豪雨予測への貢献をめざした海洋でのGNSS水蒸気観測

○小司禎教（気象衛星・観測システム研究部）

1. はじめに

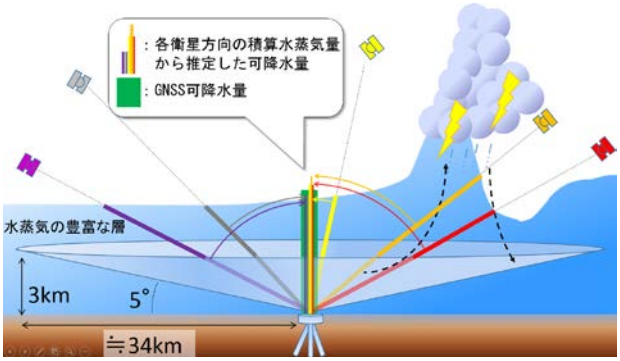
しばしば豪雨や突風など激しい気象現象を引き起こす積乱雲は、地上数百m～1km程度の高度に暖湿な空気が集まることで発生・発達するため、風と水蒸気を、高い時・空間分解能で観測することが機構解明や予測に重要である。GPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)に代表される人工衛星を用いた測位システム（GNSS: Global Navigation Satellite System)は、カーナビゲーションやスマートフォンの位置情報アプリケーションとして日常生活に浸透している。あまり知られていないが、GNSSは全天候型の高精度の水蒸気センサーという側面も有する。国土地理院は1,300箇所以上（平均20km間隔）からなるGNSS観測網(GEONET: GNSS Earth Observation Network System)を展開し、日本列島の地殻変動を監視しているが、GEONETから得られる水蒸気情報は、気象庁の天気予報にも実利用されている。

周囲を海に囲まれた日本列島では、海上からの湿潤な空気の流入が豪雨発生に重要な役割を果たすため、海上での水蒸気監視能力等の高度化が求められている（国土交通省, 2015）。ここでは、近年のGNSS技術の進展により可能となりつつある、船舶に搭載したGNSSによる海洋上での水蒸気連続観測技術の研究成果を報告する。

2. GNSSを用いた水蒸気解析（第1図）

GNSS による位置計測（測位）では、原子時計を搭載し、高度約 2 万 km を周回する衛星群から発射される電波が、受信機に到達するまでの時間を利用して GNSS 衛星と受信機間の距離を計測する。GNSS 衛星の位置が既知で時計が正確であれば、3 つ以上の衛星からの距離を計測することで受信機の三次元的な位置が求められる。

電波は真空中では光速で伝播するが、大気中では速度が遅くなる。遅れの量は経路上の気圧・気温・水蒸気によって決まる。気圧や気温に比べ、水蒸気は時・空間変動が大きく、GNSS測位に誤差をもたらすノイズである。一方、衛星と受信機の位置を予め求めておけば、衛星から発射された電波が、地上の受信機に到達するまでに経過した時間から、電波の遅れの量（遅延量）がわかる。気圧や気温の寄与を差し引くことで水蒸気による寄与のみを抽出することができ、さらには水蒸気量を求めることができる。すなわち、測位解析にとってはノイズとなる水蒸気量を、大気変動のシグナルとして利用することができる。気象庁では各衛星方向の水蒸気量を天頂方向の値に換算した、アンテナを頂点とした逆円錐空間内の代表的な鉛直積算水蒸気量（可降水量、Precipitable Water Vapor: PWV）等を天気予報に利用している。この場合、衛星の位置（軌道）と時計情報は、国際GNSSサービス等外部機関の解析結果を利用し、アンテナは解析期間（例えば24時間）中動かないと仮定して解析を行っている。



第1図： GNSSによる水蒸気量解析の概念を説明する模式図。GNSS解析による可降水量は、地上受信局を頂点とする逆円錐空間の代表値である。より多く、ノイズの少ない衛星からの電波を受信することが、測位や水蒸気の解析精度向上をもたらす。

3. GNSS技術の革新と水蒸気解析

2010年、日本初の衛星測位システムである準天頂衛星(Quasi-Zenith Satellite System: QZSS)初号機（みちびき）が打ち上げられ、2011年にはロシアがGLONASS(Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)の測位サービスを開始した。測位衛星数の増加は、固定点に加え、移動体測位の高精度化・安定化につながっている。また近年のGNSS技術の高度化により、リアルタイムによる高頻度（1秒）測位解析が行われるようになり、国土地理院による地殻変動観測のためのGEONETリアルタイム解析システム(REGARD)の開発等に活用されている。

GNSS電波を用いた水蒸気量解析は、衛星からの電波の

遅れを利用するため、衛星の位置・時計誤差、GNSS受信機の位置も高精度に解析する必要がある。陸上固定の場合、アンテナは動かないものとしているのに対し、船舶などの移動体に設置した受信機の場合、時間変動する電波の遅れに加え、受信機の位置も同時に推定する必要がある。従来は事後解析による研究が行われてきたが、上述の様な解析技術の高度化により、移動体におけるリアルタイムでのPWV解析を行える環境が整ってきている。

