

## 解 説

# 船舶による海上の GNSS 水蒸気観測について Maritime Water Vapor Observation with Ship-Based GNSS Measurements

大気海洋部 環境・海洋気象課 海上・データ班<sup>1</sup>

### 要 旨

線状降水帯による豪雨の要因となる海上からの水蒸気流入状況を把握するため、気象庁では船舶による海上の全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）水蒸気観測を 2021 年に開始した。船舶を用いた GNSS 水蒸気観測は、現業としては世界初の取組である。

本稿では、2021 年 5 月から 2023 年 2 月にかけて、気象庁海洋気象観測船 2 隻、海上保安庁測量船 4 隻、民間企業の貨物船・フェリー 10 隻、計 16 隻の船舶を用いて順次開始された海上 GNSS 水蒸気観測について紹介する。

第 1 章では、海上 GNSS 水蒸気観測が開始された背景について述べる。第 2 章では観測装置と船舶を、第 3 章では観測システムの概要を解説する。各船で解析されたデータは 10 分ごとにリアルタイムで気象庁に送信され、予報現業及び数値予報モデルで利用されている。また、第 3 章で紹介しきれなかった詳しい観測原理については付録にまとめた。第 4 章ではほかの観測システムによって得られたデータとの比較を示す。高層ゾンデ観測との比較では可降水量の二乗平均平方根にして 2.5 mm 未満という結果を得た。第 5 章では 2022 年 7 月に九州地方において発生した線状降水帯の観測事例について紹介する。

### 1. はじめに

大気の水蒸気を把握する手法の一つとして、GNSS 測位を利用した水蒸気量解析がある。詳しい観測原理は第 3 章及び付録 A で説明するが、本稿では、GNSS 測位データの取得から解析された水蒸気量のリアルタイムな利用までの一連の流れを GNSS 水蒸気観測と呼ぶことにする。GNSS 水蒸気観測の主な特徴は、得られる水蒸気量が観測点直上の鉛直積算量（可降水量、Precipitable

Water Vapor, *PWV*）ではあるものの、高頻度な（例えば 10 分ごとの）観測値が得られるという点である。

気象庁では 2009 年から、国土地理院の電子基準点（現在は全国約 1,300 地点）での GNSS 測位データを収集し、解析された可降水量をメソ数値予報モデル（Meso-Scale Model, MSM）等<sup>2</sup>で活用している（石川, 2010）。このように陸上では時空間的に密な GNSS 水蒸気観測が行われる一方、海

<sup>1</sup> 小司 禎教・日比野 祥・長谷川 拓也・小嶋 惇・椿 修二・齊藤 一浩・奥野 功之・前原 孝多（令和 4 年度在籍）

<sup>2</sup> 2012 年からは局地数値予報モデルでも利用（永戸ほか, 2012）。

（令和 5 年 7 月 31 日発行）

上観測には、電子基準点のような固定測位点が無いことや、1日あたり100MBを超える(測位データで約100MB/日、軌道情報で約25MB/日程度)データの常時送信が困難であることなど、課題が残されていた。

2010年以降、利用可能な測位衛星数の著しい増加、「みちびき(準天頂衛星システム)」からの衛星軌道情報の配信開始等、GNSS技術は目ざましい発展を遂げている。これらの技術革新は、移動体である船上での高精度なGNSS測位データの解析を可能とした(Shoji *et al.*, 2017)。さらには、数値予報モデルへの同化実験により、船上で観測されたGNSS可降水量が線状降水帯予測に大きなインパクトを与えることが示された(Ikuta *et al.*, 2022)。

近年度々発生している豪雨の多くで確認される線状降水帯は、海上から陸上へと大量の水蒸気が継続的に供給されることで発生すると考えられるため、その発生予測には流入源である海上での水蒸気量を把握することが重要である。海上での観測技術開発の進展を受け、気象庁では2021年から、線状降水帯の予測精度の向上のための気象観測・監視の強化の一環として、船舶による海上GNSS水蒸気観測を開始した。海上GNSS水蒸気観測で得られたデータは、MSMに用いるためのより精度の高い初期値の作成や、予報現業における実況監視に利用される。

本稿では、2021年5月から2023年2月にかけて船舶16隻で順次開始された海上GNSS水蒸気観測(以下「海上GNSS観測」という。)について紹介する。以下、第2章で装置概要を紹介し、第3章でシステムの全体と解析処理の内容を説明する。第4章ではメソ解析(Meso-scale Analysis, MA)やほかの観測との比較結果を示し、第5章では2022年7月19日に九州地方で発生した線状降水帯に関連する観測を紹介する。まとめを第6章に記す。さらに付録AにはGNSSと海上GNSS測位解析を概説し、付録Bに2021年の業務開始から2023年3月現在までの主な処理の改修等を記す。

## 2. 観測装置と船舶

本章では、海上GNSS水蒸気観測装置(以下「海上GNSS観測装置」という。)と、本装置が搭載された船舶の概要について紹介する。

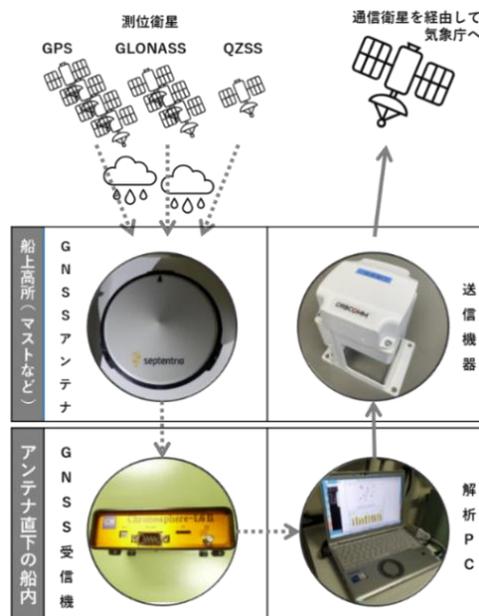
### 2.1 海上GNSS観測装置

海上GNSS観測装置は、GNSSアンテナ及び送信機器と、GNSSアンテナ直下の船内に設置されたGNSS受信機及び解析PCからなる(第2.1図)。海上GNSS観測装置は、第2.1表に示す船舶16隻に搭載された。

海上GNSS観測で利用する測位衛星システム<sup>3</sup>と電波の周波数帯を以下に示す。

- ・米国 GPS (L1, L2)
- ・ロシア GLONASS (G1, G2)
- ・日本 QZSS (みちびき) (L1, L2, L6)

海上GNSS観測の特徴として、L帯に属する二周波の搬送波(測位のための電波)と、みちびきの衛星軌道情報(L6帯)を利用する(詳しい原理は第3章)。GNSSアンテナ及びGNSS受信機は、これらの周波数帯に対応したものである。



第 2.1 図 船舶に搭載された海上GNSS観測装置一式の概要。破線矢印は測位データ、実線矢印は解析データの流通を示す。

<sup>3</sup> 2023年1月より、順次欧州のGALILEO(E1, E5)信号の利用を開始。

第 2.1 表 海上 GNSS 観測装置が搭載された船舶。

分類	船舶		観測開始月	GNSSアンテナ	GNSS受信機	送信機器
	所属	船名				
海洋気象 観測船	気象庁	凌風丸	2021年5月	Trimble社製Zephyr 3 Rugged Septentrio社製PolaNI-x MF	コア社製Cohac <sup>∞</sup> Chronosphere-L6	既設衛星回線に よる電子メール
		啓風丸				
測量船	海上保安庁	昭洋	2021年6月	既設アンテナから信号を分配		
		拓洋	2021年7月			
		平洋				
		光洋				
フェリー	新日本海フェリー株式会社 株式会社フェリーさんふらわあ オーシャントランス株式会社	はまゆう	2022年5月	Septentrio社製PolaNI-x MF	コア社製Cohac <sup>∞</sup> Chronosphere-L6 II	オーブコム社製 ST6100-BXX
		それいゆ	2022年6月			
		さんふらわあ きりしま	2022年7月			
		フェリーびざん	2023年1月			
		琉球エキスプレス3	2022年8月			
		琉球エキスプレス5	2022年11月			
貨物船	琉球海運株式会社	琉球エキスプレス2	2023年2月			
		わかなつ	2022年10月			
		あやはし	2022年10月			
		ちゆらしま	2022年11月			

(a)



(b)



第 2.2 図 GNSS アンテナ（赤実線）及び送信機器（赤破線）の設置例. (a) 貨物船「あやはし」マスト, (b) フェリー「さんふらわあ きりしま」オンデッキガーダー.



第 2.3 図 貨物船「琉球エクスプレス 3」操舵室に設置された GNSS 受信機（赤実線）及び解析 PC（赤破線）.

電波の遮蔽・反射を避けるため、GNSS アンテナ及び送信装置はマストなどの高所に設置した（第 2.2 図に設置例を示す）。GNSS 受信機及び解析 PC は GNSS アンテナ直下の船内に設置し、GNSS アンテナ・GNSS 受信機間と送信装置・解析 PC 間に専用のケーブルを敷設した。

市販品の解析 PC にはあらかじめ測位データの解析環境を構築した上で、解析 PC を GNSS 受信機の近くに設置し、1 m 程度のケーブルでつなげた（第 2.3 図）。

## 2.2 船舶

海上 GNSS 観測装置が搭載された船舶 16 隻は気象庁海洋気象観測船（以下「気象庁船」という。）2 隻、海上保安庁測量船 4 隻、民間企業の貨物船・フェリー 10 隻に大別される（第 2.1 表）。ここでは、それぞれの船舶での観測の特徴について紹介する。

### 2.2.1 気象庁船

2 隻の気象庁船（凌風丸及び啓風丸）での海上 GNSS 観測は 2021 年 3 月に試験観測を開始し、5 月に正式運用が開始された。

気象庁船では、6 月から 10 月（出水期）にかけて、九州の西から南東の沖合を中心に、水蒸気の流入が予測される海域での機動的な観測を実施している（第 5 章で例を示す）。また、より効果的な水蒸気の観測を行うため、海上 GNSS 観測と並行してラジオゾンデを用いた高層ゾンデ観測<sup>4</sup>も実施している。

気象庁船では、解析 PC に測位データに加えて、気圧及び気温の観測値を取込み、船上で可降水量を解析している（詳しくは第 3 章）。解析データの送信方法としては、海上 GNSS 観測専用の機器は設置せず、既設の衛星通信回線を通して、電子メールによる送信を行っている。また、凌風丸及び

<sup>4</sup> 高層ゾンデ観測では、1 日に 2 回から 4 回、温度計及び湿度計（ラジオゾンデ）を上空に飛ばすことにより、直接的に水蒸気の高度分布などを観測する。高層ゾンデ観測は鉛直分解能が高い直接観測であり、GNSS 観測は時間分解能が高い観測であるといえる。

啓風丸は 2012 年から海上 GNSS 観測の技術開発に貢献している (Shoji *et al.*, 2016). 凌風丸では 2018 年に GNSS アンテナをマスト最上部に設置したリアルタイム解析試験を開始した (気象研究所気象観測研究部, 2021) が, その際設置した GNSS アンテナを引き続き利用している.

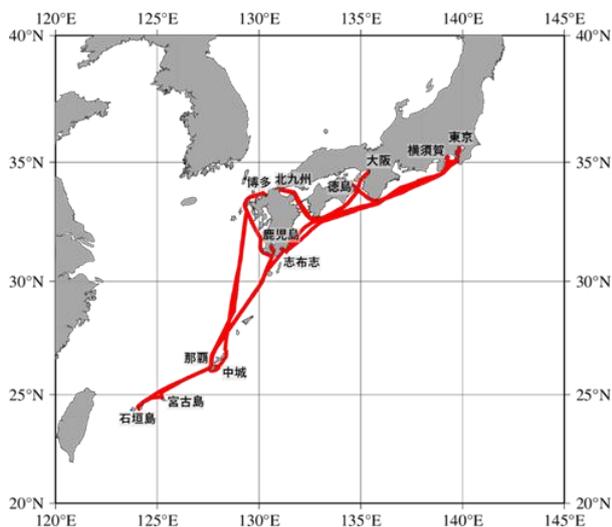
### 2.2.2 海上保安庁測量船

海上保安庁の協力を得て, 測量船 4 隻 (昭洋, 拓洋, 平洋, 光洋) に観測装置を搭載し, 2021 年 6 月から 7 月にかけて海上 GNSS 観測を開始した.

GNSS アンテナについては, 別観測に使用している既設のものから信号を分配している. また, 解析データの送信用に, 操舵室後方に送信機器 (第 2.1 図) を設置し, 10 分ごとのデータ送信を行っている.

### 2.2.3 貨物船・フェリー

東シナ海や九州・四国太平洋側海域に定期航路 (第 2.4 図) を持つ民間企業各社の協力を得て, 貨物船 6 隻及びフェリー 4 隻に観測装置を搭載し, 2022 年 5 月から 2023 年 2 月にかけて海上 GNSS 観測を順次開始した (第 2.1 表).



第 2.4 図 海上 GNSS 観測装置が搭載された貨物船・フェリーの定期航路 (赤線). 航路は, 各船の観測開始時のもので, 変更される場合がある.

「さんふらわあ きりしま」については, 船体との共振を避けるために, GNSS アンテナ及び送信機器をオンデッキガーダーに設置した (第 2.2 図 b).

