

令和 6 年度生研支援センター調査報告書（研究開発構想）
「農林水産分野のカーボンニュートラルに向けた
ネガティブエミッション技術の研究開発」

令和 7 (2025) 年 4 月



目 次

I	生研支援センター研究開発構想について	3
II	テーマの背景と目的	3
III	対象技術等.....	6
IV	調査方法	
1.	文献・聞き取り調査.....	7
2.	アドバイザー委員会	7
3.	海外の動向調査.....	8
V	ネガティブエミッション技術全体を巡る動向	
1.	国内外の研究開発プロジェクトの動向	9
(1)	日本.....	9
(2)	米国.....	10
(3)	E U.....	11
(4)	中国.....	12
(5)	その他.....	14
2.	論文の動向.....	16
(1)	調査のアプローチ.....	16
(2)	ネガティブエミッションに関する論文数の傾向	16
(3)	各研究領域の論文数の傾向	17
3.	カーボン・クレジット制度の動向	21
(1)	調査のアプローチ.....	21
(2)	主なカーボン・クレジット制度と方法論の概要	21
(3)	クレジット発行量（2015～2024 年の総計）の状況.....	24
4.	まとめ.....	26
VI	各技術について	
1.	土壌炭素貯留.....	27
(1)	技術の概要.....	27
(2)	研究動向.....	32
(3)	課題と今後の研究開発の方向性	38

2. バイオ炭.....	44
(1) 技術の概要.....	46
(2) 研究動向.....	48
(3) 課題と今後の研究開発の方向性	53
3. 森林の循環利用.....	60
(1) 技術の概要.....	60
(2) 研究動向.....	65
(3) 課題と今後の研究開発の方向性	74
4. 海藻・海草.....	82
(1) 技術の概要.....	82
(2) 研究動向.....	85
(3) 課題と今後の研究開発の方向性	89
5. その他の海洋C D R s	93
(1) 海洋肥沃化に関する技術の概要と研究動向	93
(2) 海洋アルカリ化に関する技術の概要と研究動向	96
(3) 課題と今後の研究開発の方向性	98
6. ライフサイクルアセスメント (L C A)	105
(1) 現在の動向.....	105
(2) 今後の研究開発における課題	105
 VII まとめ.....	 107
 VIII 謝辞.....	 116
 (参考) 用語解説.....	 117

I 生研支援センター研究開発構想について

生物系特定産業技術研究支援センター（生研支援センター）は、農林水産・食品分野における「Society5.0」の早期実現を通じ、この分野で我が国が直面する諸課題を克服するため、農林水産・食品分野における研究開発の支援を専門とする唯一の資金配分機関（ファンディング・エージェンシー）であり、

- ① 民間企業、大学、国立研究開発法人などから、幅広く研究課題の提案を募集し、
- ② 採択した課題に委託研究費を供給しつつ、社会実装を見据えて研究管理を行うとともに、
- ③ その研究成果の情報発信や事業化支援などを通じて、社会実装を推進する業務を担っている。

こうした資金配分機関としての機能を強化し、農林水産・食品分野の研究開発とその成果の社会実装を一層推進するため、生研支援センターでは令和3年度から、今後の研究開発の方向を提案する「研究開発構想」の策定に取り組んでいる。

研究開発構想では、毎年度、農林水産・食品分野において解決すべき重要課題をテーマとして設定し、これに関する国内外の研究開発の動向等の情報を収集・分析した上で、今後必要と考えられる研究開発の方向性を取りまとめている。その内容は、研究開発やその推進に取り組む関係機関・企業等にも広く周知すべく、ホームページやシンポジウムなどによって公表している。

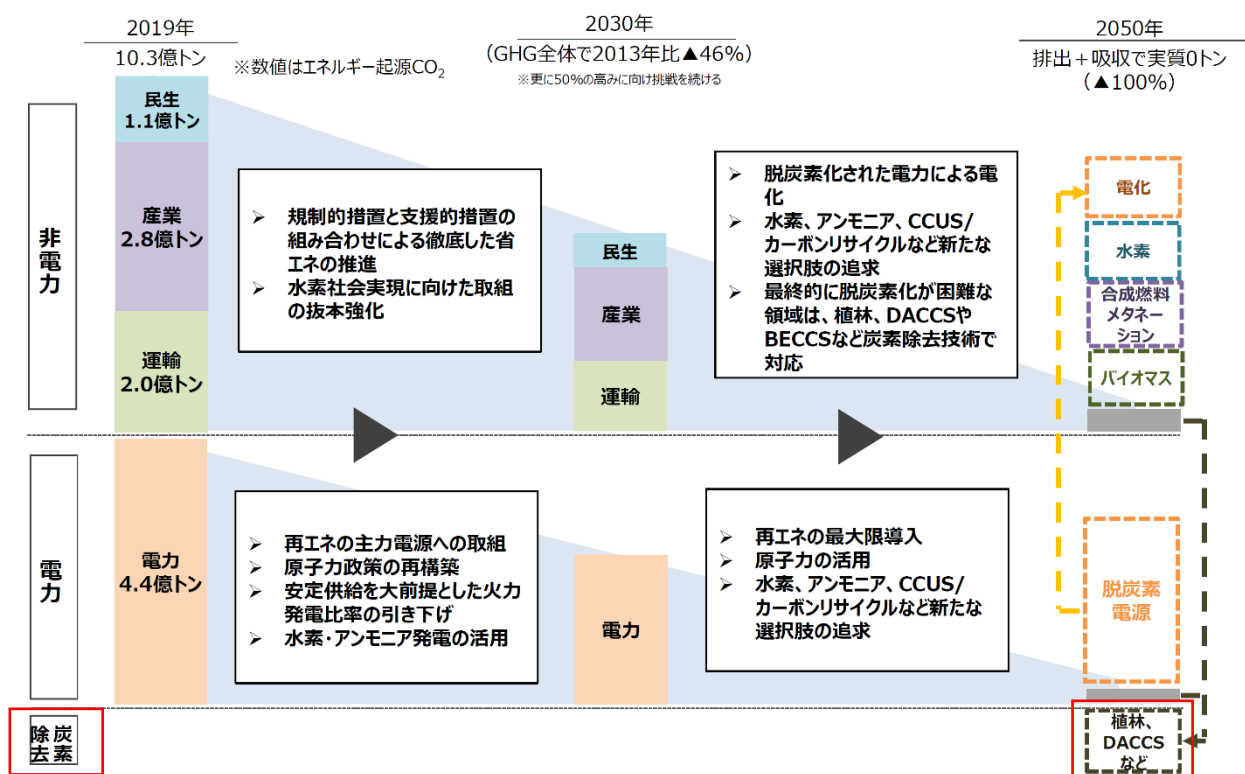
これまで、令和3年度には「食品企業における研究開発動向と取り組むべき研究開発」、4年度には「我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化」、5年度には「スマート農機の中山間地域への展開」をテーマとした研究開発構想をとりまとめた。令和6年度に取りまとめる本報告書が、4本目の研究開発構想となる。

II テーマの背景と目的

我が国は、2020年10月に、2050年までに温室効果ガス（以下、「GHG」という。）の排出を全体としてゼロにする「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、2021年4月には、2030年度にGHGを2013年度から46%削減することを目指し、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けていくことを宣言した。また、2025年2月に閣議決定された地球温暖化対策計画¹⁾では、2035年度、2040年度において、GHGを2013年度からそれぞれ60%、73%削減することを目指すことが明記された。

政府では、温暖化への対応を経済成長の制約コストとする時代は終わり、国際的にも成長の機会と捉える時代に突入したとして、経済と環境の好循環を作っていく産業政策である「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（以下、

「グリーン成長戦略」という。)を2021年6月に策定し、成長が期待される産業において高い目標を設定した上で予算、税制、金融、規制改革・標準化等のあらゆるツールを総動員しながら様々な政策を推進している²⁾。また、地球温暖化対策計画においても、もはや地球温暖化対策は経済成長の制約ではなく、積極的に地球温暖化対策を行うことで、産業構造や経済社会の変革をもたらす大きな成長につなげるという考えの下、GX(グリーントランスフォーメーション)の推進等に取り組んでいくこととしている。



図Ⅱ－１ 2050年カーボンニュートラルの実現
(出典) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

(令和3年6月18日、内閣官房ほか9府省庁) ※ 赤枠は生研支援センターが追加

2050年カーボンニュートラルの実現に向けては、様々な分野で大幅なGHG排出削減が求められる一方、現段階ではGHG排出削減が困難な産業^aがあるなど、排出を完全にゼロに抑えることは現実的には難しいことから、大気中のGHGを回収・吸収し、貯留・固定化するネガティブエミッション(負の排出)が不可欠である(図Ⅱ－1の赤い枠)。国際エネルギー機関(IEA)や気候変動に関する政府間パネル(IPCC)等各機関における推定によれば、ネガティブエミッション技術(Negative Emissions Technologies、以下「NETs」という)の活用によ

^a Hard-to-Abate 産業と呼ばれる。鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプ等が該当。

り、世界全体で 2050 年に約 20～100 億 t-CO₂/年の CO₂除去が必要とされている。また、IPCC 第 6 次評価報告書のシナリオでは、我が国のカーボンニュートラル達成時点における残余排出量は約 0.5～2.4 億 t-CO₂/年と推定されている³⁾。

この状況に対し、我が国の農林水産業は、生産過程における農地、森林や海洋の保全管理の行為を通じて、GHG の巨大な吸収源となることが期待される重要な産業であるといえる。このため、地球温暖化対策計画において森林、農地土壌、ブルーカーボン等を含む GHG 吸収源対策・施策が掲げられているとともに、農林水産省が令和 3 年 5 月に策定した「みどりの食料システム戦略」においては、農地・森林・海洋への炭素の長期・大量貯蔵に向けて、

- ・ バイオ炭の農地土壌への投入技術の開発
- ・ 堆肥、緑肥等の有機物の施用による土づくりの推進
- ・ 森林吸収源対策（早生樹やエリートツリーの開発・普及、再造林や木材利用による人工林資源の循環利用の確立、高層建築物等の木造化）
- ・ 海藻類による CO₂固定化（ブルーカーボンの推進）

等に取り組むことが掲げられている⁴⁾。

これらを含む、GHG の吸収・固定を促進する土壌炭素貯留、バイオ炭、森林の循環利用、海藻・海草の増養殖等に関する技術について、研究開発が進み農林漁業者等への導入・普及が拡大することによって、農林水産業等におけるさらなる GHG の削減につながり、2050 年カーボンニュートラルに貢献することが期待される。

以上を踏まえ、令和 6 年度は、「農林水産分野のカーボンニュートラルに向けたネガティブエミッション技術の研究開発」をテーマに設定し、海外を含む研究開発の動向等の調査・分析を行うとともに、その結果を踏まえ、さらなる研究開発や技術の導入・普及に向けた課題を特定しつつ、今後の研究開発の方向性を提案することとした。

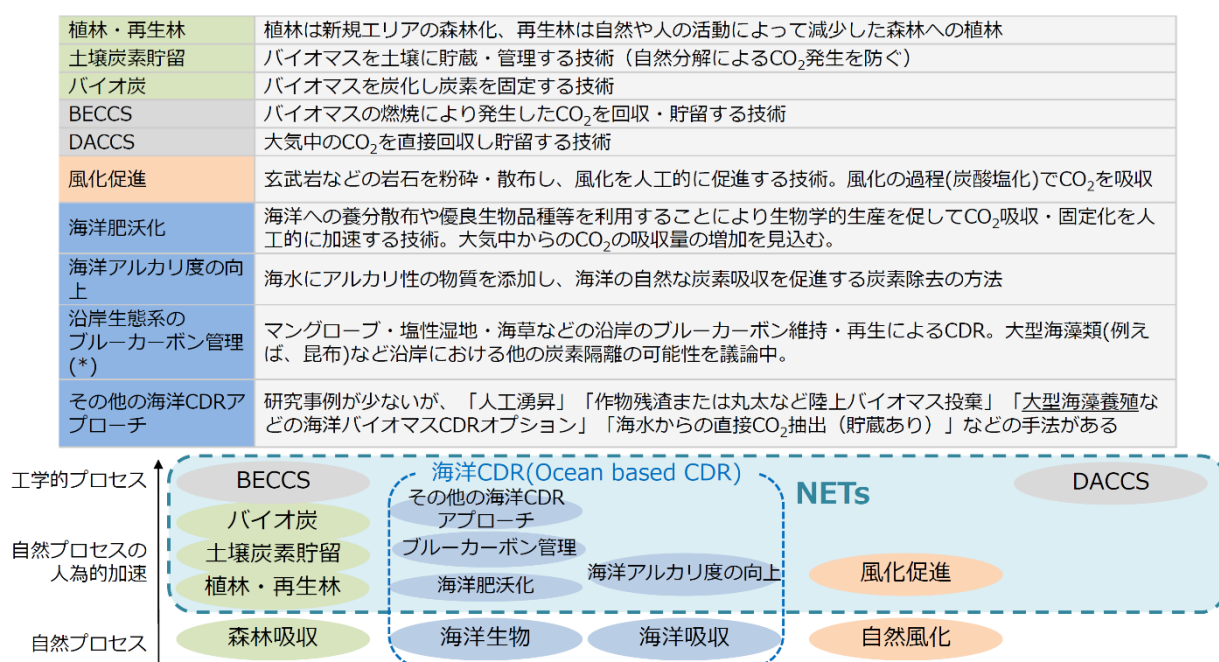
【参考文献等】

- 1) 「地球温暖化対策計画」（令和 7 年 2 月 18 日閣議決定）
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/250218.html>
- 2) 内閣官房・経済産業省・内閣府・金融庁・総務省・外務省・文部科学省・農林水産省・国土交通省・環境省
「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（令和 3 年 6 月 18 日）
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html
- 3) 「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」（令和 5 年 6 月）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/negative_emission/20230628_report.html
- 4) 農林水産省「みどりの食料システム戦略」（令和 3 年 5 月）
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>
- 5) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター調査報告書「バイオマスを CO₂吸収源としたネガティブエミッション技術」（令和 4 年 3 月）
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-RR-05.html>

Ⅲ 対象技術等

図Ⅲ－１は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究機構イノベーション戦略センター（NEDO-TSC）の整理によるNETsの定義・分類である。これによれば、NETsとは「大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することで大気中のCO₂除去（CDR, Carbon Dioxide Removal）に資する技術」と定義される¹⁾。

- **ネガティブエミッション技術(NETs)**とは、大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することで**大気中のCO₂除去(CDR, Carbon Dioxide Removal)に資する技術**。



図Ⅲ－１ ネガティブエミッション技術（NETs）の定義・分類

（出典）ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会取りまとめ（令和５年６月）

本報告書では、この整理を参考にしつつ、原則として農林漁業者やその関連業者による取組が想定されるNETsとして、次の研究領域を取り扱うこととする。

- ① 土壌炭素貯留
- ② バイオ炭^b
- ③ 森林の循環利用^c

^b バイオ炭も土壌炭素貯留に関する技術であるが、NEDO-TSCの整理を踏まえ、本報告書では独立した項目として扱う。

^c NEDO-TSCの整理では「植林・再生林」(Afforestation and Reforestation)とされているが、我が国においては、新たに森林面積が増加する状況にはない一方、現在利用期を迎え高齢級化に伴いGHG吸収量が減少傾向に

- ④ 海藻・海草^d
- ⑤ その他の海洋C D R s（海洋肥沃化、海洋アルカリ化）^e

また、本報告書では、土壌炭素貯留量の長期モニタリングや大型海藻由来炭素の長期貯留実態把握といった、長期的に取り組むべき基礎的な研究から、炭素貯留効果と土壌改良効果を併せ持つバイオ炭資材の開発といった短期的に開発すべき現場課題解決型の技術開発まで、幅広く取り上げる。このうち後者については、2050年（カーボンニュートラルの目標年）の時点で広く普及している状況を目指し、概ね10年後程度までに開発が見込まれる技術を想定する。

【参考文献等】

- 1) 「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」（令和5年6月）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/negative_emission/20230628_report.html

IV 調査方法

1. 文献・聞き取り調査

土壌炭素貯留、バイオ炭、森林の循環利用、海藻・海草及びその他の海洋C D R s（以下、これらを総称して「農林水産分野のN E T s」という。）に関する国内外の論文や研究発表、情報誌等を調査するとともに、研究者や専門家等から、農林水産分野のN E T sに関する研究開発や社会実装の動向及び課題、課題達成に向けた取組等について聞き取り調査を行った。

2. アドバイザリー委員会

有識者からなるアドバイザリー委員会を開催し、

- ・ 研究開発構想の調査対象や方法等調査全般に関すること
- ・ 研究開発構想の調査結果の分析に関すること（研究開発の動向やプロジェクト等の情報、さらなる技術開発や社会実装に向けた技術的な課題、課題の達成に資する技術的なアイデア、当該アイデアの実現に必要な技術（他産業の

ある人工林について、「伐って、使って、植える」という循環利用を確立して若い森林を造成していくことにより、排出削減効果の最大化を図るアプローチがとられていることを踏まえ、本報告書では、スマート林業の展開や木材の利用拡大等を含む、森林の循環利用に資する技術を取り扱うこととする。

^d ブルーカーボン生態系（マングローブ、塩性湿地、海草（アマモなどの顕花植物）、海藻（ワカメなどの藻類）のうち、漁業者による養殖が想定されるものとして海草及び海藻を取り扱う。

^e 海洋肥沃化及び海洋アルカリ化については、水産業従事者及び海業（漁村の人々が、海や漁村に関する地域資源の価値や魅力を活用して所得機会の増大等を図る取組）従事者が地先の海で取り組むことが想定される研究開発を取り扱う。

技術を含む）や低コスト化に係る技術に関する情報、以上を踏まえた今後の研究開発の方向性）

等についてご意見をいただくとともに、１．の調査結果やこれらのご意見を踏まえて作成した報告書の原案について、ご助言をいただいた。

アドバイザリー委員会の開催実績は次のとおり。またアドバイザリー委員は表Ⅳ－２－１のとおりである。

- ・ 第１回：令和６年１０月２１日（月）１５：００～１８：００ オンライン開催
- ・ 第２回：令和７年３月３日（月）１３：００～１６：００ 於：生研支援センター（対面とオンラインの併用開催）

表Ⅳ－２－１ アドバイザリー委員会委員一覧（五十音順、敬称略）

氏名	所属・役職
いづか ゆうこ 飯塚 優子	住友林業株式会社 執行役員 サステナビリティ推進部長
いっしき たつや 一色 竜也	神奈川県 水産技術センター 企画研究部長
うつぎ はじめ 宇都木 玄	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 研究コーディネーター（地域イノベーション推進担当）
かさい としひろ 河西 利浩	山梨県 農政部 農業技術課 新技術推進監
きしもと あやか 岸本 文紅	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 気候変動緩和策研究領域 緩和技術体系化グループ長補佐
つねつぐ ゆうこ 恒 次 祐子	国立大学法人東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
はたの りゅうすけ 波多野 隆介	国立大学法人北海道大学 名誉教授
ふじい まさひこ 藤井 賢彦	国立大学法人東京大学 大気海洋研究所 大槌沿岸センター 教授
ほり まさかず 堀 正和	国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所 社会・生態系システム部 沿岸生態系暖流域グループ長

３．海外の動向調査

農林水産分野のNE T sに関する、海外における研究開発プロジェクトや論文の動向及び国内外におけるカーボン・クレジット制度の動向について、外部への委託により調査を行った。

V ネガティブエミッション技術全体を巡る動向

農林水産分野のNE T sをめぐる主要な国・地域と我が国の動きを比較し、グローバルな潮流の中で我が国が置かれている状況を把握するため、国内外における研究開発プロジェクトや論文の動向、主要なカーボン・クレジット制度の動向について調査を行った。

1. 国内外の研究開発プロジェクトの動向

(1) 日本

① 全体概要

「Ⅱ テーマの背景と目的」において示したとおり、地球温暖化対策計画においてGHGの削減目標が定められるとともに、地球温暖化対策計画、グリーン成長戦略、みどりの食料システム戦略等に基づき、適切な森林の整備・保全、木材利用の推進、他資材から木材への転換、土壌への堆肥や緑肥等の継続的な施用やバイオ炭の施用、ブルーカーボンに関する取組等が進められている。

② 主な研究開発プログラム

政府は、令和2年度第3次補正予算において2兆円の「グリーンイノベーション基金」をNEDOに造成し、グリーン成長戦略において実行計画を策定している重点分野等であって政策効果が大きく社会実装までを見据えて長期間の継続支援が必要な領域に取り組む企業等を対象に、最長10年間、研究開発・実証及び社会実装を支援している。農林水産分野のNE T sに関しては、「食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発」のプロジェクトにおいて、高機能バイオ炭等の供給・利用技術の確立、高層建築物等の木造化に資する等方性大断面部材の開発及び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が進められている。

このほか、農林水産省の委託プロジェクト研究等において該当する研究プロジェクトがあり、その概要は、「Ⅵ 各技術について」における各領域の研究動向等の中で言及する。

(2) 米国

① 全体概要

米国エネルギー省（DOE）は、CDRの劇的な大規模化と重要なクリーンエネルギー技術のコスト削減を目指す新たな目標「Carbon Negative Shot」を2021年に発表し、

- ・CO₂の回収と貯留の両方を100ドル未満/トンにコスト削減、
- ・ライフサイクル排出量の確実な算定
- ・モニタリング・報告・検証コストが実証された、長期の安定的な貯留
- ・ギガトン規模でのCO₂除去

の達成に向けた様々な取組を展開している。

また、超党派インフラストラクチャー法（Bipartisan Infrastructure Law）に基づくDAC（Direct Air Capture）ハブの設立やCO₂輸送・貯留インフラの整備への資金提供を通じて、大規模な実証が取り組まれている。

このほか、CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage、二酸化炭素回収・有効利用・貯留）の導入・普及に向けては、45Qクレジットと呼ばれる税額控除が措置されており、2022年に成立したインフレ削減法（Inflation Reduction Act：IRA）により控除額が拡充されている。

② 主な研究開発プログラム

DOE、米国海洋大気庁（NOAA）及び米国農務省（USDA）が中心となり、様々な研究開発プログラムが展開されている。

主なプログラムの概要及び対象とする研究領域は、表V-1-1のとおり。その他に、Environmental Quality Incentives Program（EQIP）、Regional Conservation Partnership Program（RCP）、Agricultural Conservation Easement Program（ACEP）など、陸域に関する技術の導入や普及の促進を目的としたインセンティブ用途の資金提供プログラムも存在する。

米国では、2010年代は、主に土壌炭素貯留に係る基礎研究への支援（Conservation Innovation Grants など）が行われていたが、2020年代に入り、森林由来の製品開発支援（HESTIA など）や、海洋分野の基礎研究や核となる技術開発への支援（Sea-CO2 など）が行われるようになってきている。

表 V-1-1 米国における農林水産分野の N E T s に関する主な研究開発プログラム

主要プログラム	オーナー	プログラム概要	土壌炭素貯留	バイオ炭	森林の炭素利用	ブルーカーボン	海洋炭素利用	海洋アルカリ化
SEA-CO2	DOE-ARPA-E	MRV、mCDR 技術の新しいアプローチを目指す				✓	✓	✓
ROOTS		新しい植物品種と技術で土壌炭素を増加させ、温室効果ガス排出を削減し、生産性を向上させることを目指す	✓					
SMARTFARM		フィールドレベルで原料関連の排出量を正確に定量化する技術に資金を提供	✓					
HESTIA		建物を炭素貯蔵構造に変え、排出量を相殺する技術の開発を支援		✓	✓			
Ocean Acidification Program (OAP)	NOAA	海洋酸性化のメカニズム、影響、そして緩和策についての理解を深めるための研究						✓
Global Ocean Monitoring and Observing Program	NOAA	地球規模での海洋の状態をモニタリングし、科学的理科を深め環境変化や海洋の役割についてのデータを提供				✓	✓	✓
National Oceanographic Partnership Program		政府、学界、産業界が協力して海洋科学と技術の研究と開発を推進するためのプログラム				✓	✓	✓
North American Carbon Program	複数機関	北アメリカ大陸の炭素循環を理解し、炭素管理戦略を開発することを目的				✓	✓	✓
Environmental Sustainability Program	NSF	環境の持続可能性を向上させるための研究と技術開発を支援		✓				
Conservation Innovation Grants	USDA	自然資源保護を促進するための新しいツール、アプローチ、実践、技術の開発を支援する競争力のあるプログラム	✓	✓	✓			

(3) E U

① 全体概要

エネルギー、交通、農業、産業など多岐にわたる分野での変革を促進する総合的な政策枠組みとして「European Green Deal」が 2019 年に発表されるとともに、2021 年にはその核となる欧州気候法（European Climate Law）が採択された。欧州気候法では、European Green Deal が掲げる 2050 年の G H G 純排出量ゼロの目標が法文化された上で、その中間目標として 2030 年までに 1990 年比で少なくとも 55%削減すること、2040 年目標を設定すること等が併せて定められるとともに、加盟国は具体的な行動計画を策定・実施することを求められている。

また、European Green Deal の一環として策定された E U 土壌戦略に基づく土壌モニタリング法（Soil Monitoring Law）が検討されており、欧州議会及び E U 理事会において、2024 年 6 月までにその修正を含むそれぞれの立場が採択された。E U 全域で土壌が劣化し土壌の生態系サービスが損なわれているとともに、土壌の状態に関するデータが不十分であるとの問題意識の下、2050 年までに健康な土壌を実現することを目標とし、土壌の健全性の監視と評価、持続可能な土壌管理及び汚染された土地の管理について、枠組みと措置が規定されている。土壌劣化の様相の 1 つとして土壌有機炭素の損失も挙げられ、土壌有機炭素の濃度や蓄積量に係る基準が定められる見込みで

ある。

② 主な研究開発プログラム

EUでは、2010年代半ばから、Horizon2020と呼ばれるプログラム等により海洋系の基礎研究を中心に支援が行われてきたが、2020年代に入り後継プログラムとして開始された Horizon Europe では、海洋系に加えて陸上系の N E T s についても、基礎研究や核となる技術開発に支援してきている。

Horizon Europe 内における主なトピック（期待されるアウトカムやスコープを定義したもの）の概要及び対象とする研究領域は、表 V-1-2 のとおり。

表 V-1-2 EUにおける農林水産分野の N E T s に関する主なプログラム・およびトピック

トピック	トピック概要	土壌炭素貯留	バイオ炭	森林の炭素利用	ブルーカーボン	海洋炭素貯留	海洋アルカリ化
Carbon Dioxide Removal (CDR) approaches	CDR技術の技術的準備状況、要件等を調査、数値モデル化できるCDRを拡大することで気候政策をサポートする				✓	✓	✓
Renewable energy incorporation in agriculture and forestry	再生可能エネルギーの活用と農業/森林廃棄物管理により農業および林業の二酸化炭素排出量を削減する		✓				
Restoration of natural wetlands, peatlands and floodplains as a strategy for fast mitigation benefits; pathways, trade-offs and co-benefits	地球システムに関する知識の向上と社会変革のための解決策の設計と評価を行う			✓			
Let nature help do the job: Rewilding landscapes for carbon sequestration, climate adaptation and biodiversity support	陸、淡水、沿岸、海洋の特定の生態系や景観に対処しながら、地域、国、大陸レベルでの「再野生化」アプローチにより生態系の回復と炭素隔離・貯留を行う			✓			
MSCA Postdoctoral Fellowships	博士号を持つ研究者の創造力と革新力を高めるための研究を支援する				✓		✓
ERC CONSOLIDATOR GRANTS	プリンシパルリサーチの科学的に画期的・野心的な提案を支援する				✓		
Network on carbon farming for agricultural and forest soils	土壌の炭素作用・生態系を包括的に理解し、科学的なMRVと長期的な効果の保証された炭素農法を実現する	✓					
EIC Accelerator Challenge: Technologies for 'Fit for 55'	グリーントランジションを強化するために、画期的なイノベーションを実現するための技術へ支援する		✓				
Innovations for soil improvement from bio-waste	バイオ廃棄物のリサイクルを通じて土壌改良剤として生産を促進し、土地の肥沃度を高める		✓				
Biogenic carbon capture and use (CCU) for circular bio-based products	生物由来の炭素の回収・利用及び循環型非化石燃料生産に向けた研究者・イノベーターへの支援を行う			✓			
Understanding the oceanic carbon cycle	海洋の炭素吸収の可能性に関する理解を深めるために、海洋の炭素循環に関する研究を行う				✓	✓	✓
Ocean and coastal waters carbon- and biodiversity-rich ecosystems and habitats in Europe and the Polar Regions	国際協力のもと海洋と沿岸における生態系を回復させ、長期的な炭素吸収源として活用する				✓		
ERC STARTING GRANTS	優れたプリンシパルリサーチが独立した研究チーム又はプロジェクトの開始を支援する				✓		
EU-China international cooperation on blue carbon	EUと中国が協力して沿岸水域におけるブルーカーボンに関する調査を実施する（TRL4を超える技術は範囲外）			✓			
Enhancing science-based knowledge on EU forests', including old-growth forests, capacities to mitigate climate change	生物多様性、樹木種間の遺伝的多様性をサポートし、炭素貯留量と吸収能力のを保全及び強化する			✓			

（４）中国

① 全体概要

気候変動対策と持続可能な発展を推進するための政策枠組み「第14次五カ年計画」において、植林と再生林の推進により2025年までに森林カバー率を24.1%に引き上げる目標や、産業部門や発電所からのCO₂排出削減に向けてCCUS技術の開発を進めることなど、CDRに関する取組が掲げられている。

また、中国では、急速な経済発展に伴って土壌環境の質が低下し、農作物生産に悪影響を与えていた状況を改善するため、2019年に「土壌污染防治法」が制定され、土壌汚染の状況調査を行うモニタリング制度が創設されるとともに、土壌情報の収集・管理を促進するための「土壌情報サービスプラットフォーム」が構築されている。ここに蓄積される土壌内含有物等のデータは、政府系科学技術機関である中国科学院傘下のCERN土壌研究センターによって管理され、無償で公開されている。

② 主な研究開発プログラム（表V-1-3）

基礎研究と先端科学研究に資金提供する「国家自然科学基金」の中で、NETs技術の研究開発が実施されている。当該基金は、研究者の提案によるボトムアップ型、国や社会の重大な課題の解決に向けた研究開発や重点投資すべき領域などを対象とするトップダウン型、人材育成に関わるプロジェクト等があり、ボトムアップ型研究開発への資金配分が最も大きくなっている。

また、地方単位でもNETsに関する研究が行われており、威海市や海南省において、ブルーカーボンに関する研究開発の例が見られる。

その他、中国中央政府による研究開発への直接的な競争的資金提供プログラムとして、国家科学技術重大プロジェクト（National Science and Technology Major Project）や国家重点研究開発計画（National Key R&D Program of China）が存在するが、詳細情報は非公開となっている。

表V-1-3 中国における農林水産分野のNETsに関する主な研究開発プログラム

主要プログラム	オーナー	プログラム概要	土壌炭素貯留					
			土壌炭素貯留	バイオ炭	森林の炭素利用	ブルーカーボン	海洋炭素貯留	海洋アルカリ化
国家自然科学基金	国务院 科学技術部	国予算を利用し、自然科学に関連する技術の基礎研究と一部の応用研究を支援する	✓	✓	✓	✓	✓	
威海市ブルーカーボン経済発展行動計画	威海市政府	国内初めてのブルーカーボンに関する中国科学院院士ワークステーションを建設				✓		
海南国際ブルーカーボン研究センター (海南省生態環境庁直轄)	海南省政府	ブルーカーボンに関する基礎と理論研究、ブルーカーボンクレジット方法論等に関する研究、ブルーカーボン債券発行等				✓		

(5) その他

① 英国

2050年までにネットゼロを達成するための包括的な戦略「Net Zero Strategy: Build Back Greener」において、2030年までに工業的CDRによる少なくとも年間5百万t-CO₂の捕捉を目指すことが掲げられており、これに向けて1億ポンドのGGR (Greenhouse Gas Removal) イノベーションへの投資やGGRの監視・報告・検証を提供するための規制監督のオプションが検討されている。また、植林も重要な柱となっており、2050年までに毎年30,000haの新しい森林を植林する目標が設定されている。

主な研究開発プログラムとしては、GGRに関する研究開発を支援・促進する「The Greenhouse Gas Removal Hub」(実施部局: UKRI^f)、NETs技術を開発する企業等へ投資する「Net Zero Innovation Portfolio」(実施部局: BEIS^g)、同じく世界クラスの研究システムを構築するために研究者や企業へ投資・支援する「Research and Innovation Funding」(実施部局: UKRI) などがある。

② 豪州

「National Climate Resilience and Adaptation Strategy」は、自然、社会、経済、建築の4つのドメインにわたる協調的な行動を通じて、気候変動の影響に対する適応力を高めて地域社会のレジリエンスを強化し、経済的な機会を創出することを目指している。

主な研究開発プログラムとしては、土壌水文学・土壌炭素動態等土壌科学に関する研究を支援する「Soil Science Challenge Grants Program」や気候変動が林業に与える影響を研究する「Forest Industries Climate Change Research Fund」(いずれも実施部局: DAFF^h) などがあり、木材の活用や商業化における研究内容が多い。また、ブルーカーボンにおいては、国際自然保護連合(IUCN)と協力して現場での修復と保全活動を支援する

「Blue Carbon Accelerator Fund」などにより、グローバルでの活動をリードしている。

③ カナダ

「Canada's Carbon Management Strategy」に基づき、国内外でネットゼロ目標を達成するための炭素管理が推進されている。競争力のある炭素管理セクターを促進するための5つの主要優先分野に焦点を当てており、その1つとして「イノベーションと、研究・開発・実証(RD&D)を加速するこ

^f UK Research and Innovation

^g Department for Business, Energy & Industrial Strategy

^h Department of Agriculture, Fisheries and Forestry

と」が掲げられている。

主な研究開発プログラムとしては、C D Rの研究・開発・実装を推進するためのイニシアチブ「CanC02Re Initiative」(実施部局：E C C C ⁱ)、不耕起栽培やカバークロップ等による炭素隔離など農場での共同開発や実証に取り組む「Agricultural Climate Solution - Living Labs」(実施部局：A A F C ^j)などのほか、森林セクターにおける革新的な技術、製品、プロセスの研究開発を促進する「Forest Innovation Program」や、建設プロジェクトにおける革新的な木質建築技術の活用を奨励する「Green Construction through Wood (GCWood)」(いずれも実施部局：N R C ^k)など、森林の循環利用に資するプログラムがみられる。

④ サウジアラビア

経済の多様化と持続可能な発展を目指す国家計画「Vision2030」に基づき、再生可能エネルギーの導入拡大、C C S (Carbon dioxide Capture and Storage、二酸化炭素回収・貯留)技術の開発、植林活動等が進められている。

主な研究開発プログラムとしては、パーム廃棄物をバイオ炭に変換して農地に活用する「Biochar Initiative」(実施部局：N C P D ^l及びM E W A ^m)や、マングローブや海藻の炭素隔離効果に関する研究プログラム等で構成される「Red Sea Mangrove Conservation and Carbon」(実施部局：K A U S T ⁿ)がある。

⑤ インド

「National Action Plan on Climate Change」に基づき、水資源管理、森林保護 (Green India)、持続可能な農業等 8 つのミッションに取り組んでいる。このうち Green India では、森林被覆を 500 万 ha の範囲に拡大すること、炭素の隔離・貯蔵、生物多様性等の生態系サービスを強化すること等を目標としている。

主な研究開発プログラムとしては、インドの海洋資源を活用し持続可能なブルーエコノミーを推進する「Ocean Science & Resources」(実施部局：M o E S ^o)や、インドの科学技術とイノベーションに関する情報を集約し提供するためのオンラインプラットフォーム「India Science, Technology and

ⁱ Environment and Climate Change Canada

^j Agriculture and Agri-Food Canada

^k Natural Resources Canada

^l National Center for Palms and Dates

^m Ministry of Environment, Water and Agriculture

ⁿ King Abdullah University of Science and Technology

^o Ministry of Earth Sciences

Innovation Portal」(実施部局：M o S T ^P) などがある。

2. 論文の動向

(1) 調査のアプローチ

世界最大級のオンライン学術データベースである「Web of Science」を用いて、農林水産分野のN E T sに関する技術を対象に、過去10年間(2015年1月1日～2024年11月30日)における論文数を調査した。検索キーワードは、「IPCC AR6 WGⅢ:CDR Factsheet」を参考にしつつ、表V-2-1のとおりとした。

表V-2-1 論文調査の検索キーワード

ネガティブ・エミッション

土壌炭素貯留

バイオ炭

森林の循環利用

ブルーカーボン

海洋肥沃化

海洋アルカリ化

“Carbon Dioxide Removal” OR “Carbon Removal” OR “Negative Emission”

“Soil Carbon Sequestration”

“Biochar” OR “Bio-char”

“Afforestation” OR “Reforestation” OR “Improved Forest Management”

“Blue Carbon”

“Ocean Fertilization”

“Ocean Alkali*”

pasture management

grassland management

soil

organic waste

phosphate OR nitrate

crops OR “greenhouse gas” OR GHG

“life cycle assessment” OR LCA

“timber in construction agroforestry”

“bio-based products”

“bio-based materials”

biorefinery

“wood-based bioeconomy”

macroalgae

kelp

seaweed

aquaculture

sequestration

sink

burial

iron fertilization

nitrate OR phosphate OR nutrients

“enhanced upwelling”

simulation OR model

monitoring OR sensing

carbonate OR silicate

simulation OR model

monitoring OR sensing

キーワード抽出

内訳抽出キーワード (実装オプション)

(2) ネガティブエミッションに関する論文数の傾向(図V-2-2)

年々増加傾向にあり、10年間の論文数の総計は約3,700本に上る。国別にみると、米国と中国が毎年1位、2位を争っており、2021年以降米国が中国を上回っている。

我が国も増加傾向にあるが、10年間の総計は140本(11位)にとどまり、米国や中国とは大きな開きがある。

^P Ministry of Sciences and Technology

論文総数の上位11カ国		
No.	国名	論文総数 ² (2015-2024)
1	米国	928
2	中国	817
3	ドイツ	477
4	英国	441
5	カナダ	223
6	オーストラリア	222
7	イタリア	211
8	フランス	192
9	インド	159
10	オランダ	157
11	日本	140

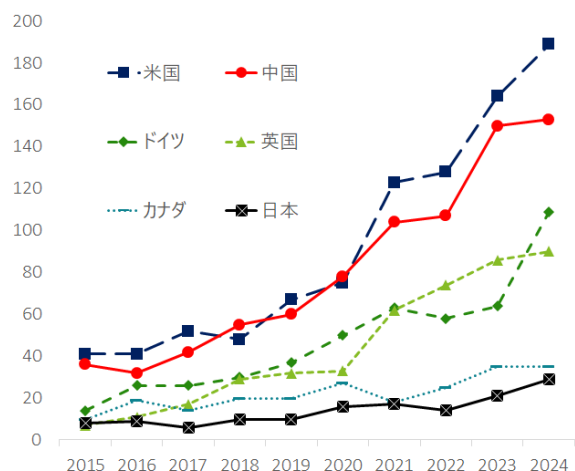


図 V-2-2 ネガティブエミッションに関する論文数（国別）

（3）各研究領域の論文数の傾向

① 土壌炭素貯留（図 V-2-3）

世界全体としては増加傾向。国別に見ると、中国が最も多く、特に 2020 年代に入ってから増加のペースが加速している。2 位は米国であるが、近年は横ばいで推移。

我が国はほぼ横ばいで推移。10 年間の論文数の合計は 48 本（17 位）であり、上位の中国、米国、豪州等と比較して桁が 1 つ少ない。また、他の研究領域と比較しても、海洋肥沃化及び海洋アルカリ化を除けば、少ない状況。

論文数上位 10 機関を確認したところ、中国の機関が過半数を占めている。また、他の研究領域と比較して、大学よりも国の研究機関が多く入っている。

論文総数の上位10カ国		
No.	国名	論文総数 ² (2015-2024)
1	中国	776
2	米国	452
3	オーストラリア	199
4	ドイツ	139
4	インド	139
6	英国	118
7	フランス	98
8	スペイン	95
9	カナダ	84
10	イタリア	83
(中略)		
17	日本	48

