

宇宙技術で高精度測位社会を支えます

せいみつれき ～ GNSS 衛星の精密暦の整備～

国土交通省 国土地理院 測地観測センター 電子基準点課 課長補佐 たかまつ 高松 なおふみ 直史

1. はじめに

全球測位衛星システム（GNSS：Global Navigation Satellite System）は、人工衛星から送信される電波を用いて地上の位置を精密に決定する技術です。各国・各地域がそれぞれ衛星を運用しており、米国の GPS、日本の準天頂衛星システム「みちびき」（QZSS）、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo が代表的です。GNSS の活用はスマートフォンのガイド機能やカーナビゲーションといった日常的な用途にとどまらず、近年は ICT 施工や自動運転、ドローン物流等の位置情報サービス事業にまで及んでおり、今や社会経済活動を継続する上で必要不可欠な技術となっています。

国土地理院が運用する「電子基準点」（写真－1）は、これらの衛星からの電波を 24 時間 365 日受信し、高精度に位置を求める観測施設で、約 1,300 点の電子基準点がおおむね 20 km 間隔で日本全国をカバーしています。電子基準点は三角点とともに、VLBI（宇宙のかなたにある天体から届く電波を利用して、地球上のアンテナの位置を高精度に測る技術）によって決定された日本の位置に基づいて、国内の位置の基準を「国家座標」として実現する測量標で、国土の明示・管理・保



写真－1 電子基準点（国土地理院構内）

全および各種測量に用いられています。

また、稠密かつ連続的な観測により、地殻変動の監視も行っています。日本は世界的に見ても地殻変動が激しい地域にあり、過去のある時点における位置（座標値）は年月の経過に伴い、実用上無視できないほどずれていきます。このため、過去のある時点の位置を基に作られた地図と、スマートフォンやカーナビゲーションで測定した瞬間に得られる位置を整合させるには、累積する地殻変動を補正する仕組みが必要となります。国土地理院では電子基準点の毎日の位置情報である「電子基準点日々の座標値」を算出し、地図と測位を整合させる仕組み（定常時地殻変動補正システム：POS2JGD）を整備しています。

これら電子基準点を用いた位置の管理を支える

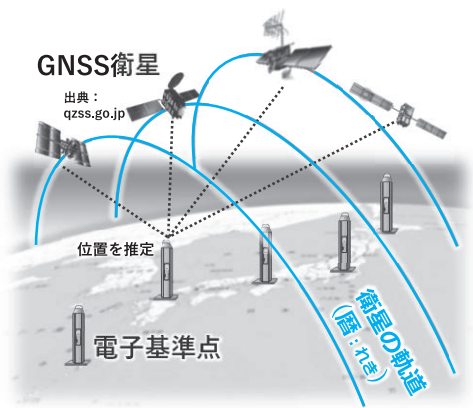


図-1 GNSS 衛星の軌道情報「暦」

のが、衛星の軌道情報である「暦」です(図-1)。GNSSは暦を基にして地上の位置決定を行うシステムのため、精度の高い位置管理には精度の高い暦である「精密暦」が必要となります。

2. 放送暦と精密暦

暦には精密暦のほか、放送暦があります。放送暦は各衛星プロバイダの監視局十数局程度の観測データを基に生成される情報で、衛星を経由して地上の観測施設に直接配信されます。情報をリアルタイムに得ることができますが、軌道情報の精度はやや粗くメートル単位の誤差を伴います。

一方、精密暦は電子基準点を含む世界中の数十～数百点規模の観測データを解析することで得られる暦で、センチメートル単位の高い精度で実現されます。精密暦の配信は基本的にはインターネットを介して行われます。

3. 国際 GNSS 事業による精密暦算出

精密暦の算出において重要な役割を果たすのが国際 GNSS 事業 (IGS: International GNSS Service) です。IGS は地球科学等の研究活動の支援、社会一般での GNSS の利用促進を理念として平成 6 年に開始した事業で、現在 200 以上の参加機関の国際協力により運営されています。

IGS は国土地理院が運用する 8 点の観測点を含む、世界中の約 500 点からなる地球規模の GNSS 観測網を構築しています。これらの観測データを利用して、IGS が認定した「解析センター」は各々独自の精密暦を算出しています。IGS はこれら各解析センターの精密暦を統合処理することで、世界最高精度の精密暦である「IGS 暦」を算出しています(図-2)。解析センターは、長らく北米、欧州、中国の 12 の機関で構成され、日本からの参画はありませんでしたが、令和 5 年 12 月、国土地理院・国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が日本で初めて解析センターに認定されました(表-1)。

