

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289160

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

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

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：50376638

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：水田に、本研究で開発した水蒸気安定同位体比連続計測システムおよび自動降水サンプラーを導入し、水蒸気や降水、水田湛水等の同位体比の高頻度連続観測を3年間にわたって行った。その結果に基づき、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。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、 $57\% \pm 7\%$ であると定量化できた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed a new vapor isotope continuous measurement system to understand the land water cycle process in more detail. Compared to conventional mass spectrometric methods, by using laser spectroscopic technique, it is possible to increase the measurement frequency and precision of vapor isotope and moreover to dramatically improve the estimation precision and time resolution of the evapotranspiration isotope and transpiration fraction. Furthermore, due to portability and ease of management, it was succeeded in acquiring continuous data over three years from the test observation paddy. Based on the results, we developed a transpiration fraction estimation method applicable to the whole world, and estimated the value of $57 \pm 7\%$ as the global mean. Regarding the transpiration fraction, various values were published ranging 20% to 90% in the past few years, which was a big controversy, but the value based on this observation data may settle the dispute.

研究分野：同位体気象学

キーワード：水同位体比 気候プロキシ 千年再解析 蒸発散フラックス データ同化 陸面過程 成分分離 蒸散寄与率

1. 研究開始当初の背景

地球水循環の全体像についての理解は十分進んでいると思われがちである。しかしながら、例えば降水中の海洋起源の水の割合 (Gimeno et al., 2012) や、陸面からの潜熱フラックス、すなわち蒸発散量のうち、植生を經由する蒸散量と土壌からの蒸発量の割合 (Jasechko et al., 2013) 対流雲生成活動における激しい相変化を伴う雲中の水循環や雲底下の蒸発効率 (Moyer et al., 2012) ハドレー循環の下降流地帯における水蒸気の挙動 (Frankenberg et al., 2009) などは、地球水循環を理解するうえの基本的な事項であるにもかかわらず未だ十分理解されているとは言えず、活発な議論が行われている最中である。いずれも将来気候の予測に大きな影響を与えるものであり、理解の向上は喫緊の課題である。

一方で、水の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ と δD) は水の相変化に対して敏感であり、特に上記のような相変化を伴う水循環過程の理解向上への利用に適した指標である。これまでは質量分析計で測定していたため、液体の水を採集する必要があり、結果的に降水や地表水といった地表面のデータが大部分であったが、近年の技術進歩により、人工衛星搭載型の赤外線スペクトル分光計や可搬型のレーザー分光計を用いて水蒸気同位体比が圧倒的高頻度で測れるようになり、データ数が爆発的に増加している。また、水同位体を含む大循環モデル・領域モデル・雲解像モデルなどの開発が飛躍的に進み、これまで仮説の限定的な側面からの状況証拠程度にしか使われてこなかった同位体情報 (例えば高緯度への水蒸気輸送への証拠として同位体比に緯度傾度が生じていることなど) が、より詳細な物理過程の包括的な検証に使われるようになってきている。しかしながら、そのように爆発的に増加した水蒸気データを多角度からまだ十分に使い切っていないという現状も依然として存在していた。

2. 研究の目的

本研究では、水同位体比データ同化システムを用いた理想化実験及び再現実験を行い、対流圏上層や表層で観測された水蒸気同位体比がそれぞれどのようなプロセスを拘束する効果があるのかを定量的に分析する。そして、開発した全球水同位体比データ同化システムを進展させ、水同位体大気大循環モデル及び同位体陸面モデルとアンサンブルカルマンフィルタを用いた大気・陸面水同位体比データ同化システムを構築し、上述した地球水循環過程の未解明な現象について、伝統的な大気場観測データとともに水蒸気同位体比観測データも加えてデータ同化することにより、大気・陸面場全体としての物理的整合性を保持した形で、蒸発蒸散割合等の最適解を導きだすことを目的とする。

