

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05466

研究課題名(和文) マルチ気候モデルを用いた過去150年間における地球温暖化の加減速の再現と要因同定

研究課題名(英文) Reproduction and attribution of decadal accelerations and slowdowns of surface global warming in the past 150 years with multi-climate models

研究代表者

小坂 優 (Kosaka, Yu)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：90746398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：19世紀末以降、全球平均地表面温度は顕著な年々～十年規模変動を伴って階段状に上昇してきた。気候モデル中で熱帯太平洋域の海面水温変動を観測履歴に一致させる「ペースメーカー実験」や他の様々な数値実験により、全球平均気温上昇の十年規模加速・減速の要因分析と付随する地域気候変動やエネルギー収支変動の解析を行った。熱帯太平洋に内在する大気海洋結合変動は地球表面温暖化の加減速のタイミングを決める役割を果たしてきたことを示すとともに、その全球エネルギー収支との関係や、遠隔地域に影響するメカニズムを提示した。また北半球陸域の極端高温・低温頻度に対しては、他の変動現象も重要な寄与を持つことも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Global-mean surface temperature increase since the late 19th century is accompanied by remarkable year-to-year and decadal fluctuations, forming a global-warming “staircase”. Through pacemaker experiments with global climate models in which tropical Pacific surface temperature variability is forced to follow observed evolution, together with other model simulations, this study performs attribution of decadal accelerations and slowdowns of surface global warming and examines associated variations of regional climate and global energy budget. It is found that ocean-atmosphere coupled variability inherent to the tropical Pacific has affected timing of the staircase-like surface global warming. The study further proposes a revised view on global energy budget and mechanisms for remote climate impacts associated with the tropical Pacific variability. Modes of climate variability important for occurrence of extreme heat and cold events in the Northern Hemisphere lands are also identified.

研究分野：気候力学

キーワード：地球温暖化の停滞 熱帯大気海洋結合変動 気候内部変動 遠隔影響 全球平均気温

1. 研究開始当初の背景

大気中の二酸化炭素濃度は増加を続けているにもかかわらず、全球平均地表面温度の上昇は1990年代末から2010年代前半にかけて顕著に減速した。代表者らはこの「地球温暖化の停滞」の主因が、熱帯太平洋に内在し二酸化炭素濃度変動などの放射強制力とは独立に変動する十年規模変動が、一時的に全球平均温度上昇を相殺したという仮説を提示していた(Kosaka and Xie 2013)。

全球平均地表面温度は気候変化の指標として広く使われているが、放射強制力への応答としてだけでなく気候内部変動に伴っても揺らぐことを上の研究は示している。特に熱帯太平洋では、エルニーニョ・南方振動(以下 ENSO)として知られる経年変動と、これと似た空間構造を持つが十年規模で変動する太平洋数十年規模変動(以下 IPO)が卓越する。元来、これら内部変動の予測は初期値問題であり、気候システムのカオス性のため現状では1-2年を超えて予測することは困難である。またこのため、気候モデル相互比較プロジェクト(CMIP)の気候再現実験や温暖化シナリオ実験は、これらの内部変動の時間発展の再現・予測を対象としていない。そこで Kosaka and Xie (2013) は、気候モデルにおいて熱帯太平洋海面水温変動を観測履歴へと緩和する「ペースメーカー実験」を行い、上の仮説を実証した。この結果は、産業革命以降の地球温暖化に対し熱帯太平洋変動がどのように影響してきたかという新たな疑問を生む。

また、上のペースメーカー実験の成功の一方で、近年の温暖化停滞に対し異なる側面も注目されていた。第1に、温暖化停滞の原因としてよく持ち出される海洋熱吸収が挙げられる。熱帯太平洋における海洋亜表層の熱吸収の加速は上記のメカニズムと矛盾しないものの(England et al. 2014)、他海盆における熱吸収の増加も指摘されていた(Chen and Tung 2014)。このことは、温暖化停滞をエネルギー収支の観点から再解釈する必要性を示唆する。第2に、全球平均地表気温上昇の停滞にもかかわらず、北半球夏季の極端高温事例の出現頻度は顕著な増加傾向を示しており(Seneviratne et al. 2014)、その要因や温暖化停滞との関係は明らかにされていなかった。加えて、北半球冬季の極端低温頻度の変化傾向自体も、その要因とともにあまり調べられていなかった。第3に、これらの全球的な統計だけでなく、温暖化減速の地域的な顕れとその要因については研究が限られていた。

