

2F06 陸域観測技術衛星 2 号（ALOS-2） 観測運用技術強化システムの設計検討

○植田泰士，吉岡伸人，伊藤寛行，上杉正人，鈴木新一，大澤右二
（宇宙航空研究開発機構）

Design of a ground system towards an enhancement of observation capability for ALOS-2
Yasushi Ueda, Nobuto Yoshioka, Hiroyuki Itoh, Masato Uesugi, Shin-ichi Suzuki and Yuji Osawa (JAXA)

Key Words: Advanced Land Observing Satellite - 2, ALOS-2, Operation, Simulation

Abstract

In order to meet the recent increasing demands towards satellite based earth observation, it is becoming essential for ALOS-2, which is a satellite designed to observe selected locations with high-resolution, to maximize its observation duration within the limited system resources. With this background in consideration, JAXA presents a systematic approach to conduct precise evaluations and system simulations of satellite conditions, and then to predict potential margins among the satellite system resources which eventually leads to extending observation opportunities. This paper describes the result of the design.

1. 背景と目的

宇宙基本計画¹⁾において衛星利用の促進が重視されているように，近年，地球観測周回衛星においては衛星利用者の要求に最大限対応していくことが，今まで以上に求められている状況にある．特に現在，宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」）が開発中の陸域観測技術衛星 2 号²⁾（以下「ALOS-2」）のような高分解能の衛星においては，大量の観測データの生成のために，多くの衛星リソースを消費することから限られた中で観測時間の最大化が重要となる．また ALOS-2 においては，観測時に衛星姿勢を迅速にロール軸に±30 度振る，従来には無かったダイナミックな衛星姿勢制御による観測運用方式を採用しており，衛星挙動を今まで以上に正確に評価しながら運用を行うことが求められる．以上の背景を踏まえ，以下（および図 1 参照）を目的とした衛星観測運用技術の強化（以下「観測運用技術強化」）に取り組んでいる．

- (1) 衛星利用者の観測要求に最大限対応
（より多く観測データを取得）

- (2) 従来にはなかった観測運用（制御）技術を、
より正確に評価しながら運用

本稿では本取り組みにおいて実施した実現性検討結果について紹介を行う．

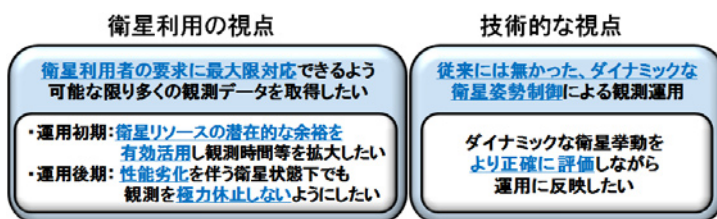


図 1 「観測運用技術強化」の目的

2. 「観測運用技術強化」の目標

本取組では平成 25 年度打上予定の ALOS-2 において，次の 2 つを達成することを目標としている．

【目標 1】

軌道上衛星の挙動を正確に評価・予測し，衛星システムが潜在的に持っている衛星リソースの余裕（実力値）を把握できること．

【目標 2】

衛星システムの実力値に基づいて運用制約を緩和した観測計画を実運用に適用し、実力値の妥当性が検証されること．

ここで衛星システムが潜在的に持っている衛星リソースの余裕（以下、「潜在リソース余裕」とは，例えば図 2 に示すものである．一般に，衛星の運用においては，軌道上の衛星を故障または損失させないように，衛星設計または地上での試験結果に基づき運用制約ラインを決定し，その制約内での衛星ミッ

ション運用を行う。また、その運用制約ラインの決定においては、軌道上での様々な衛星挙動や物理現象の不確定性等を考慮し、最悪時にも耐えうる安全なレベルを設定する。しかしながら、最悪状況を考慮されていることから、軌道上のある特定状況下または実際の軌道上衛星としては運用制約以上に観測できる実力を衛星が持っている可能性がある。

