Press Release

令和８年 11 月 11 日

報 道 機 関　各位

二酸化炭素排出を抑えても、海洋への影響は数世紀にわたって続く
― 2500 年までの予測で明らかになった 深海の炭素蓄積と海洋生態系へのストレス―

■ ポイント

・地球システムモデル※1）を用いて、二酸化炭素排出量の異なる複数の共有社会経済経路シナリオ※2）について、西暦 2500 年までの数値シミュレーションを実施し、大気中の二酸化炭素濃度が安定あるいは低下した後も、人為起源炭素※3）の海洋内部への蓄積や、海洋生態系へのストレスの変化が数百年にわたって続くことを示しました。

・高排出シナリオでは、海洋への人為起源炭素の蓄積による二酸化炭素緩衝能力の低下※4）と、海洋成層の強化による表層へのアルカリ度供給の減少※5）が、長期的な表層海洋の二酸化炭素分圧の上昇に寄与することを明らかにしました。

・海洋の生物生産※6）は、大気中の二酸化炭素濃度が産業革命前の約 3 倍に達する水準を境に増加から減少へ転じ、この転換が大西洋子午面循環※7）の弱化と、それに伴う海洋表層への栄養塩※8）供給の変化に密接に関係することを明らかにしました。

■ 概要

富山大学学術研究部理学系の小林英貴特命助教、国立環境研究所の横畠徳太主席研究員、千葉大学の山本彬友准教授、海洋研究開発機構の羽島知洋主任研究員、建部洋晶主任研究員、東京大学大気海洋研究所の岡顕准教授、東北大学・海洋研究開発機構変動海洋エコシステム高等研究所（WPI-AIMEC）の Keith B. Rodgers 教授からなる研究グループは、地球システムモデル「MIROC-ES2L」を用いて、二酸化炭素排出量の異なる複数の共有社会経済経路（SSP）シナリオに基づく西暦 2500 年までの数値シミュレーションを行い、海洋炭素循環と生物地球化学環境の長期的な変化を解析しました。解析の結果、海面から取り込まれた人為起源炭素は、大気中の二酸化炭素濃度が安定あるいは低下した後も深海へ運ばれ続け、海洋の変化が数百年にわたって継続することが明らかになりました。特に高排出シナリオでは、人為起源炭素の蓄積による二酸化炭素緩衝能力の低下に加え、海洋生態系を支える表層の生物生産量や海洋生態系へのストレス※9）にも大きな変化が生じました。一方、低排出シナリオでは、これらの変化がより早く収まり、海洋環境が回復に向かう可能性が示されました。本研究は、気候変動に対する海洋の応答が数百年にわたって続くことを踏まえ、2100 年以降も見据えた長期的な視点で将来の気候変動を考える必要性を示しています。本研究成果は、「Biogeosciences」に 2026 年 11 月 11 日（水）（日本時間）に掲載されるとともに、同誌の「Highlight Paper」に選定されました。

【本発表資料の配信元】富山大学総務部総務課広報・基金室 (TEL)076-445-6028 (FAX)076-445-6063

■研究の背景

海洋は、人間活動によって排出された二酸化炭素の一部を吸収し、大気中の二酸化炭素濃度の上昇と地球温暖化を抑える重要な役割を果たしています。その一方で、二酸化炭素の吸収や温暖化に伴い、海洋酸性化や海洋循環、生物生産など、海洋の炭素循環や生態系を取り巻く環境も変化します。さらに、海面から取り込まれた熱や炭素が深海まで運ばれ、海洋全体が変化するには数百年以上の時間を要するため、大気中の二酸化炭素濃度が安定した後も海洋の変化は続く可能性があります。しかし、これまでの将来予測は主に 21 世紀末までを対象としており、その後の海洋炭素循環や生物地球化学環境がどのように変化するかは十分に明らかになっていません。

■研究の内容・成果

本研究では、日本で開発された地球システムモデル「MIROC-ES2L」を用いて、温室効果ガス排出量などが異なる複数の SSP シナリオについて、西暦 2500 年までの数値シミュレーションを行いました。その実験データから、海洋による二酸化炭素の吸収・放出、海洋内部への炭素蓄積、二酸化炭素緩衝能力、海洋循環、栄養塩、生物生産、海洋生態系へのストレスなどの長期的な変化を解析しました。

