

令和 6 年 6 月 20 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：20K12144

研究課題名(和文)人為起源エアロゾル由来の栄養塩供給が海洋生態系と物質循環に与える影響の評価

研究課題名(英文) Assessing the impact of the atmospheric nutrient inputs to the ocean on the ocean biogeochemical cycles

研究代表者

山本 彬友 (Yamamoto, Akitomo)

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)・特任研究員

研究者番号：30794680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：海洋の生態系と物質循環の全球的な変動に対して、これまで調べられていた気候変動の影響に加え、人間活動に伴う富栄養化の影響について、地球システムモデルを用いて評価した。その結果、富栄養化の影響が、気候変動の影響と同程度に重要であることを初めて定量的に示した。具体的には、富栄養化に伴う基礎生産の増加が気候変動に伴う減少を打ち消す以上の効果があること、貧酸素化が富栄養化と気候変動が同程度に寄与して進行していることを明らかにした。これらの結果は、人間活動が海洋環境に及ぼす負荷を低減するためには、両影響に配慮する必要があることを示している。以上の成果をScience Advances誌で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた結果は、人間活動が複数の影響を通じて全球的な海洋環境の変動に影響を与えている可能性を初めて指摘した。同時に、人間活動が海洋環境に及ぼす負荷を低減するためには、従来知られている気候変動(人為的な炭素排出)だけではなく、富栄養化(人為的な窒素などの排出)についても配慮する必要性を示している。得られた結果はインパクトファクターの高いScience Advancesにて発表され、学術的にも意義の高い結果であると認識されている。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated that the contribution of anthropogenic nutrient inputs to past global changes in ocean biogeochemistry is of similar magnitude to the effect of climate change using historical simulations by an Earth system model. Anthropogenic nutrient inputs increase oceanic productivity and carbon uptake, offsetting climate-induced decrease and accelerating climate-driven deoxygenation in the upper ocean. Considering the effects of both nutrient inputs and climate change is crucial in assessing anthropogenic impacts on ocean biogeochemistry. These results were published in the Science Advances.

研究分野：海洋生物地球化学モデリング

キーワード：海洋生物地球化学循環 富栄養化 気候変動 地球システムモデル 海洋基礎生産 貧酸素化 海洋炭素循環

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋の窒素循環は植物プランクトンの光合成を制限するとともに、生物ポンプを通じて、炭素及び酸素循環にも影響を及ぼす。そのため、窒素循環の変動の理解は生態系や気候の変化を理解する上でも非常に重要である。これまでの研究では窒素循環に対する気候変動の影響に焦点が当てられてきた。数値モデルを用いたシミュレーション研究では、気候変動に伴う海洋の成層化により海洋内部から表層への栄養塩供給が減少することで、海洋表層が貧栄養化し、海洋基礎生産は減少すると報告されている。一方、化学肥料の使用や化石燃料の燃焼などの人間活動も窒素循環に大きな影響を与えており、大気及び河川から海洋への窒素流入量は、産業革命前から現在にかけてほぼ倍増したと推定されている(Duce et al., 2008; Beusen et al., 2016)。このような人間活動に伴う富栄養化は、気候変動に伴う貧栄養化の影響を一部打ち消す可能性があるが、従来のシミュレーション研究では富栄養化の影響が考慮されておらず、海洋の基礎生産や物質循環に対する気候変動と富栄養化の影響がどのような関係にあるのかについては理解が不足していた。

2. 研究の目的

本研究では、気候変動と人間活動に伴う富栄養化が海洋生態系・物質循環に与える影響をそれぞれ定量化するために、大気及び河川からの人為起源窒素の流入過程を組み込んだ地球システムモデルを用いて詳細な数値実験を実施し、両影響の時空間構造や相互関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

気候変動と人為起源窒素流入の両影響を考慮できる地球システムモデル MIROC-ES2L を用いて、産業革命前から現在までのヒストリカル実験と、現在から 2100 年までについて SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP3-4.5、SSP5-8.5 の 4 つのシナリオ実験を実施した。また、それぞれの実験において、基礎生産・貧酸素化・海洋炭素吸収に対する気候変動の影響、大気からの人為起源窒素流入の影響、河川からの人為起源窒素流入の影響をそれぞれ切り分ける感度実験を実施した。各影響を比較することで、全球における気候変動と富栄養化の影響の定量的な関係、及び海域ごとに支配的なプロセスを明らかにする。

