

2.4 大気中CO₂除去

2.4.1 ネガティブエミッション技術

(1) 研究開発領域の定義

気候変動緩和のため、大気中の二酸化炭素（CO₂）吸収・固定効果の評価に関する研究開発や技術開発を扱う領域である。農林水産業に関する内容を主に扱う。農林業分野では、植林、森林管理、バイオ炭、岩石による風化促進などが対象である。水産業分野では、ブルーカーボン生態系の利活用、品種改良、養殖技術、漁場整備、資源管理などが含まれる。なお、農林水産資源の利活用、および気候変動適応の評価に関しては「2.8.2 農林水産業への気候変動影響評価・適応」で扱う。

(2) キーワード

植林、森林管理、バイオマス、土壌保全、土壌炭素貯留、バイオ炭、ブルーカーボン、自然を活用した解決策（Nature-based Solutions：NbS）、難分解性溶存態有機炭素、深海輸送

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2021年に英国グラスゴーで開催された気候変動枠組条約第26回締約国会議（COP26）では、パリ協定の1.5℃努力目標達成に向け、今世紀半ばのカーボンニュートラル及びその経過点である2030年に向けて野心的な気候変動対策を締約国に求めた。全ての国に対して、排出削減対策が講じられていない石炭火力発電の通減及び非効率な化石燃料補助金からのフェーズ・アウトを含む努力を加速すること、先進国に対して、2025年までに途上国の適応支援のための資金を2019年比で最低2倍にすることを求める内容となった。全ての国は2022年に2030年までの排出目標、各国の国が決定する貢献（NDC）達成に向けた取組の報告様式を全締約国共通の表形式に統一することが合意された。日本政府が決定したNDCでは、2030年度の温室効果ガス（Green House Gases：GHGs）目標排出量・吸収量は7億6千万トンCO₂-eqで、2013年の14億トンCO₂-eqと比較して46%の削減が示されている。この2030年の目標値には、GHGs吸収源4千700万トンCO₂-eqが新たに計上されている。これは2013年段階ではなかった数字である。ネガティブエミッション技術は、この新たな「GHGs吸収源」を創出する技術であり、これを2030年時点において実現する使命を負っている。GHGsのなかでも、CO₂を対象に検討が進んでいる。各産業セクターの努力によって排出源での削減取り組みは進むことが期待されているが、それだけではゼロエミッションに到達できない。最大の削減努力によって到達した排出量をさらにネガティブエミッション技術による相殺が求められる¹⁾。

[研究開発の動向]

〈A. 陸域〉

[a1. 植林・再造林]

- ・陸域の広い面積を占め、樹木と土壌に炭素を貯留している森林へのネガティブエミッション技術への期待は高い。様々な技術を適用可能でかつ評価しやすい農地と比べて、森林では基本的には植林と森林管理に限られる。植林は一つのわかりやすい炭素固定方法であり世界各国で植林が促進される一方で、他の生態系サービスや他の生態系の保全、食料生産との土地利用の競合など、バランスのとれた植林の展開が検討されている。これまで森林の炭素循環の研究の事例は膨大に存在するが、ネガティブエミッションに資する森林管理はいまだ研究途上であり、どのような森林管理を行えば森林の炭素固定能力を最大化できるのかについて、各国で研究が進められている。その研究では観測に加えて、モデルを用いた評価が進められている。

- ・エリートツリー（早生樹）：既存の樹種以外に、新規の造林樹種を開発することで、炭素固定能を向上させる木質資源を創出する必要がある。九州大学は、センダン、チャンチンモドキなどの樹種の国産早生樹としての育成について報告している²⁾。（※エリートツリーとは特定母樹由来の苗木（特定苗木）のことを指す。特定母樹とは間伐等特措法に基づき、森林のCO₂吸収固定能力の向上のため、成長に係る特性の特に優れたものと指定されたものを呼ぶ。指定基準は、成長性が在来系統と比較して1.5倍以上、花粉量が一般的なスギ・ヒノキの半分以下、幹の通直性の曲がりがないなどである。）

[a2. 土壌炭素貯留]

- ・農地土壌に蓄積する炭素量の増減を計算し、土壌のCO₂吸収量として示した『土壌のCO₂吸収「見える化」サイト』がウェブ公開されている。対象とする農地を地図上で選び、栽培する作物や栽培管理方法を選択することで、その農地の土壌炭素量の変化が予測できる。

[a3. バイオ炭]

- ・バイオ炭（Biochar）とは、生物資源を材料とした、生物の活性化および環境の改善に効果のある炭化物のことを指し、近年国際的に認められるようになった。バイオ炭については、土壌炭素貯留（吸収源）の算定方法が、“2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use”に提示された。NEDOは、2022年8月にバイオ炭に関する事業公募「グリーンイノベーション基金事業/食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発」を発表した。事業期間は2022～2030年度の最大9年間としている。「2050年カーボンニュートラル」に向け、官民で野心的かつ具体的な目標を共有した上で、これに経営課題として取り組む企業等に対して、長期に渡り、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援する「グリーンイノベーション基金事業」の一環として、NEDOは「食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発」に係る技術開発事業を実施する予定としている。この中で、「高機能バイオ炭等の供給・利用技術の確立」を項目の1つに掲げている。

[a4. BECCS]

- ・BECCS（Bio-Energy with Carbon Dioxide Capture and Storage）は、バイオマスエネルギーの利用とCO₂回収貯留を組み合わせた技術である。ネガティブエミッション技術の一つとして位置づけられている。例として、石炭火力発電の混焼にバイオマスを燃料の一部として使用した上で、排出されるCO₂を90%回収・固定するならば正味の排出が負となる³⁾。このとき、混焼用のバイオマスの混焼率を13.6%以上にすることが必要である。
- ・火力発電のように元来化石燃料を燃焼させてCO₂を排出させる過程であっても、バイオマスを燃料源に置き換えることでカーボンニュートラルの比率を高め、さらに排出されるCO₂の大部分を回収すれば、固定したCO₂にバイオマス起源のものが加わることでネガティブエミッションを実現しながらの発電が可能となる。発電以外にもバイオマスの発酵により液体燃料を得ながら、生成するCO₂を回収貯留する方法もBECCSである。世界的なカーボンニュートラルの急進を受けて、将来の技術と見なされていた「CCUS（Carbon dioxide Capture Utilization and Storage：CO₂回収・有効利用・貯留）」についても、できる限り早期での社会実装が期待され始めた。BECCSはCCUS技術としても期待される。
- ・バイオマスの燃焼によって発生したCO₂を回収・土蔵する技術。バイオマスを燃焼または発酵させることでCO₂が排出されるが、そこに含まれる炭素は光合成で大気中から吸収したCO₂であるため、バイオマスを燃焼または発酵させてエネルギー利用をしても、大気中のCO₂は増加しない（カーボンニュートラル）。さらにCCS（Carbon dioxide Capture and Storage：CO₂回収・貯留）を組み合わせることで、CO₂を回収・貯留するため、CO₂排出量は差し引き正味で負になり、「ネガティブエミッション」を達成できる。

- ・ BECCSに用いるバイオマスとしては様々なものが利用可能である。主に、食用作物による第1世代バイオエネルギー作物（サトウキビ、トウモロコシなど）、非食用である第2世代バイオエネルギー作物（ススキ、ナンヨウアブラギリ、ポプラなど）、廃棄物（廃食用油、食品廃材、下水汚泥）、農作物の残渣（稲わら、トウモロコシの茎など）、木材及び林業での残渣、藻類（研究開発中）などがある。バイオマスエネルギーの供給量は、将来的には増加すると考えられるが、BECCSに利用できるバイオマス量は、食料需給との関係やエネルギー効率などの様々な要因によって制約を受ける。食料需給とエネルギー使用のバランスが崩れると、穀物の高騰を引き起こすなどのリスクもある。

[a5. DACCS]

- ・ 大気中のCO₂を直接回収するDAC (Direct Air Capture: 直接空気回収)とCCSを組み合わせた「DACCS (空気中CO₂直接回収・貯留)」⁴⁾がある。大気中から空気を直接集めた後に、CO₂を溶剤によって化学的に特殊な液体に吸収させて分離する方法や、選択的に透過する膜で分離する方法などでCO₂を回収する手法が考案されている。
- ・ DAC運用に必要な敷地は、植林や他のCO₂削減技術と比較して圧倒的に小さな面積で済むとされている。CO₂の貯留や利用など用途に合わせた回収場所が選択でき、より効率的にCO₂の回収が実現できる可能性がある。回収したCO₂を利用する場合、工場を適切な貯蔵場所や利用場所の近くにDACを設置すれば、CO₂輸送コストが削減できる。現段階ではBECCSと比較しても2倍程度コストが高いことが問題点として指摘されている⁵⁾。

[a6. 風化促進]

- ・ 玄武岩などの岩石を粉砕・散布して、風化を人工的に促進する技術である。風化の過程でアルカリ性の玄武岩とCO₂の化合によって炭酸塩を形成してCO₂を固定化する。
- ・ 英国シェフィールド大学は、土壌での「岩石風化促進法 (enhanced rock weathering)」に大きな技術的、経済的可能性があると報告している⁶⁾。玄武岩や鉄鋼スラグなどの工業用ケイ酸塩材料は、破碎して土壌に添加すると徐々に溶解し、CO₂と反応して炭酸塩を生じる。炭酸塩はそのまま土壌中にとどまることもあれば、海まで流されることもある。この技術によって毎年5億～20億tのCO₂が大気から除去できる可能性がある。

[a7. EOR]

