

GNSS 地上観測網による水蒸気量推定と 気象学への応用に関する研究

—2015年度日本気象学会賞受賞記念講演—

小 司 禎 教*

1. はじめに

この度は日本気象学会賞をいただき、大変な光栄に感激しております。私の研究を導いていただきました全ての方々に、心より感謝申し上げます。

GNSS (Global Navigation Satellite System) とは、人工衛星を用いた測位、航法支援システムの総称で、1990年代半ばに運用が開始された米国の GPS (Global Positioning System) は、その代表的な存在です。現在ではロシアや中国等、独自の GNSS を運用している国が増えてきています。本稿では、GPS のみを用いた研究の場合、あるいは研究課題等固有名詞として使われている場合は“GPS”と表記します。

私は1997年4月、気象庁予報部予報課より気象研究所予報研究部に異動して直ぐ、同月に開始された科学技術庁科学技術振興調整費のプロジェクト「GPS 気象学：GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究（以下、学問分野としての GNSS 気象学と区別するため、“科振費「GPS 気象学」と表記します。）」に参加しました。異動の前月頃だったと思いますが、野口啓孝予報研究部第3研究室長（当時）より電話で「GPS 気象学って知っていますか？」と聞かれ、そういう分野があることを知りました。以来18年以上、この研究に取り組んできたこととなります。日々課題に取り組んでいるうちに、いつのまにか年月が経っていたというのが正直な気持ちです。

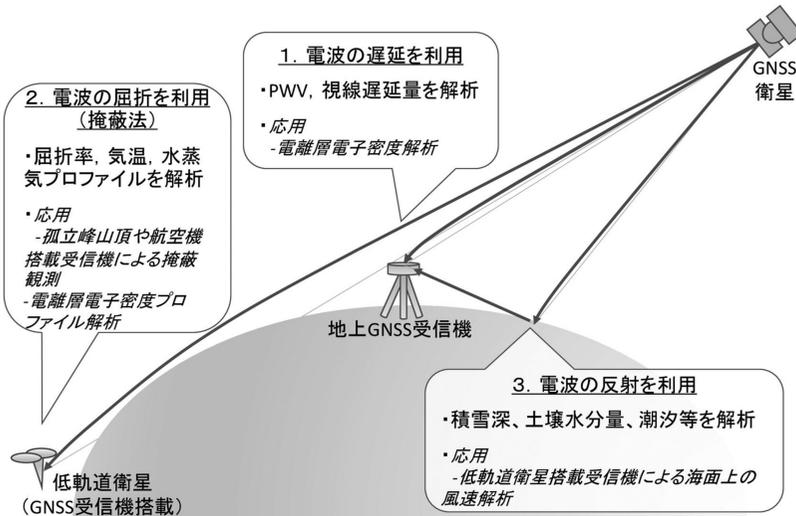
GNSS によるリモートセンシングは、第1図に示すように、大きく以下の3種類に分けられます。(1) 地上受信機で観測した電波の遅れを利用する地上基地型、(2) 低軌道衛星等に搭載した受信機で観測した電波の伝播経路の屈折を利用する掩蔽法、(3) 受信機に到達する直達波と反射波の干渉を利用する反射手法。それぞれ、国内外で興味深い成果が挙げられ、特に掩蔽法は、世界の数値予報センターで、バイアスの無い観測として初期値解析に利用されています。欧米では GNSS 気象学といえば、掩蔽法を意味する場合がありますように思います。日本でも数多くの研究開発が行われ、成層圏下部（高度20~30 km）における大気重力波のエネルギーの全球分布を解析し、波動エネルギーが赤道域、特にインドネシア域、南米、アフリカ西岸で増大していること (Tsuda and Hocke 2004) などが初めて明らかとなりました。掩蔽法については、津田敏隆先生（京都大学）が詳しく解説されています (津田 1998, 2006)。掩蔽法による屈折率のプロファイルが、気象庁の全球モデル解析に初めて利用されたのは、2007年3月でした (小澤・佐藤 2007)。同年11月には一旦中断しますが、2009年11月以後は継続して利用され、2014年3月からは屈折角の同化を行っています (大和田 2015)。反射波の利用は比較的新しい分野ですが、日置幸介先生（北海道大学）のグループが、積雪深解析 (Ozeki and Heki 2012) や潮汐解析 (中島・日置 2013) 等、興味深い結果を発表しています。

私の研究は地上 GNSS 観測網を用いたものですので、本稿はそれに特化した解説となることをお断りしておきます。まず第2節で精密衛星測位と、それを利用した大気計測の原理、気象学への応用の始まりを簡

* 気象研究所, yshoji@mri-jma.go.jp

—2015年7月2日受領—

—2015年9月30日受理—



第1図 GNSSによる3種類の大気計測手法の概念図。GNSSリモートセンシングでは、中性大気の屈折率や水蒸気量等の他、2つの周波数電波を利用した電離層の電子密度解析も研究に利用されている。

単に紹介します。私がこれまで行ってきたのは概ね以下の3つの研究開発です。

- (1)GNSSから解析される水蒸気情報を高速かつ高精度に解析し、気象学や気象業務に役立てられるものにする。
- (2)GNSSから解析された可降水量(PWV: Precipitable Water Vapor)の豪雨やサイクロン予測への効果を確認すること。
- (3)GNSS水蒸気情報を、積乱雲の実況監視へ利用する可能性を検討すること。

第3～5節で、これら3つの研究開発について、GNSS気象学の発展を絡めて振り返ります。最後に、第6節でGNSS気象学の今後を展望します。原子時計を用いた高精度時間計測に基づいた水蒸気観測という、ユニークなリモートセンシングに、興味を持っていただければ幸いです。

私の研究成果は、国土地理院のGNSS観測網の存在無しには考えられません。1994年、国土地理院は南関東・東海地方に110点、それ以外の全国地域に100点のGPS観測網を展開しました。それぞれCOSMOS-G2(Continuous Strain Monitoring System with GPS by GSI)とGRAPES(GPS Regional Array for Precise Surveying)と呼ばれていました。1996年にはそれらを統合し、GEONET(GPS Earth Observation Network)として、測量法の基準点として運

用を開始、2003年に観測点は1200点に達しました。開始から15年ほどはGPS衛星からの電波のみを受信していましたが、2011年からロシアのGLONASS(Global Navigation Satellite System)や宇宙航空研究開発機構(JAXA)の準天頂衛星(QZSS: Quasi Zenith Satellite System)など複数のGNSS観測が可能で受信機への更新を開始し、2012年、GNSS Earth Observation Networkと改称、2013年5月より、全国のGEONET点でGPSに加えGLONASSとQZSSの提供を行って

います。GEONETのデータは勿論、解析に関するアドバイス等、国土地理院の皆様にはこれまで大変お世話を頂いてきました。

2. GNSS測位の原理と大気計測

GNSS衛星には周波数標準として原子時計(セシウム, ルビジウム)が搭載され、L帯2周波の電波が送信されています。受信機で検出されたGNSS電波の位相から、電波が受信機に到達するまでに要した時間、さらに衛星と受信機間の距離を推定します。衛星軌道が既知であれば、原理的には3機以上の衛星からの距離を用いて、受信機の3次元空間における位置が計測できます。

衛星から発射された電波が受信機に到達するまでに影響を与える要素と、GNSS解析における処理方法を第1表にまとめました。詳細は、大谷ほか(1997)、辻(1998)、大谷・内藤(1998)等を参照下さい。

PWVは鉛直積算水蒸気量ですが、GNSS解析からリトリブされるPWV(GNSS PWV)は測位解析の際、座標値等と共に未知パラメータとして推定される天頂大気遅延量(ZTD: Zenith Total Delay)から、GNSSアンテナ位置の気圧と気温を用いて解析することができます。歴史的にはBevis *et al.* (1992)が、測位解析の副産物であるGPS PWVを気象学に利用することを提唱し、1993年には米国でオクラホマ

第1表 GNSS で観測される電波の位相に影響する要素, GNSS 解析における処理 (表中の斜字体数字は, 関連する節番号).

要素	処理	備考
衛星・受信機間距離 (受信機位置)	パラメータ推定	精密測位には観測点位置変動のモデルが重要. ・極運動 ・プレート運動 ・固体地球潮汐 ・海洋潮汐荷重(3.1節)
中性大気 (静水圧+湿潤) 遅延	天頂遅延量をパラメータ推定	視線 (受信機・衛星間) 遅延量は, 「天頂遅延量に, ある関数 (マッピング関数*) を介することで表現できる」と仮定.
受信機時計誤差	①位相差を観測量とすることで相殺, あるいは, ②パラメータ推定	本研究では主に②を採用.
衛星時計誤差	①位相差を観測量とすることで相殺, あるいは, ②予め解析(3.3節)	本研究では主に②を採用.
電離層遅延	遅延が周波数の2乗に反比例する性質を利用し, 2周波の線形結合により消去	改良された電離層モデルを適用した1周波受信機による測位や大気リモートセンシング研究も行われている.
アンテナ位相中心変動	機種に依存したアンテナ位相中心変動モデルの適用	本研究ではIGSによる位相中心変動モデルを利用.
反射波の干渉	事後残差の蓄積 (観測点依存補正テーブル) (3.2節)	

*マッピング関数:

観測された電波の位相から, 各衛星方向の視線遅延量を直接求めようとすると, 未知パラメータの数が観測量より多くなり, 精度良く解析できない. 未知パラメータを天頂遅延量に限定することで, この問題を回避している. マッピング関数は, 視線遅延量と天頂遅延量の比率 (主には仰角依存性) を記述する. マッピング関数の精度は, 測位精度に直結するため, その開発は衛星測地学研究における重要な分野の一つである. 標準大気モデル, 全球の高層ゾンデ観測, さらに ECMWF 再解析等に波線追跡を適用し, 高度化が進められてきた.

