

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12156

研究課題名(和文)GNSSを用いた新たな水蒸気トモグラフィー手法の開発

研究課題名(英文)Development of a new method of GNSS water vapor tomography

研究代表者

藤田 実季子 (FUJITA, Mikiko)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(大気海洋相互作用研究センター)・グループリーダー

研究者番号：50426293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水蒸気の連続観測を可能とするGNSS衛星(衛星測位システム)を用いた新たな水蒸気トモグラフィー手法の開発を実施した。これまでのGNSS水蒸気トモグラフィー手法よりも比較的少ないGNSS観測点のみで解析できるように改良を実施した。GNSSの水蒸気トモグラフィー解析は、電波の経路と通過時間(水蒸気による遅延量)の逆問題を表す連立方程式解くが、逆解析で用いる境界条件(重み付け)について、主に改良を実施した。先行研究でもよく使われている重み付けの簡便な関数は、特定の高度にバイアスが大きく出現するが、今回開発した重み付けモデルは、これよりも高精度で推定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、水蒸気の連続観測を可能とするGNSS衛星(衛星測位システム)を用いた、新たな水蒸気トモグラフィー手法の開発を実施した。開発したトモグラフィー手法では、より高精度に水蒸気の鉛直構造を推定することが可能となった。これにより、これまで観測することが難しかった降水イベント発生時の大気構造を、連続的かつ高頻度に観測・監視することができるようになり、降水現象の詳細理解や予測精度の向上へつながる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new water vapor tomography method using GNSS satellites (Global Navigation Satellite System), which enables continuous observation of water vapor. We made improvements to allow analysis with relatively fewer GNSS observation points compared to conventional GNSS water vapor tomography methods. GNSS water vapor tomography analysis involves solving a system of simultaneous equations that represent the inverse problem of the radio wave path and the travel time (delay caused by water vapor). We primarily focused on improving the boundary conditions (weighting function) used in the inverse analysis. The simple weighting functions frequently used in previous studies tend to exhibit significant bias at specific altitudes. However, the weighting model developed in this study achieved higher accuracy in estimation.

研究分野：気象・気候学

キーワード：水蒸気トモグラフィー GNSS気象 大気構造

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空気中の水蒸気量は、相対湿度が一定の場合、クラウジウス・クラペイロンの定理に従い気温の関数で表現することができ、気温 1 上昇あたり水蒸気量は 7% ずつ指数関数的に増加すると概算される。ところが、水蒸気の鉛直積算量(可降水量)の各気温帯で分類された極大値はこの 7% を超えた増加率で変化する (Fujita and Sato 2017)。7% 超過の理由の一つとして、地上付近の大気境界層よりも上空の水蒸気の寄与が示唆されており、類似した 7% を超える増加率は降水量を用いた研究でも報告されている (Lenderink and Meijgaard 2008 他) が、降水の源となる水蒸気量についての過去研究は上記以外ほとんどなく、特に地上気温上昇に伴う水蒸気の鉛直構造がどのように変化するのかが明らかになっていない。

正確な水蒸気の変化傾向を知るには、水蒸気の鉛直構造を高時間分解能に観測しなければならない。水蒸気量の鉛直構造を観測する手段は、今のところラジオゾンデが一般的であるが、現業観測では時間分解能が低く、1日2回しか実施されない。温度変化に伴う水蒸気量の鉛直構造の変化を理解するには極めて難しい状況である。

本研究では上記の背景をふまえ、衛星測位システム (GNSS) を用いた水蒸気トモグラフィー手法の開発を実施した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地上気温の上昇と水蒸気量の鉛直構造の関係性を解明するために、GNSS 水蒸気トモグラフィーの解析手法を更新することである。これまで、多数の GNSS 観測点で構成されてきた GNSS 水蒸気トモグラフィー手法を、比較的少ない GNSS 観測点のみで解析できるように改良する。一般的にトモグラフィー解析をする際には電波の経路と通過時間(水蒸気による遅延量)の逆問題を表す連立方程式解くが、本研究では少ない情報で解くための補完情報を逐次設定し、解の推定可能な重み付けを組み込む。

