

衛星測位システムシミュレータの開発 Development of a Satellite Positioning System Simulator

地理地殻活動研究センター

宗包浩志・黒石裕樹・畑中雄樹・矢来博司

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Hiroshi Munekane, Yuki Kuroishi, Yuki Hatanaka and Hiroshi Yarai

要 旨

国土地理院では、準天頂衛星等の次世代衛星測位システムについて、それらを測量に利用する場合の測位精度を予測するために、「衛星測位システムシミュレータ」(Satellite Positioning System Simulator; 以下、「SPSS」という。)を開発した。SPSSは、衛星の軌道位置情報を生成する軌道生成モジュール、観測点での測位データを生成する観測量生成モジュール、また測位状況の把握を支援する情報を描画する描画モジュールから構成されている。SPSSの出力は、GPSの汎用フォーマットで記述された軌道位置情報ならびに測位データであり、ユーザーはそれらを汎用の測位解析ソフトウェアを用いて解析し、測位精度のシミュレーションを行うことができる。衛星軌道生成、観測量生成に関しては、現実の測量誤差をできるだけ再現するよう、さまざまな誤差を考慮できるように設計されている。

SPSSの使い方の例として、気象擾乱下において、GPSのみで測位した場合、GPSと準天頂衛星を組み合わせで測位した場合のそれぞれについて測位精度の比較を試みた。その結果、気象擾乱下においては10km程度の短基線においても5cmにも達する測位誤差が生じうることを、また遮蔽が大きい観測点においては準天頂衛星の観測を組み入れることで、測位精度の改善が期待できることが分かった。

1. はじめに

衛星測位システムといえば、これまで米国のGPS衛星システムや、ロシアのGLONASSシステムがその代表的なものであったが、近年各国において、それらに加え、さまざまな衛星測位システムの導入が計画されている。例えば、ヨーロッパにおいては、Galileo衛星システムを2013年までに完成させる予定となっており、現在軌道上で試験衛星を運用して実験を行っている。また、中国では、北斗衛星ナビゲーションシステムを計画しており、現在5機の衛星を配備して試験運用を行っている。また、GPS衛星システム自体も、更なる高精度化、頑健性を達成するため、既存の衛星を、新たなコードや周波数を追加した高性能衛星に順次入れ替えていくGPS近代化計画を推進中である。

我が国においても、衛星測位システムとして準天頂衛星システムが計画されており、現在そのための研究開発が実施されている。準天頂衛星システムは静止衛星とほぼ同じ高度に位置し、赤道から傾けた3枚の軌道面に配備された3機の衛星から構成され、日本の上空において、常に最低1機の衛星が天頂付近にとどまるように設計されている。準天頂衛星には、GPSと互換の測位信号が送信される予定になっている。天頂近くにある準天頂衛星からGPSと互換な測位信号が送信されることで、例えば山間部や都市部など従来GPS衛星による測位が困難であった地域において測位可能性を向上することが期待されている。

準天頂衛星システムの開発は、産官共同プロジェクトとして行われており、官側としては文部科学省、総務省、経済産業省、国土交通省の4省庁が連携し、必要な技術開発および技術実証にあたることとなっている。国土交通省は準天頂衛星による高精度測位補正技術の研究開発を担当しており、その中で国土地理院は、特に測量向けの技術開発として、全国どの地域においても高精度測位を実現することを目標として①準天頂衛星測位・通信システムの精密測量への応用技術の研究開発、②次世代電子基準点に関する研究開発を行っている。具体的な研究項目は、①では、シミュレーションによる測位精度評価を通じて、準天頂衛星を含む、次世代測位衛星等を用いた精密測量の作業規程(案)を策定すること、②では、次世代衛星測位システムに対応した次世代の電子基準点の仕様(案)を策定すること、また、GPS衛星を用いてセンチメートル級の高精度測量を短時間で実現するための高精度測位補正情報を生成・配信するための技術を開発すること、とされている。

国土地理院では、上記研究項目のうち、①において、次世代測位衛星等を用いた精密測量の作業規程(案)を策定するにあたり、数値シミュレーションにより衛星測位の精度予測を行うために必要となる擬似測位データを作成する「衛星測位システムシミュレータ」(Satellite Positioning System Simulator; 以下、「SPSS」という。)を開発した。開発に際しては、今後さまざまな次世代衛星測位システムの開発が計画されているため、それら次世代の

測位衛星システムについても測位精度の評価ができるように汎用性を持たせること、またできるだけ現実に近い測位精度予測ができるよう、現実に考えられる誤差をできるだけ正確に再現できるように留意した。

本稿では、SPSS の機能の概要を紹介するとともに、その使い方の例として、特に気象擾乱が起きている際に、GPS のみの測量に比べて、GPS と準天頂衛星を組み合わせる測位するとどの程度測位精度が向上するかについて適用した事例について報告する。

