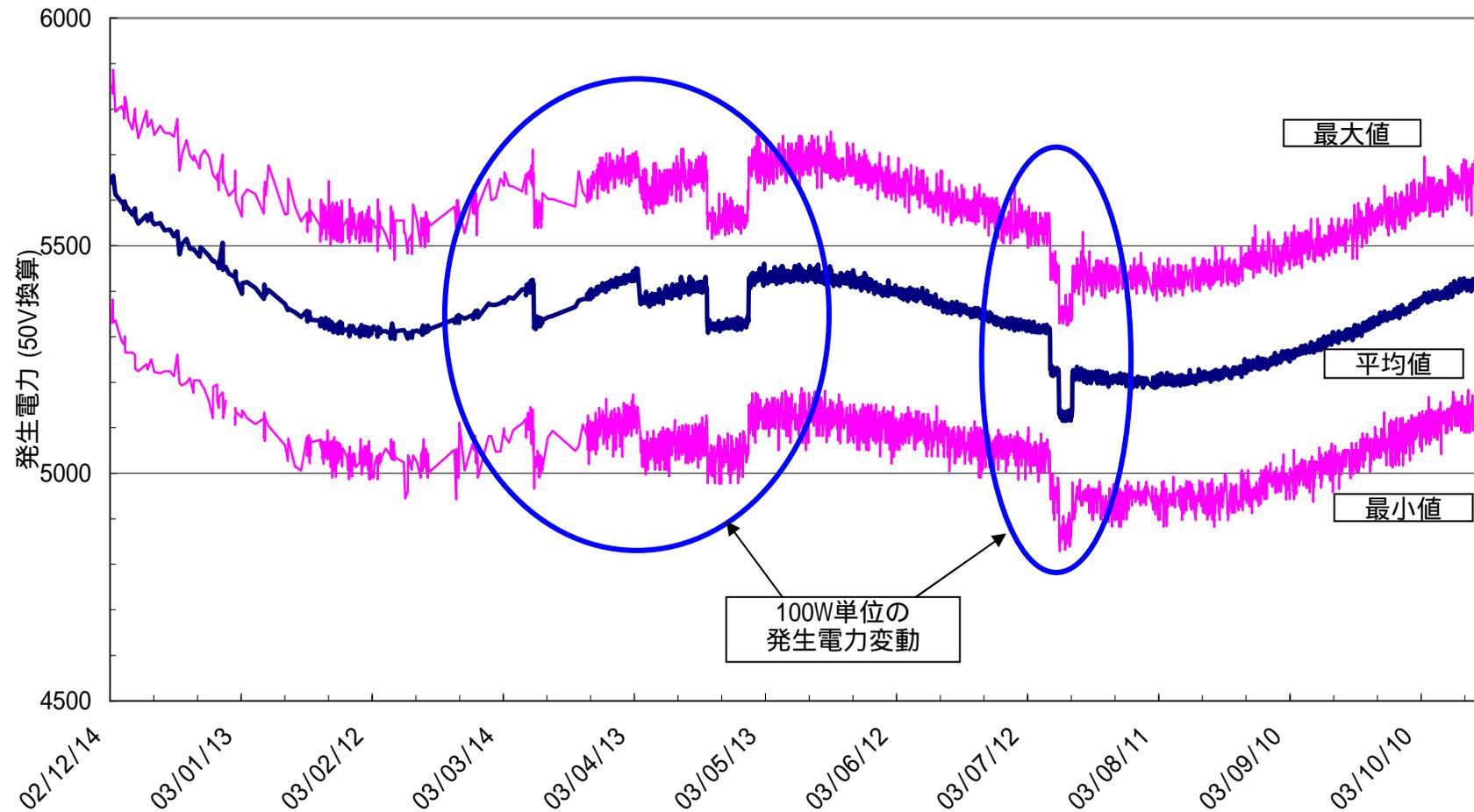


図4.2-2 太陽電池パドル発生電力の長期トレンド
(日陰明け～+25分の最大/最小/平均値)