2. 研究の目的

本研究はペースメーカー実験を用い、近年の温暖化減速に対する熱帯太平洋変動の役割を一般化し、19世紀まで遡って地球温暖化の十年規模加減速の再現を試みた。これを通して、過去一世紀以上の全球平均地表気温変動に対する要因分析を行った。加えて、地球温暖化の加減速に伴う全球エネルギー収支の調

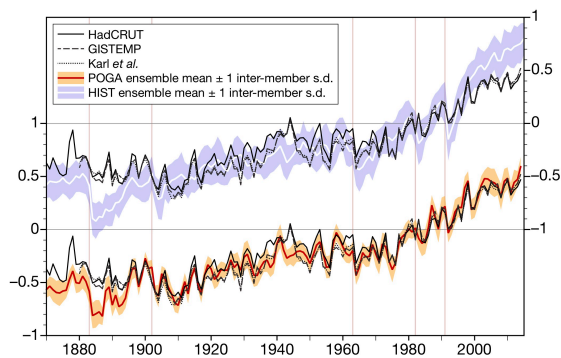


図1. 全球・年平均地表面温度偏差(1970-99年平均からの差; °C). CM2.1による気候再現実験(白線及び青陰影, 右軸)及びペースメーカー実験(赤線及び橙陰影, 左軸). それぞれ折れ線はアンサンブル平均, 陰影はアンサンブルメンバー間の単位標準偏差. 黒線は3つの観測データセットに基づく. 茶色の縦線は主要な火山噴火を表す. 雑誌論文⑤より.

査や、近年頻発する極端気象に対する気候内部変動の寄与の可能性を探究した。さらに、ペースメーカー実験を大気大循環モデルによる多様な感度実験と組み合わせ、ENSO・IPOが駆動する多様な気候変動モードに内在するフィードバックメカニズムの特定や地域気候変動への影響評価を行った。

3. 研究の方法

Kosaka and Xie (2013)が用いた米国地球流体力学研究所気候モデルCM2.1に加え、東大大気海洋研・国立環境研・海洋研究開発機構共同開発気候モデルMIROC5、米国立大気研究センター地球システムモデルCESM1を用い、ペースメーカー実験の全球気温変動再現性能比較を行った。不確実性の評価には、これらのモデルやCMIP5に参加した気候モデルによる気候再現実験・産業革命前固定実験等も併せて用いた。さらに、CM2.1の大気部分であるAM2.1を用いた多様な感度実験も行った。

4. 研究成果

(1) 階段状の温暖化

温室効果ガス濃度の増加に伴い、全球平均地表面温度は19世紀以降上昇してきたが、その上昇は単調ではなく、顕著な経年変動及び十年規模変動を伴って階段状に進行してきた。本研究はCM2.1を用いたペースメーカー実験がこの階段状の温暖化をよく再現することを示し、熱帯太平洋変動が地球温暖化の加速と減速のタイミングを決める役割を果たしてきたことを明らかにした(図1)。このことは全球平均地表面温度の再現性だけでなく、その空間構造や季節性からも確かめられた。さらにこの結果に基づき、全球平均地表面温度の観測データからモデルによって推定された熱帯太平洋影響分を差し引くことで、温度変化のうち放射強制力に起因する上昇分を推定する新手法を提示した(雑誌論文⑤)。

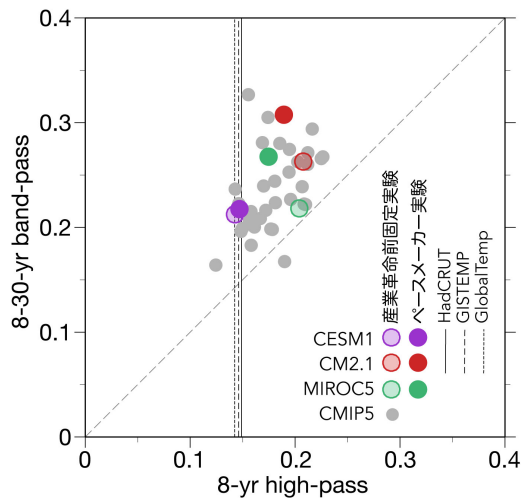


図2. 6月から翌年5月(「ENSO年」)の熱帯太平洋(15°S-15°N, 180°-90°W)海面水温に対する、3ヶ月遅れ(9月から翌年8月)の全球平均地表気温の回帰係数(°C/°C). 8年の高周波フィルターにより抽出した経年変動(横軸), 8~30年のバンドパスフィルターにより抽出した十年規模変動(縦軸)に対して評価. ペースメーカー実験の十年規模変動に対しては気候再現実験からの差に基づいている. 観測データについては経年変動のみ評価.

