

スペースデブリ観測の実施成果

Achievements Made in Space Debris Observation

● 足立 学 ● 大西隆史 ● 亀山雅也

あらまし

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)様のスペースデブリ(宇宙ごみ)観測に関わるデータ処理と軌道の解析において、富士通がシステム開発と運用業務を長年にわたり実施している。スペースデブリは人工衛星への衝突や地上への落下の危険性があることから、光学望遠鏡やレーダー設備から得られるデータを使用して、スペースデブリの軌道の把握を進めてきた。更に、その軌道情報を用いて、スペースデブリの人工衛星への接近監視や、大気圏への再突入に関する予測解析の実施に当たり、技術開発やシステム構築で支援してきた。技術面では、軌道把握、接近監視、再突入予測解析を精度良く実現する軌道計算技術、スペースデブリの観測の確実性を高める技術、少ない観測拠点でも効率良く軌道把握ができるように観測計画を適正化する技術を確立した。一方、システムにおいては、軌道や解析の計算精度の確保と、大量のスペースデブリのデータを短時間に処理可能とするための並列分散処理化や自動化を図ってきた。

本稿では、スペースデブリを管理・解析するシステム構成と機能を紹介する。また、観測の主要業務を挙げ、それらで適用している技術とその成果について述べる。

Abstract

Over the years, Fujitsu has been working with the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) to develop and operate JAXA's system for observing space debris, and helping with its data processing and orbit analysis. There is a risk that space debris could collide with satellites or hit the Earth's ground. Thus, JAXA has been tracking the orbital courses of debris using data from optical telescopes and radars. Furthermore, the orbital data are used to monitor pieces of debris that approach satellites, and to calculate their reentry into the Earth's atmosphere. Fujitsu has been supporting this endeavor through technological engineering and system development. We have developed a high-precision orbit calculation technology to track pieces of orbiting debris, monitor their proximities to satellites, and provide analysis and forecast their reentry into the Earth's atmosphere. Also, with enhanced space debris observation and technology to optimize observation plans, we have succeeded in making orbit tracking more efficient with fewer ground stations. As for the system development, we have striven to ensure higher computational accuracy in orbit calculation and analysis, developing a parallel computation system and automation in order to process a vast amount of data in a short time. This paper explains the structure and features of this system, developed for managing and analyzing space debris. It also describes the specific technologies applied in major observational tasks, and their results.

まえがき

宇宙空間を漂うスペースデブリに対する関心が、世界的に高まってきている。スペースデブリとは、ロケットの残骸、運用を停止した人工衛星、爆発や衝突で飛散した人工衛星の破片など、人工物のゴミである。

スペースデブリは、低軌道の場合、秒速7 km以上という高速で地球を周回しており、小さなスペースデブリでも国際宇宙ステーションや人工衛星を破損することもある。また、人工衛星とスペースデブリの衝突によって生じた破片が新たなスペースデブリとなる。その数は年々増加し、米国の国防総省戦略軍統合宇宙運用センター (JSpOC) 運営のWebサイトSpace-Track.org⁽¹⁾ で公開される10 cm以上のものが1万7千個以上にもなっている(図-1)。また、比較的低い高度のスペースデブリは、大気による抵抗を受け、徐々に高度が低下し大気圏に再突入するが、大型のものは大気圏で燃え尽きず、地上に部品が落下する危険性がある。

日本の「宇宙基本計画」⁽²⁾においても、宇宙環境保全の重要性や、スペースデブリ観測能力向上の必要性が指摘されるとともに、本分野における一層の国際協力、国際貢献の推進が必要であるという認識が示されている。また、1990年代から観測設備やデータ処理設備の整備が行われ、スペースデブリに関わる観測・解析の技術開発が続けられ

