

— 解説 —

海洋への二酸化炭素除去 (mCDR) に関する実現可能性調査 — 全米科学・工学・医学アカデミー報告書の要点 —*

本多 牧生[†]

要 旨

地球温暖化の原因である大気中の二酸化炭素増加を低減させるため脱炭素化, 省エネルギーとともに, ジオエンジニアリング (気候工学) 的な二酸化炭素吸収方法の検討がなされている。海洋は人為起源の二酸化炭素の約 1/4 を吸収し, 大気中の二酸化炭素の約 50 倍の二酸化炭素を保有しており, 潜在的な二酸化炭素の巨大な吸収・貯留の場である。この能力を人工的に高めるのが海洋への二酸化炭素除去方法・技術 (Marine Carbon Dioxide Removal: mCDR) である。mCDR としては (1) 栄養塩肥沃化 (2) 人工湧昇・沈降流 (3) 海藻養殖 (4) 海洋生態系回復 (5) 海洋アルカリ度増強 (6) 電気化学工学的除去などが考えられるが, 知識不足, 経験不足により, 実際に大気中で増加する二酸化炭素を低減させる規模の mCDR を実海域で実施する段階には, 至っていない。本解説は, 全米科学・工学・医学アカデミー (National Academies of Science, Engineering, and Medicine) による上記 6 つの mCDR の実現可能性調査報告のうち, 生物地球化学的手法である (1)–(4) の要点を, 原文に沿って, かつ筆者からの解説を若干加えながら, 紹介するものである。

キーワード: 気候工学, mCDR, 栄養塩肥沃化, 人工湧昇・沈降流, 海藻養殖,
海洋生態系回復

1. 著者まえがき

地球温暖化対策としては, その原因である大気中の二酸化炭素増加を低減させるため脱炭素化, 省エネルギー

とともに, ジオエンジニアリング (気候工学) 的な二酸化炭素吸収方法の検討がなされている。海洋は人為起源の二酸化炭素の約 1/4 を吸収し, 大気中の二酸化炭素の約 50 倍の二酸化炭素を保有しており, 潜在的な二酸化炭素の巨大な吸収・貯留の場である。この能力を人工的に高めるのが海洋への二酸化炭素除去方法・技術 (Marine Carbon Dioxide Removal, 以下 mCDR) である。mCDR としては (1) 栄養塩肥沃化 (2) 人工湧昇・沈降流 (3) 海藻養殖 (4) 海洋生態系回復 (5) 海洋アルカリ度増強 (6) 電気化学工学的除去などが考え

* 2024 年 6 月 11 日受領 2024 年 11 月 25 日受理

著作権: 日本海洋学会, 2025 年

† 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

e-mail: hondam@jamstec.go.jp

られる。2022年、全米科学・工学・医学アカデミー (National Academies of Science, Engineering, and Medicine, 以下 NASEM) は、上記6つの mCDR の実現可能性調査報告書を発表した。

NASEM (2022): A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>

本報告書作成委員会は以下の研究者で構成されている。

Scott C. Doney (University of Virginia, Charlottesville) (委員長)
 Holly Buck (University at Buffalo, NY)
 Ken Buesseler (Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA)
 M. Debora Iglesias-Rodriguez (University of California, Santa Barbara)
 Kathryn Moran (University of Victoria, BC)
 Andreas Oschlies (GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany)
 Phil Renforth (Heriot-Watt University, Edinburgh, UK)
 Joe Roman (University of Vermont, Burlington)
 Gaurav N. Sant (University of California, Los Angeles)
 David A. Siegel (University of California, Santa Barbara)
 Romany Webb (Columbia Law School, New York, NY)
 Angelicque White (University of Hawai'i at Manoa, Honolulu)

また本報告書の目次を表1に示す。

今回「海の研究」で紹介する本解説は、上記の報告書のうち生物地球化学的もしくは生物学的手法であり、著者の専門に近い(1)-(4)の要点を、ある部分は原文に沿って抄訳・意識し、原文のある部分(例えば、基本的な炭素循環や化学平衡に関する記述、法律に関する記述および米国特有の記述など)は割愛して、紹介するものである(表1の本解説目次を参照)。末尾には、付録として、著者による用語捕捉説明、そして英語・略語・日

本語の対比表を掲載した。なお NASEM 報告書の本文・表で用いられている経費説明は全て米ドル(例えば \$5M: 500 万米ドル)表示であるため、本解説では日本円を、米ドル(\$1)=150 円換算し、併記した。また NASEM 報告書では、引用元に従って Gt (10^9 ton = 10^{15} g) と Pg (10^{15} g) が混在しているが、本解説文では Gt に統一した。

2. はじめに (NASEM (2022) 1 章 Introduction の要点)

2021年の段階で、大気中二酸化炭素濃度(CO₂)は産業革命前の1.5倍、過去80万年どころか過去数百万年間で最大となり、現在の地球温暖化の74%は同CO₂によって引き起こされている。地球温暖化による気候変動は生態系、人間社会に多大な影響をおよぼしている。そして海の温暖化と酸性化は海洋生態系、人間社会への海の生態系サービスを脅かし始めている。1992年に採択され、1994年に発効された国連気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 以下 UNFCCC) の下、毎年、同条約締約国会議 (Conference of Parties, 以下 COP) が開催されてきた。2015年、パリで行われた UNFCCC COP21 では 21 世紀終了時の産業革命前気温からの温度上昇を 2°C まで (できれば 1.5°C まで) に留めるというパリ協定が宣言された。この目標達成のためには再生エネルギーへの転換やエネルギー効率の上昇、そして土地利用による CO₂ 放出量削減という脱炭素化に加え、より積極的な CO₂ 吸収の取り組みが必要である。ある計算に基づくと年間 10 Gt の CO₂ (10 Gt-CO₂/yr) (炭素換算で年間 2.7 Gt: 2.7 Gt-C/yr)、今世紀末には 20 Gt-CO₂/yr (5.5 Gt-C/yr) の吸収が必要である。そして気温上昇 1.5°C 未満を達成するための CO₂ 排出許容量は残すところ 300-900 Gt-CO₂ (82-250 Gt-C) と試算されている。これに対して現在の CO₂ 発生量は 35 Gt-CO₂/yr (~9.5 Gt-C/yr) である。現在、人為起源 CO₂ を化学的に捕獲し地中などに貯留する CO₂ 回収・貯留 (Carbon Dioxide Capture and Storage, 以下 CCS) の実証実験が世界的に行われているが、その量は 2020 年の段階で 40 Mt (0.04 Gt)-CO₂/yr 程度に留まっている。

海は物理学的・地球化学的・生物学的プロセスにより、

表 1 NASEM 報告書の目次と本解説文の目次。解説文目次の括弧内は NASEM 報告書の抄訳・意訳箇所を示す。

<p>=NASEM (2022) =</p> <p>SUMMARY</p> <p>1. INTRODUCTION</p> <p>1.1. Human Perturbations to the Global Carbon Cycle</p> <p>1.2. Climate Mitigation, Decarbonization, and Carbon Dioxide Removal</p> <p>1.3. Seawater CO₂ and Carbonate System Chemistry</p> <p>1.4. Ocean Carbon Cycle and Ocean Anthropogenic CO₂ Uptake</p> <p>1.5. Ocean-Based Carbon Dioxide Removal</p> <p>1.6. Origin and Purpose of the Study</p> <p>1.7. Study Approach and Framework for Assessment</p> <p>2. CROSSCUTTING CONSIDERATIONS ON OCEAN-BASED CDR R&D</p> <p>2.1. Legal and Regulatory Landscape</p> <p>2.2. Social Dimensions and Justice Considerations</p> <p>2.3. Other Crosscutting Considerations</p> <p>2.4. Addressing Research Gaps</p> <p>3. NUTRIENT FERTILIZATION</p> <p>3.1. Overview,</p> <p>3.2. Knowledge Base</p> <p>3.3. Efficacy</p> <p>3.4. Scalability</p> <p>3.5. Viability and Barriers</p> <p>3.6. Summary of Carbon Dioxide Removal Potential</p> <p>3.7. Research Agenda</p> <p>3.8. Summary</p> <p>4. ARTIFICIAL UPWELLING AND DOWNWELLING</p> <p>4.1. Overview</p> <p>4.2. Knowledge Base</p> <p>4.3. Efficacy</p> <p>4.4. Scalability</p> <p>4.5. Viability and Barriers</p> <p>4.6. Summary of Carbon Dioxide Removal Potential</p> <p>4.7. Research Agenda</p> <p>4.8. Summary</p> <p>5. SEAWEED CULTIVATION</p> <p>5.1. Overview</p> <p>5.2. Knowledge Base</p> <p>5.3. Efficacy and Scalability</p> <p>5.4. Viability and Barriers</p> <p>5.5. Summary of Carbon Dioxide Removal Potential</p> <p>5.6. Research Agenda</p> <p>5.7. Summary</p> <p>=本解説=</p> <p>1. 著者まえがき</p> <p>2. はじめに (NASEM (2022) 1 章の要点)</p> <p>3. mCDR 調査研究における分野横断的課題 (NASEM (2022) 2 章の要点)</p> <p>3.1. 法規制の状況 (NASEM 2.1 の要点: 以下 2.1)</p> <p>3.2. 社会的側面と正義に関する考慮事項 (2.2)</p> <p>3.3. その他の分野横断的課題 (2.3)</p> <p>3.4. 考慮すべき研究のギャップ (2.4)</p> <p>4. 栄養塩肥沃化 (NASEM (2022) 3 章の要点)</p> <p>4.1. 概要 (3.1)</p> <p>4.2. 知識と実績 (3.2)</p> <p>4.3. 有効性 (3.3)</p> <p>4.4. 拡張性 (3.4)</p> <p>4.5. 実行可能性と障壁 (3.5)</p> <p>4.6. まとめ (3.8)</p> <p>5. 人工湧昇流と沈降流 (NASEM (2022) 4 章の要点)</p> <p>5.1. 概要 (4.1)</p> <p>5.2. 知識と実績 (4.2)</p> <p>5.3. 有効性 (4.3)</p> <p>5.4. 拡張性 (4.4)</p> <p>5.5. 実現可能性と障壁 (4.5)</p> <p>5.6. 調査研究項目 (4.7)</p> <p>5.7. まとめ (4.8)</p>	<p>6. RECOVERY OF MARINE ECOSYSTEMS</p> <p>6.1. Overview</p> <p>6.2. Knowledge Base</p> <p>6.3. Efficacy</p> <p>6.4. Scalability</p> <p>6.5. Viability and Barriers</p> <p>6.6. Summary of Carbon Dioxide Removal Potential</p> <p>6.7. Research Agenda</p> <p>6.8. Summary</p> <p>7. OCEAN ALKALINITY ENHANCEMENT</p> <p>7.1. Overview</p> <p>7.2. Knowledge Base</p> <p>7.3. Efficacy</p> <p>7.4. Scalability</p> <p>7.5. Environmental and Social Impacts</p> <p>7.6. Monitoring and Verification</p> <p>7.7. Viability and Barriers</p> <p>7.8. Summary of Carbon Dioxide Removal Potential</p> <p>7.9. Research Agenda</p> <p>7.10. Summary</p> <p>8. ELECTROCHEMICAL ENGINEERING APPROACHES</p> <p>8.1. Overview</p> <p>8.2. Knowledge Base</p> <p>8.3. Efficacy</p> <p>8.4. Scalability</p> <p>8.5. Viability and Barriers</p> <p>8.6. Summary of Carbon Dioxide Removal Potential</p> <p>8.7. Research Agenda</p> <p>8.8. Summary</p> <p>9. SYNTHESIS AND RESEARCH STRATEGY</p> <p>9.1. A General Framework for Ocean-Based Carbon Dioxide Removal Strategies</p> <p>9.2. Common Components of Any Research Implementation</p> <p>9.3. Summary of Assessed Ocean-based Carbon Dioxide Removal Strategies</p> <p>9.4. Proposed Research Agenda</p> <p>REFERENCES</p> <p>ACRONYMS AND ABBREVIATIONS</p> <p>APPENDIXES</p> <p>A COMMITTEE BIOGRAPHIES</p> <p>B WORKSHOP AND MEETING PUBLIC PRESENTATIONS TO THE COMMITTEE</p> <p>6. 海藻養殖 (NASEM (2022) 5 章の要点)</p> <p>6.1. 概要 (5.1)</p> <p>6.2. 知識と経験 (5.2)</p> <p>6.3. 有効性と拡張性 (5.3)</p> <p>6.4. 実行可能性と障壁 (5.4)</p> <p>6.5. 研究課題 (5.6)</p> <p>6.6. まとめ (5.7)</p> <p>7. 海洋生態系回復 (NASEM (2022) 6 章の要点)</p> <p>7.1. 概要 (6.1)</p> <p>7.2. 知識と経験 (6.2)</p> <p>7.3. 有効性 (6.3)</p> <p>7.4. 拡張性 (6.4)</p> <p>7.5. 実行可能性と障壁 (6.5)</p> <p>7.6. まとめ (6.8)</p> <p>8. 著者まとめとあとがき</p> <p>謝辞</p> <p>付録 1 用語捕捉説明</p> <p>付録 2 訳語・略語説明</p> <p>参考文献</p> <p>図表キャプション</p>
--	--

①産業革命前の50倍のCO₂を貯蔵(～38,000 Gt-C)
 ②人類起源のCO₂の約1/4を吸収しており(2020年段階で～9 Gt-CO₂/yrもしくは2.16 Gt-C/yr), CO₂の巨大な吸収場所・貯蔵場所となっている。海洋が大気中CO₂を吸収・海洋内輸送するメカニズムの一つが「生物ポンプもしくは生物炭素ポンプ(Biological Carbon Pump, 以下BCP)」であり、年間5-12 Gt-CのCO₂を海洋内部へ輸送している。このBCPの効率を評価する上で重要なポイントは①Rain ratio(注1)②有機炭素分解深度スケール(Remineralization Length Scale, 以下RLS)(注2)である。現在、海洋内では、温暖化、酸性化、貧酸素化が進行中であるが、上記Rain ratio, RLSそして海洋溶存無機炭素(Dissolve Inorganic Carbon, 以下DIC)やCO₂吸収能力の変化は現在のところ検出されていない。一方、大気中のCO₂が物理化学的に溶解込み、海水循環・混合・拡散により海洋内部へ輸送されるメカニズムが「溶解ポンプ」である。大気中のCO₂の溶解込みやすさは、CO₂の溶解度そして海水中のアルカリ度に大きく影響される。

これらの働きを人為的に高めるのがジオエンジニアリング(気候工学)的な海洋への二酸化炭素除去技術・方法(Oceanもしくはmarine Carbon Dioxide Removal: 本解説ではmCDR)である。mCDRとしては(1)栄養塩肥沃化(注3)(2)人工湧昇流・沈降流(注4)(3)海藻養殖(注5)(4)海洋生態系の回復(注6)(5)海洋アルカリ度増強(注7)(6)電気化学工学的手法(注8)などが検討されている(図1)。しかし知識不足、経験不足により、実際に大気中で増加するCO₂を低減させる規模のmCDRを実海域で実施する段階には、至っていない。

NASEMでは、

- ① 科学技術的疑問点の抽出, 取り巻く管理上の疑問, 利益・危険度, 潜在的規模, 実行可能性の検証
- ② 研究開発の基本的要素, 疑問に答える手順の定義
- ③ 費用や自然への潜在的影響の見積・評価
- ④ 公的機関, 私的機関による調査研究実行方法の提案を目的に, 研究機関, 政府機関, 非政府機関から65名以上の専門家を招集し, 文献調査や会議を開催することで, 以下の点に留意して上記技術・方法の実現可能調査を実施した(NASEM 2022)。

- ① 知識と経験: 知識の蓄積とギャップ, 準備状況, 実験室レベルから実海域試験まで, 何を基に知識が構築されているのかの把握, 不明点, 疑問点の抽出。
- ② 効果・有効性: 実海域で実施された場合のCO₂吸収能力と負の要素(他の温室効果ガスの発生などの副反応)の検討。
- ③ 耐久性と永続性: どれぐらいの期間, CO₂を大気から隔離できるかの検討。
- ④ 拡張性: 効果的にCO₂吸収が実現できる規模の考察。
- ⑤ 実行可能性と障壁: 実行可能性とそれに障壁となりそうな事項の抽出。
- ⑥ 統治と社会的側面: 法律, 規制, 社会的側面, 政策, 環境正義(平等性)についての検討。
- ⑦ 調査開発の方法: mCDRの実現性や実施にあたっての留意点(コスト評価, 実施後の効果や副反応に関するモニタリング方法, 副次的利点, 社会的影響)の検討。

なおNASEMでは、2019年に、植林、森林回復、森林管理、農耕地によるCO₂吸収、バイオ燃料、CCSなどの陸上のCDR(land CDR, 以下ICDR)に関する実行可能性調査報告書(NASEM 2019)を出版している。この中で沿岸域の海草藻場造成やマングローブ林再生および湿地帯へのCO₂吸収技術・方法であるブルーカーボンについて言及している。よって本報告では沿岸域で実施されるブルーカーボンについては言及しない。

3. mCDR 調査研究における分野横断的課題 (NASEM (2022) 2章 Crosscutting considerations on ocean-based CDR R & Dの要点)

全てのmCDRに関して共通する留意事項、懸念事項は以下のものである。

3.1. 法規制の状況

海洋の60%は公海であるため、mCDR実施時には様々な国際海洋法の法令遵守が必須となる。基本的なものが1982年に採択され、1994年に発効された国連海洋法条約(United Nations Convention on the Law of the Sea, 以下UNCLOS)である。また1972年に採択

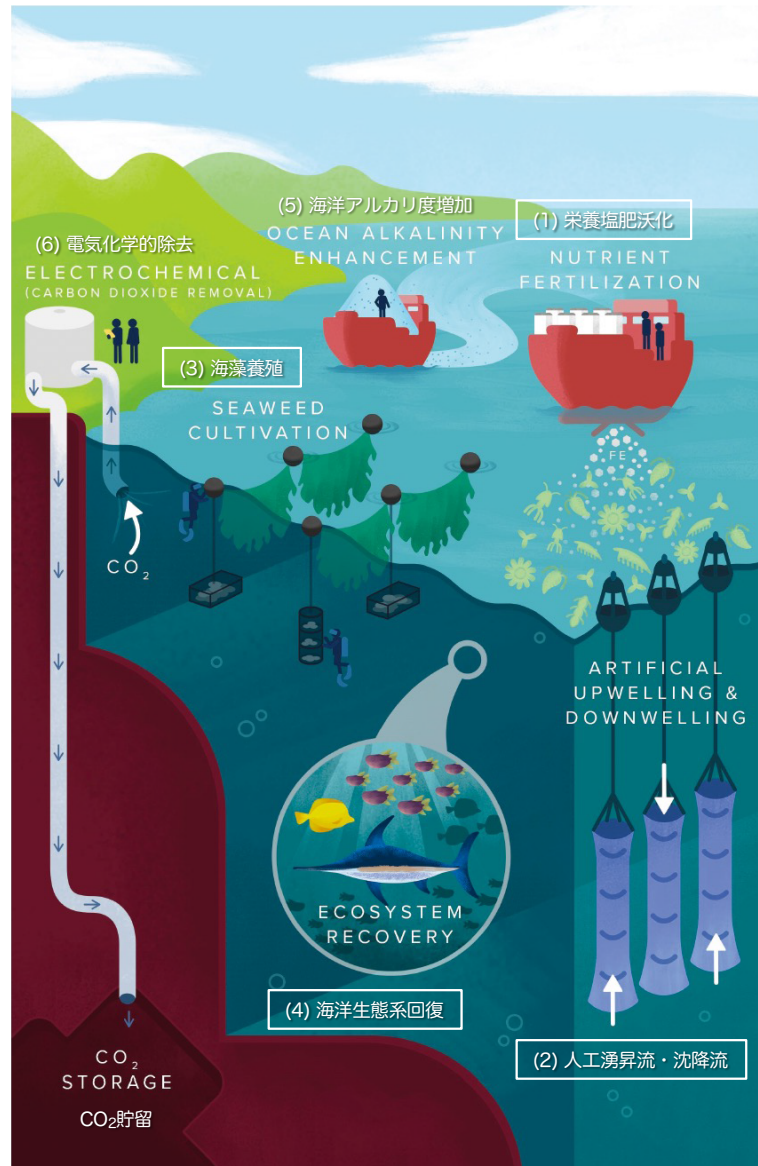


図1 海洋における気候工学的二酸化炭素吸収方法 (mCDR) (NASEM 2022 Fig.S.1 を引用)。本報告では (1)-(4) を解説。

され、1975年に発効されたロンドン条約、そして同条約による海洋汚染の防止措置をさらに強化するために1996年に採択され2006年に発効されたロンドン議定書では禁止物質 (Blacklisted substances) と定義されている有機ハロゲン、水銀、カドミウム、プラスチック、原油、放射性物質、産業廃棄物の海洋投棄を禁止している。一方では検討物資 (whitelisted substances) と定義される浚渫物、下水汚泥、魚ゴミ、船、コンクリート、

建造物、天然に存在する有機物や鉱物などは厳格な条件下では海洋投棄可能としている (注9)。

1997年のCOP3で採択された京都議定書や2015年のCOP21で採択されたパリ協定では、暗黙的に、気候変動を緩和するCDRを認めているが、mCDRとしての鉄、栄養塩、鉱物など風化物質やアルカリ水の海洋散布がこれらに抵触するの否かについては今後の議論が必要である。また1992年に採択され、1993年に発効さ