2. SPSS の機能

SPSS は、地球上の任意の観測位置・観測時刻において、ユーザー指定の衛星測位システム（GPS、Galileo、準天頂衛星など）に対し、観測位置において取得されると考えられる測位データを数値的に模擬生成し、出力するものである。得られた測位データを汎用の測位解析ソフトウェアで解析することにより、次世代測位衛星を組み入れた場合の測位精度の向上程度や、その際の効率的な測量の方法などについて検討を行うことができる。

SPSS は、以下の3つのモジュールから構成されている。

①軌道生成モジュール：ユーザーが指定する衛星測位システムの衛星の軌道要素を入力とし、軌道積分を実施し、各エポックでの軌道位置情報を生成する。現実的な測位誤差を再現するため、軌道位置には現実的な誤差を付与できる。軌道位置情報は、ユーザーが手持ちの測位解析ソフトウェアで利用できるよう、汎用のフォーマットで出力される。

②観測量生成モジュール：生成された軌道位置情報から、任意に指定する地上観測点の位置で取得される測位データ（擬似距離および位相）を模擬生成する。その際、現実的な測位誤差を再現するため、測位データには現実的な誤差を付与できる。測位データは、ユーザーが手持ちの測位解析ソフトウェアで解析できるよう、汎用のフォーマットで出力される。

③描画モジュール：上記①、②の出力を用い、測位状況の把握を支援する情報（例えば、観測点において観測される衛星数、観測点で見える衛星のスカイプロット等）を抽出して描画する。

以下、それぞれのモジュールについて詳述する。

2.1 軌道生成モジュール

軌道生成では、まず、入力された軌道要素および元期から慣性系（ICRF 系）での衛星の初期位置が算出される。次に、生成された初期位置から、摂動を考慮した軌道積分により ICRF 系での衛星軌道の位置が時系列として計算される。軌道積分は、衛星高度が 1000km 以上の場合は Runge-Kutta-Nystrom 11

次 17 段数値積分法を用い、それ以下の場合には Runge-Kutta-Nystrom 4 次数値積分法を用いている。得られた ICRF 系での出力位置は ITRF 系に変換され、観測ノイズを付加された上で汎用の SP3 フォーマット（Remondi, 1991）にて出力される。

軌道位置情報生成時に含めることが可能な摂動や誤差は以下のものである。

①地球重力ポテンシャルの非球状成分による重力

地球重力ポテンシャルとして JGM-3 モデル (Tapley et al., 1996) ないしは EGM96 モデル (Lemoine et al., 1996) を用いる。任意の位数、次数までの摂動を与えることができる。

②相対論的加速度

IERS Conventions 2003 (McCarthy and Petit, 2003) に準拠した相対論的加速度を作用させる。

③惑星及び月・太陽引力

米国航空宇宙局 (NASA) のジェット推進研究所で作成している天体暦 DE405 で指定される惑星、月、太陽の位置から期待される引力を与える。

④太陽輻射圧

単純な形状の衛星に適用可能なキャノンボールモデル (e.g. Kubo-oka and Sengoku, 1999)、GPS 衛星に適用可能な T20/T30 モデル (Fliegel et al., 1992; Fliegel and Gallini, 1996) を用いた太陽輻射圧の効果を与える。

⑤固体地球潮汐力

天体暦 DE405 で指定される月、太陽の位置から期待される固体地球潮汐力を IERS Conventions 2003 (McCarthy and Petit, 2003) に従って与える。

⑥大気抗力

大気抗力として Jacchia-Roberts モデル (Roberts, 1971)、ないしは NRLMSISE-00 モデル (Picone et al., 2002) を考慮する。これは低軌道衛星を用いた測位への適用を考慮したものである。

⑦白色・ランダムウォーク誤差

生成された軌道位置に、任意の大きさの白色誤差やランダムウォーク誤差を付与する。

2.2 観測量生成モジュール

観測量の生成では、まず、観測点位置を ITRF 系での座標値とアンテナ高、または、測地緯度、経度、橢円体高とアンテナ高の形で入力する。準拠橢円体は GRS80 (Moritz, 1992) である。

橢円体高の入力は省略可能であるが、その場合、数値標高モデル (Digital Elevation Model; DEM) で与えられる観測点の標高とジオイドモデルで与えられるジオイド高から観測点の橢円体高が生成される。その際に使用される DEM は、国内の観測点については国土地理院の数値地図 50mメッシュ (標高)、海外の観測点については米国海洋気象庁 (NOAA) の

TerrainBase であり、また使用されるジオイドモデルは EGM96 モデル (Lemoine et al., 1996) である。

このようにして与えられた観測点位置から、計算時刻での ICRF 系での観測点位置が計算される。ITRF 系から ICRF 系への変換は、IERS Conventions 2003 (McCarthy and Petit, 2003) に準拠している。

次に、軌道生成モジュールにより生成された ICRF 系での衛星位置から、計算時刻での ICRF 系での衛星位置が 11 次のラグランジュ補間法を用いて求められる。軌道生成モジュールにより生成された ICRF 系での衛星位置の代わりに、ITRF 系で与えられる SP3 形式の衛星位置を与えることも可能であるが、その場合、衛星位置は内部で一旦 ICRF 系での衛星位置に変換される。

