

## 環境観測技術衛星 (ADEOS- )「みどり」の 運用異常の原因究明の進捗状況について

平成 15年 11月 18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. 作業の検討状況

太陽電池パドル発生電力低下に至る原因究明作業として、故障部位に対応した考えられる発生メカニズムの仮説を作成し、その仮説を検討するのに必要なデータ取得のための試験を開始している。(調査 3 - 4 FTA の検討状況と異常事象の発生シナリオについて」参照)また、電力低下前後の姿勢・軌道変動についてのその後の解析結果及び約 100W 単位の電力変動分析を踏まえた、故障電力回路数を特定したので、下記の項目ごとに報告する。

- (1) 姿勢 軌道データの解析
- (2) 電力変動の分析

### 3. 姿勢 軌道データの解析

#### 3.1 姿勢データ分析

前回報告した姿勢変動の「事象 A」及び「事象 B」(図 3- 1、図 3- 2、図 3- 3)についての検討結果を以下に示す。なお、本検討は、事象 A、B 発生日と正常時(4日前)の差分に関する評価である。なお、本検討にあたり8日前のデータまで確認しているが、今後、確度を高めるため、過去のデータとの比較を行う必要がある。

図 3- 4に、ロール軸/ピッチ軸/ヨー軸の定義を示す。

##### 3.1.1 事象 A ; 発生電力直前のヨー軸の姿勢変動

###### (1) 事象の整理

事象 A は、15:45 ~ 15:57 にかけて主にヨー軸に発生した姿勢変動である。この期間には、以下の2種類の事象 / 動作が発生している。

日照出時における太陽電池パドルの熱変形  
MDR 動作 (テープの駆動開始/停止)

、 は、4日前の同一周回 / 同時刻でも発生しているので、4日前のデータとの差をとることにより、これらの動作以外の要因による姿勢擾乱を評価することが出来る。この結果、 以外の要因により衛星に力が働き、角運動量が生じていたことがわかった。

この擾乱量は、姿勢角変動量としてはヨー軸に-0.004deg 程度であり、角運動量としては衛星にピッチ軸に 0.2Nms、ヨー軸に-4Nms の角運動量が余分に蓄積した。

図 3- 5に、事象 A 発生前後の推定姿勢角を示す。

図 3- 6に、事象 A の 4 日前の同一周回 / 同一時刻における推定姿勢角を示す。

図 3- 7に、事象 A と 4 日前の同一周回 / 同一時刻における推定姿勢角の差を示す。

図 3- 8に、事象 A 発生前後の蓄積角運動量を示す。

図 3- 9に、事象 A の 4 日前の同一周回 / 同一時刻における蓄積角運動量を示す。

図3-10に、事象Aと4日前の同一周回/同一時刻における蓄積角運動量の差を示す。

## (2) 擾乱トルクの原因

事象Aは、太陽電池パドルが太陽と正対していて、太陽輻射圧や大気抵抗の増加が衛星のヨー姿勢に影響を与えやすい北極通過時に発生していることが特徴であることから、衛星に働いた擾乱トルクとして以下の原因が考えられる。

大気抵抗の突発的な増加  
太陽輻射圧の突発的な増加  
その他

現在、上記、 、 について、検討中である。

図3-11に、北極上空における太陽と太陽電池パドルの関係を示す。

### 3.1.2 事象B 発生電力低下と同時期の姿勢変動

#### (1) 事象の整理

事象Bは、電力低下と同時期の16:13~16:17にかけて発生している。この期間には、下記の定常運用動作を実施しており、事象としては発生電力の低下、加速度センサのオフセットも発生している。

太陽電池パドルのアレイトリム動作  
GLフィルタ動作  
DCSアンテナ駆動動作

事象Aと同様に、動作、 、 は、4日前の同一周回/同時刻で実施されているので、両者の差をとることにより、これらの動作以外の要因による姿勢擾乱を評価することが出来る。この結果、 以外の要因により、衛星に力が働き、角運動量が生じていたことがわかった。

この擾乱量は、姿勢変動量としてはロール/ピッチ/ヨーそれぞれに-0.004deg / +0.003deg / -0.005deg 程度であり、衛星に-1.0Nms / +0.6Nms / -2.0Nms の角運動量が余分に蓄積している。

図 3- 12に、事象 B発生前後の推定姿勢角を示す。

図 3- 13に、事象 Bの 4日前の同一周回/同一時刻における推定姿勢角を示す。

図 3- 14に、事象 Bと4日前の同一周回/同一時刻における推定姿勢角の差を示す。

図 3- 15に、事象 B発生前後の蓄積角運動量を示す。

図 3- 16に、事象 Bの 4日前の同一周回/同一時刻における蓄積角運動量を示す。

図 3- 17に、事象 Bと4日前の同一周回/同一時刻における蓄積角運動量の差を示す。

この余分に蓄積された角運動量が何らかの力により発生したと仮定すると、角運動量ベクトルが力の作用点ベクトルと力積ベクトルの外積で表されること(図 3- 18参照)を利用して、力の作用点と力積が存在する範囲を求めることが出来る。この評価の結果、図 3- 19示す平面と ADEOS-II 機体との交点のいずれかに力の作用点があることが判った。角運動量の推定誤差を考慮すると、上記作用点と力積の平面は  $\pm$  約 7deg 程度の面の推定誤差があると考えられる。

図 3- 18に、角運動量ベクトルと力の作用点ベクトルの関係を示す。

図 3- 19に、事象 Bにおける力の作用点が存在する範囲を示す。

なお、事象 Bと同時に発生している加速度センサのオフセットについては、実際の力学的挙動を反映したものではなく電氣的に重畳されたものであると考えているが、詳細確認中である。

## (2) 姿勢シミュレーションによる事象の再現

(1)で述べたトルクが時間的に衛星に対してどのように作用したかを確認するために、ヨー軸廻りに推定した擾乱トルクを入力として姿勢シミュレーションを実施した。

シミュレーションの結果、姿勢軌道制御系の制御動作も含めて、実テレメトリと良く一致することが確認できた。

この結果から、衛星に働いたトルクはインパルスまたはステップ状に加わったのではなく、比較的長い時間(約 4分)かけて通常の自然外乱トルクの最大値の 2倍位の擾乱トルクが徐々に増加したのち、「0」に戻ったと推定する。

図 3- 20に、姿勢シミュレーションに入力した擾乱プロファイルとシミュレーション結果を示す。

### (3) 擾乱トルクの原因

衛星に働いた擾乱トルクの原因としては、衛星からの質量放出や大気抵抗等が考えられる。これらのどのメカニズムにより擾乱トルクが発生したかの評価は、電力低下発生メカニズムの検討結果を参考に再評価する必要がある。

## 3.2 軌道の変化について

前回報告した高精度軌道決定システムの軌道決定値による軌道伝播値と搭載 GPSR の単独航法解の差分に関して、GPSR テレメトリを用いたオフライン航法解析を実施した。その結果、衛星に搭載された GPSR の単独航法解とオフライン航法解析結果は整合しており、通信リンク途絶前まで GPSR から出力されたデータは正常であることが再確認できた。

このことから、1mm/秒の減速制御に相当する軌道長半径の減少は、実際に発生していたと判断している。

なお、この軌道長半径の変化時刻は事象 A発生時刻とは離れており、軌道変化に関する事象 A の寄与度は小さいと推定している。

図 3 - 21に、オフライン GPSR 航法解析との比較を示す。

図 3 - 22に、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及び推定軌道変化時刻を示す。

## 4. 電力変動の分析

### 4.1 100W 単位の発生電力変動との共通要因の分析と動作回路数の特定

打ち上げ以降、断続的に発生している100W単位の発生電力変動と今回の急激な発生電力変動の共通要因の分析と動作回路数の特定を実施した。

(1)平成14年12月14日の打ち上げ以降、平成15年3月に約100W程度の発生電力低下がはじめて観測され、7月下旬までの合計7回の発生電力変動が観測されている。これらの発生電力変化は、全て約100W単位であることについては共通している。

(2)今回の発生電力低下は1系と2系のほぼ同期した現象であることが特徴的であったことに対し、約100W単位の発生電力の変動は1系と2系のどちらか一方が変動している。

(3)5月9日や7月22日には、一度低下した発生電力が復帰する現象が発生している。

(4)7月5日には、発生電力の変動は見られないが1系と2系のシャント電流差およびPCU入力電流差が同時に発生している。

(5)打ち上げ当初は、1系 / 2系あわせて64回路あった動作回路数が10月下旬には61回路となっていた。

打ち上げ当初の動作回路数

1系 32回路 + 2系 32回路 = 合計 64回路

10月下旬における動作回路数

1系 30回路 + 2系 31回路 = 合計 61回路

いずれにしても、これら約100W単位の発生電力変動と今回の約6kWから約1kWへの大幅な発生電力変動の関係の有無については、今後の詳細検討が必要である。

- 表4 1に、約100W単位の発生電力変動の履歴を示す。  
図4-1に、PDM温度、シャント温度の温度計測点を示す。  
図4 2に、1系および2系電流のトレンドを示す。  
図4 3に、1系と2系の電流差のトレンドを示す。

