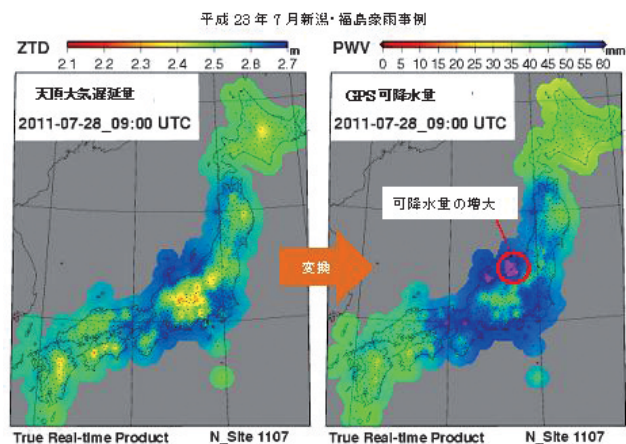


リアルタイム GPS 可降水量解析システムの開発

Development of True Real-time GPS Water Vapor Analysis System



和田	晃	Akira Wada	□
林	稔	Minoru Hayashi	□
山田	浩章	Hiroaki Yamada	□
杉本	淳	Jun Sugimoto	□
石川	公美子	Kumiko Ishikawa	□
阿部	知宏	Tomohiro Abe	□

あ ら ま し

GPS可降水量とは、GPSの電波遅延を利用して算出した観測点上空の水蒸気の積算量のことであり、本システムでは、電子基準点を用いて日本全国のGPS可降水量をリアルタイムに得ることが可能である。本システムで得られたGPS可降水量は、民間気象会社や大学、研究機関にて利用され、集中豪雨の予測や地球温暖化プロセスの解明の研究などに応用されている。本報告では、リアルタイムGPS可降水量解析システムの特徴および、最近の研究成果および適用事例について述べる。

Abstract

The integrated quantity of Precipitable Water Vapor (PWV) in the troposphere calculated based on propagation delays in the GPS station is called GPS PWV. We have developed a True Real-time GPS PWV analysis system that can calculate GPS PWV across the whole of Japan in real time. The GPS PWV obtained through this system is widely used in climatology and meteorology. This report covers the details of this system and the results of its application in some typical heavy rain conditions.

1. 緒 言

地球規模の気候変動から局所的な集中豪雨まであらゆる気象事象にとって水蒸気の寄与は非常に大きく、水蒸気量を連続的に観測可能なGPS可降水量は昨今、数値気象モデルのデータ同化に用いられるようになってきている⁽¹⁾。

GPSによる可降水量観測のメリットは、観測点を設置した場所において、24時間365日連続したデータを取得できる点にある。水蒸気量は時間とともに大きく変動し、また特に近年注目を浴びている集中豪雨などにおいては、激しい増減が発生する。定期的に打ち上げる必要があるラジオゾンデなどでは、捉えることができない水蒸気量の連続的な時間変化をGPSによる解析によって推定することができる。

当社では、日本全国に約1300箇所設置されている電子基準点のGPS観測データを用いて、リアルタイム

にGPS可降水量を算出し、配信するシステムを開発し運用してきた⁽²⁾。今回、さらに機能を向上させたRTNet/MetV2システムを開発した。本システムの特徴は以下の通りである。

- (1) 途切れないシームレスな可降水量解析
 - (2) 日本全国をリアルタイム（最大1分間隔）に解析
 - (3) GPS可降水量だけでなく、視線遅延量も推定可能
 - (4) 独自基準点の取り込みが可能
- また、解析手法を変更することで、以下も可能となる。
- (5) 海上でのGPS可降水量推定

本論文では、本システムの特徴ならびに最新の研究成果について報告する。

2. GPS可降水量

GPS衛星からの電波が対流圏を通過することにより発生する伝搬遅延は、通常、測位の際の誤差要因として扱われる。逆に、観測点の座標が正確に測定されて

□ Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 開発センター

いる場合、対流圏による遅延量を正確に見積もることができる。対流圏遅延量は、乾燥大気による遅延量と水蒸気による湿潤遅延量に分けられる。

GPS衛星は図1に示したように、観測点からみて様々な仰角、方向に位置しているが、それぞれの衛星に対する遅延量を視線遅延と呼び、これらを天頂方向に重み付けしてマッピングすることにより、天頂遅延量が算出される。

