

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

－関連事象の検討－

1 . 姿勢変動事象について

10 月 24 日の発生電力低下事象の発生時刻付近の姿勢について、1 回帰前(4 日前)のデータと比較した結果、16:00 頃の姿勢変動(以下、「事象 A」という)と発生電力低下中の姿勢変動(以下、「事象 B」という)の 2 つの事象が発生していることがわかった(図 1-1)。以下では、この 2 つの事象の検討結果について述べる。

1. 1 事象 A について

(1)概要

10 月 24 日 15:45~15:57 の日陰明け直後に 1 回帰(4 日)前の同一時刻と比較して、推定姿勢角についてはヨー軸まわりに約 -0.004 度、またヨー軸まわりの蓄積角運動量には約 -4Nms の変化が生じている(姿勢角の差、蓄積角運動量の差、姿勢角の定義をそれぞれ図 1-2、図 1-3、図 1-4 に示す)。

(2)推定原因

この姿勢変動の原因については、以下の理由から、磁気嵐による地磁気の急激な変化により、北極上空の大気抵抗が突発的に増加し、太陽電池パドルに作用するヨー軸トルクが増大したためと推定する(概念図を図 1-5 に示す)。

- (a)姿勢変動が大気抵抗の増加によるものと仮定した場合、姿勢データから推定した外乱トルクと、10 月 24 日の北極域の磁気情報、空力外乱モデルを用いて算出した大気抵抗による外乱トルクの数値がほぼ整合すること。
- (b)事象 A と比較して、レベルは小さいが、地磁気活動の急激な変化に伴い、角運動量が突発的に増加する事象が、10 月 24 日以前にも、数

回観測されていること。

1. 2. 事象 B について

(1) 概要

発生電力低下時(16:13~16:17)に、ロール/ピッチ/ヨーの3軸全ての姿勢角で、1回帰前の姿勢と比べて僅かながら変動が生じている。

また、同時期に、軌道においても高度が低下する現象が発生している。(図 1-6)

(2) 姿勢擾乱量の推定

発生電力低下時に発生している、①太陽電池パドルのアレイトリム動作、②GLIチルト動作、③IOCSアンテナ駆動動作による擾乱量を差し引いた結果、姿勢変動量は、ロール/ピッチ/ヨーそれぞれに、 -0.004° / $+0.003^{\circ}$ / -0.005° 程度であり、 -1.0Nms / $+0.6\text{Nms}$ / -2.0Nms 程度の角運動量が蓄積されている。(図 1-7、図 1-8)

(3) 力の作用点の範囲の推定

蓄積された角運動量は何らかの力により発生したと仮定し、力積の作用点が存在する範囲を求めた結果を図 1-9 に示す。ただし、角運動量の推定誤差を考慮すると、力積の作用点を含む平面は、 $\pm 7^{\circ}$ 程度の誤差がある。

また、FTA で絞り込まれている部位と、力積の作用点を含む平面との交点を考慮すると、PDL ブームからブランケットの一部の範囲に限られる。

事象 B 発生時に軌道データが変化していることを合わせて考慮し、事象 B と軌道の変化が同一原因によるものとしてロール軸方向の力積を軌道変化から求めると他の2軸(ピッチ、ヨー)の作用力も推定できる。

図 1-10 に、FTA を考慮した作用点範囲と推定作用力を示す。

(4) 事象B外乱トルク波形の推定

テレメトリデータをもとに外乱トルクの時間変化の推定を実施した。

図 1-11 にその推定波形を示す。

衛星には約4分間トルクが作用している。トルクは発生電力低下終了時刻の付近でピークとなり、その後約1分程度かけて「0」に戻っている。

(5) 原因推定

仮説2-1及び仮説2-2のシナリオにおける、ブーム・ハーネス104本の焼損時に発生したガスの噴出が、今回の姿勢変動(事象B)の原因であると推定し、その仮説の妥当性について検討を行った。

ハーネスを高温加熱して得られた発生ガスの平均分子量及び質量減少率を用いて、事象Bを発生しうるハーネス(104本分)の長さを概算した結果、3cm～11cm程度となった。多数回路波及試験等の結果から、この程度のハーネス長が損傷をうける可能性は高く、発生電力低下時に、ハーネス被覆材がガス化して宇宙空間へ噴出し、衛星に力が作用したというシナリオは十分有り得ると考える。

2. 100W単位の発生電力変動について

(1) 概要

みどりⅡでは、平成14年12月の打上げから約3ヶ月経過した平成15年3月20日に約100Wの電力低下が発生して以来、図2-1に示す7回路上で3回の解消を含め合計10回の100W単位の発生電力変動が発生している。

【変動の分類】

特徴1 シャント動作時の2回路分の電流動作(図2-2)

特徴2 日照全期間における発生電力の低下(図2-3)

特徴3 日陰明けに低下していた発生電力の日照中の復帰(図2-4)
(なお、7月19～22日では、特徴3に加え蓄積角運動量及び特定のテレメトリに変動が発生している。図2-5)

(2) 「みどりⅡ」運用異常との関連について

「みどりⅡ」運用異常である約 6kW から約 1kW への発生電力低下と 100W 単位の発生電力変動の関連性については、以下のとおり。

① 事象の違い

100W 単位の発生電力変動は、全て 1 回路 (100W) のみが 1 系と 2 系の片方が独立して発生しているのに対し、10 月 24 日の約 6kW から約 1kW への発生電力低下は、約 3 分間で波及的に 1 系と 2 系の両方の多数回路の発生電力が低下する事象であるところが異なる。

② 運用異常に至る発生電力低下時の残存回路数

打上げ以降の発生電力トレンド解析により、図 2-6 に示すように運用異常発生直前には、2 回路分が発生電力低下しており、62 回路 (1 系 31 回路 + 2 系 31 回路) が動作していたことが確認されている。この直前に低下していた 2 回路のうち 1 回路は、電力線 12 回路分の小電力ハーネス束を通過していた可能性があり、図 2-7 に示すように運用直後の残存回路数が 11 回路であることに符合する。よって、調査 14-2-1:2. (6) 項で述べたように運用異常の原因を「電力線 104 本の大電力ハーネスの全損」とすると、事象がよく説明できる。なお、上記のように『約 6kW から約 1kW への発生電力低下』は、正確には『62(回路)分から 11(回路)分への発生電力低下』である。

③ 運用異常を促進した可能性

100W 単位の発生電力変動のうち、「特徴 1」(シャント動作時の 2 回路分の電流動作)と分類した 2 つの事象は、1 回路に 2 回路分の電流が流れることによって発生している。この事象の具体的な発生部位は特定できていないが、太陽電池パドルハーネスより上流で発生していたとすると、小電力ハーネス束内の 1 回路分の発生電流が、大電力ハーネス束内の回路を流れている可能性がある。この効果と温度解析誤差を合わせると、大電力ハーネス束中心の温度が最高 255℃程度に到達していた可能性があり、100W 単位の発生電力変動が運用異常を促進した可能性は否定できない。

3. 放電時のノイズの検出の可能性について

(1) ミッションデータ及びテレメトリデータ上でのノイズの調査

放電に伴うノイズがミッションデータ及びテレメトリデータ上に現れていないかを確認するため、GPS 受信機、パドル搭載センサ、ミッション機器等のデータについて、異常なスパイク状のノイズ等が発生していないかを調査した。

その結果、放電の影響が認められるような異常なノイズは確認できなかった。特に、軌道間通信系(IOCS)受信機の受信レベル、AMSR、加速度センサのデータについては、もともとノイズが多く識別が困難であった。

(2) 放電に伴うノイズの検出確認試験

仮説2-1及び仮説2-2の検証に係る放電試験の際に、2GHz 帯及び 6GHz 帯標準アンテナを用いて、放電に伴うノイズの観測を実施した。その結果、標準アンテナでは、ノイズフロアを上回るレベルのノイズは観測されなかった。高周波領域では放電のノイズレベルが小さいことは、過去の測定例でも示されているとおりである(図 3-1)。なお、中波帯(数百 kHz～数 MHz)のラジオにノイズが入る事が確認されたが、当該周波数帯を検知する機器は搭載されていない。

(3) 放電に伴うノイズのテレメトリでの検出の可能性について

試験で確認された放電のパルス幅値と、各テレメトリのサンプリング周期から、トリガ放電がテレメトリに検出される可能性の確率計算を行った。計算の結果、最もサンプリング周期が短い DCS(Data Collection System)の場合でも、10 ヶ月間にノイズが観測される頻度は、0.1 回程度であり、テレメトリで観測される可能性は極めて低いと考える。

以上のことから、MLI からハーネスへのトリガ放電、ハーネス間の単発的な放電の際に低周波ノイズは出ていたと推定されるが、「みど

りⅡ」搭載機器は当該領域に感度がなく、また、テレメトリに検出される確率は極めて低いため、ミッションデータ、テレメトリデータには現れないか、または識別できないと考える。

4. 運用異常時の宇宙環境の影響について

10月24日の運用異常時に観測された太陽フレアの発生に伴う以下の変化について「みどりⅡ」に対する影響の評価を行った。

(1) 低エネルギー電子の増加

運用異常時直前に横切った極域オーロラ帯では、静穏時の前日の結果と比べて2桁程度多い30keV以上の電子の流量があった。これにより、MLIが帯電し、トリガ放電が起こりやすい環境となっていたと考える。

(2) 磁場の変動

運用異常時の磁場の変動は、通常の10倍程度(2000nT)、変化に要した時間は約90秒である(図4-1)。これに対し、最悪条件としてパドル全体が一つのループを形成していたと考えた場合(太陽電池パドルの面積は60.1 m²)でも、この変化により発生する誘導電流はわずか(数百μA)であり、誘導電圧も数μV程度であるので、衛星に与える影響はないものとする。

環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどりII」運用異常に係る
原因究明に関するこれまでの検討状況について(案)