図 2では、観測衛星における観測時間に影響するある機器 A の温度変化を示しているが、時刻 t_0 から観測を開始すると機器 A の温度が時刻 t_1 には最悪時（事前解析ケース 1）において許容温度範囲上限に達することが事前解析から分かっているため、最悪時を考慮した運用においては $t_1 - t_0$ の間しか観測できない。しかしながら、ある特定状況下や軌道上での衛星の実力としては、時刻 t_1 においても、機器 A の温度は最悪時ほど上昇せず、実際は t_2 まで観測しても問題ない可能性がある。本稿では、この観測時間余裕（ $t_2 - t_1$ ）を生み出すことが可能な衛星システムのリソース余裕を「潜在リソース余裕」とよぶ。

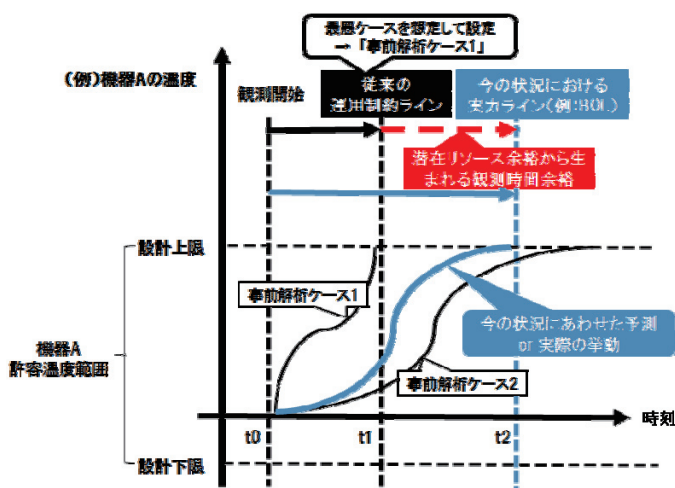


図 2 「潜在リソース余裕」のイメージ例

ここで留意すべきは運用前時点におけるこの「潜在リソース余裕」の存在は否定されるべきものではない。限られたコスト、スケジュールの中で、期待される信頼性を確保した衛星の開発を確実に行うには、過去の実績、知見に基づき各フェーズに見合った設計上のマージンを持ち、手戻りを防ぎつつ設計、製造を進めるべきである。またあらゆるケースを考慮した事前解析を個別に行うことは非現実的であるため一定の「潜在リソース余裕」の存在は妥当な開発プロセスの結果と言える。

一方、軌道上での運用を開始することで衛星の実力がより明確化になった時点においては、観測時間を拡大してもシステムの誤動作や故障のリスクがそれ以前に比べ減少するため、システムの設計余裕を最大限活用することを目指すのが妥当と言える。しかしながら、これらを活用するには、実力を適切に評価できる手段が必要となるが、現状その手段も人的リソースもないため、最悪時を考慮したより安全な運用を行わざるを得ないのが現状である。

以上を踏まえ、本取組では、「潜在リソース余裕」を活用できるようにするための手段を実現していくことを目指す。これにより、1項で述べた衛星利用者の観測要求に最大限対応すること、および観測運用（制御）技術を、より正確に評価しながら運用していくことが可能となっていくと期待している。

3. アプローチ

2項の目標 1 および目標 2 を達成する本活動のアプローチを図 3 に示す。

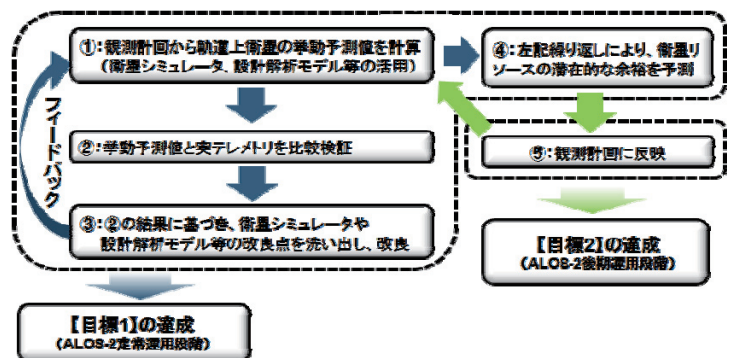


図 3 アプローチ

第一段階として目標 1 の達成を ALOS-2 定常運用段階で目指す。まず、①設計情報等に基づき、ある観測計画に対して衛星がどのような状態になるか予測を行う。次に、②同じ観測計画に対して、実際の衛星がどのような挙動をしたかを示す実テレメトリと、①の結果を比較し、③どのような予測改良が必要か検討し、その結果を元に再び①から繰り返す。このフィードバックの繰り返しによって、より正確な予測を可能とし、これによって軌道上衛星の実力を把握していく。

