

富士通の軌道決定・軌道予報・ 軌道解析ソリューション

Fujitsu's Solution for Orbit Determination, Prediction, and Analysis

● 片桐征治 ● 青島千晶 ● 大西隆史 ● 山本洋介

あらまし

宇宙開発の進展によって、人工衛星のミッションとその運用も利用範囲が広がっている。人工衛星の運用では、軌道力学計算技術を用いて軌道の決定・予報・解析を正確に行うことが重要であるが、これらの技術への要求も複雑化・高度化・多様化している。富士通は、日本の宇宙開発において、人工衛星の軌道力学計算システムなどの開発に携わってきている。そして現在も、人工衛星を確実に捕捉・追尾するための軌道決定・予報システム、4億km遠方の探査機の軌道を精度良く決めるシステムなどを開発している。

本稿では、人工衛星・探査機の軌道決定・軌道予報・軌道解析の技術を基に提供しているシステムを紹介し、更に関連技術の活用事例と最新動向を紹介する。

Abstract

As advancements are made in space exploration, the scope of the missions and operations of satellites is also expanding. Especially in the operations of satellites, it is very important to carry out precise orbit determination, prediction, and analysis using flight dynamics technologies. And the requirements for these technologies are becoming more and more complex, sophisticated, and diverse. Fujitsu has for a long time participated in Japan's space exploration, and has made contributions to the development of flight dynamics systems for satellite operations. Our efforts continue today as we develop various systems such as orbit determination/prediction systems to reliably capture/track satellites, and systems to determine highly precise orbits for space explorers that operate at a distance of 400,000,000 km from the Earth. This paper presents these systems based on the technologies to determine, predict, and analyze orbits of satellites/explorers. The paper also describes some case studies of relevant technologies and the latest trends.

まえがき

日本の宇宙開発は、1969年の宇宙開発事業団(NASDA)^(注)の発足とともに本格化した。宇宙開発の根幹となる人工衛星の軌道決定や軌道予報・軌道制御には、複雑な計算が必要となる。富士通は、宇宙開発の一端を担うべく、NASDAへの汎用機の納入および人工衛星の軌道決定などのシステム開発に参入した。

本稿では、人工衛星・探査機の運用に欠かせない軌道決定・軌道予報・軌道解析について述べ、これらの軌道技術によって開発した軌道決定システムを紹介する。また、本技術の活用事例と最新動向を紹介する。

軌道力学計算システムの目的と役割

人工衛星の運用は、宇宙空間にある衛星本体と搭載機器から成る「衛星システム」と、地上にあって衛星に指示を出しデータを受信して処理する「地上システム」が連携して行われる。「軌道力学計算システム」は、地上システムに含まれ、衛星を直接制御し運用する「衛星運用システム」と、衛星から受信したデータを処理して利用者向け提供情報を作成する「ミッションデータ処理システム」の運用に必要不可欠な軌道情報(過去および未来における人工衛星の正確な飛行経路)を計算し、提供する重要な役割を担っている(図-1)。

軌道力学計算システムは、いわば宇宙空間における物理シミュレーションを行うシステムである。ニュートン力学を基本として、希薄な大気が衛星に及ぼす減速効果、相対性理論による時間のずれ、地球の自転のゆらぎなど、様々な物理現象を詳細にモデル化して計算機シミュレーションを行っている。

軌道力学計算システムには、大きく以下の三つの役割がある。

(1) 軌道決定

人工衛星の過去一定期間の軌道を正確に把握する。ミッションデータ処理向けに、正確な実績軌道情報を提供する。

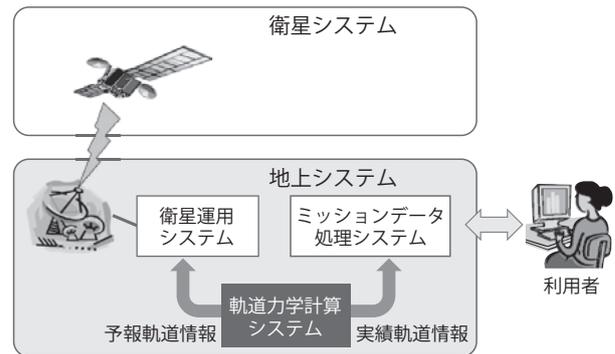


図-1 軌道力学計算システムの位置付け

(2) 軌道予報

軌道決定結果と宇宙空間の物理モデルに基づき、人工衛星の将来の軌道を計算する。軌道予報から、運用計画に必要な軌道関連情報(地上局から衛星を捕捉追尾するためのアンテナ駆動角度予報や、衛星がいつどこの上空を通過するかといった情報など)や、ミッションの観測計画立案のための長期の軌道予報値を作成する。

