

II12 第一期水循環変動観測衛星「しずく」 太陽電池パドルの開発・運用評価

○大瀬貴之，野崎幸重（NEC 東芝スペースシステム株式会社）
志水正人，劔持伸朗，伊藤武彦（日本電気株式会社）
加藤松明，杵野正明（宇宙航空研究開発機構）

Development and In-Orbit Behavior of Solar Array Paddle for GCOM-W1

○Takayuki Ose, Yukishige Nozaki (NTSpace)
Masahito Shimizu, Nobuo Kenmochi, Takehiko Ito (NEC)
Matsuaki Kato, Masaaki Mokuno (JAXA)

Key Words: GCOM, GCOM-W1, Solar Array Paddle, Electric Power System

Abstract

GCOM-W1 (Global Change Observation Mission 1-Water) has been developed since 2007 and was successfully launched on May 18th, 2012 (JST). GCOM-W1 has been operated without any anomalies over a year in orbit, and also Solar Array has generated electrical power as expected. This paper describes on-orbit data of PDL with a focus on power generation including space environmental degradation.

1. はじめに

第一期水循環変動観測衛星「しずく（GCOM-W1 : Global Change Observation Mission 1-Water）」は，これまでの開発・運用実績に基づき，ロバスト性とサバイバビリティを大きく向上させたシステムを有した衛星である．また，衛星バスシステムは，NEC が開発を担当した「だいち（ALOS）」をベースに小型軽量化した中型衛星バスシステムである．

「しずく」は 2012 年 5 月 18 日の打上げ以降，軌道上で不具合は発生しておらず，順調な運用が続いている．太陽電池パドル系（PDL）に関しても，打上げから太陽電池パドル展開，太陽追尾に至るまで，さらに打上げ後から現在まで発生電力供給を含む全ての機能に対して設計通りの性能を維持している．

本稿では，PDL 開発と発生電力の評価を中心に，打上げから現在までの軌道上運用結果を報告する．

2. 太陽電池パドル系（PDL）概要

PDL は，図 1 に示すように+Y 面及び-Y 面にそれぞれ 1 翼ずつ搭載され，電力を発生する太陽電池パドル（PAD），PAD を回転駆動し発生電力ならびに PAD 各種信号を衛星内部に伝達するパドル駆動機構（PDM）から構成される．また，PAD の先端には PAD の太陽指向状態を検出する姿勢軌道制御系

（AOCS）帰属のパドル搭載追尾用太陽センサ（SPSS）を搭載している．

図 2 に PDL のブロック図を，主要機能・性能および運用動作モードを表 1，表 2 に示す．PAD は打ち上げ時の収納状態から，軌道上において火工品点火により解放され，展開同期機構の作動により展開状態に移行する．パドル展開が完了後，SPSS で取得した PAD 太陽指向の情報をもとに AOCS から PDM へ駆動信号が送出され，PDM がクロックモードで PAD を太陽方向に指向させる．ホールドモード／スルーモードは運用上必要な場合にパドル駆動を停止させるもしくはスルーレートで回転させるモードである．

