

## ADEOS-II 100W 発生電力変動調査

### ADEOS-II 運用異常原因究明チーム

概要: 2003年10月25日(JST)に、環境観測技術試験衛星「みどりII」(ADEOS-II)の太陽電池パドル発生電力が6kWから1kWに低下する事象が発生し、衛星全損に至る不具合となった[1]。それに先立つ2003年3月20日~7月22日の期間に、太陽電池7回路に計10回の発生電力の低下及び低下の解消が発生した。原因調査の結果、発生原因の特定には至らなかったが、デブリが発生要因の有力な一候補であることが明らかとなった。

#### 1. はじめに

ADEOS-IIと同様のフレキシブル太陽電池を採用したハッブル宇宙望遠鏡にも、軌道上で一部の発生電力が低下する事象が報告されているが、その原因特定には至っていない[2]。地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS)は太陽電池パドルの破断によって運用断念に至ったが、ADEOS-IIのような太陽電池回路(100W)単位の発生電力の変動は発生していない。ADEOS-IIで発生した100W発生電力変動現象は、衛星テレメトリの解析結果等からは発生原因の特定には至らなかったが、ADEOSとのパドル構造の違いから、デブリが発生要因の有力な一候補であるとの結論を得た。本論文では、調査概要を報告する。

#### 2. 太陽電池パドル系概要

ADEOS-IIの電源・パドル系のブロック図を図1に示す。太陽電池パドルは64回路の太陽電池アレイ回路から構成されており、各アレイ回路は約100Wの電力を発生する。発生電力は、電力ハーネス、パドル駆動機構(PDM)を通して、シャント回路(SHNT)に繋がれ、SHNTは電力制御ユニット(PCU)からの制御により発生電力の余剰電力処理とバス電圧安定化を行う。ADEOS-IIのシャント回路は2台搭載されており、それに合わせてパドルの太陽電池アレイ回路は図1に示すように、1系と2系に分類されている。発生電力は、SHNT-1,2及びPCUの各コンポーネントでモニターされる入力電流から計算される。

#### 3. 異常事象

2003年10月25日(JST)に、環境観測技術試験衛星「みどりII」(ADEOS-II)の太陽電池パドル発生電力が6kWから1kWに低下する事象が発生し、衛星全損に至る不具合となった。それに先立つ2003年3月20日~7月22日の期間に、太陽電池7回路に計10回の発生電力の低下及び低下の解消が発生した。

発生電力の変動を系毎に表1及び2に、系毎の発生電流推移を変動事象と対応させて、

図3及び4に示す。発生電流は日陰明け1分後（日陰明け直後）、30分後、58分後（日陰入り直前）の値を示している。

本発生電力の変動の特徴は、全て100W単位で変動していること、1系と2系各々に独立して発生していること、及び時間経過により復帰もしくは解消することである。尚、復帰とは各周回、日照中に発生電力が復帰することをさし、解消とは全ての日照期間を通じて発生電力の低下現象が解消することをさす。

運用異常が発生した10月25日時点では、太陽電池パドル系1系の回路17及び39と2系の回路4と回路44～64のうちの一つ（特定不可能）の計4回路の異常が継続していたが、発生電力が6kWから1kWに低下する瞬間には、1系の回路17の発生電力が復帰しており、2系の回路4は発生電力の変動を伴わない異常であったことから、1系2系とも31回路が残存する状態であった。

#### 4. 不具合状況解析

##### 4.1 不具合状況の分類

100W単位の発生電力低下事象は、3つの特徴に大別できる。各々の特徴について、発生事象の概要を以下に示す。

##### 4.1.1 特徴1(シャント動作時の2回路分の電流動作)

1系と2系のシャント電流差の推移を図4に示す。シャント1系と2系は同じタイミングでON/OFF動作を行うよう設計されている。このため、正常であればシャント1系とシャント2系の電流差の平均値は0Aとなる。しかしながら、7月5日及び8月24日に、シャント電流差の平均値に1回路分(約2A)のオフセットが生じている。尚、後者は8月25日に解消している。特徴1においては、パドル発生電流(シャント電流とPCU入力電流の総和)に変動は見られない。

