

海洋を利用した大気中の二酸化炭素の除去・貯留技術（Ocean-CDR）の最近の展開（その1．総論）

NPO 法人海ロマン21 理事長 小池勲夫

1. 要約
2. 初めに—CDR の意義—
3. CDR と関係した海洋での炭素循環と海洋での炭素貯留
4. CDR に関する共通な課題—特に国際法との関係—

1. 要約

地球温暖化をパリ協定のように今世紀末に平均 2℃以下の上昇に抑えるには、温室効果気体の排出抑制だけでは難しく、Carbon dioxide removal (CDR) と呼ばれる全球規模での大気からのより積極的な二酸化炭素除去の必要性が近未来的には高まって来ている。自然界でも海洋は大気からの CO₂ の吸収・貯留源として既に機能しているが、それを人為的に加速させる幾つかの手法が、海洋を使った CDR として提案されている。2022 年に米国の科学アカデミーがこれに関する詳細な報告書を出版したので、それに基づいて海洋での CDR に関する最近の知見をまとめる。

この報告書で提案されている海洋での CDR は6つあり、その（1）は微量あるいは主要な栄養塩の海洋表層への添加による一次生産の促進と、生物ポンプによる海洋内部への無機炭酸の隔離である。（2）としては湧昇あるいは下降流の人為的形成で、栄養塩の表層への付加を促進させる。（3）は大型海藻の大規模養殖とその海洋深部への隔離であり、（4）はケルプ林やサルガッスムなどの主に沿岸生態系を保全・拡大させて CO₂ 吸収を図るものである。次の（5）は海洋のアルカリ度の増加を陸域岩石の風化を人為的に促進させて行い CO₂ 吸収を図るもの、（6）は海水を電気分解して、酸性化区分とアルカリ化区分を作り、海水中の CO₂ の濃縮・分離を行うものである。これらは、いずれも大規模で行わないと CDR としての実効性は乏しいので大規模化への可能性の評価が重要である。

次に CDR の手法を支える海洋での炭素循環と海洋生態系との関係について検討する。まず、外洋では、微細な植物プランクトンとそれに連なる食物連鎖で沈降性有機物粒子が生成され、これらが海洋内部に沈降することで炭素隔離が成立する。このような有機炭素の粒子の沈降による海洋深部への輸送を生物ポンプと呼んでいる。表層での一次生産には、主要な窒素やリンといった栄養塩だけでなく微量金属の鉄などを含めた栄養塩が必要であり、鉄散布や人工湧昇流はこれに寄与する。なお、鉄が微量栄養塩として不足している海域は全海洋の 1/4 にも達することが知られている。全球での見積もりでは、表層での一次生産に使われることなく、再度中・深層に移行してしまう栄養塩の無機リンは全体の半分以上を占めると推定され、これは鉄などの微量栄養塩の枯渇や物理的な沈降流によると考えられる。なお、沿岸域でのケルプなどの大型海藻は単細胞の植物プランクトンに比べて生物量が大きいので、その育成や隔離は CO₂ 吸収・隔離に対する効果は大きい。

海洋での CDR に共通する課題として、陸域での CDR は各国の責任で行われるが全海洋の半分以上が公海である海洋では現在国際法上あるいは例えばアメリカにおける国内法においても、海洋での CDR に関する統合的な法的枠組みは存在していない事がある。さらに国際条約においても、温暖化の進展を止めるためには海洋を含めたより積極的な CDR を進展させることが必要と考える国連の気候変動枠組条約 (UNFCCC) と、海洋生態系の保全を第一に考える国連生物多様性条約 (CBD) との考え方の違いが大きい。後者では、生物多様性に影響を与える規模での大気からの二酸化炭素の除去に関する技術をより広く地球工学的な活動と呼び、環境や生物多様性の劣化を生じる可能性のある地球工学的な手法に対し、その恐れが無くなるまでは停止を求める非拘束的な文書を出している。また、海洋での廃棄投棄物による海洋汚染を防止するロンドン条約およびロンドン議定書は、この間にあって海洋での CDR の実施と言う時代の要請を、海洋環境の保全の立場から様々なステークホルダーの立場を考慮して具体的な検討を行う役割を果たしているように思われる。2022 年の全米アカデミーズの報告書では、国際的に海洋での CDR のための強固な法的枠組みを確立することの優先性と重要性を強調している。つまり、CDR に関する研究調査及びもしも適切と判断された場合のアップスケール等の事業が、環境およびその他の悪影響のリスクを最小化する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の不可欠な基礎として、CDR に関する国際的な法的枠組みの確立をこの報告書では考えている

2. 初めに—Marine-CDR の意義—

現在の人間活動によるCO₂の大気への排出は、自然界におけるその吸収量を大きく超えている。これは単に温室効果ガス（GHGs）の排出を人為的に削減することだけで気候を安定化させ、国連のThe United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)による2015年のパリ協定で示された温暖化による気温上昇を2℃以下に抑える事は難しくなっている事を意味する。パリ協定で各国は自国のGHGs排出削減の目標（NDC）を提出し、例えば我が国は2021年の目標として2030年には2013年度比で46%、2050年にはカーボンニュートラルの達成を目指している。しかし、図1に示したように世界各国のNDCの合計による人為的なGHGsの排出は図1-1の赤の幅であり、同じ図に示した2100年に1.5/2.0℃以下に抑えるための排出シナリオとの間には極めて大きなギャップが存在する。つまり、地球全体での1850年—2019年間のGHGsの総排出量は2400GtCO₂に達しており、これは今後1.5℃上昇をもたらす蓄積量に後500GtCO₂の余裕しかないが、現状では年間で約55 - 60GtCO₂の排出が持続しているのである。

