

GNSS による湾上および山岳域における 水蒸気分布と豪雨に関する研究

Study on Relationship between Water Vapor Distribution Detected by GNSS and Severe Storm on Bays and Mountainous Area

大石哲⁽¹⁾・山口弘誠・小川まり子⁽²⁾・中大輔⁽³⁾・林和成⁽³⁾・中北英一

Satoru OISHI⁽¹⁾, Kosei YAMAGUCHI, Mariko OGAWA⁽²⁾, Daisuke NAKA⁽³⁾,
Kazushige HAYASHI⁽³⁾ and Eiichi NAKAKITA

(1) 神戸大学都市安全研究センター

(2) 神戸大学大学院工学研究科博士課程後期課程

(3) 神戸大学大学院工学研究科博士課程前期課程

(1) Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

(2) Ph.D. Candidate, Graduate School of Engineering, Kobe University

(3) Master Course Student, Graduate School of Engineering, Kobe University

Synopsis

The present study shows the result of detecting water vapor distribution by using GNSS on the bay and the mountain area. Basically, ZTD (Zenith Total Delay) is widely applied for meteorological purpose and it has been already applied even for operational meso-scale meteorological model. However, the GNSS receivers only on open land has been used for the meteorological purpose. Therefore, in the present study, GPS receivers have been newly launched around bay and mountain area to investigate the accuracy of ZTD. Especially on OSAKA bay, nine new GPS receivers have been deployed. From the verification of the accuracy of the data observed by these new GPS, most of these new GPS receivers acquired accurate data generally, and it was found that the accuracy of the data was enough to be used for research and practical use. Moreover, the present study proposes the way to detect water vapor contrast in local scale. The purposed way of detection has been applied for on the severe storm phenomenon happened on August 18 2012. It shows the convergence of water vapor when convective cloud appeared over OSAKA city area.

キーワード：天頂大気遅延量, GNSS, 水蒸気, 大阪湾

Keywords: zenith total delay, GNSS, water vapor, OSAKA bay

1. 研究の背景と目的

近年, 地球温暖化をはじめとする環境問題が取り沙汰され, それに伴った各地での異常気象の続発などが大きな問題となっている. 特に狭い範囲に 1 時間あたりに 100mm を越えるような強烈な雨で, 短

い時間しか降らないものを「ゲリラ豪雨」と呼び, 全国各地で「ゲリラ豪雨」による被害が続出している.

特に 2008 年 7 月 28 日に兵庫県神戸市灘区の都賀川で発生した水難事故が記憶に新しい. これは活発化した前線の影響により, 神戸市に突発的, 局所的な集中豪雨が発生し, 都賀川や河川敷にいた 16 人が急激な水位の上昇によって流され, 最終的に小学生・

園児を含む 5 人の尊い命が失われた事故であった。また私たちの住む日本は地域や季節ごとの降水・気温の変動が激しく、前線や台風による強雨などが多いことから水害の発生しやすい国土であると言える。

しかし、従来の天気予報（数値気象モデル）では「ゲリラ豪雨」等の局所的集中豪雨の発生予報は非常に困難であり、気象レーダーでも雨滴が発生した後でなければ雨を観測できないため降水の早期発見は難しい。このように気象に関する分野は未だに解明されていない部分が多い。

また、日本は世界でも有数の地震・火山国であり、これまで多くの大規模な地震災害や火山活動が発生している。そのため国土地理院は全国に GNSS 受信機を設置し、地震や火山に関連する地殻変動の監視を行っている。GNSS は上記のような本来の目的で、主に観測学や測量学等の分野を中心に用いられている。この GNSS が大気中の水蒸気量を知ることができることが分かり、GNSS から得られる水蒸気に関する研究が広まりつつある。そこで私たちは、実際に GNSS を活用した水蒸気観測から得られる情報を利用して、気象現象の解明や予測精度の向上につなげ、最終的には「ゲリラ豪雨」の予測を可能にすることを目的として、GNSS 気象学と GNSS 解析ソフトを用いて、観測データから大気の水蒸気量やその移り変わりを算出し新たな解析手法を模索している。

しかし、GNSS 配備のためのコストや日本の地理的な問題等によって、大気の水蒸気量を迅速かつ正確により細かく解析するには、まだまだ難しい段階であると言える。

そこで本研究では海洋上や山間部などの GNSS 観測が行われていない特殊な地点に新たに受信機を設置し、独自の観測を行うことで、より多様な地点で多くのデータを集め、その観測データを用いて、大気中の水蒸気分布をより詳細に算出・解析する。具体的には山岳域および大阪湾上における水蒸気遅延量変動の観測に QZSS が与える影響を調査する。また、視線方向大気遅延量を用いて局地スケールの水蒸気コントラスト算出手法を提案し、大阪湾域における観測データに適用する。

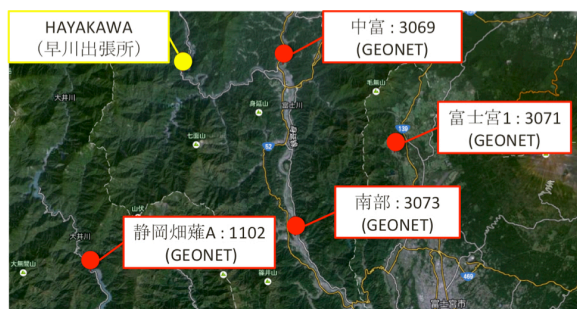


Fig. 1 GNSS receivers launched along the Fujikawa river in Yamanashi Prefecture and GEONET receivers around there.