##### 4.1.2 特徴2(日照全期間における発生電力の低下)

シャント制御とは無関係に、日照中の全期間を通じて発生電力が低下する事象が、3月20日及び4月29日に発生している。尚、前者は5月9日に解消している。異常の発生した4月29日の発生電流を図5に示す。

##### 4.1.3 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)

日陰明け直後には低下していた電力が、シャント電流が特定の電流値に達したタイミングで復帰する事象が、4月14日、7月17日、及び7月19日に発生している。尚、7月19日に発生した事象は7月22日に解消している。各々の事象における日照中の発生電流とシャント電流の挙動を、発生電流復帰の概念図とともに図6に示す。

## 4.2 故障モードと不具合発生箇所の推定

### 4.2.1 特徴1

特徴1の推定メカニズムはHOTライン同士の短絡であり、電力変動と同時にPDM温度の変化が発生していることから、PDMより上流で発生していると考えられる。太陽電池パドル上の短絡回路（シャント電流の低下）の位置と短絡相手（シャント電流の増加）の位置関係を図7に示す。

図7の近接箇所として示した箇所で、短絡回路のHOTライン（銅ハーネス）と短絡相手の太陽電池セル裏面に短絡が発生したと仮定すると本事象を説明することができる。また、太陽電池パドルとPDM間の太陽電池パドルハーネスでHOTライン同士の短絡が発生したと仮定しても、本事象を説明できる。

### 4.2.2 特徴2及び3

特徴2と3は発生している事象は異なるものの、共通する推定メカニズムは、HOTラインとRTNラインの短絡、または太陽電池アレイストリング内でのRTNラインとの短絡であり、電力変動と同時にPDM温度の変化が発生していることから、PDMより上流で発生していると考えられる。太陽電池パドル上の異常発生箇所を図8に示す。

図8の異常が発生した太陽電池アレイストリング内で、太陽電池セル裏面とRTNライン（銅ハーネス）に短絡が発生したと仮定すると本事象を説明することができる。また、太陽電池パドルの拌み部、太陽電池パドルハーネスでHOT/RTN間の短絡が発生したと仮定しても、本事象を説明できる。

尚、特徴2のみであれば、異常が発生した太陽電池アレイのHOTラインもしくはRTNラインの開放により事象を説明できる。開放が発生していたとすると発生部位の特定は困難である。

### 4.2.3 考察

特徴1,2,3は現象そのものの見え方は異なるものの、「セル裏面と銅ハーネス間の短絡」により全てのケースを説明できる。

銅ハーネスHOTラインが太陽電池セル裏面のHOTライン近傍で短絡した場合、特徴1の事象が発生し、銅ハーネスHOTラインが太陽電池セル裏面のRTNライン近傍で短絡した場合、または銅ハーネスRTNラインが太陽電池セル裏面のHOTライン近傍で短絡した場合、特徴2及び3の事象が発生する。

## 5. デブリ衝突試験

4項で示したように、100W発生電力変動は「セル裏面と銅ハーネス間の短絡」により全てのケースを説明できる。また、ADEOSでは太陽電池パドルの破断に伴うものを除いて、100W単位での発生電力低下が発生していなかったことから、ADEOSとADEOS-

IIの太陽電池ブランケット裏面の銀蒸着テフロン(Ag/テフロン)の有無に着目し、太陽電池ブランケット裏面からデブリが衝突した場合を想定し、Ag/テフロンの影響を確認することを目的に試験を実施した。

ADEOSの太陽電池パドルの断面を図9に示す。ADEOS-IIではAg/テフロン及びそれを接着するための接着剤が存在していない。

ADEOS及びADEOS-II相当の約10cm角のブランケットに、直径74から88 $\mu\text{m}$ のソーダ石灰ガラスを約4km/sで衝突させる実験を行った。尚、MASTER2001[3]で計算したADEOS-II太陽電池パドル裏面に100 $\mu\text{m}$ 以下のデブリ及びメテオロイドが衝突する確率は約12個/m<sup>2</sup>/年である。試験後の供試体写真を図10及び11に示す。

Ag/テフロンなし(ADEOS-II相当)の場合は銅ハーネスを貫通し、カバーガラスに大きな損傷(クラック)ができた。一方、ブランケット裏面にAg/テフロンを貼付した供試体(ADEOS相当)では、銅ハーネスの貫通は確認されなかった。本試験のプロジェクトの条件は、軌道上でも十分あり得るものであり、Ag/テフロンは太陽電池ブランケットの裏面から衝突するデブリがセル面に到達することを防止する一定の効果があると言える。