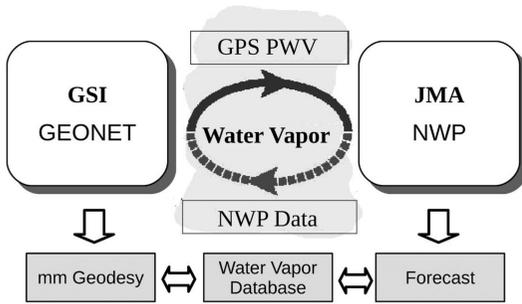
州を中心に「GPS/STORM」と名づけられた実験観測が行われました. そして, GPS PWV がラジオゾンデと比較し二乗平均平方根 (RMS) 差1.8 mm で一致する (Rocken *et al.* 1995 ; Duan *et al.* 1996) という水蒸気センサーとしてのポテンシャルが世界で初めて示されました.

日本では1989年, 当時の国立天文台水沢観測センター (現 国立天文台水沢キャンパス) で開催された「GPS 大気遅延に関するワークショップ」において, 気象庁数値予報課から参加した萬納寺信崇氏が, 「GPS 解析でパラメータ推定される大気遅延量を, 気象分野に利用する」というアイデアを Bevis *et al.* (1992) 等とは独立に, 提案したことが, 日本型「GPS 気象学」の原点とされています (畑中ほか 1996). 1995年7月には気象庁で第1回 GPS 気象学ワークショップが開催され, 同年11月には京都大学防災研究所の田中寅夫教授を中心とした研究グループが, 信楽の MU レーダー (Middle and Upper atmosphere radar) 観測所周辺に24台の GPS 受信機を数

百 m 間隔で配置し, 国内では最初の GPS 気象学に関する大規模な集中観測を行いました (吉原ほか 1999). そして国土地理院の辻 宏道氏提案による1996年度の科振費フィージビリティスタディ期間を経て, 1997年4月より, 当時国立天文台の内藤勲夫先生が代表となり科振費「GPS 気象学」プロジェクトが開始されました. プロジェクトのコンセプトを第2図に示しますが, 世界に類を見ない稠密な国土地理院の GPS 観測網である GEONET から得られる水蒸気情報を天気予報の根幹である数値気象予報に活用すること, および数値予報データを用いて測位精度を向上させること, という2つの目標を掲げ, 測地研究者と気象研究者が多数参加する大規模な学際プロジェクトでした (小司ほか 2009).

3. 高精度・高速解析手法の確立

前節で概観した経緯を知らずに, 1997年4月から「GPS 気象学」に参加した私に与えられた課題は, GPS 観測と解析の技術を習得し, PWV 解析を可能

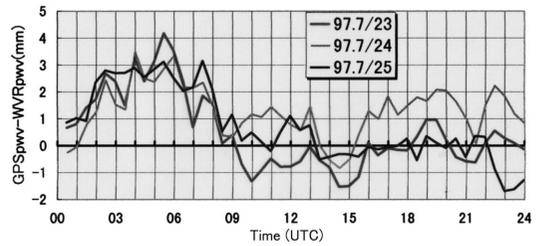


第2図 科振費「GPS気象学」(1997年4月～2002年3月)のコンセプト。GEONETから得られる水蒸気情報を介して、数値予報と測位双方の精度向上を目指した。(小司ほか(2009)のFig. 1)

にすることでした。7月にはGPS特別観測が計画されていたため、当時気象研究所地震火山研究部の上垣内修氏、山本剛靖氏から、三脚にGPSアンテナを固定する方法や、機器の取り扱い方法等を学びました。東京大学地震研究所に同僚の瀬古弘氏等と1週間通い、加藤照之教授や中尾茂氏からGPS解析ソフトウェアBernese (Rothacher and Mervart 1996)を用いた測位解析手法などを研修し、また別の学術用GPS解析ソフトウェアGAMIT (King and Bock 2002)を、防災科学技術研究所(当時)の島田誠一氏に教えていただいたりしました。GPS解析で用いられている大気モデルについては、東京大学(当時)の大谷竜氏や、通信総合研究所鹿島宇宙通信センター(当時)の市川隆一氏に何度もお尋ねし、そのつど丁寧に教えていただきました。7月22日から8月1日の間、つくば市内4箇所(工業技術院つくば第2研究センター、国土地理院、気象研究所、農業環境研究所)で「1997年夏つくばGPS特別観測」が行われました(小司ほか1999)。

3.1 海洋潮汐荷重変形モデル適用の必要性

異なる場所に設置した複数の受信機で観測した、複数衛星からの搬送波位相の差(二重位相差)を観測量とすることで、位相に含まれる衛星時計と受信機時計の誤差を相殺することができます。この手法は長基線解析と呼ばれ、GNSSによる測位解析の代表的な方法です。数百kmの長基線を組むと、お互いの受信機で観測される電波の位相に含まれる大気遅延量の相関が小さくなり、精度良く分離することが可能となります。Duan *et al.* (1996)は、「GPS/STORM」の観測データに、長基線解析を適用してZTDを解析し、



第3図 GPS PWVのWVR PWVに対する差の時系列。気象研究所, 1997年7月23～25日。(小司ほか(1999)の図4)

PWVに変換した結果、水蒸気ラジオメータ(WVR: Water Vapor Radiometer)とのRMS差が1.5 mm未満という高い一致度を得ることに成功しました。彼らは、この長基線を用いた手法を「絶対法(absolute method)」と呼んでいます。

東京大学の講習会で学んだGPS解析ソフトウェア、Bernese (Version 4.0)を用い、「絶対法」により、「1997年夏つくばGPS特別観測」の解析を行った結果、高層ゾンデ観測やWVRとの比較で、RMS差が各々2.3 mm, 1.5 mmと、良く一致することがわかりました(小司ほか1999)。一方で、第3図に示すように毎日11時から16時の間、GPS PWVがWVRに比べ3-4 mm値が大きく解析されていることも見つけられました。日中に見られることから、熱による何らかの影響や、蒸発による地面の変位等、誤差原因を検討しました。Ohtani and Naito (2000)は、気象庁高層ゾンデ近傍のGEONET点で解析したPWVとゾンデのそれとの1年間の比較を行い、09時と21時でバイアスが異なることを報告し、その原因を、海洋潮汐荷重による観測点の上下変動に関連付けました。海洋潮汐荷重とは、満ち干による地面への海水の荷重のことで、その変動により地面が周期的に変動する現象を海洋潮汐荷重変形と言います。当時のGPS解析ソフトウェアは、固体地球潮汐のモデルは組み込まれていましたが、海洋潮汐荷重については研究段階ということもあり、解析オプションの一つで、国土地理院の解析でも考慮されていませんでした。大谷竜氏(当時東京大学大学院)、宮崎真一氏(当時国土地理院地殻活動研究センター)、岩淵哲也氏(当時総合研究大学院大学)から、米国のジェット推進研究所(JPL: Jet Propulsion Laboratory)で開発されているGIPSY-OASIS II (GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software)

(Webb and Zumberge 1993) には、海洋潮汐荷重モデルを考慮する機能があること、国立天文台で任意の位置における海洋潮汐荷重変形を計算する GOTIC (Sato and Hanada 1984) というソフトウェアを開発していることなどを教えてもらい、開発者の佐藤忠弘氏 (当時国立天文台水沢観測センター) にご教示いただきながら、気象研究所の海洋潮汐荷重変形を計算しました。GIPSY については、幸運なことに1998年11月9～12日に国土地理院で JPL の開発者を招いて1週間開催された講習会に参加し、ライセンスを取得することができました。統計的に誤差を評価するため、青梨和正氏 (気象研究所) の協力で、1998年5、6月の2ヶ月間、気象研究所の露場で GPS と WVR の比較観測を実施しました。その結果、海洋潮汐荷重によって、気象研究所でも上下方向に3～4 cm 程度の振幅で変位しており、PWV の解析誤差が、上限変動に比例していること、Schwidorski (1981) の海洋潮汐荷重モデルを GPS 解析に適用することで、誤差を1/2～1/3に減らせることがわかりました (Shoji *et al.* 2000)。

