

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860671

氏 名 林 未知也

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ハワイ大学 （国名： アメリカ ）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。

年々変動から数十年規模変動へのエネルギー輸送過程

3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 令和 2 年 3 月 24 日

4. 受入機関名及び部局名

ハワイ大学 大気科学科

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

熱帯太平洋における大規模な気象現象は数日から数年、数十年の時間スケールの変動として観測されており、その影響は熱帯域のみならず中高緯度の気象・気候にも広がるため、現象の理解や複数の現象間の相互作用を理解することは季節予報や将来気候予測にとって重要な課題である。特に、熱帯太平洋の大気海洋相互作用により引き起こされるエルニーニョ南方振動(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)は約 3-7 年周期で不規則に変動する振幅の大きな年々変動現象として知られており、そのメカニズムや世界全域への影響は多くの先行研究により調査が進められてきた。例えば、**Timmermann et al. (2018, Nature) [6(1).1]**や **Hayashi (2020, 天気) [6(2).4]**によって先行研究はまとめられている。これまでに ENSO の基本的な力学的枠組みは理解されてきたものの、ENSO の非線型的振る舞いやそのメカニズムには多くの課題が残されている。ENSO に伴う非線型性は、異なる時間・空間スケールへエネルギーの輸送を引き起こしうするため、季節変動・数十年規模変動や将来予測など、気候変動の仕組みを考察する上で欠かせない特徴である。

観測的データの解析から、ENSO 非線型性の要因はいくつか提案されている。その一つとして、**Hayashi and Jin (2017, Geophysical Research Letters)**は、熱帯太平洋赤道域の海洋温度躍層付近(亜表層)における水温の非線型移流(非線型力学加熱; Nonlinear Dynamical Heating, NDH)を複数の海洋客観解析データから調査し、特に赤道潜流(Equatorial Undercurrent, EUC)の強い変動に伴う亜表層 NDH の東西成分が ENSO の暖かい位相(El Niño)から冷たい位相(La Niña)に遷移するとき亜表層冷却傾向を 30%程度弱め、結果として振幅や構造の非対称性をもたらすことを示した **[6(2).5,7]**。他に、海面水温に対する積雲およびそれに伴う大気大循環の応答が ENSO 位相に非対称であることや、ENSO やそれより高周波な海洋擾乱(Tropical Instability Waves, TIWs)に伴う海面付近での NDH が ENSO の暖かい位相を相対的に強めることなどが要因として考えられている。

ENSO の非線型性は海面水温の長期的観測から明らかであるが、利用可能な観測データには限りがあるため、その詳細なメカニズムや長期変化および気候変動との関係を調べるためには大気海洋結合した全球気候モデルを用いることが有用である。世界各国が開発する最新の気候モデルの長期シミュレーションデータは結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)により集約されている。しかしながら、その気候モデルの大部分が ENSO の振幅を観測される程度に表現するものの、依然として ENSO の振幅や構造の非対称性を再現しないという問題が、第3次から第5次 CMIP において確認されている(Bellenger et al. 2014)。また、ENSO を駆動する基本的な大気海洋相互作用として提案されている力学的な正のフィードバックと熱力学的な負のフィードバック過程は、大部分の気候モデルにおいていずれも過小評価されている(Bayr et al. 2018)。すなわち、多くの気候モデルは、過小評価された正と負のフィードバック過程の誤差補償により誤った理由で ENSO の振幅を「現実的」にしており、また ENSO のメカニズムと非線型性を適切にシミュレートできていないのが現状である。したがって、ENSO の調査に気候モデルを用いる際には着目する力学や統計的指標の気候モデルによる再現性は慎重に評価される必要があると考えられるが、これまでの多くの研究ではその評価が十分になされてこなかったことは問題である。

本研究の当初の計画では、ある気候モデルを用いて、代表的な年々変動である ENSO がより低周波な変動と相互作用する過程を調査することを NDH に着目して検討した。しかし、既に述べた通り、現状では気候モデルの多くが ENSO のメカニズムや非線型性を表現できていないため、単体もしくは少数の気候モデルのみに基づく結果は信頼性が高くないことが懸念される。したがって、まず、CMIP に提出されている多数の気候モデルアンサンブルを解析することで気候モデルにおける ENSO 非線型性の再現性を制約する主要因を特定することを目指した。さらに、その主要因を比較的現実的に表現できる気候モデルのみに着目したサブアンサンブルを選定することで、多くの気候モデルに共通する誤差を低減させたデータセットによる ENSO の非線型力学と長期的な気候変動との関係を調査した。本研究成果は国際誌 *Nature Communications* に提出済みであり、査読中である(令和2年4月2日現在)。また、内容の一部は Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演)などで発表しており [6(2),1,2,3]、日本気象学会 2020 年度春季大会[6(2).6]および Asia Oceania Geosciences Society Meeting 2020 [COVID-19 により開催中止]に受理されている。