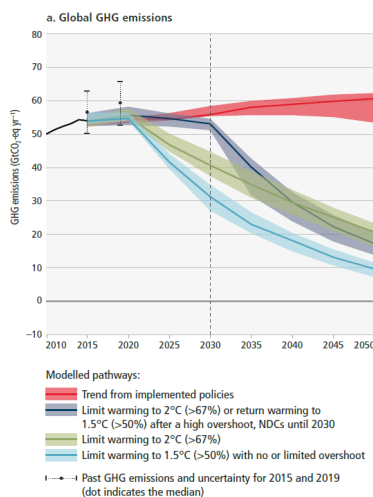


図1 2050年までの各国の温室効果ガス（GHGs）の削減目標から得られた全球でのGHGsの生成予測と、2100年までの気温上昇を1.5/2.0℃以下に抑える為のGHGs生成シナリオ（IPCC/AR6, WG3 SMP 2022）。赤が各国の削減目標を元にした予測、青が2.0℃以下あるいはオーバーシュートの後、1.5℃まで戻る、薄青、黄緑はそれぞれ、1.5/2.0℃までの上昇に留まるための排出シナリオ。

その為、Carbon dioxide removal（CDR）と呼ばれる全球規模での大気からのより積極的なCO₂除去（負の排出技術-NETs-とも呼ばれる）の必要性が高まって来ている。これはGHGsの排出量を抑制するだけでは急速に進展する温暖化を抑制する事は難しく、より積極的な大気中のGHGsの減少を狙ったCDRが短期的な施策としては重要と言う認識が国際的に高まったのが大きな理由である。さらに、わが国のように2050年でのカーボンニュートラルを目標にしても、産業からのCO₂の排出で航空機燃料など二酸化炭素除去（CCS）の難しいセクターでの放出源や、メタン、一酸化二窒素など、自然由来の多いGHGsなどが残る事もその理由に挙げられる。

このような流れを受けてアメリカの全米アカデミーは2015年にCDRに関する報告書をまとめた（National Research Council. 2015）。この報告書ではまず既に提案されている様々なCDRの手法は、その適用するスケールをはるかに大きくする必要がある事が強調された。また、スケールアップを想定した研究をなるべく早く開始することが重要であるとも述べている。これを受けて全米アカデミーは2019年にさらに陸域でのCDRを中心に報告書をまとめている。そこでは近年のCO₂排出状況から見て、気候を安定化させるには今世紀の半ばで、全球で年間10Gトン、また今世紀末には20GトンのCO₂の除去・貯留が必要になると述べている（NASEM 2019）。なお、最新のIPCC評価報告書では、人間活動による化石燃料やセメ

ント製造からのCO₂の生成は年間29Gトンと推定されており、この約1/3を今世紀半ばにはCDRで除去することが期待されていることになる。この2019年の報告書によれば既に陸域では、以下の4つのCDRがその規模を拡大して行われ始めている。(1) 新規植林と再植林、(2) 森林管理の改善、(3) 農地土壌への有機炭素の取り込みと貯留、(4) 炭素の回収・貯留を伴う生物エネルギーの利用である。また、2019年の報告書では海洋に関してのCDRは特に取り上げていないが、海洋の持つ自然なCO₂吸収能力のスケールの大ききから判断してそのCDRとしての重要性を指摘している。なお、わが国でのこのCDRによるCO₂の除去の必要性については、経済産業省の検討会では2050年には年間数億トンとなっている（経済産業省、2023）。

アメリカの全米アカデミーズ（National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine）は2022年に「海洋をベースにした二酸化炭素の除去・隔離についての研究戦略」を発表した（NASEM2022）。この報告書では、「海洋は全球の表面積の7割を占め、大気の60倍もの二酸化炭素を海水中に貯留している。今後も大気や海洋表層部からCO₂を除去し、それを深層、あるいは海底下の地層に貯留することで、海洋でのCDRのアプローチは陸域でのCO₂削減を補完し、今後数10年から数世紀にわたる、気候変動と海洋酸性化を抑制するために必要な気候安定化戦略のポートフォリオに貢献することが出来る」と述べられている。このように、海洋をベースとしたCDRは、陸域等でのCDRのアプローチと合わせて、人類が排出するCO₂のバランスをとり、今世紀半ばから今世紀後半にかけてのカーボンニュートラルに貢献する可能性があると報告書では考えている。なお、この報告書は海洋でのCO₂除去・貯留（Marine-CDR）に関する総合的な取りまとめとしては最新のものである。

ここで2022年の報告書で取り上げられた海洋でのCDRの手法を以下にまとめる。その(1)は微量あるいは主要な栄養塩の海洋表層への添加であり、“**Nutrient fertilization**”と呼ばれる。なお、鉄などの微量栄養の場合はその添加量は微量でも効果のあることが分かっており、大気等からの鉄の沈積による海洋への添加は自然界でも生じている。(2)は自然における湧昇や下降流を人工的に行う方法であり、“**Artificial upwelling and downwelling**”と呼ばれる。これには物理的な力が必要であり、その為には波浪を利用したポンプ等が提案されている。一般に下降流は、表層の酸素に富む海水を下部に運ぶことで鉛直混合を促進させ貧酸素化を抑える効果がある。一方、湧昇は栄養塩を表層にもたらすことで一次生産の促進と、生物ポンプを促進させる効果がある。(3)は、大規模な海藻の栽培であり“**Seaweed cultivation**”と呼ばれ、生産された海藻の炭素を外洋の深海などに貯留させることで、CDRが達成される。(4)はケルプ林やサルガッスムなどの大型海藻藻場を持つ主に沿岸生態系を保全し、それを拡大させることで、CDRの目的を達成するもので、これを“**Recovery of ocean and coastal ecosystems**”と呼んでいる。