れた生物多様性条約 (Convention on Biological Diversity, 以下 CBD) があるので, mCDR を実施することによる海洋生態系への悪影響については十分に検討する必要がある。ただし米国は UNCLOS および CBD に締結していない。mCDR に関する強固な法的枠組みの確立は, 環境やその他の悪影響のリスクを最小限に抑え, 研究と (適切とみなされる場合の) 展開 (実海域実証実験) が安全かつ責任ある方法で実施されることを保証するために不可欠である。

3.2. 社会的側面と正義に関する考慮事項

mCDR には多くの社会的側面 (産業, 雇用, 環境など) が含まれている。実施にあたっては地域住民, 先住民との合意形成が必須であるとともにプロジェクト設計の一部として雇用創出, 地域活性化など関係者の生計にとってプラスとなる側面を組み込み, 計画と実施のすべての段階で地域社会を巻き込んで, ニーズを考慮・醸成することが必要である。また開発中に地域社会の意識を高めることで, ある地域での養殖や CO₂ 隔離が他の地域での CO₂ 隔離を妨げることがないように留意することも必要である。

3.3. その他の分野横断的課題

各 mCDR が実施された場合には, 実際の効果を把握するため, また実施したことで変化するもしくは発生する生物学的, 化学的, そして環境学的な副次的事項について把握するための時空間的に広がりのあるモニタリングが必要不可欠である。このモニタリング経費がどの分野でも経費の中で最大になりうる。そして得られたデータは一般への公開が必須である。

3.4. 考慮すべき研究のギャップ

法的問題 (ロンドン条約・議定書など既存の国際法や国内法に対する mCDR の位置付けと必要に応じての法改正, そして有用な指針や行動規範の提案), 社会的側面 (さまざまな分野での, 学際的な, mCDR 調査研究, 多様な組織, 人種, 地域社会による研究開発の醸成, 持続可能な開発目標 (SDGs) との関わり, mCDR の気候変動の緩和, 適応策への位置付けの把握), 経費 (未確定要素が多い中での試算, ICDR コストおよびもう一つ

の気候変動対策ジオエンジニアリングである太陽放射管理 (Solar Radiation Management, 以下 SRM) コストに対する mCDR コストの評価) などが挙げられる。

4. 栄養塩肥沃化 (NASEM (2022) 3章 Nutrient fertilization の要点)

本章以降から, NASEM (2022) において mCDR として検討されている6つのうち, 生物地球化学的・生物学的要素の強い4つを紹介していく

4.1. 概要

微量 (鉄) もしくは主要 (リン, 窒素, ケイ素) 栄養塩添加により海洋表層での基礎生産増加により大気中 CO₂ を吸収させ, その一部を沈降粒子として海洋内部へ輸送する方法である。鉄散布実験による基礎生産の増加と CO₂ 吸収は, 現場観測や衛星観測で実証されてきた。しかし CO₂ の海洋内部輸送に関しては十分な観測結果が得られていない。海洋内部へ CO₂ を輸送した場合, 場所によって, また沈降粒子の分解深度によって, CO₂ を 100-1000 年のスケールで大気から隔離することが可能である (図 2)。鉄添加の特徴 (利点) は, ある一定の CO₂ 吸収のために必要な鉄の量が, 他の栄養塩 (リン, 窒素, ケイ素) に比較すると極めて少ないことである。

4.2. 知識と実績

BCP は海洋の大気中 CO₂ 吸収にとって極めて重要である。モデル計算によると, BCP がなければ大気中 CO₂ 濃度は 200 ppm 高かった (Sarmiento and Toggweiler, 1984; Maier-Reimer *et al.*, 1996), 沈降有機炭素粒子の分解深度が 240 m 深くなると大気中の CO₂ 濃度は 10-25 ppm 低くなる (Kwon *et al.*, 2009) など BCP の重要性が報告されてきた。

4.2.1 鉄添加 (Ocean Iron fertilization, 以下 OIF)

BCP を駆動するためにはリン, 窒素, ケイ素などの主要栄養塩が必要であるが, 海洋にはこれらの栄養塩が多いにもかかわらず植物プランクトン量が少ない HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 海域が多くある。1990 年代後半, 米国の John Martin 博士はこれは微量

栄養塩の鉄 (Fe) が欠乏しているために生じていることを培養実験や現場実験で明らかにした (Martin and Fitzwater, 1988)。そして博士が残した言葉「Give me half a tanker of iron and I'll give you the next ice age」で知られるように、最終氷期最寒期に、間氷期に比べ大気中 CO₂ が約 90 ppm 低下したのは、大陸からの鉄が海洋へ供給され海洋の基礎生産力が増加したためという鉄仮

説が発表された (Martin *et al.* 1990)。これを実海域で実証すべく、1993 年以降、東西北部北太平洋や東部赤道域、そして南大洋など様々な HNLC 海域で 13 回の実海域鉄散布実験が行われてきた (図 3)。ただし mCDR として評価するための沈降粒子増加については十分な検証が行われていない (観測結果が得られていない)。

一方、火山由来 (例えば Duggen *et al.*, 2007 Jones

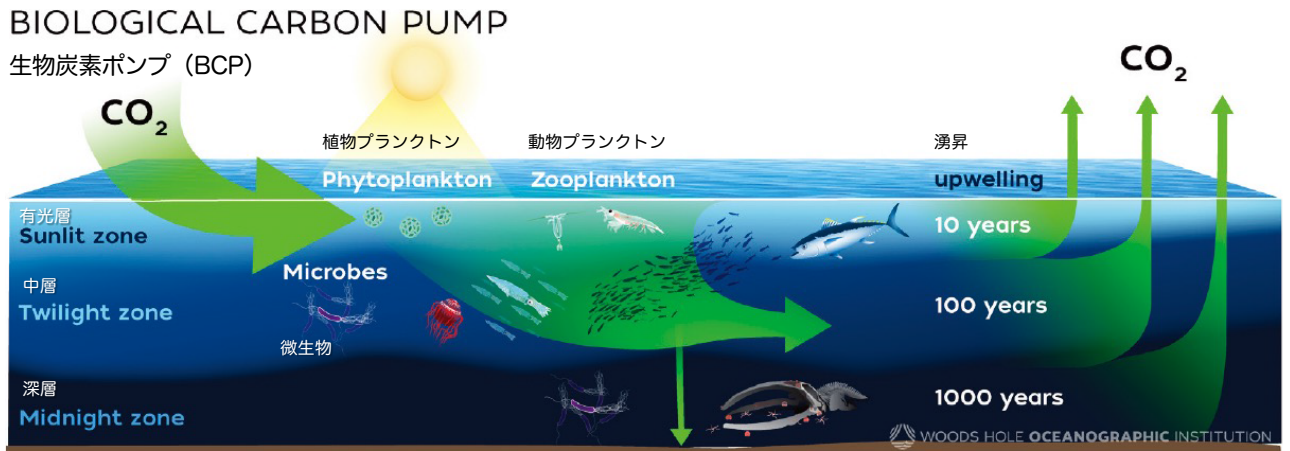


図 2 生物炭素ポンプと炭素隔離期間 (NASEM 2022 Fig. 3.1 を引用。原図はウッズホール海洋研究所作成)

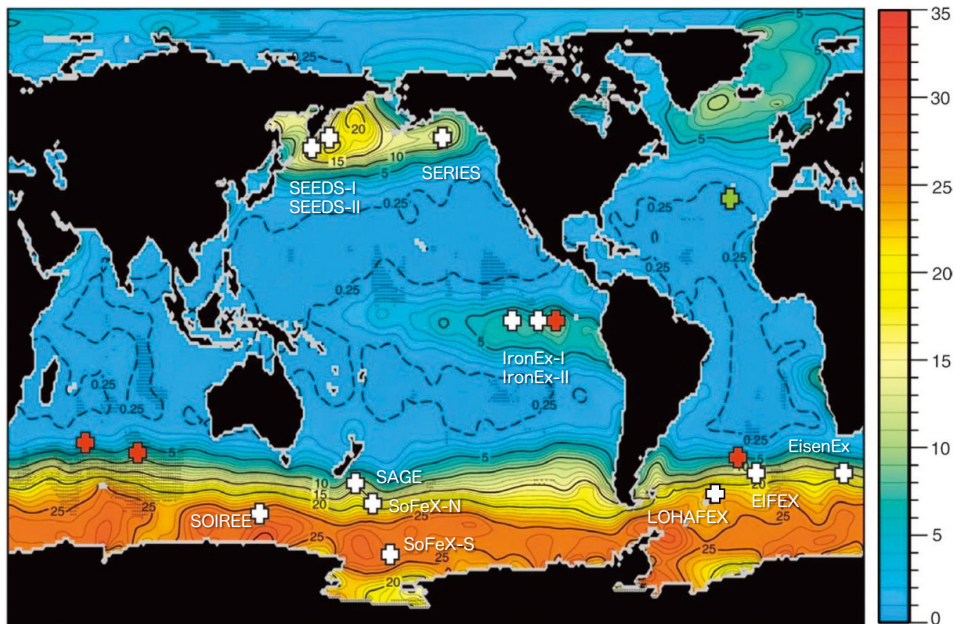


図 3 鉄散布実験海域 (NASEM 2022 Fig. 3.2 を引用。原図は Boyd *et al.* 2007 で Smetacek and Naqvi, 2010 のデータが追加されている。白十字は人為的鉄散布実験海域と実験名。赤十字は天然鉄散布実験海域。緑十字は鉄+リン散布実験海域。背景は表層混合層の硝酸塩濃度 (μM)。

and Gislason, 2008; Hamme *et al.*, 2010; Browning *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017), 山火事由来 (Young and Jan, 1977; Sundarambal *et al.*, 2010; Kelly *et al.*, 2021) の天然鉄供給による海洋の基礎生産力の増加についても報告されてきている。

4.2.2. 主要栄養塩添加 (Ocean Macronutrient Fertilization, 以下 OMF)

地質年代スケールでは、大陸風化による主要栄養塩供給が全球的な炭素循環や海洋生物地球化学や地球気候に影響を与えてきたと考えられてはいるが、主要栄養塩(窒素、リン、ケイ素)が欠乏し、植物プランクトンが少ない海域(LNLC)への、主要栄養塩添加についての議論は限定的である(Lawrence, 2014; Thingstad *et al.*, 2005)。本報告では OIF に焦点を当てて調査を進めてきた。

4.3. 有効性

4.3.1. 輸送効率

前述の通り、1993年から2009年の間に、13回のOIF実験が実施されてきた。350-4,000 kgの鉄(酸性の硫酸鉄溶液)が25-300 km²の海域に散布され、400 mg/m²以下から1,700 mg/m²以上の純基礎生産量増加が観測されている。しかしこれらのOIF航海は10日から30-40日程度の航海日数であったため、沈降粒子の増加など鉄散布後の生物地球化学的变化についての十分な観測は行われてこなかった。

OIFを実施し、評価するためには、取り込みの炭素/鉄モル比(C/Fe)(150,000-500,000, Sunda and Huntsman, 1995; de Baar *et al.*, 2008),ではなく、海洋内部へ輸送される炭素/鉄比(Export-C/Fe)測定が重要である。南大洋のOIFではExport-C/Feが水深100 mで8,000であった。de Baar *et al.* (2008)は同比が650-6,600であると報告し、実験室的取り込み比に比べるとはるかに低いことを示し、これは添加鉄がコロイド態になり植物プランクトンに十分に利用されていない結果であると考察した(注10)。

重要なことは鉄散布により純増した純基礎生産のうちで海洋内部へ輸送される割合(輸出生産率)、RLS、そして水深に伴う分解量である。自然界では純基礎生産のうち、海洋内部へ輸送される有機炭素フラックスの割合(輸出生産率)は1-50%であり、水深500 mまでに多

くの有機炭素フラックスが分解してしまう。

4.3.2. 耐久性または永続性

mCDRでは、最低100年間のCO₂海洋内貯留(大気からの隔離)を基準としている。貯留時間はCO₂の輸送深度と輸送海域に大きく依存している。Primeau (2005)は500 m以深に輸送されたCO₂の海洋内貯留時間は200年以上、2,000 m以深では600年と見積もっている。Siegel *et al.* (2021a)の数値シミュレーションでは、多くの海域の200-500 mに輸送されたCO₂で、貯留時間が100年以上となるものは50%以下であるが、1,000 m以深まで輸送されたCO₂は数百年以上貯留される、と見積もられている。ただし北大西洋循環域、南大洋極前線域、南インド洋東部アフリカ沖は例外である(貯留時間が短い)。

粒状有機炭素(POC)フラックスの水深に伴う減衰を表す経験式であるMartin curve (Martin *et al.*, 1987)のべき乗指数“b”により、POCの輸送深度が決定される(注11)。べき乗指数“b”が小さいほどより多くのPOCがより深い水深まで輸送され、結果、貯留時間が長くなる(図4)。珪藻が優占種である海域ではべき乗指数“b”が小さくなる傾向がある(Buesseler *et al.*, 2020)。また分解速度は、粒子の沈降速度や水温、酸素濃度にも大きく影響される(Devol and Hartnett, 2001; van Mooy *et al.*, 2002; Boscolo-Galazzo *et al.*, 2021)。さらに深層水が形成されるような場所(南極ウェッデル海や北部北大西洋)もPOC(=CO₂)を深海に輸送するので、mCDRには適した場所と言える。

現在、BCPとしては上記の沈降粒子の重力沈降によるCO₂内部輸送メカニズム(Gravitational pump)に加え、鉛直混合層の発達や沈降流による小さいPOCや懸濁POCおよび溶解有機炭素(Dissolved Organic Carbon: DOC)の物理的な海洋内輸送メカニズム(physical pump)と生きている生物の鉛直移動によるCO₂内部輸送メカニズム(migration pump)が知られているが(Boyd *et al.*, 2019)、これらの輸送深度は浅く、より深いところまでPOC(=CO₂)を輸送するのはGravitational pumpである。

4.3.3. モニタリングと確認

全てのmCDRに共通するものは、mCDR実施後のモニタリングとmCDRの効果の確認の重要性である。NASAのPACE(Plankton, Aerosol, Cloud ocean Eco-

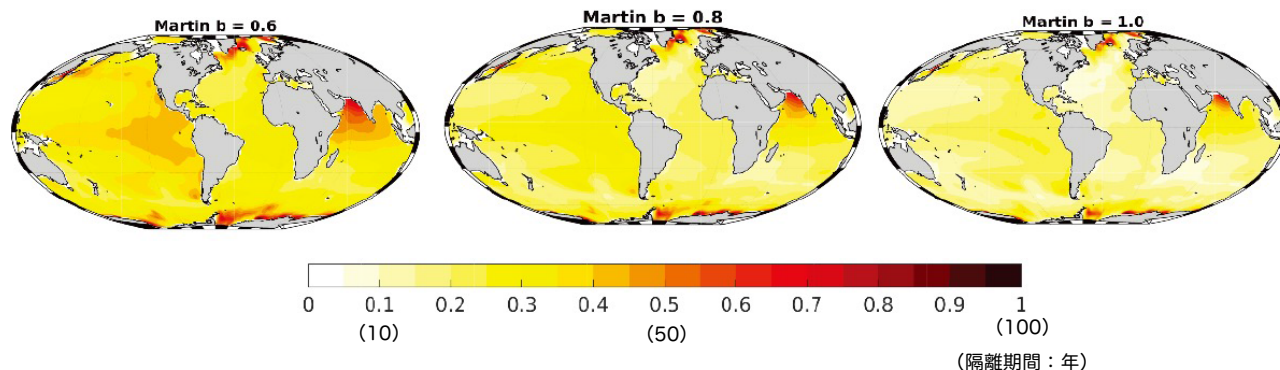


図4 マーチンカーブのべき乗指数“b”の違いによる炭素隔離期間指数（×100年）(NASEM 2022 Fig. 3.3 を引用。原図は Siegel *et al.* 2021a) (注17)

system: <https://pace.gsfc.nasa.gov/>) ミッションによる新しいハイパースペクトル観測により衛星による植物プランクトン組成の定量化観測も可能になる(注12)。衛星観測は mCDR 実施による海洋環境・生態系の時空間変動の観測には必須のものである。

海洋内部の mCDR 実施後のモニタリングと効果の検証には、各種センサー（水温、塩分、圧力、pCO₂、O₂、後方散乱、栄養塩）を搭載した BGC-Argo フロート、無人表層観測船、グライダーおよび篤志船が有効なモニタリングプラットフォームである。POC 観測にはセジメントトラップや放射化学的手法が必要である。さらに POC の光学的観測（後方散乱観測など）も今後は重要となる。また mCDR による深海の酸性化や貧酸素化そして漁業への影響、一方では地球温暖化による海洋熱波などのモニタリングも重要であり、北東太平洋の Line P のような長期定線観測なども重要である。多くのセンサーによる全球的ネットワーク観測のためには、より小型で、より安価で、生分解性のあるセンサー開発も必須となる。そして生態系の観測には従来からの水中カメラ観測や環境 DNA 測定も今後は必須項目となる。

4.3.4. 追記および末端への影響

OIF による mCDR により対象とする植物プランクトンが増加する一方、栄養塩が消費され他の植物に行き渡らなくなるという排他的栄養塩摂取が生じ、その結果、mCDR にとってマイナス効果が生じる可能性がある。南大洋や北部太平洋などの HNLC 海域では排他的栄養塩摂取が発生する可能性が高い。OIF による珪藻の繁茂

による Si : N 比のバランスの変化（Si が優先的に消費される）も要注意である。

4.4. 拡張性

OIF による mCDR 効果は、数値シミュレーションによると、貯留時間や海域によって異なり 1-5 Gt-C/yr 未満と見積もられている。また GESAMP (2019) は 1 Gt-C/yr と考えている（天然の BCP 能力は 5-12 Gt-C/yr）(表 2)。実施に適した場所は HNLC 海域である南大洋、適していない場所は太平洋赤道域である。ただし主要栄養塩が徐々に減少していくので、mCDR 効果も年々低下する。ただし POC フラックスが増えても湧昇流のある海域では CO₂ が再び海洋表面に戻ってくるので mCDR 効果は低い。POC フラックスに対する大気への CO₂ 放出の割合が 0.5 未満になる mCDR が良い。mCDR の目標は 1 年スケールで数%、数十年スケールで 10%、数百年スケールで 50%である。

4.5. 実行可能性と障壁

4.5.1. 一般的な考慮事項

他の mCDR と同様、生態系変化、食物連鎖変化、貧酸素化、生物多様性変化を引き起こし、勝者と敗者を産み出す可能性がある。加えて以下の産物がある。

① 一酸化二窒素：N₂O の生成

海水の酸素消費量も増加し、海洋貧酸素化の結果、硝化がおり、温室効果ガスである N₂O が生成される。結果、CO₂ 吸収効果が 6-12% 減となる。

表2 OIFの潜在的炭素貯留能力 (NASEM 2022 Table 3.1を改訂)

出典	年	潜在C貯留能力 (Gt-C/yr)	備考
Aumont and Bopp	2006	1-2	5つの数値シミュレーションで推定された106-227 Gt-C/100 yrsに基づく
Buesseler <i>et al.</i>	2008	0.2-0.3	HNLC 海域のみ
GESAMP	2019	1	数値シミュレーションに基づいた最大値
Strong <i>et al.</i>	2009	<1	南大洋のみ (Zahariev <i>et al.</i> 2008に基づく)
Cao and Caldeira	2010	<3	2100年までに全ての表層リン酸塩が消費された場合 (90年で約280 Gt-C)
Oschlies <i>et al.</i>	2010a	<1	南大洋のみ (周辺海域の二酸化炭素の逆流も考慮)
Keller <i>et al.</i>	2014	1-5	南緯30度以南の南大洋。ただし数百年スケールでモニターした場合、5から1 Gt-C/yrに低下
自然界のBCP	-	5-12	自然界の有光層からの炭素輸送量 (輸出生産力) (e.g. Siegel <i>et al.</i> , 2014)

② ジメチルサルファイド：DMSの生成

DMSも温室効果ガスと言えるが、太陽光を反射する雲核になるため、こちらは地球冷却化効果があり共同便益にもなる。また貧酸素化に伴うメタン(CH₄)やイソプレンの発生についても考慮しておく必要がある。

4.5.2. 有害藻類ブルーム (Harmful Algal Blooms: HABs)

例えばOIFにより神経毒のドウモイ酸(DA)を出すプセウドニッチア属珪藻などのHABsが発生する可能性がある。

4.5.3. 共同便益

植物プランクトンが増えることで、動物プランクトンが増え、その結果、魚が増えるため、OIFにより水産に利益が出ることが期待できる。例えば2012年にはある民間会社が100トンの鉄散布をし、鮭を増やす試みも実施された。しかし植物プランクトンの増加や鮭の増加は確認できず(Xiu *et al.*, 2014)、同行為が法的問題で議論されている(Tollefson, 2012)。よってOIFに漁業効果があるという十分な証拠は得られていない。

また2002年アリューシャン列島のKasatochi火山が噴火した際に、1.5-2×10⁶ km²にわたってクロロフィル濃度が2倍になり、北太平洋東部アラスカ湾観測地点OSPではpCO₂が30 ppm (8%) 低下し、pHが8.08

から8.13に上昇したことが報告された(Hamme *et al.*, 2010)。これらは天然の鉄供給によるものであり、この時は~0.01 Gt-C (0.04 Gt-CO₂)のmCDR効果があったと試算されている。Parsons and Whitney (2012)は同噴火によるアラスカ湾への鉄供給が珪藻を繁茂させ、ベニザケを増加させ、その結果、2010年のFraser川における記録的なサケの遡上に繋がったと、推定した。ただし火山噴火から記録的なサケの遡上には大きな時間差があり、天然のOIFによって漁獲量が増大したかどうかについて議論がある。

