



準天頂衛星システム初号機「みちびき」

小 暮 聡

GPSを代表とする衛星測位システムの利用は私たちの社会生活に広く浸透しており、位置情報や時刻同期など様々な分野で活用されている。近年、搬送波位相を用いた精密測位利用が拡大しており、農機や建機の自動制御への応用も進んでいる。GPSだけでなく複数のGNSS利用によって、これまで周囲の障害物による信号遮蔽やマルチパスなどによって精密測位が難しかった都市部や林野内においても、数cmオーダーの精度で精密測位が行える環境が整うことが期待されている。本稿では準天頂衛星システム初号機「みちびき」と、「みちびき」を用いた複数GNSS対応の単独搬送波位相測位技術の開発状況について紹介する。

キーワード：衛星測位、GPS、GNSS、準天頂衛星システム、「みちびき」、単独搬送波位相測位

1. はじめに

衛星測位は、宇宙技術の利用という観点では、衛星通信、衛星放送、気象観測に次いで、最も我々の社会生活に浸透、広く利用されている技術分野であろう。カーナビや携帯電話、スマートフォンの道案内や場所に応じた情報検索機能、携帯電話基地局の時刻同期など、目に見える利用から、目に見えないバックグラウンドでの利用まで、もはや朝起きてから寝るまでの間に衛星測位技術の恩恵を受けない人間はいないのではないだろうか。

衛星測位は、地球の周りを回る測位衛星からのスペクトラム拡散変調された信号を受信、メッセージに含まれる時刻情報と衛星の軌道情報から、衛星の送信アンテナとユーザの受信機アンテナ間の距離を精密に測定（この距離は受信機時計の誤差を含むため擬似距離と呼ばれる）し、4つ以上の測位衛星からの擬似距離を用いて、三次元の位置（X、Y、Z）と、受信機の時計誤差（T）の4つの未知数を解くのが、その基本原理である。この時、ユーザの測位精度は、衛星と受信機間の測距誤差と、受信機と衛星の幾何学的な配置（DOP：Dilution of Precision、精度劣化係数）によって決まり、この両者を良くすることが、ユーザ測位精度の改善に繋がることになる。

米国の衛星測位システムであるGPSは、現在、高度約20000kmの円軌道を周回する31機の衛星で運用されており、空が開けた（DOPが良い）場所であ

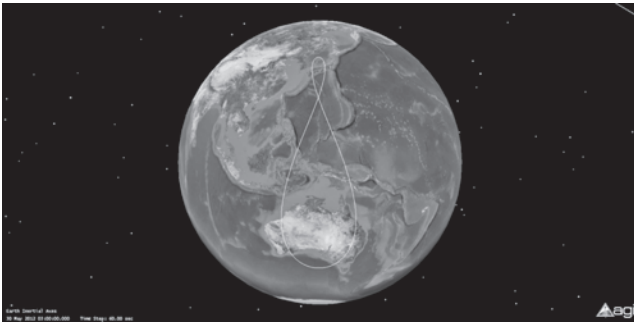
れば、8～10機程度の衛星からの信号が受信可能であり、コード位相を用いた単独測位により、数メートルの精度で位置を求めることができる。測量や測地利用、農機や建設機械の制御など、より精密な数cmから数mmオーダーの精度が要求される場合には、搬送波位相を用いた測位を行う必要があり、地上の電子基準点や、ユーザが設置する固定の基準点との相対測位によって所望の精度を得るのが一般的である。

ユーザの測位精度は、ユーザの利用環境に大きく依存しており、狭い場所に多くのビルが密集している都市部や、地形によって衛星からの信号がブロックされやすい山間地、森林内においては、衛星測位に必要な4機以上の衛星からの信号を受信することができないことや、4機以上からの信号が受信できたとしても、衛星配置が偏っていたり（DOPが悪かったり）、反射波やマルチパスが影響したりして、実際の測位精度が大きく劣化することがあり、これが衛星測位利用の大きな課題となっている。

準天頂衛星システムは、我が国の上空に長時間滞空し、GPSと同等の信号を送信してGPSを補完、さらに擬似距離や搬送波位相に含まれる誤差の補正情報を天頂付近から配信することによって、前述した衛星測位の弱点を補うだけでなく、精度や信頼性などの測位性能も改善、我が国及び周辺地域においてより高度な衛星測位利用を可能にすることを目的に開発されたシステムである。