3.2 反射波の干渉による影響の軽減

科振費「GPS 気象学」最初の3年間では GEONET 水蒸気情報の精度把握と、水蒸気変動の測位に及ぼす影響が研究され、測位精度向上には平均20 km 間隔の GEONET では捕捉できない、数 km スケールの水蒸気変動を研究することが必要とわかってきました。そこで、第2期と位置づけられた後半の2年間 (2000年度と2001年度) には、GPS による3次元水蒸気変動の観測・解析、数値気象モデル実験などによる詳細な水蒸気変動の解明と GPS 鉛直測位精度の向上などに重点がおかれしました。2000年秋と2001年夏には、茨城県つくば市周辺の20 km 四方に1～3 km の間隔で75点の観測点を格子状に配置した世界最高密度の GPS 観測網による実験観測「つくば GPS 稠密観測」が実施されました。

この観測実験の中で、私は水蒸気3次元解析に利用可能な、視線遅延量 (SPD: Slant Path Delay) の解析を担当しましたが、2つの問題に直面しました。一つは、僅か10 m ほどしか離れていない気象研究所の2つの GPS 観測点から抽出した PWV が平均的に1 mm 以上異なって解析されたこと。2つ目は、SPD の中に、PWV では得られない、数 km スケールの水蒸気変動の情報が含まれていることが確認できないことでした。前者は GPS PWV は絶対値として利用で

きるのか、後者は GPS でローカルな水蒸気解析はできるのかという、疑問を投げかけます。

GPS アンテナは、無指向性で、あらゆる方向からの電波を受信します。アンテナの位相中心位置は、実は電波の入射角 (特に仰角) に依存して変化し、変化の特徴はアンテナの機種によって異なります。Ohtani and Naito (2000) は気象庁高層ゾンデ近傍の GEONET 点で解析した PWV とゾンデのそれとの1年間の比較から、差の平均 (バイアス) で-2.7 mm、バイアスを除いた後の標準偏差で2.6 mm との結果を得ましたが、この GPS PWV の負バイアスの要因の一つとして、アンテナ位相中心変動 (PCV: Phase Center Variation) の影響を挙げています。一方、米国海洋大気庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) の国立測地測量局 (NGS: National Geodetic Survey) は、独自に受信機や衛星のアンテナ PCV を評価し、インターネット上で公開しています。2000年当時は、仰角依存の変動のみが評価されていました。この NGS の PCV モデルを適用することで、バイアスがほとんど解消されることがわかりました (Shoji *et al.* 2004)。しかし2番目の課題は残ったままです。

その頃、国土地理院の畑中雄樹氏は、GEONET のアンテナ架台からのマルチパス、レドームの影響により大気遅延量や座標値の推定値に大きなバイアスが生じること (Hatanaka *et al.* 2001a)、及び GEONET のアンテナピラー、レドーム、アンテナ機種の組み合わせ別に PCV 補正モデルを作成し、解析に適用することでバイアスが改善されることを示されました (Hatanaka *et al.* 2001b)。解析の際は、アンテナの PCV だけでなく、ピラーやレドームの影響も考慮する必要があることを示唆しています。1998年10月、科振費「GPS 気象学」による国際ワークショップ、“GPS/MET JAPAN Has Come!” が、東京大学にて開催され、GIPSY 開発者の一人、Ken Hurst 氏 (当時 JPL) が、各衛星の位相残差を90-100日間、電波の入射角 (仰角2度、方位角5度) 毎に蓄積し、平均することで、観測点個々の PCV モデルを構築するという試みを発表されました (Hurst and Bar-Sever 1998)。この手法で作成された補正モデルには、NGS の PCV モデルには含まれない、方位角方向の PCV と、観測点周囲の環境に依存する反射波 (Multipath) の影響も含まれます。Hurst 氏、Bar-Sever 氏に電子メールで手法の詳細を教えてもらいながら、

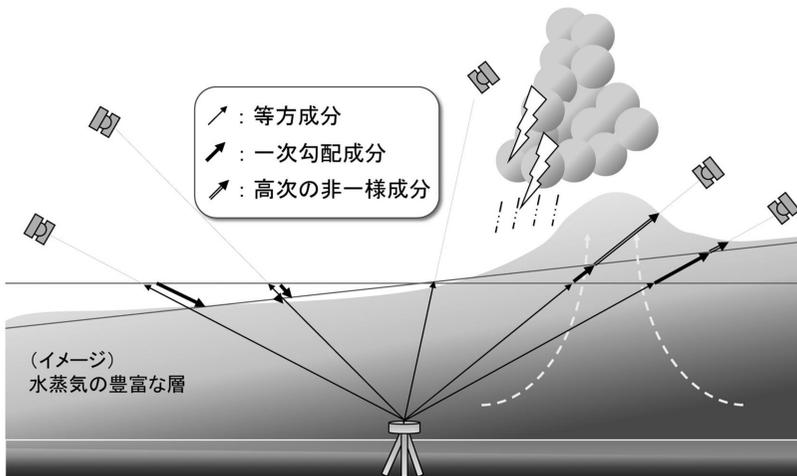
特別観測地点全ての PCV 補正モデルを作成したところ、NGS の PCV モデル適用時よりさらに、隣接観測点におけるバイアスが減り、高層ゾンデとの RMS 差も 1.6 mm 程度にまで減らすことに成功しました。しかし 2 番目の問題は解決されませんでした。

第 4 図に模式的に示すように GNSS 解析は、受信機上空の逆円錐状の空間に分布する衛星からの電波の位相を用います。GNSS PWV は、逆円錐空間内の PWV の平均値（等方成分）を代表しているといえます。GIPSY 等、学術用 GPS 解析ソフトウェアには、等方成分に加え、大気遅延量の勾配成分を解析する機能があります。Ichikawa *et al.* (2001) は茨城県の鹿嶋とつくばでの WVR の観測から、水蒸気の水平勾

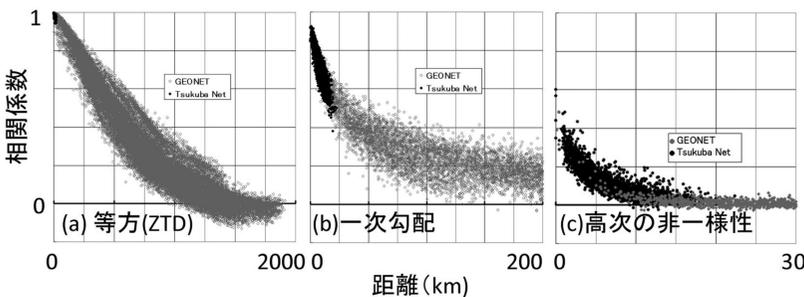
配は水平スケールで数十 km 以下の場合があることを見出しました。GPS 解析による勾配と、WVR 観測から得られた勾配とが高い相関関係にあるとの研究結果も報告されています (Aonashi *et al.* 2000 ; Bar-Sever *et al.* 1998)。

遅延量の等方成分と一次勾配成分を推定して残った事後残差には、より高次の非一様成分が含まれていることが期待されます。逆に、事後残差に大気シグナルが確認できなければ、GPS 解析で得られるものは、大気遅延量の一次勾配成分までということになります。

高次の非一様成分には、勾配では表現できない、スケールの小さな水蒸気の変動が表現されていると考えたのですが、当初はつくばと国立天文台水沢観測センター（当時）の事後残差の相関係数が 0.7 程度でした。この、数百 km はなれた観測点における事後残差の高相関は、気象以外の要因（例えば衛星時計や軌道の誤差、解析プログラムに搭載された地球回転、潮汐、大気等のモデルの誤差）が考えられるため、GEONET 観測点個々の事後残差の共通変動成分を抽出し、共通成分からの偏差を比較したところ、水平スケールが数 km の成分が残っていることがわかりました（第 5 図）。この結果は、WVR で同様のスケール解析を行った Aonashi *et al.* (2004) とも整合するものでした。Shoji *et al.* (2004) にて発表し、同手法で解析した SPD を用い、Noguchi *et al.* (2004) や Seko *et al.* (2004a) は、孤立積乱雲に関連する水蒸気の 3 次元トモグラフィ解析を行っています。ちなみに、気象研究所の瀬古 弘氏



第 4 図 SPD を 3 成分（等方成分、一次勾配成分、高次の非一様成分）に分解して考えることを説明する模式図。矢印の長さが、各成分の長さを表現し、3 成分の総和が SPD 全体の長さとなる。



第 5 図 異なる観測点で解析された SPD に含まれる各成分の相関係数の距離依存性。灰色は GEONET、黒はつくば稠密特別観測点による。2001 年 7 月 14 日から 9 月 2 日の 51 日間の結果。(Shoji *et al.* (2004) の Fig. 9, 10, 11 を編集)

は、既に2000年に、1996年7月7日、九州南部に停滞する梅雨前線を小低気圧が通過した事例で、GEONETのみを用いたトモグラフィー解析を行い、水蒸気の最も多かった九州南部で、降水域の下層1-2 kmの湿った領域の上、高度4 km付近を中心に水蒸気の少ない乾燥した場所があったとの解析結果を報告しています (Seko *et al.* 2000)。

3.3 衛星時計誤差の補正による準リアルタイム解析

電波の伝播時間に基づくGNSS大気リモートセンシングでは、時刻情報や衛星の位置情報が非常に重要です。科振費「GPS気象学」では、国際GNSSサービス (IGS: International GNSS Service) やJPLの解析した精密暦と呼ばれる軌道・時計情報を用いた研究を行いました。精密暦は観測後約2週間後に公開されるため、気象予報業務に利用することはできません。例えば気象庁のメソ解析の場合、解析対象時刻の後50分以内に入手した観測データを解析に利用します。

