

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

エグゼクティブサマリー

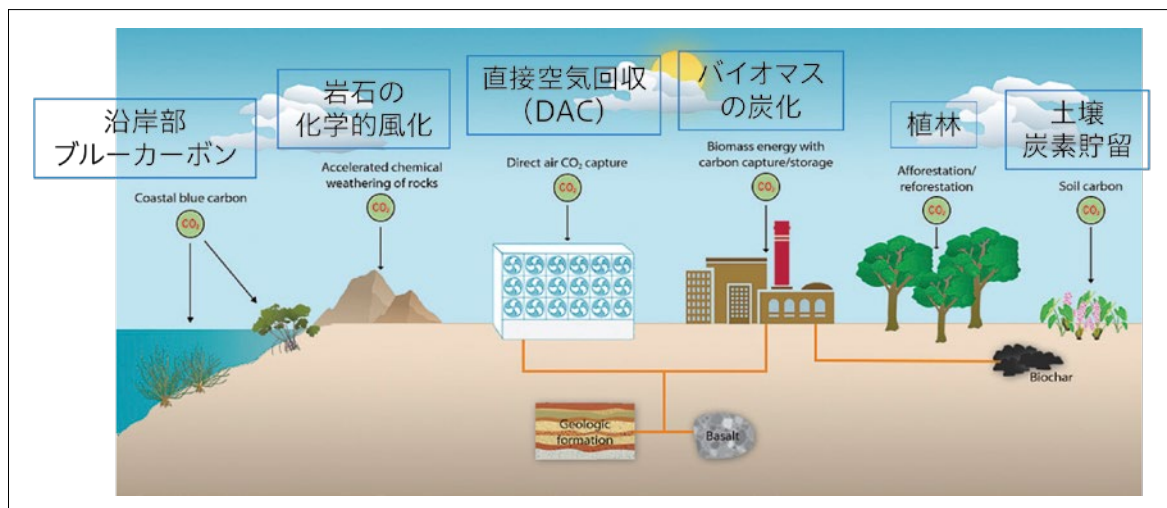
本報告書は、農地・森林・海洋におけるバイオマスを活用したネガティブエミッション技術について、国内外の動向と、今後の推進が期待される研究開発課題、さらにはネガティブエミッション技術の社会実装に向けて検討が必要な社会・経済的な課題を調査し、まとめたものである。

我が国では2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。カーボンニュートラルの実現のためには、二酸化炭素（CO₂）を中心とした温室効果ガス（GHG）について、排出量と吸収量を均衡させ、実質ゼロにする必要がある。このためには、化石資源からの依存度を最小限にするためのエネルギーシステムの大規模な変革を必要としている。

一方で、CO₂排出量削減が技術的に困難な製鉄・化学などの産業等も存在し、これを補填するためには、GHG排出量をマイナスにするためのネガティブエミッション（負の排出）技術が必要不可欠となる。また、カーボンニュートラル達成後も、温暖化進展を止めるために現在大気に蓄積されているCO₂の濃度削減が必要であり、そのためにも長期的にネガティブエミッション技術が必要となる。

このネガティブエミッション技術には、沿岸部ブルーカーボン、岩石の風化、直接空気回収（DAC）、バイオマスの炭化、植林、土壌炭素貯留などの人工的なもの、自然資本を利用するものなどがある。それぞれの技術には、課題があり、地域特性や予算なども考慮しながら組み合わせ活用していくことが重要である。

その中で農地、森林、海洋でのバイオマスを活用したネガティブエミッション技術は環境負荷とコストが他の技術と比較して低く、かつ、農林水産資源の有効利用の観点からも重要な技術とされている。



図E-1 ネガティブエミッション技術の例

（全米アカデミーズの資料¹からの図にCRDSが日本語追記）

1 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://www.nap.edu/read/25259/chapter/3#37>, FIGURE 1.6（2022年2月アクセス）

以上の背景を踏まえ、本調査では、バイオマスとCO₂吸収源としてのネガティブエミッション技術に関する研究開発動向と社会実装に向けた課題を整理することを目的とし、調査を行った。

調査方法は、各国の政府レポートなどの資料調査および有識者へのヒアリングとワークショップ、などである。本書では、農地、森林、海洋の順に整理している。

国内外の動向調査は、資料調査によりまとめた。海外の動向については、主に欧米での政策動向および進行中のプロジェクトや推進されている研究開発課題について整理した。国内動向は、革新的環境イノベーションで技術的な課題を整理した後、科研費の採択課題についてまとめた。