本試験結果をもって、100W発生電力変動の原因がデブリであるとは特定できないが、有力な一候補であると考えられる。

## 6. まとめ

ADEOS-IIで複数回発生した「100W発生電力変動」の原因調査を行った。

ADEOSとADEOS-IIのブランケットの構造的な違いに着目し、デブリ衝突試験を実施し、デブリが発生要因の有力な一候補であることを確認した。

太陽電池パドルとデブリの衝突を回避することは不可能であり、デブリ衝突による影響を評価し、対策を検討することが必要である。

今回の試験では、Ag/テフロン1層でも一定のデブリ防止効果のあることが確認されており、本結果が今後の対策検討の一助となることを期待する。

## 【参考文献】

- [1]H. Maejima, et Al, "Investigation of Power System Failure of a LEO Satellite", AIAA #21IECEC, 16-19 Aug 2004
- [2]L. Gerlach, "HST-Solar Array 1 in-Flight Power Generation Anomalies", HST Solar Array Workshop, 30-31 May 1995
- [3]P. Wegener, et Al, "Upgrade of the ESA MASTER Space Debris and Meteoroid Environment Model", Final Report of EOSC/TOS-GA contract 14710/00/D/HK

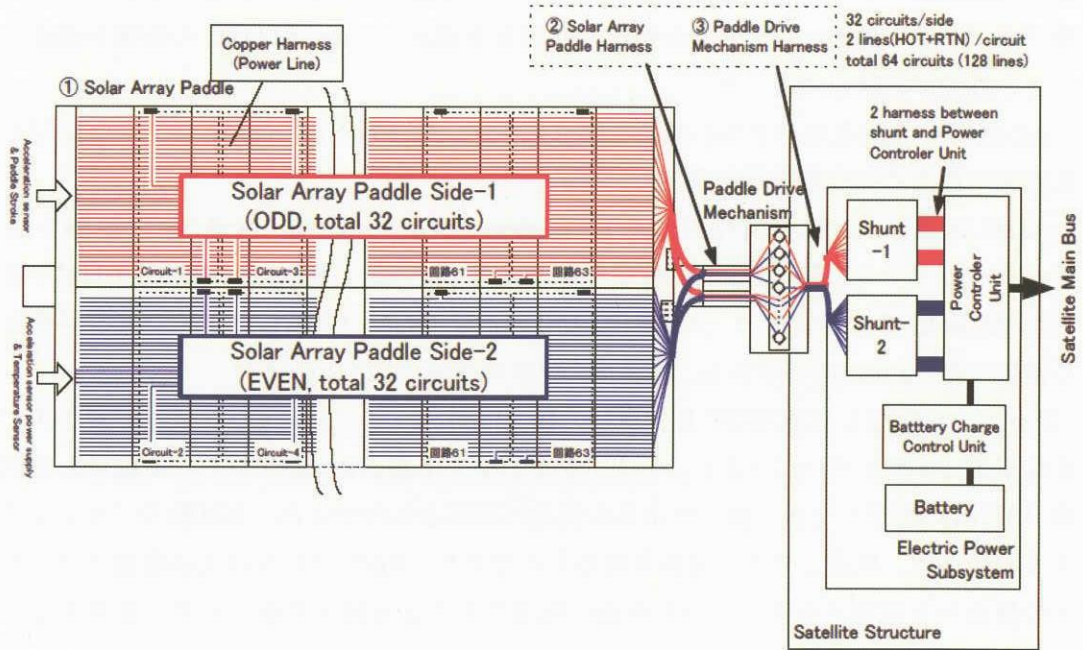


図1 ADEOS-II電源・パドル系ブロック図

表1 太陽電池パドル1系発生電力変動

No.	発生日時	異常事象	発生電流		シャント電流		PCU入力電流		PDM温度		シャント温度		特徴1 発生電流変動なし	特徴2 低下(→解消)	特徴3 日照中の復帰	備考
			上段1系 下段2系	1系-2系	1系-2系	1系-2系	上段 T1 下段 T2	上段 1系 下段 2系								
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 -	-	-	-	-	-	回路43~63 のうち1つ	-	シャント常時OFF
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	-	-	-	-	回路17	シャント電流 約15Aで復帰
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 -	-	-	-	-	-	回路43~63 (解消)	-	-
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 -	-	-	-	-	-	-	回路39	シャント電流 約33Aで復帰
9	2003/8/24 22:10~23:14	発生電力低下 なし	変化なし 変化なし	変化なし	増加	減少	-	-	-	-	-	-	-	回路31	-	シャント電流 約28Aにおいて発生
10	2003/8/25 20:04~21:10	発生電力低下 なし	変化なし 変化なし	変化なし	減少	増加	-	-	-	-	-	-	-	回路31 (解消)	-	-