- ・ 原油回収促進 (Enhanced Oil Recovery: EOR) は油田における石油回収技術のひとつである。石油の回収段階は3段階に分かれている。1段階目は油田からの自噴による回収、2段階目は、水圧・ポンプくみ上げ等動力を要する回収、3段階目は1、2段階目の回収では取り出せない約60%の埋蔵石油をさらなる気体圧入、熱水注入などによって回収する技術である。EORと類似の用語である改良型石油回収法 (Improved Oil Recovery: IOR) は2次回収と3次回収を併せた概念である。EORは3次回収のみを指す。この3次回収においては圧入用の堅坑 (圧入井、injection well) からCO₂などを地中の石油滞留層に圧入する。この圧力によって、回収井から石油が取り出される。このとき、圧入したCO₂量が、取り出される石油にともなって排出されるCO₂の量を上回れば、地中にCO₂が貯留されたと理解される。このことから、EOR技術は、CCUSの一つと位置付けられている。

〈B. 海域〉

[ブルーカーボン]

(吸収機能の向上)

- ・ ネガティブエミッション技術としてのブルーカーボン生態系による炭素貯留技術の研究開発は、単位面積

当たりの吸収量（吸収係数と呼ばれる）の評価・向上技術と、分布面積の把握・拡大技術に大別される。吸収量評価・向上に関わる研究開発では、2009年に国連環境計画（UNEP）が中心となって作成した「ブルーカーボン・レポート」が公開されて以降、一貫して天然（自然海岸）のブルーカーボン生態系を対象に有機炭素貯留プロセス（植物残渣海洋貯留プロセス）の解明に関する研究が実施されてきた⁷⁾。特に海草藻場、マングローブ林、塩性湿地では、2006年にIPCCが公開したGHGs排出・吸収源インベントリへの評価手法のガイドライン⁸⁾の追補版として、2013年にIPCCが公開した湿地ガイドライン⁹⁾に掲載された手法に基づき、各生態系内の土壌貯留速度の評価が進められた。IPCC湿地ガイドラインでは、Tier1の標準値としてマングローブ林が-1.62トンC/ha/year、塩性湿地が-0.91トンC/ha/year、海草藻場が-0.43トンC/ha/yearの値が示されている。しかしながら、海草藻場の標準値は地中海に多いPosidonia属の数値が引用されたものであり⁸⁾、この値では海草藻場で最も広く分布するZostera属や他の海草種に関する数値を求め、各地域でTier2あるいはTier3での算定に使用することが困難であった。そのため、生態系内の土壌貯留速度の評価に関する研究は、現在も引き続いて各地で実施されている。

- ・2013年以降、生態系内の土壌貯留に加えて、生態系外での貯留も生態系内の土壌貯留の科学的根拠を示す研究がなされるようになった。特に海草藻場において、流れ藻となった草体が藻場外の浅海域の海底土壌に堆積する貯留速度¹⁰⁾、さらに沖合に流出して深海で堆積する貯留速度^{11), 12)}の科学的根拠が蓄積され始めている。そのため、IPCC湿地ガイドラインに準拠する土壌貯留は、藻場内だけでなく、これら藻場外での貯留も含める形で解釈されるようになった¹³⁾。
- ・2016年頃より、UNEPブルーカーボン報告書では知見不足で算定が見送られていた海藻類について、深海貯留や難分解性有機炭素による海中貯留の科学的算定の事例が報告されるようになった¹⁰⁾。特に、海草や海藻類が成長する過程で草藻体から放出する溶存態有機炭素に含まれる難分解成分が、ブルーカーボンの残渣貯留に貢献する例が報告されるようになった¹⁴⁾。海藻ホンダワラ類では、少なくとも年間一次生産量の10%以上が炭素貯留されている結果が報告されている。海洋国家の首脳陣で構成されたハイレベル・パネルが2019年に公開した報告書でも¹⁵⁾、海藻類がブルーカーボン生態系に含まれるようになっている。ブルーカーボン生態系に関連した、もう一方の削減ポテンシャルとされる海洋肥沃化の範疇では、海藻類は従来のブルーカーボン生態系の植物群よりも海中栄養塩濃度に対する要求や応答が大きいと、肥沃化による削減ポテンシャルにも大きく影響すると考えられる。これらの動きは、2020年から開始された農林水産省におけるブルーカーボンに関連した技術開発研究にも影響を与えている。農林水産省では、日本のGHGsインベントリ報告書へ海洋の貢献を登録する一助とするため、「ブルーカーボンの評価手法および効率的藻場形成・拡大技術の開発」を2020年度から5年間の委託研究プロジェクトとして開始している。このプロジェクトではIPCC湿地ガイドラインの算定手法に準拠しつつ、海藻類も含めた評価手法の構築が進められている¹⁶⁾。
- ・日本の周辺に生息する海草・海藻類を分布域や生活史、炭素貯留プロセスの類似性から多数のタイプに分類し、国内すべての海草藻場・海藻藻場での吸収係数をタイプ別に評価することを目指している。吸収係数は4つの植物残渣貯留プロセスからなり、上述したように科学的根拠を有する藻場内の土壌貯留、藻場外の土壌貯留、深海貯留、溶存態有機炭素の海中貯留が該当する。現在は、これら貯留プロセスの検証事例を増やし、科学的根拠をより強固にするための研究が進められるとともに、各プロセスの貯留速度を向上させるための研究開発も開始している。

(生態系の観測技術)

- ・ブルーカーボン生態系のうち、特に藻場は完全に海面下に没した海中林であるため、その分布状況や面積把握においては、衛星等による観測が可能な陸域の植物観測よりも困難である。これを打開するためのリアルタイム観測技術開発¹⁷⁾、海洋環境要因からの藻場分布推定モデルの開発が進められている¹⁸⁾。

リアルタイム観測技術では、航空機・UAVによる海中透過撮影（高解像度可視光、LiDARなど）による撮影画像解析が有効である。特に局所的・精緻な観測では無人航空機（UAV）が必要となるが、日本はUAV開発が遅れており、現時点では安価で高性能な汎用型国産機は存在しない。現時点で国内プロジェクトとして開発中の機体も価格が高く、同程度の性能を有する他国製UAVの10倍以上である。衛星画像を用いた解析であっても、広域・多点での現地証拠（Sea truth）を得るためにUAVの活用が有効であるため、汎用型UAVの早期開発が待たれるところである。

- リアルタイム観測された海水温、塩分、波浪等の物理環境データ、海底・海岸線地形データをパラメータとした海草・海藻種の種分布推定モデルを構築し、モデル解析によって藻場植生の分布推定を行う技術開発が進められている。ただし、こちらの手法でも広域・多点での現地証拠の測定が必須である。現状では潜水者による観測、船舶搭載の音響探査等を用いて現地証拠の測定が実施されているが、多大な労力がかかる上にCO₂排出の面からも好ましくない。これらに代わる観測手法として、こちらでも汎用型UAVの開発が待たれる。

（食害対策）

- 陸域の森林・草地における獣害と同様に、ブルーカーボン生態系でも食害による植生衰退が生じている。特に温暖化によって南方系の植食性魚類が北上し、温帯域地域での植食圧が高まり、食害の影響が国内外の各地で頻発している¹⁹⁾。日本の周辺においては、アイゴ類・イスズミ類、ブダイ類といった魚種の北上に加えて、クロダイやカワハギ類などの在来魚種による食害も深刻化している。食害は天然藻場だけでなく海藻養殖に対しても深刻化しているため、食料生産の観点からも各地で対策技術の開発が必要とされている。

（4）注目動向

大気中CO₂の吸収・固定化の過程に、人為的な工程を加えることで加速される技術やプロセスは、鉱工業、農林水産業など様々な分野に及んでいる。考え方も様々といえる。

〈A. 陸域〉

[a1. 植林・再造林]

- J-クレジット制度の活性化：カーボンニュートラルの実現に向けて、ますますその重要性が高まっている炭素除去・吸収系のクレジットの創出を促進するため、森林の所有者や管理主体への制度活用の働きかけやモニタリング簡素化等の見直しを進め、森林経営活動等を通じた森林由来のクレジット創出拡大を図る動きが見られる。
- 日本の森林吸収インベントリにおいて、森林が主伐された場合は排出量として計上されるが、伐採された木材は住宅資材や家具などに利用されている間は炭素蓄積を吸収とみなし、最終的に廃棄されたときに排出として計上する伐採木材製品（HWP）のルールが導入されている。J-クレジットにおいても伐採木材製品中の炭素固定量を評価する仕組みの検討が進んでいる。

[a2. 土壌炭素貯留]

土壌の健全性に資する技術として、土壌炭素貯留を高める施策が世界的潮流となっている。

- 「農業イノベーションアジェンダ」：米国において農業イノベーション研究戦略等で推進する考え方。農業生産量は2050年において40%増産、環境負荷は50%低減、バイオ燃料ブレンド率はE30とするなどを骨子としている。環境負荷低減の中に土壌炭素貯留も含んでいる。
- 4パーミルイニシアチブ：世界の土壌（30～40 cm）の炭素量を毎年0.4%（4パーミル）増やすことができれば、大気中のCO₂の増加分を相殺し、温暖化を抑制できるという考え方に基づく国際的な取り組み。

2015年12月のCOP21でフランス政府が提案し、2021年4月現在、日本国を含む623の国や国際機関が参画。山梨県は日本の都道府県ではじめて参加し、さらにこの取り組みを全国に拡大して、2021年2月に山梨県が提案して全国協議会を設立した。

[a3. バイオ炭]

