

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03724

研究課題名(和文)水蒸気の時空間分布計測のための光・電波複合観測システムの研究

研究課題名(英文)Optical and radio observation system for measuring the spatio-temporal distribution of water vapor

研究代表者

津田 敏隆 (Tsuda, Toshitaka)

京都大学・生存圏研究所・名誉教授

研究者番号：30115886

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：水蒸気の時空間分布計測のため、滋賀県信楽地域において全地球航法衛星システム(GNSS)の稠密受信ネットワークとラマンライダーで構成される光・電波複合観測システムを構築した。GNSS稠密ネットワークで観測される可降水量(PWV)の準リアルタイム解析を検証した。また、GNSS-PWVと数値予報GPVデータを組み合わせて、ラマンライダーを精度良く校正する手法を開発した。平成28～30年にかけて実施した光・電波複合観測システムによる観測から、PWV水平分布と大気境界層内の水蒸気混合比鉛直分布のデータセットを作成した。これらを用いて、降水前の水蒸気の不均一な時空間変動の特徴を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光・電波複合観測システムは、大気境界層内の水蒸気量の変動を高頻度・高分解能で測定することが特徴であり、雨滴が生成されるより前の水蒸気の収束などが把握できる。本研究課題では、さらに準リアルタイム観測への対応や、複合観測の利点を活かして観測精度を向上する手法についても検証した。これらは、局所的な強雨をもたらす降水系の前兆現象や積乱雲の急激な発達過程の解明に貢献し、数値モデルの予報精度の向上につながる事が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have developed a coordinated optical and radio observation system, combining a Raman lidar and a hyper-dense GNSS receiver network to monitor the high spatio-temporal water vapor distribution near the Shigaraki MU observatory, Japan. A total of ten dual-frequency GNSS receivers were installed with a horizontal spacing of 3-4 km surrounding the MU radar. Near real-time evaluation of GNSS-derived precipitable water vapor (PWV) was performed by using the products of the Real-Time Clock Estimation (RETICLE) system. A new calibration technique for water-vapor Raman lidar was established referring to both GNSS-PWV and the grid point values from the meso-scale numerical model. We have constructed a data set of the horizontal distributions of GNSS-PWV and the vertical profiles of water vapor mixing ratio from 2016 to 2018. Further, we studied the local inhomogeneities of water vapor distributions that are associated with the formation of convective clouds before torrential rains occur.

研究分野：大気科学

キーワード：気象 リモートセンシング 水蒸気 GNSS気象学 稠密GNSS受信ネットワーク ラマンライダー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温暖化にともない極端気象の頻度と強度が増大すると予想されている。実際、2012年8月に京都府宇治市で起こった豪雨では、8時間積算雨量が250mmを超える降水が約4km × 4km以内の狭い地域に集中し大きな被害を起こした。近年では、気象レーダーによる精緻な雨滴の空間分布計測が行われるようになってきたものの、集中豪雨の詳細な過程は、現在の観測システムやメソ数値予報モデルの観測点や格子点の水平間隔が粗すぎるため捉えきれない。局地的豪雨を引き起こす積乱雲は、湿った気塊が冷たい気流に持ち上げられる過程などにより発生するので、境界層内の水蒸気量の増加や気温の変動を高頻度・高分解能で把握することが必須である。

本研究グループでは、雨滴が生成されるより前の水蒸気の動態を把握すべく、衛星測位電波の大気伝搬遅延を用いて可降水量(鉛直積算した水蒸気量, PWV)を計測するGNSS稠密ネットワークを標高差の小さい京都府南部地域に独自展開し、平成22年から平成25年にかけて運用した(Sato et al., 2013)。このネットワークは、水平間隔1~2km置きに配置したGNSS受信機群により構成されており、国土地理院のGNSS連続観測システム(GEONET、水平間隔約20km)では解像できない詳細な水蒸気水平分布観測を実現している。また、気象庁非静力学モデルを活用している。同化手法を取り入れたアンサンブルカルマンフィルターを用いて、観測データを組み込んだ初期値から予報計算を開始することで、2012年に発生した宇治市での豪雨を再現している。