このようにして与えられた計算時刻における ICRF 系での衛星位置と観測点位置を用い、両者の間の光路差方程式を反復計算することで、両者の間の距離が計算される。

その際、以下のような効果や誤差を考慮することができる。

①観測点における遮蔽

DEM によって与えられる地形遮蔽、または地表面高モデル (Digital Surface Model; DSM) によって与えられる地物遮蔽を考慮する。地形遮蔽の計算は、国内の観測点については国土地理院の数値地図 50 mメッシュ (標高)、海外の観測点については NOAA の TerrainBase を用いて行われる。一方、地物遮蔽は国内の観測点位置に限られ、その際の遮蔽計算は、平面直角座標系で記述された DSM を用いて行われる。

②固体地球潮汐、海洋潮汐による変位

地上の観測位置に及ぼす固体地球潮汐、海洋潮汐荷重による変位を考慮する。固体地球潮汐は IERS Conventions 2003 (McCarthy and Petit, 2003) に準拠したモデルで与えられる。また、海洋潮汐荷重については、GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001) により計算された値が付与される。その際、海洋潮汐モデルとしては、NAO99b モデル (Matsumoto et al., 2000)、CSR4.0 モデル (Eanes and Bettadpur, 1995)、GOT99.2b モデル (Ray, 1999)、Schwiderski モデル (Schwiderski, 1980) から選択可能である。

③電離層遅延

Klobuchar モデル (Klobuchar, 1996) から与えられる電離層遅延量を付与する。または、ベルン大学の The Center for Orbit Determination in Europe (CODE) から公表されている球面調和係数モデルないしはユーザーが与える球面調和係数モデルから計算される電離層遅延量を付与する。

④電離層遅延高次効果

通常考慮される周波数の 2 乗に反比例する電離層遅延に加え、周波数の 3 乗に反比例する項を考慮す

る (e.g. Kedar et al., 2003; Munekane, 2005)。

⑤対流圏遅延

Saastamoinen モデル (Saastamoinen, 1973)、Hopfield モデル (Hopfield, 1971) で与えられる対流圏遅延量を付与する。また、US76 大気モデル (The U. S. Committee on extension to the standard atmosphere, 1976)、あるいは任意の数値気象モデルを用い、モデル内で与えられる気圧、気温、水蒸気量からレイトレーシング法により対流圏遅延量を計算し、それを誤差として付与する機能を有する。

⑥受信機アンテナ位相特性モデル

受信機アンテナの位相特性に関して、仰角に応じたアンテナ位相中心モデルを考慮する。

⑦衛星アンテナオフセット

衛星重心と衛星アンテナ位相中心の間のオフセットを考慮する。

⑧衛星・受信機時計誤差

測位衛星搭載の時計、および、受信機の時計誤差について、白色雑音、ランダムウォーク、 δ プロセス (衛星時計のみ)、時間についての 2 次多項式 (受信機時計のみ) で与える。または、エポック毎の値を用いることも可能である。

⑨マルチパス、サイクルスリップ

全天球を方位角と仰角で 5 度間隔に区分した点における遅延量を数値表の形で入力し、マルチパス誤差を考慮する。また、任意の大きさのサイクルスリップを、任意の時刻に発生させる。

⑩白色・ランダムウォーク誤差

生成した観測量に、任意の大きさの白色誤差、またランダムウォーク誤差を付与する。その際、誤差は周波数毎に独立か、周波数間で共通かを選択する。

2.3 描画モジュール

このモジュールでは、生成された衛星軌道情報や測位データ、または入力データを元に、測位状況の把握を支援する情報を GUI 上に表示する。表示出来る情報は、衛星の地上軌跡、観測点における遮蔽マップ、観測点で観測される衛星のスカイプロット、観測衛星数、衛星配置の幾何学条件の劣化度合いを表す DOP (Delusion of Precision) 値 (GDOP, PDOP, UDOP, HDOP, TDOP) (e.g. Kaplan et al., 2006)、受信機時計誤差の時系列図、また、電離層モデルによって与えられる総電子数の空間分布図である。

3.SPSS の準天頂衛星補完効果の予測への適用事例

本章では、SPSS の使い方の例として、気象擾乱の下で、GPS と準天頂衛星を組み合わせることで、GPS のみで測位した場合に比べ、測位精度がどの程度向上するのかについて試験的に調査した事例について報告する。

本事例では、関東地方で台風と前線の組み合わせにより激しい気象擾乱が生じた 2004 年 8 月 31 日－9 月 1 日の 2 日間において、東京の観測点で測量を行ったケースを想定し、GPS 衛星と準天頂衛星を組み合わせて測位した場合、GPS 衛星のみを用いて測位した場合の測位精度について調査した。以下にその概要を紹介する。