ている。

富士通は1995年度から国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) (当時、宇宙開発事業団) 様より、スペースデブリの軌道情報を管理するシステム、およびその軌道情報を基にスペースデブリの衝突や再突入をシミュレーションで解析するシステムを受託開発した。また、一般財団法人日本宇宙フォーラム (JSF) が所有するレーダー観測・光学観測設備と連携してスペースデブリ観測データ処理と軌道解析を実施し、当初からシステム開発と運用に関わっている⁽³⁾。そして、この実験運用を通して観測技術・解析技術を確認するとともに、システムの機能向上や改善を継続的に実施している。

本稿では、まずスペースデブリを管理・解析するシステム構成と機能について述べる。次に本システムを活用した運用業務を紹介し、適用技術の成果について述べる。

システム構成

スペースデブリの管理・解析を行うシステムは、光学望遠鏡やレーダーの観測施設との間で観測計画の送信と観測データの受信により、スペースデブリの軌道計算に必要なデータを取得する。また、衛星の軌道を管理するシステムから衛星の軌道情報を、Space-Track.orgからスペースデブリの軌道情報を取得するよう構成している(図-2)。

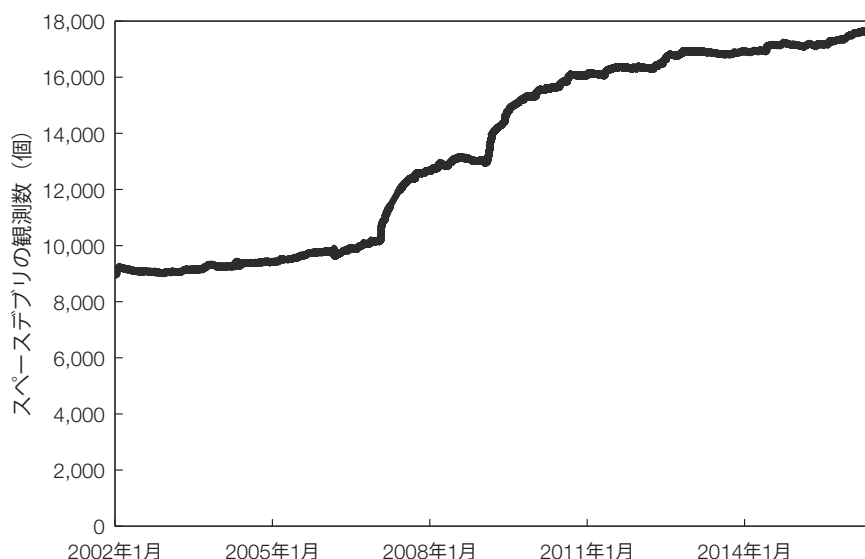


図-1 スペースデブリ数の推移(人工衛星含む)

