

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 元年 6 月 5 日現在

機関番号： 1 2 6 0 1  
 研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）  
 研究期間： 2016～2018  
 課題番号： 1 5 K K 0 1 9 9  
 研究課題名（和文）水同位体比データ同化システムを用いた大気・陸面水循環過程の詳細解明（国際共同研究強化）  
 研究課題名（英文）Investigation of detailed water cycle processes in atmosphere and land surface using stable water isotope data assimilation system(Fostering Joint International Research)  
 研究代表者  
 芳村 圭（YOSHIMURA, KEI）  
 東京大学・生産技術研究所・准教授  
 研究者番号： 5 0 3 7 6 6 3 8  
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,400,000 円  
 渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：延べ半年間米国サンディエゴ州立大学（SDSU）及びスクリプス海洋学研究所（SIO）に滞在し、水蒸気同位体比データを世界中から収集するほか、様々な手法で推計された蒸散割合についての論文をコンパイルした結果を用いて、全球陸域の蒸発散量に対する植生からの蒸散量の寄与について、より正確な値を推計した。さらに、同位体大気大循環モデルIsoGSMと局所アンサンブル変換カルマンフィルタLETKFを用いて、欧州の地球観測衛星MetOpに搭載された分光計IASIによって観測された水蒸気同位体比データ（2H）を2013年の1ヶ月分を使用し、データ同化を通して大気場が再現されているかを評価した。

### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、32篇の論文出版や15件の学会発表を行うことが出来た。こうした効果的な研究活動ができたのも、国際共同研究加速の際の必須項目である海外研究機関への長期派遣（本課題では約半年間）があったからである。日常の膨大な数の会議から離れ、落ち着いた環境でじっくり研究について考えられる期間があることが、研究を進めるにあたって極めて大切であると痛感できた。ここにこのようなプログラムを考えてくださった方々に深く感謝したい。

研究成果の概要（英文）：Through this project, I stayed San Diego State University and Scripps Institution of Oceanography for 6 months in total. During then, vapor isotope observation data were collected from all over the world, and those papers that estimated transpiration fraction with various methods were compiled. Thus, the more accurate value of global transpiration fraction over total evapotranspiration was estimated. Furthermore, I evaluated the impact of vapor isotope observation by IASI spectrometric instrument on European satellite MetOp on improvement in analyses of atmospheric dynamic fields.

研究分野： 同位体気象学

キーワード： 水安定同位体 蒸発散 植物活動 水蒸気同位体比 成分分離 地球水循環

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、Jasechko et al. (2013; Nature)を皮切りに、Good et al. (2015; Science)、Evaristo et al. (2015; Nature)など、陸面からの潜熱フラックスが蒸発散フラックスのうちどれくらいが植生からの蒸散の寄与によるものか、全河川流量のうちどれくらいが土壌の中を通っているのかという、水循環の内訳を定量化する研究が盛んにおこなわれ、世界の水循環研究コミュニティを賑わせていた。こういった背景のもと、本研究の基課題である基盤研究(B)課題(26289160;以降基課題と称する)では、つくば市真瀬での試験水田において表層水及び水蒸気の同位体比観測を行い、蒸発散・蒸散・蒸発の同位体比をそれぞれ求め、水田上での蒸散寄与率を導いたところ、葉面積指数と蒸散寄与率に良い相関があることを発見した(Wei et al., 2015)。しかし、研究開始当初には、水蒸気同位体比の長期間連続観測データは世界的にほとんど例がなく、得られた知見について地域間や季節間の違いをみることは難しかった。一方、同時期に実用例が出始めていた人工衛星に搭載された分光計を用いた水蒸気同位体比の全球観測データについては、その観測頻度のみが使われた理想化実験という形でしかデータ同化研究に使われてこなかった(Yoshimura et al., 2014; JGR)。

### 2. 研究の目的

そこで、本国際共同研究(以降本課題と称す)では、基課題で行うつくば市真瀬での水蒸気観測データに加えて、世界中で行われていた様々な降水・水蒸気同位体比観測によるデータを可能な限り収集し、全球陸域の蒸発散量に対する植生からの蒸散量の寄与を推計する。さらに、人工衛星に搭載された分光計による水蒸気同位体比の実測値を用いたデータ同化実験を実施し、水蒸気同位体比を拘束することによる大気場再現性の向上の実現を図る。