3. 1 衛星軌道生成

SPSS を用い、2004 年 8 月 31 日－9 月 1 日の 2 日に渡り、GPS 衛星と準天頂衛星の軌道を作成した。表－1 に軌道生成条件をまとめる。GPS 衛星の軌道要素は実際の GPS 衛星の軌道に準拠して与えた。また、準天頂衛星の軌道要素については、現在のところ公式な軌道要素は公表されていないが、現実的なシナリオとして、Wu et al. (2004) に従い、表－2 のように与えた。軌道生成に際しては、摂動力として相対論効果、月・太陽の引力を考慮し、地球の重力場は 12 次、12 位まで考慮した。

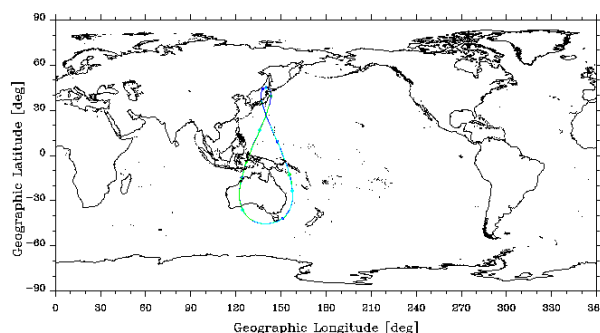
準天頂衛星の軌道が正しく生成されていることを確認するため、準天頂衛星の軌道の地上軌跡を描画した結果を図－1 に示す。今回与えた軌道要素では、準天頂衛星は、日本付近で高仰角位置に長くとどまるよう、日本を中心軸にして、南北非対称な 8 の字軌道を描く (e.g. Wu et al., 2004)。図－1 の軌跡はその特徴を正しく再現しており、軌道生成に問題がないことが確認できる。

表－1 軌道生成条件

期間	2004 年 8 月 31 日-9 月 1 日 (2 日間)	
GPS 軌道要素	実際の GPS 衛星の軌道に準拠	
準天頂衛星軌道要素	表－2 の通り	
地球重力ポテンシャル非球状成分に由来する重力	EGM96 モデル (12 次, 12 位まで)	
相対論的加速度	考慮	
惑星及び月・太陽引力	月・太陽	
大気抗力	なし	
太陽輻射圧	GPS 衛星	T20/30 モデル
	準天頂衛星	キャノンボールモデル
固体地球潮汐力	考慮	
大気抗力	なし	
白色・ランダムウォーク誤差	なし	

表－2 準天頂衛星の軌道要素

軌道長半径	42164km
離心率	0.099
近地点引数	270 度
昇交点赤経	0, 120, 240 度 (3 機)



図－1 準天頂衛星の地上軌跡

3. 2 観測量生成

今回のシミュレーションでは、試験観測点として表－3 で与えられるような 3 つの観測点を取った。各々の観測点の平面配置は図－2 の通りである。3017 は電子基準点練馬、0228 は電子基準点世田谷の位置と一致させている。また、U007 は、準天頂衛星の補完効果を強調するため、ビルによる遮蔽が大きく影響する西新宿のオフィス街に設定している。U007 の詳細位置を図－3 に示す。U007 は新宿都庁や新宿住友ビル、京王プラザホテルなどの超高層ビルに囲まれた、上空視界の悪い場所であることが分かる。

生成された軌道情報を用い、それぞれの観測点において観測量を生成した。観測量生成の際の設定条件を表－4 に示す。遮蔽については、建物による遮蔽の効果は超高層ビル群にかこまれた U007 だけで大きいので、U007 において DSM を用いた地物遮蔽を考慮し、残りの 2 観測点においては DEM を用いた地形遮蔽のみを考慮し、遮蔽マスクを生成した。本調査の目的は気象擾乱下での測位精度の評価であり、誤差モデルは特に適用しなかった。気象擾乱をより正確に再現するため、非静力学大気モデル CReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2002) を用いて生成された水平解像度 2 km × 2 km、時間分解能 1 時間の精細数値気象モデルを用いたレイトレーシングを行い、対流圏遅延を計算した。

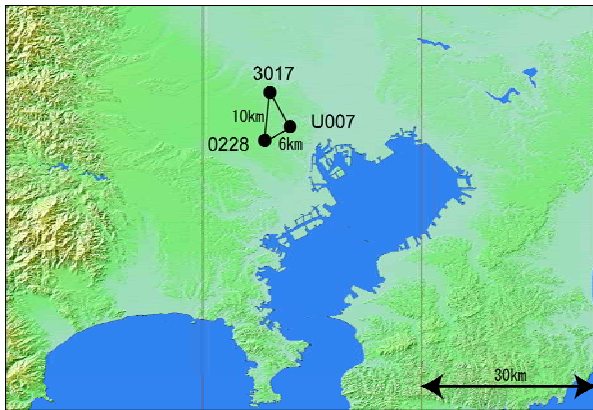
遮蔽処理を確認するため、各観測点での遮蔽マスクを描画した結果を図－4 に示す。0228 と 3017 は起伏が少ない場所に位置するため、地形による遮蔽は小さいと考えられるが、遮蔽マスクにもそれと対応して仰角 15 度以上において遮蔽がほぼ見られない。一方、U007 においては周辺の高層ビル群に対応