- 図4 4に、関連温度のトレンドを示す。  
図4 5に、動作回路数の推定を示す。

#### 4.2 発生電力低下において残存した回路数の特定

前項の検討において、10月下旬における動作回路数を特定することができた。このことを利用して、今回の運用異常で残存した回路数を特定することができる。

- (1)運用異常発生直前の日陰明け後のパドル発生電流を評価することにより、運用異常発生直前の動作回路数は以下のとおりとなっていることを確認した。

$$1系 31回路 + 2系 31回路 = 合計 62回路$$

- (2)この動作回路数を初期値にして、約6kWから1kWへの発生電力変動を評価することにより、最終的な残存動作回路数を特定することができた。

運用異常発生後の動作回路数

$$1系 6回路 + 2系 5回路 = 合計 11回路$$

- (3)以上のことから、今回の運用異常による発生電力低下は、回路数に換算すると1/5.64に相当することがわかった。

運用異常による動作回路数の変化

$$11回路 / 62回路 = 1 / 5.64の電力低下$$

- 図4-6に、発生電力低下直前の動作回路数の推定方法を示す。  
図4-7に、運用異常における動作回路数の変化を示す。

## 5. まとめ

故障発生部位に対して考えられる仮説を作成した。また、関連性の高いテレメトリデータの評価や姿勢データの解析等を行ってきた。

今後は、継続検討が必要なテレメトリや姿勢データの解析の実施及び検証試験や解析による発生シナリオの解析・検証を行うこととしている。

環境観測技術衛星(ADEOS- )「みどり」の  
運用異常の原因究明の進捗状況について

図表集

平成 15 年 11 月 18 日

独立行政法人

宇宙航空研究開発機構

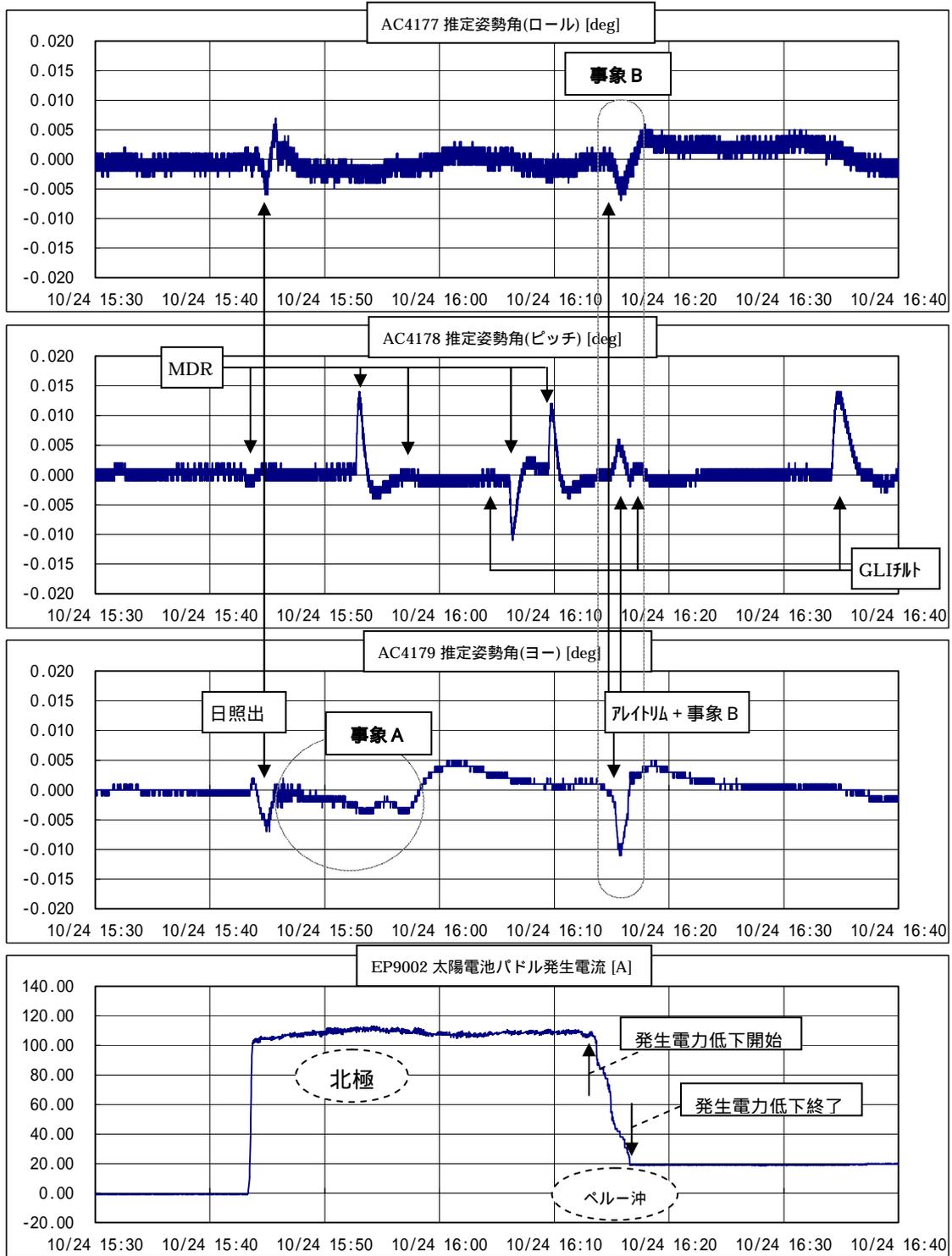


図3 - 1 発電電力低下前後の推定姿勢角

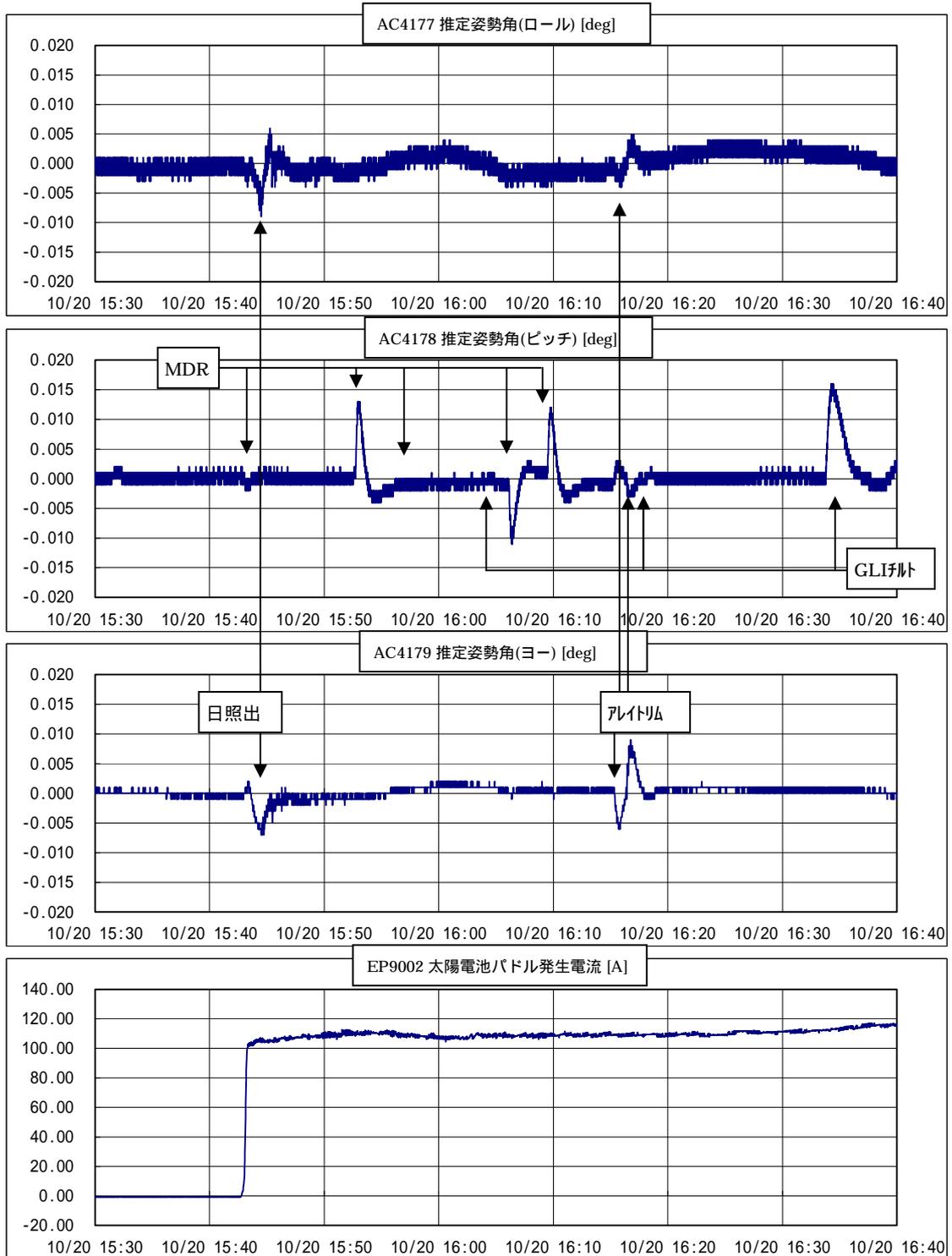


図3 - 2 発生電力低下発生日の4日前の推定姿勢角

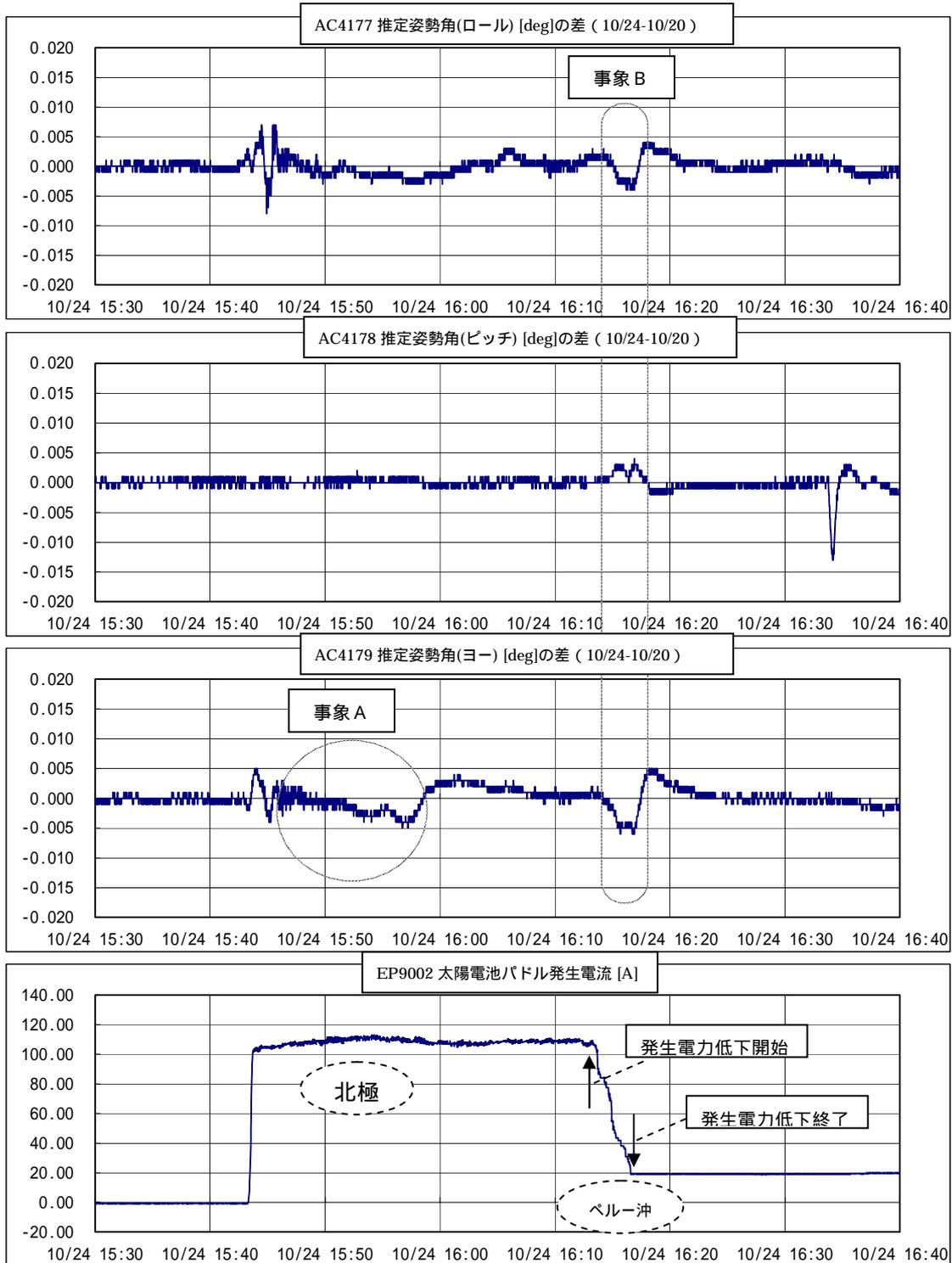


図3 - 3 発生電力低下発生日と4日前の推定姿勢角の差

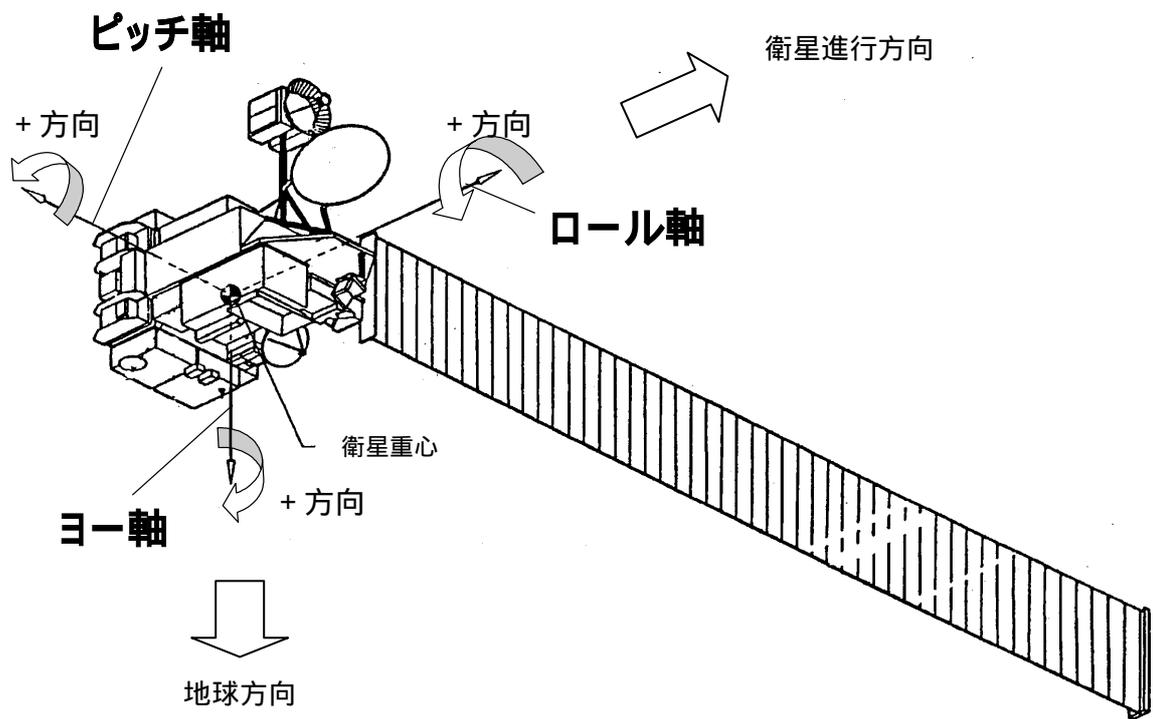


図3 - 4 ロール軸/ピッチ軸/ヨー軸の定義

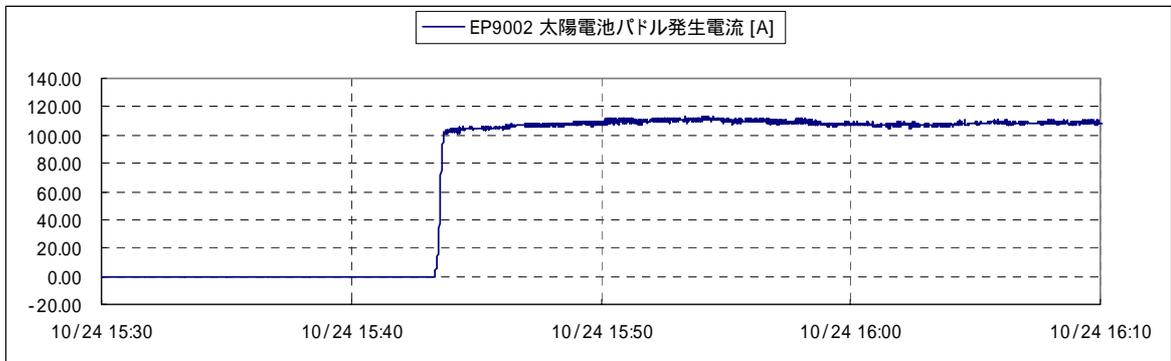
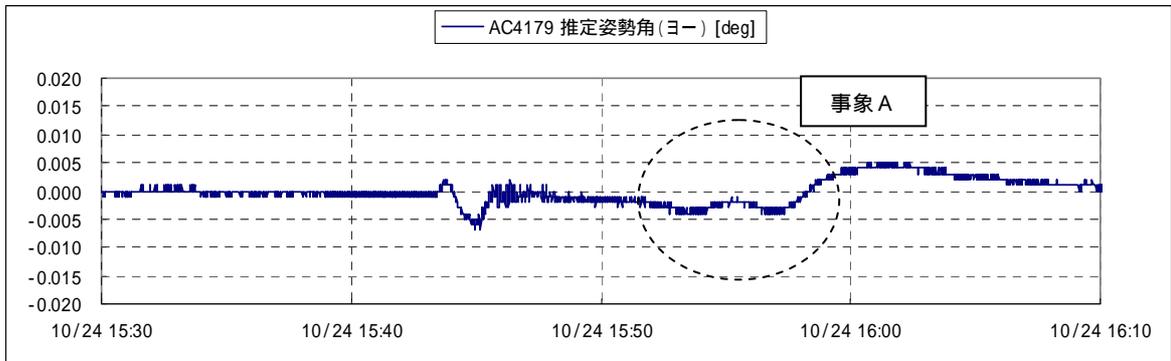
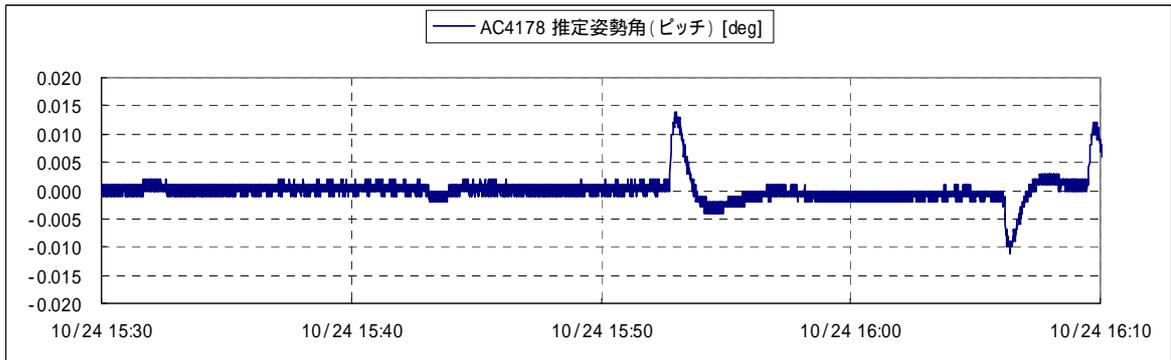
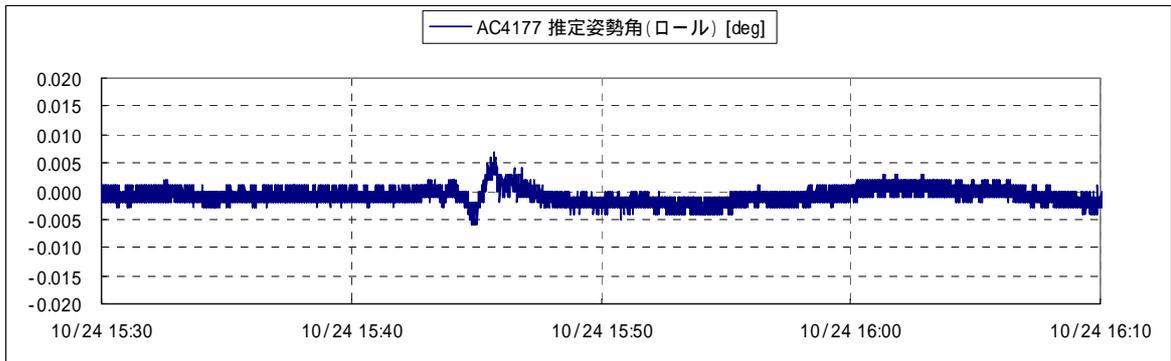


図3 - 5 事象A発生前後の推定姿勢角

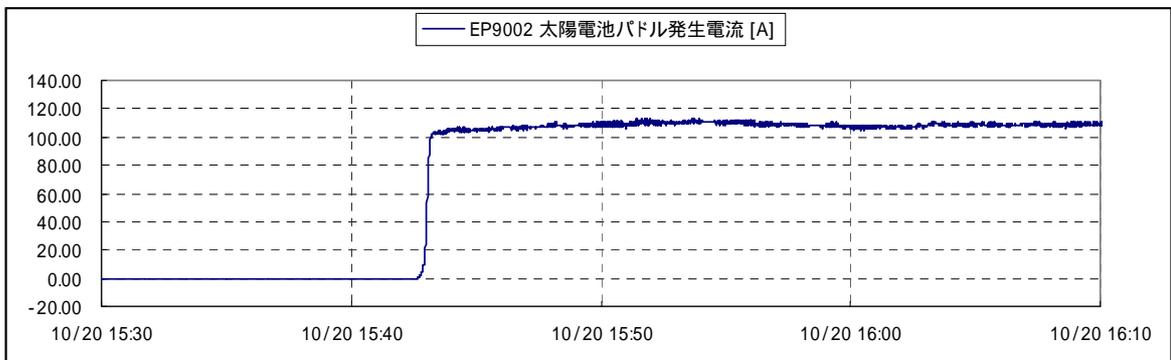
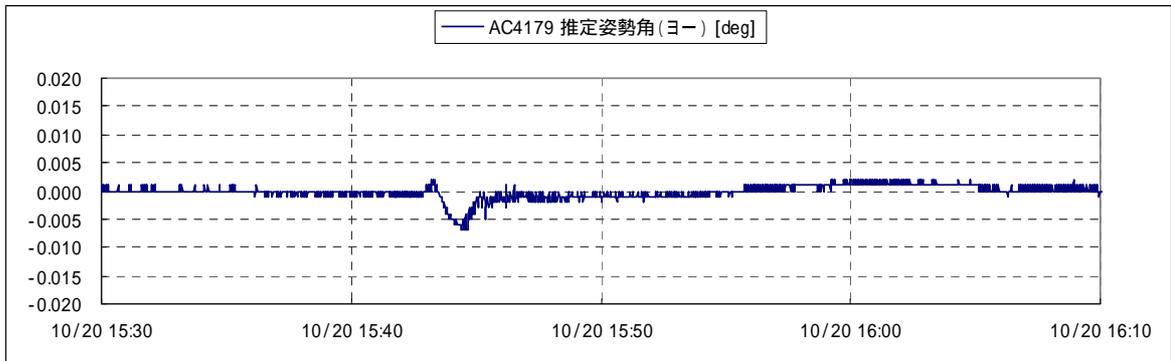
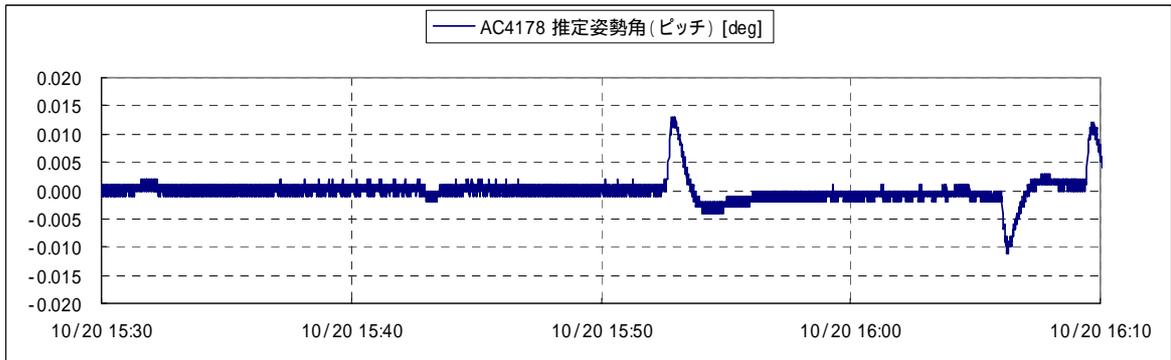
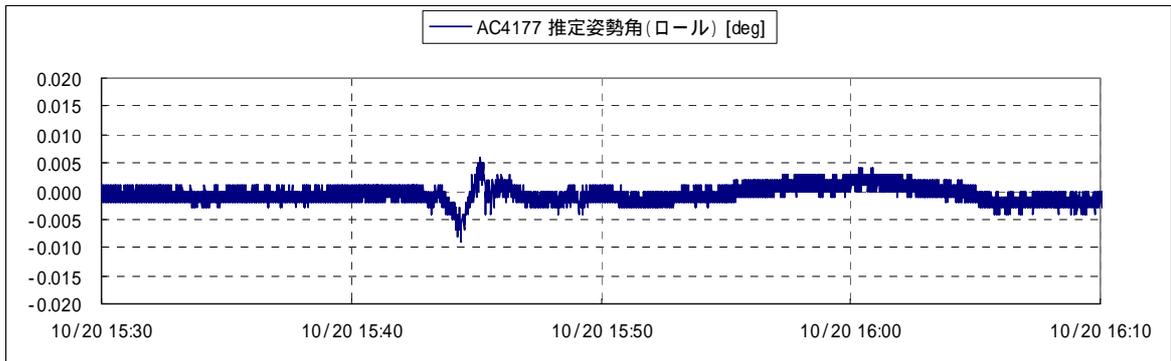


