

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02420

研究課題名(和文) 船舶搭載GNSSによる東シナ海水蒸気、波浪、海面高度の観測

研究課題名(英文) Observation of water vapor, wave height, and sea level in the East China Sea using ship-borne GNSS measurements

研究代表者

小司 禎教 (Shoji, Yoshinori)

気象庁気象研究所・気象観測研究部・研究官

研究者番号：70354446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,260,000円

研究成果の概要(和文)：移動体精密単独測位(Kinematic PPP)の鉛直座標解に、(1)解析時間長、(2)解の更新時間間隔および、(3)大気遅延量の時間拘束に依存したバイアスが存在し、GNSS解析による可降水量(PWV)推定誤差と密接に関係していることがわかった。上記3条件を変えた解析試験を行うことで、先行研究で課題とされた(1)不自然な時間変動と(2)PWV値が高い環境下で強まる過小評価傾向を改善できた。本課題の解析手法が、気象庁で2021年度、2022年度に搭載を行った船舶GNSS装置に実装された。さらに、本課題の解析手法が、有義波高や副振動などの推定には有望な観測技術となりうることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

精密衛星測位の一手法である精密単独測位は、全球で適用可能な測位手法である。移動体の鉛直座標精度評価は十分になされていない。本研究の結果、固定点の測位解析に比べて誤差が大きく、また解析手法のわずかな違いが大きく影響することが判明した。GNSSを用いた大気計測の精度は、測位精度と不可分な関係にあり、本研究で得られた知見は、衛星測地学分野への問題提起にとどまらず、課題解決に向けた衛星測地分野と大気研究分野の学際協力の必要性を提起する。本研究の成果は気象庁の船舶搭載GNSSによる海上水蒸気観測に採用された。豪雨の機構解明や予測精度改善を通じて災害軽減に資することが期待される。

研究成果の概要(英文)：It was found that the vertical coordinate solution of Kinematic Precise Point Positioning has biases that depend on time length of batch processing, solution update time interval, and time constraint of atmospheric delay, which are closely related to the estimation error of GNSS derived precipitable water vapor (PWV). By conducting analysis tests while modifying the aforementioned three conditions, we were able to mitigate two issues highlighted in a previous study: (1) unnatural time variation of GNSS derived PWV and (2) the tendency of GNSS derived PWV to underestimate, which became more pronounced in high PWV environments. The analysis method obtained in this project was adopted in the implementation of ship-based GNSS system carried out by the Japan Meteorological Agency in FY2021 and FY2022. Furthermore, it was found that the analysis method obtained in this work could be a promising observation technique for estimating significant wave heights and secondary undulations.

研究分野：気象学

キーワード：海上水蒸気観測 GNSS 移動体測位

1. 研究開始当初の背景

(1) 平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 30 年 7 月豪雨、令和 2 年 7 月豪雨など、近年記録的な豪雨災害が頻発している。豪雨をもたらす線状降水帯(発達した積乱雲が列をなし、同じ場所に数時間にわたって強い雨をもたらす)の発生や維持にとり、上流に位置する海上における大気下層の水蒸気が重要な役割を果たす。しかし海上の観測は十分ではなく、その機構解明や監視・予測の改善にとって課題であった。

(2) 全球航法衛星システム(Global Navigation Satellite System, GNSS)は、位置情報の基盤として生活に浸透している。測位衛星から送信される搬送波(測位電波)が水蒸気量に応じて遅れる性質を利用し、水蒸気センサーとして気象学や気象業務に応用されている(GNSS 気象学)。気象庁は国土地理院が運用する世界最高密度の GNSS 観測網である GEONET(GNSS Earth Observation Network System)を利用し、2009 年 10 月より、日本列島の鉛直積算水蒸気量(可降水量、Precipitable Water Vapor, PWV)を連続解析し、天気予報に利用している。