今後の推進が期待される研究開発課題については、2021年度に開催した2回のワークショップでの議論を元に、重要な課題をカテゴリーごとに大別した。

ネガティブエミッション技術の社会実装に向けて検討が必要な社会・経済的については、ヒアリング調査、ワークショップでの議論、資料調査から課題を整理してまとめた。

本調査結果の概要は以下の通りである。

- ・ 欧米では、ネガティブエミッション技術の重要性が強調されており、様々なプロジェクトが現在進行中である。特にCO₂の吸収源としての技術（緩和）だけではなく、気候変動への対応（適応）としての必要性が強調されていることが特徴として挙げられる。
- ・ 我が国で今後実施が期待される研究開発課題は、①温暖化進展段階でのCO₂吸収・放出の変化、②コベネフィットの観点からの研究、③炭素循環の総合評価、④植物の環境適応能力の向上、⑤植物の収穫性の向上、⑥バイオマス残渣の循環利用、評価、⑦生物機能利用と工学的オプションの組み合わせ技術などであり、緩和と適応の両側面を検討していく必要がある。
- ・ 社会実装に向けては、生態系への影響や、地場産業への影響などを含めた様々な社会的・経済的な課題がある。各々の地域でそれらを総合的に考慮していかなければならない。
- ・ 農地、森林、海洋それぞれの分野で、産官学の連携による具体的な取組も進められている。今後、より長期的に、より広範な活動を推進していくことが、カーボンニュートラルの実現のためには重要である。

今後はこれらの技術の社会実装に向けた具体的な取組への課題について整理していく予定である。

目次

1	はじめに	1
1.1	背景と目的	1
1.2	調査概要	3
2	農地におけるネガティブエミッション技術	5
2.1	海外の動向	5
2.2	国内の動向	8
2.3	社会・経済的な課題	13
2.4	具体的な取組事例	14
2.5	CRDS 主催のワークショップで議論された課題のまとめ	16
3	森林におけるネガティブエミッション技術	23
3.1	海外の動向	24
3.2	国内の動向	26
3.3	社会・経済的な課題	30
3.4	具体的な取組事例	31
3.5	CRDS 主催のワークショップで議論された課題のまとめ	32
4	海洋におけるネガティブエミッション技術	34
4.1	海外の動向	35
4.2	国内の動向	37
4.3	社会・経済的な課題	43
4.4	具体的な取組事例	44
4.5	CRDS 主催のワークショップで議論された課題のまとめ	47
5	まとめ	50
6	謝辞	56

Appendix1 俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた 生物機能を活用したネガティブエミッションに関する 研究開発課題（テーマ1）	57
A1.1 ゲノム編集技術の利用に関する現状と展望 江面 浩（筑波大学 生命環境系 教授／つくば機能植物イノベーション 研究センター センター長）	59
A1.2 植物の生産量を増加させる技術開発の一例 ～食糧増産と CO ₂ や肥料の削減に期待～ 木下 俊則（名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所・ 名古屋大学大学院理学研究科 教授）	73
A1.3 地球高 CO ₂ 化と植物の環境適応 射場 厚（九州大学理学研究院 生物科学部門 植物生理学研究室 教授）	81
A1.4 バイオマスと植物共生研究 白須 賢（理化学研究所 環境資源科学研究センター グループディレクター）	92
A1.5 微細藻類を用いたバイオジェット燃料生産について 星野 孝仁（ちとせ研究所 本部長）	100
A1.6 全体討論	109
Appendix2 俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた 生物機能を活用したネガティブエミッションに関する 研究開発課題（テーマ2）	117
A2.1 土壌改良とカーボンマイナス－土壌の健康と温暖化影響評価－ 当真 要（北海道大学大学院農学研究院 土壌学研究室 教授）	118
A2.2 ネットゼロエミッションの達成に必要な森林吸収源の評価： 研究計画紹介 松井 哲哉（国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 室長）	128
A2.3 マングローブ生態系の炭素固定機能と研究課題 藤本 潔（南山大学 総合政策学部 教授）	129
A2.4 ネガティブエミッション技術としてのブルーカーボン 桑江 朝比呂（国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究グループ長）	140
A2.5 カーボンニュートラルとネガティブエミッションの役割 黒沢 厚志（エネルギー総合工学研究所 主席研究員）	147
A2.6 全体討論	154