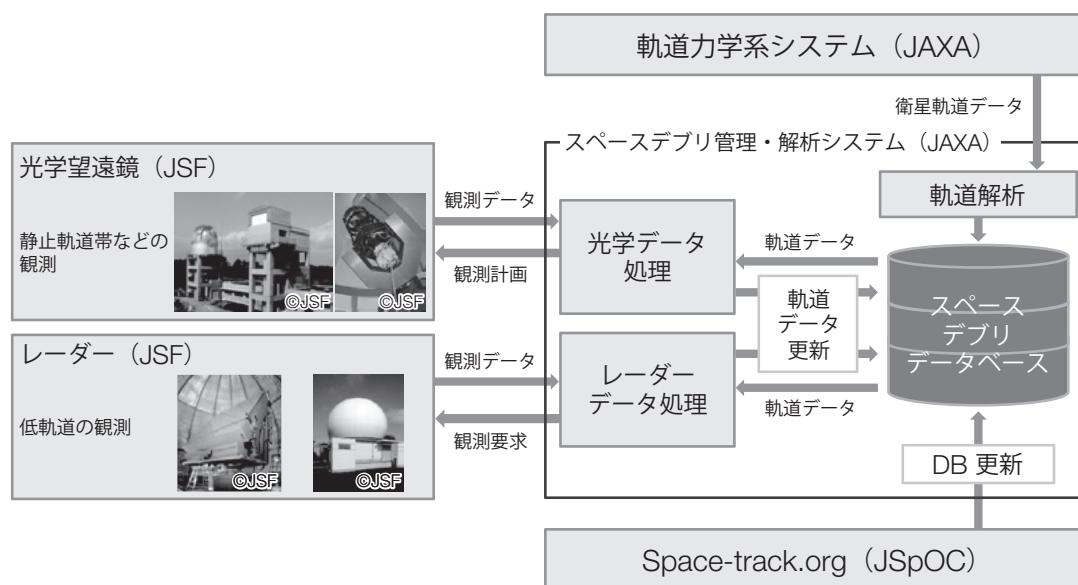


図-2 スペースデブリの管理・解析システムと観測施設、関係システムの構成

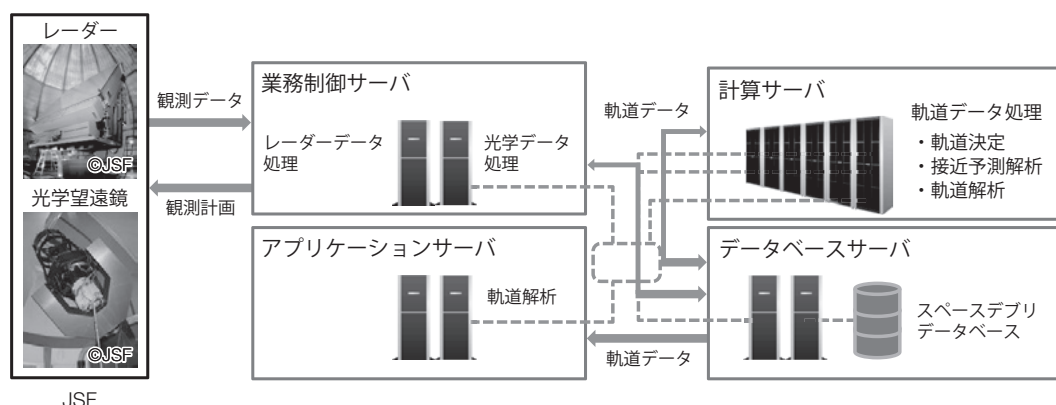


図-3 スペースデブリの管理・解析システムの構成

システム内は、数多くのスペースデブリの軌道計算や解析を短時間に処理できるようにするため、その用途に応じて以下の四つのサーバ群で構成している（図-3）。

(1) データベースサーバ

スペースデブリの軌道情報や解析結果などを管理する。データを蓄積することで、軌道の履歴から詳細な分析を可能としている。

(2) 計算サーバ

大量のスペースデブリの軌道計算や解析を短時間で行えるようにする。そのため、複数の計算機に分散して並列に処理を行う仕組みとしている。

(3) 業務制御サーバ

軌道計算や接近予測解析など日々行う処理を自

動化する。また、複数計算機への処理の分配の平準化や、一部の計算機で異常が発生した場合に処理の再分配を行う。

(4) アプリケーションサーバ

軌道情報などのデータを使用し、ユーザー操作による解析を実行する。

機能構成

スペースデブリの観測に関わるデータ処理と軌道の解析を実現するため、主要な機能として以下を備える。

(1) 観測計画立案

どのスペースデブリをいつ観測するのかを計画し、観測する時間や方向を示す観測予報値と併せ

て観測施設へ送付する。

(2) 軌道決定

観測データを基にスペースデブリの軌道を計算するのが軌道決定である。これにより求めた軌道は、次の観測計画に利用する。また、以下の接近予測解析や再突入予測解析にも利用する。

(3) 接近予測解析

スペースデブリの軌道と人工衛星の軌道から、人工衛星へのスペースデブリの接近を予測する⁽⁴⁾。予測は定期的に行い、その結果を関係者に自動的に通知する。人工衛星の軌道は、人工衛星の軌道運用を行うシステムからオンラインで取得できるようになっており、この先の軌道制御計画が考慮された最新の予測軌道を用いることができる。