このシステムの衛星の軌道には、地球自転周期と同

じ軌道周期を持つ、赤道面から約45度傾いた楕円軌道が用いられており、日本上空に地球からの距離が最も遠くなる点（遠地点）が来るようにすることによって、日本付近での可視性が高められている。この軌道は、日本とオーストラリアの間で衛星の直下点軌跡が8の字を描くことから、8の字軌道とも呼ばれる。3機以上の衛星が順次日本上空を通過するように配置することで、常に1機以上の衛星が、日本の天頂付近からサービスできるようになる（図一1に準天頂衛星の地上軌跡を示す）。



図一1 準天頂衛星の地上軌跡

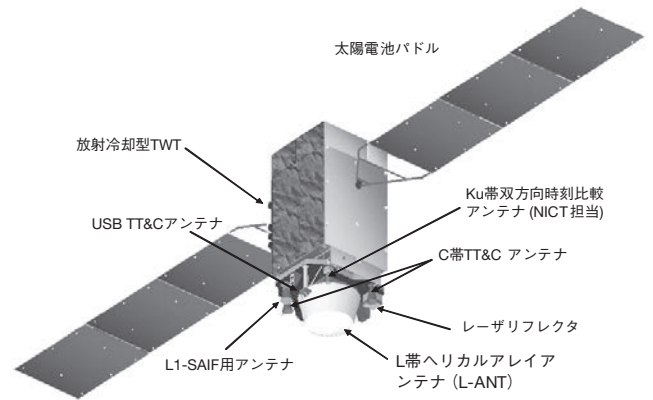
準天頂衛星システムの研究開発は2003年度に、民間企業が整備する移動体通信・放送システムに国の測位技術研究開発ミッションが相乗りする官民連携プロジェクトとしてスタートした。しかし、後に民間が通信放送サービスの事業化を断念したため、最終的にはGPS補完・補強の技術実証及び利用実証を行うための実証衛星として初号機を打ち上げ、その成果を持って2機目以降の打ち上げを行うかどうかを判断することとなった。初号機は文部科学省、総務省、経済産業省、国土交通省の4省庁で協力分担して開発されることとなり、完成した衛星「みちびき」は2010年9月11日に種子島宇宙センターからH-IIA18号機によ



図一2 「みちびき」の打上げ



図一3 「みちびき」外観（地球指向面パネル）於：衛星システム試験



図一4 「みちびき」軌道上外観図

て打ち上げられている。図一2は「みちびき」を搭載したH-IIA18号機のリフトオフの瞬間、図一3は「みちびき」の打ち上げ前のシステム試験時に地球指向面から見た実機の写真、図一4は軌道上外観図である。

2. 「みちびき」の技術実証成果

前述したように、「みちびき」は、4省庁の連携の下、5つの研究機関が分担して開発と打ち上げ後の実証を実施しており、JAXAは、全体システムの開発とりまとめと、GPS補完技術及び、LEX信号を使った次世代の高精度補正方式として、単独搬送波位相測位（Precise Point Positioning：PPP）技術の開発と実証を担当している。誌面の都合もあるので、ここでは、JAXAが実施してきた技術実証実験の成果として2つの例を紹介したい。