- ・丸紅株式会社は、同事業を日本で推進する日本クルベジ協会とバイオ炭で創出したカーボンクレジットの独占販売代理権を取得した。同協会は6月末に農地での炭素貯留で初めて、国の認証制度「J-クレジット」で認証され約250トンを生出した。同協会はこれまで、創出したクレジットを協会独自に販売してきたが、今後は、丸紅が総代理店として企業等に販売していくとされている。

[a4. BECCS]

- ・2022年に公表されたIPCC第6次評価報告書第3作業部会報告書（気候変動緩和策）の第7章AFOLU（Agriculture, Forestry and Other Land Uses：農業、森林およびその他の土地利用）の中でもBECCSの項目が設けられている。BECCSの技術的なCO₂除去貯留能力の試算に加え、コストに応じた試算も実施している。米国、カナダ、欧州諸国の2050年に向けた長期戦略においても、各国とも削減目標達成にCCSを重要な手段として位置づけている。

[a5. DACCS]

- ・スイスのスタートアップであるクライムワークス（Climeworks）社が商用化に取り組んでいる。同社は、2017年にCO₂を回収し貯蓄するDACCSを商用プラントとして世界で初めて稼働させ、2021年9月には、大気中からCO₂を取り出して地中に永久的に貯留するプラント「オルカ（Orca）」を稼働させた。年間最大4,000トンのCO₂の抽出が可能で、CO₂の回収量は現時点で世界最大レベルであり、隣接する地熱発電所が生む電力によって全ての動力をまかなう。取り出したCO₂は連携するアイスランドの企業が開発した技術により地下に埋めるとしている。
- ・カナダのスタートアップであるカーボン・エンジニアリング（Carbon Engineering）社は年間100万トン回収するDAC施設の建設を米国内で進めている。2026年の稼働を目標に、2022年から建設する予定である。
- ・米グローバルサーモスタット社は、カリフォルニア州とアラバマ州にパイロットプラントを持ち、新たにコロラド州に実験プラントを建設中である。
- ・日本では、川崎重工業株式会社や三菱重工株式会社が、DACの実証試験に取り組んでいる。

[a6. 風化促進]

- ・政府は、GHGsの国内での大幅削減とともに、世界全体での排出削減に最大限貢献することを目的とした革新的環境イノベーション戦略を2020年1月に策定した。排出削減コストをいかに引き下げていくかが重要で、非連続なイノベーションにより社会実装可能なコストを可能な限り早期に実現することが、世界全体で重要であるとしている。2050年カーボンニュートラルを達成するためにGHGsを安価かつ大量に回収・吸収し、その後貯留するネガティブエミッション技術が不可欠である。CO₂回収・吸収技術のコア技術として、DACは自然環境に対して影響がない技術的な経路であり、重要な技術である。また、自然プロセスの人為的加速をしたCO₂回収・吸収技術については、削減コストや削減ポテンシャルの不確実性が高い。
- ・炭酸塩化によるCO₂吸収：玄武岩などの岩石を粉碎・散布し、風化を人工的に促進する風化促進技術等が新たな技術として期待されている²⁰⁾。

[a7. EOR]

- ・ EOR市場は、2022年から2027年の予測期間中に、2%を超える年平均成長率（CAGR）を記録すると予想される。新型コロナウイルス感染症（COVID-19）のパンデミックは、シェールおよび重油市場に深刻な影響を及ぼした。成熟する油田の数の増加や、より良い石油回収技術を導入するための技術の改善などの要因は、EOR市場の推進に追い風となる可能性がある。ただし、原油価格の大きな変動は、今後数年間で市場の成長を抑制する見込みである。
- ・ 中国やインドなどの主要国からの石油とガスの需要が高まる中、アジア太平洋地域は、EORサービスの需要を促進すると予想される石油とガスの生産目標を維持するために、成熟した分野でのEORの必要性を推進している。
- ・ 2019年の時点で、アジア太平洋地域には約30のEORプロジェクトが存在した。約58%が化学薬品とCO₂の混和性注射タイプに分類され、調査対象の市場の化学薬品注射セグメントでは中国が主導的であった。
- ・ インドの生産油田は継続的に老朽化しており、平均回収率は世界平均を継続的に下回っている。より広範な「エネルギー安全保障」プログラムの一環として、政府は2022年までに原油輸入の10%を削減するという目標を設定し、解のひとつとしてEORが浮上している。インドの国営企業ONGC社は、28のEORプロジェクトに57,825ルピーを投資する計画を発表した。一方、Cairn India社は、EORを使用して生産を増やすために37,000ルピーを費やす計画を示している。石油およびガス事業者と政府によるこのような同様の投資は、予測期間中にインドの国際的なEORプレーヤを大幅に引き付けると予想される。
- ・ 2021年12月の時点で、中国北東部の黒竜江省にある中国石油天然気集団によって管理されている大慶油田は、世界最大のEORによる原油生産拠点になっている。大慶油田の三次回収による年間原油生産量は、20年連続で1,000万トンを超え、累計生産量は2億8,600万トンに達した²¹⁾。

〈B 海域〉

[ブルーカーボン]

- ・ 溶存態有機炭素による植物残渣貯留プロセス、貯留量の定量化：草藻体表面から分泌される溶存態有機炭素（DOC）の難分解成分（RDOC）がブルーカーボンの新しい植物残渣貯留源となることが判明して以降、海藻・海草種間でのDOC溶出量の違い、溶出量と生息環境特性との関係など、RDOC生成プロセスの解明が進められている¹³⁾。養殖された海藻類からも天然藻場と同様にRDOCが生成されることが判明し、海藻養殖も天然海藻と遜色ない吸収源として機能できることが示された¹⁵⁾。この農林水産省プロジェクト研究の評価手法では、RDOC貯留速度を分解プロセスモデルから100年～1000年スケールで算定している。
- ・ 環境DNAを用いた土壌貯留・深海貯留の定量化：ブルーカーボン生態系内の土壌貯留速度の算定、深海貯留など生態系外の貯留速度の算定では、従来から安定同位体比分析が用いられている。近年では、環境DNAを用いたアプローチ²²⁾、さらには環境DNAと安定同位体比分析と組み合わせた手法が開発されつつある²³⁾。これにより、土壌中にどの植物種由来の有機炭素が堆積されているか、種レベルでの解明が可能となり、ブルーカーボン生態系によるCO₂貯留の確実な証拠が得られるようになっている。
- ・ インベントリ登録に向けた分布面積算定システムとそのアーカイブの構築：日本のGHGsインベントリへのブルーカーボン生態系の登録を目指す一環として、生態系の分布面積の算定システムと分布面積データのアーカイブ化が進められている。藻場については、以前は各都道府県の水産課等において、分布面積情報を取りまとめた藻場・干潟の台帳が毎年毎に作られていた。しかしながら、15年ほど前から作成を取りやめる都道府県が増え、全国的な分布情報を取りまとめられなくなった。そのため、不定期に各省庁で実施された全国調査データが使用可能な分布面積情報を代理で用いることになるが、インベントリ登録には不十分である。そこで、国土交通省を中心にして、毎年全国沿岸時で実施されている海洋環

境データ等を用いたモデル推定により藻場分布情報を更新するシステムの構築が進められている。このシステムが完成すれば、毎年更新された精緻な藻場分布情報を得ることができ、かつそのアーカイブ化によって藻場分布面積の時系列把握が可能となる。

- ・海藻養殖による植物残渣貯留プロセスの評価手法の構築：海草・海藻類が成長過程で草藻体から溶出させる溶存態有機炭素による植物残渣貯留が発見・科学的根拠が示されたことにより、最終的に収穫して水揚げしてきた海藻養殖ですら、CO₂吸収源として機能することが明らかにされつつある²⁴⁾。そのため、食害等により磯焼けが頻発している天然藻場に加えて、好条件な立地を選択して実施可能な海藻養殖による吸収源が拡大しつつある。

→中国全土における海藻養殖でのCO₂吸収ポテンシャルについて、RDOC貯留を主軸に計算された事例が報告されている²⁵⁾。

- ・オフセット・クレジット制度の構築・開始：国内で運用されているカーボンクレジットとしてJ-クレジット制度があるが、J-クレジットは日本のインベントリに登録されている排出・吸収源を対象としている。現時点では、インベントリに登録されていないブルーカーボン生態系を対象にJ-クレジットを適用することができない。そこでブルーカーボン生態系を中心に、海洋を活用した気候変動対策の社会実装試験を行うため、国土交通大臣認可によるジャパンプルーエコノミー技術研究組合（JBE）が設立され、各種の研究開発が実施されている。
- ・日本では自然資本を対象とした環境価値の保全・創造に関する取り組み・事業が少なく、生態系の衰退や自然破壊の一因となっている。海洋も例外ではなく、特に沿岸海洋域の劣化が深刻化している。この状況を打開するため、JBEでは、様々な分野の研究者、技術者、実務家らが密に連携し、海洋の活用に関与する事業の活性化を図るのに必要な技術（方法論）の研究開発を進めることを目的に活動が行われている。4つの方法論：科学的方法論（環境価値の定量的評価）、技術的方法論（環境価値の創造と増殖）、社会的方法論（社会的コンセンサス形成）、経済的方法論（新たな資金メカニズム導入）、を基盤とし、相互の研究成果を連関させつつ、統合的研究も進められている。特に、ブルーカーボン生態系のCO₂吸収源としての役割や、その他の沿岸域・海洋での気候変動緩和と気候変動適応へ向けた取組みを加速するため、2021年からは「Jブルークレジット」と名付けられた独自のカーボン オフセット・クレジット制度が開始された²⁶⁾。JBEから独立した第三者委員会による審査・認証意見を経て、JBEがクレジットを発行・管理することを主軸に、制度設計等に関する研究開発が進められている。

[新展開・技術トピックス]