また、将来の軌道を当初計画していた軌道に合わせるように、軌道制御計画を立案する。

(3) 軌道解析

軌道決定、軌道予報の精度を評価する。運用計画を立てるために行う事前解析と、実運用データを処理した実績を統計的に評価する事後解析がある。また、重力場推定など、衛星軌道以外のパラメーターを軌道決定に付随して推定・評価する場合もある。

富士通の軌道力学計算システム開発

富士通の軌道力学計算技術への取り組みは、NASDAの発足とほぼ同時期に始まった(図-2)。富士通は、地球周回衛星を対象とした軌道力学計算システムをNASDAから受託開発して以来、様々な機能拡張やアルゴリズム改良を重ね、軌道力学計算システムの開発を約40年間継続して担当している。

1980年代に入ると、東京大学から独立して宇宙科学研究所(ISAS)が発足した。富士通は、ISASの地球外の天体を探査する科学ミッション向けに深宇宙軌道決定システム(ISSOP: ISAS Orbit determination Program)を開発した。ISSOPは

(注) 2003年に宇宙科学研究所(ISAS)、航空宇宙技術研究所(NAL)とともに宇宙航空研究開発機構(JAXA)に統合。

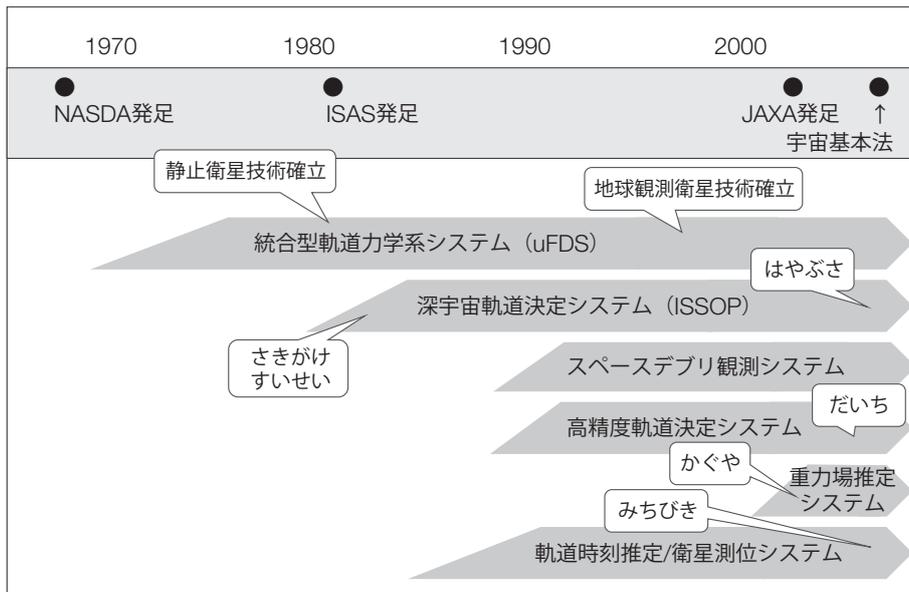


図-2 富士通の軌道力学計算システム開発

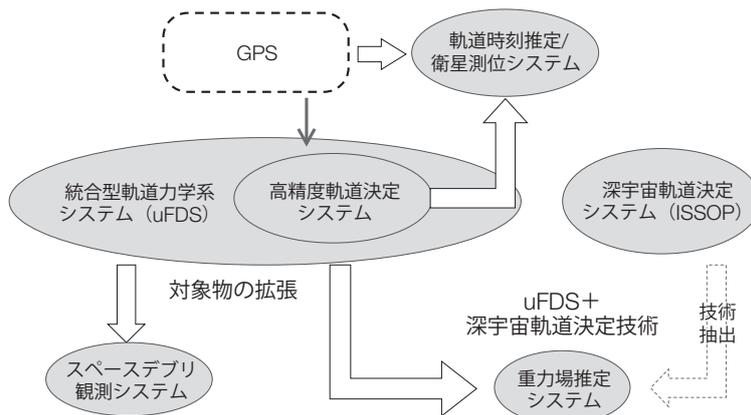


図-3 軌道決定技術(システム)の進展

機能改良を重ねて、現在も最先端の深宇宙探査ミッションで運用されている。

1990年代には、スペースデブリ（宇宙ごみ）の問題が注目され始めた。また、米国が構築を進めていたGPS（Global Positioning System）の初期サービス運用が始まり、地球周回衛星の軌道決定に利用され始めた。NASDAではこれらに対応すべく、スペースデブリ観測システムと高精度軌道決定システムを開発した（図-2）。いずれのシステムもそれまでの基幹システムに比べてデータ量、または演算量が 10^8 倍程度にもなり、富士通は、これらに対して業界トップレベルの計算機と軌道力学計算技術で応えた。

2000年代は、それまでに蓄積された技術が国民の知るところとなった年代と言える。日本版GPSの準天頂衛星初号機「みちびき」向け軌道時刻推定システムは、高精度軌道決定システムのアルゴリズムを活用して実現した。月周回衛星「かがや」の重力場推定は、統合型軌道力学系システムと深宇宙軌道決定技術を融合して実現した（図-3）。小惑星探査機「はやぶさ」や金星探査機「あかつき」では、ISSOPに新しい計算モデルを追加することで目的の軌道に投入する能力を持たせた。

開発したシステムの特長

本章では、富士通が開発した軌道力学計算シ

テムの特長について述べる。

● 統合型軌道力学系システム (uFDS)

統合型軌道力学系システム (uFDS: unified Flight Dynamics System) は、「軌道力学計算システムの目的と役割」に記載した三つの役割の全てを担うJAXAのシステムであり、富士通が開発を担当した。ここでは、そのうちの軌道決定の方法について述べる。