熱帯太平洋変動がもたらすこの全球影響を, CMIP5に参加した複数の気候モデルによる産業革命前固定実験及び上記の3つの気候モデルによるペースメーカー実験を用いて評価した(図2). 熱帯太平洋海面水温1°C上昇当たり全球平均地表気温上昇には時間スケール依存性があり, CMIP5モデルの1つを除いて, 十年規模変動の方がこの感度が高い(雑誌論文③). これには熱帯太平洋海面水温偏差の南北幅がENSOよりもIPOにおいて広いこと, 及び北半球中高緯度の海洋・海氷変動が低周波フィルターのように働くことが要因として示唆された.

(2) 近年の地球温暖化停滞の再考

海洋深層の熱吸収が表面気温上昇を減速させるという主張を, 気候モデルCESM1の産業革命前固定実験と, 同じモデルの大気・海水部分と海洋混合層モデルを結合したものによる同様の実験と比較し検討した. 後者のモデルでは海洋は1層の「板」で表現され, 海洋深層は存在しない. このようなモデルにおいても, IPOは完全な海洋モデルと結合した気候モデルのものとよく似た構造と同程度の振幅を持ち, また全球平均地表温度変動の振幅も同程度である. この結果から, 海洋深層の熱吸収は地球温暖化の十年規模加減速にとって本質的ではない可能性を示唆した. エネルギー保存の制約から, 大気及び海洋表層の温度上昇が減速しているなら, 海洋深層はより熱を吸収していなければならないが, これが表面温度上昇減速の「原因」であるとは限らない(雑誌論文⑧). また, 近年急激に進んだ

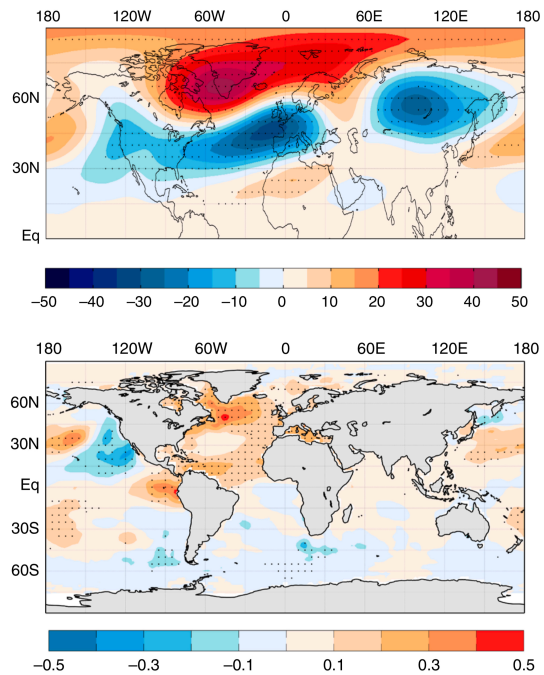


図3. 北半球陸域の極端高温・低温頻度に対し線形トレンド・火山性エアロゾルの光学的厚さ・ENSO指数を独立変数とする重回帰モデルを構築し, その残差に対する部分的最小二乗回帰によって求められた, 各極端気温頻度をよく説明する変動パターン. (上)冬季の極端低温頻度を説明する500 hPa高度偏差(単位: m), (下)夏季の極端高温頻度を説明する海面水温偏差(単位: °C). 雑誌論文①より.

温暖化停滞に対するこれらの研究を俯瞰するレビュー論文を執筆した(雑誌論文④).