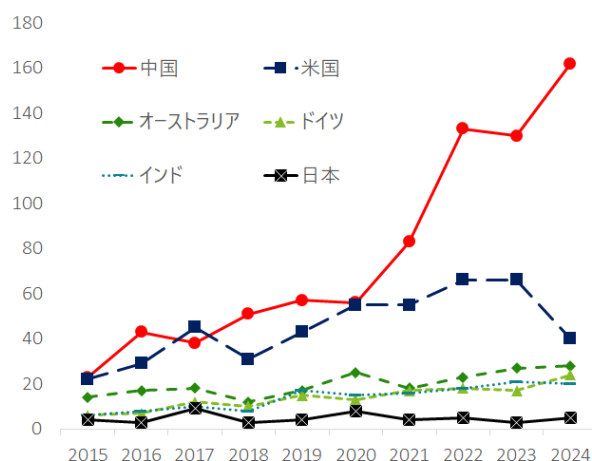


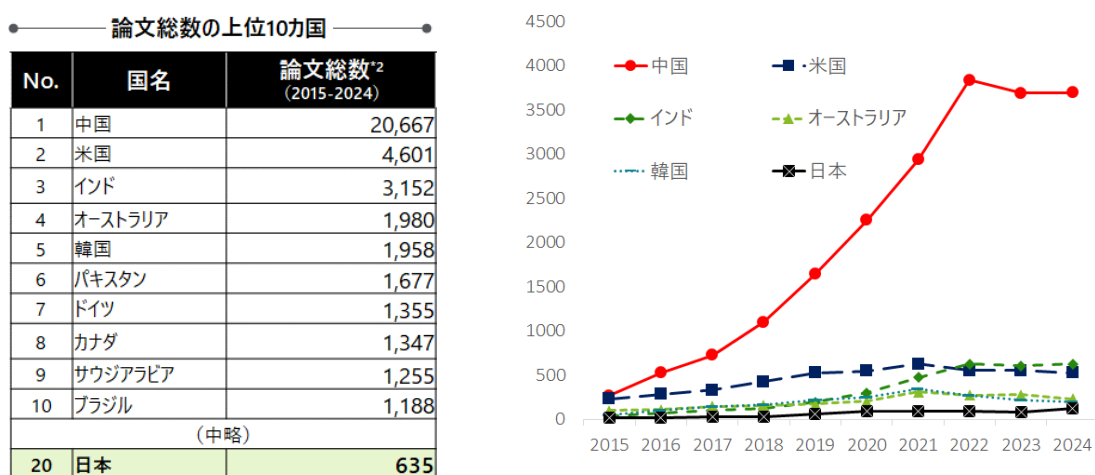
図 V-2-3 土壌炭素貯留に関する論文数（国別）

② バイオ炭（図V－2－4）

他の研究領域と比較して、非常に多くの論文が発出されている。世界全体としては、増加傾向で推移していたが、直近では横ばい傾向。国別に見ると、中国が突出して多い。米国が2位で推移していたが、2022年からはインドが2位となっている。

我が国もまた増加傾向で推移しており、10年間の論文数の合計は635本（20位）に上るが、中国とは桁が2つ異なるなど、上位の国とは大きな開きがある。

論文数上位10機関を確認したところ、中国の機関が過半数を占めている。また、エジプト、韓国といった、他の研究領域では見られない国の研究機関が入っている。



図V－2－4 バイオ炭に関する論文数（国別）

③ 森林の循環利用（図V－2－5）

世界全体としては、増加傾向で推移していたが、近年は減少傾向。国別に見ると、中国が1位、米国が2位であるが、いずれも近年はやや減少している。

我が国は横ばい傾向で推移しており、10年間の論文数の合計は244本（17位）。中国や米国とは桁が1つ小さく、大きな開きがある。

論文数上位10機関を確認したところ、中国の機関が過半数を占めている。また、他の研究領域では見られないロシアの研究機関が入っている。

論文総数の上位10カ国

No.	国名	論文総数 ² (2015-2024)
1	中国	3,527
2	米国	1,946
3	ブラジル	918
4	ドイツ	729
5	スペイン	641
6	カナダ	602
7	英国	591
8	オーストラリア	568
9	イタリア	415
10	ロシア	412
(中略)		
17	日本	244

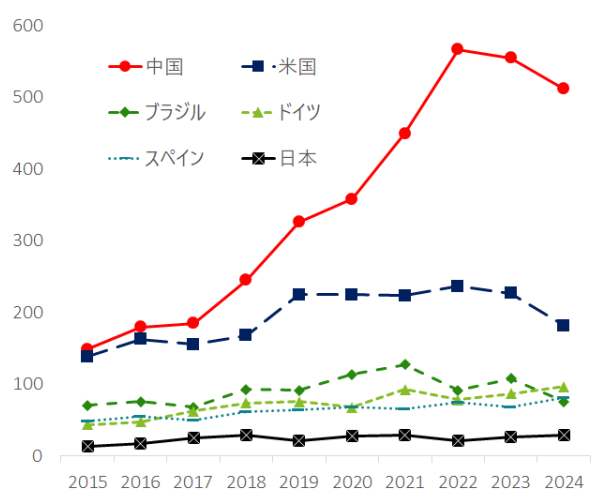


図 V-2-5 森林の循環利用に関する論文数 (国別)

④ ブルーカーボン (図 V-2-6)

世界全体としては増加傾向。国別に見ると、米国が1位で推移していたが、2022年以降は中国が1位。また、3位には豪州が入っている。

我が国は2021年に急速に増加しており、10年間の論文数の合計は157本に上る。国別の順位では6位に入っており、他の研究領域に比べると競争力が高い状況といえる。

論文数上位10機関を確認したところ、豪州の機関が5つ入っている一方、中国の機関は1つにとどまる。また、他の研究領域では見られないスペインの研究機関が入っている。

論文総数の上位10カ国

No.	国名	論文総数 ² (2015-2024)
1	中国	655
2	米国	631
3	オーストラリア	512
4	英国	247
5	スペイン	186
6	日本	157
7	ドイツ	142
8	インドネシア	125
9	カナダ	100
10	韓国	99

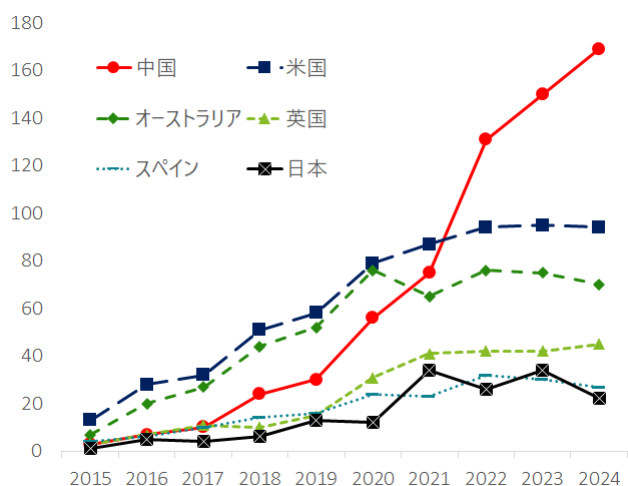


図 V-2-6 ブルーカーボンに関する論文数 (国別)

⑤ 海洋肥沃化 (図 V-2-7)

年間の論文数が数本～10数本で推移しており、他の研究領域と比較して著

しく論文数が少ない。国別に見ると、米国と英国が比較的多いが、1位の米国でも10年間の論文数の合計は20本に満たず、海洋肥沃化の研究はまだ黎明期であるといえる。

我が国における10年間の論文数の合計は4本にとどまっているが、上位との開きはあまりないため、今後研究開発への投資を増やすことによって、高い競争力を持てる可能性がある。

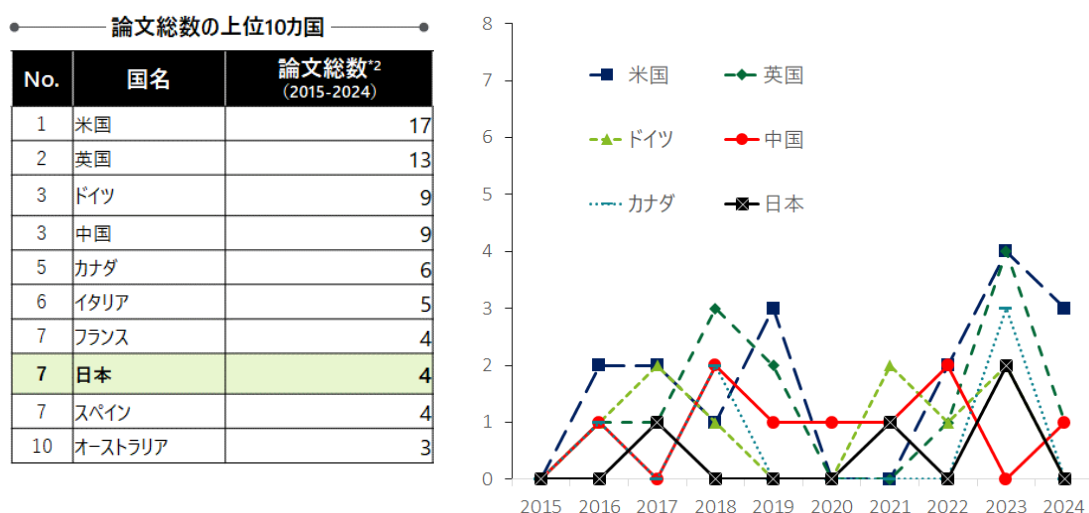


図 V-2-7 海洋肥沃化に関する論文数（国別）

⑥ 海洋アルカリ化（図 V-2-8）

世界全体としては増加傾向であるが、他の研究領域（海洋肥沃化を除く）と比較すると少ない。国別に見ると、米国が1位である一方、2位のドイツが近年急激に論文数を増やしている。

我が国における10年間の論文数の合計は8本であり、10位に入っている。海洋肥沃化と同様に、全体の論文数が他の研究領域と比較して少ないため、今後研究開発への投資を増やすことによって、高い競争力を持てる可能性がある。

論文数上位10機関を確認したところ、ドイツの学術機関や大学が4つ入っており高い存在感を示している。

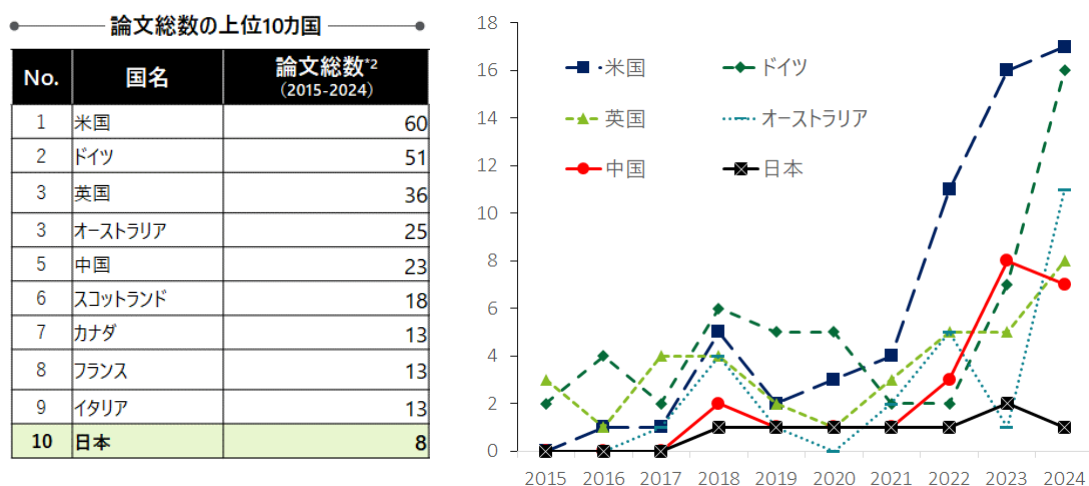


図 V-2-8 海洋アルカリ化に関する論文数（国別）

3. カーボン・クレジット制度の動向

（1）調査のアプローチ

農林水産分野の N E T s の導入・普及を拡大していくにあたり、これによる G H G の吸収・除去量をクレジットとして認証し他者と取引可能な形にするカーボン・クレジット制度が大きな役割を果たすことから、国内外の 8 つの主要なカーボン・クレジット制度について調査した。

農林水産分野の N E T s に関する方法論のうち 2025 年 1 月時点で有効なものについて、各制度の web サイトや Barkeley Carbon Trading Project の “Voluntary Registry Offsets Database” を参照し、制度や方法論の概要及び 2015 年から 2024 年の 10 年間ににおけるクレジット発行量を確認した。

（2）主なカーボン・クレジット制度と方法論の概要

主なカーボン・クレジット制度の概要は表 V-3-1 のとおり。国連・政府主導の制度と民間主導（ボランタリー）の制度がある。

日本国内では、2013 年度に国内クレジット制度と J-V E R 制度が J-クレジット制度として一本化され、経済産業省・環境省・農林水産省の共同により運営されているほか、表にはないが、ブルーカーボンの取組を対象とするボランタリー制度として、ジャパンプルーエコノミー技術研究組合が運営する J ブルークレジットがある。

カーボン・クレジットの品質を担保するため、I C-V C M において、「ガバナンス」「G H G 排出の影響」「持続可能な開発」の観点から「透明性」「追加性」「永続性」等 10 の規定を設定した Core Carbon Principle (C C P s) が 2023 年に公表されるなど、ルールメイキングが進められている。^{1) 2)}

表 V-3-1 主なカーボン・クレジット制度の概要

	クレジット認証・機関名	運営国	開始年	概要	主なプロジェクト地域
国連・政府主導	Clean Development Mechanism (CDM)	CDM執行理事会 (国連)	2005年 (京都議定書)	■ 京都議定書の下で設けられたメカニズム ■ COP29で決定された6条4項(国連管理メカニズム)において、一部 CDM活動及びPoAが登録可能。また、CERsをNDCの達成に使用可能 ■ 日本政府が主導する二国間の温室効果ガス削減認証制度 ■ 日本がパートナー国と協力して排出削減プロジェクトを実施し、その成果を両国で共有	途上国
	Joint Crediting Mechanism(JCM)	日本	2013年	■ 環境省、経済産業省、農林水産省で共同で制度を管理 ■ プロジェクトの登録形態は「通常型」と「プログラム型」の2つ ■ 「プログラム型」は削減・吸収活動を随時追加することが可能	日本とパートナー国
	J-クレジット制度	日本	2013年	■ 環境省、経済産業省、農林水産省で共同で制度を管理 ■ プロジェクトの登録形態は「通常型」と「プログラム型」の2つ ■ 「プログラム型」は削減・吸収活動を随時追加することが可能	日本
民間主導 (ボランティア)	Verified Carbon Standard(VCS)	米国	2006年	■ 独立した第三者機関であるVerra (米国) が運営するカーボンの認証制度 ■ 取引量が最も多いボランティア・クレジット制度	グローバル
	Gold Standard (GS)	スイス	2003年	■ 2003年にWWF(World Wide Fund for Nature)等の国際的な環境 NGOが設立した認証制度	グローバル
	American Carbon Registry (ACR)	米国	1996年	■ NPO法人であるWinrock Internationalが1996年に設立した世界初の民間ボランティア・オフセットプログラム	主に北米
	Climate Action Reserve (CAR)	米国	2001年	■ 米国California Climate Action Registryを起源とし、主に北米地域のプロジェクトを対象	主に北米
	Puro.earth	フィンランド	2019年	■ ネガティブエミッション技術に特化したカーボンのクレジット市場 ■ 取引量は他の制度に比べて小規模だが上昇傾向 ■ 2021年6月にNASDAQが買収	グローバル

また、各制度における、農林水産分野の N E T s に関する方法論の数は図 V-3-1 のとおり。最も多いのはボランティア制度の V C S (Verified Carbon Standard) であり、同じくボランティア制度の G S (Gold Standard)、C A R (Climate Action Reserve) が続く。

各 N E T s の内訳で見ると、最も多いのは森林の循環利用に関する方法論で 33 あり、次いで土壌炭素貯留の 10 となっている。また、現時点では、海洋肥沃化及び海洋アルカリ化に関する方法論はない。

J-クレジット制度では、バイオ炭に関する 1 つの方法論と森林の循環利用に関する 3 つの方法論が定められている。

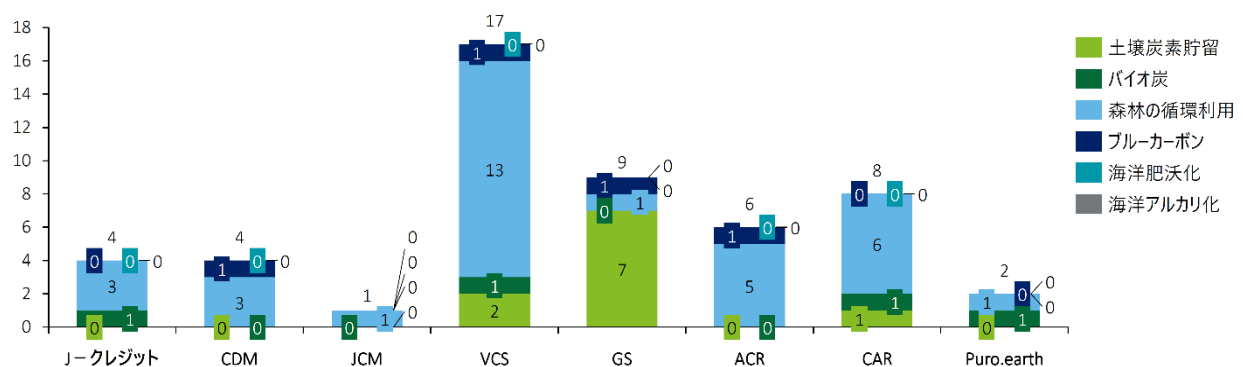


図 V-3-1 各制度における農林水産分野の N E T s に関する方法論の数

それぞれの N E T s に関する主な方法論は次のとおり。

① 土壌炭素貯留 (計 10)

V C S では、放牧する動物の密度や焼却の頻度の持続可能な調整に関する

方法論と、耕起の削減や施肥の改善、バイオマス残渣や水の管理、カバークロップ栽培等農地管理の改善に関する方法論が定められている。

また、G Sでは、不耕起の導入、バイオスティミュラントの適用、カバークロップの栽培、パルプ及び製紙工場のスラッジ由来の土壌改良剤の適用等、7つの方法論が定められている。

C A Rにおいて定められた方法論も、持続可能な農地管理に関するものである。

② バイオ炭（計4）

J ークレジットにおける方法論では、バイオ炭の農地施用を対象としている一方、他の3制度（V C S、C A R及びPuro.earth）における方法論では、農地施用のみならず非土壌への適用も認められている（例えばV C Sの場合、セメントやアスファルトへの適用など）。

③ 森林の循環利用（計33）

植林・再生林をテーマとした方法論が、C D M（Clean Development Mechanism）、V C S、G S、A C R（American Carbon Registry）、J ークレジットにおいて定められている。

森林の循環利用に関する方法論が最も多いV C Sでは、植林・再生林のほか、伐採年数の延長、選択的伐採活動の停止によって森林劣化を防止する保護林活動、温帯林及び北方林における森林管理の改善及び伐採防止、計画外の森林破壊の回避等、計13の方法論が定められていることに加え、C D Mの植林・再生林の方法論についても、クレジットを発行している。

また、A C Rでは、植林・再生林のほか、米国の非連邦林地における森林管理の改善やカナダの森林地帯における森林管理の改善等、計5の方法論が定められている。

C A Rは、米国、メキシコ、パナマ、グアテマラといった、国ごとの森林活動に関する方法論等が定められている。

日本政府がパートナー国と協力してG H G排出削減に取り組むJ C M（Joint Crediting Mechanism）では、ラオスにおける、移動耕作の管理を通じて森林破壊と森林劣化によるG H G排出を削減するための方法論が定められている。

④ ブルーカーボン（計4）

V C Sでは、マングローブ、塩性湿地、海草を含む潮汐湿地（tidal wetland）の回復に関する方法論が定められている。また、A C Rでは、カリフォルニアのデルタ地帯、サンフランシスコ湾河口及び沿岸地域における、

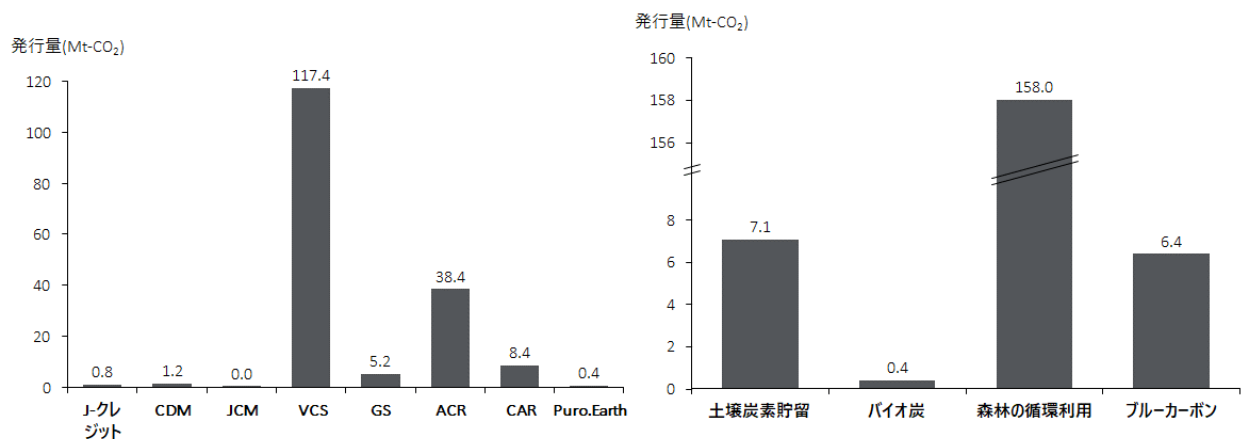
アマモ（eelgrass）藻場を含む潮汐湿地の回復に関する方法論が定められている。CDMとGSで定められている方法論は、マングローブに関するものである。

Jブルークレジットでは、自然海岸や自然海域（藻場、マングローブ、塩性湿地（干潟）等）における生態系の創出・回復・維持・劣化抑制の活動等を対象に、クレジットが発行されている。

（３）クレジット発行情（2015～2024 年の総計）の状況

① 全体

2025 年 1 月時点における農林水産分野のNETsに関する方法論全体のベンチマーク年によるクレジット発行情は、図V-3-2のとおり。VCSが突出して多く、1 億 t-CO₂を超えるクレジットが発行されている。以下、ACR、CAR、GSと続く。



図V-3-2 農林水産分野のNETsに関する方法論に係るクレジット発行情
（左：カーボン・クレジット制度間の比較、右：NETs間の比較）

② 土壌炭素貯留

全制度合わせて約 700 万 t-CO₂のクレジットが発行されている。

方法論ごとに見ると、放牧する動物の密度や焼却の頻度の持続可能な調整に関する取組（VCS、VM0032）が最も多く、全体の 90%以上を占める。また、持続可能な農業慣行の取組（CAR、U.S. Soil Enrichment）もクレジット発行の実績がある⁹。一方、GSの方法論では、まだクレジット発行の実績はない。

③ バイオ炭

⁹ このほか、2025 年 1 月時点では無効となっているが、Puro.earth の、パルプや製紙工場のスラッジなどのバイオマス残渣を土壌改良剤として使用する取組（Soil Amendment）において、クレジット発行の実績がある。

全制度合わせて約 40 万 t-CO₂ のクレジットが発行されている。このうちほぼすべては、Puro.earth の方法論 (Biochar) に基づく取組である。

なお、わずかではあるが、J-クレジットにおいてもクレジット発行の実績がある。

④ 森林の循環利用

全制度を合わせたクレジット発行量は約 1.6 億 t-CO₂ に上り、他領域と比べて突出して多い。

方法論単位で最もクレジット発行量が多いのは、計画外の森林破壊の回避に関する取組 (VCS、VM0015) で、全体の約 40% を占める。以下、米国非連邦林地における森林管理改善 (ACR、Improved Forest Management (IFM) on Non-federal U.S. Forestlands) の約 20%、湿地以外の植林・再生林活動 (CDM、AR-ACM0003、VCS による発行分を含む) の約 15% が続いている。

なお、J-クレジットにおける発行量については、森林経営活動に関する方法論が最も多く、約 83 万 t-CO₂ に上る。

⑤ ブルーカーボン

全制度合わせて約 600 万 t-CO₂ のクレジットが発行されている。

方法論ごとでは、潮汐湿地の回復に関する取組 (VCS、VM0033) が最も多く、全体の約 3/4 を占める。このほかクレジット発行の実績があるのは、劣化したマングローブ生息地での植林・再生林 (CDM、AR-AM0014、VCS による発行分)、カリフォルニアにおける潮汐湿地の回復 (ACR、Restoration of California Deltaic and Coastal Wetlands) である。

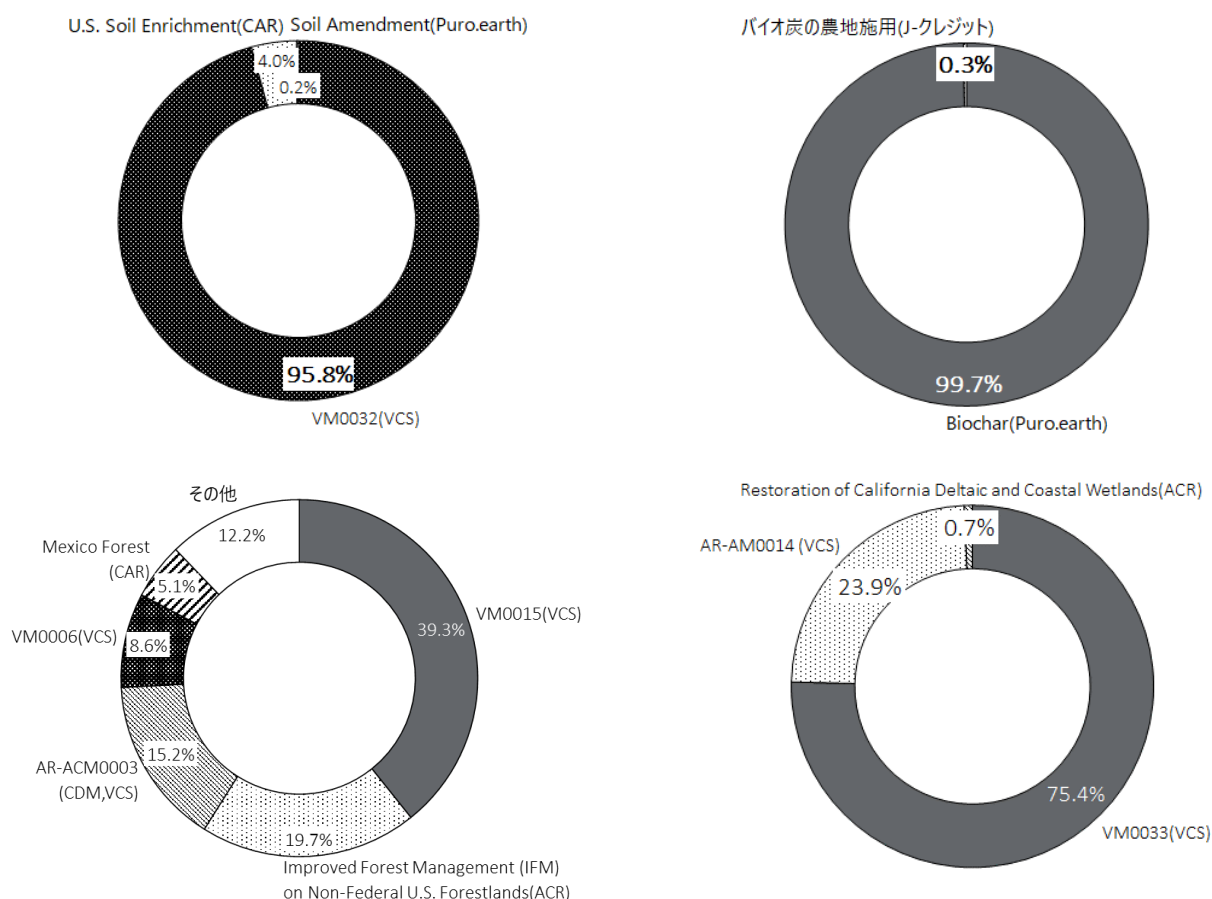


図 V-3-3 クレジット発行量の方法論ごとの内訳
(左上：土壌炭素貯留、右上：バイオ炭、左下：森林の循環利用、右下：ブルーカーボン)

【参考文献等】

- 1) 「農業分野のカーボン・クレジットの取組推進に係る最終調査結果」(2024年4月)
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/jcredit/240417_3.html
- 2) 「カーボン・クレジット・レポートを踏まえた政策動向」(2024年3月)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_credit/pdf/006_03_00.pdf

4. まとめ

農林水産分野のNETs全体をめぐる国内外の研究開発プロジェクト、論文、カーボン・クレジット制度の動向について調査した。その結果、

- ・米国、EU、中国のほか世界中で農林水産分野のNETsに関する研究開発プログラムが進められている中、我が国でも大型の研究プロジェクトが進行していること、

- ・中国や米国の論文数が突出しており、我が国は両国から大きく離されているものの、それ以外の国・地域に対しては遜色ない存在感を示しており、特にブルーカーボンに関する直近 10 年間の論文数は世界で 6 番目に多いこと、
- ・方法論・発行量ともに、海外のカーボン・クレジット制度（特にボランタリークレジット）が充実しており、J-クレジット制度にない方法論もみられること

等が明らかとなった。

次章では、それぞれの研究領域において、さらに詳細に国内外の研究等の動向を分析し、今後必要と考えられる研究開発の方向性を示す。

VI 各技術について

1. 土壌炭素貯留

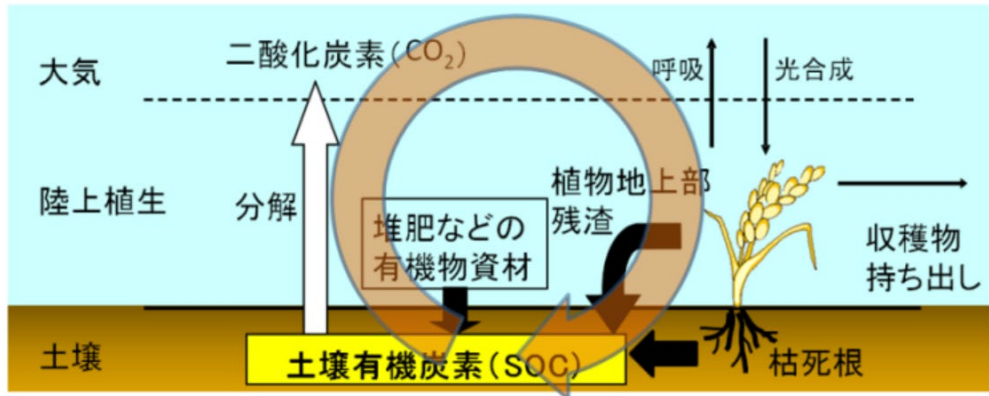
（1）技術の概要

① 土壌炭素貯留技術の概要

地球規模では、土壌は大気中に二酸化炭素（ CO_2 ）として存在する約 3 倍の炭素を貯留していると推定され、土壌中に貯留されている炭素量のわずかな変動が温暖化の進行に影響を及ぼすと考えられている。

農地では、植物は光合成により大気中の CO_2 を固定することで炭素を体内に蓄積し、その一部は収穫により農地から持ち出される。収穫されずに土壌中に入った植物体の大半は、微生物によって分解されて CO_2 として大気に戻るが、一部は土壌鉱物と結合して安定化し、土壌有機物として長期間にわたって貯留される。土壌有機物中の炭素が土壌有機炭素（SOC）である。堆肥などの有機物資材の土壌への投入や、収穫残渣（収穫後に圃場に残される作物の地上部および地下部）の土壌へのすき込み等により、土壌中の SOC を増やすことを土壌炭素貯留という¹⁾。SOC はもともと植物が光合成で大気から吸収した CO_2 に由来するので、SOC の増加分だけ、大気の CO_2 が減少するとみなせる¹⁾。このため、土壌炭素貯留は NETs の一つとされる（図 VI-1-1）。

¹⁾ バイオ炭も有機物資材の投入によって土壌中に炭素を貯留する技術であるが、バイオ炭以外の土壌炭素貯留技術に比べて、投入された炭素が土壌中に長期間にわたって貯留されるため炭素貯留効果が大きく、国内でも J-クレジットの取引が開始されるなど、技術の普及に向けた環境整備も進んでいる。そこで、本報告書ではバイオ炭は他の土壌炭素貯留技術とは分けて、次節で取り扱う。3



図VI－１－１ 農地の土壌炭素貯留（出典：農研機構，土壌のCO₂吸収見える化サイト¹⁾）

② 土壌炭素貯留のための農地の管理技術

土壌有機物は、土壌の物理性（団粒構造の形成による保水性、透水性、通気性の向上）、化学性（分解によりN、P、K等を供給）、生物性（微生物の量や質）を向上させる機能がある。このため、一般に土壌有機物含量を高く保つことは、土壌の肥沃度向上に役立つ²⁾。

日本の農地土壌の有機物含量の状況については、1）水田土壌では稲わらのすき込み量は増加しているものの、堆肥の施用量は年々減少しており、主要な水田土壌タイプの有機物含量は減少傾向で推移していること、2）畑土壌では土地利用型作物における堆肥施用量が低いレベルにとどまっており、全体の4割で「地力増進基本指針」に定める土壌中の有機物含量の改善目標を下回っていること、3）樹園地では全体の9割以上で上記指針の定める目標を達成していることが報告されている³⁾。このため、特に水田および畑地の土壌有機物量の管理を通じた土壌炭素貯留が重要といえる。

表 VI-1-1 農地を対象とする主な土壌炭素量貯留技術

「今後の環境保全型農業に関する検討会報告書」³⁾などを参考にして作成
農地整備については文献 4)

管理技術	炭素貯留効果	その他の効果	課題
堆肥の施用	土壌有機物量が増加	家畜排泄物処理対策	堆肥の製造・運搬コスト 品質のばらつき
収穫残渣の土 壌へのすき込み	土壌有機物量が増加	後作の減肥	病害虫の発生源 CH ₄ 発生増加（水田）
カバークロップ、 リビングマルチ、 草生栽培	作物の緑肥としての投入により 土壌有機物量が増加 冬期間の作付により土壌侵 食を抑制	休閑期の有効利用 堆肥に比べ労力・運搬コ ストが小さい 土壌物理性を改善	緑肥作物の種子のほとん どが輸入
多毛作・二期作、 輪作	収穫残渣により土壌有機物 量が増加 土壌侵食を抑制	生産量増加 土壌養分の地下水への溶 脱を防止	肥料などの資材や作業量 の増加
省耕起・不耕起	土壌有機物の分解を抑制 耕起作業に伴う土壌CO ₂ の 放出を抑制 土壌侵食を抑制	団粒構造が発達 蒸発散を抑制（節水）	雑草繁茂、湿害、土壌物 理性的悪化（土壌孔隙 率の低下等）
農地整備	土壌改良や暗渠の資材として 大量の有機物を土壌に投入		木材チップは有効だが、も み殻では効果が小

土壌炭素貯留のための農地の管理技術には様々な方法があり（表 VI-1-1）、上記のような農業に有益な機能をもつ土壌有機物を保持するために実施されてきた。堆肥はもっとも基本的な有機物資材だが、日本では農業労働力の減少・高齢化、耕種と畜産の分離等を背景に堆肥施用量が減少し、土壌有機物含量が低下傾向にある一方で、土壌診断に基づかない施肥等の実施による土壌中の養分過剰や塩基バランスの悪化が指摘されている。家畜ふん堆肥については品質の向上が課題となっており、堆肥の施用拡大に向けて、耕種農家のニーズに合った成分・熟成度の安定した堆肥や、窒素・塩類濃度が低い堆肥の生産・供給が求められる³⁾。多毛作や二期作では、単作よりも多くの収穫残渣が土壌に還元されることから、一般に土壌炭素の貯留量は高いレベルで維持される。水田に比べて土壌有機物の分解が大きい畑地では、地力増進作物等を組み入れた輪作体系の導入が、生産性向上と炭素貯留の効果が高い。また、カバークロップや多毛作・輪作による冬期間の作付けや、不耕起栽培による土壌侵食（水食、風食）の防止は、有機物を多く含む作土の流出を軽減し、土壌炭素貯留の低下を防止する効果が高い³⁾。なお、特定の管理技術がどのような農地にも汎用的に適用できるわけではない。一方、樹園地で草生栽培と堆肥や剪定枝の土壌への投入が併用されるように、複数の管理技術が併用される場合もある。

土壌への有機物資材の投入量を増やす管理であっても、土壌中での有機物の分解を抑制する管理であっても、実施を中止すれば土壌炭素量貯留は進まない。したがって、土壌炭素貯留のための管理技術は継続的な実施が必要であり、そのためには営農上の収益性が確保されることが不可欠である。また、土壌は CO_2 だけではなく、メタン (CH_4) および一酸化二窒素 (N_2O) の発生源でもあるので、これらのGHGとのトレードオフも考慮して実施する必要がある。たとえば、水田の湛水は土壌有機物の分解を抑制する効果があるが、土壌からの CH_4 発生を抑制するための適切な水管理（中干し）が必要になる。また、水田での収穫残渣のすき込みは、湛水後の CH_4 発生を抑制するために、秋に行うことが奨励されている。

なお、森林では植物体（樹木）とともに土壌中にも多量の炭素が貯留されており、森林の土壌炭素に関する研究も多い。森林土壌を対象とする炭素貯留技術は農地に比べれば少ないが、たとえば長伐期化、複層林化により、一度にすべての樹木が伐採されて地温が上昇し、有機物分解が進むことを回避する方法がある⁵⁾。

③ 土壌炭素貯留を取り巻く社会情勢

2015年の国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において、フランス政府が4パーミル・イニシアチブを提案したことで、地球温暖化対策における土壌炭素貯留の重要性について国際的に注目が高まった。国連食糧農業機関（FAO）は、加盟各国に呼びかけて、1 km メッシュで、深さ0–30cmの土壌炭素量を示す地図（地球土壌有機炭素地図）を作成し、2017年に公表した⁶⁾。近年、土壌炭素貯留は土壌の健康（Soil health）と関連させて論じられることが多い⁷⁾。EUでは健康な土壌の実現のため、土壌モニタリング法の制定に向けた手続きが進んでおり、並行して Horizon Europe プログラムで土壌炭素貯留変化の評価のための測定・報告・検証（MRV）の方法の検討が進められている⁸⁾。

海外では、Verified Carbon Standard（VCS）やGold Standard（GS）などの民間主導のカーボン・クレジット制度において、土壌炭素貯留に有効な農業に関わる方法論（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もの）が採用されているが、森林の循環利用に比べてクレジットの発行量が圧倒的に少ない（「V 3. カーボン・クレジットの動向」参照）。日本では、2023年10月に東京証券取引所にJ-クレジット市場が開設され、2025年1月には農業分野の売買の区分が新設された。

しかし、現在のところ、農業分野のクレジットはバイオ炭と、水田からのメタン排出削減のための中干し延長に限られており、バイオ炭以外の土壌炭素貯留技術はJ-クレジットの対象とはなっていない。一方、堆肥の施用やカ

バークロップ、不耕起播種などの技術は、土壌中に炭素を貯留し地球温暖化防止に貢献するとして、環境保全型農業直接支払により、生産者に交付金を支払う仕組みが 2015 年度から運用されている⁹⁾。2023 年度の同交付金による支援対象の取組別面積では、堆肥の施用、カバークロップが高い割合を占めている¹⁰⁾（図 VI－1－2）。また、山梨県では、4 パーミル・イニシアチブに取り組む生産者を認証する独自の制度を 2021 年に制定し、草生栽培、堆肥の投入、樹園地での剪定枝の炭化、植物残渣のすき込みなどを認証し、認証を受けた農産物を「やまなし 4 パーミル・イニシアチブ認証農産物」としてブランド化を進めている¹¹⁾（図 VI－1－3）。