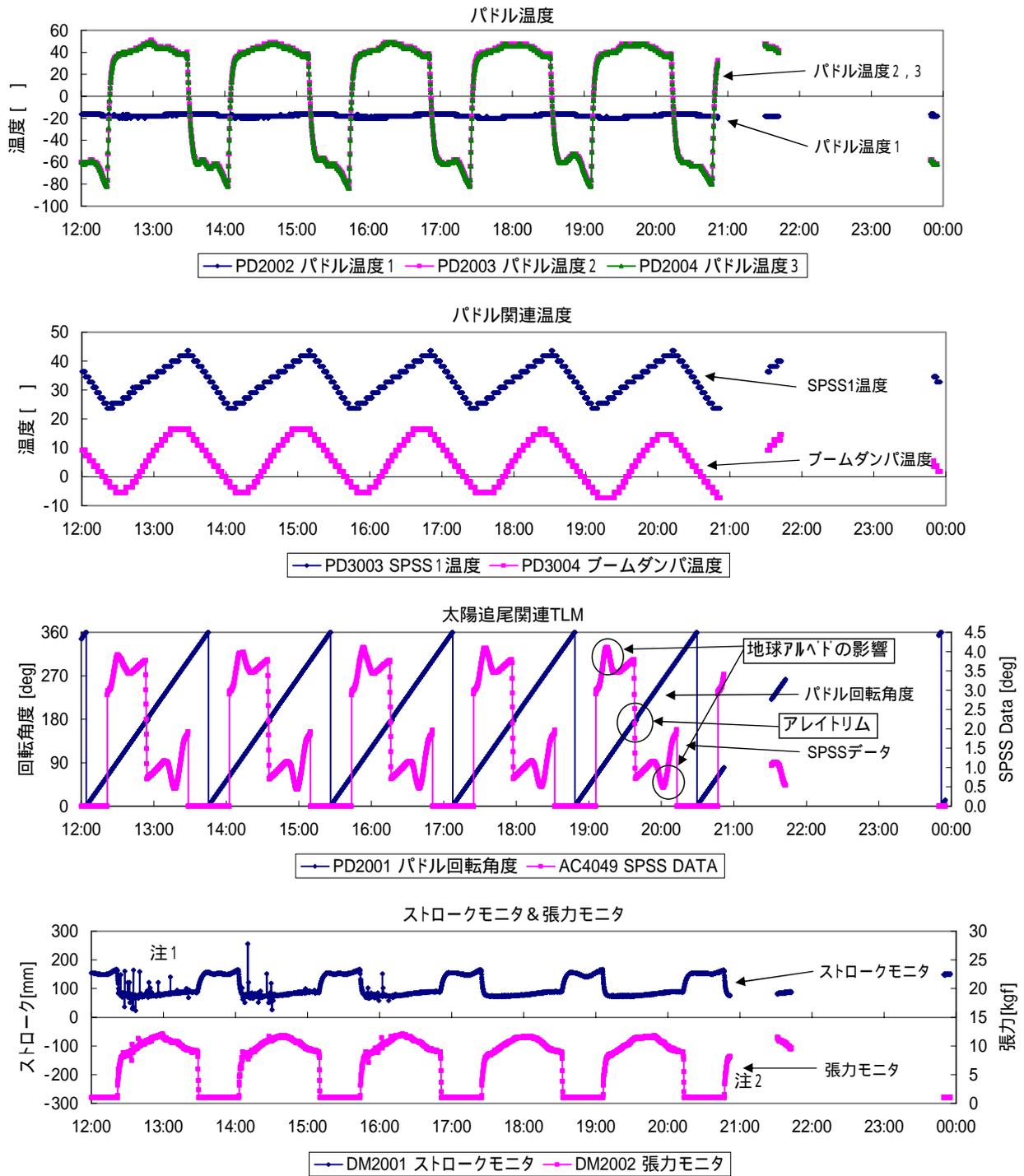


図4.2-3 太陽電池パドルの温度、追尾状態、ストローク&張力モニタ

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