4. 船舶搭載GNSSによる海上でのPWV解析実験

平成27年、4隻の船舶にGNSS受信機を設置し、洋上観測実験を行った（第3図）。移動する受信機位置推定のため、GPS衛星に加え、GLONASS、QZSSを利用し、衛星の軌道情報としてMADOCA[1)]によるリアルタイムプロダクトを適用した解析を試みた。さらに、設置場所に制限のある船舶上で影響の大きい反射波による誤差を含む解析結果を除去する品質管理手法を考案した。

解析の結果、近傍の陸上GNSS点で解析された水蒸気量に匹敵する精度で解析できることが確認できた（第4図）（Shoji et al. 2016）。

このことは、位置が固定しない海上の船舶や浮遊ブイに搭載したGNSSアンテナで、高精度のPWV解析が可能であることを示している。

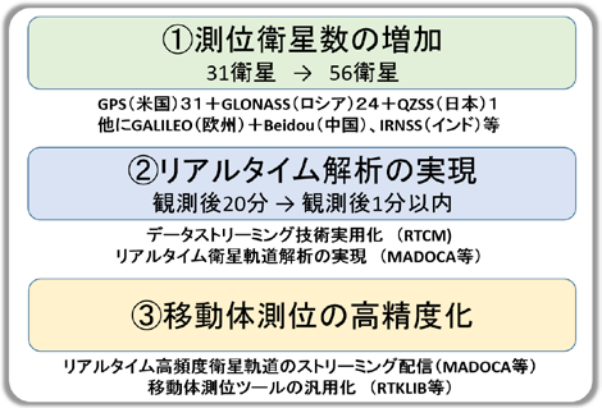
実用化に向けた課題として、海洋上でのデータ通信がある。解析する計算機にGNSS観測データ（60MB/日）、衛星軌道情報（150MB/日）を送る必要がある。QZSSは衛星軌道情報を配信する機能を有し、GNSS受信機で受信することができる。4基体制となる2018年には、日本周辺で常時1基以上のQZSSが観測できる。船上で受信したGNSSデータ、衛星軌道情報を用い、船上でPWVが解析できるため、通信データ量の課題はクリアされると期待される。

参考文献

(1) 国土交通省交通政策審議会気象分科会 2015: 提言「新たなステージ」に対応した防災気象情報と観測・予測技術のあり方，http://www.jma.go.jp/jma/press/1507/29a/bunkakai150729_2.html

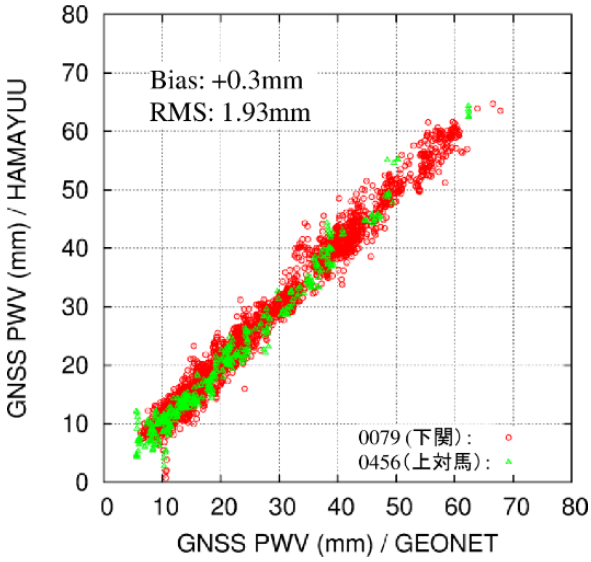
(2) Shoji Yoshinori, Kazutoshi Sato, Masanori Yabuki, and Toshitaka Tsuda 2016: PWV Retrieval over the Ocean Using Shipborne GNSS Receivers with MADOCA Real-Time Orbits, *SOLA*, 12, 265-271.

[1)] Multi-GNSS Advanced Demonstration Orbit and Clock Analysis の略称。宇宙航空研究開発機構(JAXA)の開発する複数 GNSS 対応衛星軌道時刻推定ツール。



第2図：準天頂衛星打ち上げ（2010年）以後に実現したGNSS技術の革新。

第3図：船舶に設置したGNSSアンテナの一例（関釜フェリー株式会社の「はまゆう」）。デッキ上部左舷側ポール（赤丸で囲んだ場所）に取り付け、下関と釜山を結ぶ航路上の可降水量を解析した。



第4図：フェリー「はまゆう」で解析された PWV と、近傍（20km以内）の地上 GNSS 点で解析された PWV との比較（赤点：0079（下関）、緑点：0456（上対馬））。