

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21847

研究課題名(和文) 車載型低コストGNSS受信機による高密度水蒸気観測網に関する研究

研究課題名(英文) Research on dense observing network of precipitable water by using on-vehicle low-cost GNSS receiver systems

研究代表者

今岡 啓治 (Imaoka, Keiji)

山口大学・大学研究推進機構・准教授

研究者番号：50725869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：豪雨の早期検知などの観点から高頻度・高密度の水蒸気観測が必要であり、低コストGNSS受信機の活用が期待される。本研究では、車載型の低コストGNSS受信機を用いた高密度な水蒸気観測網構築を目標として、2周波の低コストGNSS受信機を用いた水蒸気計測システムを構築し、電子基準点やラジオゾンデ観測との比較を通じて推定精度を評価した。その結果、低コストGNSS受信機システムは電子基準点とほぼ同等の水蒸気推定性能を持つことを示した。車載状態においては良好な推定性能を示すことができなかったが、少なくとも固定観測点の増設による高密度観測網の構築には十分活用できると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平成30年7月豪雨における線状降水帯に伴う大雨や大型台風の上陸頻度増加など、地球温暖化の影響と考えられる極端な気象現象の頻発が近年問題となっている。このような風水害に備えるためにはその兆候をいち早く把握し、対応のリードタイムを確保することが重要である。本研究成果は、降水に先行する水蒸気の挙動の高頻度・高密度な観測網の構築に資するもので、防災の観点から社会的意義を有する。また、近年市場に展開されている低コストGNSS受信機による水蒸気観測の精度を、ラジオゾンデ観測との長期比較により初めて直接的に検証した点に学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Observations of water vapor with high temporal frequency and high area density are desired for many purposes including early detection of severe rainstorms. To reduce the cost for installation, utilizing low-cost GNSS receivers is highly expected. In this research, for the purpose of establishing dense water vapor observation network by using on-vehicle low-cost GNSS receivers, we constructed the observing system with two-frequency low-cost GNSS receiver and evaluated the estimation performance of water vapor by comparing with geodetic-grade GNSS receiver system and radiosonde observations. As a result, low-cost GNSS receiver system exhibited comparable performance with that by geodetic-grade system in estimating water vapor. Although we were not able to show reasonable performance for on-vehicle experiment, at least low-cost GNSS receivers are promising in constructing denser observing network of water vapor with fixed stations.

研究分野：宇宙地球計測学・人工衛星リモートセンシング

キーワード：GNSS 水蒸気 可降水量 低コスト 移動体

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 高頻度・高密度の水蒸気観測網の必要性

平成30年7月豪雨における線状降水帯に伴う大雨や大型台風の上陸頻度増加など、地球温暖化の影響と考えられる極端な気象現象の頻発が近年問題となっている。このような風水害に備えるためにはその兆候をいち早く把握し、対応のリードタイムを確保することが重要である。そのため、降水に先行する水蒸気の挙動を高頻度・高密度で観測することが肝要である。また、地殻変動を面的に捉える技術として人工衛星搭載合成開口レーダ(SAR)を用いた干渉 SAR 技術が注目されている。干渉 SAR は異なる二時期のデータ間の電波の位相差を地表変位に変換する技術であるが、時空間変動の激しい水蒸気による位相の遅れが大きな誤差要因となっている。このように、様々な用途に高頻度・高密度の水蒸気観測が必要とされている。

### (2) 水蒸気観測技術における課題

地上観測や人工衛星リモートセンシングなど水蒸気観測を行うための技術は多数あるが、それぞれに長所・短所があり現状では上記の高頻度・高密度の要求を満たしていない。全球測位衛星システム(GNSS)は主に位置を計測する技術であるが、同時に水蒸気を計測する有効な手段としても知られている<sup>[1]</sup>。地震国である日本では、国土地理院が約1,300地点の電子基準点等からなるGNSS連続観測システムGEONETを構築しており、水蒸気観測網としても活躍している。しかし、約20kmの観測点間隔は上記目的には未だ十分とはいえない。さらに高密度な観測網を構築する上で、現実的な制約のひとつは受信機システム自身、および受信局の整備コストである。