さらに、ALOS-2 後期運用段階など正確な予測が可能となった段階で、本予測結果に基づいて運用制約を見直し、観測時間の拡大など観測計画への反映を行い目標 2 の達成を行うアプローチである。

4. 要求分析

3項のアプローチを実現するため、「観測時間の拡大」を最上位要求とした、それに必要な手段（(1)項）、およびそれらの実現性と有意性に基づく要求スコープ（(2)項）の検討を要求分析結果として示す。

(1)「観測時間の拡大」判断に必要な予測
「観測時間の拡大」をできるかどうかを判断する際に考慮が必要となる衛星リソース観点を図 4 に示す。

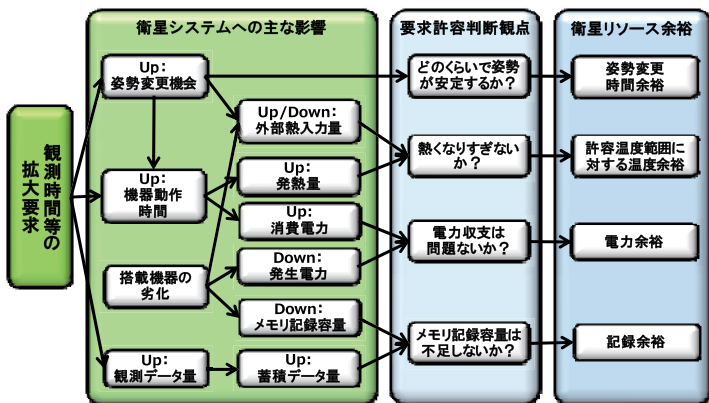


図 4 観測時間の拡大判断に必要な
衛星リソース余裕

図 4 に示す通り、観測時間を拡大すると、まず衛星システムにおいて、機器動作時間の増大や観測データ量の増加が直接的に発生する。機器動作時間の増大は、当然ながら消費電力の増加を招くとともに発熱量の増加を招く。そのため衛星リソースとしては搭載機器が時間とともに劣化していく中で「電力余裕」、「許容温度範囲に対する温度余裕」がどれぐらい残っているかを考慮しての判断が必要となる。また、観測データ量の増加は、データレコーダの蓄積量を増加させるため、メモリ素子の劣化やダウンリンクシナリオを踏まえて「記憶余裕」を考慮しての判断も必要である。さらに、ALOS-2 ではボディポインティングを採用しているため、姿勢変更に必要な時間（「姿勢変更時間余裕」）も、観測時間に対して影響を及ぼすため考慮が必要となる。一方、観測時の姿勢変更は主にリアクションホイールによって行うため残推量量は判断観点としては支配的とはならない。以上より、これら 4 つ（「温度余裕」「電力余裕」「姿勢変更時間余裕」「記録余裕」）の観点の衛星リソースが支配的となるため、観測時間の拡大のためには、それら 4 つの観点の衛星リソースを予測