2. 研究の目的

本研究では、PWVの水平分布計測のためのGNSS稠密ネットワーク、水蒸気の鉛直分布計測が可能なライダー、気温・風向3成分の鉛直分布や境界層高度・雲底高度の情報を取得するリモートセンシング手法を基礎とした「光・電波複合観測システム」の構築を目的とする。多様な場所へのGNSS稠密ネットワークの展開を指向し、標高差のある複雑地形に展開する際の課題や、準リアルタイム解析への対応について検証する。また、ライダーから水蒸気を導出する際に必要となる校正係数をGNSS-PWV計測との複合計測から求める手法を開発する。雨滴が生成されるより前に水蒸気の収束等の動態を測定できる特長を活かして、強雨をもたらす降水系の前兆現象や積乱雲の急激な発達過程を研究する。

3. 研究の方法

滋賀県甲賀市信楽地区に展開したGNSS稠密ネットワークの観測点配置を図1に示す。観測領域は、ライダー・レーダーやラジオゾンデ放球設備が充実した滋賀県甲賀市の京都大学生存圏研究所信楽MU観測所(34°51'N, 136°06'E)を中心に、半径約15km内で標高差300m以上ある丘陵地とした。受信機を設置する領域は、過去2年間の信楽地域への降水雲の流入経路の特徴を参考として決定した。京都府南部で取得された稠密観測データを、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)によりデータ同化した感度実験(Oigawa et al., 2018)を参考として、受信機の設置間隔を決めた。2周波GNSS受信機と気象計で構成される独自観測点は最大10地点であり、その周辺にGEONETが4観測点存在する。10秒値の観測データを受信機のSDカードに直接保存しつつ、1秒値データをミニPCとモバイルデータ通信により5分ごとに大学のサーバーに自動転送するシステムを構築した。GNSSデータから対流圏遅延量を

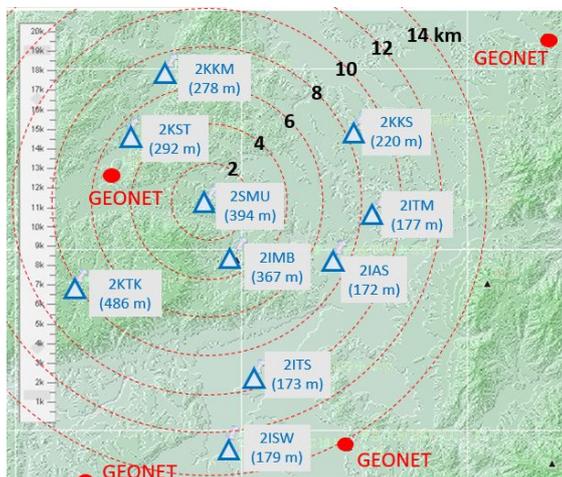


図1 信楽GNSS稠密ネットワーク。独自観測点を青三角、GEONET観測点を赤丸、信楽MU観測所(2SMU)からの距離を赤破線で示す。括弧内の数字はGNSS観測点の標高。

求めるためのデータ解析は、RTNet(GPS Solutions Inc.)を用いた。また、観測ネットワーク内に廉価な1周波受信機を設置して、可降水量計測に適用するための検証実験を行った。

水蒸気の鉛直分布計測には、空気分子の振動ラマン散乱光を検出するラマンライダーを用いた。光を用いた計測手法は、背景光の影響を受ける日中の観測が難しいという課題があるが、太陽放射の少ない紫外域レーザーを光源とするシステムを開発することで計測可能な時間の拡大を図った。本研究では、京都大学と英弘精機株式会社の共同研究で開発したソーラーブラインド領域となる波長266nmを光源とするライダーを用いた。このライダーは、大気境界層内の水蒸気混合比を、時間分解能15分、高度分解能30~150mで昼夜連続計測できる。また、ラジオゾンデによる直接観測を、夏期を中心に年間30~40回行った。