－関連事象の検討－

図表集

平成16年5月19日

宇宙航空研究開発機構

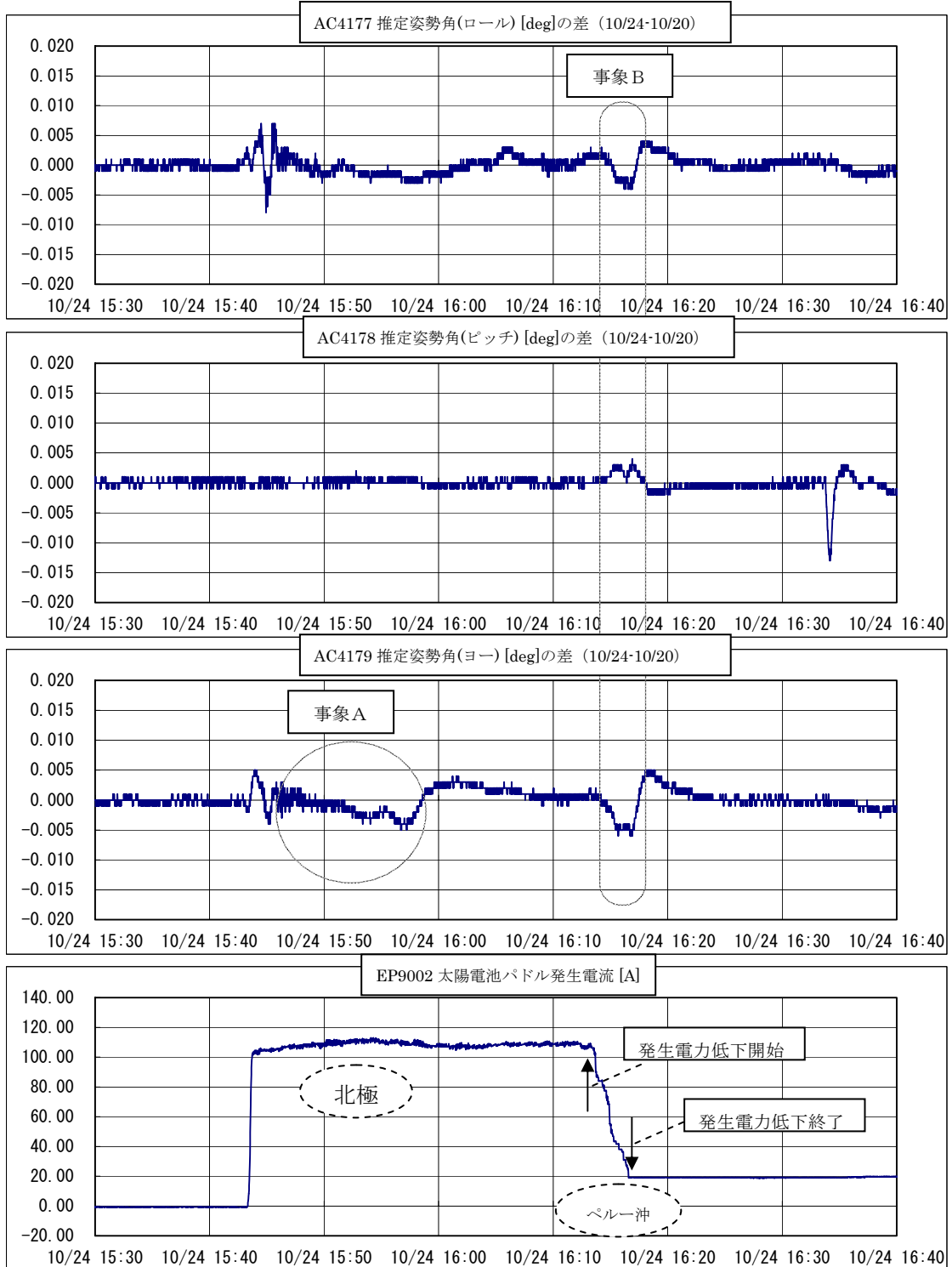


図 1-1 発生電力低下発生日と4日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角の差

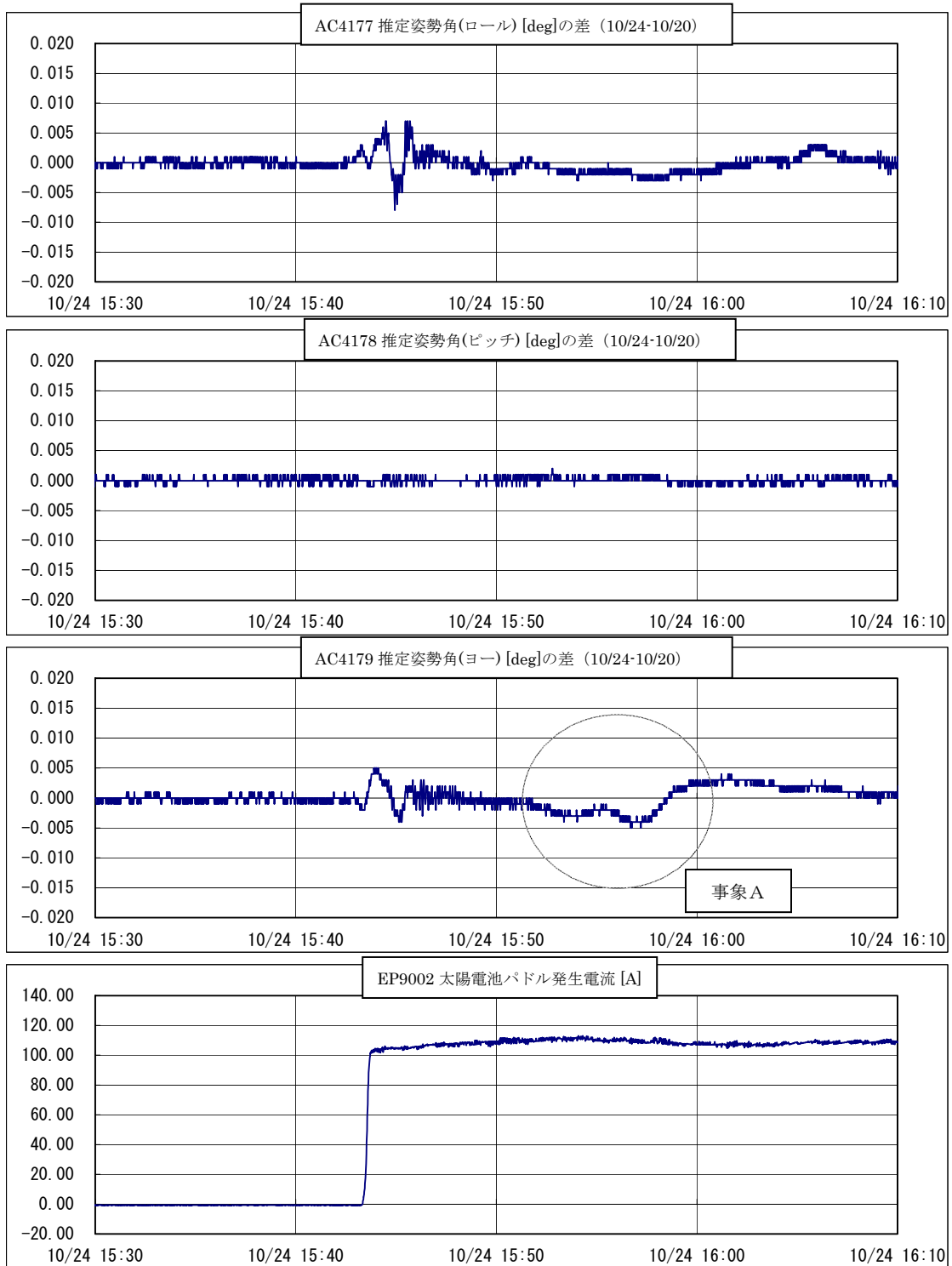


図 1-2 事象 A と4日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角の差

