

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12230

研究課題名(和文) 貧栄養海域への湿性沈着が海洋表層基礎生産力に及ぼす影響評価：現場観測による検証

研究課題名(英文) Impact of wet deposition to oligotrophic sea area on marine surface primary productivity: validation by field observations.

研究代表者

竹谷 文一 (Taketani, Fumikazu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・グループリーダー代理

研究者番号：50377785

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)：本課題では、アジア大陸に近い貧栄養海域において“湿性沈着”が海洋表層生態系に及ぼす影響を評価するため、現場海水を用いた培養実験を実施し、植物プランクトンの雨水の添加に対する応答を観察した。その結果、降水に伴う窒素栄養塩の供給に伴い基礎生産の増加を捉えた一方で、高濃度の銅が沈着することによって基礎生産が阻害されることも捉えた。この結果は銅の沈着影響は植物プランクトンの群集組成等の状況に依存することも示唆される。本研究では、湿性沈着による基礎生産力への影響は栄養塩供給による植物プランクトンの成長だけでなく、阻害効果にも考慮する必要があるということが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで数値計算などにより、海洋表層の基礎生産について、大気からの栄養塩供給の効果について考慮されてきたが、本研究により現場実験によりその効果が確認された一方で、成長阻害効果についても見出された。このことは、海洋表層の基礎生産を考えるうえで、大気からの栄養塩供給だけでなく、阻害の効果も含め、大気化学-海洋生態系の複合的な研究を推し進める必要があることを示している。

研究成果の概要(英文)：In this project, to investigate the effects of "wet deposition" on the marine surface ecosystem in an oligotrophic sea near the Asian continent, we conducted an incubation experiment using seawater in the field and observed the response of phytoplankton to the addition of rainwater. We observed an increase in primary production with the supply of nitrogen nutrients from rainfall, but also found that high concentrations of copper deposition hampered primary productivity. The results also suggest that the effect of copper deposition depends on conditions such as phytoplankton community composition. This study clearly indicates that the effect of wet deposition on primary productivity should take into account not only the growth of phytoplankton due to nutrient supply, but also the inhibitory effect.

研究分野：大気化学

キーワード：湿性沈着 基礎生産力 栄養塩供給 阻害効果 窒素化合物 貧栄養海域 大気海洋物質循環

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。

1. 研究開始当初の背景

海洋表層に分布する植物プランクトンは海洋食物連鎖の底辺を支える役割を担っているため、基礎生産力の変動要因を理解することは重要な課題の1つとなっている。基礎生産力を規定する主要な因子である海洋表層(有光層)内に溶存している窒素化合物などで代表される栄養塩は、主に季節的な鉛直混合などによって、海洋内部の栄養塩躍層以深から供給される。しかしながら近年の数値計算などのアプローチにより、栄養塩としての大気から海洋への物質供給は、特に貧栄養海域(栄養塩供給に生産力が主にコントロールされている海域)では重要な供給過程であることが示唆されている (Duce et al. 2008, Taketani et al. 2018)。一方で、エアロゾルに含まれる銅が沈着することで植物プランクトンの増殖が抑制される可能性も指摘されており (Paytan et al. 2009)、アジア大陸に近い西部北太平洋の亜熱帯海域では大量の銅沈着による影響も懸念される。これまでの海洋表層の栄養塩供給に関する議論は大気化学・海洋化学が独立して、それぞれの視点からのみ行っており、両者を組み合わせ、さらには現場で直接、現象(湿性沈着有無)を区分して観測をした例がほとんどない。海洋表層における大気沈着の効果を示す指標としてはこれまで、表層の植物プランクトン現存量(クロロフィル濃度)の変動をもとに解析されてきた経緯がある。衛星などによる情報の取得のしやすさもあり、中長期的なトレンドとして利用されてきたが、大気からの沈着効果に対する応答(時間)や他の環境要因の寄与に関して、あいまいな部分が見受けられてきた。我々は過去の研究航海において、栄養塩が枯渇している亜熱帯海域のような極めて低クロロフィル濃度の表面水塊において、降雨の発生前後に表面海水を採取して培養実験による基礎生産力測定を実施した結果、高濃度の窒素化合物を含んだ降雨の後に基礎生産量が約1.5倍大きいことを見出した(図1)。このことは、貧栄養海域においては湿性沈着による栄養塩供給が表層の基礎生産力に大きな影響を及ぼす可能性をとらえたことになり、降雨有り無しでの現場表層海水の基礎生産を調べることで、大気からの物質供給の影響を評価できる可能性が示唆されてきた。