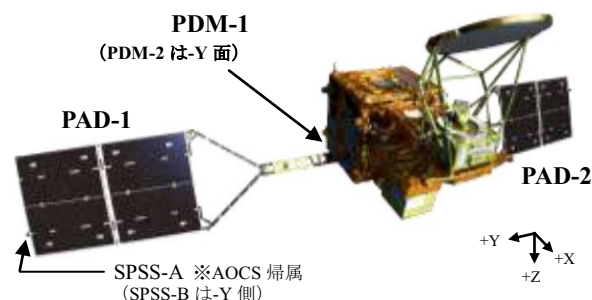


図 1 GCOM-W1 PDL 衛星搭載図

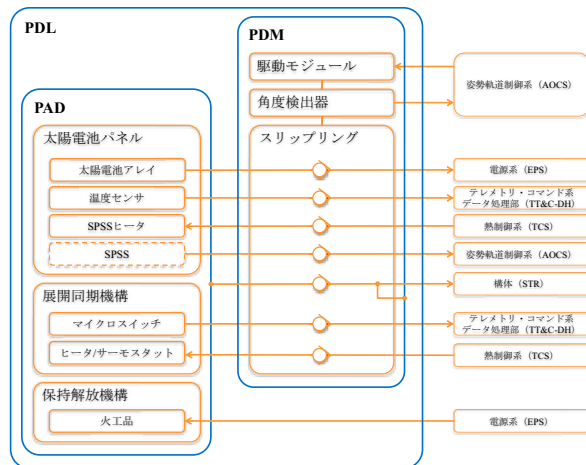


図 2 GCOM-W1 PDL ブロック図

表 1 GCOM-W1 PDL 主要諸元

項目	内容	備考
形状	2翼構成 リジッド型太陽電池パドル	
寸法	幅2.3m×長さ7.7m (片翼)	
質量	156.3kg	製造結果 (要求: 168.6kg以下)
設計寿命	5年	
発生電力 (EOL)	3,936W以上	製造結果 (要求3,880W以上)
展開時間	92.1秒以内	製造結果 (要求: 5分以内)
剛性	収納時: 57.6Hz 展開時: 0.26Hz	製造結果 (要求: 収納時50Hz以上, 展開時0.2Hz以上)
太陽追尾	・ホールドモード ・クロックモード (回転速度3.6°/分) ・スルーモード (回転速度11.25°/分)	製造結果
信頼度 (EOL)	0.9951	設計値 (要求: 0.991以上)

表 2 GCOM-W1 PDL 動作モード

コンポーネント名		太陽電池パドル			パドル駆動機構			
		PAD			PDM			
コンポーネント動作状態		収納状態	パドル展開動作	パドル展開状態	スタンバイ	ホールド	クロック	スルー
PDL 動作モード								
パドル収納モード		○			○			
パドル展開動作モード			○		○			
パドル全展開状態モード	ホールドモード			○		○		
	クロックモード			○			○	
	スルーモード			○				○

「しずく」に搭載する PDL は、「だいち」のような 1 翼式ではなく衛星システムとしてのロバスト性・冗長性向上の観点から、2 翼式の太陽電池パドルを採用している。また、現在も順調に運用を続け

ている「きずな (WINDS)」で開発した PAD¹⁾と同一の設計とし、既存技術を最大限活用することで、さらなる信頼性向上を実現した。「きずな」からの変更点は、発生電力要求に対するパネルの枚数の削減と、衛星本体とのインターフェースの変更（ヨーク・ブームの長さを変更）のみであり、基本的な構造は同じである。本パドルは、次号機の GCOM-C1 も含めてシリーズ化された NEC の標準パドルとなっている。

ただし、「きずな」は静止軌道衛星であり「しずく」が飛翔する環境とは大きく異なる。そのため、「しずく」PAD では、同一部材・同一工程にて製造したクーポンパネルによる熱真空試験／熱サイクル試験、帯電放電試験を行い、低軌道周回衛星としての設計検証および製品寿命の確認を行った。その結果、熱真空試験／熱サイクル試験では、軌道上 14.5 年相当のサイクル負荷を供した後でも正常な発生電力性能を有し、帯電放電試験によって高い耐帯電放電性能を有することを確認した。また、帯電放電試験結果と帯電解析によるミッション期間中の放電予測から発生電力低下量を見積り、発生電力解析に取り込んで設計を行った。

3. 運用評価

3.1. クリティカル運用～初期機能確認運用

「しずく」は 2013 年 5 月 17 日 16:39 (UT) に種子島宇宙センターから打上げられた。同 17:02 にロケットから分離され、クリティカル運用を経て初期機能確認にて衛星、パドル共に機能性能が要求を満足していることを確認した²⁾。

打上げ時の PDL の発生電力、展開信号ステータス及び回転角度のテレメトリを図 3 に示す。ここに示す発生電力は、電源系 (EPS) 内でモニタしている出力電流から PDL 出力端における発生電力に換算したものである。

(1) パドル展開

打上げ約 26 分後の同日 17:05:16 に AOCs の自動シーケンスにより火工品点火コマンドが送信され、PAD-1 が 11 秒、PAD-2 が 12 秒で展開した。これは、ノミナル時の展開信号予測 (11.5 秒) とよく一致しており、PAD 展開が正常に行われたことを示している。PAD 展開の様子は、図 4 に示すようにモニタカメラ (DM) で撮像され、画像からも問題なく展開したことが確認できる。