次の(5)は、海洋のアルカリ度の増加を陸域岩石の風化を人為的な細粒子化などで促進することで海水における二酸化炭素の貯留能力を高める手法を大規模に行う手法で、これは“**Ocean alkalinity enhancement**”と呼ばれる。(6)番目の手法は海水を電気分解することで、酸性化区分とアルカリ化区分を作り、その酸性区分では二酸化炭素の濃縮・除去を行い、アルカリ化区分を使う場合はこれを海水に放出する事で(5)と同じ効果を得る事が出来る。このような工業的な手法が“**Electrochemical approaches**”と呼ばれる。なお、電気分解に使う電力は再生可能エネルギーを使うことを前提としている。

以上のように、生物学的なプロセスを利用して海洋での炭素貯留を促進する手法が4つあり、他の2つは、地球化学的な二酸化炭素の海洋への移行を人為的に加速させるものである。この報告書の評価では、生物学的な手法の内、微量な栄養塩添加と海藻培養の2つの手法が規模の拡大が必要なCDRとして可能性のあるものと評価している。6)の電気化学的な手法を除くと、これらは既に自然界で海洋が行っているCO₂の貯留プロセスを人為的に促進するものであるが、それぞれの炭素循環に関わる規模や時間スケールが異なっている。

本報告書では、CDRの基礎となる海洋での炭素循環の科学的な知見や、海洋でのCDRに共通する海洋の

利用と保全に関わる課題を紹介する。また、各手法に関する詳しい紹介は、その2：各論で行う。なお、海洋を利用した大気中の二酸化炭素の除去・隔離の主に地球工学的な技術に関しては、GESAMP(2019)が既に主に環境に対する影響評価の側面から取りまとめを行っている。

3. 地球表層での炭素循環と海洋における炭素貯留

米国アカデミーズによる2022年の報告書では、上記で紹介したように6つの海洋をベースにしたCDRについて、それぞれの対象とする海洋生態系に基づき、それらの利点、リスク、十分なスケールアップの可能性などについて検討している。海洋は地球表層における炭素循環の中でCO₂の貯留源としての大きな役割を既に果たしており、海洋をベースにしたCDRによってその能力をさらに向上させる大きなポテンシャルを持っていることは確かである。最近の推定では、海洋は人為起源のCO₂の約30%を既に取り込んでしているとされる(Gruber et al. 2019)。現在、海洋でのCDRとして提案されている大気中のCO₂を海洋に貯留する手法は、既に述べたように大きく分けて植物プランクトンや海藻などによる一次生産によるCO₂の除去プロセスを利用したもの、海洋での炭酸塩やケイ酸塩の溶解をめぐる地球化学的なプロセスを利用した2つに分けられる。これらはいずれも海洋の自然界での炭素循環のプロセスを模倣しそれを強化している点が重要である。ここではまず地球表層での自然界における炭素循環とそこで海洋の持つ炭素貯留について説明する。

地球表層での炭素はその存在状態から、二酸化炭素やメタンのような気体で大気中に存在するもの、陸域を覆う土壌や岩石、凍土、あるいは陸上生物などのように陸域に存在するもの、さらには、海に溶け込んだ無機炭酸、海洋生物、生物由来有機物のように海洋に存在するものに分ける事が出来る(図2)。また、海洋の中・深層にある炭素の大部分は無機炭酸なので、この図からCO₂の大気中での現存量に比べて、海洋の中・深層にはその60倍以上の炭素が存在することが分かる。大気中で増加したCO₂の安定的な隔離と言う観点からは、陸域の地下深部や深海、深海底など大気との接触がない場所で、炭素の形態としては二酸化炭素に分解されにくい難分解性有機物の形が望ましい。しかし、後で述べるように海洋は水深が平均で4000mもあるため、無機炭酸でも1000m以深へ輸送されれば、大気との接触は長期間無くなるため、貯留効果は充分あることになる(Shigel et al. 2021)。

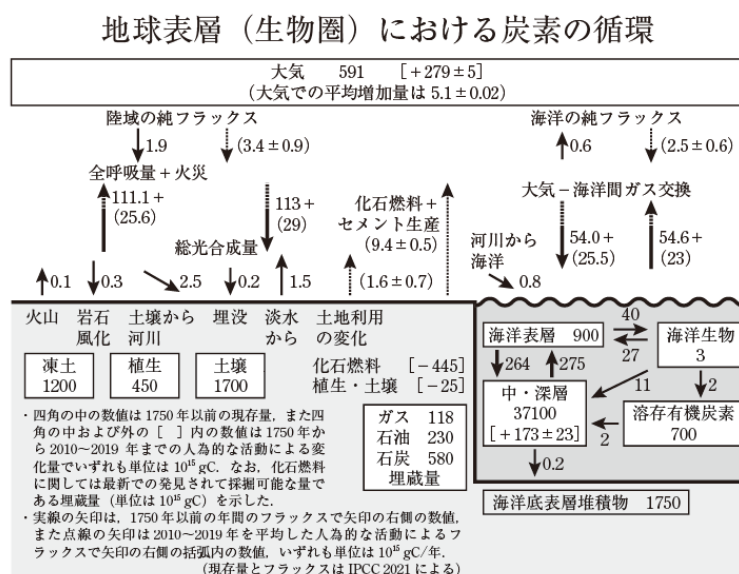
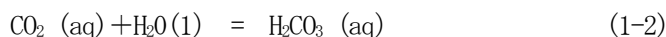


図2 地球表層における炭素の循環 (理科年表 2024)