4. 研究成果

(1) データベースの作成

平成 28～30 年にかけて、構築した光・電波複合観測システムによる観測を行った。装置故障や施設整備に伴う観測停止等により欠損となった期間を除くと、GNSS-PWV データは約 30 カ月分(独自観測点のうち 8 地点以上稼働した期間)、ラマンライダーによる水蒸気混合比鉛直分布データは約 18 カ月分が取得できた。特に平成 30 年は、GNSS-PWV および水蒸気混合比鉛直分布とともに、ほぼ欠損なく通年の連続データが得られた。定期的実施したラジオゾンデによる観測との比較により各データの品質管理を行い、これらと地上気象観測データを合わせて、信楽地区における水蒸気空間分布のデータベースを作成した。

(2) GNSS 稠密観測の性能評価

GNSS 稠密観測の準リアルタイム解析の検証のため、GEONET 観測点により衛星時計誤差を補正した衛星軌道情報(暦)を用いて PWV を求めた。準リアルタイム解析から求めた PWV と IGS 最終暦による事後解析から計算した PWV との差の標準偏差は、1 mm 以下となった。各観測点からのデータ転送が 5 分ごと、衛星時計補正データ(日立造船)の配信を 10 分ごとに設定していた本実験のシステムでは、観測から全観測点の PWV 導出までにかかる時間は約 12 分であった。

廉価な 1 周波受信機によるシステム構築を想定し、電離層の影響を補正する空間内挿モデルを導入した。ドイツ地球科学研究センターが提案した SEID モデルをソフトウェアとして構築・適用すると、2 周波解析と比較した場合の PWV の標準偏差は 1.34 mm となった。

観測点の標高差に起因したバイアス補正には、各観測点の一定期間の PWV の平均値を計算し、その差を標高バイアスと見なして各地点の PWV から除去する手法を用いた。この方法では、平均する期間の PWV の値に大きな差があるような場合には誤差が大きくなる。観測領域内を空気塊が移流する時空間スケールを考慮して、PWV の時間変動に合わせてバイアスを計算するための平均期間を変えることが重要であることが分かった。

(3) 水蒸気ラマンライダーの性能評価

水蒸気ラマンライダーの長期安定性能の評価のため、ラジオゾンデとの比較から求まるラマンライダーの校正係数の経年変化を調べた。近傍観測に使用するアナログ計測、および遠方の観測に使用する光子数計測とともに通年での校正係数の変化量は 5%以内と、目標とする性能内に収まった。また、昼夜で観測精度に大きな違いが無いことも確認した。

複合観測の特長を活かし、ラマンライダーと数値予報 GPV データを統合して得られる水蒸気混合比の鉛直積算量が、GNSS-PWV と一致するようにして水蒸気ラマンライダーの校正係数を決定する手法を開発した。提案手法により求めた校正係数の精度は、対流圏に占める大気境界層内の水蒸気量の比率に依存し、また水蒸気の多い夏期より冬季に悪くなった。ラジオゾンデによる従来手法と提案手法で求めた校正係数の比較から求めた誤差は、精度が悪くなる冬季でも 5%以内となった。本手法は、ラジオゾンデによる観測が難しい場所でのラマンライダーの運用に有用となる。