図3 - 6 事象Aの4日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角

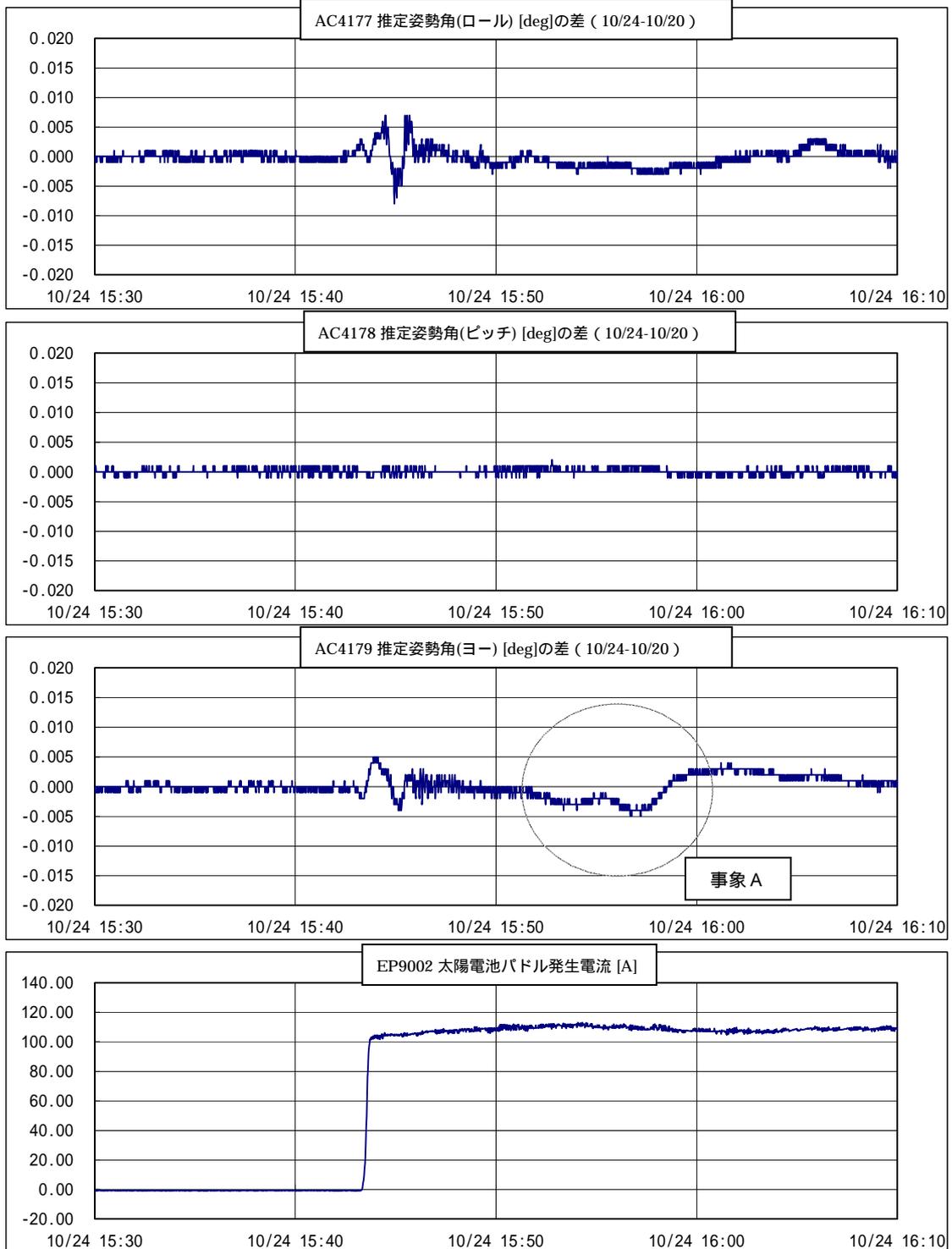


図3 - 7 事象 A と4日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角の差

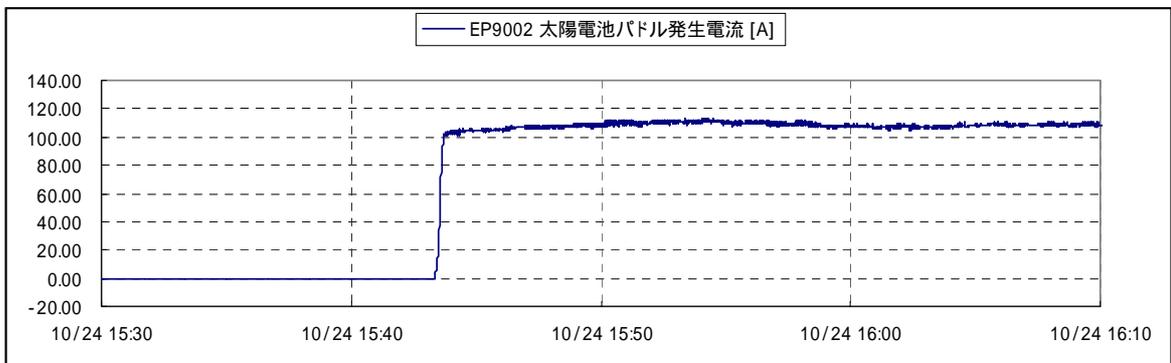
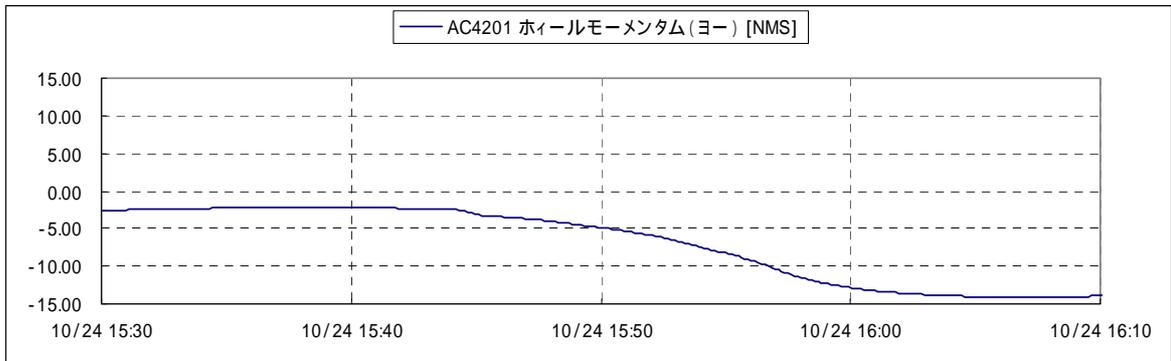
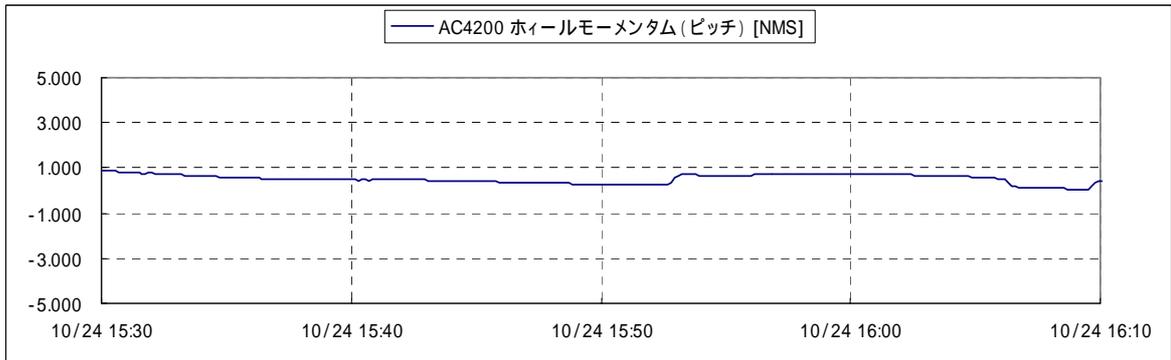
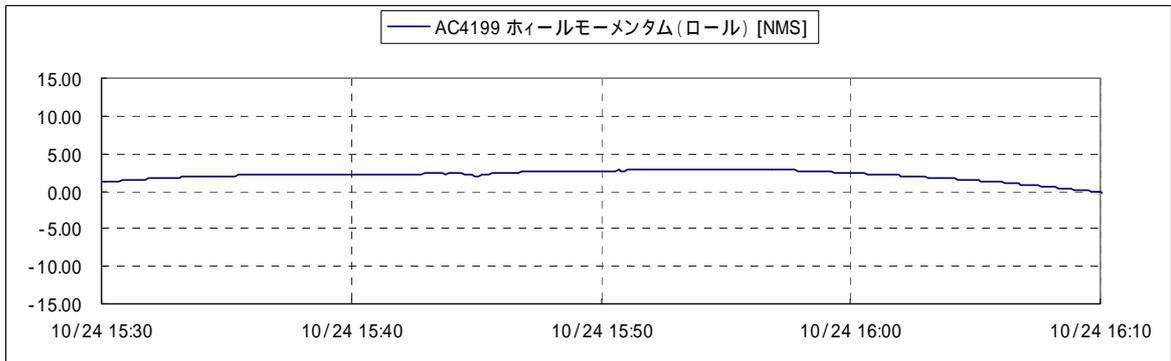


図3 - 8 事象A発生前後の蓄積角運動量

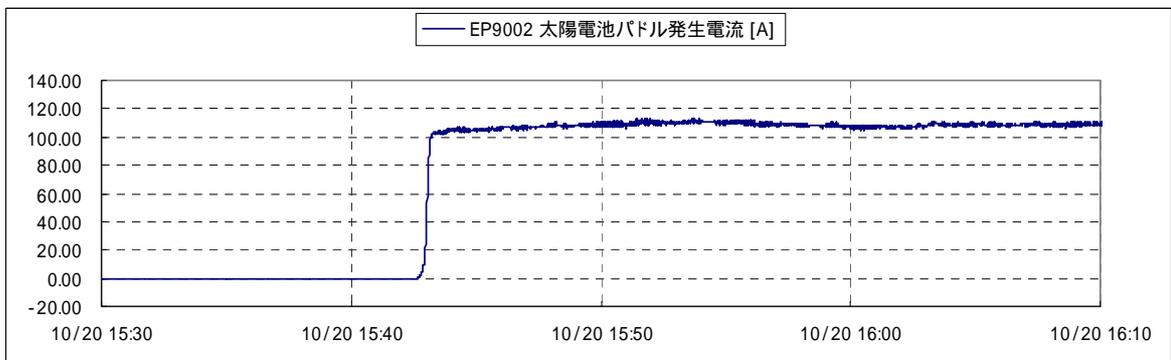
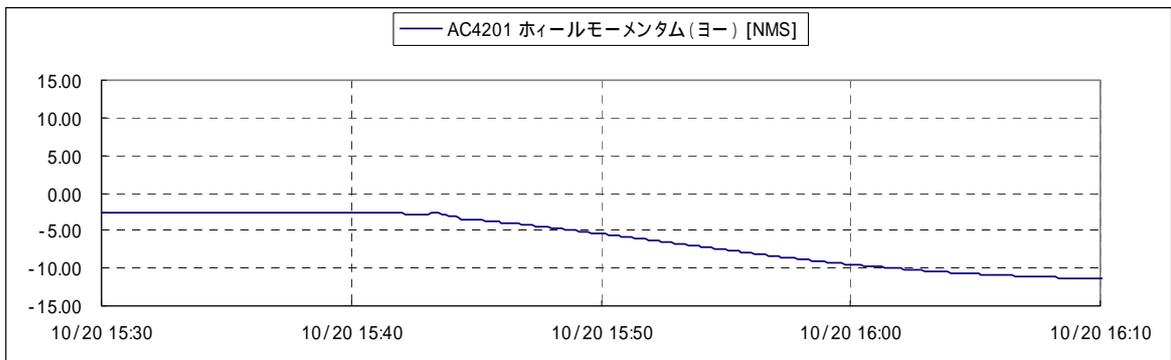
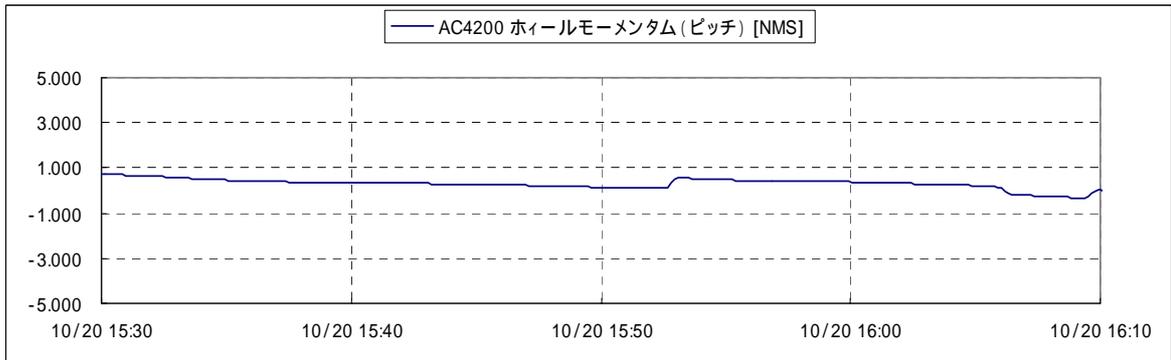
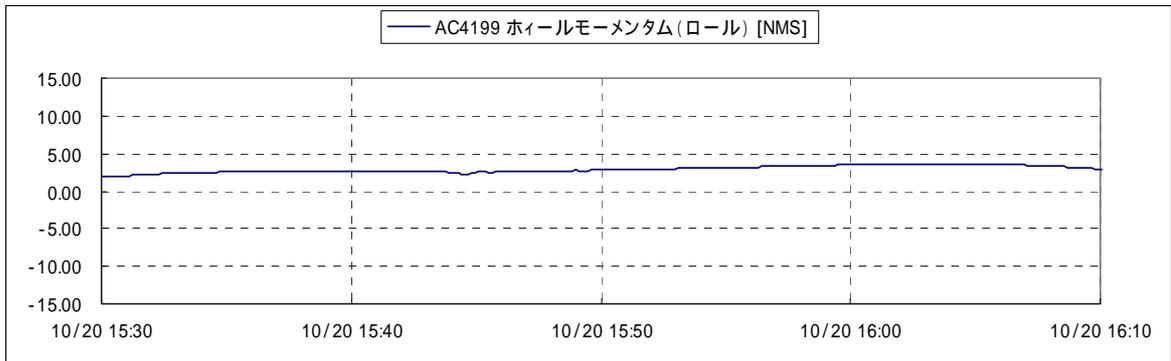