(1) GPS補完技術の実証

まずはGPS補完技術の実証について述べたい。GPS補完技術においては、GPSが送信している航法

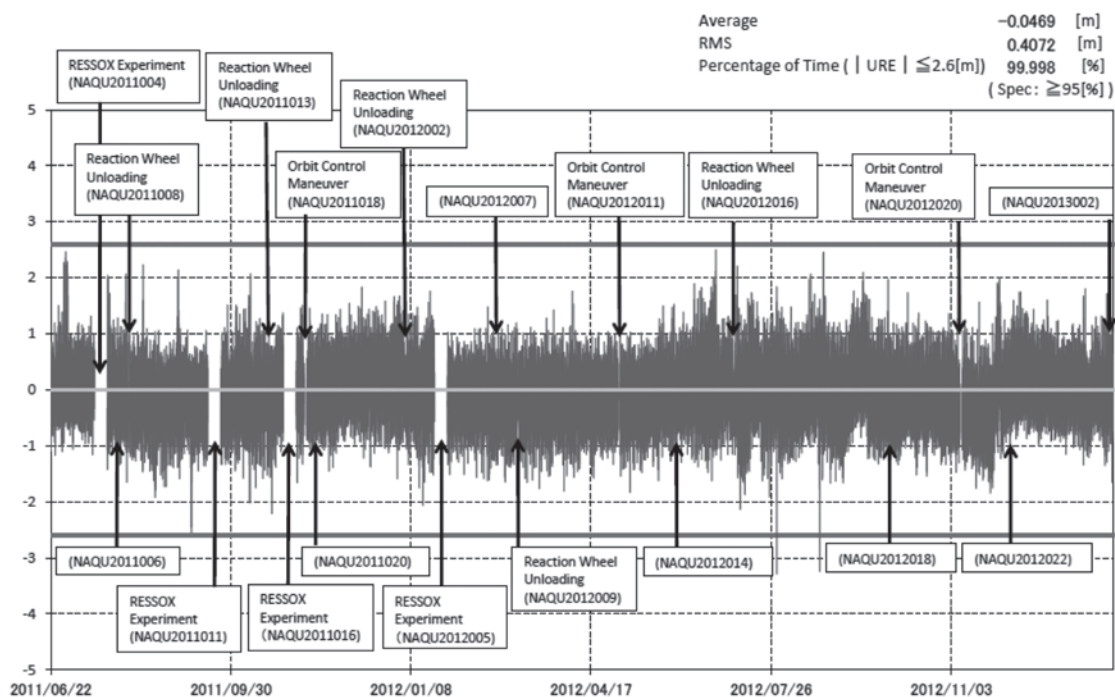
メッセージと同等の軌道・クロック誤差を実現することが最も重要な点であり、この軌道・クロック誤差に起因する誤差を SIS-URE (Signal-in-Space User Range Error) と呼ぶ。準天頂衛星システムは、GPS と組み合わせて用いることが前提となっており、測位に使われる他の GPS 衛星と同等の SIS-URE を有していなければ、ユーザの測位結果を悪化させてしまう恐れがある。また、「みちびき」に対して GPS と同等以上の SIS-URE が達成できれば、打ち上げる衛星数を増やすことによって、日本の衛星だけで GPS 同等以上の性能を有する衛星測位システムが構築できることになる。GPS の精度を向上する補強技術の方が、効果が分かりやすく重要に感じられるかもしれないが、衛星測位システム構築の基本技術である GPS 補完技術の開発は将来の自立的な衛星測位システム整備にとって非常に重要な技術開発であると言える。

その GPS 補完技術のコアとなるのが、「みちびき」の軌道及び衛星に搭載された原子時計とシステム時系からのずれを精密推定する技術である。「みちびき」の打ち上げ、初期チェックアウト終了後の 2010 年 12 月から、約 6 か月の期間をかけて、地上システムの軌道クロック推定ソフトウェアのフィルタのチューニングや、衛星の力学モデルの改良を行った結果、SIS-URE を仕様値である 2.6 m まで向上させることに成功、安定的に 2.6 m 以下の精度で航法メッセージを提供できることを確認した。2011 年の 6 月には、それまで一般ユーザに対して、「みちびき」の測位信号を

測位演算に使用しないように航法メッセージに付加していた使用禁止フラグ（アラートフラグ）を解除し、測位信号の一般利用を開始した。図—5 は、L1C/A 信号のアラート解除後、2013 年 1 月 3 日までの SIS-URE の変動を示す時系列のグラフである。オンボードの原振を地上の原子時計を基に直接制御する擬似時計実験や、スラスタ噴射によって衛星軌道に外乱が生じる運用（軌道保持制御やホイールアンローディング）実施時を除き 99.998% の時間率で 2.6 m 以下となっており、仕様を継続的に満たしている。この期間の RMS 値は 0.40 m で、これは GPS 衛星群の中でも、性能が良い新しい世代（Block-IIR, IIF）の GPS 衛星と同等の精度である。「みちびき」の SIS-URE は継続的に評価・監視されており、その結果は 1 か月ごとに、ウェブ上で公開されているので、関心のある方は是非ご参照いただきたい（「みちびき」実験成果公開ページ URL:http://qz-vision.jaxa.jp/USE/ja/exp_results_report）。

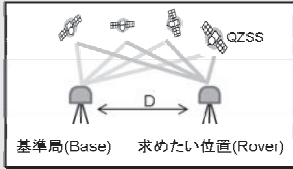
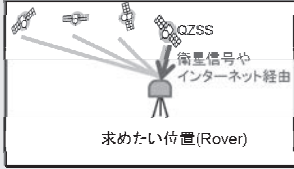
(2) 単独搬送波位相測位技術の実証