(4) 再突入予測解析

スペースデブリの軌道から大気圏に再突入する日時や位置を予測する。再突入が迫っている場合から数十年先といった長期的な場合まで予測することができる。

運 用 業 務

前述のシステムを用いて、スペースデブリの観測計画立案と軌道決定、接近監視、再突入予測解析を実施している。

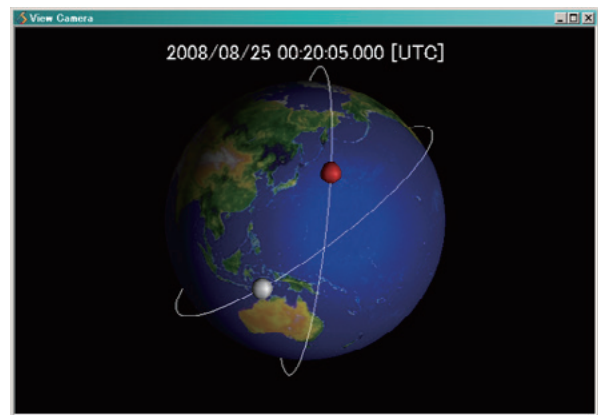
(1) レーダー観測・光学観測によるスペースデブリの軌道情報把握

観測計画を立案して観測施設へ送信し、観測が実施された後、観測データを観測施設から受信して軌道決定を行い、スペースデブリの軌道把握を行っている。

現在運用中のJAXAの陸域観測技術衛星2号「だいち2号」などがある高度約600 kmといった低軌道帯に漂うスペースデブリは、レーダーにより観測している。また、高度約3万6千kmの静止軌道帯に漂うスペースデブリは光学望遠鏡により観測している。

(2) レーダー観測による低軌道衛星へのスペースデブリ接近監視

人工衛星とスペースデブリの軌道を基に接近予測解析を行っている。この解析では、接近時刻や接近距離などの算出や軌道の可視化することができる(図-4)。接近までの間、観測と接近予測解析を繰り返し、衝突の危険性が高い場合は人工衛星



※データ提供：JAXA

人工衛星とスペースデブリの軌道(線)と位置(球)が示される。リアルタイム表示のほか、時刻を変えて過去や未来の状況を動画表示することもできる。

図-4 接近時の軌道の可視化

の軌道を変更してスペースデブリとの衝突回避が行われる。

(3) レーダー観測による再突入予測解析

JAXAが起源となっているスペースデブリ(運用終了人工衛星やロケット)、および日本へ落下する可能性のあるスペースデブリを中心に再突入時期や再突入地点の解析を行っている。

再突入予測の精度を左右する主要因として大気抵抗による誤差が挙げられる。高度が低くなればなるほど大気密度が高くなり、スペースデブリは大きな大気抵抗を受けて高度を急激に低下させる。このときの大気抵抗の計算がスペースデブリの軌道計算に大きく影響し、再突入時刻や再突入地点の予測精度を左右する。大気抵抗は、スペースデブリの回転の状態や、太陽活動や地磁気の変動に伴う大気密度の変化により大きく異なる。これらの事象は、精度の良い予測が難しく、その結果として再突入時刻や再突入地点の予測には大きな誤差が生じる。その誤差の計算も行い、再突入地点の誤差範囲も把握する(図-5)。

再突入予測の誤差を低減させるために、スペースデブリを頻繁に観測して、予測を最新化する。再突入時点に対して、最新の軌道を求めることにより、予測誤差を低減できる。再突入する大型のスペースデブリの場合、使用するレーダーの性能では1日に1～2回程度の観測が可能であり、再突入するまで観測と予測を繰り返し行っている。