する必要があるとともに、そのために衛星挙動予測として、図 5 に示す通り、熱系、電源系、姿勢系、メモリ系等の予測が必要となる。

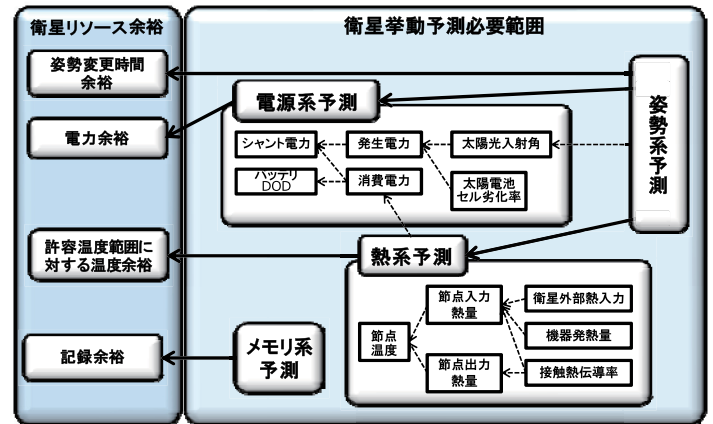


図 5 予測必要範囲概要

(2) 要求スコープ

(1) 項で示した「温度余裕」「電力余裕」「姿勢変更時間余裕」「記録余裕」の予測の実現性と有意性を踏まえた実現すべき要求スコープを表 1 に示す。

表 1. 実現すべき要求スコープ検討結果

	技術的 実現性	有意性	要求 スコープ
温度余裕	○	○	○
電力余裕	○	○	○
姿勢変更 時間余裕	○	×	×
記録余裕	△	×	×

結論として、「温度余裕」および「電力余裕」の予測を実現することが妥当であると判断した。それぞれの検討結果概要を以下に示す。

① 温度余裕

JAXA で開発される衛星システムの温度制御系においては、各機器の許容温度範囲の上限、下限のそれぞれに対し最悪ケースにおいても原則 15 度以上のマージンをもつよう設計する。したがって±15 度未満の精度で確実に予測可能であれば温度余裕を活用可能となる。一方、衛星設計フェーズにおける熱数学モデルは、最終的にプロトフライトモデルを使った地上での熱真空試験結果に対し最終的に±5 度の精度を目指してコリレーションを図る。ただし、地上で試験できる熱環境条件には限りがあり、軌道上の外部熱環境にも不確定性が多く存在するため、実際に±5 度の範囲で本当に予測可能であるということでは

ないが、そのコリレーション後の熱数学モデルを活用し、個々の観測シナリオに合わせた予測を行うとともに、実テレメトリからモデルの見直しをかけることで、有意な精度で温度余裕を予測可能であると判断した。

② 電力余裕

温度同様に、衛星設計フェーズでは、最悪シナリオを考慮して電力的に収支しているかどうかを解析する。その解析は軌道上の実挙動と比べると、太陽電池セルやバッテリーが軌道上でどのように劣化していくか、衛星システムの中で比較的大きな負荷となるヒータが温度変化状況に応じどのように挙動するかが予測差異を生じる主な原因となる。しかしながら、当該差異があるものの、従来の軌道上実績に対する予測精度を鑑みると、最低限当該解析同様の手法を用いることで有意な精度で電力余裕を予測可能であると判断した。

③ 姿勢変更時間余裕

JAXA で開発される衛星システムにおいては、打ち上げ直後の初期チェックアウトにおいて、軌道上における姿勢変更に必要な時間の実力評価作業を実施する。通常、不具合等が発生し状況が大きく変化しない限りにおいて、この姿勢変更に必要な時間は、衛星運用期間を通して大きく変化するものではなくほぼ定数と扱えるため、観測シナリオ立案時にはその定数を利用すればよいこととなる。また万が一不具合等が発生した場合も、個別に再評価作業を実施すればよく、あらゆる不具合等を想定して予測手段を本システムに具備しておくことは有意性が低いと判断した。以上より実力評価時に活用されているモデルを活用した予測環境を本システムに具備させることは可能ではあるが、有意性は低いことから、要求スコープから除外した。

④ 記録余裕

記録余裕を予測するには、観測により生成されるデータ量、地上局または中継衛星へのダウンリンク可能量、データレコーダの最大記録容量（劣化状況考慮）の予測が必要となる。まずデータ量については、観測データが衛星システム内でデータ圧縮されてデータレコーダに記録されるため、正確なデータ量は観測データの内容に依存することとなる。過去の同一観測対象の観測データを活用すればある程度の圧縮率予測が可能である可能性もあるが、観測対