注1 : No. は、第4回調査部会報告(11月27日)時のもの 注3 : 発生日時に期間を表示しているものは、表示期間のどこかで発生(不可視中)  
 注2 : 『-』は、変化なしもしくは判断できない。

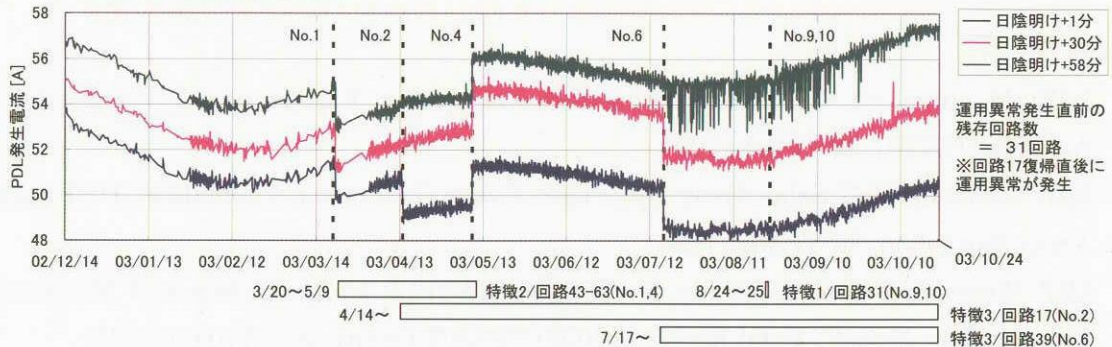


図2 太陽電池パドル1系発生電流推移

表 2 太陽電池パドル 2 系発生電力変動

No.	発生日時	異常事象	発生電流		シャント電流		PCU入力電流		PDM温度		シャント温度		特徴1 発生電流 変動なし	特徴2 低下	特徴3 日照中の 復帰	備考
			上段 1系 下段 2系	1系-2系	1系-2系	1系-2系	上段 T1 下段 T2	上段 1系 下段 2系	上段 1系 下段 2系	上段 1系 下段 2系						
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	— —	— —	— —	— —	— —	回路44~64 のうち1つ	—	シャント常時OFF
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	— —	— —	— —	— —	— —	回路4	—	—	シャント電流 約3Aにおいて発生
7	2003/7/19 3:22~3:34	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	— —	— —	— —	— —	— —	— —	—	シャント電流約28Aで復帰 RIU#5オフセット、加速度オフセット 番積角運動量の変化
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	— —	— —	— —	— —	— —	— —	—	回路32 (解消)