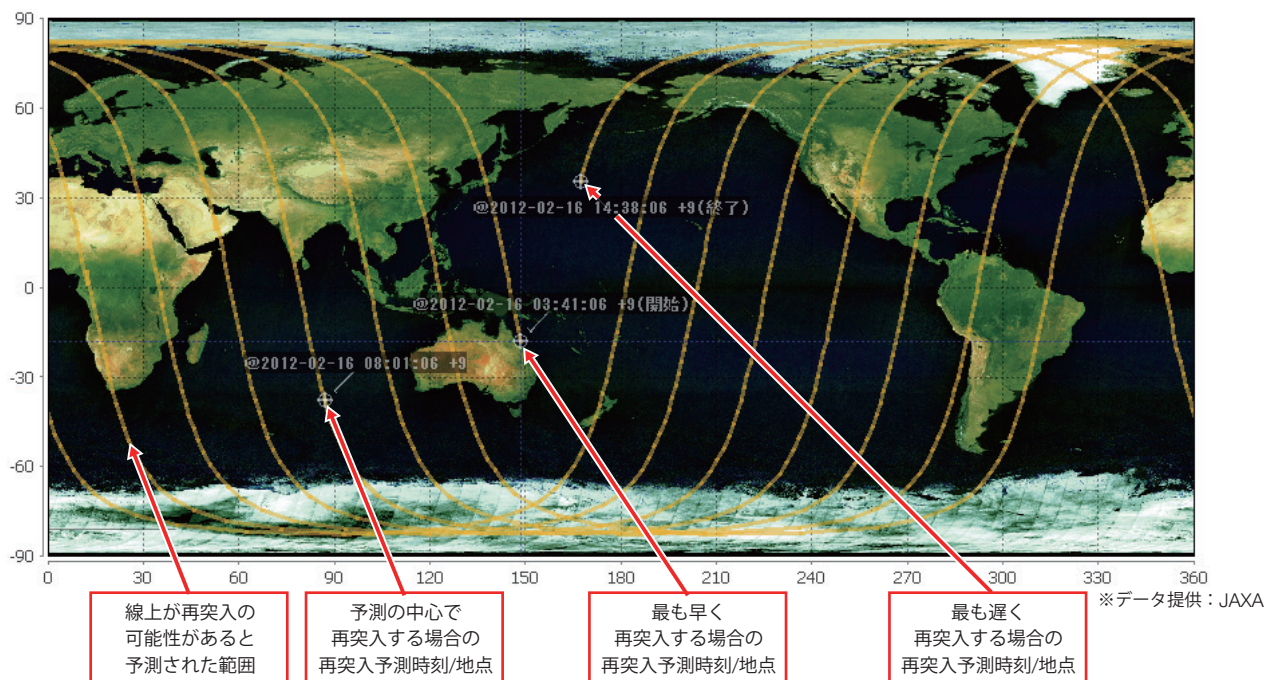


図-5 再突入予測地点の誤差範囲

(4) 光学観測による静止衛星へのスペースデブリ接近監視

光学観測は夜間に行い、太陽光がスペースデブリに反射した光を捉える。なお、観測の成否は天候にも左右される。例えば、雲で光が遮られることもある。そのため、静止衛星へ接近するスペースデブリの観測は、余裕を持って接近の3週間程度前から開始している。観測においては、スペースデブリと静止衛星それぞれの軌道予測誤差を考慮し、接近する可能性があるものを選定している。

接近までの間、観測と接近予測解析を繰り返し、衝突の危険性が高い場合には、人工衛星の軌道を変更して衝突回避が行われるのは低軌道衛星の場合と同じである。

(5) 光学観測によるスペースデブリの発見とその軌道把握

光学観測においては、静止軌道帯を中心に観測し、新たなスペースデブリの発見も行っている。新たなスペースデブリとは、Space-Track.orgで公開されているデータには含まれないものである。人工衛星への衝突を防ぐために、新たなスペースデブリを発見することは重要である。

発見したスペースデブリは、しばらく観測を行って軌道を精度良く求める。静止軌道帯は大気がな

く、スペースデブリの軌道予測の精度は良いため、おおむね1年に1回再捕捉し、そのときに1～2週間程度の観測を行い、軌道を求め直している。

(6) 宇宙ステーション補給機「こうのとり」へのスペースデブリ接近監視

「こうのとり」(HTV:H-II Transfer Vehicle)は、国際宇宙ステーションへ確実に物資運搬を行うために、スペースデブリとの衝突を避けることが重要である。