図3 - 9 事象Aの4日前の同一周回/同時刻における蓄積角運動量

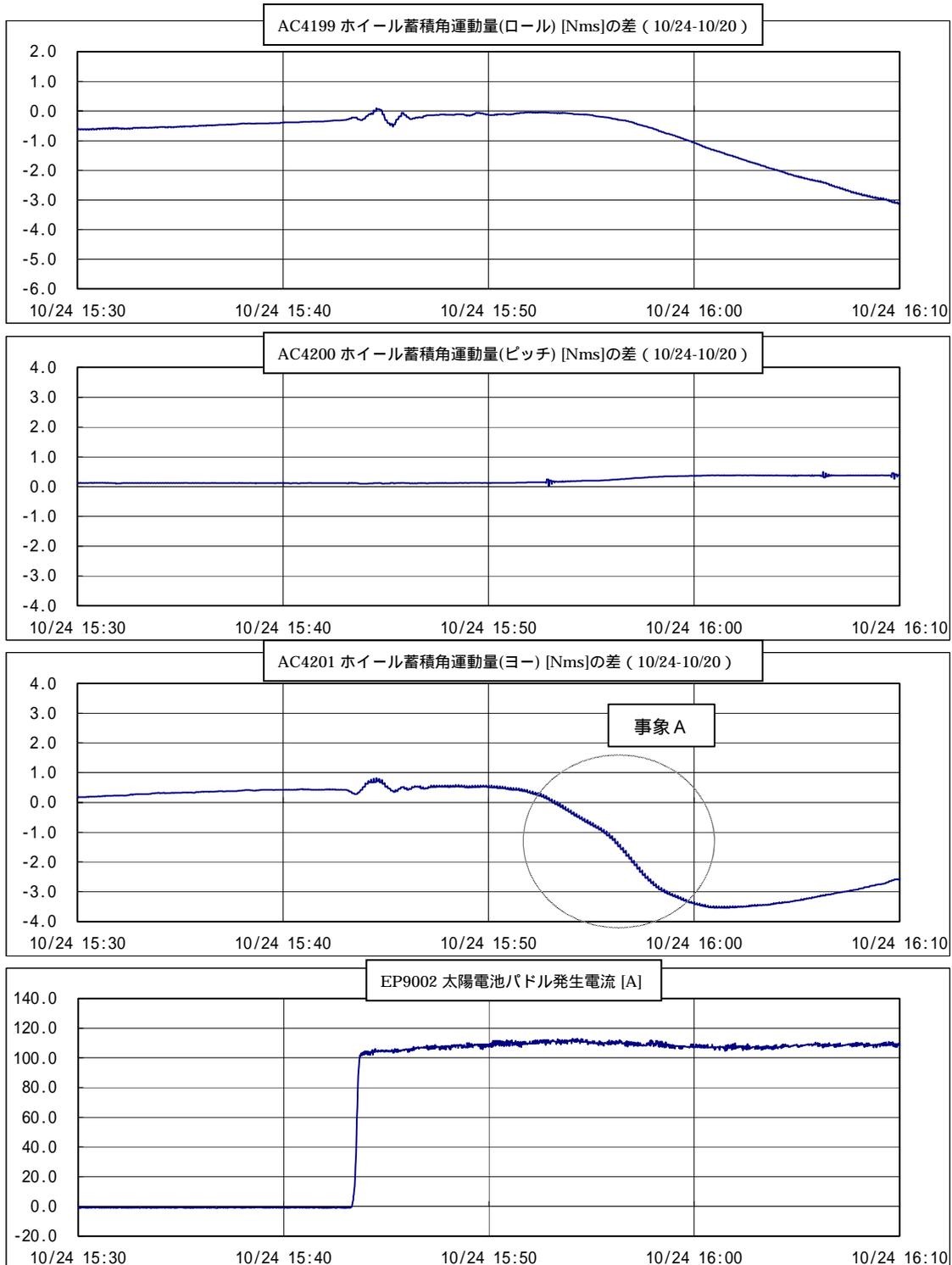


図3 - 10 事象 A と4日前の同一周回/同時刻における蓄積角運動量の差

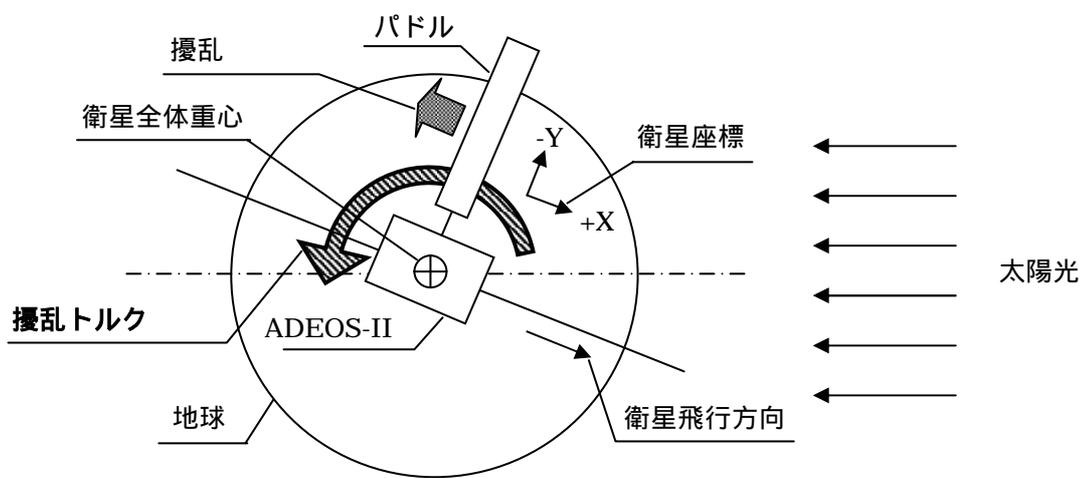


図3 - 11 北極上空における太陽と太陽電池パドルの関係

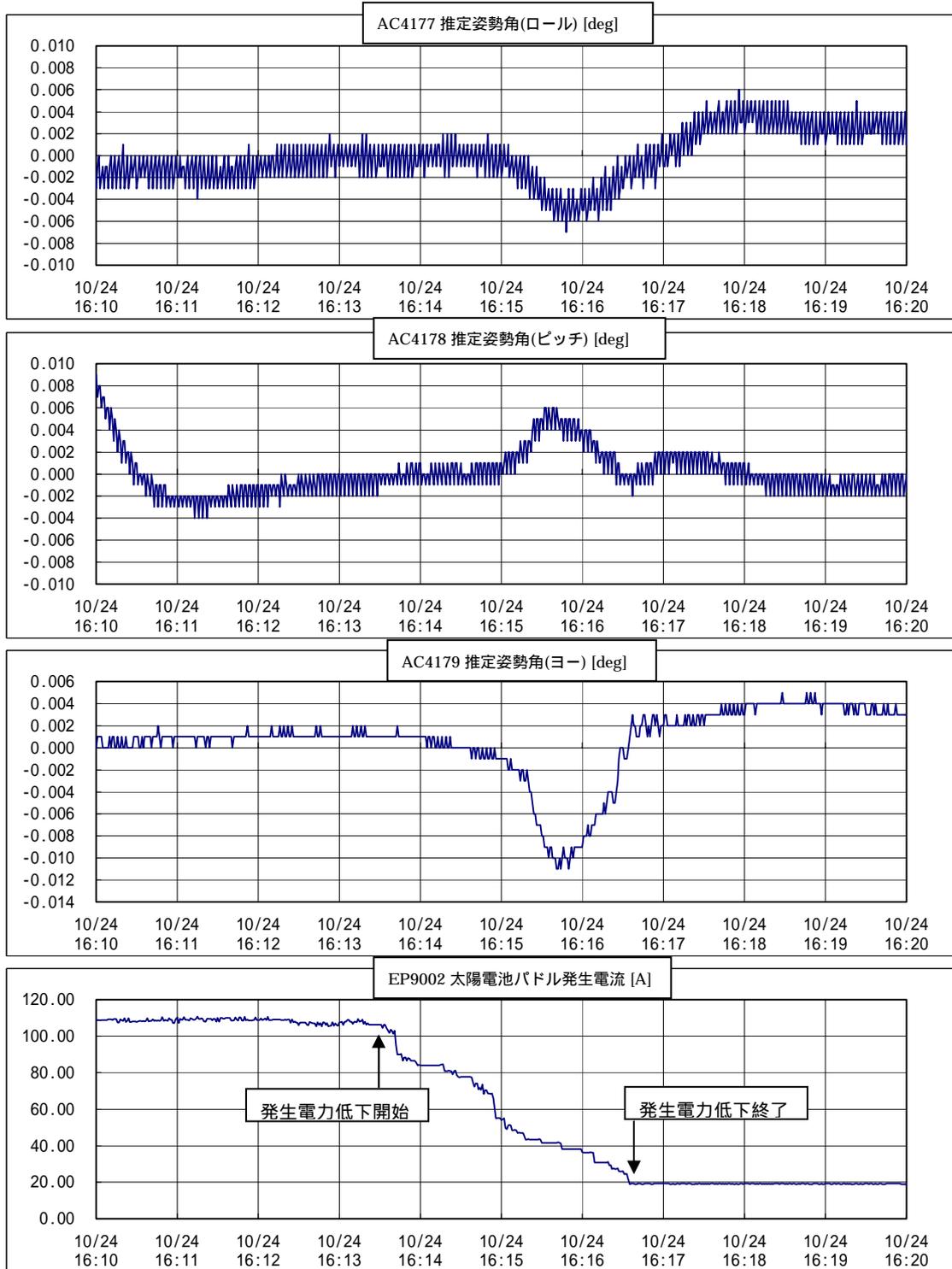


図3 - 12 事象B発生前後の推定姿勢角

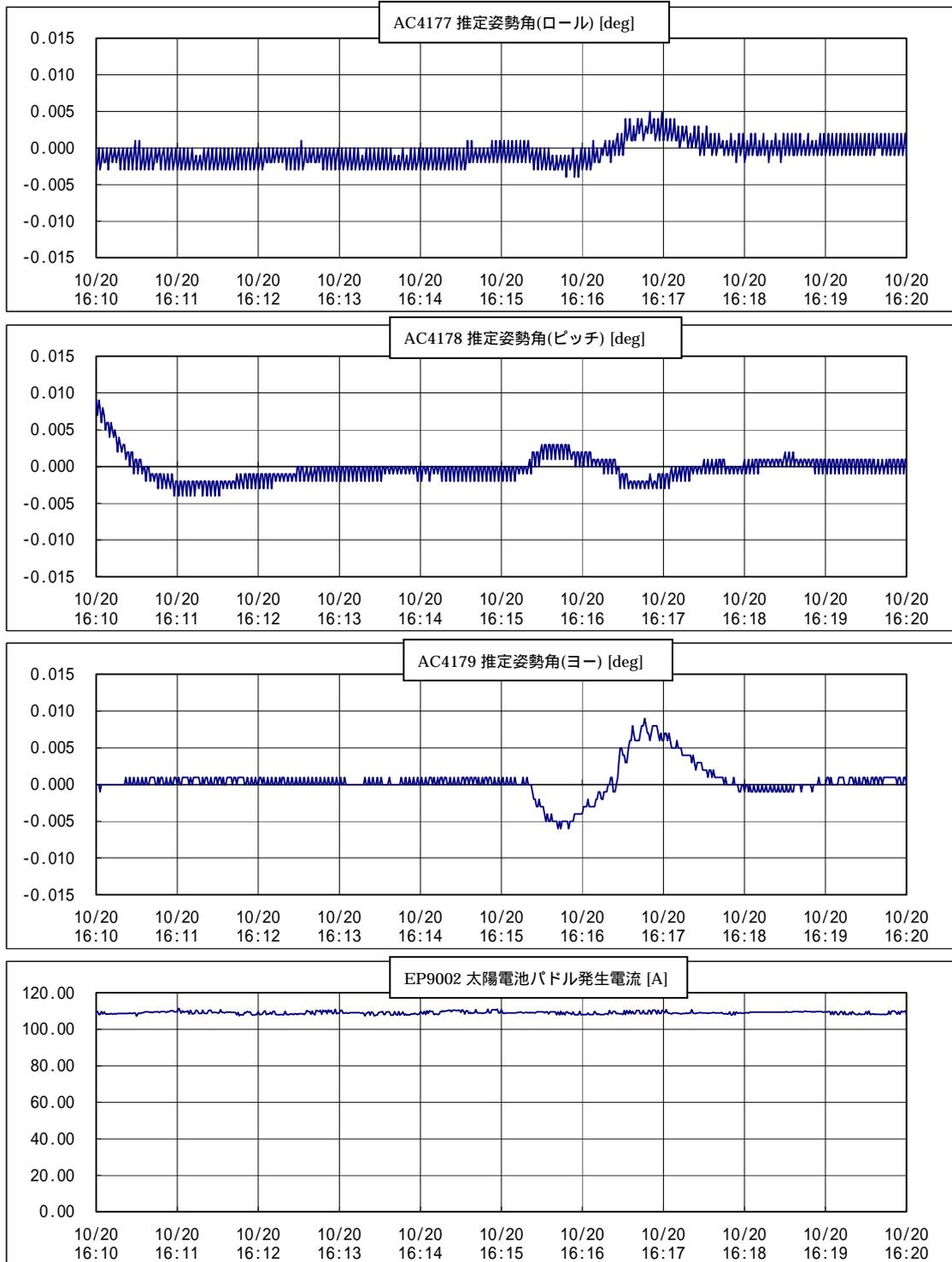


図3 - 13 事象Bの4日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角

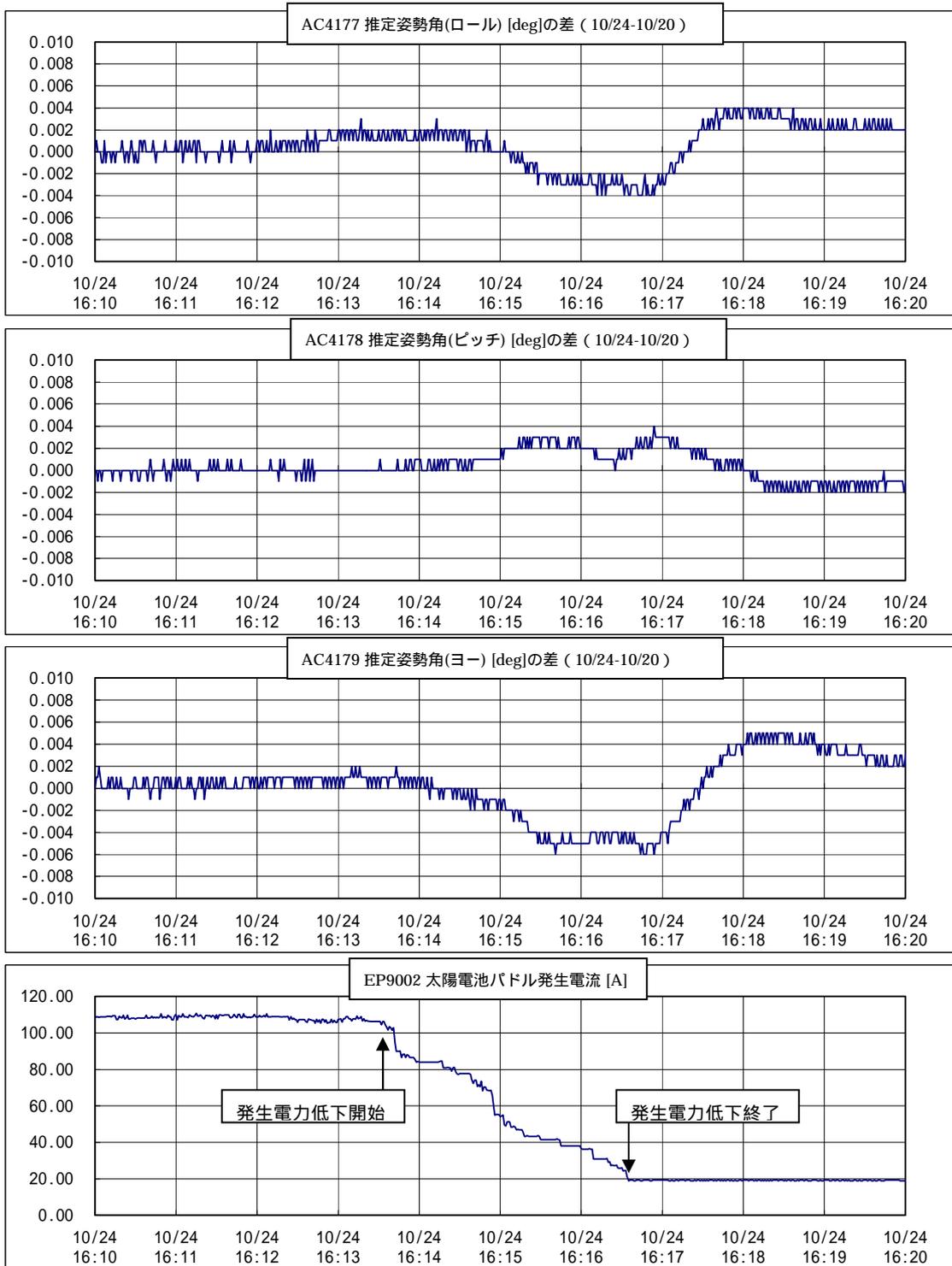


図3 - 14 事象 B と 4 日前の同一周回/同時刻における推定姿勢角の差

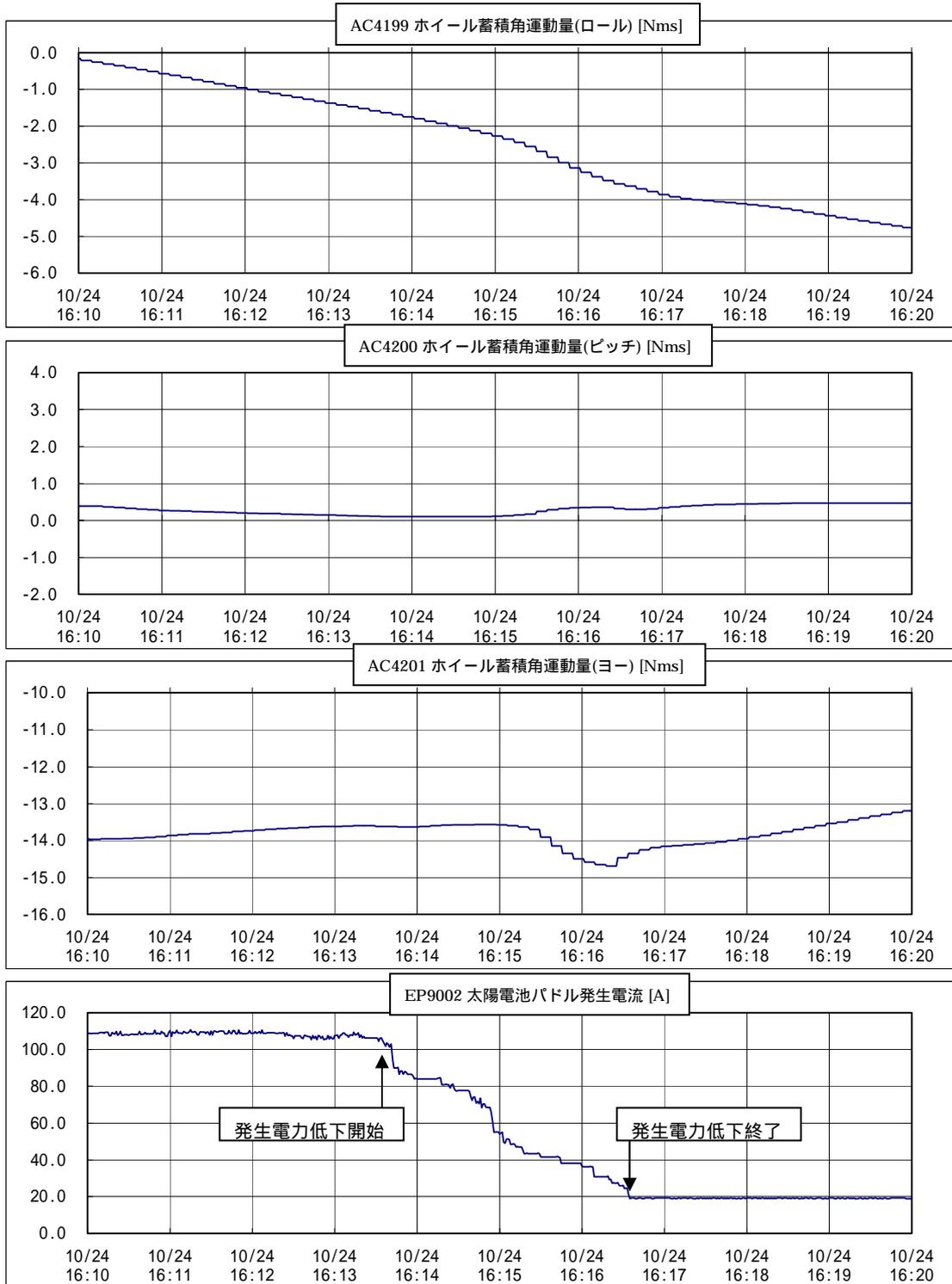


図3 - 15 事象B発生前後の蓄積角運動量