注1 : No. は、第4回調査会報告(11月27日)時のもの

注3: 発生日時に期間を表示しているものは、表示期間のどこかで発生

注2 : 『-』は、変化なしもしくは判断できない。

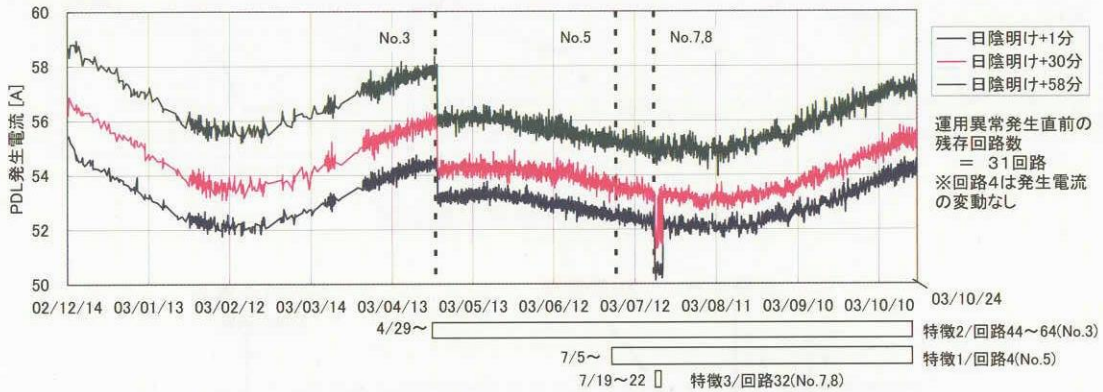


図 3 太陽電池パドル 2 系発生電流推移

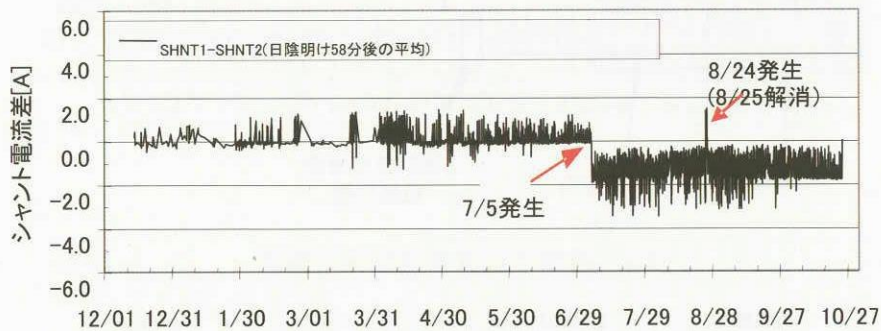


図 4 シャント電流差の推移