(3) 極端現象の要因分析

全球平均地表温度上昇の減速にもかかわらず, 北半球夏季の極端高温頻度は今世紀に入っても増加を続けた. 再解析データを用いてこの傾向を確認したのち, 同様の手法で冬季の極端低温も1990年代末以降増加傾向に転じたことを見いだした. 温室効果ガスやエアロゾルなどの放射強制力及び熱帯太平洋変動に基づく統計モデルでは, 近年のこれらの変化傾向を捉えることはできないが, 夏季極端高温に対しては大西洋数十年規模変動, 冬季極端低温に対しては北極温暖-大陸寒冷パターンと呼ばれる遠隔影響パターンの寄与を考慮する新たな統計モデルでは, これらを高精度で再現できることを示した(図3; 雑誌論文①). この結果は, 全球平均・年平均気温と季節的極端気温が十年規模において別の内部変動によって駆動されていることを示唆する.

(4) 熱帯太平洋・インド洋変動がもたらす地域気候変動

地球温暖化の停滞期には世界の様々な地域で地域気候の十年規模変化が起こったが, その一つに米国南西部の干ばつの頻発がある. 全球平均気温上昇を停滞させた熱帯太平洋の

低温化がこの地域的な干ばつに大きく寄与したことが示唆されていた (Kosaka and Xie 2013). 2015 年から 2016 年にかけて発生した大規模なエルニーニョ現象は干ばつを終わらせると予想されたが、実際にはこの冬もカリフォルニア州の降水は少ないままであり、その原因を調査した。観測データの解析及びモデル実験から、インド洋及び西太平洋の海面水温上昇が、過去の大規模エルニーニョ現象時とは異なる大気循環偏差を形成し、熱帯東太平洋からの影響に抗してカリフォルニアの干ばつを継続させたことを示した(雑誌論文②)。

熱帯太平洋変動が駆動するインド洋・アジア域の気候変動メカニズムの解析と過去変動の実態解明も行った。特に我が国を含む東アジアに対しては、ENSO がその衰退期に熱帯インド洋海面水温偏差を介して夏季に影響をもたらすことが知られていたが、ペースメーカー実験に基づく新たな解析により、熱帯インド洋-西太平洋に内在する大気海洋結合変動として解釈し直した(雑誌論文⑥)。ENSO はこの「インド洋-西太平洋キャパシター(IPOC)モード」の主要な駆動源であるが、その駆動効率は数十年規模で変調し、特に今世紀の温暖化停滞期にはこの ENSO-IPOC モードの相関関係が弱まっていたことも見いだした。

<参考文献>

- X. Chen and K.-K. Tung: Varying planetary heat sink led to global- warming slowdown and acceleration. *Science*, Vol.345, pp.897-903, 2014.
- M. H. England et al.: Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, Vol.4, pp.222-207, 2014.
- Y. Kosaka and S.-P. Xie: Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, Vol.501, pp.403-407, 2013.
- S. I. Seneviratne, M. G. Donat, B. Mueller and L. V. Alexander: No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, Vol.4, pp.161-163, 2014.

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 19 件)

- ① N. C. Johnson, S.-P. Xie, Y. Kosaka and X. Li: Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown. *Nature Communications*, Vol.9, 1724, 2018 (査読有り). doi:10.1038/s41467-018-04040-y
- ② N. Siler, Y. Kosaka, S.-P. Xie and X. Li: Tropical ocean contributions to California's surprisingly dry El Niño of 2015-16. *Journal of Climate*, Vol.30, pp.10067-10079, 2017 (査読

有り). doi:10.1175/JCLI-D-17-0177.1

- ③ C.-Y. Wang, S.-P. Xie, Y. Kosaka, Q. Liu and X.-T. Zheng: Global influence of tropical Pacific variability with implications for global warming slowdown. *Journal of Climate*, Vol.30, pp.2679-2695, 2017 (査読有り). doi:10.1175/JCLI-D-15-0496.1
- ④ S.-P. Xie and Y. Kosaka: What caused the global surface warming hiatus of 1998-2013? *Current Climate Change Reports*, Vol.3, pp.128-140, 2017 (査読有り). doi:10.1007/s40641-017-0063-0
- ⑤ Y. Kosaka and S.-P. Xie: The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming. *Nature Geoscience*, Vol.9, pp.669-673, 2016 (査読有り). doi:10.1038/ngeo2770
- ⑥ S.-P. Xie, Y. Kosaka, Y. Du, K. Hu, J. Chowdary and G. Huang: Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol.33, pp.411-432, 2016 (査読有り). doi:10.1007/s00376-015-5192-6
- ⑦ J. C. Fyfe, G. A. Meehl, M. H. England, M. E. Mann, B. D. Santer, G. M. Flato, E. Hawkins, N. P. Gillett, S.-P. Xie, Y. Kosaka and N. Swart: Making sense of the early-2000s global warming slowdown. *Nature Climate Change*, Vol.6, pp.224-228, 2016 (査読有り). doi:10.1038/nclimate2938
- ⑧ S.-P. Xie, Y. Kosaka and Y. M. Okumura: Distinct energy budgets for anthropogenic and natural changes during global warming hiatus. *Nature Geoscience*, Vol.9, pp.29-33, 2016 (査読有り). doi:10.1038/ngeo2581