### 3. 研究の方法

平成28年度から平成30年度にかけて、延べ半年間米国サンディエゴ州立大学(SDSU)及びスクリプス海洋学研究所(SIO)に滞在し、研究を進める。SDSUとSIOは、どちらも米国サンディエゴにあり、研究代表者が海外学振時代とプロジェクト科学者時代の4年間滞在していた時に培った研究ネットワークがあるため、より効率的に研究を進められる。

より具体的には、水蒸気同位体比データを世界中から収集するほか、様々な手法で推計された蒸散割合についての論文をコンパイルし、その値を物理的に制約している植生タイプと葉面積指数に回帰させる。その結果を用いて、20%から90%と非常に大きな不確実性を示していた、全球陸域の蒸発散量に対する植生からの蒸散量の寄与について、より正確な値を推計する。

水蒸気同位体比データ同化研究については、数値予報モデルとして同位体大気大循環モデルIsoGSMを用い、データ同化スキームとして局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)を用いる。欧州の地球観測衛星MetOpに搭載された分光計IASIによって観測された水蒸気同位体比データ( $^2\text{H}$ )を2013年1月分使用し、データ同化を通じて大気場が再現されているかを評価する。

### 4. 研究成果

全球陸域からの蒸発散量に対する蒸散寄与率の同定に関する研究(Wei et al., 2017)

つくば市真瀬での試験水田において行われていた表層水及び水蒸気の同位体比観測により、蒸発散・蒸散・蒸発の同位体比がそれぞれ求められ、水田上での蒸散寄与率を導いた。それにより得られた葉面積指数と蒸散寄与率に良い相関があることを発見した。これまでの研究報告では、20%から90%と非常に大きな不確実性を示していた、全球陸域の蒸発散量に対する植生からの蒸散量の寄与について、これまでに出版された60以上の観測に基づく論文を精査し、葉面積指数との関係性を導いた上で、 $57\% \pm 7\%$ であると定量化した。

この研究に関して、東京大学生産技術研究所よりプレスリリースを行い、日刊工業新聞や朝日小学生新聞など、いくつかの新聞記事・Web記事として取り上げられた。



図1: 2017年6月6日付朝日小学生新聞の抜粋記事

世界中の水蒸気同位体比連続観測データの収集およびデータポータル公開 (Wei et al., 2019)

北米 6 箇所、欧州 6 箇所、アジア 10 箇所、アフリカ 1 箇所、オセアニア 1 箇所、北極域 2 箇所、南極域 2 箇所、船舶及び航空機観測 8 シリーズ、計 28 箇所と 8 シリーズの水蒸気観測データを収集し、データポータルとして公開した。収集したデータがカバーする期間は 2004 年から 2017 年である。このデータを用いることで、様々な地域での蒸散寄与率の算定や、データ同化研究が進むことが大いに期待できる。まさに国際共同研究を加速することでしか得られなかった成果であると考えている。

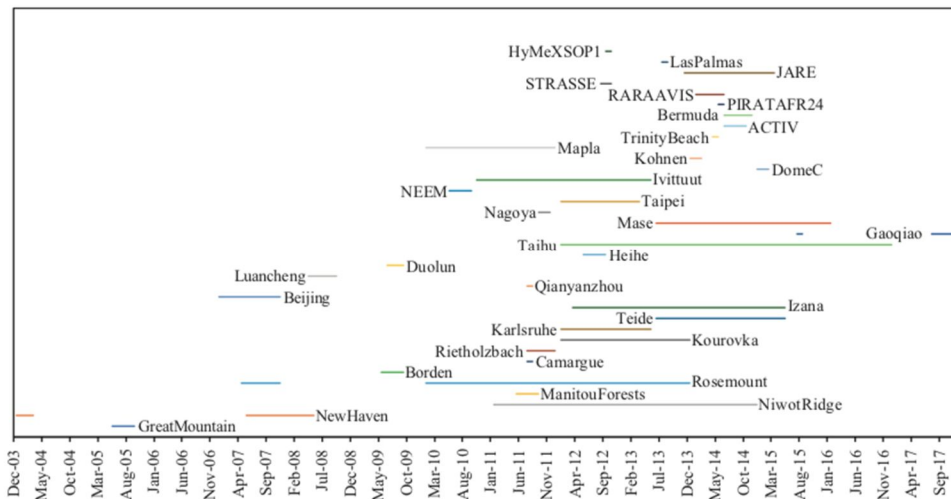


図 2：世界中で収集した水蒸気同位体比連続観測データの時系列範囲 (Wei et al., 2019 の Figure 2 より抜粋)