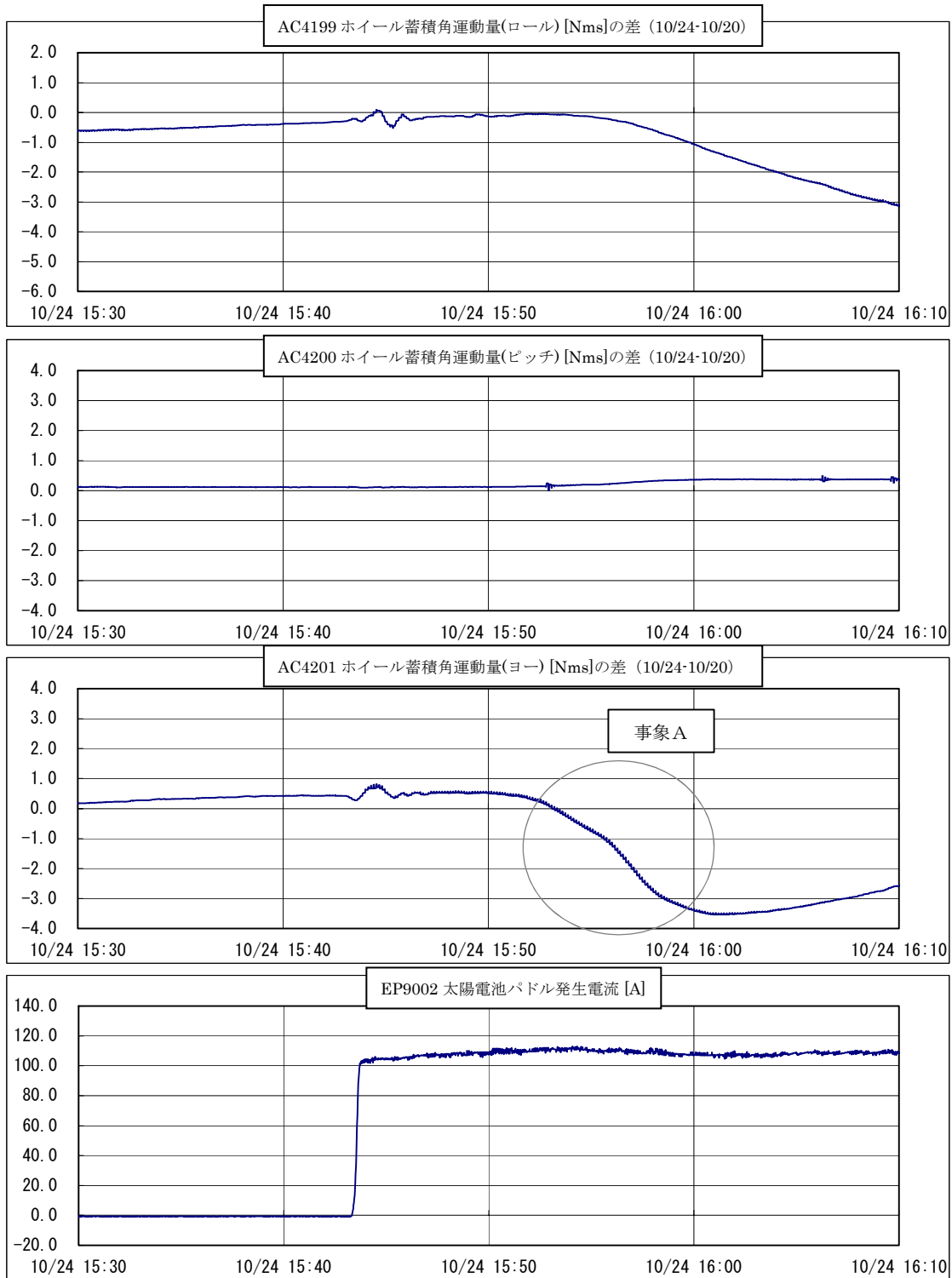


図 1-3 事象 A と4日前の同一周回/同時刻における蓄積角運動量の差

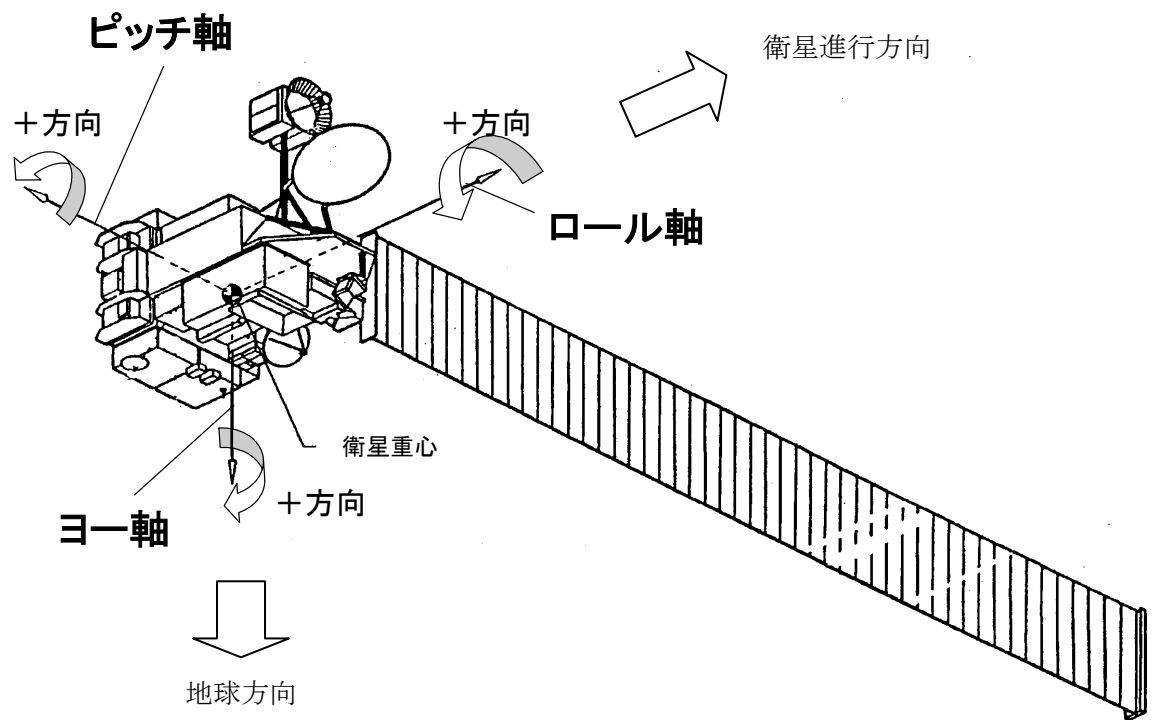


図 1-4 ロール軸/ピッチ軸/ヨー軸の定義

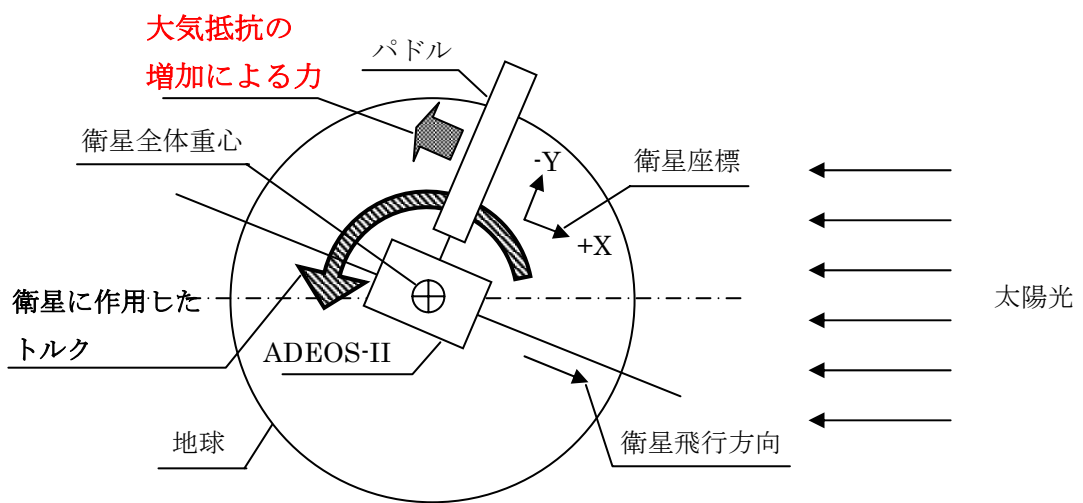


図 1-5 事象 A 発生時における衛星に作用した力と姿勢の関係図(概念図)

