

5. QZSを用いる高精度測位実験システムの開発

衛星技術部 新井直樹 伊藤憲 坂井丈泰
航空システム部 福島荘之介

1. まえがき

現在、我が国においては全地球的測位システム(GPS)による測位の利用が拡大しており、カーナビゲーションを始めとして陸上、船舶、航空などの移動体や、測地・測量など、幅広い分野で利用されている。

しかしながら GPS においては、山影や都市部のビル影等により十分な電波を受信できない地域が存在するという問題があり、必ずしも、いつでも、どこでも基盤的サービスである測位サービスを受けられるわけではない。さらに、鉄道や高速道路を走る自動車などの高速移動体では、より精度が高く、信頼性に優れた測位サービスの提供が望まれている。

このような背景から、日本付近で常時高仰角からのサービスが可能な準天頂衛星(QZSS: Quasi-Zenith Satellites System)を用いた測位システムの研究開発が、官民共同で進められている。準天頂衛星を利用して GPS の補完・補強情報を配信することにより、移動体に適した高精度で信頼性が高い測位システムの実現が期待されている。

電子航法研究所は、準天頂衛星システムにおける SBAS(静止衛星型衛星航法補強システム Satellite Based Augmentation System)に類似した広域 DGPS(以下、QZSS-DGPS)の研究開発を担当している。本稿では、QZSS-DGPS における対流圏遅延の補正方式について、現在までの検討結果をまとめる。

表 1 QZSS-DGPS における誤差配分値(提案)

誤差要因	誤差配分(m)
衛星軌道	0.3
衛星クロック	0.1
電離層遅延	0.4
対流圏遅延	0.2
受信機ノイズ	0.2
マルチパスの影響	0.2
UREE, rms	0.62
航法精度, rms (HDOP=1.5)	0.9

2. QZSS-DGPS の誤差配分

電子航法研究所が担当する QZSS-DGPS のユーザにおける測位精度は、社会的な要求から 1m(水平方向 rms)とされている。この精度を実現するために、現時点では表 1 の誤差配分を目標値として提案している。表 1 の値は Kee ら⁽¹⁾による広域 DGPS の誤差配分よりも若干小さい値であり、目標精度を実現するためには新たな技術開発が必須である。

表 1 の誤差配分において最も大きな誤差要因は電離層による遅延である。SBAS では経緯度 5 度ごとに配置された IGP(電離層格子点)の垂直遅延量を放送しているが、準天頂衛星システムにおける QZSS-DGPS では、IGP を高密度化することも含め、電離層遅延の推定精度を向上させることを目指している。

電離層遅延量の推定精度が向上した上で、問題となるのが対流圏による遅延である。対流圏による遅延は、静水圧遅延と湿潤遅延とに分けられる。静水圧遅延量は対流圏遅延量の中で大きな割合を占めるが、その変動量は小さく、かつ緩やかである。それに対し湿潤遅延量は場所や季節、気象条件によって大きく変化する⁽²⁾。WAAS(Wide Area Augmentation System、米国の運用する SBAS)では、ユーザの位置及び 1 年の経過日を用いた経験的なモデルにより、ユーザ側の受信機で対流圏遅延量を推定して補正する。しかしこの場合、気象条件の変化に伴う対流圏遅延量の変動には対応できない。特に、湿潤で、気象条件の変化が大きい日本周辺でサービスを行う準天頂衛星システムにおいては、前述した測位精度を実現するために、対流圏遅延量をより正確に推定し、補正することが重要である。

3. 対流圏遅延量の補正方式

対流圏遅延量を補正するには、遅延量を推定する側(センタ側、ユーザ側)、さらに推定に用いるデータや方式によって、いくつかの方式が

考えられる。現在、QZSS-DGPSにおける対流圏遅延量の補正方式として検討している各方式を、図1に示す³⁾。本稿では、図1に示した方式のうち、①モデル方式、④広域GPSデータ方式について述べる。なお、各補正方式の呼称は便宜上定めたもので、現状では一般に用いられているものではない。