## 3. 海上 GNSS 観測と解析処理

海上 GNSS 観測では, 測位衛星から送信される電波 (搬送波) を, 船舶に設置された二周波 GNSS 受信機<sup>5</sup>を用いて受信する. 解析 PC では, GNSS 受信機から取得した情報 (搬送波位相, 放送暦, 衛星軌道補正情報) を用いて移動体 (Kinematic) 精密単独測位を行う. その際, GNSS アンテナの位置とともに天頂遅延量 (天頂方向に換算した中性大気による電波の遅れ, Zenith Total Delay, ZTD) を推定し, 衛星通信により送信する. 気象庁船 (凌風丸, 啓風丸) では, ZTD から船上観測の気圧, 気温を用いて PWV を算出して送信する.

ここでは, システムの理解に必要な GNSS の概要, 海上 GNSS 観測のシステム概要, 海上 GNSS 解析による ZTD 推定, さらに PWV の算出処理について述べる. GNSS 測位の処理内容については付録 A に記す.

### 3.1 GNSS の概要, 及び海上実時間解析を可能にした技術革新

米国の全球測位システム (Global Positioning System, GPS) 等, 人工衛星から送信する電波を用いた位置計測システムは, 総称して GNSS と呼ばれる.

測位衛星は複数の L 帯電波 (搬送波) を送信している. GNSS 受信機は搬送波と同一周波数の信号を生成しており, 観測開始から時間と共に変化する両者の位相差 (搬送波位相) が GNSS 精密測位解析に利用される.

衛星の正確な位置が既知で, 3 基以上の衛星からの距離がわかれば, 三辺測量と同様に GNSS 受信機の位置が計測できる. しかし搬送波位相には, 衛星と GNSS 受信機間の距離のほか, 衛星や GNSS

<sup>5</sup> 電離層の影響を除くために二周波の搬送波 (GPS・QZSS の場合 L1 帯及び L2 帯) を利用する (付録第 A5 節). それらに加えて, QZSS からの衛星軌道補正情報 (L6 帯) を受信する必要がある (第 3.2.1 節).

受信機の時計誤差, 電離層の影響, 対流圏遅延(中性大気による遅延)等の情報が含まれている。そのため cm 級の精度を有する GNSS 精密測位解析では, 搬送波に含まれる衛星と GNSS 受信機間の距離以外の未知量も得る必要があり, 対流圏遅延は天頂方向に換算された *ZTD* として, 測位解析の中で最小二乗法や拡張カルマンフィルター(Extended Kalman Filter, EKF)等により GNSS 受信機座標と共に推定される。

GNSS 測位で副産物として推定される *ZTD* には乾燥空気と水蒸気が寄与しており, それぞれ天頂静水圧遅延(Zenith Hydrostatic Delay, *ZHD*), 天頂湿潤遅延(Zenith Wet Delay, *ZWD*)と呼ばれる。*ZHD* は GNSS アンテナ位置の気圧から推定できる。一方 *ZWD* は *PWV* と比例関係にあり, 比例係数は GNSS アンテナ位置の気温から実用的な精度で推定できる。以上より, GNSS 精密測位解析で推定される *ZTD* と, GNSS アンテナ位置の気圧, 気温が得られれば, GNSS アンテナ位置における *PWV* を推定することが可能となる。

GNSS 解析による *PWV* は天候に左右されず連続的に得られることから, 大気研究や天気予報への利用技術開発が進められてきた。気象庁では国土地理院が電子基準点として全国に展開する GNSS 連続観測システム(GNSS Earth Observation Network System, GEONET)の MSM への利用が 2009 年に開始された。当時, 利用できる衛星は, GPS の約 30 基であったが, その後, 米国以外の複数の国や地域で, 独自の衛星測位システムが実用化され, 2023 年 3 月現在, 船上リアルタイム解析が利用可能な実時間において, 衛星軌道情報(後述)が提供されている衛星の数は以下のように 82 基に増加している。

- ① GPS 31 基 (U. S. Coast Guard Navigation Center, 2023),
- ② GLONASS 25 基 (Information and Analysis Center for Positioning, 2023),

③ GALILEO 22 基 (European GNSS Service Center, 2023),

④ QZSS 4 基 (内閣府, 2023)。

実時間で利用できる衛星数の増加と, 衛星軌道解析精度向上などの技術革新により, 従来は困難とされてきた船舶等移動体に設置した GNSS 観測装置から, 固定点に比肩する精度や安定性で *PWV* を解析することが可能となった。

### 3.2 海上 GNSS 解析の概要

ここでは, 初めに海上保安庁測量船及び貨物船・フェリーでの *ZTD* 解析処理について説明し, その後で気象庁海洋気象観測船で実施されている *PWV* 解析について述べる。

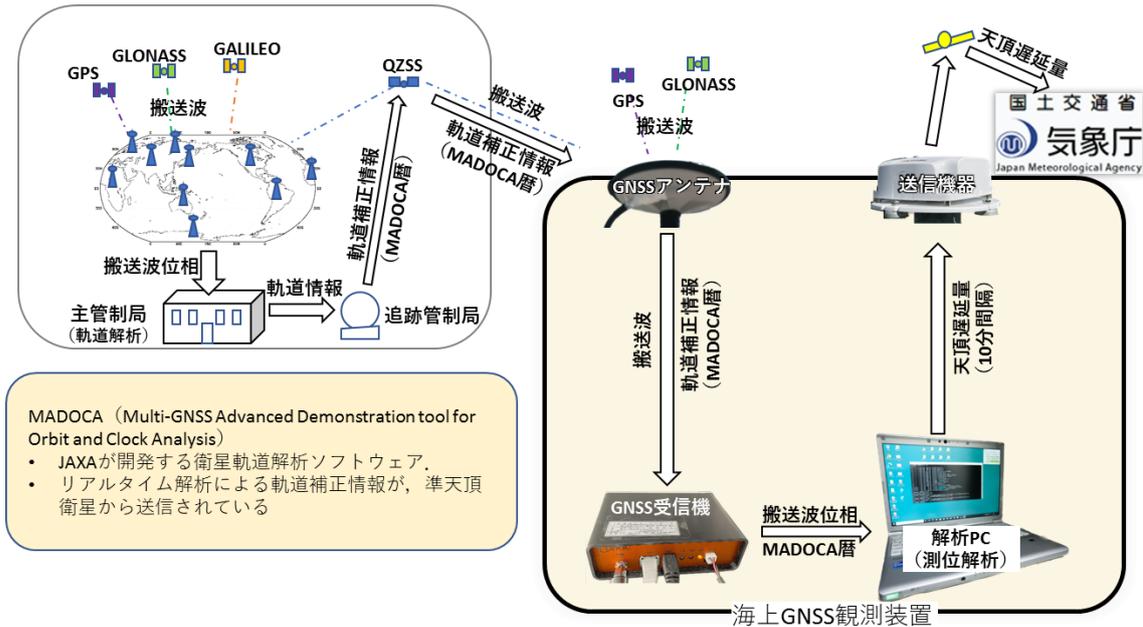
#### 3.2.1 システム概要

第 3.1 図に海上保安庁測量船及び貨物船・フェリーでの海上 GNSS 解析の全体像を模式的に示す。図の右側, 太い角丸四角で囲まれた範囲が船上での処理の流れを示している。

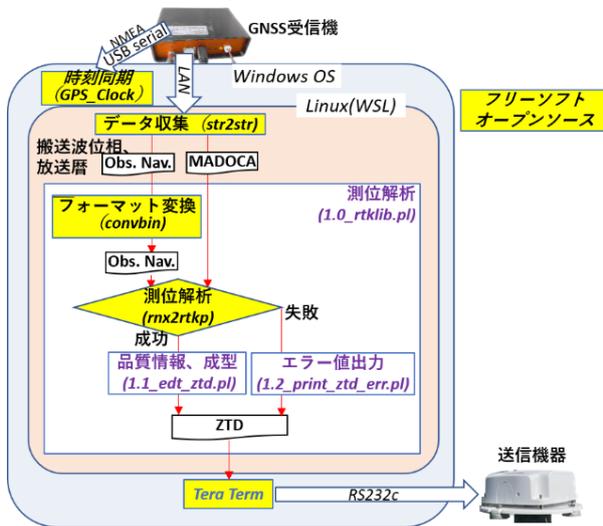
海上 GNSS 解析に用いる精密単独測位(Precise Point Positioning, PPP) (Zumberge *et al.*, 1997) は, 予め解析された高精度の衛星軌道と衛星時計誤差情報を利用する。準天頂衛星システムの主管制局では, 宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)の開発した衛星軌道解析プログラム(Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis, MADOCA) (Kawate *et al.*, 2023) を用いて測位衛星の軌道及び時計誤差をリアルタイムに解析し, 結果を衛星軌道補正情報<sup>6</sup>(以下「MADOCA 暦」という。)として QZSS から測位信号の一つである L6 信号に乗せて送信している。

船上に設置した二周波 GNSS 受信機は, 各測位衛星から送信される電波(搬送波)を受信し, 搬送波位相を生成し, 搬送波に含まれる放送暦, 及び MADOCA 暦を解析 PC に送る。

<sup>6</sup> 2022 年 9 月 30 日に, JAXA 技術実証に基づいた高精度測位補強サービス(Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation- Precise Point Positioning, MADOCA-PPP)として試行運用が開始された(第 3.2.3 節)。



第 3.1 図 海上 GNSS 解析処理の模式図 (海上保安庁測量船, 貨物船・フェリー). 黒い太枠内が海上 GNSS 観測装置. 主管制局では国内外の地上 GNSS 測位データを収集し, 衛星軌道解析ソフトウェア MADOCA を用いた測位衛星の軌道, 及び時計解析を行う. 解析結果は追跡管制局から準天頂衛星にアップリンクされ, 準天頂衛星から測位電波の一つとして送信される. 海上 GNSS 観測装置は, GNSS アンテナ, GNSS 受信機, 解析 PC 及び送信機器からなる.



第 3.2 図 解析 PC 内の処理の模式図 (海上保安庁測量船, 貨物船・フェリー). WSL により, 仮想的 Linux 環境を構築. GNSS 受信機や送信機器とのデータ I/O は Windows で行い, 測位解析は仮想 Linux 環境で行う.

解析 PC は, 搬送波位相と放送暦, 及び MADOCA 暦を用いた PPP 解析により, 10 分間隔で ZTD を算出し, 送信機器を経由してデータを気象庁に送信する.

### 3.2.2 解析装置の処理

第 3.2 図に海上保安庁測量船及び貨物船・フェリーの解析 PC 内部の処理概要を示す. 解析 PC は, いわゆる Windows PC である. Linux 環境が利用できるサブシステム (Windows Subsystem for Linux, WSL) を用いて仮想的 Linux (CentOS 7) 環境を構築している. GNSS 受信機からのデータ取得, 送信機器へのデータ送信には Windows 用のデバイスドライバを用いて行い, 測位解析やデータ処理等の自動処理は Linux で実行している.

解析 PC の内部時刻はフリーソフトである GPS\_Clock を用いて, GNSS 受信機から出力される National Marine Electronics Association (NMEA) 情報に含まれる時刻情報に同期させる.

測位解析, GNSS 受信機からのデータ収集, フォーマット変換等, 解析の中核はオープンソースの GNSS 測位解析ライブラリである RTKLIB (Takasu, 2013) の該当するツール (str2str, convbin, rnx2rtkp) を用いる.

① str2str (通信サーバー)

シリアル, TCP, The Networked Transport of Radio technical commission for maritime services via Internet Protocol (NTRIP) 及びデータファイルからデータを取得し, シリアル, TCP, NTRIP, 及びデータファイルに出力する機能を有する.

② convbin (データフォーマットコンバーター)

受信機固有フォーマットや rcm 形式などで GNSS 受信機から出力される測位データを, mx2rtkp が読み込める Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 形式の搬送波位相ファイル, 及び放送暦ファイルに変換し, ファイル出力する.

③ mx2rtkp (測位解析プログラム)

搬送波位相, 放送暦, 精密暦等を用いて測位解析を実行する. 解析の詳細設定はコンフィグレーションファイルで指定する.

海上 GNSS 解析では, 過去 90 分の受信データを用いて移動体精密単独測位 (Kinematic PPP) 解析を行い, 2 秒間隔で GNSS アンテナの緯度・経度・標高と ZTD 等を推定する. 解析対象時刻から前 1 分以内のデータを用いて対象時刻の ZTD, 及び品質に関連する情報を計算 (1.1\_edt\_ztd.pl) し, オープンソースの通信ツールである TeraTerm を用いて, シリアル通信により, 送信機器 (オーブコム社製 ST6100-BXX) にデータを送

る. 解析 PC は, 搬送波位相と放送暦, 及び MADOCA 暦を用いた Kinematic PPP 解析により, 10 分間隔で ZTD を算出し, 送信機器を経由してデータを気象庁に送信する.

3.2.3 mx2rtkp による Kinematic PPP 解析

第 3.1 表に GNSS 測位解析の主な設定を示す. 個々の設定の意味については, 付録 A を参照してほしい.