その結果、海洋の炭素循環は、大気中の二酸化炭素濃度が安定あるいは低下した後も数百年にわたって変化し続け、その大きさや持続期間は排出シナリオによって大きく異なることが明らかになりました。特に深海では、大気中の二酸化炭素濃度の増加が止まった後も溶存無機炭素※１０）が増加しました（図 1)。これは、海面から取り込まれた人為起源炭素が、海洋循環によって時間をかけて深海へ運ばれ続けるためです。

高排出シナリオでは、海洋による二酸化炭素吸収量は 21 世紀後半まで増加した後、表層海洋の二酸化炭素分圧が大気に近づくにつれて減少しました。さらに 23 世紀半ば以降には、赤道域や亜熱帯を中心に、表層海洋の二酸化炭素分圧が大気を上回る海域が拡大しました。一方、深層水の湧昇などを通じて海洋内部の影響を強く受ける南極大陸を取り囲む南大洋では、実験期間を通じて二酸化炭素を吸収しやすい状態が維持されました。

こうした長期的な二酸化炭素分圧の変化には、海水の炭酸系と海洋循環の変化が関係していました。人為起源炭素が海洋に蓄積するにつれて、海水の二酸化炭素緩衝能力が低下し、同じ量の溶存無機炭素が加わった場合でも、二酸化炭素分圧がより大きく上昇するようになります。さらに高排出シナリオでは、海洋上層の成層強化や深層循環の弱化によって、アルカリ度の高い深層水が表層へ運ばれにくくなり、表層のアルカリ度が低下することも二酸化炭素分圧の上昇に寄与していました。

海洋の生物生産にも、排出シナリオによって異なる応答がみられました（図 2)。低排出シナリオでは生物生産と有機物の深層への輸送が増加した一方、高排出シナリオでは減少しました。この違いは、大気中の二酸化炭素濃度が産業革命前の約 3 倍に達する付近で現れ、大西洋子午面循環の弱化と、それに伴う栄養塩分布の変化に密接に関係していました。

海洋生態系を取り巻く環境にも長期的な変化がみられました（図 3)。高排出シナリオでは、大気中の二酸化炭素濃度が安定した後も、高水温、海洋酸性化、貧酸素化などによる生態系へのストレスが強まり続けました。一方、低排出シナリオでは、こうした変化がより早く収まり、海洋環境が回復に向かう傾向がみられました。ただし、北極海など一部の海域では、高水温や栄養塩の減少による影響が 25 世紀後半まで残りました。

以上の結果は、大気中の二酸化炭素濃度が安定あるいは低下しても、海洋内部への炭素蓄積や生物地球化学環境の変化はすぐには止まらず、数百年にわたって続くことを示しています。また、その持続期間は排出シナリオによって大きく異なり、低排出シナリオでは海洋環境がより早く回復へ向かう可能性が示されました。

■今後の展開

本研究では、温室効果ガスの排出経路によって、海洋環境の変化の大きさだけでなく、その変化が続く時間にも大きな違いが生じることが示されました。特に低排出シナリオでは、高排出シナリオに比べて海洋環境がより早く回復へ向かう傾向がみられました。このことは、今後の排出経路が、21 世紀の気候だけでなく、その後数百年にわたる海洋環境の変化と回復の時間スケールにも関わることを示しています。

一方、本研究で用いたモデルには、氷床の融解や流動に伴う淡水供給と海洋・大気との相互作用や、海底堆積物やサンゴ礁との相互作用を通じて海水中の溶存無機炭素やアルカリ度が変化する過程など、数百年以上の時間スケールで重要となる過程が十分に表現されていません。今後、こうした長期的な過程を地球システムモデルに取り入れることで、人為起源炭素に対する海洋の応答と、その影響がどの程度続くのかを、より正確に評価できるようになると期待されます。