#### 国際原子力機関連携研究プログラムとして採択

本研究の国際的な展開の一つとして、国際原子力機関 (IAEA) が統括する連携研究プログラム (Coordinated Research Program; CRP) の一つ、Isotope-enabled Models for Improved Estimates of Water Balance in Catchments (同位体モデルによる流域水収支推計の改善; F31005) に、平成 29 年度に応募し、平成 30 年度に採択され共同研究が開始している。その第一回会合は 11 月にウィーンの IAEA 本部で行われた。



写真 1：IAEA CRP 会合時の写真 (一番右が芳村)

人工衛星から観測された水蒸気同位体比分布のデータ同化による気象予報精度の改善に関する研究 (投稿準備中)

水蒸気同位体比観測情報によるデータ同化に関する理想化実験と実測データ同化実験を行った。理想化実験については、2006 年の 1 月 1 日から 4 月 1 日までを解析対象期間とし、TES、SCIAMACHY、GNIP、IASI をデータ同化した実験を行った。理想化実験の結果から、水蒸気同位体比を同化することで、少なくとも 3 ヶ月間は解析精度が担保されることや、IASI を同化することによって解析精度に大きな改善を及ぼすことが示唆された。これを踏まえ、IASI の実測データ同化実験を行った。実測データ同化実験は、データが存在する 4 月 1 日から 4 月 30 日までをデータ同化する実験と、データが存在しない 5 月 1 日以降を予測する実験を行った。データ同化期間においては、実際に観測された水蒸気同位体比をデータ同化することで、水蒸気同位体比だけでなく気温を含む多くの気象変数の解析精度が向上した。その例として、図 1 は IASI を同化した実験と非データ同化実験の誤差を時系列で表しており、上段が同化した変数である対流圏中層での水蒸気同位体比  $^2\text{H}$ 、下段が 2m 気温である。非データ同化実験 (黒) より IASI 同化実験 (赤) のほう精度よく解析出来ているのが見て取れる。予測実験の詳細な設定は省略するが、5 月 1 日以降を予測する実験においても IASI をデータ同化した実験では非データ同化実験よりも予測精度が向上した。本研究より、水蒸気同位体比をデータ同化することで、多くの気象変数における予測が改善されることが判明した。IASI のような高性能な赤外線分光計の果たす役割もきわめて大きいと言える。

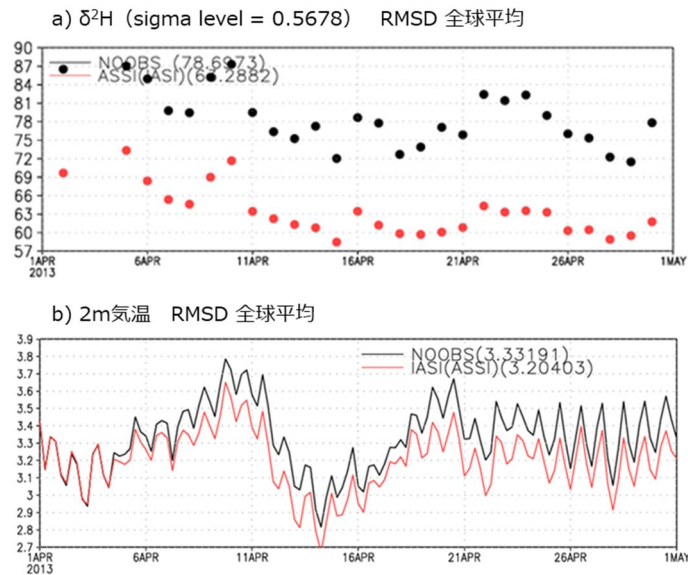


図3：観測値に対するシミュレーションの水蒸気同位体比のRMSDの全球平均（上段）再解析データに対するシミュレーションの2m気温のRMSDの全球平均（下段）。黒、赤のマーカーがそれぞれ、非データ同化実験、IASI同化実験を示す。

以上は本課題で得られた成果の一部であり、下記に示すように多数の論文出版や学会発表を行うことが出来た。こうした効果的な研究活動ができたのも、国際共同研究加速の際の必須項目である海外研究機関への長期派遣（本課題では約半年間）があったからである。日常の膨大な数の会議から離れ、落ち着いた環境でじっくり研究について考えられる期間があることが、研究を進めるにあたって極めて大切であると痛感できた。ここにこのようなプログラムを考えてくださった方々に深く感謝したい。