Kinematic PPP 解析の演算処理には RTKLIB ver. 2.4.3 b34 の事後解析ツールである mx2rtkp を用いる. 解析開始時刻における各衛星と GNSS 受信機間の波数は整数には確定しない. Kinematic PPP 解析に必要な衛星軌道は, 予測暦である放送暦と, 放送暦の補正情報である MADOCA 暦を用いる. 放送暦, MADOCA 暦ともに準天頂衛星から配信されるものを受信している. 2021 年 3 月に海上 GNSS 試験観測を開始した当初は, MADOCA 暦には GPS, GLONASS, QZSS の補正情報が収録されていた. 2022 年 9 月 30 日に MADOCA-PPP として配信形式の変更と共に, 新たに GALILEO の補正情報が追加された (内閣府, 2022). 海上 GNSS 業務では, 解析試験の結果, GALILEO を追加することの有効性を確認し, 2023 年に順次 GALILEO 衛星の利用を始めた.

第 3.1 表 海上 GNSS 解析の主な設定.

項目	仕様	備考
解析ソフトウェア	mx2rtkp (RTKLIB ver. 2.4.3, b34)	
解析手法	精密単独測位による移動体測位	
波数不確定の処理	実数	
衛星軌道	放送暦 + MADOCA 暦 (準天頂配信)	<a href="https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html">https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html</a>
衛星	GPS, GLONASS, QZSS, GALILEO	GALILEO 利用は 2023 年より
マッピング関数	GMF + 勾配推定	Boehm <i>et al.</i> (2006)
仰角カットオフ	仰角 3 度以下は使用しない	
アンテナ位相特性モデル	igs14.atx	
電離層補正	二周波電離層フリー線形結合	電離層の影響については, 電波の周波数に依存することから, 電離層フリーと呼ばれる二周波の線形結合を観測量として利用する.
天頂静水圧遅延量	$ZHD = 0.002277 \cdot P$ $P = 1013.25 \times (1 - 2.2557 \times 10^{-5} h)^{5.2568}$	Elgered <i>et al.</i> (1991)
時間依存未知パラメータ	GNSS アンテナ座標 GNSS 受信機時計誤差 天頂湿潤遅延量 ランダムウォーク過程 (シグマ $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$ ) 大気遅延量一次勾配	Shoji <i>et al.</i> (2023)
スライディングウィンドウ	時間窓 90 分	Foster <i>et al.</i> (2005)
時間更新ステップ	2 秒	

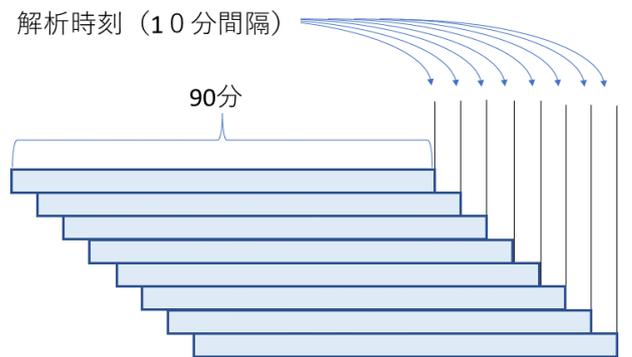
マッピング関数は ERA40 を基に作成された全球で利用可能かつ外部情報の不要な GMF (Boehm *et al.*, 2006) を用いる. なるべく多くの衛星を利用することで, 測位精度が上がることを期待し, カットオフ仰角は Fujita *et al.* (2008), Boniface *et al.* (2012) 同様, 3 度とした.

GNSS アンテナの位相中心が衛星の方位角や仰角で変動する影響は, 国際 GNSS 事業 (International GNSS Service, IGS) が提供する位相中心変動 (Phase Center Variation, PCV) モデル (igs14.atx) で考慮する. 船上の GNSS アンテナは常に傾きや方位が変化するため, その補正効果は限定的と思われるが, それでもアンテナ PCV の, 特に仰角に依存した変動に起因する誤差の軽減を期待している.

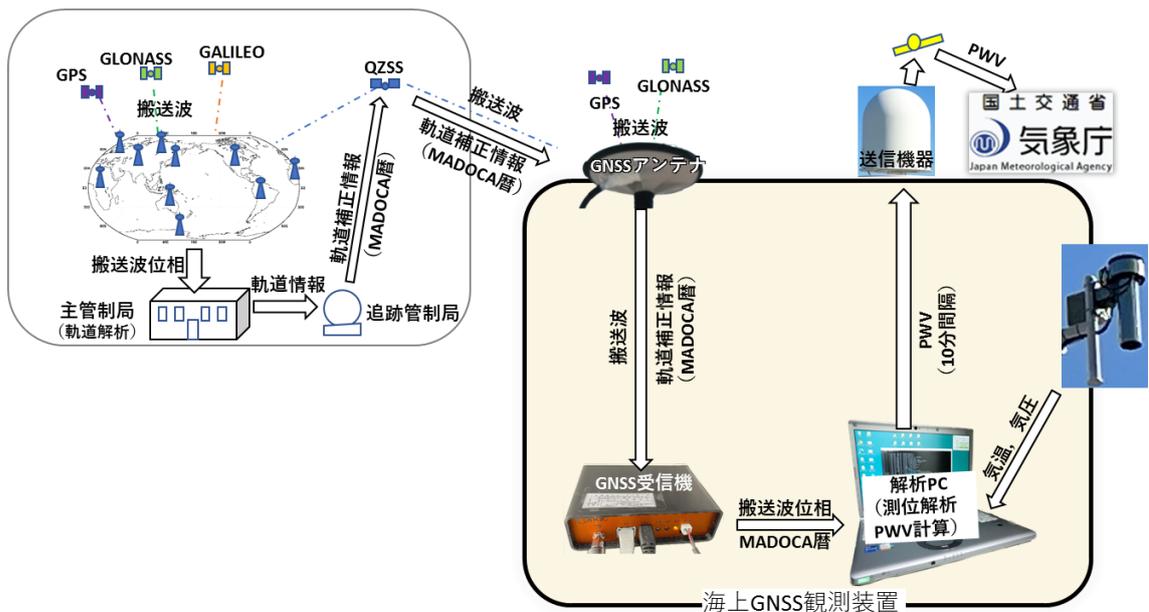
ZHD は標準大気モデルを用いた推定値 (Elgered *et al.*, 1991) を用いて推定する. それ以外の時間依存パラメータ (GNSS アンテナ座標, ZWD, 大気遅延量勾配, GNSS 受信機時計誤差) は拡張カルマンフィルターを用いて推定する. MA との比較 (Shoji *et al.*, 2023) から, 第 3.3 図に示すように, 過去 90 分の測位データを用いるスライディングウィンドウ (Foster *et al.*, 2005) 手法を用い, 拡張

カルマンフィルターの時間更新間隔は 2 秒, ランダムウォーク過程として解析される ZWD の時間拘束を規定するシグマは rnx2rtkp デフォルトの 0.3 倍の  $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1/2}$  に設定した. スライディングウィンドウ解析は, 10 分毎に起動する.

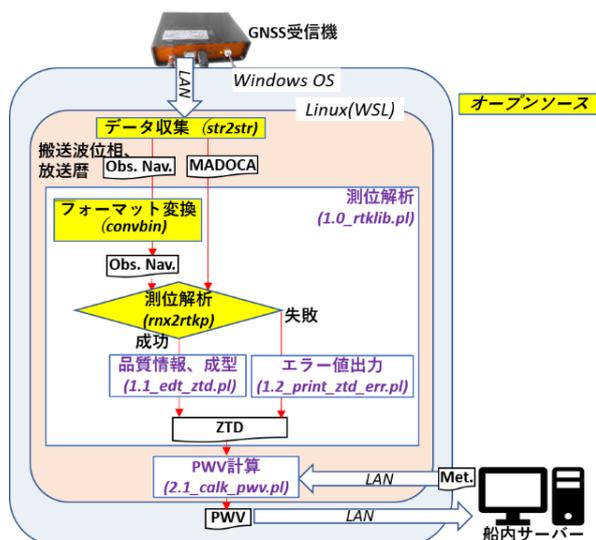
海上保安庁測量船や貨物船・フェリーでは, 海上の GNSS 測位解析から推定される ZTD を送信し, 気象庁内の計算機システムで MSM による直近の数値予報の気温と気圧を用いて PWV に変換する.



第 3.3 図 時間窓 90 分のスライディングウィンドウ解析の模式図. 解析対象時刻を最終時刻とした過去 90 分のデータを用いて測位解析を行う. 解析対象時刻は 10 分間隔で更新する.



第 3.4 図 海上 GNSS 解析処理の模式図 (気象庁船). 黒い太枠内が海上 GNSS 観測装置. 海上保安庁測量船, 貨物船・フェリーと異なり, 船上での気温, 気圧観測値を用いて解析された PWV が衛星通信を介して気象庁に送信される.



第 3.5 図 解析 PC 内の処理の模式図 (気象庁船).  
測位解析により ZTD を出力後, 船内サーバーにより入手した気象観測データを用いて PWV を計算し, 船内サーバーに送る.

### 3.2.4 気象庁船での処理

気象庁船での処理概要を第 3.4 図及び第 3.5 図に示す. 気象庁船では船上での気象観測値を用いて ZTD を PWV に変換し送信しているが, GNSS 測位解析は他船と共通している. なお, 気象庁船における解析 PC の内部時刻は, 船内サーバーを用いて NMEA 情報に基づく船内時刻に同期させる.

### 3.2.5 PWV の算出

ここでは海上 GNSS 解析で推定される ZTD から PWV を算出する手順を示す. GNSS アンテナ位置での気温と気圧が必要であるが, 気象庁船では船上の観測値, 海上保安庁測量船, 貨物船・フェリーでは MSM による直近の数値予報からの内挿値を用いる. 以下, ZHD は, 海上 GNSS 解析で得られるものと気象観測から推定されるものを区別するため, 各々添え字「GNSS」と「MET」で区別する.

海上 GNSS 解析では, 標準大気から高度の関数として推定された  $ZHD_{GNSS}$  と, パラメータ推定で得られた ZWD の和としての ZTD が得られる. 一方,  $ZHD_{MET}$  は地上気圧, 標高, 緯度の関数として推定できる (Elgered *et al.*, 1991).

$$ZHD_{MET}(P, \varphi, ht)$$

$$= \frac{2.2779 \cdot P}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot ht} \quad (1)$$

ここで  $P, \varphi, ht$  はそれぞれ GNSS アンテナ位置の気圧, 緯度, 標高.

ZTD と  $ZHD_{MET}$  から ZWD の推定値が得られる. GNSS アンテナと気温計, 気圧計の観測高度は同一ではない. 気温は気温減率  $0.65 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$  で高度補正し, 気圧は静水圧平衡を仮定して GNSS アンテナ高度における気温と気圧の推定値を利用する.

$$ZWD = ZTD - ZHD_{MET} \quad (2)$$

PWV の推定値は, ZWD と比例関係にあり, 比例係数  $\Pi$  は以下の式で表される (Askne and Nordius, 1987).

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (3)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left( k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (4)$$

ここで  $R_v$  は水蒸気の気体定数,  $k_2'$  と  $k_3$  は経験的に得られる定数である.  $T_m$  は第 5 式で定義される水蒸気で重みづけした気柱の平均気温である (Davis *et al.*, 1985).

$$T_m = \frac{\int_H^\infty \frac{P_v}{T} dz}{\int_H^\infty \frac{P_v}{T^2} dz} \quad (5)$$

ここで  $H, T,$  及び  $P_v$  はそれぞれ GNSS アンテナ高度, 気温, 水蒸気分圧である. Bevis *et al.* (1992) は高層ゾンデ観測データを用い,  $T_m$  が地上気温と高い相関を持つことを見出し, 地上気温と  $T_m$  との線形回帰式を用いて地上気温から  $T_m$  を推定する方法を提案した. 海上 GNSS 解析においても, 日本の高層ゾンデ観測から得られた地上気温と  $T_m$  の線形回帰式を用いて,  $T_m$  の推定を行っている.