付録 1	俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた生物機能を 活用したネガティブエミッションに関する研究開発課題（テーマ1） 参加者リスト	163
付録 2	俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた生物機能を 活用したネガティブエミッションに関する研究開発課題（テーマ2） 参加者リスト	165
付録 3	ヒアリングにご協力いただいた有識者	167

1 はじめに

1.1 背景と目的

我が国では2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。カーボンニュートラルの実現のためには、二酸化炭素（CO₂）を中心とした温室効果ガス（GHG: Green House Gas）について、排出量と吸収量を均衡させ、実質ゼロにする必要がある。このためには、供給側ではエネルギー消費量における化石資源の依存度の削減、ライフサイクル全体でのCO₂排出量削減などが必要である。また需要側では、4R（Refuse, Reduce, Reuse, Recycle）の徹底等が挙げられ、それぞれ需要・供給双方の大規模な変革を必要としている。具体的には電力部門の脱炭素化、民生・産業・運輸での電化、水素化などの代替エネルギーの利用が挙げられている。また、化石燃料の消費を抑えるために炭素を循環的に利用するカーボンリサイクルや、CO₂排出量削減が技術的に困難な製鉄・化学などの産業等からの排出を補填するものとして、大気中CO₂を吸収・固定化するネガティブエミッション技術（負の排出）が重要とされている。（図1-1 参照）

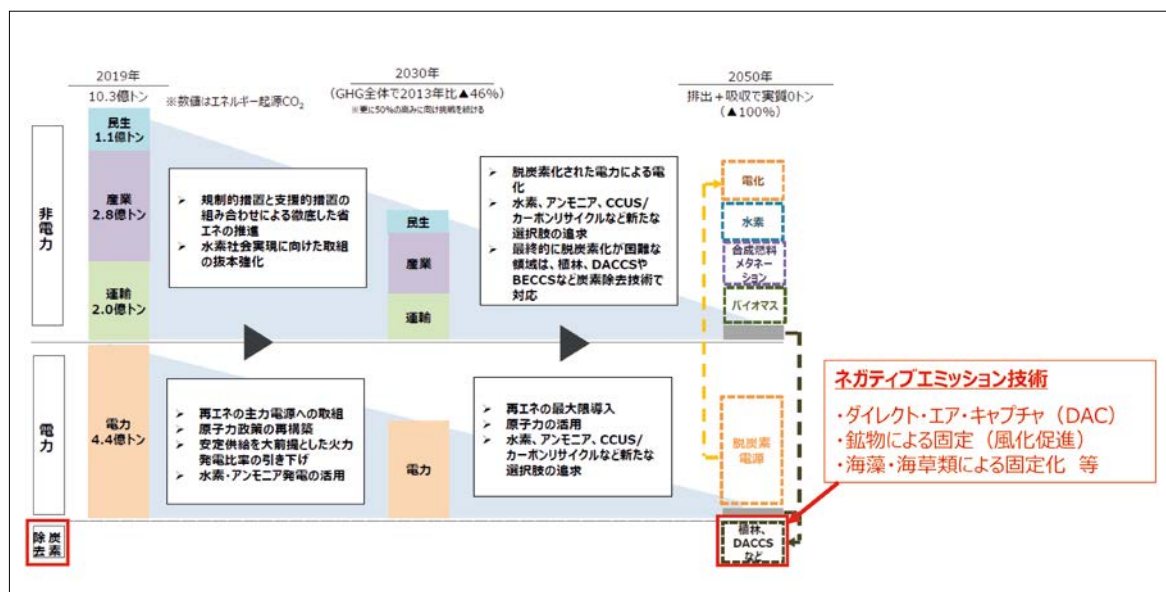


図1-1 カarbonニュートラルへの転換イメージ

経済産業省 資源エネルギー庁・産業技術環境局、クリーンエネルギー戦略の策定に向けた検討、p71、令和3年12月6日、
(https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/001_02_00.pdf)

「産業革命後の気温上昇を2℃以内に抑える」という目安（以下：2℃目標）においても、2060年ごろまでには人為的なCO₂排出量と、吸収・固定量をバランスさせていく必要があると考えられている。それ以降も、気温上昇を抑えるためには大気中CO₂濃度の削減が必要であり、陸域や海洋による吸収増加を含めて、約200億トンのCO₂の吸収・固定が必要となり、ネガティブエミッションを進めて行くことが重要な課題となっている（図1-2 参照）。