した遮蔽域が確認できる．例えば，北東に見られる遮蔽域は新宿住友ビル，南西部に見られる遮蔽域は，東京都庁舎によるものである．これらのことから，シミュレータはDSMを考慮して正しく観測マスクを生成できていることが確認された．他方，RINEXデータと衛星軌道情報から再現した観測点 U007 における可視衛星のスカイプロットを図－5に示す．図－4のマスクに対応して，可視衛星のスカイプロットも遮蔽されており，観測データにマスク情報が正しく反映されていることが分かる．

因みに，図－5の中で黒の実線で示した，天頂付近に輪のように見える軌跡が準天頂衛星である．準天頂衛星はこの輪の部分にできるだけ長時間滞留するように設計されている．そのため，遮蔽が厳しい場所でも影響をうけにくい．また，同じ軌道を8時間毎に3衛星が通過するため，常に1機は天頂方向に位置するように設計されている．

表－3 観測点座標

観測点名	緯度	経度	楕円体高
0228	35° 39' 49"	139° 37' 50"	82.6m
3017	35° 45' 33"	139° 38' 35"	85.5m
U007	35° 41' 27"	139° 41' 32"	78.0m



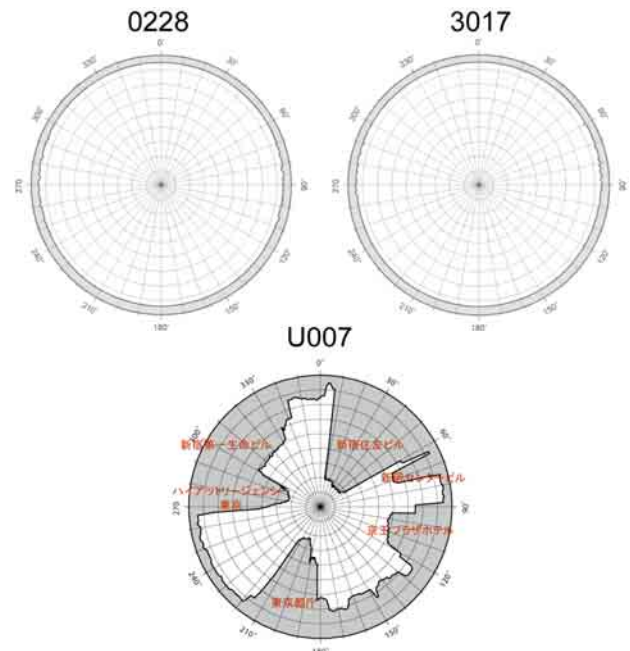
図－2 観測点配置



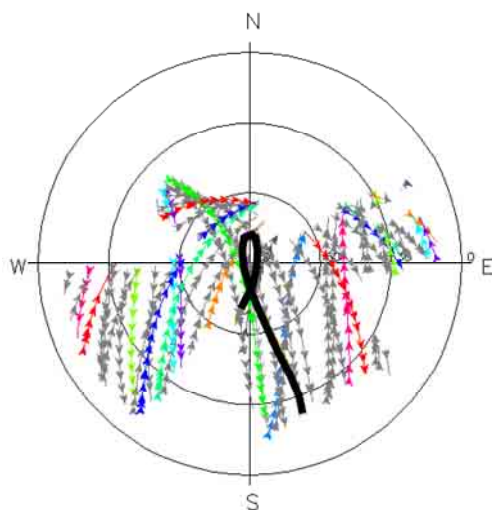
図－3 観測点 U007 付近のビルの配置

表－4 観測量の生成条件

遮蔽効果	0228, 3017	地形遮蔽
	U007	地形，地物遮蔽
固体地球・海洋潮汐	固体地球潮汐のみ考慮	
電離層遅延	考慮（CODE モデルによる）	
電離層遅延高次効果	非考慮	
対流圏遅延	精細数値気象モデル（水平解像度 2km×2km, 時間分解能 1 時間）を入力としたレイトレーシング	
受信機アンテナ位相モデル	非考慮	
衛星アンテナオフセット	非考慮	
衛星・受信機時計誤差	非考慮	
マルチパス・サイクルスリップ	非考慮	
白色・ランダムウォーク誤差	なし	