象の変化量を見込んでマージンを設定することが本質的に困難であるため、予測上は非圧縮相当として扱うしかない。次に地上局や中継衛星へのダウンリンク可能量を正確に計算するためには、局や中継衛星について他衛星による占有予定、メンテナンス予定など含めた実際の運用予定を全て考慮する必要がある。これらは簡易な仕組みでは到底実現できるものではない。加えて、最大記憶容量への劣化状況考慮含めて、ALOS-2 の衛星管制システムではこれらを実現する機能を有しており、機能重複となり有意性がないため要求スコープから除外した。

5. 設計検討

本項においては、4 項の要求を実現するための設計検討結果として、予測手法設計概要、全体システム構成を示す。

5.1. 予測手法設計結果概要

(1) 温度余裕予測

温度計算は熱数学モデルを用いた場合、計算量が非常に大きいため、温度余裕予測手法設計上の主要課題は、「精度性能（効果量）と 時間性能（運用成立性）の両立」となる。設計結果としては、有意な精度の範囲内で運用が成立する設計解を得た。

① 予測手法

設計フェーズにおいて作成された熱数学モデルの「縮退化」を図ったモデルで予測を行うこととした。簡単かつ高速に計算するため、過去の温度プロファイルを用いた統計的手法などその他手法を用いる等の検討も実施したが、より確実に有意な精度（効果）を確保することを優先し、当該予測手法を選択した。また主要課題の解決に対しては、次の 3 つの方策を採用した。

(a) 「縮退化」

クリティカルな温度規定点ノードのみを残し縮退化することで計算量の削減、時間性能の向上を図る。システム熱真空試験前のモデルを用いた試行においては、誤差増分 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲で予測計算時間を 1/15 に短縮可能であることが確認できたため、精度を維持した大幅な時間性能の向上を図ることができる見込みである。

(b) 「放射計算の事前蓄積」

さらに精度を維持して時間性能を向上させるため、前日に都度放射計算をせず事前に放射計算結果を蓄積しておくことで 9 時間分/日の計算時間削減を図る。

(c) 「運用上の工夫」

図 6 に運用イメージを示すが、運用上の工夫により更なるトータルの計算量削減を行う。

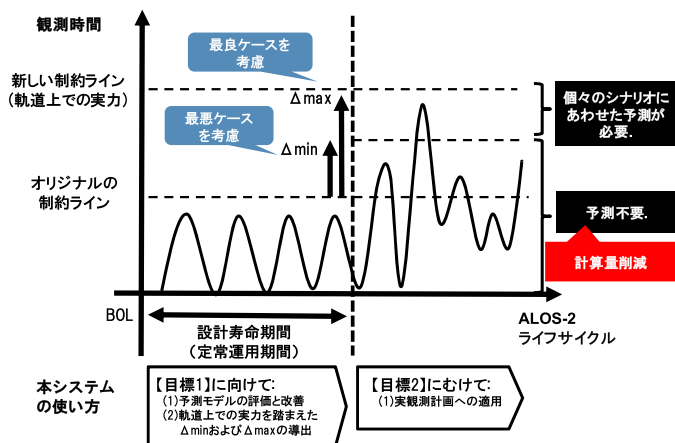


図 6 運用イメージ

図 6 または図 3 の通り、第一段階として目標 1 の達成を ALOS-2 定常運用段階で目指す。この期間においては、予測モデルの評価と改善を実施するとともに、軌道上での ALOS-2 の実力を踏まえた $\Delta \min$ および $\Delta \max$ の導出を実施する。ここで $\Delta \min$ とは、設計フェーズ同様に最悪ケースを考慮して任意のケースに適用可能な軌道上運用を踏まえた観測時間に対する新しい制約ラインと、設計フェーズで導出されたオリジナルの制約ラインとの差を意味する。 $\Delta \max$ とは、逆に最悪ケースではなく、最良ケースに基づく新しい制約ラインと、そのオリジナルの制約ラインとの差を意味する。