大気中の二酸化炭素の現存量に比べて海洋が無機炭素を大きく貯留出来る理由は、酸素などと異なり CO_2 は水に溶けてイオン化するため、以下のプロセスではるかに多量に海洋に溶け込むことが出来るからである。大気中の CO_2 は海洋表面での気液平衡で海洋に溶け込むが、溶けた CO_2 は水和して炭酸 (H_2CO_3) となる。この炭酸 (H_2CO_3) は水素イオン (H^+) が解離した炭酸水素イオン (HCO_3^-) や炭酸イオン (CO_3^{2-}) との間で、以下の式で表わされる反応により化学平衡の状態をとっている。なお、海水は酸である二酸化炭素が多く溶けているにもかかわらず pH が 8 前後の弱アルカリ性である。これは、海水には酸性成分よりも Ca, Mg などのアルカリ成分がより多く溶けていることによる。海水の pH 8 の条件では炭酸物質の約 90% は炭酸水素イオン HCO_3^- (aq) として存在し、また、残りの大部分は炭酸イオン CO_3^{2-} (aq) であり、大気中の CO_2 濃度を反映する、 CO_2 (aq) + H_2CO_3 (aq) は pH が 8 前後では全炭酸濃度の 1% にも満たない (図 3)。つまり、(1-3) で化学平衡が大きく右に傾いている。このことが酸素などと異なり、 CO_2 がヘンリーの溶解度よりも二桁以上も高濃度で海洋に取り込まれる理由となっている。



この海水の持つ弱アルカリ性は、海水に含まれる Mg, Ca などアルカリ土類元素の成分が主に陸域の岩石の風化によって海洋に供給されていることで維持されている。また、海洋で石灰化生物により生成される CaCO_3 のような生物の殻や骨格が Ca などの除去機構として機能して地質学的な年代での海水中での均衡が保たれている。このいわば過剰に存在するアルカリ成分をアルカリ度として Dickson (1981) は以下のように定義した。すなわちアルカリ度は、海水中のプロトン供与体 (酸に相当する) に対するプロトン受容体 (塩基に相当する) の過剰に相当する水素イオンのモル数とした。上記に示したように、アルカリ度の変化は、海水中における陽イオンと陰イオンのバランスに関係するので、このようなアルカリ成分の海洋への供給を増やし、炭酸系の平衡を CO_2 (aq) が減少する方向に動かすことで、大気からの CO_2 の吸収を増加させることが考えられる。これが後で紹介する海洋化学的な CDR の考え方の基になっている。

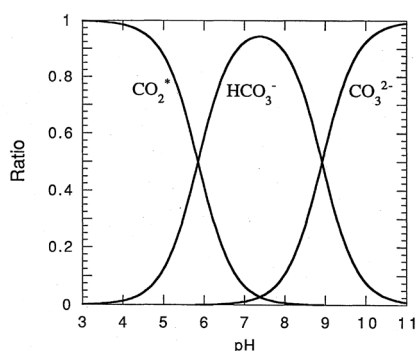


図 3 炭酸塩の乖離と pH との関係

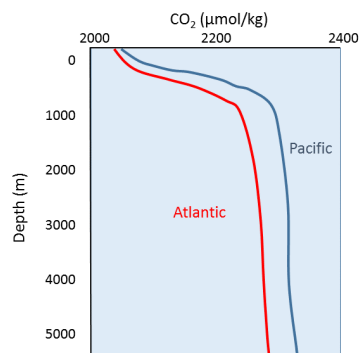


図 4 全炭酸濃度の太平洋、大西洋での鉛直分布

海洋が大気中の CO_2 を海洋深部に取り込む機構として主に”溶解度ポンプ”と”生物ポンプ”の 2 つがあることが分かっている (Shigel et al. 2023)。この内、”溶解度ポンプ”は冷たくまた密度の高い水塊は、より多くの無機炭酸を保持出来ることに基いており、例えば北部大西洋や南大洋で生成される水温が $-2 \sim 4^\circ\text{C}$ の海洋深層水は、全海洋での平均的な表層での 20°C の海水の 2 倍もの無機炭酸を保持出来る。このような高緯度での冷たい密度の高い無機炭酸に富んだ表層水が、物理的な沈降により海洋深部に輸送される

プロセスを”溶解度ポンプ“と呼んでいる。一方、”生物ポンプ“は海洋表層で沈降性の有機物粒子が生成され、主に重力で海洋内部に沈降しそこで無機化され無機炭酸に戻ることで表層からの隔離が生じる事を指す。最近、DeVries(2022)は炭素循環モデルを使って”溶解度ポンプ“がこのような勾配を維持するのに約1/3寄与しており、残りは”生物ポンプ“と推定している。

CDRで利用される”生物ポンプ“についてより詳細に検討すると、海洋表層では光合成により主に植物プランクトンが光と栄養塩を使って増殖することで、粒子態の有機炭素が生産される。これを一次生産と呼ぶが海洋表層を中心に植物プランクトンを基礎とした食物連鎖が成立し、動物プランクトンの糞粒子など様々な形態の沈降性の粒子態有機物が生成される。このような沈降性の粒子態有機物は重力により沈降し海洋の中・深部へ輸送される。沈降の過程で有機物の大部分は主に細菌群集により好氣的に分解され有機物は無機炭酸と無機栄養塩に酸化分解される。また、動物プランクトンは、海洋表層と中・深層の間を上下移動する種類が多い事が分かっており、これらが表層で摂餌して中・深層でネクトンなどに捕食される事で有機炭素の中・深層への輸送が行われることになる。さらに、表層水が沈降流などで物理的に中・深層に沈み込み表層に存在した有機炭素が中・深層に輸送されることも生じる。

Nowicki et al.(2022)は、衛星観測と現場での生物地球化学的な観測の結果を生物ポンプのアンサンブル数値モデルに同化させることで、全球と各海域で炭素輸送と深層での隔離の定量化を試みている。その結果、全球の炭素の深層輸送の70%は粒状有機物の物理的な沈降である重力ポンプが担っており、その内訳は85%が動物プランクトンの糞粒子、15%は植物プランクトンの凝集体の沈降が占めた。沈降の残りは動物プランクトンの鉛直移動によるものが10%、残りの20%は沈降流などの物理的混合が担っているとしている。