### 3.3 品質管理に利用可能な情報の算出

反射波との干渉 (Multipath), GNSS アンテナの傾きや揺れ, データの欠落など, 海上 GNSS 解析の精度に影響を与える要因は多々あり, 影響の度合いも多岐にわたる. 現在の海上 GNSS 解析では, 作成元で情報を止めることはせずに, すべての解析結果を通報している. そのため, 下記に示すい

くつか品質管理に利用可能な情報を通報データに付加している。

### 3.3.1 解析時間（指標名 SCAL）

海上 GNSS 解析は拡張カルマンフィルターで行われ、解が収束するまでに数十分必要とされる。時間窓 90 分のスライディングウィンドウ解析を採用しているが、搬送波や MADOCA 暦の取得状況によっては、より短い時間の解析となる場合も多い。概ね 1 時間程度の解析が行われていれば、安定した結果が得られていると考えられる。

### 3.3.2 事後残差のばらつき（指標名 ZTDsg）

各衛星の遅延量事後残差を天頂方向に換算したもののばらつきを標準偏差で表したもの。事後残差には大気遅延量の非一様性のほか、衛星時計、衛星位置の誤差、反射波の影響などが含まれる。極端にばらつきが大きい場合は、大気以外の要因が卓越していることが示唆される。

### 3.3.3 大気遅延量勾配パラメータ（指標名 Gn（南北方向）、Ge（東西方向））

測位解析で未知パラメータとして推定したもの。

大気遅延量勾配は、各高度の遅延量水平勾配の鉛直積算であり、勾配と言いつつ長さの次元を持つ。海上 GNSS 解析では勾配の長さの 99 %は 20 mm 未満で、値が大きいほど MA との差が大きくなる傾向にある。また、その場合解析初期から異常が発生し、かつ直前 10 分及び直後 10 分の処理では正常に解析される場合がほとんどである。このことから、原因は、解析開始時刻付近における反射波による干渉の影響と推測される。

海上 GNSS 解析では大気遅延量勾配パラメータが 40 mm を超える場合に、解析終了時刻はそのまま、開始時刻を 10 分後にずらした再解析処理を行う。

### 3.3.4 過去 1 分の鉛直座標のばらつき（指標名 ALTsg）

測位解析で得られた過去 1 分間の 2 秒間隔の鉛直座標のばらつきを標準偏差で表したもの。定性的には港に停泊中に小さく、海上を航行中ほど大きな値となる。直前の解析結果と比べて極端に鉛直座標のばらつきが大きくなった場合は、解析に何等かの異常が含まれている可能性がある。

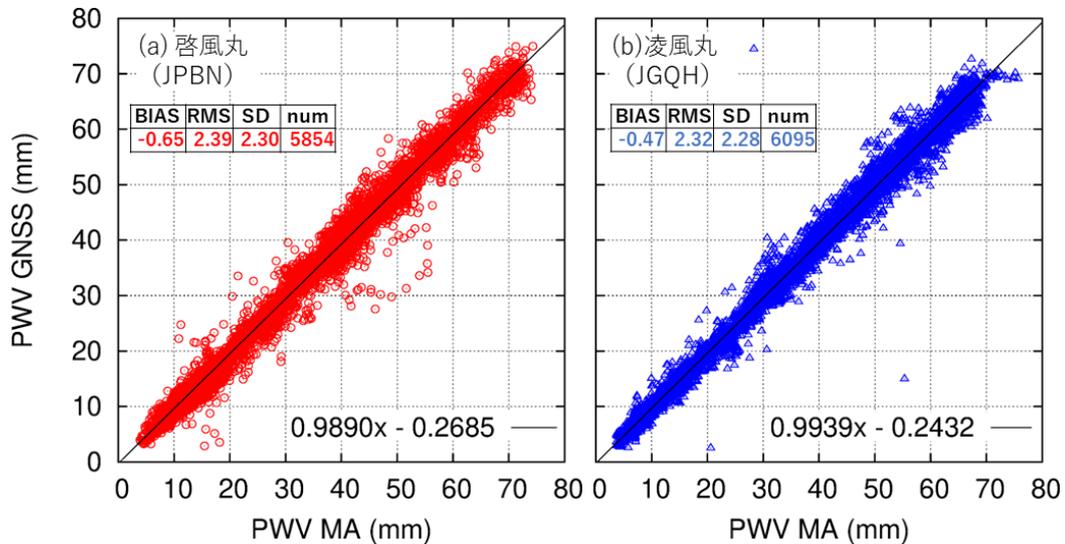
第 3.2 表 データ処理時間一覧。（※1）過去 90 分の GNSS データを使用。（※2）気温と気圧には、正 10 分間の 1 分値を用い、欠測の場合、可降水量計算を行わずに遅延量を送信。（※3）通信障害時の送信待機は 4 時間まで。（※4）可降水量（*PWV*）の無いデータのみ MSM データから計算。

分	気象庁船	測量船 貨物船・フェリー	メール受信サーバー	NAPS（各課ルーチン）
～0	観測（10 分毎）			
0	遅延量（ <i>ZTD</i> ）解析（※1）			
		オープンコムサーバーへ送信（※3）		
3	可降水量計算（※2）			
4	メール作成			
5	メール送信			
6			オープンコムサーバーから取得	
～7			気象庁船メール受信フォーマット整形 異常データ QC	
7			NAPS へ送信用に格納	
8				メールサーバーからデータ取得 可降水量計算（※4） 多画面ツール用格子データ作成 配信

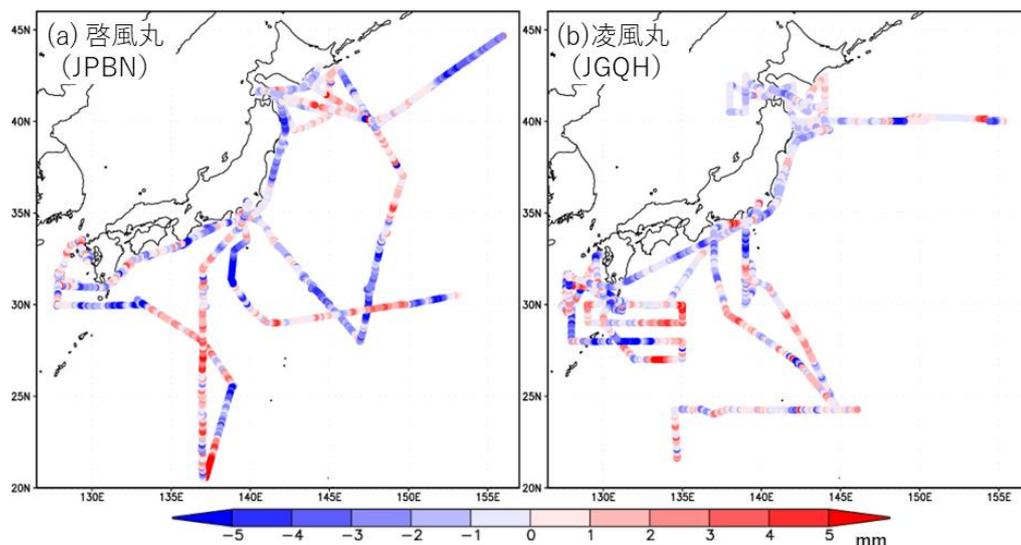
### 3.4 気象庁における船舶データの受信処理

気象庁船からメール送信された各通報データは、海洋情報処理システムのメールサーバーで受信され、受信処理によりフォーマットチェック、異常値確認の後、観測時間ごとのファイルにまとめられる。気象庁船以外の測量船、貨物船・フェリーのデータはオープンコムサーバーに入るため、ルーチン処理によりオープンコムサーバーから 10 分毎にデータを取得し、気象庁船と同じく観測時間ごとのファイルにまとめられる。メールやデータの送信が遅延した場合や、観測値の訂正通報があった場合は、該当時間のファイルは最新のデータで新たに処理される。

海洋情報処理システムのメール受信サーバーで受信処理したデータは、数値解析予報システム (Numerical Analysis and Prediction System, NAPS) 各課ルーチンにより数値予報、気象庁内の実況監視画面向け配信フォーマットに整形される。気象庁船以外の可降水量が含まれていないデータ (気象庁船の気象データが欠測だった場合も含む) は、MSM による直近の数値予報の海面気圧及び気温と通報された遅延量等から可降水量を計算する。観測時刻からのデータ処理にかかる時間は第 3.2 表のとおりである。データ送信に遅延がなければ、観測時刻から 10 分以内に通報処理が完了する。



第 4.1 図 海上 GNSS 観測装置で解析された PWV の MA との比較。2021 年 4 月 1 日から 2021 年 8 月 30 日。同時刻で最も距離の近い格子点と比較している。



第 4.2 図 MA に対する海上 GNSS 観測装置で解析された PWV の差の分布。2021 年 4 月 1 日から 2021 年 8 月 30 日。同時刻で最も距離の近い格子点と比較。

#### 4. PWV 比較

ここでは、啓風丸（コールサイン JPNB）と凌風丸（コールサイン JGQH）の 2021 年における、MA、船上での高層ゾンデ観測、衛星搭載マイクロ波放射計との比較結果を示す。

##### 4.1 MA との比較

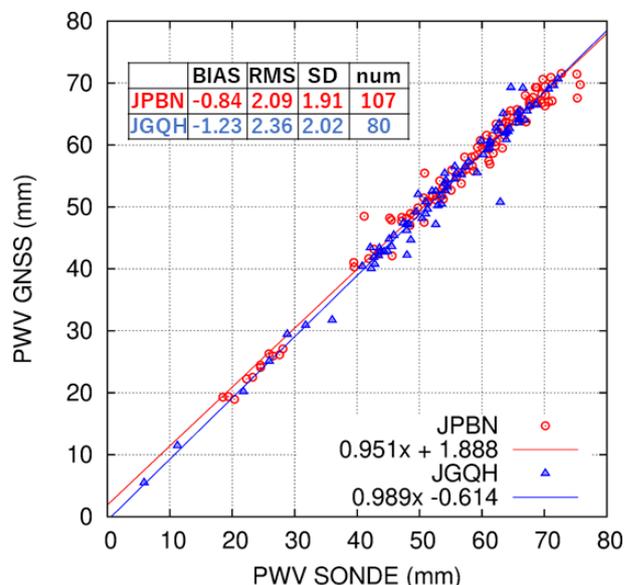
2021 年 8 月 31 日に、海上 GNSS 解析による *PWV* の MA での利用が開始されたので、2021 年 4 月 1 日から 8 月 30 日の期間で比較を行った。同時刻で、船の位置から最も近い格子の *PWV* と比較した。第 4.1 図に散布図を、第 4.2 図に MA に対する差の分布を示す。MA に対して啓風丸、凌風丸両船とも -1 mm 未満のバイアス、二乗平均平方根（Root Mean Square, RMS）差は 2.5 mm 未満であった。分布図（第 4.2 図）からは、おおまかに、負あるいは正の状態が一定程度連続していることがわかる。両者の差が 3 mm を超える場合もある。海上の場合、近傍に比較できる観測が無い場合が多く、海上 GNSS 観測による *PWV* をデータ同化に採用するためには、品質管理や精度評価の指針を示す必要がある。現在の海上 GNSS 観測では、第 3.3 節に示す品質管理を行っている。

##### 4.2 高層ゾンデ観測との比較

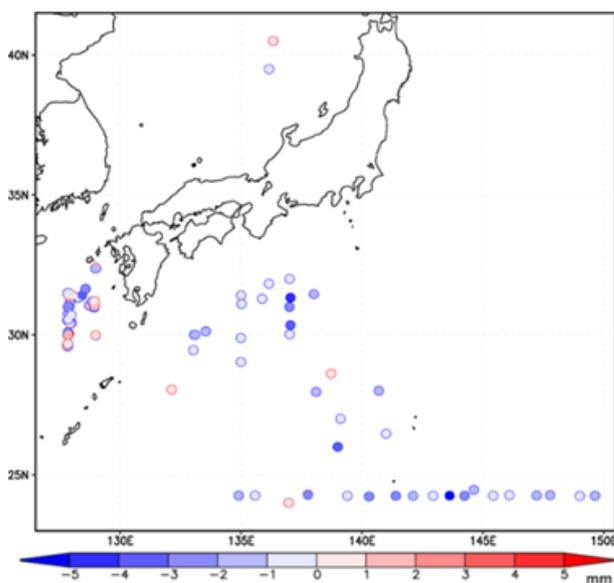
啓風丸、凌風丸船上で実施された高層ゾンデ観測による *PWV* との比較結果を第 4.3 図の散布図、及び第 4.4 図の差の分布図で示す。ラジオゾンデが対流圏を上昇する時間を考慮し、海上 GNSS 観測による *PWV* は、ラジオゾンデ放球時刻から 20 分の平均を比較対象とした。

2021、及び 22 年度は線状降水帯上流の大気状態把握のため、6 月から 9 月にかけて東シナ海での高層ゾンデ観測を実施した。両船とも 1 mm 程度の負バイアス、RMS は 2.5 mm 未満という結果であった（第 4.3 図）。また回帰直線の傾きも、特に啓風丸（JPNB）は約 0.95 で MA や GCOM-W（第 4.3 節）との比較に比べ、やや小さい。分布図（第 4.4 図）からも、高層ゾンデ観測に対する過小傾向がわかる。

梅雨期の東シナ海など、海上でのラジオゾンデが放球後にたどる経路も考慮した比較が必要と考えられ、今後も新たな観測による比較を継続する必要がある。



第 4.3 図 海上 GNSS 観測装置で解析された *PWV* の高層ゾンデ観測との比較。JPNB では 2021 年 7 月 5 日から 2022 年 12 月 16 日、JGQH は 2021 年 6 月 2 日から 2022 年 10 月 26 日の間に随時高層ゾンデ観測が行われた。



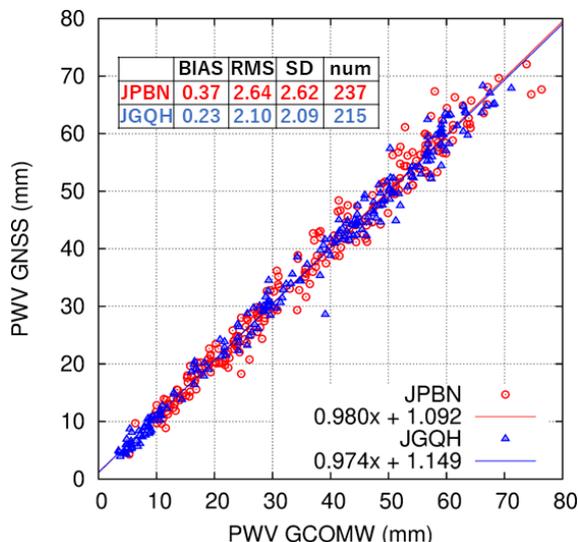
第 4.4 図 高層ゾンデ観測に対する海上 GNSS 観測装置で解析された *PWV* の差の分布。JPNB、JGQH の区別はしていない。