3. 研究の方法

全球大気予報モデルとして水同位体大気大循環モデルを、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を用いて構築された水同位体比データ同化システムを利用し、水同位体比の観測データを同化することによる、気温や風速といった大気循環場の解析精度に及ぶ影響を定量化する。また、大気循環場の解析及び予測の精度を向上させるために必要な観測システムの時空間解像度及び解像度を求める。さらに、実際の人工衛星や現地観測から得られた水蒸気や降水の同位体比データを投入し、水蒸気及び降水同位体比の時空間分布に関してより精度の高い客観解析を行い、観測された水同位体比及びその他の観測データと整合的な降水中の海洋起源の水の割合や蒸発散中の蒸散の割合など、大気・陸面における水循環過程の詳細を同定する。

4. 研究成果

34 篇の査読付き論文の出版によく表れているように、極めて生産性の高い研究プロジェクトを遂行できた。いくつかの代表的な成果について個別に書き記す。

代表的成果 1

地球科学における水同位体情報の利用法の新たな展開に関するレビュー研究 (Yoshimura, 2015; 芳村, 2016)

「気候学・気象学及び水文学における水の安定同位体：レビュー」というタイトルの総説論文 (原文は英語) では、観測技術とモデリング技術の近年の急な進展に伴って急速に広がっている水同位体情報の直接的な利用について例をあげてレビューした。また、今後の方向性の例として、同位体プロキシデータを用いたデータ同化の可能性を挙げた。一方、「水同位体比情報を用いたデータ同化」というタイトルの和文論文では、2 つの異なるスケールでの水同位体比情報のデータについて議論している。一つ目は、水蒸気同位体比のリモートセンシング測定のような、全球規模で時間的に密な観測についてであり、それを用いる場合には、大気循環の日々の移り変わりを拘束可能であることが述べられている。二つ目は、セルロースやサンゴ・アイスコアなど、時空間解像度が比較的疎なデータを用いることであり、数百年・数千年規模での気候の移り変わりを拘束することが可能になる。

代表的成果 2

水蒸気同位体比連続観測による蒸散寄与率の同定に関する研究 (Wei et al., 2015; 2016; 2017)

研究分担者の金元植博士が所属する農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究

センターが管理・観測している試験水田に、新たに開発した水蒸気安定同位体比連続計測システムおよび自動降水サンプラーを2013年5月に導入した。そして、水蒸気や降水、水田湛水等の同位体比の高頻度連続観測を3年間にわたって行った。その結果に基づき、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、稲の成長とともに蒸散寄与率が上がること、すなわち葉面積指数(LAI)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)。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%±7%であると定量化した(Wei et al., 2017)。

代表的成果3

同位体プロキシデータと同位体大循環モデルのデータ同化による気候復元研究(Okazaki and Yoshimura, 2017)

この論文では、これまで経験的な手法から復元した気候情報を入力情報として使用してきた古気候データ同化手法に対してのパラダイムシフトを提案するものである。その新たなやり方とは、同位体比等のプロキシ物質からの測定データを、直接の入力情報としてデータ同化に用いるものである。これにより、経験的な復元に伴う不確実性の影響を除外することができる。本研究では、気候プロキシの一つである水同位体を対象に、気候プロキシデータ同化の実現可能性を理想化実験の枠組みにおいて検討した。その結果、129地点のデータを同化するだけで30%以上の面積における気温の年々変動を有意に再現することができ、特にエルニーニョ南方振動(ENSO)の再現性は相関係数0.6($p < 0.01$)以上を得ることができた。この結果により、同位体情報を用いた気候復元のためのデータ同化手法の妥当性を証明することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 34 件)