図－4 各観測点における遮蔽マスク．方位角は北を 0° にとっている．赤字が遮蔽域に対応した地物を表している．

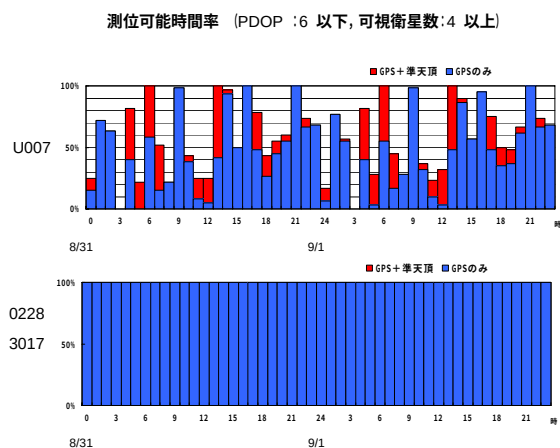


図－5 観測点 U007 における観測値のスカイプロット。図中の黒の実線が準天頂衛星の軌跡を表している。

3.3 準天頂衛星の GPS 補完効果のシミュレーション

3.3.1 衛星配置の幾何学条件のシミュレーション

測位解析による測位精度シミュレーションの前に、まず、純粋に衛星配置の幾何学条件がどの程度改善されているのかについてシミュレーションを行う。今回は、幾何学条件の指標として、観測量生成時に計算された PDOP 値を用いる。一般に PDOP 値が 6 以下であることが、GPS 衛星を用いた測位が可能である幾何学条件とされている (e.g. Kaplan et al., 2006)。そこで、本報告でも PDOP が 6 以下かつ観測衛星数が 4 以上の場合を測位可能な条件とし、1 時間毎に、そのなかで測位可能である時間の割合を測位可能時間率としてまとめ、図－6 に示す。図－6 によると、遮蔽のない 0228、3017 においては、GPS のみの場合、GPS に準天頂衛星が加わった場合ともにすべての時間に渡って測位可能である。一方、遮蔽の大きい U007 ではほとんどの時間帯で測位可能時間率が 100% に満たず、全体的に測位可能時間率が低い。しかしながら、準天頂衛星を加えた場合には、明瞭に測位可能時間率が向上することが見てとれる。8 月 31 日、9 月 1 日の 2 日間のトータルの測位可能時間率を計算してみると、GPS のみの場合 47.0% であるが、GPS と準天頂衛星を組み合わせると 60.4% まで上昇する。以上のことから、遮蔽の大きい U007 では準天頂衛星を組み入れることで衛星配置の幾何学条件が向上しており、結果として測位精度の向上も期待できる。



図－6 各観測点における測位可能時間率。青が GPS のみの場合、赤が GPS と準天頂衛星を組み合わせた場合の増分を表す。横軸の時刻は UTC である。

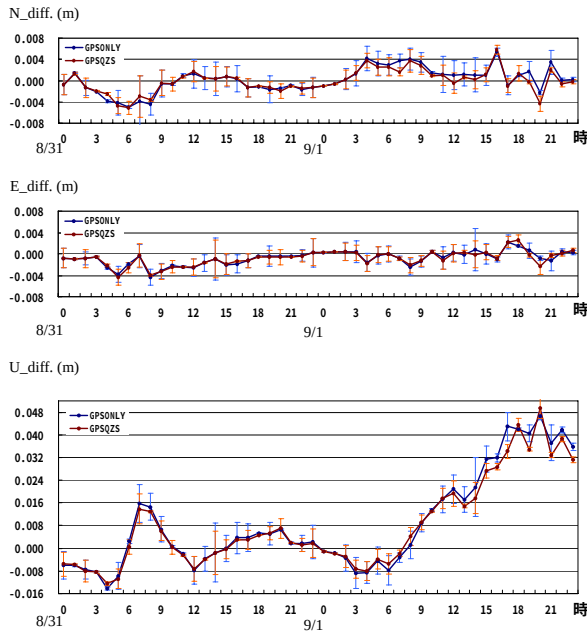
3.3.2 測位解析による測位精度シミュレーション

次に、実際に生成された観測データを測位解析した座標解を用いて測位精度をシミュレーションする。測位計算には、マサチューセッツ工科大学で開発された測位ソフトウェア GAMIT10.32 (King and Bock, 2007) を、準天頂衛星を考慮出来るように改造して使用した。測位計算は 1 時間のウィンドウで重複なく行った。解析は 2 周波で行い、対流圏遅延量に関しては通常の測量での取り扱いに準じ、推定をおこなわなかった。なお、データのサンプリング間隔は 30 秒である。

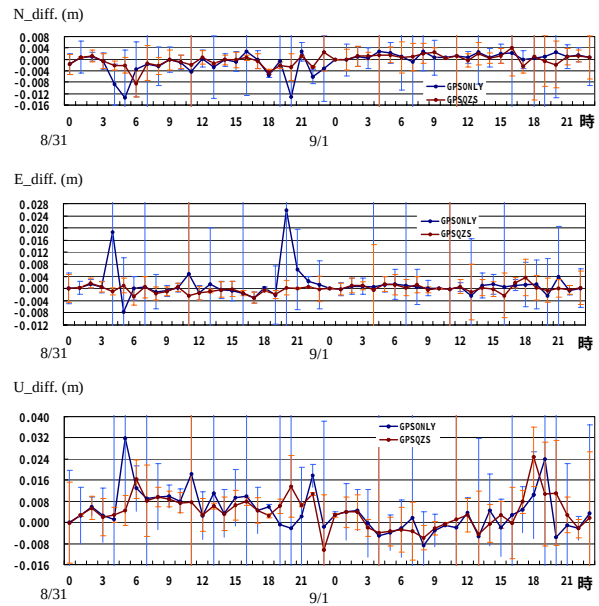
図－7 に、0228 を基準とした 3017、U007 の各基線について、シミュレーションで与えた座標値 (真値) からのずれの時間変化を示す。まず、これだけ基線が短いにもかかわらず、特に上下成分に大きな測位誤差が見られることが分かる。特に、0228-3017 の基線では、基線長が 10km 程度であるにもかかわらず、9 月 1 日の 20 時 (UTC) ころに 5 cm 弱もの測位誤差が鉛直成分に見られる。このことから、気象擾乱がある場合に、鉛直方向の変位を精度よく推定するためには、短い基線といえども対流圏遅延量を解析時に推定するなどなんらかの対策を行う必要があることが分かる。