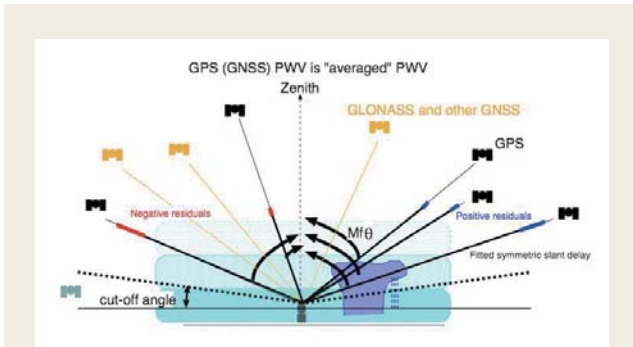


図1 天頂遅延量および可降水量のイメージ⁽³⁾

GPS可降水量と気象学的な可降水量の違いは、観測範囲と計算方法にある。気象学的な可降水量は、面積1m²の空気柱に含まれる水蒸気の総質量であり、観測点上空の積算値である。これに対し、GPS可降水量は、推定された天頂遅延量に、気圧、気温等の補正を加えることで算出されるため、観測点のアンテナを中心に逆円錐の観測範囲を表した値となる。

また、GPS可降水量は、上空の水蒸気量であり雨の量ではないため、算出されたGPS可降水量がそのまますべて雨となって地上に降り注ぐわけではない。しかし、水蒸気の情報レーダーでは捉えられない情報であり、水蒸気がどのように移動しているか、そしてそれがどこに収束するのかという情報をGPS可降水量で捉えることができるため、GPS可降水量そのものを気象予報に使うといった利用方法よりは、GPS可降水量を気象予報における数値気象モデルのデータ同化に利用される場合が多い。

図2に、数値気象モデルにおいて、GPS可降水量を用いない場合（左）、GPS可降水量をデータ同化した場合（中）、また実際の観測値（右）を示す⁽⁴⁾。

近畿地方から中国、四国地方にかけては、GPS可降

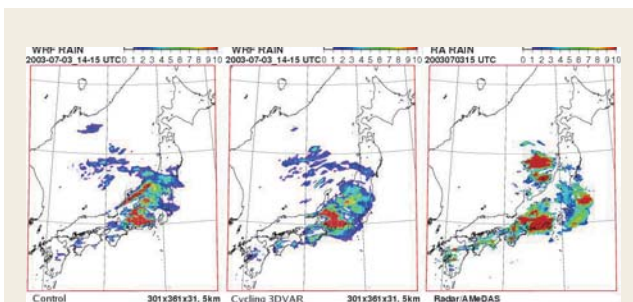


図2 GPS可降水量の有無による予測値の違い

水量を用いない場合、観測値に比べて、予報降雨量が少ないのに対し、GPS可降水量をデータ同化した場合は、観測値に予報降雨量が近づいている。また、新潟県付近では、実際には降っていないのにも関わらず、GPS可降水量を用いない場合は、予報推測でかなり大きな雨が降っているが、GPS可降水量をデータ同化した場合は、予報降雨量が減少している。

このようにGPS可降水量を数値気象モデルにデータ同化することで、雨が降ることに対する予測精度を向上させられる他、誤報の低減にも有効である。また、ウインドプロファイラなどのデータと組み合わせることで、日照量や風向・風速など他の気象事象についても予測精度を向上させることができる。

3. システム構成

本システムは、機能別に「データ収集サブシステム」、「天頂遅延量解析サブシステム」、「可降水量変換サブシステム」、「データ配信サブシステム」の4つのサブシステムから構成される。図3に、本システムのシステムイメージを示す。青点線線が本システムの構成である。