4. 国土地理院・JAXA による精密暦算出

各解析センターの精密暦は IGS 暦の精度を左右するため、IGS による解析センターとしての認定には高い技術力が求められます。国土地理院は

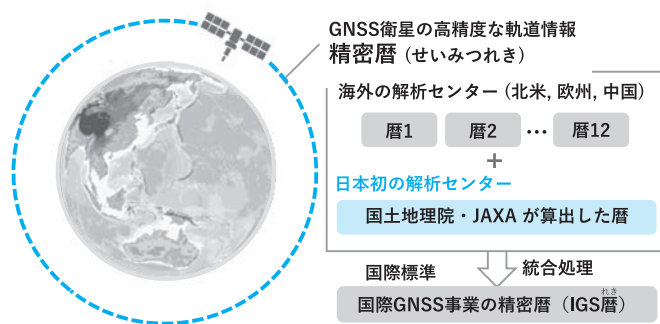


図-2 国際 GNSS 事業 (IGS) の精密暦「IGS 暦」の算出手順

表-1 解析センター一覧

組織和名	国名
カナダ天然資源省	カナダ
武漢大学	中国
Pecny 測地観測所	チェコ
フランス国立宇宙研究センター	フランス
欧州宇宙機関/欧州宇宙運用センター	ドイツ
ドイツ地球科学研究所	ドイツ
国土地理院・JAXA	日本
欧州軌道決定センター	スイス
NASA ジェット推進研究所	米国
マサチューセッツ工科大学	米国
米国国家海洋大気庁/米国国家測地測量局	米国
スクリップス海洋研究所	米国
米国海軍天文台	米国

(<https://igs.org/acc> をもとに作成。順序は国名のアルファベット順)

電子基準点の大規模な運用を開始した平成8年以降、「電子基準点日々の座標値」をはじめとするGNSSデータの解析にあたっており、解析ノウハウを蓄積してきました。

一方、JAXAは国産のGNSS軌道計算ソフトウェアであるMADCOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)を開発するなど、軌道情報の算出における豊富な知見を有しています。これらGNSSに関する豊かなノウハウを有する両機関が連携することにより、高い精度の精密暦を安定的に算出する体制が確立されました。

この体制の下、令和5年7月から独自の精密暦を定常的に算出し、IGSによる品質評価が進められました。その結果、十分な精度と運用能力を有することが確認されたため、令和5年12月、IGSの最高意思決定機関である理事会(Governing Board)にて、解析センターとして認定されました。

解析センターの略称は「JGX」で、Jは日本(Japan)、Gは国土地理院(Geospatial Information Authority of Japan)、XはJAXAを表しています。認定に伴い、JGXの精密暦は新たにIGSの統合処理に加えられ、IGS暦の算出に初めて日本が貢献することとなりました。

MADCOCAは、複数種類のGNSSを対象とした解析が可能で、個々の衛星の暦を、地球自転の

ゆらぎやほかの天体の影響なども加味して高精度に推定するためのソフトウェアです。解析に用いられる機能は、主にリアルタイム推定機能、後処理推定機能の二つです。

リアルタイム推定機能は観測データを逐次的に処理し、リアルタイムに衛星の位置を追尾することができます。主に防災分野での活用が進められており、気象庁における気象予報に活用されているほか、巨大地震における地震の規模や地殻変動を即座に把握することを目的として、国土地理院が運用する「電子基準点リアルタイム解析システム」(REGARD)への活用に向けた検証が現在行われています。

後処理推定機能では、一定期間分(通常は1日から数日程度)のデータをまとめて処理することで、期間内の整合性を保持し、より高精度な精密暦を得ることができます。IGS暦の統合処理に用いられているのは、この後処理推定機能を用いた精密暦です。いずれの解析でも、電子基準点やIGSの観測網のデータを用いることで、さまざまな軌道の衛星に対して高い精度で暦を算出します。

図-3は、国土地理院・JAXAが実施した、後処理推定機能による精密暦の品質評価結果です。IGS暦を基準とした乖離度を1日ごとに計算し、令和5年7~12月までを対象期間として示しています(ただし、GalileoはIGS暦に含まれないため、欧州宇宙機関の精密暦を基準として評価)。青線がJGXの精密暦、灰色線がほかの解析センターの精密暦を示しており、各解析センターと比較して遜色ない品質であることが分かります。