■付記

本研究は、文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム（SENTAN)」（課題番号：JPMXD0722681344)、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業さきがけ（課題番号：JPMJPR23G4）、環境省・（独）環境再生保全機構環境研究総合推進費（課題番号：JPMEERF23S21109, JPMEERF20242001)、文部科学省「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI)」に認定された WPI-AIMEC の支援を受けました。

本研究の数値シミュレーションは海洋研究開発機構（JAMSTEC）が運用する「地球シミュレータ」を使用しました。

【用語解説】

※１）地球システムモデル（Earth System Model）

大気、海洋、陸域、生態系、炭素循環など、地球システムを構成するさまざまな要素と、それらの間の相互作用をコンピューター上で表現する数値モデルです。

※２）共有社会経済経路（SSP, Shared Socioeconomic Pathways）シナリオ

将来の社会や経済の発展、それに伴う温室効果ガス排出量などを想定した、将来の気候変動を調べるためのシナリオです。

※３）人為起源炭素

化石燃料の燃焼や森林伐採などの人間活動によって、大気中の二酸化炭素濃度が上昇したことに伴い、海洋に追加的に蓄積された炭素を指します。海洋にはもともと自然由来の炭素が大量に存在しますが、人間活動による影響で増加した分を「人為起源炭素」と呼びます。

※４）海洋の二酸化炭素緩衝能力の低下

海洋の二酸化炭素緩衝能力とは、海水が取り込んだ二酸化炭素を、重炭酸イオンや炭酸イオンなどの別の化学的な形に変えて蓄えることで、海水中の二酸化炭素分圧の上昇を抑えるはたらきです。これにより、海は大気中からさらに二酸化炭素を吸収することができます。しかし、海洋に炭素が蓄積するにつれてこの能力は低下し、二酸化炭素を吸収しにくくなります。

※５）アルカリ度供給の減少

温暖化によって海洋表層の水温が上昇し、海の表層と深層が混ざりにくくなり、深層に多く存在するアルカリ成分が表層へ供給されにくくなります。アルカリ度は海水が酸性化するのを防ぐ「緩衝力」であり、アルカリ度が高いほど取り込んだ二酸化炭素を重炭酸イオンや炭酸イオンとして蓄えやすくなります。そのため、成層の強化によって表層のアルカリ度が低下すると、海水中の二酸化炭素分圧が上昇しやすくなり、海洋の二酸化炭素吸収能力が低下します。

※６）生物生産

植物プランクトンなどが光合成によって有機物をつくるはたらき。つくられた有機物は海洋生態系の食物のもととなり、その一部は海洋内部へ運ばれて炭素の貯蔵にもつながります。

※７）大西洋子午面循環（AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation）

北大西洋での海水の沈み込みを伴い、大西洋の表層と深層をつなぐ大規模な海洋循環。暖かい表層水が北上し、形成された深層水が南下することで、南北方向の熱輸送や、炭素・栄養塩の分布に重要な役割を果たします。

※８）栄養塩

植物プランクトンの成長に必要な物質で、主に硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩などを指します。海洋では、深い海から表層に供給される栄養塩が、植物プランクトンによる生物生産を支えています。

※９）海洋生態系へのストレス

海洋生物の生息や成長に影響を与える環境要因。本研究では、海水温の上昇、酸性化、貧酸素化、炭酸カルシウム飽和度の低下、栄養塩の減少を対象としています。

※１０）溶存無機炭素

海水中に溶けている無機炭素の総量を指し、主に二酸化炭素、重炭酸イオン、炭酸イオンの形で存在します。これらは海水中で化学的な平衡を保ちながら相互に変化し、その割合は水温や海水の酸性・アルカリ性の程度などによって変わります。

【論文詳細】

論文名：Multi-centennial ocean biogeochemical responses to extended Shared Socioeconomic Pathways
著者：Hidetaka Kobayashi, Tokuta Yokohata, Akitomo Yamamoto, Tomohiro Hajima, Hiroaki Tatebe, Akira Oka, Keith B. Rodgers
掲載誌：Biogeosciences
DOI：https://doi.org/10.5194/bg-23-7807-2026