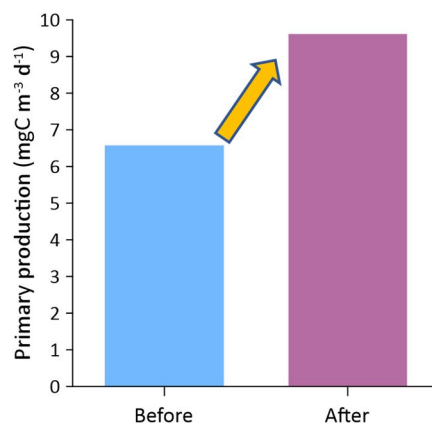


図1. 降雨前(左)と降雨後(右)に採取した表面海水で測定した基礎生産量の変化。

2. 研究の目的

本研究の大目的は、貧栄養海域での「湿性沈着」が海洋表層の基礎生産力をどれほど変化させるのかを評価することである。沈着過程には乾性/湿性沈着が存在するが、乾性沈着はエアロゾル粒子が直接海洋へ沈着することに対し、湿性沈着では雨などを介して海洋へ沈着する。湿性沈着は降雨のある場所ない場所とその効果に対して、明確に区分される。大気からの湿性沈着による海洋表層の基礎生産力への影響を評価するため、現場観測により、変動因子となる大気からの降水中の各種化学成分濃度および表層海水中の栄養塩濃度を把握し、加えて、大気からの成長阻害物質(銅など)による影響も含めて評価することを目的とした。

3. 研究の方法

大気からの湿性沈着の植物プランクトンへの影響を確認・検証するために、2022年4月~5月に行われた研究船「みらい」の研究航海(西部北太平洋)に参加し、熱帯・亜熱帯海域(図2)のPE1 (25.6°N, 137.5°E), PE2 (25.9°N, 140.5°E), KEOS (25.0°N, 145.0°E), KEO (32.4°N, 144.5°E)において現場海水を採取して培養実験を実施した。観測では、現場表層海水および鉛直プロファイルのクロロフィル濃度、栄養塩濃度、植物プランクトン群集組成などの測定用採水も同時に行った。船上の培養実験では、過去に同海域で採取

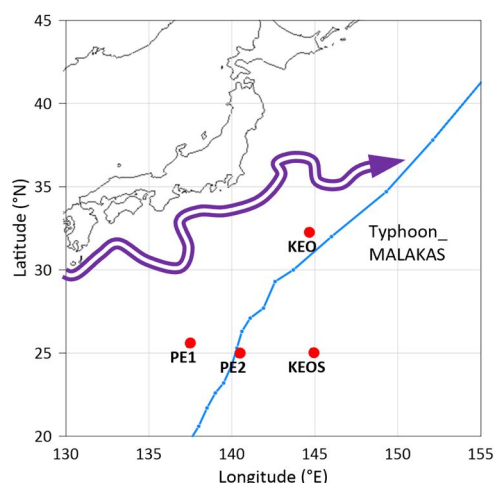


図2. 2022年4月~5月に実施したみらい航海における観測点(赤点)。黒潮の位置(紫線矢印)と航海1週間前に発生した台風の経路(青線)。

した栄養塩や金属成分などの濃度計測済みの雨水を現場で採取した表面海水の1L ボトル 8 本にそれぞれ一定量添加し、基礎生産力の指標となる飽和光下の最大光合成速度を実測(PE カーブ実験)することで、雨水添加の影響を見積もった。また、実験に使用した雨水の一部では、金属成分のみを吸着する特殊カラムを用いて金属成分の除去を行い、窒素化合物濃度を変化させず、金属成分の有無による効果も合わせて検証した。

