



準天頂衛星システム —センチメートル級測位補強技術—

佐藤友紀 (三菱電機 (株))

島 岳也 (三菱電機 (株))

小山 浩 (三菱電機 (株))

人工衛星を利用した測位

◆ GPS (全地球測位システム)

人工衛星を利用した測位は、通信、気象観測とならび、日常生活に最も深く浸透している宇宙利用である。GPS (Global Positioning System) は米国国防総省が運用する衛星測位システムであり、民生用の信号が一般に開放され、携帯電話やカーナビから航空機の離着陸の誘導まで、全世界で幅広く利用が普及している。GPS を用いた測位は、送信側と受信側で同期した符合列の空間伝搬による遅延を利用した距離観測値に基づいている。6つの異なる軌道面の異なる位相に配置された複数の衛星が測距用の信号を送信しており、ユーザは4機以上の衛星に対する距離観測値から、受信機の3次元の位置座標と時刻情報を得ることができる。衛星の軌道配置等の情報は、米国の NAVIGATION CENTER の Web サイト¹⁾ を参照されたい。

その利便性と、近年の市場製品の多機能化と高機能化に伴い、インフラとして位置情報が安定して利用できることへの要求がますます高まっている。一方、GPS は、本来が米国の軍事目的で設計されたシステムであり、時間や場所によって利用できる衛星数が少ないという問題がある。また後述のように距離観測値にはさまざまな誤差が含まれ、アプリケーションによっては位置の品質 (正確度: Accuracy と精度: Precision) が十分ではないという問題がある。いつでもどこでも安定した衛星測位を実現するため、GPS を補完し、位置の品質を補強するための準天頂衛星システムの整備が開始されている。

◆ QZSS (準天頂衛星システム)

準天頂衛星システム (QZSS: Quasi Zenith Satellite System) は準天頂軌道と静止軌道に配置された複数の衛星と地上系 (追跡管制局などの衛星を運用するための設備群) で構成される日本の衛星測位システムである。準天頂軌道とは、高緯度の地域で天頂方向に長時間連続して衛星が見えるよう設計された軌道であり、静止軌道と同じく地球の自転周期に合わせた公転周期を持ちながらも、軌道面が赤道面に対し傾斜し、わずかな離心率が与えられた楕円軌道である。地球を1つの焦点とする長軸上の遠い側が日本上空となる準天頂軌道にGPSと互換性のある測位衛星を複数機配置することで、常時1機以上が天頂方向に見え、都市部や山間部など、遮蔽物の多い環境においても測位に必要な衛星数を確保することができる (測位補完)。さらに、GPSの距離観測値の誤差を補正する情報を配信することで、位置の品質の大幅な向上にも貢献する (測位補強)。

2010年9月に準天頂衛星初号機「みちびき」が打ち上げられ、我が国にとって新しい衛星測位技術の実証が広く行われた。その成果を踏まえ、新たに3機 (準天頂軌道に2機と静止軌道に1機) の打ち上げが決まり、2018年より4機体制による実用サービスが開始される。将来的には、持続測位が可能となる7機体制構築が計画されている²⁾ (図-1)。

センチメートル級測位

GPSの信号を用いた距離観測値には、さまざまな誤差が含まれる。大別して、(1)衛星のクロック誤差、軌道予報値の誤差 (軌道誤差)、衛星の信号バ

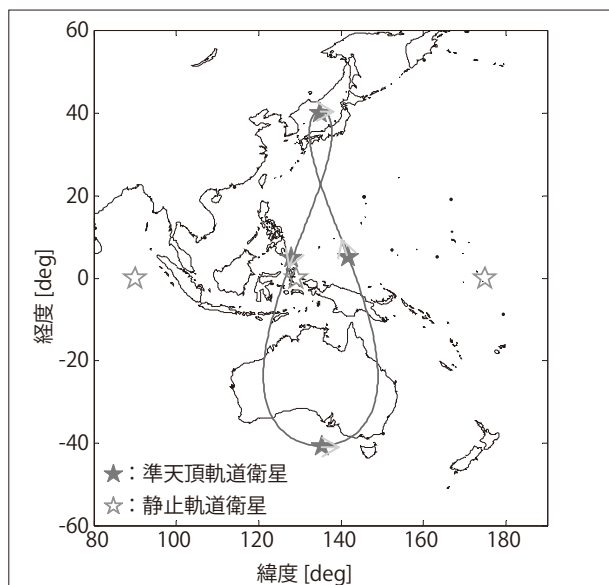


図-1 7機体制（衛星の位置はすべて概念的なもの）

イアス（複数の信号間の送信時刻の差）等の衛星に起因する誤差，(2) 電離層遅延，対流圏遅延等の大気起因する誤差，(3) 受信機のクロック誤差やマルチパス，観測ノイズ等，受信機および受信環境に起因する誤差が存在する。これらの誤差のため，GPS の距離観測値のみを用いた測位の精度は 10m 程度である。