追跡管制の初期から、地球周回衛星の軌道決定にはレンジデータが用いられている。近年は、衛星搭載GPS受信機が推定した位置を用いた軌道決定が主流であるが、衛星打ち上げ直後の運用や、GPS受信機が不調の場合のバックアップとして、レンジデータによる軌道決定が行われる。

レンジデータは、地上局から人工衛星に向けて送信した電波を衛星が受信して地上局へ折り返しの電波を送信し、それを地上局が受け取るまでの往復に要した時間を計測して、距離の単位に換算したものである。電波の送受信設備を持たないが、レーザー反射器を搭載している衛星に対しては光学望遠鏡を用いて衛星に向けてレーザーを発射し、衛星で反射して戻ってくるまでの往復時間を計測して、レンジデータを計測する。

人工衛星は、宇宙空間の軌道上で様々な力(引力・ふくしや輻射圧・抵抗)を受けながら飛行している。地上局は、宇宙空間から見れば地球の自転とともに動いている。また、地上局と人工衛星がやり取りする電波やレーザーは、地球の電離層や大気を通過する際に様々な影響を受ける。レンジデータまたはGPS受信機が推定した位置による軌道決定では、これらの現象をモデル化して計算した予測の距離や位置と、実際に観測された距離や位置とを時々刻々比較し、実測値と予測値の差が最小になるように、最小二乗法を用いて人工衛星の軌道を表すパラメーターを合わせていく計算が行われる。

● 深宇宙軌道決定システム (ISSOP)

深宇宙向け軌道決定では、レンジデータに加えて、地上局と探査機の間を往復する電波の周波数がドップラー効果によって変化する現象を計測したデータ(ドップラーデータ)を使用する。探査機と地上局は、ともに太陽の周りを毎秒30 km前後で回っているため、相対速度は毎秒数十kmのオーダーに及ぶが、ドップラーデータにより探査機と

地上局を結ぶ方向の相対速度は毎秒1 mm未満の誤差で計測される。これらの高精度な計測データと正確な計算モデル化により、地球から何億kmも離れた探査機の軌道決定を行うことが可能である。

2005年に小惑星イトカワに到着した小惑星探査機「はやぶさ」では、探査機から小惑星を観測した光学データを追加して軌道決定を行った。その結果、地球から4億km離れた探査機の位置決定精度を、従来の数百kmオーダーから数kmオーダーまで向上させることに成功し、小惑星への正確な誘導に貢献している。また2015年には、ISSOPにDDOR (Delta Differential One-way Range) という新しい観測モデルを導入し、⁽¹⁾「はやぶさ2」の運用で実用化した。DDORとは、NASAのジェット推進研究所 (JPL: Jet Propulsion Laboratory) が開発した、地球上の遠く離れた2か所の地上局で同時に探査機信号とクエーサー(電波を発する天体)を交互に受信する手法であり、レンジ・ドップラーにDDORを加えることで、探査機位置精度を大きく向上させることができる。