、歪みセンサー部剥離による0点校正不良による。

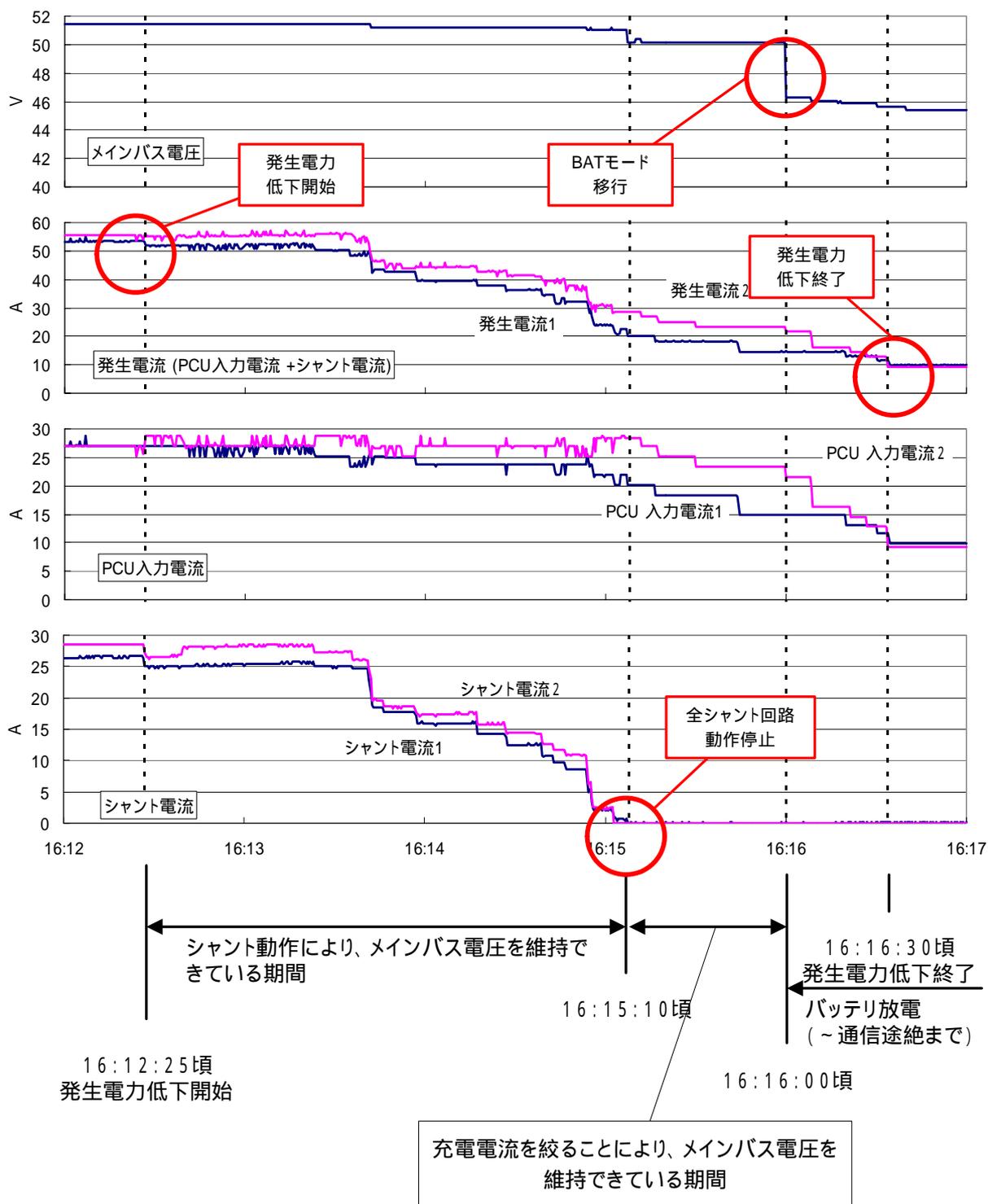


図4.2-4 発生電力低下にともなう電源系動作