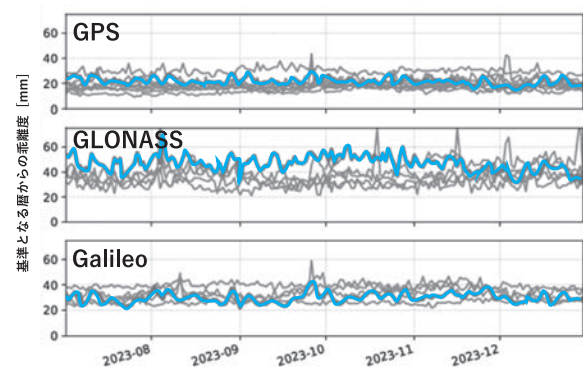


図-3 精密暦の品質評価結果

後処理推定機能による精密暦は、IGSのデータセンターに加えて、「GNSS精密暦提供サービス」(<https://jgxnnet.gsi.go.jp/ja/top/>)として国土地理院から一般公開しています。

5. みちびきの精密暦整備に向けて

平成30年11月、みちびきは4機体制でサービスを開始しました。みちびきはGPSを補完することで、従来GPSだけでは難しかった都市部や山間部など上空の視界に制約がある場所での測量の実施に貢献しています。また、電子基準点のデータを用いて実現される、「センチメートル級測位補強サービス」(CLAS)は、みちびきから地上の受信機に直接送信される高精度な測位サービスで、位置情報サービス事業での活用が進んでいます。

みちびきは、宇宙基本計画工程表で、令和6～7年度にかけて7機体制構築に向けた打ち上げが予定されており、みちびき単独での持続測位が可能となる見込みです。また、11機体制に向けた検討・開発の着手にも触れられており、みちびきを利用する機会のさらなる拡大が期待されます。一方で、みちびきの精密暦はIGS暦には含まれていないのが現状で、今後の7機体制構築、その先の11機体制に向けて、高精度測位を支える基盤としてみちびきの精密暦を整備することは大変重要です。

現在、国土地理院・JAXAが算出している精密暦はGPS、GLONASS、Galileoを対象としていますが、みちびきについても算出方法の検討を進めています。みちびきは日本を中心としたアジア・オセアニア地域の利用に特化したシステムで、令和6年4月時点では、同地域を8の字軌道(準天頂軌道)で周回する3機と赤道上空の静止軌道に配置する1機から構成されています。

このため、精密暦の算出に使用可能な観測点に地域的な偏りが生じ、地球全体を周回する

GPS、GLONASS、Galileoと比べて、高い精度での軌道決定には本質的な難しさがあります。その中で国土地理院・JAXAは、軌道情報の推定精度を左右する要因の一つである、衛星に加わる物理的な力の正確な表現に注力するなど、みちびきの精密暦の精度向上に努めています。なお、みちびきを含む精密暦は、前述のGNSS精密暦提供サービスから試験提供を行っています。

6. おわりに

今回、国土地理院・JAXAの精密暦算出に関する技術力が国際的に認められたことは、公共測量等の各種測量や位置情報サービス事業の継続・発展において大きな意義を持ちます。電子基準点は、これらが参照する国内の位置の基準を与え、高精度な位置基盤として用いられますが、精密暦はこの実現に不可欠な構成要素です。したがって、精密暦の算出体制が国内で確立されたことで、より自律的、安定的な位置の基準の維持・管理が可能となります。

今後、みちびきの打ち上げが進み、その精密暦が整備されることで、高精度な衛星測位を実現する環境がさらに強化され、各種測量や位置情報サービス事業の発展が促進されるものと期待されます(図-4)。引き続き、安定的な精密暦の算出に努めるとともに、みちびきの精密暦整備に向けた取組を実施し、高精度測位社会に必要な基盤の整備、更新を着実に進めていきます。

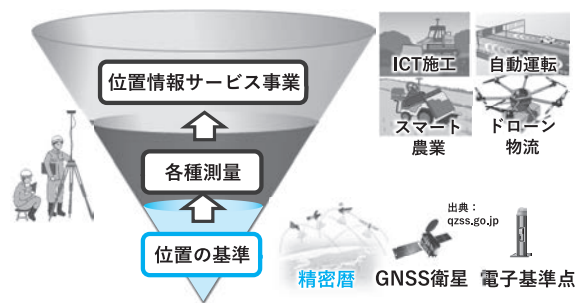


図-4 衛星測位におけるサプライチェーン