2. GNSS 観測と解析手法の説明

2.1 観測の対象地域

(1) 山岳域

山岳谷部における精度の高い水蒸気量観測を実施すべく、山梨県富士川にある国土交通省関東地方整備局富士川砂防事務所早川出張所に GNSS 受信機を設置して 2014 年 3 月から GNSS 観測を行っている。観測点周辺は標高 2000m 以上の山岳域に囲まれており、GNSS 衛星からの電波が山岳などで反射された後に得られるマルチパスの影響を受けやすい。

そこで日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発した QZSS（準天頂衛星）のデータを使用することによって、山間部に設置した受信機の上空の水蒸気の状態を精度よく推定することを試みた。Fig. 1 は、観測地点の位置と名称である。ここで、国土地理院が運用している GNSS 観測網（GEONET）観測地点は、周囲に高い建物や山がない場所が選定されている。一方、本研究のために設置した国土交通省関東地方整備局富士川砂防事務所早川出張所は山岳谷部に存在して観測条件は悪い。そこで GEONET が観測した大気遅延量と早川出張所で観測した大気遅延量について、QZSS を使用する場合としない場合に分けて解析し、値の比較を行うことによって、山岳域の GNSS 観測の精度検証を行った。

(2) 海洋上

本研究では、新たに大阪湾上に受信機を設置し、独自の GNSS 観測を行った。

Fig. 2 は今回の大阪湾観測において新たに設置した洋上の GNSS 受信機と大阪湾周辺の既設の GNSS 観測網（GEONET）の地点を表している。Fig. 2 に示している赤い点が、大阪湾周辺の GEONET の点であり、Fig. 2 における黄色の点は、今回新しく設置した受信機を表している。今回の大阪湾観測は、近年



Fig. 2 GNSS receivers launched around Osaka Bay.

頻発する「ゲリラ豪雨」の予測や早期発見に貢献するため、大阪湾周辺における気象観測を行うことを目的とし、その中でも新たに設置した受信機は、大阪湾上の水蒸気情報を取得するためのものである。今回使用した装置は、GNSS 受信機で観測されたデータを通信制御装置のメモリカードに収録し、FOMA 網を通じて、データ回収が行える機能を有しており、ソーラー電源を使用して 24 時間の観測が行える。

大阪湾に新たに設置した GNSS 受信機は、Table 1 に示すように 9 つあり、タワー、ブイ、固定、船の 4 つのタイプに分類できる。特にタワー、ブイに該当する神戸波浪観測塔 (9004)、阪南沖窪地 (9005)、洲本沖灯浮標 (9006)、神戸沖第二号灯浮標 (9007) 等の観測点は、新たに浮標を設置して観測を行うのではなく、既存の浮標や観測塔に GNSS 受信機を設置することによって、航行船舶の安全性を確保している。また紀伊水道に和歌山と徳島市を結ぶフェリーを運航している定期便に受信機を設置した。これらの受信機は、南海フェリー株式会社が所有している「かつらぎ」(9002)、「つるぎ」(9003) の 2 つの船舶上に設置している。このように移動体のものに GNSS 受信機を取り付け、海洋上の水蒸気を観測するという新たな観測手法にも取り組んでいる。

2.2 観測によって得られるデータ

GNSS 観測では、受信機が受け取った生の信号から、そのまま ZTD 等の解析データが得られる訳ではなく、今回新しく設置した GNSS 受信機においても、GEONET の電子基準点においても、まず得られるの

は GNSS の単なる位相データである。そのため、位相データを解析可能なデータ形式にする必要がある。また GNSS が普及するにあたって様々な受信機が登場してきた。そこで異なる受信機であっても同様の形式で出力されるように、入出力形式の標準化が進んでいる。RINEX (Receiver Independent Exchange Format) は受信機が観測したデータの共通フォーマットとして使われているファイル形式である。世界的に使用されている標準フォーマットであるため、他メーカーの受信データであっても解析が可能である。国土地理院のホームページよりダウンロードできる GEONET の電子基準点や大阪湾上に新しく設置した GNSS 受信機の位相データも RINEX 形式で取得することが可能である。

2.3 RTNet Software

先にも述べたように、GNSS の生の信号は単なる位相データであり、ここから直接的に GNSS の電波の遅延量を知ることはできない。位相データから大気遅延量等の情報を得るには、GNSS 解析ソフトを用いる必要がある。RTNet (Real Time NETwork processing Engine) Software は最高精度の GNSS 解析をリアルタイム・準リアルタイムシームレス解析・事後解析で提供するために GPS Solutions Inc. が開発したソフトウェアである。RTNet の特徴として挙げられるのが、モデルを単純化せずに、可能な限り最適な数学、統計モデルを使用することに重点を置き、高精度な解析を行えることである。また一般的な解析手法を用いているため、様々な分野に適用可能である。気象学の分野においては、この RTNet を用いることで、他の気象データを用いることなく、天頂大気遅延 (ZTD) を求めることが可能である。

3. 山岳域における QZSS を使用した解析

3.1 観測におけるマルチパスの影響

マルチパスとは、衛星から放たれたマイクロ波が直接 GNSS 受信機まで到達するもの以外にビルや地面等に反射され通常の経路とは異なる経路で受信機に到達する反射波のことを言う。マルチパスは直接受信機に到達する電波とは異なる経路をたどっているために、到着までに要する時間が長くなる。これが直接波と同時に受信されると、測位誤差として現れる。こうしたマルチパスのノイズが大気遅延と相関を持ち、大気遅延パラメータと混同して推定され、

Table 1 GNSS which has been deployed on Osaka Bay by the project,

Number	Observation Point Name	ID	Type
1	Wave Observation Tower in Kobe Port	9004	tower
2	Second Lighted Buoy off the Kobe Coast	9007	buoy
3	Waste Landfill Site off the Osaka Coast	9009	fix
4	A Depression off the Hannan Coast	9005	fix
5	Lighted Buoy off the Sumoto Coast	9006	buoy
6	An Observation Platform in Tomogashima Island	9006	fix
7	Nushima Jr. High School	9001	fix
8	Ferry Boat KATSURAGI	9002	ship
9	Ferry Boat TSURUGI	9003	tower

系統誤差の要因になっているという報告もある。建物や樹木等の障害物は地表付近に多く存在するため、マルチパスは地表付近で多く発生する。このため、仰角の低い衛星からの信号を使用しないことや、反射物（高層ビルや樹木など）の少ない場所など、観測局の環境を選定することによって、マルチパスによる影響を軽減させることが可能あるが、その一方で、山岳域に GNSS 受信機を設置し、観測を行うことでマルチパスによる観測精度の悪化が問題として挙げられている。