なお当初の計画では、富栄養化の影響については大気からの人為起源窒素流入の影響のみを評価する予定であったが、その後の文献調査などから河川からも大量の人為起源窒素が流入していることが判明したため、河川の影響も評価に加えた。

大気から海洋への窒素沈着量は CMIP6 (第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト) から提供されたデータを外力として与えており、自然起源と人為起源の両方が含まれる。河川を通じた陸域から海洋への窒素流入量はモデル内で計算されており、CMIP6 から提供された人為起源窒素を考慮した施肥量や陸域への窒素沈着量のデータを与えることで、人為起源窒素が河川から海洋に流入する。

4. 研究成果

ヒストリカル実験における海洋基礎生産は、気候変動に伴う海洋の成層化の影響で主に中低緯度で減少する。一方、人為起源窒素の流入は、窒素流入量が多い北アメリカ、ヨーロッパ、アジアの沿岸域を中心に基礎生産を増加させる。1850 年から 2014 年までの全球積算した海洋基礎生産は、人為起源窒素による増加 ($1.34 \text{ Pg C year}^{-1}$) が気候変動による減少 ($-1.16 \text{ Pg C year}^{-1}$) を打ち消し、わずかに増加した。このような気候変動と人為起源窒素の影響の関係は海域ごとに異なっており、北大西洋では両影響がほぼ打ち消し合う一方で、北太平洋やインド洋では人為起源窒素の影響が支配的であった。大気と河川からの窒素流入量の増加はほぼ同程度であったが、人為起源窒素による基礎生産増加の約 70% が窒素沈着の影響で、残り約 30% が河川からの窒素流入の影響であった。この影響の違いを調べるために窒素収支解析を行った結果、河川から流入した窒素の約半分が河口域における脱窒の増加によって消費されたために、基礎生産への影響が小さくなったことが明らかになった。

貧酸素化については、気候変動の影響で 1970 年から 2010 年にかけて表層 1000 m の全球平均した溶存酸素濃度が 0.95 mmol m^{-3} 減少した。この減少は CMIP5 モデル ($1.53 \pm 0.6 \text{ mmol m}^{-3}$) と整合的であるが、観測された $3.3 \pm 2.4 \text{ mmol m}^{-3}$ の減少に比べて小さく (Bindoff et al., 2019)、現在の解像度が荒い全球モデルでは観測された貧酸素化の速度を過小評価するという先行研究と同様の結果であった (Oschlies et al., 2018)。人為起源窒素流入は、基礎生産の増加に伴い生物ポンプを強めるため、溶存酸素を減少させる。海洋上部 1000 m における世界平均酸素濃度は 1970-2010 年の間に 0.82 mmol m^{-3} 減少させ、気候変動と人為起源窒素流入の複合効果を考慮すると、全球平均の酸素濃度の減少は 1.77 mmol m^{-3} となり、観測値とモデルの不整合が一部解消された。

海洋の CO_2 吸収についても、人為起源窒素流入による吸収増加が気候変動による吸収減少を打ち

消していることが示された。従来研究では富栄養化の影響は主に沿岸域に限られていると考えられていたが、本研究の結果から、地球規模で海洋の基礎生産及び炭素・酸素循環の変化を引き起こし、従来推定されていた気候変動の影響に匹敵することが明らかになった。上記の結果は Science Advances 誌から論文を発表した(Yamamoto et al., 2022)。

