

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04077

研究課題名（和文）海洋鉛直熱輸送過程が気候システムの熱吸収効率に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Understanding of the role of ocean vertical heat transport process on heat uptake efficiency in the climate system

研究代表者

鈴木 立郎（Suzuki, Tatsuo）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門（環境変動予測研究センター）・グループリーダー代理

研究者番号：10415995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：高緯度における深層への海水の輸送が気候システムの海洋の熱吸収に大きな役割を果たす役割を気候モデルMIROC5.2を用いて明らかにした。高緯度海域の海洋深層には、低温高密度の海水が沈降・拡散しており、気候システムの熱輸送に重要な大規模海洋循環に重要な役割を担っており、本研究では、気候システムにおける深層水形成の変化が気候システムの熱収支に与える影響を調べた。その結果、深層水形成の変化は、海洋の熱量だけでなく、大気熱収支にも無視できない影響を与えることがわかった。高緯度海洋における深層水形成の減少は、底層水の温暖化、海洋表層の冷却、およびそれに伴う外向き長波放射の減少につながると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化の人間社会への影響を抑制する取組みにおいて、海洋の熱吸収過程を正しく理解する事が求められている。本研究による海洋の熱吸収プロセスの理解は、温暖化予測に用いられる気候モデル間の気候感度の不確実性の理解と地球温暖化予測精度の向上に寄与する。さらに海洋の気候場の成り立ちとして、海洋鉛直成層の形成メカニズムの理解が進んだ。

研究成果の概要（英文）：The role of dense water mass transport to ocean-deep layers at high latitudes on ocean heat absorption in the climate system was investigated using the climate model MIROC6. The formation and spreading of dense deepwater in the polar regions play a crucial role in one of the most critical climate systems. Here, we performed a series of numerical experiments with a climate model where the downward water mass transport through the bottom boundary layer is artificially reduced to quantitatively evaluate its impacts on the transient ocean and climate responses. It is demonstrated that changes in deepwater formation have non-negligible impacts on not only ocean heat content but also the Earth's radiation budget at the top of the atmosphere: reduction in deepwater formation in high-latitude oceans causes warming of bottom water, cooling of the ocean surface, and a subsequent decrease in outgoing longwave radiation.

研究分野：気候物理

キーワード：海洋熱吸収効率 地球温暖化 海洋熱輸送 気候モデル 海洋モデル

1. 研究開始当初の背景

人間社会の温室効果ガス排出による気候システムへの影響は、近年ますます明らかとなりつつある。国連サミットで 2015 年に採択された持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals)において「気候変動に具体的な対策を」が 17 の目標の一つとして挙げられ、その対策決定に気候変動の科学的知見は欠かすことができない。観測ベースの研究によると、地球温暖化に伴い地球の気候システムに蓄積される熱量のおよそ 90% は海洋によって吸収されている。この海洋熱吸収は地球温暖化に伴う急激な気候変化を抑制する。このため、この熱吸収を定量的に評価する事は、温暖化時の気候応答を理解する上で重要である。先行研究(e.g. Gregory & Forster; 2008)では、その指標として、海洋熱吸収効率 λ_{oc} を導入している。地球温暖化時の気候システム全体の熱量の変化(近似的には海洋熱吸収) ΔN は、二酸化炭素増加等による放射強制力を F とすると、 $\Delta N = F - \Delta T$ となる。ここで、 ΔT は全球平均地上気温の上昇、 $\Delta \alpha$ は雲やアルベドなどによる気候フィードバックパラメータを示す。海洋熱吸収は地球温暖化が徐々に進行すると仮定した場合、海洋の熱吸収効率 λ_{oc} を用いて、 $\Delta N = \lambda_{oc} \Delta T$ とおくことができ、気候応答としての地上気温の上昇は $\Delta T = F / (\lambda_{oc} + \dots)$ となる。この関係式は気候応答が放射強制力によって決まると共に、海洋熱吸収効率 λ_{oc} が大きいほど地上気温の上昇は抑えられる事を示している。気候モデル相互比較プロジェクト Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)では、気候モデル間の海洋熱吸収効率 λ_{oc} のばらつきはおよそ 2 倍と見積もられており、予測の信頼性を高めるために、この不確定性の理解が欠かせない。さらに、海水の熱膨張による海面水位上昇を評価する上でも、海洋による熱吸収過程を理解することは必要である。例えば、海洋熱吸収効率 λ_{oc} が想定より大きければ、地球温暖化は抑制されるが、海面水位上昇はより大きくなる(e.g. Kuhlbrodt & Gregory; 2012)。また、温暖化進行時だけでなく、全球平均気温上昇を一定値以下に抑えた場合でも、海洋の熱吸収が直ちに停止する訳ではない。このことから、地球温暖化の人間社会への影響を抑制する取組みにおいて、海洋の熱吸収過程を正しく理解する事が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、気候モデルの海洋コンポーネントに着目し、海洋内部への温暖化時の熱輸送のメカニズムを明らかにする。多くの気候モデルでは、海洋内部の熱輸送を再現するため、中規模渦拡散スキームや、鉛直午面循環をより現実的に再現するための海底境界層モデルが導入されている。海底境界層モデルは、海底に沿って高密度水が下り落ちる流れを、より現実的に表現しようとする手法であり、北大西洋深層水の元となる高密度水が ノルウェー海からグリーンランド-スコットランド海嶺を 越えて北大西洋に流入する過程や、南極大陸周辺で作られた重い水が大陸棚を下り落ちて南極底層水を形成する過程の再現している。中規模渦拡散スキームに関しては、先行研究(e.g. Saenko et al; 2018)において、中規模渦拡散が小さい場合、海洋熱吸収効率が大きくなる事が示唆されている。しかしながら、海底境界層モデルについては、気候モデルの海洋午面循環の再現に重要な役割を果たしているにも関わらず、その有無による熱吸収効率への影響は十分調べられていない。気候モデルにおいて、海底境界層モデルは深層の最も重い水塊の形成に支配的な役割を果たし、より長い時間スケールの気候応答に重要な役割を果たすと考えられる。このため、本研究においては、温暖化抑制対策やその後の長期にわたる人間社会への地球温暖化の影響評価に視点を置くだけでなく、これらのスキームが再現する熱輸送過程に着目して海洋鉛直成層の形成過程への理解を深める事を目的とする。さらに、CMIP6 の枠組みの中で、温暖化時の海面水位・海洋貯熱量変化を明らかにするための気候モデルを用いた比較実験に参加し、気候モデルの海洋熱輸送過程と比較検証することで、海洋の気候場の理解や気候モデルの予測不確実性のメカニズムの理解を深める。