3.1. モデル方式

対流圏遅延量の長期的(年単位)な変化のモデルを定義し、ユーザの位置や季節などのパラメータを用いて、ユーザ側で遅延量を求める方式である。前述したように、WAASで用いられる対流圏遅延量の推定方法は、この方式に分類される。

この方式の特徴は、センタ側からユーザ側へのデータ転送が不要なことである。現在QZSS-DGPSでは、SBASと同様に250bpsの補正信号をLバンドの測位信号に重畳することを予定しており、このため伝送容量に制限がある。したがって、対流圏遅延量を補正するために必要なデータ転送量も、可能な限り少ないほうが望ましい。

一方でこの方式は、実際の気象条件の変動をモデルに取り込み事ができないため、より短期的(日単位、時単位)な対流圏遅延量の変化を補正することができない。このことによる推定誤差への影響については、次章で検討する。

3.2. 広域GPSデータ方式

日本全国に設置されているGPS受信機の観測データを用いて、対流圏遅延量を推定する方式である。GPS観測データのネットワークとしては、観測点の数、設置されている範囲等を考

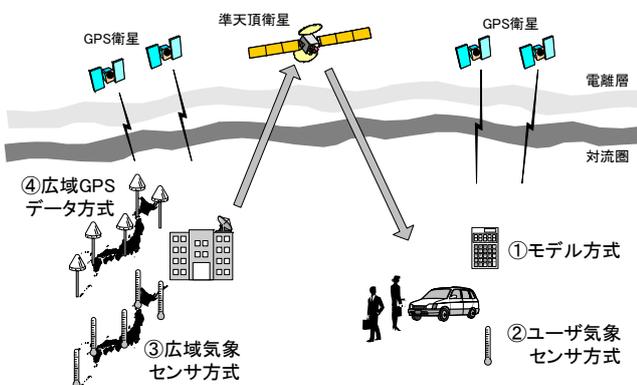


図1 対流圏遅延の各補正方式のイメージ

慮し、国土地理院が運用する電子基準点、及びJAXA(宇宙航空研究開発機構)が整備する準天頂衛星システムのモニタ局の利用を想定している。これらのGPS観測データを用いてセンタ側で求めた対流圏遅延量の情報を、準天頂衛星を經由してユーザに放送するものである。

この方式では、GPSの観測データを用いて対流圏の遅延量を推定することから、実際の気象条件の変化を反映した短期的な遅延量の変化も補正することが可能である。

その一方で、対流圏遅延量の値をユーザに伝送するため、メッセージのサイズが非常に大きくなる可能性がある。さらに、GPSの観測データから対流圏遅延量を推定する際の計算量が大きいいため、センタ側の計算負荷が大きくなることが予想される。

4. モデル方式の評価

QZSS-DGPSで採用する対流圏遅延の補正方式を検討するにあたり、モデル方式の一つとしてWAASで用いられている対流圏遅延の補正方式について検証する。WAASでは、MOPS⁴⁾で定められた経験的なモデルを用いて、ユーザ側で対流圏遅延量を推定し、補正することとされている。MOPSのモデルを用いることによって、どの程度対流圏遅延を補正することができるか確認するために、実際の気象観測値から求めた対流圏遅延量と、MOPSのモデルにより得られた対流圏遅延量とを比較する。

実験に用いたシステムの構成を図2に示す。この実験システムは、当研究所がSBAS関連技術の研究を目的として開発したGNSS試験システムの一部を利用したもので、東京都調布市の電子航法研究所内に設置されている。気象センサに近接して複数のGPSアンテナが設置