第2表に、2008年7月当時のIGS暦情報の精度をまとめました。メソ解析を行う場合、利用できる暦は超速報暦 (IGU: IGS Ultra-rapid ephemerides) の後半、軌道や時計の予測情報のみです。予測の軌道情報の誤差は、精密暦の2倍程度であるのに対し、時計情報は50倍精度が悪いことがわかります。衛星内部の回路に生じた熱雑音などの影響による時計の誤差は、予測が非常に難しいのです。基線解析によって、衛星時計の誤差を相殺する選択肢もありますが、その場合、計算コストは解析する観測点数の3乗のオーダーで増加します (Zumberge *et al.* 1997)。GIPSYの他の解析ソフトウェアに対する特徴の一つに、精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) 機能があります。これは、予め高精度に解析した衛星軌道と時計情報を既知として、基線を組まずに観測点個々の座標

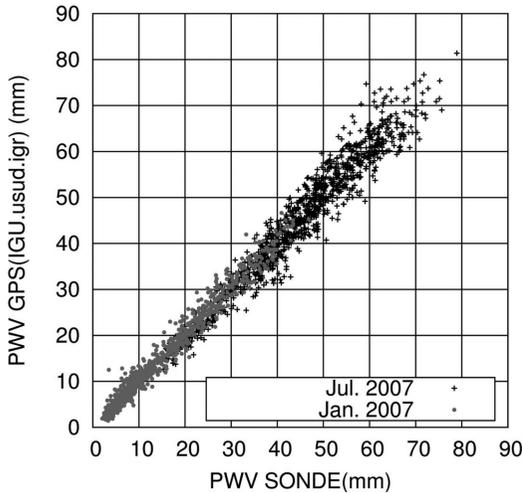
や大気パラメータを推定する手法です。計算コストは解析する観測点の個数に比例して増加するだけなので、観測点の数が多いほど、基線解析に比べ計算コストの面で優位になります。ただし、予め短時間のうちに衛星軌道と時計の誤差を解析する必要があります。

Flores *et al.* (2000) は、Onsala (スウェーデン) やMadrid (スペイン) にある、水素メーザー原子時計に同期した地上GPS観測点の時刻情報を真値として、GPSの準リアルタイム解析を行う手法を提案しました。水素メーザー原子時計は、GPS衛星に搭載されているセシウム原子時計やルビジウム原子時計より、特に1日程度の短期の安定性が高いのですが、長期的にはずれ (ドリフト) していくことが知られています。日本周辺で水素メーザーに同期した受信機を探したところ、JAXAの臼田宇宙空間観測所にJPLがIGS観測点として運用しているUSUD (Usuda Deep Space Tracking Station) 点が該当することがわかりました。GIPSYを用いて、時計の誤差を解析し、他のセシウム原子時計と同期した観測点の時刻と比較しても、極めて安定していることが確認できたので、USUDの時刻を用いて、衛星の時刻を補正するシステム構築を試みました。この研究では、GIPSYの衛星軌道解析機能を用いました。この実験にも、JPLのBar-Sever氏が、解析の設定確認などに協力してくれました。

初めて自分で解析した衛星時計誤差を用い、軌道はIGU暦の予測パートを用いて、PPP解析を行い、PWVを解析すると、解析時間が進むにつれて、パイアスが增大していく問題に気づきました。原因はUSUDの時刻がドリフトによって1日あたり 7×10^{-7} s (距離換算で20 m程度) GPS時刻からずれていくことにありました。基準となる時刻の誤差の増加が、ZTDの解析値にオフセットを与えていたのです。ドリフトは、数日程度であれば線形外挿で十分予測で

第2表 2008年7月当時のIGS軌道暦の公称精度と利用できるまでの時間 (Shoji (2009) のTable 1を和訳)。

種類	精度 (公称値)		観測から結果が利用できるまでの時間	更新頻度	
	軌道	時刻 (括弧内は距離換算)			
超速報暦 (IGU)	後半 (予測)	~10 cm	~5 ns (~150 cm)	リアルタイム	6時間
	前半 (解析)	< 5 cm	~0.2 ns (~6 cm)	3時間	
速報暦 (IGR)	< 5 cm	0.1 ns (3 cm)	17時間	1回/日	
精密暦 (IGF)	< 5 cm	< 0.1 ns (< 3 cm)	~13日	1回/週	



第6図 高層ゾンデによるPWV(横軸)とその近傍のGPS観測点で、準リアルタイム解析されたPWVとの比較。2007年1月(灰色)と7月(黒)。(Shoji (2009)のFig. 14)

きるものでした。1日先まで外挿で予測したUSUDの時計の誤差を真値とみなして、衛星時計を補正することで、バイアスの無いPWV解析が、観測後30分程度で可能となりました。

高層ゾンデ観測との比較(第6図)では、冬(2007年1月)にRMS 1.64 mm, バイアス0.29 mm, 夏(2007年7月)でRMS 3.36 mm, バイアス0.22 mmと、Ohtani and Naito (2000)が、精密暦を用いて比較した結果と比べても、RMSで同等、バイアスは顕著に改善するという結果を得ることができました(Shoji 2009)。

私が作った準リアルタイム解析のための拙いシェルスクリプトは、気象庁観測課(当時)の吉本浩一氏によって、現業利用可能なものに改良され、気象庁で試験されることになりました。解析されたGPS PWVを数値予報課の石川宜広氏が現業のメソ解析システムで同化する開発を行い、同化・予測実験により効果を確認した結果、2009年10月より、メソ解析への現業利用が開始されました(石川 2010)。

4. メソ数値予報へのデータ同化実験

日本で最初のGPS PWV データ同化実験の概要が、萬納寺(1998)で報告されています。そこでは、モデルの第一推定値から計算したPWVと、GPS PWV

との差を第一推定値の各高度の水蒸気量に応じて配分し、最適内挿法を用いて数値モデル初期値の解析を行っています。気象庁では2002年3月、メソ数値予報解析としては世界初となる4次元変分法を導入しました(石川・小泉 2002)。最適内挿法では、数値予報モデルの予報変数に無い観測量は、予報変数に変換して同化する必要があります。変分法では、予報変数と観測量の関係を記述する観測演算子によって、PWV等、予報変数になっていない観測要素を直接同化することが可能です。研究分野でも変分法データ同化が可能となり、GPS PWVの同化実験が、特に首都圏で発生した豪雨の事例について、盛んに行われました。さらにGPSに加え、ドップラーレーダーやライダーで観測された風の場と同時に同化することで、効果が大きくなることも確認されてきました(例えば、Kawabata *et al.* 2007, 2011, 2014; Koizumi and Sato 2004; Nakamura *et al.* 2004; Seko *et al.* 2004 b, 2007)。さらにSPDを同化する実験として、Kawabata *et al.* (2013)は、2009年8月19日、沖縄県那覇市で発生した局地豪雨(ガープ川の急激な増水で工事作業員4名が死亡)事例について実験を行い、同化しなかった場合には再現されなかった強い降水の表現に成功しています。Seko *et al.* (2010)は、2004年7月26日に発生した北陸地方の大雨事例について、SPDから視線方向の水蒸気量(SWV: Slant Water Vapor)を抽出し、GPS掩蔽観測の屈折率プロファイルから推定した視線方向の屈折率分布とともに同化する実験を行い、地上と掩蔽観測両方の観測を利用することで、観測に最も近い降水分布を再現できたことを報告しています。

上記のデータ同化実験で用いられたGPS PWVやSPDは、観測後2週間後に利用可能となる精密暦を用いた事後解析によるものです。私は3.3節で述べた、準リアルタイム解析によるGPS PWVの、日本国内の数値予報への効果を評価する目的で、同化実験を行いました。

4.1 2008年7月28日、都賀川豪雨の同化実験

2008年7月28, 29日、上空に寒気を伴った気圧の谷の通過と高気圧の縁を回る下層の暖湿気の影響で、中国・近畿・北陸・東北地方等で大雨となりました。神戸市の都賀川では14時40分過ぎ、急激な増水により、河川敷の親水公園にいた小学生、保育園児を含む5名の方が犠牲となりました。

当時の気象庁現業メソ数値予報モデル(MSM)

は、大雨をうまく予測できず、数値予報課や気象研究所で、原因の検討や、再現実験などが行われました。

この事例については、7月27日03時から始めて、3時間窓の同化を10回つなげ、7月28日09時の初期値を作成しました。その際、以下2通りの同化実験を行いました。同化には同僚の川畑拓矢氏や國井 勝氏によって気象研究所に移植された、当時の現業用メソ4次元変分法データ同化システム（以下メソ4D-Var）を用い、GPS PWV 以外の同化データは、当時の現業解析に利用されていたものに準じました。GPS PWV の同化法については、小泉 耕氏（気象庁数値予報課）に質問して、答えを参考にしながら進めました。予測は水平解像度10 km の JMA-NHM (Saito *et al.* 2007) を用いました。2002年3月に出版された数値予報課報告・別冊第48号「変分法データ同化システムの現業化」に掲載された解説（露木 2002；竹内 2002；石川・小泉 2002）を足がかりに、データ同化の輪読会に参加して勉強し、以下の2種類の実験を行いました。