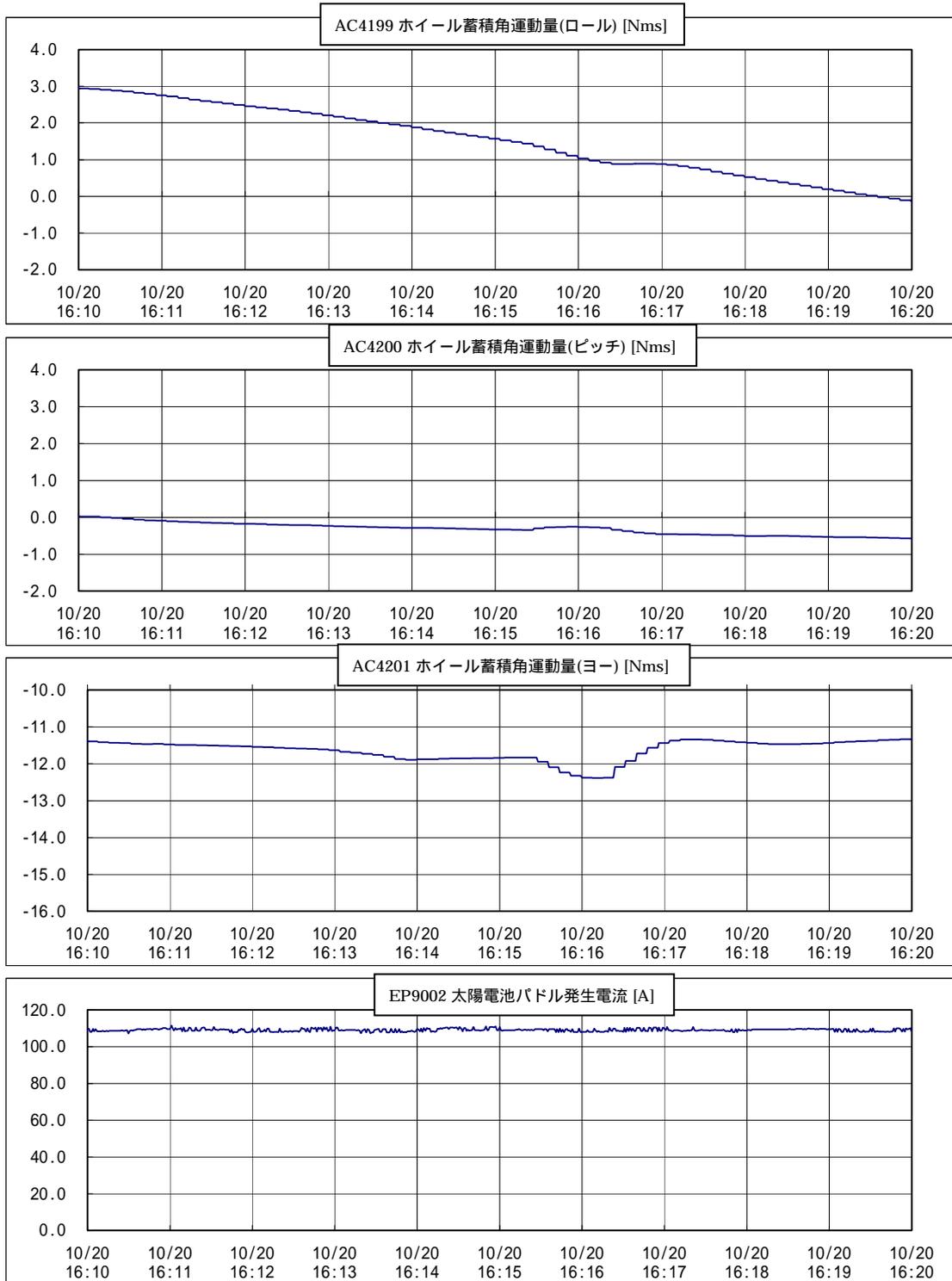


図3 - 16 事象Bの4日前の同一周回/同時刻における蓄積角運動量

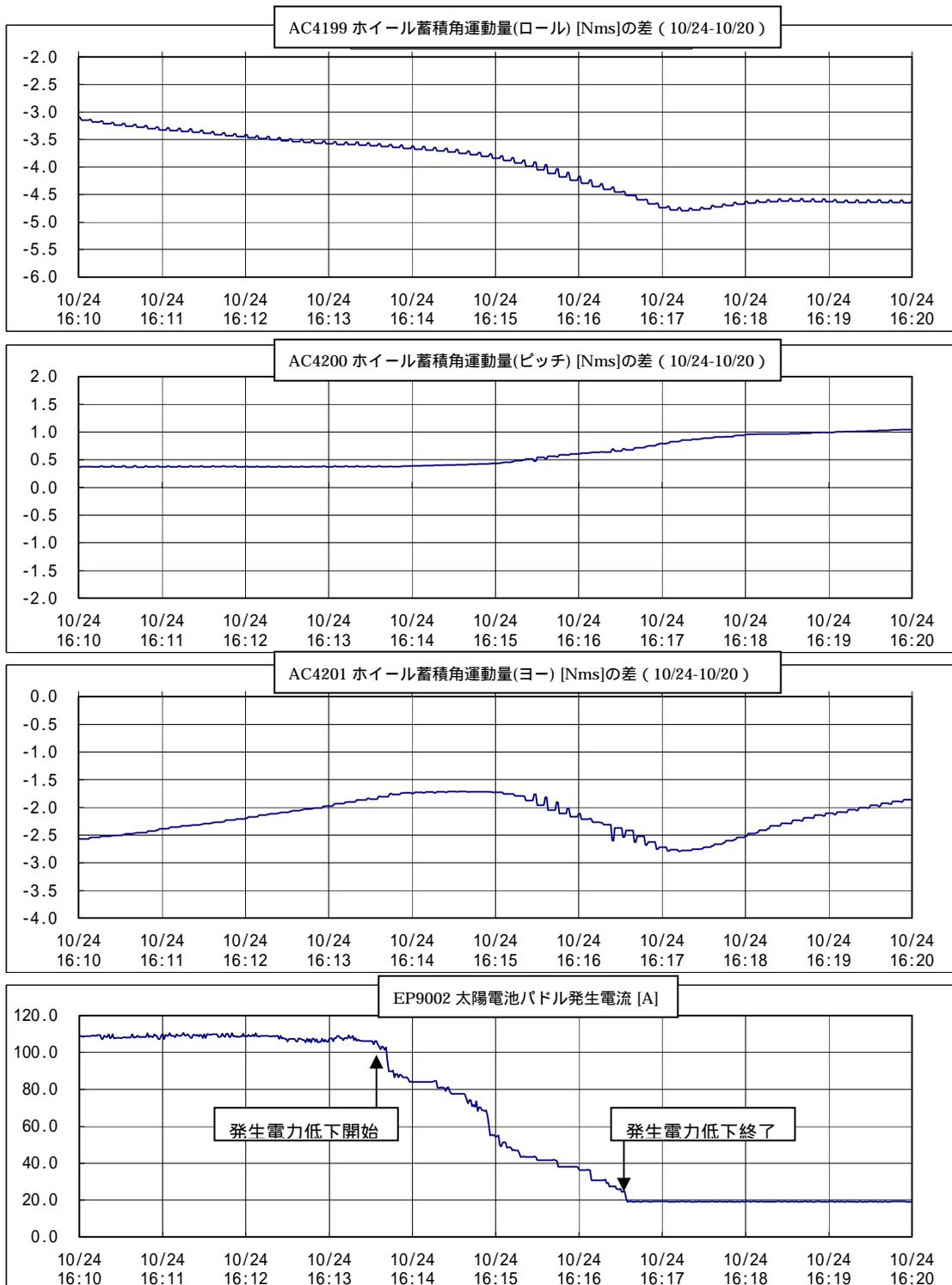


図3 - 17 事象 B と4日前の同一周回/同時刻における蓄積角運動量の差

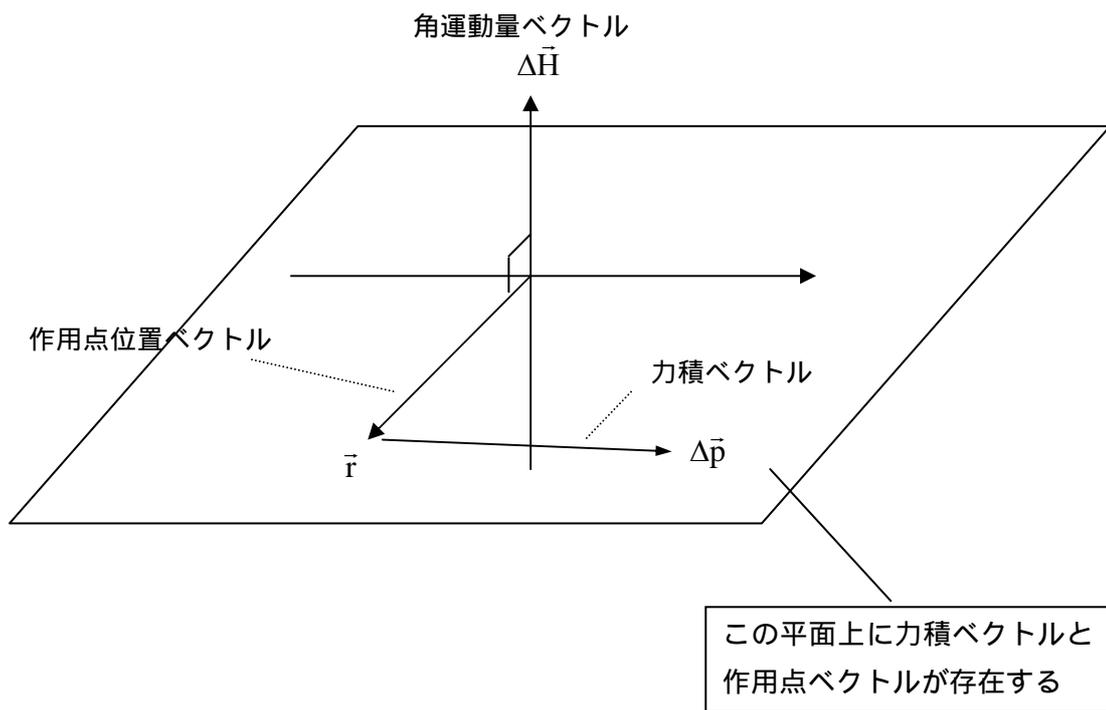


図3 18 角運動量ベクトルと力の作用点ベクトルの関係

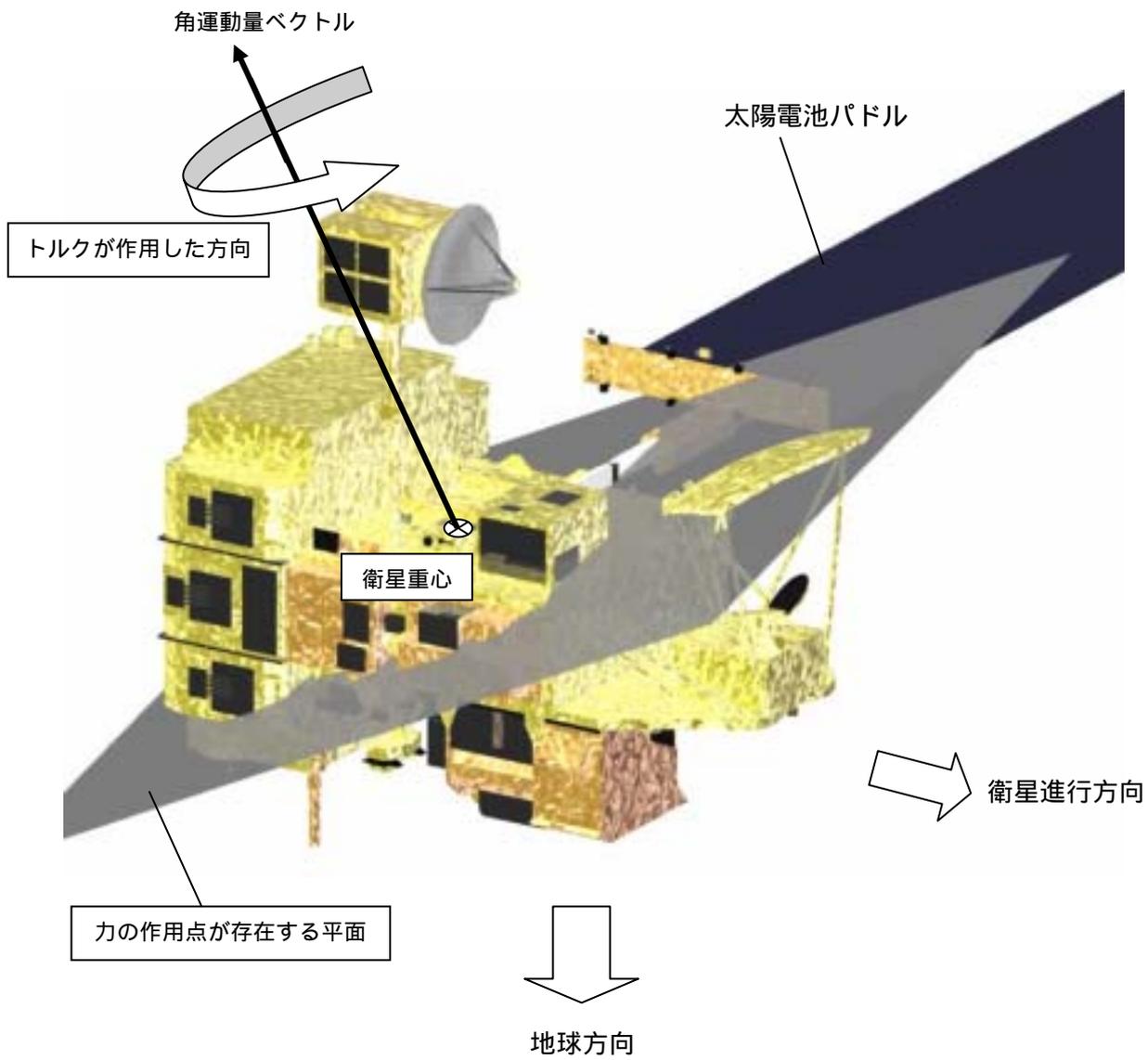


図3 - 19 事象 B における力の作用点が存在する範囲

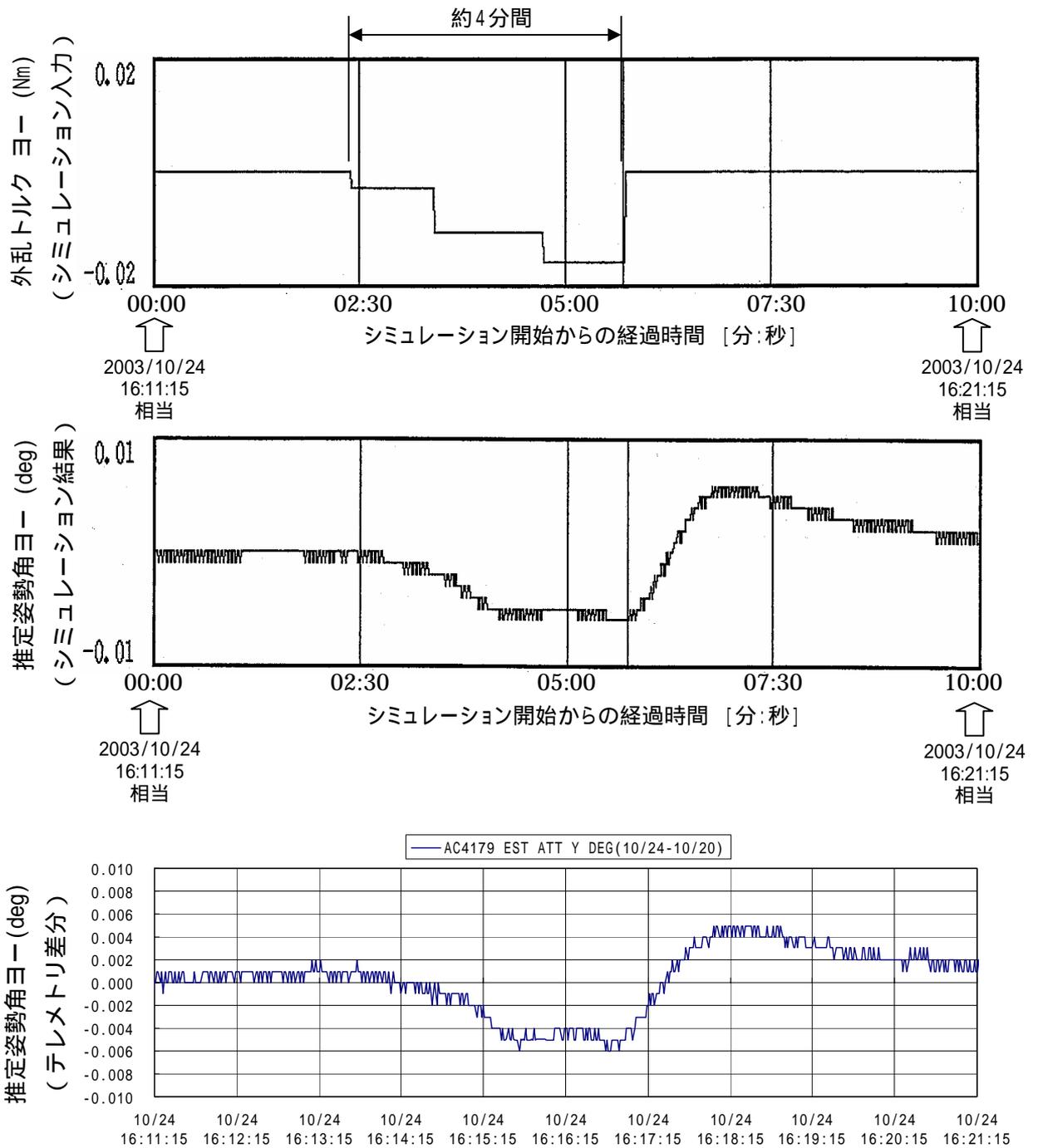


図3 - 20 事象Bの姿勢シミュレーション

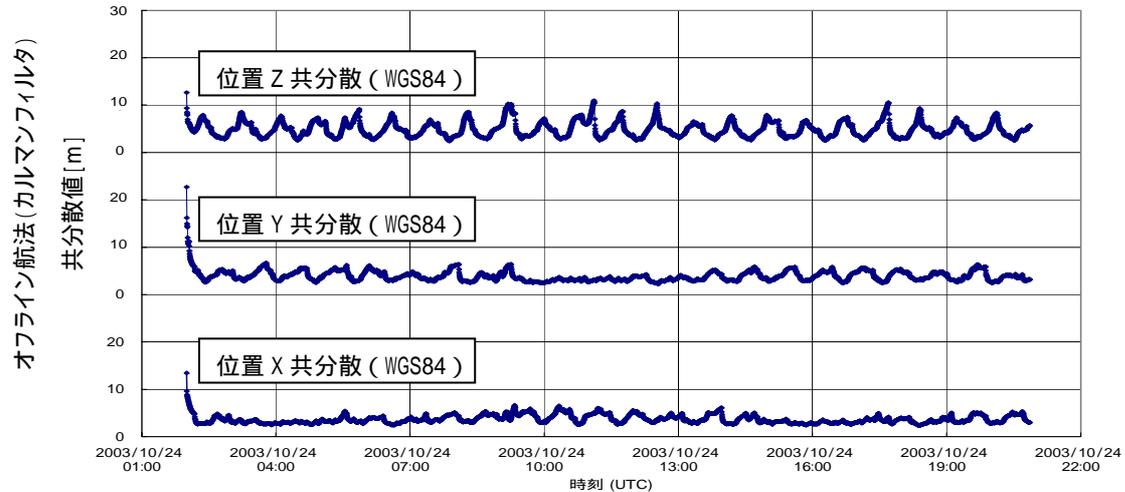
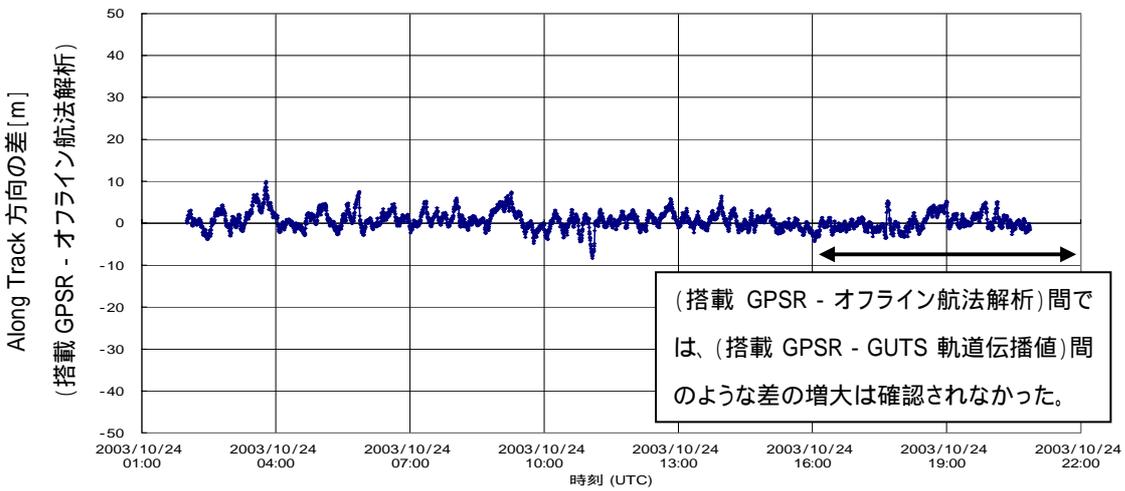
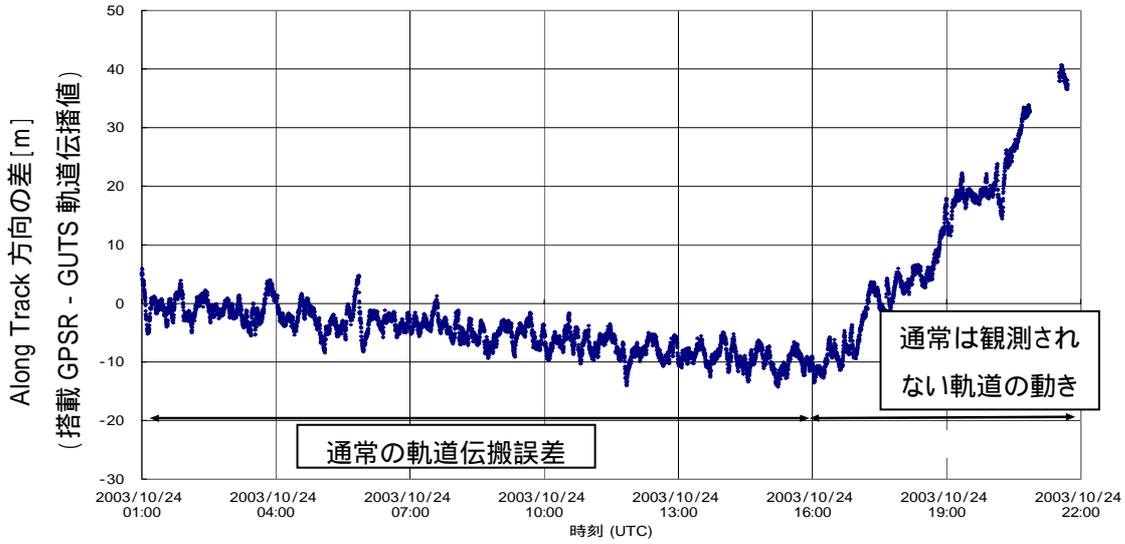