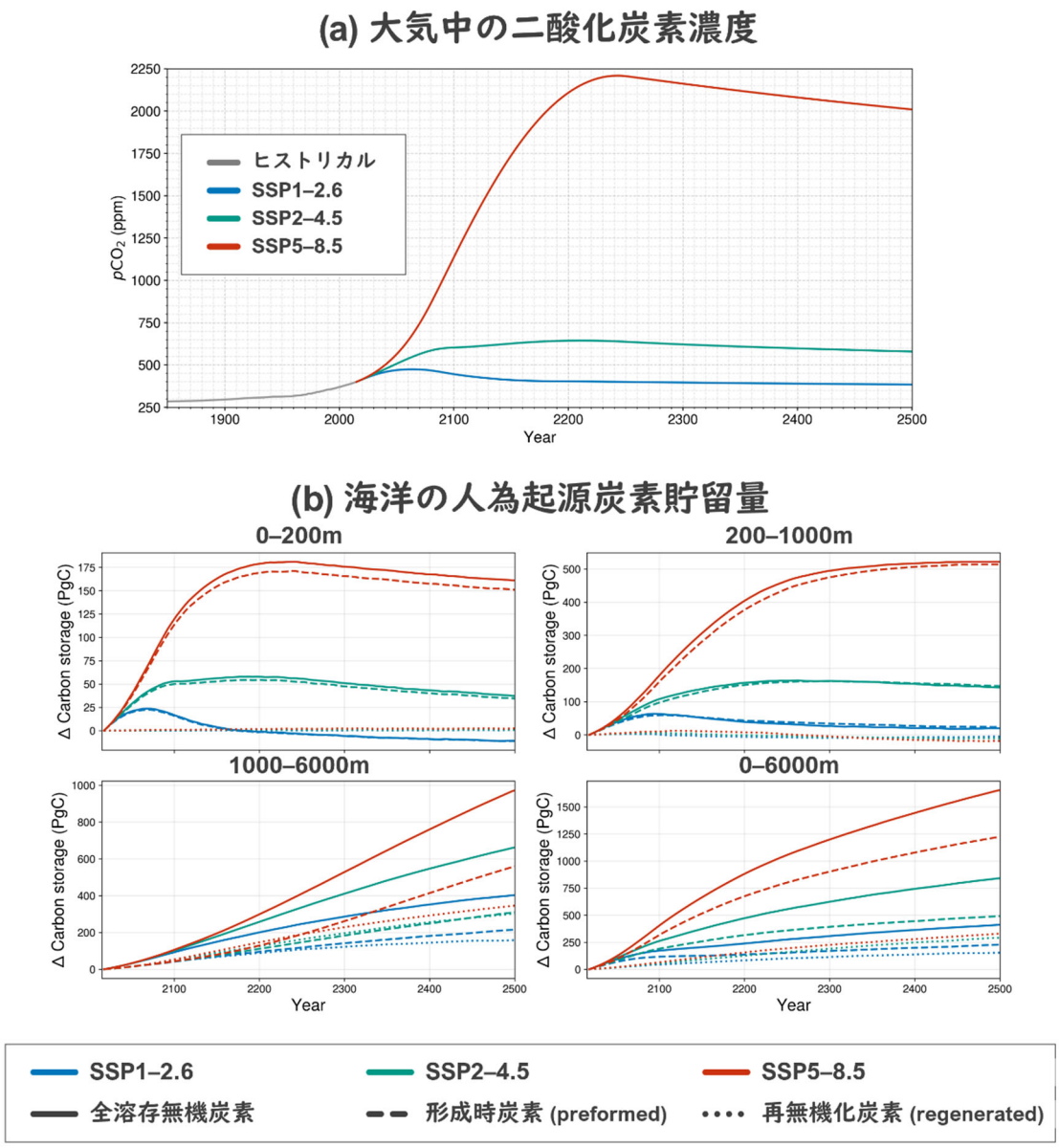


図 1 : 海に取り込まれた人為起源の炭素は、表層では大気中の二酸化炭素濃度の変化にすばやく応答する一方、深層では数百年にわたって蓄積し続けます。(a) 共有社会経済経路シナリオ（SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5）に基づく大気中の二酸化炭素濃度の変化。(b) 各シナリオのもとで、海洋の表層（0-200 m）、中層（200-1000 m）、深層（1000-6000 m）および海洋全体に蓄積された人為起源炭素の量（PgC）。海洋中の人為起源炭素を、海水が表層にあったときに取り込まれた「形成時炭素」（破線）と、海洋内部で有機物の分解によって生じた「再無機化炭素」（点線）に分けて示しています。