GPS そのものの発展に伴い，距離観測値の誤差を補正する技術も発展してきた。その歴史は長く，1つのビジネス分野を形成し，国際標準化も進められている。誤差を補正する最も基本的な方法は，測位を行う受信機の近くに基準となる別の受信機（基準点）を配置し，両受信機で得た距離観測値の差分を用いて相対測位を行うことである。距離観測値の差分により，衛星に起因する誤差と大気に起因する誤差を消去することができる。誤差を消去することに加え，マルチパスの影響と観測ノイズの小さい搬送波位相観測値（符合列を乗せている搬送波の位相角の観測値）を用いることにより，位置の品質をセンチメートル級まで高めることができる。基準点からの距離が短いほど補正精度は高く，単一の基準点を用いる場合，実用上は測位を行う受信機から数十 km 以内の範囲にある基準点を用いることが望ましい。また複数の基準点で構成した電子基準点網での観測値を用

いることで，基準点からの距離による補正精度の劣化を低減し，広範囲でセンチメートル級の測位を行うことができる。複数の基準点での観測値から，ユーザの近傍の基準点での誤差補正量と基準点周りの誤差変動の面補正パラメータを生成し提供する FKP（Flächen Korrektur Parameter）方式，複数の基準点での観測値を補間し，ユーザ近傍の仮想基準点での観測値として提供する VRS（Virtual Reference Station）方式が代表的である。

上記のように観測値を直接補正する方式に対し，Fugro 社の Starfix，NavCom 社の StarFire 等のサービスのように，近年では複数の基準点での観測値から衛星クロック誤差，軌道誤差，衛星の信号バイアス等の各誤差の物理的状态を推定し，推定した状態量をユーザに提供し，観測値の次元に変換した上で観測値を補正する方式が注目されている。

準天頂衛星システムを用いたセンチメートル級測位補強サービス

◆ サービスの特徴

準天頂衛星システムはその測位補強機能の1つとして，センチメートル級測位補強サービスを提供する（図-2）。センチメートル級測位補強サービスでは複数の基準点での観測値に基づいて誤差の物理的状态を推定し，推定した誤差の状態量を，測位補強情報として日本全国に準天頂衛星から一律に配信する。基準点は，国土地理院が整備し維持管理を行う GNSS 連続観測システム³⁾（GEONET：GNSS Earth Observation Network System）を活用する。GEONETでは，全国の約1,300カ所に配置した電子基準点の測位を行い，日々の正確な座標値を算出している。

本稿で紹介するセンチメートル級測位補強サービスでは，前述の衛星クロック誤差，軌道誤差，衛星の信号バイアスに加え，各地域の電離層遅延と対流圏遅延を補正する情報も提供する。これにより，よりリアルタイム性の高いセンチメートル級の測位が実現できる。また電子基準点網での連続観測データに基

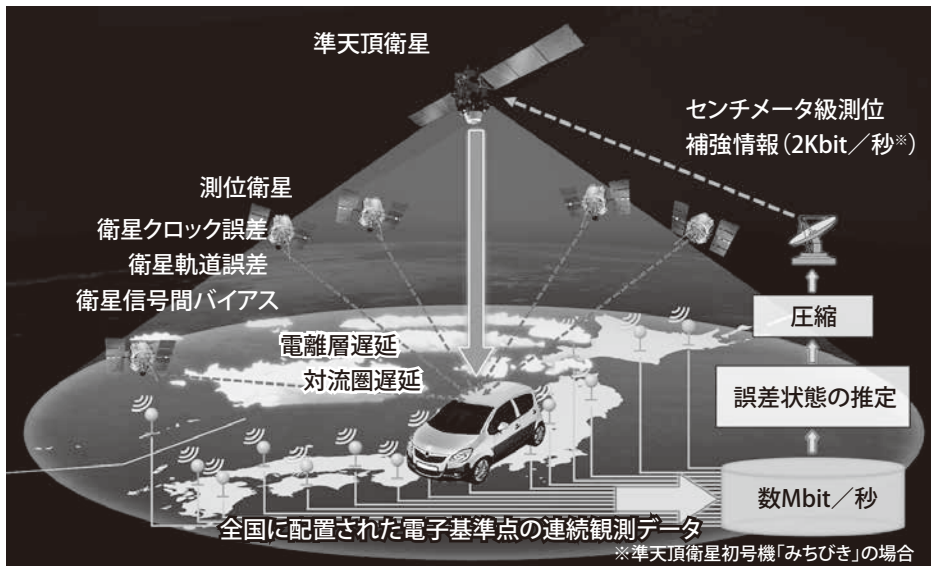


図-2 センチメートル級測位補強サービスの概念図

づき測位補強情報を生成するため、測位補強情報により補正した距離観測値を用いたユーザは、GEON-ETの座標値を基準とした測地系における正確な座標値を得ることができ、国家基盤地図を使用したアプリケーションにも適用できる。