シナリオ実験については、海洋への窒素流入量の変化と基礎生産と貧酸素化への影響について調べた。2100 年までの窒素沈着は大気汚染対策により現在と同程度が減少する一方、河川窒素流入は施肥と河川流量の増加によって増加する。SSP1-1.9 と 5-8.5 では現在から 2090 代までにおよそ 50%増加し、SSP2-4.5 と 3-7.0 では約倍増する。河川窒素流入の影響が寄与し、海洋に流入する窒素量は全ての SSP シナリオで増加した。基礎生産への影響については、SSP1-1.9 と SSP2-4.5 では窒素流入に伴う増加と気候変動に伴う減少がほぼ相殺され、SSP3-7.0 と SSP5-8.5 では窒素流入による増加が気候変動による減少を約半分程度打ち消した。同様に貧酸素化についても、SSP1-1.9 と SSP2-4.5 では窒素流入と気候変動が同程度に寄与して貧酸素化が進行し、SSP3-7.0 と SSP5-8.5 では気候変動が 7 割程度寄与し、窒素流入が 3 割程度寄与して貧酸素化が進行した。このように、窒素負荷が海洋生態系・物質循環の将来変動に重要な役割を果たすことを明らかにした。このことは、人間活動による海洋環境への負荷を低減するには、気候変動と窒素排出の両方に配慮が必要であるというメッセージが含まれています。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshikawa Chisato, Shigemitsu Masahito, Yamamoto Akitomo, Oka Akira, Ohkouchi Naohiko	4. 巻 11
2. 論文標題 A nitrogen isoscape of phytoplankton in the western North Pacific created with a marine nitrogen isotope model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2024.1294608	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

1. 著者名 Santana-Falcon Yeray, Yamamoto Akitomo, Lenton Andrew, Jones Chris D., Burger Friedrich A., John Jasmin G., Tjiputra Jerry, Schwinger Jorg, Kawamiya Michio, Frolicher Thomas L., Ziehn Tilo, Seferian Roland	4. 巻 4
2. 論文標題 Irreversible loss in marine ecosystem habitability after a temperature overshoot	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43247-023-01002-1	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

1. 著者名 Yamamoto Akitomo, Hajima Tomohiro, Yamazaki Dai, Noguchi Aita Maki, Ito Akinori, Kawamiya Michio	4. 巻 8
2. 論文標題 Competing and accelerating effects of anthropogenic nutrient inputs on climate-driven changes in ocean carbon and oxygen cycles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abl9207	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 山本 彬友、羽島 知洋、山崎 大、野口 真希、伊藤 彰記、河宮 未知生
2. 発表標題 大気及び河川を介した富栄養化に対する海洋炭素、酸素循環の応答
3. 学会等名 JpGU Union Meeting 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本彬友, 渡辺路生, 野口真希, 増田良帆, 羽鳥知洋, 建部洋晶, 河宮未知生
2. 発表標題 地球システムモデルMIROC-ES2Lの現状と今後の展望
3. 学会等名 海洋学会2023秋季大会 熱帯分野横断シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本彬友
2. 発表標題 人間活動に伴う富栄養化が全球海洋生態系、物質循環に与える影響: 地球システムモデルを用いた評価
3. 学会等名 2023年度 水圏生態系モデリングシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akitomo Yamamoto, Tomohiro Hajima, Dai Yamazaki, Maki Noguchi-Aita, Akinori Ito, and Michio Kawamiya
2. 発表標題 Response of the ocean carbon and oxygen cycles to climate change and anthropogenic nutrient inputs
3. 学会等名 EGU General Assembly 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akitomo Yamamoto, Tomohiro Hajima, Manabu Abe, Tokuta Yokohata, Ayako Abe-Ouchi, Michio Kawamiya
2. 発表標題 Response of deep ocean circulation and dissolved oxygen to climate change on millennial time-scales
3. 学会等名 JpGU Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akitomo Yamamoto, Tomohiro Hajima, Dai Yamazaki, Maki Noguchi, Akinori Ito and Michio Kawamiya
2. 発表標題 Impacts of climate change and anthropogenic inputs of nitrogen and iron on the ocean carbon and oxygen cycles
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto Akitomo, Hajima Tomohiro, Yamazaki Dai, Noguchi Aita Maki, Ito Akinori, Kawamiya Michio
2. 発表標題 Competing and accelerating effects of anthropogenic nutrient inputs on climate-driven changes in ocean carbon and oxygen cycles
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本彬友、羽島知洋、山崎大、野口真希、伊藤彰記、河宮未知生
2. 発表標題 大気及び河川を通じた人為起源栄養塩の流入が全球の炭素及び酸素 循環に与える影響
3. 学会等名 日本海洋学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akitomo Yamamoto, Tomohiro Hajima, Dai Yamazaki, Maki Noguchi Aita, Michio Kawamiya
2. 発表標題 The response of ocean biogeochemical cycles to global warming and anthropogenic nutrient inputs from atmosphere and rivers
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021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	羽島 知洋 (Hajima Tomohiro) (40533211)	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 (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
---------	---------