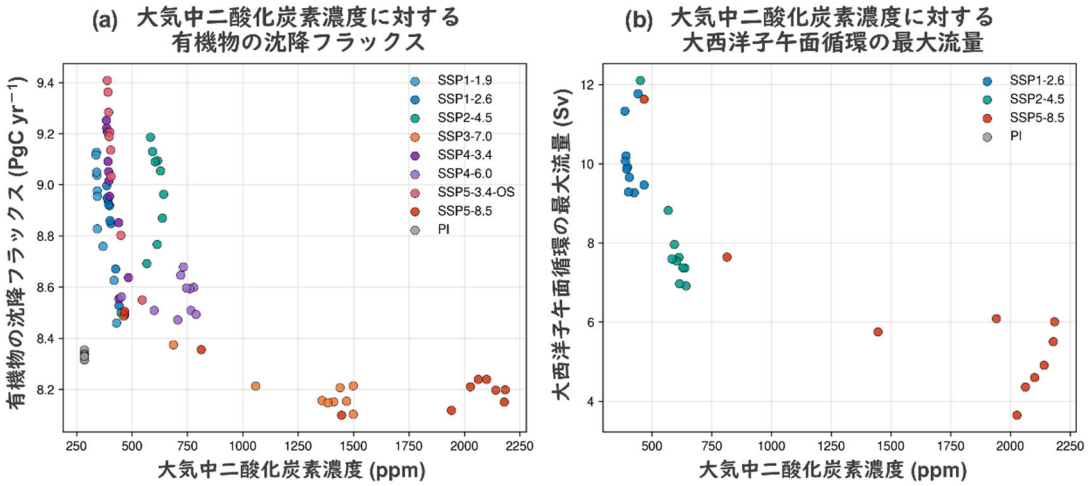


図 2 : 大気中の二酸化炭素濃度が増えるほど、海洋表層から内部へ輸出される有機炭素量が減少します。この変化は、大西洋の子午面循環の弱まりと密接に関係しています。(a) 大気中の二酸化炭素濃度と、海洋表層から内部へ輸出される有機炭素量の関係。(b) 大気中の二酸化炭素濃度と、大西洋の子午面循環の強さとの関係。各点は、さまざまな共有社会経済経路シナリオのもとで計算された 50 年間ごとの平均値を示しています。