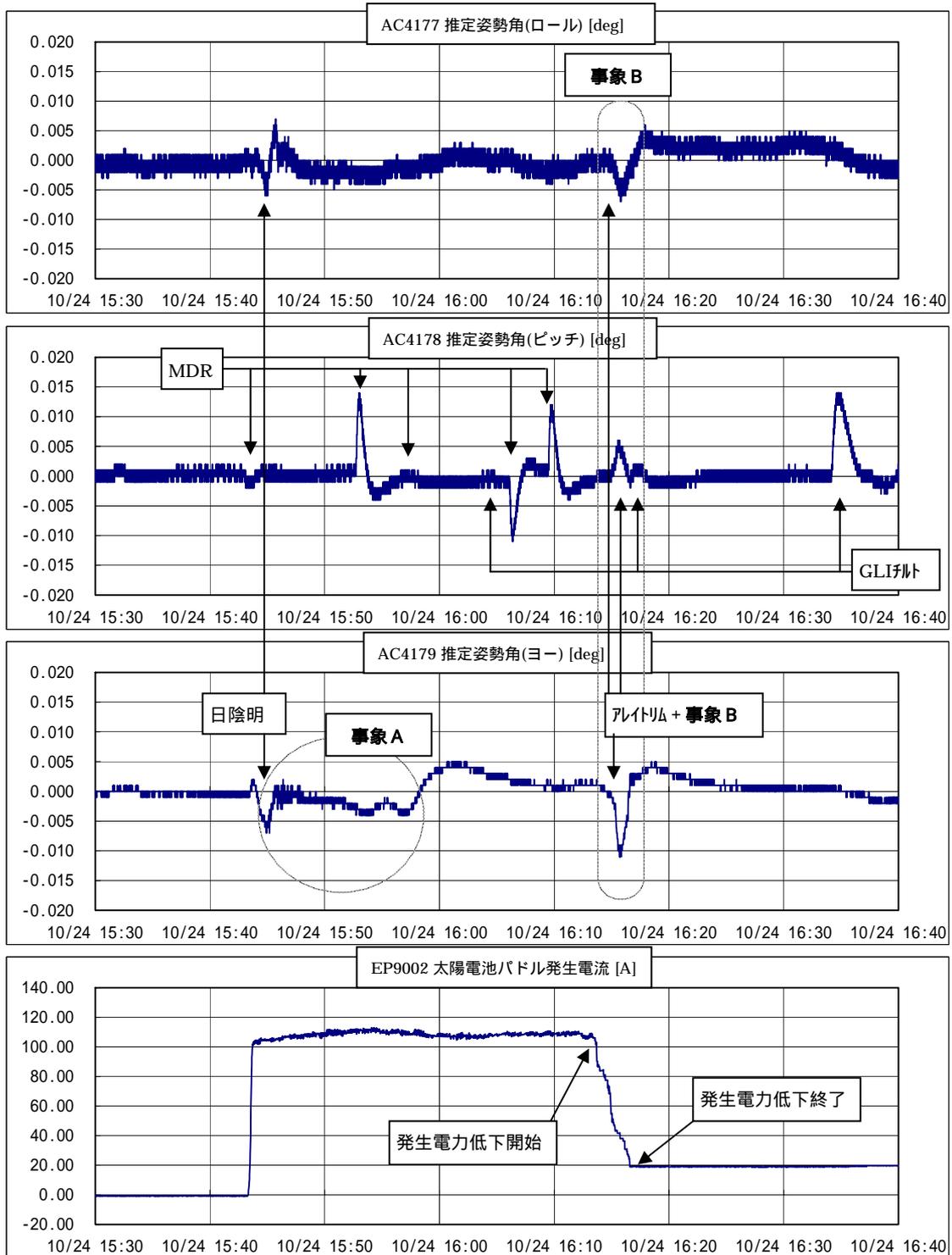


図 4 . 3 - 1 発生電力低下前後の姿勢角

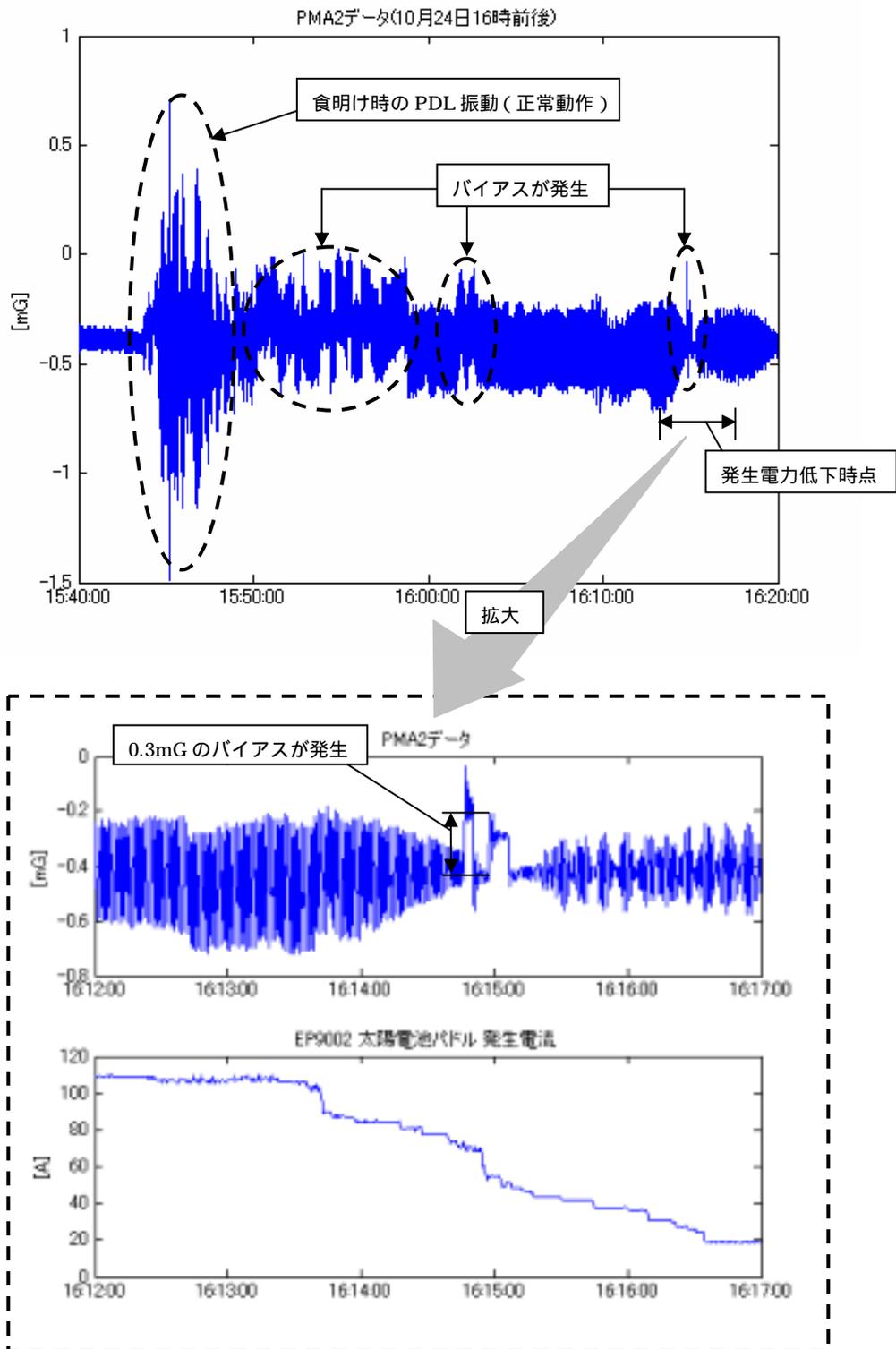