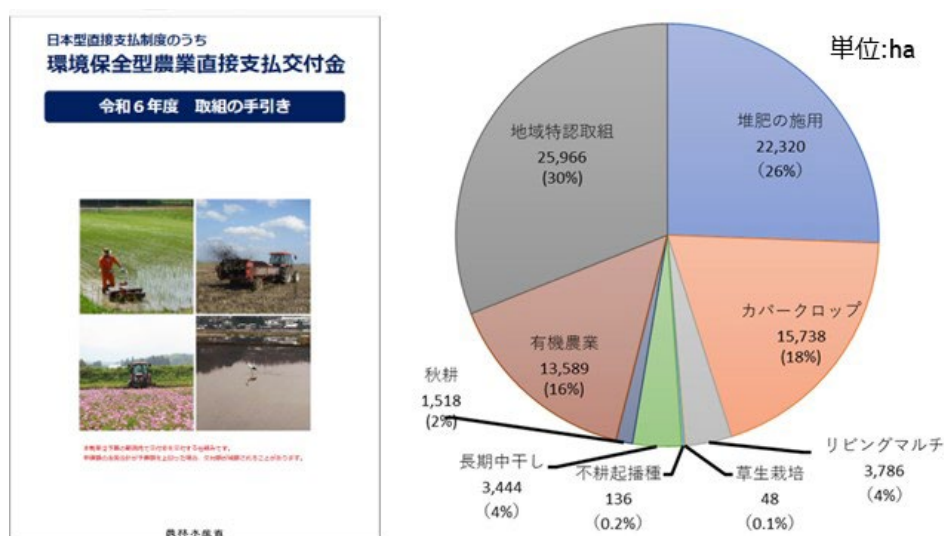


図 VI－1－2 環境保全型農業直接支払交付金の令和 6 年度版取組の手引き（左）及び令和 5 年度における支援対象取組別面積と各取り組みが全体に占める割合（右）
（出典）農林水産省ウェブサイト⁸⁾ 及び環境保全型農業直接支払交付金最終評価⁹⁾



図 VI－1－3 果樹（モモ）園での草生栽培（左）とやまなし 4 パーミル・イニシアチブのロゴマーク（右）

（出典）山梨県ウェブサイト、4 パーミル・イニシアチブについて¹¹⁾

(2) 研究動向

① 土壌炭素貯留のメカニズム

土壌中に入った有機物が微生物の分解を受け、土壌鉱物と結合して安定化するプロセスの解明が進みつつあり、土壌有機物の安定化における植物、微生物、土壌鉱物の相互作用と土壌の団粒構造が果たす役割について、さらに研究が進められている¹²⁾。一方、土壌有機物の微生物による分解（土壌呼吸）に対する温度や土壌水分の影響に関する研究も行われているが、未解明の点も多い。温度の影響に比べて、水分条件の変化の影響は複雑で非線形であるため研究が進んでいないこと¹²⁾、温暖化にともなう将来の土壌炭素貯留の変化予測においては、土壌水分の変化にともなう物質循環の予測が課題であることが指摘されている¹³⁾。

② 農地の土壌炭素貯留管理技術

土壌炭素量の増減は、正味として投入される有機物の量および質、有機物の分解に関する環境条件（温度、土壌水分、土壌の理化学性）の影響を受ける。土壌炭素貯留のための管理技術としては、投入量を増やす方法（堆肥、緑肥などの有機物資材など）と、土壌中での有機物の分解を遅くする方法（不耕起、省耕起、湛水など）がある。

ア 堆肥の施用

堆肥の施用はもっとも一般的な有機物資材の投入方法であり、全国の公設農業試験研究機関による長期連用試験などの結果により、土壌炭素貯留に有効ことが実証されている。長期間の観測により土壌炭素貯留の変化を直接検出する代わりに、生態系の炭素収支を観測する研究も実施されている。たとえば、国内4か所の採草地（家畜粗飼料生産用の草地）で3年間、草地の炭素収支および CH_4 、 N_2O を含むGHGの収支を観測した研究では、草地の炭素収支を正（正味で草地への炭素の持ち込み）にするためには、年間約 $2.5\text{t-CO}_2/\text{ha}$ の堆肥施用が必要であり、さらに N_2O の放出量も含めたGHGの収支を正（正味で草地がGHGを吸収）にするためには、年間約 $3.5\text{t-CO}_2/\text{ha}$ の堆肥の施用が必要であるという結果が得られた。堆肥の新鮮重当りの炭素含量を10%とすれば、堆肥重量としては上記の値の10倍となる¹⁴⁾。

イ 多毛作・二期作、輪作、田畑輪換

温暖化の影響等により作付けの変化がみられる。多毛作や二期作では、単作よりも多くの収穫残渣が土壌に還元される。九州などの温暖な地域では、飼料用トウモロコシの二期作が行われており、二作目は播種が遅れて

収穫期が低温になることを避けるため、不耕起栽培が行われる¹⁵⁾。温暖化の進行にともなう二期作の栽培適地の拡大に加えて、輸入飼料価格の高騰もあり、今後、飼料用トウモロコシの二期作栽培の拡大が予想される¹⁶⁾。

また、九州では再生イネを利用したコメの二期作の栽培技術が開発された。再生二期作では、二作目の育苗や移植が不要であり、適切な管理を行うことで一期作に比べて増収が可能である¹⁷⁾。これらの二期作では二作目に耕起を行わないことや、再生二期作では一作目の切株を利用することもあり、土壌中にすき込まれる収穫残渣は通常の二期作よりも少ないことが予想されるが、新たな作付けによる土壌炭素貯留の研究は見当たらない。輪作については、たとえばオホーツク地域で、従来は畑地の輪作体系に含まれていなかったダイズの作付けが増加しており、気温上昇が要因とみられる¹⁸⁾。農林水産省気候変動適応計画では、大豆・小豆等では、有機物の施用や病害虫発生リスクを軽減する輪作体系など気候変動の影響を受けにくい栽培体系の開発に取り組むとしている¹⁹⁾。

また、水稻と畑作物・野菜等を輪作する田畑輪換は、基盤整備による水田の汎用化や地下水位制御システム（F O E A S）²⁰⁾の普及にともない、今後導入の拡大見込まれる。田畑輪換は水田を利用したG H G（特にC H₄）の排出削減技術でもあるが、土壌炭素貯留の観点では、田畑輪換によって土壌有機物量（土壌炭素量）が減少すること、高頻度に畑転換した方がその減少程度が大きいこと、有機物の施用によって減少程度が緩和されることが報告されている²¹⁾。

ウ カバークロップ

カバークロップ（被覆作物）とは、土壌浸食を防ぎ土壌中に有機物を加えて土壌改良に役立つ作物の総称であり、主要作物の栽培期間の前後に緑肥作物を栽培して、緑肥として土壌にすき込んだり、主作物の畝間に緑肥を作付けするリビングマルチ、樹園地での草生栽培などがある。カバークロップは、堆肥に比べると輸送コストや施用にかかる労力の面で有利であり、化学肥料価格が高い状況が続くなかで、肥料代替効果が期待される。緑肥は堆肥よりも分解しやすいが、1年後に作土に残る有機物量では、地上部乾物重 13t/ha のソルガムでは牛ふん堆肥 1.4t/ha と同じ効果が期待できる。マメ科緑肥はソルガムよりも分解しやすいため、土壌への有機物蓄積効果は小さい。また、すき込みが遅くなると分解しにくくなり、炭素蓄積効果が大きくなるが、肥効は小さくなる²²⁾。

エ 不耕起・省耕起

不耕起・省耕起は、収穫残渣、さらには土壌有機物の分解が遅れること、および土壌侵食が抑制されることから、土壌炭素貯留効果が高く、耕起作業にともなう労力とCO₂排出量の削減にもつながる。不耕起・省耕起栽培では雑草対策が重要な課題であり、ブラジルでは遺伝子組換え技術により除草剤抵抗性を付与した作物の導入と組み合わせて、不耕起・省耕起栽培の普及を拡大している。

日本国内での不耕起・省耕起の研究例は少ないが、ダイズ畑で不耕起とカバークロップ（ライムギ）を組み合わせた約20年間の長期試験では、0-15cmの土壌炭素貯留量が増加し、不耕起栽培による炭素貯留の可能性が示された。ただし、土壌中の微生物群集のバイオマスと多様性が増加し、土壌呼吸量が増加したことから、不耕起栽培による炭素貯留の潜在的な脆弱性も指摘されている²³⁾。また、国内の畑地で3種類のGHGのフラックスを4年間にわたって観測した研究では、慣行栽培に比べて不耕起栽培ではGHGの排出削減に効果があるという結果が得られた。しかし、夏季に低温で降水が多い年には排出量が増える場合があり、その要因として、土壌水分の増加により土壌有機物の分解が加速されることが指摘されている²⁴⁾。なお、不耕起・省耕起栽培がN₂O排出に及ぼす影響は様々な要因によって大きく変動し、N₂O排出を削減する場合も増加させる場合もあること、耕起方法と有機物の種類・施用量がともにN₂O排出に関係しており、その相互作用に着目した研究が必要なことが指摘されている²⁵⁾。これはCO₂以外のGHGへの影響を含めて、不耕起・省耕起の有効性を評価するうえで留意すべき点である。

③ 作物の遺伝的改変

作物の遺伝的改変によって、バイオマスの増加や増収だけではなく、土壌炭素貯留も目指す研究が行われている。米国エネルギー省（DOE）ARPA-EによるROOTSプログラムでは、新しい品種と技術で土壌炭素の増加、GHGの排出削減、生産性の向上を目指すとしているが、これまでに実施されたプロジェクトとしては、根圏環境の改善のためのセンシングやモニタリング技術の開発が多くを占めている²⁶⁾。日本では、ムーンショットプログラム（目標4）で、CO₂固定・吸収能を高めた作物の開発により、作物の地上部だけではなく地下部も増やすことで、脱炭素と食料生産の両立をめざす研究が実施されている²⁷⁾。収穫残渣が増えることで土壌炭素貯留の増加が期待できる。

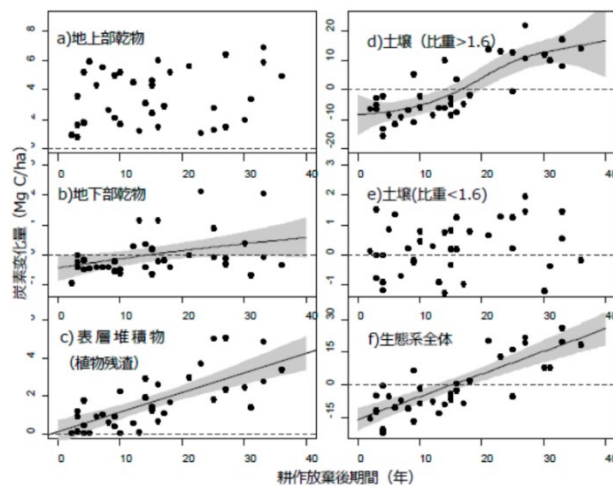
作物の根圏の改良には、地下部のセンシングが重要となる。上記のROOTSプログラムでは、中性子散乱、レーザー、マイクロ波励起などの技術によって得られた画像を利用して、作物地下部の画像化から炭素量の定量化までを

含む様々な研究プロジェクトが実施された²⁶⁾。国内でも、光ファイバーを利用して、根の成長など地下部の生物の動きをリアルタイムで可視化する技術が開発されている²⁸⁾。

④ 耕作放棄や土地利用変化にともなう土壌炭素貯留の変化

耕作放棄された農地や、農地の林地転換にともなう土壌炭素貯留の研究が行われている。国内2地点（十勝、福山）の耕作放棄後の畑地で、地上部・地下部バイオマスと土壌炭素・窒素量の変化を追跡する研究（継続中）の放棄後6年目までの結果では、土壌炭素量は放棄2年後に最少となり、その後は徐々に増加している。福山に比べて十勝では、放棄直後の土壌炭素量の減少量が小さく、その後の増加量が大きく、その理由として低温による土壌有機物の分解抑制と、植生の木本植物への遷移が指摘されている。十勝では、一定期間の耕作放棄後に耕作を再開した場合と、慣行栽培を継続した場合の土壌炭素量を比較する試験も実施されている²⁹⁾。

水田の耕作放棄にともなう炭素貯留変化については、西日本の28地点の耕作放棄水田と隣接する耕作中の水田との土壌炭素量の差と、耕作放棄期間（耕作放棄後の経過年数）との関係を解析した研究がある^{30, 31)}。耕作放棄水田では、放棄後の乾燥により、水稻残渣由来の有機物の分解が進むため土壌炭素量はいったん減少し、回復までは全体として15年かかり、放棄30年後に10tC/haの最大値に達した（図VI-1-4）。



図VI-1-4 水田の耕作放棄に伴う土壌炭素量の変化^{s)}
(出典) 農研機構北海道農業研究センター2019年の成果情報³¹⁾

^{s)} 図のeは土壌有機物のうち比重 $<1.6\text{gcm}^{-3}$ の低比重画分で、リターや粒子状有機物など、微生物が速やかに利用しやすい画分。図のdは比重 $>1.6\text{gcm}^{-3}$ の高比重画分。

土地利用の変化に伴う土壌炭素蓄積量の変化は、土地利用が変化した場所と、隣接する元の土地利用の場所の土壌炭素量の比から変化量を算出する。国内の森林と農地間の土地利用変化が生じた約 60 地点での調査では、農地から森林へ転換した場合は、転換後約 20 年間は転換前よりも炭素量が減少するが、その後は長期間にわたって増加するという結果が得られている³²⁾ (図 VI-1-5)。

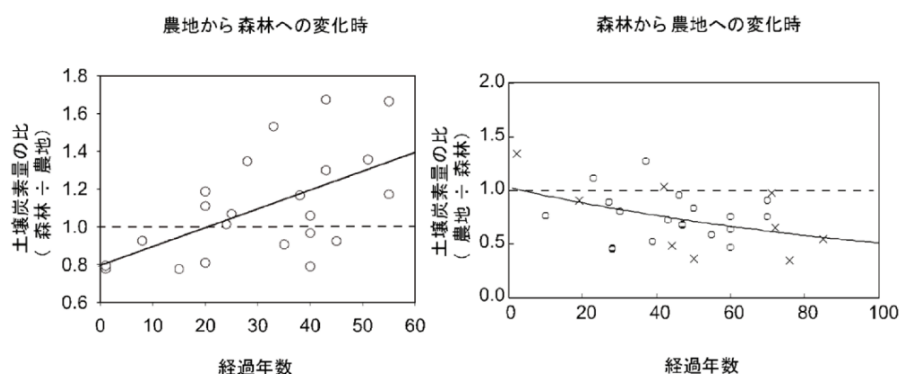


図 VI-1-5 農地から森林へ、森林から農地への土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積量の変化
(出典) 森林総合研究所研究成果選集 2022³²⁾

⑤ モニタリング

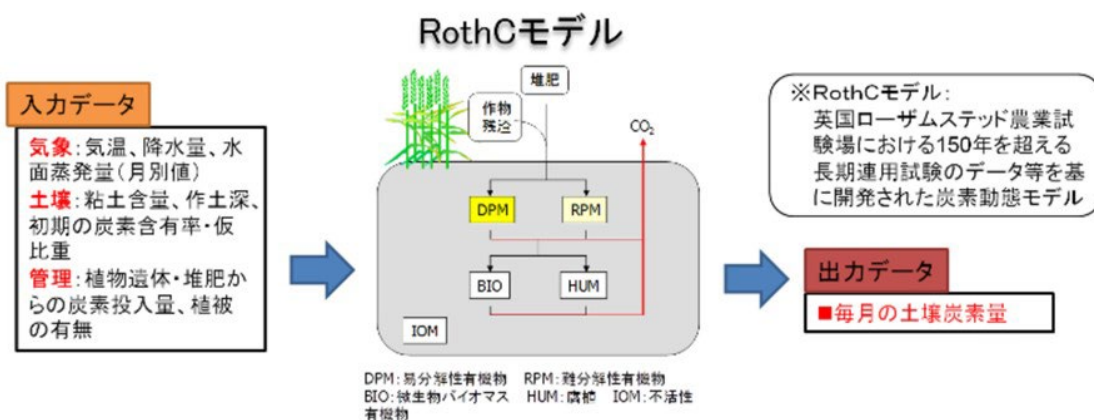
国内では、全国の農業関係公設試験研究機関で実施されてきた長期連用試験のほか、土壌環境基礎調査 (1979-1998 年)、農地土壌炭素貯留等基礎調査³³⁾ (2015 年以降) 等で、土壌炭素量の経年変化のデータが蓄積されている。土壌炭素量の標準的な計測には、地表から深さ 30cm までの土壌を採取し、乾式燃焼法で定量化するが、図 VI-1-5 に示したような土地利用変化に伴う土壌炭素量を比較する場合には、土壌質量均等法¹⁾を使用する。カーボン・クレジットの方法論では、土壌炭素量のモニタリングには土壌炭素量の直接測定が求められており、中性子非弾性散乱などの上記以外の方法も採用されている。リモートセンシングの利用も進められており、米国ではリモートセンシングで土壌炭素貯留を計測するスタートアップ企業が現れている³⁴⁾。

⑥ モデリング

英国で開発された土壌炭素貯留の簡易モデル (RothC モデル) を、国内の長期連用試験のデータに基づいて、水田や黒ボク土の畑地にも適用できるよ

¹⁾ 土壌の密度変化の影響を除去するために、同じ土壌重量に含まれる炭素量を比較する方法。

うに改良したモデルを利用して、有機物投入などの土壌管理による土壌炭素貯留を計算するウェブサイトが公開されている（図VI－1－6）¹⁾。



図VI－1－6 簡易な土壌炭素動態モデルを使用した農地の土壌炭素貯留の計算
 （出典）農研機構，土壌のCO₂吸収見える化サイト¹⁾

また、全国規模での農地土壌の炭素貯留量変化を推定する研究も行われている。上記の改良した RothC モデルと土地利用変化データ、農業活動（作物残渣および堆肥による土壌への炭素投入量）および気象データを用いて、0.1km×0.1km の区画毎に土壌炭素量の変化を計算し、全国集計した結果によれば、1979 年から 1998 年の 20 年間で、水田の畑地への転換に加えて、農地から建物用地やその他の土地利用への転換が進み、土壌への有機物投入量が減少、土壌有機物の分解量が増加し、全国の農地の土壌炭素貯留量が減少した³⁵⁾。さらに将来の土地利用変化、農業活動の変化、気候変化の各シナリオに基づいて、全国の農地土壌の炭素貯留量の変化予測も行われており、土地利用ごとの有機物投入量の不確実性ととも、土壌有機炭素の固定の期間と経時変化、将来の土地利用変化の想定および農業政策を考慮することの重要性が指摘されている³⁶⁾。

RothC モデルに比べてモデルの構造が複雑だが、土壌炭素貯留と N₂O、C H₄ の排出を同時に取り扱うことができる DNDC モデル³⁷⁾を利用した研究は、日本を含めた各国で活発に行われており、DNDC モデルを地上サンプリング、リモートセンシングと統合して、土壌炭素貯留と N₂O 排出量を定量するシステムの開発も行われている³⁸⁾。

¹⁾ 土壌中での炭素・窒素の生物地球化学を扱うプロセスモデルで、土壌からの G H G (CO₂, N₂O, CH₄) の排出を同時に予測するために使用される。当初は、畑や草地からの CO₂ と N₂O の排出量を推定することを主目的としていたが、水田からの CH₄ 排出量を推定できるモデル (DNDC-Rice) に改良された³⁷⁾。

⑦ 環境影響評価

工業製品などに適用されているライフサイクルアセスメント（LCA）手法を、農業生産活動によって生じる環境影響の評価に適用し、その分析に基づいて、全体としての環境への正の影響を最大化するような農業技術の開発を目指す研究は、日本では1990年代後半に開始された。その成果として、農業生産システムのデータから、産業連関表に基づいて得られる排出係数を用いて環境影響を評価するためのマニュアルが公表された^{39、40)}。さらに、新たに開発された農業生産システムの環境影響評価に対応できるように、モジュール化に基づくライフサイクルインベントリ（LCI）データベースが開発された⁴¹⁾。近年は土壌炭素貯留に限らず、農業分野の温暖化緩和技術の普及を目指す研究プロジェクトにおいて、技術導入にともなうGHG削減のLCA評価、営農評価、地域経済への影響評価などが組み込まれるようになってきている（たとえば、農林水産省委託事業「脱炭素型農業の実現のためのパイロット研究プロジェクト（2021-2025）」）。また、土壌炭素貯留技術（堆肥の施用、カバークロップ、リビングマルチ、草生栽培）の副次的効果として、生物多様性保全、土壌の風食・水食防止、窒素排出抑制効果に関する現地調査や文献調査が実施されている¹⁰⁾。

（３）課題と今後の研究開発の方向性

【課題１】農地における土壌炭素貯留の普及に向けた実証的研究および新規技術の開発

<背景>

農地における土壌炭素貯留の普及を進めるためには、土壌・気象条件や栽培する作物に応じて、各技術の適用による土壌炭素貯留効果と営農上の効果をわかりやすく提示するとともに、近年の気候変動やスマート農業の普及等の社会情勢も踏まえて、それらの技術を改良し、あるいは新たな技術を開発する必要がある。

バイオ炭を除く既存の土壌貯留炭素技術では、土壌中に投入する有機物資材の多くは比較的短期間に分解されてしまう。炭素貯留効果を高めるためには、投入する有機物量を増やすか、土壌中での分解が遅い有機物を投入する必要がある。その一つの方法として、近年著しく進歩しているゲノム編集技術などの遺伝子改変技術による作物の遺伝的改変が考えられる。この課題の達成に向けて、次の研究開発が必要と考えられる。

<研究開発の方向性案>

- ・ 飼料用トウモロコシの二期作や、再生イネを利用したコメの二期作、温暖化にともなう新たな輪作体系や、基盤整備による水田の汎用化にともなう田畑輪換など、今後、普及拡大が予想される新たな作付けの導入に伴う土壌炭素

貯留への影響を、CO₂以外のGHGへの影響を含めて定量化し、生産性の向上と土壌炭素貯留を両立させる技術として確立する。

- ・ 不耕起・省耕起やカバークロップなどの既存の土壌炭素貯留技術について、スマート農業の導入も含めた全国規模の実証試験を実施し、作物の収量・品質や土壌炭素貯留効果、及びそれらに影響を及ぼす要因を解明し、併せてCO₂以外のGHGへの影響やその他の環境影響、経済性も評価して、技術導入マニュアルとして提示する。
- ・ 遺伝的改変（光合成速度の増加、開花時期の調節、深根性、木質増強など）によりバイオマスが増大した作物や、土壌中での分解が遅い成分を多く含む作物を開発し、圃場試験により生育・収量および土壌炭素貯留効果を実証するとともに、CO₂以外のGHG、水利用、土壌環境への影響を含めて、土壌炭素貯留技術としての可能性を評価する。

【課題2】耕作放棄地の活用に向けた炭素貯留の解明および技術開発

<背景>

耕作放棄による荒廃農地[▽]の発生は、工業団地、道路、宅地等の他用途への転用とともに、国内農地面積の減少の主な要因となっている。荒廃農地の面積は2022年時点で25.3万haであり、そのうち9.0万haは再生利用が可能な荒廃農地（1号遊休農地）に分類され（図VI-1-7）、その55%は中山間地にある⁴²⁾。都市的地域や平地農業地域にある耕作放棄地は、宅地等への転用やスマート農業の普及に伴う生産者の経営規模拡大に利用される可能性が高いが、人口減少と高齢化が急速に進む地域、特に中山間地の耕作放棄地の適切な管理と有効活用は、農地の多面的機能の発揮の観点からも重要である⁴²⁾。

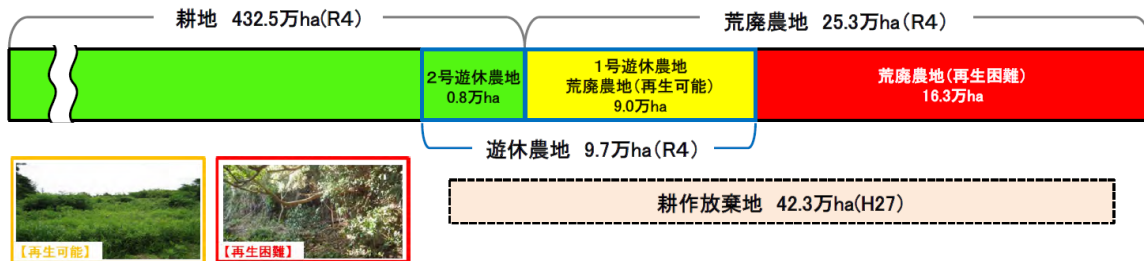
農林水産省は荒廃農地の発生防止、解消に向けて、粗放的な利用、ビオトープ、植林などを含む、人口減少社会における長期的な土地利用の在り方を示し（図VI-1-8）⁴³⁾、多面的機能支払制度、中山間地域等直接支払制度、農地中間管理事業等の施策の拡充を行っている。実際に、遊休農地の粗放的利用や林地化への取り組みは全国各地で行われており⁴⁴⁾、谷津の放棄水田を治水、水質浄化、生物多様性等に寄与するグリーンインフラ[▼]として活用する取り組み⁴⁵⁾も、長期的な土地利用の在り方に位置付けることができる。

一方、「(2) 研究動向」で述べたように、耕作放棄された農地や、林地転用後の土壌炭素貯留に関する研究も開始されており、これらの研究を発展、拡充する

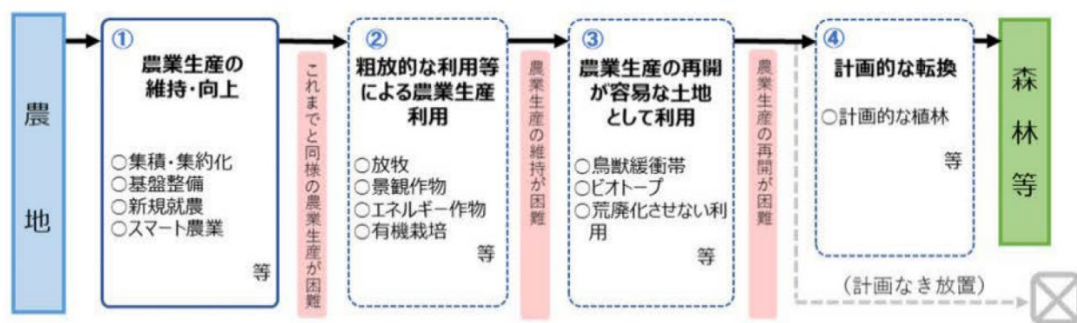
[▽] 市町村農業委員会の現地調査により、耕作に供されておらず、耕作の放棄により荒廃し、通常の農作業では作物の栽培が客観的に不可能となっていると判断された農地。これに対し、耕作放棄地とは5年ごとに実施される農業センサス（農家の自己申告）に基づく分類で、以前耕作していた土地で、過去1年以上作付けせず、数年の間に再び作付けする意志のない土地。全国の耕作放棄地面積は、2015年の調査で42.3万ha⁴²⁾。

[▼] 自然が持つ多様な機能を賢く利用することで、持続可能な社会と経済の発展に寄与するインフラや土地利用計画。

ことにより、耕作放棄地を土壌炭素貯留にも活用できる可能性がある。この課題の達成に向けて、次の研究開発が必要と考えられる。



図VI-1-7 荒廃農地、遊休農地および耕作放棄地の関係
 (出典) 農林水産省, 荒廃農地の現状と対策 (2024 年 4 月) ⁴²⁾



図VI-1-8 人口減少社会における長期的な土地利用の在り方
 (出典) 農林水産省, 地方への人の流れを加速化させ持続的低密度社会を実現するための新しい農村政策の構築（新しい農村政策の在り方に関する検討会・長期的な土地利用の在り方に関する検討会）(2022 年 4 月) ⁴³⁾

＜研究開発の方向性案＞

- ・ 耕作放棄後の農地について、農地土壌の環境変化および植生の遷移に伴う生態系の炭素動態と、炭素の各プールへの分配を解明し、耕作放棄地を活用した土壌炭素貯留の可能性を評価する。
- ・ 一定期間の耕作放棄後に耕作を再開した農地の土壌の炭素・窒素動態、および耕作放棄期間の最小限の管理（草刈り、耕うん等）が土壌炭素貯留に及ぼす影響を解明し、耕作放棄期間に土壌炭素量を保持・増加させ、耕作を再開しやすくするための管理法を開発する。

- ・ 耕作放棄された農地を飼料作物栽培や、その他の粗放的利用に供した場合の土壌炭素貯留を定量化し、それを向上させるための管理技術を開発する。
- ・ 耕作放棄された農地をバイオ炭原料の供給源として利用するための技術を開発する。
- ・ 再生困難な荒廃農地を林地に転用した場合の生態系の炭素動態を解明し、林地転用に伴う土壌炭素貯留に加えて、早生樹を利用した森林の循環利用を通じて、カーボンニュートラルに寄与する技術を開発する。

【課題3】NETsとしての有効性の評価のための基盤技術

＜背景＞

様々な土壌管理技術が、農地の肥沃度の向上に加えて、土壌炭素貯留に有効とされているにも関わらず、生産現場への普及は十分ではない。そのビジネス上の理由として、カーボン・クレジット取引の仕組みが十分に整っていない点に加えて、土壌炭素貯留の測定・検証の精度が低い点が指摘されている⁴⁶⁾。また、カーボンニュートラルに向けた土壌炭素貯留の重要性が、生産者や消費者に十分に浸透していないことも、普及が進まない一因と考えられる。

このため、信頼性のある土壌炭素貯留の測定・評価手法を開発するとともに、他の環境影響を含めて、土壌炭素貯留技術のNETsとしての有効性とその意義を、生産者、消費者、企業、投資家などにわかりやすく示すことが重要である。この課題の達成に向けて、次の研究開発が必要と考えられる。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ 土壌炭素貯留メカニズムの解明をさらに進め、農地土壌の炭素貯留ポテンシャルを明らかにする。
- ・ 気候変動に伴う地温上昇や土壌水分量の変化が土壌呼吸に及ぼす影響を解明し、農地の土壌炭素モデルを改良するとともに、日本土壌インベントリを高度化し、農地管理技術の導入に伴う土壌炭素貯留の圃場規模および全国規模でのモデル評価・予測を精緻化する。
- ・ 圃場での簡易測定、長期モニタリング、カーボン・クレジット用の検証など、それぞれの目的に応じた精度が得られ、使いやすい土壌炭素量の測定法（リモートセンシングの利用を含む）を開発する。
- ・ CH₄、N₂Oとのトレードオフ、生物多様性などのその他の環境影響・環境保全効果、および経済性を含めて、土壌炭素貯留技術のNETsとしての有効性を評価する手法を標準化する。

【参考文献等】

- 1) 農研機構, 土壌のCO₂吸収「見える化」サイト, <https://soilco2.rad.naro.go.jp/> (2025.03.10 参照)

- 2) 白戸康人, 2011. 農地管理による土壌炭素貯留効果と気候変動の緩和. 日本 LCA 学会誌, 7(1), 11-16
- 3) 農林水産省, 2008. 「今後の環境保全型農業に関する検討会」報告書
- 4) Kitagawa, I. and Tsukamoto, Y., 2014. Evaluation of technologies for sequestering carbon in agricultural land by using organic filter underdrains. Paddy and Water Environment, 12, 287-294
- 5) 農林水産省農林水産技術会議事務局, 2003. 地球温暖化の防止に関わる森林の機能 (農林水産研究開発レポート No.8)
- 6) 農研機構・国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所, 2017. 日本全国の土壌有機態炭素地図を作成- FAO 作成の全世界地図の日本部分、気候変動対策の立案などに利用 -プレスリリース (2017.12.26)
- 7) Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. Food and Energy Security, 5(4), 212-222
- 8) Batjes, N.S. et al., 2024. Towards a modular, multi-ecosystem monitoring, reporting and verification (MRV) framework for soil organic carbon stock change assessment. Carbon Management, 15(1), 2410812
- 9) 農林水産省ウェブサイト, 環境保全型農業直接支払交付金 令和 6 年度版取組の手引き https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/kakyou_chokubarai/attach/pdf/mainp-152.pdf (2025.03.10 参照)
- 10) 農林水産省, 2024. 環境保全型農業直接支払交付金最終評価. 2024 年 8 月
- 11) 山梨県ウェブサイト, 4 パーミル・イニシアチブについて. <https://www.pref.yamanashi.jp/oishii-mirai/contents/sustainable/4permille.html#ninshouseido> (2025.03.10 参照)
- 12) 和穎朗太, 2016. 陸域最大の炭素・窒素プールを制御する土壌微生物と土壌団粒構造. 土と微生物, 70(1), 3-9
- 13) 和穎朗太, 2022. 土壌炭素 (土壌有機物) の役割、存在形態、貯留ポテンシャル. 科学技術未来戦略ワークショップ報告書, バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究 (第 1 回) および (第 2 回), 32-43, 科学技術振興機構
- 14) 波多野隆介, 2024. 採草地における炭素と温室効果ガス収支. 草地と気候変動, 波多野隆介・森昭憲編, 99-103, 海青社
- 15) 加藤直樹, 2011. 九州における飼料用トウモロコシ不耕起栽培技術の紹介. 日本草地学会誌, 57(3), 172-175
- 16) 菅野勉ら, 2014. 関東地域におけるトウモロコシ (Zea mays L.) 二期作適地の近年の状況と今後の変化予測. 日本草地学会誌, 60(3), 161-166
- 17) 農研機構, 2023. 良食味多収水稻品種「にじのきらめき」を活用した 再生二期作による画期的多収生産の実現. プレスリリース (2023.10.4)
- 18) 日本学術会議 農学委員会 農業生産環境工学分科会, 2023. 見解 気候変動に対する国内農業の適応策と食料安定供給へ果たす農業生産環境工学の役割
- 19) 農林水産省, 2023. 農林水産省気候変動適応計画
- 20) 農研機構, 2016. 水田輪作における地下水位制御システム活用マニュアル (増補改訂版) https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/052038.html (2025.03.10 参照)
- 21) 西田瑞彦, 2022. 日本の農業生産力の要 水田土壌をめぐる問題とその管理の方向性. 農業, 1685(2022.1), 6-

- 22) 農研機構, 2020. 緑肥利用マニュアルー土づくりと減肥を目指してー
- 23) 茨城大学, 2022. 気候変動・環境問題と不耕起農業&カバークロップ 約 20 年間の調査で実証 「耕さない農業」が土壌炭素を貯留し土壌微生物の多様性を高める 分解促進による潜在的な脆弱性にも注目. プレスリリース (2022.10.27)
- 24) Yonemura, S. et al., 2014. Soil respiration, N₂O, and CH₄ emissions from an Andisol under conventional-tillage and no-tillage cultivation for 4 years, *Biology and Fertility of Soils*, 50(1), 63-74
- 25) 西村誠一, 2022. 北海道の農地における土壌からのメタンおよび一酸化二窒素排出の特徴および排出削減のための栽培管理技術ー既往の研究事例と今後の展望ー. *日本土壌肥料学会誌*, 93(5), 313-320
- 26) ROOTS (Rhizosphere Observations Optimizing Terrestrial Sequestration) プログラムウェブサイト
Advanced Research Projects Agency-Energy (APA-E), U.S.Department of Energy
<https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/view-all-programs/roots> (2025.03.10 参照)
- 27) ムーンショット型研究開発事業「炭素超循環社会構築のための DAC 農業の実現」プロジェクトウェブサイト.
<https://www.dac-agriculture.jp/> (2025.03.10 参照)
- 28) 国立研究開発法人海洋研究開発機構・農研機構, 2021. 地中の生物をリアルタイムで可視化する装置「Fiber-RADGET」を開発ー光ファイバによる根の可視化が実現、フィールドでのモニタリングへの応用ー, プレスリリース (2021.7.21)
- 29) Shimoda, S., 2022. Soil carbon balance after the temporal cessation of cultivation under cool and subtropical humid climate in Japan. *Soil Use and Management*, 38(1), 331-340
https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/harc/2019/harc19_s18.html (2025.02.26 参照)
- 30) Shimoda, S., Wagai, R., 2020. Ecosystem dynamics after abandonment of rice paddy fields: does alien plant invasion enhance carbon storage ?. *Ecosystems*, 23, 617-629
- 31) 農研機構, 2020. 水田の耕作放棄後の生態系炭素貯留量は外来種侵入の有無に依らず一旦減少後増加する. 北海道農業研究センター2019年の研究成果情報
https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/harc/2019/harc19_s18.html
- 32) 石塚成宏ら, 2022. 土地利用が変化した場合の土壌炭素蓄積量変化を解明. *森林総合研究所研究成果選集 2022*, 4-5
- 33) 農林水産省ウェブサイト, 農地土壌炭素貯留等基礎調査事業について
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/tuti_chyosa.html (2025.03.10 参照)
- 34) Perennial 社ウェブサイト. <https://www.perennial.earth/>. (2025.03.10 参照)
- 35) Yagasaki, Y., Shirato Y., 2014. Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit land-use change inventories - Part 1: Historical trend and validation based on nation-wide soil monitoring. *Biogeosciences*, 11, 4429-4442
- 36) Yagasaki, Y., Shirato Y., 2014. Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit land-use change inventories - Part 2: Future potentials. *Biogeosciences*, 11, 4443-4447
- 37) Fumoto, T., et al., 2008. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biology*, 14, 382-402

- 38) SMARTFARM (Systems for Monitoring and Analytics for Renewable Transportation Fuels from Agricultural Resources and Management) プログラムウェブサイト Advanced Research Projects Agency-Energy (APA-E), U.S.Department of Energy.
<https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/view-all-programs/smartfarm> (2025.03.10 参照)
- 39) 農業環境技術研究所, 2003. 農業環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発 研究成果報告書
- 40) 農業環境技術研究所, 2003. LCA 手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル
- 41) 林清忠, 2011. 農業の LCI データベースをめぐる世界動向と農研機構の取り組み. 日本 LCA 学会誌, 7(1), 23-29
- 42) 農林水産省, 2024. 荒廃農地の現状と対策
- 43) 農林水産省, 2022. 地方への人の流れを加速化させ持続的低密度社会を実現するための新しい農村政策の構築, 新しい農村政策の在り方に関する検討会・長期的な土地利用の在り方に関する検討会
- 44) 農山漁村文化協会編, 2022. 使い切れない農地活用読本 荒らさない、手間をかけない、みんなで耕す
- 45) 西廣淳ら, 2020. 「里山グリーンインフラ」による気候変動適応：印旛沼流域における谷津の耕作放棄田の多面的活用の可能性. 応用生態工学 22 (2), 175-185
- 46) 佐野則子, 2022. 自然を利用した炭素貯留がもたらす「土壌炭素クレジット」 日本企業に求められるプレーヤーとしての参画. 知的資源創造, 2022 年 9 月号, 104-119

2. バイオ炭

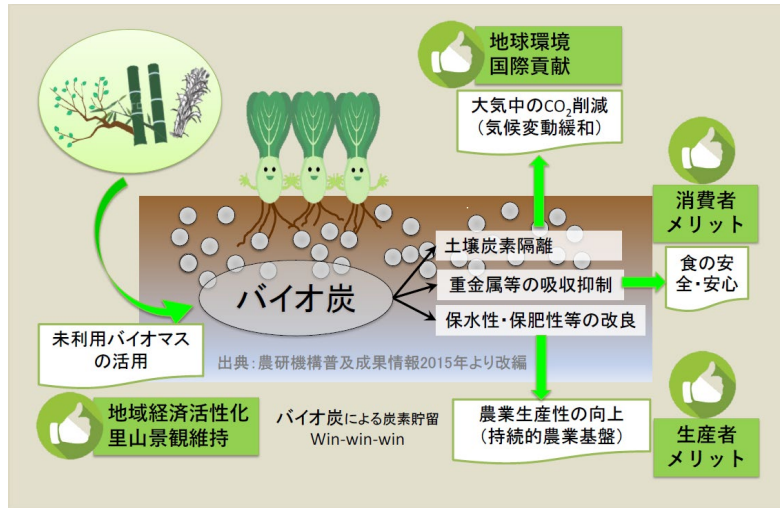
バイオ炭は、炭素の長期固定作用を持つ一方、多孔質構造による保水性・保肥性・通気性を備えていることから種々の用途に用いられている。本項では農業関連の用途を対象としたバイオ炭について調査を実施した。