最新の気候モデル(50 モデル以上)の長期積分データを用いて、ENSO 非線型性の再現性を評価した。特に、既に述べた、Hayashi and Jin (2017)が提案した亜表層 NDH に着目して、ENSO の振幅非対称性との関係を調査した。2010 年代前半から多くの研究で解析されてきた第5次 CMIP (CMIP5)に加えて、2019 年後半に利用可能となった第6次 CMIP (CMIP6)に提出された大気海洋結合した気候モデルの出力を解析した。現在気候の客観解析データと比較するために、各々のモデルによる historical 実験の結果を主に解析した。ENSO 指標として、東部太平洋赤道域(Niño-3 領域; 90°-150°W, 5°S-5°N)で平均した海面水温(Sea-Surface Temperature, SST)の月平均値の季節変化する長期平均からのずれ(偏差)を採用した。CMIP5 と CMIP6 のほとんどの気候モデルは観測と整合的に Niño-3 領域付近で SST 偏差の強い変動を伴い、またその領域は ENSO 位相間の非対称性が顕著に現れる場所であることによる。ENSO の振幅は ENSO 指標の標準偏差(単位: month)、非対称性はその歪度(無次元)で定義される。亜表層 NDH は Hayashi and Jin (2017)に倣い、非線型温度移流の東部太平洋赤道域の亜表層(100°-180°W, 1°S-1°N, 深さ 50-150 m)で平均した月毎の時系列として定義する(単位: K/month)。また、ENSO の基本的なフィードバック過程を代表する二つの指標である力学的結合フィードバックと熱力学的フィードバックは、それぞれ中央太平洋赤道域(150°E-120°W, 5°S-5°N)での東西風応力偏差と太平洋赤道域(160°E-90°W, 5°S-5°N)での正味の海面熱フラックスの Niño-3 SST 偏差への線型回帰係数で評価する(cf. Bayr et al. 2018)。

まず、CMIP 気候モデルはマルチモデル平均として ENSO の振幅を観測値(約 0.9 K)と同等にシミュレートしていることを確認した。それにもかかわらず ENSO の非対称性は、観測値はおよそ 1(無次元)であるのに対し、CMIP のマルチモデル平均はゼロから統計的に区別できないほど過小評価されていた。同様に、ENSO の力学的結合フィードバックと熱力学的フィードバックの強さ

はいずれも平均して過小評価されていた。これらの過小評価された ENSO 非対称性およびフィードバック過程は、CMIP5 から CMIP6 にかけて改善はみられないことが分かった。過小評価された ENSO 非対称性の原因を調査するために、ENSO 振幅に相対的な亜表層 NDH の変動強度(標準偏差)として定義される「NDH 効率」(単位: 1/month)を各々の気候モデルについて算出した。その結果、CMIP 気候モデル群データにおける NDH 効率のモデル間のばらつきが、ENSO 非対称性のばらつきの約 60%を説明する有意な相関関係が見出された。観測的値に近い NDH 効率を伴う気候モデルは全体の 30%程度のみであり、したがって、多くの気候モデルで共通して NDH 効率が低すぎることは、一つの ENSO 非対称性の過小評価の主要因であることが示唆された。さらに、亜表層 NDH の変動強度が過小評価されている理由を調査したところ、Niño-3 SST 偏差に対して中央太平洋赤道域での東西風応力の応答が弱すぎることに加えて、中央太平洋赤道域での東西風応力偏差に対して太平洋赤道域亜表層での東西流の応答が弱すぎる、もしくは応答の符号が正しくないことが確認された。つまり、大気と海洋の双方向における力学的結合フィードバックの弱さが、気候モデルにおける NDH 効率を抑制するため、ENSO 非対称性を弱めていることを示唆する。

気候モデルにおける ENSO の非対称性は、ENSO 振幅の長期変動が残差的に気候平均場を変化させる効果をもたらすため(整流効果と呼ばれる)、将来気候予測や数十年規模変動などの長期変動における ENSO の役割を考察する上で重要な要素である。実際、高度に理想化された ENSO モデルの温度方程式に NDH の効果を加えると、ENSO の非線型性を強く仮定するほど ENSO 非対称性は強まり、平均場はより暖まることは、*American Geophysical Union* から 2020 年 9 月に出版される本の第 6 章で示した(Jin et al. 2020, AGU book, in press) [6(1).2]。そこで、本研究で見出された NDH 効率と ENSO 非対称性の現在気候における関係に基づいて、NDH 効率がより高い気候モデル(グループ H)とそうでないモデル(グループ L)に分類することで、ENSO 振幅の将来変化と熱帯温暖化の関係を調べた。期待される通り、グループ H の気候モデルは ENSO 振幅と亜表層 NDH の長期平均との間に強い比例関係が見られたが、グループ L ではその関係は弱かった。つまり、NDH 効率がより現実的なモデルは、ENSO が将来強まると NDH に伴う海洋亜表層の力学的加熱が強くなる。ただし、グループ H においても ENSO 振幅の将来変化は大いに不確実であった。ENSO 振幅の将来変化の理解は課題として残されるが、ここではこの振幅変化のモデル間でのばらつきを利用することで、ENSO と温暖化予測の不確実性の関係を調査する。NDH 効率が低すぎるグループ L の気候モデルでは、ENSO 振幅の将来変化にかかわらず、東部熱帯太平洋が西部より早く昇温する「エルニーニョ型」の温暖化パターンのみを示した。一方で、NDH 効率が比較的現実的なグループ H の気候モデルでは、ENSO の振幅が将来強くなるほど「エルニーニョ型」の温暖化パターンも強まり、逆に ENSO の振幅が将来弱くなるほど「エルニーニョ型」温暖化は抑制された。このような ENSO 振幅と温暖化パターンとの関係は、現在気候における NDH 効率がより観測値に近いとさらに強まる。つまり、ENSO が将来気候で平均的に強まると東部太平洋の海洋亜表層が温められ、海洋温度躍層が深まることにより、平均場の海面は太平洋東部でより早く昇温する。上昇した SST によって熱帯太平洋の降水変化パターンも変わるため、その影響は降水に伴う大気循環を通じて熱帯域全体に広がる。将来気候における ENSO 振幅は依然として不確実ではあるものの、気候モデルにおける NDH 効率が改善されることによって、現在気候で卓越した自然変動である ENSO の将来変化が引き起こす熱帯気候平均場の将来変化をより正確に考慮することができる。