(3) GNSS 測位の高精度化が進む中、移動体に設置した GNSS 装置を用いた PWV 解析の精度も向上してきた。さらに日本の準天頂衛星システム(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)が 2017 年 12 月より技術実証として、高精度測位補正技術 MADOCA(Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)による衛星軌道補正情報(MADOCA 補正情報)のリアルタイム配信を開始し、海上での GNSS 観測から PWV を解析する環境も整いつつあった。Shoji et al. (2017)は、船舶搭載 GNSS 装置(以下“船舶 GNSS”)による PWV 解析値を、高層ゾンデ観測と比較し、系統差(bias) -0.7 mm、二乗平均平方根(Root Mean Square, RMS)差 1.7 mm という、高い一致度を得た。一方で不自然に大きな時間変動と、PWV が大きい環境下ほど過小評価の傾向が強くなるという課題があった。

2. 研究の目的

本研究は、災害を引き起こす豪雨の機構解明に課題の一つとなっていた海上の水蒸気観測を、最新の GNSS 技術を駆使して実現することを主目的とし、同時に測位装置としての GNSS の活用を図るべく、波浪、黒潮流軸、高潮や津波等に関連の深い海面高度も海上で同時観測するシステムの可能性を評価する基礎研究を目的とした。

そのためには、GNSS PWV の誤差は鉛直測位誤差と逆比例の関係にある(Santerre, 1991; Shoji et al. 2000)ことから、Shoji et al. (2017)の課題を解決するとともに、海上での GNSS 解析による鉛直測位精度との関係を明らかにすることが重要である。

3. 研究の方法

精密衛星測位手法には大きく基準局からの相対位置を求める干渉測位と精密単独測位(Precise Point Positioning, PPP)がある。海上での GNSS 測位では、データ通信に制限があり、また近傍に参照できる固定 GNSS 点が存在しない場合が多いため、GNSS 観測で得られた搬送波位相と MADOCA 補正情報を用いた移動体精密単独測位(Kinematic PPP)を用いることが現実的である。本課題では以下の方法で研究を行った。

- (1) 地上の固定 GNSS 点を船舶 GNSS と同じ Kinematic PPP による解析をすることで、海上での鉛直座標精度の評価を行う。
- (2) 気象庁海洋気象観測船や貨物船等(第 1 表)に GNSS 装置を設置し、大気遅延量の時間拘束条件、解析時間、解析時間間隔を変更した Kinematic PPP 解析を行い、PWV を推定し気象庁メソ解析(MA)による PWV と比較することで、最適な解析オプションを探る。
- (3) (1)と(2)の結果から、船舶搭載 GNSS 装置を用いた場合の最適な観測、解析手法を決定し、船舶への実装を行い、他観測との比較により結果を評価する。
- (4) 合わせて海面高度計測の可能性を考察する。

第 1 表 GNSS 装置を設置した船舶

船	所属
かりゆし	琉球海運株式会社
ちゅらしま	
わかなた	
なは 2	丸三海運株式会社
みいかじ	
りゅうなん	鹿児島荷役海陸運輸株式会社、南日本汽船株式会社
陽光丸	水産研究・教育機構
凌風丸	気象庁
啓風丸	

4. 研究成果

4.1 Kinematic PPP 解析による鉛直測位精度の評価

気象研究所(茨城県つくば市)露場の固定 GNSS 点で 2021 年 12 月 1 日から同 16 日にかけて 10Hz 観測を行った。受信機はコア製 Chronosphere L6II、アンテナは Septentrio 製 PolaNt-x MF(第 1 図)である。