軌道の変化

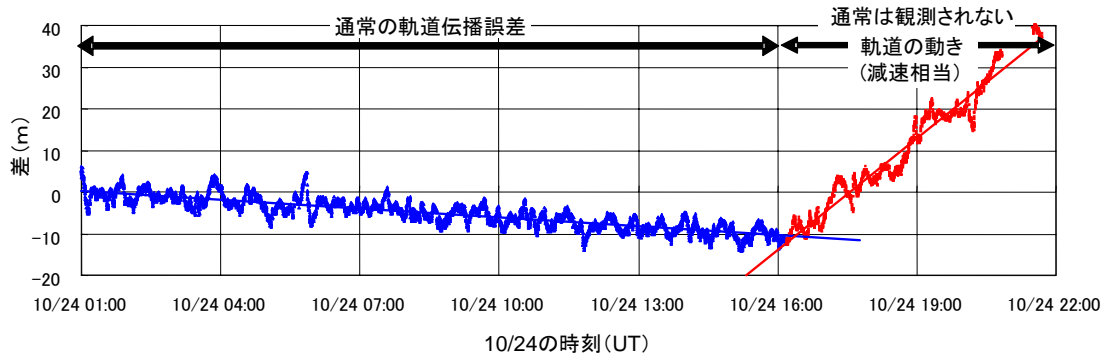


図1-6 軌道の変化

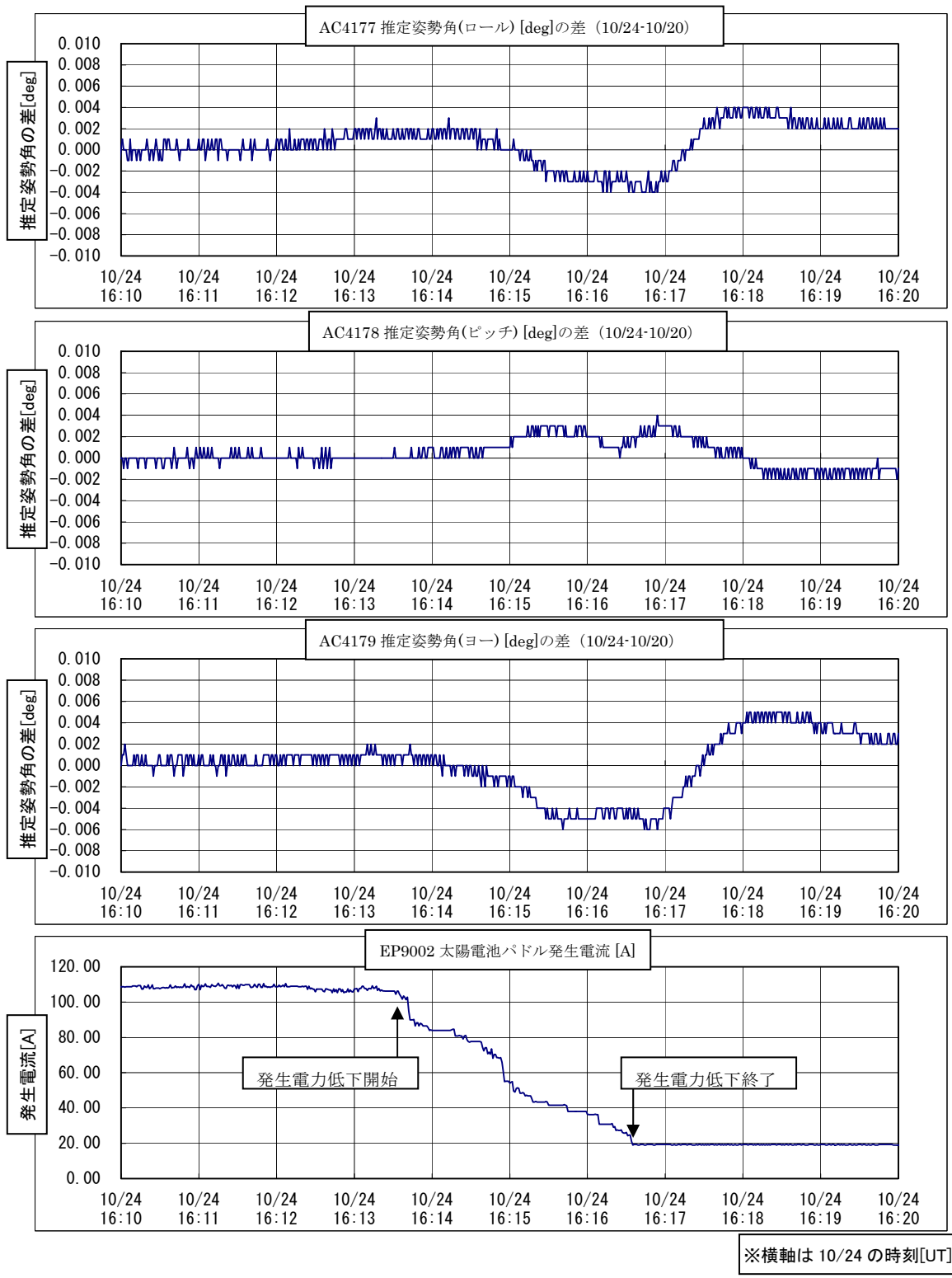


図 1-7 事象 B と4日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角の差

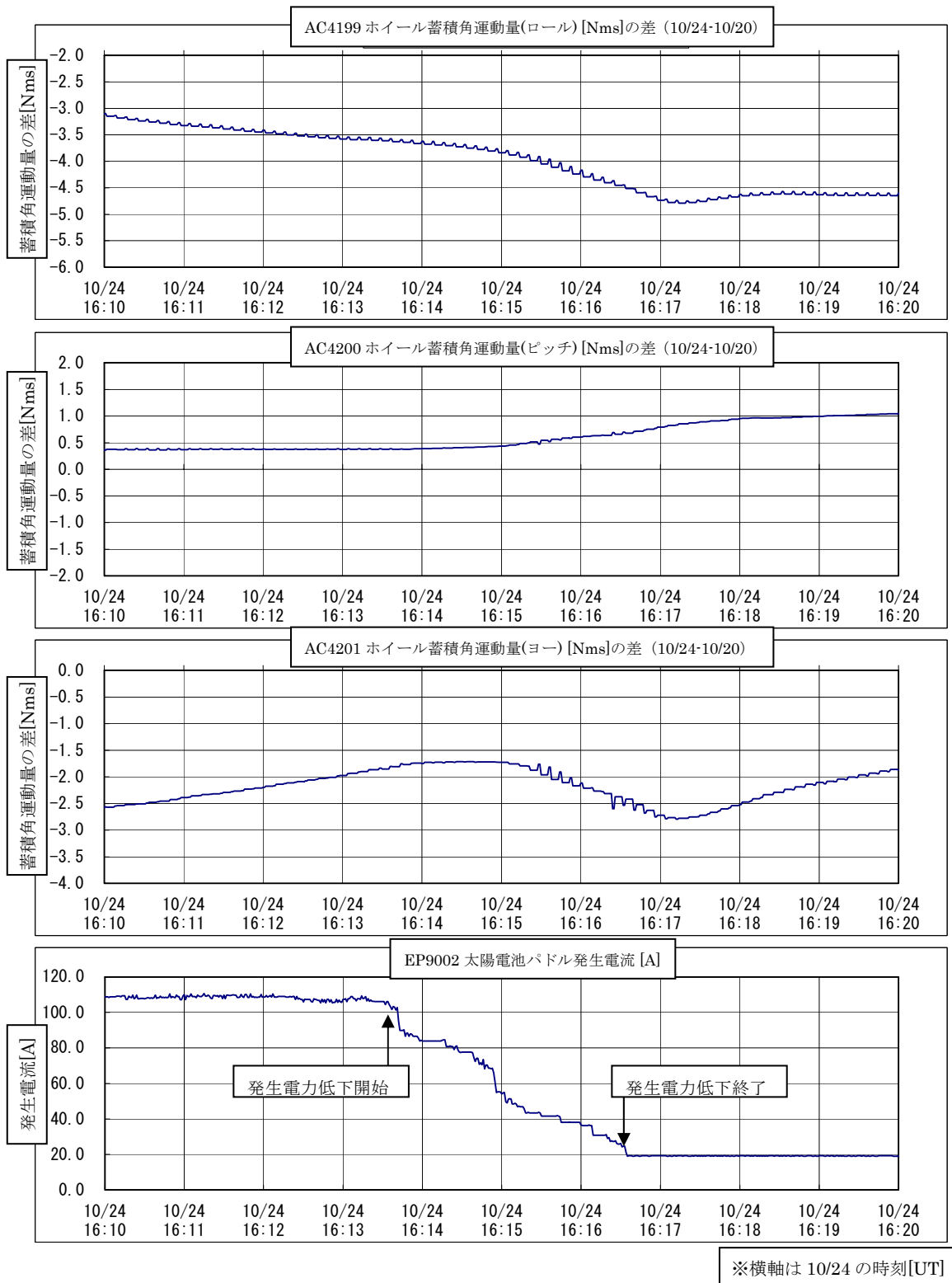


図 1-8 事象 B と4日前の同一周回/同時刻における蓄積角運動量の差

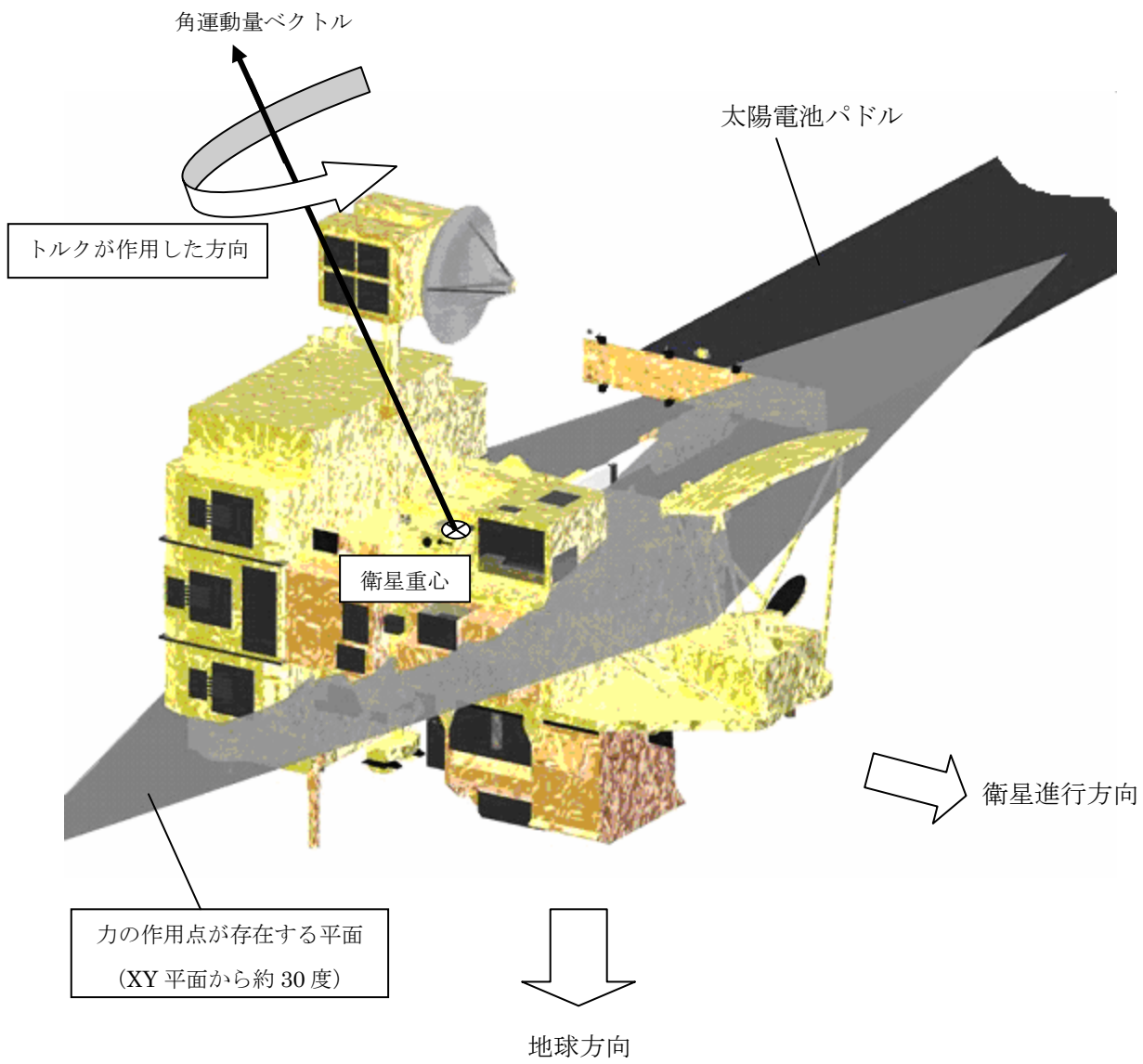
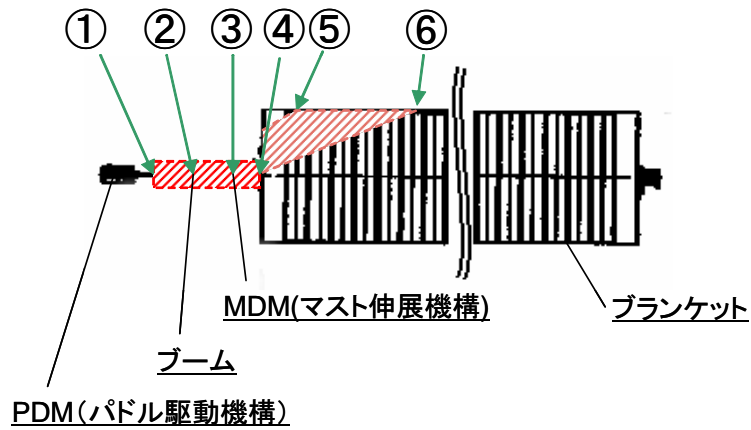
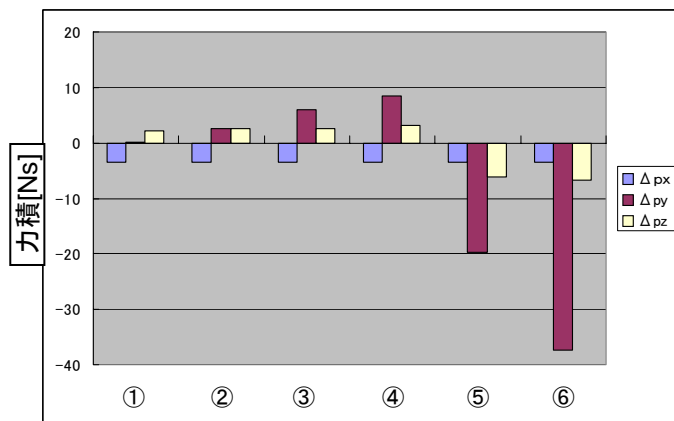