本研究の結果から、次世代の気候モデルに向けて力学的結合フィードバックを改善して正しく表現することができるようになれば、NDH 効率、そして ENSO 非対称性の再現性が向上することが期待される。海洋から大気への力学的フィードバックの弱さの要因は、太平洋冷舌と呼ばれる東部太平洋赤道域の低温バイアスが主要因であることが近年報告されているが、大気モデルを観測される SST で強制する AMIP 実験においても ENSO フィードバックの過小評価は完全には取り除かれないことから(e.g., Bayr et al. 2020)、積雲パラメタリゼーションや雲微物理過程など大気プロセスの改善が根本的に必要だと考えられる。また、大気から海洋への力学的フィードバックは風応力と赤道潜流(EUC)の共変動の強さだと解釈されるため、海洋モデルにおける運動量フラッ

クスの輸送過程などの改善も同時に必要であることが示唆される。大気海洋結合した気候モデルでこれらの過程が改善されれば、ENSO の非線型性が向上するだけでなく、ENSO の将来変化およびそれに伴う将来気候への影響をより正確に見積もることが可能となる。今後、将来気候における ENSO の振幅などが確からしく考察できるようになれば、熱帯温暖化の不確実性を狭めることが期待される。また、同様の観点から気候モデルを制約・改善することにより、太平洋数十年規模変動と ENSO との関係も見出される可能性がある。利用可能なデータの解析に加えて、気候モデルを改善していくことは、マルチスケールな熱帯気候変動の理解を進める上で重要な課題である。

ただし、熱帯温暖化の早さは熱帯域のプロセスだけでなく中緯度の温室効果ガスへの応答にも同等に制約されることは、共著論文によって国際誌 *Nature Climate Change* に掲載された論文で示した(Stuecker et al. 2020, *Nature Climate Change*) [6(1).3]。したがって、ENSO に関わる熱帯でのプロセスの改善と同時に、中緯度における温暖化に関わるプロセスの気候モデルによる再現性を評価・改善することも、熱帯温暖化、そして地球温暖化の将来予測不確実性を低減させるために欠かせないことは明らかであり、気候モデルのプロセスに潜むバイアスの統一的要因の特定と改良は今後の課題である。

参考文献

- Timmermann, A., ..., **Hayashi, M.**, ... et al. El Niño-Southern Oscillation complexity. *Nature* **559**, 535–545 (2018).
- Hayashi, M.** Study on Coupling between Westerly Wind Events and ENSO. 天気 **67(1)**, 5-25 (2020).
- Jin, F.-F., Chen, H.-C., Zhao, S., **Hayashi, M.**, Karamperidou, C., Stuecker, M. F., Xie, R., & Geng, L. Chapter 6: Simple ENSO models. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate* (W. Cai, A. Santoso and M.-J. McPhaden, eds.), American Geophysical Union, pp 528, ISBN:978-1-119-54812-6 (2020, in press).
- Hayashi, M.**, & Jin, F.-F. Subsurface nonlinear dynamical heating and ENSO asymmetry. *Geophysical Research Letters* **44**, 12427–12435 (2017).
- Stuecker, M. F., ..., & **Hayashi, M.** Strong remote control of future equatorial warming by off-equatorial forcing. *Nature Climate Change* **10**, 124–129 (2020).
- Hayashi, M.**, Jin, F.-F., & Stuecker, M. F. Dynamics for El Niño-La Niña asymmetry constrain equatorial-Pacific warming pattern. *Nature Communications* (2020, under review).
- Bellenger, H. et al. ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* **42**, 1999–2018 (2014).
- Bayr, T. et al. Mean-state dependence of ENSO atmospheric feedbacks in climate models. *Climate Dynamics* **50**, 3171–3194 (2018).
- Bayr, T., Dommenges, D., & Latif, M. Walker circulation controls ENSO atmospheric feedbacks in uncoupled and coupled climate model simulations. *Climate Dynamics* (2020).