またOIFによるBCPの強化により、海洋表層の酸性化は軽減される。一方ではOIFは中深層でのPOC分解量を増加させるので、中深層では酸性化、貧酸素化が促進されるとともに深海サンゴなどの生態系に影響を及ぼす可能性がある。「mCDRは大気CO₂の海洋投棄」という言われ方もするが、遅かれ早かれ大気CO₂は海洋へ侵入していくのである。Cao and Caldeira (2010)は、2100年までのCO₂進入量は、自然に27%が入っていくのに対し、OIFすれば40%入っていくことになると試算している。

4.5.4. 経費とエネルギー

主要栄養塩添加に比べると鉄添加は安価といえる。また主要栄養塩を必要とする陸上肥料産業への影響も少な

表3 栄養塩元素単位量と市場価格あたりの CO₂ 除去量と必要栄養塩元素の年間製造量に対する割合 (NASEM 2022 Table 3.2 を引用)

栄養塩元素 (ele)	理論的 CO ₂ 除去量 (t-CO ₂ /t-ele) (*)	市場価格 (\$/t-ele)	除去 CO ₂ 当たりの市場価格 (\$/t-CO ₂)	年間製造量に対する 1Gt-CO ₂ を吸収するために必要な量の割合 (%)
窒素 (N)	21	1,000 (硝酸アンモニウム)	48	~34
珪素 (珪藻) (Si)	11	300-1,700 (e.g. Si 蒸気), 1-5 (珪藻塩岩)	27-155 もしくは <1 (珪藻塩岩)	-
リン (P)	150	300 (リン酸塩岩)	2	~40
鉄 (Fe)	780-78,000	350 (65% 鉄鉱石)	<0.4	<0.1

* C : Si : N : P : Fe (mole)=106 : 15 : 16 : 1 : 0.1-0.001 (Brzezinski, 2004)

い (表3)。ただし Fe : C 比 (生物の添加鉄の利用効率) および RLS により炭素貯蔵 (C_{seq}) 経費は大きく変動する (\$3 (450 円)/t-C_{seq} 未滿-\$300 (4.5 万円)/t-C_{seq} 以上 : Boyd, 2008)。全ての mCDR において, 実施にかかる経費より, その効果と環境・生態系影響, 副産物 (CH₄, N₂O, DMS, HABs) 発生状況の時空間的なモニタリング経費がかかる。海洋表層から海洋内部までの炭素輸送 (循環) の解明をターゲットにした NASA のプロジェクト EXPORTS (EXport Processes in the Ocean from Remote Sensing : <https://oceanexports.org/>, Siegel *et al.*, 2021b) では, 2021 年に 3 隻の船と自動プラットフォームを使用した, OIF を実施した場合のモニタリングと類似の, 物理学・生物学・地球化学的観測を実施したが (ただし鉄散布は行っていない), その時の経費は 1 観測海域 (約 10,000 km²) 当たり \$15-20M (22.5 億-30 億円)/月であった。

4.5.5 統治

OIF もしくは OMF は国際・国内法の対象に抵触する可能性があるものであるが, CBD では科学的データ取得目的の沿岸域での小規模な実験なら問題なし, と解釈できる可能性がある。またロンドン条約・議定書では, 正当な科学的目標がある場合は問題なし, と解釈できる可能性がある。一方では関係する地域住民や先住民への説明と理解, 賛同が必須であり, 重要不可欠である。

4.6. まとめ

表4に OIF に関する課題, 社会への影響, そして経費についてまとめる。OIF の効果は自然界の鉄に富んでいる島周辺や火山活動域の高い基礎生産力で証明されて

いるが, mCDR としての効果に関しての証明は不十分であり, 国際的な枠組みでの実海域実証実験が必要である。今後行われる実証実験はこれまで実施された OIF 実験の 10-100 倍規模 (鉄散布量は数百-数千トンでブルーム面積は 10⁵-10⁶ km²) で, その効果と影響については長期間 (1 年間以上) モニタリングされなければならない。また, OIF は他の mCDR に比べて, 拡張性が高く, 実施経費が低いと考えられるが, 固定される炭質量と生態学的影響についても注意深く監視する必要がある。OIF を含む OMF は多くの企業が漁業を強化する方法として提案している。OIF の参入経費は, 数百トンの鉄と小型船の費用で \$1-2M (1.5-3 億円) 程度と, 巨額の投資を必要としないため, 個人や小規模の組織や企業でも参入しやすい。そのため, 法令遵守しない, また科学的基準を維持し, 国際プロトコルに準拠した透明性のある計画や結果の報告を行わない組織などによる不正行為が発生しやすいので注意が必要である。

5. 人工湧昇流と沈降流 (NASEM (2022) 4 章 Artificial upwelling and downwelling の要点)

5.1. 概要

人工湧昇流 (Artificial Upwelling, 以下 AU) と沈降流 (Artificial Downwelling, 以下 AD) は熱, 塩分, 栄養塩, 無機・有機炭素, そしてエネルギーを, 表層有光層と暗くて栄養塩・CO₂ が豊富に含まれている中深層間を輸送する。また温度差発電にも拡張できる。AD は,

表4 OIFの課題と経費 (NASEM 2022 Table S3 および Table 3.4 をまとめたもの)

鉄散布肥沃化	課題	調査の環境への影響	調査の社会への影響	概算経費と必要期間
炭素隔離の輸送と生物取り込み度	鉄 (Fe) の生物利用率, 輸送の効率を向上させられるか? CDR 効果を高めるために輸送はバルス状のものか連続性のものか?	中程度: 実験室やメソコスムで試験が行われるため。数値シミュレーションは必須。	中程度。多くの場合, 沿岸で行われるため。	\$5 M/yr (7.5 億円/年) 必要期間: 5 年
炭素の行方のトラッキング	どのようにして増加した炭素フラックスを追跡するか? 炭素や Fe を追跡する新たな手法はあるか?	大規模実海域試験の一部として既に実施	実海域試験の結果次第	\$3 M/yr (4.5 億円/年) 必要期間: 5 年
一年間にわたる >1,000km ² の >100t-Fe 散布実海域試験	CDR の効率と生態系への影響は如何に?	中程度: Fe 散布時の影響と周辺海域への影響。表層付近の酸性化は解消されるかもしれない。CDR が効果的であれば深海の地球化学の変化が予想される。観測と数値シミュレーションが必須。	中程度: 未知の生態系の変化が懸念される。つまり HABs や温室効果ガス (N ₂ O) の発生。漁業との共同便益について確認する必要がある。	\$25 M/yr (37.5 億円/年) 想定される地球化学, 海洋物理, 生態系への影響など全てについて調査が必要。大規模な有効性と影響を測定するための生態学的影響 (本文中に記載されているコストは, 小規模かつ短期間の OIF および BCP 研究に基づいており, ここでは予測的な理解を得るために必要な 5-10 か所のサイトを仮定)。必要期間: 10 年
炭素と生態系変化のモニタリング	BCP を調査するための自動観測手法の開発。大規模での効果と影響の調査が必須	低: 生態系変化をモニターするための新しい手法の開発, 特に光学的手法, センサー, プラットフォーム, 分子レベルの測定装置	低: 炭素の流れや生態系変化を計測する手法は他の科学や一般生活にも使用できる多機能なものになる可能性。	\$10 M/yr (15 億円/年) 新しい技術はプロトタイプを迅速に作成できるが, CDR に役立つ信頼性と規模で市場に投入するにはコストがかかる。 必要期間: 10 年
実験計画と地球規模への外挿	現実の BCP や Fe や粒子サイズを再現した全地球システムモデルも構築	低: 実験を計画し, 局所規模および遠隔地での影響を予測するために必要なモデリングは, 環境に直接的な影響を与えず, より受け入れられる実海域試験の計画策定が可能。	モデル化のみを考慮した場合, 影響は低い, CDR の一般の受け入れが依然として必要であり, モデルは起こり得る影響を評価することが必要。	\$5 M/yr (7.5 億円/年) 初期は計画, 後期は影響度評価 必要期間: 10 年
社会, 経済, 説明責任に関する調査	現ロンドン条約やロンドン議定書に抵触していないか?	N/A	一般市民の低-中の OIF の許容から開始。	\$2 M/yr (3 億円/年) 必要期間: 10 年
研究と最終的な展開に最適な行動規範の文書化	オープンデータシステムとピアレビュー, 独立した炭素および影響評価を成文化する必要あり。	N/A	全ての CDR の外洋域での実施に関する一般市民からの許可, が必要。	\$2 M/yr (3 億円/年) 必要期間: 5-10 y (調査に関する早めの許可が必要)
調査研究総額				\$48 M/yr (72 億円/年) 必要期間: 5-10 年
優先項目実施の経費				\$33 M/yr (49.5 億円/年) 必要期間: 5-10 年

注: 太字は, それぞれの特定のアプローチの理解を進めるために次のステップに進むための優先項目を示す。

注: \$1M=1.5 億円

海洋表層の富栄養化, 酸性化を軽減させるとともに, 粒状態・溶存態炭素, 酸素を多く含む表層水を海洋内部に輸送する共同便益がある。

5.2. 知識と実績

1950 年代以降, 波力, 塩分差, バブリング, 密度差, および電気を利用したポンプによる AU や AD が試みられてきたが, mCDR の観点から実施されたことはなかった。mCDR として実施する場合は AU と AD を組み合

わせて実施することが効果的だと考えられる。AU による栄養塩供給は BCP 増加, 水産業の活発化とともに, 水温・気温低下による陸上土壌からの CO₂ 排出削減や, 台風の成長阻止, またサンゴの白化現象の低減などの効果が期待できる。

5.3. 有効性

AU による BCP 活発化により表層水から CO₂ が除去される一方, 亜表層から表層水へ CO₂ が供給されたり,

AU が粒状・溶存炭素の沈降を妨げたりするので、そのバランスの考慮が重要である。さらにアクセスが容易であるが炭素貯留時間が短い沿岸域で実施するか、アクセスが困難ではあるが炭素貯留時間が長い外洋域で実施するか、波力の強弱や栄養塩濃度の高低に対する人工湧昇パイプ敷設の難易度と建設費のトレードオフ等についても検討が必要である。また OIF と同様に、他の温室効果ガスの発生や、海洋内部・海底環境および生態系への影響を考慮する必要がある。さらに数値シミュレーションによる理想値に対する、技術・経費を考慮した実現性についても考慮する必要がある (図 5)。

mCDR では CO₂ 貯留期間 100 年を基準としている

が, Siegel *et al.* (2021a) は, OIF や AU/AD により粒状炭素となった CO₂ の 70% は浅海で分解するので, 貯留時間は 50 年程度と見積もっている。また, Dutreuil *et al.* (2009) は 200 m のパイプを, 緯度方向に 20 度, 経度方向に 10 度間隔で全海洋に展開した場合, 海洋の湧昇速度が 0.1 m/s 増加すると見積もった。その結果, 基礎生産力や BCP は上昇するが, 海洋内部からの CO₂ 供給があるため, 大気-海洋間の CO₂ 交換量は変化しないと結論づけた。

5.4. 拡張性

北太平洋亜熱帯海域で AU を実施した場合, 2 段階の

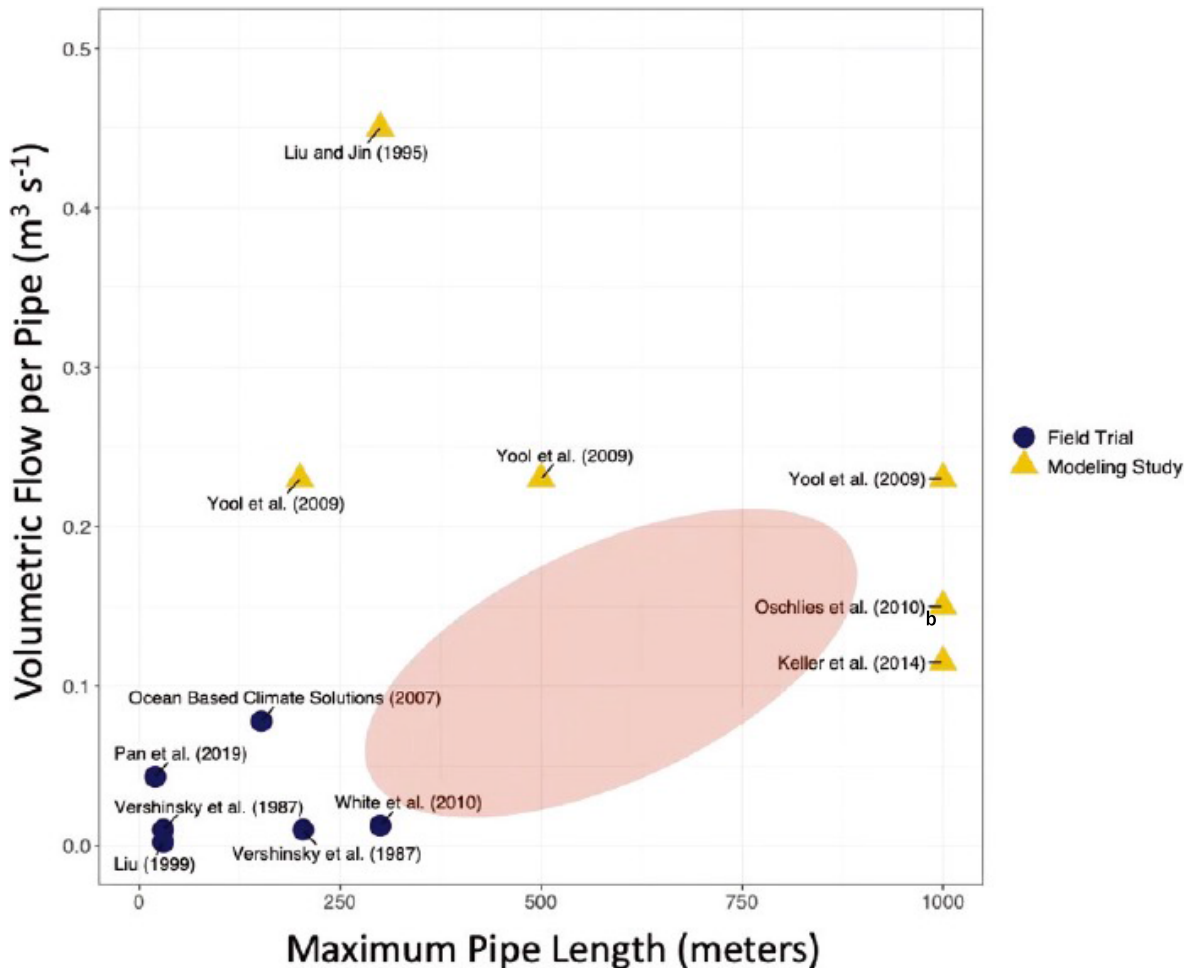


図 5 人工湧昇用パイプ最大値と湧昇速度の, 数値シミュレーションによる理論値 (理想値) (三角) と実海域試験実績 (黒丸) の格差 (オレンジ) (NASEM 2022 Fig. 4.3 を引用。原図は David Koweek 作成)。なお本図の最新版は Koweek (2022) を参照。

植物プランクトンのブルーム（1段階目は、硝酸消費による春のブルーム、2段階目は、残存しているリン酸を消費できる窒素固定能を持つシアノバクテリアの夏のブルーム）が期待でき、2段階目の方がmCDRとして効果的であると考えられる（Karl and Letelier, 2008）。一方では、CO₂を1 Gt-C/yrを吸収するためには、1.89億-7.76億台のポンプが必要と試算される。ADを実施するにあたっては、①適切な季節性があるか ②連続した、それとも単発的なAUのどちらが効果的か ③AUとADを同時に行う必要があるか ④複数ポンプの使用による過剰な水温上昇が発生しないか ⑤海域間の排他的栄養塩摂取が発生しないか、などについての検討が必要である。

5.5. 実現可能性と障壁

最大の障壁（負の側面）は、AUによりCO₂放出量が増加することである。これは自然界でエルニーニョ（ラニーニャ）発生時、湧昇の弱化（強化）に伴い海洋からのCO₂放出量が減少（増加）するのと同じ原理である。また、AUのカウンターであるADの結果、亜表層の水

温が上昇し微生物生産速度が増加し、POC分解が促進され、結果、BCP効果が低減する可能性がある。加えてAUのためのポンプが劣化もしくは破壊された場合、プラスチック・金属・コンクリート汚染が発生する可能性がある。さらにAU・ADにより周辺海域に強い流れが発生して、船舶航行に支障をきたす可能性および生物増加による生物付着増加も懸念される。

一方、法的可能性については、AUは人工物を設置したり、物質を加えるわけではないので、ロンドン条約・議定書には抵触しない、との解釈がある。

5.5.1. 共同便益

AUの結果のBCP上昇により発生することが予想されるDMSは地球冷却化効果がある。また表層海水温上昇によるサンゴの白化現象を低減させる。さらに、AUによる基礎生産力の増加は、漁業・水産養殖に貢献する（図6）。

5.5.2. 経費

直径12.9 m、長さ500 mの炭素鋼の波力湧昇慣性ポンプは\$4.68M（70.2億円）程度と見積もられる。設営、

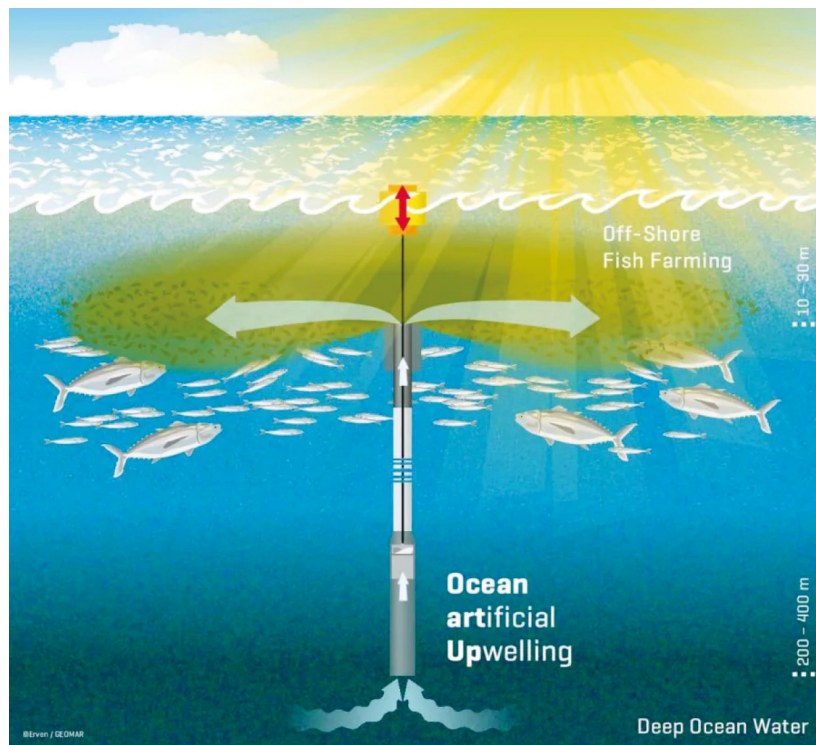


図6 外洋における人工湧昇の水産養殖への貢献概念図（NASEM 2022 Fig. 4.5 を引用。原図は GEOMAR 作成）

ランニングコスト、撤去、全て含むと \$10M (15 億円) 以下と見積もられている (Kirke, 2003)。また 10 エーカーのケルプ養殖場のためのプラスチックもしくはコンクリート素材の数千-数万台の永久塩泉ポンプによる AU の経費は \$24.2-139M (36.3 億-208.5 億円) であり、(ただし設置費, ランニングコスト, 調査費, モニタリング費は含まない) 150 t-CO₂/yr の吸収能力のある 500 m パイプの価格は \$60,000 (9 百万円)/500 m 程度であると見積もられている (Johnson and Diccico, 1983)。

5.6. 調査研究項目

自然界では米国東岸や南大洋で見られる自然の湧昇域では大型植物プランクトン (珪藻) が優占種で沈降粒子も多い。一方では CO₂ の放出量も多い。これらの事実を背景に、調査研究必須項目として以下のものが挙げられる。

- ① 長期間 (数ヶ月から数年単位) 稼働し持続的な生物反応が期待できるポンプシステムの開発。表層に供給された栄養塩豊富な深層水が容易に沈み込まないような工夫が必要。
- ② 湧昇速度, 供給海水の元素の化学両論, 生物への影響を予測できるモデルの開発。メソコズムと室内実験による環境影響・生物応答の把握。
- ③ AU 域/AD 域における粒状態・溶存態炭素の輸送に焦点をあてた強固なモニタリング計画。
- ④ 炭素鉛直輸送能力, RLS のモニタリング。
- ⑤ AU/AD の頻度 (単発的 vs 連続的ポンピング), 最適季節, 最適層などの検証。
- ⑥ AU がいない時の自然の生物生産と鉛直輸送の把握モニタリング。鉄制限海域や窒素制限海域など異なる特性を持つ海域での AU 計画の策定。
- ⑦ 船舶航路, 漁業活動, 他の海洋利用活動の妨害行為を確認するための現地調査。経費を最小化するための現地調査 (適切な汲み上げ水深の選定)。
- ⑧ FAIR 原則 (注 13) に従って, データの配布, 説明責任, データの透明性に関する明確な計画を含むデータ管理計画。
- ⑨ 材料, 展開, ローカルおよび下流の監視コストの完全なライフサイクル分析。
- ⑩ 社会学者, 法律専門家, 経済学者との対話により,

国民の認識, 受容性, ガバナンス, コストの実現可能性, および AU を大型藻類や漁業生産に結びつける可能性の評価。

5.6.1. 経費と時間枠

技術開発は ~\$40M (60 億円) と試算されている。このコストの大きさと現在の技術的準備の欠如を考慮すると, ポンプネットワークと CDR の可能性の最適な配置と規模を特定するための研究課題をモデルベースの実現可能性研究が主導する必要がある。これに続いて, 技術開発の拡大と, 材料のライフサイクル評価および導入コストと組み合わせて, 材料の耐久性と必要な湧昇速度の達成を示すことを目的とした小規模な概念実証研究が続く必要がある。