搬送波位相単独測位（PPP）技術は、従来の地上基準点との相対測位ではなく、搬送波位相を用いて単独測位を行う方式で、計算アルゴリズムの進歩と、測位衛星の軌道クロック精密推定技術の発達によって実現した技術である。表—1 に相対測位方式（RTK）と PPP 方式の差異をまとめる。従来の相対測位方式が、基準点観測値との差をとることで、観測データに含ま



図—5 「みちびき」の SIS-URE（ユーザ測距誤差）のトレンド

表一 1 相対測位と PPP の差異

項目	相対測位	PPP
基準局	必要 (受信機2台)	不要 (受信機1台)
決定座標	基準局からの相対座標	座標
電離層補正	2周波補正(短基線なら補正不要)	2周波補正
搬送波位相バイアス	整数化	実数値推定
測位精度(RMS)	数cm+2ppm×D	数cm
収束時間	数秒~数分程度	30分程度
概念図		

れる軌道や衛星クロック等の誤差をキャンセルしているのに対し、PPP方式では、軌道・クロックそのものが精密に数 cm 以下の精度で推定され、これらの情報を使うことが前提となる。このため、グローバルに展開された地上局のネットワークによる衛星軌道・クロックの精密推定とその結果をユーザに伝送するための回線が必要である。「みちびき」の実験用信号である LEX 信号は他の測位信号に比べて 2 kbps と速いデータ伝送レートを有しており、JAXA ではこの LEX 信号を用いて、精密な軌道・クロック情報を配信し、単独搬送波位相測位技術の実証を行っている。電離層や対流圏遅延補正情報のような地域的な情報と異なり、衛星の軌道やクロック情報はグローバルに有効なデータであり、衛星からの広域配信が適していると考えられる。

現在、「みちびき」の地上システムのモニタ局 12 局構成で GPS と「みちびき」の軌道とクロック情報を生

成し配信中であるが、当該情報を用いた PPP 測位精度は、水平方向で 30 cm (RMS)、垂直方向で 60 cm (RMS) と、精密測位利用には十分な精度とは言えず、暦の高精度化に取り組んでいるところである。このため、モニタ局の数を増やし、より広範囲に分散配置した局による軌道・クロック推定を行うとともに、複数 GNSS 対応の新しい軌道・クロック推定ソフトウェアとして MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) と呼ぶシステムを開発中である。

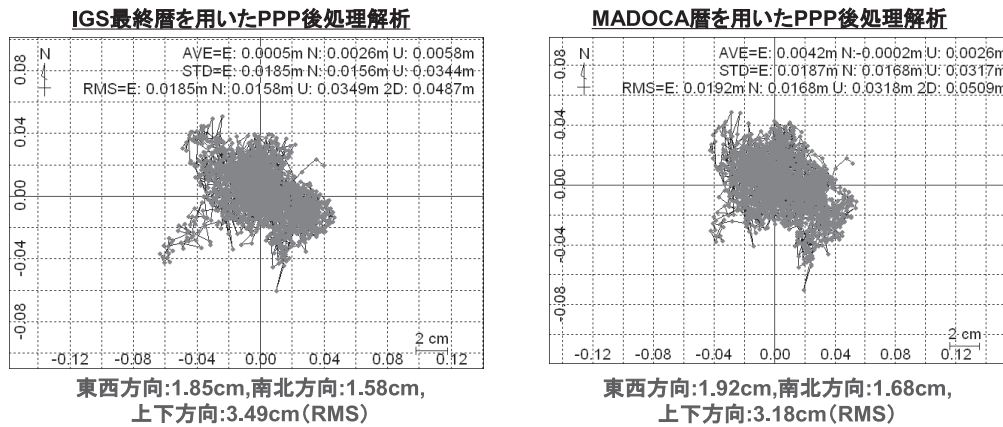
MADOCA は、平成 23 年度から 2 年間の計画で開発を進めており、23 年度には、オフライン処理系の開発を、24 年度は前年度の開発成果を基に、リアルタイム処理系の開発を実施中である。表一 2 は、MADOCA のオフライン処理系で推定した、GPS の軌道推定精度と、現在、世界で最も正確な GPS 軌道を推定、公開している国際 GNSS 事業 (International

