

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686071

研究課題名(和文) 気候プロキシの包括的理解に向けた同位体大気海洋結合モデル構築

研究課題名(英文) Development of isotope-incorporated atmosphere and ocean coupled climate model for comprehensive understanding of climate proxies

研究代表者

芳村 圭 (YOSHIMURA, KEI)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：50376638

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：同位体大気海洋結合モデルを構築した。衛星観測による水蒸気同位体比データをモデル結果と比較し、鉛直構造や水平輸送過程との関連を調べた。その結果、雲粒や雨滴からの再蒸発過程に伴う同位体交換が特に西部太平洋及び海洋大陸における対流圏中層の水蒸気同位体比に影響していることを見出した。また、同位体海洋モデルによって表現される海水同位体比とサンゴ同位体比と比較する手法を確立し、簡素な鉛直一次元モデルであっても年々及び季節変動を再現することは可能であるが、大河川の河口部やデルタ地域などでは海洋大循環による影響が大きいことを明らかにした。さらに同位体データ同化システムを世界で初めて構築した。

研究成果の概要(英文)：Isotope atmosphere-ocean coupled model has been developed. The simulated results were compared with satellite-based vapor isotope data, and vertical structure and advection process in the atmosphere were investigated. The results indicated that the mid-tropospheric vapor isotope ratio is influenced by re-evaporation of falling droplet inside clouds over western Pacific and Maritime regions. The method for comparing simulated seawater isotope ratio and coral isotope data has been established. It is revealed that simple 1-dimensional mixing model can simulate the interannual and seasonal variations of seawater isotope ratio, but the ocean current and freshwater impact is large in the places close to big river mouths or delta region. Furthermore, isotope data assimilation system has been developed in the first place in the world.

研究分野：気候水循環学

キーワード：水安定同位体比 結合大循環モデル 気候プロキシ データ同化 古気候 20世紀再解析 セルロース同位体比 海洋循環

1. 研究開始当初の背景

将来の気候変化を予測するに当たって、過去と現在の気候システムを詳細に理解することは不可欠であり、例えば IPCC の第 5 次報告書 (AR5) 用の気候予測実験では、最終氷期やそれ以前を含む長期間の古気候再現実験の提出が初めて義務付けられた。ただしその評価にあたり、モデルとの比較に直接利用できる観測データは高々数十年分程度に過ぎないため、それ以前については氷床・植物セルロース・サンゴ・石筍・地上や海底堆積有機物等々の安定同位体比 ($D \cdot ^{18}O \cdot ^{13}C$ 等) の「気候プロキシ」から推定される気候状態を用いることが定石となっている。しかし、その推定手法は多分に簡素かつ経験的であり、特に「経験式が気候によって変化しない」ということを大前提としていることが多い。ところが多くの気候プロキシに含まれる同位体比の元となる水の酸素・酸素同位体比の循環自体は、気候によって大きく変動することが知られており、「氷床コア同位体比から逆推定されている古気候気温は過小評価の可能性がある (Sime et al., 2009)」という報告からもわかるように、気候状態が気候プロキシに「記録」されるメカニズムが完全に理解されているとは言い難かった。

2. 研究の目的

そのような問題の解決策のひとつとして期待されているのが、気候予測に使われる大循環モデル (GCM) に同位体比の物理過程を導入する方法である。この「同位体大循環モデル」を用いれば、地球システムの中で複雑に絡み合う水循環にまつわる物理法則と完全に整合する形で水蒸気や降水同位体比の時空間変動を求めたうえで、気候プロキシの同位体比変動がどのように気候状況と結びついているのか、そのメカニズムを明らかにすることができる。そして、気候プロキシからの逆推定に使われる経験式が持つ信頼性を定量的に裏付けたり、物理的・生化学的な過程を考慮したより正確な較正を行えるようになる。

本研究では、将来予測や古気候再現のために用いられている最新の気候海洋結合大循環モデルに同位体比の物理過程を組み込み、逆推定前の同位体比を直接用いた気候再現実験の検証を可能にする。その上で ENSO や PDO、AMO といった中長期的な周期をもつ気候変動シグナルや気候レジームの変化が気候プロキシの同位体比に反映される際の物理的・生化学的メカニズムの理解を深め、現在利用されている経験的な逆推定手法よりも正確かつ包括的な手法を提案する。