3. 研究の方法

本研究では気候モデル MIROC(Model for Interdisciplinary Research On Climate)及びその海洋コンポーネントである海洋モデル COCO を用いた。このモデルは、文部科学省の統合的気候モデル高度化研究プログラムの一環として、温暖化予測実験を含むモデル相互比較プロジェクトである CMIP6 に参加しており、国際的にも日本を代表する気候モデルとして認知されている。本研究では、ここでは、大気成分の水平解像度は T42 スペクトル(約 2.8° 間隔)、鉛直解像度は 3hPa までの 40 層、海洋成分は、水平分解能 1°、鉛直レベル 62 層で、地形に沿った下降流を再現するために、海底境界層(BBL)モデルが導入している(Nakano and Sugimoto, 2002)。本研究では、これらのモデルに、海洋熱吸収効率や鉛直熱輸送を評価するプログラムを組み込み、気候変動時の熱吸収効率および現在気候形成のメカニズムを探る。鉛直熱輸送は、数値モデル内の水温時間変化項を、モデルで表現される熱輸送成分に分解してプロセスごとに評価する。本研究では、産業革命前の条件で 1000 年間スピニングした後、BBL の厚さを標準実験の 100m から、10m、20m、50m と変化させることで、深層への AABW の形成量をコントロールする実験(それぞれ b10m、b20m、b50m 実験)を行い深層水形成が気候システムに及ぼす影響を調べた(図)。

4. 研究成果

本研究では、BBLの厚さを減少させることにより、深層水形成の減少が海洋の熱の取り込みと気候システムにおける熱収支に与える過渡的な影響を評価した。深層水形成に関連する高緯度での深層への水塊輸送量は、BBLの厚さの変化とともに減少する。高緯度での深層水形成の弱まりと、それに伴う低緯度での代償湧昇の弱まりは、海洋の下向き熱輸送(DHT)を増加させる。2000m以深に輸送される熱の60%はNADWが寄与し、残りの40%はAABWが寄与している。AABWは、4000m以深のDHTにおいて支配的である。DHTは主に移流項の変化によって駆動され、拡散項はDHTを抑制するように作用する。DHTはBBLによる下向き水塊輸送(DMTB)の減少に伴い、2000mで5.4~6.0 TW/Svの割合で増加すると推定される。我々の数値実験の結果は、深層水形成の変化が海洋の熱量だけでなく、大気熱収支にも無視できない影響を与えることを示した。深層水形成の減少は、移流項の変化により2000mで45.6TWのDHT増加をもたらす。この深層へのDHTの増加は、大気上端(TOA)における全球放射収支の変化(50TW; TOAにおける全球平均DRFは約0.1W/m²)とほぼ等しい。深層水の形成に関連するDHTの増加は、2000m付近の温度躍層以下の深海を暖め、全球平均表面気温(SAT)を減少させる(-0.14K)。地球表面の冷却により、TOAにおける外向き長波放射は減少する。その結果、TOAにおける全球平均の下向きの放射フラックスは、深層に輸送された熱を補うために増加する。地球温暖化の下では、DMTBの弱体化による深層への熱輸送は、SATの増加を抑制する一方で、TOAでの放射熱入力を強め、気候システム全体の熱量の増加に寄与する。本研究はまた、BBLを通じた深層への熱輸送が、気候感度の不確実性の推定に無視できない影響を与えることを示唆している。