◆ 測位補強情報の圧縮

サービスの普及に向けては、伝送レートを下げ、一般のGPS用の小さなアンテナでも測位補強情報が受信できるよう、品質を保ちつつ情報量を少なくすることが重要である。準天頂衛星初号機「みちびき」の場合、準天頂衛星から2Kbit/秒程度の伝送レートで測位補強情報を配信している。この伝送レートは通信衛星や気象観測衛星の回線と比較してかなり低い。

「みちびき」で使用した、個々の誤差の物理状態量を推定する方式は、誤差情報が抽出されるため情報量が少なくなる点でも優れており、観測データから状態量への変換により、観測量の次元のままの測位補強情報を送る場合と比較して、データ量は約10分の1程度となっている。さらに変動の速い状態量と遅い状態量を分け、それぞれの変動量に応じた時間周期と空間周期（場所により異なる大気起因の誤差の補強情報を、約20km間隔の電子基準点での推定値から変換して提供する、格子点の間隔）で

送ることにより、実用上無視できる程度の品質の劣化の範囲内で、データ量をさらに100分の1程度に低減することが確認されている。

◆ 「みちびき」による利用実証結果

「みちびき」を用い、前述のセンチメートル級測位補強技術の利用実証が行われた。実証では、測位補強情報の生成、圧縮、衛星からの配信、端末側での受信、受信後、伸長した測位補強情報を適用した測位まで、一連の処理を行うシステムを整備し、公募で集められた多岐に渡る実験テーマによる評価が行われた⁴⁾。測位補強情報の圧縮にあたっては時間変動の速い衛星クロック等高速成分の配信周期を5秒、その他の配信周期を30秒とし、電離層遅延と対流圏遅延は60km間隔の全国の格子点での値を提供する設計により、データ量を低減し、「みちびき」のLEX (L-band Experiment Signal) の回線2Kbps (うちデータ部1695bps) を用いて測位補強情報を配信した。

代表的な実験としては、北海道大学で行われた農作業のロボット化が挙げられる。同実験では納屋から圃場に走行し、圃場にて土壌を掘り起しする一連の作業が自動化できる可能性が示されている。

2020年代に向けて

2018年の4機体制の準天頂衛星システムによるサービス開始に向けて、技術改良と各サービスの設計、そして新産業創出のための活動が進められている。日本を取り巻く環境が絶えず変化中、ロシアのGLONASS、中国のBeiDou、インドのIRNSS、欧州のGalileo等、近年では世界各国が自国の測位衛星システムの整備を進めており、我が国の国際競争力の維持・強化のためにも、準天頂衛星システムの確立は欠かすことができない。また2020年に開催される東京オリンピックは、たとえば会場に向かうルートのナビゲーションなど、準天頂衛星システムによるセンチメートル級測位補強技術を世界にアピールする大きなチャンスである。日本人のみならず世界からの来訪者にも、楽しさと驚きを持って準天頂衛星システムによるセンチメートル級測位を利用してもらえるような、サービスを実現したい。

参考文献

- 1) U. S. Department of Homeland Security, Navigation Center, <http://www.navcen.uscg.gov/>
- 2) 実用準天頂衛星システム事業の推進の基本的な考え方, http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/pdf/kakugi_jun.pdf (Sep. 30 2011).
- 3) 中川弘之, 他: GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, Vol.118, pp.1-8 (2009).
- 4) 準天頂衛星初号機「みちびき」を使用した民間利用実証報告書, 財団法人衛星測位利用推進センター (May 16 2012).

(2015年4月23日受付)

佐藤友紀 ■ Sato.Yuki@dn.MitsubishiElectric.co.jp

2009年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。準天頂衛星システムを用いたセンチメートル級測位技術の開発に従事。現在、同社、先端技術総合研究所に所属。The Institute of Navigation 会員。

島 岳也 ■ Shima.Takeya@cb.MitsubishiElectric.co.jp

1997年大阪大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士。同年三菱電機(株)入社。宇宙機の姿勢軌道制御技術の開発に従事。現在、同社、先端技術総合研究所に所属。日本航空宇宙学会、日本機械学会、計測自動制御学会会員。

小山 浩 ■ Koyama.Hiroshi@aj.MitsubishiElectric.co.jp

1987年東京大学工学系大学院博士課程修了、工学博士。同年三菱電機(株)入社。ランデブ宇宙機、観測衛星の開発・運用等に従事。現在、同社、電子システム事業本部、役員技監。日本航空宇宙学会、計測自動制御学会会員。