目標 1 を達成した第二段階においては、この $\Delta \min$ と $\Delta \max$ を活用して観測計画の立案を行う。つまり、 $\Delta \min$ は最悪時を考慮しているため、本システムを用いて、予測のためのシミュレーションを都度実施することは不要であり、これによって計算量の削減が図れる。また、 $\Delta \min$ を超えた観測計画については、都度シミュレーションを実施することで個々の観測シナリオが成立するかどうかを確認し、成立する場合は観測を実施し、そうでない場合は計画の見直しを実施する運用となる。

② 性能

(a) 精度性能：

システム熱真空試験結果に対する予測誤差として ± 6 度を達成可能見込み。ただし、実運用においては ± 6 度に軌道上不確定性 ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) 等を上積みしたシステムマージンをもった範囲で運用することとなる。また設計上の原則としての ± 15 度を運用制約ラインとした場合でも、製造物実力が高ければ、観測時間拡大効果は期待可能であり、目標 1 の達成状況に応じ、運用ポリシーは検討予定である。

(b) 時間性能：

約 40 分/15 周回分の見込みであり、前日中に次の日の観測計画を確認可能であり運用として成立する。

(2) 電力余裕予測

ALOS-2 における観測時間性能は、電力制約によるところが大きい。電力予測をより精度よく予測することが活用効果を高めることにつながる。そのため、電力余裕予測手法としては、実テレメトリからフィードバックをかける帰納的な予測方法を採用することでより精度よく予測することを目指している。そのため設計上の主要課題は「有意な目標精度を達成できる見込みがある手法を設計できるかどうか」となる。設計結果としては、目標精度を達成する精度見込みある設計解を得た。

① 予測手法

(a) 発生電力予測：

ベースは演繹的な設計解析と同じ計算を行うが、実テレメトリの非線形回帰分析により経年劣化パラメータを軌道上挙動にフィッティングをかけることで精度向上を図る。

(b) 負荷電力予測：

機器負荷については、運用計画における動作モード遷移、スペック/PFT 等実績電力から予測する。ヒータ負荷については、周回内変動が少ないものは、周回平均値、周回内変動が大きいものは、最悪値(周回内最悪)を固定利用する。

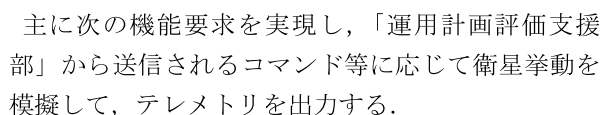
② 精度性能

きる機能. またその差異を縮めるための衛星モデル
精度向上 (フィードバック) ができる機能.

③ データ蓄積・参照機能

本システムの実現に際し必要となるデータについて、蓄積、および利用者（衛星開発担当者および衛星管制運用者）による参照ができる機能。

(2) 衛星シミュレーション部



(a) (1) ①項の実現に必要なもの、軌道上衛星の挙動・状態を予測できる機能。なお、その予測は、ある特定の観測運用計画に対し、その計画期間範囲内の各時刻における軌道上衛星の状態を導出することを意味する。

6. まとめと今後の予定

本稿では、衛星利用者の観測要求に最大限対応していく等のため観測時間の拡大を目指した地上システム（「観測運用技術強化システム」）について、その設計検討結果を紹介した。2012 年秋現在においては、本システムは当該設計に基づき、衛星システム等の開発と並行して、製作・試験を進めており、ALOS-2 打上までの完成を目指す予定である。

図 7 全体システム構成

「衛星シミュレーション部」の出力を利用し、主に次の機能要求を実現する。

利用者（衛星開発担当者または衛星管制運用者）が指定した任意の観測運用計画に対し、次を算出できる機能。

- 謝辭

本稿の作成にあたっては、JAXA とともに ALOS-2 総合システムの開発を行っている三菱電機株式会社とともに検討した結果を活用している．ここに感謝の意を表する．

参考文献

- 1) 宇宙基本計画, 宇宙開発戦略本部, 平成 21 年 6 月.
- 2) ALOS-2:The Advanced Land Observing Satellite-2,
<http://www.jaxa.jp/pr/brochure/pdf/04/sat29.pdf>
Y. Ueda, N. Yoshioka, H. Itoh, H. Miyoshi and Y. Osawa, “Feasibility study of a ground system towards an enhancement of observation capability for ALOS-2”, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011.