5.6.2. 環境への影響評価

OIF と同様に商業ベースの高次栄養段階生物への影響, HABs の発生, 他の温室効果ガスの発生, 中深層における酸性化と貧酸素化などである。

5.7. まとめ

以上, 様々な技術による AU による栄養塩濃度の豊富な中深層水の表層への供給が可能であることが実証されてきた。表 5 に mCDR としての AU/AD の課題や経費などをまとめる。AU の mCDR としての評価を行うためには, AU 技術の長期的な耐久性と有効性, および海上試験の実施場所について検討する必要がある。栄養塩豊富な中深層水の AU は基礎生産向上に伴う POC の海洋内への輸送量増加が期待できる一方, 中層水の CO₂ を海洋表層にもたらすため, その相対的効果を評価することが不可欠である。また海域ごとに植物プランクトンの種組成が異なるため, 供給される炭素:窒素:リン比とそれらの利用度合いについて考慮しておく必要がある。大規模な AU は経費がかかり, また自然界では湧昇域は CO₂ の排出域になっており, mCDR としては非現実的であり効果がない可能性がある。しかし養殖業や漁業を促進する貴重な手段にはなるので, 現在の不確実性を減少させるための現場における実証実験は価値があると考えられる。

表5 AU/AD の課題と経費 (NASEM 2022 Table S3 および Table 4.3 をまとめたもの)

人工湧昇流と沈降流	課題	調査の環境への影響	調査の社会への影響	概算経費と必要期間
技術的な準備：人工湧昇技術の耐久性と操作性を判断するための限定的かつ制御された外洋試験（さまざまな条件で最大100台のポンプをテスト）	開発されたポンプは実海域の海洋環境に耐えるか？十分な時間の湧昇速度を持続できるか？	中程度：HABsの発生、CO ₂ など温室効果ガスの放出	短期間では中程度の影響	\$5 M/yr (7.5 億円/年) (様々な海況で試験される～100台のポンプ) 必要期間：5年
実現可能性調査	限定的規模の技術と湧昇速度は、スケールアップ可能か？			\$1 M/yr (1.5 億円/年) 結果と技術試験のモデルシミュレーションをベースにした実行可能性調査 必要期間：1年
炭素の行方のトラッキング	どうすれば増加した炭素フラックスを追跡できるか？増強されたBCPの追跡技術の開発。	大規模な野外実験では影響がでるのである。	野外実験結果待ち	\$3 M/yr (4.5 億円/年) 海洋表層から深層まで炭素を追跡できる新しいシステムの開発が必要。 必要期間：5年
達成可能な湧昇速度と深層水源の既知の化学量論に基づいた炭素隔離のモデル化。さまざまな水源の深層水に対する潜在的な生物学的反応を評価するためのメソコスム実験と実験室実験を並行して実施	BCPを調査するための自動観測手法の開発。大規模での効果と影響の海洋試験の結果とポンプの技術進歩を考慮すると、CDRの可能性ほどの程度か？成長を制限する栄養素の既知の比率と推定される生物学的反応を考慮すると、堅牢な研究プログラムに最適な領域はどこか？調査が必須。	低：生態系シフトをモニターするための新しい手法の開発、特に光学的手法、センサー、プラットフォーム、分子レベルの測定装置。	低：炭素の流れや生態系シフトを計測する手法は他の科学や一般生活にも使用できる多機能なものになるであろう。	\$5 M/yr (7.5 億円/年) 新しい技術はプロトタイプを迅速に作成できるが、CDRに役立つ信頼性と規模で市場に投入するにはコストがかかる。 必要期間：5年
地域における実証規模の現場実験（1年以上、1,000 km以上）の計画と実施モデリングと予備実験からの現地ベースのインプット	実証規模でのCDR効率とその効果は何か？意図された、および意図されていない生態学的影響？計画には、材料コスト、展開コスト、およびローカルおよび下流の監視コストの完全なライフサイクル分析を含める必要あり。	実証規模でのCDR効率とその効果は？意図された、および意図されていない生態学的影響？計画には、材料費、展開費、および地域的および中程度の影響に関する完全なライフサイクル分析を含める必要あり。湧昇期間中、およびいくつかの懸念事項があり、テストの境界を超えている。観察とモデルが必要。下流の監視コスト。	中～高 一般の人々は、これらの活動を海洋投棄とみなしたり、未知の生態学的変化、つまりHABsの発生や他の温室効果ガスの共同生産の可能性があるため、海洋地球工学として否定的に見られる可能性あり。漁業の強化による副次的利益が最近強調されている。	\$25 M/yr (37.5 億円/年) 大規模な実証実験による可能性ある全ての地球化学、物理学および生態学的影響を測定・調査する必要あり。 必要期間：10年
炭素と生態系変化のモニタリング	大規模および下流（末端）への影響、隔離の時間と水深はどのようなものか？高解像度の結合物理/生態モデルと結合したBCPの評価のための自律的かつ遠隔的な方法の開発が必要であり、フィールド試験の計画と実施、およびそれらの取り組みの統合と連携して早期に実施される必要あり。	新しい方法、特に光学的なものから既存の地球化学センサーやプラットフォーム、および生態学的変化を監視する分子ツール技術が必要。	炭素の流れや生態系シフトを測定する全ての技術は他の科学や一般生活など多目的利用が可能。	\$10 M/yr (15 億円/年) 新しい技術はプロトタイプなものも迅速に作成可能だが、CDRに役立つ信頼性と規模で市場に投入するにはコストがかかる。 必要期間：10年
実験計画と地球規模への外挿（早い段階で計画を立て、その後影響評価）	総合的地球システムモデルで示されるように、現実的な粒子循環を含むBCPと物質循環はどのようなものか？	環境に直接的な影響を与えず、より受け入れられる野外研究の計画を支援する、局所規模および遠方場での影響を予測する実験を計画するために必要なモデリング。	モデル化のみを考慮した場合は低い、CDRの一般の受け入れが依然と必須であり、起こり得る影響を評価するにはモデルが必要。	\$5 M/yr (7.5 億円/年) 初期は計画経費、後期は影響評価経費が必要。 必要期間：10年
社会経済要素と管理に関する調査	公海における調査そして実海域実験はロンドン条約やロンドン議定書に抵触しないか？	N/A	海洋気候工学に関する一般の低/中程度の理解からの開始。	\$2 M/yr (3 億円/年) 必要期間：10年
研究と最終的な導入に最適な「行動規範」の文書化	公開データシステム、ピアレビュー、独立した炭素影響評価に関する最適な方法は何か？成分化が必要。	N/A	公海における全てのCDRに関して一般からの同意が必要。	\$2 M/yr (3 億円/年) 必要期間：5-10年
調査研究総額				～\$54 M/yr (81 億円/年) 必要期間：5-10年
優先項目実施の経費				\$5 M/yr (7.5 億円/年) 必要期間：5-10年

注：太字は、それぞれの特定のアプローチの理解を進めるために次のステップに進むための優先項目を示す。

注：\$1M=1.5 億円

6. 海藻養殖 (NASEM (2022) 5章 Seaweed cultivation の要点)

6.1. 概要

海藻養殖による海藻内への CO₂ の固定とともに、生産する DOC による CO₂ 固定にも着目する。また海藻養殖は食料増加、バイオ燃料増加という共同便益がある。

6.2. 知識と経験

大型海藻の mCDR としての炭素除去量、貯留量、滞留時間に関してはよくわかっていない。Krause-Jensen and Duarte (2016) は海藻養殖による mCDR (SC-mCDR) 量は $\sim 0.17 \pm (0.6-1.7)$ Gt-C/yr (~ 0.6 Gt-CO₂/yr) であり、そのうち難分解の DOC が約 70% を占めると見積もっている (図 7 の表層混合層からの DOC としての輸出: 117 / 総貯留量: 173 Tg-C/yr)。

海洋生態系への正の影響として、魚や哺乳動物の食料場・生息場の提供、人間社会生活への影響がある。ただし mCDR の CO₂ 貯留時間目標 100 年以上という点から見ると大型植物養殖は期待薄の可能性がある (CO₂ 貯留時間は 10 年以下)。沿岸域 (100 m 以浅の海域) に張られたロープ上で海藻を養殖していく方法が現実的である。ポイントである「大型植物に固定された CO₂ のどれだけが、後に枯草破砕物や DOC として海洋内部に運ばれていくか?」については未知数である。養殖大型植物の基礎生産の 14% が DOC と見積もられている。一方、漂流型 SC-mCDR と言えるホンダワラが排出した DOC の 56-78% は 150 日間分解しなかった、との報告がある。

6.3. 有効性と拡張性

Krause-Jensen and Duarte (2016) は効果的な SC-mCDR に必要な面積は以下のように試算した。

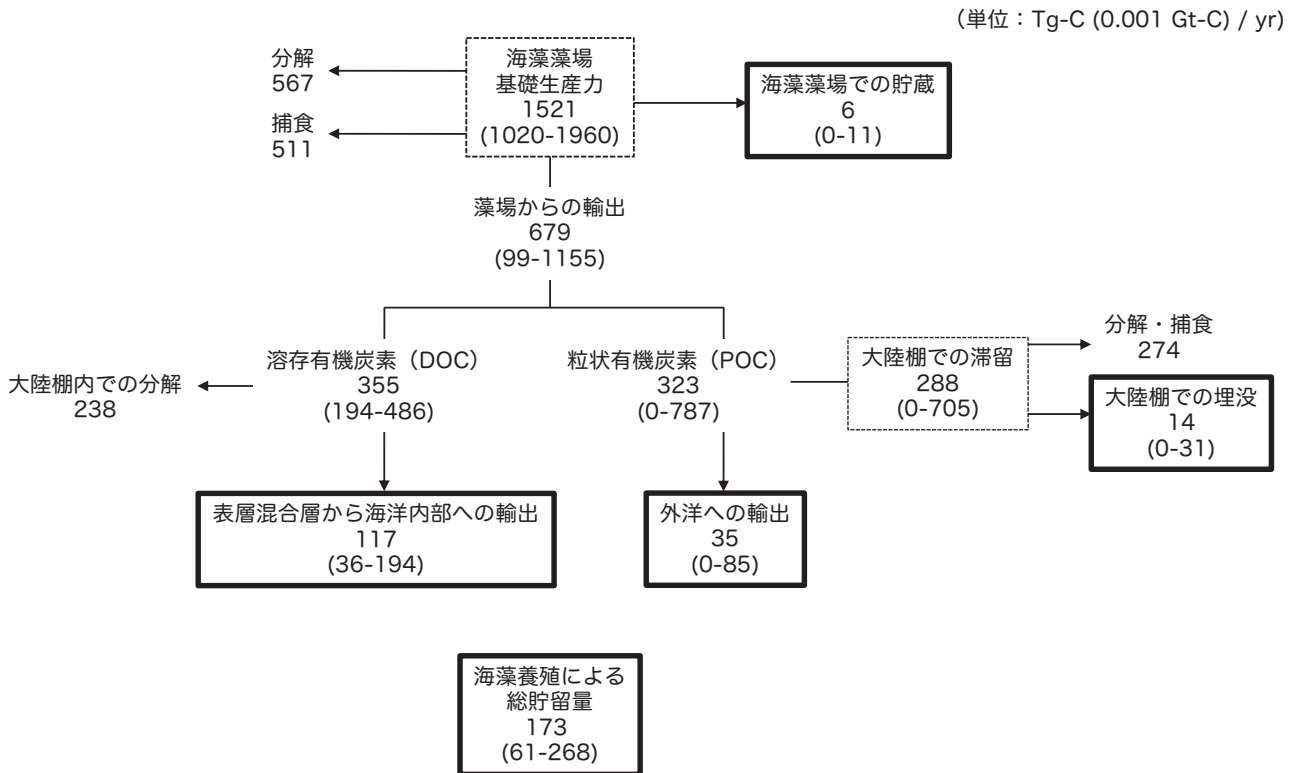


図 7 大型海藻類による最大炭素輸出量と貯留量 (NASEM 2022 Fig. 5.1 (原図は Krause-Jensen and Duarte 2016) を基に作成)。太線枠内が長期間貯留される炭素量。黒字は迅速に分解し大気に戻る炭素量。括弧内数字は 25%-75% 四分位不確実性レベルを示す。

- ① 目標は100年以上にわたって年間0.1 GtのCO₂を貯留することであり (Seq_(Goal)), そのためにはPOC:海藻体内 (Seq_(Bio)) とDOC (Seq_(DOC)) としてCO₂を固定することである。

$$\begin{aligned} \text{Seq}_{(\text{Goal})} &= 0.1 \text{ Gt-CO}_2/\text{yr} (0.027 \text{ Gt-C/yr}) \\ &= \text{Seq}_{(\text{Bio})} + \text{Seq}_{(\text{DOC})} \end{aligned}$$

- ② Seq_(DOC)は純基礎生産力 (NPP_(Farm)) の8% (f_(DOC)) 程度と考えられる。

$$\text{Seq}_{(\text{DOC})} = f_{(\text{DOC})} \times \text{NPP}_{(\text{Farm})} = 0.08 \text{ NPP}_{(\text{Farm})}$$

- ③ Seq_(Bio)は、損失分 (f_{loss}) (20%) を考慮すると以下のようになる。

$$\text{Seq}_{(\text{Bio})} = (1 - f_{\text{loss}}) \times \text{NPP}_{(\text{Farm})} = 0.8 \text{ NPP}_{(\text{Farm})}$$

- ④ 上記の式を整理すると、年間海藻養殖量 (NPP_(Farm)) は以下のようになる。

$$\text{NPP}_{(\text{Farm})} = 0.027 / (1 + 0.08 - 0.2) = 0.033 (\text{Gt-C/yr})$$

- ⑤ 養殖に必要な面積 (A_{Farm}) は以下の式で見積もられる。

$$A_{\text{Farm}} = \text{NPP}_{\text{Farm}} / (\text{Yield} \times C_{\text{Content}} \times N_{\text{Crop}})$$

ここでYieldは海藻養殖密度 (g-乾燥重量: DW/m²), C_(content)は一回の収穫時のC密度 (濃度) (g-C/g-DW), N_{crop}は1年における収穫回数 (crops/yr) で、それぞれ1×10³(g-DW/m²), 0.3(g-C/g-DW), 1.5 (crops/yr) である。

- ⑥
$$A_{\text{Farm}} = 0.033 \times 10^{15} / (1 \times 10^3 \times 0.3 \times 1.5) = 7.3 \times 10^{10} (\text{m}^2) = 73,000 \text{ km}^2$$

従って沿岸域100 m (0.1 km) 幅で効果的なSCを実施する場合、必要な長さは730,000 kmとなる。これは世界の沿岸の63%の長さに相当する。また全米を囲んで効果的なSCを実施する場合は、500 m幅の養殖面積が必要と見積もられる。

SC-mCDRの留意事項は、十分な栄養塩の確保、嵐対策、炭素輸送水深 (海洋内部であり、容易に大気とコンタクトしない水深) である。いずれにせよ大型藻類の海洋内貯留時間は十分にわかっていない状況である。

6.4. 実行可能性と障壁

他のmCDRと同様、環境への影響 (深海生態系への影響、貧酸素化、酸性化、富栄養化、濁度増加) が懸念される。またSC-mCDRの場合は大量の栄養塩を吸収するので、他の生態系への影響が大きい (排他的栄養塩摂取)。また外来種の侵入による現地生態系の攪乱も懸念される (図8)。自然界のBCPにおける輸出生産 (海洋表層から中層に鉛直輸送されるPOCフラックス) は~10 Gt-C/yrである。Martin curveのべき乗指数“b”を0.7とした時に2,000 mに到達するPOCフラックスは~1.2 Gt-C/yrである。よってSC-mCDRにより期待されるのは~2.5%程度である (0.027/1.2)。なおX-prize (注14) で目標とされている1 Gt-CO₂/yrというCO₂除去量は、水深2,000 mに到達する自然界のPOC fluxの~25% (0.27/1.2) を回収できる技術に相当する (図9)。

現在、米国エネルギー省エネルギー高等研究計画局 (DOE ARPA-e) がMARINER programという大型海藻養殖のプロトタイプ実証実験を実施しているが (ARPA-e, 2021), その藻場係留系がクジラや他の哺乳動物を拘束しないか、生態系や生態系サービスが破壊しないか、船舶航行に影響しないか、海藻養殖で使用する船舶によるCO₂の放出などが懸念されている。

6.4.1. モニタリングと検証

NASA予算で実施されたEXPORT研究から、モニタリング経費は1ヶ月\$115M (172億5千万円) と見積もられる。時空間的観測に広がりのある観測には人工衛星やドローン技術が必須である。BGC-Argoも有望な観測手段だが、酸素測定の場合はまだまだ誤差 (検出限界) が大きい (高い)。観測と並行して数値シミュレーションは必要不可欠である。ただし栄養段階の高い生物のモデリングの開発は未成熟である。

6.4.2. 必要となる資源

先に見積もったとおり、CO₂貯留量0.1 Gt-CO₂/yr規模の場合は73,000 km²の養殖施設が必要であり、その建設費と維持費 (電力など) が必要となる。ベルギーとオランダにパイロット養殖場がある。これらの電力は風力と太陽光の再生エネルギーを利用している。

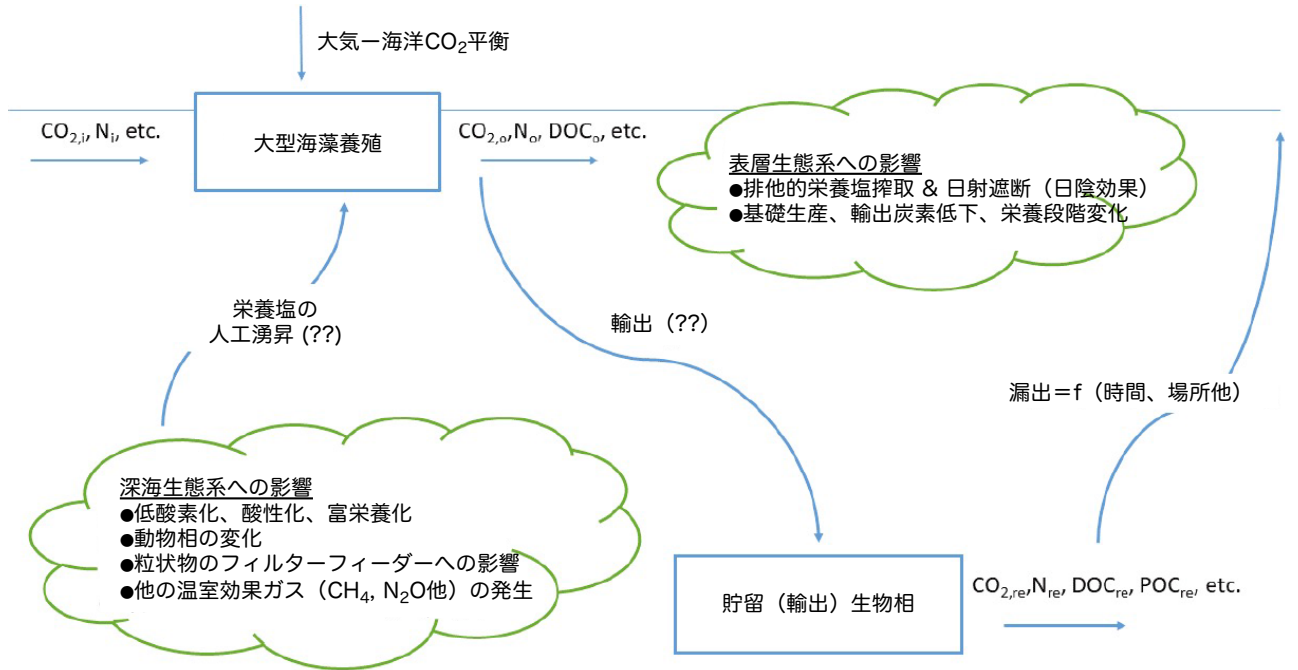


図8 mCDR としての大型海藻養殖による周辺海域への影響 (NASEM 2022 Fig. 5.2 を改訂)

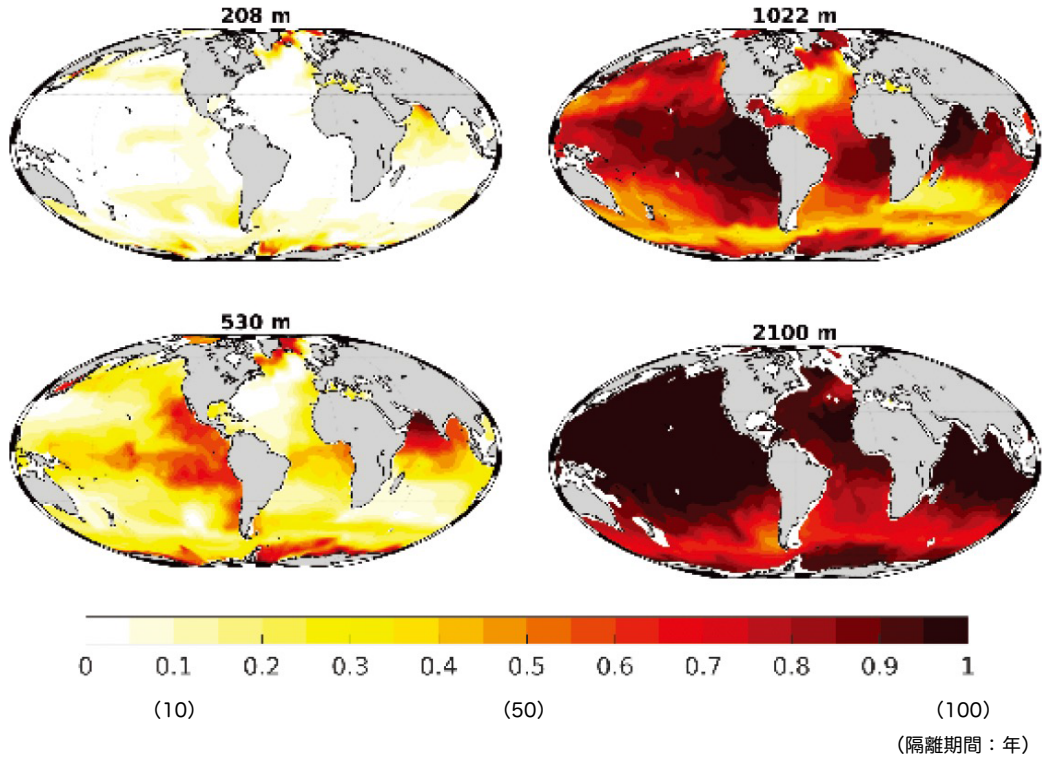


図9 水深 208, 530, 1,022, 2,100 m まで輸送された CO₂ の貯留 (隔離) 期間 (NASEM 2022 Fig. 5.3 を引用。原図は Siegel *et al.* 2021b)