(4) 信楽地区における降水前の水蒸気時空間分布の観測例

図 2(a)に、信楽 GNSS 稠密ネットワークで得られた標高補正後の GNSS-PWV と 1 時間降水量を示す。この期間では、7 月 2 日の 16 時台に 1 時間降水量が 20 mm を超える短時間に降る雨があった。PWV の値が大きく時間変化した場合であったため、標高差補正のためのバイアスの計算期間をどのように取るかで値は多少変わるが、降水前後には水平距離で 3～8 km の観測点間で PWV が約 20 mm 異なるような大きな水平不均一分布が観測された。各観測点の PWV 標準偏差は、降水の 4～5 時間前に一旦極大が現れ、降水時には約 6 mm にまで達している。図 2(b)に示す水蒸気混合比の鉛直分布は、7 月 1 日の 21 時頃から大気境界層内の水蒸気増加が見られた。降水があった 7 月 2 日の日中には、地表付近に水蒸気混合比の高い領域があったほか、大気境界層内にも水蒸気量が多い高度領域が不均一に分布していたことが分かる。また、同じ観測所に設置されている境界層レーダー観測からも、降水の前後で風速場が変化している様子が捉えられた。本課題で開発した光・電波複合観測システムにより、降水に至るまでの大気現象の推移を観測面から精緻に捉えることができた。今後は、数値予報モデルへのデータ同化に関する研究への、作成したデータベースの活用を考える。