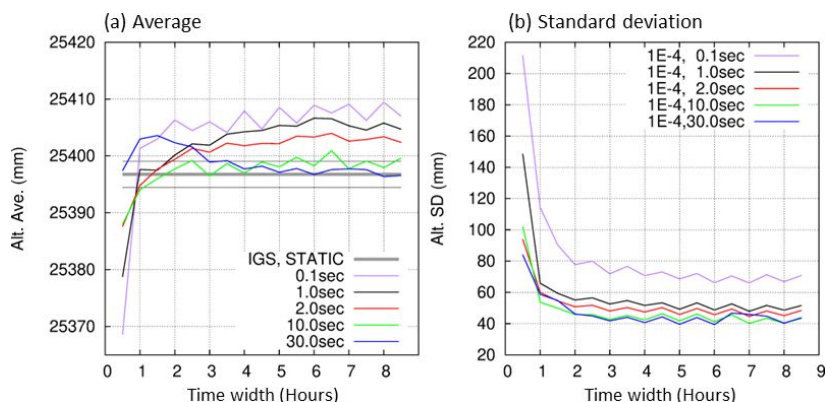
得られた搬送波位相を用い、解析時間間



第 1 図 気象研究所露場の GNSS アンテナ

隔を 0.1~30 秒の範囲で変えながら Kinematic PPP 解析を行った。解析には RTKLIB 2.4.3 b33 を用い、Kinematic PPP 解析の標準的なオプションを用いた。軌道情報には放送暦と、JAXA の公開する MADOCA 補正情報 (リアルタイムプロダクト) を用いた。解析時間は 9 時間で、0.5~8.5 時間の範囲において 0.5 時間間隔で、16 日間で得られた鉛直座標の平均と標準偏差を計算した。

第 2 図は、解析時間、解析時間間隔に依存する鉛直座標解の変化を示す。(a)は平均座標、(b)は標準偏差である。第 2 図(a)の灰直線とその上下の細実線は、国際 GNSS 事業(International GNSS Service, IGS)による精密暦を用いた Static PPP による平均鉛直座標と ± 1 の鉛直座標値を示している。



第 2 図 解析時間 (横軸) 別、解析時間間隔 (線の色) 別に見た、(a) 鉛直座標解の平均と(b)標準偏差(Shoji et al. (2023), Fig. 12)。

Kinematic PPP による鉛直座標解は、解析開始時には過小評価の傾向

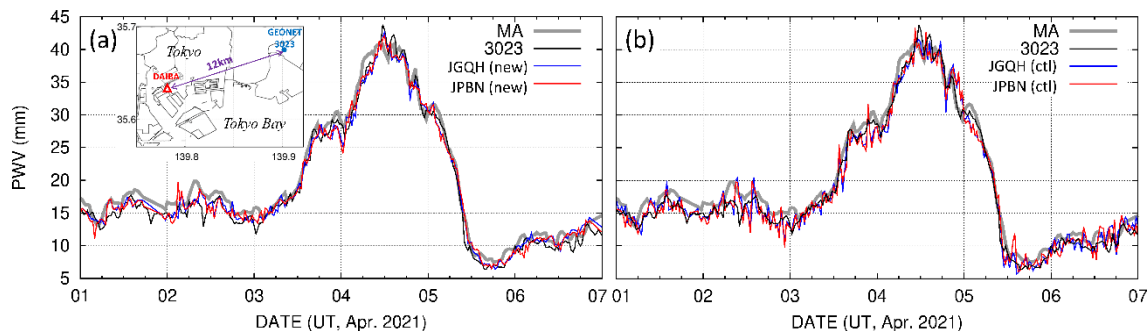
にあり、解析時間が長くなるほど、鉛直座標解が上昇していく。特に解析時間間隔が 2 秒以下の場合は解析時間が 2 時間を超えると、Static PPP 解より高い鉛直座標が解析される傾向にある。その傾向は、解析時間間隔が短いほど顕著である。また、鉛直座標の座標解の標準偏差は、解析時間間隔が短いほど大きい傾向にある。

これらの結果は、Kinematic PPP において、高時間間隔の解析が、必ずしも高精度の測位につながらず、PWV の解析にもバイアスをもたらす可能性を示唆している。

高頻度の解析ほど、鉛直座標解にバイアスが生じる要因としては、衛星時計誤差やマルチパスの影響により、時間相関を持つ誤差の存在が考えられるが、今後より詳細な解析が必要である。