図4.3-2 発生電力低下直後の加速度計データ

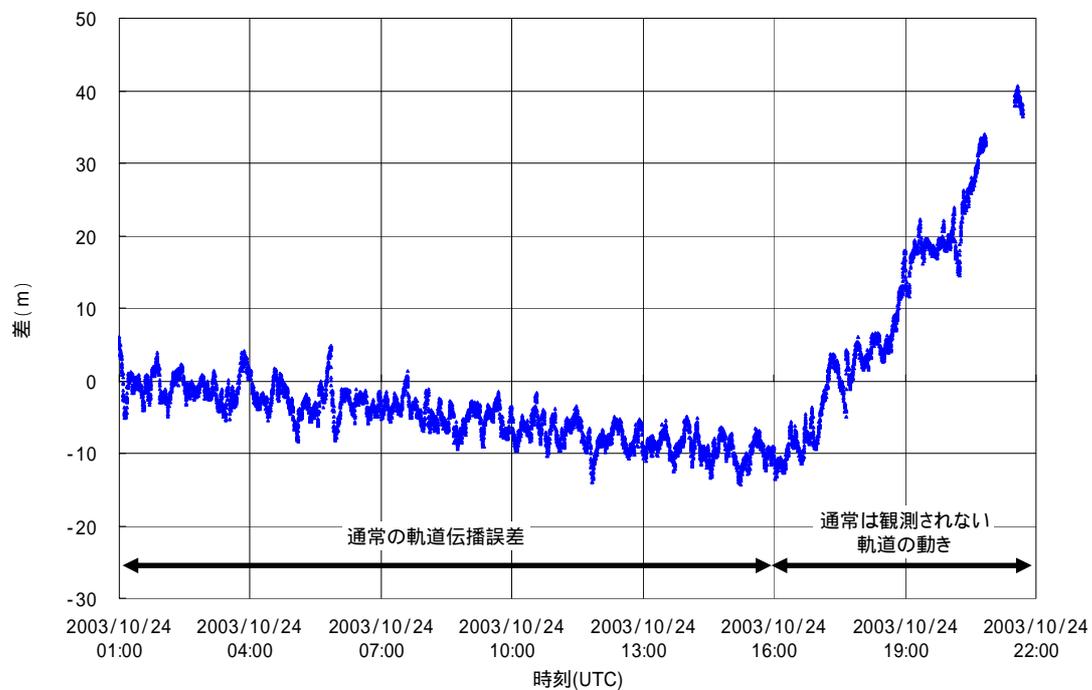


図5 - 1 直前の高精度軌道決定値による軌道伝播値と搭載 GPSR による単独航法解の差(衛星進行方向)