図 1-9 力の作用点が存在する範囲



: FTAを考慮した力積作用点が存在する範囲



軌道変化を考慮し、求めた各作用点候補における力積

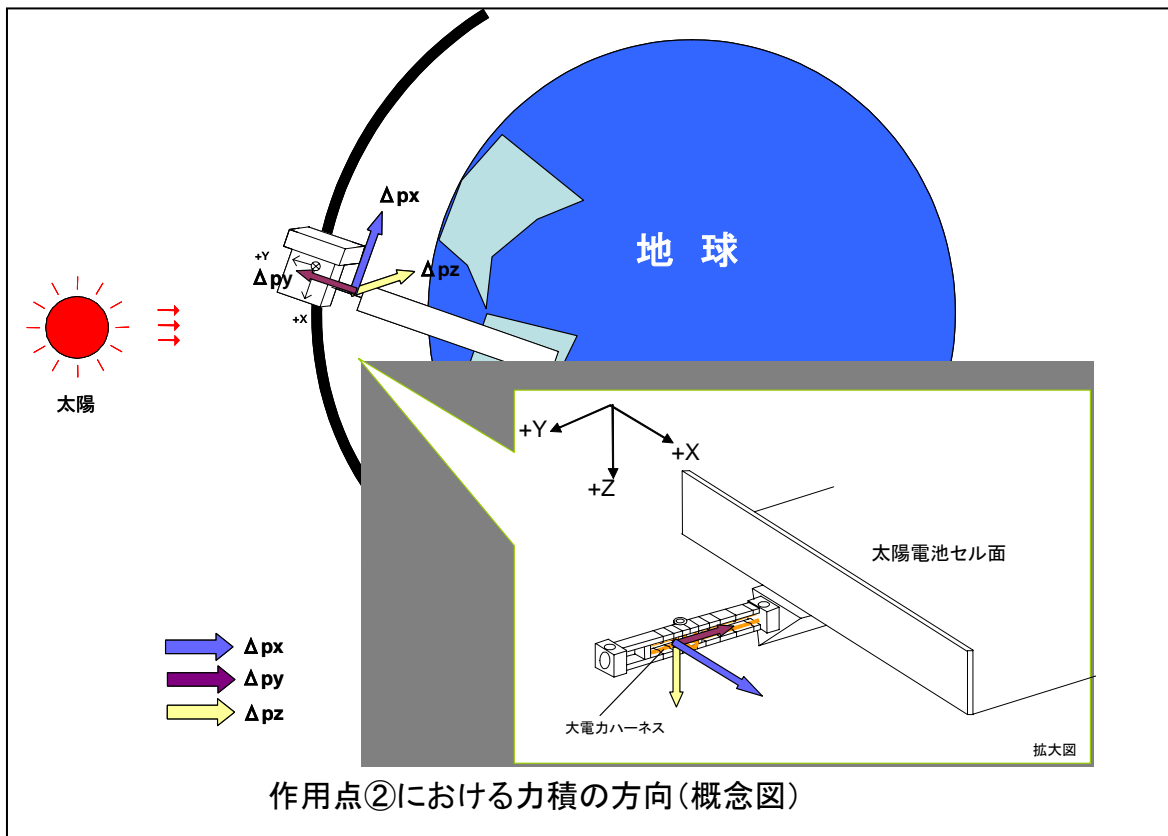


図1-10 FTAを考慮した作用点範囲と推定作用力

推定した外乱トルク

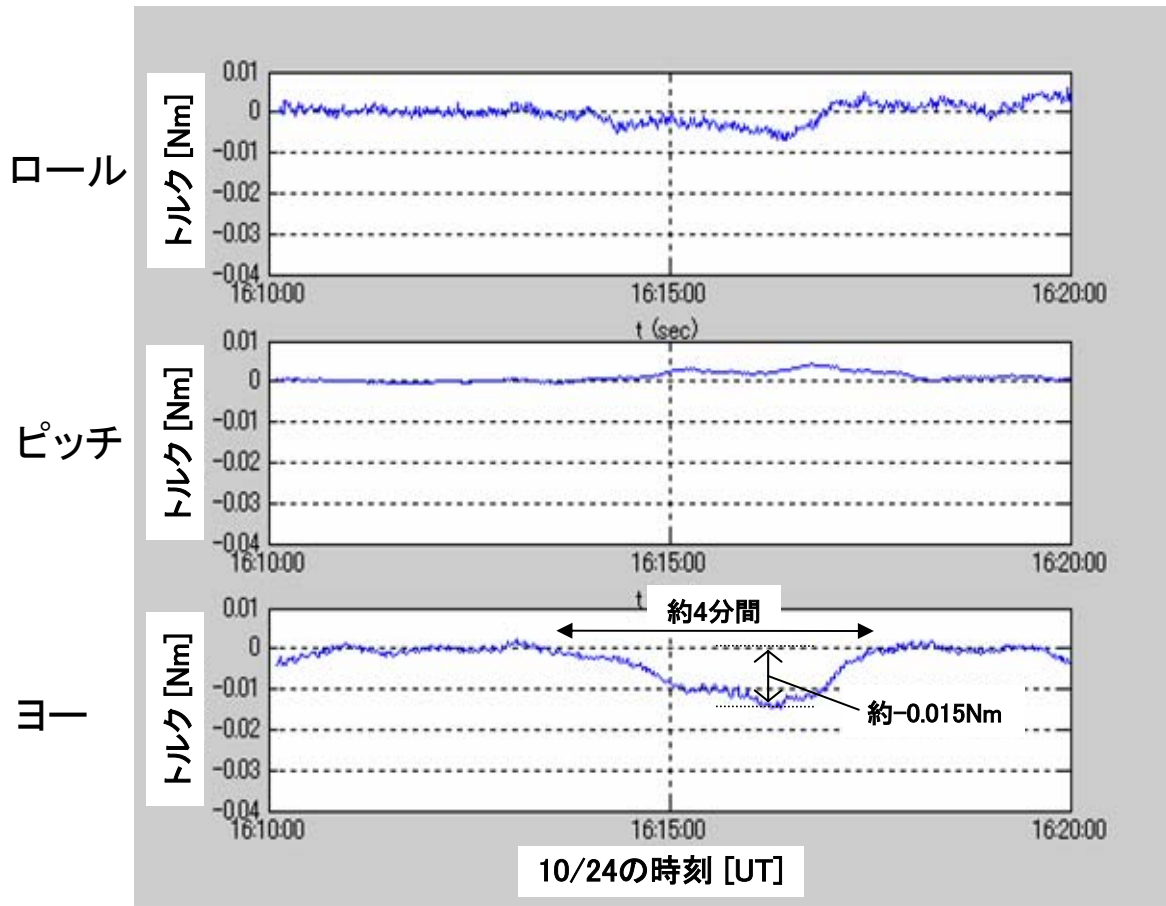
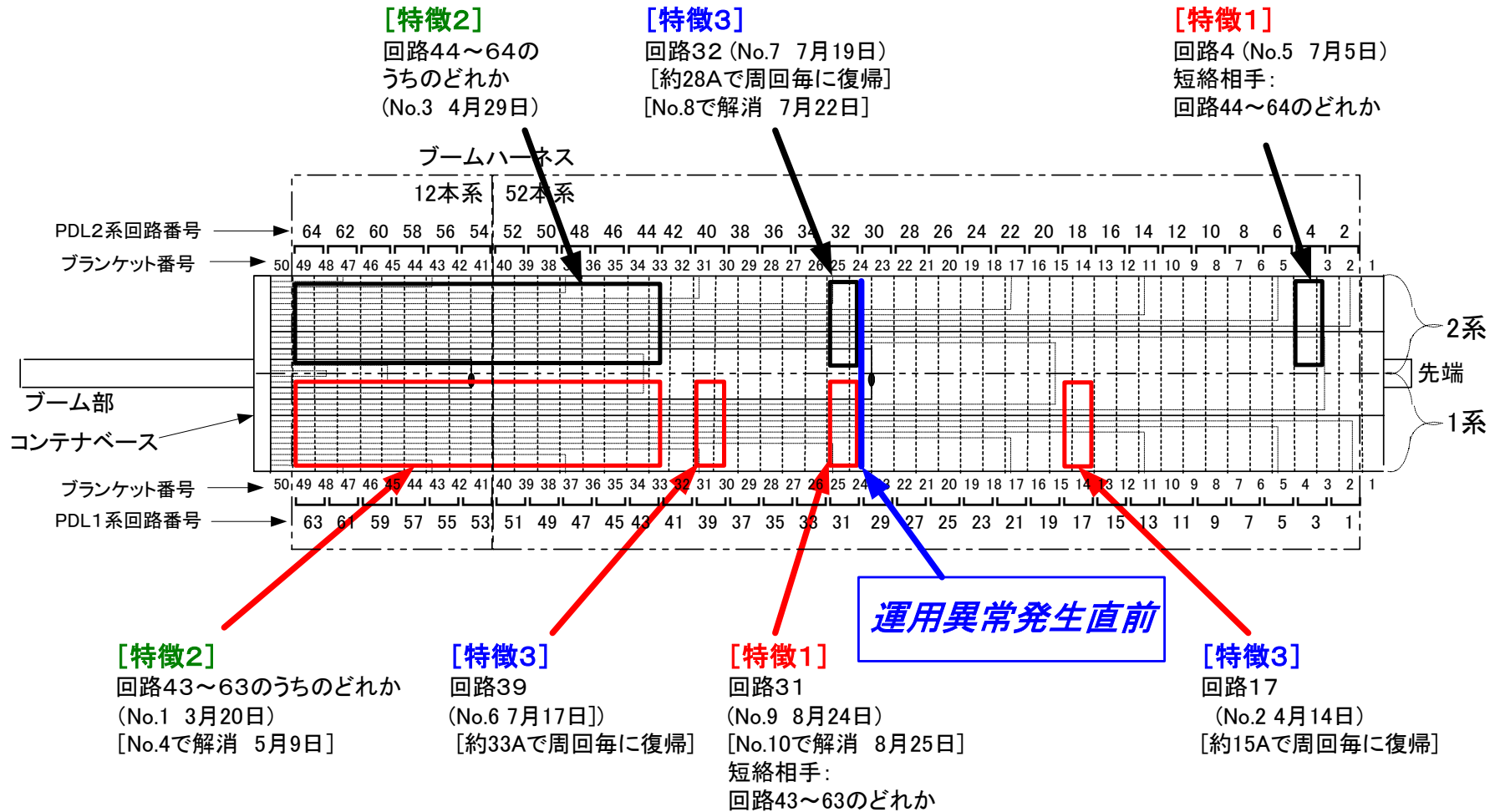