### 4.3 衛星搭載マイクロ波放射計との比較<sup>7</sup>

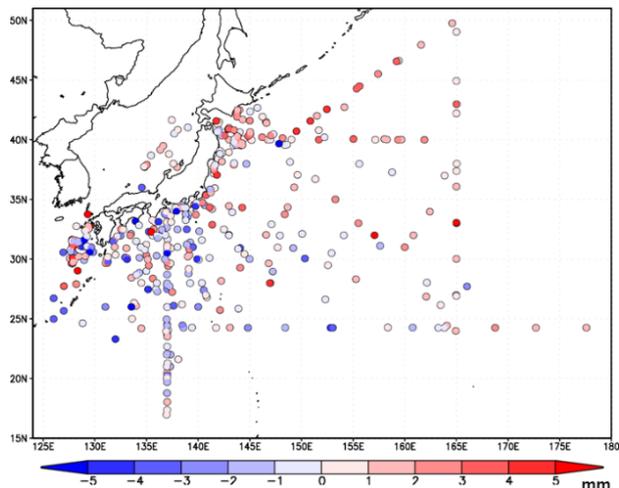
ここでは、JAXA から提供された、水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載された高性能マイクロ波放射計 2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer2, AMSR2) から得られた積算水蒸気量 (TPW: GCOM-W/AMSR2 L2 Integrated Water Vapor. DOI: 10.57746/EO.01gs73b0sq5s2w86n3cxdjwrga) との比較結果を示す。

観測時刻差 5 分以内、観測位置 20 km 以内でマッチアップを行った。期間は啓風丸が 2021 年 4 月 7 日から 2022 年 12 月 16 日、凌風丸が 2021 年 4 月 8 日から 2022 年 10 月 28 日である。

第 4.5 図に散布図を、第 4.6 図に差の分布を示す。高層ゾンデ観測に対して海上 GNSS 観測による *PWV* は負バイアスであったが、GCOM-W/AMSR2 に対しては 1 mm 未満の正バイアスであった。RMS は 2.5 mm であった。差の分布図(第 4.6 図) でみると、北緯 40 度以北で正バイアスが目立つ。比較領域や季節が高層ゾンデ観測とは異なるため、より詳細な解析には、サンプル数を増やす必要がある。



第 4.5 図 海上 GNSS 観測装置で解析された *PWV* の GCOM-W/AMSR2 との比較。JPBN は 2021 年 4 月 7 日から 2022 年 12 月 16 日、JGQH は 2021 年 4 月 8 日から 2022 年 10 月 28 日。観測時間差 5 分以内、距離 20km 以内で最も近い観測を比較した。



第 4.6 図 GCOM-W/AMSR2 に対する海上 GNSS 観測装置で解析された *PWV* の差の分布。JPBN と JGQH は区別しない。

## 5. 線状降水帯に対する観測事例

本章では、2022 年 7 月 19 日に九州地方で発生した線状降水帯に関する海上 GNSS 観測の事例について紹介する。

### 5.1 2022 年 7 月 19 日に九州地方で発生した線状降水帯

2022 年 7 月 18 日において、前線や低気圧の影響で福岡県に断続的に発達した雨雲が流れ込み、福岡管区气象台によると福岡市の一部では午後 5 時半までの 1 時間に 18.5 mm のやや強い降水が観測された。7 月 18 日の午後には、翌 19 日に線状降水帯が発生するとの予測情報が発表された。その後、予測されたように線状降水帯が発生し、7 月 19 日午前 1 時 20 分に線状降水帯の発生情報「顕著な大雨に関する気象情報」が、福岡県(福岡地方、筑豊地方、筑後地方)及び佐賀県(南部)において発表された。続いて、7 月 19 日午前 3 時 50 分には大分県(北部、西部)に線状降水帯の発生情報が発表された。

気象庁船(凌風丸及び啓風丸)は、航行中において海上 GNSS 観測を連続的に実施している(第 2.2.1 節)。線状降水帯の発生が見込まれる場合には、気象庁内での検討を踏まえて、海上 GNSS 観

<sup>7</sup> GCOM-W 搭載のマイクロ波放射計 (AMSR2) データは、G-Portal (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>) より取得。

測及び高層ゾンデ観測を機動的に実施する。2022年7月19日に九州地方で発生した線状降水帯のケースでは、線状降水帯の発生の見込みが徐々に強まる状況に対応して、凌風丸と啓風丸の両船は当初の航海日程を変更して機動観測を行った。凌風丸に関しては、九州西方海域において7月15日から同19日まで機動観測を実施し(RF2204航海)、啓風丸に関しては7月19日から同21日にかけて凌風丸と入れ替わって九州西方海域において機動観測を行った(KS2205航海)。

また、この期間中、海上GNSS観測装置が搭載された3隻のフェリーが九州東方海域において航行していた。凌風丸、啓風丸、及び3隻のフェリーによって得られたデータは、第3.4節で述べた手法に従って、7月19日に発生した線状降水帯の実況監視や数値予報に活用された。次節では、この線状降水帯が発生する直前の7月15日から消滅後の7月21日において、海上GNSS観測で得られた各種遅延量や可降水量について紹介する。

## 5.2 2022年7月15日から7月21日における海上GNSS観測結果

凌風丸及び啓風丸においては、天頂遅延量( $ZTD$ )を算出した後に、天頂静水圧遅延( $ZHD_{MET}$ )を $ZTD$ から差し引くことで天頂湿潤遅延( $ZWD$ )を求め、最後に $ZWD$ から可降水量( $PWV$ )を算出する(第3.2.4節)。その後、 $PWV$ を含む解析データが気象庁本庁に通報され、MSMを用いた線状降水帯の予測のために活用される。また、気象庁内の実況監視画面における $PWV$ 分布図作成のために、海上GNSS観測から得られた $PWV$ が使用される。

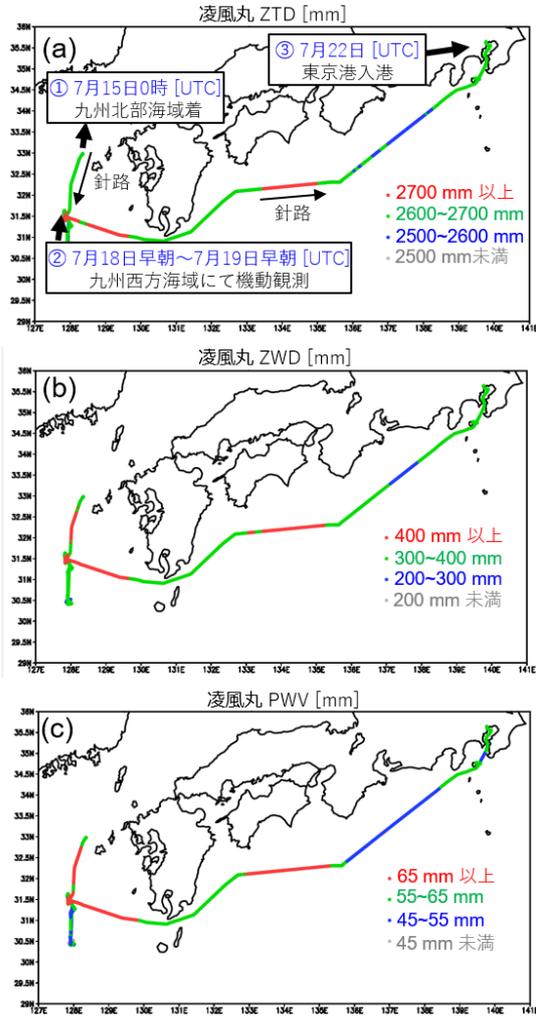
はじめに、凌風丸RF2204航海によって2022年7月15日から7月21日の間に観測された $ZTD$ 、 $ZWD$ 、 $PWV$ を航路に沿って示す(第5.1図)。凌風丸は7月11日に鹿児島港を出港し7月15日に九州北部海域に到着した(第5.1図a, ①)。その後、7月18日午後まで九州沿岸を南下し、線状降水帯発生前日の7月18日午後九州西方海域の北緯30度30分、東経127度50分に到着し、発生後の7月19日午後まで同地点にとどまりながら機動観測を実施した(第5.1図a, ②)。この期間におい

て、 $ZTD$ が2,700 mm以上(第5.1図a)、 $ZWD$ が400 mm以上(第5.1図b)、 $PWV$ が65 mm以上(第5.1図c)と高い値を示す。機動観測終了後に凌風丸は補給のために東京港に向けて発航し7月22日に入港した(第5.1図a, ③)。

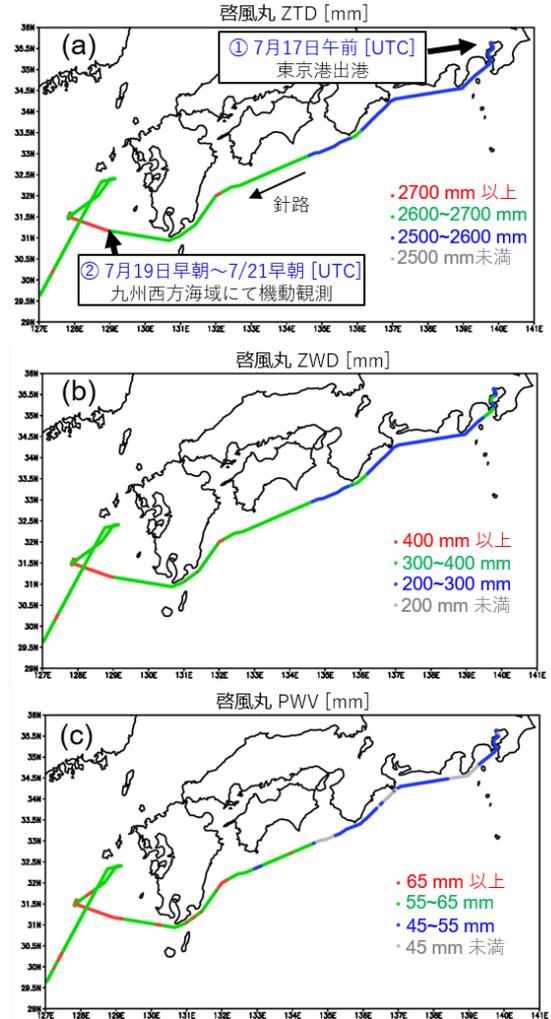
7月15日から7月21日の期間の $ZTD$ 、 $ZHD_{MET}$ 、 $ZWD$ 及び $PWV$ の変化をより詳しく見るために、これらの時系列を第5.2図に示す。線状降水帯が発生する前の7月17日では、 $ZTD$ (第5.2図a, 実線)は2,600 mm程度の値を示す。その後、線状降水帯が発生する前日の7月18日から発生した7月19日にかけて、 $ZTD$ は増加傾向を示し約2,600 mmから約2,700 mmを超える。一方、 $ZHD_{MET}$ (第5.2図a, 破線)に関しては、時間変化が $ZTD$ よりもわずかであり、 $ZHD_{MET}$ は2,300 mmよりやや低い値のまま推移する。

$ZTD$ と $ZHD_{MET}$ の差として求まる $ZWD$ (第2式)に関しては、7月17日では約250 mm程度と小さい値を示すが、7月18日には300 mmを超え、7月19日には420 mmを超える時間帯も存在する(第5.2図b, 実線)。 $ZWD$ の変化に対応して、 $PWV$ (第5.2図b, 灰陰影)は7月17日には45 mm程度であったが、7月18日には60 mm程度の値を示し、7月19日には70 mmを超える。このように、凌風丸RF2204航海では、線状降水帯の発生直前から発生時に向かって、 $ZTD$ 、 $ZWD$ 及び $PWV$ が増加傾向を示す期間においてこれらのデータを取得し、気象庁本庁へ通報を行った。

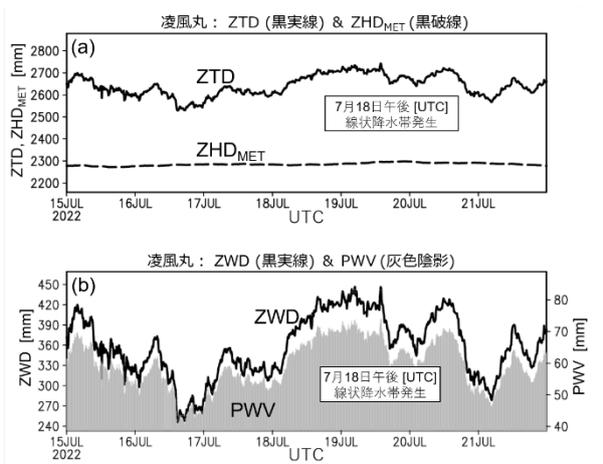
次に、啓風丸において2022年7月15日から同21日の間に観測された $ZTD$ 、 $ZWD$ 、 $PWV$ を航路に沿って示す(第5.3図)。啓風丸は、7月17日に東京港を出港し(第5.3図, ①)、九州西方海域の北緯31度、東経129度付近において、線状降水帯発生後の7月19日午後から線状降水帯消滅後の7月22日午後にかけてデータを取得した(第5.3図a, ②)。啓風丸の観測によって得られた $ZTD$ 、 $ZHD_{MET}$ 、 $ZWD$ 及び $PWV$ の時系列を第5.4図に示す。線状降水帯が発生した7月19日において、 $ZTD$ が2,700 mm以上(第5.4図a)、 $ZWD$ が400 mm以上、 $PWV$ が65 mm以上といずれも高い値を示す(第5.4図b)。また、7月20日の午前以降は、線状降水帯の



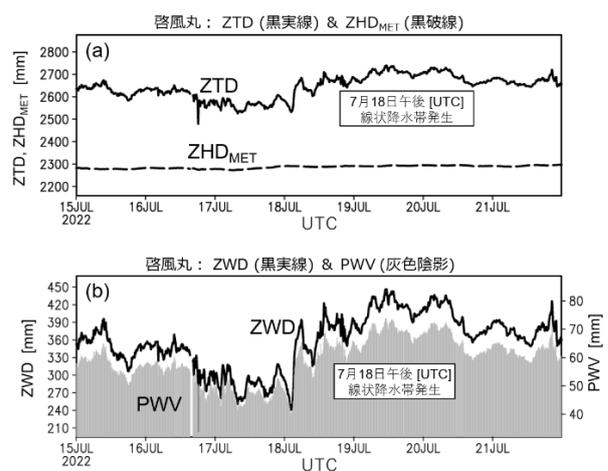
第 5.1 図 凌風丸の 2022 年 7 月 15 日から 21 日にかけての航路に沿った、(a) ZTD, (b) ZWD, (c) PWV.