3. 研究の方法

東大等が開発する気候海洋結合大循環モデル MIROC の最新版に水の同位体比の物理過程を組み込む。MIROC は大気・海洋・陸面・河川・植生動態等の各要素モデルの統合体であるため、それぞれの要素モデルにおいて水が関係する過程に水素同位体比・酸素同位体比という属性を付加する作業を行う。ちなみに大気モデルと陸面モデルに関しては過去に水同位体比が組み込まれたことがある (Yoshimura et al., 2006) が、その後の MIROC 全体の更新に置き去りにされていたため、ほとんど新規と同様な作業が必要になると考えられる。海洋モデルについては全く新規の作業となる。また、植生動態モデルについては炭素同位体比の挙動の組み込みも念頭に置く。並行して、古気候復元に用いられる物体 (氷床コア・植物セルロース・石筍・地上や海底の堆積有機物等々) の同位体比データを世界中から収集し、整理する。

モデルの完成後、過去 1000 年・最終氷期最盛期 (LGM)・完新世温暖期 (6ka) 等の気候再現実験を行い、収集した気候プロキシの同位体比を用いて直接検証する。過去 140 年については、既存の同位体再解析データも併用し、日単位から数十年周期までの様々なスケールでの同位体比変動を分析し、背景大気場の変化からの同位体比の応答に関して統計的な解析を行う。その上で、ENSO や PDO、AMO といった中長期的な周期をもつ気候変動シグナルや気候レジームの変化が気候プロキシに反映される際の物理的・生化学的メカニズムの理解を深め、現在利用されている経験的な逆推定手法よりも正確かつ包括的な手法を提案する。また、いくつかの気候プロキシが示す近年の異常傾向 (例えば北米西部の樹木セルロース ^{18}O の 1990 年代からの上昇傾向; Stott et al., 2010) 等の原因特定を行う。

4. 研究成果

38 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: 同位体大循環モデルと衛星による水蒸気同位体比観測との比較 (Yoshimura et al., 2011)

2 つの独立した人工衛星搭載分光計から観測された水蒸気同位体比の全球分布と、自身の同位体大循環モデルを用いた同位体に関する準再解析データとを比較し、モデル内の水蒸気の輸送過程の妥当性について議論した。その結果、雲粒や雨滴からの再蒸発過程に伴う同位体交換が特に西部太平洋及び海洋大陸における対流圏中層の水蒸気同位体比に影響していることを見出した。また、季節変動から短時間変動での比較を行い、衛

星分光計による水蒸気同位体比観測を用いたデータ同化によってモデルによる大気水循環の再現性が改善する可能性のある場所を特定した。

代表的成果2：同位体情報と太平洋北米テレコネクション(PNA)の関係性に関する一連の研究(Liu Z., et al., 2012; 2013)

太平洋北米テレコネクション(PNAパターン)と降水同位体比の地域分布及び年々変動との関係性に着目し、そのメカニズムを解明した。1990年と1992年というPNAパターンが顕著に異なる年では、極域ジェット気流の蛇行がトリガーとなって水蒸気移流の方向が大陸西側でも東側でも大きく変化することにより、降水同位体比分布に顕著な差が生じることを明らかにした(Liu Z. et al., 2012)。この結果を拡張する形で、同位体大循環モデルによる結果を用いてPNAパターンによる違いの普遍性を確認した。同位体大循環モデルが現実の分布とPNAパターンによる違いをよく再現できていることを確認した上で、1979年から現在までの約30年間においてPNA指標による分別を行い、正のPNAと負のPNAでの気候値コンポジットを作成した。その上で、水蒸気輸送過程について、正のPNA期には、大陸北西域では南西方向からの水蒸気輸送が卓越し、大陸南東域では、北西からの極域循環の一部の輸送が卓越していることが分かった。また、大陸を東側と西側に分割して分析したところ、西側の降水同位体比の分布にPNAに起因する有意な差が認められた。(Liu Z. et al., 2013)

代表的成果3：同位体海洋モデルの開発とサンゴ同位体比から推定した海水同位体比との比較検証(Liu G. et al., 2013; 2014)

同位体海洋モデルを開発し、すでにある同位体大気大循環モデルの結果を用いてシミュレーションすることによって得られた海水の同位体比結果とサンゴ同位体比と比較する手法を確立した(Liu G. et al., 2013)。サンゴ殻のSr/Ca比から得られるSSTに起因する同位体比の変化量を、直接測定可能なサンゴ殻の ^{18}O から差し引くと、海水の同位体比が得られる。このようにして世界の熱帯域にて採取された34か所のサンゴ殻のデータと、簡素な鉛直1次元海洋モデル及び同位体海洋大循環モデルによるシミュレーション結果とを比較した。その結果、簡素な鉛直1次元モデルであっても年々及び季節変動を再現することは可能であるが、大河川の河口部やデルタ地域などでは海洋大循環による影響が大きいことが判明した(Liu G., et al., 2014)。