3.2 QZSS 概要

米国が運用している GPS は名前のとおり、全地球的に測位をおこなうものであるため、日本に特化しているものではない。また、日本は国土の大部分を山地で形成しているため、限られた平地に都市が集中してしまい、山や都心部の高層ビル等によって GPS 衛星からの信号が遮られてしまう。そこで日本の地理条件に応じて、GPS 信号を補完・補強するために開発されたのが準天頂衛星システム（QZSS : Quasi Zenith Satellite System）である。QZSS は、日本のほぼ天頂付近を通る衛星を複数組み合わせた衛星システムで、常に 1 機の衛星を日本上空に配置することを可能とするような計画がなされている。この準天頂衛星の軌道は日本での利用に特化している軌道となっており、準天頂衛星軌道を、地球を止めた状態で見ると、衛星が 8 の字を描くように動いているように見えることから、「8 の字衛星」と呼ばれている。しかし南北対称の 8 の字を描くのではなく、衛星から衛星への切り替えが行いやすく、1 衛星あたりの滞空時間が長いメリットがある非対称の 8 の字

の軌道を採用している。

QZSS には 2 つの働きがある。1 つは GPS と同じ役割を果たすことであり、日本のほぼ真上に位置する QZSS の衛星が GPS と同じ役割を果たすことによって、GPS のみでは衛星数が不足してしまう場合においても、QZSS を使用することで、測位が可能となる。2 つ目の働きは GPS を補強することである。GNSS 測位の誤差要因である電離層遅延と対流圏遅延量に関する情報を QZSS からの電波で提供することによって安価な一周波受信機を用いても高精度な観測を行うことが可能になることを目指したものである。

また、1 つの衛星が常に日本上空に滞在しているわけではなく、衛星も少しずつ角度を変えて、南北に移動し地平線の下に隠れる。そのため 1 機の衛星が日本真上に滞在できる時間は 7 時間から 9 時間程度となっており、複数の衛星を時間差で入れ替えることにより、常に 1 機が 24 時間常に日本の上空に滞在させる計画となっている。2010 年 9 月 11 日に QZSS 衛星の初号機である「みちびき」を打ち上げ、現在は第一段階の技術実証と利用実証を推進するため、宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって衛星システムの整備と運用が行われている。

本研究では QZSS の 1 つ目の役割について調査するものである。すなわち、QZSS は現在 1 機だけが運用されているので、QZSS が天頂付近にある時間帯とそうでない時間帯を明確に分離できる。そこで、QZSS が天頂付近にある場合の効果について、そうでない場合と比較することによって調査する。日本の場合、開けた場所であれば十分な数の GPS を使った測位が可能であるが、山岳部は受信できる GPS 衛

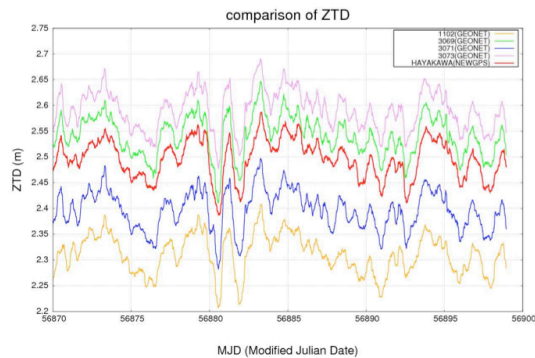


Fig. 3 Time series variation of ZTD of HAYAKAWA and GEONET.

星の数が十分でないことがあるので、山岳部において QZSS の効果を調査する。

3.3 既存の受信点の大気遅延量との比較

a) 周辺の GEONET との比較

山岳谷部に GPS と QZSS の衛星電波を受け取ることができる GNSS 受信機を設置し、大気遅延量や水蒸気量の観測を行う。ここで上空が開けた地点と森林によって見晴らしが悪い地点での観測結果の違いなどについても検討するため、山岳部に新しく設置した受信機周辺の既存の GNSS 観測網の電子基準点で観測された天頂大気遅延量 (ZTD) のデータとの比較を行う。解析期間は日本時間の 2014 年 8 月 1 日から 8 月 31 日 (MJD : 56879.625~56900.625) である。

Fig. 3 は山梨県の富士川砂防事務所早川出張所に独自に設置した GNSS 受信装置 (HAYAKAWA) とその周辺の GEONET の 4 地点 (1102, 3069, 3071, 3073) で観測された天頂大気遅延量の推移である。上記で天頂大気遅延量の増減の変化が、大気中の水蒸気量の増減を表していると述べた。天頂大気遅延量 (ZTD) の値が大きくなっている期間では降雨が発生している期間で、受信機地点の上空に水蒸気が流入していることを表していると言える。また山岳谷部に新しく設置した受信機 (HAYAKAWA) によって観測された ZTD の値も周辺の GEONET で観測された ZTD と同様な増加・減少の傾向であり、山間部においても水蒸気の変動を捉えていると言える。

次に 2014 年 8 月 9 日から 8 月 11 日 (MJD : 56877.625~56880.624) の山岳部の GNSS 受信機 (HAYAKAWA) で観測した「GPS+QZSS」データの ZTD 解析値と QZSS の仰角を Fig. 4 に示す。今回示す図における期間では、台風 11 号の接近に伴い、台

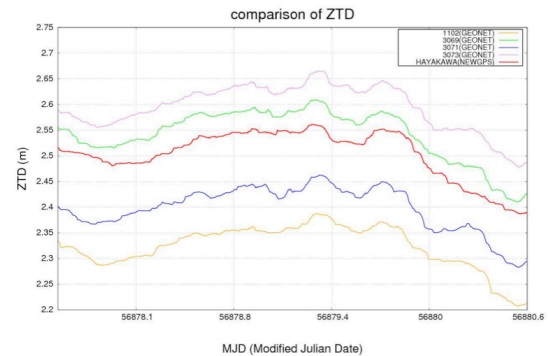


Fig. 4 Time series variation of ZTD of HAYAKAWA and GEONET when T1411 approaching.