・俯瞰的視点をもったさらなる新規植林

各国とも新規植林の推進を明言しており^{27), 28)}、森林を活用したネットゼロエミッションへの貢献が急速に進められている。単純に森林を増やせば良い、と言う安易な考えは問題視され始めている。他の生態系サービスや森林以外の生態系の保全などに与える影響とのバランスを評価し、より俯瞰的な視点に立った植林の重要性が指摘されている。

・Carbon farming

森林・農地と分けずに、森林・農地を含む農林業のランドスケープ単位で炭素固定能力を向上していく概念であり、すでに実装に向けた手法の検討も行われている²⁹⁾。今後、より包括的な炭素固定方法として研究と実装が進む可能性が高いと思われる。

・EUの積極的なFunding

Horizonなどのフレームワークの中で、ネットゼロエミッションに貢献するためのプロジェクトに積極的にファンディングを行っている。

- **ブルーカーボン (国内)**

- 2017年にブルーカーボン研究会 (民間主体、事務局: WAVE・SCOPE) が発足した。
- 2019年「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」(政府主体、事務局: 国土交通省港湾局) が開催された。
- 2020年、JBEが設立された。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

- **科研費・学術変革領域 (A)「デジタルバイオスフェア: 地球環境を守るための統合生物圏科学」(2021年09月～2026年3月、1,124,200千円)。**
より俯瞰的なネットゼロエミッションにつなげるため領域を超えた学術を行うとしている。主に森林を対象とした生物圏モデル (デジタルバイオスフェア) の構築を目指すとしている。
- **森林総合研究所所内交付金プロジェクト「ネットゼロエミッションの達成に必要な森林吸収源の評価」(2021年4月～2025年3月、36,918千円)。**
国内の森林のネットゼロエミッションへの貢献可能性をシミュレーションで評価する構想である。
- **環境研究総合推進「メタン吸収能を含めたアジア域の森林における土壌炭素動態の統括的観測に基づいた気候変動影響の将来予測」(2021年4月～2023年3月、120,000千円)**
土壌の炭素放出量およびメタン吸収量を、アジア地域を対象に評価する。一般に評価されているバイオマスではなく、土壌の炭素そしてCO₂だけでなくメタンも評価する。
- **森林総合研究所所内交付金プロジェクト「マイナスエミッションに向けた土壌メタン吸収の広域算定手法の開発」(2022年4月～2026年3月、37,700千円)**
国内の森林土壌のメタン吸収力を精緻に評価し、ネットゼロエミッションに貢献する。
- **農林水産省・農林水産技術会議委託プロジェクト研究「ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発」(2020～2025年)**
日本のGHGsインベントリ報告書にブルーカーボン生態系を登録する動きの一助とするため、海草・海藻藻場・海藻養殖を対象としたCO₂吸収量算定を可能にする評価手法を確立させると同時に、藻場を維持・回復・拡大させるための技術開発を実施している。
- **NEDO「ブルーカーボン (海洋生態系によるCO₂固定化) の追求に関する技術戦略策定調査」(2020～2021年)**
水産分野におけるGHGs削減に資するため、総合科学技術・イノベーション会議において策定された「革新的環境イノベーション戦略」における重点領域「V.農林水産業・吸収源」のうち、「ブルーカーボン (海洋生態系による炭素貯留) の追求」にかかわる国内外の技術調査が行われた。日本の有望な技術を駆使し、必要に応じて国際的な連携も視野に入れつつ、海洋へのCO₂固定化の促進と海藻・海草類の有効利用にかかわるアクションプランの策定に向けた情報収集が行われた。
- **NEDOエネルギー・環境新技術先導研究プログラム「ブルーカーボン (海洋生態系による炭素貯留) 追求を目指したサプライチェーン構築に係る技術開発」(2020～2021年)**
「最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO₂吸収・固定」を目的とした課

題のうち、ブルーカーボンにかかわる課題として次の3課題が採択された。「海産性微細藻類培養拠点のための研究開発 (代表: 筑波大学)」「マリンバイオマスの多角的製鉄利用に資する研究開発 (代表: 日本製鉄株式会社)」「大型海藻類の完全利用に向けた基盤技術の開発 (代表: 三重大学)」

- NEDO (グリーンイノベーション基金)「食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発」(2022～2030年)

「水産業・海洋」全体を視野に入れた吸収源対策ブルーカーボンを実現すべく、「ブルーカーボンを推進するための海藻バンク整備技術の開発」に取り組む予定である。

■国外

- Horizon2020 “Carbon smart forestry under climate change” (2018年1月～2022年12月、€967,500)

Carbon-smartな林業を探索するプロジェクト。欧州の5カ国12機関が参画している。

- Horizon2020 “Holistic management practices, modelling and monitoring for European forest soils” (2021年5月～2025年10月、€10,035,592)

欧州の森林土壌の総合的管理に向けたプロジェクト。アウトリーチ・実装にも力を入れている。欧州に加え、日本・ウルグアイも含め20機関が参画している。

- UK Research and Innovation “Connected treescapes: a portfolio approach for delivering multiple public benefits from UK treescapes in the rural-urban continuum” (2021年7月～2024年7月、£235,853)

田園から都市域を接続し、より広域のランドスケープ単位で炭素固定を検討し、加えてそれに限らず多面的機能を考慮すとしている。

- JST-SATREPS 「コーラルトライアングルにおけるブルーカーボン生態系とその多面的サービスの包括的評価と保全戦略」(2017 - 2023年)

フィリピン共和国 (代表: フィリピン大学) およびインドネシア共和国 (代表: 海洋水産省) 両海域でのブルーカーボン調査と活用に関わる研究・指導・教育を介し、両国の政策提案に寄与することを目的に実施している。

- Ocean2050 seaweed project (2020年～)

海洋の保全に取り組む国際的なプラットフォームであるOcean2050が開始した、世界各地での海藻養殖海域におけるブルーカーボン貯留量推定を実施。フランス、デンマーク、ノルウェー、米国、日本、マダガスカル、インドネシア、マレーシア、中国、カナダ、チリが参加。COVID-19により大幅に遅れたが、現在はデータ解析用試料の採取が終了し、スペイン等で試料分析が進められている。

- Blue Carbon Initiative

ブルーカーボン生態系の保全 (保護・復元) 等で気候変動緩和を進める取り組みに焦点を当てた国際的な共同イニシアチブ。コンサベーション・インターナショナル (CI)、国際自然保護連合 (IUCN)、ユネスコ政府間海洋学委員会 (IOC-UNESCO) が取りまとめする。Blue carbon scientific working groupとBlue carbon policy working groupの2つのグループからなり、両者が連携する形で活動を実施。活動事例にはインドネシア、ラテンアメリカ、米国、豪州でのブルーカーボン生態系を対象としたCO₂貯留量の推定、

保全活動、政策研究の実施等があげられる。UNFCCC-SABSTAでのブルーカーボンワークショップの開催等も実施。また、ブルーカーボン生態系の炭素貯留や排出を算定するための新しいマニュアルを作成している。

(5) 科学技術的課題

〈A. 陸域〉

[a1. 植林・再造林]

- J-クレジット制度における見直し議論において、以下のような論点がある。

- ①人工林が高齢級化する中、将来的な吸収量を確保するためには、再造林を進めることが必要。
- ②主伐・再造林を含むプロジェクトは、下刈り等の必要経費が造林後10年以上にわたって発生することから、認証対象期間のみの収支評価では経済障壁を適正に評価できないことに加え、CO₂の吸収や脱炭素社会の実現に十分な効果の発現が期待できないことから、森林経営の長期的な時間軸を踏まえたルール作りが必要。
- ③森林の成長によるCO₂吸収、伐採木材製品の利用による炭素固定、燃料等の代替による排出削減をトータルで考えることが必要。

このため、より早く成長するエリートツリーの活用が期待される。

- 気候変動下でネットゼロに貢献する森林管理（産業との連携も含めて）

欧州を中心に、ネットゼロに貢献できる森林管理手法について研究が始まっている。日本では気候変動への森林の適応についても十分に研究・実装が進んでいないことに加え、気候変動下でネットゼロに貢献する森林管理についても研究が進んでいない。

- 形質データに基づいた高度な森林管理

樹木の光合成能力や乾燥耐性など樹木の生理生態特性を表現する「形質データ」の整備が世界的に進んでおり、樹木の成長や気候変動への応答について、より精緻な評価が可能になる可能性がある。

- Lidar技術等を用いた高精度の森林資源量把握

森林の炭素固定能力を精度良く推定することがネットゼロエミッション技術の開発には必要であるが、近年上空からLidarを用いた資源量の把握や、林内においてもLidarやレーザーを用いた高速・高精度の資源量把握の開発が進められている。

- 長期モニタリング研究と気候変動への森林生態系の応答解明、将来予測

森林の炭素循環研究は長く取り組まれてきたが、気候変動への森林生態系の応答は未だ不明な事も多く、研究の継続が必要である。また現在進行している気候変動に対する森林の応答を捉えるためにも長期観測が必要不可欠である。気候変動シナリオ自体にも不確実性があり、森林生態系の将来予測は不確実性がまだかなり高い。

- データセットの整備

世界的にデータやデータベースの公開が進んでいる。日本でも森林データは古くから取得されているが、非公開であったり機械可読性が無かったりする物が多いが、徐々にデータセットの整備と公開が進められている。

[a2. 土壌炭素貯留]

- 農業は植物の光合成産物を販売する産業である。大気中のCO₂を取り込むことでネガティブエミッション技術と解釈されやすいが、光合成産物である食品、残渣、枯死植物は、体内での消化、ごみ焼却、土