[学会発表] (計 20 件)

- ① 小坂 優: 熱帯太平洋十年規模変動に伴う全球気温変動とその不確実性. 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017.
- ② Y. Kosaka: Tropical Pacific variability as a pacemaker of the staircase-like global warming. Asia- Oceania Geosciences Society Meeting 2017.
- ③ 小坂 優: 大気海洋結合変動がもたらす東アジアへの遠隔影響. 日本気象学会 2017 年度春季大会シンポジウム, 2017.
- ④ Y. Kosaka: Climate variability and predictability over the Indo-western Pacific: Two meridional teleconnection patterns over the summer Northwestern Pacific and their interdecadal modulations. CLIVAR Open Science Conference, 2016.
- ⑤ Y. Kosaka: Coherent climate anomalies over the Indo-western Pacific in post-El Niño summer. American Geosciences Union Fall Meeting 2016.
- ⑥ 小坂 優: 階段状の地球温暖化のペースメーカーとしての熱帯太平洋変動. 日本気

- 象学会 2016 年度秋季大会, 2016.
- ⑦ Y. Kosaka: The Indo-western Pacific ocean capacitor mode and coherent climate anomalies in post-ENSO summer. Japan Geosciences Union Meeting 2016.
 - ⑧ 小坂 優: 地球温暖化停滞期の全球エネルギー収支. 日本海洋学会 2016 年度春季大会, 2016.
 - ⑨ Y. Kosaka: Hiatus and acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability. CLIVAR-ICTP Workshop on Past and Future Climate Shifts, 2015.
 - ⑩ 小坂 優: 地球温暖化はなぜ停滞したか. 日本気象学会 2015 年度春季大会シンポジウム, 2015.

[その他]

ホームページ等

- ① プレスリリース: 地球温暖化が階段状に進む要因を究明～熱帯太平洋は地球温暖化の「ペースメーカー」～
http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/pressrelease/pdf/280719release_rcast.pdf
- ② プレスリリース: 日本近海の夏の気象分布に数十年規模で変化する関係を見出す～コメの収穫量や台風数との相関を指摘～
http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/pressrelease/pdf/270730release_rcast.pdf
- ③ Research Highlight: Why was the 2015-16 El Niño event so dry?
<https://scripps.ucsd.edu/news/research-highlight-why-was-2015-16-el-niño-event-so-dry>
- ④ Researcher Create Means to Monitor Anthropogenic Global Warming in Real Time.
<https://scripps.ucsd.edu/news/researchers-create-means-monitor-anthropogenic-global-warming-real-time>
- ⑤ A New Take on the Global Warming Hiatus.
<https://scripps.ucsd.edu/news/new-take-global-warming-hiatus>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小坂 優 (KOSAKA, Yu)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号 : 90746398

(4)研究協力者

謝 尚平 (XIE, Shang-Ping)

カリフォルニア大学サンディエゴ校・スクリプス海洋研究所・教授

渡部 雅浩 (WATANABE, Masahiro)

東京大学・大気海洋研究所・教授

今田 由紀子 (IMADA, Yukiko)

気象庁気象研究所・主任研究官

DESER, Clara

米国立大気研究センター・上級研究員

JOHNSON, Nathaniel C.

米国地球流体力学研究所・研究員

楊 韻 (YANG, Yun)

北京師範大学・研究員

SILER, Nicholas

カリフォルニア大学サンディエゴ校・スクリプス海洋研究所・研究員

WANG, Chuan-Yang

中国海洋大学・大学院生

ZHANG, Yu

中国海洋大学・大学院生