4. 研究成果

MR22-03 航海において、本実験を行った亜熱帯循環域内部の観測点である PE1, PE2, KEOS でのクロロフィル深層極大は約 100m と深く、海表面の植物プランクトン群集は *Prochlorococcus* や *Synechococcus* といった小型の植物プランクトンであるシアノバクテリアが 60 ~ 70% を占めるクロロフィル低濃度の水塊であった。一方で、黒潮続流域に近い観測点 KEO では表層のクロロフィル濃度が比較的高く、大型植物プランクトンである珪藻が約半数を占める水塊となっていた(図 3)。また、各観測点の表面海水の栄養塩は低濃度であった(表 1)。このような水塊環境下において、PE1, PE2, KEOS の観測点では雨水中の金属濃度が異なる雨水を添加し(表 2)、添加 4 時間後のクロロフィル濃度、基礎生産力の変化を調べた(図 4)。その結果、雨水を添加しないサンプル(コントロール)では最大光合成速度(P^B_{max})がもっとも高く、雨水の添加による P^B_{max} は、ほぼ変化しない、もしくは低下する傾向が確認された。特に、金属濃度が高い雨水を添加したサンプルで P^B_{max} はより大きく低下していることから、これは雨水に含まれる銅によって基礎生産が阻害されている可能性を示してい

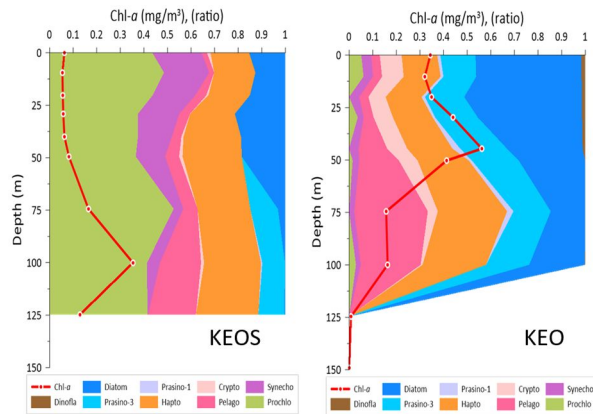


図 3. KEOS と KEO における植物プランクトン群集組成の鉛直分布。KEOS では *Prochlorococcus* (緑) や *Synechococcus* (紫) のシアノバクテリアが優占し、KEO では珪藻(青)が優占していた。

表 1. MR22-03 航海での亜熱帯海域観測点での表層海水中の栄養塩濃度

	PE1	PE2	KEOS	KEO
NO ₃	0.04	0.01	0.02	0.01
NH ₄	0.03	0.01	0.05	0.04
PO ₄	0.02	0.01	0.01	0.04

単位: $\mu\text{mol/L}$

表 2. 亜熱帯海域観測点での添加用に使用した雨水中の化合物濃度

	PE1		PE2		KEOS		KEO
NO ₃ ^a	22.6		64.5		7.9	10.4	0.01
NH ₄ ^a	6.2		22.8		2.1	0.9	0.04
PO ₄ ^a	0.01		0.04		0.01	0.01	0.04
	(L) ^b	(H) ^b	(L)	(H)	(L)	(H)	
Fe ^c	n.d.	n.d.	30	386	65	78	486
Cu ^c	1.4	131	66	533	220	1006	543

^a $\mu\text{mol/L}$, ^b (L): Metal low concentration, ^b (H): Metal high concentration, ^c