【対象】

土壌改良（農地・緑地・牧草地）、肥料、生育阻害物質の吸着（連作障害の回避）、家畜飼料（腸内環境改善）、他

【対象外】

水ろ過、埋め立て、エネルギー生産、コンクリート混和材、重金属・有害化学物質の吸着固定化、他



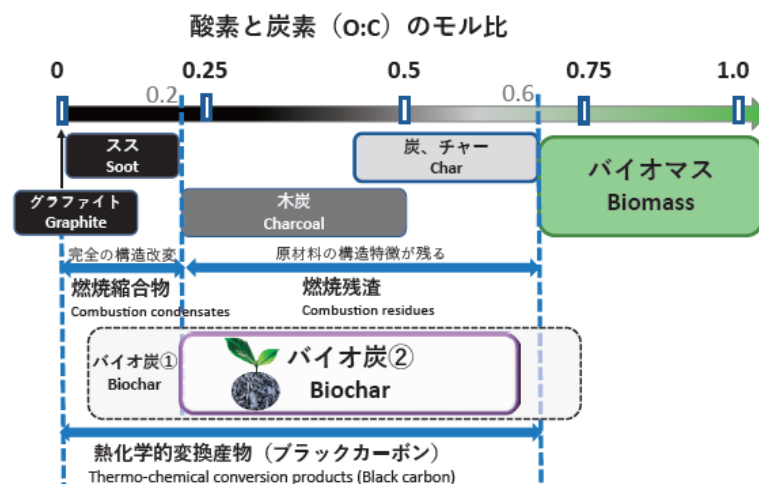
図VI-2-1 バイオ炭を用いた土壌改良と気候変動緩和の効用

(出典) 木質炭化学会誌 15(1): 2-7 (2018)

【定義】

バイオ炭は、バイオマスの熱分解後に残る炭素と灰から成る軽量で黒い残渣であり、木炭の一形態である。「気候変動に関する政府間パネル

(Intergovernmental Panel on Climate Change、略称: IPCC)」により、バイオ炭は次の通り定義されている。「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。(2019年改良 IPCC ガイドライン¹⁾)」



図VI-2-2 酸素と炭素 (O:C) のモル比

(出典) Journal of Life Cycle Assessment, Japan Vol.18, No.1 36-42 (2022)

【バイオ炭の施用状況】²⁾

バイオ炭は 2020 年 9 月に 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が、環境省の調査による 2018 年データに基づくバイオ炭使用量試算²⁾は「バイオ炭の施用量は 2,500t であり、その施用農地面積は 250ha であり、日本全土農地面積 450 万 ha の 0.006%に当たる。その後、クレジットの認証・発行が進んでおり、現時点では上記よりバイオ炭使用量が増加していることになる。

【バイオ炭の普及促進】

国内におけるバイオ炭の普及を促進する主な活動として次が挙げられる。

ア 日本の農業全体で温暖化抑制に積極的に取り組むため、山梨県が提案して 4 パーミル・イニシアチブ推進全国協議会が令和 3 年 2 月に設立された。令和 6 年 12 月時点の参加者数は 66（県・自治体、大学など研究機関、民間団体）、展開を全国的に広げつつある[※]。

イ 立命館大学内に設置されている日本バイオ炭コンソーシアムは国内外のバイオ炭の貯留に係る社会実装の加速化を目指しており、令和 5 年 2 月時点の会員は 40 以上（産業界、学術・研究機関、自治体、農業法人や N P O など）、会員によるビジネス・エコシステムの形成を通じバイオ炭の社会実装が広がりを見せている。

ウ 日本クルベジ協会は、バイオ炭の農地施用による J-クレジット制度運営管理事業とクルベジ普及事業を展開している[※]。

（１）技術の概要

① 技術構成

バイオ炭に直接あるいは間接に関係する技術として、原料、炭化装置、炭化プロセス、バイオ炭の高機能化、バイオ炭の施用技術)、および L C A などが挙げられる。

② 個別技術の概要

ア 原料の探索と選定

バイオ炭の原料になる多種多様なバイオマスの探索と利用目的に応じた選定が重要である。探索と選定に際し、各種残渣の有効活用や原料の輸送

[※] クルベジ：クールベジタブルの略。意味合いは、二酸化炭素を減らすことで地球を冷やす野菜（炭を入れた畑で作った野菜のこと）。

コストの面から、地域内における収集可能性と一定量以上の確保可能性も重要な視点になる。なお、原料の違い、製造条件の相違により、製造されるバイオ炭の性質と効果は千差万別となる。

国内のバイオ炭原料となるバイオマスとしては、木材、家畜糞尿、籾殻、木の実、剪定枝、下水汚泥由来物、海藻・藻類などがある。

国外、特にアジアで注目される原料としては、大量確保が可能な、コーヒー・オイルパーム・サトウキビの残渣、ホテイアオイなどが挙げられる。

イ 炭化装置³⁾

炭化装置には、炭化の方法や目的に応じてさまざまな種類が存在する。装置は、加熱炉、排気処理装置、冷却システムの三部品で構成される。加熱炉は、性能により炭化のスピードやバイオ炭の品質が左右されるため、安定した高温環境の維持が重要となる。また劣化や金属成分の融解が問題となる場合があり、耐熱性が技術テーマとして挙げられる。

排気処理装置に関する重要な技術は、炭化中に生じる CH_4 などが含まれるガスを適切に管理し無害化すること、発生したガスをエネルギー源として再利用すること、装置全体のエネルギー効率を向上させることが挙げられる。

冷却システムにおいては、炭化プロセスが終了した直後の高温環境における過剰な酸化反応による生成物であるバイオ炭の品質劣化の抑制、および生成物の冷却が重要となる。

ウ 炭化プロセス³⁾

炭化プロセスでは加熱の温度と時間の管理が重要であり、温度が低過ぎると炭化が不完全、高過ぎると分解が過度に進みバイオ炭の品質が損なわれる場合がある。したがって、炭化の前工程でのバイオマスの調整、熱分解、および温度と滞留時間の管理が重要となる。

エ バイオ炭の高機能化

バイオ炭を施用する農家には作物の生育促進や耐病性の向上のニーズがあり、これらに対し、微生物群定着や堆肥混合等による機能付加が技術テーマとなる。

オ 施用技術

バイオ炭を施用する上で、地域の気候・対象土壌・対象作物・施用方法・施用量・効果の連関性に関する情報の収集と分析・整理が求められている。

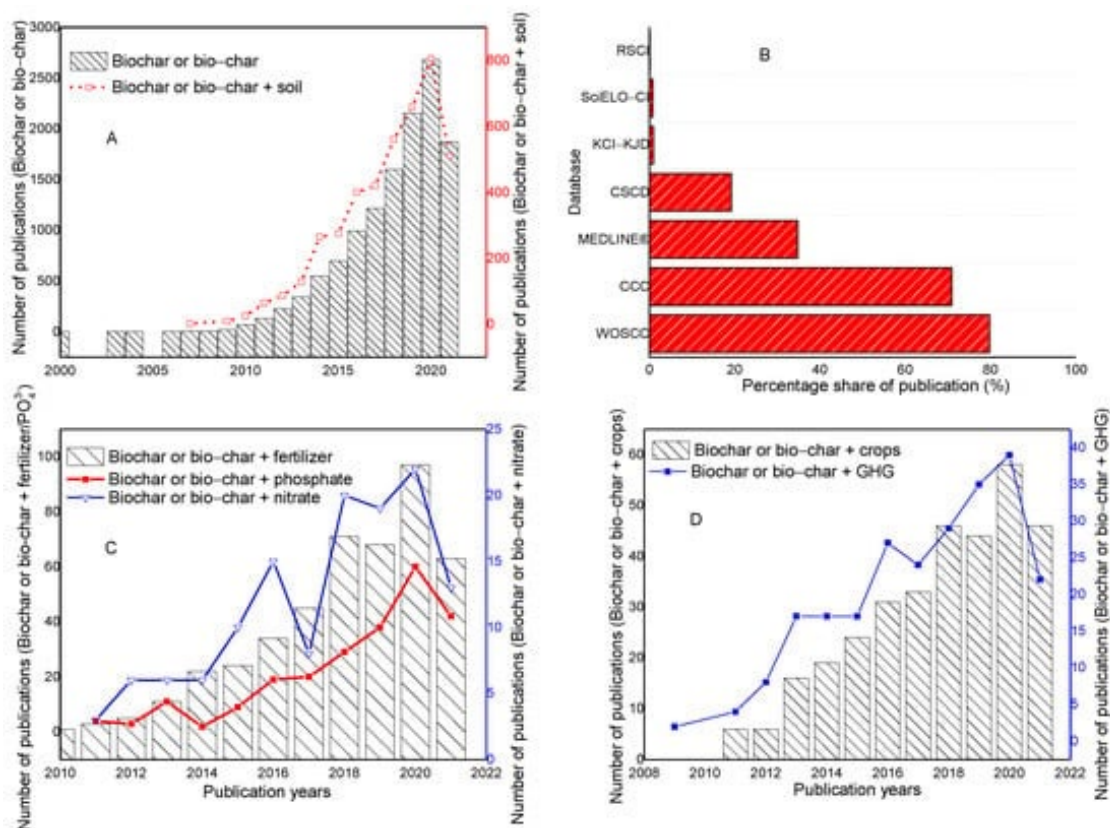
カ．LCA⁴⁾

サプライチェーン全体を通じて環境影響を評価する技法（学術研究課題として、長期施用時の固定効果、施用後の流出による影響、バイオマス資源の利用可能性等）が求められている。

（２）研究動向

① 研究動向（論文発表のトレンド）

2009年にBiocharに関する国際会議が多数開催され（「IBI conference」「USDA-SSSA biochar」「Asia-Pacific biochar」「北米 biochar 会議」）、その後論文発表が増加し、2020年には2,500報に達した⁵⁾。



図VI-2-3 Total number of the publication containing the keywords biochar or bio-char and biochar or bio-char + soil (A), number of publications in different databases (B), biochar or bio-char + phosphate/nitrate (C), and biochar or bio-char + crops/greenhouse gas (GHG) (D). Web of Science Core Collection (WOSCC), Current Contents Connect (CCC), Russian Science Citation Index (RSCI), Chinese Science Citation Database (CSCD), KCI-Korean Journal Database (KJD).

(出典) Jackson Nkoh Nkoh et al., Sustainability, 2021, 13(24), 13726

② バイオ炭に関する国別グラント⁶⁾

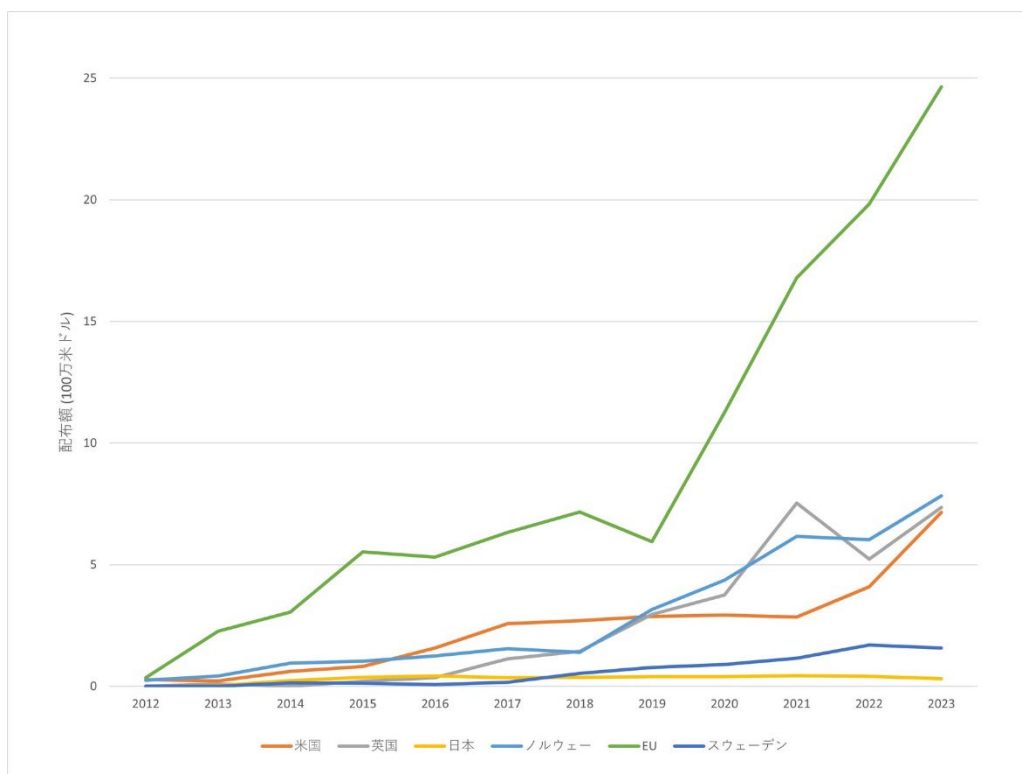
2012年から2023年までのバイオ炭に関連するグラント（研究競争資金）の採択件数における上位五ヶ国の動向は、それぞれ増減があるものの、長期的には増加傾向である。

なお、公開直後のグラント情報にはデータベースに格納されていないものもあり、直近の集計値は過小評価の可能性がある。また、中国はグラントデータ非公開のため調査対象から除外されている。

【ポイント】

- ・2012年から2023年までのバイオ炭に関連するグラントの国別付与額推移件数に関しては突出した国は認められない。

- ・配賦額ではEUがとびぬけて多く（2023年配付額：EU約2500万ドルはノルウェー、英国、米国の約3倍）、この背景にはEUでいち早く政権主導の国家プロジェクトが立ち上がったことがある（図Ⅳ－2－4）。



図Ⅵ－2－4 バイオ炭に関連するグラントの国別件数推移（2012～2023年）
（出典）アスタミューゼ株式会社 バイオマスによる二酸化炭素固定技術

③ 国内

近年の国内におけるバイオ炭関連の研究に関して国プロと大学等研究機関や民間団体による研究（後述するバイオ炭に関する学会発表）により動向を捉えてみた。

前者については令和6年度時点で二事業が展開中である。みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業では、「農地土壌の炭素貯留、肥効、 N_2O 排出削減」「地域で循環しうるバイオ炭製造と施用モデル」など、グリーンイノベーション基金事業では「高機能バイオ炭の開発」「農産物の環境価値の評価手法」とバイオ炭の施用を拡大する上での今日的課題が対象となっている。

後者については、本間の「炭化学会の発表のまとめ（2019年、2020年、2021年）」⁷⁾によると、原料、製造、機能付与、実証、効果・効用、資源循環など多岐に亘るテーマに対する取り組みがみられる。なお、日本炭化学会

は、木質資源を始めバイオマス資源の炭化に関する研究開発を推進し資源の有効利用を目指している。

ア 国プロ

- a みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち 農林水産研究の推進（委託プロジェクト研究） 「農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発」⁸⁾（令和2年度～令和6年度）

（実施者）福井県、農業・食品産業技術総合研究機構、立命館大、
秋田県立大学、他

[バイオ炭に関する研究の状況（令和5年度 研究実績報告書から抜粋）]

- ・“N₂O低排出型バイオ炭資材”および“鶏ふんを原料とするバイオ炭”の評価や肥料効果の確認が行われた。
- ・“地域で生産されたバイオ炭を用いた農業現場での施用”および“地域毎（北海道・中国・九州）のバイオ炭施用”において、作物収量データなどの収集や効果確認が行われた。
- ・“農地への最適なバイオ炭施用条件”が研究成果として提示される予定である。

- b グリーンイノベーション基金事業のうち 食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発「農業副産物を活用した高機能バイオ炭の製造・施用体系の確立」⁹⁾（2022年度～2030年度）

（実施者）株式会社ぐるなび、片倉コープアグリ株式会社、他
[バイオ炭に関するテーマ（全体計画から抜粋）]

- ・イネもみ殻等高機能バイオ炭の開発
 - “有用微生物の探索・同定・培養法の確立”
 - “バイオ炭と有用微生物等を組み合わせた高機能バイオ炭開発”
- ・高機能バイオ炭等によるCO₂固定効果の実証・評価
 - “バイオ炭の連年施用に伴う農作物影響調査”
 - “高機能バイオ炭の農地施用体系等の確立”
 - “高機能バイオ炭施用効果の現地実証試験”
 - “環境価値評価手法の開発”
 - “環境価値評価システムの検討開発”

イ 日本炭化学会大会（2019年、2020年、2021年）

研究発表会および特別講演において、最近のバイオ炭利用の取り組みについて次の様に多岐に亘るテーマについて発表がなされた。

- ・原料：木材、もみ殻等農業残渣、家畜糞尿、草木、木の実、他
- ・製造：原料に応じた製造方法、自燃式炭化技術、バイオ炭物性、他

- ・ 特定機能付与：有用微生物の機能、化学肥料代替、養分利用率向上、他
- ・ 実証研究：種々の土壌や作物への施用、最適施用量、他
- ・ 効果効用：G H G 削減、施用効果、農業生産上好ましい効果、他

④ 近年の欧米における政府主導の研究事例

ア EU ⁶⁾

2019 年末に発表された欧州グリーンディールにもとづき、「2050 年までに排出ゼロを達成する世界初の大陸になる」ことを目標に、さまざまな EU 圏内のプロジェクトが立ち上げられている。政権主導ということもあり、2020 年以降、毎年 1000 万ドルをこえる資金が投じられている計算となる。プロジェクトの起案は 2023 年以降も継続されており、EU 各国での研究はさらに活性化すると考えられている。

< 予算配付額の大きいグラントの事例（グラント主体、研究期間） >

- ・ 地域の固形廃棄物の中で最も回収率の低い食品廃棄物を肥料化する研究（EU、2021～2024 年）
- ・ 処理の難しい農業廃棄物を熱分解と熱堆肥化によりバイオ炭と堆肥を生成し農家の地域特性に応じた解決策の研究（EU、2024～2027 年）
- ・ 食品廃棄物を持続可能な土壌改良剤に変え土壌健全性と食料システム改善を図る研究（EU、2023～2027 年）
- ・ バイオ炭の安定性と G H G の土壌排出への影響に関する英国初の包括的評価（英国、2021～2025 年）

イ 米国

米国農務省（U S D A）の研究機関である農業研究局（A R S）が運営する“ARS National Programs”において 2020 年以降に報告されたバイオ炭に関する研究報告の中で重要性の高いテーマを以下に示す。個別具体的テーマが多い

< 研究事例（報告年） >

- ・ 綿繰り機からの廃棄物とクルミの殻の熱分解に由来するバイオ炭の物理化学的特性（2023 年）
- ・ バイオ炭と土壌中ミネラルや有機物との反応および相互作用の経年変化（2023 年）
- ・ バイオ炭が土壌に取り込まれた後の微生物の存在量と活動に与える影響（2020 年）

- ・ バイオ炭の土壌導入が窒素の形質転換プロセスとその基礎となる微生物メカニズムに与える影響（2020 年）
- ・ バイオ炭が保有する栄養素、高い多孔性と保水能力が土壌微生物の生存率を向上させる特性（2023 年）
- ・ サトウキビ残渣由来のバイオ炭が土壌の性質とサトウキビの収穫に及ぼす影響（2022 年）
- ・ バイオ炭との共堆肥化によるメタンなどのガス排出量の削減効果（2023 年）
- ・ 高湿度のミシシッピデルタにおけるバイオ炭の効果：トウモロコシの成長、収量、経済性（2023 年）

（３）課題と今後の研究開発の方向性

バイオ炭に関しては、2010 年頃から多数の研究が行われてきたが依然として残されている未解明な研究分野とバイオ炭の広がりが不十分な原因などを整理し 5 つの課題として取り纏めた。

バイオ炭は、炭素の長期固定作用を持つ一方で多孔質構造による保水性・保肥性・通気性を備えており土壌改善効果を有するが、作物収量の向上やバイオ炭の利用拡大に向けた研究課題の重要性が高まっている。

課題 1．バイオ炭の原料や製造条件に関する研究開発

課題 2．バイオ炭による効果の更なる解明

課題 3．バイオ炭による弊害事象や潜在リスクの回避

課題 4．利用農家や製造業者におけるバイオ炭の経済メリットの明確化

課題 5．バイオ炭による資源循環システムの構築

【課題 1】バイオ炭の効果に対する原料や製造条件の明確化

背景として、バイオ炭の原料は多岐に亘り性質が異なる特徴があること、製造条件により生成物であるバイオ炭の性質が変化すること、バイオ炭の生産過程で GHG が発生すること、および炭化炉の劣化等に関する指摘がある。

研究開発の方向性として、最適な製造条件や製造方法、炭化炉の改良、作物の収量向上などの効果をもたらす高機能バイオ炭などの研究が挙げられる。

<背景>

- ① 日本には、白炭、黒炭、オガ炭、粉炭、竹炭の他に、家畜糞尿、木材、草本、もみ殻・稲わら、木の実、汚泥、ガス化発電残渣などに由来する様々なバイオ炭が存在しており、バイオ炭分析用の独自の規格が必要との指摘がある¹⁰⁾。

- ② バイオ炭はその生産の過程で、 CO_2 の他に、メタン（ CH_4 ）と亜酸化窒素（ N_2O ）などのGHGを発生させることが知られており、炭化炉にGHG発生を抑える機能を備え付けることが重要である。
- ③ 炭化炉については、バイオ炭の製造過程で炭化炉からクロムが溶出しバイオ炭に混入するものがあるとの指摘があり、究明が必要である。他方で、東北大学ではクロム検出技術を開発中である¹¹⁾。また、炭化炉は高温に晒されることから劣化が早い傾向がある。
- ④ バイオ炭の施用目的の一つに作物の収量や品質の向上が挙げられる。バイオ炭の肥料作用を高めるため、バイオ炭への土壌微生物の定着や堆肥の混合、家畜糞尿由来のバイオ炭の開発などを進める必要がある。
- ⑤ バイオ炭を日本から世界へ広める活動が日本バイオ炭普及会等により展開されており¹²⁾、これからの研究が望まれるアジアなど熱帯地域に関しては、原料・標準品の作成・高温多湿の影響・土壌環境の影響などの研究が必要とされている。

<研究開発の方向性案>

- ・ バイオ炭原料の種類に応じた最適な製造条件や製造方法の研究 ①
- ・ バイオ炭製造過程で発生する CH_4 などGHGと炭化炉・炭化方法の調査 ②
- ・ 炭化炉の改良研究（GHGの吸収と燃焼機能を備えた炭化炉、炭化炉の耐性強化） ②③
- ・ 高機能バイオ炭の研究開発（微生物群定着・堆肥混合などによる作物の育成促進や耐病性の向上） ④
- ・ 熱帯地域にバイオ炭施用を広めるための研究（原料、高温多湿・土壌・微生物等熱帯環境の影響） ⑤

【課題2】バイオ炭による効果の更なる解明

背景として、農業関連用途におけるバイオ炭の効果について種々研究が進められてきているが、種々の試験結果を整理して農家が施用する際に利用可能な状態にする必要性や、未だ解明されていない機能が存在する。また施用されたバイオ炭は炭素を半永久的に貯留するとされているが、長期に亘る実証試験は少ないのが現状である。また、バイオ炭の施用現場では他のNETs技術を組合せて利用している実態が存在する。

研究開発の方向性として、多様な条件毎の効用効果、大規模施用、長期連用、長期実証の各試験、複数のNETs技術の組み合わせ効果の研究が挙げられる。

<背景>

- ① 農家が圃場にバイオ炭を施用する上では、気候風土・土壌性質・対象作物・バイオ炭の性能・バイオ炭の施用量および効果の関係が明確にされることが望ましい。地域毎のバイオ炭施用効果の確認と農地への最適なバイ

オ炭施用条件に関する研究が、みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業⁷⁾（令和2年度～令和6年度）の中で実施されている。

なお、日本バイオ炭普及会により、農業者・園芸愛好家向けにバイオ炭の施用目安¹³⁾が示されている。

② バイオ炭が土壌の健康、作物の生産性、土地の再生、気候変動の緩和を改善する効果は、これまでに広く研究されてきた。他方、これら研究では、土壌の種類、作物、バイオ炭の種類、環境に応じて、土壌が明らかに改善された結果から対照群と比較してほとんど差がない結果まで様々であるとF A Oは指摘している¹⁴⁾。

③ 現在適用されているバイオ炭の効果などを確認するためには長期的な研究が必要である。人工条件を用いたバイオ炭の研究が行われているが、実際のフィールド条件は異なる場合があるため、長期的なフィールド調査が必要になるとの指摘がある⁵⁾。

他方、バイオ炭の特性と効用との関係をより体系的によりメカニズム的に解明すること、バイオ炭の農地施用における大規模や長期連用効果の解明の重要性が指摘されている。¹⁵⁾

④ バイオ炭単独の施用のみならず、果樹園での下草管理（草生栽培）など他のN E T s 技術を組み合わせた利用¹⁶⁾が行われている。

<研究開発の方向性案>

- ・原料や熱分解条件により相違が生じるバイオ炭の特性と効用効果の定量化、バイオ炭の特性と効用との関係性のより体系的解明及びそれらの整理。バイオ炭施用と作物の品質向上の検証研究 ①
- ・バイオ炭の大規模施用、長期連用、長期実証試験によるバイオ炭の効果検証や環境影響の解明 ②③
- ・複数のG H G削減技術の組み合わせに関する技術の確立 ④

【課題3】バイオ炭による弊害事象や潜在リスクの回避

背景として、バイオ炭や土壌条件の組み合わせによっては有害作用が起こる可能性、バイオ炭の施用によるC H ₄、N₂Oなどの収支に与える影響の把握が不十分などの指摘がある。加えて、バイオ炭に関連するリスクを回避することは、今後、バイオ炭の施用を広げていく上で重要である。

研究開発の方向性として、バイオ炭が及ぼす種々の影響に関する情報の収集・分析・整理、環境への影響を総合的に評価するL C Aに関する研究が挙げられる。

<背景>

- ① バイオ炭や土壌の組み合わせによっては有害な作用を及ぼす場合もあり、どのような使用においても有用になるとは限らないこと¹⁷⁾、バイオ炭の効果は、土壌の種類や健康状態（劣化または健全）、土壌温度、土壌水分などに依存すること¹⁸⁾、効果やその発現メカニズム等未だ科学的ではないか解明されていない部分が相当存在すること¹⁹⁾、が指摘されている。
- ② いずれも海外の報告であるが、バイオ炭施用が作物の収穫量を減少させた事例²⁰⁾、土中のバイオ炭が農薬を吸収し農薬の効果を低下させる事象²¹⁾、不適切な種類のバイオ炭による土壌微生物叢への悪影響や炭素貯蔵能力を低下させる可能性²²⁾の指摘がある。
- なお、バイオ炭の過剰施用による土壌pHの上昇については、バイオ炭の使用目安が示されている²³⁾。

表Ⅵ－２－１ バイオ炭の施用量上限の目安について
 （出典）農林水産省「バイオ炭の施用量上限の目安について」
 minorasu 編集部
 まとめ

		pH6.5以下とする作物	pH6以下とする作物	pH5.5以下とする作物
		ほとんどの作物	ジャガイモ、サトイモ、ショウガ、ニンニク、ラッキョウ等	茶等
黒ボク土	圃場施用量	227t/ha	113t/ga	pH上昇に注意して施用
	容積あたり施用量	20%	10%	
未熟土	圃場施用量	22.7t/ha	施用しない	施用しない
	容積あたり施用量	2%		
その他土壌	圃場施用量	113t/ha	57t/ha	pH上昇に注意して施用
	容積あたり施用量	10%	5%	

- ③ バイオ炭に存在する潜在的な汚染物質による土壌汚染のリスクや、バイオ炭を生産する際の全球的なGHG排出量のリスクを回避するためには、適切な規制メカニズムが必要であるとFAOが指摘している¹⁴⁾。
- ④ バイオ炭の圃場への施用効果の体系的理解（施肥的效果、副次的効果などを網羅）を深める上で、CH₄、N₂Oなどの収支に与える影響の把握に関する研究の必要性が指摘されている¹⁰⁾。

<研究開発の方向性案>

- ・ バイオ炭が及ぼす種々の影響に関する情報の収集・分析・整理
 （農薬吸収、土壌の微生物叢など生態系への影響、土壌汚染リスク、バイオ炭を生産する際のGHG排出リスクの） ①②③
- ・ LCA（長期施用時の炭素固定効果、施用後の流出による影響、バイオマス資源の利用可能性など） ④

【課題４】利用農家、製造業者におけるバイオ炭の経済メリットの明確化

背景として、バイオ炭の価格が高く補助金なしでは施用する農家に経済メリットがないこと、バイオ炭の生産側の経済メリットも小さいことがある。

研究開発の方向性として、経済成立条件、ビジネスモデル、欧米のインセンティブ策、費用対効果の高い製造方法・製造システムの研究が挙げられる。

<背景>

- ① バイオ炭は、ある種の肥料と同程度か多くの堆肥より価格が高い。バイオ炭の大規模生産が経済的に成り立つのは、補助金の支給や炭素排出量削減政策による化石燃料の価格上昇の場合に限られるとの指摘がある²⁴⁾。
- ② 利用農家にとり、バイオ炭の施用が経済的に成立するか不明確である。バイオ炭の農地施用に対するインセンティブである環境保全型農業直接支払い交付金（5,000 円/10a）が終了すると生産者はインセンティブを失うことになる。

表Ⅵ－２－２ バイオ炭施用 1 ha の収益試算
(生研支援センター試算)

(参考) バイオ炭施用 1 ha の収益試算	
a 環境保全型農業直接支払交付金	50,000 円
b J-クレジットの売却益	4,058 円
c バイオ炭など資材購入費用	40,000 円
収益 (a+b-c)	14,058 円

参考：

a. 環境保全型農業直接支払交付金=5,000 円/10a x10=50,000 円

b. 2023 年 5 月再エネ発電のクレジット平均販売価格
3,246 円/t x1.25=4,058 円

c. 800 円/10kg x0.5t/ha=40,000 円

* バイオ炭 1t 当たり炭素貯留量

=1tx0.77(炭素含有率) x0.89(100 年後炭素残存率) x44/12x0.5 /ha=1.25

- ③ バイオ炭製造による利益確保を目指した取り組みや研究が行われており、
 - ・ガス化発電の副産物となるバイオ炭の活用（乳牛の敷料、バイオ炭牛糞たい肥）²⁵⁾
 - ・バイオ炭生産と排熱を利用した発電を組み合わせたコプロダクションシステムの構築²⁶⁾

上記 2 事例により、日本各地の未利用バイオマスの有効活用、地域分散型エネ

ルギー生産および炭素隔離を同時に実現できる可能性が示唆される。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ バイオ炭の製造・流通・施用が経済的に成立する条件、ビジネスモデル等の研究 ①②③
- ・ 欧米のバイオ炭施用インセンティブ策の研究 ①②
- ・ 費用対効果の高いバイオ炭の製造方法・製造システムの研究 ③

【課題５】バイオ炭による資源循環型エコシステムの構築

背景として、バイオ炭の施用拡大に大量かつ継続的な原料確保が必要なこと、未利用かつ多様なバイオマスの存在などがある。

研究開発の方向性として、新たなバイオマスの探索、バイオ炭製造と組み合わせが可能な発電などのシステム、バイオ炭の施用を拡大していく基盤となる継続性の高い資源循環型エコシステムの研究が挙げられる。

＜背景＞

- ① バイオ炭の施用を拡大するためには、大量のバイオ炭原料の確保と製造施設の建設、および継続性を保つ基盤となる地域に根差した資源循環型エコシステムの構築が重要となる。他方、GHG削減による気候温暖化効果を積極的に獲得するためには、バイオ炭の施用場所を農地に限らず、緑地や林地へ拡大することが必要となる。
- ② 大規模なフィールド試験からの情報はまだ限られているが、これは市場に出回っているバイオ炭のコストが高いことが原因と推測される。あらゆる種類の有機廃棄物からバイオ炭を大規模に生産することはコスト削減に役立つ可能性があるとしてFAOは指摘している¹⁴⁾。
- ③ バイオ炭の施用は地力を向上させ、持続可能な農業の構築に役立つだけでなく、同じ地域の林地残材や畜産排せつ物など「未利用バイオマス」をバイオ炭の原料とすることで、地域全体の活性化や環境の改善に貢献できるとの指摘がある²⁷⁾。
- ④ 低コストでバイオ炭を生産するのに役立つ技術に関する研究が必要である。大きな課題の1つは、多くの大規模なバイオ炭製造会社がビジネスの維持に苦労している。エネルギーのリサイクルを含む可能な限りすべての利益を集約する努力の重要性、持続可能なバイオマス源を得ることの必要性、廃棄物バイオマス(都市ごみ)の利用も選択肢の一つであること、ただし多様なバイオマスを扱うには適切な技術が必要との指摘がある⁵⁾。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ 持続可能で大量確保が可能な原料（バイオマス）の探索および確保方法の

研究 ①②③

- ・ バイオマス発電などバイオ炭製造と組み合わせが可能なシステムの研究 ①
- ・ 日本に適した地域に根差した資源循環型エコシステムの研究と構築 ①④

【参考文献等】

- 1) 2019 REFINEMENT TO THE 2006 IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES
- 2) バイオ炭とは～農業分野での脱炭素～, 中部産業経済局ホームページ, Jクレコラム 第35回 2020年6月
- 3) 炭化装置の仕組みとは? 種類や炭化プロセスを徹底解説! 株式会社 ZE エナジー コラム 2024年11月11日
<https://ze-energy.net/how-carbonization-equipment-work/>
- 4) 日本バイオ炭研究センター LCA 手法の開発・事例研究
- 5) Jackson Nkoh Nkoh et al., A Critical-Systematic Review of the Interactions of Biochar with Soils and the Observable Outcomes, Sustainability, 2021, 13(24), 13726
- 6) アスタミューゼ株式会社, バイオマスによる二酸化炭素固定技術, 2024年10月
- 7) 本間千晶, 北海道立総合研究機構 林業試験所, バイオ炭の土壌中への炭素貯留などに関する最近の研究事例の紹介, 林産試だより 2024年5月号
- 8) 農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発 (みどり戦略)
農業・食品産業技術総合研究機構、立命館、秋田県立大学、他
農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究令和2年度～令和6年度
- 9) 中谷 誠, 農業・食品産業技術総合研究機構, 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 / 高機能バイオ炭等の供給・利用技術の確立 / 農業副産物を活用した高機能バイオ炭の製造・施用体系の確立
- 10) 須藤重人, 農業・食品産業技術研究機構 農業環境変動研究センター, バイオ炭普及研究の今と、今後の展望, 於、フードサプライチェーンにおける脱炭素化の実践とその可視化の在り方等検討会 2021年
- 11) 東北発電工業, 東北大学, 木質バイオ灰を肥料に 東発・東北大が新技術開発へ 解決する課題, 日刊工業新聞 2024年10月14日
- 12) 日本バイオ炭普及会, バイオ炭とは <https://biochar.jp/activities/whatisbiochar>
- 13) 日本バイオ炭普及会, 土壌改良用バイオ炭の施用目安, 平成31年1月31日起案
- 14) FAO, BIOCHAR IN SUSTAINABLE SOIL MANAGEMENT: POTENTIAL AND CONSTRAINTS, November 2023
- 15) 岸本文紅, 農業・食品産業技術研究機構, バイオ炭の農業利用と脱炭素～国内外の動向と今後の展望, Journal of Life Cycle Assessment, Vol.18, No.1, January 2022
- 16) 山梨県, やまなし4パーミル・イニシアチブ農産物等認証制度実施要領、令和3年5月7日施行
- 17) CSIRO, Biochar fact sheet <https://www.csiro.au>
- 18) ウィキペディア, バイオ炭 <https://ja.wikipedia.org/wiki/バイオ炭>
- 19) 凌祥之, 九州大学大学院農学研究院, “バイオ炭, 歴史と期待”, JAHES シンポ (日本環境共生学会), 2024年9月

- 20) Shelby Rajkovich et al., Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil, *Biol Fertil Soils*, 2012
- 21) Brtnicky M., et al., A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment, *Science of the Total Environment*, Vol.796, 20 November 2021, 148756
- 22) Zimmerman, A. R., Gao, B. & Ahn, M. -Y., Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils, *Soil Biol. Biochem.* **43**, 1169-1179 (2011).
- 23) 土壌炭素貯留効果のある炭の施用による農作物の生育への影響の調査 令和元-2年度 農地土壌炭素貯留等基盤調査事業（研究実施主体：農研機構農業環境変動研究センター）
- 24) バイオ炭は地球と人類を救えるか, *Nature ダイジェスト* Vol. 12 No. 4, DOI: 10.1038/ndigest.2015.150424, 翻訳：三枝小夜子
- 25) 山梨県南部町バイオマスエナジー, 立命館大学カーボンプロジェクトホームページ, <https://www.ritsumeikan-carbon-minus.org/インタビュー/生産サイド南部町バイオマスエナジー>
- 26) 産総研, ネイチャーポジティブな循環型社会を創る発電型のバイオ炭生産技術, 産総研ホームページ, 2024年10月31日
- 27) 大曾根三緒, バイオ炭で収益アップ！ブランド構築やJ-クレジット活用などのメリットを紹介, *minorasu* <https://minorasu.basf.co.jp/81007>

3. 森林の循環利用

（1）技術の概要

① 日本の森林事情を考慮したNETsについて

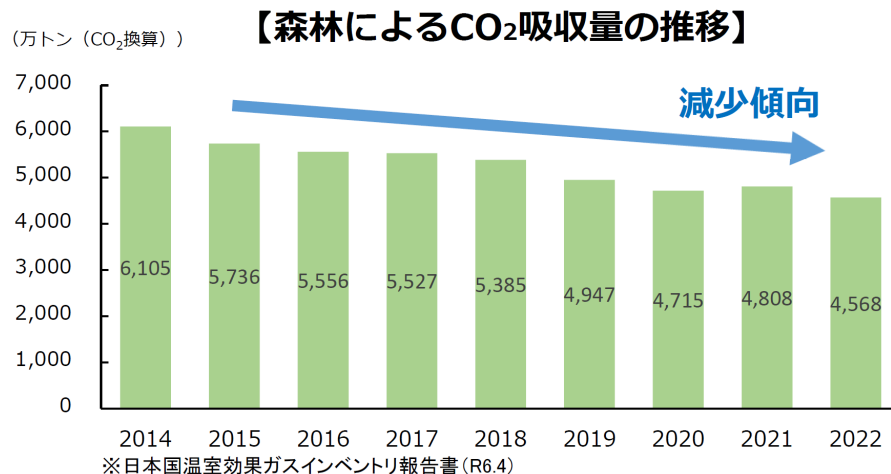
ア 日本の森林資源の現況

日本の森林は国土面積の約70%を占め、その内約6割は天然林で、約4割（1,020万ha）がスギやヒノキなどの針葉樹を主体とした人工林である。天然林はパルプ用材としての利用のため昭和40年台までは多く伐採され、その後、スギ等が造林されたが、外材輸入による木材価格への不安、労賃や苗木代等の経費の増大などで天然林の伐採は急速に減少した。現在は生物多様性保全等のため、天然林を広く伐採するという傾向は少ない。人工林は、戦後の復興が軌道に乗り、昭和25（1950）年頃から木材の需給が急速に増大したため、多くの森林が伐採、造林され、昭和41（1966）年には齢級（1～10年生）が約57%となっていた。その後、令和4（2022）年には約64%が齢級50年生を超え、本格的な利用期を迎えている（図VI-3-2）。