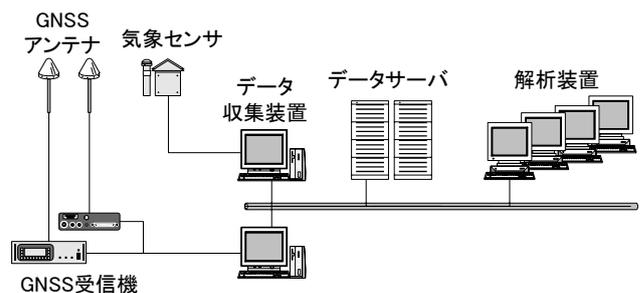


図2 実験システムの構成

されており、常時連続して GPS 等の観測データ及び気象観測値を収集している。

気象センサより得られた観測値から、Saastamoinen のモデル⁽⁵⁾により、垂直方向の対流圏遅延量を求めた結果を図 3(上)に示す。この図において、横軸は 2000 年 1 月 1 日を基準とした経過日で、4 年間の対流圏遅延量の変化を示している。観測データの間隔は 15 分間である。なお、この図が示しているのは垂直方向の遅延量であるので、仰角が低くなるにしたがって遅延量はこの図の値よりも増大する。

図 3(中)は、前項に示した MOPS のモデルにより求めた垂直方向の対流圏遅延量の値である。遅延量を求めるにあたり、ユーザの位置は東京都調布市の緯度とし、高さは GNSS 試験システムの気象センサの楕円体高から、GSIGEO 2000 ジオイド・モデル⁽⁶⁾を用いて海拔高度を求めた。

図 3(下)に、観測値から Saastamoinen のモデルによって得られた対流圏遅延量と、MOPS モデルによる遅延量の差を示す。この図の値は、MOPS モデルを用いて垂直方向の対流圏遅延量を補正した際の、観測値との残差を表している。図 3 の観測期間全体において、MOPS モデルによる補正後の残差は、最大値 +13cm、最小値 -18cm であった。

図 3 の期間のうち、2002 年 8 月における観測値、MOPS モデルによる対流圏遅延量、及び観

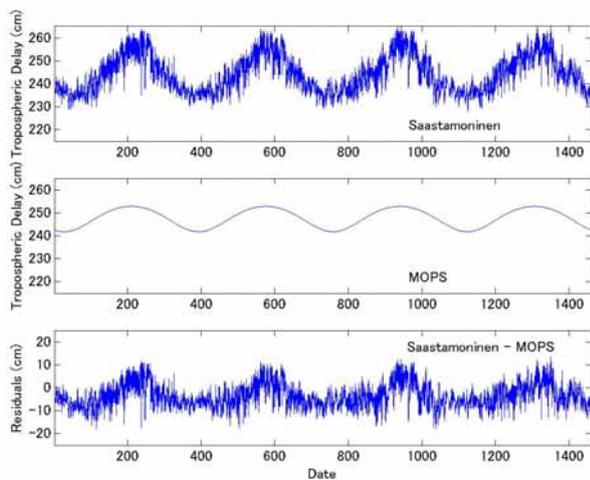


図 3 2000～2003 年の対流圏遅延量の変化
(上)Saastamoinen モデルを適用した観測値
(中)MOPS モデル (下)観測値と MOPS モデルとの差

測値と MOPS モデルとの残差の各値を図 4 に示す。観測値から得られた対流圏遅延量(図 4(上))には、日単位の変動が現れている。この変動は、MOPS モデル(図 4(中))によっては補正されないため、観測値と MOPS モデルとの残差(図 4(下))にも同様の変動が見られる。

さらに 2002 年 8 月 20 日付近で、対流圏遅延量の値が大きく減少している。該当する期間における温度、相対湿度、大気圧の変化を図 5 に、8 月 20 日における天気図を図 6 に示す。この時期、強い勢力の台風 13 号が関東の南東海上を北東進し、広い範囲で多量の降雨があった。その後台風は北海道の東海上で温帯低気圧に変わり、本州上は大陸方面からの乾燥した北西風が吹き渡った。8 月 21 日には、東京の 8 月としては歴代 1 位タイ記録となる最小湿度 23%を記録した。以上のような気象条件の急激な変動に伴って、観測値から得られた対流圏遅延量は大きく変化したと考えられる。