また、準天頂衛星を組み入れた場合の効果については、遮蔽のほとんどない 3017 の場合、GPS のみを用いた測位の場合と準天頂衛星を入れた測位の場合とで測位解の差がほとんどないことが予想される。他方遮蔽の大きい U007 においては、GPS のみを用いた測位に時折見られる基線水平成分の大きな跳びが解消され、全体的にばらつきが小さくなる傾向が見

0228-3017



0228-U007



図ー7 0228 を基準とした, 3017, U007 の測位座標値の時間分布. 青が GPS のみ, オレンジが GPS と準天頂衛星を組み合わせた場合の測位座標値を表す. エラーバーはフォーマルエラーの 1σ を表す. 横軸の時刻は UTC である.

られる. またエラーバーも小さくなっている. 表ー5 に測位座標値のバイアス, 表ー6 にその RMS をまとめた. 3017 では GPS のみの測位の場合と準天頂衛星を入れた測位の場合とで, バイアスおよび RMS ともにほとんど変化が見られないが, U007 においては準天頂衛星を入れることで, 特に東西成分において, 時系列に見られる大きな跳びが軽減された結果, バイアス, RMS ともに改善が見られる. すなわち, 準天頂衛星の GPS 補完効果は, 遮蔽が小さい場所ではあまり期待ができないが, 遮蔽が大きい場所では効果が見られることが予想される.

なお, ここで得られた測位解の精度はあくまで相対評価においてのみ意味をもつものであり, 現実の測量精度と対応するものではないことに注意が必要である. なぜならば, 本シミュレーションでは対流圏遅延量の影響のみに注目しており, 実際の測量におけるそれ以外のさまざまな誤差要因を考慮していないからである.

表ー5 0228 を基準とした 3017, U007 の測位解のバイアス. 単位は mm.

観測点		N	E	U
3017	GPS のみ	0.1	-0.7	8.6
	GPS+QZSS	-0.1	-0.8	7.9
U007	GPS のみ	-0.7	1.2	4.1
	GPS+QZSS	-0.2	-0.1	3.8

表ー6 0228 を基準とした 3017, U007 の基線成分の RMS. 単位は mm.

観測点		N	E	U
3017	GPS のみ	2.3	1.5	18.9
	GPS+QZSS	2.1	1.6	17.7
U007	GPS のみ	3.6	4.9	8.7
	GPS+QZSS	2.1	1.2	7.2

4. おわりに

本稿では, 国土地理院で開発した衛星測位システムシミュレータ SPSS についてその機能を紹介した. また, 気象擾乱下において, GPS のみで測位した場合と準天頂衛星を入れて測位した場合の測位精度についてシミュレーションによる調査を行った.

シミュレーションの結果, 気象擾乱下においては, 10km 程度の短基線であっても, 対流圏遅延量の推定を行わない場合には 5 cm におよぶ測位誤差が生じ得ることが分かった. また, 今回のシミュレーションはあくまでも SPSS の使い方を紹介する目的で行ったものであり, 事例が 1 つと限られていること, また誤差として対流圏遅延のみを考慮していることなどから, 準天頂衛星を入れた場合の測位精度の向上を定量的に評価するには不十分であるが, 今回の事例に限って言えば, 遮蔽の大きな場所においては準天頂衛星を加えることで主に水平方向の測位精度が向上する可能性があることが分かった.

今後、本報告で行ったシミュレーションを発展させ、誤差などについてより現実に近い再現を行い、事例を増やして評価を行った上で、その結果を「準天頂衛星等の次世代測位衛星を用いた測量作業規程(案)」としてとりまとめる予定である。

SPSS で測位精度のシミュレーションを行うことができる衛星測位システムは準天頂衛星に限らない。軌道要素を変更することで、例えば Galileo など任意の衛星測位システムについてシミュレーションを行うことが可能である。今後導入が予定されている衛星測位システムが運用された際に測量への導入効果をスムーズにシミュレーションすることができるよう、その測位精度の改善効果や効率的な利用方法を検討していくことは有用であり、今回行ったような調査を今後他の衛星測位システムについても拡張していくことが効率的であると考えられる。

また、SPSS は、次世代測位衛星を用いた測位の精

度評価にとどまらず、現行の GPS 測量における測位誤差を分析するために用いることもできる。例えば 宗包・他 (2007) は SPSS を用い、GEONET における、対流圏遅延量起源の年周誤差を評価した。その結果、特に鉛直座標において、大きいところでは年間 4mm にも及ぶ見かけの年周変化が現れることが分かった。このようなシミュレータの活用法についても今後研究を進めていくことが望まれる。