(1) 現業で同化されている観測データに加え、

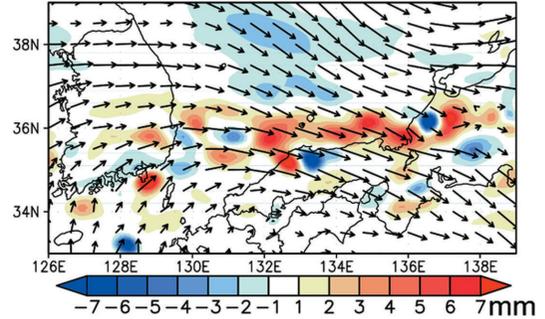
GEONET の PWV を同化（“GEONET” 実験）。

(2) GEONET の PWV に、さらに韓国や中国などメソ4D-Var の範囲内で国外の IGS 観測点の PWV を加えて同化（“GEONET+IGS” 実験）。

その結果、“GEONET” 実験で雨量の予測は改善し、“GEONET+IGS” 実験で、さらに実況に近い雨を予測できました (Shoji *et al.* 2009)。このとき、“GEONET” 実験と “GEONET+IGS” 実験で解析された PWV 分布の差を調べると、韓国の IGS 点を基点に、PWV の増加域が東に延びて850 hPa 付近の風の場に沿って分布し、その東端が若狭湾から北陸に達していました (第7図)。全体として前線帯の PWV は増加し、位置も “GEONET+IGS” の方が南に移動し、より日本列島に近づいて解析されていました。前線の位置の違いは風の収束の場の位置にも同様の変化をもたらしていました。この結果は、豪雨予測に風上側の水蒸気分布の把握が重要であることを示唆します。

4.2 2008年サイクロン NARGIS の同化実験

3.3節で提案した準リアルタイム解析手法が、日本国外でも有効であるか、確認するため、ミャンマーに大災害をもたらした2008年のサイクロン NARGIS についても同化実験に取り組みました。余田成男先生（京都大学）が代表の科振費「東南アジア地域の気象

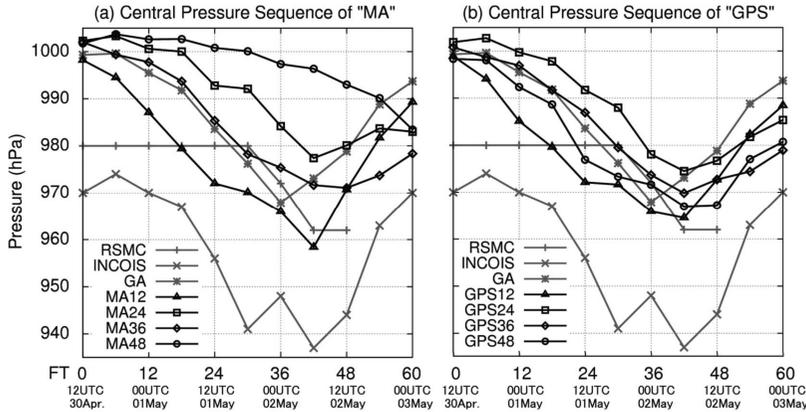


第7図 “GEONET” 実験で解析された PWV の2次元分布に対する “GEONET+IGS” 実験で解析された PWV の差。矢印は850 hPa の水平風。(Shoji *et al.* (2009) の Fig. 6(c))

災害軽減国際共同研究（2007-2009年度）に参加していたことと、当時の上司である斉藤和雄予報研究部第2研究室長（当時）に、気象集誌で計画されていた NARGIS 特集号への投稿を奨励されたことがきっかけでした。

IGS は全世界に400点規模の地上 GNSS 観測網を展開しており、観測データは IGS の FTP サーバーから誰でも取得できます。ただし、ベンガル湾周辺で利用可能なものは10点にも満たないわずかなものでした。カリフォルニア大学サンディエゴ校にある Scripps 軌道・恒久アレイセンター (SOPAC: Scripps Orbit and Permanent Array Center) では、IGS 点を含む世界中の GNSS 観測データアーカイブを整備しています。同センターが提供する地図上で観測点を検索するツールを用い、スマトラ島とその周辺の島々、さらにベンガル湾内部のアンダマン諸島に、観測ネットワークがあり、2008年4月のデータがアーカイブされていることが分かりました。そこで、國井 勝氏が東南アジア域用に拡張したメソ4D-Var を用い、IGS、スマトラ島及び周辺の島々、アンダマン諸島にある合計21GPS 点の PWV 解析結果を同化する実験を行いました。

Indian National Centre for Ocean Information Services (INCOIS) の解析によると、NARGIS の中心気圧は4月30日18UTC から5月1日の18UTC にかけての24時間に30 hPa 以上も低下しています。そこで、強化の開始前の4月30日12UTC をターゲットの初期時刻として、データ同化する期間を12, 24, 36, 48時間と変え、それぞれ GPS PWV を同化する、



第8図 JMA-NHMを用いた予測におけるサイクロン中心気圧の比較。(左) GPS PWV 同化無し (MA12, MA24, MA36, MA48), (右) GPS PWV を同化 (GPS12, GPS24, GPS36, GPS48). 各実験名の後ろの2桁数字は同化時間を表す. GAは全球モデルを初期値としたJMA-NHM予測. RSMCはRSMC New Delhiのベストトラック. INCOISはIndian Centre for Ocean Information Servicesの解析. (Shoji *et al.* (2011) の Fig. 5)

あるいはしない実験を行いました。得られた8個の初期値から、水平解像度10 kmのNHMを用い、60時間先までの予測を行いました。GPS PWVを同化しない実験では、同化時間が最も短い12時間の同化実験が最も強いサイクロン中心気圧の低下(42時間で約40 hPa)を予測しましたが、同化時間を24, 36, 48と長くとると、逆に発達が弱まる結果となりました。一方GPS PWVを同化すると、この同化時間の長さに依存して中心気圧低下が小さくなってしまふ欠点が顕著に改善され、安定した予測結果が得られるようになりました(第8図)。

この違いが何に起因するのか、考察したところ、アングマン諸島のGPS PWVを同化することで、同諸島の降水が強化し、気圧場、風場が変わることで相対的に、ベンガル湾中西部にサイクロンの発達しやすい環境場が形成されていました(Shoji *et al.* 2011)。

ベンガル湾のように観測データの希薄な領域では、今回の実験のように決して多くは無い観測データが、予測の安定につながる場合があることがわかりました。

5. ローカルスケールの水蒸気分布解析

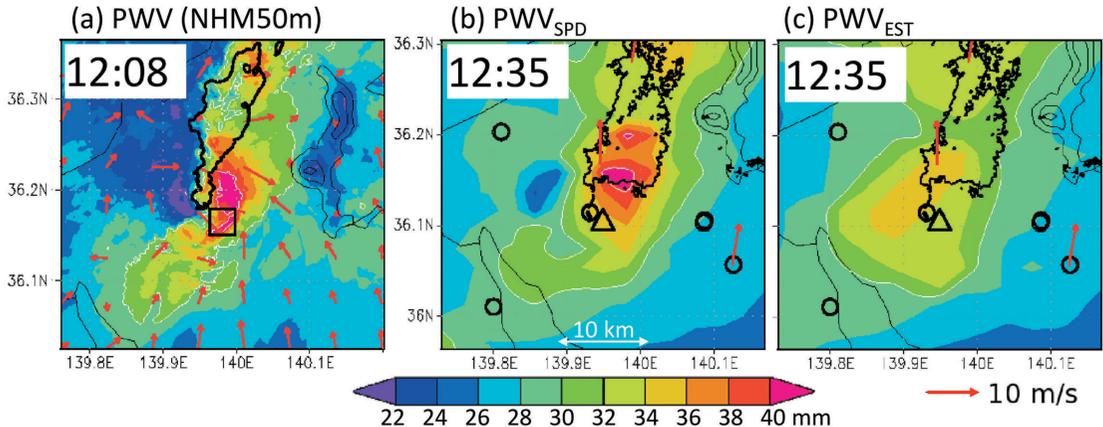
平均20 km間隔でPWVが得られる優位性を活かし、GEONETから得られるPWVの変動を、降水の実況監視や短時間予測に利用する研究も、科振費

「GPS気象学」の重要課題の一つでした。

神田ほか(2000)は、1997年8月23日の首都圏で発生した局地的な大雨の事例について、降水量とGPS PWVの時間変動の比較を行い、GPS PWVの時間変化の位相が、降水量の位相に対して1~2時間先行していることや、GPS PWVが増加すると1~3時間後に降水量が増大する確率が増すこと、降水量の最盛期にPWVは減少を開始することなどの知見を報告しました。新村ほか(2000)は、首都圏でGPS PWVと降水量の統