壤微生物の分解などによってやがてはCO₂に戻る。これがカーボンニュートラルの概念である。農業活動は基本的にはネガティブエミッション技術とはいえない。家畜ふんや油しぼり粕などの有機質を資源とする堆肥などを土壤に投入することで、一時的に土壤中には炭素が蓄えられる。投入された堆肥はその後数年のうちにすべて微生物によって分解されてCO₂に転換するが、こうした堆肥が毎年繰り返し投入されつづければ、最初に土壤に堆肥が投入される前の土壤と比べて土壤中の炭素は常に多い状態が維持される。これが土壤中の炭素を貯留するという概念である。

- ・過去の堆肥連用試験に基づく土壤炭素量変動に関する試験結果に基づいて作られた数値解析モデル（Roth-Cモデル）は、このような土壤炭素貯留の長期予測を可能にする手法の一つである。農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）では農地土壤に貯留する炭素量の増減を計算し、土壤のCO₂吸収量として示すウェブサイト「土壤のCO₂吸収見える化サイト」を公開している。
- ・世界には数多くの異なる土壤タイプが存在しているため、土壤中での有機物分解特性は一律では予測できない。今後、カバー率の高い土壤タイプを優先に、土壤有機物の分解特性の土壤、気候タイプ別の予測手法の開発が進展することが期待される。

[a3. バイオ炭]

- ・バイオ炭は燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物と定義される。
- ・バイオ炭については、土壤炭素貯留（吸収源）の算定方法が“2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use”に提示された。
- ・2020年の日本のGHGsインベントリから、「バイオ炭の農地施用に伴う炭素貯留量」の算定・報告を開始した。これによれば、2018年度のバイオ炭の炭素貯留効果による排出削減量は、約5,000トンCO₂-eqと報告されている。
- ・2020年9月、J-クレジット制度において「バイオ炭の農地施用」を対象とした方法論が策定された。本方法論は、バイオ炭を農地土壤へ施用することで、難分解性の炭素を土壤に貯留する活動を対象としている。方法論とは、J-クレジット制度を活用したプロジェクトを実施するため、排出削減・吸収に資する技術ごとに、プロジェクトの適用範囲、排出削減・吸収量の算定方法及びモニタリング方法等を規定した文書を指す。
- ・先述の「土壤のCO₂吸収見える化サイト」においてもバイオ炭による土壤炭素貯留は1項目として加わっている。

[a4. BECCS]

- ・先進国を中心とする世界の多くの国が石炭火力発電所の新規建設の禁止、現有施設の廃止を掲げており、極めて高効率である日本の石炭火力発電技術に対しても批判的な見方が一部ある。しかし、アジアや電力需要が増加する途上国では、石炭火力は依然として重要な発電技術といえる。石炭火力発電の低炭素化の一つの手段として、バイオマスとの混焼が挙げられる。
- ・BECCSの前提となるバイオマス作物の栽培面積の拡大自身がBECCSで得られるネガティブエミッションの半量程度を相殺してしまうとする報告もあるなど、技術的に克服すべき課題は多い。

[a5. DACCS]

- ・空気を回収するのに使用する電力などを調達しやすい場所、たとえば大規模な太陽光発電サイトなどを活用してCO₂を回収する考え方である。検討が始まったばかりの技術であり、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment : LCA）によってネットのGHGsがネガティブとなるか否かの評価手法も進

みつつある課題といえる。

- DACの最大の課題として、1つ目に、回収に大量のエネルギーがかかるという点があげられる。地球環境産業技術研究機構(RITE)によると、大気からのCO₂分離回収は、回収エネルギーの9割以上をCO₂脱着エネルギーが占めるため、発電所等の大規模発生源に比べて1桁増えるとの試算がでている。そのため、再生可能エネルギーを使わない限り、ネガティブエミッションにならない。新規吸収技術の開発(エネルギー低減)が実用化に不可欠となる。DACCSではCO₂を1トン回収するのに500~1,000ドル(約5万7,000~11万4,000円)ほどかかると見積もられている。500ドルとしても日本のCO₂の年間排出量を約10億トンとして、それを回収するには57兆円もかかると試算される。

[a6. 風化促進]

- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では、2022年度より、天然に存在する岩石・鉱物を介してCO₂を固定する風化促進技術等について、日本での実施可能性を検討すべく、技術体系や国内外における研究開発や取り組みの状況、そのCO₂削減ポテンシャル等の指標からネガティブエミッション技術における位置づけやその有望性の調査・検討を実施するとしている。実現可能性を含めてこれから検討を進めていくフェーズであり、技術的に克服すべき点は多い。

[a7. EOR]

- 近年、非破壊透過検査技術やコンピュータシミュレーション技術が向上したことで、どこに水やガスを注入して、どのように圧力を加えれば、効率良く石油が回収できるかについての予測精度は高まりつつある。しかしながら、1次回収と2次回収を併せた石油の回収率は、埋蔵量の50%に満たない程度とされる。原因は、石油は不均一であり、固体不純物を多く含み、高い粘度を有する液体であることによる。
- 石油は、油田上方では比較的粘度が低いが、下方に沈殿している石油は非常に粘度が高く、水やガスで押し出すことが困難。高い粘度を有し、砂礫と混じり合った石油を回収するためには、高圧蒸気、CO₂などの注入によって石油自体の性質を変化させ、粘度を低下させる必要がある。今後のこの分野の課題はこれらの改質技術に負うところが大きい。

〈B. 海域〉

[ブルーカーボン]

• CO₂貯留量の評価手法の構築

各国のGHGsインベントリ等、国際基準の報告書への掲載を目的としたCO₂排出・吸収源の評価には、原則としてIPCC湿地ガイドライン⁸⁾に従った形で算定モデルを構築する必要がある。つまり、土壌への植物残渣貯留をベースとした評価が必須であり、すでにIPCC湿地ガイドラインに掲載されている海藻藻場の算定手法を原則としなければならない。現在、国際的にもブルーカーボン生態系に海藻藻場および海藻養殖を含めることが検討されているため、上述した農林水産省委託プロジェクト研究でも海藻藻場・海藻養殖による植物残渣貯留をベースとした算定手法の構築が進められている。しかしながら、海藻類は多種多様であり、国内の海藻類が20種以下であるのに対し、海藻類は1,000種以上分布しているため、種別の残渣貯留量の事例蓄積が急務となっている。残渣貯留プロセスと貯留量の解明では、①溶存態有機炭素による植物残渣貯留プロセス、貯留量の定量化、②深海輸送による残渣貯留プロセス、貯留量の定量化が課題である。いずれも困難な課題があり、これらを打開するための科学技術が必要となる。①では、溶存態有機炭素に含まれる難分解性の成分が貯留源になるが、分析手法が構築されていないため、難分解性の物質構成が解明されていない。②では、藻場から流出した草藻体が流れ藻となって沖合域へ流出し、その後は海面から深海へ輸送されるプロセスを定量化するための衛星画像解析技術、草藻体片が中層から深層で輸送されるプロセスを定量化するための海洋物理モデルを基盤とする算定技術開発が急務となっている。

• 環境DNAを用いた土壌貯留・深海貯留の定量化

植物残渣貯留のうち土壌貯留の算定には、対象となる海草・海藻種の懸濁態有機炭素が土壌に堆積する速度を算定すると同時に、土壌での懸濁態有機炭素の分解速度を評価していくことが重要となる。環境DNA分析と安定同位体分析を組み合わせることにより、定量的で精緻な堆積速度の算定が進められている。一方で、分解速度は対象とする海草・海藻種の組織や器官等の違いによって種間で大きく異なるため、精緻な算定を行うためには有機炭素を構成する物質や、その分解され易さを分析することが重要となっている。多様な海草・海藻種の分析を行っていくためには迅速かつ多量の試料を一度に分析可能な分析システムの構築が必要となる。

• 食害対策システムの構築

ブルーカーボン生態系のうち藻場によるCO₂吸収源を拡大していくためには、食害生物による植食発を低減していくことが重要である。近年の気候変動に伴う温暖化によって、日本周辺の沿岸域では南方系に多い植食性魚類の増加による植食圧の激甚化が深刻となっている。各地で天然藻場や海藻養殖の海域で防護網や音響機器などによる食害対策が実施されているが、場当たりの対応が多く、目立つ成果は得られていない。そこで根本的な食害問題の解決を可能にするシステム構築が喫緊の課題とされている。海外の魚類養殖では養殖魚の魚体表面に付着する寄生虫をAIで自動判別し、レーザー等で駆除する無人装置が実装されているが、食害対策においても、養殖海域や天然藻場に来遊する食害魚等を自動判別して駆除できるような海中ロボットの登場が望まれている。

• 藻場創成と海藻養殖の大規模化

ブルーカーボン生態系によるCO₂吸収源を拡大していくためには、食害対策とともに人工藻場・海藻養殖のさらなる展開が必須である。国土を広くに覆う森林等と異なり、ブルーカーボン生態系は海岸線の限られた地域と海面（適した水深帯）にしか形成されないため、その面積は自然海岸の面積に大きく制限されている。したがって、埋め立てや開発等で護岸化された海岸に人工的に藻場を創成し、藻場面積を拡大すること、沖合等の海面で人工藻場や海藻養殖を拡大することが必要となる。特に後者の沖合海面の利用では、広い海面で藻場の基盤や養殖施設を展開するため、海面利用の法整備とともに、海上プラントの技術開発が望まれる。現行の藻場創成・海藻養殖技術は海岸線近くのごく浅い海面を使い、漁業者が単独で実施できる手法・規模に特化しているためである。広大な沖合域を活用可能にする、大規模な藻場基盤・養殖システムの構築が急務となる。