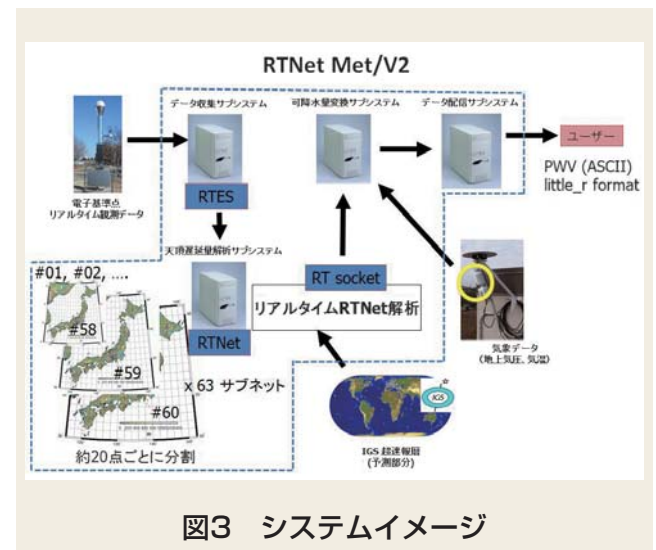


図3 システムイメージ

3.1 外部データ

3.1.1 電子基準点リアルタイム観測データ

GPS可降水量解析のための源泉データは、国土地理院により設置された日本全国約1300点のGPS連続観測網（GEONET）で観測されたリアルタイムGPS観測データである。GEONETは主に地殻変動の解析を目的として構築・運用されているシステムであるため、地震多発地域は高密度で観測局が設置されているなど、地域によってばらつきはあるが、概ね30km間隔で日本全土を網羅している。気象データとしてよく利用されている約1300箇所のアメダスとほぼ同等の設置間隔である。

本システムでは、日本GPSデータサービス株式会社の全点1秒間隔のデータ配信サービスを利用している。

3.1.2 IGS超速報暦 精密解析に必要な衛星の軌道は、世界中の大学、研究機関などが参加して運営を行なっている

ボランティア組織IGS:International GNSS service によるIGS超速報暦を利用している。IGSでは、衛星の精密な時計・軌道や地球回転パラメータなどが公開されており、そのうち、IGS超速報暦は6時間ごとにWebから入手可能である。

3.1.3 気象データ 可降水量変換には、地上気圧・気温観測データ、あるいは、数値気象モデルによるそれらの予報値が必要である。本システムでは、気象官署観測データや数値予報データを利用している。

3.2 データ収集サブシステム データ収集サブシステムでは、日本GPSデータサービス株式会社の電子基準点観測データ配信サーバと本システムのサーバを広帯域のネットワークで接続することにより、日本全国のデータを遅延なく取得可能なシステムを構築した。

データ収集には当社とGPS Solutions社との共同開発である、リアルタイムデータ収集ソフトウェアRT_Epoch_server (RTES) を用いた。このソフトウェアでは、全国1300箇所の1秒データを1台のサーバで取得可能である。また、収集されたデータは内部独自フォーマットに変換され、天頂遅延量解析サブシステムの解析エンジンであるRTNetの各プロセスに配信される。

3.3 天頂遅延量解析サブシステム 天頂遅延量解析システムでは、データ収集サブシステムで取得した電子基準点のリアルタイム観測データを用いた天頂遅延量解析が行われる。解析ソフトウェアには、RTESと同様にGPS Solutions社と共同開発したリアルタイムGNSS解析エンジンRTNetを用いる。

解析戦略として、全国の電子基準点を約20点ずつ63のネットワークに分割し、それぞれのネットワークを1つのRTNetのプロセスにて解析を行う。全国の電子基準点を適度に分割することにより、解析精度を落とすことなく、1プロセスごとの負荷を減らした。すべ

表1 RTNet解析パラメータ

観測量	搬送波位相ゼロ差 (コードは利用しない)
初期値	観測点座標 国土地理院精密解析値 (F3 解) 期間平均値、 地殻変動の影響を考慮し、若干の誤差幅をもたせる
推定量	受信機時計 衛星時計 位相アンビギュエティ 天頂大気遅延量 観測点座標 (スタティックモード)
地球物理モデル	海洋潮汐 (NAO, GOTIC2 による荷重係数)
大気モデル	Sasstamoinen 標準大気モデル GMF -DRY および GMF-WET (マッピング関数)
大気遅延推定	1 分間隔
視線遅延	位相ゼロ差残差と ZTD 推定値から計算 (マルチパスフィルターを別途加える)