第 5.3 図 第 5.1 図と同様. ただし啓風丸.



第 5.2 図 凌風丸の 2022 年 7 月 15 日から 21 日にかけての、(a) ZTD (実線) 及び ZHD<sub>MET</sub> (破線), (b) ZWD (実線) 及び PWV (灰陰影) の時系列.

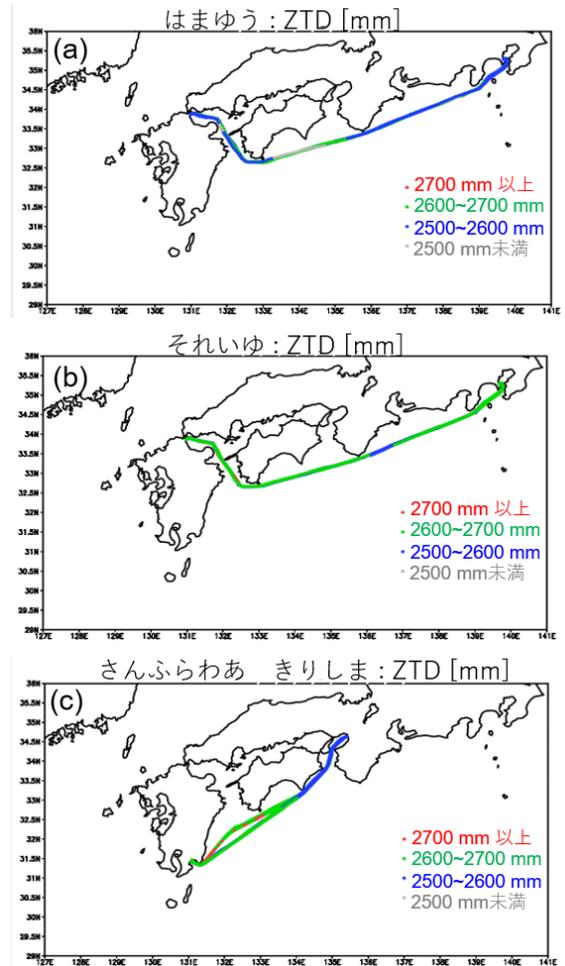


第 5.4 図 第 5.2 図と同様. ただし啓風丸.

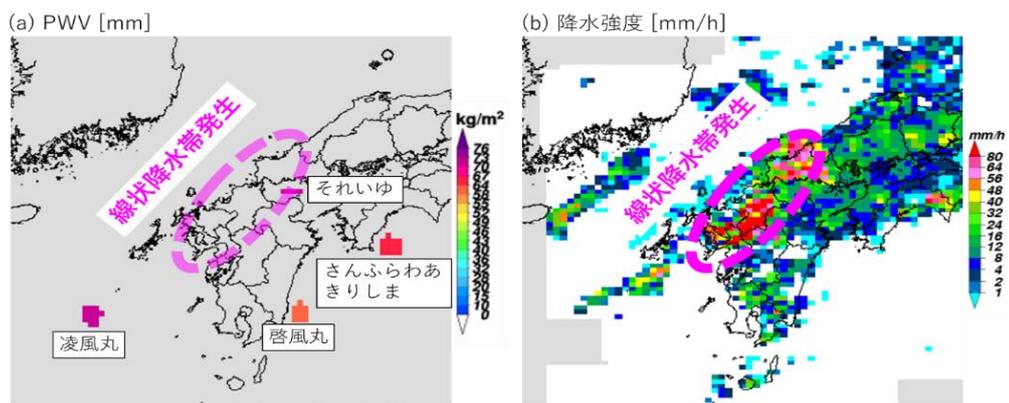
衰退に対応して  $ZTD$ ,  $ZWD$  及び  $PWV$  がいずれも減少している. 一方,  $ZHD_{MET}$  (第 5.4 図 a, 破線) は, 凌風丸における観測結果と一致して, 啓風丸においても変化幅が  $ZTD$  と比較して著しく小さい. このように, 凌風丸から観測を引き継いだ啓風丸 KS2205 航海では, 線状降水帯の最盛期から消滅に至る期間のデータを取得し, 気象庁本庁に通報を行った.

海上 GNSS 観測は, 気象庁船のみならず 4 隻の海上保安庁測量船と 10 隻の貨物船・フェリーの合計 14 隻の協力も得て実施している (第 2.2 節). 7 月 19 日に九州地方で発生した線状降水帯に関しては, 3 隻のフェリー (「はまゆう」, 「それいゆ」及び「さんふらわあ きりしま」) が, 2022 年 7 月 15 日から同 21 日において九州東方海域の南部から北部にかけて航行していた (第 5.5 図). 3 隻の航路に沿って観測された  $ZTD$  は経路の大部分で 2,600 mm 以上の値を示す.

上記のように, 2022 年 7 月 19 日に九州北部で発生した線状降水帯に対して, 九州を囲うように合計 5 隻の船舶による海上 GNSS 観測を行い, 線状降水帯の発生前から消滅に至る期間において  $ZTD$  や  $PWV$ <sup>8</sup>を気象庁本庁に通報することによって, MSM に用いるためのより精度の高い初期値の作成や, 予報現業における実況監視 (第 5.6 図) に貢献した.



第 5.5 図 (a)「はまゆう」, (b)「それいゆ」, (c)「さんふらわあ きりしま」の 2022 年 7 月 15 日から 21 日にかけての航路に沿った  $ZTD$ .



第 5.6 図 線状降水帯が発生した 2022 年 7 月 19 日午前 1 時 20 分の実況監視画面 (多画面ツール) の表示例. 線状降水帯の位置を楕円で示す. (a) 海上 GNSS 観測による  $PWV$ . 九州付近で観測中の 4 隻に船名を付した. (b) レーダー合成による降水強度.

<sup>8</sup> 海上保安庁測量船及び貨物船・フェリーの船上で得られるデータは  $ZTD$  までで,  $PWV$  は気象庁本庁で計算される (第 3.2 表).

## 6. おわりに

船舶に設置された二周波 GNSS 受信機を用い、海上の可降水量を連続解析し通報する取組を紹介した。背景には衛星測位技術の革新、特にリアルタイムの衛星軌道解析と、準天頂衛星システムによる配信という日本独自技術の実用化がある。凌風丸・啓風丸等を用いた気象研究所による実証試験を通じた精度改善と安定化の開発を経て、船舶搭載 GNSS 観測装置としては世界初の現業的な海上可降水量解析が可能となった。

線状降水帯の予測精度向上、防災気象情報の高度化に向け、海上における水蒸気観測の強化は重要な課題の一つである。令和 11 (2029) 年度運用開始を目指す次期気象衛星では、水蒸気を含む大気の 3 次元データを観測する機能を搭載すべく計画されている。船舶による海上 GNSS 観測は全天候下で連続観測の可能な海上水蒸気観測システムとして、高度化が進む衛星測位技術の進歩を取り入れつつ、安定して高精度の情報が提供できるよう、取組を続けたい。

## 謝辞

研究開発段階では 2018 年から 5 年にわたり、鹿児島荷役海陸運輸株式会社様、水産研究・教育機構様、丸三海運株式会社様、南日本汽船株式会社様、琉球海運株式会社様に試験観測の場を無償提供いただいた。これによって、船上特有の品質理解や注意点の把握、解析方法の検討が進展した。2021 年の現業観測開始時には、海上保安庁様、2022 年よりオーシャントランス株式会社様、株式会社フェリーさんふらわあ様、新日本海フェリー株式会社様、マルエーフェリー株式会社様、琉球海運株式会社様に観測場所の提供、機器設置に関わる船体工事、電力の提供、さらに異常時の対応をご協力いただいている。

リアルタイム衛星軌道情報の MADOCA 暦及び MADOCA-PPP の特性や利用方法については、内閣府準天頂衛星システム戦略室様及び宇宙航空研究開発機構様に、解析ソフトウェア RTKLIB の詳細について作者の高須知二様にそれぞれ重要で有意義なアドバイスをいただいた。

## 参考文献

- Askne, J. and H. Nordius (1987) : Estimation of tropospheric delay of microwaves from surface weather data. *Radio Sci.*, **22**, 379–386.  
<https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379>.
- 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.  
<https://doi.org/10.1029/92JD01517>.
- Boehm, J., B. Werl, and H. Schuh (2006) : Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *J. Geophys. Res.*, **111**, B02406.  
<https://doi.org/10.1029/2005JB003629>.
- Boniface, K., C. Champollion, J. Chery, V. Ducrocq, C. Rocken, E. Doerfner, and P. Collard (2012) : Potential of shipborne GPS atmospheric delay data for prediction of Mediterranean intense weather events. *Atmos Sci Lett*, **13(4)**, 250–256.  
<https://doi.org/10.1002/asl.391>.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rodgers, and G. Elgered (1985) : Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, **20**, 1593–1607.  
<https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人 (2012) : 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-86.  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/45/No45\\_all.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/45/No45_all.pdf).
- Elgered, 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.*, **96**, 6541–6555.  
<https://doi.org/10.1029/90JB00834>.

- European GNSS Service Center (2023) : Galileo Constellation Information.  
(<https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>, accessed 2023-5-16)
- Foster, J., M. Bevis, and S. Businger (2005) : GPS Meteorology: Sliding-window analysis. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 687–695.  
<https://doi.org/10.1175/JTECH1717.1>.
- 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.  
<https://doi.org/10.1029/2008GL033764>.
- Ikuta, Y., H. Seko, and Y. Shoji (2022) : Assimilation of shipborne precipitable water vapour by Global Navigation Satellite Systems for extreme precipitation events. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **148(742)**, 57–75.  
<https://doi.org/10.1002/qj.4192>.
- Information and Analysis Center for Positioning (2023) : Navigation and Timing, GLONASS Constellation Status.  
(<https://glonass-iac.ru/en/sostavOG/>, accessed 2023-5-16)
- 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.
- Kawate, K., Y. Igarashi, H. Yamada, K. Akiyama, M. Okeya, H. Takiguchi, M. Murata, T. Sasaki, S. Matsushita, S. Miyoshi, M. Miyoshi, and S. Kogure (2023) : MADOCA: Japanese precise orbit and clock determination tool for GNSS. *Adv. Space Res.*, **71**, 3927–3950.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.060>.
- 気象研究所気象観測研究部(2021):船舶搭載GNSSによる海上の水蒸気観測. 船と海上気象, **65-1**, 5–7.
- 内閣府 (2022) : 「高精度測位補強サービス (MADOCA-PPP)」の試行運用開始に関するお知らせ.  
([https://qzss.go.jp/info/information/madoca\\_220930.html](https://qzss.go.jp/info/information/madoca_220930.html), 2023年5月16日参照)
- 内閣府 (2023) : 衛星運用状況.  
(<https://sys.qzss.go.jp/dod/constellation.html>, 2023年5月16日参照)
- 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. J.*, **101**, Early Online Release.  
<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., K. Sato, M. Yabuki, and T. Tsuda (2016) : PWV retrieval over the ocean using shipborne GNSS receivers with MADOCA real-time orbits. *SOLA*, **12**, 265–271.  
<https://doi.org/10.2151/sola.2016-052>.
- Takasu, T. (2013) : RTKLIB 2.4.2 manual.  
([http://www.rtklib.com/prog/manual\\_2.4.2.pdf](http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf), accessed 2023-5-16)
- U. S. Coast Guard Navigation Center (2023) : GPS Constellation Status.  
(<https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>, accessed 2023-5-16)
- Zumberge, J. F., M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, and M. M. Watkins (1997) : Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005–5017.