4.2 海上での PWV 推定のための船舶搭載 GNSS 観測・解析の最適化

PPP 解析では、水蒸気を含む中性大気による電波の遅れを random walk 過程とみなし、一定の時間拘束を与えて推定することが一般的である。最適な時間拘束条件は地域や季節によって変化するため、先行研究では複数の時間拘束条件が使用されてきた。Shoji et al. (2017)では、解析に用いた RTKLIB のデフォルトの時間拘束 ($1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1/2}$) を適用して解析を行った。本研究では、改めて時間拘束を $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ の範囲で変化させ、近傍の地上固定 GNSS 点で得られた PWV の時系列との比較を行った。その結果、時間拘束の値を $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ とすることで、最も地上 GNSS 点の PWV と一致度が高くなるという結果を得た。第 3 図は 2 隻の気象庁海洋気象観測船 (凌風丸(JGQH)と、啓風丸(JPBN)) が母港の東京都お台場に停泊中に解析された PWV の時系列である。時間拘束を $1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1/2}$ とした(b)の場合、船舶 GNSS の PWV のみ、近傍の地上固定 GNSS 点や MA の PWV と比べ、10 分から数 10 分周期の変動が卓越している。時間拘束を $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ とした(a)では、(b)に見られる船舶 GNSS に特有の時間変動は抑制され、地上固定 GNSS や MA との一致度が増している。時間拘束 $1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1/2}$ は、固定 GNSS 点を測位解析する static PPP でも採用されている値である。Kinematic PPP 解析で、static PPP と同じ時間拘束条件を適用しても、必ずしも PWV の最適な解析につながらない。測位解析結果も同様で、4.1 節の解析を、時間拘束を $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ に変えて行くと、鉛直座標解の解析毎のばらつきが小さくなる (図省略)。鉛直座標と遅延量には相関があり、Kinematic PPP の場合両者の分離が難しいことを示している。



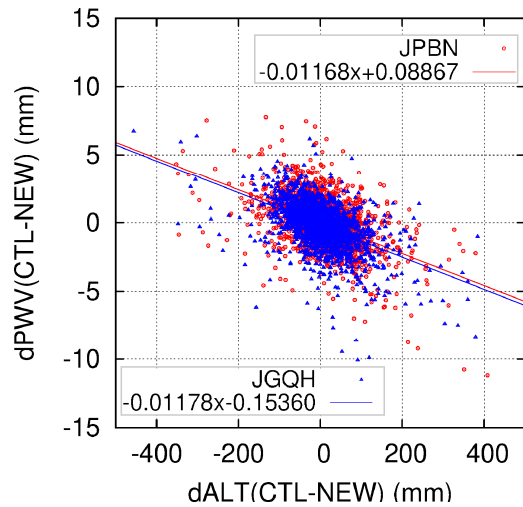
第 3 図 PWV 時系列(2021 年 4 月 1~16 日)。灰太線: MA。黒実線: GEONET 点(3023、千葉市川)。青: 凌風丸(JGQH)搭載 GNSS。赤: 啓風丸(JPBN)搭載 GNSS。凌風丸、啓風丸の解析結果は、(a)は本研究による新しい設定による解析結果。(b)は Shoji et al. (2017)の手法を用いた結果。(Shoji et al. (2023), Fig. 7)