図3 - 21 オフライン GPSR 航法解析の結果

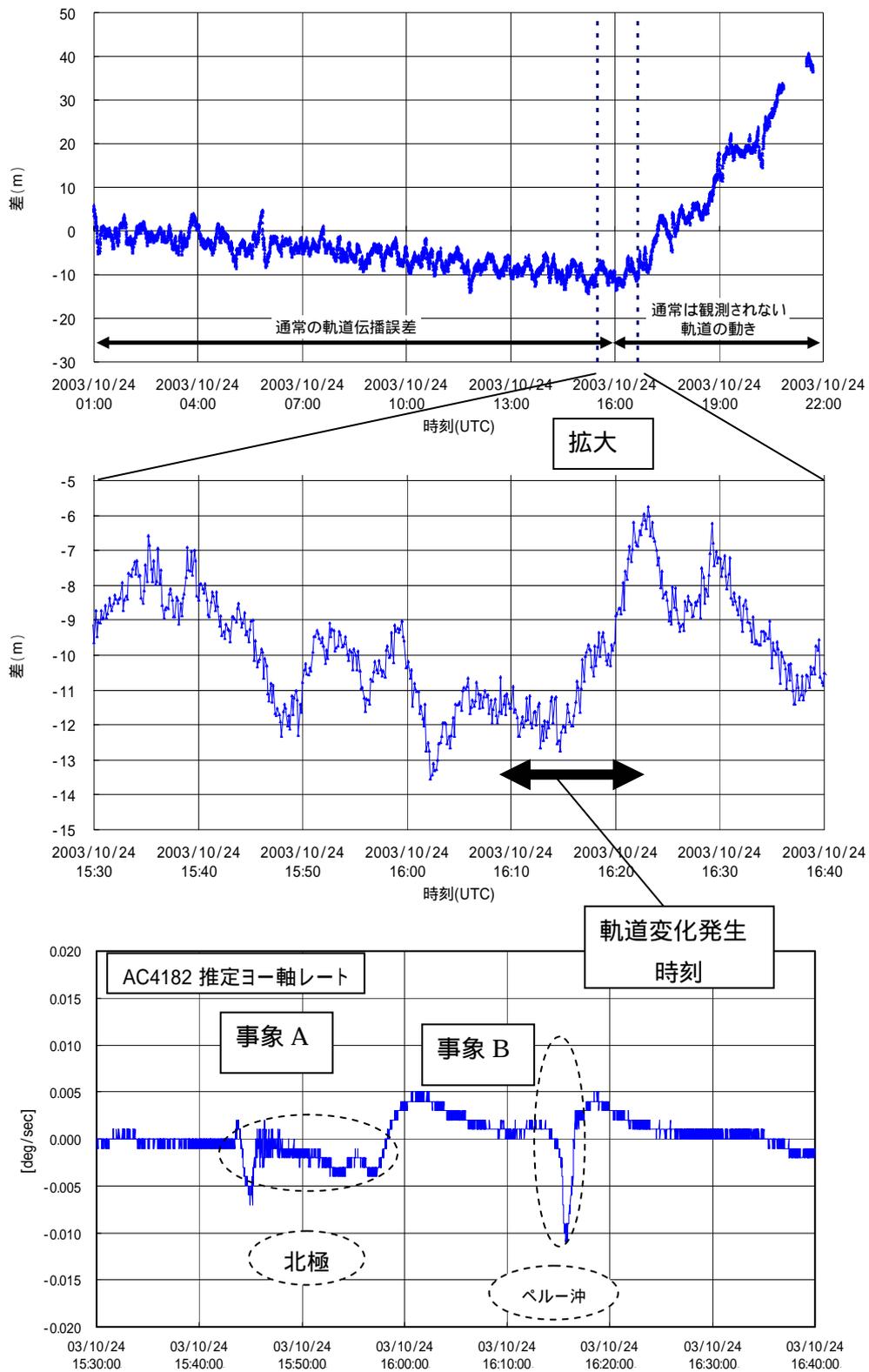


図3 - 2.2 高精度軌道決定値による軌道伝播値と搭載 GPSR による単独航法解の差及び推定軌道変化時刻

### 表4 - 1 発生電力変動時のテレメトリ変化一覧

No.	発生日時	異常事象	発生電流 (EP GEN CUR)			シャフト電流 (SHNT CUR)	PCU入力電流 (PCU IP CUR)	PDM温度 (PDM TEMP)		シャフト温度 (SHNT TEMP)		備考
			パドル1側	パドル2側	差分	差分	差分	PDM T1	PDM T2	パドル1側	パドル2側	
1	2003/3/20 22:31	パドル1側 発生電力低下	減少	変化なし	減少	変化なし	減少	低下	低下	低下	-	
2	2003/4/14 4:30 ~ 5:50	パドル1側 発生電力低下	減少	変化なし	減少	変化なし	減少	-	低下	-	-	
3	2003/4/29 14:44	パドル2側 発生電力低下	変化なし	減少	増加	変化なし	増加	低下	低下	-	低下	
4	2003/5/9 2:53	パドル1側 発生電力復帰	増加	変化なし	増加	変化なし	増加	上昇	上昇	上昇	-	
5	2003/7/5 14:02	発生電力低下 なし	変化なし	変化なし	変化なし	減少	増加	上昇	上昇	-	-	
6	2003/7/17 2:10	パドル1側 発生電力低下	減少	変化なし	減少	変化なし	減少	低下	低下	低下	-	
7	2003/7/19 3:01 ~ 4:10 (3:34)	パドル2側 発生電力低下	変化なし	減少	増加	変化なし	増加	-	-	-	低下	
8	2003/7/22 3:13	パドル2側 発生電力復帰	変化なし	増加	減少	変化なし	減少	-	-	-	上昇	

注：「-」は変化なし、もしくは判定不可能

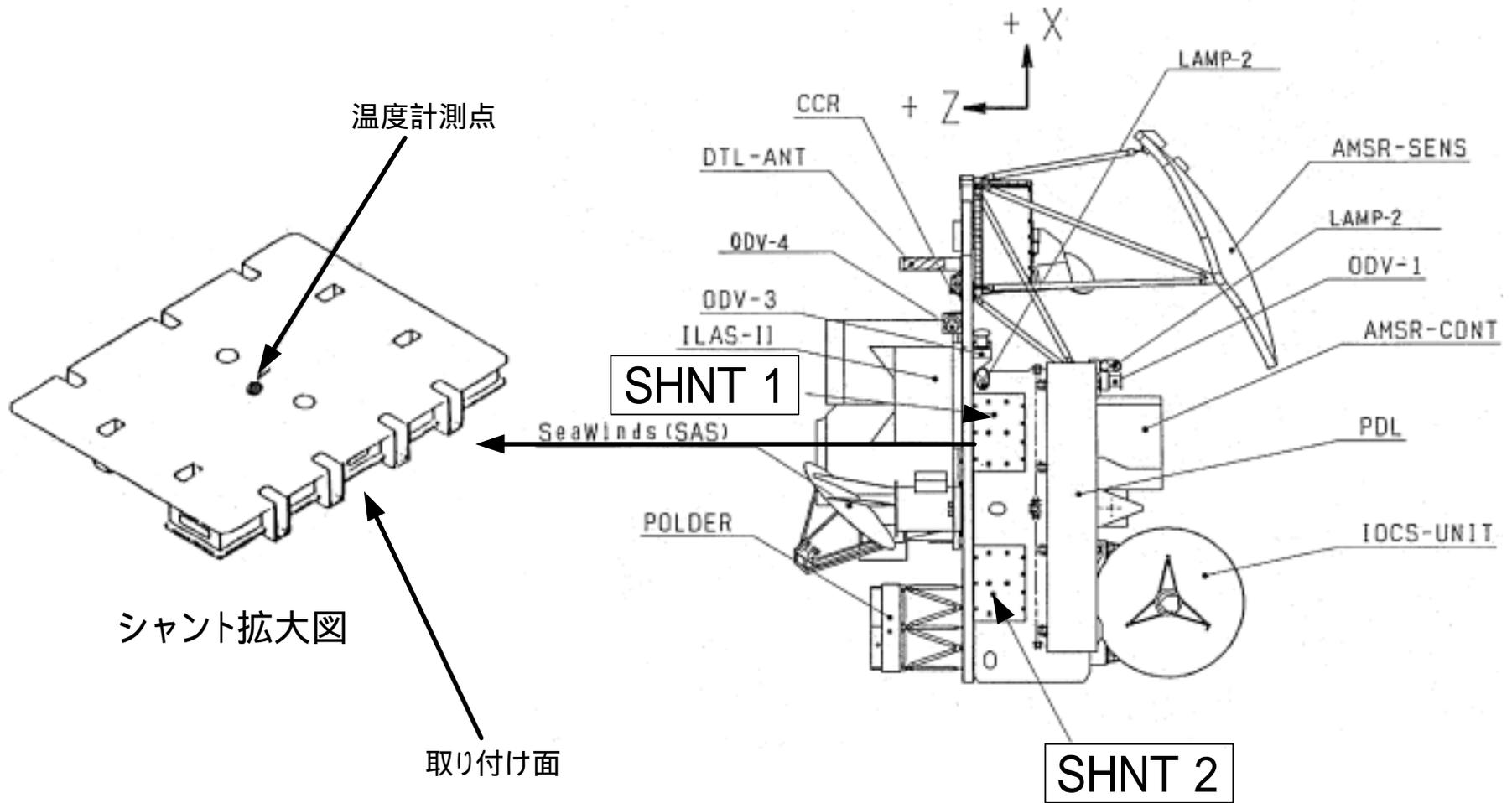


図4-1(a)シャント外観図

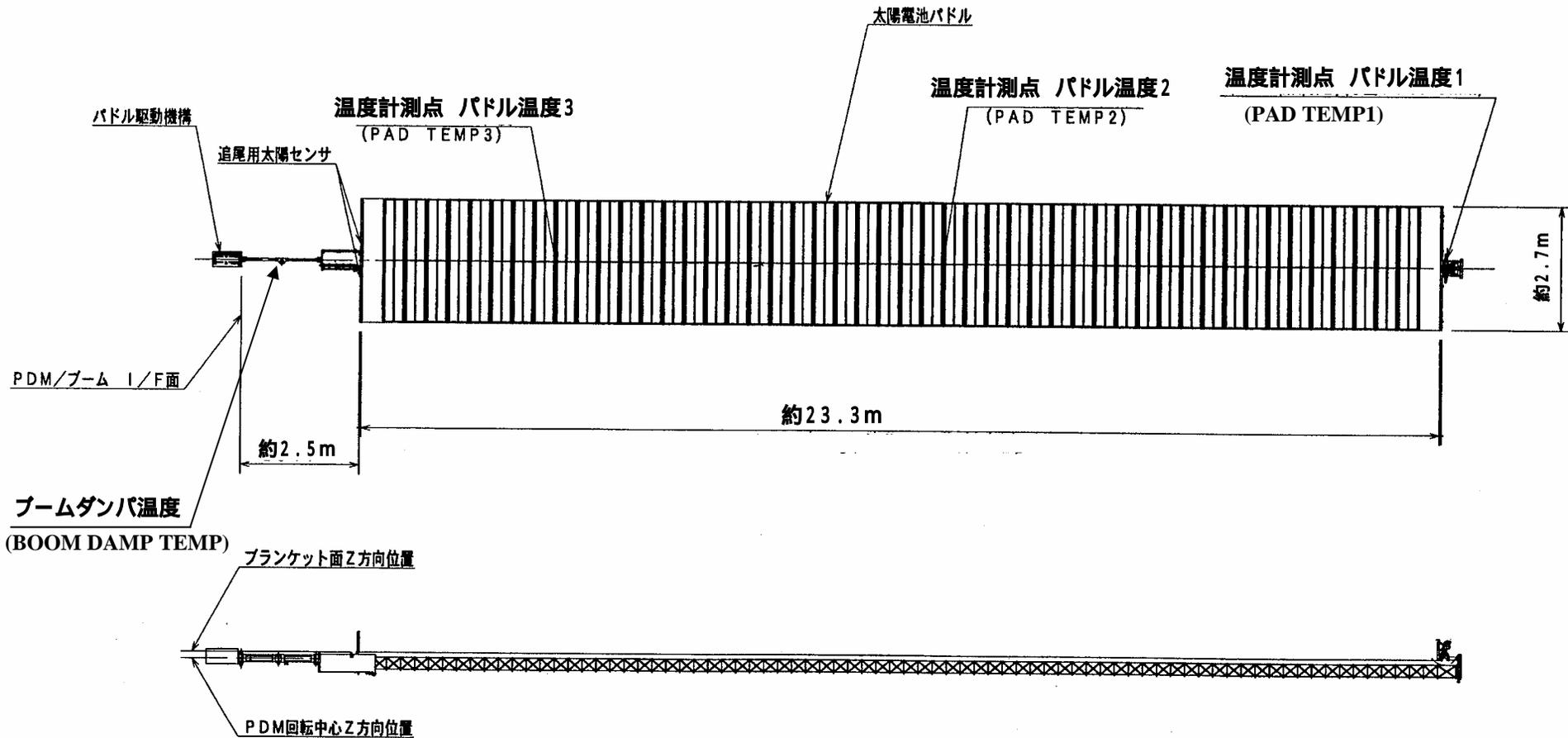


図4-1(b)太陽電池パドル軌道上展開時外観図

# パドル駆動機構(PDM)

図中の2点が温度テレメトリ計測点である。

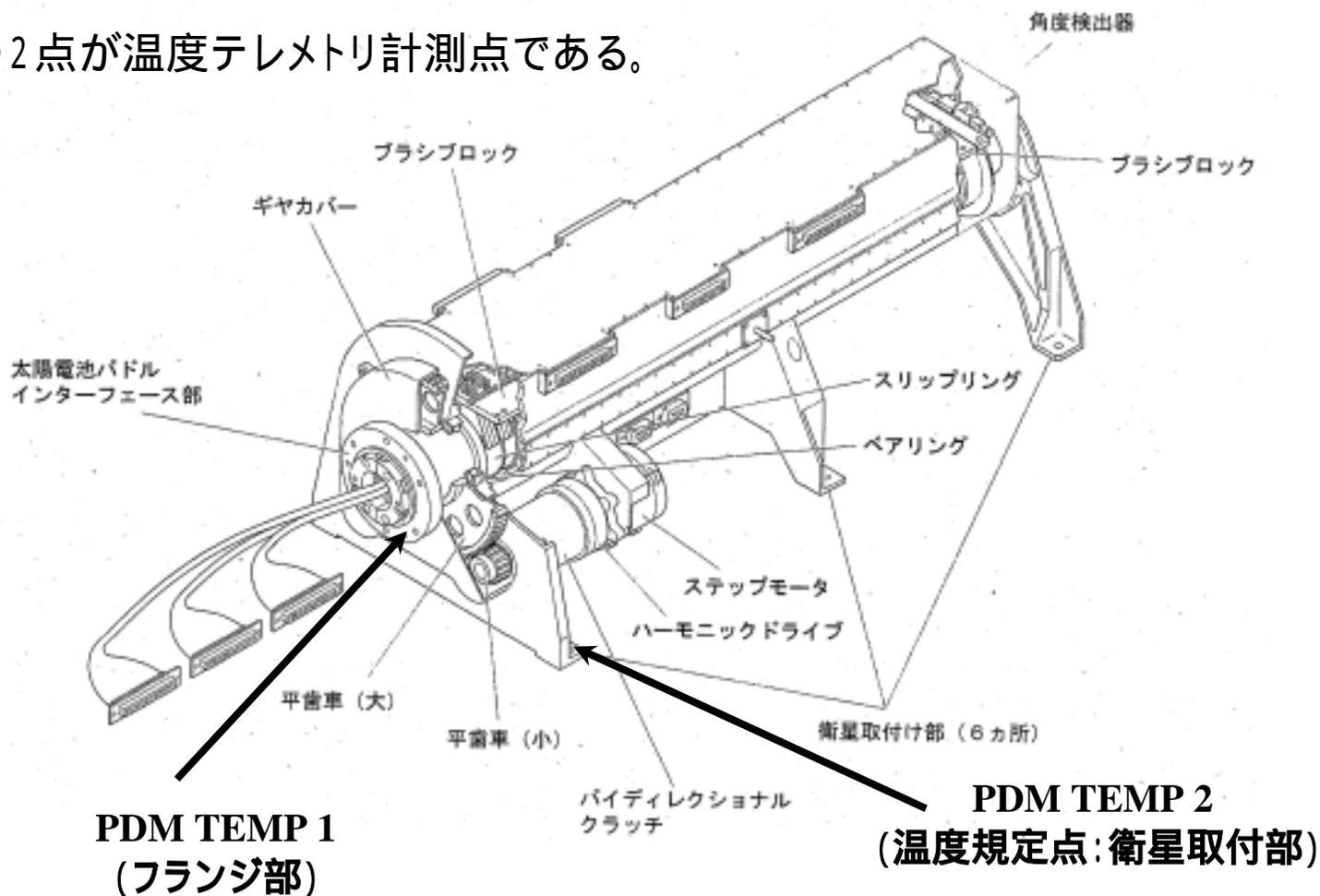


図4-1(c)パドル駆動機構外観図

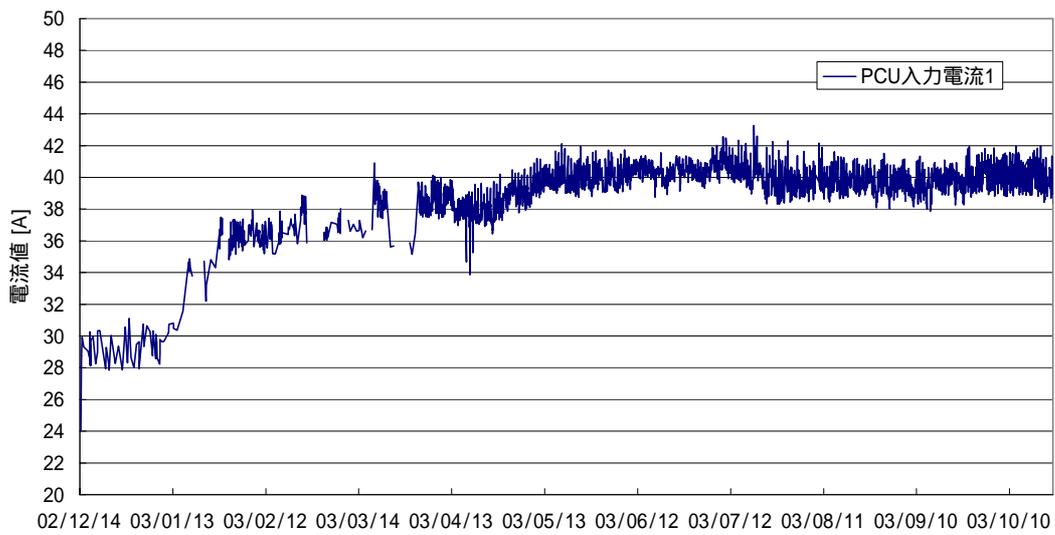
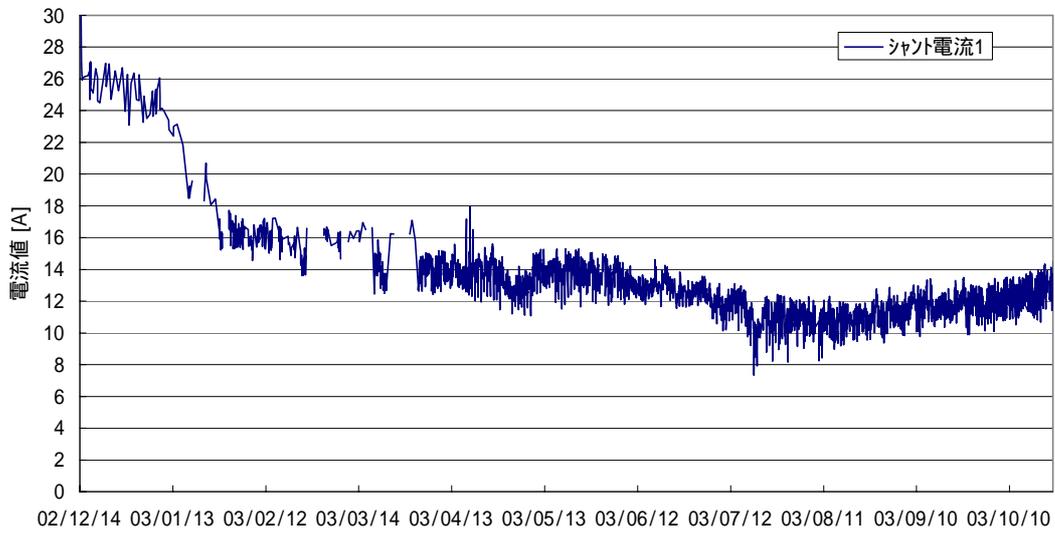
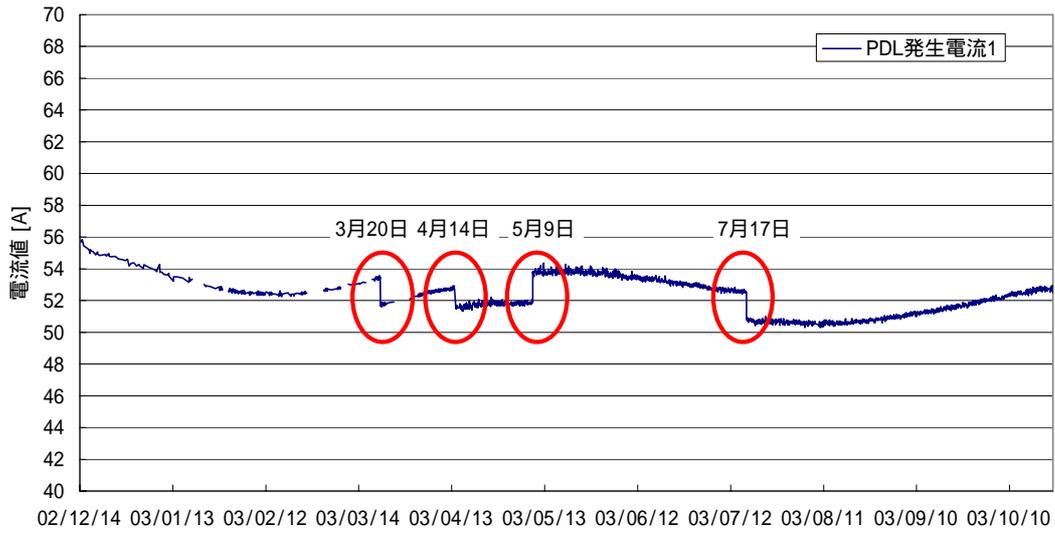