(2) パドル駆動

太陽追尾駆動開始後は、PDM の角度信号テレメトリから両翼とも正しい回転方向に動作し、PDM-1、

PDM-2 共に一定に角度変化しており、要求通り、一定速度で回転していることが確認できる。

(3) パドル発生電力

発生電力は、太陽電池が最高温度となり最小電力となる日照中心（同時に外乱光が最も小さい）にて評価した。日照中心における軌道上実績値は、約 4760W～4780W であり解析予測値 4750W とほぼ一致しており、設計通りの性能を示し問題ないことが確認できる。また、極域飛行時（日照入り後と日陰入り前）における発生電力の増加は、地球アルベドによって太陽電池パドルに入射する太陽光が増加するためであり、その影響は最大+5%程度であった。

(4) パドル温度

図 5 に示す PAD の各パネルに実装した温度センサのテレメトリを示す。軌道上の温度は、 -88.1°C ～ $+89.8^{\circ}\text{C}$ で推移しており、解析予測通りの結果が得られている。また、温度センサと表裏反対側に位置するアレイ回路のシャント状態に合わせて、検出温度が変化しており、その際の太陽電池の変換効率に応じて太陽光吸収率が予測通りに変化することを確認している。PDM の温度については、PDM-1 は衛星構体の影になり、PDM-2 は太陽光が直接入射するなど熱環境が搭載位置で大きく異なるが、両者とも解析予測内で推移している。

以上より、PAD 展開が正常に完了し、太陽捕捉後からは PDM が AOCS からの駆動信号で日照・日陰を通して正常に動作し太陽電池面が常に太陽方向を指向するよう制御していることを確認した。また、日照期間においては所定の発生電力を供給していることを確認した。

3.2. 定常運用

「しずく」は全ての衛星機能性能確認が終了した 2013 年 8 月 10 日から定常運用段階に移行した。PDL は定常運用期間を通じて、発生電力、温度、太陽追尾駆動も全て正常に動作している。

2013 年 7 月までの発生電力予測プロファイルに対する軌道上実績を図 6 に示す。この発生電力プロファイルは打上げ 1 年目と 5 年目の太陽光入射効率の増減が変動する時期（図中グラフマーカー表示）について発生電力解析を行い、その中間年は線形補完したものをカーブフィッティングしたものである。軌道上実績値は、打上げから現在まで解析ノミナル値とよく一致しており、地上試験結果から予測される出力が軌道上でも得られていることが確認できる。