「こうのとり」へのスペースデブリの接近監視は、米国によって精度の良いスペースデブリの軌道を基に精密な接近予測解析が行われ、その結果により最終的な回避判断がなされる。それに対して本業務は、接近の早期検知を目的としており、Space-Track.orgで公開されている軌道情報を利用し、米国よりも短時間で解析を行っている。いち早く接近を検知することで、余裕を持って衝突回避に向けた軌道変更の検討を行うことができる。

(7) 人工衛星異常時の緊急観測と軌道把握

大型の人工衛星は、地上局との通信により、その軌道を精度良く求める仕組みを備えているものがほとんどである。しかし、例えば、人工衛星に故障などの異常が生じて通信機能が停止すると、軌道が把握できなくなる。そのような場合には、

レーダー観測や光学観測により、軌道の把握を行っている。求めた軌道情報は、人工衛星の軌道運用を行うシステムへ提供し、人工衛星の復旧などに利用される。

技 術 成 果

以上の業務を通じて確立した主な技術として、軌道計算技術、観測の確実性を高める技術、観測計画を適正化する技術が挙げられる。これらについて以下に述べる。

(1) 軌道計算技術

スペースデブリの軌道を精度良く把握するには、軌道計算を精確に行うことが重要である。重力モデルや大気密度モデルなどの力学モデルを適切に取り扱い、光学観測とレーダー観測のそれぞれのデータの特性に合わせて光行差補正や屈折補正などの補正を適切に行うことにより、軌道計算の精度を確保している。

光学観測では、準天頂衛星「みちびき」(高度約3万6千km)を対象として求めた軌道の精度を評価した結果、位置の誤差(RMS: Root Mean Square)は0.95 kmであった。⁽⁵⁾ また、レーダー観測では、陸域観測技術衛星「だいち」(高度約690 km)を対象として求めた軌道の精度を評価した結果、位置の誤差(RMS)は0.037 kmであった。⁽⁶⁾ これらの結果は、光学およびレーダーの観測データの精度と同等であり、光学観測、レーダー観測とも、観測拠点は一つずつであるが、良好な精度で軌道計算を実現できている。

軌道計算は、接近予測解析や再突入予測解析においても使用する。特に再突入予測解析は、大気抵抗の不確実性が大きいことにより、大きな誤差が生じる。この誤差の妥当性は、海外機関の予測結果と比較することで評価した。評価の結果、複数のレーダー観測拠点を持つ海外機関と比べると、得られる観測データは少なくなるものの、再突入予測の精度という点では大差のない結果が得られていることが確認できた。⁽⁷⁾

更には、発見したスペースデブリの軌道情報から過去の軌道を計算し、そのスペースデブリを発生させた物体の特定やその発生時刻の推定も可能である。発見したスペースデブリが20年前のロケットの破碎事故から発生したものであることを特定

した実績もある。⁽⁸⁾

(2) 観測の確実性を高める技術

スペースデブリの観測が難しい例として、観測の限界に近い小さなスペースデブリの場合や、予測した軌道の誤差が大きい場合が挙げられる。小さなスペースデブリに対しては、レーダーによる捕捉を開始する距離や捕捉を試みるスキャン方式を適切に選択できる手法を確立し、観測成功率を向上させた。⁽⁹⁾

また、軌道誤差が大きな場合に対しては、誤差を考慮して観測する手法を確立した。⁽¹⁰⁾ この手法では、まず最近の軌道の変動状況を分析し軌道誤差を把握する。次に、軌道誤差に応じて観測方向が少しずつ異なることに対処するため、複数の観測方向に対して順次観測を行う。軌道誤差が大きいのは、大気抵抗の不確実性が大きい高度の低い場合であり、大気圏への再突入が迫っているような場合は特に顕著である。使用するレーダーの性能で観測可能な大型のスペースデブリであれば、この手法の適用により、再突入の間際でも観測はほぼ成功するようになった。