図4-2(a) 1系電流のトレンド  
(日陰明け後25分間の平均値)

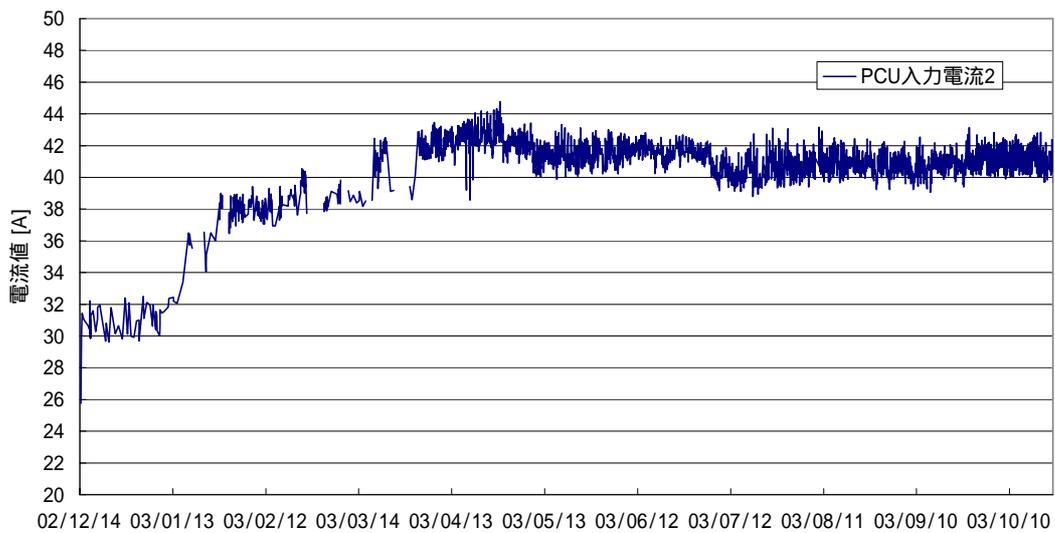
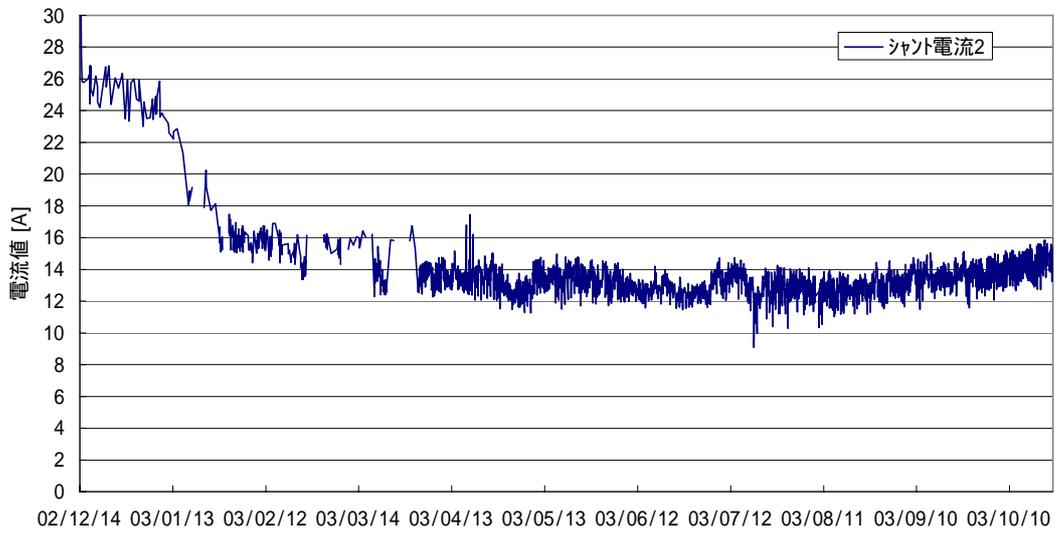
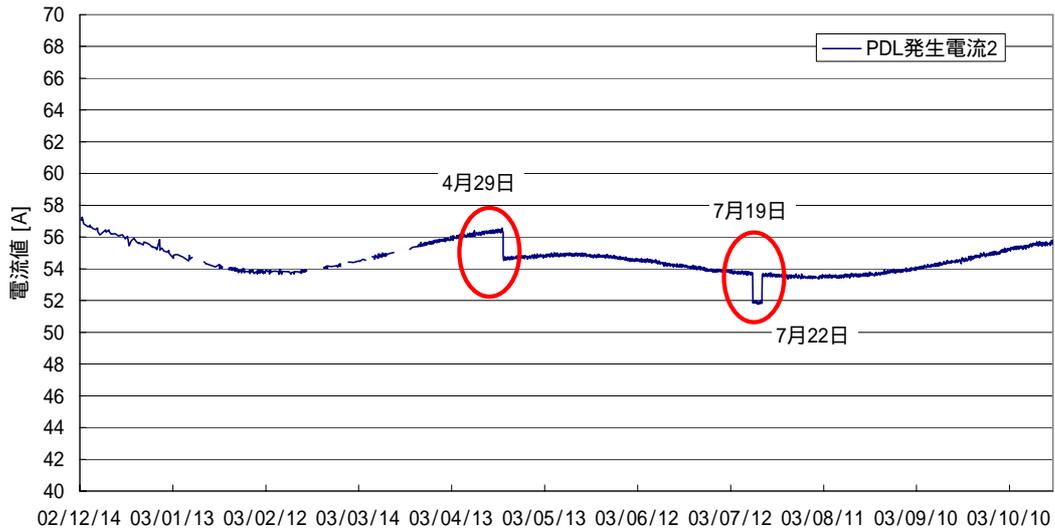


図4-2(b) 2系電流のトレンド  
(日陰明け後25分間の平均値)

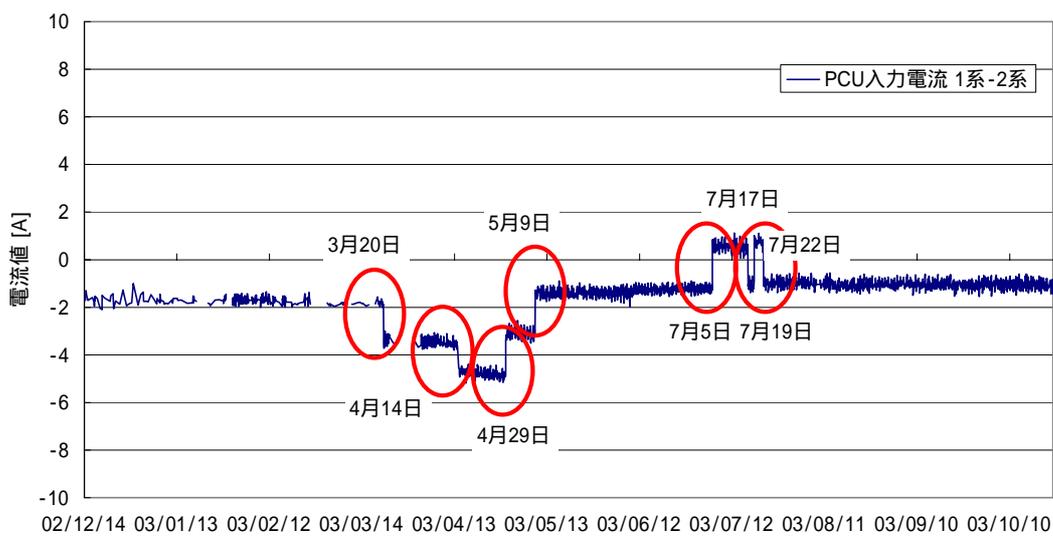
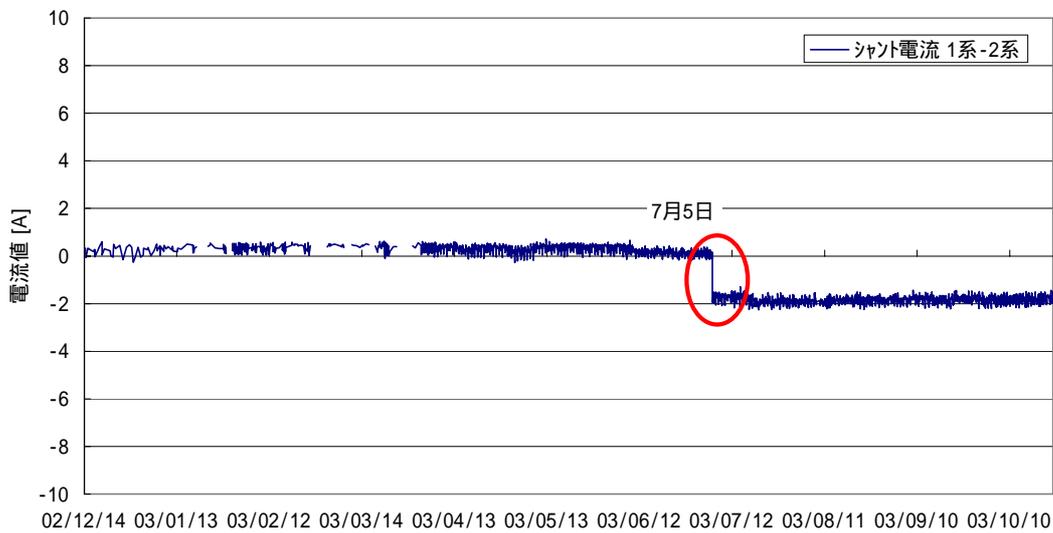
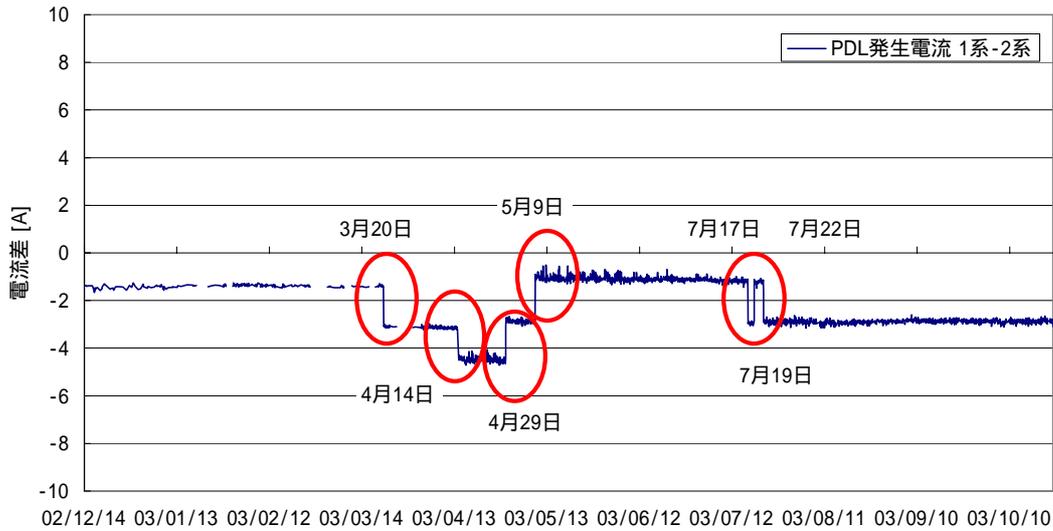


図4-3 1系電流と2系電流の差のトレンド  
(日陰明け後25分間の平均値)

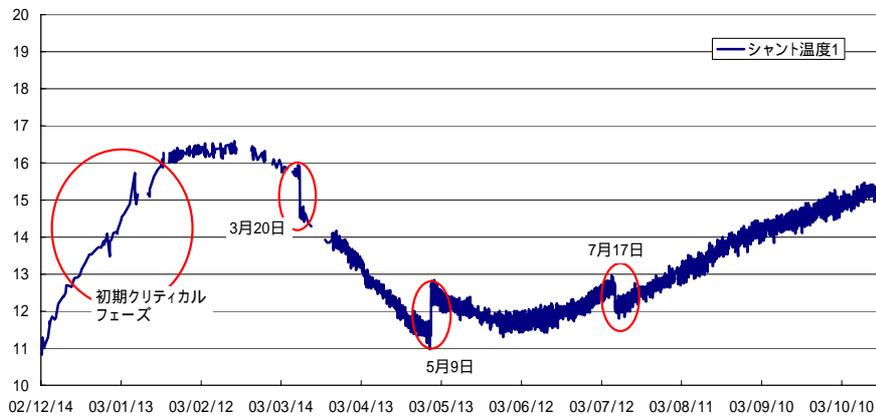
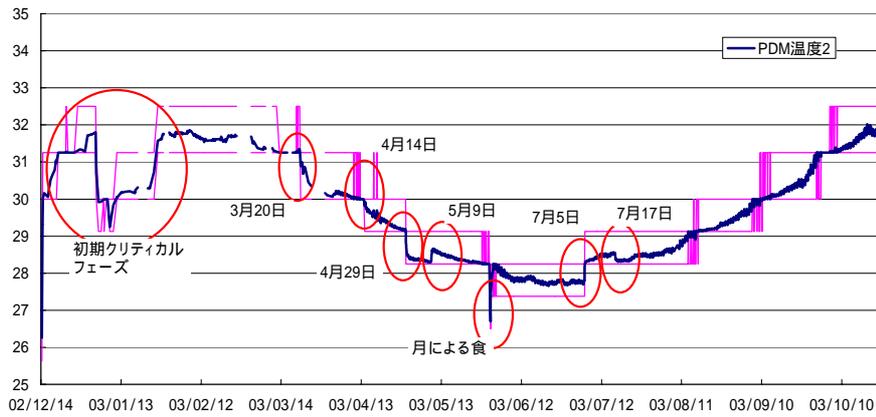
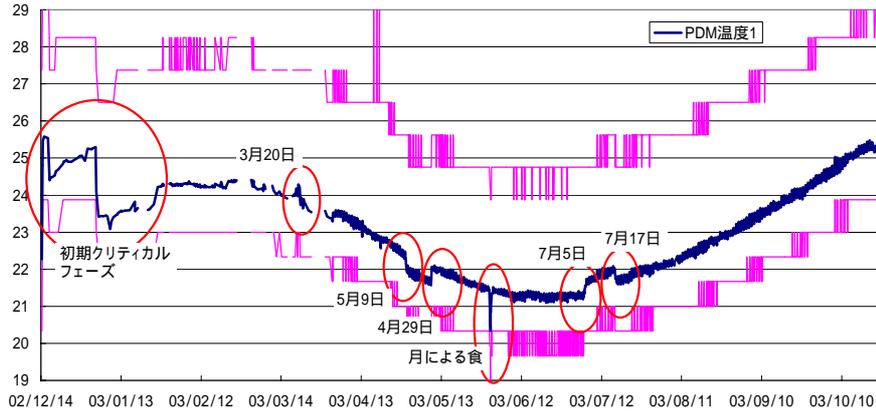
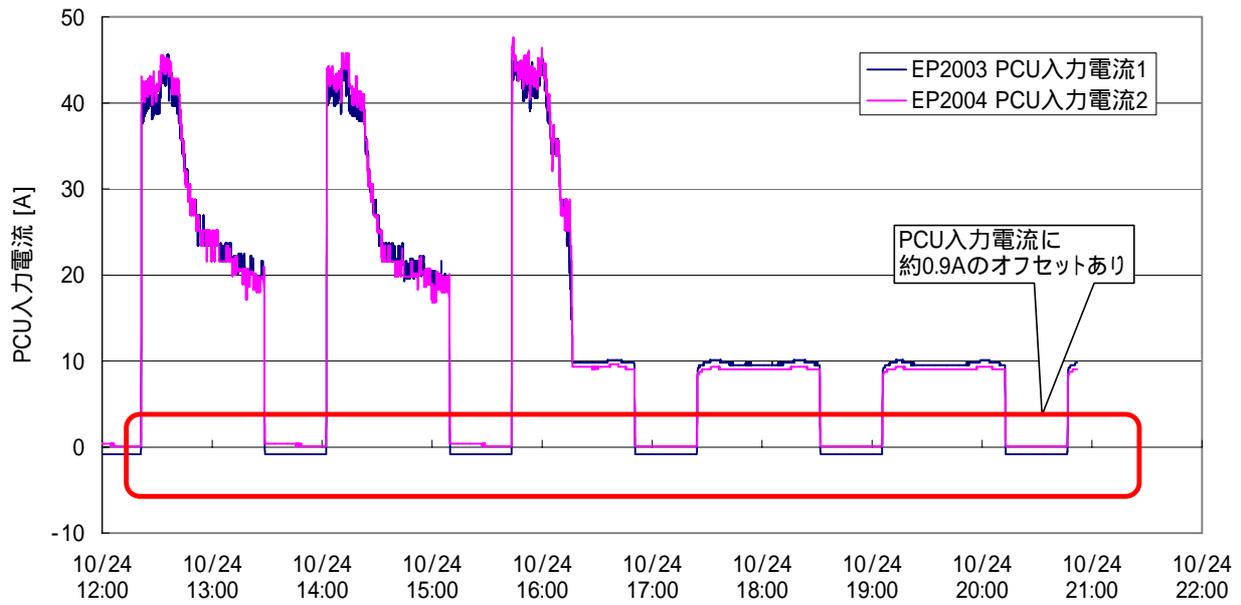
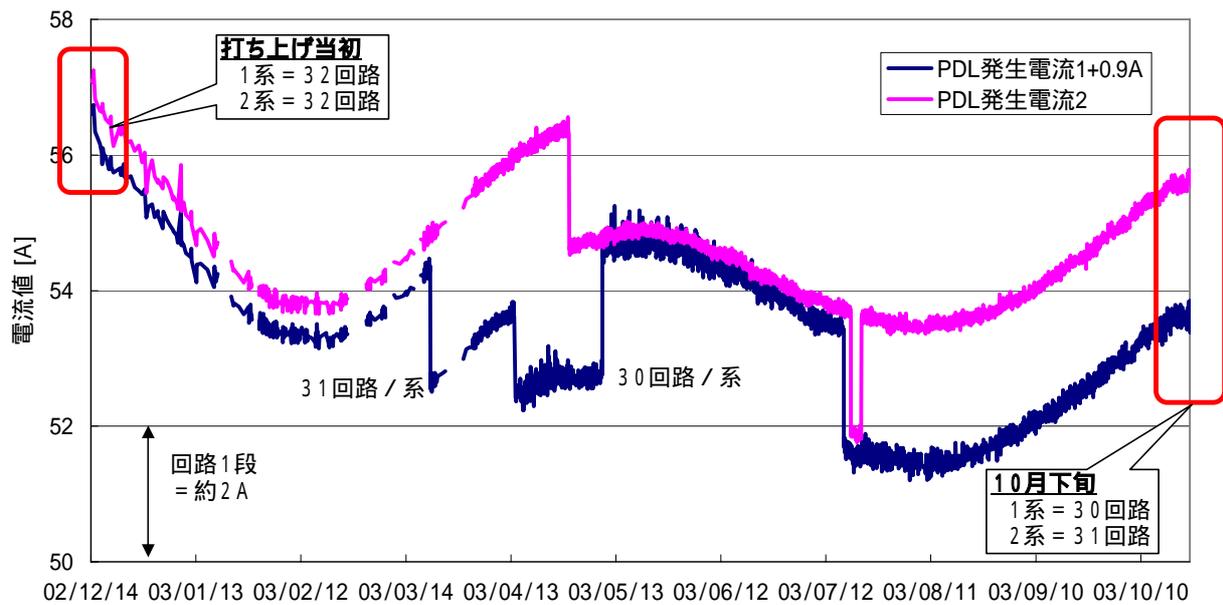