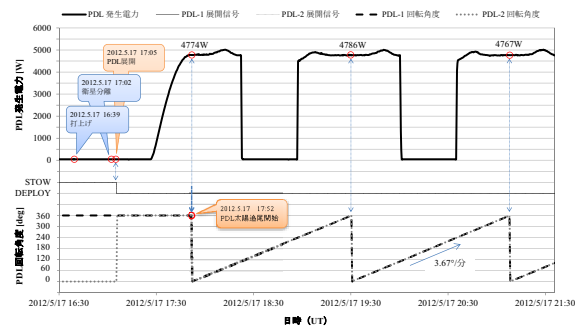


図 3 打上げ時の PDL 関連テレメトリ

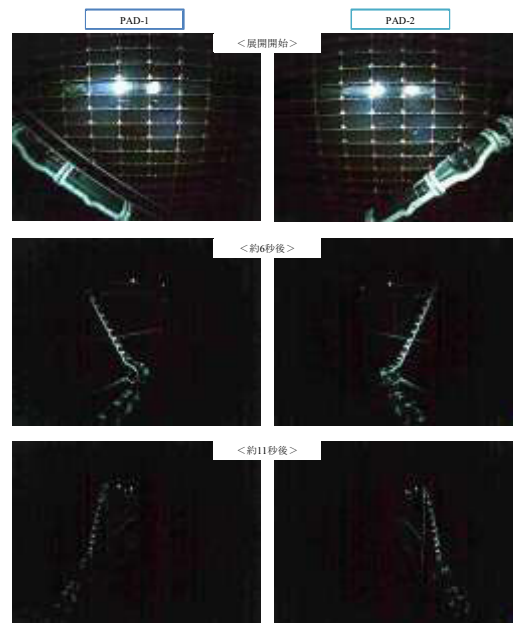


図 4 PAD 展開画像（DM 画像）

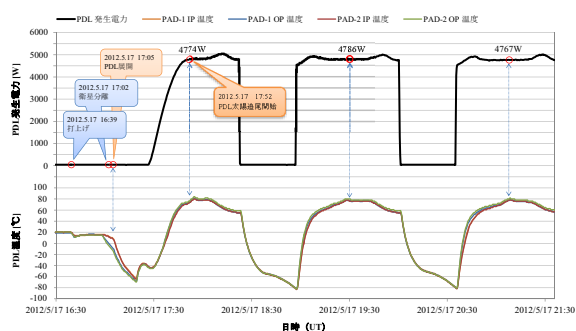


図 5 PAD 温度テレメトリ

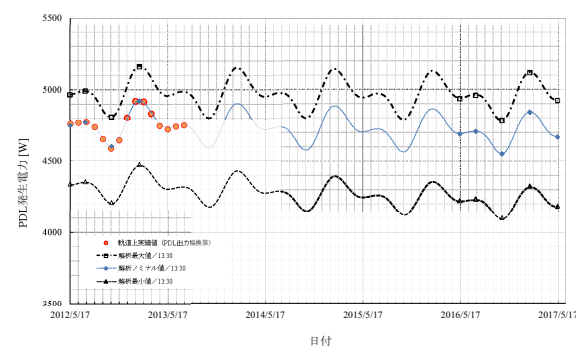


図 6 発生電力予測に対する軌道上実績

4. PDL 発生電力の経年変化

「しずく」における PDL 発生電力の経年変化は、宇宙環境による太陽電池性能の劣化予測から判断して妥当であり、PDL は EOL においても要求電力である 3880W 以上を供給できる見込みである。

以下に打上げから現在までの発生電力の経年変化に対する評価と、発生電力低下の最大の要因である放射線に対する劣化予測の妥当性について示す。

(1) 発生電力の経年変化

宇宙環境で動作する太陽電池に対しては、放射線、紫外線、原子状酸素、帯電放電などの複合環境による劣化要因が存在する。そのため、発生電力予測では上記を全て考慮した解析を行っており、現在の軌道（昇交点通過地方太陽時：13 時 30 分）ではミッション期間 5 年の最悪条件で 154W の低下を見込んでいる。必ずしも毎年平均的に劣化するとは限らないが、初年度の劣化見込みを内挿で算出した場合、毎年 31W の低下となる。

図 7 に 2012 年 7 月 17 日（14 周回分）と 2013 年 7 月 17 日（13 周回分）の日照時の発生電力を示す。またそのときの温度（PAD-1, PAD-2 の平均値）を同様に図 8 に示す。打上げ月の 5 月ではなく、7 月を比較したのは、衛星の初期機能確認による負荷変動が大きい時期を避けたためである。外乱光が最も小さい日照中心域における平均発生電力は 2012 年が 4773W（予測値：4770W）、2013 年が 4750W（予測値：4754W）であり、経年変化としては 23W の発生電力低下のため、先に述べた予測に対して問題ない推移である。この発生電力の低下は、図 8 に示すように PAD 温度が 2012 年と 2013 年で変化がないため、太陽電池出力の温度依存性によるものではなく、先に挙げた環境劣化要因によるものと判断できる。

本結果より、「しずく」における発生電力の経年変化は予測した範囲内であり、発生電力予測解析における環境劣化は適切に考慮されていると判断する。

(2) 放射線劣化予測の妥当性評価

「しずく」では、図 10 に示すように、電源系シャント（EPS/SHNT）において全ての太陽電池アレイ回路の出力電圧（TAP 電圧）を検出しており、アナログシャント回路（AS 回路）がシャントされている際は上部アレイの開放電圧 V_{oc} をテレメトリで確認することが可能である。上述の発生電力低下における最大の要因は放射線による太陽電池性能の劣化であるため、実際の太陽電池開放電圧の変化量から放射線劣化予測の妥当性について評価する。

開放電圧に対する放射線被曝量は、5 年間で $2.1 \times$

10^{13}e/cm^2 （1MeV 電子線換算）を見込んでいる。毎年平均的に劣化すると仮定し初年度の劣化見込みを内挿で算出した場合、開放電圧が 1.0% 程度低下する見込みである。