(3) 観測計画を適正化する技術

より多くのスペースデブリについて軌道を精度良く把握するには、どのスペースデブリをいつどのくらい観測すれば良いか、効率的に観測できるよう計画を立てる必要がある。

前述した静止衛星へのスペースデブリ接近監視については、静止衛星とスペースデブリの軌道予測誤差などを考慮して観測を計画する手法を確立し、⁽⁵⁾ おおむね接近の3週間前から観測を開始する計画としている。また、定期的な軌道の把握を目的とする場合は、そのスペースデブリを見失わない程度まで軌道予測誤差を許容し、おおむね1年に1回の再捕捉で済むような観測頻度の低さで軌道把握を成立させた。

このようにして、光学観測拠点が1拠点でも、接近監視と軌道把握の両立を実現している。

今後の課題

JAXAは、今後、レーダーおよび光学望遠鏡の観測能力の向上を計画している。これに伴い、スペースデブリの観測数も増大していくことが予想される。データ処理システムについても以下のような

機能・性能面の改善が必要となってくる。

(1) 観測効率の向上

多くのスペースデブリを観測し、軌道把握ができるよう観測計画立案機能の高度化を図る。また、観測成功率の向上に向けて、これまでに獲得した技術を活かし、パラメータチューニングの自動化を図る。

(2) 観測物体の同定技術の向上

観測物体がどのスペースデブリであるかを特定する同定技術の確立と自動化を図る。また、適切な同定を実現するために、人工衛星の軌道変更を検知および推定する技術を開発する。

(3) 大量データ処理への対応

観測数の増大に伴って、軌道計算、接近予測解析、再突入予測解析の処理量も増大するため、システム処理性能を向上させる。また、接近状況などの迅速な把握のため、処理の自動化の拡大と処理タイミングの適正化を図り、接近検出などの適時性を高める。

む す び

本稿では、スペースデブリ観測のデータ処理と軌道解析について、構築したシステム、実施している業務、および観測に適用した技術を述べた。スペースデブリの観測や軌道計算、接近予測解析、再突入予測解析に関して、技術向上を図り、業務の実現とその改善につなげてきた。今後も更なる技術の向上とともに、業務やシステムの改善につなげていく所存である。

最後に、本システムの開発および業務実施に当たりご指導頂いたJAXA追跡ネットワーク技術センターの皆様に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Space-Track.org.
<https://www.space-track.org>
- (2) 内閣府：宇宙基本計画。
<http://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html>
- (3) 亀山雅也ほか：スペースデブリ軌道生成実験システム。FJITSU, Vol.51, No.6, p.438-443 (2000).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol51-6/paper16.pdf>
- (4) 足立 学ほか：スペースデブリ接近予測解析システ

ムの開発。第52回宇宙科学技術連合講演会講演集, p.1522-1527 (2008)。

- (5) 田島 徹ほか：光学観測を利用した静止衛星へのスペースデブリ接近監視。第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2013-4225 (2013)。
- (6) 工藤伸夫ほか：上斎原スペースガードセンターのレーダ軌道決定精度評価。第55回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2011-4477 (2011)。
- (7) 宮原伸博ほか：上斎原スペースガードセンターのレーダを利用した大気圏再突入予測解析。第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2016-4423 (2016)。
- (8) 足立 学ほか：静止軌道帯における破砕デブリの光学観測とその発生源の同定。第59回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2015-4588 (2015)。
- (9) C. Hirose et al.: Observation Techniques made Through The Kamisaibara Radar. 61st International Astronautical Congress, IAC-10-A6.1.1 (2010)。
- (10) 染谷一徳ほか：KSGCレーダによる大気圏再突入間際のスペースデブリ観測。第56回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4064 (2012)。

著者紹介



足立 学 (あだち かく)

テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部
科学システムソリューション統括部
スペースデブリに関する運用やそのシステム開発に従事。



大西隆史 (おおにし たかふみ)

テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部
科学システムソリューション統括部
軌道力学計算システムの開発に従事。



亀山雅也 (かめやま まさや)

テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部
科学システムソリューション統括部
軌道力学計算システムの開発に従事。