軌道決定システムと並んで、月惑星探査機の運用で活躍するのが探査機の軌道変更をリアルタイムに監視するマヌーバモニタシステムである。このシステムは、地上局から軌道変更によってドップラーデータがどう変化するかをあらかじめシミュレーションにより計算しておく。実際の軌道変更時に、地上局で受信されたドップラーデータをリアルタイムに監視することにより、軌道変更が予定どおりに行われ、狙いどおりの軌道に乗っているかを即時に把握できる。「あかつき」では、2015年12月に行われた金星周回軌道投入制御運用において、軌道制御の状況をリアルタイムに監視し、計画どおりの軌道制御が実施され、追加制御が不要であることの確認と判断が迅速に行われた。

● 高精度軌道決定システム

高精度軌道決定システムは、米国GPS衛星が高度2万kmの上空から送信するL1およびL2周波数帯の測位信号(疑似距離と搬送波位相)を用いて、人工衛星の軌道を高精度に推定するシステムである。高精度軌道決定の結果は、地表の高精度画像または高精度な海面高度分布を作成するために利用される。

富士通は、2002年に打ち上げられた環境観測技

術衛星「みどりⅡ」を最初のターゲットとして、高精度軌道決定システムの開発を担当した。

「だいち」の高精度軌道決定では、約5年のミッション期間において0.31 m (3 σ) の位置決定精度を達成し、世界各地を観測した210万シーンの合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) 画像処理に貢献した。特に、2011年3月に発生した東日本大震災では、震災前後の地殻変動を干渉SARという手法で正確に捉え、災害状況の把握や調査ポイントの特定にも貢献することができた。⁽²⁾

「だいち2号」の高精度軌道決定は、ソフトウェアモデルの改良を進めることでより高い精度を追求するとともに、高精度軌道データ提供の速報性を向上させ、精度と利便性の向上に寄与している。だいち2号打ち上げ後の初期評価では、10 cm (1 σ) 以下の軌道決定精度を達成させることに貢献した。⁽³⁾ だいち2号が、2016年4月に発生した熊本地震における災害状況の迅速な把握などに貢献していることは記憶に新しい。⁽⁴⁾

干渉SARは今後、広域の陸域観測や、海面高度計測ミッションへと展開される。これらミッションには、位置で10 cm、高度で3 cmという世界最高レベルの軌道決定精度が求められている。⁽⁵⁾ JAXAでは、これら精度を定常的に達成するため、最先端のアルゴリズムを取り入れた研究開発を続けている。富士通はこの研究開発に携わり、高精度軌道決定に必要な最新の技術要素を習得し、GRACE衛星の軌道決定で2 cm以下の精度を実現することに貢献した。⁽⁶⁾

● 軌道時刻推定システム

準天頂衛星システム (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) は、初めて民間利用を開始した日本の衛星測位システムである。衛星測位システムの利用者は、米国のGPSと同様に、衛星測位用の人工衛星 (以下、測位衛星) から測位信号を受信できれば世界中のどこでも自身の位置と時刻を正確に割り出すこと (以下、測位) ができる。衛星測位システムは、カーナビや携帯端末だけでなく、運輸、建設、防災など様々な分野で利用されている。

準天頂衛星「みちびき」はQZSSの初号機である。みちびきは、日本の真上に8時間ほど滞在する準天頂軌道と呼ばれる、従来の衛星にない軌道を飛行

している。みちびきはGPSと互換性のある測位信号を送信し、GPS衛星と組み合わせて測位できる。準天頂軌道は、日本の真上に衛星が滞在するため、都会のビルの谷間や、山間部の谷間など、空の見通しの悪い場所でも測位が可能になるよう考えられた軌道である。