てのプロセスは1台のサーバ上で並列に実行されるが、この分割により、リアルタイム観測データ入手後、約1秒で全点の解析が終了する。なお、実際には1秒間隔の解析ではなく、この時点で1分間隔に間引いた解析を行なっている。また、観測点座標を完全に固定せず、若干の誤差量を持たせることで、地殻変動等による観測点座標の誤差分を吸収する。本システムにおけるRTNetの代表的な解析パラメータを表1に示す。

3.4 可降水量変換サブシステム 可降水量変換サブシステムでは、天頂遅延量解析サブシステムで算出された電子基準点上の天頂遅延量から、GPS可降水量への変換を行う。本システムは、複数のスクリプトにより構成される。

可降水量変換の処理フローを図4に示す (「GPSハンドブック」より引用、一部改変)⁽⁵⁾。

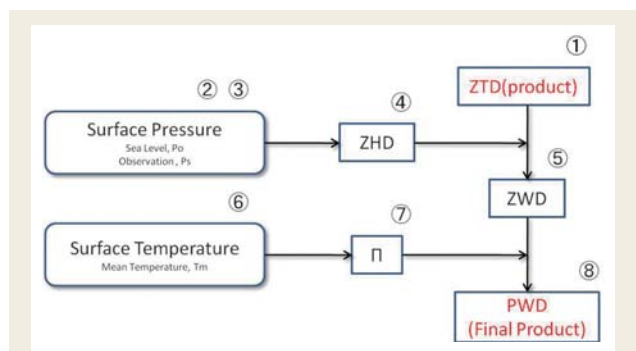


図4 可降水量変換処理フロー

図4中の各数字が示すのは以下の通りである。

- ①天頂遅延量 (ZTD) Zenith Tropospheric Delay
- ②海面気圧 (Po) Sea Level Pressure
- ③GPS観測点気圧 (Ps) Surface Pressure of GPS observation
- ④天頂静水圧遅延 (ZHD) Zenith Hydrostatic Delay
- ⑤天頂湿潤遅延 (ZWD) Zenith Wet Delay
- ⑥大気水蒸気荷重平均気温 (Tm) Temperature
- ⑦変換係数 (Pi) Transformation Coefficient
- ⑧可降水量 (PWV) Precipitable Water Vapor

図4の各数字によるデータを可視化すると図5のようになる。

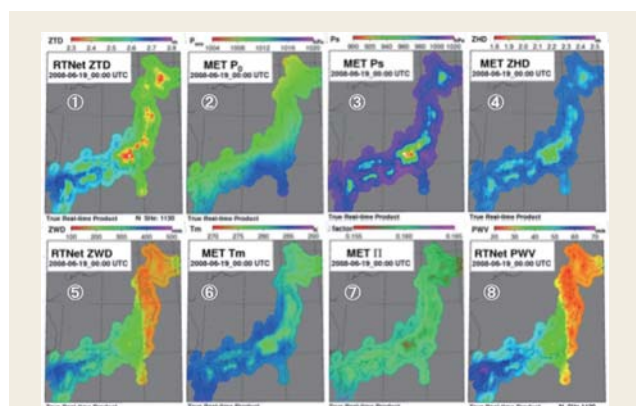


図5 可降水量変換の各データの可視化

①のZTDから始まって、各データを使用して変換をすることにより、標高や気圧の影響を取り除き、⑧のGPS可降水量が算出される。

3.5 データ配信サブシステム 天頂遅延量解析サブシステムおよび、可降水量変換サブシステムにより算出された、天頂遅延量・可降水量は、本サブシステムにより、観測点ごとファイル、時系列ファイル、ASCIIファイル、データ同化フォーマット等の各種フォーマットに変換され、また、ユーザーごとに必要な時間分にデータが間引かれる。解析結果はFTP等を用いてユーザーに配信される。