第 4 図は 2021 年 4 月 1 日~7 月 22 日の間、凌風丸、啓風丸が各々お台場に停泊時、時間拘束

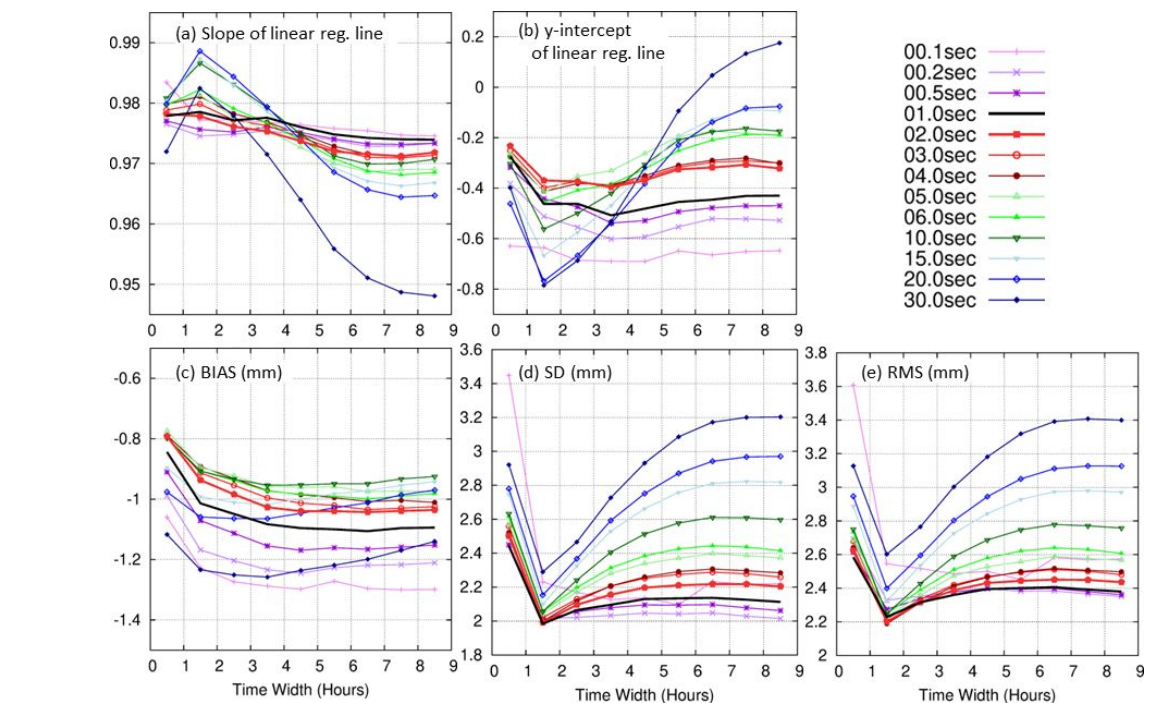
を $1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1/2}$ とした場合と、 $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ とした場合に生じた船舶 GNSS の鉛直座標解(標高換算)の差と同時に解析された PWV の差の散布図である。各船の GNSS 装置は独立しているが、線形回帰直線は共通の特徴を有している。大まかに、鉛直座標解が 10 cm 過大(小)の場合、PWV は 1 mm 程度過小(大)に解析されている。第 2 図では、解析時間間隔が 2 秒より細かい場合、鉛直座標解が過大評価の傾向にあり、解析時間間隔が細かいほどその傾向が強い。Shoji et al. (2017) の場合、解析時間は 3 時間以上、解析時間間隔は 1 秒であった。PWV の過小評価を抑制するためにはより短い解析時間にとどめる必要性が示唆される。

船舶 GNSS による PWV 推定のための最適な観測、解析方法を検討するため、2020 年 10 月 22 日 ~ 11 月 20 日に、東シナ海を航行する貨物船「わかなつ」と「りゅうなん」に設置した GNSS 装置を用いて、観測のサンプリング間隔を 10 Hz にした試験観測を行った。解析時間を 0.5~8.5 時間の範囲で変え、解析時間間隔は 0.1~30 秒の範囲で変更させた測位解析から PWV を推定し、評価を行った。観測の希薄な海上観測の場合、十分な量の参照値(reference)を他の観測から得ることは難しい。そこで、30 分間隔で日本周辺の PWV 解析値が得られる MA を参照値とした。この時、遅延量の時間拘束は、前節の結果を受け、 $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ とした。第 5 図はその結果であるが、下記のような特徴が見いだせる。

- (1) 回帰係数(線形回帰直線の傾き)は解析時間 1.5 時間を超えると、小さくなっていく。一方で切片は解析時間 1.5 時間より長いほどゼロに近づく。この傾向は解析時間間隔が長いほど顕著である。
- (2) 解析時間間隔が 5 秒より短い場合、解析時間が長くなるほど、負バイアスが増大する傾向にある。
- (3) 解析時間間隔によらず、差の標準偏差(SD)や RMS 差は解析時間 1.5 時間で極小となり、それより解析時間が短くても、長くても 1.5 時間解析のそれより大きくなる。解析時間間隔が 2 秒程度で解析時間が 1.5 時間の場合、標準偏差や RMS が最も小さくなる。



第 4 図 パラメータを変えた船舶搭載 GNSS 解析で得られた鉛直座標差と PWV 差の散布図。大まかに鉛直座標が 10cm 過大(小)の場合、PWV は 1mm 過小(大)となっている。(Shoji et al. (2023), Fig. 10)