みちびきは、2011年6月22日にサービスを開始して以来今日まで、自身の正確な位置と時刻情報を休みなく送信し続けている。富士通は、QZSSの地上システム整備に携わり、測位衛星用の軌道時刻推定システムを開発した。このシステムは、日本国内を中心に世界9か所に配置されたモニタ局で受信したみちびきの測位信号を観測データに用い、軌道と時刻オフセット (基準となるGPS時からのずれ) をリアルタイムに推定する。リアルタイム軌道時刻推定の結果は、みちびきが送信する軌道と時刻情報の源泉に使われるとともに、システム健全性の監視にも使われる。軌道時刻推定処理は、高精度軌道決定システムで培ったアルゴリズムを採用している。

みちびきの軌道と時計の予報値に起因する測位利用者の観測データにおける誤差 (SIS-URE: Signal-In-Space User Range Error) は、平均30 ~ 40 cmの精度を維持し、みちびきとGPSを組み合わせた測位は、GPSだけの測位より高い精度を達成することができている。^{(7),(8)} また、システムを二重化することなどにより、衛星測位サービスを非常に高い稼働率で提供することができている。

● スペースデブリ観測システム

1990年代に、NASDAにおいてスペースデブリ (以下、デブリ) 観測システムのシステム化の検討や構築が開始された頃から、富士通もデブリ関連の技術開発に携わっている。実際の観測データを使ったデブリ軌道決定がJAXAで実験的に開始されたのは、光学観測が2000年、レーダー観測が2004年である。その後、デブリの急激な増加により、2008年にはJAXA衛星のデブリ接近予測運用が開始された。現在では、デブリとの接近予測結果に基づく運用衛星のデブリ回避制御計画の立案および実施を担う技術へと拡大・発展している。

現在、衛星軌道上を飛翔しているデブリは、追跡が可能なもの (大きさ10 cm以上) で数万個、追跡が困難な微小なデブリを含めると数兆個に及ぶ

と推定されている。これらデブリが国際宇宙ステーションに衝突したことにより、太陽電池パネルの破損、放熱板に穴が開いたといった事例が報告されている。⁽⁹⁾更に大きなデブリが、人工衛星や国際宇宙ステーションに衝突した場合の被害は甚大なものとなる。

このような事故を回避するために、国際的に宇宙状況把握 (SSA: Space Situational Awareness) の重要性、必要性が高まっている。日本は宇宙基本計画 (2015年1月) において「日米連携に基づく宇宙空間の状況把握のために必要となるSSA関連施設および運用体制を、平成30年代前半までに構築する」という今後の活動方針を定めた。

SSAに必要な技術要素として、①スペースデブリをレーダー観測や光学観測により軌道決定する技術、②スペースデブリと運用衛星の接近・衝突リスクを予測する技術、③燃え尽きないで地上に落下する可能性のあるスペースデブリが大気圏に再突入する時刻と位置を予測する技術、などが必要と想定される。富士通は、既にこれら技術を保有しており、日本のSSAシステムの一部を今後担うことになるJAXAのSSAシステムの開発を行っている。

● 月重力場推定システム

軌道決定とは、元来は人工衛星に働く加速度を正確にモデル化した上で、観測データと計算シミュレーションの差 (観測量残差) が最小となるように、人工衛星の軌道を推定する技術である。これを応

用して、逆に軌道決定の結果として得られた観測量残差から、その差をより小さくする加速度モデルを推定するのが、重力場推定の技術である。富士通は、月周回衛星「かぐや」が取得した月の表裏両面の観測データを1年以上統計的に処理することで、月の重力分布の推定を行う「月重力場推定システム」をJAXAから受託開発した。また、実際に得られた観測データを用いて月の重力を推定する研究を2007年からJAXAより受託し、国立天文台との共同研究として実施した。当時、月の裏面で取得した観測データを使用して月の重力分布を計算したのは世界初であった。⁽¹⁰⁾

● 軌道計算ソフトウェアパッケージORBITER FORCE

2008年に宇宙基本法が施行されて以降、人工衛星の開発・運用に関わる組織がJAXA・文部科学省だけでなく他省庁・大学・民間企業などに拡大しつつある。特に、大学・民間企業では小型衛星への意欲が高く、従来よりも安価で手軽に構築できる衛星運用システムが求められている。その一方で、省庁においては、機能をブラックボックス化せず技術の透明性・確実性を確保することや、迅速なサポート体制が重要視される場合がある。これらのニーズに応えるため、富士通は軌道計算ソフトウェアパッケージFUJITSU Technical Computing Solution ORBITER FORCE (図-4) を2013年に販売開始した。ORBITER FORCEは、実際に衛星運用に使用されてきた軌道計算アルゴリズムを、