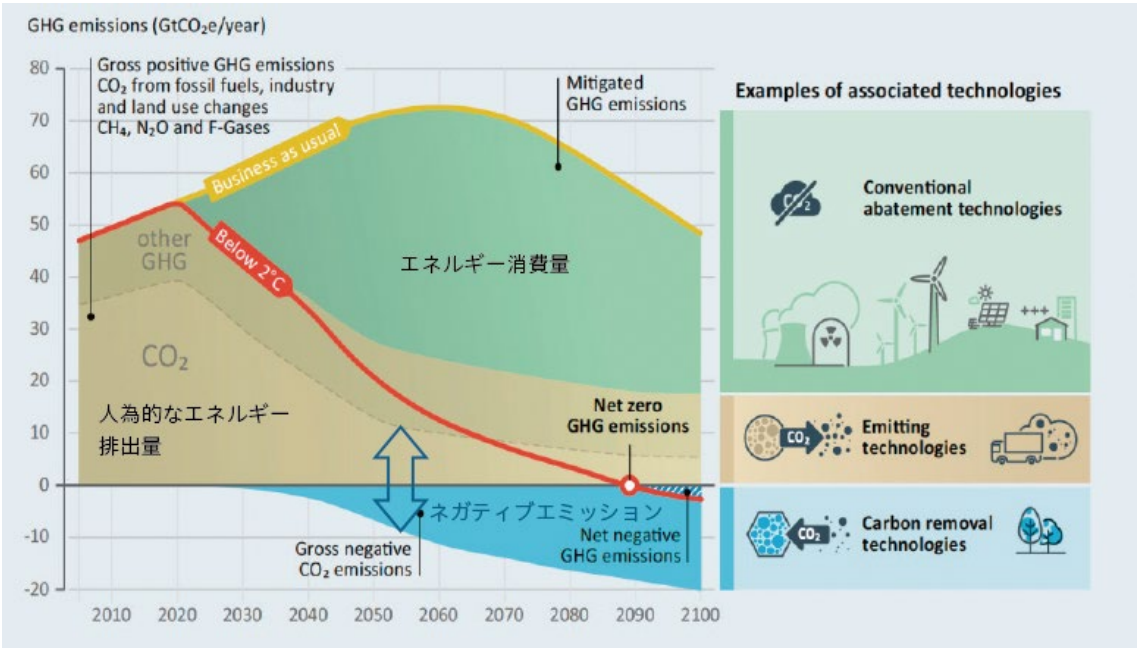


図1-2 ゼロエミッション達成へのイメージ図
(全米アカデミーズの資料¹からの図にCRDSが日本語追記)

一般にネガティブエミッション技術と呼ばれる技術には、表1-1に示す通り、沿岸部ブルーカーボン、植林、土壌炭素貯留、BECCS、DAC、炭素鉱物化などが挙げられる。費用や炭素固定速度も含め、それぞれの技術に課題はあるものの、環境への負荷や予算に加え、その他社会的課題や技術的課題を考慮した上で、様々な技術を組み合わせて活用していくことが重要とされている。

表1-1 ネガティブエミッション技術の例（全米アカデミーズの資料¹を元にCRDSが作成）

種類	費用*	炭素固定速度**(推定) (Gt/y/CO ₂)	課題
沿岸部ブルーカーボン	低	0.13	沿岸開発・土地利用の考慮、海面上昇などの影響の把握、食糧との競合。
植林／森林管理	低	1-1.5	食糧・繊維生産との競合。森林管理の遂行。木材需要との競合。
土壌炭素貯留	低-中	3	食糧との競合。土壌保全。
BECCS	中	3.5-5.2	高コスト。食糧・繊維生産・生物多様性との競合。
DAC	高	0***	高コスト。実証化に向けた技術的課題。
炭素鉱物化	中-高	不明	既往研究からの知見の不足。

* 推定費用。低：0-20(\$/t/CO₂)、中：20-100(\$/t/CO₂)、高：100(\$/t/CO₂) 以上。

** 現在の技術で安全に、かつ\$100/t/CO₂ (Gt/y/CO₂)で遂行できると推定できる値。

*** 実質的に、\$100/t/CO₂(Gt/y/CO₂)を上回っている(\$600/t/CO₂)。

1 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/25259> (2022年2月アクセス)