第 5 図 異なる解析時間(x 軸)、解析時間間隔(線の色)による船舶 GNSS PWV の MA との比較結果。(a) 線形回帰直線の回帰係数、(b) 線形回帰直線の切片、(c) バイアス、(d) 標準偏差、(e) RMS 差。(Shoji et al. (2023), Fig. 5)

以上の特徴は、解析時間が 1.5 時間未満の場合は十分に測位解析が収束していないこと、解析時間間隔が 2 時間を超えると、2 秒より解析時間間隔が短い場合は、反射波等時間相関する誤差の影響を受け、解析時間間隔が長い場合は移動するアンテナの位置が十分な精度で解析で

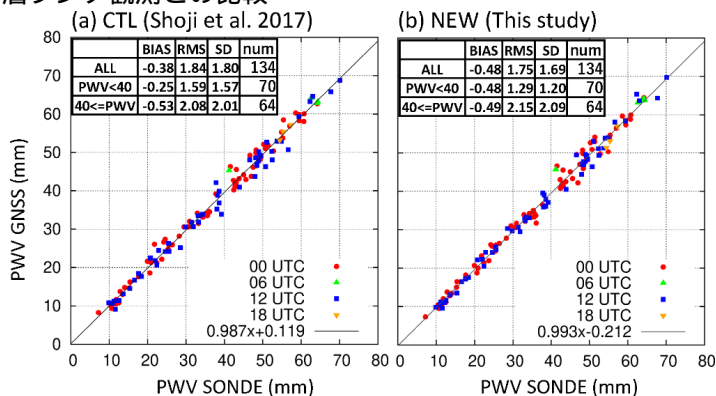
きていない可能性があること、などを反映していると思われる。

本調査の結果、時間拘束 $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ 、解析時間間隔 2 秒で解析時間 1.5 時間の解析が、調査した組み合わせの中で最も MA との一致度が高い解析方法とし、次節の船舶 GNSS リアルタイム解析システムに採用した (4.3 節)。

4.3 船舶搭載 GNSS 装置、および高層ゾンデ観測との比較

第 6 図は凌風丸船上での高層ゾンデ観測による PWV と、GNSS PWV との比較結果である。PWV が 40 mm 未満の場合に負バイアスが 0.2 mm ほど増大し、40 mm 以上の場合は減少し、全体として PWV の多少によるバイアスの変化は Shoji et al. 2017 の手法より抑制されている。その結果、回帰係数も 1 に近づき、RMS と標準偏差 (SD) とも小さくなっている。近傍の GNSS 点、および衛星搭載マイクロ波放射計との比較でも同様の改善を確認できた (図省略)。

本課題の成果を受けて 2021 年 3 月、気象庁海洋気象観測船に船上 GNSS 解析装置が設置された。



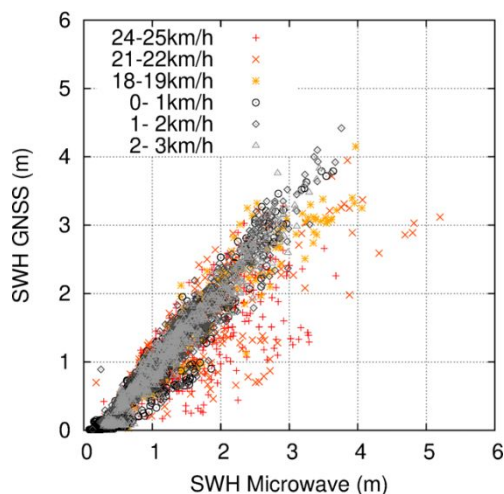
第 6 図 気象庁海洋気象観測船凌風丸船上で 2019-2020 年に放球された高層ゾンデ観測による PWV と、船上 GNSS 解析による PWV との比較。GNSS PWV は放球時刻から 30 分平均。(a)Shoji et al. 2017 の方法で解析した結果。(b)本課題の解析手法で解析した結果。(Shoji et al. (2023), Fig. 6)