表一 2 国際 GNSS 事業解析センターとの GPS 軌道・クロック推定精度比較

IGS AC	Analysis Software	# of Stas	Orbit RMS (cm)				Clock (ns)	
			R	A	C	3D	STD	RMS
	MADOCA 0.3.0	77	0.89	1.10	1.12	1.81	0.109	0.131
ESA	NAPEOS 3.5	110	0.97	1.33	1.09	1.98	0.116	0.183
CODE	Bernese 5.1	231	1.01	1.36	1.14	2.04	0.075	0.089
NGS	arc, orb, pages, gpscom	199	0.95	1.46	1.41	2.24	-	-
GFZ	EPOS.PV2	191	1.15	1.64	1.59	2.56	0.146	0.169
MIT	GAMIT 10.33, GLOBK 5.16	263	1.37	2.12	1.39	2.88	0.277	0.316
NRCan	GIPSY/OASIS-II 5.0	91	2.58	1.72	1.77	3.57	0.128	0.148
JPL	GIPSY/OASIS-II 5.0	142	2.62	1.67	1.98	3.68	0.168	0.226
SIO	GAMIT 10.20, GLOBK 5.08	258	2.42	2.26	1.77	3.75	-	-
GRG	GINS, DYNAMO	134	2.47	2.80	1.74	4.12	0.172	0.212

2011/1/1 - 12/31 (365 days), interval 900/300 s, wrt IGS Final

ESA : 欧州宇宙機関, CODE, バルン大学欧州軌道決定センター, NGS : 米国海洋大気庁測地測量局, GFZ : ドイツ地球科学研究センター, MIT : マサチューセッツ工科大学, NRCan : カナダ国家資源局, JPL : NASA ジェット推進研究所, SIO : スクリプス海洋研究所, GRG : フランス国立宇宙研究センター



IGS WTZZ 局の2011/3/1 0:00:00-23:59:30のデータを30秒間隔で解析

図-6 MADOCA で生成した精密暦を用いた PPP 後処理解析結果

GNSS Service : IGS) の最終暦との差を IGS の解析センターである各国宇宙機関や、大学が公開している軌道推定結果と比較したものである。MADOCA の軌道推定結果は、IGS の解析センターと同等レベルであり、表に示す結果では、世界で最も IGS 最終暦に近く、精度の高い推定結果であることがわかる。図-6 は、この MADOCA で推定した軌道・クロックを用いた PPP 解析結果である。後処理とはいえ、IGS 最終暦を使った PPP 解析結果と同等の精度である数 cm の精度が得られており、開発中のリアルタイム処理系でも、目標である 10 cm (RMS) 以下の達成が十分期待できる結果が得られている。

3. 準天頂衛星システムの将来像

2011年9月30日に、政府の閣議決定が行われ、2010年代後半までに、「みちびき」を含む4機の衛星から構成される実用準天頂衛星システムの整備が加速されることとなった。また将来的にはGPSに頼らずに持続測位可能な7機体制を目指すことが、閣議決定には明記されている。4機体制が整備される予定の今後5~6年の間には、世界中の宇宙先進国が各々衛星測位システムの整備を計画しており、特にアジア・オセアニア地域では、GPS (米国), GLONASS (ロシア), 北斗 (中国), Galileo (欧州) の4つのグローバルシステムと IRNSS (インド), QZSS (日本) の2つの地域システム全てが利用でき、世界のどの地域よりも早く、多くの衛星、信号を利用できる恵まれた環境に

ある。

これら利用可能な測位衛星数の増加は、都市部におけるアベイラビリティや、信頼性向上に大きく寄与することが期待でき、複数GNSS利用によって、反射波やマルチパスの影響を受けた信号を使わずに、直接波のみを使って測位できる確率が高まると考えられている。このような複数GNSS利用環境においては、準天頂衛星システムによって、天頂付近から複数のGNSSに対応した補正情報や、インテグリティ情報を配信できれば、精密測位ユーザにとって大きなメリットとなると考えられる。また、7機体制実現時には、東南アジア上空の静止衛星も構成機数に含められると考えられ、日本だけでなく東南アジアや中国の沿岸部、豪州など、広範な地域で高仰角からのサービスが展開可能になることが期待される。

現在開発中の複数GNSS対応の精密軌道・クロック推定システム「MADOCA」や、MADOCAで生成した精密な暦を用いた単独搬送波位相測位技術が、より高度な精密測位利用の拡大に寄与することに期待して本稿の締めとしたい。

JCMA

【筆者紹介】

小暮 聡 (こぐれ さとし)

宇宙航空研究開発機構

宇宙利用ミッション本部 衛星利用推進センター

ミッションマネージャ