代表的成果4：同位体データ同化システムの開発と評価(芳村ら、2013; Yoshimura et al.,

2014)

モデルとして同位体大気大循環モデルIsoGSM(Yoshimura et al., 2008)、データ同化手法として局所アンサンブル変換カルマンフィルター-LETKF(Miyoshi and Yamane, 2006)を用いた。モデルの1つのリアリゼーションを真値とした理想実験を使い、同位体比データを投入することによる風速・気温といった大気力学場に及ぼす影響を定量化した。その結果、風速や気温が与えられている場合にさらに同位体比データを同化すると、気温や風速を含むすべての変数について解析精度の改善が見られた。また、風速や気温の観測がなく水蒸気同位体比のみを投入した場合には、何も観測データがない場合と比較して、全ての変数において解析精度の劇的な向上が見られた。つまり、水蒸気同位体比場を気候モデルへの制約として与えることにより、水蒸気同位体比場だけではなく、大気循環場が拘束されるということである。もちろん、大気観測において同位体比のみが存在するというような状況は現在においてはあり得ないが、観測史以前の過去にさかのぼると同位体情報のみが存在するということもあり得る。これからクリアすべき課題は山積しているが、同位体データを用いた過去の気候場の復元という命題に取り組むための準備を整えつつある。

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38件)

1. Liu, G., K. Kojima, K. Yoshimura, A. Oka, Proxy interpretation of coral-recorded seawater ^{18}O using 1D model forced by isotope-incorporated GCM in tropical oceanic regions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, doi:10.1002/2014JD021583.
2. 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.
3. Li, H. M. Kanamitsu, S.-Y. Hong, K. Yoshimura, D.R. Cayan, V. Misra, and L. Sun, Projected climate change scenario over California by a regional ocean-atmosphere coupled model system, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-013-1025-8, 2013.
4. Liu, Z., K. Yoshimura, G.J. Bowen, J.M. Welker, *Pacific-North American*