風周辺の湿った空気が流入し、広い地域で降雨が発生した。台風 11 号は 10 日 6 時頃に四国・兵庫県に上陸、同日午後日本海へ抜けて北上し、11 日午前 9 時に北海道で温帯低気圧に変わった。また山梨県富士川では台風の影響により、10 日の午前 3 時から午後 5 時までにかけて降雨が発生している。Fig. 4 では、56878 (MJD) 付近が、山梨県周辺において台風 11 号が最も接近した時間帯であると言える。またその後、台風 11 号が日本海を抜け、温帯低気圧に変わり、山梨県周辺地域における天候が回復するにつれ、天頂大気遅延量 (ZTD) の値も小さくなるように推移している。

b) 近傍の GEONET 点との比較

次に山岳部における ZTD 解析での QZSS の効果について検証を行う。検証方法としては、山岳部に設置した GNSS 受信機 (HAYAKAWA) と近傍の GNSS 観測網の電子基準点である GEONET 3069 の「GPS のみ」と「GPS+QZSS」の 2 つの観測データを使用する。天頂大気遅延量の比較では、開けた土地に受信機が設置してあり、マルチパスの影響を受けない天頂方向からの QZSS の衛星データを使用するという理由から GEONET 3069 の「GPS+QZSS」のデータで得られた ZTD の値を正しいものとして比較・検証を行う。

また、HAYAKAWA と 0369 の ZTD には距離によるバイアスが存在するので、それぞれの平均値を算出し、平均値の差を距離のバイアスと仮定して取り除いた。

Fig. 5 は、2014 年 8 月 1 日から 8 月 31 日 (MJD : 56870.625~56890.625) の ZTD と HAYAKAWA で捉えられた QZSS の衛星の仰角の推移を表している。前述のように、現在 QZSS は「みちびき」の 1 機の

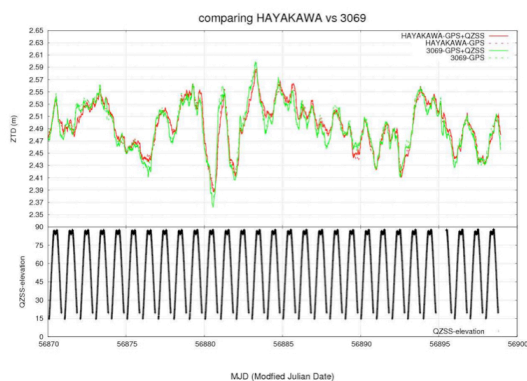


Fig. 5 Time series variation of ZTD of HAYAKAWA and GEONET 3069 at Nakatomi by comparing GPS only and GPS+QZSS with elevation angle of QZSS at the bottom.

みによる運用を実施しており、軌道傾斜角 45 度、軌道周期 23 時間 56 分で地球を周回している。1 日に 4 分のずれが生じるが、2014 年の 8 月における HAYAKAWA で捉えられる QZSS 衛星の天頂滞在時間は午後 4 時から午後 11 時の間であることが分かった。午後 4 時から午後 11 時以外は単なる GPS 衛星として機能していた QZSS 衛星は、この時間帯だけは天頂方向に滞在することとなる、その結果 QZSS 衛星から放たれる電波がマルチパスの影響を受けずに直接受信機に到達するようになり、精度の良い観測が行えるようになると思う。

この期間において、台風 11 号が山梨県に最も接近した 8 月 10 日 (MJD: 56878.625~56879.625) の期間の ZTD と QZSS の仰角の推移を Fig. 6 に示す。グラフの推移を見ても分かるように、QZSS が低仰角または存在しない時は、同じ色の実線と点線の差が小さい、すなわち GEONET 3069 と HAYAKAWA の「GPS+QZSS」の ZTD の値は、同じ点の「GPS のみ」の ZTD と同様な値を示していた。しかし、QZSS 衛星が高仰角に存在している間は、2 つの実線の差が小さい、すなわち、開けた地点で観測を行いかつ、高仰角の QZSS データを使用している GEONET 3069 の「GPS+QZSS」の ZTD 値と HAYAKAWA の「GPS+QZSS」の ZTD の値が、それぞれの「GPS のみ」よりも近い値となっていて、QZSS の効果が現れている。以上の結果から、QZSS が天頂方向に滞在している時間はマルチパスや周辺の山の影響を受けずに、天頂大気遅延量を精度よく解析していることがわかった。

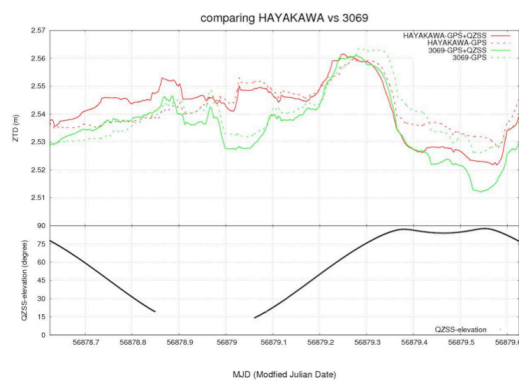


Fig. 6 Same as Fig. 5 but focusing when T1411 approaching.