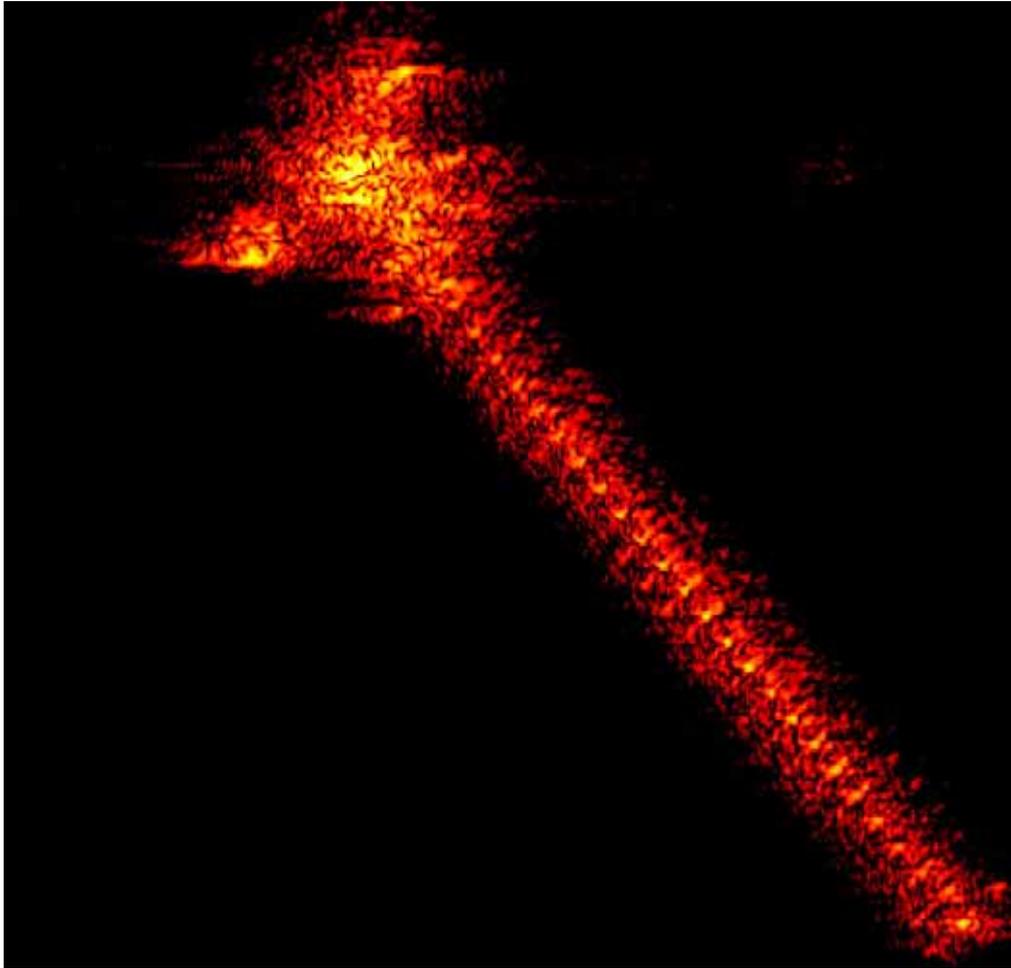
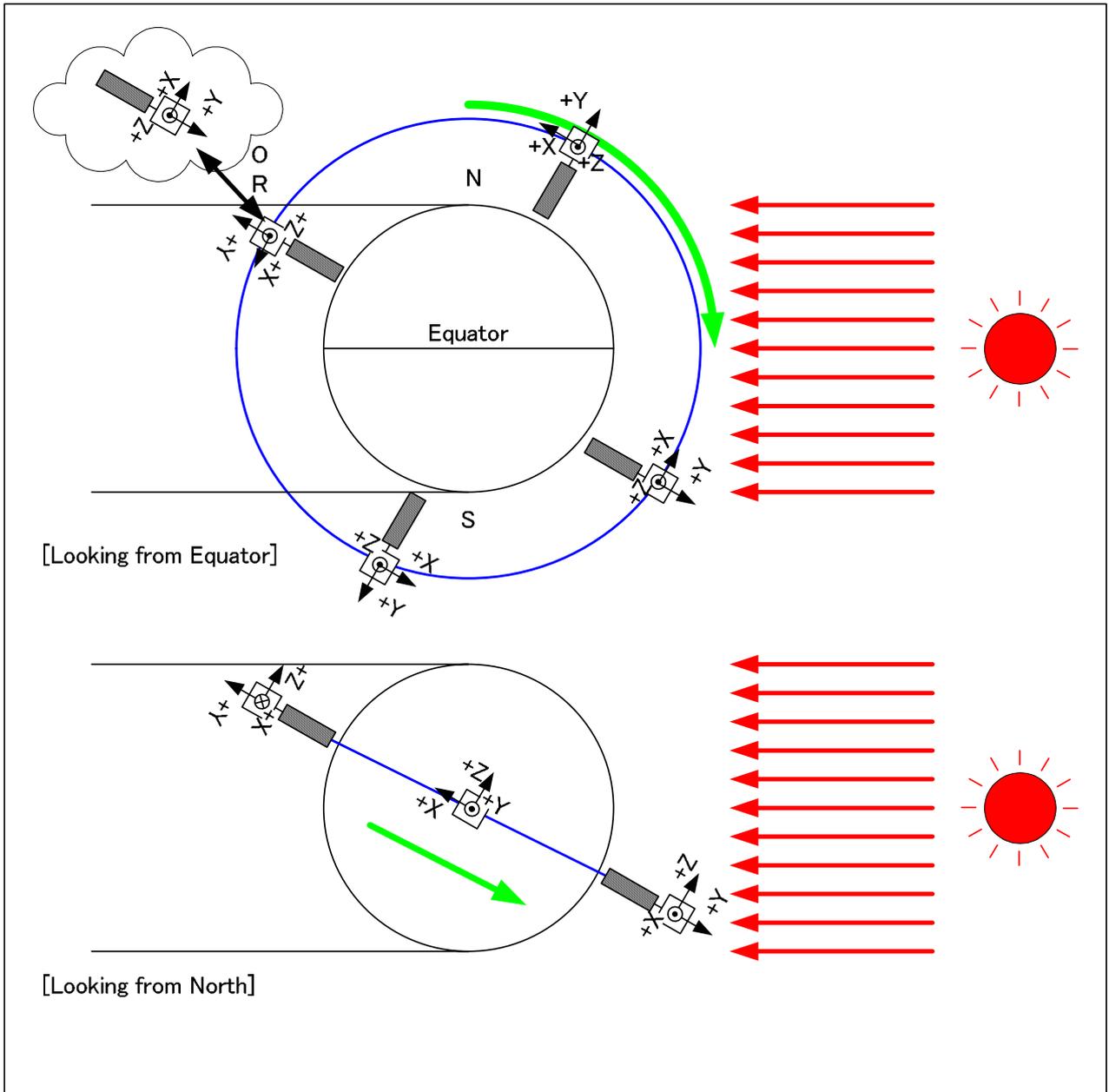