3. 研究の方法

まず、水蒸気トモグラフィー解析に必要な GNSS 衛星方向の視線方向大気湿潤遅延量の推定と、検証用データの抽出・品質管理を行った。GNSS の大気遅延量は、GNSS 衛星の電波が地球大気を通過する際に気温・水蒸気により屈折率が変化することで生じる遅れである。視線方向の大気湿潤遅延量は、精密測位解析による天頂方向の大気湿潤遅延量に衛星ごとの残差を加えることで推定した。

次に GNSS 搬送波の経路と解析空間を設定するモジュールの開発を着手した。衛星位置は GNSS 関連機関から発表される精密暦の情報を用い、特定の地上観測点までの搬送波の経路を設定した。水蒸気トモグラフィーでは設定したグリッド空間上において、搬送波が通過したグリッドに重み付けをして方程式を設定する。本研究では、効率的なトモグラフィー解析を実施するために、水平方向に隣接するグリッドへも重み付けを与える関数を設定し、逆解析の推定条件の改善を試みた。このグリッドへの重み付けについて、鉛直方向への適用も実施した。気象庁のメソ解析データを用い統計的手法により関数を推定し適用した。また、これらのモジュールを実行する計算機環境の整備も事前に実施した。

4. 研究成果

作成したモジュールの組み込み作業を実施し、実際の GNSS 衛星観測データを用いた水蒸気プロファイルの推定を行った。観測データは稠密な GNSS 観測網のデータを用い、トモグラフィーが実施しやすい観測配置のデータを選定した (図 1)。

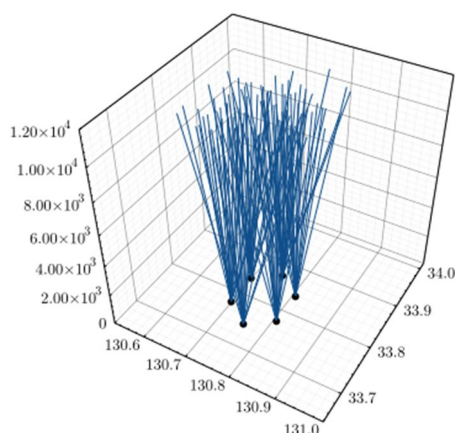


図 1 観測点配置の例。擬似観測点 6 点を六角形上に配置し、空間外縁の仰角は 60° に設定した。青線は各衛星の電波伝搬経路を示す。

日本の九州地方において、夏季の大気状態が比較的不安定な事例について水蒸気プロファイルの推定を実施したところ、高度 3-5km 程度に湿潤気塊の流入に伴う水蒸気変動が顕著に出現した（図 2：右）。特に鉛直方向の重み付けについて、関数の違いによるトモグラフィー解析の精度評価を調査したところ、先行研究でもよく使われている水蒸気のスケールハイトをパラメータとした鉛直重み付けの簡便な関数は、このような高度 3-5km 付近と地上付近のバイアスが大きく（図 2：左）統計的手法で推定された重み付け関数を用いた場合の方が高精度で推定できることがわかった（図 2：右下）。この結果から、重み付け関数の正確さは、トモグラフィー解析で得られる結果の精度を左右する重要な部分であることが示唆された。