3.4 RMSE を用いた精度検証

山岳部に設置している GNSS 受信機の周辺は山に囲まれており、見晴らしが悪く、GPS の衛星が遮られる（またはマルチパスの影響を大きく受ける）ことを前章で述べた。そこで、QZSS の仰角を 45 度以下（低仰角）と 45 度以上（高仰角）の時の ZTD の解析値の精度調査を行うために、GEONET 3069 の「GPS + QZSS」の ZTD データを真値として、残りの 3 つの ZTD と比較を行う。ここでの ZTD の精度評価は、平方根平均自乗誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) で行う。

前述のように、本研究では、真値を GEONET 3069 の GPS+QZSS の ZTD、推定値を GEONET 3069 の GPS の ZTD、早川出張所 (GEONET) の GPS+QZSS の ZTD、早川出張所 (GEONET) の GPS の ZTD とする。Table 2 はそれぞれの RMSE を表したものである。QZSS の仰角が 45 度以下の場合、HAYAKAWA の ZTD は QZSS データの使用に関係なく同じような値となった。しかし、45 度以上の場合になると HAYAKAWA (GPS+QZSS) の RMSE は 0.009, HAYAKAWA (GPS) の RMSE は 0.011 となり、QZSS の衛星が高い仰角に存在する場合、受信点上空の水蒸気量を精度よく計測することができると考えられる。また同様に 60 度、80 度以上の場合の RMSE を算出した。しかし、大きな差は見られなかった。この理由としては、山岳部に設置した GPS 受信機の周辺の山の状況から仰角が 40 度以下の衛星信号を遮るため、45 度以上の衛星ならば、受信機が衛星から放たれたマイクロ波を山やマルチパスの影響を受けずに、直接受け取ることができるためであると推測できる。

Table 2 Root Mean Square Error of ZTD

Observation Point (GNSS Type)	$\theta < 45^\circ$	$45^\circ \leq \theta < 60^\circ$	$60^\circ \leq \theta < 80^\circ$	$80^\circ \leq \theta$
HAYAKAWA (GPS + QZSS)	0.014	0.009	0.009	0.009
3069 (GPS)	0.005	0.007	0.007	0.008
HAYAKAWA (GPS)	0.013	0.011	0.011	0.012

3.5 QZSS の有効性と今後の課題について

山岳谷部において GNSS 観測を行い、得られた GPS+QZSS のデータを使用して、ZTD の解析を行うことは初めての試みではあったが、詳細な解析パラメータの設定や使用する観測データにまだ不備はあるものの QZSS の衛星（みちびき）が高仰角に存在する場合、QZSS のデータを使用するほうが、近傍の GEONET の ZTD 値に近い値となったことは、QZSS の有効性を証明している。また今後の課題としては、解析パラメータの決定を行うことや、夏季と冬季によって、QZSS の衛星が天頂方向に滞在する時間帯が異なること等を考慮した長期間の解析と精度検証を行っていく必要がある。

4. 大阪湾における水蒸気コントラスト探知

4.1 大阪湾周辺の水蒸気の可視化にむけて

次に大阪湾周辺の水蒸気の可視化を行う。Shoji *et al.* (2013) は実際に天頂大気遅延量を観測している地点とその受信機に電波信号を放送している衛星を結んだベクトルと、実際の観測点から水蒸気のスケールハイトの高さの面の交点を海面に射影した点を仮定の観測点であることを示した。本章ではこの方法を使用し、大阪湾周辺で発生した「ゲリラ豪雨」の期間における水蒸気の変動を検出する。

対象期間は、2012 年 8 月 18 日の 12 時から 17 時 (MJD : 56884.165~56884.333) において解析を行う。この期間の近畿地方周辺は、上空の寒気と南からあたたかく湿った空気の影響により、大気の状態が不安定となった。これに日射による地上の気温の上昇も加わり、大阪府では、解析期間内において、局地的に雷を伴った激しい雨が発生し、大阪市中央区では 1 時間に 58.0mm の雨を観測した。またこの期間に発生した落雷により、大阪府で死者 2 名、負傷者 8 名となった。他にも、強雨により、大阪府内で床上浸水 (2 棟)、床下浸水 (64 棟)、土砂崩れ (1 カ所) 等の被害が発生した。この事例は、短期で一部の地域に雨が集中したので、この期間の大阪湾周

辺の水蒸気変動を可視化することで、水蒸気の移動の特性を調査することにした。太平洋高気圧が平年より東や南に位置すると、太平洋高気圧の縁辺で暖かく湿った空気が入りやすくなっている。その一方で、日本のはるか東海上で上空の気圧の谷から切り離された冷たい空気が東風により日本付近に流され、地表付近の暖かく湿った空気と上空の冷たい空気との温度差が大きくなる。そのため、大気の状態が不安定となり、入道雲が発達し、2012 年 8 月 18 日は雷や「ゲリラ豪雨」が発生しやすくなったと考えられる。

4.2 解析方法

(1) 仮想観測点の ZTD の算出

(a) 視線大気遅延量の算出方法

まず、一般的な視線遅延量の推定手法について述べる。第 2 章でも述べたように、視線遅延は観測点から衛星に向かう方向に観測された大気遅延量のことであり、視線方向大気遅延量 (STD) は、個々の衛星において、天頂大気遅延量 (ZTD) を衛星方向に投影した視線大気遅延量と衛星の残差の和として式 (1) のように表される。

$$STD = ZTD \cdot (\sin \theta_{el})^{-1} + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 θ_{el} は視線方向の仰角、 ε は非等方成分の大気遅延とマルチパス等のノイズによって形成される事後残差を示している。

(b) 仮想点の ZTD の推定手法

次に、先ほど RTNet の出力データから算出した視線大気遅延量 (STD) と Shoji *et al.* (2013) のスケールハイトを使用する仮想点の推定方法を述べる。ここでスケールハイトとは、大気力学においてある量が指数関数的に減少する際の距離を表しているものであり、水蒸気のスケールハイトを用いて、水蒸気の屈折率の高度分布 $n_0(z)$ と、水平勾配の高度分布 $g_0(z)$ を以下のように仮定することができる。

$$n_0(z) = n_0(0) e^{-\frac{z}{h_0}} \quad (2)$$

$$g_0(z) = g_0(0) e^{-\frac{z}{H_0}} \quad (3)$$

ここで z は海面からの高度 [m], H_0 は水蒸気のスケールハイト [m] である. また本研究では水蒸気のスケールハイトを 2000m とした.