## 付録 A. GNSS と海上 GNSS 測位解析

## A1. はじめに

全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）による衛星測位は，利用する情報や測位方法によって，精度数 10 m から mm 級までの測位を提供する．海上 GNSS 観測で用いる精密単独測位（Precise Point Positioning, PPP）（第 A4 節）は測位衛星と GNSS 受信機間の距離を基に，cm の精度で受信機の 3 次元空間の位置を解析する．

ここでは船舶に搭載した GNSS 観測装置を用いた測位解析に基づく海上の可降水量（Precipitable Water Vapor, *PWV*）解析の理解に必要な基礎知識を概説する．なお，GNSS について測地学会(2004)，GNSS 気象学については内藤勲夫編(1998)が総合的な解説を行っている．また，RTKLIB で行われている処理については，バージョン 2.4.2 マニュアル (Takasu, 2013) の Appendix E に解説されている．

以下第 A2 節で衛星測位の種類について概説し，第 A3 節では精密測位で利用する搬送波位相について説明する．第 A4 節では精密測位の二つの手法（二重位相差と精密単独測位）の違いを紹介し，第 A5 節では海上 GNSS 観測で用いている精密単独測位の概要を述べる．

## A2. GNSS と GPS

人工衛星を用いた衛星測位システムを総称して GNSS と呼ぶ．米国の Global Positioning System (GPS) は 1993 年 12 月に世界で初めて正式運用を開始した．その後，ロシアの GLONASS が 2011 年に 24 基体制となり，全世界で利用可能となるまで，唯一全球で 24 時間利用可能な GNSS であった．2023 年 3 月現在も，高精度の GNSS 測位には不可欠の，基盤的なシステムである．第 A1 図は GPS 衛星のイメージ図である．高度 2 万 km，6 軌道面に投入された 31 基の原子時計を搭載した衛

第 A1 図 GPS 衛星のイメージ<sup>9</sup>。

星から，測位信号が送信されている．

GNSS 衛星の軌道や高度，また送信電波の周波数等はシステムごとに必ずしも同一ではないが，基本的に L 帯の電波を，衛星ごとに割り当てられたコードで変調して送信している．コードには放送暦（あるいは航法メッセージ）と呼ばれる，各 GNSS 機関が行った軌道解析結果等が含まれている．コードに含まれる情報を用いた単独測位（あるいは一点測位）は，GNSS の最も基本的な利用方法である．リアルタイムで利用が可能で，カーナビゲーションなどで利用される．測位精度は数 m 程度である．

GNSS の大気計測への応用として解析される *PWV* は，GNSS 測位の際に座標と共に推定される天頂遅延量（Zenith Total Delay, *ZTD*），及び別途気象観測やモデルから入手した GNSS アンテナ位置の気圧と気温から算出する．*ZTD* の誤差と鉛直座標の誤差は逆比例の関係にある (Santerre, 1991 ; Shoji *et al.*, 2000)．*PWV* を 1 mm の精度で解析するためには，少なくとも cm レベルで鉛直座標を推定する必要があり，コードを用いた単独測位では達成できない．

<sup>9</sup> GPS 衛星のイメージ図は，国立国会図書館インターネット資料収集保存事業（WARP）により保存されている国土地理院のホームページより転載．

([https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10191130/terras.gsi.go.jp/geo\\_info/GNSS.html](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10191130/terras.gsi.go.jp/geo_info/GNSS.html))

A3. 搬送波位相を用いる精密測位

cm 級の測位には、コードではなく搬送波位相（後述）を用いる。距離の推定精度は民生用の C/A コードで 30 m であるのに対し、搬送波位相は大気や時計誤差の影響が無い場合、2 mm 程度である。

搬送波位相は、単なる GNSS 衛星から受信した電波の位相とは異なる。GNSS 受信機内部では、GNSS 衛星の送信周波数と同一の信号を生成しており、受信した電波の位相と、GNSS 受信機内部で生成された信号の位相との差が搬送波位相として定義され（第 A1 式）、サイクルの単位を持つ。

$$\phi_R^S[t] = \phi_R[t] - \phi^S[t] + N_R^S \quad (A1)$$

ここで、 $\phi_R[t]$  は GNSS 受信機 R の生成した信号の位相、 $\phi^S[t]$  は衛星 S から受信した電波の位相。 $N_R^S$  は波数不確定（あるいは整数値バイアス）。搬送波位相の時間変化は、受信開始からの衛星と GNSS 受信機間の距離の変化や電波経路上の大気状態の変化、衛星及び GNSS 受信機の時計の誤差変化を反映している。ただし、受信開始時における衛星と GNSS 受信機間の波数の整数部分や、大気による電波の遅延、時計の誤差は未知である。

GNSS 測位では、時刻情報の精度が測位精度を左右するため、各衛星には高精度な原子時計が搭載されている。一方で GNSS 受信機には安価な水晶発振時計が使われている。衛星の時計も、回路の熱雑音等の影響による揺らぎは避けられない。

時計誤差 ( $\delta_R, \delta^S$ ) を含めると、GNSS 受信機の生成した信号の位相、及び衛星から受信した電波の位相は下記のように記述できる。

$$\phi_R[t] = f(t - \delta_R[t]) \quad (A2)$$

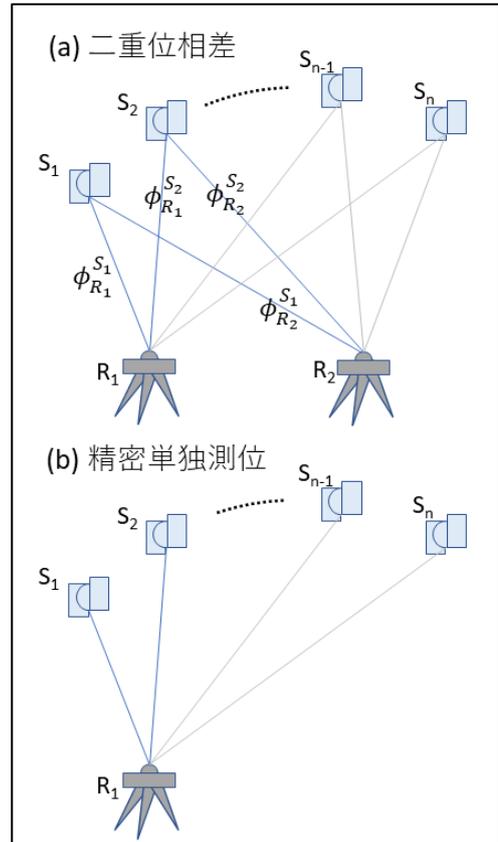
$$\phi^S[t] = \phi^{S0}[t] - f \rho_R^S/c \quad (A3)$$

$$\phi^{S0}[t] = f(t - \delta^S[t]) \quad (A4)$$

ここで、 $\phi^{S0}$  は時刻  $t$  の衛星時計の位相、 $f$  は搬送波の周波数、 $\rho_R^S$  は電波が伝搬した距離、 $c$  は真空中の光速。

A4. 二重位相差と精密単独測位

時計誤差の処理の仕方では、搬送波位相を用いた精密測位は二重位相差 (Double Difference, DD) 測位と PPP の二種類に大別される（第 A2 図）。DD の場合、2 つの GNSS 受信機で 2 基の衛星からの



第 A2 図 二重位相差と精密単独測位の違いを説明する模式図。二重位相差では、第 A5 式に示すように、2 つの GNSS 受信機で観測した 2 基の衛星の搬送波位相を差し引くことで、衛星及び GNSS 受信機の時計誤差を相殺する。精密単独測位では、衛星時計誤差は予め解析されたものを用い、GNSS 受信機時計誤差はパラメータ推定する。

搬送波位相を下記のように差し引くことで、衛星及び GNSS 受信機の時計誤差を相殺することができる。

$$\phi_{R1R2}^{S1S2}[t] = \phi_{R2}^{S1}[t] - \phi_{R1}^{S1}[t] - (\phi_{R2}^{S2}[t] - \phi_{R1}^{S2}[t]) \quad (A5)$$

二重位相差測位では、GNSS 受信機の相対的な位置が解析される。構成する受信機の 1 点が、既に精密に測位されていれば、他方の GNSS 受信機の絶対位置が mm から cm の精度で求められる。対流圏遅延についても同様に、個々の GNSS 受信機上空の遅延量差が求められる。大気遅延の絶対量を求めるためには、少なくとも 1 点の遅延量を観測やモデルなどから入手するか、GNSS 受信機間の距離を、数百 km 等、電波経路上の遅延量に相

関が十分小さい程度に離して解析する必要がある。

一方, PPP は, 予め高精度に推定された GNSS 衛星の軌道と時計の誤差を既知として, GNSS 受信機時計誤差や対流圏遅延量を GNSS 受信機の位置と共に未知パラメータとして推定する。衛星軌道解析を先行して行う必要があるため, 厳密な意味でのリアルタイム解析はできないが, 通信網の発達した現代では, ほぼ実時間処理が可能である。また, 二重位相差では基線を構成する観測点数の約三乗のオーダーで計算コストが増加する (Shoji, 2009) のに対し, PPP では観測点数に比例したコスト増となるため, 大規模な観測網を短時間で処理したい場合は PPP が優位となる。海上 GNSS 観測では, 他点の搬送波位相が不要の PPP を採用している。

#### A5. 精密単独測位の概要

搬送波位相 (cycle) に波長 ( $\lambda$ ) を掛け, 距離の単位に変換した量 ( $L$ ) の観測モデルは下記のように表すことができる。

$$L \equiv \lambda\phi = \rho + c(\delta_R - \delta^S) - I + STD + \lambda N + \varepsilon_L \quad (A6)$$

ここで,  $\rho$  は GNSS 衛星と GNSS 受信機を結ぶ直線距離,  $I$  は電離層遅延,  $STD$  は中性大気による遅延 (対流圏遅延),  $\varepsilon_L$  は観測誤差である。GNSS 測位では, 同時刻に 4 基以上の衛星から得られた搬送波位相を用い, GNSS 受信機座標や波数不確定等の未知パラメータ推定を行う。ただし, 測位解析の前に, 未知パラメータの数を減らす二つの工夫がなされている。

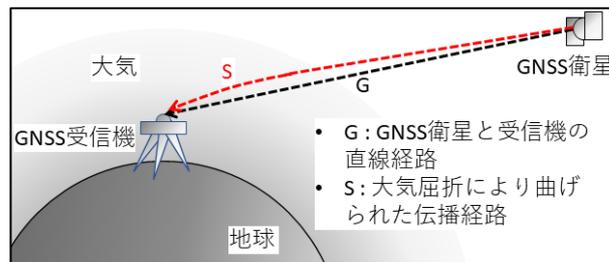
##### A5.1 電離層遅延

L 帯電波の電離層遅延は, 周波数の二乗に反比例する性質がある。

$$I = \frac{40.3}{f^2} \int \rho_l dl = \frac{40.3 \times 10^{16}}{f^2} TEC \quad (A7)$$

ここで  $\rho_l$  は電子密度,  $TEC$  (Total Electron Content, 総電子数) は電波経路に沿った電子密度の積分。

この性質を利用すると, 下記の二周波線形結合により, 電離層遅延は観測モデルから除くことができる。



第 A3 図 GNSS 搬送波の伝播経路の模式図。一般に大気の屈折性は下層ほど強いことから, 搬送波はわずかに地球中心に向けて屈折して GNSS 受信機に到達する。

$$LC = C_1 L_1 - C_2 L_2 = \rho + c(\delta_R - \delta^S) + STD + \lambda N_{LC} + \varepsilon_{LC} \quad (A8)$$

$$C_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, C_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (A9)$$

$$N_{LC} = C_1 \lambda_1 N_1 - C_2 \lambda_2 N_2 \quad (A10)$$

##### A5.2 対流圏遅延

衛星から送信された電波が大気中で減速し, かつ曲がることで, 真空中を伝播する場合より遅れて GNSS 受信機に到達する (第 A3 図)。この遅れを距離に換算したものが大気遅延量である。下式のように, 伝播経路上の屈折指数の積分として定義される。

$$STD = \int [n(s) - 1] ds \quad (A11)$$

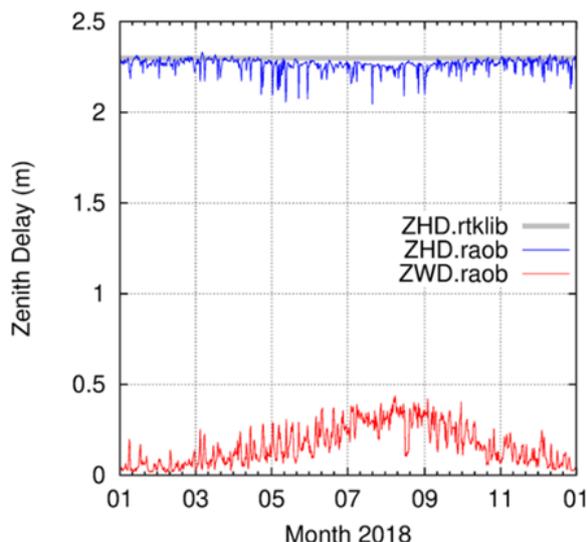
ここで  $STD$  は全遅延量 (Slant Total Delay),  $n$  は屈折率である。

$n$  と乾燥空気分圧 ( $P_d$ ), 水蒸気分圧 ( $P_v$ ), 気温 ( $T$ ) には下記の関係がある (Thayer, 1974)。

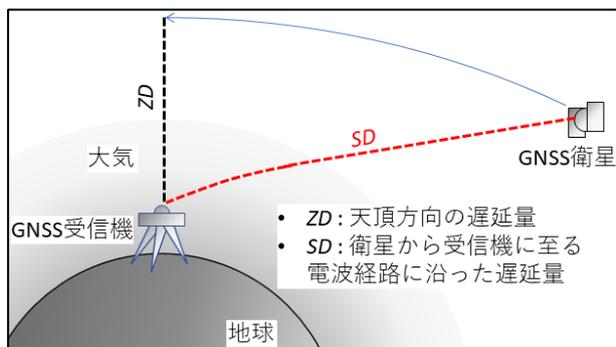
$$10^6(n - 1) = k_1 \left(\frac{P_d}{T}\right) + k_2 \left(\frac{P_v}{T}\right) + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2}\right) \quad (A12)$$

係数  $k_1, k_2, k_3$  は実験で求められる。海上 GNSS 観測では Boudouris (1963) にならひ,  $k_1 = 77.60 \text{ K/hPa}$ ,  $k_2 = 71.98 \text{ K/hPa}$ ,  $k_3 = 3.754 \cdot 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$  を使用している。

第 A12 式の乾燥空気に起因する右辺第 1 項による遅延量を静水圧遅延 (Hydrostatic Delay, HD), 水蒸気の寄与による右辺第 2, 3 項による遅延量を湿潤遅延 (Wet Delay, WD) と呼ぶ。天頂方向の遅延量の場合,  $ZHD$  は年間を通して 2 m 程度,  $ZWD$



第 A4 図 つくば市における天頂静水圧遅延量 (ZHD.raob : 青線) と天頂湿潤遅延量 (ZWD.raob : 赤線) の年変化 (2018 年). 灰太線は標準大気モデルから推定された天頂静水圧遅延量 (ZHD.rtklib) で, RTKLIB による測位解析で用いられるもの.