8 月 20 日における MOPS モデル補正後の 24 時間の平均値は -13cm、最大値、最小値はそれぞれ -11cm、-15cm であった。この値は垂直方向の遅延量の残差であるので、例として仰角が 20 度の場合には 3 倍程度に増大することから⁽⁷⁾、GPS 衛星の仰角によっては、QZSS-DGPS における対流圏遅延の補正方式として目標としている精度を超えてしまう可能性がある。

モデル方式の評価結果を以下にまとめる。

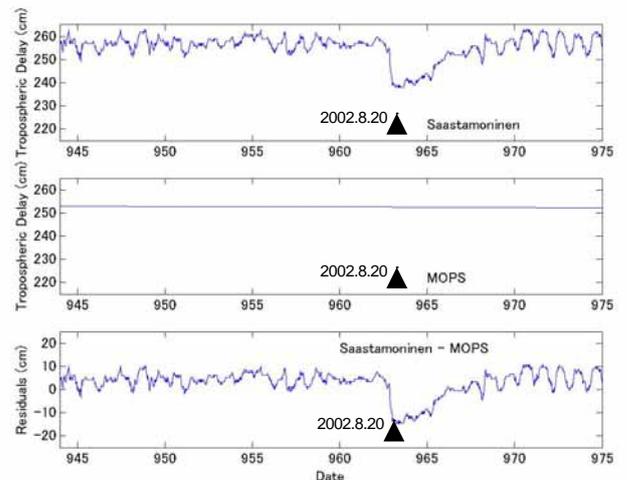


図 4 2002 年 8 月の対流圏遅延量の変化
(上)Saastamoinen モデルを適用した観測値
(中)MOPS モデル (下)観測値と MOPS モデルとの差

- ・ 2000年～2003年において、観測値から得られた垂直方向の対流圏遅延量は、約230cm～265cmの間で変動している。
- ・ MOPSモデルを用いることにより、対流圏遅延量の補正後の残差は、+13cm～-18cmに減少しており、補正前に比べて大きな改善が見られる。
- ・ 年単位の周期的な変化は、MOPSモデルを用いて補正しても、完全には除去できない。
- ・ 日単位の変化及び気象条件の変化による対流圏遅延量の変化は、MOPSモデルで補正できない。