6.4.3. 共同利益

海藻養殖という産業創生（ブルーエコノミー）により雇用が生まれる。また生態系の回復、環境良化（酸性化、貧酸素化、富栄養化解消）が期待できる。また牛などの陸上反芻動物の海藻食（配合飼料食）への応用で、CH₄排出量の低下にもつながる可能性がある。

6.4.4. 管理・説明責任

他の mCDR と同様に CBD, UNCLOS, ロンドン条約・議定書に抵触していないか、に留意する必要がある。

6.5. 研究課題

- ① 経済的な大規模海藻養殖、収穫技術の向上（AR-PA-e's MARINER program は3年以上で \$30 M（45 億円）以上）。
- ② 炭素損失することなく収穫した海藻を海洋内部深海へ輸送する手段の創出と検証。
- ③ 海藻炭素の長期間にわたる行方の理解（生物量および成長時に排出される DOC）そしてこの知見を組み込んだ数値シミュレーションの開発。
- ④ 様々な特徴を持った海域での 0.1 Gt-CO₂/yr 規模の海藻養殖・貯留場の建設と実証試験。
- ⑤ ローカルスケールでの実証実験結果の評価とモニタリング。
- ⑥ 大型海藻養殖場が行われる浅海およびその一部が輸送される深海の環境影響評価。
- ⑦ CDR そして沿岸生活者や先住民への社会経済的影響要素に関する法的枠組みの理解。
- ⑧ 最善の方法の文書化（マニュアル作成）、大型海藻養殖を実施する最高の場所を検証するための地域選定演習の実施。構築技術、モニタリング知識、技術は石油会社、ガス会社が持っているであろう。

6.6. まとめ

海藻養殖による CO₂ 隔離は魅力的な mCDR 戦略となり得る。現段階で、基礎となる生物学、生態学、生物地球化学については十分理解されているが、CDR 要件を満たす海藻養殖には多くの技術的進歩が必要である（表 6）。原理的には、大気中の CO₂ を削減するはずだが、適切な場所に適切に運ばれなかった場合、プランクトン生態系からどれだけの生産性と CO₂ 輸出が奪われるか、

また隔離された炭素の貯留性についてはかなりの不確実性がある。CDR に値するレベル（ ≥ 0.1 Gt-CO₂/yr）にまで拡大することは、必要な耕作面積が膨大であるため困難となることが予想される。コストは CO₂ トンあたり \$100（1.5 万円）未満である必要がある。このコスト目標を確実に達成するには、研究を継続する必要がある。SC-mCDR のエネルギーは太陽エネルギーなので、エネルギー支出経費は他の mCDR と比べて小さくなると考えられる。一方、海藻養殖が行われている場所やバイオマスが隔離されている場所には、潜在的に有害な環境要因がいくつか存在する。現時点では、これらの影響の規模推定は非常に不確実である。海藻養殖と隔離による CDR の社会的影響は、プラスとマイナスの両面がある。SC-mCDR が大規模に実施されれば、ブルーエコノミーが強化され、沿岸地域社会と多くの海洋産業の両方に利益をもたらす可能性がある。また、養殖場を他の用途（魚の養殖など）に隣接して配置することによって、いくつかの副次的な利益も得られる可能性があり、水産養殖施設による環境被害の軽減に役立つ可能性がある。マイナス面としては、広大な養殖場は船舶航行に危険をもたらしたり、養殖場の配置や海藻バイオマスの大規模養殖によって排他的栄養塩摂取の可能性もある。

7. 海洋生態系回復（注 15）（NASEM（2022） 6 章 Recovery of marine ecosystem の 要点）

7.1. 概要

陸では森林保全が行われ、海では沿岸でのマングローブ、塩沼、海草場の保全が試みられてきた。一方、海底、外洋などは、未知・未着手の部分が多い。海洋の生態バイオマスは一般に動物で構成され、生産者より消費者が上回る（図 10）。これらの動物は漁業、船舶航行、汚染などの人間活動により存亡の危機に瀕している。バイオマス量としては陸上のバイオマスよりはるかに小さいが、海洋のバイオマスも全球的な炭素サイクルにおいて、そして生態系回復アプローチの共同利益を考慮して、注目されてきた。例えばケルプやホンダワラのような大型海藻、そして植物プランクトンが炭素循環に重要であることがわかってきた。人為的な生態系回復・保全活動は

表 6 海藻養殖の課題と経費 (NASEM 2022 Table S3 および Table 5.2 をまとめたもの)

海藻養殖	課題	調査の環境への影響	調査の社会への影響	概算経費と必要期間
海藻バイオマスの効率的な大規模養殖・収穫技術	CDR に値する可能性のある海藻バイオマスを栽培し収穫するための効率的な実証規模の農場を構築できるか？	地域規模では中程度。実証規模の農場は地域の生態系に影響を与え、周囲の栄養素、基礎生産性、炭素輸出生産などが減少。外来品種の栽培は環境リスクとなる。養殖場は、海洋表層の酸性化の影響を軽減することも可能。	大型動物の絡み合い、外来品種の導入、航行への危険、漁業活動の代替などによる許可に関する懸念。	\$15 M/yr (22.5 億円/年) 必要期間：10 年
炭素の損失を最小限に抑えながら、収穫したバイオマスを耐久性のある海洋貯留層に輸送することに焦点を当てた工学研究	大量の海藻バイオマスを損失を最小限に抑えて深層または海底に運ぶにはどうすればよいか？	最小限のエンジニアリングテスト	最小限のエンジニアリングテスト	\$2 M/yr (3 億円/年) 必要期間：10 年
海藻バイオマスおよび副産物の長期隔離の評価	海藻の炭素の長期隔離を予測することは可能か？	最小限	最小限	\$5 M/yr (7.5 億円/年) 必要期間：5 年
実証規模の海藻養殖・隔離システムの導入・展開	CDR に値するスケールに拡張するシステムの構築は可能か？	局地的な規模では中程度で、海洋上層と輸送深度に影響を与える。	中程度-大型動物の絡み合い、外来品種の導入、航行への危険、漁業活動の代替などによる許可に関する懸念。	\$10 M/yr (15 億円/年) 必要期間：10 年
実証規模の海藻養殖および隔離システムの CDR パフォーマンスの検証とモニタリング	海藻の養殖と隔離は実行可能な CDR 戦略であり、そのパフォーマンスを監視可能か？	最小限	最小限	\$5 M/yr (7.5 億円/年) 必要期間：10 年
大規模な海藻養殖と隔離による環境への影響の評価	海藻の隔離は環境にどのような影響を与えるか？	最小限	最小限	\$4 M/yr (6 億円/年) 必要期間：10 年
調査研究総額				\$41 M/yr (61.5 億円/年) 必要期間：5-10 年
優先項目実施の経費				\$26 M/yr (39 億円/年) 必要期間：5 年

注：太字は、それぞれの特定のアプローチの理解を進めるために次のステップに進むための優先項目を示す。
注：\$1M=1.5 億円

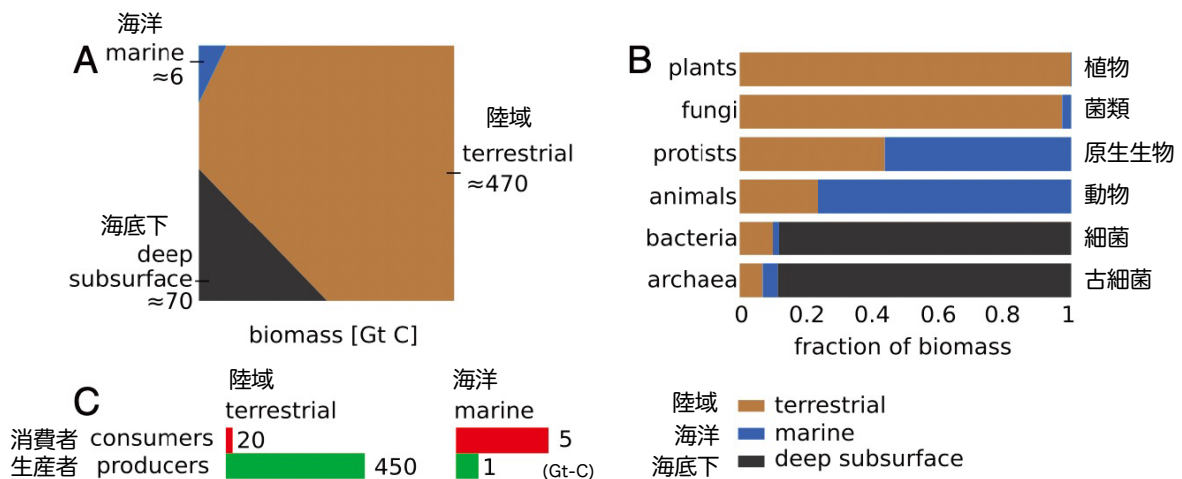


図 10 陸域と海洋のバイオマスと構成要素 (NASEM 2022 Fig. 6.1 を引用。原図は Bar-On *et al.* 2018)。A：陸域、海洋、海底下のバイオマス：色分けされた面積比が各バイオマス量比で数字が各バイオマス量 (GtC)，B：陸域、海洋、海底下バイオマスの構成，C：陸域、海洋の消費者と生産者構成。

生態系基盤解決策 (Eco-Based Solution, 以下 EBS) (対するは自然基盤解決策: Nature-Based Solution, 以下 NBS) と呼ばれ, 以下の考えに基づいている。

- ① EBS は化石燃料放出の迅速な削減に置き換わるものでも, 脱炭素化をめざす経済を先送りするものでも無い。
- ② EBS は陸上, 海洋の自然, 半自然生態系を保護し, 修復し, 管理するものを含む。
- ③ EBS は, 先住民および地域社会と協力して作成, 雇用, 管理, 監視され, 地域の権利を尊重し, 地域の利益を生み出す。
- ④ EBS は遺伝子レベルから生態系レベルまでの生物多様性を助け, 増やす役割を担う。

7.2. 知識と経験

低次生産者を中心とした炭素循環についての多くの知見は得られてきたが, 大型生物の炭素貯留量に関する研究は限定的であり (表 7), 保全, 回復による炭素循環の変化などについては未知の部分が多い。そして別々の道を歩んできた個体群生物学 (および関連する漁業管理), 生態学, 生物海洋学の統合的理解が必要である。

7.2.1 大型海藻

大型海藻の植林は, 沿岸域のマングローブや海草や塩性湿地帯の生態系のように根の部分に炭素を貯蔵するわけでもなく, 深海に炭素を輸送することも少ない短寿命なものなので, 軽視されてきたが, 再評価する必要がある。ケルプや岩藻 (ラミナリア目, ティロプテリ目, デスマレスティア目, イワナ目) は世界の沿岸線の 28% をおおっている一方, ケルプ海中林はサンゴよりも速く衰退している。ケルプの 82% は破砕物になり, 草食性動物を介して溶存無機炭素 (DIC) へ変換され, 一部のものは深海へ輸送される。

大型海藻による海底堆積物もしくは深海へ炭素輸送・貯蔵速度は 173 Tg-C/yr (0.173 Gt-C/yr) と見積もられており (図 7) (Krause-Jensen and Duarte, 2016), これは純基礎生産力の 11% 相当であり, 沿岸のブルーカーボン (マングローブや塩性湿地帯や海草場の CDR) による炭素固定量に匹敵するものである。ただし好条件の下なので, 過剰評価であり, 長期的 mCDR とは必ずしも言えない。Queiros *et al.* (2019) は英国海峡での海藻による mCDR は 8.75 g-C/m²/yr (0.73 mol-C/m²/yr) と見積もっている (図 11)。これは沿岸のブルーカーボンの 4-5%, DOC としては沿岸のブルーカーボンの

表 7 生態系への炭素貯蔵・貯留に関する先行研究 (NASEM 2022 Table 6.1 を改訂)

メカニズム (参考文献)	システム	地域	炭素貯蔵量・貯蔵速度
大型海藻フラックス (破砕物) (Queiros <i>et al.</i> , 2019)	大型海藻-堆積物システム	英国	0.0007 Gt-C/yr (*)
サンゴ藻の成長と貯蔵 (van der Heijden and Kamenos, 2015)	サンゴ藻と着床における炭素貯蔵	全球	1.6 Gt-C/yr
全球の大型海藻による炭素貯留 (Krause-Jensen and Duarte, 2016)	深海への炭素輸送と沿岸堆積物への埋没	全球	0.173 Gt-C/yr
炭素輸出量 (Siegel <i>et al.</i> , 2014)	海洋表層から海洋内部への BCP	全球	~ 6 Gt-C/yr
魚や他の生物の日周鉛直移動 (Pinti <i>et al.</i> , 2021)	生物による呼吸, 糞粒, 死後沈降	全球	5.2 Gt-C/yr
ゼラチン質生物による炭素輸送 (Luo <i>et al.</i> , 2020)	100 m 以深へのクラゲや糞粒の沈降	全球	1.6-5.2 Gt-C/yr
魚に関連した炭素輸送 (Sava <i>et al.</i> , 2021)	受動的・能動的炭素輸送	全球	1.5±1.2 Gt-C/yr
海洋脊椎動物保護や野生生物増加による炭素貯蔵 (Martin <i>et al.</i> , 2021)	バイオマス	全球	見積なし
鯨の生物量 (バイオマス) と死骸 (Pershing <i>et al.</i> , 2010)	鯨生体と死骸による炭素貯蔵と貯留 (深海輸送)	全球	0.0089 Gt-C/yr (保存量回復時の値)
ラッコとケルプの森の栄養貯蔵 (Wilmers <i>et al.</i> , 2012)	ラッコによる草食ウニの抑制を介したケルプ林による C 貯蔵量の増加	北アメリカ北部	0.0044-0.0087 Gt-C (貯蔵量)

*Gt = 10⁹ ton

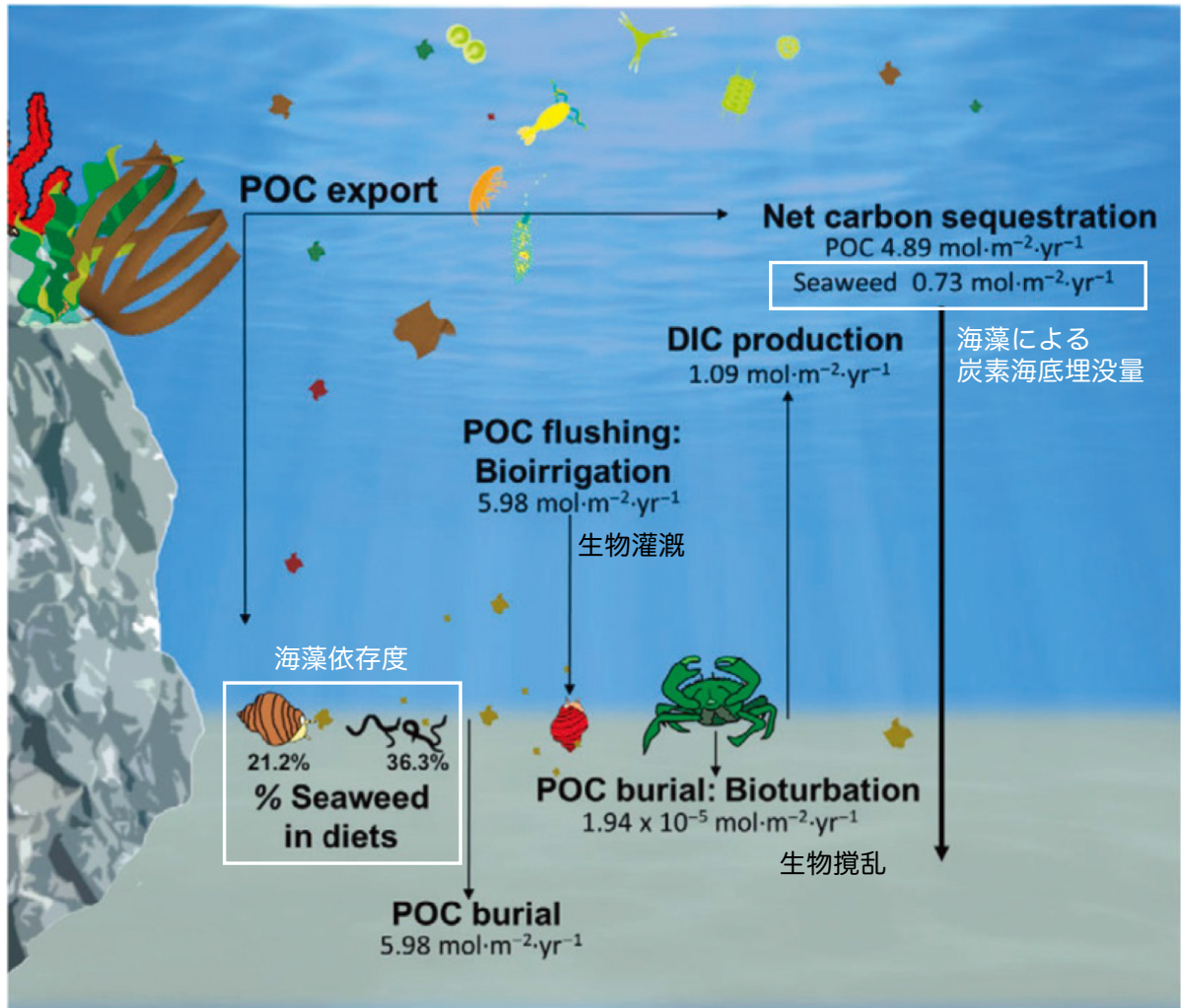


図 11 英国海峡における大型海藻による炭素循環図 (NASEM 2022 Fig. 6.3 を引用。原図は Queiros *et al.* 2019)

58.74%に相当する。また大西洋ホンダワラ漂流生息帯にも注目が集まっている (Bach *et al.*, 2021)。生態系保全策としては、ケルプ林の鍵種であるラッコの保護、他の捕食者やウニの退治などが重要である。

7.2.2. 底生海藻

数千年の長期生息可能なサンゴ藻などの底生生物は長期間炭素を貯蔵することができるが、その炭素収支や循環の定量化は不十分である。生物による石灰化は海洋のアルカリ度を低下させるため CO₂ 吸収にとってはマイナスである。

7.2.3. 動物と炭素循環

今後は海洋動物 (バイオマス, 呼吸, 死骸, 排泄物) の

炭素循環への役割について精査する必要がある (図 12)。

7.2.4. 動物の存在量

海洋動物の現存量は炭素換算で $3.3 \pm 0.5 \text{ Gt}\cdot\text{C}$ である。これは 地球上の基礎生産力 ($150 \text{ Gt}\cdot\text{C}$) の 2%、表層の生物輸出力 ($33 \text{ Gt}\cdot\text{C}$) の 10% である (魚: $0.7 \text{ Gt}\cdot\text{C}$; Bianchi *et al.*, 2021)。また 8 種類の鯨の炭素貯蔵量は $8.7 \text{ Mt}\cdot\text{C}$ と見積もられている。しかし、結論として十分な定量的研究・見積りは行われていない。

7.2.5. 死骸と排泄による炭素輸送

BCP の中で、沈降粒子による炭素鉛直輸送が Gravitational pump と定義されているのに対し、生きた低次生物 (動物プランクトン) の日周鉛直移動や生涯鉛直移動