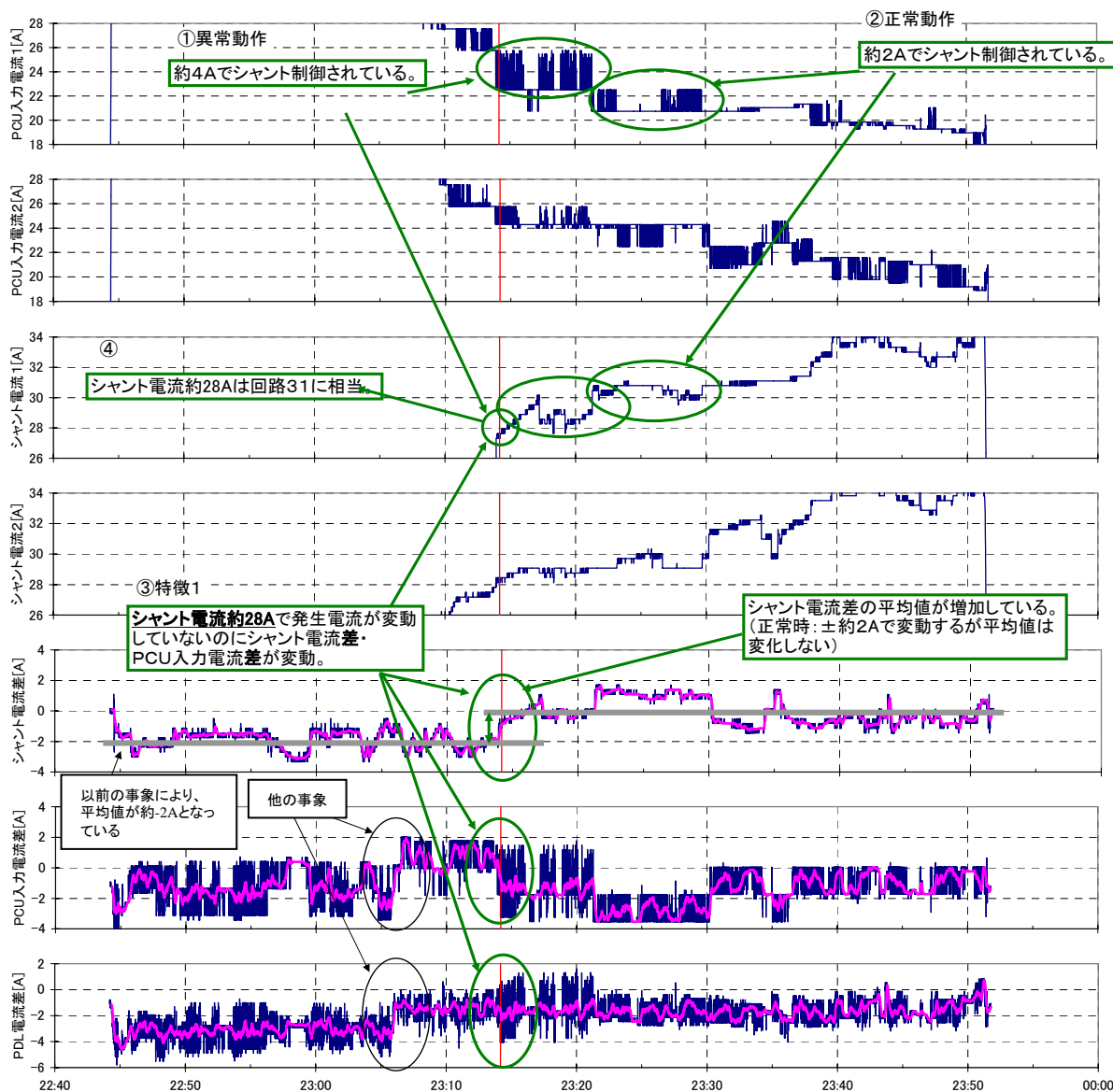
図1-11 推定波形



※本図は、パドル上の不具合と仮定した場合の図であり、不具合発生箇所をパドル上と限定している訳ではない。

図2-1 100W単位の発生電力変動発生回路一覧

図2-2 特徴1:シャント動作時の2回路分の電流動作



← 4Aの動作が確認できるため、『推定メカニズム2』のシャントトランジスタの故障は考えられない

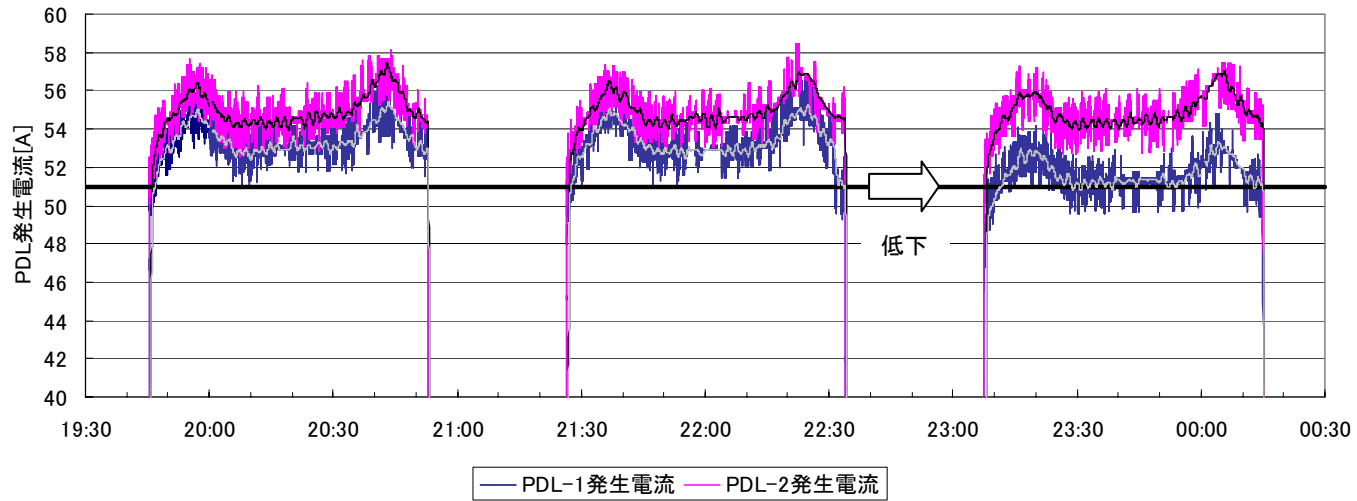
よって、8月24日の事象は「HOT-HOT間の短絡」が要因であると考えられる。

8月24日
太陽電池PDL-1系
回路31

※ 8月25日に解消

図2-3 特徴2:日照中全領域で発生電流低下

3月20日～太陽電池PDL-1系 回路43～63 (→ 5月9日に解消)