次に一様でない大気を想定し, ある地点における大気遅延量について考える. 天頂方向から見える衛星で観測した場合の天頂大気遅延量 (ZTD_{ctl}) は屈折率の鉛直積分であるので,

$$ZTD_{ctl} = \int_0^\infty n_0(z) dz = \int_0^\infty n_0(0) \cdot e^{-\frac{z}{H_0}} dz = H_0 \cdot n_0(0) \quad (4)$$

と表すことができる.

また, θ_{el} の仰角方向に存在する衛星から観測した視線方向の大気遅延を天頂方向に射影した遅延量 (ZTD_{std}) は天頂方向では捉えることのできない水蒸気の水平勾配の影響を受けるため, 式 (5) のように表すことができる.

$$ZTD_{std} = \int_0^\infty \{n_0(z) + g_0(z) \cdot z \cdot \tan(90 - \theta_{el})\} dz = ZTD_{ctl} + \tan(90 - \theta_{el}) \cdot \int_0^\infty (g_0(z) \cdot z) dz \quad (5)$$

ここで Ruffini *et al.* (1999) より,

$$\int_0^\infty (g_0(z) \cdot z) dz = H_0 \cdot \nabla ZTD \quad (6)$$

となる. また, 天頂大気遅延 (ZTD_{ctl}) と視線方向の大気遅延を天頂方向に射影した遅延量 (ZTD_{std}) の相違は水蒸気の水平勾配に起因するとして, 天頂遅延量の水平勾配は式 (4), (5), (6) より, 算出することができる.

$$\nabla ZTD = \frac{ZTD_{std} - ZTD_{ctl}}{H_0 \cdot \tan(\pi/2 - \theta_{el})} \quad (7)$$

以上より, ZTD_{std} と ZTD_{ctl} の差から, ZTD の空間勾配が推定できるようになる.

式 (8) から, 実際の観測点より距離が d [m] 離れた地点の天頂大気遅延量 (ZTD_d) を求めることが可能である.

$$ZTD_d = ZTD_{ctl} + d \cdot \nabla ZTD = ZTD_{ctl} + d \cdot \frac{ZTD_{std} - ZTD_{ctl}}{H_0 \cdot \tan(\pi/2 - \theta_{el})} \quad (8)$$

また, 実際の観測点と衛星を結ぶベクトルが水蒸気のスケールハイトを通過する際の水平距離における点での ZTD_d は式 (9) で表せるように, 視線遅延を

天頂方向に射影した ZTD_{std} と仮定の観測点の天頂大気遅延量が同じ値となる.

$$ZTD_d = ZTD_{ctl} + H_0 \cdot \tan(90 - \theta) \cdot \frac{ZTD_{std} - ZTD_{ctl}}{H_0 \cdot \tan(\pi/2 - \theta_{el})} = ZTD_{std} \quad (9)$$

以上より, 本研究では, エポック毎に捉えられている衛星の視線遅延量を算出した後, 各衛星の視線と水蒸気スケールハイトが交わる点を海水面に投影した場所を仮定の観測地点を衛星ごとに算出し, そこで観測することができると考えられる値を ZTD_{std} として解析を行っていく.

前述までにおいて, 実際の観測点から各衛星の視線とスケールハイトの交点を海に投影した距離における ZTD を求めることができた. そこで, 実際の GNSS 観測点の緯度・経度, 各衛星の方位角, 仮想点までの距離を使用して, 仮想点の座標を求めることにした. 本研究では, 一般的によく知られている近似計算式でも最も簡単な Hubeny (ヒュベニ) の公式を用いる. この計算式は, 「カシミール 3D」という, 山の範囲をプロットした地図を作成するためのソフトウェアで採用されている計算式である. ヒュベニの式は日本付近の緯度であれば高精度で位置座標を推定できるため, 今回の解析では十分適用することができる.

(2) 水蒸気コントラストの算出方法

仮想観測点の天頂大気遅延量から実際の観測点の天頂大気遅延量を減じたものが, 実測観測点を原点とした座標系の一次関数で表されるとして線形回帰法でその一次関数を求め, その回帰式が面の方程式であるとして, その法線ベクトルを求め, その水平面への射影が水蒸気コントラストを表しているものとした. また測定される法線ベクトルの確からしさを回帰分析検定によって評価した.

まず実際の観測点を原点として, 仮想点の座標を算出し, 3次元空間の面の方程式を求める. 面の方程式は,

$$ax + by + 1 \cdot (ZTD_{std} - ZTD_{ctl}) = 0 \quad (10)$$

とする. ここで x は実測点から仮想点までの東西方向の距離, y は実測点から仮想点までの南北方向の距離, ZTD_{std} は仮想点の天頂大気遅延量, ZTD_{ctl} は観測点の天頂大気遅延量を表す. 定数 a, b は複数の観測点の値から最小二乗法で求めた. さらに, この最小二乗法で求められた定数 a, b の有意性を検討する

ため、 p 値（危険率）を使用した統計検定を行った。各観測点の a, b を決定する際、 p 値（危険率）を同時に算出し、その時の p 値が有意水準である 0.05 未満であれば、有意差があるとし、その値は確からしいものであるとして解析を行う。

次に上記の方法で求めた面の法線ベクトルを単位ベクトルに変え、 xy 平面に射影したベクトルが水蒸気のコントラストを表すものとなる。式 (11) は法線ベクトルの xy 平面の射影ベクトルである。

$$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (11)$$

これは水蒸気量が大きい方角から小さい方角への方角を表しており、さらにそのベクトルが大きい場合、水蒸気の勾配が大きいことを示す。

以上の方法を用いて、大阪湾とその周辺に設置してある GNSS 観測点から捉えることができる水蒸気のコントラストを探知する。

4.3 解析結果

Fig. 7 は、2012 年 8 月 18 日の 12 時 00 分の水蒸気コントラストと X バンド MP レーダーの雨量データを表したものであり、ここで青い枠の矢印が水蒸気のコントラストであり、青く塗りつぶされている矢印が、 p 値（危険率）が 0.05 以下となった有意差がある水蒸気コントラストを示している。また p 値が 0.05 以下の観測点がある場合のみの時間を使用して比較を行う。