1. Okazaki, A. and K. Yoshimura, Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate reconstruction, *Clim. Past*, doi:10.5194/cp-2016-12, 2017.
2. Wei, Z., K. Yoshimura, L. Wang, D. Miralles, S. Jasechko, X. Lee, Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL072235, 2017.
3. 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.*, doi:10.1007/s00382-017-3626-9, 2017.
4. 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*, 2017.
5. 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.
6. 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 monsoon, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2016JD025352, 2016.
7. 芳村圭, 水同位体比情報を用いたデータ同化, *水文科学会誌*, 46, 87-99, 2016.
8. 鳩野美佐子, 芳村圭, 荒川隆, 山崎大, 沖大幹, 高解像度河川氾濫過程の導入が大気大循環モデルの推計値に及ぼす影響. *土木学会論文集B1(水工学)*, 72, 2016
9. 芳村圭, 中村晋一郎, 鳩野美佐子, 向田清峻, 石塚悠太, 内海信幸, 木口雅司, 金炯俊, 乃田啓吾, 牧野達哉, 鼎信次郎, 沖大幹, 平成27年9月関東・東北豪雨による茨城県常総市における鬼怒川洪水に関する調査及び考察. *土木学会論文集B1(水工学)*, 72, 2016
10. Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, K. Ono, W. Kim, M. Yokoi, C.-T. Lai, Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture over a humid subtropical rice paddy in Tsukuba, Japan, *J. Hydrol.*, 533, 91-102, 2016.
11. Tanoue, M., K. Ichianagi, and K. Yoshimura, Verification of isotopic compositions of precipitation simulated by a regional isotope circulation model over Japan, *Isotopes in Env. Health Studies*, DOI:10.1080/10256016.2016.1148695, 2016.
12. Jasechko, S., A. Lechler, F. S. R. Pausata, P. J. Fawcett, T. Gleeson, D. I. Cendón, J. Galewsky, A. N. LeGrande, C. Risi, Z. D. Sharp, J. M. Welker, M. Werner, and K. Yoshimura, Late-glacial to late-Holocene shifts in global precipitation $\delta^{18}\text{O}$, *Clim. Past*, 11, 1375-1393, doi:10.5194/cp-11-1375-2015, 2015.