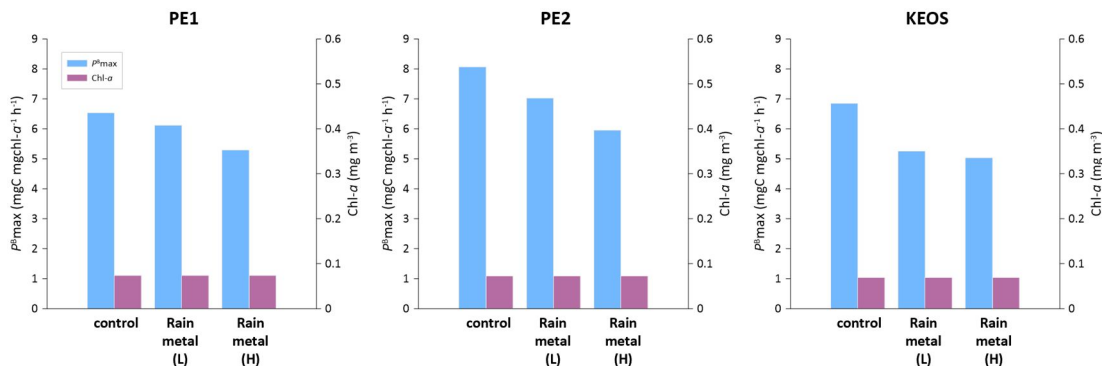


図 4. PE1, PE2, KEOS における雨添加 4 時間後の最大光合成速度 (P^B_{max} : 青) とクロロフィル (紫)。雨添加なし(コントロール)および、低濃度金属(L)と高濃度金属(H)を含む雨水を添加して培養。高濃度金属を含む雨を添加したサンプルでは大きく P^B_{max} が低下した。

た。一方で、KEOでの表面海水を用いた基礎生産力の実験では、高濃度の銅を含む雨水を添加して1日経過後のクロロフィル、基礎生産力の変化は、KEOの表層海水では雨水の添加による P^B_{max} の変化はほぼ見受けられなかったが、1日経過後のクロロフィルがコントロールサンプルに比べておよそ2倍に増加していた(図5)。これは1日経過後にはクロロフィルの増加した分だけ基礎生産量も2倍に増加したことを意味する。観測点KEOでは雨水の添加によって不足している窒素栄養塩が加えられた結果として、植物プランクトンが大きく増殖することがこの実験から確認された。このように、PE1, PE2, KEOSでは高濃度栄養塩添加にもかかわらず基礎生産が低下、また、KEOでは増加に転じるという異なる結果が生じた。その理由として、研究航海出港の直前(2024年4月15日の一週間前)に観測点付近を大型台風が通過したこと、および優占する植物プランクトン種の違いによる影響が大きいと考えられた。銅の毒性については小型の植物プランクトンであるシアノバクテリアは耐性が低く、大型植物プランクトンである珪藻は耐性が高いことが知られている。PE1, PE2, KEOSでは貧栄養塩海域の特徴であるシアノバクテリアが支配的な植物プランクトン種であるため、銅による成長阻害影響が強く出たものと考えられる。KEOは冬季混合が発達して亜熱帯モード水を形成する海域でもあるため、春先は成層しても表層の水塊構造は不安定で混合しやすい。また、台風の通過時に50mほど鉛直混合したことが係留ブイデータの解析からも確認されており、鉛直混合によって下層から供給された栄養塩を利用して珪藻ブルームが発生していたと考えられた。その後、サンプリング時には再び成層し、表層の混合層内での窒素栄養塩は枯渇していたことから、KEOでは栄養塩添加の効果が強く表れたと考えられる。台風による混合に伴って珪藻ブルームが発生したことが銅を含む雨水添加後の基礎生産力の違いを生じさせた可能性が高いと考えられ、銅の沈着影響は植物プランクトンの群集組成等の状況に依存することも示唆された。

本課題では、アジア大陸に近い貧栄養海域において“湿性沈着”が海洋表層生態系に及ぼす影響を評価するため、現場海水を用いた培養実験を実施し、植物プランクトンの雨水の添加に対する応答を調べた。その結果、降水に伴う窒素栄養塩の供給に伴い基礎生産の増加を捉えた一方で、高濃度の銅が沈着することによって基礎生産が阻害されることも捉えた。今後の課題としては、エアロゾルによる銅を含む様々な大気化合物の海洋への沈着量の時空間変動を数値モデルや観測で評価することに加え、様々な水塊環境において観測実験で検証していくことも重要だと考えられる。