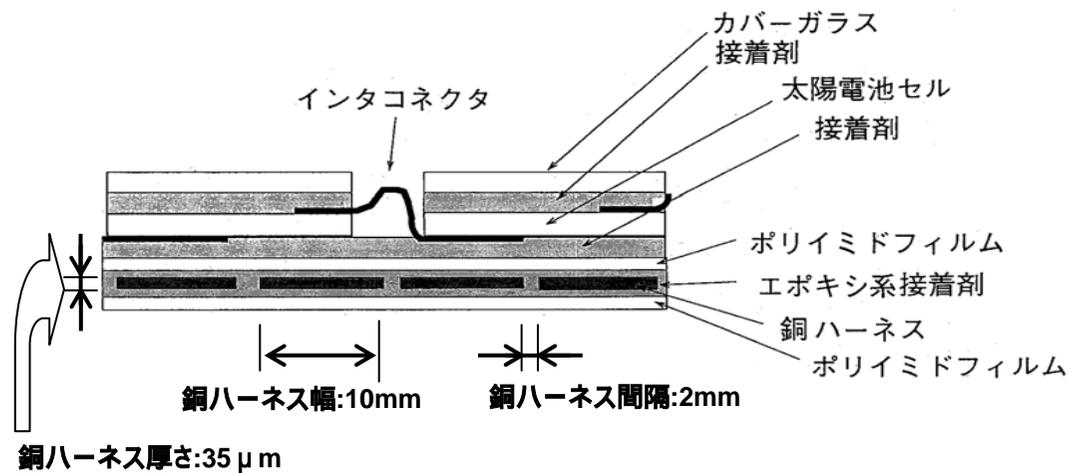