4.4 海面高度の計測

Kinematic PPP により解析された GNSS アンテナの標高の変化から、20 分間隔で上位 3 分の 1 の振幅の平均を計算し、マイクロ波式波高計による有義波高との比較を行った。第 7 図は啓風丸の結果である。船の速度が 3 km/h 以下の場合には両者は数 10 cm 程度の範囲で一致している。船の速度が 20 km/h を超える場合、GNSS から推定した有義波高は、マイクロ波式波高計に対して過小評価の頻度が増加している。一つの要因として、船体の傾きの影響が考えられる。傾斜計を併設して、船体の傾きの影響補正を試みたが、まだ有効な手法の確立に至っていない。

この他、2019 年 3 月 21 日に長崎港で発生したあびき (副振動) に関連して、同日の長崎漁港 (長崎市多以良町) に停泊中の陽光丸 (水産研究・教育機構) に設置した GNSS 装置でも、振幅数 10 cm の海面変動を計測した。

波浪や副振動等の解析には、船体の傾きの影響補正が今後の課題である。また、海面高度の絶対値を解析するためには、GNSS アンテナの喫水からの高度を把握する必要がある。



第 7 図 啓風丸の波浪計による有義波高と、GNSS アンテナの標高変化から計算した有義波高。2021 年 4~12 月。船の進行速度によって色分けしている。

謝辞

船上への GNSS 装置の設置、観測、およびデータ回収時の立ち入りなど、本研究の遂行に際し、下記の機関より多大なるご協力を賜りました。心より感謝を申し上げます。
(敬称略) 水産研究・教育機構、鹿児島荷役海陸運輸株式会社、南日本汽船株式会社、丸三海運株式会社、琉球海運株式会社。