5. 主な発表論文等  
（研究代表者は下線）

〔雑誌論文〕（計 32 件）

1. Wei, Z., 他 25 名, K. Yoshimura, A global database on high-frequency isotopic compositions of water vapour measured with infrared isotopic spectroscopy near the Earth surface, *Scientific Data*. doi:10.1038/sdata.2018.302, 2019.
2. Tanoue, M., K. Ichiyonagi, K. Yoshimura, M. Kiguchi, T. Terao, T. Hayashi, Seasonal variation in isotopic composition and origins of precipitation over Bangladesh, *PEPS*, doi:10.1186/s40645-018-0231-4, 2018.
3. Saya, A., K. Yoshimura, T. Yoshikane, E.-C. Chang, T. Oki, Precipitation redistribution method for regional simulations of radioactive material transport during the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. doi:10.1029/2018JD028531, 2018.
4. Yoshikane, T., K. Yoshimura, Dispersion characteristics of radioactive materials estimated by using wind patterns, *Scientific Reports*, 8, 9926, doi:10.1038/s41598-018-27955-4, 2018.
5. Reuter, J., N. Buening, K. Yoshimura, Evaluating hydrological influences on mid-latitude 180p in the Middle East, *Clim.Dyn.*, doi:10.1007/s00382-017-3798-3, 2018.
6. Rahul P, K. Prasanna, P. Ghosh, Anilkumar N, K. Yoshimura, Stable isotopes in water vapor and rainwater over Indian sector of Southern Ocean and estimation of fraction of recycled moisture, *Scientific Reports*, 8, 7552, doi:10.1038/s41598-018-25522-5, 2018.
7. Midhun M, Lekshmy PR, Ramesh R, K. Yoshimura, Sandeep KK, S. Kumar, R. Sinha, A. Singh and S. Srivastava, The effect of monsoon circulation on the stable isotopic composition of rainfall, *J. Geophys Res Atmos*, 123, doi:10.1029/2017JD027427, 2018.
8. Wei, Z., X. Lee, Z. Liu, U. Seeboonruang, M. Koike, K. Yoshimura, Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia, *Earth and Planetary Science Letters*, 488, doi:10.1016/j.epsl.2018.02.015, 2018.