## 2. 研究の目的

豪雨の早期検知などの観点から、高頻度・高密度の水蒸気観測が必要とされている。近年入手可能となり、様々な分野で応用が進められている低コストGNSS受信機<sup>[2]</sup>による水蒸気観測が十分な精度を有すれば、固定観測点の増加により高密度の水蒸気観測網を構築できる。また、車載状態での観測が可能となれば、将来的にコネクテッドカーが普及した際には動的な水蒸気観測網へ発展する可能性もある。本研究では、2周波の低コストGNSS受信機を用いた水蒸気計測システムを構築し、固定点で天頂大気遅延量(ZTD)と水蒸気量の精度評価を行うとともに、車載状態での位置・姿勢安定性や受信状態などの影響を評価する。これにより、将来の高頻度・高密度水蒸気観測システムの可能性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

低コストGNSS受信機を用いた水蒸気計測システムを、市販の低コスト2周波GNSSモジュールとオープンソースの処理ソフトウェアにより構築する。この低コストシステムを用いて、まず固定点におけるZTDの測定と評価を実施する。大学建物屋上に低コストシステムおよび高精度システムを設置し、近傍の電子基準点のデータと比較することによりZTD推定値の精度評価を行う。次に、ラジオゾンデによる定期的な高層気象観測が実施される気象庁松江地方気象台の敷地内に低コストGNSS受信機システムを設置し、ラジオゾンデ観測との長期比較により可降水量(PWC)の直接比較実験を行う。続いて、低コストシステムおよび高精度システムを自動車に搭載し、電子基準点周辺において車載状態での計測を行い、受信状態や自動車の位置・姿勢などの条件とZTD推定値との関係を調査する。最後に研究のまとめとして、将来の水蒸気高密度観測網の構築に関する考察を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 低コストGNSS受信機システムの構築とZTD推定性能評価

市販の低コスト2周波GNSSモジュール(u-blox製:ZED-F9P)、2周波アンテナ(小峰無線電機株式会社製:QZG12fQ)、シングルボードコンピュータ(Raspberry Pi)、およびオープンソースのRTKLIB<sup>[3]</sup>のrtkrcvプログラムを用いて低コストGNSS受信機システム(以下、低コストシステム)を構成した。ZED-F9Pは複数のGNSS衛星信号を受信できるが、L2帯で受信できる信号はL2Cのみであり、GPSについては受信可能な衛星数が制約される。性能比較用の高性能システムとして高精度受信機(NovAtel製:PwrPak7)と高精度3周波アンテナ(NovAtel製:GNSS-850)を用いた。両システムを山口大学常盤キャンパス建物屋上に設置して同時観測を行い、約2.5km離れた位置にある電子基準点(宇部)のデータを基準として比較した。まず、2021年2月18日~6月6日にかけて長期比較実験を行った。次に、アンテナと受信機に起因する誤差を分離するために分配器を用いてアンテナ・受信機の全ての組み合わせについて評価を実施した(2021年7月1日~8月5日)。処理ではGPS衛星のみを対象とし、軌道情報等としてIGS速報暦、海洋潮汐補正はNAO.99bモデルで計算された結果、アンテナの位相中心変動(PCV)補正については、低コストシステムはNGSが提供する補正情報、電子基準点は国土地理院が提供する補正

情報を用いて、RTKLIB の rnx2rtkp プログラムを用いたスタティック単独精密測位 (PPP-static) により ZTD を求めた。図 1 に、アンテナ・受信機の組み合わせ毎に電子基準点との ZTD 散布図を示す。二乗平均平方根誤差 (RMSE), バイアス (BIAS), 及び標準偏差 (STD) の値を付している。L2C 信号を送出しない GPS Block IIR 衛星を除いて低コスト・高精度システム間で衛星数を揃えている。アンテナ毎に観測期間が異なるためデータの分布は異なるが、標準偏差は受信機・アンテナの組み合わせによらずほぼ同一であった。低コストアンテナを用いた場合にややバイアスが増加する傾向がみられたが、顕著ではない。また、長期比較実験の結果では低コストシステムでやや低い精度を示したが、その場合でも電子基準点の ZTD に対する標準偏差は 4.9 mm (PWC 換算で約 0.7 mm) 程度であり、高精度システムを用いた電子基準点 PWC のラジオゾンデ測定に対する誤差が 2 mm 程度であることを考えると、低コストシステムによる追加誤差は誤差伝搬から許容範囲であると推測された。低コストアンテナ使用時にみられたバイアスが PCV に起因すると想定し、低コスト・高精度システム間で短基線解析を行い、高精度アンテナを基準とした PCV 相対校正<sup>[4]</sup>を試みた。しかしながら、この方法ではバイアスの改善にはつながらなかった。