図6 - 1 応用自然科学研究協会(FGAN)
高周波物理研究所(FHR)のレーダによる
「みどり2」の画像
(2003年10月27日 21:01UT撮像)

FGAN : Forshungsgesellschaft fuer Angewandte Naturwissenschaften e.V.
FHR : Forschungsinstitut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik

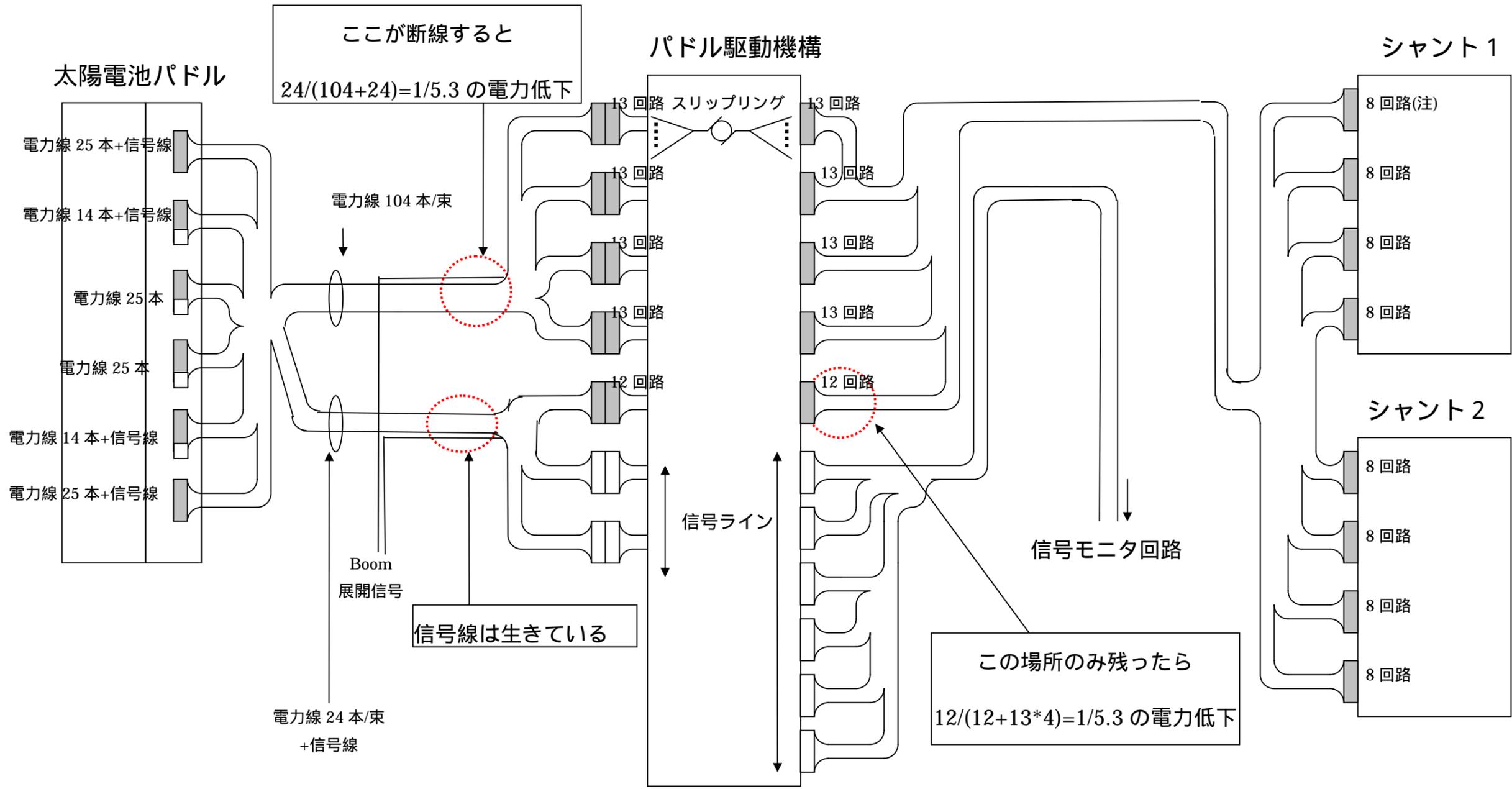


**図 6 - 2 ADEOS - の最終安定姿勢
(重力傾斜姿勢)**



ブランケット断面図

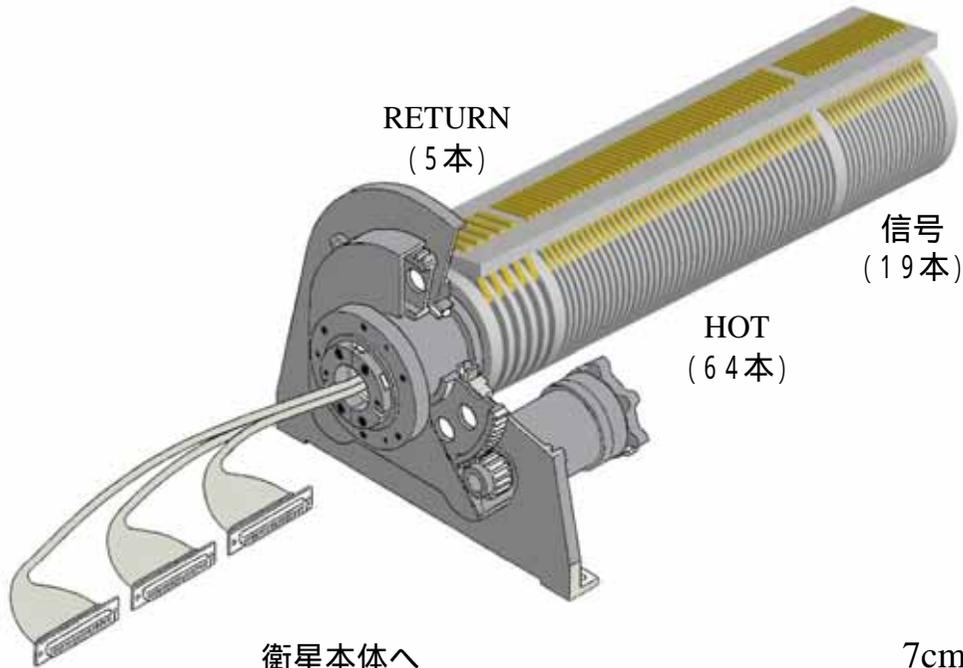
図7-2 太陽電池パドルの断面図



注: 1回路=HOT+RTN=2本

図 7-3 接続ハーネス詳細

図7-4 パドル駆動機構詳細図(イメージ図)



スリップリング部の故障で、電力の4 / 5を3分程度の短時間で断続的に失うためには、

図上の64本のHOTラインの4 / 5にあたる50本強のラインが、連続的にRETURNラインに短絡。(ショート故障)
2枚のブラシが同時に接触を失い開放する現象が、50本強のHOTラインに連続的に発生。(オープン故障)

の2通りのモードしか考えられないが「みどりII」のパドル駆動機構は上記いずれの故障モードも考えにくい構造となっている。