4月29日～太陽電池PDL-2系 回路44～64

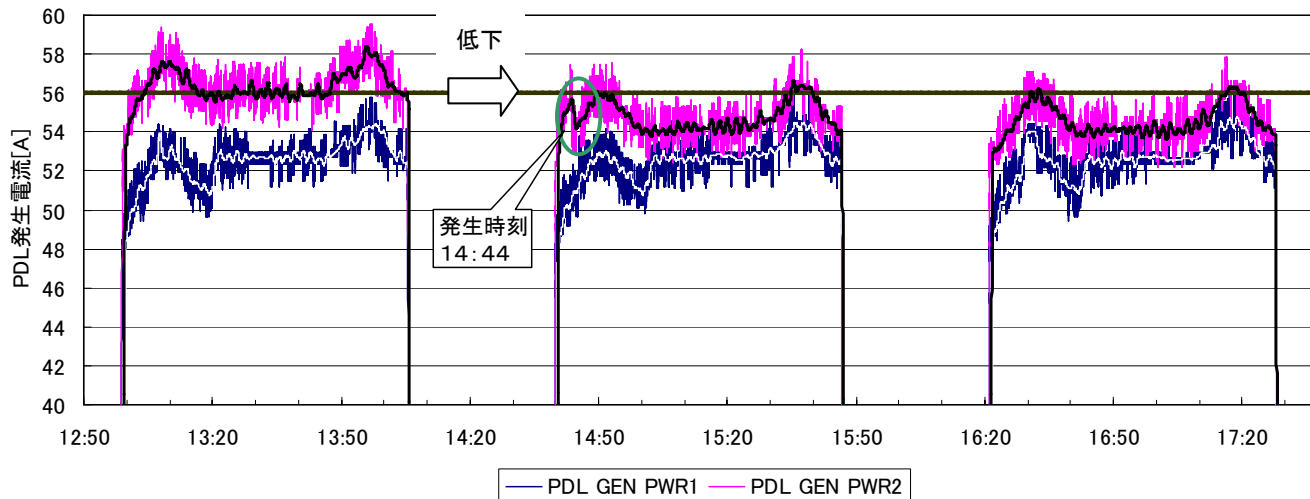


図2-4 特徴3:日陰明けに低下していた発生電力の日照中の復帰

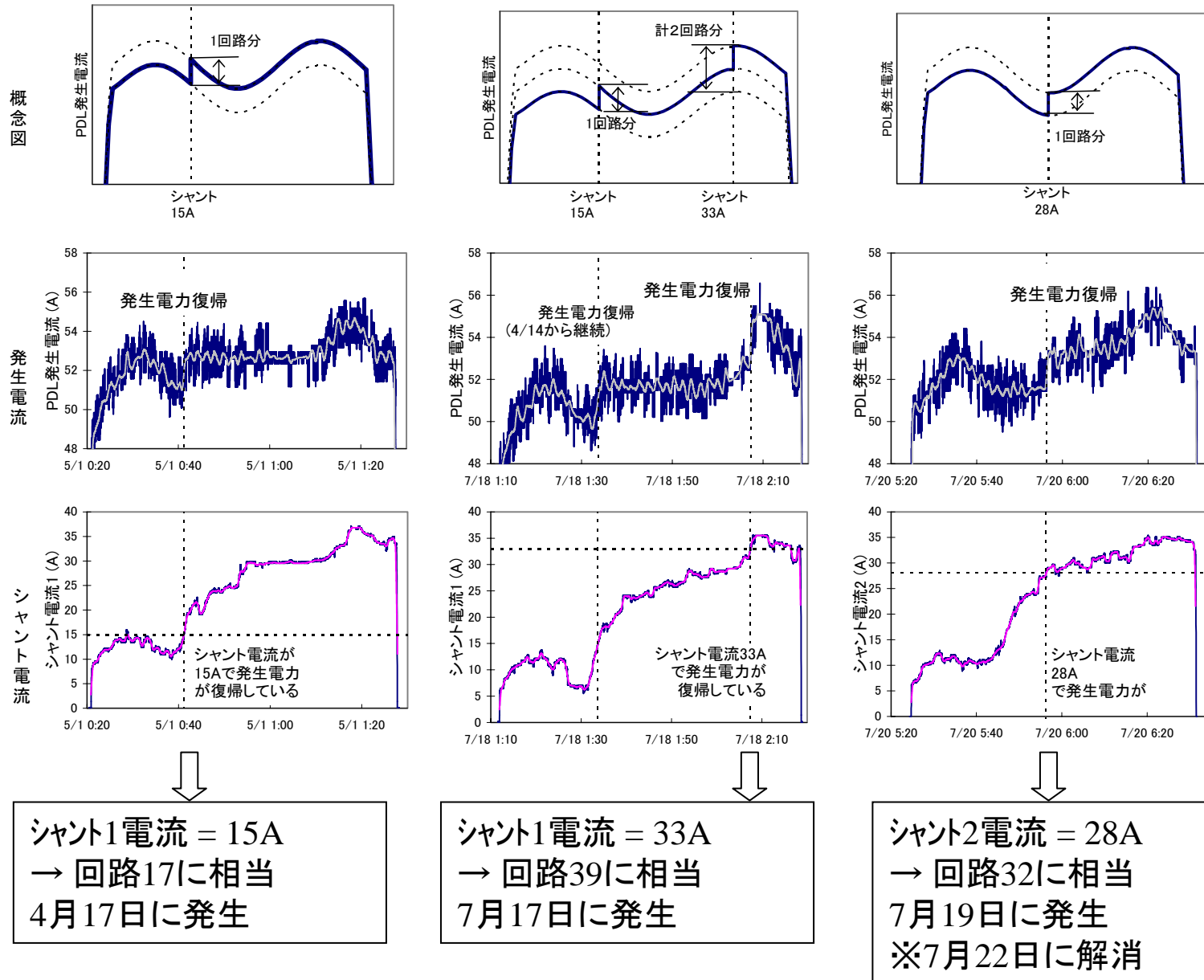


図2-5 特定テレメトリ等の異常を伴う特徴3(7月19日~22日)

7月19日~22日の特徴3は、特定テレメトリ等の異常が連動して発生している。

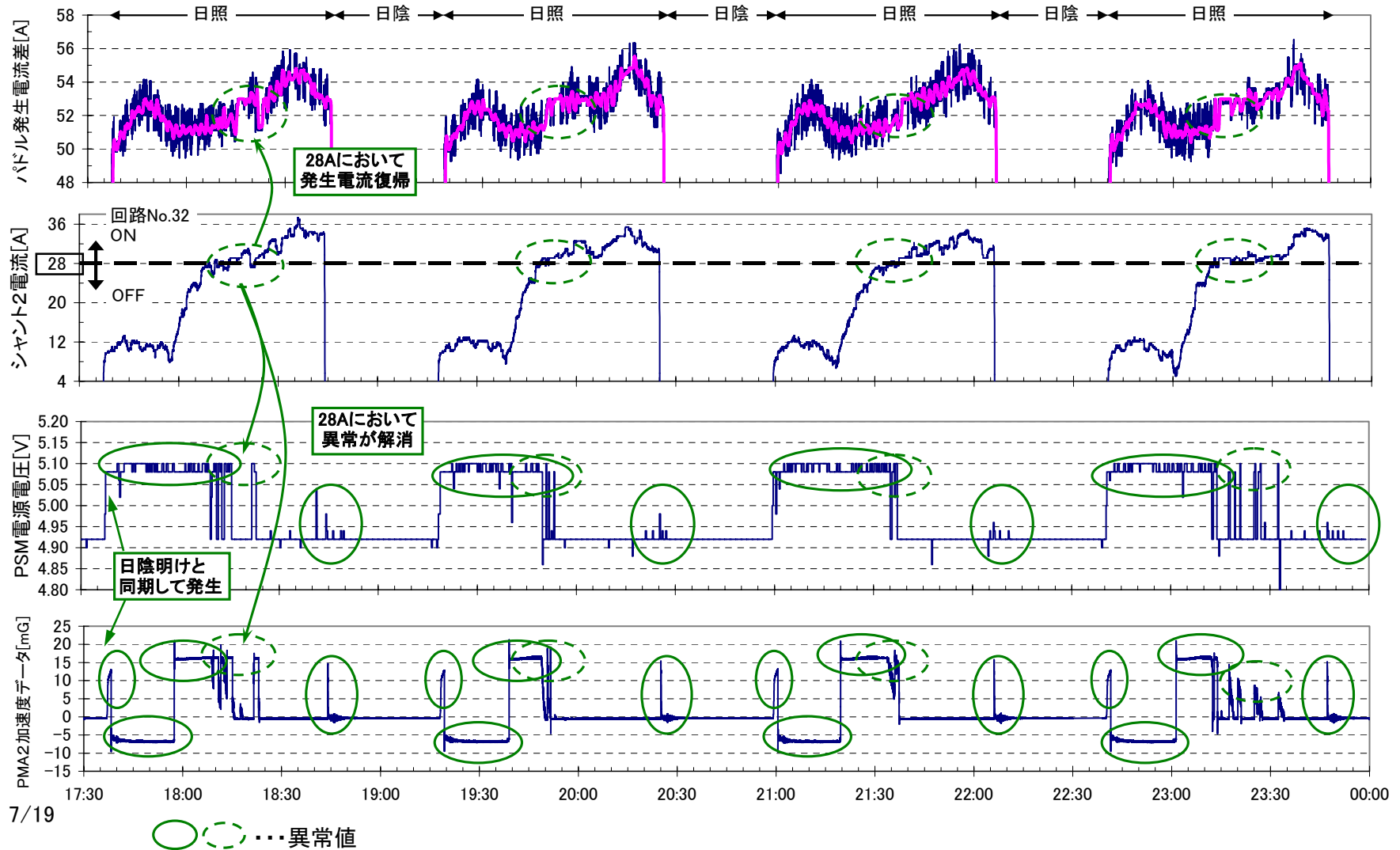


図2-6 運用異常に至る発生電力変動の残存回路

	1系		2系		備考
	回路数	低下回路	回路数	低下回路	
日陰明け	30回路	特徴3/回路17(No.2) 特徴3/回路39(No.6)	31回路	特徴2/回路44~64(No.3) [特徴1/回路4(No.5)]	特徴1は発生電力に影響しない
シャント電流15A到達 2003/10/24 16:04:12	31回路	特徴3/回路39(No.6)	31回路	特徴2/回路44~64(No.3)	回路17の復帰
発生電力低下開始 2003/10/24 16:12:27	31回路	特徴3/回路39(No.6)	31回路	特徴2/回路44~64(No.3)	
発生電力低下終了 2003/10/24 16:16:30	6回路		5回路		←2系の方が1回路少ない