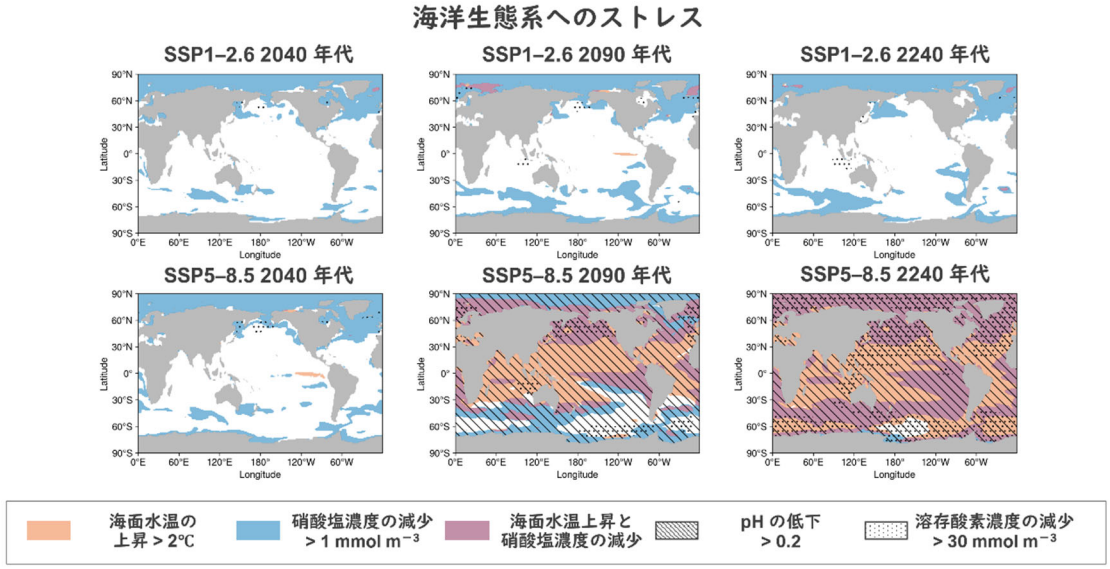


図 3 : 温暖化や海洋酸性化、貧酸素化など、海洋生態系への複数のストレスが長期的に拡大します。低排出（SSP1-2.6）、高排出（SSP5-8.5）の各シナリオについて、2010 年代と比べて海洋環境が大きく変化する海域を示しています。左から 2040 年代、2090 年代、2240 年代です。海水温の上昇、栄養塩の減少、海洋酸性化、酸素の減少を海洋生態系へのストレス要因として評価しています。色は温暖化（+2° C）と栄養塩の減少（−1 mmol m^{-3}）、斜線は海洋酸性化（pH が 0.3 低下）、点描は酸素の減少（−30 mmol m^{-3}）を示し、これらが重なる海域では複数の環境変化が同時に進行することを表しています。

【研究に関するお問い合わせ先】
富山大学　学術研究部理学系
特命助教 小林　英貴（こばやし　ひでたか）
TEL：076－411－4801　　Email：hidekoba@sci.u-toyama.ac.jp

国立研究開発法人国立環境研究所
主席研究員　横畠　徳太（よこはた　とくた）

千葉大学　大学院理学研究院
准教授　山本　彬友（やまもと　あきとも）

国立研究開発法人海洋研究開発機構
地球環境研究部門　環境変動予測研究センター
主任研究員　羽島　知洋（はじま　ともひろ）

地球環境研究部門　環境変動予測研究センター
兼務 東北大学・海洋研究開発機構変動海洋エコシステム高等研究所（WPI-AIMEC）
主任研究員/WPI-AIMEC 研究員　建部 洋晶（たてべ　ひろあき）

東京大学大気海洋研究所　気候システム研究系
准教授　岡　顕（おか　あきら）

東北大学・海洋研究開発機構変動海洋エコシステム高等研究所（WPI-AIMEC）
兼務　東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻
WPI-AIMEC 主任研究員/教授　Keith B. Rodgers（キース　ロジャース）

【報道に関するお問い合わせ先】

国立大学法人富山大学 総務部総務課 広報・基金室
TEL：076-445-6028　　Email：kouhou@u-toyama.ac.jp

国立研究開発法人科学技術振興機構　広報課
TEL：03-5214-8404　　Email：jstkoho@jst.go.jp

国立研究開発法人国立環境研究所　企画部広報対話室
TEL：029-850-2308　　Email：kouhou0@nies.go.jp

千葉大学　広報室
TEL：043-290-2018　　Email：koho-press@chiba-u.jp

国立研究開発法人海洋研究開発機構　企画部門　事業推進部　報道室
TEL：045-778-5690　　Email：press@jamstec.go.jp

東京大学大気海洋研究所　附属共同利用・共同研究推進センター広報戦略室
Email：kouhou@aori.u-tokyo.ac.jp

東北大学・海洋研究開発機構　変動海洋エコシステム高等研究所（WPI-AIMEC）
TEL：022-795-5620　　Email：aimec-comm@grp.tohoku.ac.jp

【JST 事業に関するお問い合わせ先】

科学技術振興機構　戦略研究推進部　ライフイノベーショングループ
沖代 美保（おきしろ　みほ）
TEL：03-3512-3524　Email：presto@jst.go.jp