イ 日本の森林CO₂吸収量の状況と課題

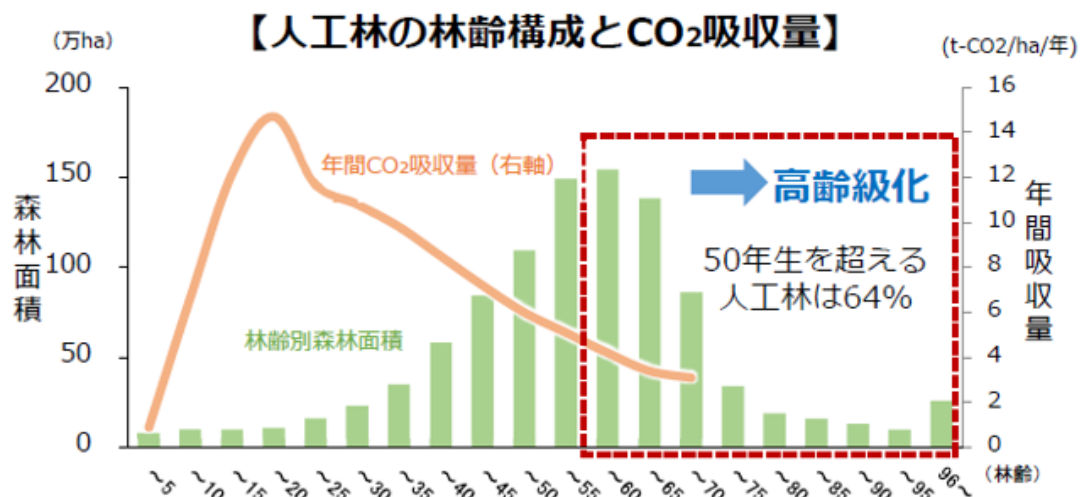
日本の森林CO₂吸収量の変化を図VI-3-1に示したが、吸収量は年々減少傾向にある。人工林の林齢構成と年間CO₂吸収量の状況を図VI-3-

2に示したが、吸収量は高齢化が進むほど減少する傾向にある。このことから日本の森林のCO₂吸収量が減少する要因は、高齢林の占める割合が多くなったことと推察できる。したがって日本の森林のCO₂吸収量を維持・向上させるためには、利用期を迎えた高齢林を積極的に利用―再造林し、若齢林を増やすことが必要であると考えられる。



図VI-3-1 日本の森林によるCO₂吸収量の推移

(出典) 林野庁 HP (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/kyushuryo.html>)



注：林齢を5年の幅でくくった単位を「齢級」という。
苗木を植栽した年を1年生として、1～5年生を1齢級と数える。

図VI-3-2 人工林の齢級構成とCO₂吸収量の変化

(出典) 林野庁 HP (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/kyushuryo.html>)

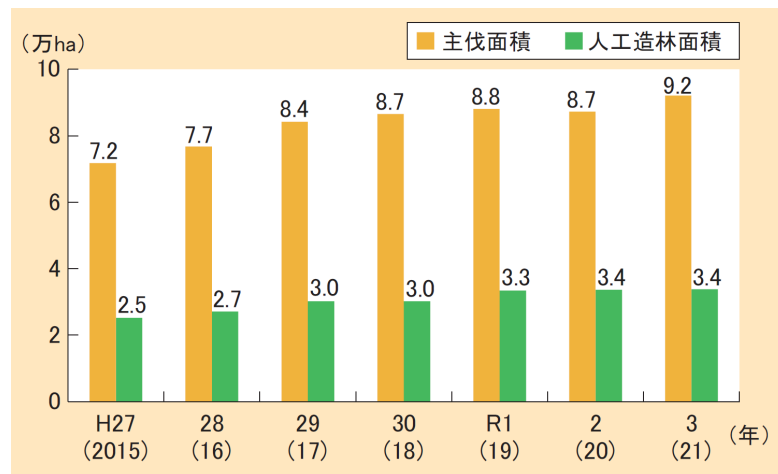
ウ 日本の森林・林業の状況に適したNE T s -「森林の循環利用」-

I P C C等の報告書において、自然プロセスによるNE T s（ネガティブエミッション技術）の内、森林分野としては「植林・再生林」（植林：新規エリアの森林化、再生林：自然や人の活動によって減少した森林への植林）が提唱されている。しかしながら、日本の森林・林業の現状を考慮すると、森林面積の純増は現実的に困難であり、「植林」という取り組みは、日本には馴染みが低い取り組みと考えられる。また国内の林業の状況としては、近年の木材価格の低迷や再造林等の費用負担が大きいことなどから森林所有者等が林業経営に関心を持っていない状況にあり、主伐後の再造林率が3～4割程度と低い状況にある（図VI-3-3）。したがって、現状では「再生林」という取り組みも進みにくい状況にあると考えられる。加えて、現在の日本の公式なGHG排出勘定（GHG排出国家インベントリ）では輸入木材の炭素貯蔵は計上されていない。そのため日本において自然プロセスによりNE T sを推進する手段としては、国産材を対象に利用拡大することが重要である。

一方で森林を構成している樹木はCO₂を吸収し、葉、枝、木材、根の各部位において炭素固定する。葉はやがて地表面に落下し、枝は枯れて脱落する（これらが地表に堆積したものをリターと呼ぶ）。また、長い間には木材そのものが倒れたり枯れたりする。これらは森林の地表に堆積し、少しずつ分解されて失われるが、しばらくの間は炭素を地表に貯留する。地表の堆積物は微生物によって分解され、一部はCO₂になって大気に放出するが、一部は高分子化合物として土壌の構成物になる。さらにその一部が時間とともに難分解性の有機物になり、粘土粒子表面に付着する。この状態になると土壌微生物等でも分解が困難になり、土壌中に炭素分として蓄積されていくことになる（図VI-3-4）。森林土壌中の炭素貯留量を調べた研究によると、土壌中の炭素量は地表にある樹木中の炭素量の約5倍に相当するという結果があり（図VI-3-5）、森林土壌に貯留した炭素量は無視できないものである。加えて伐採、植林、森林の育成という各工程の中で、森林土壌中の炭素は着実に増え続けていくという研究結果もある（図VI-3-6）。しかしながら森林土壌中の炭素蓄積速度は決して早くない。したがって、土壌中の炭素を保全するためには森林の適切な伐採、維持管理が重要となる¹⁻³⁾。

このような日本の森林・林業の実情を考慮し、日本に適した自然プロセスを利用したNE T sとして「伐って、使って、植える」という「森林の循環利用」（図VI-3-7）をここでは提案する。これらの取り組みは林野庁等が林業の活性化策として広く検討しているものでもあるが、それらを徹底することでNE T sとしても貢献できると考えられる。将来的にはそれらの概念を取り入れ、さらに発展させた「森林産業」として、日本経済の柱の一つ

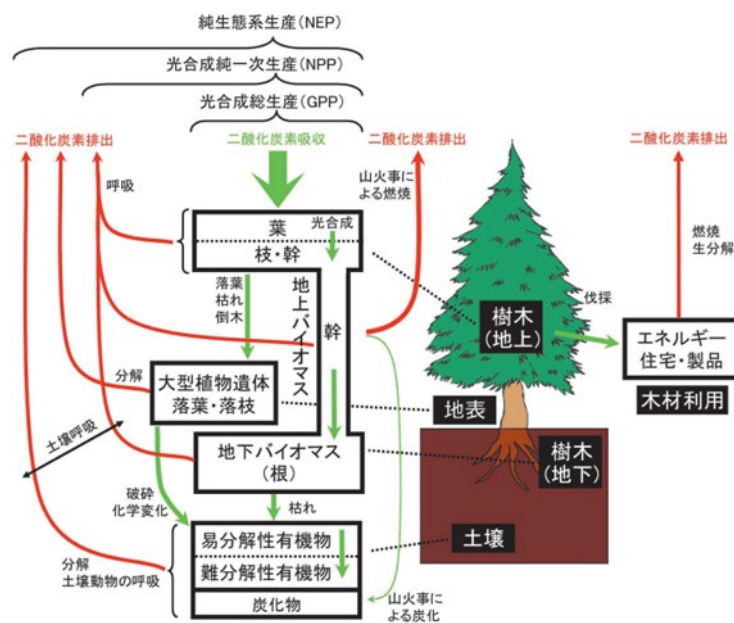
になることを期待するものである。



図VI-3-3 主伐面積と人工造林面積の推移

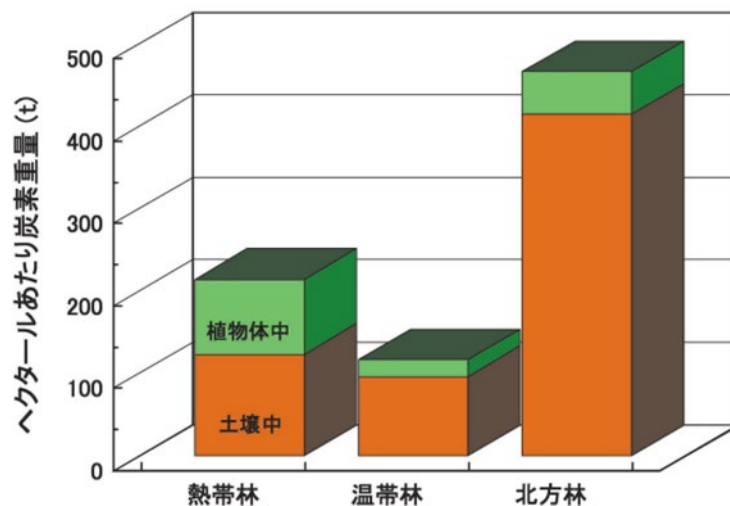
注：「主伐面積」の内、民有林分については、林野庁「木材需給表」の木材供給量のうち国内生産量を基に推計した。

(出典) 令和5年度森林・林業白書



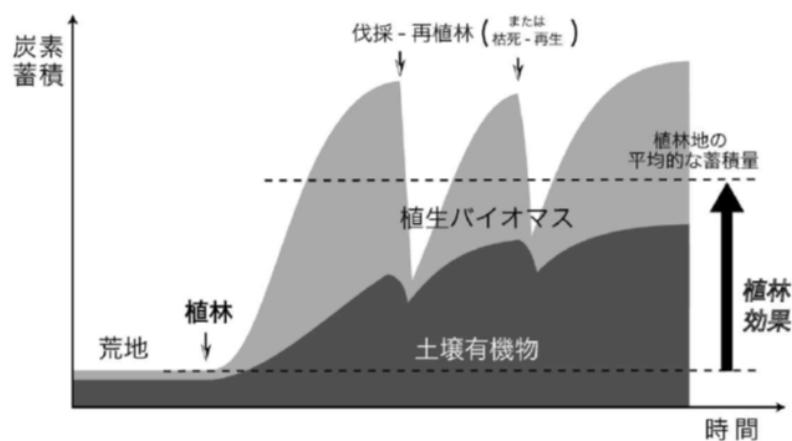
図VI-3-4 森林生態系の炭素の流れ

出典：農林水産省農林水産技術会議、農林水産研究開発レポート, 8, (2003)



図VI-3-5 森林の土壌中と植物体中の炭素量

出典：農林水産省農林水産技術会議、農林水産研究開発レポート, 8, (2003)



図VI-3-6 植林の実施前後における炭素蓄積量の変化

出典：国立環境研究所地球環境研究センターHP

(https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/3/3-2/qa_3-2-j.html)

② 「森林の循環利用」技術の概要

日本の森林・林業の事情を考慮し、自然プロセスによるNETsの一手段である「森林の循環利用」を推進するために、高齢化する森林の伐採によって生産される木材を市場に供給し、建築物等としての木材等の利用拡大を推進すると共に、森林・林業基本計画に基づき間伐の適切な実施や、再造林等の森林整備（森林の早期再生・回復）を併せて実施することが必要となる。

この取り組みを成立させる上で重要な条件は、「木材を消費する速度が森林

の成長速度を超えないこと」、「国産材の供給拡大と再造林は必須であり、木材等の利用・国産材供給・再造林を同時に進めること」である^{4, 5)}。技術としては以下の3種の内容から構成される。

- ・「森林の早期再生・回復」に係る技術
- ・「木材等の利用拡大」に係る技術
- ・「ICT活用による木材の生産流通管理システム」に係る技術



図VI-3-7 森林の循環利用のイメージ

（出典）林野庁 HP より

(https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r4hakusyo_h/all/chap3_2_1.html)

（2）研究動向

① 「森林の早期再生・回復」に係る技術

ア 最新の技術を用いた森林資源量の把握技術^{6, 7)}

森林の現況把握は森林管理の基本である。しかし、現況把握のための森林調査は2つの難点がある。1つは森林の現況が常に変化していることである。森林は成長により資源量は増加するが、自然災害や病虫害により枯損も生じる。2つ目は森林調査には多くの経費と時間が必要なことである。このため、森林資源量を把握するためには、様々な要因を加味した成長モデルを作成し、森林調査の回数を最小化するなどコストを考慮した森林資源量の把握技術が必要とされていた。

森林、特にここでは人工林の成長モデルを取り上げる。コンピュータシミュレーションシステムとして開発されたシステム収穫表は森林の取り扱い

を多様化したうえで直径分布などを予測可能とするシステムである。その特徴として、平均値などの統計量だけでなく径級別の情報を予測できること、任意の林分に対して任意の林齢から予測できること、間伐などを取り入れた成長予測ができること、などがある。単純な樹高成長や直径成長を予測するモデルもある。これらのモデルは多くは回帰曲線で表され、ロジスティック回帰式、ゴンベルツ回帰式、リチャード関数などがあるが、これらの手法は現在まで多くの研究がなされている。

近年、ICTを活用した様々な技術が開発されている。森林調査においても画像やレーザーを利用した3次元情報から森林調査を行う手法が開発されている。森林調査の基本となる胸高直径、樹高などがレーザースキャナやUAVを利用し測定可能となってきた。地上型レーザースキャナによる計測事例では、3次元の点群情報を得ることにより樹高や胸高直径の測定を行うことが可能と考えられるが、周辺木の枝葉により梢端の点群データの取得が難しく樹高測定には向かない。一方、UAVによる空中写真画像から得られる情報はオルソモザイク画像のみではなく3次元点群データも得られ、これとDSMから樹高推定が可能となる。したがって、地上型レーザースキャナによる胸高直径の計測とUAVによる樹高の計測を行うと精度の高い材積推定が可能となる。これらの技術により森林の成長モデルの基礎となる各種パラメーターを推定することにより、精度の良いモニタリングや成長モデルの作成が可能となる。

さらに、最近ではドローン等による計測が容易になったため、成長初期から複数回にわたり行われるアナログによる調査を実施するという方向ではなく、その都度、最新の森林計測技術により簡便にコストを低く計測するという方向に向かっており、これによる現状の森林蓄積(CO₂貯留量)の把握に関する研究が進められている。

イ スマート林業に関する研究（ハーベスタ等作業機械の自動化・半自動化、伐採後の植林のためのアシストスーツ・小型造林機械の開発など）^{8～13)}

高性能林業機械が日本へ輸入されてから30～35年が経過し、この間、林業機械の研究としては機械の開発というよりは、どの様にそれらの機械を使用するのか、生産性はどの様に変わったか、安全性はどうかなどの問題に対応するものが多い。しかも、現状でも、チェーンソーによる伐木作業の割合が多くを占めている。

これまでの研究事例を概観すると、伐採搬出については、フォワーダのグラップルローダを用いた作業機械の動作解析を行うため、熟練者と初心者の操作を比較して、操作技術の違いが生産性に影響するとする報告、タワーヤーダの新旧の比較を行い生産性が1.8倍の向上がみられるとした報告、など

があった。路網については、C T L（短幹集材）システムの今後の方向性や技術の検討課題を指摘、ハーベスタとグラップルを用いた全木集材について林内路網を利用し車両系作業システムの可能性を検討、ヨーロッパのホイールベース林業専門機械を用いたC T L作業の生産性の検証、車両系と架線系作業システムの路網についての方向性を指摘、などの報告があった。

主伐と更新については、主伐後に天然更新を誘導するため重機による地表処理を検討、緩傾斜地において成果を上げている機械地拵えについて生産性とコストに与える影響分析、立木の大径化が進む地域において 10 t トラックや欧州製タワーヤーダによる集材を可能にするための作業道改良事業実施前後の搬出経費の比較、車両系作業システムと架線系作業システムの生産コストの比較、カラマツやトドマツの伐採跡地におけるクラッシャによる地拵え作業試験による雑草木の抑制効果の検証、刈り払い機能と根株切削機能を併せ持つ新たな乗用型造林作業機械などの開発、が進められてきている。

ウ 早生樹・無花粉樹・エリートツリーの開発・育成技術^{14～17)}

早生樹とは、早く成長する樹種の総称で、一般的にはスギやヒノキより初期の樹高成長や伐期までの材積成長の大きな樹種で 10 年から 25 年の比較的短伐期で収穫可能なセンダン、ユリノキ、チャンチンモドキ、コウヨウザンなどの種類がある。特に、コウヨウザンでは比較的早い時期から試験植栽が行われている。

コウヨウザンはスギのような優れた成長とヒノキの材強度を兼ね備えた樹種として注目されている。国内で確認されているコウヨウザン林分のうち 17 カ所について調査した結果は、スギの 1 等地（21 年生で $165\text{m}^3/\text{ha}$ ）に比べ倍以上（ $423\text{m}^3/\text{ha}$ ）の成長を示した。また、50 年生を過ぎても成長が持続していることも確認されている。

無花粉樹は、近年、大きな問題となっているスギ花粉症対策に関する研究として進んでいる。無花粉スギは富山県で最初に発見された。この個体は遺伝的に全く花粉を飛散させないもので、それ以来、7 県で 23 個体が発見されている。富山県で発見された無花粉スギは実用化に向け遺伝的改良が行われている。特に、成長や材積などで遺伝的に優れた無花粉スギを作出するため、各地域の主要品種や精英樹の中で雄性不稔遺伝子を保有するクローンを探索し、それらを交配親とした研究が行われている。これにより今後は雄性不稔遺伝子を保有し、それぞれの地域に適した優良な無花粉スギの作出が期待される。

エリートツリーとは第 2 世代以降の優良樹の総称で、全国各地で選抜された第 1 世代優良樹から、特に優れた系統等を交配し作出している。エリートツリーは成長に優れるものから選抜していることから、その活用により、下

刈り回数の削減等の造林・育林コストの低減効果が期待される。エリートツリーの選抜基準は材積が5段階評価で4以上であること、材の剛性に欠点がないこと、幹の通直性に欠点がないこと、着果量が少ないこと、などがあげられる。様々な分野の技術と併せて、エリートツリーの活用効果を高めるためには、開発されたエリートツリーの特性情報の蓄積と発信を続けていくことが重要である。

② 「木材等の利用拡大」に係る技術

ア 木材等の利用の意義¹⁸⁾

木材は、環境や人、地域社会に優しい様々な性質を持っている。木材には、森林が吸収したCO₂が貯蔵されており、建築物に木材を利用することで、長期間にわたって炭素を貯蔵することができる。また、木材には再加工しやすいという特徴もあるため、建築物等として利用した木材をパーティクルボード等として再利用すれば、再利用後の期間も含めて炭素が貯留される。建築物に木材を利用することで、鉄やコンクリート等の資材に比べて製造や加工に要するエネルギーが少ないため、建設に係るCO₂排出量を削減することができる。さらに木材は再生産可能な資源であり、エネルギー源として燃やしてもCO₂濃度に影響を与えない「カーボンニュートラル」な素材と考えることもできる。その他、建築物やエネルギー以外にも木材は石油資源代替のマテリアルとして利用できる可能性があり、実用化に向けて研究開発が進んでいる。

イ 日本の建築物における木材利用の現状¹⁸⁾

日本では、古くから木材を使用して社寺建築、塔、木橋などの大規模な構造物を建築してきた。主要な木質構造物の構法として在来軸構法、桝組壁工法（ツーバイフォー工法等）、丸太組構法、集成材構造、木質プレハブ構法などがある。最近の木質構造には、木材の他、様々な木質系、非木質系材料が用いられている。最近の森林・林業白書によると建築資材等として木材が多用されており、令和5年の建築着工床面積の木造率は44.7%である。この内1～3階の低層の住宅等の木造率は80%を超えているが、木造率の最も多い低層住宅の着工数は今後人口減少等により、長期的には減少する傾向にある。一方で、低層の非住宅建築物（公共建築物や学校等）での木造率は15%程度、4階以上の中高層建築物では1%以下と非常に低い傾向にある。そのため木材の利用拡大を推進するためには利用率の低い非住宅・中高層建築物での木造化を進めることが重要である。

ウ 非住宅・中高層建築物での木質化・木造化の拡大に向けた技術開発^{18～26)}

一般に流通している建築材料としては、製材、構造用集成材、構造用合板、構造用パネル（OSB（配向性ストランドボード）、PB（パーティクルボード）、ファイバーボード（繊維板）等）があるが、非住宅・中高層建築物での木質化・木造化の拡大に向けては建物の規模・高さ、架構形式が従来のものと異なる場合が想定され、流通している規格ではない建築材料の研究開発が行われている。

一方で近年、強度等に優れた建築用木材であるCLT（直交集成板）、LVL（単板積層材）、木質耐火部材に関する開発・普及も進み、中高層建築物に木造を採用できる可能性が広がっている。CLTは一定の寸法に加工されたひき板（ラミナ）を繊維方向が直交するように積層接着した木材製品であり、利用する利点はコンクリート等と比べて養生期間が不要であるため工期の短縮が期待できること、建物重量が軽くなり基礎工事の簡素化が図られることが挙げられる。またCLTはコンクリートと比べて断熱性が高く、床や壁にパネルとして使用することで一定の断熱性能を確保することもできる。日本でも共同住宅、宿泊施設、オフィスビル、校舎等がCLTで建築されており、600件近い建物でCLTが採用されている。一方、LVLは単板を繊維方向がほぼ平行になるように積層接着したもので、長尺の部材を製造することができる。木質構造としては前述した主要な木質構造に加えて、木構造と非木構造とを採用した構造形式である混構造、鉄骨を集成材等の木材で被覆することで耐火構造としての性能を確保するなど、木の質感を出すことができる木質ハイブリッド構造などが開発されている。

中高層の建築物や大規模な建築物を建てるためには、火災が発生し鎮火するまでの間、倒壊・延焼を防止するために必要な耐火性能を有する部材を柱や梁等の構造部材に使用する必要がある。木質耐火部材としては「被覆型（木材を石膏ボード被覆し燃焼を防ぐ）」、「燃え止まり型（火災時に表面のみで燃焼が止まるように、内側にモルタル等を配置したもの）」、「鉄骨内蔵型（鉄骨を木材で被覆したもので炭化した木材と鉄骨により燃焼を停止させる）」があり、これらにより3時間まで耐火性能を有する耐火部材が開発されている。

木質建築物を長く利用することはCO₂の固定に大きく貢献できる。しかし、屋外で木材を利用すると太陽光や雨水などの作用による気象劣化と腐朽菌やシロアリ食害などによる生物劣化があるため、それらに適した対策が重要となっている。研究としては気象劣化のメカニズムの解明や耐腐朽・耐シロアリ技術の開発等が行われている。また木造住宅部材の高寿命化もCO₂固定の観点からも重要なテーマとなっており、長期寿命の予測のための研究等が行われている。

建築物等への木材利用を促進させるための方法の一つとして、建築物中の

木材による炭素貯蔵量の推定法が開発されている。木材の化学組成から考慮すると炭素が重量の半分を占めていると考えることができるので、木材の全乾重量が分かれば、炭素貯蔵量（CO₂換算量）はその半分であると推定できる。近年の木造建築物への高い関心とともに、林野庁から「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン（制定令和3年10月1日、3林政産第85号）」が公表されている。

エ 木材を利用することのメリットの評価方法^{27～32)}

木材は他材料に比べて環境的に優位であることが科学的に解明されている。一方で木材は人間に身近な材料であり、「あたたかみ」や「やすらぎ」を感じさせ、「人への親和性」があるというイメージがもたれている。このようなイメージに頼ることで木材利用の促進を図ることはできるが、他方、科学的根拠に基づいた「木材の良さ」をPRしていきたいという要望が高まっている。また消費者にとって木材の利用と人の健康との関係に対しては大きな関心が寄せられている。そのようなことから木材の様々な要素が人間に与える影響を評価する手法の開発が行われ、木材を見たり触ったり、香りを嗅いだりすると、心拍数や血圧を下げ、副交感神経の働きを活性化することなど、人の健康に影響があることがわかってきている。また木質居住空間で人がどのような影響を受けるのかについても研究が開始されている。人の反応を観察、測定するために現状用いられている手法として、心理的手法（対象者の主観的申告に基づくもの）、パフォーマンス評価法（作業の生産性等を指標とするもの）、動作観察的手法（行動や視線を観察するもの）、生理的手法（血圧変化等を測定するもの）、疫学的手法（統計値等に基づいくもの）などがある。

オ 化石資源の代替と成り得るマテリアルとしての利用技術の開発^{33～42)}

化石資源は現代産業の基盤的な資源であり、エネルギー源やプラスチック等の原料など様々な用途に用いられている。しかしながら、化石資源の使用はCO₂等の排出源となるため、NETsを考慮する上で化石資源の使用割合を減ずることが極めて重要となってくる。そのため、化石資源の代替となりうる植物バイオマス資源の利用に関する研究開発が盛んに行われている。特に木材は資源量も豊富であることから注目が高い。木材は主に3種類の高分子（セルロース（含有率：50～58%）、ヘミセルロース（含有率：15～25%）、リグニン（含有率：20～30%））から構成されており、それらの化学特性を活かすことで、様々な素材が開発可能である。含有量の最も多いセルロースの用途としては、紙・パルプはもとより、化学処理を経てレーヨンなどが開発されている。最近ではセルロースの繊維をナノメートルレベルまでほぐした

セルロースナノファイバー(CNF)が開発されている。CNFの強度は鉄の5倍で重さは鉄の5分の1といわれるなど軽量ながら高強度で、膨張・収縮しにくく、保水性が優れるなどの特性を持つ素材である。循環型社会実現への“夢の新素材”と期待されている。自動車車体などが鉄からCNF配合強化樹脂に換われば、軽量化による大幅な燃費向上が可能である。CNFに抗菌・消臭機能を付与した機能性シートの開発などが行われている。製造法は機械的解繊法と化学的解繊法(「TEMPO酸化法」(「TEMPO」:触媒(2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl)の略称))があり、前者では繊維径15nmのCNFが後者では繊維径3nmのCNFが得られる。CNFの水分散体は高粘度のゲル状であり、繊維径15nmでは白っぽく、繊維径3nmでは透明にみえる。現在CNF製造設備が各地で稼働しており、紙おむつ、筆記用インク、運動靴、化粧品、食品、塗料等の製品に使用されている。CNF自体の環境負荷は低く、燃焼時のCO₂排出は実質ゼロ(カーボンニュートラル)、土壌に埋めても微生物によって分解される。CNFは木材の新しい用途として産業界からも大きな期待が寄せられている。ただし、現在のCNFの原料としてはパルプが主流であり、木材を原料として直接製造するものは少ない。

紙パルプの製造過程で生じる副産物のリグニンは生成量も多いことから古くから研究も行われている。この副産物リグニンの主な用途の1つが、木材からのパルプ・製紙工程における熱源としての利用である。その他、バニリンの原料として利用されているほか、硫黄を加えて加熱することでメタンチオール、ジメチルスルフィド、ジメチルスルホキシドなどを生産するプラントが稼働している。

最近では化学構造が比較的均質なリグニンを有するスギ材にポリエチレングリコールを混ぜて加熱し、リグニンを改質・抽出した「改質リグニン」が機能性の高さから注目されている。高強度、耐熱性、耐薬品性等の特性が求められる高付加価値材料への活用が期待されている。現在産官学の連携のもと、高性能なプラスチック材料が開発されている。社会実装を進めるためには製造コスト等が課題となっており、大規模製造技術の実証等コストの低減化に向けた研究が進められている。これらの他、木材等には含有量は少ないが高い付加価値が期待できる抽出成分が含まれている。主要な3成分はその化学構造や特性については、樹種の違いによって大差はないが、それに対して抽出成分は色や香りなど木の個性を表現する成分と呼ばれている。抽出成分の種類は脂肪族化合物(糖類、デンプン、脂肪酸類、テルペン類、サポニン類等)、芳香族化合物(フェノール類、スチルベン類、クマリン類、フラボノイド、タンニン、リグナン類等)、含窒素化合物(タンパク質、アルカロイド等)、無機成分など非常に多く、機能も豊富である。用途も幅広く

医薬品、抗菌剤、香料、樹脂等の原料などとして実用化されている例もある。抽出成分は木材以外にも樹皮、枝葉からも得られるため、林地残材や製材残渣など、これまで用途がほとんどなかった資源の新規な利活用法として期待が大きい。最近では針葉樹の一種であるトドマツの枝葉に含まれる精油成分とその抽出残渣を含めた総合利用システムを構築し、空気浄化剤、芳香剤、消臭剤等を企業と共同開発した事例がある。抽出成分は微量であるが故、抽出分離の工程が複雑であり、製造コストが高い点や抽出分離工程での変質が問題点となっている。

カ カーボンニュートラルな燃料の開発^{43～49)}

現状、エネルギー源として石油等化石資源が利用されているが、カーボンニュートラルを目指すためには脱石油が必要であり、石油の代替素材として再生可能なバイオマス資源が注目されている。特に森林資源は燃焼で発生するCO₂量と、樹木などの植物由来のバイオマスが生育過程で大気から固定したCO₂量が等しいという考えのもと、燃焼させても、既に固定したCO₂を放出するだけなので、プラスマイナスゼロ、つまり炭素中立（カーボンニュートラル）と考えられている。現在、バイオマスの燃料化研究の多くは木質バイオマスを対象としたものとなっている。その利用形態としては、大きく固体燃料、液体燃料、気体燃料の3種類に分けられる。表VI-3-1は、薪炭材を除いた木質バイオマスの燃料化を整理したものである。固体燃料の研究開発の動向は、規模は小さく地域レベルでの各要素開発や実証化が多く、基礎研究は少ない。要素となる技術の組み合わせによるコストのシミュレーションなどが多い点があげられる。ペレットの普及を図る目的で、規格も策定されている。液体燃料の研究開発の動向としては、バイオエタノール、バイオディーゼル、バイオジェット燃料、バイオオイルなどがある。

表 VI-3-1 木質系バイオ燃料の分類

	燃料形態	燃料製造法・改質方式	熱利用機器
固体燃料	・ペレット、ブリケット、 ・木粉、チップ、炭	ペレタイザー、ミル、チップパー、炭 化炉、ガス化炉	燃焼炉、ボイラ
液体燃料 ¹⁾	木質液化油、バイオオイル (ナフサ等)、黒液、軽油	液化プロセス (PERC, LBL 法等)、 オートクレーブ法、急速熱分解法	ボイラ、バーナ
気体燃料	バイオガス	熱分解炉・ガス化炉 (固定床方式、 流動床方式、噴流床方式、キルン方 式他)	ボイラ、ガスタービ ン、ガスエンジン

1) 廃食油改質油、バイオエタノールなどは情報量が多いため省略する。詳しくは参考資料を参照のこと。

永橋ら、日本燃焼学会誌、51, 158, 310-317 (2009) を参考に一部改変。

バイオジェット燃料 (持続可能な航空機燃料 (以下、S A F : Sustainable Aviation Fuel) は持続可能性の条件を満たす、再生可能または廃棄物を原料とする燃料であり、世界的にも需要拡大が見込まれており、日本でも官民挙げて研究開発が進んでいる。S A F の製造法として確立しているのは廃食油や微細藻類等を原料にする H E F A (Hydroprocessed Esters and Fatty acids) だが、世界的な需要の増加によって供給量が不足しており、賦存量の豊富なバイオエタノールを原料とする A T J (Alcohol to JET) が注目されている。国内では紙パルプ会社を中心に木質バイオマスからバイオエタノールを経て、S A F を製造する方法が研究されている。その他、C O₂ と水素を合成して製造される「合成燃料」や廃プラ等から「ガス化・F T 合成」由来の S A F も研究が行われている。S A F の製造工程では沸点の異なるナフサの画分が同時に回収される。

ナフサは様々な化学工業材料の基幹物質であり、石油代替の原料として注目を集めている。

木材等を 425～600℃ 付近まで急速加熱後、得られた混合留分を急速冷却すると、気体、液体、固体を得ることができる。特に液体留分である熱分解油はバイオオイルと呼ばれ、新しい液体燃料・新材料として期待が大きい。研究としては製造工程に関するもの、バイオオイルの改質ガス化に関するものなどが行われている。

木材から軽油などを合成する技術も開発されている。木材等を高温 (600～1000℃) でガス化し、室温で水などを用いてガスを精製した後、昇圧および再加熱工程を経て、ガス中の一酸化炭素と水素から Fischer-Tropsch (F T) 反応により炭化水素を合成し、水素化分解を経ることで軽油を合成する方法が開発されている。

気体燃料の研究開発の動向は、従来から石炭ガス化技術をベースとした回収ガスの基礎物性や製造法や利用法に関する研究開発が行われている。

③ ICT活用による木材の生産流通管理システムの開発⁵⁰⁾

建築物の木造化を促進するには、国産材のコスト高の解消が課題となっている。木材の流通は、川上の生産現場である林業事業者から川下の建築業者に供給されるまでに、多くの事業者を経由する。その間、需要動向の情報が行き渡りにくく、タイムラグやニーズのミスマッチが発生している。また近年、原木の生産現場では生産性向上のための高性能林業機械を導入している。機械の償却を行うために年間を通じて生産を行い、素材生産量が増加するのだが、市場では入荷の急増を受け入れられない事態も発生している。さらに川中に位置する製材事業者でも、現場の情報が見えないため安定的な仕入ができないため入札による買い付けで在庫に余裕を持たせてしまい、結果的に原木市場の在庫滞留を発生させている。このことが原木市場入荷停止の原因の一つになっている。以上のことより現状の国産材の流通は必ずしもスムーズではなく、結果的に国産材のコスト高の要因となっている。そこで、ICTの利活用が可能なハーベスタやフォワーダから得られる造材・集材データ、スマートフォンやタブレット等で管理する作業日報データ、検知データ等を有効活用し、作業工程でのデータを一元的に管理し、在庫管理・進捗管理を行う生産管理システムの開発が行われている。今後は、開発した木材の生産流通管理システムを現場にて導入し、最適化させ事業展開することが望まれる。

(3) 課題と今後の研究開発の方向性

【課題1】最新の技術を用いた森林資源量の把握技術

<背景>

森林はバイオマス資源として、また、CO₂の吸収源として重要な役割を担っている。

森林を適切に管理・利用するためには、森林資源量の適切な把握による森林経営計画の作成、それに基づき伐採・収穫・造林などの林業作業を実施することが必要である。このため、最新の計測機器を使用し、新たなソフトウェアの開発により森林資源量の把握を行うことが必要である。

<研究開発の方向性案>

- ・ Lidar・ドローンなどによる森林計測技術
(ハードウェア、ソフトウェア)
- ・ AIなどを活用した森林資源量の把握技術

【課題２】スマート林業に関する研究

<背景>

林業における造材・運搬作業は急傾斜地・不整地で重量物を扱うことから労働負荷が大きく労働災害の発生率が非常に高い。また、木材生産の労働生産性は欧米に比べ非常に低く、生産コストも高い。このような状況からスマート林業を推進し、効率的で安全な木材生産を実現することが急務となっている。これらを実現するためには、各種作業機械に最新のセンサーを導入し、新たなソフトウェアを開発することにより林業機械を製作することが必要である。さらに今後は、日本の林業現場に対応したベースマシンの開発と作業を効率化するためのアタッチメントを開発することが重要になる。その先にはE V化への取り組みも必要となる。

<研究開発の方向性案>

- ・造材・運搬作業の自動化・半自動化に向けたセンサーと制御ソフト搭載林業機械の開発
- ・小型の造林機械の開発
- ・ベースマシン、アタッチメントの開発

【課題３】早生樹・無花粉樹の開発、エリートツリー改良・育成技術

<背景>

CO₂の吸収源として森林は重要な役割を担っている。このため、伐採後の林地に植栽する成長の早い早生樹の開発⁷⁾やエリートツリーの改良などにより吸収源の拡大や生産性の向上が求められている。また、近年、花粉症により引き起こされる様々な症状が問題となっており、これに対応した造林木の重要性が高まっている。これらを実現するためには、林木育種期間の大幅短縮に向けたゲノム編集をはじめとする先進的技術開発が必要となる。

<研究開発の方向性案>

- ・早生樹の開発と材質、利用適正の探索
- ・成長や形質のよい無花粉樹の開発
- ・エリートツリーの２倍の成長速度を持つハイパーエリートツリーの開発
- ・ゲノム編集をはじめとする先端技術の開発

【課題４】非住宅・中高層建築物での木質化・木造化の拡大に向けた技術開発

<背景>

非住宅・中高層建築物等の木質化・木造化を推進するために、それらに利用可能な部材等が開発されているが、実物大構造物としての性能面に係る各種データ

の蓄積は今後の課題となっている。また木質建築物の普及のために、従来の部材よりも優れた強度を有する新しい部材の開発やそれらの普及のためのJASや国交省告示の制定も必要になってくる。加えてCO₂固定の観点より木質建築物の高寿命化は重要な課題となっており、そのための耐久性向上に向けた技術の開発や長期利用した木材の利用に係る研究も今後必要である。

<研究開発の方向性案>

- ・木質建築物を長期間利用可能にするための耐久性に優れた部材の開発や維持管理技術など長寿命化に係る技術の開発、並びに長期間利用木造部材の再利用のための性能評価技術や再利用技術の開発。
- ・従来と異なる性能（長さと幅の両方からの荷重に強い）を有する等方性大断面部材の開発やそれらを歩留まりが高く効率的に製造する技術の開発。

【課題5】木材等自然素材がもたらすセラピー効果の科学的解明

<背景>

様々な分野でウェルビーイング(well-being)の取り組みが行われるようになり、木材等の自然の素材を活用した空間や施設が注目されている。そのような風潮の中、木材等自然素材が人にもたらすセラピー効果に関する関心が高まっており、そのエビデンスの蓄積と効果の科学的解明が必要となっている。ここで得られた知見は、木材利用の拡大に大きく貢献できると考えられる。

<研究開発の方向性案>

- ・木材等の自然素材が人の睡眠や作業性に与える効果等セラピー効果に関する研究
- ・オフィス、教育施設、医療施設などを木質化した時のセラピー効果に関する研究等

【課題6】木材等の新規利用技術の開発^{51~56)}

ー化石資源の代替と成り得るマテリアルとしての利用技術の開発ー

<背景>

建築資材に不適な未利用材や長期利用され再利用に適さない木材等も重要な炭素蓄積源であり、それらの有効な利用法の開発は重要な課題である。一方で脱化石資源化の必要性から石油代替素材として木材等のバイオマスの利用法の開発が急務となっている。そのためこれまでの研究で得た知見を活かし、高機能性素材の開発並びに森林資源フル活用のための総合利用システムの開発が必要である。

<研究開発の方向性案>

- ・ C N F、改質リグニンの新規用途開発並びに事業化
(新規用途の開発)

- ✓ C N Fでは、高い弾性率と強度、低い熱膨張係数といった優れた力学特性を背景に、樹脂やゴムの補強繊維とした樹脂複合材料やゴム複合材料の開発、光学・エレクトロニクス基材などの開発など。
- ✓ 改質リグニンでは、有機無機ハイブリッド材料、鋳型材料および各種成形品、鉄道車両用ブレーキシュー、エンジニアリングプラスチックの開発、改質リグニン含有樹脂およびセルロース系繊維による熱可塑 F R P 成形技術を用いた製品（家具等）の開発、ステアリング向けポリウレタン材料の開発、改質リグニン樹脂を用いた F R P の開発など。

(事業化に向けての課題)

- ✓ 「C N F」や「改質リグニン」の事業化を促進させるため、原料の安定供給体制の整備、各素材の効率的な製造法の開発、各素材の大量製造システムの開発など。
- ・ 化石資源代替工業材料等の開発・セルロースやヘミセルロースから化学繊維の代替に成り得る高性能繊維の開発。・ ナノ加工工程で生成する棒状粒子「セルロースナノクリスタル(C N C)」の物性の解明、液晶材料や液晶構造を内部に保持したフィルムの開発並びに他成分との複合化技術の開発。・ リグニン分解物から微生物機能を活用し、機能性バイオプラスチック基幹物質の製造に係る研究開発並びに事業化に向けて大量培養製造システムの開発。
- ・ 森林資源をフル活用するために、サーキュラーエコノミーを志向した木材成分総合利用システムの開発