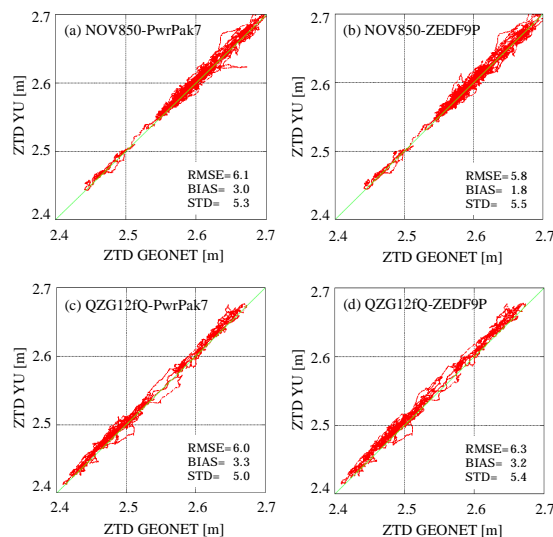


図 1 アンテナ・受信機比較実験の結果

## (2) ラジオゾンデ比較による PWC 直接検証

気象庁松江地方気象台のご協力を得て、ZTD 推定性能評価時とほぼ同様の低コストシステムを気象台庁舎屋上に設置させていただき、2021 年 12 月 14 日から連続観測を開始した。図 2 にシステムの設置状況を示す。3G 回線により遠隔で機器監視とデータ取得を行った。設置直後の受信状態は芳しくなかったが、その後近隣の携帯基地局の停波に伴い良好に転じた。ZTD 推定に際し、GPS 単体解析では IGS 最終暦、GLONASS を含むマルチ GNSS 解析では CODE 最終暦を使用した。松江地方気象台では世界時 00・12 時にラジオゾンデによる高層気象観測が行われており、このデータから PWC を算出して直接的な検証を行った。ZTD を PWC へ変換する際に必要な地上気温・気圧として、同気象台における測定値を用いた。また、変換時に用いる加重平均気温と地上気温の関係式を作成するため、2020 年 8 月から 2022 年 7 月の 2 年間に国内 16 ヶ所の気象官署で取得された高層気象データと、同時期の地上気温を用いた。比較対象として、直線距離で約 2.8 km の位置に設置されている電子基準点 (松江) のデータからも PWC を推定して比較した。



図 2 松江地方気象台における低コストシステム設置状況

冬季から秋季にわたる連続観測により、解析期間における可降水量は 5~65 mm の値を取り、国内で観測される PWC の範囲をほぼ網羅することができた。図 3 にラジオゾンデ PWC と GNSS PWC の散布図を、低コストシステム・電子基準点、および使用衛星条件毎に示した。低コストシステムは GPS/GLONASS 使用時において 1.2 mm 程度の標準偏差を示し、電子基準点と比較して遜色のない PWC 推定性能を有することが分かった。しかし、約 -1.2 mm のバイアスが生じている。このバイアスは ZTD 推定の段階で生じているが、事前に実施した ZTD 推定性能評価時の結果とは整合性がなく現時点では原因を特定できていない。PWC 推定においては経験的