2012 年 7 月 17 日と 2013 年 7 月 17 日のアナログシャント回路の開放電圧を比較した結果が図 9 であり、2012 年は日照中心付近で 31.5V を示したが、2013 年では 31.1V と約 0.4V の低下が確認できる。テレメトリの分解能が 0.42V であるため、1 デジットの変位である。仮に 0.2V～0.6V の劣化と考えると、劣化率は 0.6%～2.0% となり予測していた開放電圧の劣化率である約 1.0% と概ね一致しているため、放射線劣化予測は妥当である。

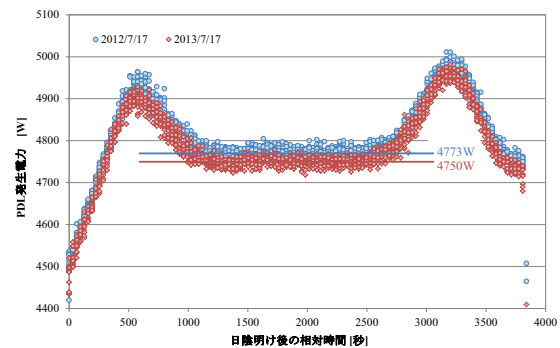


図 7 発生電力比較（2012/7/17 - 2013/7/17）

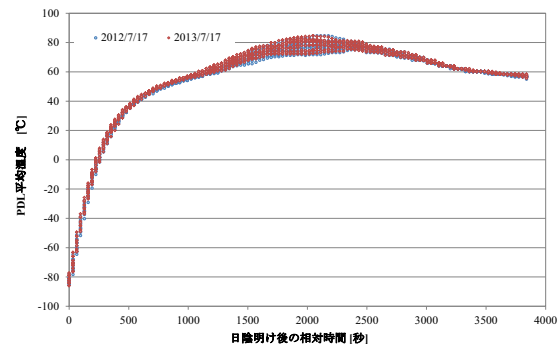


図 8 平均温度比較（2012/7/17 - 2013/7/17）

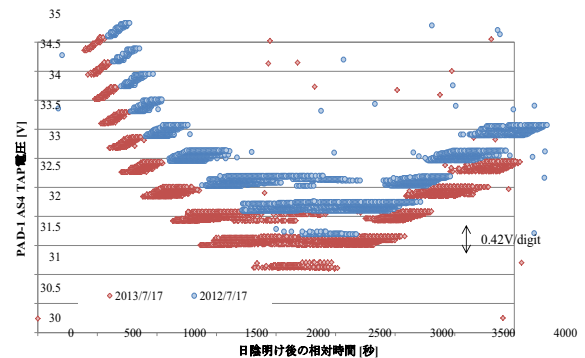


図 9 開放電圧比較（2012/7/17 - 2013/7/17）

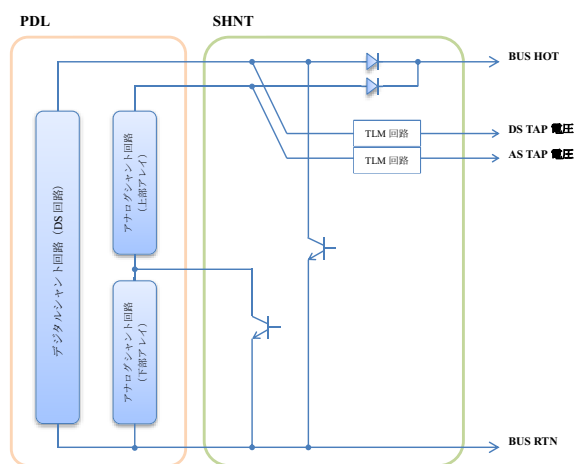


図 10 太陽電池出力電圧検出

5. まとめ

「しずく」に搭載された太陽電池パドルは、2012年5月18日の打上げ直後の太陽電池パドル展開、太陽追尾から始まり、打上げ後1年間通して発生電力供給を含む全ての機能が予定通りの性能を有していることを確認した。発生電力については、軌道上実績値が予測とよく一致しており、経年変化についても現在のところ予測範囲内で推移している。今後も同様の評価を続けていき、発生電力予測の精度向上に努める計画である。

参考文献

- 1) 渡部浩一，他: WINDS「きずな」初期段階運用結果（太陽電池パドル系），第52回 宇宙科学技術連合講演会講演集, 2008.
- 2) 杵野正明，中川敬三，吉田達哉，川口正芳: 「しずく」衛星システムの軌道上初期機能確認結果，第56回 宇宙科学技術連合講演会講演集, 2012.