木材等を超緩和溶解という新規な技術で処理し、必要な成分画分を利用する木材成分の総合利用を図る内容。この技術は最近開発されたものであるが、その将来性の高さから注目度が高く、実用化研究が急がれている。この方法では、身近に存在する安価な物質を用いることができ、また処理に必要なエネルギーも少ないという利点がある。

【課題 7】木材等の新規利用技術の開発 2^{57~64)}

ー森林循環利用に必要なカーボンニュートラルな燃料ー

<背景>

「森林の循環利用」の各工程では各種エネルギーを必要とする作業が多い。これらのエネルギーは、現状石油資源に依存しており、C O₂濃度の上昇を招きかねない。循環利用のサイクルを円滑に回し、N E T s に貢献するためには、石油代替と成り得る森林資源を原料とするカーボンニュートラルな燃料が必要と

なっている。他の分野でも需要が高いカーボンニュートラルな燃料の原料は、バイオマス量の多い森林資源が候補となることから、開発した技術等はそれらにも応用展開が可能となる。また、国産材に適した熱電供給システム（CHP）のエネルギー利用システムの開発も急務となっている。

<研究開発の方向性案>

- ・ 固形燃料：

半炭化技術（別名トレファクション）を活用したブラックペレット（半炭化ペレット）、バイオコークスの品質改善、新規用途並びに大量生産システムの開発等。

- ・ 液体燃料：

バイオオイル[収率向上を目指した製造法、原料調達－製造までを含めたシステム開発、オイルの高品位化、新規用途開発]等。バイオオイルは収率向上を目指した効率的な製造法（熱効率に優れたマイクロ波超高速熱分解技術など）の開発が必要である。また事業化を見据え、原料の調達－製造までを含めたシステム開発についても研究が重要である。加えてバイオオイルは貯蔵過程で変質し、品質が劣化するため、脱酸素反応触媒等の利用による品質保持手法（高品位化）の開発も重要である。その他、バイオオイルは原料（スギやヒノキなどの樹種、木材、樹皮等の使用部位）やその処理条件（装置の反応機構、接触時間や処理温度など）により成分組成が異なるため、バイオオイルの実用化を加速するためには、利用展開を指向した成分分布の規格化や妥当な数値設定などが重要である。バイオオイルは化学組成の特徴から燃料以外の用途も注目度が高く、例えば工業用化学材料（プラスチック、化成品等）の開発や炭素固定資材（土壌中に埋設・固化させて炭素を固定）の開発が課題である。軽油[木材ガス化-精製-反応等連続合成システムの開発]等。

（参考）S A F ：S A Fの課題としては原料供給、製造技術・プロセスの最適化、製造コスト低減化、経済性評価などが考えられる。また、S A Fの製造工程では沸点の異なるナフサ画分が同時に得られる。ナフサは樹脂等の原料として化学工業界で広く用いられている基幹物質である。産業界等が中心に立ち上げたプラチナ森林産業イニシアチブが取りまとめた「ビジョン 2050 日本が輝く、森林循環経済」では、ナフサを化学工業材料の基幹物質として位置づけたバイオマス化学産業の構想を描いており、木造都市化等も含めた森林資源フル活用ビジョンを公表している。

- ・ 気体燃料：

バイオガスの効率的な製造法開発（タール発生低減技術）、回収ガス高度利

用（水素をリッチな状態にする研究）技術の開発。固定床から流動床反応炉に至るまでのほとんどの変換プロセスにおいて、バイオマス材ガス化に特有のタール発生低減技術の開発や回収されるガスのうち、エネルギー源として有望な水素をリッチな状態にする研究などが重要である。気体燃料に共通する課題は、製造コストの低減技術の開発が挙げられる。

・国産材に適した熱電併給システム（CHP）の開発：

初期投資の少ない小規模な施設であっても、80%程度のエネルギー変換効率を実現することが可能である熱電併給システム（CHP）は、国内でも地方自治体などに導入が進んでおり、木材等のエネルギー利用の拡大に繋がっている。しかしながら、システム本体はバイオマス利用が進んでいる海外から導入されたものであり、これまでの研究では燃材に国産材を用いると安定稼働ができず、課題となっている。そのため、スギなどを国産材に適した熱電併給システムの開発が課題となっている。

【参考文献等】

- 1) 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部 HP
https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20240422-1.html
- 2) 農林水産省農林水産技術会議、農林水産研究開発レポート, 8, (2003)
- 3) 国立環境研究所地球環境研究センターHP https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/3/3-2/qa_3-2-j.html
- 4) 恒次祐子、木材利用によるカーボンニュートラル社会への貢献、農業および園芸、98, 1, 27-30(2023)
- 5) T. WATARI, N. YAMASHITA and A. C. Serrenho: Net-zero embodied carbon in building with today's available technologies, *Enviro. Sci. Technol.*, 58, 1793-1801(2024)
- 6) 田中和博、森林の成長モデル. 森林科学 3, 28-31(1991)
- 7) 溝上展也・太田徹志、森林経営における画像・レーザー計測の研究動向. 森林遺伝育種 11, 177-180(2022)
- 8) 毛綱昌弘、特集「伐採搬出の道具と機械」にあたって. 森林利用学会誌 30, 3-4(2015)
- 9) 板谷明美、特集「路網を活用した伐出システム」にあたって 林内走行化路網活用か、路網の限界と河川の活用. 森林利用学会誌 31, 3 (2016)
- 10) 有賀一広、特集「主伐と更新」にあたって. 森林利用学会誌 33, 3-4(2018)
- 11) 板谷明美：特集「ICT 導入による林業のスマート化」. 森林利用学会誌 36, 3-4、2021
- 12) 図子光太郎：特集「林業の成長産業化に求められる技術と条件」にあたって. 森林利用学会誌 35, 3-5、2020
- 13) 鈴木保志：特集「林内道路ネットワークの再考」にあたって. 森林利用学会誌 37, 3-4、2022
- 14) 松本 順司・井上 真由美・横尾 謙一郎・小田一幸：高炭素固定樹を有する国産早生樹の育成と利用（第1報）センダンの可能性. 木材学会誌 52, 77-82、2006

- 15) 近藤 禎二：コウヨウザン研究の現状．森林遺伝育種 6, 143-147, 2017
- 16) 斎藤 真己：無花粉スギの開発状況と今後の展望．森林科学 54, 17-20, 2008
- 17) 栗田 学：エリートツリー、これまでの歩みと将来展望．森林遺伝育種 12, 123-128, 2023
- 18) 林野庁：令和 5 年度森林・林業白書、2 木材利用の動向、129-148, (2024)
- 19) 原田寿郎：日本における木質耐火構造開発のあゆみ、木材学会誌、55、1、1-9(2009)
- 20) 服部順昭：木質耐火部材を知る、建材マンスリー、657、2-5(2020)
- 21) 林野庁：加速化する建築物の木造化、林野、121、3-7(2017)
- 22) ウッド・チェンジ協議会 高層ビルグループ：高層木造ビル事例集（令和 3 年版）、
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/pdf/clt_20220601_jireisyu.pdf
- 23) 林野庁：高層木造ビル事例集、令和 3 年版
- 24) 平井卓郎：木質構造の現状と課題、材料、52、12、1502-1507(2003)
- 25) 柿谷 朋：木造住宅部材における寿命予測のための加速試験とその実際、木材保存、35(1), 2-8(2009)
- 26) 片岡厚：木材の気象劣化と表面保護、木材保存、43(2), 58-68(2017)
- 27) 一宮孝至他：木造および RC 造非住宅建築の環境経済評価（第 1 報）積上法 LCA による GHG 排出量の比較、木材学会誌、67、1、14-19(2021)
- 28) 河村奏瑛他：木造および RC 造非住宅建築の環境経済評価（第 2 報）国産材利用および国内加工に着目した経済波及効果の比較分析、木材学会誌、67、1、1-6(2021)
- 29) 森井拓哉他：木造および RC 造非住宅建築の環境経済評価（第 3 報）産業連関法による LCA と環境効率指標、木材学会誌、67、1、7-13(2021)
- 30) 木村彰孝他：室内空間への木材使用量の違いが二桁加算・減算の作業効率に与える影響、木材学会誌、57、3、160-168(2011)
- 31) 杉山真樹：人間の快適性に及ぼす木材の触覚、視覚及び嗅覚刺激の効果の解明、森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果 72、(2018)
- 32) 恒次祐子他：木質居住環境が人間にもたらす影響の評価手法：木材学会誌、63、1、1-13(2017)
- 33) 磯貝明：セルロースナノファイバー、表面技術、71、6、389-395(2020)
- 34) 矢野浩之：セルロースナノファイバーとその利用、日本ゴム協会誌、85、12、376-381(2012)
- 35) 藤澤秀次：TEMPO 酸化セルロースナノファイバー/高分子複合材料の基礎的物性、森林科学、81、15-18 (2017)
- 36) 河崎雅行：セルロースナノファイバーの実用化に向けた検討、紙パ技協誌、69、1、54-57(2015)
- 37) 木村肇他：グリコール改質リグニンによるフェノール樹脂の高性能化、ネットワークポリマー、44、2、76-83(2023)
- 38) 日本発のリグニン産業の創出、 <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/matechem/about.html>
- 39) A.Kobayashi et al.:Effect of thermal base generators on the FRP fabrication with glycol-lignin., J.Photopolym. Sci.Tech., 31(1), 101-106(2018)

- 40) 谷田貝光克：樹木成分の生物活性とその利用、紙パ技協誌、55、 11、 1543-1549(2001)
- 41) 大原誠資：樹木抽出成分利用の新展開、木材工業、61、8、 339-344(2006)
- 42) 大平辰朗、宮澤三雄監修：テルペン利用の新展開、シーエムシー出版（東京）、280pp(2016)
- 43) 永橋優純、村上和彦、雑賀高、木質系バイオ燃料の利用形態と燃焼特性—研究・開発動向—、日本燃焼学会誌、51、158、310-317(2009)
- 44) 農林水産省、JAS0030、木質ペレット燃料、(2023)
- 45) 吉本康文、木下英二、植物油燃料のエンジン適用技術 バイオディーゼル燃料について、日本燃焼学会誌、51、156、121-128(2009)
- 46) 上田達巳：国産バイオエタノール生産の評価と今後の展望、農業農村工学会誌、77(1)、29-32(2009)
- 47) 野尻昌信他：実用化に一步近づいたスギからのバイオエタノール製造技術、森林総合研究所平成 25 年度研究成果先集、 26-27(2013)
- 48) 本間正義、横山伸也、三石誠司、小島正美、アルコールで走る車が地球を救う、毎日新聞出版、242pp、(2024)
- 49) 山内康弘他、航空業界の脱炭素化に貢献するバイオマスガス化 FT 合成バイオジェット燃料の実証、三菱重工技報、59, 4、 1-8(2022)
- 50) 生物系特定産業技術研究支援センターHP、革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）、ICT を活用した木材 SCM システムの構築
https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/h27kakushin/chiiki/research/files/subject6_06.pdf
- 51) リグニンネットワーク事務局、リグニンネットワーク技術集 2024、(2024)
- 52) 図解よくわかるナノセルロース、ナノセルロースフォーラム 編、日刊工業新聞社、(2015)
- 53) 毛利恵美子、セルロースナノクリスタル—液晶構造とその利用—、化学と教育、70, 1, 32-35(2022)
- 54) 中村雅也他、2-ピロン-4,6-ジカルボン酸の製造方法、特許 7392928
- 55) NEDO TSC、TSC Foresight、22、NEDO HP、<http://www.nedo.go.jp/content/100870192.pdf>
- 56) 知財図鑑、樹木を“超穏和”に溶解して再構成する技術、<https://chizaizukan.com/property/373/>
- 57) 澤井徹他：バイオマスの半炭化（トレフアクション）改質技術と展望、Netsu Sokutei、51, 2, 70-77(2024)
- 58) 近畿大学 HP、次世代再生可能エネルギー「バイオコックス」夢の燃料で争いのない世界を！
<https://www.kindai.ac.jp/science-engineering/research/forefront-research/toprunner02/>
- 59) M. J. Watson et al., Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and , markets: A critical review, *J. Cleaner Prod.*, 449, 10, 141472(2024)
- 60) S. Wandelt et al., *Sustainable aviation fuels: A meta-review of surveys and key challenges*, J. the Air transport research society, Available online 20 January (2025)
<https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2024.100056>
- 61) S. Tsubaki et al., Process intensification of the ultra-rapid pyrolysis of bamboo by spatially separated microwave electric and magnetic fields, *Chemical Engineering J.*, 499, Available online 28 September (2024), <https://doi.org/10.1016/j-cej.2024.156260>.

62) Charm Industrial HP, <https://charmindustrial.com/>

63) 経済産業省 HP, <https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230331010/20230331010.html>

64) 一般社団法人プラチナ構想ネットワークプラチナ森林産業イニシアチブ、「ビジョン 2050 日本が輝く、森林循環経済」2023、<https://platinum-network.jp/2023/05/23/16/26/>

65) 笹内謙一：国内におけるバイオマス小規模ガス化発電の最新の動向と課題、日本エネルギー学会機関誌えねるみくす、101, 660-668(2022)

4. 海藻・海草

(1) 技術の概要

2009 年に国連環境計画（U N E P）の報告書において、海草（アマモ類等）藻場、塩性湿地、マングローブ林に取り込まれた炭素が「ブルーカーボン」と定義され（図 VI-4-1）、ブルーカーボン生態系は新たな CO_2 吸収源としてネガティブエミッション技術（N E T s）の対象の一つとなった¹⁾。

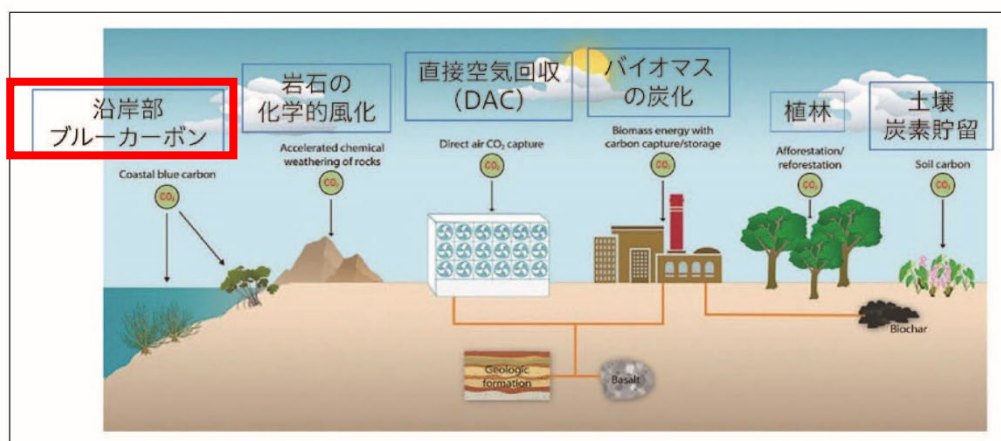


図 VI-4-1 ネガティブエミッション技術の例

（出典）バイオマスを CO_2 吸収源としたネガティブエミッション技術（J S T 2021）²⁾

アマモ藻場では、光合成総生産量の 33% が分解され、45% がアマモ場内に堆積し、22% がアマモ藻場外に流出する（図 VI-4-2）。また、アマモ藻場の堆積物の調査から、アマモ由来の有機炭素が数千年もの間、貯留されていることが明らかになっている³⁾。同様に、塩性湿地、マングローブ林においても、植物体由来の有機炭素が長期間にわたり堆積していることが知られている¹⁾。

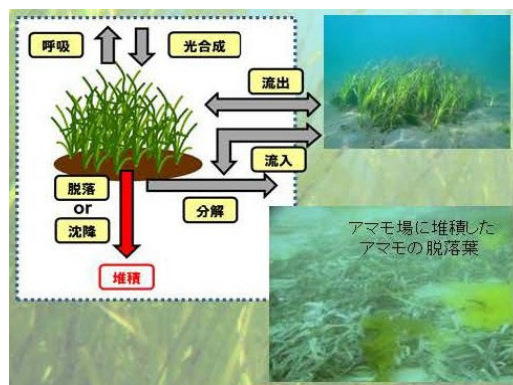


図 VI-4-2

アマモ場における炭素固定とフロー

(出典) 藻場・干潟の二酸化炭素吸収・固定のしくみ (水産庁 2014) ³⁾

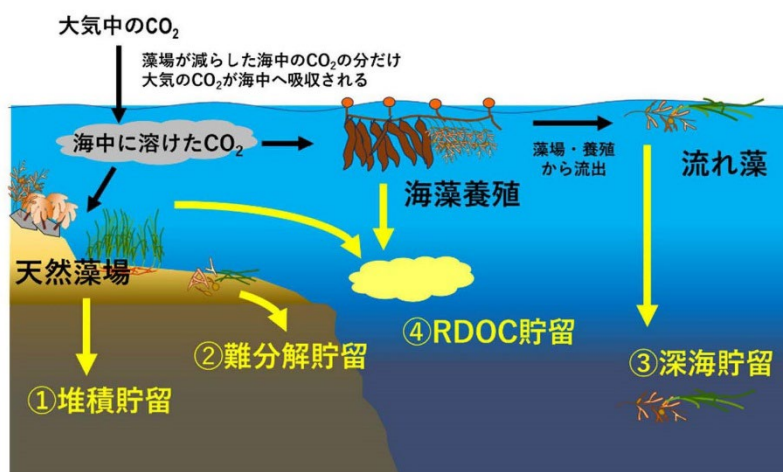


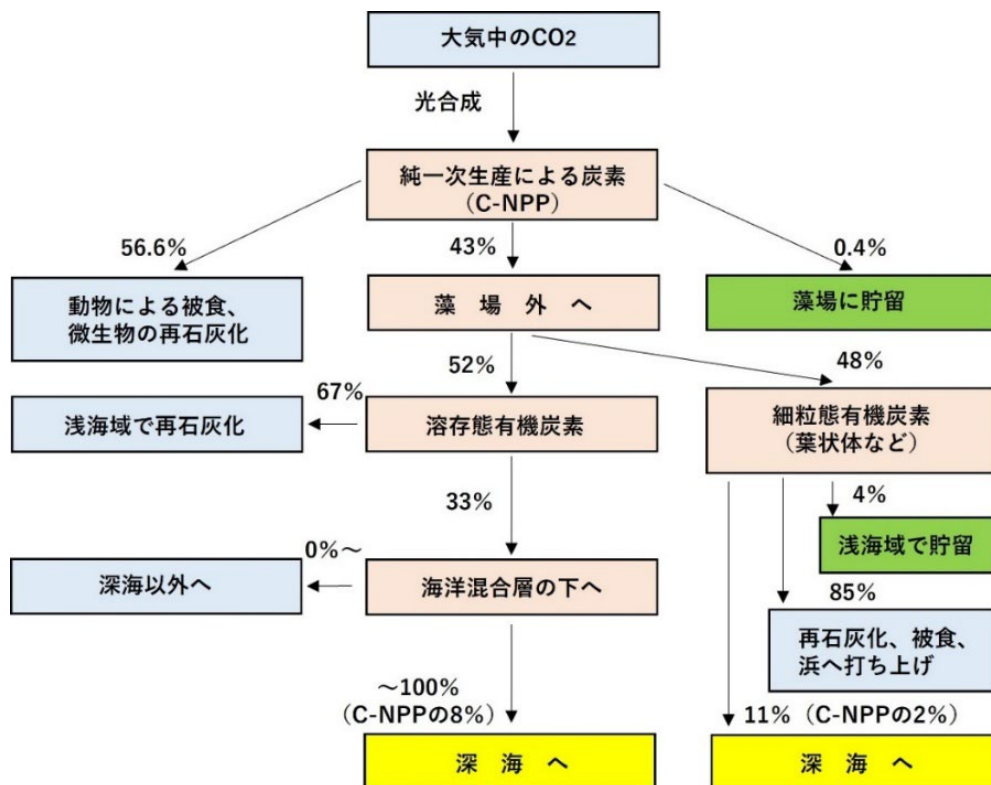
図 VI-4-3 海草、海藻由来炭素の海中における貯留形態 (R O D C : Refractory Dissolved Organic Carbon 難分解性溶存態有機炭素)

(出典) 海草・海藻のCO₂貯留量算定ガイドブック (水産研究・教育機構 2023) ⁴⁾

ブルーカーボンの炭素貯留形態は、図 VI-4-3 の①～④の 4 つに分類される。海草類 (アマモ類等) の藻場では、海草は地下深く根を張り、枯れ落ちた葉等のうち分解・腐敗を免れた分が水底に厚く長期間堆積することから ^{5), 6)}、大気中の CO₂ を固定し貯留する大きな役割をもつと考えられている (①堆積貯留、②難分解貯留)。塩性湿地とマングローブ林も同様の機能を持ち、ブルーカーボン生態系はこれらの植生に限定され ¹⁾、海藻藻場は対象にされなかった。その理由として、海藻類は海底の岩盤に固着した生活形態を取り、群落内に植物体残渣の堆積が見られないことから、大気中の CO₂ を固定し生態系内に貯留するブルーカーボンとしての役割が不明確であることがあげられる。ただし、同年に出版された

他の報告書では、水域の炭素貯留として海藻藻場（Kelp Forests）の記述に1章が設けられており⁷⁾、ブルーカーボンを考える上での海藻類の扱いが一樣ではない。しかし、海藻が流れ藻となり海底に沈んで残る（③深海貯留）、海藻由来の難分解性溶存態有機物類が分解されず海水中に残る（④RDOC貯留）などして、炭素貯留に大きな役割を果たしていることを示唆する研究も多い⁸⁾。海藻の光合成の純一次生産の10%程度が深海貯留等にまわるという試算もある^{9), 10)}（図VI-4-4）。

我が国においては、海藻・海草藻場は表VI-4-1¹¹⁾のように炭素貯留に貢献しているとして、これらを、CO₂を吸収するブルーカーボン生態系として位置づけ、一層の保全・創造に取り組み、各種事業を通してカーボンニュートラルへの貢献を推進するとともに、気候変動枠組条約（UNFCCC）に基づき作成するインベントリへの海藻・海草によるCO₂吸収量の反映を目指すこととしている¹²⁾。



図VI-4-4 藻場の純一次生産炭素のフロー図

黄色：不可逆的に深海に貯留（合計でC-NPPの10%程度）、緑色：浅海域に貯留だが可逆的、青色：大気へ戻り循環、赤色：フローの中間段階

（出典）Krause-Jensen & Duarte (2016)⁹⁾とCage (2018)¹⁰⁾に基づき作成

表Ⅵ－４－１ 藻場タイプ別の算定対象貯留プロセス

(出典) 我が国インベントリにおける藻場（海草・海藻）の算定方法について
(環境省 2024)¹¹⁾

藻場タイプ		主要種	貯留プロセス			
			堆積貯留	深海貯留	RPOC貯留	RDOC貯留
海草藻場	アマモ型	アマモ、スゲアマモ、コアマモなど	○	○	○	○
	タチアマモ型	タチアマモ	○	○	○	○
	スガモ型	スガモ、エビアマモなど		○	○	○
	垂熱帯小型	ウミシルモ類、マツバウミシジサ、コアマモ（垂熱帯型）など	○	○	○	○
	垂熱帯中型	リュウキウスガモ、ベニアマモリュウキウスガモなど	○	○	○	○
	垂熱帯大型	ウミシヨウブ	○	○	○	○
海藻藻場	コンブ類	マコンブ型		○	○	○
		ナガコンブ型		○	○	○
	アラメ・カジメ類	アラメ型		○	○	○
		カジメ型		○	○	○
		ワカメ型		○	○	○
	ガラモ類	温帯性ホンダワラ型	○	○	○	○
		亜熱帯性ホンダワラ型		○	○	○
	小型海藻類	小型緑藻型		○	○	○
		小型紅藻型		○	○	○
		小型褐藻型		○	○	○

一方、海洋全体の循環・混合という時間スケールを考慮するとブルーカーボン生態系の炭素貯留は一時的なものであると指摘する報告¹³⁾や、有機物炭素ばかりが注目され炭酸カルシウムサイクルが軽視されているという見解もある¹⁴⁾。

このような指摘はあるものの、海藻・海草（群落）の生長・増殖で大気中のCO₂が取り除かれることはまちがいになく、また植物の増殖分をバイオ燃料、農業用肥料・飼料として利用することで、化石燃料使用量を減らすことができ、沿岸環境の緩和などの効果もある¹⁵⁾。以下に示す研究開発は、水域の植物の増養殖はカーボンニュートラルに向けたネガティブエミッション技術につながるものとして、多方面において大きな可能性を持つと考えられる。

本章では、水産業にとって重要な海藻・海草（特に海藻類）の増養殖に焦点を当て、今後のネガティブエミッション技術の開発に向けて必要となる研究開発の方向性を探る。

(2) 研究動向

① 海藻・海草由来炭素の長期貯留実態に関する研究動向

我が国においても、アマモ等の海草藻場は広域で見られ、魚介類稚仔のナ－サリーとして水産上重要な位置を占め⁵⁾、また海草藻場の造成は市民が沿岸環境について学ぶ場にもなっている¹⁶⁾。地中海の海草 *Posidonia oceanica* の藻場では、枯れた地下茎等が堆積した mat と呼ばれる堆積層があり、数メートルにも及ぶ厚い層が腐敗せずに残っている^{17), 18)}。この堆積物を分析することで海草藻場の炭素貯留の実態を明らかにすることができ、¹⁴C の分析から、この堆積は数百年から千年程度経過しているとされている¹⁹⁾。なお、紅

海のマングローブ林や海草藻場堆積物の環境DNA分析では、大型藻類DNAも多く見られるという報告もある²⁰⁾。

一方で海藻藻場に堆積物はないことから、その炭素貯留能を明らかにするためには、海藻由来有機物の輸送と貯留に関する証拠を示す必要がある。この分野の研究としては、複数種の同位体、バイオマーカー、環境DNAなどを組み合わせることで、海域に堆積する炭素の起源が明らかになる可能性が示されている²¹⁾。イギリス海峡プリマス沖の水深約48mの海底堆積物の環境DNA調査では、多くの大型藻類DNAが確認され、藻類は底生生物食物網にも取り込まれていることが示されている²²⁾。アメリカのカリフォルニア州モントレー沖（水深約150～450m）における、ROVによる3年間のビデオ撮影調査では、沿岸に生育するコンブ類のジャイアントケルプ *Macrocystis pyrifera* などの破片の漂流・堆積が確認されている²³⁾。我が国の研究例として、トカラ列島、八重山諸島沖における堆積物中のDNAフラグメント分析では、マングローブ植物、海草だけでなく大型藻類のDNAも検出されている²⁴⁾。

この他にアメリカでは、国立研究所、大学、民間企業が、海洋の炭素動態を調べるための各種センサーシステムの開発プロジェクト研究が進行中である²⁵⁾。

② 藻場調査手法に関する研究動向

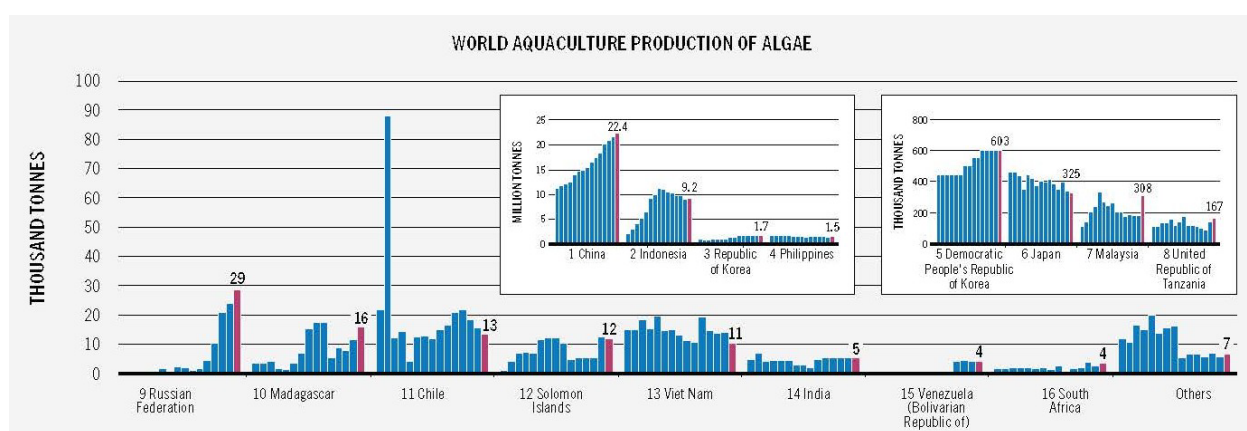
国連気候変動枠組条約を批准している各国は、自国のGHGの排出量・吸収量の算定結果を条約事務局に報告することとなっている。その算定のためにも、またカーボンクレジットの認定と取引のためにも、多様な藻場のタイプや面積を調べ、正確に炭素貯留量を算定する必要がある。

ブルーカーボン生態系（海草藻場、塩性湿地、マングローブ林）のモニタリングに関する報告では、マッピングとモニタリングには光学的画像の他、Synthetic Aperture Radar（SAR：合成開口レーダー）、Light Detection and Ranging（LiDAR）、Multispectral Data等を利用したリモートセンシング技術の利用が有効とされる²⁶⁾。しかし海藻藻場は水深が深く濁りがある場合もあり、独自の計測技術が必要である。水産庁の「広域藻場モニタリングの手引き」²⁷⁾では、LiDARを応用して水深と海藻の分布状態を把握する研究等が紹介されているほか、広範囲を調べる衛星写真や航空写真、比較的狭い範囲を調べるドローン空撮、音響測量について、データ解析方法も含めて詳しく紹介している。

水産研究・教育機構のガイドブック^{4), 28)}においても、藻場タイプと海域区分を細かく分け具体的な調査手法やCO₂貯留量算定手法を公開しているが、潜水調査が多いことから、フィールド調査における新技術導入も望まれる。

③ 大規模海藻養殖に関する研究動向

図VI-4-5に海藻養殖主要国の近年の生産量²⁹⁾を示した。我が国ではノリやワカメなどの食用海藻類が主に養殖されているが、その生産量は325千トンで、世界的には少量であり、生産量1位の中国(22,400千トン)とは70倍近い開きがある。他国とは様々な条件の違いはあるが、我が国でもネガティブエミッション技術としての海藻養殖生産増を検討する余地はあると考えられ、海藻・海草を最大限に活用する技術開発の重要性が提案されており、海藻・海草を資源とみなし「ブルーリソース」として将来のあり方が提言されている³⁰⁾。



図VI-4-5 世界の海藻養殖生産量(湿重)

枠内グラフのバーは左から2008年～2022年で、2022年(赤)の生産量の多い順に、中国22,400千トン、インドネシア9,200千トン、韓国1,700千トン、フィリピン1,500千トン(中央枠内)、北朝鮮603千トン、日本325千トン、マレーシア308千トン、タンザニア167千トン(右枠内)となっている。

(出典) The state of world fisheries and aquaculture (FAO 2024)²⁹⁾

ヨーロッパではスペイン、フランス、アイルランド、イギリス、ノルウェーなどで海藻類の生産(天然含む)が多く、養殖もヨーロッパ各国で増えてきている³¹⁾。北海では、新たに立ち上がったNPOのNorth Sea Farmers(NSF)が中心となって100社以上の企業等がコンソーシアムを組み、北海沿岸9か国が協力して北海の12%を占める洋上風力発電施設建設を目指しており、その施設周辺海面を利用して大規模な海藻養殖場を造り、CO₂固定と同時に商業的に採算の取れる運営の実証試験に取り組み、アメリカの大手企業もスポンサーとして巨額の資金を提供している³²⁾。計画では、海藻養殖によりCO₂を固定するとともに、海藻を食品、包装材、衣料品、化粧品、農

業資材等の原料とすることで、風力発電によって化石燃料に頼らない地域産業創生を目指しており、ここにも技術開発要素がある。

洋上風力発電自体は本構想の趣旨から外れるが、日本国内でも洋上風力発電が注目されており³³⁾、稼働中の風車間の海面での海藻養殖も試験的に始められている³⁴⁾。大規模な養殖場になれば、それに対応した技術開発が必要になると思われる。

この他、海藻利用による温暖化対策として科学的データによる裏付けがあるものの一つは、家畜飼料への紅藻 *Asparagopsis taxiformis* の混合による反芻動物ルーメンからのメタン発生抑制効果である。ウシ飼料への上記海藻配合により、最大で98%のメタン減少が報告されており、ヒツジにも効果があるという³⁵⁾。また、北大西洋の大規模な流れ藻の調査から、海面表層に海藻がある場合、太陽光を反射して海洋の水温上昇を抑えるポテンシャルがあると報告されており³⁶⁾、CO₂固定以外の温暖化対策の可能性も検討の余地がある。

④ 海洋環境変動に強靱な海藻・海草に関する研究動向

近年の気候変動の影響で海洋環境も大きく変動し、海水温の上昇が報告されており³⁷⁾、それに伴った植食性魚類による食害の増加もあり、天然海域での藻場の造成、海域での海藻養殖を今と同様に進めるために、様々な試みが行われている。

大型海藻のカジメ類はアワビなどの餌料として知られる重要種であるが、天然海域においては、ウニ類やアイゴ、ノトリスズミなどの植食性魚類による過剰な摂食により藻場が減少してきており、世界的にもこのような磯焼け現象が報告されている³⁸⁾。近年、世代交代が早く1年で成熟するカジメ類が日本沿岸各地で見つかり、食害を受けた翌年も海藻群落が維持されることが報告されている³⁹⁾。神奈川県水産技術センターでは三浦市地先において早熟性カジメを確認し⁴⁰⁾、陸上水槽でその人工種苗の育成に成功している⁴¹⁾。日本の複数の海域でこのような早熟性藻類が確認されており、各地でその系統を用いた藻場の造成ができれば、磯焼けに強い藻場が造成され、CO₂固定に大きく貢献すると期待できる。また、海水温上昇を考慮した海藻種の将来的なハビタットマップの作成や磯焼け対策の実証試験も始まっており、報告書の作成が進められている⁴²⁾。

他の方法として、高温耐性品種の育種が考えられる。我が国で最も養殖生産量が多いノリについては、育種素材の開発⁴³⁾や温度ストレス応答の分子メカニズムの解明⁴⁴⁾などの研究開発が行われており、公設試でも高温耐性品種の作出⁴⁵⁾が進んでいる。しかし、海草やノリ以外の藻類については研究が少

なく、人為的に作出した品種で天然海域の藻場造成等を行うことの可否については慎重な検討が必要である。

（３）課題と今後の研究開発の方向性

上記の研究動向や、ＩＣＥＦが示すブルーカーボンに係る研究ロードマップ⁴⁶⁾も踏まえ、ゼロエミッション技術開発のために必要となる今後の研究開発の方向性を以下に提示する。

【課題１】海藻・海草由来炭素の長期貯留実態の定性・定量的把握

＜背景＞

藻場に由来する有機炭素の動態や貯留については、複数の手法を組み合わせることで明らかになる可能性が示唆されているが²²⁾、統一された手法はない。海藻藻場がブルーカーボン生態系として認められるためには、有機炭素成分や藻類（環境）ＤＮＡの分析手法を開発し、定性・定量的解析を可能にするとともに、各炭素貯留（難分解貯留、深海貯留、ＲＯＤＣ貯留）へのフローと貯留期間を明らかにする必要がある。同様に、海藻養殖場について、収穫物以外の有機炭素フローを明らかにする必要がある。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ 藻場・養殖場に由来する有機炭素成分等の分析手法の開発
- ・ 藻場・養殖場に由来する有機炭素成分等のフロー、貯留実態と貯留期間の把握

【課題２】藻場調査手法の高度化

＜背景＞

また、変化の大きい藻場面積の把握も簡易で高精度な測定が求められる。炭素貯留量の精確な算定のため、ドローン空撮、水中ドローン、音響調査、各種リモートセンシング技術等について、ＡＩも導入して手法の高度化を続けていく必要がある。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ ドローンや音響調査機器を用いたフィールド調査手法の高度化
- ・ 光学・音響技術や衛星データを用いた藻場生態系センシング技術の高度化

【課題３】海藻の大規模養殖技術開発と新たな「海業」の場の創出

＜背景＞

我が国でも、今後建設が進む洋上風力発電施設等の利用を見据え、海域の環境に合わせた大規模海藻養殖システム及び総合的利用・加工システムに関する研究を進める必要がある。また、その際は周辺海域の生態系モニタリングを進め、藻場の維持・造成による魚介類稚仔のナースリー化も進めて、「海業」の場としての多面的機能の定量化も推進する。

<研究開発の方向性案>

- ・ 海上施設等を利用した海藻養殖及び総合的利用・加工システム開発に向けた海域特性把握と技術開発
- ・ 周辺海域の生態系モニタリングと藻場の維持・造成による魚介類稚仔のナースリー化
- ・ N E T s を基盤とした新たな「海業」の場の創出に必要な総合的社会的科学研究

【課題4】海洋環境変動に強靱な藻場の維持・造成と養殖技術の開発

<背景>

アマモ類や大型藻類（特に養殖対象種）の増養殖技術は体系化されているが、地球温暖化による海水温上昇等の海洋環境変動に対応した新たな技術や、耐性をもつ系統の作出を推進する必要がある。神奈川県等では天然海域由来で世代交代が早い早熟カジメに関する研究を進め⁴⁰⁾、海水温上昇による植食魚類や荒天増加への対応として注目されており、早熟メカニズムの解明や他海域での展開を試みる。また、ノリでは高温耐性系統が作出されており⁴⁵⁾、そのメカニズムの遺伝子レベルでの解明や他種への応用の可能性を探る。

<研究開発の方向性案>

- ・ 海洋環境変動耐性をもつ海藻・海草の探索と高水温耐性藻場造成技術の開発
- ・ 海藻・海草類の高温耐性分子メカニズムの解明と他種への応用手法の検討

【参考文献等】

- 1) Nellemann, C. *et al.* (Eds). 2009. Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, <https://vesar.no/gjenvinningsstasjoner/grinda-gjenvinningsstasjon-larvik/>
- 2) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究戦略センター（2021）バイオマスをCO₂吸収源としたネガティブエミッション技術.
- 3) 水産庁（2014）藻場・干潟の二酸化炭素吸収・固定のしくみ.