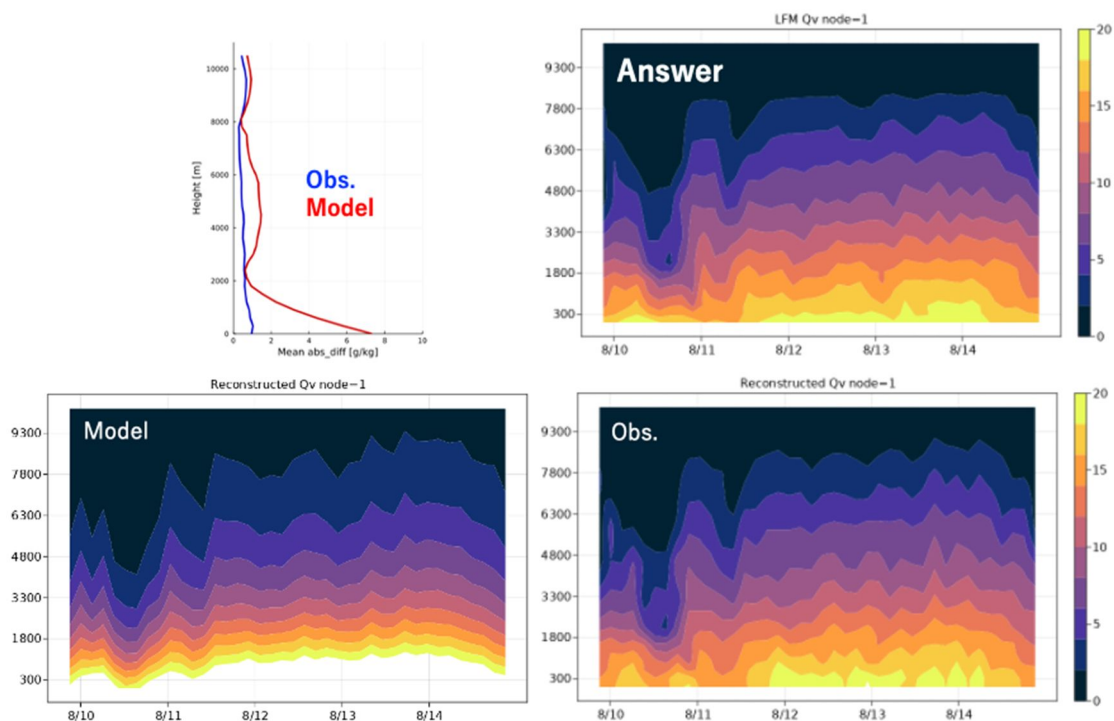


図 2 鉛直方向の重み付けの違いによる推定された水蒸気プロファイルの違い。右上の Answer はトモグラフィー解析で推定されるべき答え、左下の Model は先行研究のモデルを用いたトモグラフィー解析で推定された値、Obs. が本研究の統計的手法により定めた関数を用いたトモグラフィー解析で推定された値。左上の誤差は絶対値の平均を示す。

さらにこの鉛直方向の重み付けの推定について、教師ありの機械学習を活用したモデル推定手法を組み込んだ。モデルの学習時に水蒸気の鉛直構造の形状を数値化したデータ（シグネチャ）を用いることで精度向上を図ったところ、従来の重み付け関数よりも高精度に水蒸気の鉛直構造を表現することが可能となり、トモグラフィー解析による推定精度の向上も確認された。水蒸気量やその鉛直構造の時間変動が比較的大きい、大気状態が不安定な場合であっても、水蒸気プロファイルをより正確に推定することが可能となった。得られた結果を学術誌へ投稿し受理された(Fujita et al. 2024)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoneyama Kunio, Yokoi Satoru, Fujita Mikiko, Seiki Ayako, Katsumata Masaki, Geng Biao, Fukuda Tatsuya	4. 巻 74
2. 論文標題 Atmospheric Convection Research Using Autonomous Surface Vehicles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 MAUSAM	6. 最初と最後の頁 287 ~ 296
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.54302/mausam.v74i2.5904	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 Fujita M., Sugiura N., Kouketsu S.	4. 巻 51
2. 論文標題 Prediction of Atmospheric Profiles With Machine Learning Using the Signature Method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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） 10.1029/2023GL106403	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7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Mikiko Fujita
2. 発表標題 Sensitivity of water vapor vertical shape in GNSS atmospheric observation
3. 学会等名 EGU General Assembly 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田実季子
2. 発表標題 民間独自基準点データを用いた2021年8月九州地方大雨のGNSS可降水量と鉛直構造推定
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mikiko Fujita
2. 発表標題 Monitoring for the extreme water vapor variation around Japan using GNSS
3. 学会等名 ICG International Committee on GNSS: WG-D and WG-B's Task Force on Applications of GNSS for Disaster Risk Reduction (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤田実季子
2. 発表標題 GNSSを用いた船舶等による水蒸気量観測
3. 学会等名 電子情報通信学会 2022年ソサイエティ大会企画講演 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田実季子
2. 発表標題 GNSSの気象利用の概要と将来について
3. 学会等名 準天頂衛星が拓く安全・安心社会の実現に向けた高精度測位技術及び応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田実季子
2. 発表標題 GNSS水蒸気トモグラフィー解析手法の検討
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 Kunio YONEYAMA, Satoru YOKOI, Mikiko FUJITA, Ayako SEIKI, Masaki KATSUMATA, Biao GENG, Tatsuya FUKUDA
2. 発表標題 A Field-based Attempt to Study a Relationship Between Convective Activity and Ocean Surface Condition in Mesoscale Viewpoint
3. 学会等名 American Meteorological Society, 35th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------