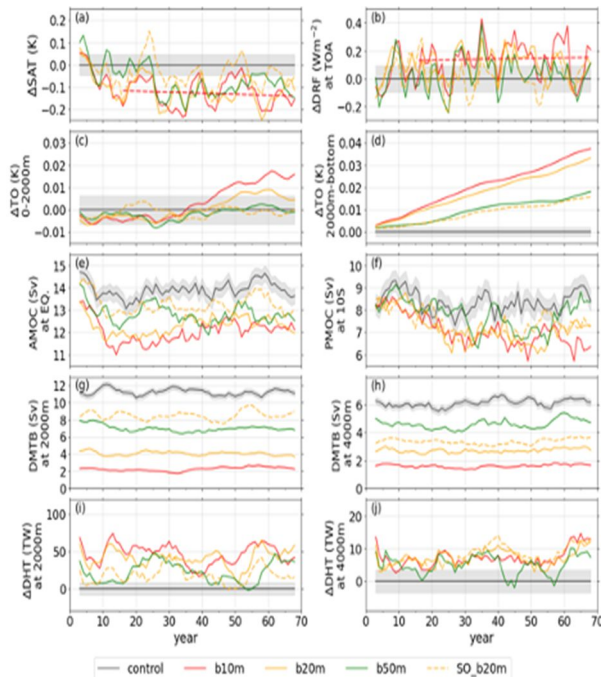


図. (a) 全球平均 SAT 偏差、(b) TOA における全球平均正味下方放射フラックス (DRF) 偏差、(c) 表層から 2000m までの鉛直平均海水温偏差の全球平均、(d) 2000m から海底までの鉛直平均海水温偏差の全球平均、(e) 赤道を横切る AMOC の南向輸送、(f) 南緯 10° を横切る PMOC の北向輸送、(g) 2000m の DMTB、(h) 4000m の DMTB、(i) 2000m の全球 DHT 偏差、(j) 4000m の全球 DHT 偏差。ハッチはコントロールの標準偏差の範囲を示す。(a)、(b)の赤い破線は、b10m の 16~68 年間の線形近似値を示す。

また、国際的なモデルの海洋熱吸収に関する相互比較研究で、温暖化時の海洋熱吸収を理解するため、海洋内部への熱輸送に関して、低緯度と高緯度からの2つのルートを考慮した概念モデル(MT2)を提案した。エネルギー収支の大部分を支配する低緯度域では熱の取り込みは気温上昇主導である。一方高緯度では有効放射強制力の14%が等密度線にそって取り込まれ、ほぼ受動トレーサーのように取り込まれる。この概念モデルは AOGCM のモデルによる次の予測の関係をよく説明できる。

- ・ 海洋熱吸収効率と AMOC に強い相関があるが、海洋熱吸収と AMOC には相関がみられない。
- ・ 過渡的応答(TCR)は AMOC と逆相関がある。
- ・ 強制力の大きなシナリオの 21 世紀末の海洋熱吸収は TCR よりも実効気候感度と強い相関がある。

さらに、本実験で用いた海洋モデルのテストにおいてトンガで発生した気象津波の再現などにも成功した。今後の高解像度モデルを用いた研究の発展にも期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Suzuki Tatsuo, Komuro Yoshiki, Kusahara Kazuya, Tatebe Hiroaki	4. 巻 49
2. 論文標題 Transient Influence of the Reduction of Deepwater Formation on Ocean Heat Uptake and Heat Budgets in the Global Climate System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1,9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021gl095179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Gregory Jonathan M., Bloch-Johnson Jonah, Couldrey Matthew P., Exarchou Eleftheria, Griffies Stephen M., Kuhlbrodt Till, Newsom Emily, Saenko Oleg A., Suzuki Tatsuo, Wu Quran, Urakawa Shogo, Zanna Laure	4. 巻 62
2. 論文標題 A new conceptual model of global ocean heat uptake	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Climate Dynamics	6. 最初と最後の頁 1669 ~ 1713
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00382-023-06989-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木立郎, 中野満寿男, 渡辺真吾, 建部洋晶
2. 発表標題 2022年1月15日のトンガ火山噴火により発生した気象津波の増幅メカニズムについて
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木立郎, 小室芳樹, 建部洋晶, 草原和弥
2. 発表標題 海底境界層を通じた深層水形成の減少が海洋の熱吸収と気候システムの熱収支に与える影響
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木立郎・小室芳樹・建部洋晶・草原和弥
2. 発表標題 温暖化時の海底境界層モデルによる海洋鉛直熱輸送
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木立郎、建部洋晶、山上遥航、大越智幸司、松岡大佑
2. 発表標題 超解像量み込みニューラルネットワーク (SRCNN) を用いた海洋モデル出力のダウンスケーリング手法の開発
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小室 芳樹 (Komuro Yoshiki) (90396945)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・グループリーダー (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------