- 4) 水産研究・教育機構 (2023) 海草・海藻藻場の CO₂貯留量算定ガイドブック. 水産研究・教育機構, pp.13.
- 5) 野島哲 (1996) 海草藻場群集の多様性と安定化機構. *日本生態学会誌*, **46**, 327-337.
- 6) Boudouresque, C. F. *et al.* (2012) Protection and conservation of *Posidonia oceanica* meadows, RAMOGE and RAC/SPA publisher, Tunis: 1-202.
- 7) Laffoley, D. d' A. & Grimsdich, G. (eds). (2009) The management of natural coastal carbon sinks. IUCN, Gland, Switzerland. 53pp.
- 8) Krause-Jensen, D. *et al.* (2018) Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the blue carbon room, *Biol. Lett.*, **14**, 20180236.
- 9) Krause-Jensen & Duarte, C. M. (2016) Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, **9**, 737-742.
- 10) Cage, P. (2018) Kelp and carbon sequestration: exporting terrestrial GHG accounting to the deep sea. <https://ghginstitute.org/2018/09/06/kelp-and-carbon-sequestration-exporting-terrestrial-ghg-accounting-to-the-deep-sea>
- 11) 環境省 (2024) 我が国インベントリにおける藻場 (海草・海藻) の算定方法について.
- 12) 水産庁 (2024) 藻場の保全・創造とブルーカーボンの取組について. 令和5年度漁港漁場講習会. https://gyokou.or.jp/wp/wp-content/uploads/2024/02/session2024_4.pdf
- 13) Johannessen, S. C. & Christian, J. R. (2023) Why blue carbon cannot truly offset fossil fuel emission. *Communications Earth & Environment*, **4**, 411. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01068-x>
- 14) Macreadie, P. I. *et al.* (2017) Addressing calcium carbonate cycling in blue carbon accounting. *Limnol. Oceanogr.*, **2**, 195-201.
- 15) Duarte, C. M. *et al.* (2017) Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation. *Front. Mar. Sci.*, **4**:100.
- 16) 東京湾 UMI プロジェクト <https://www.pa.ktr.mlit.go.jp/kyoku/59engan/umipro.html>
- 17) Monnier, B. *et al.* (2020) The *Posidonia oceanica* matte: a unique coastal carbon sink for climate change mitigation and implications for management. *Vie Milieu*, **70**(3-4), 17-24.
- 18) Monnier, B. *et al.* (2022) Quantification of blue carbon stocks associated with *Posidonia oceanica* seagrass meadows in Corsica (NW Mediterranean). *Science of the Total Environment*, **838**(1), 155864.
- 19) Boudouresque, C-F. *et al.* (2019) The withdrawal of the lower limit of the *Posidonia oceanica* seagrass meadow in the Bay of Hyeres (NW Mediterranean): a combination of natural and human-induced recent and ancient phenomena? *60th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation*, 35-40.
- 20) Ortega, A. *et al.* (2020) Environmental DNA identifies marine macrophyte contributions to blue carbon sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **65**, 3139-3149.
- 21) Geraldi, N. R. *et al.* (2019) Fingerprinting blue carbon; rationale and tools to determine the source of organic carbon in marine depositional environment. *Front. Mar. Sci.*, **6**: 263.
- 22) Queiros, A. M. *et al.* (2019) Connected macroalgal-sediment systems: blue carbon and food webs in the deep coastal ocean. *Ecol. Monogr.*, **89** (3), e01366.

- 23) Harrold, C. *et al.* (1998) Organic enrichment of submarine-canyon and continental-shelf benthic communities by macroalgal drift imported from nearshore kelp forests. *Limnol. Oceanogr.*, **43** (4), 669-678.
- 24) Miyajima *et al.* (2022) Export and dispersal of coastal macrophyte-derived organic matter to deep offshore sediment around the Tokara and Yaeyama Islands, southwest Japan: Evaluation using quantitative DNA probing techniques. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **73**(5/6), 313-321.
- 25) Sensing Exports of Anthropogenic Carbon through Ocean Observation (SEA-CO2) Program, <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/view-all-programs/sea-co2>
- 26) Pham *et al.* (2019) A review of remote sensing approaches for monitoring blue carbon ecosystems: mangroves, seagrasses and salt marshes during 2010-2018. *Sensors*, **19**, 1933.
- 27) 水産庁 (2021) 広域藻場モニタリングの手引き.
- 28) 水産研究・教育機構 (2024) 海草・海藻藻場の CO2 貯留量算定ガイドブック＜実践編 1＞. 水産研究・教育機構 pp. 51.
- 29) FAO (2024) The State of World Fisheries and Aquaculture.
- 30) NEDO 技術戦略研究センター (2024) ブルーカーボン／ブルーリソース分野の技術戦略策定に向けて. 技術戦略研究センターレポート.
- 31) Araujo, A., *et al.* (2021): Current status of the algae production industry in Europe: an emerging sector of the blue bioeconomy. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 626389.
- 32) North Sea Farmers <https://www.northseafarmers.org>
- 33) 渡辺千咲, 平田仁子 (2024) 日本の洋上風力: 導入拡大に向けた政策課題と展望. Climate Integrate. <https://climateintegrate.org/archives/6040>
- 34) 塩原泰 (2021) 洋上風力発電の動向が気になっている. 第3回 漁業と洋上風力との共存の道を探る. 水産振興コラム.
- 35) Kinley *et al.* (2020): Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *J. Cleaner Production*, **259**, 120836.
- 36) Bach *et al.* (2021): Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic *Sargassum* Belt. *Nature Communications*, **12**: 2556.
- 37) 気象庁 (2023) 海面水温の長期変動傾向 (日本近海)
https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html
- 38) Eger, A. *et al.* (2022) Kelp Restoration Guidebook, United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development.
- 39) 中嶋泰ら (2013) 早熟カジメ類の満1歳藻体の成熟率について. 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 103-106.
- 40) 木下淳司ら (2023) 早熟カジメ群落の動態. *Fisheries Engineering*, **60**(2), 53-61.
- 41) 木下淳司ら (2024) 早熟性カジメ由来人工種苗の1年目成熟率. *Fisheries Engineering*, **60**(3), 125-130.
- 42) 水産庁 (2024) 磯焼け対策全国協議会資料
- 43) 水産研究・教育機構 (2017) ノリの研究. *Fra news*, **53**, 2-14.

- 44) Khoa & Mikami (2022) Membrane-fluidization-dependent and -independent pathways are involved in heat-stress inducible gene expression in the marine red alga *Neopyropia yezoensis*. *Cell*, **11**, 1486.
- 45) 千葉県 (2024) 高水温耐性ノリ新品種「ちばの輝き」の開発について。
<https://www.pref.chiba.lg.jp/gyoshigen/suisanshigen/kousuion.html#:~:tex>
- 46) Watanabe, A. *et al.* (2023) Blue carbon roadmap: carbon captured by the world's coastal and ocean ecosystems (ICEF Innovation Roadmap Project).

5. その他の海洋CDRs^z

(1) 海洋肥沃化に関する技術の概要と研究動向

海洋においては、海洋生物ポンプ (Ocean biological pump) により、海洋表層 (有光層) における植物プランクトンの一次生産で取り込まれたCO₂の一部が、長い時間をかけて海洋内部・深海へ生物学的に輸送されると考えられている。海洋肥沃化 (Ocean Fertilization) によるCDRとは、海洋に栄養塩等を添加、肥沃化することにより、植物プランクトンの増殖を促進し、海洋生物ポンプ機能を強化することで、大気中のCO₂を海洋に取り込み、海底に貯留する機能を促進できるという考え方である。手法としては、鉄散布や、リン・窒素などの栄養塩を人工的な添加することが行われてきた。このほか、栄養塩豊富な海洋深層水を浅海域に揚水することや、火山噴火による降灰による栄養塩添加によっても植物プランクトン増殖効果が認められる。特に栄養塩が限定的な海域では、火山灰からの複数の栄養塩添加により、植物プランクトンが一時的に増加することが知られている^{1,2)}。2008年のアリューシャン列島のカサトチ火山の噴火降灰は鉄分が豊富で、珪藻の大発生が起きたとされる^{3,4)}。一方で、海洋肥沃化には、窒素酸化物の放出や、海洋の栄養塩バランスを崩す、海底や深海における酸素消費による貧酸素化・無酸素化の進行や酸性化の増大の可能性など、マイナスの影響がある可能性が指摘されており、地球環境や地質科学的な検証が必要と考えられている^{5,6,7)}。また、植物プランクトンの量や組成が変化することにより、水産重要種の仔稚魚や幼生の初期減耗への影響が大きい、動物プランクトンの量や組成にも影響する点も指摘される。

Martin *et al.* (1989)⁸⁾ は、外洋における植物プランクトンの栄養塩要求性が、C : N : P : Fe = 106 : 16 : 1 : 0.005 (モル比) となることを示した。特に外洋には表層水の硝酸塩とリン酸塩の濃度は十分高いが、鉄の欠乏によって植物プランクトンの増殖が制限されているとされる海域があり、高栄養塩・低クロロフィル海域 (HNLC : High-nutrient, low-chlorophyll) と呼称される。HNLCは南極海、太平洋赤道域、北太平洋亜寒帯域に広がり、海洋全体の20~40%

^z (CDR, Carbon Dioxide Removal) 大気中のCO₂除去のこと。

を占めるとされる。このようなHNL C海域に人為的に鉄を供給すれば、植物プランクトンの増殖・光合成を促進し、海洋のCO₂吸収能を高めることが可能になるとの発想により⁸⁾、1990年以降、大規模な国際的な鉄添加実験が10件以上実施された。そのうち、北太平洋亜寒帯域鉄散布実験（SEEDS、SEEDS-II：Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystem Dynamic Study）は、日本の研究者が中心となって実施された⁹⁾。これらの実験の結果、海底へのCO₂取り込みは限定的な一方で、赤潮の発生などへの懸念が表明されることとなった¹⁰⁾。また、海洋表層における鉄分の多寡が珪藻類の消長にも影響することが示唆されている¹¹⁾。このような状況を踏まえ、国際的には鉄分の海洋添加は規制される動きにある

（2008年ロンドン議定書締約国会合、2008年生物多様性条約締約国会議）⁶⁾。

一方、日本の沿岸域では、鉄鋼スラグ等を用いた磯焼け対策・回復技術試験が、北海道増毛町における藻場再生実証試験ほか国内で20カ所以上実施されている^{13,14)}。海域に鉄分を供給する施肥材も単独、あるいは有機質との混合で検討されている¹⁵⁾。施肥を検討する際には、増殖対象となる海藻類等の栄養塩要求性に基づいて、海域ごとの陸域の影響や流況や海底地形などを十分に検証し、制限要因となる栄養塩の動態を事前に十分に把握することが重要である。

外洋の有光層では主にリンが植物プランクトン増殖の制限要因とされるが、沿岸では、陸域からのリン供給が過剰になると、赤潮の発生、有機汚濁、底層の貧酸素化などが進行することが知られている。我が国の沿岸域では、公害問題が表面化した1960年代以降に様々な富栄養化対策が行われた（1970年：水質汚濁防止法、1973年：瀬戸内海環境保全臨時措置法（瀬戸内法））。その結果、水質は改善されたが、逆に「貧栄養化」によるノリの品質低下や貝類等の漁獲量減少等が指摘されるようになった。このことを受け、2015年に瀬戸内法が改正され、「きれいで豊かな海」という概念が盛り込まれ、水質のみならず生物の多様性や生産性等も考慮し、地域・季節ごとの実情に応じて対応する水質管理が求められるようになった。ここでは、「栄養塩類の適切な管理に関する調査及び研究に努め」、「栄養塩類の管理の在り方について検討を加える」こととされた。さらに2021年に瀬戸内法の再改正により、栄養塩類管理制度が創設され、関係府県知事が栄養塩類の管理に関する計画を策定、特定の海域への栄養塩類供給等、きめ細かな栄養塩類の管理が可能になった。各自治体の方策の元で、ため池等の搔い掘り、海底耕運、下水処理緩和運転等が試みられている。

水産分野では、磯焼け対策やノリの色落ち防止など、海藻の増養殖に不足する栄養塩を補う目的で海洋施肥が実施されている¹⁶⁾。硫酸アンモニウムや塩化アンモニウムなどの窒素肥料を液肥として、あるいは固形の緩効性無機肥料として使われることが多いが、魚かすなど完全に無機化されていない有機肥料も試験的に使用された事例がある。施肥に関しては有効範囲が限定的で継続的な効果を得ることが難しいことが難点である。栄養塩類と水産資源の関係については未だ不明

な点が多いが、一部の海域では栄養塩類の不足が一因とみられる生物多様性・生物生産性の確保に支障が生じており、環境保全の観点から現状を放置することは望ましくない状況にあるとされる¹⁷⁾。また、海洋施肥に当たっては、海表面と海底で異なる現象が引き起こされる可能性があるので留意が必要である。例えば施肥により海表面が富栄養化して有機化合物が海底に沈降すると、それを微生物が分解することで海底付近の貧酸素化、無酸素化が進行し、結果的に海底付近の生物が死滅したり、GHGであるメタンが発生することが知られている^{18, 19)}。

このため、瀬戸内法及び水質汚濁防止法に基づく規制措置は基本的に維持しつつも、栄養塩類の削減一辺倒ではなく、栄養塩類と対象水産資源の関係性についてある程度の蓋然性が見えた段階で、海域ごと、季節ごとの観点を踏まえた栄養塩類のきめ細やかな管理を図ることも適切な対応とされるようになった²⁰⁾。そのため、目標として栄養塩類濃度を設定し、モニタリングと並行しながら、人為的に管理しうる範囲において栄養塩類増加措置を実施し、順応的なプロセスに基づく栄養塩類の管理を計画的に実施することが必要と考えられる。地域ごとに栄養塩管理が可能となったため、下水処理水中の栄養塩類（窒素やリン）の濃度を調整することで、水域の生態系や水産資源の保全を図ることも可能となり²¹⁾、兵庫県など自治体ごとの栄養塩類管理計画が策定されるようになった²²⁾。

栄養塩豊富な海洋深層水を有光層に供給することにより、植物プランクトンや藻類の増殖を促すというアイデアも海洋肥沃化の一形態と考えられる。我が国での海洋深層水の利用研究は、1986年から実施された旧科学技術庁による「海洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究」がある。以降、各地で海洋深層水湧水施設が建設され、様々な産業において活用が検討、一部では実用化されている^{23, 24, 25)}。人工的な海洋深層水汲み上げによる海洋肥沃化実験の例として、2000年から相模湾で実施された「拓海プロジェクト」がある。このプロジェクトでは人工湧昇流漁場の世界初の実海域での実現に向けてハード部分はほぼ目標通り達成されたとされるが²⁶⁾、深層水が水平方向に拡散希釈していることも確認され、汲み上げ量が小規模では効果も小さいとされた²⁷⁾。また、揚水に際して、栄養塩と同時に沈降していたCO₂も表層に戻る可能性も懸念される。以上のことから、人口揚水による海洋深層水のCDRへの活用については、効果が限定的であることや、経済的効率などが課題である。

国外での海洋肥沃化の研究動向は、アメリカにおいて海洋肥沃化は、鉄分添加に焦点が置かれることが多いようである^{28, 29)}。具体的な施肥技術や肥料開発よりも、数値モデルやシミュレーションの開発・活用に重点が置かれ、CO₂の動態や吸収量の定量的把握、栄養塩添加による海洋生態系への影響評価が進められている²⁸⁻³¹⁾。また、モデルを駆動するためには高精度データが必要であり、それを入手するための長期海洋モニタリングシステムの構築や、CO₂等センサーの高度化が進められている²⁸⁻³¹⁾。

EUでは、地球規模における海洋の炭素の吸収量をモデル化して推定し、陸上のNETs技術との比較評価が行われている³²⁻³⁴⁾。海洋炭素貯留のモニタリングシステムなど、MRVのための測定技術の開発を進めるとともに、海洋モニタリングのためのガイドラインについても検討されている³⁵⁾。また、人工的に湧昇を実現する技術の開発も試みられている³⁶⁾。

中国では、海洋肥沃化の技術開発より、生物ポンプや、CO₂取り込みによる海底の炭素蓄積に関するメカニズム解明に関する研究に軸足が置かれているようであり、海底堆積物中の炭素の分析により、過去の気候変動と炭素循環の関連などが分析されている³⁷⁾。

(2) 海洋アルカリ化に関する技術の概要と研究動向

海洋表層のCO₂濃度は大気中のCO₂濃度と動的平衡状態を保っているため、海洋表層のCO₂濃度が何らかの手法で減少すれば、海洋表層における大気からのCO₂の取り込みが促進され、大気中のCO₂濃度が低下すると考えられる。海洋表面のpHは一般的に弱アルカリ性を示すが、海水に溶けたCO₂はH₂CO₃となり、さらにHCO³⁻やCO₃²⁻となってH⁺が発生するため、CO₂が溶け込むと海水の酸性化が進むことになる。溶解してOH⁻を生じるアルカリを添加し、H⁺と反応させて除去することにより、CO₂を海水中に取り込む反応を促進させることができる。アルカリとしては、石灰石・ケイ酸塩・水酸化カルシウム・カンラン石等が用いられる。これらのアルカリ化物質は、自然の風化作用により陸上の岩石等が粉砕されて河川を通じて海に流れ込むこともでも添加されるため、陸上での「風化促進」が海洋アルカリ化に寄与する可能性がある。また、炭酸カルシウムが主体である貝殻を粉砕・散布することによる海洋アルカリ化の取り組みもあるが、国内では貝殻は産業廃棄物と見做されている。貝殻を焼成した酸化カルシウムは強力なアルカリ化剤であるため、その活用法の開発を含めて、貝殻による海洋アルカリ化の科学的合理性の検証が必要である。

広範な海域に対して試験的に投入できるアルカリの物量は限られるため、そのCDR効果についての科学的検証は困難であり、そのプロセスは十分に解明されているとはいえない⁶⁾。海洋アルカリ化を通じて地層や海洋の貯留地に貯留されたCO₂は、大気中に逆戻りする可能性はそれほど高くないと考えられている^{38, 39)}。一方で、海洋表層でCO₂が取り込まれ、平衡に達するまでの時間スケールが長期にわたるとの指摘もある^{40, 41)}。

一方で、海洋表層からCO₂を安定的に直接回収するため、アルカリ投入以外によるアルカリ化促進技術も開発中である。具体的には、電気透析型として、海水のpHを下げてCO₂を回収する手法が考えられており、膜の安定運用技術等が開発中である。また、海水の圧力と触媒を利用して、低エネルギー、低コストで海中からCO₂を回収するための技術開発も検討されている^{28, 31)}。

アルカリ物質の海洋投下による生態系への影響については、依然として不明確な部分が多く、特に生態系の長期的な変化や予期せぬ影響について慎重な評価が必要である。多様な海洋生物にとって、アルカリ物質によるpHの変動がどのように作用するのかについては、長期的なモニタリングと分析が求められる。一方で、大気中のCO₂を海洋が吸収することにより引き起される問題として「海洋酸性化」が指摘されている。上述のように、海水中のCO₂濃度が高まると、結果的に海水中のH⁺濃度が高まり、酸性化が進む。水深が深くなるにつれて有機物の分解により海水中の酸素が消費され、全炭酸濃度が増加することにより、酸性度が高まるとされる。海洋酸性化の影響により、各種プランクトン・サンゴ・貝類・甲殻類・棘皮動物等、炭酸カルシウムで殻をつくる海の生き物たちの成長・繁殖を妨げ、寿命にも影響を及ぼす可能性が指摘されており、水産資源に深刻な影響を与えることが危惧されている⁴²⁻⁴⁴⁾。

海外での海洋アルカリ化の研究動向は、アメリカでは、アルカリ物質（カンラン石、玄武岩、石灰岩等）の海洋投下による実証試験が行われ、数値モデルやシミュレーションの開発・活用による、CO₂の動態や吸収量の定量的把握、海洋生態系への影響評価が進められている²⁸⁻³¹⁾。特に海洋pHの変動の影響を受けやすい有孔虫などの植物プランクトンやサンゴ礁への影響への評価が進められている²⁹⁾。また、MRVのための測定技術の開発として、高精度のpCO₂センサー搭載の自律型シーグライダーや、深海で長期運用できるpHセンサーの開発などがある^{29, 31)}。アルカリ化の手法についても、CO₂から変換した炭酸塩（炭酸ナトリウム、重炭酸ナトリウム）の海洋投下や、排水にアルカリを添加する試みがある²⁹⁾。さらには、アルカリ散布以外の海洋アルカリ化技術として、電気化学的酸隔離、波力エネルギーの電気分解駆動等を活用する研究開発が進められている^{28, 31)}。

EUでは、海洋生態系への影響評価として、CDRの実現可能性や、リスク、コベネフィット分析などが行われている³²⁻³⁵⁾。海洋pH変動の海洋環境影響調査として、植物プランクトン群集の挙動が研究されている³²⁾。

海洋アルカリ化の今後の研究開発の方向性については、海水成分のバランスを動かす取り組みであること、CDRとしての効果が十分検証されていないこと、生態系への影響が不明確でリスクがあること、モニタリングとモデル化の必要性など、海洋肥沃化と同様の課題を踏まえて検討する必要がある。また、海水pHの変動は、特に炭酸カルシウムの骨格や殻、棘等を有する動植物プランクトンやサンゴへの影響が懸念されており、海洋生態系への影響、特に水産資源への影響を適切に評価するとともに、悪影響が懸念される場合はその対策の検討も必要である。

CDR効果を検証するためには、海洋表層における大気からのCO₂の取り込み、さらに海洋表層から海底に至る複雑な海洋システムにおける長期的なCO₂や

G H Gの動態把握が必要であり、そのためには、長期にわたる詳細で様々な海洋環境データの取得するための高精度センサーや観測システムの開発も必要となる。また、取得されたデータを詳細に分析し、C D R効果を説明するためのモデルやシミュレーションの開発および活用が不可欠となる。

(3) 課題と今後の研究開発の方向性

「その他の海洋C D R s」の課題と今後の研究開発の方向性を整理するにあたり、「海洋肥沃化」と「海洋アルカリ化」には、何らかの物質を海洋に加えることで海水成分のバランスを動かす試みである部分で根本的に共通するため、両者を纏めて検討することとする。

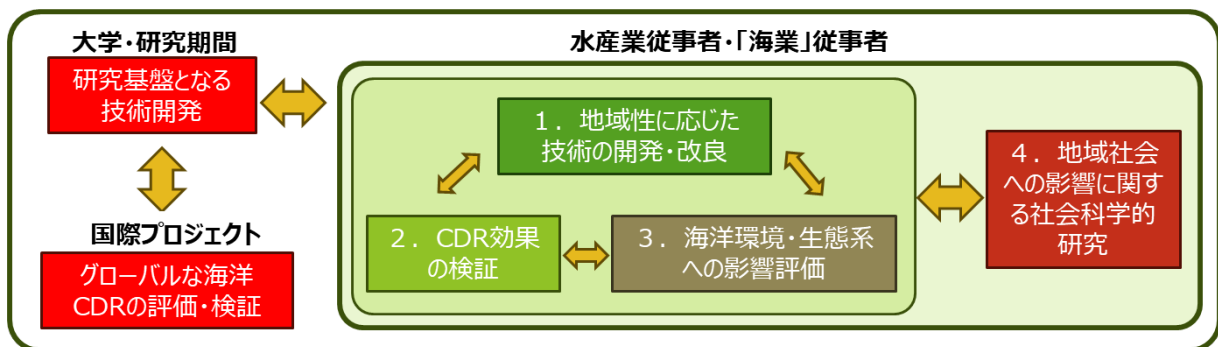
「海洋肥沃化」「海洋アルカリ化」について、本研究開発構想で提案する研究開発課題の基本的な考え方は、水産業従事者および「海業」従事者を実施主体として想定することである。「海業」とは、近年、水産庁の推進する概念で、「漁村の人々が、海や漁村に関する地域資源の価値や魅力を活用して所得機会の増大等を図る取組」をいう⁴⁵⁾。即ち、地先の海を生活の場として活用しようとする者が、地先の海で取り組める研究開発内容となるような方向性である。其々の「地先の海」には、気候、地形、海流、潮汐、陸水等の環境特性や、棲息する生物等の独自性があるため、それらの地域特性を十分に勘案し、其々の地域に適した技術開発が必要となる。このことを踏まえて、以下の4つの課題を設定した。

- ・課題1：地域性に応じた技術の開発・改良
- ・課題2：C D R効果の検証
- ・課題3：海洋環境・生態系への影響評価
- ・課題4：地域社会への影響に関する社会科学的研究

課題1においては、其々の海域特性を踏まえて、適切な場所で目標とする栄養塩濃度やp Hを達成するための技術開発を行う。課題2では課題1で開発した技術によるC D R効果を検証する。課題3では課題1で開発した技術の海洋環境・生態系への影響評価を行う。これらの自然科学的なアプローチにおいては、相互に関連付けて検証を行いながら技術的改善を図る。一方で、これらの技術開発は公的海域で実施されるため、地域社会の合意形成や体制構築、地域社会への影響への社会科学のアプローチも必要となる。これら自然科学的および社会科学のアプローチを両輪として、地域に即したC D R研究開発を推進する。

ところで、「海洋肥沃化」や「海洋アルカリ化」のC D R効果の検証のためには、海洋表層から海底に至る広大な海洋空間スケール、長い時間的なスケールでの複雑な海洋システムにおける物質動態の理解をもとに、グローバルレベルでの一般化が必要である。そのためには、長期にわたる詳細で様々な海洋環境モニタリングが必須であり、これを効率的かつ経済的に実施するための高精度センサーや観測システムの開発も必要となる。また、データを詳細に分析するためのモデ

ルやシミュレーションの開発および活用が不可欠となる。このような大規模かつ高度に学術的な研究開発に、水産業従事者や海業従事者が主体的に取り組むことは困難と思われるため、大学や研究機関等との連携を想定することが現実的である。また、本研究構想で想定している地域性に特化した開発研究の取り組みは、大学や研究機関等を通じて国際プロジェクトにおけるグローバルな海洋CDRの評価・検証に活用され、グローバルレベルでの「その他海洋CDRs」の理解を深めるためのローカルな研究事例としての情報蓄積に資することを想定している。



図VI-5 研究開発実施主体
(生研支援センター作成)

我が国におけるJブルークレジット制度では、対象海域は、「藻場、マングローブ、塩性湿地（干潟）、その他内湾等の自然海岸ならびに自然海域」もしくは「人工基盤（構造物、養殖施設等）」であり、追加性、即ち、クレジット取得が、活動の維持や発展につながることで、またベースラインとなるCO₂吸収量（プロジェクト前後の対象海域、及び対照海域）を示すことが求められている⁴⁶⁾。そのため、海藻藻場回復への取り組みの一環としての海洋施肥が、Jブルークレジットの対象となっている事例がある。しかしながら、岩・ブロック等の着生基盤（藻礁）の設置、覆砂、水底質の改善や活動体制の変更等も対象プロジェクトの具体例として挙げられていることから、取り組みの内容によって申請可否を精査する必要がある。

以上を踏まえて、想定されうる研究課題は以下の通りとする。

【課題1】地域性に応じた技術の開発・改良

<背景>

海洋CDRsの研究開発に当たっては、地域性を十分に勘案することが重要である。対象海域には地域ごとの特性（気候、地形、海流、潮汐、陸水の影響

等)があり、また生息する生物にも地域特性があるため、其々に即した海洋肥沃化・アルカリ化及び関連技術の開発が必要である。その際には、「どこをどれだけ」肥沃化・アルカリ化するかを目標を明確にして、その目標を達成するための技術開発(投入物質の種類や形態・時期・場所・量等)に取り組むことが必要になる。新たな肥沃化・アルカリ化素材の開発に際しては、科学的合理性の検証が不可欠である。また、投入後の物質の動態と海域特性との関連、目標達成度や持続性などを把握して問題点を抽出し、技術改良を図ることになる。陸水の影響に関しては、農林地からの土壌侵食や排水管理等による栄養塩類の流入や、風化した石灰岩等のアルカリ化物質の流入も考慮する必要がある。「海洋肥沃化」では、増殖対象(植物プランクトンや海藻・海草等)の栄養塩要求性、「海洋アルカリ化」では、pH変動に伴う海洋生物への影響を念頭に目標を設定することが重要である。

＜研究開発の方向性案＞

「海洋肥沃化」

- ・ 増殖対象(植物プランクトンや海藻・海草等)の栄養塩要求性を踏まえた目標濃度の把握
- ・ 対象区域内外の栄養塩濃度等の環境把握のための調査手法の高度化
- ・ 対象区域での目標濃度達成のための海洋肥沃化技術・素材の開発・改良

「海洋アルカリ化」

- ・ 対象海域に生息する生物へのpH変動の影響等を踏まえた目標pHの把握
- ・ 対象区域内外のpH、 pCO_2 等の環境把握のための調査手法の高度化
- ・ 対象区域での目標pH達成のための海洋アルカリ化技術・素材の開発・改良

【課題2】CDR効果の検証

＜背景＞

海洋肥沃化・アルカリ化の何れも、CDR効果が科学的に十分検証されておらず、効果が不明確か限定的である。時間スケールが長く、空間スケールが大きく連続的であること、 CO_2 以外のGHGによる影響が不明瞭であることも問題である。そのため、【課題1】で開発した技術を適用する際には、技術適用の前後、対象区域内外で適切な対照区域を設定して比較検討することが重要である。「海洋肥沃化」では栄養塩の動態と、増殖対象種の生活史(成長・繁殖・死亡等)に伴う生物量の変動、食物連鎖・腐食連鎖・域内外への分散等、有機炭素化合物の挙動を量的・質的に把握し、CDR効果を算定する技術開発が必要である。「海洋アルカリ化」では、アルカリ化剤の溶出等の挙動やpH等の変動を把握し、 CO_2 や炭素化合物、 Ca^{2+} 等の挙動との関連を量的・質的に把握

し、C D R 効果を算定する技術開発が必要である。データを分析し、C D R 効果を評価するためのモデルやシミュレーションについては、大学や研究機関等との連携が想定される。

<研究開発の方向性案>

「海洋肥沃化」

- ・ 対象区域内外の増殖対象種の生物量・炭素化合物の動態とその他の環境変動の関連を分析する技術開発
- ・ 対象区域内外の増殖対象種の生物量・炭素化合物の動態その他の環境変動からC D R 効果を算定する技術開発

「海洋アルカリ化」

- ・ 対象区域内外のp HやC O₂、その他の環境変動の関連を分析する技術開発
- ・ 対象区域内外のp HやC O₂、その他の環境変動からC D R 効果を算定する技術開発

【課題3】海洋環境・生態系への影響評価

<背景>

「海洋肥沃化」や「海洋アルカリ化」は、海水成分のバランスを動かす試みであり、生態系への影響については科学的に十分検証されていない。栄養塩やアルカリの対象区域外へのしみだしや、海表面と海底では異なる現象が引き起こされる可能性も想定される。そのため、C O₂以外のG H Gの発生や生物多様性への影響等、様々な想定できないリスクが発生する懸念がある。実施場所は公的な海域であることから、対象海域および周辺海域の海洋環境への影響については慎重に検討する必要がある。特に地域経済への影響が大きい水産資源や観光資源となる生物等については十分な評価が必要になる。「海洋肥沃化」では植物プランクトンの種組成変化、「海洋アルカリ化」ではp H変動に伴い、海洋生物の生活史への影響が懸念される。海洋に何らかの物質を投入することについては、国内法規や国際合意等との整合性を踏まえて取り組む必要がある。上記の分析に必要な海洋環境や生物多様性のモニタリング技術の開発については、大学や研究機関等との連携が想定される。

<研究開発の方向性案>

「海洋肥沃化」

- ・ 対象海域内外の水質等の海洋環境や、C O₂およびG H Gの挙動を把握するための技術開発
- ・ 対象区域内外の植物プランクトンの種組成変化等の生物多様性、海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発

「海洋アルカリ化」

- ・ 対象海域内外の水質等の海洋環境や、 CO_2 およびGHGの挙動を把握するための技術開発
- ・ 対象区域内外のpH変動の海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発

【課題4】地域社会への影響に関する社会科学的研究

<背景>

「海洋肥沃化」・「海洋アルカリ化」の実施場所は公的な海域であるため、対象海域および周辺海域の海洋環境への影響については十分検討する必要がある。実施内容やCDR効果、費用対効果、地域社会への影響について関係者間で慎重に協議し、事前に地域社会での合意形成プロセスを踏むことが必要である。「海洋肥沃化」・「海洋アルカリ化」は海洋に何らかの物質を投入する技術であるため、国際合意や国内法と整合性を確認することが不可欠である。新素材の開発・適用を進める際には、コストやエネルギー等の費用対効果を含めた科学的合理性と法的規制の妥当性検討も視野に入れる必要がある。また、成果を地域社会に還元し、持続的な活動にするための体制作りも必要である。そのためには、陸域の関係者を含めて、社会科学的なアプローチによる社会システムの検討や、活動を経済的に成立させるための社会経済学的な研究が必要である。経済性に関しては、Jブルークレジットへの申請可能性について、活動内容と申請条件を精査が必要である。

<研究開発の方向性案>

「海洋肥沃化」・「海洋アルカリ化」

- ・ 地域社会の合意形成プロセスを確立し、活動を定着させる社会システムを検討するための社会科学的研究
- ・ 活動を経済的に成立させるための社会経済学的な研究
- ・ 新素材の科学的合理性と法的規制の妥当性検討

【参考文献等】

- 1) Achterberg et al, 2013. Natural iron fertilization by the Eyjafjallajökull volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, 40; 921-926.
- 2) Duggen et al, 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; L01612.
- 3) Hamme et al, 2010. Volcanic ash fuels anomalous plankton bloom in subarctic northeast Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 37; L19604.
- 4) Olgun et al, 2013. Geochemical evidence of oceanic iron fertilization by the Kasatochi volcanic eruption in 2008 and the potential impacts on Pacific sockeye salmon. *Mar Ecol Prog Ser*, 488; 81-88.

- 5) Minx et al, 2018. Negative emissions—Part 1: Research landscape and Synthesis. *Environ. Res. Lett.* 13; 063001.
- 6) IPCC, 2022. “Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change” the 6th Assessment Report of IPCC.
- 7) Siegel et al, 2023. Quantifying the Ocean’s Biological Pump and Its Carbon Cycle Impacts on Global Scales. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 15:329–356.
- 8) Martin et al, 1989. Vertex: phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska, *Deep Sea Res.*, 36; 649–680.
- 9) 津田・武田, 2005. 北太平洋における鉄散布実験—プロジェクトの立ち上げと成果. *日本生態学会誌*, 55; 514–519.
- 10) Lampitt et al, 2008. Ocean fertilization: a potential means of geoengineering? *Phil. Trans. R. Soc. A*, 366, 3919–3945.
- 11) 武田, 2007. 鉄による海洋一次生産の制御機構. *日本水産学会誌*, 73;429–432.
- 12) 武田, 2009. 海洋鉄肥沃化～現場実験による成果と国際情勢～. *Ocean Newsletter*, 216.
- 13) 北海道留萌振興局, 2024. 令和6年度増毛町藻場再生事業.
- 14) Nippon Steel, 2023. 鉄鋼スラグを活用した藻場再生「海の森づくり」、今年度は全国21カ所で実証試験開始.
https://www.nipponsteel.com/news/20231219_100.html
- 15) 水産庁, 015. け対策における施肥に関する技術資料
- 16) 水産庁, 2015. 栄養塩類対策に関する研究
- 17) 環境省, 2022. 栄養塩類管理計画策定に関するガイドライン.
- 18) Hamdan and Wickland, 2016. Methane emissions from oceans, coasts, and freshwater habitats: New perspectives and feedbacks on climate. *Limnol. Oceanogr.* 61, doi: 10.1002/lno.1044.
- 19) Zygadłowska et al, 2024. Eutrophication and Deoxygenation Drive High Methane Emissions from a Brackish Coastal System. *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, 10582–10590.
- 20) 瀬戸内海環境保全特別措置法の一部を改正する法律 令和3年法律第59号（令和4年4月1日施行）.
<https://www.env.go.jp/content/900542065.pdf>
- 21) 国土交通省, 2023. 栄養塩類の能動的運転管理の効果的な実施に向けたガイドライン
- 22) 兵庫県：豊かで美しい瀬戸内海の再生に向けた栄養塩類管理計画
- 23) 洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究.
<https://research-er.jp/projects/view/1086373>
- 24) 谷口, 1997. 海洋深層水の利用. *日本海水学会誌* 55: 216–222.
- 25) 豊田, 2001. 21世紀への学術・技術展望 2. 海洋深層水の利用. *日本海水学会誌* 55: 216–222.
- 26) 大内, 2007. 深層水汲み上げによる海洋肥沃化実験—拓海プロジェクト—. *海洋開発論文集*, 第23巻, 2007年7月.

- 27) 井関・大内, 2017. 海洋深層水の富栄養性を利用した海域肥沃化. Deep Ocean Water Research, 18(3), 166-167, 2017
- 28) NOAA. Multiscale observing system simulation experiments for iron fertilization in the Southern Ocean, Equatorial Pacific, and Northeast Pacific.
<https://oceanacidification.noaa.gov/>
- 29) SEA-CO2. Sensing Exports of Anthropogenic Carbon through Ocean Observation.
<https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/view-all-programs/sea-co2>
- 30) GOMO. Global ocean monitoring and observing program. <https://globalocean.noaa.gov/>
- 31) National oceanographic partnership program (IWG-NOPP).
<https://www.noaa.gov/ocean-science-and-technology-subcommittee/national-oceanographic-partnership-program>
- 32) Carbon Dioxide Removal (CDR) approaches.
<https://www.horizon-europe.gouv.fr/carbon-dioxide-removal-cdr-approaches-26414>
- 33) Ocean Nets.
<https://www.oceannets.eu/>
- 34) Ocean-ICU Improving Carbon Understanding. <https://cordis.europa.eu/project/id/101083922>
- 35) Strategies for Environmental Monitoring of Marine Carbon Capture and Storage.
<https://cordis.europa.eu/project/id/654462>
- 36) Ocean Artificial Upwelling.
<https://cordis.europa.eu/project/id/695094/reporting>
- 37) Tiwari, 2020. Spatial variability of sedimentary carbon in South Yellow Sea, China: impact of anthropogenic emission and long-range transportation. Env. Sci. Poll. Res., 27. DOI:10.1007/s11356-020-08686-4
- 38) Middelburg et al, 2020. Ocean Alkalinity, Buffering and Biogeochemical Processes. Reviews of Geophysics, 58, e2019RG000681.
- 39) Bach et al, 2023. Toward a consensus framework to evaluate air-sea CO2 equilibration for marine CO2 removal. Limnol. and Ocenogr. doi: 10.1002/lol2.10330.
- 40) Jones et al, 2014. Spatial and seasonal variability of the air-sea equilibration timescale of carbon dioxide. Global Biogeochem. Cycles, 28: 1163-1178.
- 41) He and Tyka, 2023. Limits and CO2 equilibration of near-coast alkalinity enhancement. Biogeoscience, 20; 27-43.
- 42) 藤井 2020. 地球温暖化・海洋酸性化が日本沿岸の海洋生態系や社会に及ぼす影響. 水産工学 56:191-195.
- 43) Alter et al, 2024. Hidden impacts of ocean warming and acidification on biological responses of marine animals revealed through meta-analysis. Nature Communications, 15:2885.
- 44) Wilson et al, 2020. Potential socioeconomic impacts from ocean acidification and climate change effects on Atlantic Canadian fisheries. Plos One, 15; e0226544.
- 45) 海業の推進.
<https://www.jfa.maff.go.jp/j/keikaku/230718.html>

6. ライフサイクルアセスメント (LCA)

(1) 現在の動向

NETsについては、大気からのCO₂の回収・貯留効果が期待される一方、その回収・貯留の過程においてエネルギー等を消費してGHGを排出したり、生じる副産物が自然界に影響を及ぼす等のケースが考えられ、ライフサイクル全体で見たときの有効性については明確になっていないことから、農林水産分野のNETs共通の課題として、ライフサイクルアセスメント(LCA)に係る研究を進めることが重要である。

NETsのLCA研究を巡る動向をみると、当該研究を俯瞰的に捉えたクリティカルレビュー¹⁾において、論文の出版数は増加傾向にあり、多くの国がパリ協定の気候変動対策に合意した2015年に特に大きく増加したこと、引用数については指数関数的に増加していることが述べられている。

また、国内に目を向けてみると、LCAに関わる産業界、学界、国公立研究機関の関係者が集うプラットフォーム「LCA日本フォーラム」において、日本の将来のNETs戦略に貢献することを目的とした「カーボンリムーバル&リサイクル(CR2)研究プロジェクト」が立ち上がり、2020年に、CR2技術のGHG排出量算定に関するガイドラインが作成・公開されている²⁾。

(2) 今後の研究開発における課題

上記クリティカルレビューでは、CDR技術のLCA研究を進めるにあたり、以下の点を課題として挙げている。

- ① 例えばバイオ炭のLCA研究では、製造プロセスで発生する副産物(ガスやバイオオイル)の利用に伴う電気や熱の生産回避や、バイオ炭が持つ土壌改良効果に伴う肥料消費の回避も含めて評価しているケースがあるが、これらのような回避されるGHG排出は、大気からのGHG除去によるネガティブエミッションとは恒久性という点で異なるものであることから、区別すること。^{aa}

^{aa} 一方、このような新たな技術やサービスによるGHG排出の削減については、これを定量的に示す「削減貢献量」(Avoided emission)の考え方があり、企業が従来の製品・サービスから自社製品・サービスへの代替による排出削減効果をアピールできるとして、重要性が高まっている。2023年3月には、「持続可能な開発のための世界経済人会議」(WBCSD: World Business Council for Sustainable Development)から、削減貢献量の算出や報告に関するガイドラインが発出されている。

- ② CDR技術は、間接的な土地利用変化（i L U C）、食料や水の競争、生物多様性やアルベドの変化、生態系の攪乱等の重大な副作用を起こす可能性があることから、L C Aにおいてもシステム境界内での副作用を考慮すること。
- ③ CDR技術の主要な目標である大気からのC O₂除去を考慮し、様々なCDR技術を比較できるための共通の機能単位として、「除去されたC O₂トン」を適用すること

また、別のレビュー³⁾では、CDR技術を大規模展開した場合の体系的な影響を評価できるよう、L C Aの目的と範囲の設定において

- ④ 少なくともC O₂の回収から最終的な貯留までの全てのプロセスを含むとともに、エネルギー生成に関する間接的な影響やライフサイクル全体を通じて利用される他の製品・サービスに及ぼす影響も含んだシステム境界の定義、
 - ⑤ CDR技術の導入が適切に評価できるベースライン^{bb)}の定義（CDR技術が導入されない場合における最も可能性の高いシナリオ等）、
 - ⑥ C O₂除去によるコベネフィットやトレードオフについても捉えること、
- を踏まえた上で、帰結的（consequential）L C Aのアプローチ^{cc)}をとること等の指摘がなされている。

N E T sのL C A研究に当たっては、これら①～⑥の点に留意しながら、進めることが重要である。

また、各研究領域について目を向けてみると、次の点が重要であると考えられる。

- ① 「バイオ炭」のL C A研究に関しては、原材料の入手や製造工程の過程を含めつつ、これらの過程におけるC H₄やN₂O等も含めたG H G全体の削減貢献量について評価するべきである。
- ② 「森林の循環利用」のL C A研究に関しては、国内における、森林から木材利用（特に木造建築）までを全体としてシステム境界に含めた研究事例は存在しないが、「森林の循環利用」を担う技術毎にL C A研究を行った事例は少ないながら存在する。しかし森林作業の内容や木材製品の製造法などが多種類あるため、信頼性の高い評価に至っていない。そのため各技術のL C A研究事例をもっと増やす必要がある。「刈って、使って、植える」という「森

^{bb)} 例えば、日本LCA学会が策定した「温室効果ガス排出削減貢献量算定ガイドライン」では、評価対象製品等が存在しなかった場合に普及したであろう製品等を「比較対象製品等」と定義し、評価対象製品等が最終製品等である場合は比較対象製品等、評価対象製品等が最終製品等の一部の機能を担う部品等である場合は比較対象製品等を組み込んだ最終製品等をそれぞれベースラインと定義している。

^{cc)} L C Aには、アプローチの違いによって帰属的（attributional）L C A（a L C A）と帰結的L C A（c L C A）の2つのタイプがあり、前者はCDR技術の導入によって引き起こされうる環境への影響の評価に焦点を当てるもの、後者はCDR技術の導入によって環境への影響がどう変化するかに焦点を当て、市場への影響や土地利用の変化等の間接的な影響も考慮するものとされる。

林の循環利用」全体をシステム境界に含めた L C A 研究には、その前提として、システム境界内プロセスのスタート地点をどこに定めるか（苗木生産、植林、間伐、伐採、製材、乾燥、各種製品製造等）という論点があり、まずはそれらの論点整理を優先すべきである。

③ 海洋肥沃化の L C A 研究については、鉄等を散布する船舶の航行に係る燃料消費等を考慮すべきである。

【参考文献等】

1) Tom Terlouw, Christian Bauer, Lorenzo Rosa, Marco Mazzotti. 2021. Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review. Energy Environ. Sci., 14, 1701-1721.