引用文献

Santerre, R., 1991: Impact of GPS satellite sky distribution, *Manuscripta Geodaetica*, **16**, 28-53.
 Shoji, Y., J. Miura, S. Tsubaki, Y. Higashi, S. Hibino, A. Kojima, T. Nakamura, and K. Shutta, 2023: A study on analysis setting optimization of ship-based GNSS measurements for maritime precipitable water vapor monitoring. *J. Meteor. Soc. Japan*, **101**. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-020>
 Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan, *Earth, Planets Space*, **69**, 153. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0740-1>
 Shoji, Y., H. Nakamura, K. Aonashi, A. Ichiki, and H. Seko, 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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshinori Shoji, Jinya Miura, Shuji Tsubaki, Yoshikazu Higashi, Sho Hibino, Atsushi Kojima, Tetsuya Nakamura, Keizo Shutta	4. 巻 101
2. 論文標題 A study on analysis setting optimization of ship-based GNSS measurements for maritime precipitable water vapor monitoring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/jmsj.2023-020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yasutaka Ikuta, Hiromu Seko, Yoshinori Shoji	4. 巻 148
2. 論文標題 Assimilation of shipborne precipitable water vapour by Global Navigation Satellite Systems for extreme precipitation events	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 57-75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/qj.4192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Satoru Yoshida, Tetsu Sakai, Tomohiro Nagai, Yasutaka Ikuta, Yoshinori Shoji, Hiromu Seko, Koichi Shiraishi	4. 巻 150
2. 論文標題 Lidar observations and data assimilation of low-level moist inflows causing severe local rainfall associated with a mesoscale convective system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/MWR-D-21-0213.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小司禎教	4. 巻 47
2. 論文標題 GPS/GNSS気象学について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会 協議会だより	6. 最初と最後の頁 3-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seko Hiromu and Yoshinori Shoji	4. 巻 50
2. 論文標題 Impact of Data Assimilation of Shipborne GNSS Data on Rainfall Forecast (Part 2)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CAS/JSC WGNE WGNE Research Activities in Earth System Modelling	6. 最初と最後の頁 1-19-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momoji Masahiro, Kudo Rei, Aoki Kazuma, Mori Tatsuhiro, Miura Kazuhiko, Okamoto Hiroshi, Irie Hitoshi, Shoji Yoshinori, Uchiyama Akihiro, Ijima Osamu, Takano Matsumi, Nakajima Teruyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of on-site self-calibration and retrieval methods for sky-radiometer observations of precipitable water vapor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Atmospheric Measurement Techniques	6. 最初と最後の頁 2635 ~ 2658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/amt-13-2635-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 酒井 哲, 吉田 智, 永井 智広, 小司禎教	4. 巻 48
2. 論文標題 豪雨予測に向けた水蒸気ライダーの開発と観測データを用いた研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 595-598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yabuki, M., T. Tsuda, Y. Kawano, Y. Tottori, M. Tsukamoto, and E. Takeuchi	4. 巻 237
2. 論文標題 A Raman Lidar with a Deep Ultraviolet Laser for Continuous Water Vapor Profiling in the Atmospheric Boundary Layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 3001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202023703001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 矢吹正教, 松木一人, 内保祐一, 竹内栄治, 長谷川壽一
2. 発表標題 気温計測用回転ラマンライダーのための多波長分光検出器の開発
3. 学会等名 第40回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yabuki, M., K. Matsuki, Y. Uchiho, E. Takeuchi and T. Hasegawa
2. 発表標題 Optical Design of Rotational Raman Lidar Based on Double-Grating Spectrometer for Profiling the Atmospheric Temperature in the Lower Troposphere
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 IGS第3次再解析を用いたGNSS可降水量再解析
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小司禎教, 椿修二, 日比野祥, 小嶋惇, 長谷川拓也, 前原孝多, 齊藤一浩, 奥野功之
2. 発表標題 MADOCA-PPP試験データを用いた船舶搭載GNSS可降水量解析
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小司禎教, 三浦基哉, 椿修二, 東吉一, 日比野祥, 小嶋惇, 中村哲也, 習田恵三
2. 発表標題 船舶搭載GNSSによるリアルタイム可降水量解析とその品質管理
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小司禎教, 三浦基哉, 椿修二, 東吉一, 日比野祥, 小嶋惇, 中村哲也, 習田恵三
2. 発表標題 遅延量勾配を用いた船舶搭載GNSS可降水量の品質管理
3. 学会等名 日本気象学会2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 船舶搭載GNSSによる海上可降水量解析最適化の検討
3. 学会等名 日本気象学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 精密衛星測位を用いた大気リモートセンシング
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinori Shoji
2. 発表標題 Optimization of water vapor analysis using ship-borne GNSS measurement
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司禎教、三浦基哉、椿修二、東吉一、日比野祥、小嶋惇、中村哲也、習田恵三
2. 発表標題 Kinematic PPPによるリアルタイム海上可降水量解析
3. 学会等名 GPS/GNSSシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 GPS/GNSS気象学について
3. 学会等名 第18回リアルタイム測位利用技術講習会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 精密衛星測位の気象学、気象業務への利用
3. 学会等名 日本学術会議地球惑星科学委員会地球・人間圏分科会（第25期・第4回）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司禎教、三浦甚哉、椿修二、東吉一、日比野祥、小嶋惇、中村哲也、習田恵三
2. 発表標題 船舶搭載GNSSによるリアルタイム海上可降水量解析
3. 学会等名 日本気象学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小司禎教, 酒井哲, 永井智広, 吉田智
2. 発表標題 首都圏短時間強雨の環境場 - 東風の特徴 -
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 潮汐モデルを用いた船舶GNSS可降水量誤差補正の試み
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 SHOJI, Yoshinori
2. 発表標題 Relationship between errors in ship-borne GNSS derived PWVs and that in vertical coordinates
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小司禎教
2. 発表標題 移動体GNSS解析による可降水量誤差要因の考察
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小司禎教, 清野直子
2. 発表標題 凌風丸による2020年梅雨期東シナ海ゾンデ観測
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢吹正教、柿原逸人、津田敏隆、塚本誠、竹内栄治、長谷川壽一
2. 発表標題 GNSS稠密ネットワークおよびラマンライダーを用いた信楽上空の水蒸気時空間変動の観測
3. 学会等名 第14回MUレーザー・赤道大気レーザーシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本リモートセンシング学会 編	4. 発行年 2023年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 758
3. 書名 リモートセンシング事典（分担執筆：測位衛星を利用した大気観測）	

〔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
研究分担者	津田 敏隆 (Tsuda Toshitaka) (30115886)	京都大学・生存圏研究所・研究員 (14301)	
研究分担者	矢吹 正教 (Ybuki Masanori) (80390590)	京都大学・生存圏研究所・特定研究員 (14301)	

	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	高野 洋雄 (Kohno Nadao)		

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