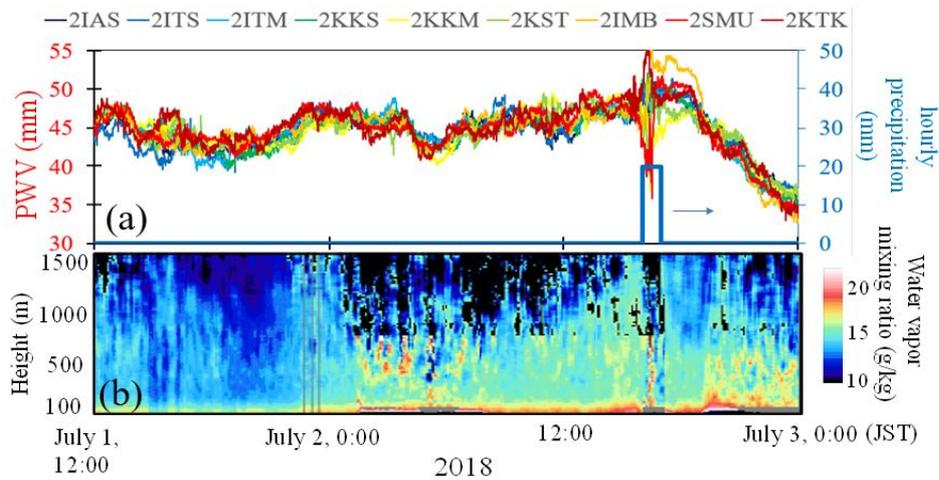


図 2 (a) 信楽 GNSS 稠密ネットワークで得られた標高補正後の GNSS-PWV (左軸) および 1 時間降水量 (右軸) (b) 信楽 MU 観測所の水蒸気ラマンライダーで得られた水蒸気混合比プロファイル (2018 年 7 月 1 日 12:00 ~ 3 日 0:00)。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- 1) Realini E., K. Sato, T. Tsuda, M. Oigawa, Y. Iwaki, Y. Shoji, and H. Seko, Local-scale precipitable water vapor retrieval from high-elevation slant tropospheric delays using a dense network of GNSS receivers, In: Rizos C., Willis P. (eds) IAG 150 Years. International Association of Geodesy Symposia, 143, 485–490, 2015. https://doi.org/10.1007/1345_2015_167
- 2) Tsuda, T., M. Yamamoto, H. Hashiguchi, K. Shiokawa, Y. Ogawa, S. Nozawa, H. Miyaoka, and A. Yoshikawa, A proposal on the study of solar-terrestrial coupling processes with atmospheric radars and ground-based observation network, *Radio Science*, 9, 1587–1599, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016RS006035>
- 3) Yabuki M., M. Matsuda, T. Nakamura, T. Hayashi, and T. Tsuda, A scanning Raman lidar for observing the spatio-temporal distribution of water vapor, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 150–151, 20–30, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.10.013>
- 4) 津田敏隆, 電波リモートセンシング技術による大気擾乱の観測的研究 - 2016 年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演 -, *天気*, 63, 945–955, 2016.
- 5) Oigawa, M., T. Matsuda, T. Tsuda, Noersomadi, Coordinated Observation and Numerical Study on a Diurnal Cycle of Tropical Convection over a Complex Topography in West Java, Indonesia, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 95, 261–281, 2017. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-015>
- 6) Noersomadi and T. Tsuda, Comparison of three retrievals of COSMIC GPS radio occultation results in the tropical upper troposphere and lower stratosphere, *Earth, Planets and Space*, 69:125, 2017. <https://doi.org/doi:10.1186/s40623-017-0710-7>
- 7) Ina, J., H. Tabata, Noersomadi, Halimurrahman, H. Hashiguchi, and T. Tsuda, Retrieval of temperature profiles using radio acoustic sounding system (RASS) with the equatorial atmosphere radar (EAR) in West Sumatra, Indonesia, *Earth, Planets and Space*, 70:22, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0784-x>
- 8) Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki, 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. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0740-1>
- 9) Oigawa, M., T. Tsuda, H. Seko, Y. Shoji, E. Realini, Data assimilation experiment of precipitable water vapor observed by a hyper-dense GNSS receiver network using a nested NHM-LETKF system, *Earth, Planets and Space*, 70:74, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0851-3>
- 10) Noersomadi, T. Tsuda, and M. Fujiwara, Influence of ENSO and MJO on the zonal structure of tropical tropopause inversion layer using high-resolution temperature profiles retrieved from COSMIC GPS Radio Occultation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 6985–7000, 2019. <https://doi:10.5194/acp-19-6985-2019>.

他 8 件

[学会発表](計 43 件)