第 A5 図 天頂方向の遅延量 (ZD) と, 伝播経路に沿った視線遅延量 (SD) との関係を示す模式図. ZD と SD の比を, マッピング関数として与え, 測位解析では ZD の推定を行う.

は数 mm から 40 cm 程度で変化する (第 A4 図). 天頂遅延量 (ZTD) は ZHD と ZWD の総和として定義される.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (A13)$$

STD は GNSS 受信機で観測された電波の各衛星からの伝播経路上の視線遅延量であり, 衛星毎に独立した量である. これを, 天頂方向の遅延量, 及び天頂遅延量の水平一次勾配で代表させ, 推定する未知パラメータを減らす (第 A5 図).

この時, 視線遅延量と天頂遅延量との比を表現する関数は, マッピング関数と呼ばれ, その精緻化は衛星測地学の重要な研究課題である. 海上 GNSS 観測では, Global Mapping Function (GMF) (Boehm *et al.*, 2006) と呼ばれる欧州中期気象予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) の 40 年再解析データである ERA40 を用いて構築されたマッピング関数を利用する.

GMF は, 第 A14 式のように地球の曲率を考慮した, 連分数である.

$$m(\theta) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(\theta) + \frac{a}{\sin(\theta) + \frac{b}{\sin(\theta) + c}} \quad (A14)$$

ここで  $\theta$  は衛星仰角, 係数  $a, b, c$  は緯度, 経度, 高度, 年通算日の関数で与えられる.

大気遅延量の一次勾配を考慮するとマッピング関数は下記のようなになる (MacMillan, 1995).

$$m(\theta, \varphi) = m(\theta) + m(\theta) \cot(\theta) \cdot [G_N \cos(\varphi) + G_E \sin(\varphi)] \quad (A15)$$

ここで,  $\varphi$  は真北を 0 度とし, 時計回りに計測した衛星の方位角,  $G_N, G_E$  はそれぞれ南北, 東西方向の勾配成分で, 未知パラメータとして推定される.

さらに, マッピング関数は ZHD と ZWD に対して作成されており, 精密測位で用いる対流圏遅延モデルは下記のようなになる.

$$STD = m_{dry}(\theta, \varphi) \cdot ZHD + m_{wet}(\theta, \varphi) \cdot ZWD \quad (A16)$$

### A5.3 RTKLIB による測位解析

RTKLIB の PPP 解析で, 未知変数の状態ベクトルは下式で与えられ, 拡張カルマンフィルター (Extended Kalman Filter, EKF) を用いて推定される.

$$x = (r_R^T, c \cdot dt, ZTD, G_N, G_E, N_R^{S1}, N_R^{S2}, \dots, N_R^{Sn})^T \quad (A17)$$

ここで,  $r_R$  は観測点位置,  $dt$  は GNSS 受信機時計誤差である. 添え字 T は, 転置行列であることを意味する. これらの未知パラメータのうち,  $r_R, dt, ZTD, G_N, G_E$  は時間依存パラメータとして扱

う。地上固定点の GNSS 受信機の場合、 $r_R$  は波数不確定  $N$  とともに、時間変化しない量として扱う。

$ZTD$  については、直接パラメータ推定するわけではない。 $ZHD$  を標準大気モデルから推定する Saastamoinen モデル (Saastamoinen, 1973) を用いて下式で推定し、 $ZWD$  を拡張カルマンフィルタで推定している。

$$ZHD = 0.002277 \cdot P \quad (A18)$$

$$P = 1013.25 \cdot (1 - 2.2557 \cdot 10^{-5} h)^{5.2568} \quad (A19)$$

ここで、 $P$  は標準大気モデルから推定した GNSS アンテナ位置の気圧で、 $h$  はアンテナの海面高度である。遅延量の大きな部分を占める  $ZHD$  の推定を単純化することで、パラメータ推定する遅延量を小さくしている。

第 A4 図には、高層ゾンデ観測データから計算した 1 年間の天頂静水圧遅延量 ( $ZHD.raob$ ) の変化を青線、第 A18 式、第 A19 式により推定される天頂静水圧遅延量 ( $ZHD.rtklib$ ) を灰太線でプロットしている。両者は相対的に冬季に一致度が高く、夏季には  $ZHD.rtklib$  は過大評価の傾向があることがわかる。また、季節変化のほかに、短期間で  $ZHD.raob$  が減少し、 $ZHD.rtklib$  と 20 cm から 30 cm 程度離れてしまうことが、1 から 2 週間に 1 回程度発生している。総観規模擾乱の影響と推測される。このように、推定された  $ZHD.rtklib$  の誤差は、パラメータ推定される  $ZWD$  に分配されることになる。 $ZHD$  と  $ZWD$  のマッピング関数の違いによる測位解析や  $PWV$  推定への影響は、現時点では不明である。

マッピング関数 (第 A15 式) と遅延量 (第 A16 式) についても、下記のような簡略を行っている。

$$m'(\theta, \varphi)$$

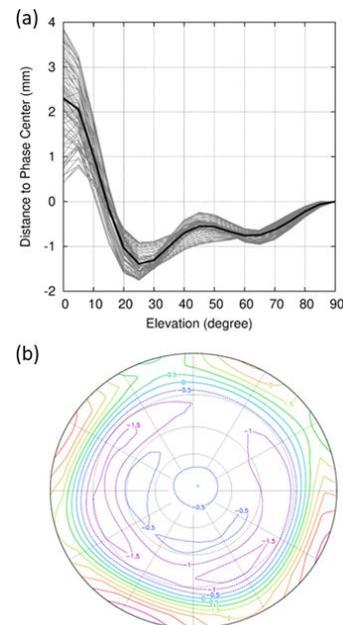
$$= m_{wet}(\theta) + m_{wet}(\theta) \cot(\theta) \cdot [G_N \cos(\varphi) + G_E \sin(\varphi)] \quad (A20)$$

$$STD = m_{dry}(\theta, \varphi) \cdot ZHD + m'(\theta, \varphi) \cdot ZWD \quad (A21)$$

#### A5.4 アンテナ位相中心変動の補正

GNSS 受信機で使用する GNSS アンテナは無指

向性である。GNSS アンテナが衛星からの搬送波を受信する電気的な中心を、アンテナ位相中心 (Phase Center) と呼ぶが、搬送波の入射角によって見かけ上の位置が変化する (Phase Center Variation, PCV)。国際 GNSS 事業 (International GNSS Service, IGS) では、各 GNSS アンテナの PCV を計測し、公開している<sup>10</sup>。第 A6 図に、IGS による PCV モデルの例を示す (Septentrio 社製 PolaNt-x MF)。当アンテナの PCV は、IGS の補正テーブルで仰角、方位角 5 度間隔の情報として提供されている。位相中心は鉛直方向にはゼロだが、仰角に依存して -2 mm から +4 mm の範囲で変化している。同一仰角でも方位角に依存して変動しており、特に低仰角では変動幅が大きい。Shoji *et al.* (2004) は PCV の補正を行わない場合、GNSS アンテナによっては 1 mm を超える  $PWV$  のバイアスをもたらすことを報告している。RTKLIB は atx 形式<sup>11</sup>の PCV を読み込み、仰角方向の PCV を補正する。



第 A6 図 IGS14.atx に収録された Septentrio 社製 PolaNt-x MF アンテナの GPS 衛星 L1 信号に対する PCV 値。(a) 仰角依存性、方位角 5 度間隔で記述された仰角依存性を灰色線で、平均を黒線で示した。(b) 仰角、方位角依存性。(a) と同じデータを 2 次元にプロットしたもの。

<sup>10</sup> <https://igs.org/wg/antenna#files>

<sup>11</sup> Antenna exchange format. (<https://files.igs.org/pub/data/format/antex14.txt>)

## 参考文献

- Boehm, J., B. Werl, and H. Schuh (2006) : Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *J. Geophys. Res.*, **111**, B02406.  
<https://doi.org/10.1029/2005JB003629>.
- Boudouris, G. (1963) : On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **67D**, 631-684.  
<https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>.
- MacMillan, D. S. (1995) : Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1041-1044.  
<https://doi.org/10.1029/95GL00887>.
- 内藤勲夫編 (1998) : GPS 気象学, 気象研究ノート, **192**, P220.  
 (<https://www.metsoc.or.jp/membersite/note/note-192/>)
- Saastamoinen, J. (1973) : Contribution to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Geodesique*, **107**, 13-34.  
<https://doi.org/10.1007/BF02521844>.
- Santerre, R. (1991) : Impact of GPS satellite sky distribution. *Manuscripta Geodaetica*, **16**, 28-53.
- 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.  
<https://doi.org/10.2151/jmsj.87.1>.
- 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 residuals. *J. Meteor. Soc. J.*, **82(1B)**, 301-314.  
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2004.301>.
- 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.  
<https://doi.org/10.1186/BF03352264>.
- 測地学会 (2004) : Web テキスト測地学新装訂版, 2-4-1-1. GNSS.  
 (<https://geod.jp/web-text/part2/2-4/index.html#1-1>, 2023 年 5 月 16 日参照)
- Takasu, T. (2013) : RTKLIB 2.4.2 manual.  
 ([http://www.rtklib.com/prog/manual\\_2.4.2.pdf](http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf), accessed 2023-5-16)
- Thayer, G. D. (1974) : An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Sci.*, **9**, 803-807.  
<https://doi.org/10.1029/RS009i010p00803>.

## 付録 B. 2021 年 3 月から現在までの主な処理の改変

当業務は 2021 年 3 月 26, 27 日に凌風丸, 啓風丸に装置を設置し, 2022 年度にかけて船数を 16 隻まで増やしてきた. 業務開始から 2022 年度末までに必要となった処理の改変の主なものをまとめる.

### B1. MADOCA 補正情報デコード不具合

業務開始後, 土曜日の 2210UTC から日曜の 0000UTC にかけて, 解析に利用できる衛星数の減少や欠測の増加が確認された. 原因は, 解析に利用する RTKLIB ver. 2.4.3 b33 が, 週境の MADOCA 補正情報を正しくデコードできないことが原因であった. 2021 年 6 月から 8 月にかけて, RTKLIB を最新の ver. 2.4.3 b34 に更新することで解消した.

### B2. 異常値回避処理

前後の値や MA と比較し, 解析された *PWV* や *ZTD* が大きく異なる事象が稀に発生した. 90 分のスライディングウィンドウの解析初期に異常が見られることが多く, その場合解析開始時刻を 10 分程度ずらすことで解消できる場合が多いこと, *ZTD* と共に推定している大気遅延勾配パラメータの長さが, 異常値判定の指標として使えることなどがわかった. 大気遅延量勾配パラメータが 40 mm を超える場合, 処理開始時刻を 10 分後ろにずらして再解析する改修を行い, 2021 年 11 月から 2022 年 4 月にかけて順次, 船上システムの更新を実施した.

### B3. 解析の欠落

2022 年 10 月から 11 月上旬にかけて, 測位解析の欠落が増加した. 特に夜間の頻度が多く, 各船の欠落発生時刻には共通点が見られた. 受信機メーカー, 内閣府, MADOCA 解析を担当する企業の技術者との情報交換の結果, 以下のことがわかった.

- ① PPP 解析の前段で, GNSS アンテナの大まかな位置を推定するためのコード測位が異常終了していること,
- ② コード測位で利用される放送暦に, 電離層補正パラメータを追加すると, 現象が解消すること,
- ③ すべてのエポックでコード測位が正常終了しなくとも PPP 解析には大きく影響しないこと.

以上より, コード測位時に二周波から得られる電離層補正情報を利用し, またコード測位が異常終了しても PPP 解析を実行するように, プログラムを改修し, 2023 年 1 月より順次船上システムの更新を行った.

### B4. GALILEO の利用

2021 年の業務開始時には MADOCA 暦で提供される衛星補正情報は, GPS, GLONASS, QZSS の 3 システムのものであった. 2022 年 9 月 30 日に MADOCA-PPP として, GALILEO の軌道補正情報が追加された. 2022 年 10 月から 12 月を対象に, 比較実験を行った結果, 解析の安定化と精度の改善が確認できたため, 第 B3 節の処置と同時に, 2023 年 1 月より順次船上システムの更新を行った.