この図からも分かるようにこの時間ではまだ降水が発生しておらず、水蒸気のコントラストも疎らになっており、一様性なものは見られなかった。

次に 14 時 00 分から 14 時 30 分にかけての比較を行う。この時間帯は大阪市で雷を伴った激しい降雨が発生した時間であり、大阪市の長居公園ではこの時間に発生した雷で 1 人が死亡している。急激な気象の変化があったとみられ、水蒸気の変動も大きかったと考えられる。Fig. 8 を見ると、14 時 20 分から 22 分では、熊取 (0340 : GEONET) の地点において、確からしいコントラストが表されている。またこの地点では小さな雨域が発生していることから、熊取 (0340 : GEONET) では、この地点における水蒸気のコントラストを捉えていたのではないかと考える。また 14 時 26 分には、大阪 (0336 : GEONET) の地点で南西の方向から北東の方向に向かって小さくなる水平規模で 5km 程度のスケールの水蒸気勾配があることを示している。大阪 (0336) の地点の北

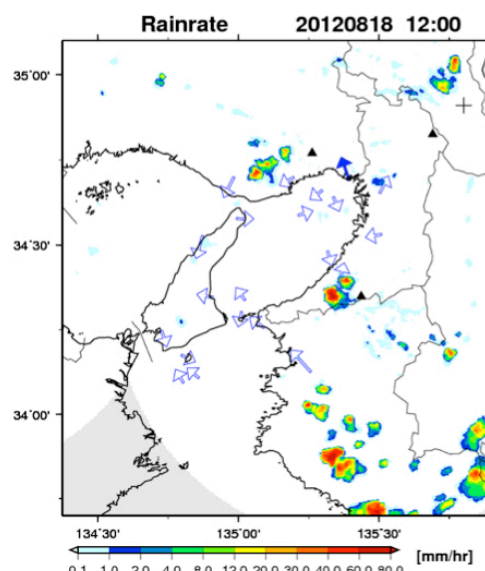


Fig. 7 Rainfall intensity by XMP (shade) and water vapor contrast (arrows) at 12:00 on 18 August 2012 (JST).

東側の雨域は水蒸気量が少ない。気象庁のアメダスの大阪地点の風向は 13 時 50 分に西北西、14 時に北東、14 時 10 分に南南東、14 時 20 分に南西となっていて、大阪で 14 時 26 分に雨域の風下側で水蒸気量が少ない勾配があるのは妥当であろうと考えられる。

次に 15 時 00 分から 17 時 00 分にかけて雨域が北上して、大阪市を過ぎていく期間を図に表す (Fig. 9)。この期間においては大阪 (0036 : GEONET) の点で p 値が小さな水蒸気のコントラストが表されている。15 時 16 分の時点では、雨域の移動とは逆方向に矢印が向いていて雨域の側に水蒸気が多くあることを示している。16 時 03 分の時点では矢印が北側を向いていて雨域側が乾燥していることを示している。

以上の結果より、この方法では、天頂大気遅延量（水蒸気）の上昇があったときに、その水蒸気がどの方向から流入してきたのかを知ることができる可能性がある。また雨域、下層の風向きを重ね合わせることで、雨域の継続性などを示すことができるのではないかと考えられる。一方で全体的に p 値が小さい事例は少なく、水蒸気の局所的なコントラストは特異事例であることが理解できた。

5. まとめ

本研究では、GNSS 受信機と解析ツールを用いて、受信機で観測される天頂大気遅延量やそれによって求められる水蒸気量について解析を行った。その際、海洋上や山岳谷部等、GNSS 観測が行われていない

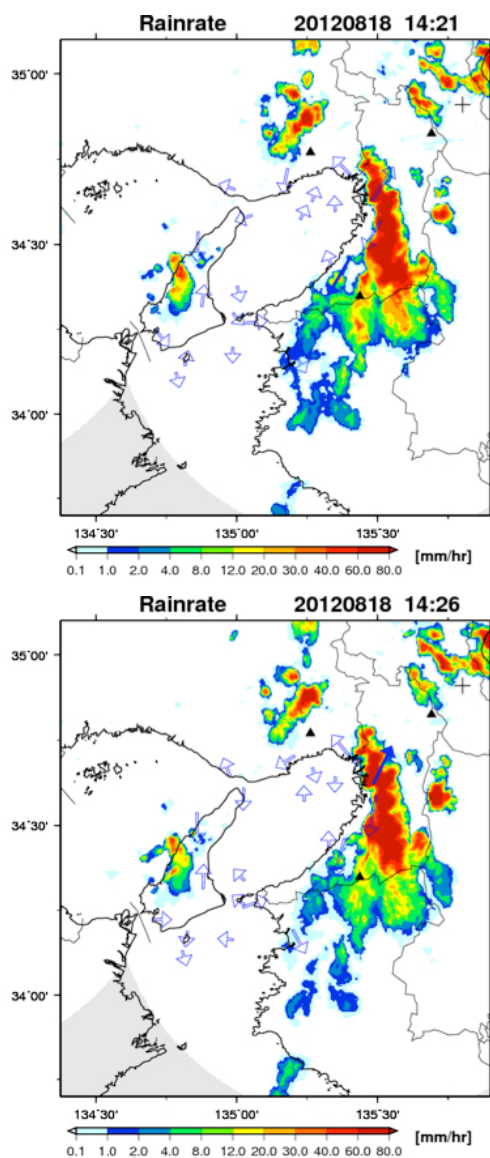


Fig. 8 Same as Fig.7 but 14:00 to 14:30.