計的關係を地上気温で層別化して調べ、PWVが地上気温で決まるしきい値より大きい場合、降水が生じる頻度が高いこと、特に領域内の多くの観測点で3時間以上連続して降水がある場合にはこれらの関係が明瞭に見られることを見出しました。一方、降水が局所的な場合は上記の関係があまり明瞭でないことも示されました。さらに、Inoue and Inoue(2007)は、2001~2005年について、5分間隔で解析されたGPS PWVを用い、本州中部における雷雨とGPS PWV変動の関連を調査し、対地雷の際、その40%の割合でGPS PWVは15~30分前に極大値となっていたことや、対地雷の30分前には、GPS PWVの値、およびその増分が大きな値を示していたことを示しました。また、吉本ほか(2006)は、GEONETで解析されたPWV分布と、AMeDASで観測された地上風を用いて数時間先までのPWVの変化を予測する方法を提案しています。

上記の先行研究は、GPS PWVの時・空間変動を元にしていました。私は一つの観測点から得られる、SPDの分布から、対流現象の発達に伴う水蒸気変動のシグナルが得られないかと考えました。青梨和正氏が2000年から2001年にかけて行ったWVR観測データから、水蒸気の非一様性を解析し、夏の昼間に非一様性が大きくなる(青梨2002)との結果を得たことにヒントを受けました。1999年7月21日に東京都練馬



第9図 (a) NHM50 m で表現された12時08分のPWV分布。四角の領域内で竜巻に対応する強い渦(約1/s)が再現された。黒実線は雨量強度40 mm/hの等値線。(b) GEONETをGIPSY OASIS II Ver. 6.1を用いてGEONETの解析を行い、得られたSPDに新手法を適用して解析したPWV分布。(c) 同じくGIPSY OASIS II Ver 6.1を用いて従来手法により得られたGEONET各点のZTDに基づき、解析したPWV分布。(b)と(c)図内の△は気象研究所Cバンドドップラーレーダーの観測から解析された竜巻の発生位置。円はGNSS観測点。黒実線はエコー強度40 dBZ。(Shoji *et al.* (2014)のFig. 7から一部を抜粋)

区で発生した局地豪雨(練馬のAMeDASで111.5 mmの1時間降水量を記録)事例について、GEONETを用いて非一様性の時・空間分布を解析したところ、雨の強まる40分ほど前から、豪雨の発生領域で非一様性が顕著に強まっていたことが解析されました(Shoji *et al.* 2002)。2011年の8月1ヶ月間について、GEONETから得られた水蒸気勾配や非一様性の日変化や降水量との関係を、統計的に調べた結果、山間部で午前から午後にかけて増大し、夕方に最大値となる傾向にあることや、GPS PWVの増加と10 mm/h以上の降水頻度には見られなかった対応関係が、非一様性や勾配には見られることなどがわかりました(Shoji 2013)。

これまで述べてきた“GPS水蒸気の非一様性”は、あるGPS観測点で同時に観測された複数のGPS衛星方向のSPDの非一様成分(3.3節)の標準偏差であらわしています。日本で同時に観測されるGPS衛星は時間にもよりますが6~12機程度で、観測点上空を代表する水蒸気の非一様性を表現するには決して十分ではありません。

GPSから解析される水蒸気非一様性の増加は定性的には降水の強化と関連していることはわかりました。より定量的な積乱雲の発達監視への貢献ができないかと考えたのが、SPDを用いた観測点周囲のPWV分布の推定です。この方法は、水蒸気の水平勾

配が、高度とともに指数関数的に減少するとの仮定を置くことで、SPD方向のPWV勾配を推定し、観測点周囲のPWV分布を推定するものです(Shoji *et al.* 2014)。この研究の契機となったのは、2012年5月6日、つくば市に大きな被害をもたらした竜巻です。ひと月前の4月に予報研究部から気象衛星・観測システム研究部に異動した私は、当時同研究部の山内洋氏から竜巻発生の電話連絡を受けました。当日16時頃、山内氏、益子 渉氏、佐藤英一氏とともにつくば市北条地区で被害調査を行い、被害のすさまじさに衝撃を受けました。

災害をもたらすような積乱雲の監視に、GNSSは貢献できないのかと考え、たどり着いたのがこのSPDを用いた観測点周囲のPWV分布の推定です。この手法を適用したところ、高解像度NHMシミュレーション(Mashiko 2012)で再現された親雲周辺のPWV分布を、ある程度表現できることを確認しました(第9図)。NHMシミュレーションによると、このPWVの強い水平勾配は、親雲周辺の上昇流と下降流に対応しています。この結果は、GNSS観測点周囲のPWV分布を、SPDを用いて推定することで、対流活動に関連する数kmスケールの上昇流、下降流の分布や強化の様子が監視できることを示唆しています。

上記のNHMシミュレーションからGPS SPDを

再現し、SPD から推定した PWV を、GPS PWV とともに真値 (NHM シミュレーションの PWV) と比較したところ、SPD から PWV を推定したほうが、GPS PWV よりも精度が良く、観測点から 5 km 以内の範囲では、RMS 差 2 mm 以内の精度で PWV を推定できていることがわかりました (Shoji *et al.* 2015)。関連する研究として、Sato *et al.* (2013) は、宇治市に展開した高密度の GNSS 観測網で SPD を解析し、高層ゾンデの飛揚経路に最も近い SPD から推定した PWV がゾンデ観測との一致度が最も高いとの結果を報告しています。

GPS PWV (GPS 解析で推定される ZTD に気圧と気温の関数を適用し、PWV に変換したものは、観測点上空逆円錐空間の代表的な性格を有し、観測点直上の積分値ではありません。積乱雲周囲など、水蒸気の非一様性が卓越している場合、SPD を用いることで、より現実的な PWV の分布を推定できると考えます。

6. 地上観測網を用いた GNSS 気象学の今後

国土地理院が GPS 観測網の全国展開を開始した 1994 年から 20 年が経過しました。この間の、特に 2010 年以後、衛星測位をとりまく技術革新には目を見張るものがあります。

2010 年 9 月、QZSS 初号機「みちびき」の打ち上げにより、日本も測位衛星を保有する時代となりました。2011 年 10 月に発売された米国 Apple 社のスマートフォン iPhone 4s では、米国の GPS に加え、ロシアの GLONASS も位置情報機能に利用されるようになり、私たちの生活にも、米国の GPS だけではなく、複数の GNSS が利用される時代となりました。国土地理院は 2013 年 5 月、全国の GEONET 点で GPS に加え、GLONASS と QZSS の観測データ提供を開始しました。中国でも北斗 (BeiDou) と呼ばれる衛星測位システムが 2012 年 12 月にアジア太平洋地域で運用を開始し、2020 年までに世界をカバーする測位システムを目指していますし、欧州の Galileo やインドの IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) 等の開発も進められています。1994 年に米国が GPS の運用を開始した時は 24 基体制でした。2015 年 6 月現在では世界で 70 を超える測位衛星が周回 (GPS 31, GLONASS 24, BeiDou 16, Galileo 4, QZSS 1, IRNSS 1) し、各国の計画が実現すれば、2020 年には 100 基を超えていると予想されます。

こうした、測位衛星の増加によって、測位精度の向上はもちろんですが、気象学にとっては視線情報の増加により、これまでより詳細で高精度のリモートセンシングの可能性を拓くものと期待されます。

通信技術の革新により、リアルタイム解析の技術、精度も急速に進展しています。GNSS 解析には、衛星の軌道と時計の高精度情報が必要で、世界中に配置された地上 GNSS 観測網による観測データの解析によって行われています。現在では GNSS 観測データをストリーミング技術によって常時収集し、解析することが可能です。2013 年 4 月、IGS はストリーミングプロトコルによる衛星軌道・時計情報の配信を正式に開始しました。JAXA も、独自に開発を進める複数 GNSS 対応高精度軌道・時計推定ツール MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration Orbit and Clock Analysis) による GPS, GLONASS, QZSS の暦情報のインターネット配信を 2014 年 9 月に開始しました。

軌道情報のリアルタイム解析・収集技術の進展に伴い、GNSS 測位解析ツールのリアルタイム化も進んでいます。リアルタイム解析が可能な商用ソフトウェア RTNet (Iwabuchi *et al.* 2006) を使い、田中ほか (2010) は GEONET のリアルタイム解析を行い、数値モデル WRF (Skamarock *et al.* 2005) に 3 次元変分法を用いて同化する実験を報告しました。また、ここ数年、オープンソースの GNSS 解析ツール、RTKLIB (高須ほか 2007) を用いたリモートセンシング研究も進展しています。QZSS は 2018 年には 4 機体制となり、日本から常時観測できることとなります。搬送波に加え、衛星軌道等の補正情報が配信される計画で、インターネットの回線に依存せず、衛星からの配信データのみで、測位や大気解析が可能となることを期待したいと思います。

位置計測精度の向上、リアルタイム化は、例えば Fujita *et al.* (2008) が精密暦を用いて成功した、船舶に搭載した受信機による海上の水蒸気解析の、実用化への可能性を大きくするものと期待されます。津波研究の分野では、海上に浮遊するブイに設置した GNSS 受信機から海面の変動をリアルタイムで解析し、津波の検知を行う研究が行われ (Kato *et al.* 2011)、ブイ搭載の GNSS 受信機網を海洋上に配置する提案なども行われています (加藤 2013) が、気象学にとってもとても興味深い構想です。