- Teleconnection Controls on Precipitation Isotopes ($\delta^{18}O$) across the Contiguous United States and Adjacent Regions: A GCM-Based Analysis, *J. Climate*, 27, 1046-1061, 2014.
5. Buening, N.H., L. Stott, L. Kanner, K. Yoshimura, Diagnosing atmospheric influences on the interannual $\delta^{18}O$ variations in western U.S. precipitations, *Water*, 5, 1116-1140, 2013.
 6. Liu, Z., K. Yoshimura, C. D. Kennedy, X. Wang, S. Pang, Water vapor $\delta^{18}O$ dynamics over China derived from SCIAMACHY satellite measurements, *Science China Earth Sciences*, doi:10.1007/s11430-013-4687-1, 2013.
 7. Liu, G., K. Kojima, K. Yoshimura, T. Okai, A. Suzuki, T. Oki, F. Siringan, M. Yoneda, H. Kawahata, A model-based test of accuracy of seawater oxygen isotope ratio record derived from a coral dual proxy method at southeastern Luzon Island, the Philippines, *J. Geophys. Res. Biogeo.*, 118, 2012JG002266, 2013.
 8. Farlin, J., C.-T. Lai, K. Yoshimura, Influence of synoptic weather events on the isotopic composition of atmospheric moisture in a coastal city of the western United States, *Water Resour. Res.*, 49, 3685-3696, doi:10.1002/wrcr.20305, 2013.
 9. Suvarman R, K. Ichianagi, M. Tanoue, K. Yoshimura, S. Mori, M. D. Yamanaka, N. Kurita and F. Syamsudin. The Variability of Stable Isotopes and Water Origin of Precipitation over the Maritime Continent. *SOLA*, 9, 74-78, doi:10.2151/ sola.2013-01, 2013. [SOLA]
 10. Yoshimura, K. and M. Kanamitsu, Incremental correction for the dynamical downscaling of ensemble mean atmospheric fields, *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3087-3101, doi:10.1175/MWR-D-12-00271.1, 2013.
 11. Pierce, D., D. Cayan, T. Das, E. Maurer, N. Miller, Y. Bao, M. Kanamitsu, K. Yoshimura, M. Snyder, L. Sloan, G. Franco, and M. Tyree, The key role of heavy precipitation events in climate model disagreements of future annual precipitation changes in California, *J. Climate*, doi:10.1175/JCLI-D-12-00766.1, 2013.
 12. Li, H., M. Kanamitsu, S.-Y. Hong, K. Yoshimura, D.R. Cayan, and V. Misra, A High-Resolution Ocean-Atmosphere coupled downscaling of a present climate over California, *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-013-1670-7, 2013.
 13. Berkelhammer, M., A. Sinha, L. Stott, H. Cheng, F. S. R. Pausata, and K. Yoshimura, An abrupt shift in the Indian monsoon 4000 years ago, in *Climates, Landscapes, and Civilizations*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 198, edited by L. Giosan et al., 75-87, AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/2012GM001207, 2012.
 14. Schneider, M., Barthlott, S., Hase, F., González, Y., Yoshimura, K., García, O. E., Sepúlveda, E., Gomez-Pelaez, A., Gisi, M., Kohlhepp, R., Dohe, S., Blumenstock, T., Wiegele, A., Christner, E., Strong, K., Weaver, D., Palm, M., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Lejeune, B., Demoulin, P., Jones, N., Griffith, D. W. T., Smale, D., and Robinson, J., Ground-based remote sensing of tropospheric water vapour isotopologues within the project MUSICA, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 3007-3027, doi:10.5194/amt-5-3007-2012, 2012.
 15. Lee, J.-H., J. Worden, D.-C. Koh, K. Yoshimura, and J.-E. Lee, A seasonality of $\delta^{18}O$ of water vapor (850-500 hPa) observed from space over Jeju island, Korea, *Geosciences J.*, 17, 87-95, DOI 10.1007/s12303-013-0003-5, 2013.
 16. Uemura, R., N. Yonezawa, K. Yoshimura, R. Asami, H. Kadana, K. Yamada, N. Yoshida, Factors controlling isotopic composition of precipitation on Okinawa Island, Japan: Implications for paleoclimate reconstruction in the East Asian Monsoon region, *J. Hydrol.*, 475, 314-322, 2012.
 17. Liu, Z., G.J. Bowen, J.M. Welker, and K. Yoshimura, Winter precipitation isotope ($\delta^{18}O$) slopes of the contiguous USA and their relationship to the Pacific/North American (PNA) pattern, *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-012-1548-0, 2012.
 18. Gimeno, L., A. Stohl, R. M. Trigo, F. Dominguez, K. Yoshimura, L. Yu, A. R. de M. Drumond, A. M. Duran-Quesada, and R. Nieto, Oceanic and Terrestrial Sources of Continental Precipitation, *Rev. Geophys.*, doi:10.1029/2012RG000389, 2012.
 19. Buening, N. H., L. Stott, K. Yoshimura, and M. Berkelhammer, The cause of the seasonal variation in the