- 1) Oigawa, M., T. Tsuda, and H. Seko, Y. Shoji, and K. Sato, Assimilation experiment by using localizations considering horizontal scale of error correlation in rainfall area, The 295th Symposium on Sustainable Humanosphere International, Symposium on Earth-Science Challenges(ISEC), The 4th Summit between the University of Oklahoma and Kyoto University (Oklahoma University, USA), Sep. 20–23, 2015.
- 2) Oigawa, M., T. Tsuda, and H. Seko, Data assimilation experiment of high resolution precipitable water vapor data using a nested NHM-LETKF system, Third International Workshop on Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (Tokyo), Feb. 4–5, 2016.
- 3) Oigawa, M., T. Tsuda, H. Seko, Y. Shoji, E. Realini, and K. Sato, PWV variations with the Uji network and data assimilation into a non-hydrostatic numerical model, 1st GEOLab-RISH joint workshop on OBSERVATIONS AND MODELS FOR METEOROLOGY (Politecnico di Milano, Italy), Feb. 22–24, 2016.
- 4) Ito, N., T. Tsuda, Y. Takeda, and E. Realini, Hyper-dense GNSS networks for troposphere analysis experimental set-up of the Ujinet network, 1st GEOLab-RISH joint workshop on OBSERVATIONS AND MODELS FOR METEOROLOGY (Politecnico di Milano, Italy), Feb. 22–24, 2016.
- 5) Ito, N and T. Tsuda, Characteristics of time and spatial variations of precipitable water vapor observed with a dense GNSS receiver network, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (千葉), 2015 年 5 月 24–28 日.
- 6) 津田敏隆, 電波リモートセンシング技術による大気擾乱の観測的研究, 日本気象学会 2016 年度春季大会 (東京), 2016 年 5 月 18–21 日.
- 7) 津田敏隆, 太陽地球系結合過程の研究基盤形成, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (招待講演)(千葉), 2016 年 5 月 22–26 日.
- 8) Tsuda, T., Characteristics of Atmospheric Waves in the Middle Atmosphere Revealed Using GNSS RO Temperature Profiles, IAG/CPGPS Joint 1st International Conference on GNSS+ (ICG+2016) - Advances, Opportunities and Challenges (招待講演)(中国), Jul. 27–30, 2016.
- 9) Takeda, Y., N. Ito, A. Shinboro, and T. Tsuda, Observation of Precipitable Water Vapor (PWV) with a Hyperdense GNSS Receiver Network, IAG/CPGPS Joint 1st International Conference on GNSS+ (ICG+2016) - Advances, Opportunities and Challenges (中国), Jul. 27–30, 2016.
- 10) Tsuda, T., Wind profiling radar (WPR) with radio acoustic sounding system(RASS), the 2nd JSPS Core-to-Core SEASTAS and IWS 2016 (Vietnam), Aug. 25, 2016.
- 11) 伊藤直, 津田敏隆, 稠密 GNSS 受信ネットワークによる可降水量の時間・空間変動のリアルタイム観測, 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (愛知), 2016 年 10 月 26–28 日.
- 12) Tsuda, T., N. Ito, Y. Takeda, E. Realini and A. Shinbori, A Hyper-Dense GNSS Receiver Network for Monitoring Time and Spatial Variations of Precipitable Water Vapor (PWV), AGU Fall Meeting 2016 (San Francisco), Dec. 12–16, 2016.
- 13) Tsuda, T., Study of Coupling Processes in the Solar-Terrestrial System, 3rd URSI - RCRS URSI Regional Conference on Radio Science 2017 (招待講演)(India), Mar. 1–4, 2017.
- 14) Yabuki, M., M. Tsukamoto, Y. Hasegawa, H. Kakihara, and T. Tsuda, Raman lidar for profiling atmospheric water vapor both in daytime and nighttime, 2nd GEOLab-RISH Joint workshop on GNSS and SAR Technologies for Atmospheric Sensing (Kyoto), Mar. 6–9, 2017.
- 15) Kakihara, H., M. Yabuki, N. Ito, T. Tsuda, T. Hasegawa and M. Tsukamoto, A water vapor Raman lidar calibration technique with GNSS PWV and meso-scale model, 2nd GEOLab-RISH Joint workshop on GNSS and SAR Technologies for Atmospheric Sensing (Kyoto), Mar. 6–9, 2017.
- 16) Noersomadi and T. Tsuda, Comparison of Three Retrievals of COSMIC GPS Radio Occultation Results in the Tropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (千葉), 2017 年 5 月 20–25 日.
- 17) Kakihara, H., M. Yabuki, F. Kitafuji, T. Tsuda, M. Tsukamoto, T. Hasegawa, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, New calibration technique for water-vapor Raman lidar combined with the GNSS precipitable water vapor and the Meso-Scale Model, AGU

Fall Meeting 2017 (New Orleans), Dec. 11–15, 2017.
他 26 件

〔 図書 〕
該当なし

〔 産業財産権 〕
該当なし

〔 その他 〕
該当なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：矢吹 正教
ローマ字氏名：YABUKI, Masanori
所属研究機関名：京都大学
部局名：生存圏研究所
職名：助教
研究者番号(8桁)：80390590

研究分担者氏名：橋口 浩之
ローマ字氏名：HASHIGUCHI, Horiyuki
所属研究機関名：京都大学
部局名：生存圏研究所
職名：教授
研究者番号(8桁)：90293943

(2)連携協力者

(平成27年度～28年度)
連携協力者氏名：國井 勝
ローマ字氏名：KUNII, Masaru
所属研究機関名：気象庁気象研究所
部局名：予報研究部
職名：研究官
研究者番号(8桁)：70370327

(平成27年度～29年度)

連携協力者氏名：佐藤 一敏
ローマ字氏名：SATO, Kazutoshi
所属研究機関名：独立行政法人宇宙航空研究開発機構
部局名：第一衛星利用ミッション本部
職名：主任開発員
研究者番号(8桁)：30437272

(3)研究協力者

研究協力者氏名：EUGENIO, Realini
ローマ字氏名：EUGENIO, Realini

(平成27年度～28年度)

研究協力者氏名：大井川正憲
ローマ字氏名：OIGAWA, Masanori

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。