SPD の応用は、GNSS 観測網の稠密観測が、数

km スケールの水蒸気変動の監視に適用できることを示しました。現実には受信機の価格によって、観測規模が大きく影響を受けます。電離層モデルの高度化が進むことによって、低廉な1周波受信機による大気のリモートセンシングが可能となり、より稠密観測の実現が近づくものと思います。ドイツの地球科学研究センター (GFZ: GeoForschungsZentrum Potsdam) で開発されている電離層モデル SEID (Deng 2012) 等、電離層研究も、今後より一層進展するでしょう。

GNSS 衛星から発射された電波は、受信機に到達するまでに様々な影響を受けます。研究者は、自分の課題に不要な“ノイズ”を除去するために努力が必要ですが、「その努力は他の研究者にとって研究の資源を提供する」おもしろい研究分野だと、最近になって思えるようになってきました。固体地球、大気、海洋を対象とする総合的な地球センサーとして、今後も GNSS の役割は増していくと想像しますし、その一端に自分が参加できたことは幸運でした。

謝 辞

日本における GPS/GNSS 気象学は、内藤勲夫先生、中村 一気象研究所所報研究部室長 (当時)、津田敏隆先生のリーダーシップによる科振費「GPS 気象学」が発展の契機でした。

内藤先生には、何度か国立天文台水沢観測センターに呼んでいただき、若手の測地研究者の方々と議論する機会を与えていただきました。私の仕事は、測地学の最新成果を気象学研究に応用することでした。衛星測地学初心者の方にとって、測地研究者の皆様から教えていただいた情報と人間関係は、今でもかけがえの無いものです。あの頃の若手の皆さんも、今や中堅としてそれぞれの場所で活躍されています。

中村 一元室長とは、科振費「GPS 気象学」の間、つくばでの特別観測、筑波山・富士山でのダウンワードルッキング掩蔽観測、富士山レドームの GPS 観測への影響評価実験、静岡大学へのゾンデ観測地の下見、国際ワークショップの準備、米国の JPL や米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) への出張、論文作成等、いろんなことをご一緒させていただきました。実験に必要な装置を手作りするため、中村さんの車でホームセンターに買出しに行ったことなど、なぜか思い出されます。あまりに身近で行動していたため、2002年に気象庁数値予報課長に異動された時、そしてその1年半

後に突然訪れた永久の別れには、導きを失い途方にくれました。初めて第5図の結果を報告した際、「これは重要な結果だ。」というようなことを言われた時のことは、忘れられません。

科振費「GPS 気象学」終了後、津田先生は常にご自身の GNSS 課題に気象研究所の私たち GNSS 研究者を誘って下さいました。東南アジアの国々で開催される国際会議に参加する機会を何度も頂き、ともすれば視野の狭くなりがちな私にも、熱帯域・東南アジア域、またよりグローバルな水蒸気変動に興味を持つきっかけとなりました。私の学位論文も先生にご指導いただきました。東日本大震災の際は、気象研究所の計算機や観測機器の状況を心配され、京都大学宇治キャンパスの研究資源利用を申し出ていただく等、長年にわたってのご指導、ご支援には、本当に有り難く感謝しております。

気象研究所の斉藤和雄部長には、8年間直属の上司としてご指導いただきました。斉藤さんが室長として来られた2004年、私は GEONET の準リアルタイム解析に取り組み始めていた頃で、2009年まで筆頭著者として論文が出せませんでした。その間、一貫して励まし、待ち続けていただいたことで、今があります。

気象研究所の瀬古 弘氏は、気象大学の同期でもあり、科振費「GPS 気象学」開始時からの同志です。氏の気象研究に注ぐ情熱は常に目標でしたし、観測とモデルを組み合わせた先進的な研究の数々は、私の研究の方向性を具体化してくれ、刺激を与えてくれます。

これまでの研究を振り返りますと、改めて皆様方のご協力、ご支援に導かれてここに至っていることを実感します。お一人お一人、お名前を紹介することはできませんが、ご指導とサポートをいただきました気象研究所や他機関の研究者の皆様、事務部門の皆様、国土地理院、気象庁の皆様にご心から感謝申し上げます。

2名の査読者の方々には、本原稿を丁寧に確認いただきました。

私を生み育ててくれた両親、仕事に向かう力をくれる家族、どうもありがとうごさいます。

参 考 文 献

- 青梨和正, 2002: 2.1.1水蒸気の水平非一様性による大気遅延量推定誤差の評価。科学技術振興調整費 GPS 気象学: GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究 (第II期 平成12年度

- ～13年度) 成果報告書, 331pp.
- Aonashi, K., Y. Shoji, R. Ichikawa and H. Hanado, 2000: Estimation of PWC gradients over the Kanto Plain using GPS data: Validation and possible meteorological implications. *Earth Planets Space*, **52**, 907-912.
- Aonashi, K., T. Iwabuchi, Y. Shoji, R. Ohtani and R. Ichikawa, 2004: Statistical study on precipitable water content variations observed with ground-based microwave radiometers. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 269-275.
- Bar-Sever, Y. E., P. M. Kroger and J. A. Borjesson, 1998: Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *J. Geophys. Res.*, **103**, 5019-5035.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787-15801.
- Deng, Z., 2012: GPS meteorology with single frequency receivers. Ph.D. Thesis, (Scientific Technical Report; 12/09), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, IV, 110pp.
- Duan, J., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. van Hove, R. Ware, S. McClusky, T. A. Herring and R. W. King, 1996: GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 830-838.
- Flores, A., A. Escudero, M. J. Sedó and A. Rius, 2000: A near real time system for tropospheric monitoring using IGS hourly data. *Earth Planets Space*, **52**, 681-684.
- Fujita, M., F. Kimura, K. Yoneyama and M. Yoshizaki, 2008: Verification of precipitable water vapor estimated from shipborne GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L13803, doi:10.1029/2008GL033764.
- 畑中雄樹, 辻 宏道, 市川隆一, 木股文昭, 萬納寺信崇, 野村 厚, 青梨和正, 柴田 彰, 内藤勲夫, 1996: 第1回GPS気象学ワークショップ報告. *天気*, **43**, 181-186.
- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita and M. Kusaka, 2001a: Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET—Part 1: Measurement of phase characteristics. *Earth Planets Space*, **53**, 13-21.
- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, M. Kusaka, J. M. Johnson and C. Rocken, 2001b: Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET—Part 2: Evaluation of the phase map by GEONET data. *Earth Planets Space*, **53**, 23-30.
- Hurst, K. J. and Y. E. Bar-Sever, 1998: In-situ GPS antenna phase center calibration. Proceedings of the Workshop 'GPS/MET JAPAN Has Come!', 54-63.
- Ichikawa, R., H. Ohkubo, Y. Koyama and T. Kondo, 2001: An evaluation of atmospheric gradient using water vapor radiometers in Kashima, Japan. *J. Commun. Res. Lab.*, **48**, 97-103.
- Inoue, H. Y. and T. Inoue, 2007: Characteristics of the water-vapor field over the Kanto district associated with summer thunderstorm activities. *SOLA*, **3**, 101-104.
- 石川宜広, 2010: 地上GPSデータのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊, (56), 54-60.
- 石川宜広, 小泉 耕, 2002: 第3章 メソ4次元変分法. 数値予報課報告・別冊, (48), 37-59.
- Iwabuchi, T., C. Rocken, Z. Lukes, L. Mervart, J. Johnson and M. Kanzaki, 2006: PPP and network true real-time 30 sec estimation of ZTD in dense and giant regional GPS network and the application of ZTD for nowcasting of heavy rainfall. Proceedings of the ION-GNSS, Institute of Navigation, Fort Worth, Texas, Sept. 26-29 2006, 1902-1909.
- 神田 学, 石田知礼, 鹿島正彦, 大石 哲, 2000: 首都圏における局地的対流性豪雨とGPS可降水量の時空間変動—1997年8月23日の集中豪雨の事例解析—. *天気*, **47**, 7-15.
- 加藤照之, 2013: GPS: 次の“夢”に向けて～「GPS大学連合」の視点から～. *測地学会誌*, **59**, 87-97.
- Kato, T., Y. Terada, H. Nishimura, T. Nagai and S. Koshimura, 2011: Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan. *Earth Planets Space*, **63**, e5-e8.
- Kawabata, T., H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Y. Honda and Y. Wakazuki, 2007: An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloud-resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 255-276.
- Kawabata, T., T. Kuroda, H. Seko and K. Saito, 2011: A cloud-resolving 4D-Var assimilation experiment for a local heavy rainfall event in the Tokyo metropolitan area. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1911-1931.
- Kawabata, T., Y. Shoji, H. Seko and K. Saito, 2013: A numerical study on a mesoscale convective system over a subtropical island with 4D-Var assimilation of GPS slant total delays. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 705-