図4は、このようなプロセスを反映した海洋での無機炭酸の鉛直分布を太平洋と大西洋で示している。この図で表層での炭酸濃度は、大気中との平衡値を反映しており、一方1000m位までの深さへの濃度の増加は表層からの沈降有機物の分解による全炭酸の付加を示している。従って、表層での一次生産による粒子状有機物の生産とその海洋深部への沈降が持続し、物理的な中・深層水の表層への循環速度とバランスすることで、無機炭酸の深層での蓄積を示す濃度勾配が維持される事になる。なお、中・深層水では大西洋の方が表層から隔離された時間が短いため、無機炭酸の蓄積量は太平洋に比べると濃度が低い。”生物ポンプ“はこの二酸化炭素の濃度勾配を維持する機能を表す用語として付けられたが、これが海洋の生物を利用したCDRの発想の基になっている。モデル計算によればもしもこの”生物ポンプ“が停止し、無機炭酸の勾配が無くなると、海洋は数百年の間に大気中のCO₂濃度を200ppmv上昇させるCO₂を放出する事になると推定される (Sarmiento & Toggweiler, 1984)。

海洋表層での一次生産という有機物粒子の生成には、無機炭素だけでなく、主要栄養塩としての窒素、リン、シリカや微量栄養塩としての鉄などの供給も同時に考える必要がある。粒状有機物が沈降する中・深層において、窒素やリンのような表層での一次生産の必須要素である栄養塩を、Regenerated NutrientsとPreformed Nutrientsに分けて考えると、これら栄養塩と炭素循環との関係が理解しやすいのでここで説明しておく。ここでは表層から躍層や深層水が新しく形成された時、表層から沈降した水塊にもともと含まれる栄養塩をPreformed Nutrientsと定義する。これは表層で生物生産に使われず残った栄養塩である。一方、中・深層では、表層から沈降した有機物の分解により、窒素やリンも無機化され栄養塩に戻りその水塊に追加されるので、この分画をRegenerated Nutrientsと定義する。従って、中・深層中の栄養塩はこの二つの分画の合計になる。このRegenerated Nutrientsの分画は、外洋域では沈降有機物の好氣的な分解により生成されたと見なす事が出来る。そこで表層で酸素飽和の状態の水塊が大気との接触を断たれた後での有機物分解に使われた溶存酸素の消費量であるApparent Oxygen Utilization(AOU)と、沈降有機物の平均的なC:N:P比を使ってRegenerated Nutrientsの量を推定する事が出来る。この中・深層における栄養塩の生成は同時に沈降有機物からの無機炭酸の生成を意味するので、これを生物ポンプによる

二酸化炭素の隔離量とも考える事が出来る。従って、この手法で中・深層での無機炭素を生物ポンプに由来した無機炭素と元々の表層での大気との平衡でもたらされたものに分けて評価する事が出来ることになる。

Ito & Follows(2005)は海洋での生物ポンプの効率を栄養塩の利用のされ方で表現することを提案し、リンを使って海洋に存在する全無機リン酸の栄養塩に占める Regenerated Nutrients の無機リン酸の割合を推定した(図5)。その結果全球で見ると現在の海洋では、再生産リンの全体での比率は36%であることが示された。この結果は、表層での鉄などの微量栄養塩の律速や深層水形成の物理的な働きにより、表層に存在する無機リン酸の半分以上が一次生産に使われることなく、中深層へ循環している事を表している。なお、生物ポンプの中で有機物生成を伴う場合にはこの栄養塩との関係が生じるが、生物ポンプの中で炭酸塩化合物による殻生成に伴う場合はこれには含まれない。

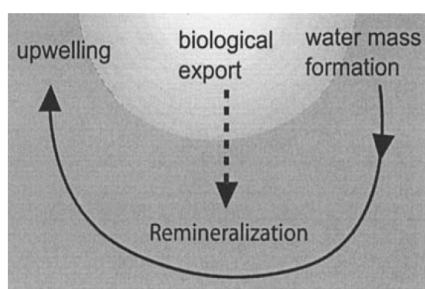


図5 海洋での主要な栄養塩の循環模式図。湧昇した栄養塩は（1）生物による取り込みと下層への輸送と（2）表層からの沈降でバランスしている。ここでは、陸や堆積物との栄養塩のやり取りは無視した。

このように、（1）海洋は大気に比べて約60倍もの量のCO₂を保持している巨大な貯留庫であること、（2）人為的に大気に放出されたCO₂のかかなりの部分を既に海洋は吸収していること、（3）幾つかの物理的、地球化学的、生物学的プロセスが大気・海洋間のCO₂の交換と海洋での貯留に影響を与えていることなどが、これまでの研究から明らかにされている。なお、地質年代的に見れば、大気中の二酸化炭素濃度は、海洋の深層循環、海洋での炭酸塩化合物の堆積や再溶解、さらには数10万年ではケイ酸塩鉱物の風化によって大気から除去されると考えられる。一方、現状ではこれらの自然プロセスは大気への人為的なCO₂の放出の速度が速すぎるために、自然現象による大気からの除去速度が追いついていない状態となっていると考えられる(Lords et al. 2016)。従って、これら自然界で行われている大気や海洋表層からのCO₂を除去し、それを海洋深部か地質的な環境に一定期間貯留する様々なプロセスを、人間活動で大きく加速させる事が可能ならば、来る世紀における気候変動や海洋表層での酸性化といった現象を抑制することが出来る可能性はある。