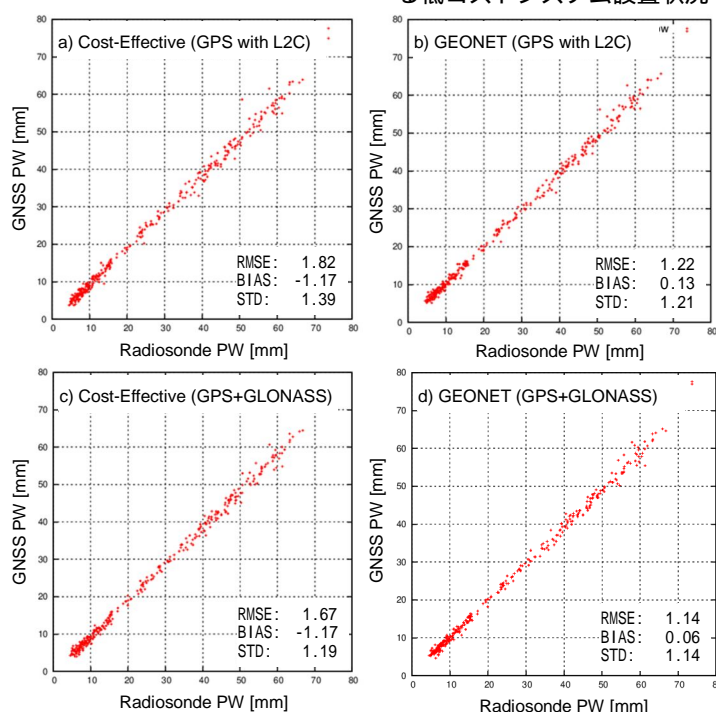


図 3 ラジオゾンデ PWC による GNSS PWV の直接検証結果

なバイアス除去により十分に利用可能であるが、個体差の有無などさらに検討を進める必要がある。また、GPS 単体時よりも GLONASS を含むマルチ GNSS 条件において標準偏差が改善している。これは、現時点では L2C 信号を送出する GPS 衛星に制約があり衛星数が少なかったことが理由であると考えられる。今後、GPS は L2C 信号を送出する次世代機と順次置き換えられていくこと、およびマルチ GNSS の利用環境がさらに整備されていくと考えられることから、低コストシステムは十分に PWC 推定に利用できると考えられる。

### (3) 車載実験による ZTD 推定性能評価

車載実験については、低コストシステムと高精度システムの同時搭載、および低コストシステム単体の搭載実験を行ったが、システムの違いは ZTD 推定結果を評価する上で大きな要素ではなかったため、以下では低コストシステム単体の結果について述べる。車載実験では搭載性の観点からさらに安価なアンテナ (u-blox 製: ANN-MB) を用いた。4 日間の実験期間中に 1 秒間隔で連続測定を行い、毎日昼間の数時間に走行時データ、夜間を含む他の時間帯は停止状態のデータを継続的に取得した。山口大学常盤キャンパスを起点とし、半径約 30 km の範囲内に走行ルートを設定してデータを取得した。比較対象として周辺の電子基準点 (宇部、山陽、および美東) のデータを用いた。図 4 に走行ルートの一例と周辺の電子基準点の位置を示す。色は受信した GPS 衛星数であり、緑が 7 機以上、黄色が 5・6 機、赤が 4 機を示す。山間部では視界が制約され受信衛星数が少ないことが分かる。電子基準点データについては PPP-static、車載実験データについてはキネマティック単独精密測位 (PPP-kinematic) を用いて ZTD 算出を試行した。車載用に用いたアンテナの PCV 補正情報は測定されていないため、処理時の補正は実施していない。大学の建物等による影響で、停止状態時であっても視野の状態は完全ではなく、正常な ZTD 推定にはマルチ GNSS 処理が必須であった。夜間の停止状態時の ZTD 算出値は、周辺 3 点の電子基準点における ZTD 算出値のばらつきの範囲程度で合致した。しかし走行時間帯は、特に走行状況の変化が著しい場合に位置推定精度と連動する大きな変動が見られた。結果的に、現時点では車載型の低コストシステムによる PWC 推定について満足な結果を示すには至っていない。船舶搭載観測における良好な精度は既に報告されており、気象庁観測船等で洋上の水蒸気を捉えるために利用されている<sup>[5]</sup>。車載観測は様々な観点で船舶搭載観測より条件が厳しいが、宅配車や公共交通機関など低速走行や停止状態の時間帯が多い移動体での観測可能性もある。今後さらに詳細評価を行うとともに、みちびきの補強信号の利用についても検討してみたいと考えている。