以上のとおり、現状のMOPSモデルをそのまま用いた場合、気象条件の急変時には高い精度で対流圏遅延量の補正を行うことが困難である。

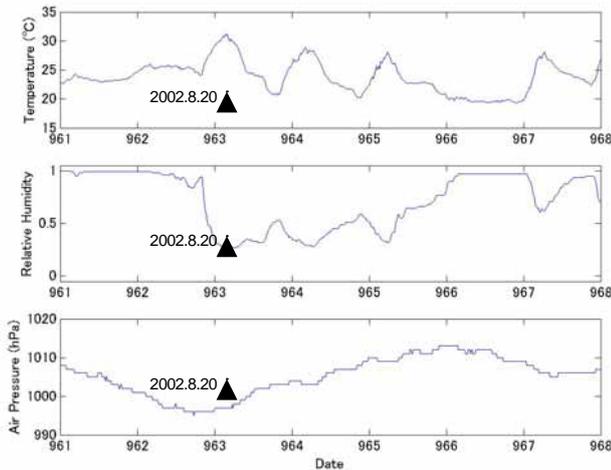


図5 2002年8月18日～8月24日の気象観測値
(上)気温 (中)相対湿度 (下)大気圧

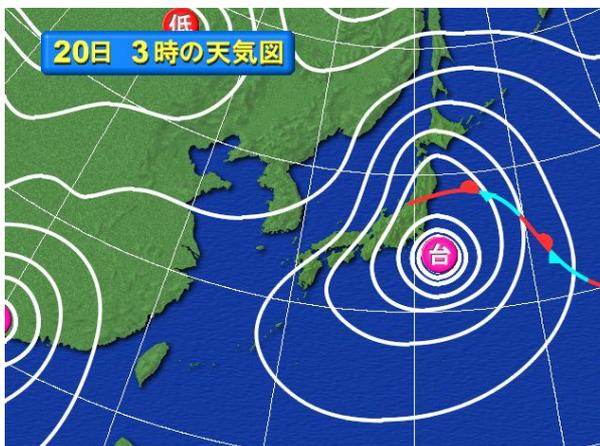


図6 2002年8月20日の天気図

5. 広域 GPS データ方式の評価

日本全国に広範囲に設置されている GPS 受信機の観測データを用いて、対流圏遅延量を後処理で推定し、その推定精度を検証することとする。ここでは国土地理院の電子基準点及び IGS (International GPS Service) の GPS 観測データを用いた。観測点の位置を図7に示す。IGS 観測点は日本周辺の6カ所の点を選択した。電子基準点は、解析日において公開されていた約900点の観測データを用いた。

解析には AIUB (Astronomical Institute of the University of Bern) で開発を行っている、学術用 GPS 解析ソフトウェア BERNESSE Version 4.2 を用いた。解析において、約900点の観測データを単一の計算で処理することは現在の計算機能力では困難なため、各観測点を8個の観測データのグループであるクラスタに分割した。図7における各観測点の色の違いは、各々の観測点の属するクラスタを表している。処理の手順としては、クラスタごとに基線解析を行い、その後、骨格となる複数の観測点を介して、各クラスタを結合する。そして、全観測点のアンテナの位置(位相中心)を決定する。さらに各々の観測点における対流圏遅延量を求め

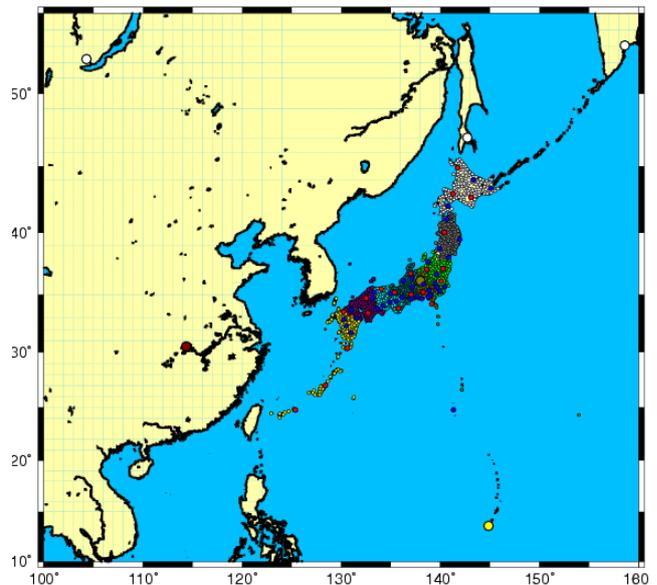


図7 解析に用いた GPS 観測点
○(大) : IGS 観測点 ○(小) : 電子基準点
○(中) : 骨格となる電子基準点

る。ここでの対流圏遅延量とは、乾燥大気による静水圧遅延と水蒸気による湿潤遅延の総和として、天頂方向における遅延量をモデル化したものである。

このような手順で推定した対流圏遅延量の例を図8に示す。解析期間は前章のモデル方式の評価と同様に、2002年8月20日の台風通過前後である。8月19日の解析結果である図8(上)においては、日本付近は台風の接近に伴い、大気がより湿潤になり湿潤遅延が増大したことによって、静水圧遅延と湿潤遅延の総和である対流圏遅延量が増加している。その後8月20日(図8(中))、8月21日(図8(下))においては、台風の通過後、日本付近は乾燥した大気に覆われたため、湿潤遅延が急速に減少し、対流圏遅延量が減少したことを表している。