バイオマスを活用したネガティブエミッション技術である、沿岸部ブルーカーボン、森林、農地でのネガティブエミッション技術は、低コストで行うことができ、農林・水産資源利用の観点からも重要な技術である。また森林に関しては、古くから研究開発や大規模実証が進められている。

図1-3は我が国のバイオマスによる炭素固定量とエネルギー起源CO₂を示している。我が国のバイオマスによるCO₂の吸収・固定量は、約5000万トンとなっており、エネルギー起源CO₂の12億トンと比較すると約5%となっている。農林資源や水産資源などの自然資本の炭素固定量は、推定値で減少傾向にあるが、2013年度比で46%の削減目標を達成するため、エネルギー起源CO₂の提言に加えて、自然資本による炭素固定量を増やしていくことが重要となっている。

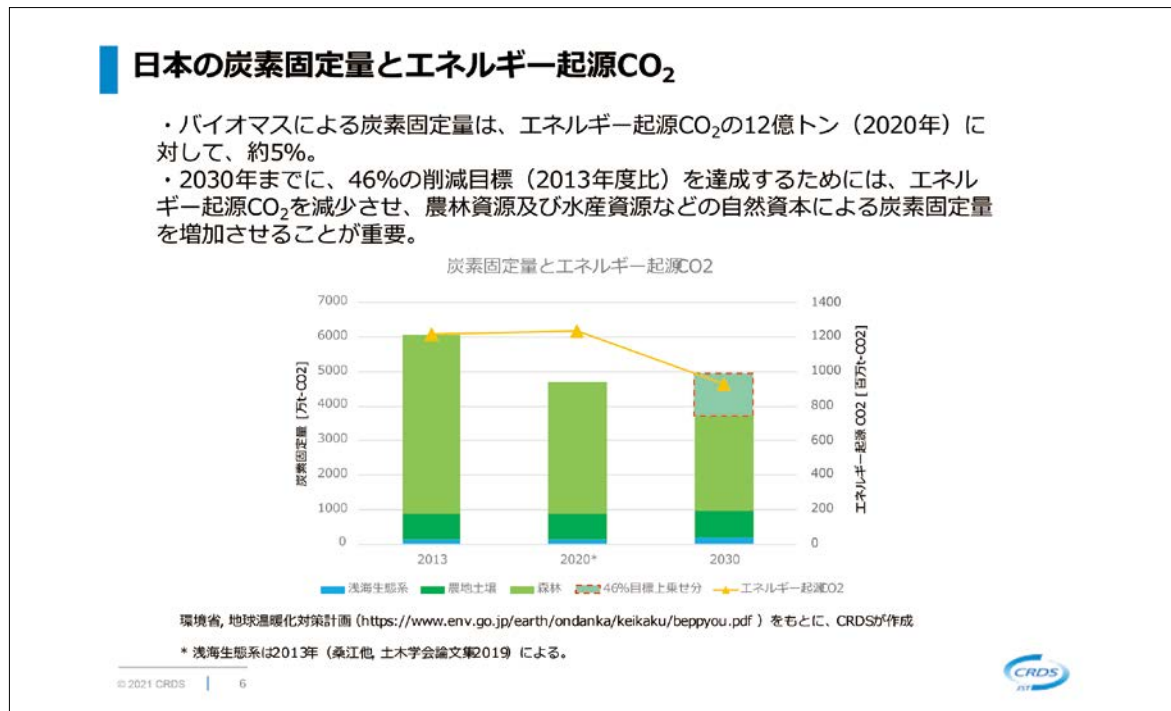


図1-3 日本でのバイオマスによる炭素固定量とエネルギー起源CO₂

以上の背景を踏まえ、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（JST-CRDS）では、バイオマスとCO₂吸収源としたネガティブエミッション技術に関する研究開発動向と社会実装に向けた課題を整理することを目的とし、2021年度に調査を実施することとした。

1.2 調査概要

本報告書では、農林資源や水産資源などのバイオマスによるCO₂吸収やその長期の固定に注目し、ネガティブエミッション技術、炭素資源利用技術について、資料調査、有識者へのヒアリング、ワークショップでの話題提供や議論（詳細はAppendix参照）に基づいてそれぞれの国内外の研究開発課題を整理し、今後に向けた研究開発課題を俯瞰的に整理した。

対象範囲は、農地、森林、沿岸生態系における炭素吸収、およびより長期の炭素固定とした。また対象とする科学技術は維持・管理手法、長期固定のための仕組み作り、量的貢献のポテンシャル評価などとした。