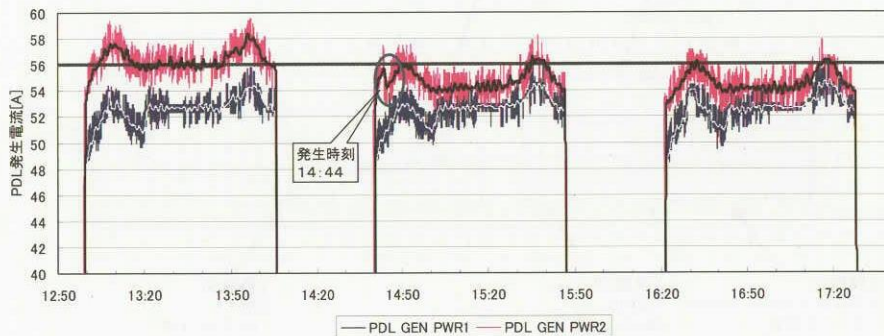


図 5 太陽電池パドル 2 系発生電流

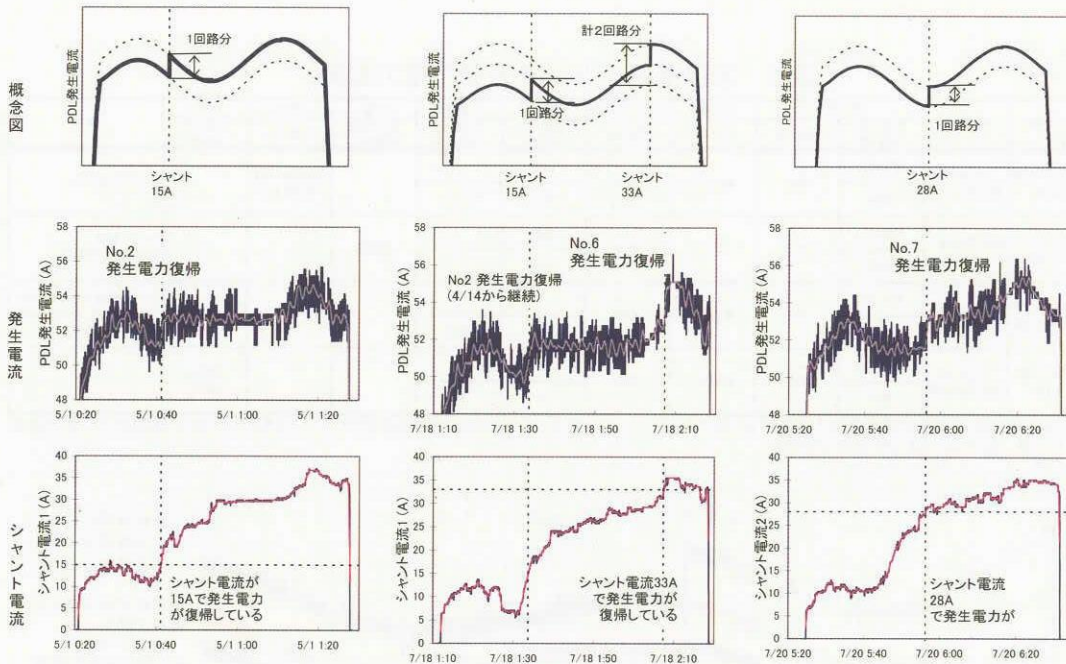


図6 発生電力復帰の概念図

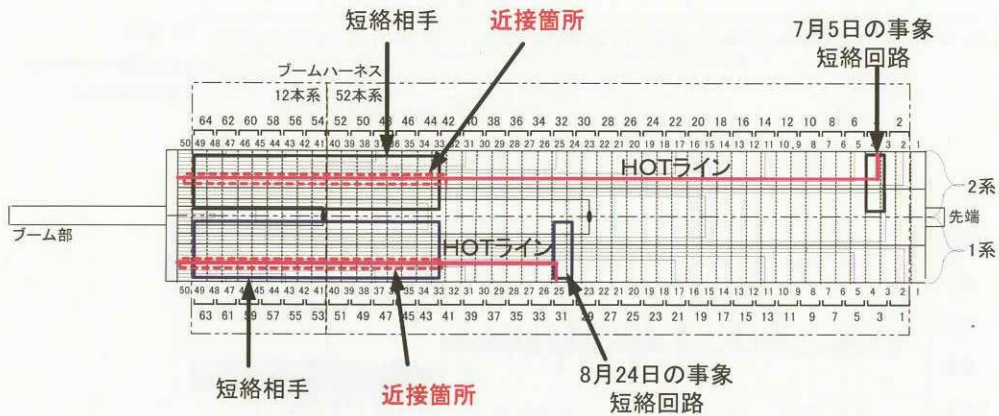


図7 特徴1の異常発生推定箇所

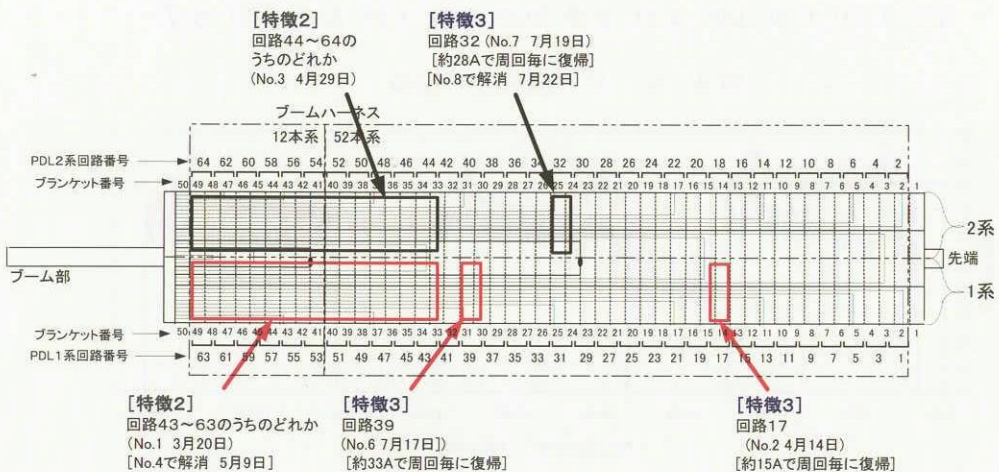