以上のとおり、GPS 広域データ方式により得られた対流圏遅延量の変化は、実際の気象条件の変化と、よく一致していることが確認できる。さらに、この方式で得られる推定精度を検証するために、他の手段で得られた観測値と、本方式で推定した対流圏遅延量とを比較して評価することとする。比較する基準データとして、高層気象観測データ(ラジオゾンデ)を用いた。広域GPS データ方式によって得られた垂直方向の対流圏遅延量を可降水量に変換し、高層気象データから求めた可降水量とを比較した結果を表2に示す。広域GPS データ方式は2002年8月18日01:30 JSTにおける推定結果、高層気象データは同日の00:00 JSTの観測結果を用いている。表2では、広域GPS データ方式の解析に用いた電子基準点のうち、高層気象データの観測点に最も近い電子基準点を選択し、各々から得られた可降水量を比較した。しかし両者の観測点は物理的に同一の場所ではないため、各々の地点における気圧の値にはある程度の差が存在する。両者の気圧の差が小さい(約4hPa以内)場所は、可降水量が約3mm以内の差で一致している。1.5mmの可降水量は、垂直方向の対流圏遅延量で1cmに相当する²⁾ので、この場合対流圏遅延量の差は約2cm以内となる。しかし気圧の差が大きい(約5hPa以上)場所では、可降水量の差が増大している。