4. 解析事例

本システムによる解析事例を以下に示す。それぞれ赤から青になるほど可降水量の量が多い。また紫は各図中のカラーバーを超えた量の可降水量であったことを示している。

(1) 平成20年8月末豪雨

2008年8月末に紀伊半島から関東地方までの太平洋側を中心に豪雨があった事例である。そのうち8月28日の関東上空の可降水量のマップを図6に示す。

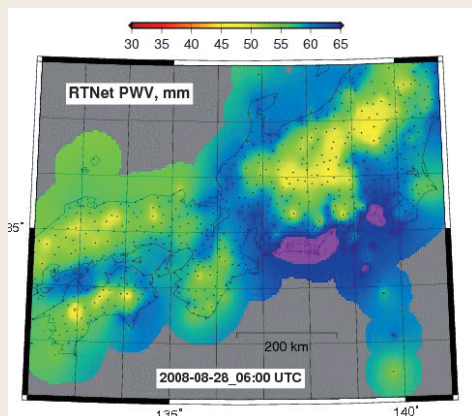


図6 平成20年8月末豪雨事例

(2) 平成21年7月中国・九州北部豪雨

2009年7月19日から7月26日にかけて中国地方から九州北部にかけて豪雨があった事例を図7に示す。

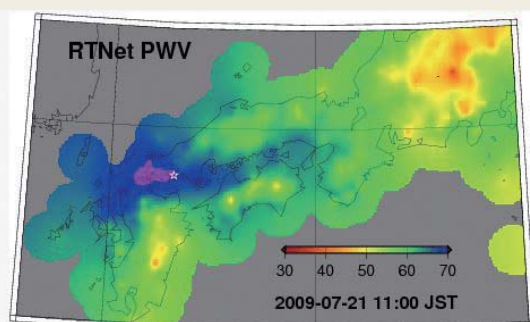


図7 平成21年7月中国・九州北部豪雨事例

(3) 平成23年台風6号の事例

2011年7月に上陸した台風6号の事例を図8に示す。

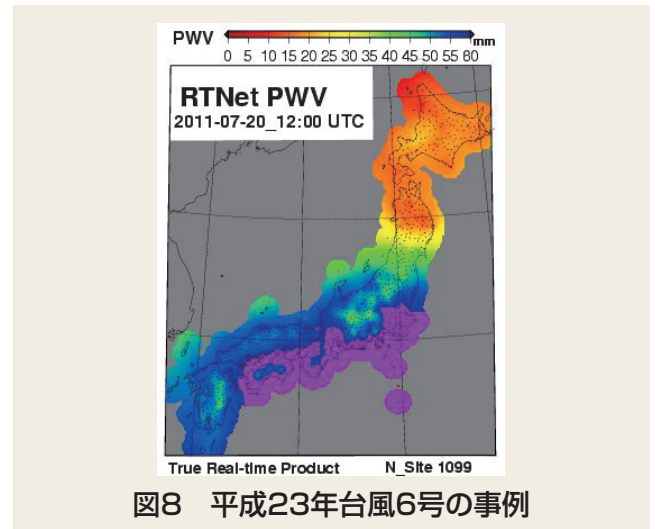


図8 平成23年台風6号の事例

上記3事例で示したように、上空の水蒸気量（雨になる可能性がある量）を、地点ごとによく表すことができている。これらの結果は、ユーザーにおいて数値気象モデルに取り込まれ、集中豪雨の予測に役立てられた。

5. 応用事例

5.1 視線遅延量の利用 従来、天頂の水蒸気量を示すGPS可降水量は、数値気象モデルやナウキャストなどに利用されていたものの、衛星ごとの遅延量である視線遅延量については、そこに含まれる残差・ノイズの影響もあり、そのまま数値気象モデルに取り込んでも誤差になる場合が多かった。そこで、本システムをさらに発展させ、観測点ごとにマルチパスを別途推定し、それを視線遅延量算出に加えることで、高精度な視線遅延量推定を行うシステムを構築した⁽⁶⁾。マルチパスは、観測点周囲の環境に影響される誤差であり、例えば、木々の成長などにより変化が生じる。そこで、図9に示すように観測点ごとに1ヶ月ごとにマルチパスの影響誤差分を推定した誤差マップを作成した。