13. Chang, E.-C. and K. Yoshimura, A semi-Lagrangian advection scheme for radioactive tracers in the NCEP Regional Spectral Model (RSM), *Geosci. Model Dev.*, 8, 3247-3255, doi:10.5194/gmd-8-3247-2015, 2015.
14. Miyazaki, S., Saito, K., Mori, J., Yamazaki, T., Ise, T., Arakida, H., Hajima, T., Iijima, Y., Machiya, H., Sueyoshi, T., Yabuki, H., Burke, E. J., Hosaka, M., Ichii, K., Ikawa, H., Ito, A., Kotani, A., Matsuura, Y., Niwano, M., Nitta, T., O'ishi, R., Ohta, T., Park, H., Sasai, T., Sato, A., Sato, H., Sugimoto, A., Suzuki, R., Tanaka, K., Yamaguchi, S., and Yoshimura, K.: The GRENE-TEA model intercomparison project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2841-2856, doi:10.5194/gmd-8-2841-2015, 2015.
15. Liu, Z., Z. Jian, K. Yoshimura, N. H. Buening, C. J. Poulsen, and G. J. Bowen, Recent contrasting winter temperature changes over North America linked to enhanced positive Pacific North American pattern, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2015GL065656, 2015.
16. Ham, S., J.-W. Lee, K. Yoshimura, Assessing future climate changes in the East Asian summer and winter monsoon using Regional Spectral Model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, doi:10.2151/jmsj.2015-051, 2016.
17. Urakawa, S., M. Kurogi, K. Yoshimura, and H. Hasumi, Modeling low salinity waters along the coast around Japan using a high resolution river discharge data set, *J. Oceanography*, doi:10.1007/s10872-015-0314-4, 2015.
18. Ham, S., K. Yoshimura, H. Li, Historical dynamical downscaling for East Asia with the atmosphere and ocean coupled regional model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, doi:10.2151/jmsj.2015-046, 2016.
19. Yoshimura, K., Stable water isotopes in climatology, meteorology, and hydrology: A review. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, doi:10.2151/jmsj.2015-036, 2015.
20. Wei, Z., K. Yoshimura, A. Okazaki, W. Kim, Z. Liu, M. Yokoi, Partitioning of evapotranspiration using high frequency water vapor isotopic measurement over a rice paddy field, *Water Resour. Res.*, doi:10.1002/2014WR016737, 2015.
21. Lee, J.-W., S.-Y. Hong, J.-E. E. Kim, K. Yoshimura, S. Ham, M. Joh, Development and implementation of river-routing process module in a regional climate model and its evaluation in Korean river basins, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 4613-4629, doi:10.1002/2014JD022698, 2015.
22. Saya, A., K. Yoshimura, T. Oki, Simulation of radioactive tracer transport using IsoRSM and uncertainty analyses, *Journal of JSCE* **3**, 60-66, doi:10.2208/journalofjsce.3.1_60, 2015.
23. Sutanto, S.J., G. Hoffmann, R.A. Scheepmaker, J. Worden, S. Houweling, K. Yoshimura, I. Aben, and T. Röckmann, Global-scale remote sensing of water isotopologues in the troposphere: representation of first-order isotope effects, *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 999-1019, doi:10.5194/amt-8-999-2015, 2015.
24. Okazaki, A., Y. Satoh, G. Tremoy, F. Viemux, R. A. Scheepmaker, and K. Yoshimura, Interannual variability of isotopic composition in water vapor over West Africa and its relation to ENSO, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 3193-3204, doi:10.5194/acp-15-3193-2015, 2015.
25. He, X., H. Kim, P.-E. Kirstetter, K. Yoshimura, E.-C. Chang, C. R. Ferguson, J. M. Erlingis, Y. Hong, T. Oki, The Diurnal Cycle of Precipitation in Regional Spectral Model Simulations over West Africa: Sensitivities to Resolution and Cumulus Schemes. *Wea. Forecasting*, **30**, 424-445, 2015.
26. Liu, G., K. Kojima, K. Yoshimura, A. Oka, Proxy interpretation of coral-recorded seawater $\delta^{18}\text{O}$ using 1D model forced by isotope-incorporated GCM in tropical oceanic regions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, doi:10.1002/2014JD021583, 2014.
27. Lee, J.-W., S. Ham, S.-Y. Hong, K. Yoshimura, M. Joh, Future changes in surface runoff over Korea projected by a regional climate model under A1B scenario, *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2014/753790, 2014.
28. Nakamura, K., S. Aoki, K. Yoshimura, N. Kurita, Distribution of oxygen isotope ratio of precipitation in the Atlantic-Indian sectors of the Southern Ocean, *SOLA*, **10**, doi:10.2151/sola.2014-032, 2014.
29. Kudo, T., R. Kawamura, H. Hirata, K. Ichiyanagi, M. Tanoue, and K. Yoshimura, Large-scale vapor transport of remotely evaporated seawater by a Rossby wave response to typhoon forcing during the Baiu/Meiyu season as revealed by the JRA-55 reanalysis, *JGR-Atmos.*, **119**, doi:10.1002/2014JD021999, 2014.
30. Yoshimura, K., T. Miyoshi, M. Kanamitsu, Observation System Simulation Experiments using Water Vapor Isotope Information, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, doi:10.1002/2014JD021662, 2014.
31. Xu, C., M. Sano, K. Yoshimura, T.

- Nakatsuka, Oxygen isotopes as a valuable tool for measuring annual growth in tropical trees that lack distinct annual rings, *Geochemical Journal*, 48, doi:10.2343/geochemj.2.0312, 2014.
32. Berkelhammer, M., A. Sinha, M. Mudelsee, H. Cheng, K. Yoshimura, and J. Biswas, On the low-frequency component of the ENSO–Indian monsoon relationship: a paired proxy perspective, *Clim. Past*, 10, 733-744, doi:10.5194/cp-10-733-2014, 2014.
33. Minamide, M. and K. Yoshimura, Orographic Effect on the Precipitation with Typhoon Washi in the Mindanao Island of the Philippines, *SOLA*, 10, 6-71, 2014.
34. Liu, Z., K. Yoshimura, G. J. Bowen, N. H. Buening, C. Risi, J. M. Welker, F. Yuan, Paired oxygen isotope records reveal modern North American atmospheric dynamics during the Holocene, *Nature Communications*, doi:10.1038/ncomms4701, 2014.

〔学会発表〕(計 13 件)

〔その他〕

<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~kei/lab>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

芳村 圭 (KEI YOSHIMURA)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：50376638

(2)研究分担者

金 元植 (WONSIK KIM)
農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター・上級研究員
研究者番号：40414502