4 CDRに関する共通な課題—特に法的な問題について—

現在、海洋で提案されているCDRの技術が、その実効性を確保するためには極めて広い海域を利用して行う必要がある事は明らかである。また、提案されているCDRの手法の内、海洋のアルカリ化などは、海洋に多量の添加物を投入する事を計画している。一方、既に大規模化の試みが行われている陸域でのCDRの場合は、国際的な取り決めはあっても基本的にはそれに準拠した各国の国内での法規制のもとで実施されている。しかし、国連海洋法条約の下で海洋の国際的な統治は複雑であり、海洋におけるCDRの法的な問題はいまだ断片化された状態に留まっているとされる(NASEM 2022)。これは海洋の約60%は公海と呼ばれるどの国の管轄下でも無く、国際法の元で全ての国に開かれている一方で、残りの40%は沿岸国が排他的経済水域(EEZ: Exclusive Economic Zone)として、その利用の法的な根拠を持っていることが課題をさらに複雑にしている。このように海洋におけるCDRは、その海域により様々な国際的あるいは沿岸国の法的な規制を受けることになるが、現在の所国際法上あるいは例えばアメリカにおける国内法においても、

海洋での CDR に関する統合的な法的な枠組みは存在していない (NASEM 2022)。

上記のように海洋での CDR に特化した国際的、国内的な法的枠組みは無いものの、海洋での CDR の活動は一般的な環境やその他の法規制の対象になり得る。しかし、これらの既存の法規制は別の活動を対象に出来ているので、その適用性などに関してははっきりしない所が多い。なお、鉄散布のような個別な CDR に関しては、後で述べるように既に存在する国際的な合意の下で規制することが過去に行われたが、これについても国際的な法の枠組みとのギャップが存在する (Brent et al. 2018, 2019)。従って、既存の海洋での法的枠組みを CDR の開発に当てはめる事による課題を含め、このような活動に対する新しい包括的な枠組みの開発が必要であることが従来から言われている。海洋の CDR に関するはっきりした整合性の取れた法的な枠組みの開発は、CDR の研究開発や必要と判断された時におけるスケールアップした実施を進展させるには必須であり、同時に CDR としての計画が安全で環境的にも健全な形で行われるかどうかを保証する事にも繋がる。特に、環境へのネガティブな影響を最小限に抑えるには、このような法的なセイフティガードが用意されることが、投資家や、政策決定者、その他のステークホルダーの間での信頼性を確保するにも重要である。ここでは以下に海洋での CDR に関する法的な課題について、主に既存の国際法での検討や考察が行われている事例を挙げて検討する。

4-1 国連海洋法:United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS)。

海洋での法的ガバナンスについては、1982 年に制定された国連海洋法 United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) が基本的な枠組みを決めている。この膨大な国際法により海洋での様々な活動は統治されているが、具体的には海洋での通行権、海洋汚染、漁業などこの条約の制定当時に課題となっていたことを中心にまとめられたものであり、制定された当時はどの国も海洋での CDR など想定していなかったことは事実である。

海洋での CDR に関してはまず科学的な調査や研究から始まるが、この条約では沿岸国の EEZ 内の海洋に関する科学的な研究や調査を行う時のルールとして、対象となる沿岸国へのその内容の事前通告を義務付けている。また得られたデータの共通性の確保など海洋調査データの透明性を保証するための規定もある。さらに、この条約では沿岸国による海洋環境の保全義務が謳われている。海洋の CO₂ を吸収する能力は海洋の持つ自然資源の 1 つとも考えられるので、海洋での大規模な CDR は各沿岸国の権利を侵す可能性もある。特に水塊の場合はその移動を制御するのは難しいので、他国の EEZ 内への影響を完全に避けるのは難しい。海洋法の中で、漁場の保全を確保する Straddling Fish Stock Agreement に関しても海洋汚染を規制しており、海洋への鉄やアルカリの付加は、海洋への汚染にあたるかどうかの議論もあるが (Scott 2013)、これに関してはロンドン条約の項で検討する。

4-2 国連気候変動枠組条約:The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)、および 京都議定書: Kyoto Protocol, パリ協定: Paris Agreement

国連気候変動枠組条約は、1994 年から発効した地球温暖化に対する様々な取り組みを決めた国際的な条約であり、現在 196 か国が批准している。この国際的な枠組において地球温暖化に対する具体的な取り決めを示している京都議定書は 2005 年に実施に移され、パリ協定は 2016 年に実施に移された。これまでの研究ではこれらの温暖化に関する国際条約においては CDR の技術を温暖化を緩和するために使う事が明示的に容認しているとされる (Reynolds 2015; Craik and Burns 2016; Brent et al. 2019)。すなわち、大気気温が危険な状態になることを防ぐためには、先進国がより積極的な大気中の CO₂ の減少を拡大することを UNFCCC は要求しており、この為には海洋を含めた CDR は必須の手法であると言う考えである。なお、海洋における CDR の中で、既に 27 か国が沿岸での CO₂ の貯留促進であるブルーカーボンを記載しているとの報告がある (Gallo et al. 2017)。一方、これは沿岸域の生態系の回復を狙ったものであり、海洋環境に対してもポジティブな影響を与えることが研究で立証されているものである点は、他の CDR とは異なっている事には注意が必要である。

4-3 生物多様性条約:Convention of Biological Diversity(CBD)