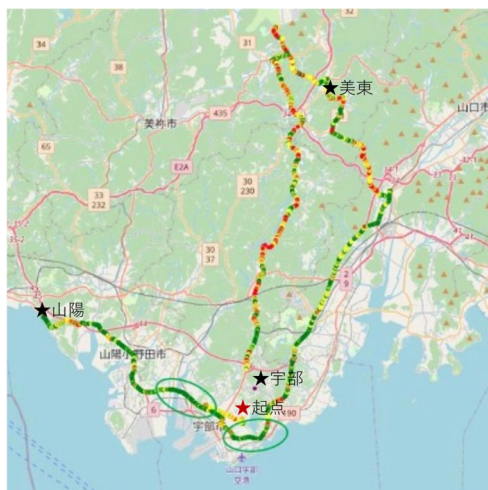


図 4 走行ルートの例と周辺電子基準点

的に、現時点では車載型の低コストシステムによる PWC 推定について満足な結果を示すには至っていない。船舶搭載観測における良好な精度は既に報告されており、気象庁観測船等で洋上の水蒸気を捉えるために利用されている<sup>[5]</sup>。車載観測は様々な観点で船舶搭載観測より条件が厳しいが、宅配車や公共交通機関など低速走行や停止状態の時間帯が多い移動体での観測可能性もある。今後さらに詳細評価を行うとともに、みちびきの補強信号の利用についても検討してみたいと考えている。

### (4) まとめ

高頻度・高密度の水蒸気観測システムの構築に資することを目標として、観測点の高密度化に貢献できると考えられる低コストシステムの PWC 推定性能を評価した。ラジオゾンデ観測との直接比較により、低コストシステムは電子基準点等の高精度システムとほぼ同等の PWC 推定性能を持つことが分かった。車載状態での PWC 推定性能については道半ばであるが、少なくとも固定観測点の増加による高密度観測網の構築には十分活用できると考えられる。本研究の期間中、民間会社が設置している 3,300 点以上の独自基準点の宇宙地球科学用途の利活用についてコンソーシアムが設立されるなど周囲環境は変わりつつあるが、利用者が独自目的のためにさらなる高密度化を図る上で低コストシステムの利用意義は以前高いと考えられる。

#### <参考文献>

- [1] 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,pp.15-33,1998.
- [2] 小門研亮,“測地分野での応用に向けた低価格 GNSS 機器の性能評価,”測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム 2020,2020 年 10 月.
- [3] T. Takasu and A. Yasuda,“Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB,”International Symposium on GPS/GNSS,Jeju, Korea, November 2009.
- [4] A. Kriemeyer, H. van der Marel, N. van de Giesen, and M.-C. ten Veldhuis,“High quality zenith tropospheric delay estimation using a low-cost dual-frequency receiver and relative antenna calibration,”Remote Sens., 12 (9), 1393, 2020.
- [5] Y. Shoji, K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda,“Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan,”Earth, Planets, and Space, 69, 153, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 今岡啓治, 乗富隆
2. 発表標題 低コストGNSS受信機システムによる天頂大気遅延量の推定性能
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第71回（令和3年度秋季）学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Noritomi, K. Imaoka, H. Shingin, and K. Ogawara
2. 発表標題 Validation of precipitable water estimates derived by a cost-effective dual-frequency GNSS receiver system
3. 学会等名 The 42nd Asian Conference on Remote Sensing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹田大騎, 今岡啓治, 新銀秀徳, 小河原加久治
2. 発表標題 低コストGNSS受信機システムによる可降水量推定精度検証
3. 学会等名 測位航法学会GPS/GNSSシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Takeda, K. Imaoka, H. Shingin, and K. Ogawara
2. 発表標題 Validation of precipitable water estimated by using cost-effective GNSS receiver system Validation of precipitable water estimated by using cost-effective GNSS receiver system
3. 学会等名 The 43rd Asian Conference on Remote Sensing (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小河原 加久治 (Ogawara Kakuji)  (70211125)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授  (15501)	
研究協力者	新銀 秀徳 (Shingin Hidenori)  (60535243)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授  (15501)	
研究協力者	乗富 隆 (Noritomi Ryu)	山口大学・大学院創成科学研究科  (15501)	
研究協力者	竹田 大騎 (Takeda Taiki)	山口大学・大学院創成科学研究科  (15501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------