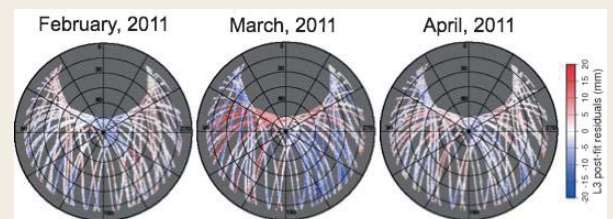
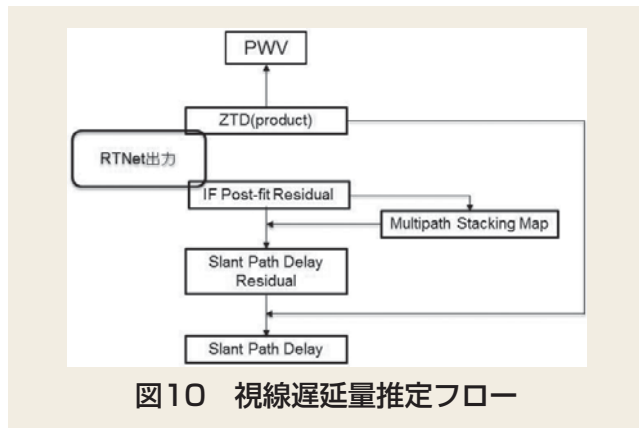
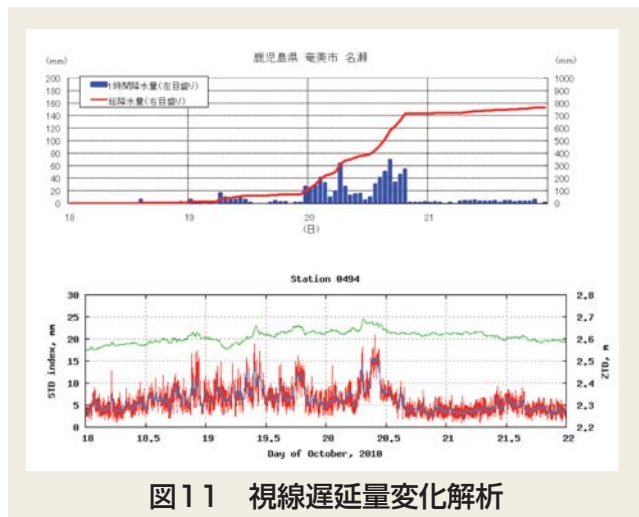


図9 マルチパス誤差マップ

視線遅延量推定のフローを図10に示す。RTNetから出力された事後残差にマルチパス誤差マップを適用することで、ノイズを低減した視線遅延量を算出する。



視線遅延量解析結果を2010年10月18日から22日の奄美大島における集中豪雨の事例に適用した。図11の上図は気象庁発表の奄美市名瀬における1時間降水量および積算総降水量である。下図の緑色で示すプロットが天頂遅延量を、赤色で示すプロットが全視線遅延量の残差の標準偏差を示す。これを見ると、降雨前および、降雨中に視線遅延量が激しく変動していることが見て取れる。また、降雨終了直前から視線遅延量の変化が減少している。



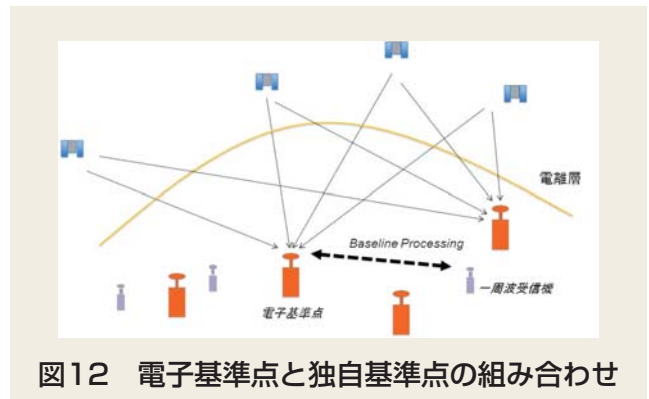
上記のことから豪雨の事例において、視線遅延量の変化を見ることにより、直前の降雨の予測および降雨終了を検出できる可能性がある。

5.2 独自観測点の取り込みとローカルな解析

本システムでは、電子基準点の他、独自の観測局を追加することが可能である。さらにここで使用するGPS受信機は、電子基準点のような高価な二周波受信機に加え、安価な一周波受信機も用いることができる。

独自観測点を追加することで、電子基準点のみより高密度にGPS可降水量を推定することが可能になる。

ただし、一周波受信機では、電離層による遅延量を除去できないため、周辺の電子基準点を用いて電離層遅延補正を作成し、それを適用することにより、一周波でも高精度なGPS可降水量を推定することが可能になる。一周波受信機を使用した場合のシステムイメージを図12に示す。