生物多様性条約は、国際条約として1993年に発効したもので2021年には196か国がこれに加盟している。この条約は、地球での生物多様性の保全とその構成員の持続的な利用の促進を目的としたものであり、海洋生態系も保全の大きなターゲットとなっている。この条約では海洋での栄養塩付加やその他の地球工学的な手法の活動に関して、すでに幾つかの非拘束的な決定（Decision）を行っている。その1つが2008年に採択された、Decision IX/16であり、これは科学的な調査研究を除く海洋での栄養塩添加の活動を、これに関するしっかりした規制が出来、科学的な知見が蓄積するまでは避けることを求めている。なお、この決定には、カーボンオフセットや他の商業的な目的でこの活動を行う事を禁止することも記載されているが、2010年にはさらにCBDはDecision X/33を採択した。この決定では生物多様性に影響を与える規模での大気からのCO₂の除去に関する技術をより広く地球工学的な活動と呼び、環境や生物多様性の劣化を生じる可能性のある地球工学的な手法に対し、その恐れが無くなるまでは停止を求める内容である。この場合は気候変動に関係した地球工学的なアプローチと言う表現を取っており、対象とされるCDRは極めて包括的である。

このように生物多様性条約としては、海洋生態系に影響のある全球的な海洋での操作実験は、その影響がはっきりするまではやってほしくないと言う姿勢である。しかしこれらは非拘束的な決定であり、また、書き方も柔らかいので拘束力はあまり無いと考える研究者もいる（Brent et al. 2019; Webs et al. 2021）。例えば、Brent et al. (2019)は、CBD の決定にある海洋のCDRに関する研究を科学的な目的に限り、カーボンオフセットや他の商業的な目的で行う事を禁止する条文は、海洋でのCDRの様々な研究を制限するものであり、パリ協定の達成に必須と考えられるCDRの近未来での実現を阻害するものと述べている。

4-4 ロンドン条約およびロンドン議定書:London Convention and Protocol

これらは海洋への投棄物による海洋汚染を防止するために作られた国際的な取り決めで、ロンドン条約の方は1975年に実効となり、ロンドン議定書の方は2006年に実効となった。2021年の時点で加盟している国の数がこの二つで異なり、前者は87か国に対し後者は53か国と少ない。この二つの取り決めはいずれもが廃棄物の海洋投棄を禁止したものであるが、ロンドン条約の方は8つの投棄物のブラックリストがあり、その中に含まれなければOKである。一方、ロンドン議定書の方は投棄しても良いホワイトリストを決め、それ以外は全部禁止する取り決めである。表1にブラックリストとホワイトリストを示した。

表1 ロンドン条約およびロンドン議定書で“Blacklist” および“Whitelist” として掲載されている物質のリスト

Blacklisted Substances Under the London Convention ^a	Whitelisted Substances Under the London Protocol ^b
1. Organohalogen compounds	1. Dredged material
2. Mercury and mercury compounds	2. Sewage sludge
3. Cadmium and cadmium compounds	3. Fish waste and material resulting from industrial fish processing operations
4. Persistent plastics and other persistent synthetic materials	4. Vessels, platforms, and other manmade structures
5. Crude oil, petroleum, refined petroleum products, distillate residues, and oil wastes	5. Inert, inorganic geological material
6. Radioactive matter (except that containing de minimis levels of radioactivity)	6. Organic material of natural origin
7. Materials produced for biological and chemical warfare	7. Bulk items “comprising iron, steel, concrete or similarly unarmful materials” (subject to some limitations)
8. Industrial waste generated by manufacturing or processing operations	8. Carbon dioxide streams from carbon dioxide capture processes for sequestration.

これらの法体系において海洋でのCDRの内の幾つかは、そのフィールドテストやそのアップスケールへ

の展開に対して関係するものが存在する。まず、殆どの海洋でのCDRの場合、ロンドン条約が禁止している8つの物質に該当するものはないので、ロンドン条約の下では問題ないと考えられる(Freestone and Rayfuse 2008; Scott 2013; Webb et al. 2021)。しかし、ロンドン議定書ではホワイトリストに掲載されていない物質は不可なので、鉄、窒素栄養塩散布やアルカリ化は、この条文での廃棄に相当する可能性があるとの見解で、その例外は海藻養殖でこれはホワイトリストにある“自然起源の有機物”に相当するとの意見がある(Freestone and Rayfuse 2008; Scott 2013; Webb et al. 2021)。

2008年にロンドン条約及び議定書では、非拘束の文書”LC-LP. 1. 2008”を採択し、ここでは海洋での鉄散布などの富栄養化プロジェクトはこの条約と議定書での“投棄”とみなすべきとした。そして、研究目的とそれ以外の場合を区別して扱い、研究目的についてはこれを容認する内容である。また、2010年には“海洋の富栄養化を含む科学的研究の道筋に関する文書”が採択され、ここでは海洋での鉄散布について、科学的な研究にふさわしいものとしての第一段階を、鉄散布による海洋生態系等への影響とその緩和の評価を挙げ、二段階のアセスメントの実施を認めている。なお、これらの段階の研究に際しても、これを実施する国は関係国を含むすべての利害関係者との協議をすることを規定している。また、その先のステップへの進展についても書かれているが、これはかなり抑制的である。さらに、2008年の文書”LC-LP. 1. 2008”では非研究的な海洋富栄養化の計画はロンドン条約の意図に反するものであると明示されているが、これも非拘束的な決定である。現在の所ロンドン条約関係は、海洋での鉄散布に関しての規程しか出していないが、他のCDR手法に関してもGESAMPなどとの協議を経て今後検討が行われるようになるとされている(Brent et al. 2019; Webb et al. 2021)。

4-5 国際条約上での海洋のCDRについてのまとめ

上記に各国際条約での海洋でのCDRに関する見解やその検討状況を示したが、現状では海洋でのCDRに関しては異なる国際条約で異なる見解がなされているように見える。すなわち、温暖化の進展を止めるためには、海洋を含めたより積極的なCDRを進展させることが必要と考える国連気候変動枠組条約(UNFCCC)と、海洋生態系の保全を第一に考える国連生物多様性条約(CBD)との違いが大きい。また、ロンドン条約およびロンドン議定書は、この間にあって海洋でのCDRの実施と言う時代の要請を、海洋環境の保全の立場から様々なステークホルダーの立場を考慮して具体的な検討を行う役割を果たしているように思われる。