- 721.
- Kawabata, T., H. Iwai, H. Seko, Y. Shoji, K. Saito, S. Ishii and K. Mizutani, 2014: Cloud-resolving 4D-Var assimilation of Doppler wind lidar on a meso-gamma-scale convective system. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 4484-4498.
- King, R. W. and Y. Bock, 2002: Documentation for the GAMIT GPS analysis software. Mass. Inst. of Technol.
- Koizumi, K. and Y. Sato, 2004: Impact of GPS and TMI precipitable water data on mesoscale numerical weather prediction model forecasts. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 453-457.
- 萬納寺信崇, 1998: GPS 大気遅延量を利用した数値予報. 数値予報課報告・別冊, (44), 14-24.
- Mashiko, W., 2012: Numerical simulations of supercell tornadogenesis: The structure and evolution of vortex lines within low-level mesocyclones and tornadoes. Proc. 26th Conference on Severe Local Storms, Nashville, TN, U.S.A., 2.2.
- Nakamura, H., K. Koizumi and N. Mannoji, 2004: Data assimilation of GPS precipitable water vapor into the JMA mesoscale numerical weather prediction model and its impact on rainfall forecasts. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 441-452.
- 中島悠貴, 日置幸介, 2013: マルチパスを用いた GPS 潮位計. 測地学会誌, **59**, 157-162.
- 新村典子, 佐々木太一, 木村富士男, 2000: 首都圏における GPS 可降水量と降水の統計的關係. *天気*, **47**, 635-642.
- Noguchi, W., T. Yoshihara, T. Tsuda and K. Hirahara, 2004: Time-height distribution of water vapor derived by moving cell tomography during Tsukuba GPS campaigns. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 561-568.
- 大谷 竜, 内藤勲夫, 1998: GPS 可降水量の物理と評価. 気象研究ノート, (192), 15-33.
- Ohtani, R. and I. Naito, 2000: Comparisons of GPS-derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 26917-26929.
- 大谷 竜, 辻 宏道, 萬納寺信崇, 瀬川爾朗, 内藤勲夫, 1997: 国土地理院 GPS 観測網から推定された可降水量. *天気*, **44**, 317-325.
- 大和田浩美, 2015: GNSS 掩蔽観測. 数値予報課報告・別冊, (61), 78-81.
- 小澤英司, 佐藤芳昭, 2007: GPS. 数値予報課報告・別冊, (53), 133-139.
- Ozeki, M. and K. Heki, 2012: GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases. *J. Geod.*, **86**, 209-219.
- Rocken, C., T. Van Hove, J. Johnson, F. Solheim, R. Ware, M. Bevis, S. Chiswell and S. Businger, 1995: GPS/STORM—GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 468-478.
- Rothacher, M. and L. Mervart, 1996: The Bernese GPS Software Version 4.0 User Manual Report. Astron. Inst., Univ. of Bern, Bern, Switzerland.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.
- Sato, K., E. Realini, T. Tsuda, M. Oigawa, Y. Iwaki, Y. Shoji and H. Seko, 2013: A high-resolution, precipitable water vapor monitoring system using a dense network of GNSS receivers. *J. Disaster Res.*, **8**, 37-47.
- Sato, T. and H. Hanada, 1984: A Program for the Computation of Oceanic Tidal Loading Effects 'GOTIC'. *Publ. Int. Latit. Obs. Mizusawa*, **18**, 29-47.
- Schwiderski, E. W., 1981: NSWC Global Ocean Tide Data (GOTD) Tape. U. S. Naval Surface Warfare Center, Dahlgren, Virginia.
- Seko, H., S. Shimada, H. Nakamura and T. Kato, 2000: Three-dimensional distribution of water vapor estimated from tropospheric delay of GPS data in a mesoscale precipitation system of the Baiu front. *Earth Planets Space*, **52**, 927-933.
- Seko, H., H. Nakamura, Y. Shoji and T. Iwabuchi, 2004a: The meso- γ scale water vapor distribution associated with a thunderstorm calculated from a dense network of GPS receivers. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 569-586.
- Seko, H., T. Kawabata, T. Tsuyuki, H. Nakamura, K. Koizumi and T. Iwabuchi, 2004b: Impacts of GPS-derived water vapor and radial wind measured by Doppler radar on numerical prediction of precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 473-489.
- Seko, H., Y. Shoji and F. Fujibe, 2007: Evolution and airflow structure of a Kanto thunderstorm on 21 July 1999 (the Nerima heavy rainfall event). *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 455-477.
- Seko, H., M. Kumii, Y. Shoji and K. Saito, 2010: Improvement of rainfall forecast by assimilations of ground-based GPS data and radio occultation data. *SOLA*, **6**, 81-84.
- Shoji, Y., 2009: A study of near real-time water vapor analysis using a nationwide dense GPS network of Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 1-18.

- Shoji, Y., 2013: Retrieval of water vapor inhomogeneity using the Japanese nationwide GPS array and its potential for prediction of convective precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 43-62.
- 小司禎教, 青梨和正, 中村 一, 瀬古 弘, 一木明紀, GPS 気象学1997年夏つくば特別観測グループ, 1999: 1997年夏つくば特別観測におけるGPS可降水量の解析. *月刊地球/号外*, (25), 35-40.
- Shoji, Y., H. Nakamura, K. Aonashi, A. Ichiki, H. Seko and Members of GPS/MET Japan Summer Campaign 1997 in Tsukuba, 2000: Semi-diurnal and diurnal variation of errors in GPS precipitable water vapor at Tsukuba, Japan caused by site displacement due to ocean tidal loading. *Earth Planets Space*, **52**, 685-690.
- Shoji, Y., H. Seko, T. Iwabuchi and H. Nakamura, 2002: A case study of water vapor variation in a severe thunderstorm in Tokyo by using dense network of GPS. *Proceedings of International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia*, Tokyo.
- Shoji, Y., H. Nakamura, T. Iwabuchi, K. Aonashi, H. Seko, K. Mishima, A. Itagaki, R. Ichikawa and R. Ohtani, 2004: Tsukuba GPS dense net campaign observation: Improvement in GPS analysis of slant path delay by stacking one-way postfit phase residuals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 301-314.
- 小司禎教, 岩淵哲也, 畑中雄樹, 瀬古 弘, 市川隆一, 大谷 竜, 萬納寺信崇, 2009: GPS 気象学: GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究. *測地学会誌*, **55**, 17-38.
- Shoji, Y., M. Kunii and K. Saito, 2009: Assimilation of nationwide and global GPS PWV data for a heavy rain event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan. *SOLA*, **5**, 45-48.
- Shoji, Y., M. Kunii and K. Saito, 2011: Mesoscale data assimilation of Myanmar cyclone Nargis Part II: Assimilation of GPS-derived precipitable water vapor. *J. Meteor. Soc. Japan*, **89**, 67-88.
- Shoji, Y., H. Yamauchi, W. Mashiko and E. Sato, 2014: Estimation of local-scale precipitable water vapor distribution around each GNSS station using slant path delay. *SOLA*, **10**, 29-33.
- Shoji, Y., W. Mashiko, H. Yamauchi and E. Sato, 2015: Estimation of local-scale precipitable water vapor distribution around each GNSS station using slant path delay: Evaluation of a severe tornado case using high-resolution NHM. *SOLA*, **11**, 31-35.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR.
- 高須知二, 久保信明, 安田明生, 2007: RTK-GPS用プログラムライブラリRTKLIBの開発・評価および応用. GPS/GNSS シンポジウム2007予稿集, http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/gpssymp_2007_rtklib.pdf (2015.6.21閲覧).
- 竹内義明, 2002: 全球3次元変分法. 数値予報課報告・別冊, (48), 17-36.
- 田中 創, 守屋 岳, 岩淵哲也, 日下博幸, 2010: WRF-3DVARを用いたリアルタイムGPS可降水量の同化実験. *天気*, **57**, 213-228.
- 津田敏隆, 1998: GPSを用いた成層圏温度プロファイルの観測. *気象研究ノート*, (192), 159-178.
- 津田敏隆, 2006: GPSデータを活用した大気重力波の研究. *天気*, **53**, 19-29.
- Tsuda, T. and K. Hocke, 2004: Application of GPS radio occultation data for studies of atmospheric waves in the middle atmosphere and ionosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 419-426.
- 辻 宏道, 1998: GPSの原理. *気象研究ノート*, (192), 1-14.
- 露木 義, 2002: 変分法によるデータ同化の基礎. 数値予報課報告・別冊, (48), 1-16.
- 吉原貴之, 津田敏隆, 平原和朗, 1999: GPSキャンペーンデータを用いた高時空間分解能による水蒸気変動の推定. *月刊地球*, (25) (号外), 96-101.
- 吉本浩一, 小司禎教, 瀬古 弘, 2006: GPS可降水量を用いた実況監視ツールの開発. 日本気象学会2006年度春季大会予稿集, P356.
- Webb, F. H. and J. F. Zumberge, 1993: An Introduction to the GIPSY/OASIS-II. JPL Publ., D-11088.
- Zumberge, J. F., M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb, 1997: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005-5017.

Water Vapor Estimation Using Ground-Based GNSS Observation
Network and its Application for Meteorology

Yoshinori SHOJI*

* *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0052, Japan.*

(Received 2 July 2015; Accepted 30 September 2015)