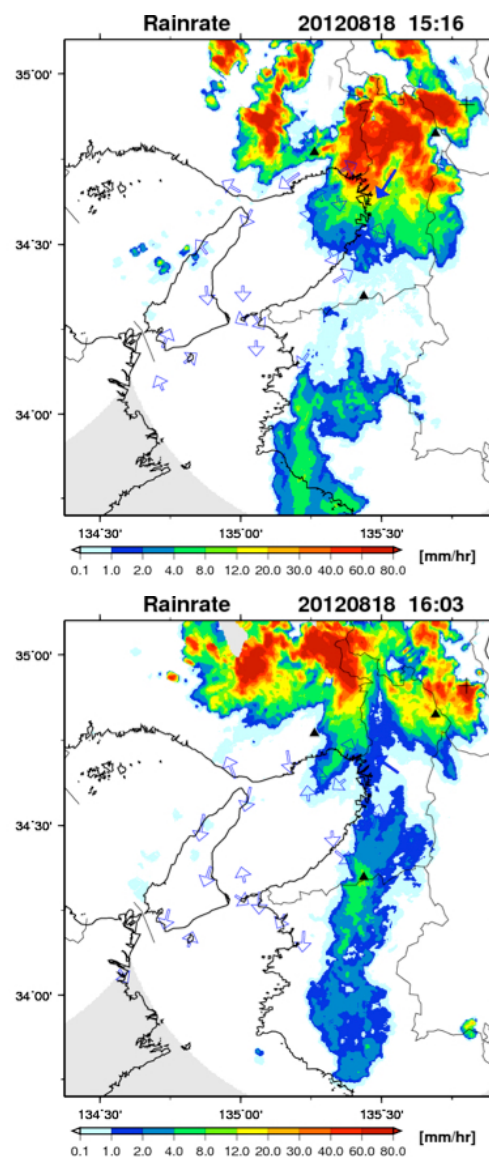


Fig. 9 Same as Fig.7 but from 15:00 to 17:00.

地点において新たに受信機を設置し、独自の GNSS 観測の実施を試みた。

まず、山岳谷部において、日本における GPS 観測の補完と補強をするために開発された QZSS (準天頂衛星) のデータを使用し、天頂大気遅延量の解析と比較を行った。その結果、山岳谷部では QZSS のデータを使用することで、天頂大気遅延量を精度よく推定することができていることが分かった。また今後の課題としては、QZSS データを使用した長期解析を行い、QZSS の天頂方向に滞在する時間帯による解析の影響等の調査を行っていくことが挙げられた。

つぎに視線遅延と Shoji *et al.*(2013) のスケールハイトを使用した仮想観測点の ZTD 推定方法を使用して、「ゲリラ豪雨」が発生した期間の水蒸気コントラ

ストの探知し、その結果を X バンド MP レーダーの雨量データと比較を行った。この方法を使用することで、5km 程度のスケールの水蒸気勾配を捉えることに成功した。

今回の水蒸気コントラストの探知では、水蒸気の細かな分布と移動を捉えることができた。しかし、湾上に設置した観測点においては、水蒸気コントラストを表現していなかったといえる。この理由については明白な答えが分からないため、今後も検討していく必要がある。また、視線大気遅延量には、様々なノイズが含まれているため、安定した大気の下では、相対的にそのノイズの影響が大きくなってくると考えられる。そこで今回の局所的な豪雨の結果より、視線遅延量と残差データを有効に利用できるのは、水蒸気量が相対的に大きく、かつ激しく変

動する気象条件とその地域にのみ限定されると考えられる。今後は上述した、ZTD 上昇時における水蒸気の流入方向の探知と、この水蒸気コントラストと風向を重ね合わせることで、バックビルディングの発生を探知する可能性の検証を行っていきたい。

謝 辞

本研究の第3章は平成26年度京都大学防災研究所共同研究・一般共同研究(26G-04)「大阪湾 GPS と高解像度レーダーを用いた大阪湾域の極端気象予測精度の向上に関する研究」(代表:大石哲),第4章は科学研究費補助金基盤研究(B)「最先端遠隔探査手法を用いた富士山周辺の水循環過程の解明と流域管理への応用」(代表:大石哲 平成25年度~27年度課題番号25289154)の支援を受けたものです。また、南海フェリー株式会社、南あわじ市立沼島中学校、大阪湾広域臨海環境整備センター、海上保安庁、国土交通省近畿地方整備局にはGNSS観測装置の設置にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 市川隆一・田中寅夫(1998): 大気遅延とマッピング関数, 気象研究ノート「GPS 気象学」(内藤勲夫編), No.192, pp.35-48.
- 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「GPS 気象学」(内藤勲夫編), No.192, pp.15-33.
- 辻宏道(1998): GPS の原理, 気象研究ノート「GPS 気象学」(内藤勲夫編), No.192, pp.1-13.
- 辻宏道・宮川康平・山口和典・矢萩智裕・大島健一・山尾裕美・古屋智秋(2013): 電子基準点の GNSS 対応, *Journal of the Geospatial Information Authority of Japan* (124), pp.139-148.
- 戸田圭一(2009): 短時間豪雨と都市水害, 予防時報 237 号, pp.22-27.
- 内藤勲夫(1998): 気象研究ノート, 日本気象学会, pp.1-59.
- Askne, J. and H. Nordius (1987): Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Science*, Vol.22, pp.379-386.
- Elgerd, G., J. L. Davis, T. A. Herring and I. I. Shapiro (1991): Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, Vol.96, pp.6541-6555.
- Ichikawa, R., M. Kasahara, N. Mannoji, and I. Naito (1995): Estimations of atmospheric excess path delay based on three-dimensional, numerical prediction model data, *J. Geod. Soc. Japan*, Vol.41, pp.379-408.
- Ruffini, G., L. P. Kruse, A. Rius, B. Burki, L. Cucurull and A. Flores (1999): Estimation of tropospheric zenith delay and gradients over the Madrid area using GPS and WVR data. *Geophys. Res. Lett.*, pp.447-450.
- Shoji, Y., H. Yamauchi, W. Mashiko and E. Sato (2013): Estimation of Local-scale Precipitable Water Vapor Distribution Around Each GNSS Station Using Slant Path Delay, *SOLA*, Vol.10, pp.29-33.
- Thayer, D. (1974): An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Science*, Vol.9, pp.803-807.

(論文受理日: 2015 年 6 月 11 日)