図8 特徴2及び3の異常発生箇所

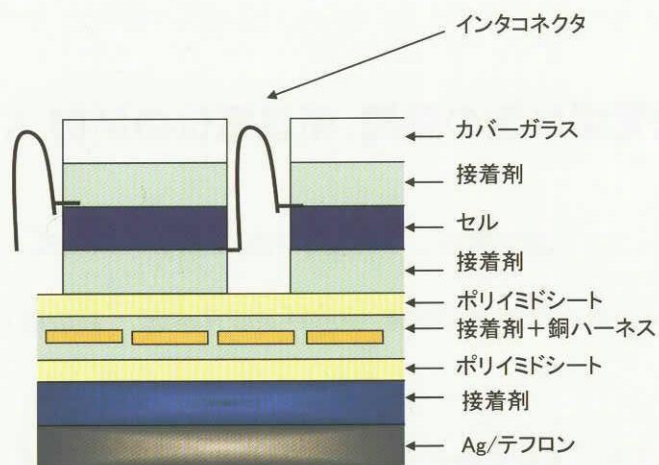


図9 ADEOS 太陽電池パドルの断面

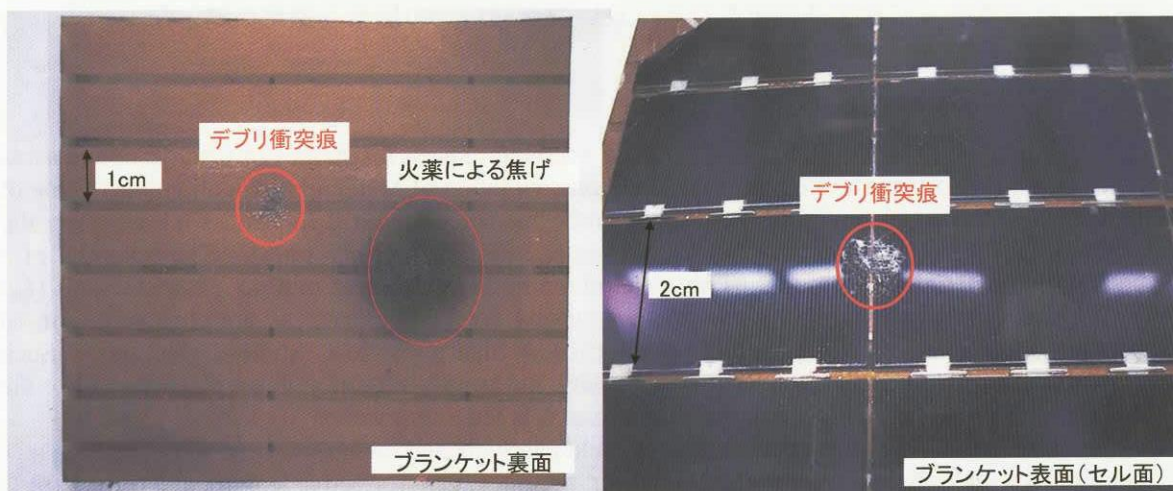


図10 試験後の ADEOS-II 相当ブランケット

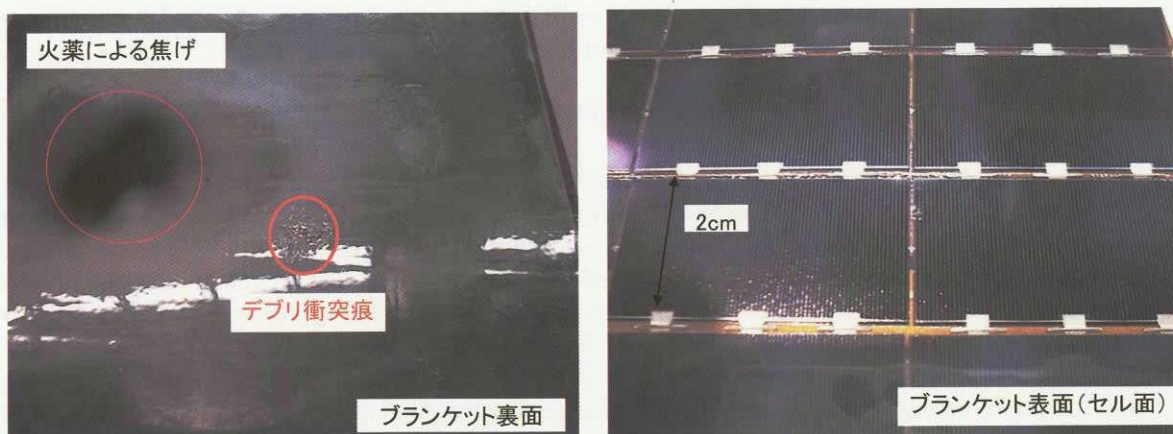


図11 試験後の ADEOS 相当ブランケット