• クレジット制度の公式化

ブルーカーボン生態系と対象としたオフセット・クレジット制度を研究開発するため、JBEによるJブルークレジットが試行されている。J-クレジット制度の排出量取引と同等に企業で活用可能な状態へ発展させることは、ブルーカーボン生態系による吸収源拡大に大きく貢献する。経済産業省で開始されたGXリーグ等、市場ルール形成や自主的な排出量取引の市場創造が今後大きく進められるため、その進展に合わせたクレジット算出に必要な技術開発の方向性を見定め、実行していくことが必要である。

(6) その他の課題

〈A. 陸域〉

[a1. 植林・再造林]

• 人材、特に若手研究者の不足

とくに大学院への進学率が低く、ネットゼロエミッション技術の開発を推進するための若手の人材が不足している。中堅層の研究者においても欧米と比較すると十分ではないと考えられる。大学でも国研でも当該テ

マの研究が余り行われていない。

• 森林データの整備

森林の炭素吸収力を広域で将来予測していくためには、過去から現在までの森林のデータが必要だが、多くが非公開や機械可読性がないなど、解析・予測するためのデータが十分に整っていない。

• 森林産業との連携

研究面でネットゼロエミッションに資する森林管理手法が開発されれば、その手法を日本の森林に広域に実装していく段階となるが、必ずしも研究と森林産業の連携がとれていない。

• 観測の維持

人材の不足に加え、長期観測が必要不可欠な森林において、10年20年と言った時間スケールでの観測の継続には予算が付きにくい傾向がある。森林生態系の理解と、いま起こりつつある変化を正確に捉えるためには長期観測が重要である³⁰⁾。

• 国際連携

森林管理は国や地域ごとに独自性が高い。日本国内における森林分野のネットゼロエミッション技術の開発に関しては、国際連携が不足していると考えられる。EU圏では圏内で国を超えた共同研究が推進されており、国際連携がしっかりなされている。

[a3. バイオ炭]

現状、バイオ炭の農地土壌施用は一般的な営農体系に浸透している段階ではない。今後、バイオ炭施用の作物への影響、病害等との関係、収量・品質との関連、気候変動に対するレジリエンス効果などをバイオ炭の種類ごとに検証する研究が必要とされている。

[a4. BECCS]

2019年度に石炭火力におけるバイオマス混焼が再生可能エネルギー固定価格買取制度 (FIT) の対象となったために、FIT 認定のバイオマス混焼発電所が増加している。バイオマスと石炭の混焼によるBECCSがネガティブエミッション技術として成立するか否か、あるいは、トータルでネガティブエミッションであったとした場合、「ネガティブの比率」をできる限り高めていくための技術開発は今まさに必要とされている。

[a5. DACCS]

CO₂を転換利用するための装置の需要が見込まれており、次世代エネルギーとして有力視される水素やアンモニアへの燃料転換を加速する方針。2020年に政府主導で革新的な研究開発を呼び起こす支援プログラム「ムーンショット型研究開発制度」の目標の一つとして、「2050年までに地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」が掲げられた。その中のテーマとして、NEDOのプロジェクトとしてDACの研究が進められている。政府はGHGs排出量を2013年度比で46%削減する目標期限の2030年度までに、CO₂濃度が10~数%程度の大気からCO₂を分離・回収する技術の実用化を目指すとしている。

〈B. 海域〉

[ブルーカーボン]

ブルーカーボンを用いた吸収源の拡大には、海面養殖等の沖合域への展開が必要となる。しかしながら、海面養殖は第一種区画漁業権の範疇であること、沖合への展開では共同漁業権海域との調整や他の海域利用

との調整も含めた法制度の再構築が必須となること、これらの海洋政策の検討が行われる必要がある。また、洋上風力発電を中心とする再生可能エネルギー施設区域内の海面利用も検討すべき項目と考えられている。ただし、洋上風力発電海域の利用を先進している欧州では、既存漁業や他の海域利用との調整も含め、様々な問題点が多く上げられている。

(7) 国際比較

〈A. 陸域〉

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●衛星やLidar、ドローンを用いた森林資源の把握の高度化は進められており、ネットゼロエミッション技術に貢献できる可能性が高い³¹⁾。 ●森林の炭素吸収に関する研究は現状維持から縮小傾向で、長期モニタリング研究への予算は付きにくい状態が続いている。 ●ネットゼロエミッションのために森林の炭素蓄積量を高めるための技術開発につながる基礎研究は十分といえる水準ではない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●日本国内の森林を活用したネットゼロエミッション技術の確立はほとんど行われておらず、社会実装が近いうちに行われるとは考えにくい。 ●森林環境税の導入もあり、各自治体や企業、NPOなどから情報と技術提供を求める声は大きい。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●森林の炭素吸収に関する研究は多数あり、レベルも高い。 ●2021年11月成立のインフラ投資雇用法により、DACCS/CCUS関連の地域別ハブの建設や検査、標準化を対象に含め出資される見込みである。DACCSに関して合計4,400万ドルの基金を設置し、DACCSとCCUSの混合プロジェクトやBECCSとCCUS混合プロジェクトも実施する予定である。海藻・海草類等による炭素固定化“algae-based carbon capture”のための基金も設立するとしている。 ●45Q税控除(45Q tax credit)：CCS/CCUS等の促進に向け金銭的インセンティブを与えるため、それらの税額控除を可能とする国内歳入法の第45Q条の改正が2018年2月に成立している。その最終規則が2021年1月に発効した。CCSで安全な地質学的貯蔵庫に貯留した場合1トン当たり50ドルまで、EORを利用して注入された炭素や光合成、化学合成プロセス、その他の商用で回収・貯留された炭素1トン当たり35ドルまで税額控除ができる。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国内の森林を気候変動下に適応しながら活用していく動きはあるものの、欧州ほどの熱気は感じられない。 ●CCS施設：2020年において米国だけでも、45Q税控除と低炭素燃料基準(LCFS)によりかなりの刺激を受けた、12の新しい、開発段階中の施設がプロジェクトデータベースに追加されている。現在、38の開発段階、建設段階または操業段階の商用施設があり、これは世界の総数の半分以上を超えている。 ●石油価格の変動などの懸念により、より多くのプロジェクトが、塩水層における純粋地層貯留およびEORの両者を使用する、スタック貯留またはデュアル貯留オプション等を利用するようになった。45Q税控除とLCFSがCO₂排出量削減に金銭的価値を置く傾向をもたらした。2020年会計年度において、議会はCCUSのために2,178億ドルを当てている。この助成金および前年度の助成金を利用することにより、米国エネルギー省(DOE)は、2.7億米ドル以上の共同出資協定を締結した。
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●気候変動問題に対して常に先進的で野心的であり、森林の炭素固定能力に関する研究も盛んである。大型プロジェクトではパートナーとして企業が参画し、実装が強く意識されている³²⁾。 ●欧州委員会が提案した総額1.85兆ユーロのCOVID-19からの復興計画のなかで、欧州連合域内排出量取引制度(European Union Emissions Trading System: EU-ETS)の対象拡大や炭素国境調整措置等の新規導入により、EUの独自財源を増やす意向を表明している。

				<ul style="list-style-type: none"> ●欧州理事会は2021年から2027年までの1.8兆ユーロの中期予算（多年次財政枠組み、復興基金）に合意している。2022年12月に、新たな独自財源として炭素国境調整メカニズム（Carbon Border Adjustment Mechanism、CBAM）の設置に関する規則案に関して、条件付きだが、暫定的な政治合意に達したと発表している。 ●欧州委員会は、2030年のGHGs削減目標を少なくとも55%に引き上げる政策文書を発表している。削減目標引き上げに関連して、欧州理事会は2022年12月にEU-ETSの改正指令案の暫定的な政治合意に達したと発表している。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●元々森林面積が小さかった英国には植林余地が多く、森林への役割の期待は大きく、研究も活発である。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●森林の炭素固定に関する研究は盛んである。かく乱が森林に与える影響評価も盛んに行われている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●森林面積率が比較的小さいこともあり、EUの中では活発な方ではない。しかし、土壌に関しては4 per 1000 initiativeを主導した国であり、土壌の研究は活発である³³⁾。
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●気候変動に対して、常に先進的で野心的であり、植林及び森林管理についてかなり積極的に展開している²⁶⁾。 ●2021年7月に欧州委員会は欧州グリーン・ディール目標の達成のため、「Fit for 55」政策パッケージを発表している。その中で、森林や草地などCO₂を吸収する自然界の「炭素吸収源」を拡張する計画案を策定している。EU-ETS収入や国境炭素税等によりEU独自財源を拡大する方針も含んでいる。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●元々森林面積が小さかった英国には植林余地が多く、森林への役割の期待は大きい。また植林に加えて、森林だけに閉じるのではなくランドスケープ単位で炭素を固定していく研究開発が行われている^{34), 35)}。 ●英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）が2021年12月から英国の気候変動目標達成と6万件の雇用創出に向けた1億6,600万ポンドの大規模助成プログラムを実施。DACCS、BECCS、海洋アルカリ化^(※1)、CO₂鉱物化（風化促進）^(※2)を含むPhase-1に進む24のプロジェクトを選定している。 <p>※1 “carbon dioxide removal through ocean alkalinity enhancement” ※2 “capturing CO₂ from air and converting it directly into a mineral by-product”</p> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●林業大国であり、森林への炭素固定が期待もされているが、持続可能な森林利用への意識も高い。 ●2021年11月にドイツ連邦環境庁がCO₂のDACの開発を勧告している。ドイツ連邦環境庁は、ドイツ政府が目標とする2045年カーボンニュートラル達成のためにDACを必要な技術と位置付け、技術開発とスケールアップを進めるよう促している。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●土壌に関しては積極的に展開されているが、森林全般に関しては顕著な活動・成果は見えない。
中国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●植林や炭素吸収量（樹木、土壌）に関する研究が多数発表されており、質の面でも世界的に遜色がないものも多い。 ●中央政府による強力な政策推進に加え、海洋沿岸の省でも独自に計画を策定している。風化促進を含むCCUSや海洋におけるネガティブエミッションを推進している。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●植林を精力的に推進しており、国土も広いため、世界的にも大きなアピールとなっている^{25), 36)}。 ●第13次5ヵ年科学技術発展計画(2016～2020年)で、CO₂鉱物化（風化促進）を含む、CCUS技術を推進していた。第14次5ヵ年計画(2022年～)では、森林被覆率増加の目標も掲げている。 ●中国国家自然科学基金等の支援により、環境改善、炭素吸収量増加を実証する研究も実施している。

韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●2020年12月に発表した「カーボンニュートラル推進戦略」は、2030年までにGHGs24.4%削減(2017年基準)を目指している。韓国のGHGs総排出量の最新値(2017年値)は、約7億910万トンCO₂-eq。気候変動に関する枠組み条約(UNFCCC)によるデータ(2016年基準)によると、24.4%削減目標を達成するには、2030年時点の総排出量を5億3,600万トンCO₂-eqまで抑制することになり、抑制量は1億7,310万トンCO₂-eqとなる³⁷⁾。 ●2020年7月に発表した「韓国版ニューディール政策」では、3つの柱の一つに、気候変動に対応し、環境に優しい低炭素社会を目指す「グリーンニューディール」が含まれている。2020年10月には、この3つの柱に、地域経済の活性化などを旨とする「地域均衡ニューディール」を加えた。 ●韓国政府は2020年10月に開催された予算案施政方針演説で、「『韓国版ニューディール政策』関連事業の推進と合わせ、国際社会とともに気候変動問題に積極的に対応し、2050年までに「炭素中立(カーボンニュートラル)」の実現を目指す」と宣言した。 ●2020年12月「2050カーボンニュートラル推進戦略」を公表している。GHGsの削減を中心とする「アダプティブな削減(対応・適応型の削減)から、新しい経済・社会発展戦略の策定を通じた「プロアクティブな対応(積極的な対応)」を計ることを目的に、3+1の推進戦略を掲げている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●2050年カーボンニュートラル戦略の中でも森林が重要視されており、今後森林の炭素吸収源としての機能強化があげられている。特に都市林の炭素吸収源の強化が述べられている³⁸⁾。 ●他の先進各国と同様、GHGsの削減と産業構造の転換、雇用の創出を同時に達成する意図がある。2050年にカーボンニュートラルを達成するという野心的な目標を達成するためには、再生可能エネルギーの大量導入に伴う送配電網の整備やCCU/CCUSなども実施していく必要があり、韓国政府は今後、制度整備や研究開発を通じ、これら施策についても詳細なロードマップを策定していく予定。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●各州政府が2050年までのCO₂排出実質ゼロ目標を掲げているものの、連邦政府による正式なCO₂排出実質ゼロの目標時期は明らかにしていない。しかし、モリソン首相はできる限り早いCO₂排出実質ゼロの実現を目標とし、多くの国と同様に2050年を期限とする案が最も好ましく実現可能性が高いとの考えを明らかにした。 ●排出削減関連の技術に課税する考えはなく、新技術を積極的に推進する姿勢を示しており、中でも新たなエネルギー源として世界中の注目が集まる水素の活用がCO₂排出実質ゼロの目標を達成する上で重要だとしている³⁹⁾。
	応用研究・開発	○	↗	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●植林プロジェクトが進んでいる⁴⁰⁾。 ●石炭や天然ガスなどの化石燃料と水から熱化学反応によって水素を生成し、副産物として発生するCO₂を深い地層に閉じ込めるCCS技術を利用する方法(ブルー水素)がある。連邦政府は、2019年には国家水素戦略”National Hydrogen Strategy”を発表し、官民双方でさまざまな政策を打ち出している。連邦政府は、水素が既存のエネルギーの代替品として浸透するために、グリーン水素の生産コストを1kg当たり2オーストラリア・ドルまで下げる「H2 under 2」を指標としている。

〈B. 海域〉

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●水産庁を中心に、漁場整備や磯焼け対策として藻場に関わる研究開発の蓄積はある。 ●IPCCガイドラインに準拠したCO₂貯留量の算定手法で必要となる植物残渣貯留のパラメータについて、残渣貯留プロセス別に実証・計測が実施され、その科学的根拠の構築が進められている。 ●海中の藻場分布推定やその面積計測、藻場構成種の判別等、空間解析を用いた解析手法の構築が進められている。 ●一部の大学機関等でIPCCガイドラインとは異なる手法を用い、CO₂吸収量の算定等に関わる研究成果が出ている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●農林水産省の委託プロジェクト研究により、ブルーカーボン生態系を対象としたCO₂貯留量の算定手法が確立され、我が国周辺の藻場によるCO₂貯留量の算定が実施されるとともに、吸収源拡大に向けた技術開発の現地試験が各地で開始されている。 ●ジャパンプルーエコノミー技術研究組合の設立およびJブルークレジット制度の試行開始により、NPOや漁業者、企業等、ブルーカーボン生態系による吸収源拡大を目指す社会活動が活性化し始めている。 ●各地でブルーカーボンによる気候変動対策を推進するNPO等の団体が新規に設立されるとともに、都道府県や市町村においてブルーカーボン協議会が設立され、CO₂貯留量の算定が始まっている。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●NOAAにおいてブルーカーボン生態系によるGHGs貯留に関する研究やモニタリングを対象とした研究助成が開始されている。マングローブ林と塩性湿地によるCO₂吸収速度は熱帯雨林の10倍、地球上の海洋面積の0.1%に過ぎない海草藻場に全海洋の11%にあたる土壌貯留された炭素があることを開示している。 ●USGSでのブルーカーボン生態系（塩性湿地とマングローブ林）を対象とした炭素フラックスのモニタリングが進められている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ブルーカーボン生態系に関する豊富な基礎研究成果を生かし、UNFCCCに提出された排出・吸収源インベントリの最新版においてもブルーカーボン生態系の分布面積減少に伴うCO₂排出量を算定している。ブルーカーボン生態系がCO₂吸収源であることを示すため、国内の研究事例をもとに土壌貯留によるCO₂貯留量を提示しているものの、分布面積の把握は十分ではないとし、吸収源としての評価は現在進行中としている。排出削減の数値目標も提示している。 ●カーボンオフセットプロジェクトによる自主的炭素市場の実証試験を実施、成功事例の蓄積を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●スペインのDuarte博士、デンマークのKrauze-Jensen博士らの研究チームが海藻類と海藻養殖におけるCO₂貯留に関するデータ蓄積を進めている。 ●IUCNが欧州と地中海海域におけるすべてのブルーカーボン生態系を対象に保全・再生や拡大を目的とするプロジェクト実施に向けたガイドラインを作成している。パリ協定における自国のNDCに活用するための手法についても言及している。 <p>【地中海沿岸国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●IPCC湿地ガイドラインでTier1の数値として多く引用されている海草の1種 Posidonia oceanica が気候変動の影響で大きく減少している。対策に向けて、藻場と植食性魚類に関する研究が増加している。
	応用研究・開発	○	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●COVID-19の影響で停滞していたが、英国のKennedy博士、スペインのDuarte博士、デンマークのKrauze-Jensen博士らの研究チームが、海藻類によるCO₂貯留をIPCC湿地ガイドラインへ2025年までに組み込む動きを再開している。 ●ブルーカーボンを題材として、塩性湿地・海草藻場・海藻藻場の保全・再生活動を活性化させているが、具体的数値の提示までには至っていない。

				<p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●海草藻場の保全を目的としたUnsworth博士らによる団体「PROJECT SEAGRASS」が世界各地で活動を展開し、CO₂貯留に関わるパラメータ収集も実施している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●中国においてブルーカーボンに関わる国際ワークショップが2017年に開催され、その際の成果をもとに、2020年には中国国内でブルーカーボンによるCO₂貯留の候補として、海藻養殖を主軸としたブルーカーボン吸収源拡大に向けた戦略が立てられている。中国全土でのブルーカーボン生態系の現状と消失をとりまとめ、海藻養殖が天然藻場と同程度の面積であることなどを報告した。ワークショップ後、ブルーカーボン生態系のうち中国沿岸に多い海藻類の植物残渣貯留に関わる各パラメータの研究事例が増加傾向にある。 ●中国全土の海藻養殖施設を対象に、植物残渣貯留による潜在的なCO₂貯留量が算定されている。それをもとに、中国のCO₂排出量を相殺するために必要な海藻養殖量の試算結果も提示されている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●2017年のブルーカーボンに係わる国際ワークショップ開催後、中国政府が進めるGHGs対策において、ブルーカーボン生態系のCO₂吸収メカニズムを解明して基準を作り、クレジット取引のメカニズムを成立させる案が検討されていた。ただし、その後の動向について、積極的な公開はなされておらず、実態が不明である。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●日本も参加している、米国の大学機関を中心とした世界約20か国が参加する海草藻場の国際共同研究に釜山の大学機関が参加している。このプロジェクトにおいて海草藻場の各種パラメータの計測が実施されている。
	応用研究・開発	—	—	—
その他の国・地域	基礎研究	◎	↗	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●インベントリにブルーカーボンを登録、UNFCCCに提出された排出・吸収源インベントリの最新版において、オーストラリア国内での研究事例で得られたパラメータを用い、IPCC湿地ガイドラインの手法で海草藻場・塩性湿地の消失による排出量を算定している。
	応用研究・開発	○	↗	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●連邦政府を中心とするInternational Partnership for blue carbonを設立。島嶼国のブルーカーボン生態系を保全することでカーボンクレジットを創出し、自国のオフセットに利用している。 <p>【ケニア共和国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ケニアのGHGsインベントリに、マングローブを主体とするブルーカーボンの登録を開始。加えて、野生生物保護協会とケニア海洋漁業研究所が共同でケニアの海草藻場を対象に炭素クレジット化を進めるプロジェクトを実施。 ●国際自然保護連合（IUCN）のBlue Natural Capital Financing Facility（BNCF）がザンビア、ケニア、インドネシアでマングローブ林を対象とした活動を実施しており、ケニアでの活動が特徴的である。ただし、現地のステークホルダーの意図が組み込まれていないと課題を指摘する情報もある。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ CO₂回収・貯留 (CCS) (環境・エネ分野 2.1.9)
- ・ CO₂利用 (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 生態系・生物多様性の観測・評価・予測 (環境・エネ分野 2.7.4)
- ・ 社会-生態システムの評価・予測 (環境・エネ分野 2.8.1)
- ・ 農林水産業における気候変動影響評価・適応 (環境・エネ分野 2.8.2)
- ・ 農林水産ロボット (システム・情報分野 2.2.11)
- ・ 農業エンジニアリング (ライフ・臨床医学分野 2.2.3)