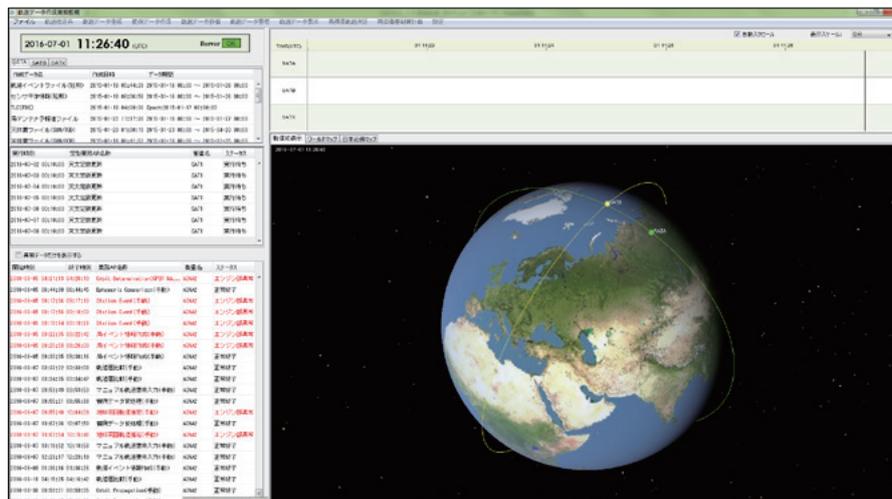


図-4 ORBITER FORCE

JAXA知的財産利用の制度を活用して富士通がパッケージ化したものである。カスタマイズによる衛星個別要求への柔軟な対応や、衛星運用システムとしての構築支援までを一括してサポートしており、小型衛星から大型実用衛星まで幅広く対応が可能となっている。今後、機能の拡張・充実化を更に進め、衛星運用や宇宙飛翔体の軌道決定に関わる新たなプレーヤーへ提供していきたい。

む す び

本稿では、人工衛星やスペースデブリなど、宇宙飛翔体の軌道決定、軌道予報、軌道解析分野において富士通が培ってきた技術、および開発したシステムについて述べた。富士通の人工衛星関連の技術は、衛星のミッションとともに成長し、適用範囲を広げ、進化を続けている。今後も、宇宙状況把握、災害監視、地球環境監視、深宇宙探査などにおいて、ミッション成功のために新しい技術をシステム化し、衛星の運用に供していく。また、GPSがそうであったように、これら技術を広く一般の人が享受できるようにソリューションの提案を実施していく。

富士通の軌道力学計算技術の習得に当たって、業務委託により技術的な協力・指導、および技術実証の場を提供して下さったJAXAのみなさまに感謝いたします。

参考文献

- (1) 竹内 央：小型ソーラー電力セイル実証機“IKAROS”を利用したVLBI実験. RFワールド, No.20, 2012年11月.
- (2) 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)プロジェクトに係る事後評価について. 宇宙開発委員会 推進部会, 平成24年1月16日.
- (3) 秋山恭平ほか：ALOS-2高精度軌道決定の初期評価結果. 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月.
- (4) 国土交通省 国土地理院：平成28年熊本地震に関する情報 だいち2号干渉SARによる変動の検出.
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html#3>
- (5) A. Uematsu et al. : Japanese Altimetry Mission, COMPIRA. International Workshop on Laser Ranging, 11-15 November 2013.
- (6) 秋山恭平ほか：搬送波位相アンビギュイティの整

数推定手法を用いた低軌道衛星の精密軌道推定について. 第57回宇宙科学技術連合講演会, 2013年10月.

- (7) 山本静夫ほか：準天頂衛星システムプロジェクトの終了審査の結果について. 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会 (第13回), 平成25年12月24日.
- (8) 梶原延浩ほか：準天頂衛星「みちびき」の高精度軌道時刻推定精度解析. 第59回宇宙科学技術連合講演会, 2015年10月.
- (9) NASA Orbital Debris Quarterly News. NASA, Vol.18, No.4, Oct. 2014.
- (10) N. Namiki et al. : Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya). Science, 323, p.900-905, 2009.

著者紹介



片桐征治 (かたぎり せいじ)

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。



青島千晶 (あおしま ちあき)

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。



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。



山本洋介 (やまもと ようすけ)

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。