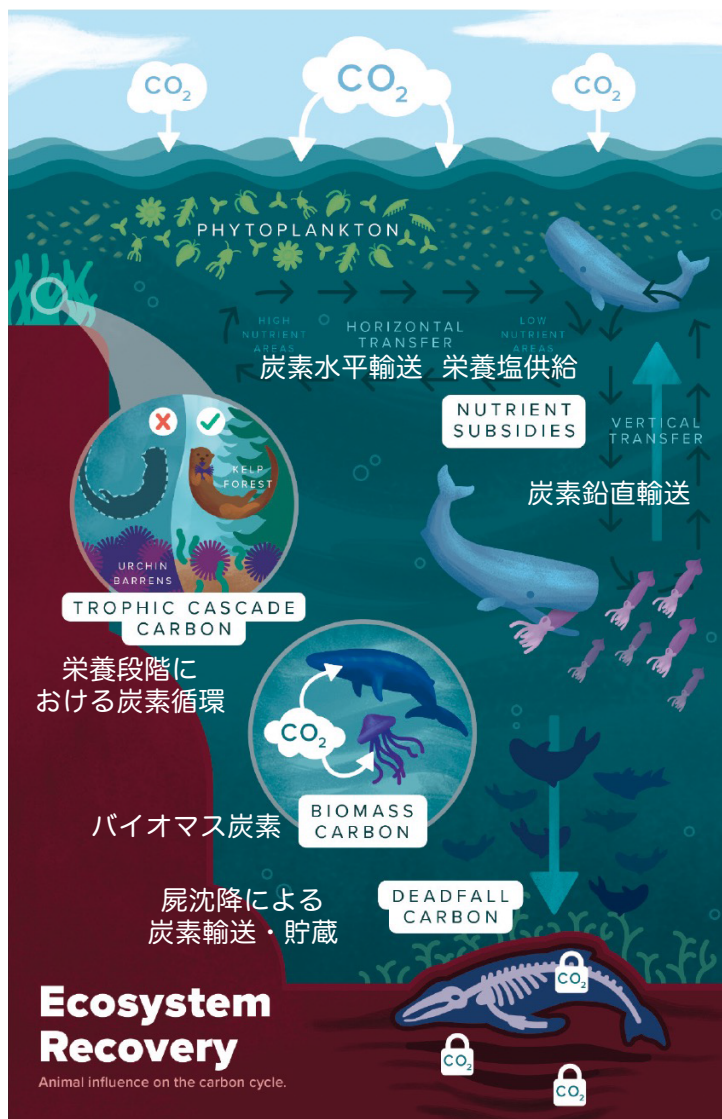


図12 大型動物の炭素循環へ影響 (NASEM 2022 Fig. 6.5 を改訂)

(深海に移動して死亡)による炭素鉛直輸送は Migration pump と定義され、その量は 2 Gt-C/yr 以上と見積もられている (例えば Boyd *et al.*, 2019)。これらに対し、より大型の海洋生物 (魚, 両生類, 哺乳類) による炭素輸送量や貯蔵量の見積もりは十分には行われてこなかった。Saba *et al.* (2021) は魚の呼吸や排泄による炭素輸送量を 1.5 ± 1.2 Gt-C/yr と見積もっている。Luo *et al.* (2020) はクラゲによる水深 100 m での炭素輸送量を 1.6-5.2 Gt-C/yr (1,000 m で 0.6-3.2 Gt-C/yr) と見積もった (表 7)。地球上で最大の動物であるクジラの死

骸は何百-何千年間、大量の炭素を深海に隔離する潜在能力がある (例えばヒゲクジラで 0.19 Mt-C/yr, Pershing *et al.*, 2010) (1.9×10^5 ton-C, 表 8)。

7.2.6. 栄養塩補助と肥沃化

海洋大型動物, 哺乳類, 亀, 海鳥による排泄は栄養塩の供給源になる (餌となる頭足類であるタコ・イカには鉄分が多い)。またオキアミやサルパや他の動物プランクトンは生物地球化学において重要な役割がある。そしてそれらの鉛直移動は物質鉛直混合を活発にする。

表8 攪乱前（過去）および現代の鯨類個体群における固定、貯蔵、または隔離された炭素の推定量（NASEM 2022 Table 6.2 を改訂）

メカニズム (引用文献)	種類	海域	攪乱前（過去）の炭素量 (個体数)	現在の炭素量 (個体数, 年)	固定・貯蔵・隔離
生きている生物炭素量 (Martin <i>et al.</i> , 2016)	汎熱帯斑点 イルカ	東部太平洋赤道域	5.9×10^4 ton-C (3.6×10^6)	1.4×10^4 ton-C (8.6×10^5 , 2006)	貯蔵
生きている生物炭素量 (Martin <i>et al.</i> , 2016)	ハシナガイルカ	東部太平洋赤道域	2.4×10^4 ton-C (1.8×10^6)	1.4×10^4 ton-C (1.1×10^6 , 2006)	貯蔵
生きている生物炭素量 (Pershing <i>et al.</i> , 2010)	8種のヒゲクジラ	全球	2.0×10^7 ton-C (2.6×10^9)	3.1×10^6 ton-C (8.8×10^5 , 2001)	貯蔵
死骸の炭素 (Pershing <i>et al.</i> , 2010)	8種のヒゲクジラ	全球	1.9×10^5 ton-C/yr (2.6×10^6)	2.9×10^4 ton-C/yr (8.8×10^5 , 2001)	隔離
鯨ポンプ (Lavery <i>et al.</i> , 2010)	マッコウクジラ	南大洋	2.4×10^6 ton-C/yr (1.2×10^7)	4×10^5 ton-C/yr (1.2×10^3 , 2001)	固定
鯨ポンプ (Lavery <i>et al.</i> , 2014)	シロナガスクジラ	南大洋	1.3×10^6 ton-C/yr (2.4×10^6)	2.8×10^6 ton-C/yr (5.2×10^3 , 2012)	貯蔵
大鯨コンベアベルト (Roman <i>et al.</i> , 2014)	シロナガスクジラ	南大洋	1.4×10^5 ton-C/yr (3.4×10^7)	5.1×10^2 ton-C/yr (4.7×10^3 , 2001)	貯蔵と隔離

7.2.7. 栄養段階間の相互作用

ラッコを保全することでケルプ林が守られる。ケルプ林の炭素貯蔵量と海洋への再生量はそれぞれ 0.015-0.043 Gt-C/yr, 0.0013-0.023 Gt-C/yr と見積もることができ、その経済効果はカナダドルで CAD\$2.2M (CAD\$1M=1 億円とすると 2.2 億円) と試算できる (Gregr *et al.*, 2020)。

7.2.8. 生態系保護ベースの気候変動解決

生態系保護による気候変動解決は、健康や生態系サービスなどの他の社会的利益を人間に提供し、他の種を保護しながら、自然の生息地を保護し、改変された生態系を復元する可能性を秘めている (Solan *et al.*, 2020)。直接および間接的な捕獲の削減、保護区の拡大、取り締まりの強化などのさまざまな対策により、多くの種が助けられており、献身的な取り組みによって海洋生物の多様性を回復できる可能性がある。Lovelock *et al.* (2018) は、マングローブなどの沿岸システムにおける炭素隔離には 2つのステップ（保全と再生）が必要であると指摘したが、このプロセスはおそらく遠洋および底生システムにも当てはまる。さらなる生息地の喪失による CO₂ 排出を避けるために保全が必要であり、復元は回復のために使用される。炭素が貯蔵され、その蓄積中に CO₂ 吸収源として機能する。同様の措置が、底生システムと遠洋システムの保護にも行われている。CO₂ 漏出を避けるために、現在の炭素除去プロセスを保護し、他のプロセスを復元する必

要がある。例えば底引き網漁では、底生藻類や堆積物が危険にさらされている。底引き網漁を停止し、堆積物をそのまま放置することで貯蔵された炭素が保護される。同時に、新しい藻類システムを復元することができる。生態系ベースの研究課題における大きな問題の 1 つは、生息地の回復と個体数の回復の結果による炭素収支の変化の予想である。Oreska *et al.* (2020) は、バージニア州の海草草原の復元により、15 年間で大気中から 9,600 t-CO₂ を吸収したが、同時に CH₄ と N₂O の生成も増加し、950 t-CO₂ 相当量が放出されたことを示した。回復した海洋生態系の CO₂ 隔離率を推定するには、さまざまなシステムにおける CO₂ やその他の温室効果ガスの除去と放出を調査する同様の取り組みが必要となる。海洋システムの場合は、大型藻類、植物プランクトン、後生動物、微生物を考慮する必要がある。

7.2.9. 海洋保護区 (Marine Protect Area, 以下 MPA) と生息地保護

2016 年の国際自然保護連合 (International Union for Conservation of Nature, 以下 IUCN) 総会では「2030 年までに自国の MPA を 30% まで増加させよう (注 16)」という「30×30」が宣言された。表層 1 m における海洋堆積物に貯蔵されている炭素量は、陸上土壌の約 2 倍の、2,322 Gt-C であり、79% は未攪乱である。しかし 2% のみが保護されているのみである。また今後は深海の MPA 設定も重要である。

7.2.10. 大型海藻の保護と回復

大型海藻の地球規模の炭素貯蔵量・炭素収支の見積は行われていない。これらを保護するためには

- ① 海底堆積部中貯蔵炭素の保護（底引き漁業や鉱物資源採取から保護）
 - ② 大型海藻の回復（ウニの退治など）
- が必要である。現在、実験室用寒天の原料など商業的に重要な紅藻であるゲリジウムなど、他のいくつかの藻類種は過剰収穫されており、取引制限や規制の対象となっている。

7.2.11. 魚と漁業管理

海水温 1°C 上昇毎に約 300 万トンの漁獲量が低減すると試算されている (Cheung *et al.*, 2016)。また漁業活動からの CO₂ 放出は、1950 年以来少なくとも 0.2 Gt-C（死んだ魚から 37.5 Mt-C、陸上での化石燃料使用や処理から 202.8 Mt-C）と見積もられている。Bianchi *et al.* (2021) は漁業から、海洋の基礎生産力（～50 Gt-C/yr）の約 2% に相当する、9.4 Gt-C/yr の CO₂ が放出されらるとしている。

7.2.12. 海洋生物量の回復

過去に比べると大幅に、特に大型生物の減少が顕著であり、海洋生物量の回復は最重要課題といえる。陸上システムとは異なり、海洋生態系は複雑な食物網とトップダウン効果によりトップヘビーであり、低次栄養段階よりも大型の捕食者に多くの炭素が蓄えられているはずである。しかし現在はボトムヘビー栄養構造、炭素貯蔵となっている。これは人間による広範な海洋破壊の結果である可能性が高い。漁業活動に加え大型生物は、船との衝突、騒音、プラスチックゴミ、ほか様々な汚染で危機に面している。

7.2.13. 栄養カスケード（注 18）の逆転と食物連鎖の回復

ラッコ保全によるケルプ林の保全、サメ保全による沿岸生態系の保全などがこれに相当する。一方、インド洋でのミドリガメの保全・回復は、海草場での漁業の低下を招き、堆積物中に貯蔵されていた炭素の減少につながった。

7.3. 有効性

生態系回復に努めることで、大型海藻で 0.173 Gt-C/

yr、底引き漁業の停止で 0.4 Gt-C/yr の炭素貯蔵が可能になると考えられる。しかし地球規模での見積はほとんど無い。また CH₄ や N₂O の生成についても考慮する必要がある。

7.3.1. 追加性

生物多様性損失を減少させ、炭素循環における海洋生物の役割を回復することができる。

7.3.2. 持続性

現在、海洋の温暖化、酸性化、貧酸素化が生態系を大きく攪乱し、mCDR 能力を大きく低下させている。適切な生態系への保全・回復を行うことで半永久的に炭素貯蔵が可能となる。

7.3.3. モニタリングと確認

全ての mCDR で必須であり、例えば GO-SHIP (Global Ocean Hydrographic Investigations Program), IOOS (International Ocean Observation System) のような地球規模のモニタリングが必要である。海洋熱波観測、貧酸素化観測、酸性化、そして生態系などのモニタリング手法として有効な手段には衛星観測、Argo フロート、篤志船観測が挙げられる。また深海と海山の MPA のモニタリングでは、たとえば、東太平洋カナダ沖の熱水域 MPA で行われたように、ケーブルで接続されたセンサー、無人探査機によるモニタリングが効果的である。さらに海洋哺乳類の活動状況のモニタリングでは海中ハイドロフォンが重要となる（海洋哺乳類および魚や脊椎動物にとって有害で死活問題となっている水中騒音のモニタリングも重要である）。生物多様性と資源評価モニタリングには、水中カメラ、ビデオカメラが有効である。そして基本的な海洋環境モニタリングでは、長期間の基本的なデータ（水温：温暖化、塩分：陸水供給量の変化、圧力（水深）：海面上昇、溶存酸素：貧酸素化検出の重要なデータ）取得と保存が重要である。上記のように mCDR の効果の検証のみならず、コンプライアンスの観点からも mCDR 事後のモニタリングは極めて重要なものである。

7.4. 拡張性

海洋は多様（極域、寒帯、亜寒帯、亜熱帯、熱帯、沿岸、大陸棚、深海）であるので、各海域毎に適切な生態系保護と回復に努める必要がある。保護活動への対応は分類群や生態系によって異なり、サンゴ礁や北大西洋セ

ミクジラや北太平洋セミクジラなどの絶滅危惧種のクジラ類の保護など、一部の回復活動には大幅な政策変更と温室効果ガスの大幅な削減が必要となる。炭素隔離のホットスポットがあるのと同様に、隔離率が季節および毎年変化するホットな瞬間が存在する可能性がある。

7.5. 実行可能性と障壁

生態系の保護・回復による mCDR は、エンジニアリング（工業的）要素の高い mCDR に比較すると、抵抗がなく、恩恵も多いと感じられ、社会に受け入れやすい面がある。一方では、海洋保護は商業漁業、海運、海洋再生可能エネルギー、鉱業などの他の利用と衝突する可能性があるため、生態系を保護し回復する広範な取り組みは障壁に直面する可能性もある（MPA の指定と漁業海域・洋上風力など再生可能エネルギープラント海域の削減、食糧安全保障、避難、経済的負担）。その影響は社会集団によって異なり（Mascia *et al.*, 2010）、MPA 戦略はこれを考慮する必要がある社会的影響を理解するには地域社会の視点が不可欠であり（Gollan and Barclay, 2020）、参加型アプローチを考慮する（Kockel *et al.*, 2020）。

7.5.1. 環境への影響

不確定要素は大きいですが、生態系の保全と炭素貯蔵は環境、経済効果にもプラスである。

7.5.2. 共同便益

生物多様性、生物機能・生態系サービスが回復する。また観光やレクリエーションへのプラス効果がある。商業捕鯨、鯨保全による炭素貯蔵が期待できる。

7.5.3. 経費

他の方法に比べて、様々な利益があるので、経済効果は高い。しかし十分な投資が行われてこなかった（資本が投じてこられなかった）。最近では投資額が増加傾向にある。一方、石油やガス産業、鉱業にとっては海洋保護区の増加や環境保全は経済的にマイナス効果がある。

7.5.4. 統治性

以下の国際的規制が大きく関連する。

- ① UNCLOS の締約国は、海洋環境を保護し保存する義務があり、とりわけ海洋環境に重大かつ有害な変化を引き起こす可能性がある汚染やその他の活動を防止するための措置を講じなければならない。UN-

CLOS はさらに、「締約国には主権者があると規定している。天然資源を搾取する権利」を主張する場合、EEZ 内の生物資源が過度の搾取によって危険にさらされないことを保証するために、適切な保存および管理措置を採用しなければならない。締約国はまた公海の生物資源を保護するための措置を講じなければならない。

- ② CBD は、締約国に生物多様性保全のための国家戦略、計画、またはプログラムを開発することを求めている。そのために、締約国は生物多様性を保全するために特別な措置を講じる必要がある保護地域または地域のシステムを確立し、劣化した生態系を回復し、絶滅危惧種の回復を促進するための措置を講じなければならない。

国の管轄権を超えた地域の海洋生物多様性の保全を目的とした新しい国際協定も、国連総会によって策定されつつある。米国の多くの法律も同様に、海洋生態系を保護することの重要性を認識している。例えば、ESA（The Endangered Species Act）、MMPA（Marine Mammal Protection Act）、NMSA（The National Marine Sanctuaries Act）である。

パリ協定の署名国のほとんどは、気候変動プログラムにおいて自然に基づいた解決策に取り組んでいる（Seddon *et al.*, 2019）。これらのアプローチには、海洋種が提供する生態学的機能をより深く理解するとともに、豊富な種と保護された生態系、そして回復が必要な生態系を含む生態系全体の視点が不可欠である。海洋と陸上で自然に発生する炭素の固定、貯蔵、および隔離の相互作用を活用することは、多くのジオエンジニアリング解決策よりもリスクとコストが低い戦略となる（Griscom *et al.*, 2017; Martin *et al.*, 2021）。

7.6. まとめ

本章では海洋生態系の保全と回復による mCDR 効果を紹介した。表 9 に海洋生態系の保全と回復に関する課題と経費をまとめる。海洋生態系の保全と回復は温室効果ガス削減と同時にされるべきものである。海洋生態系の保全と回復による mCDR は自然に基づいたものであり、工学的な解決策よりもリスクと経費が低い戦略である。動物、植物、微生物のすべてが海洋の炭素循環

表 9 生態系回復の課題と経費 (NASEM 2022 Table S3 および Table 6.4 をまとめたもの)

生態系回復	課題	調査の環境への影響	概算経費と必要期間
生態系と炭素の保全	自然と現在の海洋生態系の変化の見積り	低	\$8 M/yr (12 億円 / 年) 必要期間：5 年
海洋保護区 (MPA)：生態系レベルの保護と回復は mCDR に対応できるか？	2050 年までに年間当たりの炭素貯蔵量・貯蓄量を増加させるための海洋保全と MPA 保護能力の見積り	低	\$8 M/yr (12 億円 / 年) 必要期間：10 年
大型藻類：炭素の測定、地球規模の範囲、および保護の手段	大型海藻、異なる種、生息地の運命の理解の向上、およびケルプや他の海藻種生息地の回復のための社会的・経済的レバールと経費	低	\$5 M/yr (7.5 億円 / 年) 必要期間：10 年
底生生物：攪乱と保全	底生生物のコミュニティと異なる保護シナリオにおける潜在的变化速度に対する人間活動の影響の理解の向上	低	\$5 M/yr (7.5 億円 / 年) 必要期間：5 年
海洋動物と炭素除去	生物量、死骸沈降炭素、栄養塩輸送、栄養塩カスケードを含む海洋生物の CDR の直接的・間接的影響の理解度の向上	低	\$5 M/yr (7.5 億円 / 年) 必要期間：10 年
動物栄養塩循環	鯨や呼吸する脊椎動物による鉛直的な鉄と水平的な窒素の輸送モデルのテスト	低	\$5 M/yr (7.5 億円 / 年) 必要期間：5 年
商業漁業と炭素循環	炭素堆積における漁業、魚の個体数と生態学的機能と影響の理解度の向上	低	\$5 M/yr (7.5 億円 / 年) 必要期間：5 年
海洋生態系回復へのコミュニティの関与	どのような制度、政策、文化的慣行が海洋生態系回復への地域社会の支援や関与につながっているのかを理解する：なぜ取り組みが失敗するのか。そして何がそれらを成功させることができるのか？	低	2 必要期間：5 年
調査研究総額			\$41 M/yr (61.5 億円 / 年) 必要期間：5-10 年
優先項目実施の経費			\$26 M/yr (39 億円 / 年) 必要期間：5-10 年

注：太字は、それぞれの特定のアプローチの理解を進めるために次のステップに進むための優先項目を示す。

注：\$1M = 1.5 億円

において重要な役割を果たしており、これらを保護し回復することが大気中からかなりの量の CO₂ を除去できる可能性が高い。今後、CO₂ 排出量が正味ゼロに近づくにつれ、様々な海洋保護活動がよりいっそう全球的 CDR に貢献する可能性が高い。

8. 著者まとめとあとがき

以上、本報告では NASEM (2022) で検討された 6 つの mCDR のうち、生物地球化学的もしくは生物学的要素を持つ 4 つについて紹介した。それぞれの理解度・経験の現状、共通する実施のための課題をまとめたものが表 10 である。全ての mCDR が、理論的には、大気中で増加する CO₂ の一部を吸収する能力を有している。しかしながら有意に効果がある規模の mCDR を実施するためには、知識・経験・技術が不足しているとともに、

法的遵守、統治そして莫大な経費（特に実施後の効果と環境影響評価のための監視経費）といった問題がある。例えば、今回紹介した中で、実海域試験が行われ、その効果が検証され、ある程度理解度が進んでいる OIF できえ、mCDR としての知識と経験、観測技術が不十分である。そのため過去の OIF 実験では未検証であった海洋内への炭素輸送量評価を中心とした、そして過去には技術的に確立していなかった様々なプラットフォーム（例えば BGC-Argo フロートや無人表層観測船や分析技術（例えば環境 DNA や鉄同位体比測定など）を活用した長期間にわたる大型 OIF 実証実験計画が現在検討中である (ExOIS 2023)。より詳細に、そして本解説では割愛した化学工学的要素の強い「海洋アルカリ度増強」、「電気化学工学的除去」について知りたい諸氏はオープンアクセスとなっている NASEM (2022) オリジナル報告書を読んでいただきたい。

表 10 各 mCDR の実行可能性調査のまとめ (NASEM 2022 Table S1 を改訂)