参考・引用文献

- 1) 地球温暖化対策推進本部「日本のNDC (国が決定する貢献)(令和3年10月22日)」環境省, <https://www.env.go.jp/content/900442544.pdf>, (2023年2月11日アクセス) .
- 2) 松村順司, 他「高炭素固定能を有する国産早生樹の育成と利用 (第1報): センダン (*Meliazedarach*) の可能性」『木材学会誌』52 巻 2 号 (2006) : 77-82., <https://doi.org/10.2488/jwrs.52.77>.
- 3) 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「LCS-FY2021-PP-16 : バイオマス混焼発電を用いたBECCSによる炭素排出量削減のライフサイクル評価」<https://www.jst.go.jp/lcs/proposals/fy2021-pp-16.html>, (2023年2月11日アクセス) .
- 4) Tom Terlouw, et al., “Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources,” *Environmental Science & Technology* 55, no. 16 (2021) : 11397-11411., <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>.
- 5) Anne Owen, Josh Burke and Esin Serin, “Who pays for, BECCS and DACCS in the UK: designing equitable climate policy,” *Climate Policy* 22, no. 18 (2022) : 1050-1068., <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2104793>.
- 6) David J. Beerling, et al., “Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands,” *Nature* 583, no. 7815 (2020) : 242-248., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.
- 7) 堀正和, 桑江朝比呂 編著『ブルーカーボン: 浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用』(東京: 地人書館, 2017).
- 8) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,” <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, (2023年2月11日アクセス) .
- 9) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands,” <https://www.ipcc.ch/publication/2013-supplement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-wetlands/>, (2023年2月11日アクセス) .
- 10) Toshihiro Miyajima, et al., “Geophysical constraints for organic carbon sequestration capacity of *Zostera marina* seagrass meadows and surrounding habitats,” *Limnology and Oceanography* 62, no. 3 (2017) : 954-972., <https://doi.org/10.1002/lno.10478>.
- 11) Dorte Krause-Jensen and Carlos M. Duarte, “Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration,” *Nature Geoscience* 9 (2016) : 737-742., <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>.

- 12) Katsuyuki Abo, et al., “Quantifying the Fate of Captured Carbon: From Seagrass Meadows to the Deep Sea,” in *Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy and Implementation*, eds. Tomohiro Kuwae and Masakazu Hori (Singapore: Springer, 2019), 251-271., https://doi.org/10.1007/978-981-13-1295-3_9.
- 13) 桑江朝比呂, 他「浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計」『土木学会論文集 B2 (海岸工学)』75 巻 1 号 (2019) : 10-20., <https://doi.org/10.2208/kaigan.75.10>.
- 14) Kenta Watanabe, et al., “Macroalgal metabolism and lateral carbon flows can create significant carbon sinks,” *Biogeosciences* 17, no. 9 (2020) : 2425-2440., <https://doi.org/10.5194/bg-17-2425-2020>.
- 15) Ove Hoegh-Guldberg, et al., “The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action,” High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy, https://live-oceanpanel-wp.pantheonsite.io/wp-content/uploads/2022/06/HLP_Report_Ocean_Solution_Climate_Change_final.pdf, (2023年2月11日アクセス) .
- 16) 堀正和「CO₂ 吸収源としての藻場の評価と形成技術の展望」『JATAFFジャーナル』10 巻 10 号 (2022) : 30-35.
- 17) 経済産業省「衛星データプラットフォーム「Tellus (テルース)」上で宇宙実証用ハイパースペクトルセンサ (HISUI) のデータ提供開始を開始します」<https://www.meti.go.jp/press/2022/10/20221012003/20221012003.html>, (2023年2月11日アクセス) .
- 18) 国立研究開発法人水産研究・教育機構「農林水産研究推進事業委託プロジェクト 研究革新的環境研究: ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発 令和3年度研究実績報告書」農林水産技術会議, <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/project/pdf/jisseki/2020/seika2020-18.pdf>, (2023年2月11日アクセス) .
- 19) 水産庁「第3版 磯焼け対策ガイドライン (令和3年3月)」https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyokogyozyo/g_guideline/attach/pdf/index-23.pdf, (2023年2月11日アクセス) .
- 20) 経済産業省 産業技術環境局「研究開発制度 (目標4): 研究開発構想の改正案及び今後の運用について (令和4年3月)」内閣府, <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/yusikisha/20220324/siryu2.pdf>, (2023年2月11日アクセス) .
- 21) Mordor Intelligence「石油増進回収 (EOR) 市場-成長、傾向、COVID-19の影響、および予測 (2022-2027)」
- 22) Alejandra Ortega, et al., “Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration,” *Nature Geoscience* 12 (2019) : 748-754., <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0421-8>.
- 23) Masami Hamaguchi, et al., “Development of Quantitative Real-Time PCR for Detecting Environmental DNA Derived from Marine Macrophytes and Its Application to a Field Survey in Hiroshima Bay, Japan,” *Water* 14, no. 5 (2022) : 827., <https://doi.org/10.3390/w14050827>.
- 24) Carlos M. Duarte, Annette Bruhn and Dorte Krause-Jensen, “A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets,” *Nature Sustainability* 5 (2022) : 185-193., <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00773-9>.
- 25) Guang Gao, et al., “The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication,” *Environmental Research Letters* 17, no. 1 (2022) : 014018., <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3fd9>.
- 26) Tomohiro Kuwae, et al., “Implementation of blue carbon offset crediting for seagrass

- meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan,” Marine Policy 138 (2022) : 104996., <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104996>.
- 27) European Commission, “3 Billion Trees Pledge,” https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030/3-billion-trees_en, (2023年2月11日アクセス) .
- 28) David Stanway, “WIDER IMAGE China farmers push back the desert-one tree at a time,” Reuters, June 3, 2021, <https://www.reuters.com/business/environment/wider-image-china-farmers-push-back-desert-one-tree-time-2021-06-02/>.
- 29) European Commission, “Carbon Farming,” https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-farming_en, (2023年2月11日アクセス) .
- 30) Nature editorial, “We must get a grip on forest science -before it’s too late”. Nature, 608 (2022) : 449, doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-022-02182-0>
- 31) 一般社団法人日本森林技術協会「標準化事業」https://www.jafta.or.jp/contents/jigyoo_consulting/20_list_detail.html, (2023年2月12日アクセス) .
- 32) HoliSoils, <https://holisoils.eu/>, (2023年2月12日アクセス) .
- 33) The International “4 per 1000” Initiative, <https://4p1000.org/>, (2023年2月12日アクセス) .
- 34) Climate Change Committee, “Land use: Policies for a Net Zero UK,” <https://www.theccc.org.uk/publication/land-use-policies-for-a-net-zero-uk/>, (2023年2月12日アクセス) .
- 35) UK Research and Innovation (UKRI), “Studying how trees can help the UK reach net zero emissions,” <https://www.ukri.org/news/studying-how-trees-can-help-the-uk-reach-net-zero-emissions/>, (2023年2月12日アクセス) .
- 36) United Nations Climate Change, “Alipay Ant Forest: Using Digital Technologies to Scale up Climate Action: China,” <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/planetary-health/alipay-ant-forest>, (2023年2月12日アクセス) .
- 37) 当間正明「地域・分析レポート：韓国のグリーン政策を読み解く」日本貿易振興機構（JETRO）, <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2021/c6d232c0dfa4e111.html>, (2023年2月12日アクセス) .
- 38) The Government of the Republic of Korea, “2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea: towards a sustainable and green society, December 2020,” United Nations Climate Change, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf, (2023年2月12日アクセス) .
- 39) 日本貿易振興機構（JETRO）アジア大洋州課, シドニー事務所「調査レポート：オーストラリアにおける水素産業に関する調査（2021年3月）」JETRO, <https://www.jetro.go.jp/world/reports/2021/01/82b3276826014c69.html>, (2023年2月12日アクセス) .
- 40) Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, Australian Government, “20 Million Trees Program,” <https://www.dcceew.gov.au/environment/land/landcare/past-programs/phase-one/20-million-trees>, (2023年2月12日アクセス) .