本報告書のもとになった(NASEM 2022)の立場は、国際的に海洋でのCDRのための強固な法的枠組みを確立することの優先性と重要性を強調している。つまり、法的な枠組みをCDRに関して国際的に確立することが、研究調査および適切と判断された場合のアップスケールが、環境およびその他の悪影響のリスクを最小化する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な基礎であるとの見解である。既に述べたように、現在海洋CDRの研究や配備に関する包括的な法的枠組みは国際的には存在しない。国際レベルでは、特定の海洋CDR技術-特に海洋鉄散布-を既存の国際協定に基づいて規制するための措置が取られているが、大きな不確実性とギャップが残っている。

米国国内での初期の研究では海洋CDRの研究と展開には、さまざまな一般環境法およびその他の法律が適用される可能性があることが示唆されている。しかし、これらの法律は本来他の活動を規制するために開発されたものであり、海洋CDRには適していない可能性がある。EEZ内の海洋では沿岸国の国内法が適用され、また、それが国際的な条約に発展する場合も多い。従って、さまざまな海洋CDR技術に適用される米国の法律の全範囲を評価し、可能な改革を検討するためのさらなる法的な枠組みの研究を望む意見もある(Mcgee et al. 2017)。海洋でのCDR技術の理解を深めるためのさらなる研究の必要性和、そのような研究の潜在的なリスクとの適切なバランスを確保するための法的枠組みを強化するための可能な改革を進め、そのもとに環境その他の悪影響を防止または最小化するための適切なセーフガードを設置する必要があると報告書では考えている。

文献

- Brent, K., J. McGee, J. McDonald, & E. J. Rohling (2018). International law poses problems for negative emissions research. *Nature Climate Change* 8(6):451-453. doi:10.1038/s41558-018-0181-2.
- Brent, K., W. Burns, & J. McGee (2019). Governance of Marine Geoengineering. Waterloo, ON: Centre for International Governance Innovation.
- Craik, A. N., & W. C. G. Burns (2016). Climate engineering under the Paris Agreement: A legal and policy primer: Special Report. In *Center for International Governance and Innovation White Paper*. Waterloo: Centre for International Governance Innovation
- DeVries, T. (2022). The ocean carbon cycle. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 317-341.
- Dickson, A. G. (1981). An exact definition of total alkalinity and a procedure for the estimation of alkalinity and total inorganic carbon from titration data. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers* 28(6):609-623. doi:10.1016/0198-0149(81)90121-7.
- Freestone, D., & R. Rayfuse (2008). Ocean iron fertilization and international law. *Marine Ecology Progress Series* 364:227-233. doi:10.3354/meps07543.
- Gallo, N. D., D. G. Victor, & L. A. Levin (2017). Ocean commitments under the Paris Agreement. *Nature Climate Change* 7(11):833-838. doi:10.1038/nclimate3422.
- 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*, P. W. Boyd and C. M. G. Vivian, eds. GESAMP Reports & Studies Series. London: International Maritime Organization
- Gruber, N., D. Clement, B.R. Carter, R.A. Feely, S. Van Heuven, et al. (2019). The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science*, 363(6432), 1193-1199.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [P.R. Shukla, J. Skea, A. Reisinger, R. Slade, et al. (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001
- Ito, T., & M.J. Follows (2005). Preformed phosphate, soft tissue pump and atmospheric CO₂. *Journal of Marine Research* 63,813-839.
- Lord, N. S., A. Ridgwell, M. C. Thorne, & D. J. Lunt (2016), An impulse response function for the “long tail” of excess atmospheric CO₂ in an Earth system model. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 2–17, doi:10.1002/2014GB005074.
- McGee, J., K. Brent, & W. Burns (2017). Geoengineering the oceans: an emerging frontier in international climate change governance. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs* 10(1):67-80. doi:10.1080/18366503.2017.1400899.
- NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) (2019). Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press.
- NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) (2022). A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>.
- National Research Council (2015). Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18805>.
- Nowicki, M., T. DeVries, & D.A. Siegel (2022). Quantifying the carbon export and sequestration pathways of the ocean's biological carbon pump. *Global Biogeochemical Cycles*, 36, e2021GB007083. <https://doi.org/10.1029/2021GB007083>
- Reynolds, J. (2015). The international legal framework for climate engineering. SSRN Electronic Journal.

doi:10.2139/ssrn.2586927.

Sarmiento, J. L., & J. R. Toggweiler (1984). A new model for the role of the oceans in determining atmospheric $P\text{CO}_2$. *Nature* 308 (5960):621-624. doi:10.1038/308621a0.

Scott, K. N. (2013). Regulating ocean fertilization under international law: The risks. *Carbon & Climate Law Review* 7(2):108-116.

Siegel, D. A., T. DeVries, S.C. Doney, & T. Bell (2021). Assessing the sequestration time scales of some ocean-based carbon dioxide reduction strategies. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104003.

Siegel, D. A., T. DeVries, I. Cetinić, & K.M.Bisson (2023). Quantifying the ocean's biological pump and its carbon cycle impacts on global scales. *Annual Review of Marine Science*, 15(1), 329-356.

Webb, R. M., K. G. Silverman-Roati, & M. B. Gerrard (2021). Removing Carbon Dioxide Through Ocean Alkalinity Enhancement and Seaweed Cultivation: *Legal Challenges and Opportunities*. Columbia Public Law Research Paper: Sabin Center for Climate Change Law. https://scholarship.law.columbia.edu/faculty_scholarship/2739.

経済産業省、2023, ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会とりまとめ
理科年表、2023 年 丸善出版