図4-4 関連温度のトレンド  
(日陰明け後25分間の平均値)



(a) PCU入力電流のオフセット算出



(b) 打ち上げ以降の動作段数の変遷

### 図4-5 動作回路数の推定

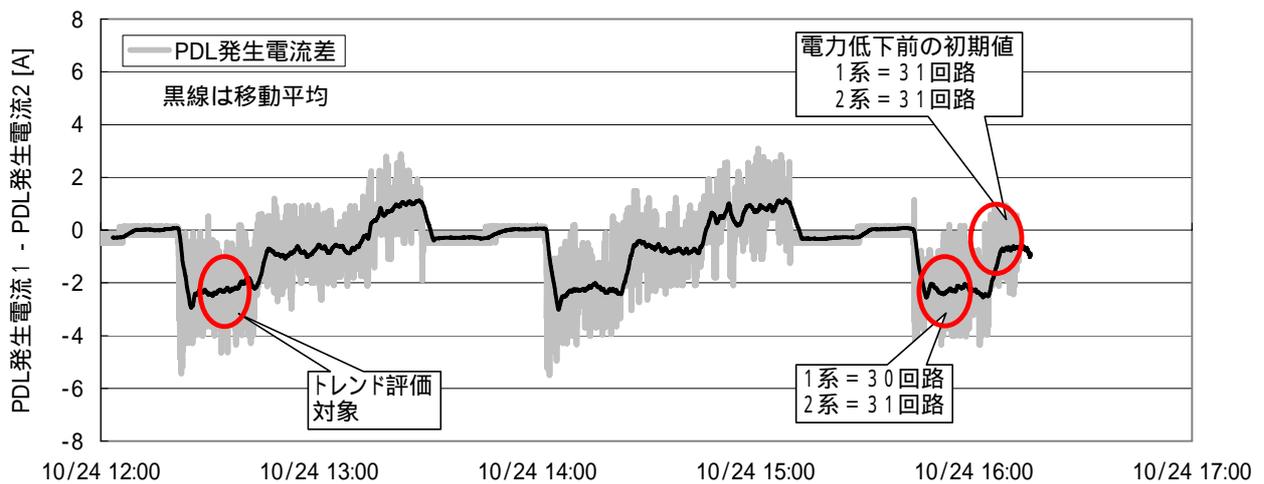
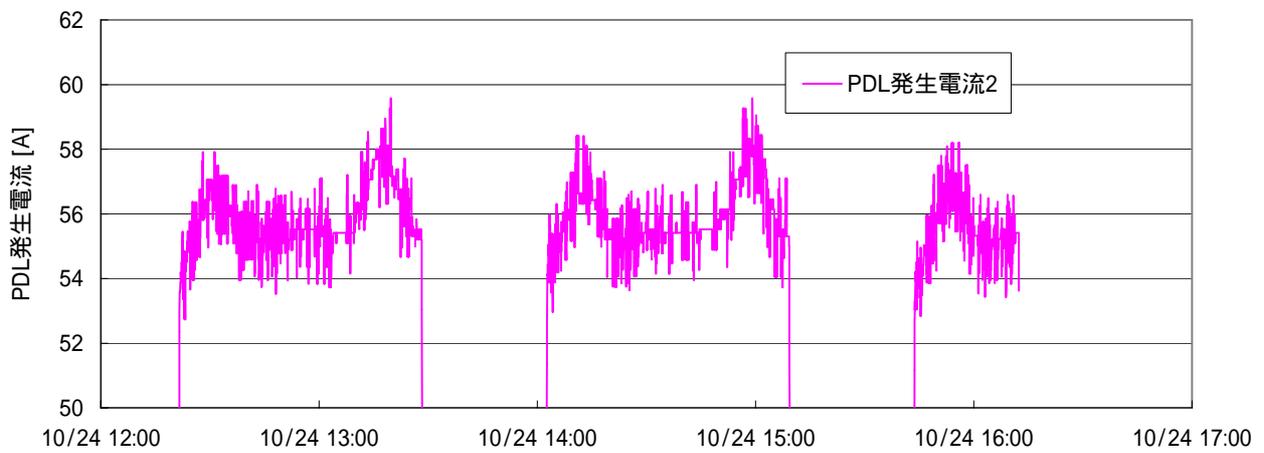
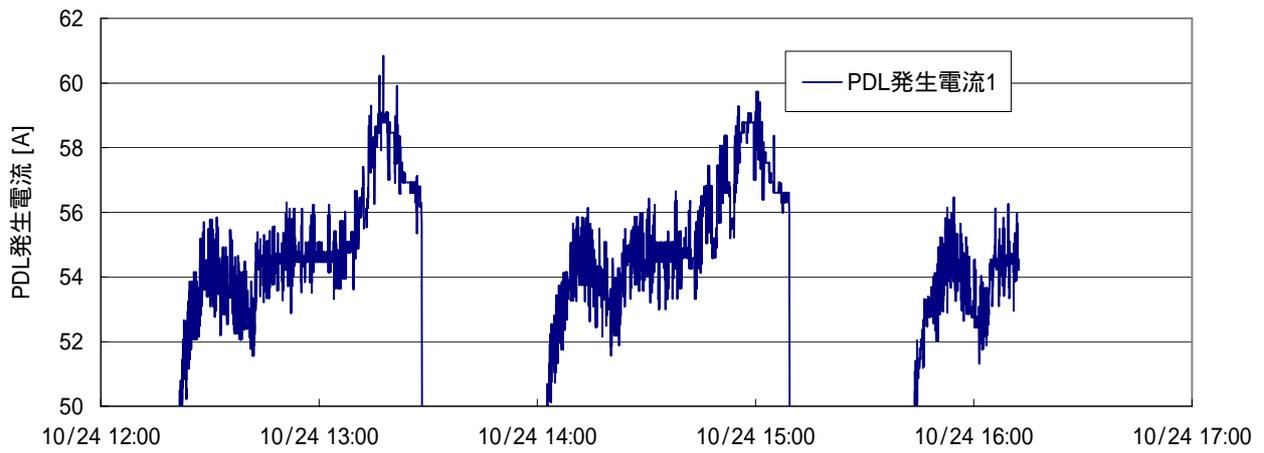


図4-6 発生電力低下直前の動作回路数の推定方法

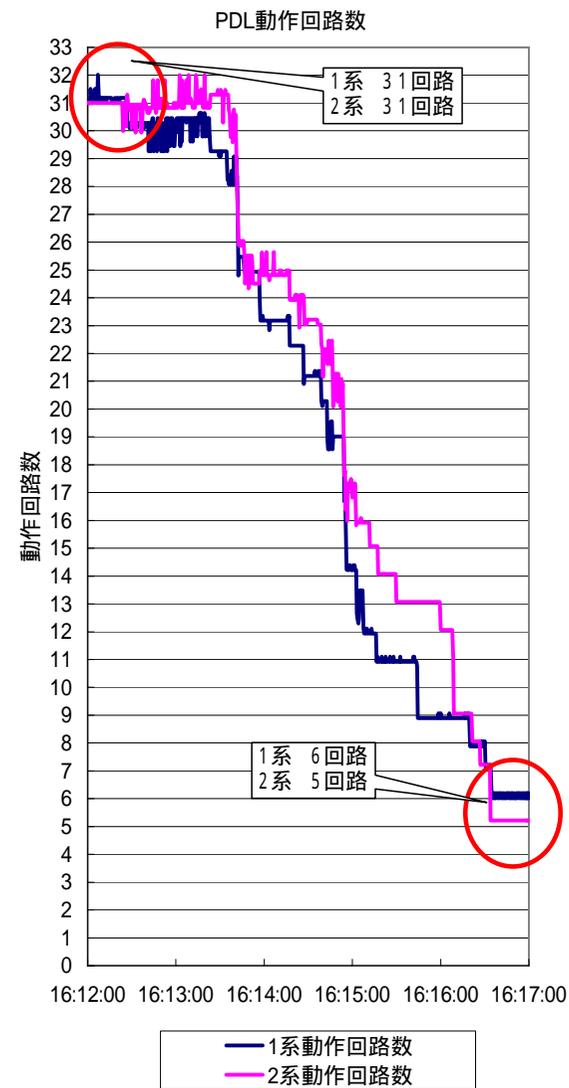
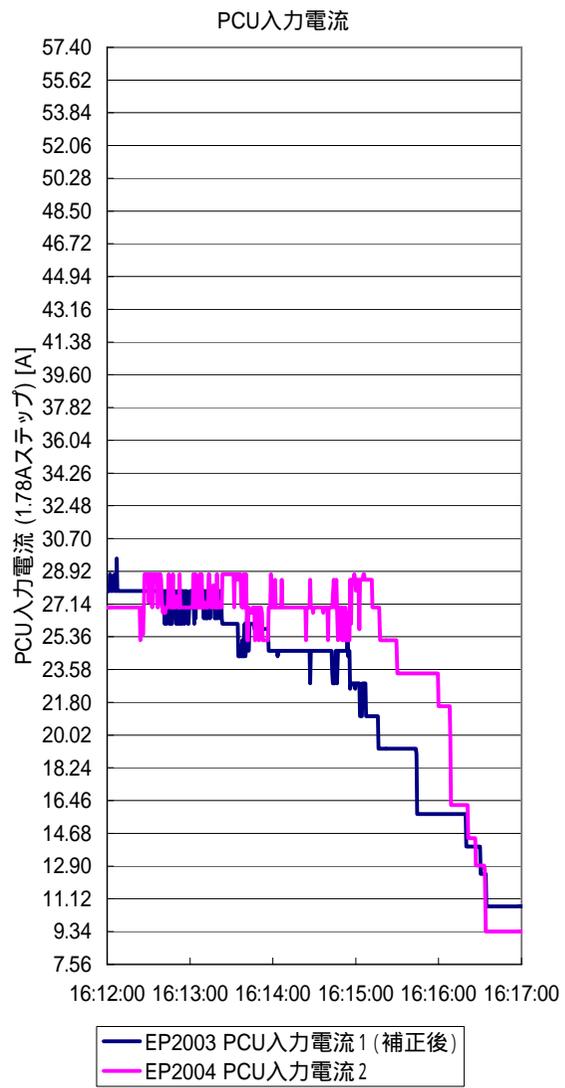
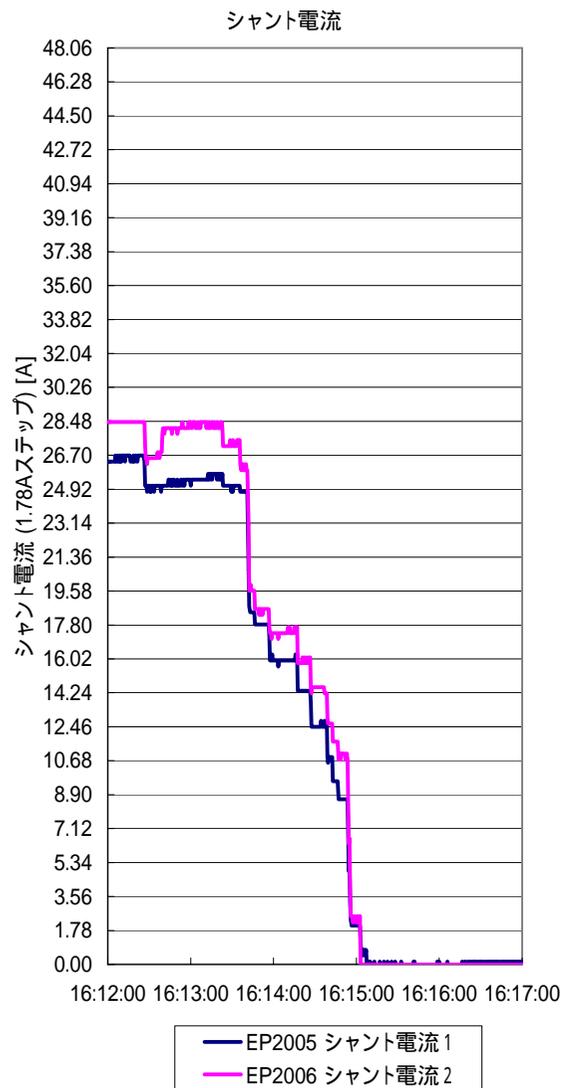


図4-7 運用異常における動作回路数の変化

## 前回の調査部会説明資料の補足説明

前回の調査部会説明資料において、必ずしも説明が十分でなかった部分および不正確であった部分について補足説明をおこなう。

(補足 1) デジタルシーケンシャルシャントの動作について

(補足 2) バッテリー容量と発生電力低下後の衛星動作時間について

## (補足 1) デジタルシーケンシャルシャントの動作について

デジタルシーケンシャルシャントは、太陽電池セルのV-I特性の動作点を変化させることで、余剰電力を制御している。概念図を図1に示す。

図2にシャント回路がOFF状態の太陽電池セルのV-I特性カーブ上の動作点を示す。シャントOFFの場合、負荷側へ50Vで供給されることとなるため、電力が発生する。

図3にシャント回路がON状態のV-I特性カーブ上の動作点を示す。シャント回路をONするとセルがショートに近い状態となり、電圧が下がり、動作点が移動する。これにより、電力を発生させないようにしている。

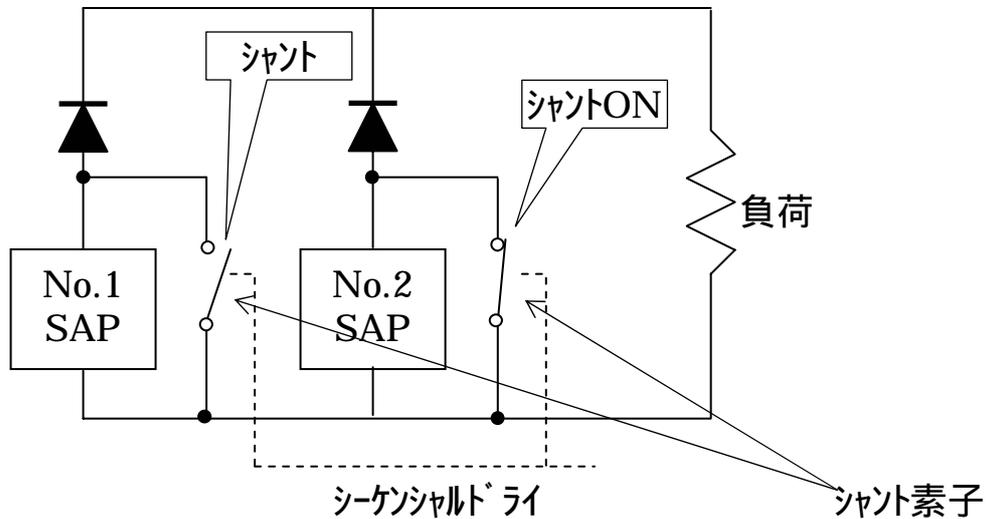


図1 デジタルシーケンシャルシャント概念図

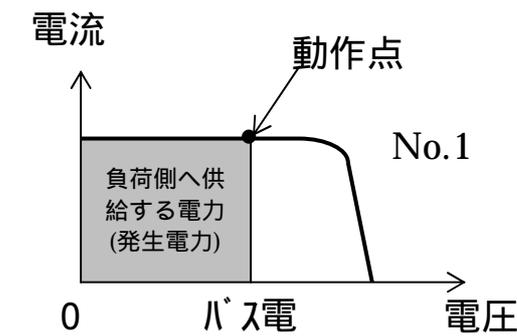


図2 シャント回路OFF時の動作

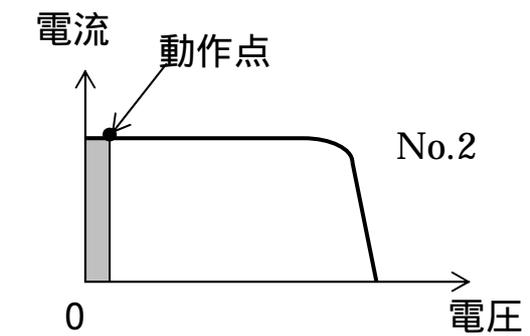


図3 シャント回路ON時の動作

## (補足 2) バッテリー容量と発生電力低下後の衛星動作時間について

10 / 24 16:16頃に発生電力の低下状態となり、23:55に通信が途絶となった。おおよそこの間の7.6時間でバッテリーを使い果たしたことになる。  
この時間の妥当性について以下に検討する。

発生電力 = 約1kW (@50V)時のバッテリー放電時間

発生電力が約1kW (@50V)、負荷電力が発生電力低下時と同等(約1.7kW)の場合で、バッテリーの容量が無くなるまでの時間を算出する。算出は電流値で実施する。

<前提条件>

・バッテリー容量: 50Ah × 4台 = 200Ah

・発生電流低下後の負荷電流 = 約42A (EP2002 PCU OT CUR)

・日照中の発生電流 = 約19A (\*1)

\*1: PCU IP CUR1(EP2003) + PCU IP CUR2(EP2004) + SHNT1 CUR(EP2005)  
+ SHNT2 CUR(EP2006)

・一周回時間 = 101分、日照時間 = 65分

<算出結果>

負荷への供給は、日陰中はバッテリーからの放電のみであり、日照中はパドルからの発生電流(1kW)とバッテリー放電とでまかなうことになる。

日照中(65分間)の発生電流(19A)を一周回で平均化すると、12A(19 × 65 / 101)となる。この分が常時供給されていることになる。

バッテリーの放電でまかなう電流量は、負荷電流 - 平均発生電流となる。

よって、バッテリー容量が無くなるまでの時間T<sub>bat</sub> は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} T_{bat} &= 200[\text{Ah}] / (42[\text{A}] - 19[\text{A}] \times 65[\text{min}] / 101[\text{min}]) \\ &= 6.67[\text{h}] \quad 7\text{時間} \end{aligned}$$

今回の場合、発生電力低下から約6時間後に軽負荷モードへ移行し、負荷電流が約1/2となっていることを考慮すると、実際にバッテリー容量が無くなるまでの時間としては、7時間 + ( = 1 ~ 2時間)となる。

発生電力 = 0W時のバッテリー放電時間

から発生電流分を0にすることで算出する。

$$T_{bat} = 200[\text{Ah}] / 42[\text{A}] = 4.76[\text{h}] \quad 5\text{時間}$$

この場合も途中で軽負荷モードへ移行するため、負荷電流が減る。これを考慮するとバッテリー容量が無くなるまでの時間としては、5時間 + ( = 1 ~ 2時間)となる。