- oxygen isotopic composition of precipitation along the western U.S. coast, *J. Geophys. Res.*, 117, D18114, doi:10.1029/2012JD018050, 2012.
20. Ishizaki, Y., K. Yoshimura, S. Kanae, M. Kimoto, N. Kurita, and T. Oki, Interannual variability of H218O in precipitation over the Asian monsoon region, *J. Geophys. Res.*, 117, D16308, doi:10.1029/2011JD015890, 2012. [JGR]
 21. Okazaki, A. P.J. -F. Yeh, K. Yoshimura, M. Watanabe, M. Kimoto, T. Oki, Changes in flood risk under global warming estimated using MIROC5 and the discharge probability index, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 90, 509-524, doi:10.2151/jmsj.2012-405, 2012.
 22. Zhu, M., L.D. Stott, B. Buckley, K. Yoshimura, K. Ra, Indo-Pacific Warm Pool convection and ENSO since 1867 AD derived from Cambodian pine tree cellulose oxygen isotopes, *J. Geophys. Res.*, 117, D11307, doi:10.1029/2011JD017198, 2012.
 23. Pierce, D., T. Das, D. Cayan, E. Maurer, N. Miller, Y. Bao, M. Kanamitsu, K. Yoshimura, M. Snyder, L. Sloan, G. Franco, and M. Tyree, Probabilistic estimates of future changes in California temperature and precipitation using statistical and dynamical downscaling, *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-012-1337-9, 2012.
 24. Zhu, M., L. Stott, B. Buckley, and K. Yoshimura, 20th century seasonal moisture balance in Southeast Asian montane forests from tree cellulose 18O, *Climatic Change*, 115, 505-517, 2012.
 25. Sunmonu, N., K. Muramoto, N. Kurita, K. Yoshimura, and Y. Fujiyoshi, Characteristics of Seasonal Variation of Near-surface Water Vapor D/H Isotope Ratio Revealed by Continuous in situ Measurement in Sapporo, Japan, *SOLA*, 8, 5-8, 2012.
 26. Pfahl, S., H. Wernli, and K. Yoshimura, The isotopic composition of precipitation from a winter storm - a case study with the limited-area model COSMOiso, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1629-1648, 2012.
 27. Jiang, C.-L., S.T. Gille, J. Sprintall, K. Yoshimura and M. Kanamitsu, Spatial variation in turbulent heat fluxes in Drake Passage, *J. Clim.*, doi:10.1175/2011JCLI4071.1, 2011.
 28. Hiraoka, A., R. Kawamura, K. Ichianagi, M. Tanoue, and K. Yoshimura, Water origins over central and southern Japan during the early summer rainy season as simulated with an isotope circulation model, 7, 141-144, 2011.
 29. Welp, L., R.F. Keeling, H.A.J. Meijer, A.F. Bollenbacher, S.C. Piper, K. Yoshimura, R.J. Francey, C.E. Allison, and M. Wahlen, Interannual variability in the oxygen isotopes of atmospheric CO2 driven by El Niño, *Nature*, 477, 579-582, doi:10.1038/nature10421, 2011.
 30. Yoshimura, K., C. Frankenberg, J. Lee, M. Kanamitsu, J. Worden, T. Röckmann, Comparison of an isotopic AGCM with new quasi global satellite measurements of water vapor isotopologues, *J. Geophys. Res.*, 116, D19118, doi:10.1029/2011JD016035, 2011.
 31. Berkelhammer, M., L. Stott, K. Yoshimura, K. Johnson, and A. Sinha, Synoptic and mesoscale controls on the isotopic composition of precipitation in the southwestern US, *Clim. Dyn.*, DOI:10.1007/s00382-011-1262-3, 2012.
 32. Fudeyasu, H., K. Ichianagi, K. Yoshimura, S. Mori, N. Sakurai, J.-I. Hamada, M.D. Yamanaka, J. Matsumoto, and F. Syamsudin, Effects of large-scale moisture transport and mesoscale processes on precipitation isotope ratios observed at Sumatera, Indonesia, *JMSJ*, 89A, 49-59, 2011.
 33. 佐谷茜・芳村圭・沖大幹、IsoRSMを用いた放射性物質移流シミュレーション及び不確実性の分析、土木学会論文集B1(水工学)、69、1765-1770, 2013.
 34. 新田友子・芳村圭・J.D. Annan・J.C. Hargreaves4・鼎信次郎・沖大幹、アンサンブル実験による全球陸域積雪シミュレーションの不確実性評価、土木学会論文集B1(水工学)、69、439-444, 2013.
 35. Shrestha, M., T. Koike, L. Wang, and K. Yoshimura, Long-term (1948-2006) simulation of snow depth at Yagisawa dam site using JP10 reanalysis and energy balance snow model (WEB-DHM-S), 土木学会論文集 B1(水工学), 69, 175-180, 2013.
 36. 芳村圭・三好建正・金光正郎、アンサンブルカルマンフィルタを用いた水同位体比データ同化に向けた理想化実験、土木学会論文集 B1(水工学)、69、1795-1800, 2013.
 37. 小島啓太郎・芳村圭・鈴木淳・沖大幹、サンゴ記録と同位体大循環モデルを用いた海水酸素同位体比変動メカニズム

の定量的理解、土木学会論文集 B1(水工学)、68、2012

38. 新田友子・芳村圭・高田久美子・大石龍太・鼎信次郎・沖大幹、陸面モデルにおけるサブグリッドスケールの積雪被覆率と積雪深の変化の表現、土木学会論文集 B1(水工学)、68、2012

〔学会発表〕(計 2 1 件)

〔図書〕(計 1 件)

筆保弘徳・芳村圭(編), 天気と気象についてわかっていること知らないこと, ベレ出版, ISBN 978-4-86064-351-5, 280p, 2013.

〔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・大気海洋研究所

研究者番号：50376638