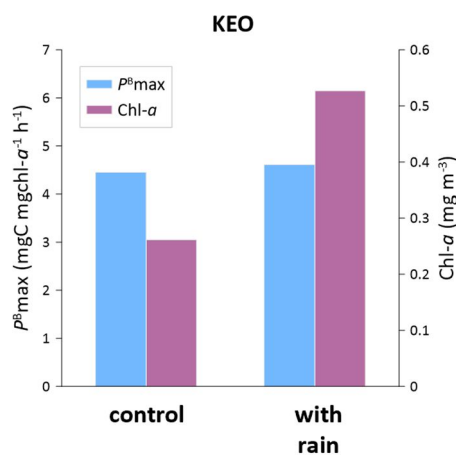


図5. KEOにおける雨添加1日経過後の最大光合成速度(P^B_{max} :青)とクロロフィル(紫)。 P^B_{max} に変化はないがクロロフィルが2倍に増加。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kazuhiko Matsumoto, Fumikazu Taketani and Koji Sugie
2. 発表標題 春季の北西部北太平洋において雨水の添加が表層基礎生産力に及ぼす影響の実験結果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumikazu TAKETANI, Kazuhiko MATSUMOTO, Takashi SEKIYA, Kazuyo YAMAJI, Yugo KANAYA
2. 発表標題 Impact of Atmospheric Nitrogen Nutrient Dry Deposition on Surface Primary Productivity over the subtropical western North Pacific
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹谷文一、松本和彦、関谷高志、山地一代、金谷有剛
2. 発表標題 西部北太平洋亜熱帯海域における大気栄養塩供給の海洋表層基礎生産への影響評価
3. 学会等名 第28回大気化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fumikazu TAKEANI, Kazuhiko MATSUMOTO, Takashi SEKIYA, Kazuyo YAMAJI, Yugo KANAYA
2. 発表標題 Influence of Atmospheric Nitrogen Nutrient Dry and Wet Deposition on Surface Primary Productivity at the Subtropical Western North Pacific
3. 学会等名 AGU Ocean Sciences Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kazuhiko Matsumoto, Fumikazu Taketani and Koji Sugie
2. 発表標題 Impact of rainwater for phytoplankton at the oligotrophic subtropical waters in the western North Pacific: implications for atmospheric deposition from East Asia
3. 学会等名 AGU Ocean Sciences Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Fumikazu Taketani, Kazuhiko Matsumoto, Yugo Kanaya
2. 発表標題 Direct observation of surface primary productivity influenced by wet deposition at subtropical Northwestern Pacific.
3. 学会等名 SOLAS meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiko Matsumoto, Fumikazu Taketani
2. 発表標題 Examining the impact of rainfall on primary productivity in the oligotrophic subtropical ocean
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumikazu Taketani
2. 発表標題 研究船みらいによる大気-海洋物質循環航海の概要紹介
3. 学会等名 寒冷圏大気-海洋間の生物地球化学的相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F. Taketani, K. Matsumoto, Y. Iwamoto, K. Nagashima, M. Kitamura
2. 発表標題 R/V Mirai cruise for IMPACT-SEA project 2021-Preliminary results-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹谷文一・松本和彦・金谷有剛
2. 発表標題 海洋表層の基礎生産力への大気物質の影響：現場観測による湿性沈着の効果検証
3. 学会等名 第26回大気化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹谷文一・長島佳菜・喜多村稔・本多牧生・松本和彦・宮川拓真・藤木徹一・木元克典・杉江恒二・栗栖美菜子・脇田昌英・内田裕・中嶋亮太・野口真希・金谷有剛・原田尚美, 岩本洋子, Astrid Mueller・Matthias Frey, 村上裕太郎, 藤木なぎさ
2. 発表標題 「みらい」MR21-01航海概要報告:西部北太平洋におけるアジア大気微量物質による海洋生物地球化学への影響評価
3. 学会等名 海と地球のシンポジウム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	松本 和彦 (Kazuhiko Matsumoto) (50359155)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・准研究主任 (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
---------	---------