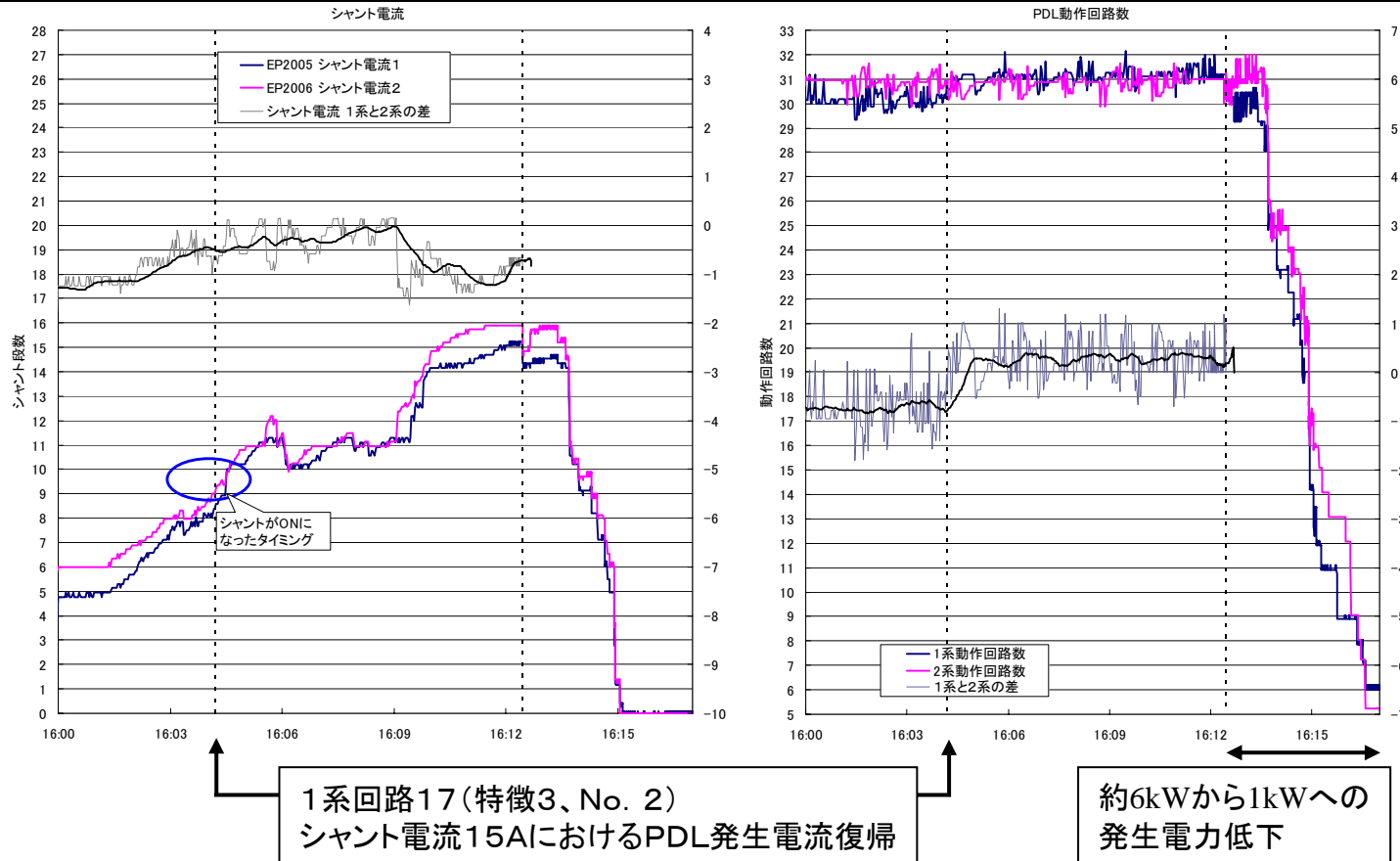
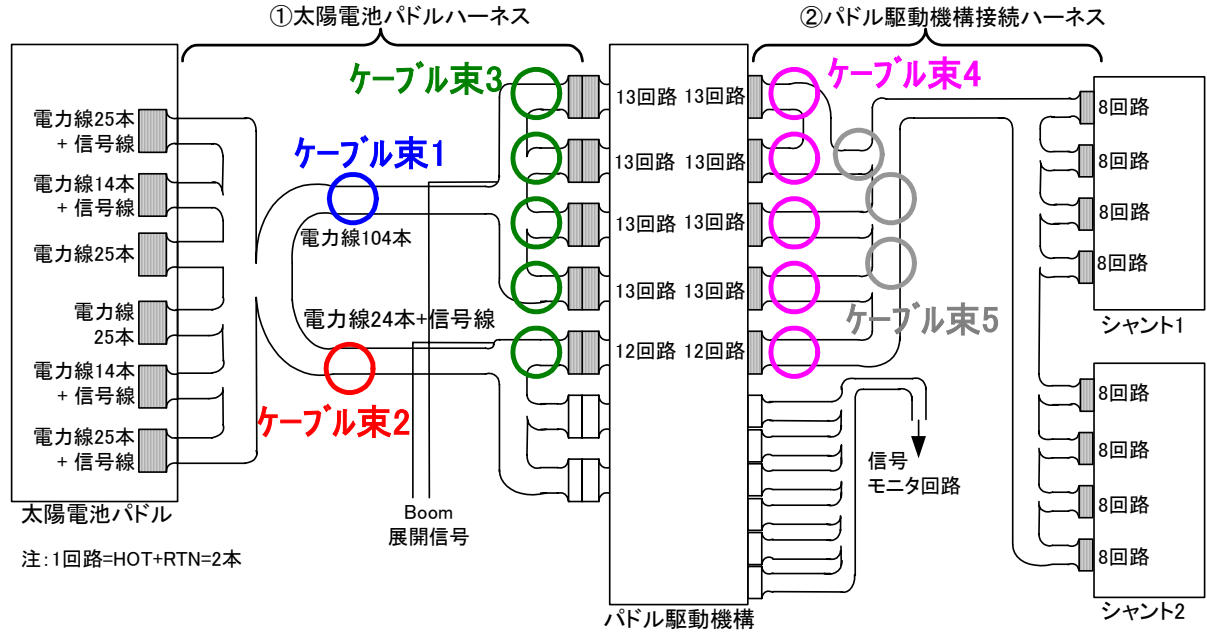
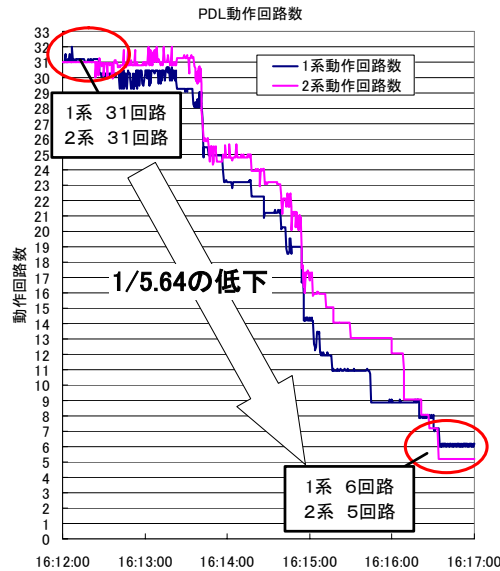


図2-7 運用異常発生後の残存回路と100W変動の発生回路



①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	1/5.17	△
	11回路	1/5.64	○
	10回路	1/6.20	△
ケーブル束2の破断	50回路	1/1.24	×
	51回路	1/1.22	×
	52回路	1/1.19	×

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	1/5.64	○
	12回路	1/5.17	△
	26回路	1/2.38	×
	39回路	1/1.59	×

②パドル駆動機構接続ハーネス破断のケース
複数束破断の場合 (代表例)

以下の2つの仮説とよく整合する。

仮説1:
特徴2/回路44~64(No.3)は、回路54~64である

仮説2:
6kWから1kWへの発生電力低下が、『ケーブル束1の全損』が原因で発生

	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	1/4.77	×
	12回路	1/5.17	△
	11回路	1/5.64	○
	25回路	1/2.48	×

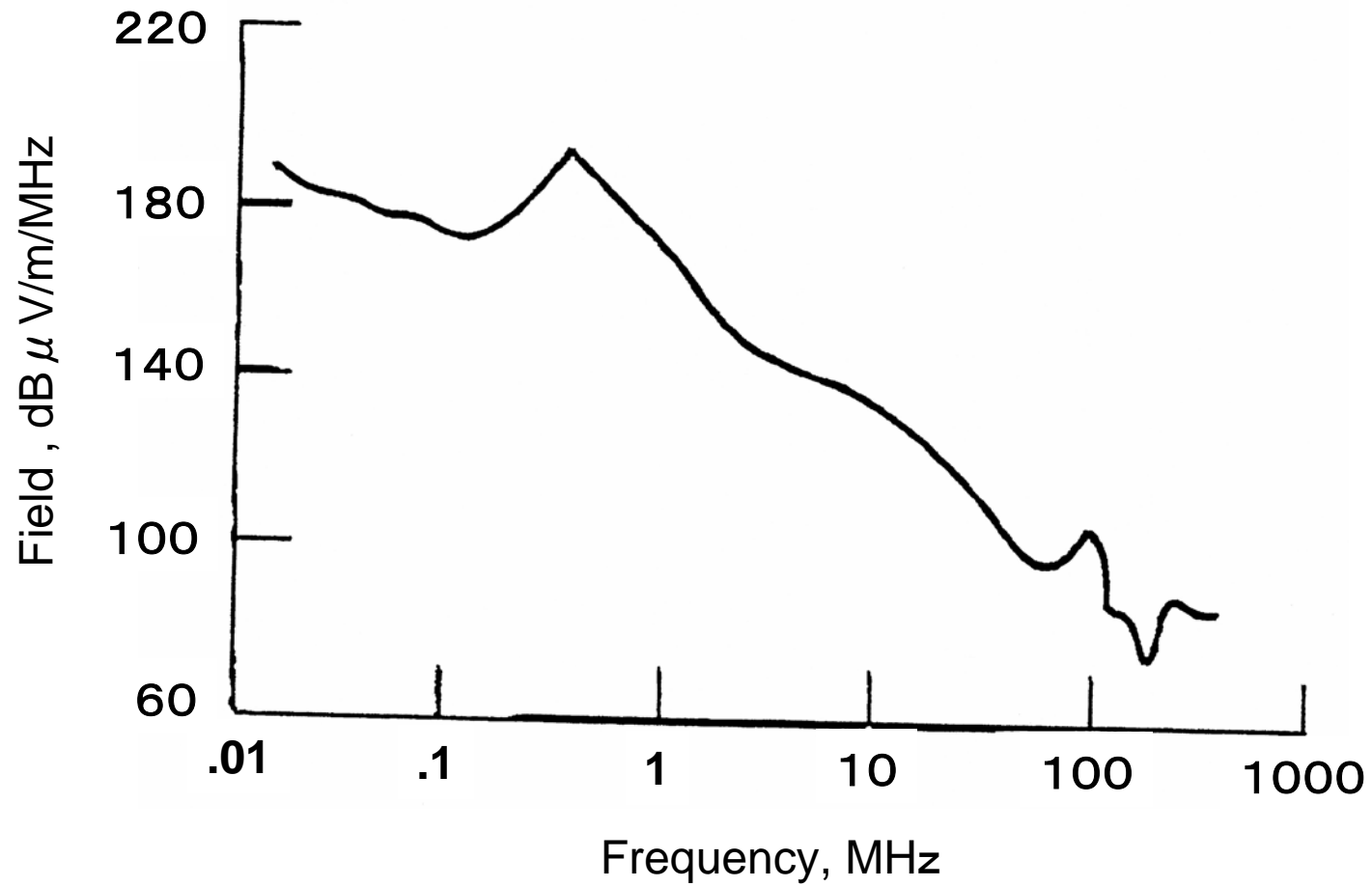


図3-1 放電放射レベル

出典: "Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects",
NASA Technical Paper 2361, 1984

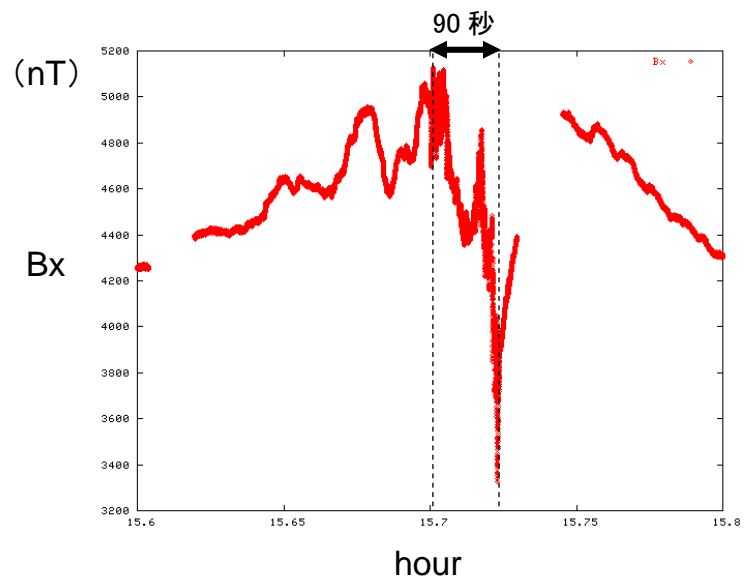


図 4-1 FedSat で観測された ADEOS-II 不具合時の北極域での磁場変動