謝 辞

SPSS の完成にあたっては、情報通信研究機構の市川隆一博士、Thomas Hobiger 博士の協力を得た。また、本シミュレーションで用いた DSM は、地理調査部社会地理課から提供していただいた。また(株)アイキューブの林文氏にはデータの整理、図の作成などでご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- Eanes, R. and S. Bettadpur (1995) : The CSR 3.0 global tide model, CSR-TM-95-06, Center for Space Research, University of Texas at Austin, Austin.
- Fliegel H. F., T. E. Gallini, and E. R. Swift (1992) : Global Positioning System radiation force model for geodetic applications, *Journal of Geophysical Research*, 97, 559-568.
- Fliegel, H. F. and T. E. Gallini, (1996) : Solar force modeling of Block IIR Global Positioning System satellites, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 33, 863-866.
- Hopfield, H. (1971) : Tropospheric effects on electromagnetically measured range, prediction from surface water data, *Radio Science*, 6, 356-367.
- Kaplan, E. D. and C. J. Hegarty (eds) (2006) : *Understanding GPS: Principles and applications* (2nd ed) , Artech house, Norwood.
- Kedar, S., A. Hajj, B. D. Wilson, M. B. Heflin (2003) : The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, *Geophysical Research Letters*, 30, 1829, doi:10.1029/2003GL017639.
- King, R. W. and Y. Bock (2007) : Documentation for the GAMIT analysis software, Release 10.32, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Klobuchar J. A. (1996) : Ionospheric effects on GPS, In Parkinson B. W., Spilker, J. J. (eds) *Global positioning system: theory and applications*, vol 1, chap. 12, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D. C.
- Kubo-oka, T. and A. Sengoku (1999) : Solar radiation pressure model for the relay satellite SELENE, *Earth Planets and Space*, 51, 979-986.
- Lemoine, F. G., S. C. Kenyon, J. K. Facrot, R. G. Trimmer, N. K. Pavlis, D. S. Chinn, C. M. Cox, S. M. Klosko, S. B. Kuthcke, M. H. Torrence, Y. M. Wang, R. G. Williamson, E. C. Pavlis, R. H. Rapp, and T. R. Olson (1998) : The development of the joint NASA GSFC and NIMA geopotential model EGM96, NASA/TP-1998-206861, NASA Goddard space flight center, Greenbelt.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000) : Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe (2001) : GOTIC2: a program for computation of oceanic tidal loading effect, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 47, 243-248.
- McCarthy, D. and G. Petit (2003) : *IERS Conventions (2003)* , IERS Technical Note 32, Observatoire de Paris, Paris.

- Munekane, H. (2005) : A semi-analytical estimation of the effect of second-order ionospheric correction on the GPS positioning, *Geophysical Journal International*, 163, 10-17.
- Moritz, H. (1992) *Geodetic Reference System 1980*, *Bulletin Geodesique*, 66, 187-192.
- Picone, J. M., A. E. Hedin, D. P. Drob, and A. C. Aikin (2002) : NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *Journal of Geophysical Research*, 107, 1468, doi:10.1029/JA009430.
- Ray, R. D. (1999) : A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99.2, NASA/TM-1000-209478, NASA Goddard space flight center, Greenbelt.
- Remondi, B. W. (1991) : NGS second generation ascii and binary orbit formats and associated interpolated studies, paper presented at the 20th general assembly, the International Union of Geodesy and Geophysics, Vienna.
- Roberts, C. (1971) : An analytic model for upper atmosphere densities based on Jacchia 's 1970 models, *Celestial Mechanics*, 4, 368-377.
- Saastamoinen, J. (1973) : Contribution to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Geodesique*, 107, 10-34.
- Schwiderski, E. W. (1980) : On charting global ocean tides, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 18, 243-268.
- Tapley, B. D., M. Watkins, J. Ries, G. Davis, R. Eanes, S. Poole, H. Rim, B. Schutz, C. Shum, R. Nerem, F. Lerch, J. Marshall, S. Klosko, N. Pavlis, and R. Williamson (1996) : The joint gravity model 3, *Journal of Geophysical Research*, 101, 28029-28049.
- The U. S. committee on extension to the standard atmosphere (1976) : U. S. Standard atmosphere 1976, U. S. Government printing office, Washington, D. C.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara (2002) : Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator, in *High performance computing*, edited by Zima, H. P., K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, 243-259, Springer, Berlin.
- Wu, F., N. Kubo, and A. Yasuda (2004) : Performance analysis of GPS augmentation using Japanese Quasi-Zenith Satellite System, *Earth Planets and Space*, 56, 25-37.
- 宗包浩志, 黒石裕樹, 畑中雄樹, 矢来博司 (2007) : 対流圏遅延による GPS 測位誤差の数値シミュレーション-GEONET に関するケーススタディー, 日本測地学会第 108 回講演会予稿集.