9. 庄司悟, 岡崎淳史, 芳村圭, 気候プロキシデータ同化における観測インパクトの時空間偏在性に関する考察, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 74, No.5, 1\_49-1\_54, 2018.
10. 芳村圭, 同位体気象水文学の展望, *水文水資源学会誌*, 31(6), 554-559, 2018.
11. Tanoue, M., K. Ichianagi, K. Yoshimura, J. Shimada, and Y. Hirabayashi, Estimation of the isotopic composition and origins of winter precipitation over Japan using a regional isotope circulation model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2017JD026751, 2017.
12. Prasanna, K., P. Ghosh, S.K. Bhattacharya, P. Rahul, K. Yoshimura, N. Anilkumar, Moisture rainout fraction over the Indian Ocean during austral summer based on 180/16O ratios of surface sea water, rainwater at latitude range of 10° N-60° S, *Journal of Earth System Science*, <https://doi.org/10.1007/s12040-018-0960-1> 2018.
13. Nitta, T., K. Yoshimura, A. Abe-Ouchi, Impact of arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with the MIROC5 AGCM and a snow-fed wetland scheme, *J. Hydrometeor.*, doi:10.1175/JHM-D-16-0105.1, 2017.
14. Furukawa, R., R. Uemura, K. Fujita, J. Sjolte, K. Yoshimura, S. Matoba, Y. Iizuka, Seasonal scale dating of a shallow ice core from Greenland using oxygen isotope matching between data and simulation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2017JD026716, 2017
15. Toride, K., P. Neluwala, H.J. Kim, and K. Yoshimura, Feasibility Study of the Reconstruction of Historical Weather with Data Assimilation, *Mon. Wea. Rev.*, 145, doi:10.1175/MWR-D-16-0288.1, 2017.
16. Park, K.J., K. Yoshimura, H. Kim, and T. Oki, Chronological development of terrestrial mean precipitation, *BAMS*, 98, doi:10.1175/BAMS-D-16-0005.1, 2017.
17. Okazaki, A. and K. Yoshimura, Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate reconstruction, *Clim. Past*, 13, doi:10.5194/cp-13-379-2017, 2017.
18. 芳村圭, 新田友子, 石塚悠太, 多田真嵩, 鈴木健太郎, 竹村俊彦, 短寿命気候汚染物質による陸域水循環への影響. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 74, No.4, 1\_217-1\_222, 2018.
19. 板谷知明, 芳村圭, 深層学習を用いた水文気象場のダウンスケーリング手法の開発. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 74, No.4, 1\_151-1\_156, 2018.
20. 森山文晶, 芳村圭, 筆保弘徳, 領域大気海洋結合モデルの不確実性の検証. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 74, No.4, 1\_157-1\_162, 2018.
21. 藪優太郎, 芳村圭, Hyungjun KIM, 新田友子, 鳩野美佐子, 石塚悠太, 向田清峻, 可知美佐子, 沖大幹, 1km 解像度陸面モデルによる河川流量の検証. *土木学会論文集 G(環境)*, doi:10.2208/jscej.73.1\_71, 2017
22. 野本大輔, 芳村圭, 平成 27 年関東・東北豪雨時のつくば市真瀬における水蒸気同位体比時間変動の決定要因に関する研究. *土木学会論文集 G(環境)*, doi:10.2208/jscej.73.1\_275, 2017
23. Wei, Z., K. Yoshimura, L. Wang, D. Miralles, S. Jasechko, X. Lee, Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration, *Geophys. Res. Lett.*, 44, doi:10.1002/2016GL072235, 2017.
24. Takakura, T., R. Kawamura, T. Kawano, K. Ichianagi, M. Tanoue, K. Yoshimura, An estimation of water origins in the vicinity of a tropical cyclone's center and associated dynamic processes, *Clim. Dyn.*, 50, doi:10.1007/s00382-017-3626-9, 2018.
25. Ramzan, M., S. Ham, M. Amjad, E.-C. Chang and K. Yoshimura, Sensitivity evaluation of spectral nudging schemes in historical dynamical downscaling for South Asia, *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2017/7560818, 2018.
26. Steen-Larsen, H.C., C. Risi, M. Werner, K. Yoshimura, V. Masson-Delmotte, Evaluating the skills of isotope-enabled general circulation models against in situ atmospheric water vapor isotope observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2016JD025443, 2017.
27. Rahul P., P. Ghosha, S.K. Bhattacharya and K. Yoshimura, Controlling factors of rainwater and water vapor isotopes at Bangalore, India: Constraints from observations in 2013 Indian mon- soon, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2016JD025352, 2016.
28. Suvarman, R., K. Ichianagi, M. Tanoue, K. Yoshimura, S. Mori, M. Yamanaka, F. Syamsudin, El Niño Southern Oscillation Signature in Atmospheric Water Isotopes over Maritime Continent during Wet Season, *J. Meteor. Soc. Japan*, 95, 49-66, doi:10.2151/jmsj.2017-003, 2017.
29. Yoshikane, T., K. Yoshimura, E.-C. Chang, A. Saya, and T. Oki, Long-distance transport of radioactive plume by nocturnal local winds, *Scientific Reports*, 6, doi:10.1038/srep36584, 2016.
30. Belgaman, H. A., K. Ichianagi, M. Tanoue, R. Suvarman, K. Yoshimura, S. Mori, N.

- Kurita, M. D. Yamanaka, F. Syamsudin, Intraseasonal Variability of 180 of Precipitation over the Indonesian Maritime Continent Related to the Madden-Julian Oscillation, *SOLA*, 12, 192-197, doi: 10.2151/sola.2016-039, 2016.
31. Liu, Z., K. Yoshimura, N. Buening, Z. Jian, The response of winter Pacific North American pattern to the largest volcanic eruptions, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-016-3287-0, 2016.
32. Yang, H., K.R. Johnson, M.L. Griffiths, K. Yoshimura, Interannual controls on oxygen isotope variability in Asian Monsoon precipitation and implications for paleoclimate reconstructions, *JGR-Atmos*, 121, 8410-8428, doi:10.1002/2015JD024683, 2016.

〔学会発表〕(計 15 件)

〔その他〕

<http://isotope.iis.u-tokyo.ac.jp>

## 6 . 研究組織

### 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：Chun-Ta Lai

ローマ字氏名：Chun-Ta Lai

所属研究機関名：サンディエゴ州立大学

部局名：Department of Biology

職名：准教授

研究協力者氏名：Alexander Gershunov

ローマ字氏名：Alexander Gershunov

所属研究機関名：スクリプス海洋学研究所

部局名：CASPO

職名：研究者

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。