独自観測点を追加することにより、河川やダム、鉄道、道路の監視や、農業気象などローカルなケースの気象予測精度の向上が期待できる。

5.3 海上でのGPS可降水量解析

通常、天頂遅延量を精密に推定する際には、観測点の座標を固定して解析を行う。このため、ブイや船など、常に動く海上においては正確な可降水量推定が困難であった。そこでRTNetを用いて、移動点においても固定点と同等精度で天頂遅延量を推定する仕組みを開発した。観測点座標は固定せず、天頂遅延量推定と同時に座標のキネマティック解析を行う。また、リアルタイムに衛星時計を別途推定する。この方式による解析結果を図13に示す。

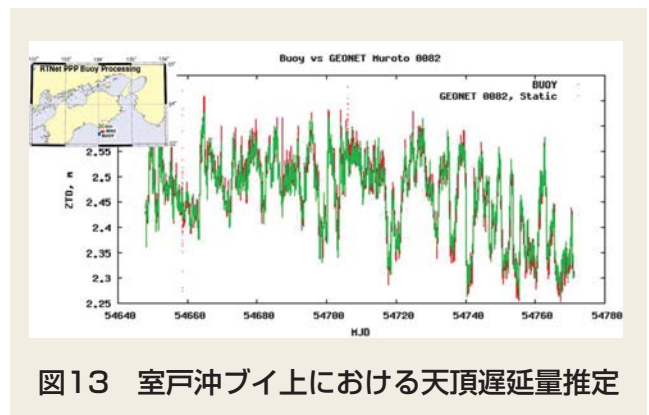


図13中の赤色で示すプロットは、高知県室戸沖に設置したブイに搭載されたGPS受信機を使って推定した天頂遅延量である。また緑色で示すプロットは、近傍の電子基準点における天頂遅延量である。結果、天頂遅延量はRMSで20mmの精度 (PWV換算で3mm) で一致した。このように、本システムを用いることで、船やブイでの海上でのGPS可降水量が正確に算出することが可能である。RTNetを使った事例として、これまでインド洋上のGPS可降水量解析が報告されている⁽⁷⁾。

6. 結言

RTNetを用いた本システムの開発により、より短時間、高精度にリアルタイムに全国のGPS可降水量を算出することが可能になった。また、さらなる応用と

して、視線遅延量の利用や独自観測点の取り込みによるローカルな気象解析、また海上でのGPS可降水量算出も可能である。近年増加している集中豪雨を始め、防災だけでなく、日常に直結している気象分野への本システムの更なる展開を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 日本気象協会：局地豪雨対応の数値予報システムの開発・運用, <http://www.jwa.or.jp/content/view/full/2549/>
- (2) 佐藤一敏ほか：RTNet/METを用いたリアルタイムGPS可降水量解析システムの構築と精度検証, 日本気象学会2009年度春季学会, **2009**, つくば, 日本
- (3) Iwabuchi.T, et al. : A New GPS-Enhanced High Resolution Weather Service, Proceedings of the ION-GNSS, Institute of Navigation, September 16-19, **2008**, Georgia, Savannah.
- (4) Iwabuchi.T, et al. : Impact of GPS Precipitable Water on WRF 3DVAR Rainfall Forecast, ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, 13-16 September **2005**, Long Beach, CA
- (5) 岩淵哲也:水蒸気観測と気象, GPSハンドブック, 朝倉書店,**2010**, 360-378.
- (6) Iwabuchi.T et al. : True Real-time Slant Tropospheric Delay Monitoring System with Site Dependent Multipath Filtering, Proceedings of the ION-GNSS, Institute of Navigation, **2011**, Portland, Oregon
- (7) 藤田実季子ほか：船上観測におけるGPS 可降水量の精度評価, 日本気象学会2007 年度秋季大会, **2007**, 札幌、日本

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部
開発センター
和田 晃
Tel : 06-6569-0066 Fax : 06-6569-0115
e-mail : wada_akira@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Product Development Division
Machinery & Infrastructure Headquarters
Akira Wada
Tel : +81-6-6569-0066 Fax : +81-6-6569-0115
e-mail : wada_akira@hitachizosen.co.jp



和田 晃



林 稔



山田 浩章



杉本 淳



石川 公美子



阿部 知宏