2) L C A 日本フォーラム「ライフサイクルアセスメント（L C A）による Carbon Removal and Recycling（C R 2）Technologies の温室効果ガス排出量算定ガイドライン」（第 2.5 版、2024 年）

3) Isabela Butnar et al. 2024. A Review of Life Cycle Assessment Methods to Inform the Scale-up of Carbon Dioxide Removal Interventions. WIREs Energy and Environment, Volume 13, Issue 6.

4) 服部順昭他、特集「木質材料・製品の L C A」、日本 L C A 学会誌、16, 2, 65-105(2020)

VII まとめ

今回、農林水産分野の N E T s に関して、国内外の研究開発等の動向を調査・分析し、各研究領域が抱える課題を明確化するとともに、その達成に向けた研究開発の方向性について提案した。各研究領域の研究開発の方向性を一覧表にすると、表 VII－1 のとおりである。

表 VII－1 研究開発の方向性一覧

	研究開発の方向性
土 壌 炭 素 貯 留	①飼料用トウモロコシの二期作や再生イネを利用したコメの二期作、温暖化に伴う新たな輪作体系や田畑輪換など新たな栽培方法に伴う土壌炭素貯留への影響等の定量化及び生産性向上と土壌炭素貯留を両立させる技術の確立、不耕起・省耕起やカバークロープなどの全国規模の実証試験による作物の収量・品質や土壌炭素貯留効果等の解明及び他の GHG や環境影響・経済性の評価と技術導入マニュアルの提示、遺伝的改変（光合成速度の増加、開花時期の調節、深根性、木質増強など）によりバイオマスが増大した作物や土壌中での分解が遅い成分を多く含む作物の開発及び生育・収量・土壌炭素貯留効果の実証並びに他の GHG、水利用、土壌環境への影響を含む可能性評価 ②耕作放棄後の農地の環境変化や植生の遷移に伴う生態系の炭素動態及び炭素の各プールへの分配の解明による、耕作放棄地を活用した土壌炭素貯留の可能性の評価、耕作放棄後に耕作を再開した農地の土壌の炭素・窒素動態及び耕作放棄期間の最小限の管理（草刈り・耕うん等）が土壌炭素貯留に及ぼす影響の解

	明並びに<u>耕作放棄期間に炭素量を保持・増加させ耕作を再開しやすくする管理法の開発、耕作放棄地の飼料作物栽培や粗放的利用に供した場合の土壌炭素貯留の定量化と貯留量向上のための管理技術の開発、耕作放棄地をバイオ炭原料の供給源として利用するための技術開発、荒廃農地を林地に転用した場合の生態系の炭素動態の解明及び林地転用に伴う土壌炭素貯留に加えて早生樹を利用した森林の循環利用を通じたカーボンニュートラルに寄与する技術の開発</u> ③ <u>土壌炭素貯留メカニズムのさらなる解明、気候変動に伴う地温上昇や土壌水分量の変化が土壌呼吸に及ぼす影響の解明及び農地の土壌炭素モデルの改良並びに日本土壌インベントリーの高度化、ほ場での簡易測定・長期モニタリング・カーボנקレジット用の検証などそれぞれの目的に応じた精度が得られ使いやすい土壌炭素量の測定法の開発（リモートセンシングを含む）、CH_4・N_2O とのトレードオフ、生物多様性などその他の環境影響・環境保全効果・経済性を含む土壌炭素貯留技術の NETs としての有効性評価手法の標準化</u>
バイオ炭	① <u>原料の種類に応じた最適な製造条件・製造方法の研究、製造過程で発生する CH_4 など他の GHG と炭化炉・炭化方法の調査、炭化炉の改良研究（GHG の吸収と燃焼機能を備えた炭化炉、炭化炉の耐性強化）、高機能バイオ炭の研究開発（微生物群定着・堆肥混合などによる作物の生育促進や耐病性の向上）、熱帯地域にバイオ炭施用を広めるための研究（原料、高温多湿・土壌・微生物等熱帯環境の影響）</u> ② <u>原料や熱分解条件により相違が生じるバイオ炭の特性と効用効果の定量化、同特性と効用との関係性のより体系的解明及びそれらの整理、バイオ炭施用と作物の品質向上の検証研究、バイオ炭の大規模施用・長期連用・長期実証試験による効果検証や環境影響の解明、複数の GHG 削減技術の組み合わせに関する技術の確立</u> ③ <u>バイオ炭が及ぼす種々の影響に関する情報の収集・分析・整理（農業吸収、土壌の微生物叢など生態系への影響、土壌汚染リスク、バイオ炭を生産する際の GHG 排出リスク）、LCA（長期施用時の炭素固定効果、施用後の流出による影響、バイオマス資源の利用可能性など）</u> ④ <u>バイオ炭の製造・流通・施用が経済的に成立する条件やビジネスモデル、欧米のバイオ炭施用インセンティブ策、費用対効果の高いバイオ炭の製造方法・製造システムの研究</u> ⑤ <u>持続可能で大量確保が可能な原料（バイオマス）の探索及び確保方法の研究、バイオマス発電などバイオ炭製造と組み合わせが可能なシステムの研究、日本に適した地域に根差した資源循環型エコシステムの研究と構築</u>

森林の
循環利用

- ① LiDAR・ドローンなどによる森林計測技術（ハードウェア、ソフトウェア）、AIなどを活用した森林資源量の把握技術
- ② 造材・運搬作業の自動化・半自動化に向けたセンサーと制御ソフト搭載林業機械の開発、小型の造林機械の開発、ベースマシン、アタッチメントの開発
- ③ 早生樹の開発と材質・利用適性の探索、成長や形質のよい無花粉樹の開発、エリートツリーの2倍の成長速度を持つハイパーエリートツリーの開発、ゲノム編集をはじめとする先端技術の開発
- ④ 木質建築物を長期間利用可能にするための耐久性に優れた部材の開発や維持管理技術など長寿命化に係る技術の開発並びに長期間利用木造部材の再利用化のための性能評価技術や再利用技術の開発、従来と異なる性能（長さや幅の両方からの荷重に強い）を有する等方性大断面部材の開発やそれらを歩留まりが高く効率的に製造する技術の開発。
- ⑤ 木材等の自然素材が人の睡眠や作業性に与える効果等セラピー効果に関する研究、オフィス・教育施設・医療施設などを木質化した時のセラピー効果に関する研究
- ⑥ CNF及び改質リグニンの新規用途（樹脂複合材料、有機無機ハイブリッド材料等、大量製造システム）開発並びに事業化、化石資源代替工業材料等（セルロース由来の高性能繊維、液晶材料、バイオプラスチック等、微生物代謝機能を利用した機能性バイオプラスチック基幹物質の製造技術）の開発、森林資源フル活用のためのサーキュラーエコノミーを志向した木材成分総合利用システムの開発
- ⑦ 固形燃料（トレファクション技術を活用したブラックペレット、バイオコークスの品質改善、新規用途並びに大量生産システムの開発等）、液体燃料（SAF[原料供給、製造技術・プロセスの最適化、コスト低減、経済性評価等]、バイオオイル[収率向上を目指した製造法（マイクロ波超高速熱分解技術等）、原料調達一製造までを含めたシステム開発、オイルの高品位化（脱酸素反応触媒の利用）、新規用途（土中埋設による炭素固定、工業材料の開発等）]、気体燃料（バイオガス[効率的な製造法開発（タール発生低減技術）、回収ガス高度利用（水素をリッチな状態にする研究）]）、国産材に適した熱電併給システム（CHP）の開発

海藻・
海草

- ① 藻場・養殖場に由来する有機炭素成分等の分析手法の開発、藻場・養殖場に由来する有機炭素成分等のフロー・貯留実態と貯留期間の把握
- ② ドローンや音響調査機器を用いたフィールド調査手法の高度化、光学・音響技術や衛星データを用いた藻場生態系センシング技術の高度化
- ③ 海上施設等を利用した海藻養殖及び総合的利用・加工システム開発に向けた海域特性把握と技術開発、周辺海域の生態系モニタリングと藻場の維持・造成による魚介類稚仔のサーナリー化、NETsを基盤とした新たな「海業」の場の創生に必要な総合的科学研究
- ④ 海洋環境変動耐性を持つ海藻・海草類の探索と高水温体制藻場造成技術の開発、海藻・海草類の高温耐性メカニズムの解明と他種への応用手法の検討

その他の
海洋 CDRs

【海洋肥沃化】

- ① 増殖ターゲット（植物プランクトンや海藻・海草等）の栄養塩要求性を踏まえた目標濃度の把握、対象区域内外の栄養塩等環境把握のための調査手法の高度化、対象区域での目標濃度達成のための海洋肥沃化技術の開発・改良
- ② 対象区域内外のターゲット種の生物量の動態やその他の環境変動の関連を分析する技術開発、対象区域内外のターゲット種の生物量の動態やその他の環境変動から CDR 効果を算定する技術開発
- ③ CO₂ 以外の GHG の挙動を把握するための技術開発、対象区域内外の植物プランクトン等生物多様性、海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発

【海洋アルカリ化】

- ① 対象海域に生息する生物への pH 変動の影響を踏まえた目標濃度の把握、対象区域内外の pH、pCO₂ 等環境把握のための調査手法の高度化、対象区域での目標 pH 達成のための海洋アルカリ化技術・素材の開発・改良
- ② 対象区域内外の pH や CO₂ やその他の環境変動の関連を分析する技術開発、対象区域内外の pH や CO₂ やその他の環境変動から CDR 効果を算定する技術開発
- ③ CO₂ 以外の GHG の挙動を把握するための技術開発、対象区域内外の pH 変動・海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発

【海洋肥沃化・海洋アルカリ化共通】

- ④ 地域社会の合意形成プロセスを確立し活動を定着させる社会システムを検討するための社会科学研究、活動を経済的に成立させるための社会経済学的な研究、新素材の科学的合理性と法的規制の妥当性検討

「Ⅱ テーマの背景と目的」でも述べたとおり、2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けては、大気中の GHG を除去する NETs が不可欠であり、特に農林水産分野の NETs については、農林水産業の営みにおいて活用することで、GHG を吸収・固定し、農地・森林・海洋内に貯留できる大きなポテンシャルを持っている。

NETs ないし CDR を巡っては、近年、グローバルな規模で様々な動きがみられる。GHG 排出量の測定・管理に係るフレームワークを検討・策定するイニシアチブ「GHG プロトコル」において、新たなガイダンス「土地セクター・炭素除去ガイダンス（Land Sector and Removals Guidance）」が検討されている。Scope 3 基準の補足資料として、土地利用及び技術的な CO₂ 除去における排出量・除去量の計算に必要な手順、手法、データを著すものであり、現在ドラフトが公開されているところ¹⁾、この最終版の発出を契機に、企業による CDR の取組が加速することが考えられる。

また、IPCC は、2024 年 1 月に、CDR 技術及び CCUS に関する方法論報

報告書の作成について検討することを決定した。これを受け、2024年7月の専門家会合及び同年10月のスコーピング会合において、当該報告書の範囲を特定する基準やCDR技術ごとの検討のアプローチ（IPCC分類の更新、新たなガイダンスの作成、既存のガイダンスのレビュー）、当該報告書の章立てや2006年IPCCガイドラインの補足文書とすること等が検討された上で、2025年2月のIPCC総会において、当該方法論報告書を作成することが決定された。この報告書は、2027年末までに作成される予定である^{2) 3)}。

2024年6月には、オックスフォード大学の研究所から、CDRの現状に関する報告書の第2版が発出された⁴⁾。この報告書は、気候変動の緩和戦略として最も重要なのは排出削減であるとしつつ、大気からのCO₂除去も必要であり2050年までに70～90億t-CO₂/年のCDRが求められるとした上で、CDRの研究開発に関しては助成金の件数や額など活動の規模は着実に拡大している一方、その活動は依然として特定の国・地域やCDR技術に集中している（アフリカ、中南米、中東におけるR&D活動や、海洋系CDRに係るR&D活動がほとんど見られない）との問題を提起している。

このようなグローバルな潮流に乗り、2050年カーボンニュートラルの実現に農林水産分野で貢献すべく、本報告書において提案した研究開発が進展し、農林水産分野のNETsがさらに社会実装・普及していくことを強く期待したい。

加えて、今後研究開発を進めるにあたって配慮すべき事項として、次の5点を示す。

① GHG吸収・除去と生産性向上等のwin-winの関係を築くこと

本報告書において研究開発を提案している技術の多くは、将来、農林漁業者及びその関連業者によって、生産活動を通じて取り組むことが想定される。農林水産等現場に技術が浸透するかどうかは、生産性向上や廃棄物処理等、農林漁業者やその関連業者が生産活動の中でメリットを感じられるかどうかによって大きく影響を受けると考えられることから、研究開発を進めるにあたっては、GHGの吸収・除去に係る効果だけでなく、生産性向上等の効果も追求し、両者がwin-winの関係になるような技術として確立するとともに、農林漁業者等がその技術を正しく使えるように展開していくことが重要である。

この点について、例えば、バイオ炭に関しては、微生物群の定着や堆肥との混合による作物の生育促進効果を併せ持つ高機能バイオ炭の開発や、バイオ炭による農薬吸収の影響分析等の提案をしているほか、森林の循環利用に関する技術の多くは、林業自体の生産性向上にも資すると考えられる。また、本報告書では取り上げなかったNETsである「風化促進」に関し、ムーンショット型研究開発事業目標4のプロジェクト「岩石と場の特性を活用した風化促進技

術“A－E R W”の開発」などの研究開発が進められているが、玄武岩等の岩石を耕作地に散布することにより、農作物の収量アップ、養分供給、土壌の物理性改善及び有機炭素の貯留量増加等の効果が得られる可能性がある。

② 自然（生物多様性）、気候（脱炭素化）、公平性（人権）のバランスをとること

人類は、気候変動のほか、様々な社会問題に直面しており、N E T sを含む脱炭素化の取組によって、これらの社会問題に影響を及ぼす可能性がある。

2022年12月に開催された生物多様性条約第15回締約国会議（C O P 15）において、自然を回復軌道に乗せるため生物多様性の損失を止め反転させる「ネイチャーポジティブ」（自然再興）の考え方が取り入れられた。我が国でも、2023年3月に閣議決定された「生物多様性国家戦略2023-2030」において、2030年までにネイチャーポジティブを達成する目標が掲げられるとともに、その実現に向けた目標の1つとして、2030年までに陸と海の30%以上を健全な生態系として効果的に保全する「30by30」（サーティ・バイ・サーティ）が位置づけられている⁵⁾。

土壌炭素の管理や森林保全、持続可能な森林活動などは、G H Gの吸収・固定だけでなく、生物多様性の回復や保全の効果も期待される^{6) 7)}。一方、例えば広い土地に単一のバイオエネルギー作物を栽培したり、これまで森林ではなかったところに植林（特に外来種の単一栽培）をすると、気候変動の緩和になったとしても、生物多様性には悪影響を及ぼす^{8) 9)}。海洋におけるN E T sの取組については、そもそも生態系への影響がまだ明確になっていない（故に、沖合での藻類養殖における生態系モニタリングや、海洋施肥、海洋アルカリ化が生態系に及ぼす影響の評価について、提案している）。

また、気候変動は、気温の上昇に伴い、自然災害の増加・深刻化、農作物の減収、水不足、熱中症の増加など、様々な形で我々の生活に影響を及ぼしていることから、人権問題とも大きく関係している。気候変動自体にとどまらず、その対策を推進する場合も、脱炭素社会の実現に伴う既存産業の衰退（＝雇用喪失）や地域住民の税負担増などの影響が起こりうる¹⁰⁾。

こうしたことを踏まえ、研究開発を含め、農林水産分野のN E T sの推進にあたっては、G H G収支のみを指標にしてその削減効果だけを追い求めるのではなく、生物多様性や人権にも影響がないか配慮し、G H G、生物多様性、および人権の3者のバランスをとりながら進めていくことが重要である。

③ サーキュラーエコノミー（循環経済）を実現すること

石油資源をベースとした化学産業（マテリアルやエネルギー等）では大量生産・大量消費・大量廃棄を基本とするリニアエコノミー（直線型経済）が基本

であった。地球温暖化対策が叫ばれた後、脱石油の動きと共に、現状の経済の仕組みを根本から見直す動き“サーキュラーエコノミー“が提唱されている。サーキュラーエコノミーは、あらゆる段階で資源の効率的・循環的な利用を図りつつ、付加価値を最大化することを目指す社会経済システムである¹¹⁾。ヨーロッパを中心にルールづくりが進んでおり、それに対応する形で各国が転換を進めようとする動きがある。日本では2020年に経済産業省が「循環経済ビジョン2020」を取りまとめている¹²⁾。資源に乏しい日本において、海外からの資源供給減のリスクに備えるためにも、国内で資源を循環させていく必要性から「成長志向型の資源自立経済」が提唱されている。

リニアエコノミーからサーキュラーエコノミーへの転換は、世界的な人口増加に伴う資源需要の増加や、廃棄物排出量の増大及びアジア諸国の廃棄物輸入規制等の問題のみならず、気候変動等の環境問題の深刻化と、それに伴う市民・社会の環境配慮要請にも対応するものである。農林水産分野のNETsにおいても、例えば、森林の循環利用は、「伐って、使って、植える」という一連のサイクルの中で、CO₂等を吸収・固定する技術であり、バイオ炭についても、営農活動を通じて発生する剪定枝、家畜糞尿、草木、籾殻等のバイオマスを炭化し、農地に施用することで炭素を循環させる資源循環型エコシステムが期待される。

今後、農林水産業やその関連産業を展開する上で、従来のリニアエコノミーを志向したものではなく、サーキュラーエコノミーの概念を取り入れた経済活動が重要となり、農林水産分野のNETsに係る研究開発や社会実装・普及についても、サーキュラーエコノミーの実現を目指すものとして取り組んでいくことが求められる。

④ CO₂以外のGHGについて、排出への影響評価や吸収・除去技術の開発に取り組むこと

CH₄とN₂Oは、CO₂と比べてそれぞれ28倍、265倍の温室効果を持ち、我が国のCH₄排出量のうち約8割が農業由来である¹³⁾等、農業生産活動において大量に排出されているほか、海洋や湖沼の底層における地球温暖化が原因とされる溶存酸素量の減少（貧酸素化）が大きな問題となっており、貧酸素化の進行によってCH₄の発生量が多くなることが指摘される^{14) 15)}など、農林水産分野に関係の深いGHGである。

このことから、2050年のカーボンニュートラルの実現に農林水産分野で貢献していくためには、CO₂だけでなく他のGHG、とりわけCH₄とN₂Oの削減にも取り組んでいくことが重要である。農業の現場では、水田における中干期間の延長や稲わらの秋すき込み（秋耕）、土壌診断を通じた適正施肥等に取り組んでいるが、研究開発サイドにおいても、NETsの適用がCH₄・N

N_2O の排出に及ぼす影響の評価や、大気中の $\text{CH}_4 \cdot \text{N}_2\text{O}$ を吸収・除去する技術の開発に取り組んでいく必要がある。

CH_4 に関しては、かねてより、日本全国やアジアの森林土壌においてメタンフラックスの測定が行われている¹⁶⁾ほか、最近では、樹木の木質表面、特に林床から2 m以上の場所で CH_4 が吸収されていることを発見し、樹木がメタンの吸収源となることを示唆する論文が発出された¹⁷⁾。また、大気中の N_2O の吸収・除去については、NEDO-TSCの報告書¹⁸⁾において、非常に希薄であることから現時点では技術的に困難であるとしつつ、間欠的に発生した N_2O の濃度で機能を発揮する触媒又は吸着剤を開発し、これを土壌中で大気に拡散する前の比較的高濃度な段階で適用することが提案されている。

⑤ 海外への技術展開も視野に入れること

我が国のGHG排出量のうち農林水産分野は約4%に過ぎない一方、海外では我が国への輸出向け農産物の生産のために大量のGHGが排出されていることを考えれば、我が国は、カーボンニュートラルの実現に向けて、国内の取組だけでなく国際的な貢献も果たしていくことが求められる。また、前述のとおり、NETsないしCDRを巡っては、前述のとおり、グローバルな規模で動きが活発化している。これらのことを強く認識し、海外へ展開することも視野に入れながら技術開発を進めるべきである。海外において我が国発の技術が着実に根付くためには、現地の環境を適確に把握し、それに適合した、悪影響が出ないアプローチをとることが重要である。

最後に、今回の研究開発構想については、農林水産分野のNETsという非常に広範な研究分野を取り扱った一方で、人員と期間が限られていたこともあり、国内外の研究動向等について、網羅的に調査・分析できたとはいいがたい。また、そのような調査・分析の結果から導かれた課題と今後の研究開発の方向性についても網羅的とは言えず、本報告書に挙げられていない課題や、その解決に向けたアプローチ、技術、発想がありうる。これらの点について、さらに調査・分析や検討が行われることを期待する。

本報告書が、農林水産分野のNETsに係る研究開発の進展、現場への社会実装・普及、ひいては2050年カーボンニュートラルの実現の一助となれば幸いである。

【参考文献等】

- 1) 環境省ホームページ「土地セクター・炭素除去ガイダンス パート1：算定・報告の要件およびガイダンスパイロットテストおよびレビュー用ドラフト（2022年9月）」（仮訳）
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/files/tools/1-10r_Land-Sector-and_Removals-Guidance-Pilot-Testing-and-Review-Draft-Part-1_JP.pdf

- 2) Task Force on National Greenhouse Gas Inventories 「Report of the IPCC Expert Meeting 1-3 July 2024, Vienna, Austria」 https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/2407_CDR_CCUS.html
- 3) Task Force on National Greenhouse Gas Inventories 「Report of the IPCC Scoping Meeting 14-16 October 2024, Copenhagen, Denmark」 https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/2410_CDR_CCUS_Scoping.html
- 4) the University of Oxford's Smith School of Enterprise and the Environment 「The State of Carbon Dioxide Removal」 2nd EDITION <https://www.stateofcdr.org/>
- 5) 環境省ホームページ「ecojin's EYE ネイチャーポジティブ」
<https://www.env.go.jp/guide/info/ecojin/eye/20240214.html>
- 6) IPCC第6次評価報告書第3作業部会報告書「気候変動2022：気候変動の緩和」政策決定者向け要約（SPM）
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/global2/about_ipcc/202310ipccwg3spmth1rdversion.pdf
- 7) 亀山康子「気候変動をめぐるシナジーとトレードオフ」学術の動向 2023.1
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/28/1/28_1_34/_pdf/-char/ja
- 8) 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所「炭素中立と自然再興を結ぶ鍵」季刊森林総研 No. 66 2024
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kikan/kikan-66.html>
- 9) 「生物多様性×気候変動ー同時解決に向けた科学のいま」国立環境研究所地球環境研究センターニュース 2021年12月号、Vol. 32 No. 9 <https://cger.nies.go.jp/cgernews/202112/373001.html>
- 10) 環境省ホームページ「【有識者に聞く】気候変動と人権問題の関連性とは？「公正な移行」の重要性」
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/topics/feature-09.html
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/topics/feature-09-2.html
- 11) 産総研マガジン、サーキュラーエコノミーとは、 https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20231011.html
- 12) 経済産業省「循環経済ビジョン2020」
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/junkai_keizai/20200522_report.html
- 13) 農林水産省「農業分野における気候変動・地球温暖化対策について」（令和6年1月）
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/pdf/ondanka_taisaku.pdf
- 14) 気象庁ホームページ「海洋内部の知識 貧酸素化」
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/mar_env/knowledge/deoxy/deoxygenation.html
- 15) 国立研究開発法人国立環境研究所気候変動適応情報プラットフォーム「ココが知りたい地球温暖化 気候変動適応編 Q14」 https://adaptation-platform.nies.go.jp/climate_change_adapt/qa/14.html
- 16) 「二酸化炭素に次ぐ温室効果をもつ大気中メタンをアジアの森林はどの程度吸収しうるのか？」国立環境研究所地球環境研究センターニュース 2020年11月号、Vol. 31 No. 8
<https://cger.nies.go.jp/cgernews/202011/359002.html>
- 17) Vincent Gauci, Sunitha Rao Pangala, Alexander Shenkin, Josep Barba, David Bastviken, Viviane Figueiredo, Carla Gomez, Alex Enrich-Prast, Emma Sayer, Tainá Stauffer, Bertie Welch, Dafydd Elias, Niall McNamara, Myles Allen & Yadvinder Malhi. 2024. Global atmospheric methane uptake by upland tree woody surfaces. Nature, 631, 796-800.
- 18) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センターレポート「温室効果ガスN₂Oの抑制分野の技術戦略策定に向けて」（2021年6月） <https://www.nedo.go.jp/content/100934250.pdf>

VIII 謝辞

本報告書の作成に当たり、貴重なご意見・ご助言をいただいた波多野委員長をはじめとするアドバイザリー委員の皆様、海外の研究開発等動向調査業務及びアドバイザリー委員会運営支援業務を実施していただいたデロイトトーマツコンサルティング合同会社様、我々の聞き取り調査にご対応いただいた関係者の方々ほか、本報告書作成にご協力をいただいたすべての皆様に、心より感謝を申し上げます。

(参考) 用語解説

用語	解説
カーボンニュートラル	CO ₂ をはじめとするGHGの「排出量」から、植林、森林管理などによる「吸収量」を差し引いて、合計をゼロにすること。
ライフサイクルアセスメント (LCA)	原材料の取得から製造、使用及び使用後の処理、リサイクルおよび最終処分（すなわち、ゆりかごから墓場まで）に至るまでの製品のライフサイクルの全体を通じた環境側面及び潜在的な環境影響の評価。
温室効果ガス (Greenhouse Gas : GHG)	大気中の熱を吸収する性質のあるガス。大気中のGHGが増えると地表を温める働きが強くなり、地表付近の温度が上昇する。増えすぎたGHGは地球温暖化の一因となる。二酸化炭素(CO ₂)、メタン(CH ₄)、一酸化二窒素(N ₂ O)のほか、ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)、パーフルオロカーボン類(PFCs)、六フッ化硫黄(SF ₆)、三フッ化窒素(NF ₃)といった種類がある。
GX (グリーントランスフォーメーション)	化石燃料をできるだけ使わず、クリーンなエネルギーを活用していくための変革やその実現に向けた活動。
気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC)	1988年に世界気象機関(WMO)と国際環境計画(UNEP)によって設立された政府間組織。2022年3月時点で195の国・地域が参加。気候変動に関する最新の科学的知見について評価を行い、定期的に報告書を作成している。総会、ビューロー(議長団)、執行委員会の下に、3つのワーキンググループ及び1つのインベントリタスクフォース(TFI)が置かれている。
ブルーカーボン	沿岸・海洋生態系が光合成によりCO ₂ を取り込み、その後海底や深海に蓄積される炭素のこと。2009年に公表された国連環境計画(UNEP)の報告書「Blue Carbon」において紹介され、吸収源対策の新しい選択肢として世界的に注目が集まっている。ブルーカーボンの主要な吸収源としては、藻場(海草・海藻)や塩性湿地・干潟、マングローブ林があげられ、これらは「ブルーカーボン生態系」と呼ばれる。
バイオ炭	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
バイオマス	生物資源(bio)の量(mass)を表す概念で、再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの。 太陽エネルギーを使って水と二酸化炭素から生物が光合成によって生成した有機物であり、私たちのライフサイクルの中で生命と太陽エネルギーがある限り持続的に再生可能な資源。
草生栽培	果樹園などで、地力を維持するため、牧草や雑草などを生えさせて地表面を被覆保護して行う栽培法。
早生樹	成長の早い経済樹種。アカシア、ユーカリ等の熱帯性の造林樹種が代表的であるが、日本国内でも、近年、コウヨウザン、センダン等が着目されている。

エリートツリー	地域の人工造林地において、最も成長が優れた木として選抜された「精英樹」のうち、優良なもの同士を人工交配によりかけ合わせ、その中からさらに優れた個体を選んだもの
C D R (Carbon Dioxide Removal)	二酸化炭素除去、すなわち大気中のC O ₂ を除去すること。
海洋肥沃化	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促してC O ₂ 吸収・固定化を人工的に加速する技術。
海洋アルカリ化	海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法。
カーボン・クレジット	排出量見通し（ベースライン）に対し、実際の排出量が下回った場合、その差分を、MRV（モニタリング・レポート・検証）を経てクレジットとして認証するもの。
等方性大断面部材	長さや幅の両方向からの荷重に強い特性を持つ木質材料で、工期の短縮化や設計・意匠の自由度拡大など多くのメリットをもたらすと見込まれている。「グリーンイノベーション基金」では、国産材を原料として支点間距離 8m、耐火 2 時間の等方性大断面部材を開発し、10 万円/m ³ 以内で製造する技術を確認するとともに、開発した部材の日本農林規格（案）と、開発した部材を用いた一般的設計法の案を提示することを目指している。
D A C (Direct Air Capture)	直接空気回収技術。大気から直接、C O ₂ を分離・回収する技術のこと。
C C U S (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)	C O ₂ の回収・貯留・有効利用。火力発電所の排ガスなどに含まれるC O ₂ を分離・回収し、深い地層に貯留し、必要に応じて有効活用する技術を指す。
C C S (Carbon dioxide Capture and Storage)	C O ₂ 回収・貯留。発電所や化学工場などから排出されたC O ₂ を、ほかの気体から分離して集め、地中深くに貯留・圧入する技術。
IC-VCM (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market)	自主的炭素市場のための十全性評議会。元イングランド銀行総裁・金融安定理事会（FSB）議長であるマーク・カーニー氏を中心として設立された TSVCM（自主的炭素市場拡大に関するタスクフォース）が 2021 年に創設したボランタリークレジットの品質評価基準等を策定するためのガバナンス機関。高品質なクレジット要件「コアカーボン原則（C C P s : Core Carbon Principles）」及び制度レベルの評価枠組みを公表している。
追加性	I C - V C Mが策定した「コアカーボン原則」の 1 つ。緩和活動による G H G 排出削減又は吸収は追加的でなければならない。 つまりそれらは炭素クレジット収入による創出されるインセンティブがなければ発生しない。 J - クレジット制度では、追加性を「本制度がない場合に、排出削減・吸収活動が実施されないこと」と定義した上で、原則として、設備の投資回収年数が

	3 年以上かどうかで追加性の有無を判断するほか、方法論によっては別途追加性の判断基準が示されている。
4 パーミル・イニシアチブ	世界の土壌の表層の炭素量を年間 0.4%（4 パーミル）増加させることで、人間の経済活動によって発生する大気中の二酸化炭素を実質ゼロにすることができるという考え方。
環境保全型農業直接支払	農業者の組織する団体等が実施する化学肥料・化学合成農薬を原則 5 割以上低減する取組と合わせて行う、地球温暖化防止や生物多様性保全等に効果の高い農業生産活動等の取組を支援する制度。2015 年度から実施されている。
クルベジ	クールベジタブルの略。意味合いは、CO ₂ を減らすことで地球を冷やす野菜（炭を入れた畑で作った野菜のこと）。
F A O	Food and Agriculture Organization of the United Nations の略。国連食糧農業機関は、飢餓の撲滅を世界の食糧生産と分配の改善と生活向上を通して達成するのを目的とする、国際連合の専門機関の一つ。国連食糧農業機関ともいう。
乳牛の敷料	敷料は、牛の寝床に敷くもののことで、稲ワラやオガクズ、モミガラなどの総称。
エコシステム	本来は生態系を指す英語「ecosystem」を比喩的に用い、主に情報通信産業において、動植物の食物連鎖や物質循環といった生物群の循環系という元の意味から転化して、経済的な依存関係や協調関係、または強者を頂点とする新たな成長分野でのピラミッド型の産業構造といった、新規な産業体系を構成しつつある発展途上の分野での企業間の連携関係全体を表すのに用いられる用語である。
ウェルビーイング	well-being、個人の権利や自己実現が保障され、身体的、精神的、社会的に良好な状態にあることを意味する概念。
エンジニアリングプラスチック	（Engineering plastic）とは、特に強度に優れ、耐熱性のような特定の機能を強化してあるプラスチックの一群を指す分類上の名称である。一般には、100℃以上の環境に長時間曝されても、49MPa 以上の引っ張り強度と 2.5GPa 以上の曲げ弾性率を持ったものが該当する。「エンブラ」と略称されることが多い。
超緩和溶解	（超穏和溶解とも言う）木材や農産廃棄物を室温から風呂温度程度の超穏和な条件で、有機酸などに可溶化し、紙とプラスチックの性質を合わせもつウッドペーパーや、その他のバイオマス成形体を創成するとともに、バイオマスが溶解した液体からセルロースやリグニンを常温で分離・利用する方法。
半炭化	別名「トレファクション」とも呼ばれ、木質バイオマスを 200～300℃で加熱することで有機物を分解して炭素成分が多い物質にするための燃料化技術。
パイオコークス	光合成に起因する全ての植物から形成できる固形燃料の総称。従来のバイオマス燃料では困難であった、圧縮強度が高く、高温環境下での長時間燃焼が可能であり、製造時に廃棄物を出さない特性等を有しており、石炭コークスの代替

	燃料として使用可能な「ゼロエミッション燃料」。
ナフサ	原油を常圧蒸留装置によって蒸留分離して得られる製品のうち沸点範囲がおおむね 30～180℃程度の炭化水素混合物。粗製ガソリン、直留ガソリンなどとも呼ばれる。主に炭素数 C8 から C10 の範囲の芳香族炭化水素などから構成。
バイオオイル	木材などのバイオマスを 425 ～ 600℃付近まで急速加熱後、得られた混合留分を急速冷却することで、気体（合成ガスなど）、液体（熱分解油）、固体（チャー）を得ることができる。特に液体留分である熱分解油（以下、バイオオイルと表記する）は、新しい液体燃料・新材料として期待されており、高収率でバイオオイルを製造可能な装置開発が進められている。
熱電併給システム	熱電併給システムはコージェネレーション（Cogeneration）／コージェネ（コージェネレーション／コジェネ）ともいい、発電と熱供給を同時に行うシステムのことである。“Combined Heat & Power”の頭文字をとって、CHP と呼ぶこともある。燃料は、天然ガス、石油、LP ガスなどで、エンジン、タービン、燃料電池などを使って発電し、同時に発生する廃熱を回収する。この廃熱は蒸気や温水という形態で供給され、冷暖房や給湯などに使われる。
Synthetic Aperture Radar (SAR：合成開口レーダー)	実開口長が小さい人工衛星などのアンテナでも、大きな開口を持ったアンテナと等価な画像が得られるように、人工的に「開口」を「合成」する技術。SAR の電波は雲を透過する性質があり、昼夜とも天候に左右されず観測できる。
Light Detection and Ranging (LiDAR)	レーザー光を照射して、その反射光の情報をもとに対象物までの距離や対象物の形などを計測する技術。計測精度が高いことから、航空測量や地形図作成などに使われてきた。
Multispectral Data	マルチスペクトルカメラからのデータ。被写体が放出する光のスペクトル情報（紫外線、可視光線、赤外線など）を観測できる。農作物の詳細データ把握、森林の状態のモニタリング、バイオマスの測定、海岸線のマッピングなどに利用される。
アルベド	天体における外部からの光エネルギー（太陽からの光）の入射に対する反射の比率。アルベドが大きくなると光エネルギーが地球の外に反射されることから地球の温度低下につながる。逆にアルベドが小さくなると温暖化へと進む。
システム境界	LCA の対象とする製品システムと、環境又は他の製品システムとの境界をいう。特に、LCI 分析においては、分析の対象範囲を指す。
機能単位	GHG 排出量を算定する技術及びシステムの機能を特定し、その機能のある単位で定量化したもの。
カーボンリムーバル&リサイクル (CR2)	ネガティブエミッション技術と、排出ガスから回収したCO ₂ を有効利用する技術 (Carbon Capture and Utilization: CCU) を合わせた技術群。
GHG プロトコル	企業、非政府組織 (NGO)、政府、その他世界資源研究所 (WRI) 及び持続可能な開発のための世界経済人会議 (WBCSD) が呼びかけた、関係先を含めたマルチステークホルダーのパートナーシップ。

Scope 3 基準	事業活動に関係するあらゆる排出を合計した排出量（サプライチェーン排出量）のうち、自社事業の活動に関連する他社の排出をさす。なお、Scope 1 は自社による直接排出、Scope 2 は自社が購入・使用した電力・熱・蒸気などのエネルギー起源の間接排出をそれぞれ指す。
フラックス	大気、海洋、森林等の炭素を貯蔵する各炭素プール間の炭素の移動量のこと。通常、単位面積（ha）当たり、単位時間（年）当たりの移動炭素重量（T）で表す（tC/ha/yr）。