広域GPS データ方式の評価結果を以下にま

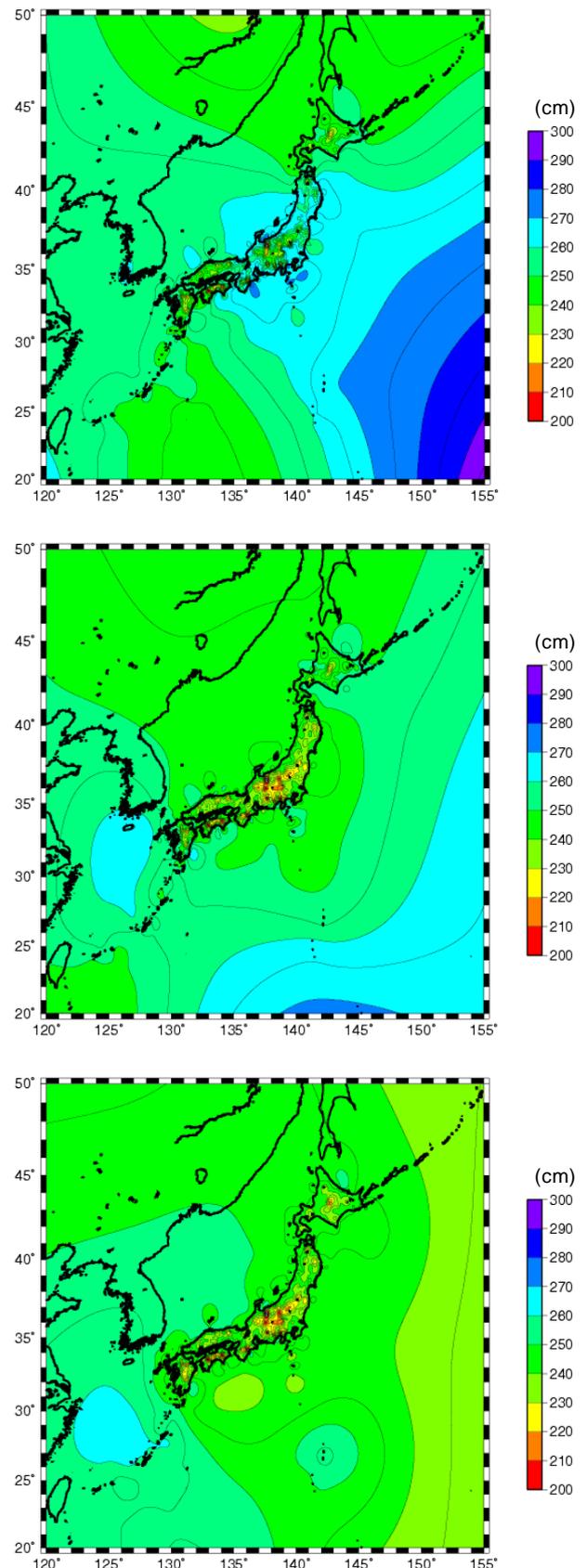


図8 対流圏遅延量の推定結果の例
 (上)2002年8月19日01:30 JST
 (中)8月20日01:30 JST (下)8月21日01:30 JST

表2 広域GPSデータ方式と高層気象データの比較

観測点	可降水量 (mm)		気圧の差 (hPa)	可降水量の差 (mm)
	広域GPSデータ方式	高層気象データ		
潮岬	61.0	60.6	1.3	0.4
根室	20.1	23.0	1.4	2.9
札幌	31.6	29.1	3.2	2.5
浜松	47.9	56.8	4.1	8.9
輪島	42.6	43.3	4.3	0.7
八丈島	49.5	55.0	4.5	5.5
石垣島	38.6	40.0	4.5	1.5
米子	45.4	41.7	4.6	3.7
南大東	36.1	40.3	5.6	4.2
鹿児島	27.0	38.5	5.7	11.6
八戸	40.7	44.8	6.0	4.0
稚内	30.7	37.4	7.4	6.7
父島	23.6	42.4	8.5	18.8
名瀬	16.8	31.9	10.6	15.0
仙台	17.7	41.3	22.9	23.7
秋田	25.0	47.9	29.1	23.0

とめる。

- ・ 気圧の差が小さい場合、広域GPSデータ方式で得られた垂直方向の対流圏遅延量は、高層気象データと2cm程度で一致している。
- ・ 推定精度のより厳密な検証のために、基準とするデータの選択及び評価方法について検討が必要である。

上記の結果から、広域GPSデータ方式は、前項で示したモデル方式と比較して、非常に高い精度で対流圏遅延量を推定できることが確認された。本方式は準天頂衛星システムのサブメータ級補強における対流圏遅延量の補正方式として有効である。なお、実際の適用については以下の課題が残されている。

- ・ 対流圏遅延量推定の高速化
- ・ ユーザ側で得られる推定精度の検証
- ・ 伝送容量の制限を踏まえた、本方式の実装の実現性についての検討

6. あとがき

本稿では、準天頂衛星システムにおける対流圏遅延量の補正方式について、現在までの検討結果を紹介した。WAASと同様に経験的なモデルを用いて対流圏遅延量を算出する方式、並びにGPSの観測データを用いて遅延量を推定する方式を検討し、得られる推定精度を評価した。

今後は今回の検討結果を踏まえ、準天頂衛星システムに適用する対流圏遅延量補正方式について、リアルタイム化の検討と開発を行う予定である。

参考文献

- (1) Changdon Kee, Wide Area Differential GPS, Global Positioning System: Theory and Applications Volume II, AIAA.
- (2) 大谷竜,内藤勲夫,“GPS可降水量の物理と評価”,気象研究ノート,第192号,1998
- (3) 新井直樹,坂井丈泰,福島荘之介,伊藤憲,“準天頂衛星システムにおける対流圏遅延量補正方式の検討”,信学技報 SANE2004-37
- (4) Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229C, 2001.
- (5) Saastamoinen, J., Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction, Bulletin Geodesique, Vol. 105, Sept. 1972, Vol. 106, Dec. 1972, Vol. 107, March 1973.
- (6) 国土地理院 測地部ホームページ, <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geoid/download/down.html>
- (7) J. J. Spilker Jr., Tropospheric Effect on GPS, Global Positioning System: Theory and Applications Volume I, AIAA.