項目	海洋栄養塩肥沃化 (OIF)	人工湧昇流/沈降流 (AU/AD)	海藻養殖 (SC)	生態系回復 (ER)
知識・理解度 (低: 理論のみ, 実海域試験実績ほぼ無し, 中: 実験室での検証あり, 少の実海域試験, mCDR 論文少なし, 高: 多くの実海域試験例有り, 多くの mCDR 論文, 報告書あり)	中~高 鉄に反応した植物プランクトンの成長に関する十分な科学的見地があり, 他の mCDR アプローチと比べてかなりの経験があるが, 炭素の行方や意図しない結果については経験が少ない。天然の鉄が豊富な類似体 (火山灰の供給など) は, より大きな時間的および空間的スケールに関する貴重な洞察を提供。	低~中 人工湧昇 (AU) についてはさまざまな技術が実証済み, しかし主に短期間の沿岸域で行われている場合のみ。CO ₂ の湧昇により, 生物炭素ポンプ (BCP) が妨げられる可能性があるため, CDR の有効性については不確実性が高く, 信頼性は低い。	中~高 大型植物の生物学と生態学の科学は成熟。世界中で多くの海洋養殖施設が整備。大型海藻の有機炭素の行方や深海や堆積物への輸送方法については未知。	低~中 海洋生態系が大量の炭素を吸収する可能性があり, 人為的影響が広範囲に及ぶことを示す証拠は豊富にあるが, これらの変化の全体的な影響と, それらを逆転させることによる CDR の利点を定量化することは複雑で困難。
有効性 各手法による大気 CO ₂ 除去と海洋内貯蔵能力の信頼度	中~高信頼度 BCP が機能し, 生産性向上は明らか。自然界では鉄に反応して炭素隔離の速度が高くなるが, 炭素輸送効率が低いいため, mCDR の有効性は限定的。	低信頼性 深層水の湧昇は, 大気と交換できる CO ₂ を亜表層からもたらす。そのため, モデリング研究では大規模な AU は mCDR に効果的ではないと予測。	中信頼性 海藻作物の成長と隔離は, 純 mCDR につながる。大規模農業により既存の純一次生産 (NPP) と海洋内部への炭素輸出がどの程度減少するかについては不明。	低~中程度の信頼度 アプローチと生態系の多様性を考慮すると, mCDR の有効性は大幅に異なる可能性あり。ケルプの森の回復, 海洋保護区 (MPA), 漁業管理, 海洋脊椎動物の炭素の回復は有望な手段。
持続性 どれぐらい長期間 CO ₂ を隔離できるか? (低: <10 年, 中: 10~100 年, 高: >100 年)	中 10~100 年 場所と BCP の効率に大きく依存し, 炭素フラックスの一部はより速く, またはより浅い水深で“再生”される。しかし, 一部の炭素は深海に到達し, その CO ₂ が表層海洋に戻るまでの期間は 100 年を超える。	低~中期 <10~100 年 OIF と同様に, 炭素を深海に輸送する BCP の効率に依存。	中~高 >10~100 年 隔離されたバイオマスが適切な場所 (例えば, 水が表層海洋に戻る時間が遅い深海) に運ばれるかどうかに依存。	中 10~100 年 生態系回復の耐久性は, 大型藻類のバイオマスから, 100 年以上続くことと予想される深海へのクジラの沈降まで多岐にわたる。
拡張性 (低: < 0.1 Gt-CO ₂ /年, 中: 0.1~1.0 Gt-CO ₂ /年, 高: >1.0 Gt-CO ₂ /年)	中~高 C 除去の可能性 >0.1~1.0 Gt-CO₂/yr (中程度の信頼度) 海洋の広い地域は, 年間 1Gt 以上の CO ₂ を隔離するのに適した HNLC 海域。大規模栄養素と生態系への影響が同時に制限される可能性があり。LNLC 海域は, 配備可能地域を増やすための調査が行われていない。(13 回の実地実験に基づく中程度の信頼度)。	中くらい C 除去の可能性 > 0.1 Gt CO₂/yr および <1.0 Gt-CO₂/yr (信頼度が低い) 水産養殖の取り組みと組み合わせることができる可能性あり。外洋での材料の耐久性をテストし, mCDR の可能性を評価するにはパイロット試験が必要。現在のモデルの予測では, 炭素隔離を強化するには数千万台から数億台のポンプを導入する必要があると考えられる。(この大規模な展開が永続的で耐久性のある mCDR につながるという確信は低い)。	中くらい C 除去の可能性 > 0.1 Gt CO₂/yr および <1.0 Gt-CO₂/yr (中程度の信頼度) 栽培面積は何百万ヘクタールも必要であり, 物流上およびコスト上多くの問題あり。栄養素の利用可能性と隔離の耐久性に関する不確実性, 季節性により, 場所などが制限。	低~中 C 除去の可能性 <0.1~1.0 Gt-CO₂/yr (低~中程度の信頼度) 沿岸海洋の大部分が広範囲に渡って劣化していることを考えると, 生態系や減少した種を回復する機会は多数。ただし, 生態系と栄養相互作用は複雑で変化しており, 上限を探るためには研究が必要。
環境負荷 大規模な意図的および意図外の望ましくない結果 (不明, 低, 中, 高), および信頼レベルはどれか (低, 中, 高)	中程度 (低から中程度の信頼度) 意図的な環境への影響により, 表層海洋生物学の変化により NPP と炭素隔離が増加。効果があるとしても, 深海への影響があり, 地球化学的および生態学的に望ましくない影響が懸念される。大規模な影響は不明。	中~高 (信頼度が低い) OIF と同様の影響。湧昇は海洋の密度場と海面温度にも影響を与え, より冷たく無機炭素と栄養豊富な水を表層にもたらすことで生態系に変化をもたらす可能性あり。	中~高 (信頼度が低い) 環境への影響は, 特に海藻が養殖されている地域規模 (つまり, 養殖による栄養素の除去により NPP, 炭素輸出, 栄養移動が減少する) やバイオマスが隔離されている深海 (酸性化, 低酸素の増加富栄養化, 有機炭素の投入) において潜在的に有害である可能性がある。これらの影響の規模と性質は非常に不確実。	低い (中程度から高い信頼度) 環境への影響は一般にプラスであると考えられる。修復の取り組みは, 多様な海洋生態系や分類群にわたる生物多様性に目に見える利益をもたらすことを目的とする。

項目	海洋栄養塩肥沃化 (OIF)	人工湧昇流/沈降流 (AU/AD)	海藻養殖 (SC)	生態系回復 (ER)
社会的影響・配慮 紛争の利用、ガバナンスの準備状況、生計の機会など。	公海および保護の他の用途との潜在的な衝突。移動した栄養素による下流への影響を考慮する必要あり。法的な不確実性。一般大衆の受容性とガバナンス上の課題の可能性（すなわち「ダンピング（廃棄）」と認識されがち）。	他の用途（海運、海洋保護区、漁業、レクリエーション）との潜在的な競合。一般大衆の受容性とガバナンス上の課題の可能性（すなわち、「ダンピング（廃棄）」と認識されがち）。	海藻養殖での仕事と生計の増加の可能性。他の海洋用途との潜在的な衝突。置換された栄養素による下流への影響を考慮する必要あり。	海洋におけるトレードオフは、海洋の有効利用に対する生態系の保護と回復。社会的およびガバナンス上の課題は、他のアプローチに比べて重要ではない可能性あり。
共同便益 mCDRの主な目標と比較して副次的利益はどの程度重要か、またその評価にどの程度自信があるか	中くらい (信頼度が低い) 漁業の強化は可能だが示されておらず、原因を特定するのが難しい。一部の現地調査でDMSの増加が見られ、気候冷却の影響を高める可能性あり。海洋表層の海洋酸性度の低下の可能性あり。	中～高 (確信度が低い) 局地的な水産養殖および漁業の強化と連携するツールとして使用される可能性あり。	中～高 (中程度の確信度) 魚介類の養殖施設の近くに養殖施設を配置すると、これらの活動による環境被害を軽減できる可能性。バイオ燃料創出も可能。	高い (中～高信頼度) 生物多様性の保全を強化し、人間の活動によって被害を受けた多くの生態学的機能と生態系サービスを回復。存在価値、精神価値、その他の不使用価値。海洋管理と観光を強化する可能性。
実行経費 将来の大規模展開にかかる推定コスト (\$/t-CO ₂)。研究開発段階で小規模な導入に必要なモニタリングおよび検証コストのすべてが含まれているわけではない (低: <\$50/t-CO ₂ , 中程度: ~\$100/t-CO ₂ , 高: >\$150/t-CO ₂) および推定の信頼性 (低, 中, 高)	低 <\$50/t-CO ₂ (低～中確信度) <\$25/t-CO ₂ の導入は大規模導入のために隔離可能だが、大規模に実証する必要がある	中～高。 >\$100-\$150/t-CO ₂ (信頼度が低い) 堅牢な監視プログラムの開発はおそらく最大のコストであり、OIFと同規模。ポンプアセンブリの材料費は、大規模で継続的な展開の場合は中程度で済む可能性あり。キロメートル規模の配備の見積もりは数千万ドルに上る。	中 ~\$100/t-CO ₂ (中程度の確信度) コストは\$100/t-CO ₂ 未満である必要あり。CO ₂ を固定するための直接エネルギーは不要。	低 <\$50/t-CO ₂ (確信度が中程度) 変動はあるが、直接コストは主に、海洋種と環境の使用を制限するための管理コストと機会コストのみ。直接的なエネルギーは不要。
炭素吸収のための経費と課題 透明で定量化可能な炭素追跡 (低, 中, 高) に関連する相対的なコストと科学的課題	中 追加の局所的な炭素隔離と、mCDR適用範囲外の炭素フラックスへの影響 (追加性) を追跡する課題。	高 OIFと同様、炭素循環に必要なローカルおよび追加性のモニタリング。	低～中 収集および隔離された炭素の量がわかる。ただし、置換された栄養素の炭素循環への影響の説明が必要 (追加性)。	高 炭素隔離に対する最終的な影響を監視することは困難。
環境モニタリング経費 海洋生態系に対する炭素循環を越えた影響を追跡する必要がある (低, 中, 高)	中くらい (中程度から高い信頼度)			
	すべてのmCDRでは、mCDRサイトのローカルおよび下流の両方で、意図した結果と意図しない結果を監視する必要がある、これらの監視コストは、研究開発および実証規模のフィールドプロジェクト中の全体コストのかかなりの部分を占める可能性あり。生態系回復のためのモニタリングのコストはより低い可能性あり。			
付加的な資源、経費 スケールアップの基本コストに対する相対的なコスト: 低, 中, 高	低～中 材料費: 鉄は安く、エネルギーは太陽光。	中～高 材料、展開、および潜在的な回収コスト。	中 養殖場が大規模にmCDRを達成するには、広い海洋面積 (数百万ヘクタール) が必要。エネルギーは太陽光。	低 費用回収の取り組みには、必要な材料やエネルギーはほとんどかからない可能性あり。ただし強制力が問題になる可能性あり。昆布やその他の生態系を積極的に回復するには、より多くの資源が必要。

最後に、CO₂による地球温暖化（改め地球沸騰化）が看過できず、脱炭素化、省エネルギー、ゼロ（ネガティブ）エミッション、カーボンニュートラルが喫緊の課題となっている昨今、CO₂の巨大な貯蔵庫である海洋におけるCDRが期待されている。しかし陸域のCO₂吸収手段をグリーンカーボンと呼ぶのに対し、海洋のCO₂吸収手段であるブルーカーボン（例えば、堀・桑江、2017）とえば、一般の人がアプローチしやすい沿岸の海草藻場造成やマングローブ林の保全・再生のみが対象と思われがちである。

そのため今回、外洋・浅海域のブルーカーボンとしてジオエンジニアリング的なmCDRの実行可能性調査の現状を紹介した次第である。また今回紹介したmCDR、そしてmCDRとして広く認知されている沿岸のブルーカーボンに関してさえ、少なくとも、自分の周囲の海洋研究者内で認知され、その効果について十分な議論や検証が行われているとは言い難いのが現状である。米国と異なり、UNCLOSそしてロンドン条約・議定書の締約国である我が国ではOIFはもとより、その他のmCDRの大型実証実験を実施

するのは容易ではないが、mCDR について国内外の調査研究や実証試験動向を調査し、その可能性について海洋生物地球化学的知識を駆使して検討しておくことは肝要と考えられる。ただし NASEM 報告書 (2022) にも述べられているように、mCDR が脱炭素化や省エネルギーの促進を妨げるものであってはいけないことを強調しておきたい。

謝 辞

図表の使用を許可していただいた National Academic Press 編集部、GEOMAR グラフィック部門、David Koweek 博士に謝意を表します。Ken Buesseler 博士と David Siegel 博士には図の使用を許可していただくとともに、第 4 章栄養塩肥沃化の鉄散布肥沃化に関して一部内容を確認させてもらいました。合わせて謝意を表します。また久保川厚編集長と匿名査読者の注意深く丁寧な査読と建設的なコメントのおかげで、本解説文の構成や内容が大きく改善されました。この場を借りて感謝いたします。

付録 1 用語捕捉説明

- (注 1) **Rain ratio** : 粒状有機炭素 (POC) フラックス/粒状無機炭素 (PIC) フラックス比。同比が約 0.7 以下の場合、海水中炭素量が減少しても海水中の二酸化炭素分 (pCCO₂) は上昇する。
- (注 2) **有機炭素分解深度スケール** : 有光層からの POC フラックスが 1/3 (約 33%) までに減衰する水深であり、同値が大きいほど BCP が良いといえる。
- (注 3) **栄養塩肥沃化** : 鉄・リン酸・硝酸などを海洋散布することで BCP を活発化させる。
- (注 4) **人工湧昇流・沈降流** : 栄養塩豊富な中層水・深層水を人工湧昇、かつ攪拌 (ベンチレーション) することで表層の富栄養化も亜表層の貧酸素化も解消させる。
- (注 5) **海藻養殖** : 光合成による体内吸収量・海底への CO₂ 貯蔵量増加、破砕物や溶存有機物により CO₂ を深海へ輸送し隔離する。
- (注 6) **海洋生態系の回復** : ケルプの森林化、漂流ホンダワラ増量化の促進、および魚、鯨、他生物の保護・

保全による CO₂ 体内貯蔵量を増加させる。

- (注 7) **海洋アルカリ度増強** : 風化鉱物を添加したり、電気化学的にアルカリ度を上昇させることで海水化学を変化させる。
- (注 8) **電気化学工学的手法** : 海水の pH を上昇させたり、アルカリ度を上昇させたりすることで (CO₃²⁻ イオン濃度を上昇させることで) 海水の CO₂ 吸収能力を高くする。
- (注 9) **ロンドン議定書** : これまで複数回改正されており、2006 年には「CO₂ の海底下地層への処分 (貯留) は可能とする改正」が発効された。一方、2013 年には「鉄散布海洋肥沃化を含む海洋ジオエンジニアリング行為規制に関する改正」が行われたが、2024 年の段階で未発効である。
- (注 10) **C/Fe 取り込み比** : ExOIS (2023) においても、植物プランクトンの C/Fe 取り込み比は 20,000/1 であるにもかかわらず沈降粒子の C/Fe ははるかに小さく、これは C が効率良く同化されていない (添加鉄が効率よく利用されていない) 証拠である、と考察されている。
- (注 11) **Martin curve** : 水深 z m における粒状 POC フラックス (POC_(z)) は、水深 100 m の POC フラックス (POC₍₁₀₀₎) と以下の関係を持つという経験式
- $$POC_{(z)} = POC_{(100)} \times (z/100)^{-b}$$
- この式のべき乗指数 “b” が小さいほど、POC フラックスの鉛直変化が小さい、すなわち POC が効率よく海洋内を沈降していくことを示している。
- (注 12) **PACE の DATA** : 2024 年 4 月から利用可能となっている。 <https://pace.oceansciences.org/data.htm>
- (注 13) **FAIR 原則** : データベース管理の原則で、Findable: 検索可能性, Accessible: アクセシビリティ, Interoperable: 相互運用性, Reusable: 再利用性、の頭文字をとってそう呼ばれる
- (注 14) **X-prize** : X プライズ財団がさまざまな分野で新たな産業の創出と市場の再活性化を使命として行うコンペティション (コンテスト) で、ここで紹介されているものは以下の URL にある「二酸化炭素回収技術コンテスト」である。 <https://www.xprize.org>

org/prizes/carbonremoval

(注 15) 海洋生態系回復：海洋生態系回復に関する取り組み，技術開発は，「国連の生態系保全の 10 年」(UN decade on Ecosystem Restoration) (2021–2030 年) の内容を参照されたい。https://www.decadeonrestoration.org/.

(注 16) 海洋保護区：日本は 2021 年段階で 13.3% である。

(注 17) Martin b：Martin curve のべき乗指数 “b” = 0.8 は Martin *et al.* (1988) が提案した値 (0.87) に近い値。

(注 18) 栄養カスケード：何が何を食べているのか？というつながり。栄養段階。

付録 2 訳語・略語説明

本解説文では，原文の英語・略語を以下のように訳している。

BCP: Biological Carbon Pump (生物炭素ポンプ)

Carbon Budget (CO₂ 排出許容量)

CBD: Convention on Biological Diversity (生物多様性条約)

CCS: Carbon dioxide Capture and Storage (炭素回収・貯留技術)

COP: Conference of Parties (締約国会議)

Co-benefit (共同便益)

Decarbonization (脱炭素化)

Detritus (破砕物)

Durability or permanence (耐久性と永続性)

Efficacy (効果・有効性)

FS: Feasibility study (実現可能性調査)

Governance and social dimensions (統治と社会的側面)

HABs: Harmful Algal Blooms (有害藻類ブルーム)

IUCN: International Union for Conservation of Nature (国際自然保護連合)

ICDR: Land Carbon Dioxide Removal (陸上におけるジオエンジニアリング的二酸化炭素除去技術)

mCDR: Marine Carbon Dioxide Removal (海洋におけるジオエンジニアリング的二酸化炭素除去技術)

MPA: Marine Protected Area (海洋保護区)

NASEM: National Academies of Science, Engineering and Medicine (NASEM) (全米科学・工学・医学アカデミー)

Knowledge base (知識と経験)

NPP: Net Primary Productivity (純基礎生産)

Nutrient robbing (排他的栄養塩摂取)

OIF: Ocean Iron Fertilization (鉄散布肥沃化)

Research and Development opportunities (調査開発の方法)

RLS: Remineralization Length Scale (有機炭素分解深度スケール)

Salt-fountain-style pump (永久塩泉ポンプ)

Scalability (拡張性)

SC-mCDR: Seaweed Cultivation mCDR (海藻養殖による mCDR)

SRM: Solar Radiation Management (太陽放射管理)

UNCLOS: United Nations Convention on the Law of the Sea (国連海洋法条約)

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change (国連気候変動枠組条約)

USV: Uncrewed Surface Vehicle (無人表層観測船)

Viability and barriers (実行可能性と障壁)

Wave-driven inertial pump (波力湧昇慣性ポンプ)

References

- ARPA-e (Advanced Research Projects Agency-e) (2021): *MARINER Ann. Rev. 2021*. https://arpa-e.energy.gov/mariner-annual-review-2021.
- Aumont, O. and L. Bopp (2006): Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochem. Cycles*, 20(2): GB2017. doi:10.1029/2005GB002591.
- Bach, L.T., V. Tamsitt, J. Gower, C.L. Hurd, J.A. Raven, and P.W. Boyd (2021): Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic Sargassum Belt. *Nat. Commun.*, 12(1). doi:10.1038/s41467-021-22837-2.
- Bar-On, Y.M., R. Phillips, and R. Milo (2018): The biomass distribution on Earth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 115(25), 6506–6511. doi:10.1073/pnas.1711842115.
- Bianchi, D., D.A. Carozza, E.D. Galbraith, J. Guet, and T. DeVries (2021): Estimating global biomass and biogeochemical cycling of marine fish with and without fishing. *Sci. Adv.*, 7(41). doi:10.1126/sciadv.abd7554.
- Boscolo-Galazzo, F., K.A. Crichton, A. Ridgwell, E.M. Mawbey, B.S. Wade, and P. N. Pearson (2021) Temperature controls carbon cy-

- cling and biological evolution in the ocean twilight zone. *Science*, **371**(6534):1148–1152. doi:10.1126/science.abb6643.
- Boyd, P.W. (2008): Implications of large-scale iron fertilization of the oceans. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, **364**, 213–218. doi:10.3354/meps07541.
- Boyd, P.W., T. Jickells, C.S. Law, S. Blain, E.A. Boyle, K.O. Buesseler, K. H. Coale, J.J. Cullen, H.J.W. de Baar, M. Follows, M. Harvey, C. Lancelot, M. Levasseur, N.P.J. Owens, R. Pollard, R.B. Rivkin, J. Sarmiento, V. Schoemann, V. Smetacek, S. Takeda, A. Tsuda, S. Turner, and A.J. Watson. (2007): Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: Synthesis and future directions. *Science*, **315**(5812), 612–617. doi:10.1126/science.1131669.
- Boyd, P.W., H. Claustre, M. Levy, D.A. Siegel, and T. Weber (2019): Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, **568**(7752), 327–335. doi:10.1038/s41586-019-1098-2.
- Browning, T.J., H.A. Bouman, G.M. Henderson, T.A. Mather, D.M. Pyle, C. Schlosser, E.M.S. Woodward, and C.M. Moore (2014): Strong responses of Southern Ocean phytoplankton communities to volcanic ash. *Geophys. Res. Lett.*, **41**(8), 2851–2857. doi:10.1002/2014gl059364.
- Buesseler, K.O., S.C. Doney, D.M. Karl, P.W. Boyd, K. Caldeira, F. Chai, K.H. Coale, H.J. de Baar, P.G. Falkowski, K.S. Johnson, R.S. Lampitt, A.F. Michaels, S.W. Naqvi, V. Smetacek, S. Takeda, and A.J. Watson (2008): Environment. Ocean iron fertilization—moving forward in a sea of uncertainty. *Science*, **319**(5860), 162. doi:10.1126/science.1154305.
- Buesseler, K.O., P.W. Boyd, E.E. Black, and D.A. Siegel (2020): Metrics that matter for assessing the ocean biological carbon pump. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **117**(18), 9679–9687. doi:10.1073/pnas.1918114117.
- Cao, L., and K. Caldeira (2010): Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification? *Climatic Change*, **99**(1), 303–311.
- Cheung, W.W.L., G. Reygondeau, and T.L. Fr.licher (2016): Large benefits to marine fisheries of meeting the 1.5°C global warming target. *Science*, **354**(6319), 1591–1594. doi:10.1126/science.aag2331.
- de Baar, H.J.W.P.W. Boyd, K.H. Coale, M.R. Landry, A. Tsuda, P. Assmy, D.C.E. Bakker, Y. Bozec, R.T. Barber, M.A. Brzezinski, K.O. Buesseler, M. Boy., P.L. Croot, F. Gervais, M.Y. Gorbunov, P.J. Harrison, W.T. Hiscock, P. Laan, C. Lancelot, C.S. Law, M. Levasseur, A. Marchetti, F.J. Millero, J. Nishioka, Y. Nojiri, T. van Oijen, U. Riebesell, M.J.A. Rijkenberg, H. Saito, S. Takeda, K.R. Timmermans, M.J.W. Veldhuis, A.M. Waite, and C.S. Wong (2008): Efficiency of carbon removal per added iron in ocean iron fertilization. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, **364**, 269–282. doi:10.3354/meps07548.
- Devol, A.H., and H.E. Hartnett (2001): Role of the oxygen-deficient zone in transfer of organic carbon to the deep ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **46**(7):1684–1690. doi:10.4319/lo.2001.46.7.1684.
- Duggen, S., P. Croot, U. Schacht, and L. Hoffmann (2007): Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: Evidence from biogeochemical experiments and satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **34**(1), L01612. doi:10.1029/2006GL027522.
- Dutreuil, S., L. Bopp, and A. Tagliabue (2009): Impact of enhanced vertical mixing on marine biogeochemistry: Lessons for geo-engineering and natural variability. *Biogeosci.*, **6**(5), 901–912. doi:10.5194/bg-6-901-2009.
- ExOIS (Exploring Ocean Iron Solutions) (2023): *Paths forward for exploring ocean iron fertilization*. Woods Hole, MA doi: http://10.1575/1912/67120.
- GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) (2019): High Level Review of a Wide Range of Proposed Marine Geoengineering Techniques, edited by P.W. Boyd and C.M.G. Vivian, *GESAMP Reports & Studies Series*. International Maritime Organization. London. UK.
- Gollan, N., and K. Barclay (2020): “It’s not just about fish”: Assessing the social impacts of marine protected areas on the well-being of coastal communities in New South Wales. *PLoS ONE*, **15**(12), e0244605. doi:10.1371/journal.pone.0244605.
- Gregg, E.J.V., Christensen, L. Nichol, R.G. Martone, R.W. Markel, J.C. Watson, C.D.G. Harley, E.A. Pakhomov, J.B. Shurin, and K.M.A. Chan (2020): Cascading social-ecological costs and benefits triggered by a recovering keystone predator. *Science*, **368**(6496), 1243–1247. doi:10.1126/science.aay5342.
- Griscom, B.W., J. Adams, P.W. Ellis, R.A. Houghton, G. Lomax, D.A. Miteva, W.H. Schlesinger, D. Shoch, J.V. Siikamaki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Campari, R.T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M.R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S.M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky, P. Potapov, F.E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg, and J. Fargione (2017): Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **114**(44), 11645–11650. doi:10.1073/pnas.1710465114.
- Hamme, R.C., P.W. Webley, W.R. Crawford, F.A. Whitney, M.D. DeGrandpre, S.R. Emerson, C.C.E., K.E. Giesbrecht, J.F.R.G., M.T. Kavanaugh, M.A. Pe.a, C.L. Sabine, S.D. Batten, L.A. Coogan, D. S. Grundle, and D. Lockwood (2010): Volcanic ash fuels anomalous plankton bloom in subarctic northeast Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **37**(19), L19604. doi:10.1029/2010gl044629.
- 堀正和, 桑江朝比呂編著 (2017) : ブルーカーボン—浅海における CO₂ 隔離・貯留とその活用. 254pp., 地人書館 (東京)
- Jones, M.T., and S.R. Gislason (2008): Rapid releases of metal salts and nutrients following the deposition of volcanic ash into aqueous environments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**(15), 3661–3680. doi:10.1016/j.gca.2008.05.030.
- Johnson, D.H., and J. Decicco. (1983): An Artificial Upwelling Driven by Salinity Differences in the Ocean. *U.S. Department of Energy*.
- Karl, D.M., and R.M. Letelier (2008): Nitrogen fixation-enhanced carbon sequestration in low nitrate, low chlorophyll seascapes. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, **364**, 257–268. doi:10.3354/meps07547.
- Keller, D.P., Feng, E.Y., and Oschlies, A. (2014): Potential Climate Engineering Effectiveness and Side Effects During a High Carbon Dioxide-Emission Scenario. *Nat. Commun.* **5**, 3304. doi: 10.1038/ncomms4304.
- Kelly, R.L., X. Bian, S.J.F., K.L. Fornace, T. Gunderson, N.J. Hawco, H. Liang, J. Niggemann, S.E. Paulson, P. Pinedo - Gonzalez, A.J. West, S. - C. Yang, and S. G. John (2021): Delivery of metals and dissolved black carbon to the Southern California coastal ocean via aerosols and floodwaters following the 2017 Thomas Fire. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* **126**(3): e2020JG006117. doi:10.1029/2020jg006117.

- Kelly, L. W., G.J. Williams, K.L. Barott, C.A. Carlson, E.A. Dinsdale, R.A. Edwards, A.F. Haas, M. Haynes, Y.W. Lim, T. McDole, C.E. Nelson, E. Sala, S.A. Sandin, J.E. Smith, M.J.A. Vermeij, M. Youle, and F. Rohwer (2014): Local genomic adaptation of coral reef-associated microbiomes to gradients of natural variability and anthropogenic stressors. *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.A.*, **111**(28), 10227–10232. doi:10.1073/pnas.1403319111.
- Kirke, B. (2003): Enhancing fish stocks with wave-powered artificial upwelling. *Ocean and Coastal Management*, **46**(9–10):901–915. doi:10.1016/S0964-5691(03)00067-X.
- Kockel, A., N.C. Ban, M. Costa, and P. Dearden (2020): Addressing distribution equity in spatial conservation prioritization for small-scale fisheries. *PLoS ONE*, **15**(5), e0233339. doi:10.1371/journal.pone.0233339.
- Koweeck, D.A. (2022): Expected limits on the potential for carbon dioxide removal from artificial upwelling. *Front. Mar. Sci.* **9**:841894. doi: 10.3389/fmars.2022.841894.
- Krause-Jensen, D., and C.M. Duarte (2016): Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nat. Geos.*, **9**(10), 737–742. doi:10.1038/ngeo2790.
- Kwon, E.Y., F. Primeau, and J.L. Sarmiento (2009): The impact of remineralization depth on the air–sea carbon balance. *Nat. Geos.*, **2**(9), 630–635. doi:10.1038/ngeo612.
- Lavery, T.J., B. Roudnew, P. Gill, J. Seymour, L. Seuront, G. Johnson, J.G. Mitchell, and V. Smetacek (2010): Iron defecation by sperm whales stimulates carbon export in the Southern Ocean. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.*, **277**(1699), 3527–3531. doi:10.1098/rspb.2010.0863.
- Lavery, T.J., B. Roudnew, J. Seymour, J.G. Mitchell, V. Smetacek, and S. Nicol (2014): Whales sustain fisheries: Blue whales stimulate primary production in the Southern Ocean. *Mar. Mammal Sci.*, **30**(3), 888–904. doi:10.1111/mms.12108.
- Lawrence, M.W. (2014): Efficiency of carbon sequestration by added reactive nitrogen in ocean fertilization. *Int. J. Global Warming*, **6**(1):15–33. doi:10.1504/ijgw.2014.058754.
- Liu, C.C.K. and Q. Jin (1995): Artificial upwelling in regular and random waves. *Ocea. Engine.* **22**(4):337–350. doi:10.1016/0029-8018(94)00019-4.
- Liu, C.C.K. (1999). *ROM IOA Newslett.* **10** (4):1–8.
- Lovelock, C.E., D.A. Friess, J.B. Kauffman, and J.W. Fourqurean (2018): Human impacts on blue carbon ecosystems. pp. 17–24. In *A Blue Carbon*, edited by Primer, L. Windham-Myers, S. Crooks, and T. G. Troxler. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Luo, J.Y., R.H. Condon, C.A. Stock, C.M. Duarte, C.H. Lucas, K.A. Pitt, and R.K. Cowen (2020): Gelatinous zooplankton-mediated carbon flows in the global oceans: A data-driven modeling study. *Global Biogeochem. Cycles*, **34**(9), e2020GB006704. doi:10.1029/2020GB006704.
- Maier-Reimer, E., E., U. Mikolajewicz, and A. Winguth (1996): Future ocean uptake of CO₂: Interaction between ocean circulation and biology. *Clim. Dynam.*, **12**(10), 711–722.
- Martin, A.H., H.C. Pearson, G.K. Saba, and E.M. Olsen (2021): Integral functions of marine vertebrates in the ocean carbon cycle and climate change mitigation. *One Earth*, **4**(5), 680–693. doi:10.1016/j.oneear.2021.04.019.
- Martin, J.H., G.A. Knauer, D.M. Karl, and W.W. Broenkow (1987): VERTEX: Carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep-Sea Res. A*, **34**(2), 267–285. doi:10.1016/0198-0149(87)90086-0.
- Martin, J.H., and S.E. Fitzwater (1988): Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, **331**(6154), 341–343. doi:10.1038/331341a0.
- Martin, J.H., R.M. Gordon, and S.E. Fitzwater (1990): Iron in Antarctic waters. *Nature*, **345**(6271), 156–158. doi:10.1038/345156a0.
- Martin, S.L., L.T. Ballance, and T. Groves (2016): An ecosystem services perspective for the oceanic eastern tropical Pacific: commercial fisheries, carbon storage, recreational fishing, and biodiversity. **3**(50). doi:10.3389/fmars.2016.00050.
- Mascia, M.B., C.A. Claus, and R. Naidoo (2010): Impacts of marine protected areas on fishing communities. *Conservation Biology*, **24**(5), 1424–1429. doi:10.1111/j.1523-1739.2010.01523.x.
- NASEM (2019): Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. doi: https://doi.org/10.17226/25259.
- NASEM (2022): A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26278.
- Oreska, M.P.J., K.J. McGlathery, L.R. Aoki, A.C. Berger, P. Berg, and L. Mullins (2020): The greenhouse gas offset potential from seagrass restoration. *Sci. Rep.*, **10**(1), 7325. doi:10.1038/s41598-020-64094-1.
- Oschlies, A., W. Koeve, W. Rickels, and K. Rehdanz (2010a): Side effects and accounting aspects of hypothetical large-scale Southern Ocean iron fertilization. *Biogeosci.*, **7**(12), 4014–4035. doi:10.5194/bg-7-4017-2010.
- Oschlies, A., M. Pahlow, A. Yool, and R.J. Matear. (2010b): Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channeling the sorcerer’s apprentice. *Geophys. Res. Lett.*, **37**(4), L04701. doi:10.1029/2009GL041961.
- Pan, Y., Li, Y., Fan, W.E.I., Zhang, D., Qiang, Y., Jiang, Z.P., et al. (2019): A Sea Trial of Air-Lift Concept Artificial Upwelling in the East China Sea. *J. Atmosph. Ocean. Technol.* **36**, 2191–2204. doi: 10.1175/JTECH-D-18-0238.1
- Parsons, T.R., and F.A. Whitney (2012): Did volcanic ash from Mt. Kasatochi in 2008 contribute to a phenomenal increase in Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in 2010? *Fish. Oceanogr.*, **21**(5), 374–377.
- Pershing, A.J., L.B. Christensen, N.R. Record, G.D. Sherwood, and P.B. Stetson (2010): The impact of whaling on the ocean carbon cycle: Why bigger was better. *PLoS ONE*, **5**(8), e12444. doi:10.1371/journal.pone.0012444.
- Pinti, J., T. DeVries, T. Norin, C. Serra-Pompei, R. Proud, D.A. Siegel, T. Ki.rboe, C.M. Petrik, K.H. Andersen, and A.S. Brierley (2021): Metazoans, migrations, and the ocean’s biological carbon pump. *bioRxiv*. doi:10.1101/2021.03.22.436489.
- Primeau, F. (2005): Characterizing transport between the surface mixed layer and the ocean interior with a forward and adjoint global ocean transport model. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**(4), 545–564. doi:10.1175/JPO2699.1.
- Queiros, A., M.N. Stephens, S. Widdicombe, K. Tait, S.J. McCoy, J. Ingels, S. Rühl, R. Airs, A. Beesley, G. Carnovale, P. Cazenave, S. Dashfield, E. Hua, M. Jones, P. Lindeque, C.L. McNeill, J. Nunes,

- H. Parry, C. Pascoe, C. Widdicombe, T. Smyth, A. Atkinson, D. Krause-Jensen, and P.J. Somerfield (2019): Connected macroalgal-sediment systems: Blue carbon and food webs in the deep coastal ocean. *Ecol. Monogr.*, **89**(3), e01366. doi:10.1002/ecm.1366.
- Roman, J., J.A. Estes, L. Morissette, C. Smith, D. Costa, J. McCarthy, J.B. Nation, S. Nicol, A. Pershing, and V. Smetacek (2014): Whales as marine ecosystem engineers. *Front. Ecol. Environ.* **12**(7), 377–385. doi:10.1890/130220.
- Saba, G.K., A.B. Burd, J.P. Dunne, S. Hernandez-Leon, A.H. Martin, K.A. Rose, J. Salisbury, D.K. Steinberg, C.N. Trueman, R.W. Wilson, and S.E. Wilson (2021): Toward a better understanding of fish-based contribution to ocean carbon flux. *Limnol. Oceanogr.*, **66**(5), 1639–1664. doi:10.1002/lno.11709.
- Sarmiento, J. L., and J.R. Toggweiler (1984): A new model for the role of the oceans in determining atmospheric PCO₂. *Nature*, **308** (5960), 621–624. doi:10.1038/308621a0.
- Seddon, N., A. Smith, P. Smith, I. Key, A. Chausson, C. Girardin, J. House, S. Srivastava, and B. Turner (2019): Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nat. Clim. Chan.*, **9**(2), 84–87. doi:10.1038/s41558-019-0405-0.
- Siegel, D.A., K.O. Buesseler, S.C. Doney, S.F. Sailley, M.J. Behrenfeld, and P.W. Boyd (2014): Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models. *Global Biogeochem. Cycles*, **28**(3), 181–196. doi:10.1002/2013gb004743.
- Siegel, D.A., T. DeVries, S. Doney, and T. Bell. (2021a): Assessing the sequestration time scales of some ocean-based carbon dioxide reduction strategies. *Environ. Res. Lett.*, **16**(10), 104003.
- Siegel, D.A.I. Cetinić, J.R. Graff, C.M. Lee, N. Nelson, M.J. Perry, I.S. Ramos, D.K. Steinberg, K. Buesseler, R. Hamme, A.J. Fassbender, D. Nicholson, M.M. Omand, M. Robert, A. Thompson, V. Amaral, M. Behrenfeld, C. Benitez-Nelson, K. Bisson, E. Boss, P.W. Boyd, M. Brzezinski, K. Buck, A. Burd, S. Burns, S. Caprara, C. Carlson, N. Cassar, H.C., E. D'Asaro, C. Durkin, Z. Erickson, M.L. Estapa, E. Fields, J. Fox, S. Freeman, S. Gifford, W. Gong, D. Gray, L. Guidi, N. Haantjens, K. Halsey, Y. Huot, D. Hansell, B. Jenkins, L. Karp-Boss, S. Kramer, P. Lam, J.-M. Lee, A. Maas, O. Marchal, A. Marchetti, A. McDonnell, H. McNair, S. Menden-Deuer, F. Morrison, A.K. Niebergall, U. Passow, B. Popp, G. Potvin, L. Resplandy, M. Roca-Mart., C. Roesler, T. Rynearson, S. Traylor, A. Santoro, K.D. Seraphin, H.M. Sosik, K. Stamieszkin, B. Stephens, W. Tang, B. Van Mooy, Y.g Xiong, and X. Zhang. (2021b): An operational overview of the EXPORTS in the Ocean from RemoTe Sensing (EXPORTS) Northeast Pacific field deployment. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **9**(1), 00107. doi:10.1525/elementa.2020.00107.
- Smetacek, V. and S.W.A. Naqvi (2010): The Expedition of the Research Vessel “Polarstern” to the Antarctic in 2009 (ANT-XXV/3-LOHAFEX). *Berichte zur Polar-und Meeresforschung* **613**. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. Bremerhaven (Germany)
- Solan, M., E.M. Bennett, P.J. Mumby, J. Leyland, and J.A. Godbold (2020): Benthic-based contributions to climate change mitigation and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biol. Sci.*, **375**(1794), 20190107. Doi:10.1098/rstb.2019.0107.
- Strong, A., S. Chisholm, C. Miller, and J. Cullen (2009): Ocean fertilization: Time to move on. *Nature*, **461**(7262), 347–348. doi:10.1038/461347a.
- Sunda, W.G., and S.A. Huntsman (1995): Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. *Mar. Chem.*, **50**(1–4), 189–206. doi:10.1016/0304-4203(95)00035-p.
- Sundarambal, P., R. Balasubramanian, P. Tklich, and J. He (2010): Impact of biomass burning on ocean water quality in Southeast Asia through atmospheric deposition: Field observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**(23), 11323–11336. doi:10.5194/acp-10-11323-2010.
- Thingstad, T.F.M.D. Krom, R.F.C. Mantoura, C.A.F. Flaten, S. Groom, B. Herut, N. Kress, C.S. Law, A. Pasternak, P. Pitta, S. Psarra, F. Rassoulzadegan, T. Tanaka, A. Tselepidis, P. Wassmann, E.M.S. Woodward, C.W. Riser, C. Zodiatis, and T. Zohary (2005): Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic eastern Mediterranean. *Science*, **309**(5737), 1068–1071. doi:10.1126/science.1112632.
- Tollefson, J. (2012): Ocean-fertilization project off Canada sparks future. *Nature*, **490**(7421), 458–459. doi:10.1038/490458a.
- van der Heijden, L. H., and N. A. Kamenos (2015): Calculating the global contribution of coralline algae to carbon burial. *Biogeosci.*, **12**(10), 7845–7877.
- van Mooy, B.A.S., R.G. Keil, and A.H. Devol (2002): Impact of suboxia on sinking particulate organic carbon: Enhanced carbon flux and preferential degradation of amino acids via denitrification. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**(3), 457–465. doi:10.1016/S0016-7037(01)00787-6.
- Vershinsky, N.V., B.P. Psenichnyy, and A.V. Solovyev (1987): Artificial upwelling using the energy of surface waves. *Oceanol.*, **27**(3), 400–2.
- White, A., K. Bjorkman, E. Grabowski, R. Letelier, S. Poulos, B. Watkins, and D. Karl (2010): An open ocean trial of controlled upwelling using wave pump technology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**(2), 385–396. doi:10.1175/2009JTECHO679.1.
- Wilmers, C.C., J.A. Estes, M. Edwards, K.L. Laidre, and B. Konar (2012): Do trophic cascades affect the storage and flux of atmospheric carbon? An analysis of sea otters and kelp forests. *Front. Ecol. Environ.*, **10**(8), 409–415.
- Xiu, P., A.C. Thomas, and F. Chai (2014): Satellite bio-optical and altimeter comparisons of phytoplankton blooms induced by natural and artificial iron addition in the Gulf of Alaska. *Rem. Sens. Environ.*, **145**, 38–46. doi:10.1016/j.rse.2014.02.004.
- Yool, A., J.G. Shepherd, H.L. Bryden, and A. Oschlies (2009): Low efficiency of nutrient translocation for enhancing oceanic uptake of carbon dioxide. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **114**(8), C08009. doi:10.1029/2008JC004792.
- Young, D.R., and T.-K. Jan. (1977): Fire fallout of metals off California. *Mar. Pollu. Bull.*, **8**(5), 109–112.
- Zahariev, K., J.R. Christian, and K.L. Denman (2008): Preindustrial, historical, and fertilization simulations using a global ocean carbon model with new parameterizations of iron limitation, calcification, and N₂ fixation. *Prog. Oceanogr.*, **77**(1), 56–82. doi:https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.01.007.
- Zhang, R., T. Jiang, Y. Tian, S. Xie, L. Zhou, Q. Li, and N. Jiao (2017): Volcanic ash stimulates growth of marine autotrophic and heterotrophic microorganisms. *Geology* **45**(8): G38833.1. doi:10.1130/g38833.1.

Feasibility study of ocean carbon dioxide removal (mCDR)
—Key points from the National Academies of Science,
Engineering, and Medicine report—

Makio C. Honda[†]

To address rising atmospheric carbon dioxide levels, a primary driver of global warming, geoengineering methods are being explored alongside decarbonization and energy-saving strategies. The ocean absorbs approximately one-quarter of human-produced carbon dioxide and stores roughly 50 times more carbon dioxide than the atmosphere, underscoring its potential as a significant site for carbon absorption and storage. Marine Carbon Dioxide Removal (mCDR) encompasses geoengineering techniques designed to artificially enhance the ocean's capacity for carbon absorption. mCDR includes the following approaches: (1) nutrient fertilization, (2) artificial upwelling and downwelling, (3) seaweed cultivation, (4) marine ecosystem restoration, (5) ocean alkalinity enhancement, and (6) electrochemical engineering. Although these methods are conceptually promising, limited knowledge and experience prevent their large-scale implementation in ocean waters to achieve meaningful reductions in atmospheric carbon dioxide. This report summarizes the findings from feasibility studies on the first four biogeochemical mCDR methods—nutrient fertilization, artificial upwelling and downwelling, seaweed cultivation, and marine and coastal ecosystem restoration—conducted by the National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The summary is based on the original report and additional insights from the author.

Key words: Geoengineering, Marine Carbon Dioxide Removal, Nutrient fertilization, Artificial upwelling—downwelling, Seaweed cultivation, Recovery of marine ecosystem

(Corresponding author's e-mail address: hondam@jamstec.go.jp)

(Received 11 June 2024; accepted 25 November 2024)

(doi: 10.5928/kaiyou.34.1_1)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2025)

[†] Earth Surface System Research Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15 Natsushima, Yokosuka, 237-0061, Japan
e-mail: hondam@jamstec.go.jp