さらにこれらの量的拡大に向けた今後の方向性、考慮すべき経済社会、環境、倫理、法的観点からの課題についてもまとめた。

なお、対象範囲の分類として、米国の全米アカデミーズでは、『Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda (2019)』にて、ネガティブエミッション技術を陸域と海洋の2つに分類しているが、本報告書では、陸域をさらに農地と森林に分類し、農地、森林、海洋の3分類とした。

表 1-2 用語の分類

	分類	再分類	ネガティブエミッション技術の種類	方法
バイオマス	陸域	農地	土壌炭素貯留	・ バイオ炭の施用 ・ 作物の残留物の蓄積など
		森林	植林	・ 植林／再植林 ・ 森林管理など
	海域	海洋	沿岸部ブルーカーボン	・ 海藻・海草、マングローブ、塩性湿地の保全など

国内外の動向調査は、資料調査によりまとめた。海外の動向については、主に欧米での政策動向および進行中のプロジェクトや推進されている研究開発課題について整理した。国内動向は、革新的環境イノベーションで技術的な課題を整理した後、科研費の採択課題についてまとめた。

今後の推進が期待される研究開発課題については、2021 年度に開催した2回のワークショップでの議論を元に、重要な課題をカテゴリーごとに大別した。

ネガティブエミッション技術の社会実装に向けて検討が必要な社会・経済的については、ヒアリング調査、ワークショップでの議論、資料調査から課題を整理してまとめた。調査期間は2021 年度の1 年間である。

2 | 農地におけるネガティブエミッション技術

世界の陸域バイオマスによる炭素貯蔵量は、約600GtCであり、土壌中の深さ1mまでは約1,500Gt C(2mまでは約2,600 GtC)と言われている。大気と陸域生態系の間での年間炭素フラックスは、60 Gt C yr⁻¹程度であるが、平均正味残留炭素吸収量は1~2 Gt Cである。しかし、人口爆発と土地利用拡大に伴い、過去1万2千年の間に土壌中の炭素貯留量は、すでに133 Gt Cが人為的な理由で失われてしまったと指摘されている。この133 Gt Cの値は約4,900億トンCO₂に相当し、1870年以降から2011年までの全ての人為起源の発生源からのCO₂排出量である約1兆9,000億トンと比較するとほぼ1/4と、大きな値であることがわかる。このため適切な土壌管理を行い、これを回収していく必要がある。

世界の農地の大部分は、炭素固定量を増大させるために適切に管理されていない。多くの農地では、作物が栽培できない期間は休耕地となっている。これらの土地の有効活用も、農地での炭素固定量を高めるために重要である。例えば被覆植物を植えることで0.32 (t / (ha y))、根などの残留物などで0.1-0.34 (t / (ha y))、不耕起栽培を行った場合は0.15-0.80 (t / (ha y))の効果があるとされている。土壌への炭素貯留量のポテンシャルは、気候や土壌の状態によってことなるものの、合計で0.2~0.5 tC / ha / yと推定されている。

食糧との競合や生物多様性を損ねることのない安全な範囲で、バイオ炭など、最新の技術を用いることにより、約8 Gt / y CO₂まで可能であると算定されている。¹

2.1 海外の動向

2.1.1 米国

農地でのネガティブエミッション技術に関する具体的な研究開発課題を以下ものが挙げられている。表2-1は、米国での具体的な取り組みと研究開発課題である。

表2-1 基礎研究から実装に向けた課題等（農地）

	研究課題	推定予算 (\$M/y)	期間 (年)	備考
基礎研究	高密度に炭素貯留ができる作物	40-50	20	米国合衆国エネルギー省（DOE）エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）ROOTSプログラムで合計3500万ドル。約10の複数年プロジェクトが進行予定。最初の20年間で、年間約4,000万~5,000万ドル。米国農務省（USDA）、米国国立科学財団（NSF）、DOE、企業など。
	深層土壌の挙動	3-4	5	年間4~6のプロジェクトが進行予定。

¹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. , Chapter:3 Terrestrial Carbon Removal and Sequestration <https://doi.org/10.17226/25259>. (2022年2月アクセス)

				5年間で年間約300万ドル～400万ドル。USDA、NSFが実施。
	バイオ炭	3	5-10	年間3～5のプロジェクトが進行予定。
応用研究	全国の農地モニタリングシステム	5	進行中	米国農務省（USDA）の既存のNRIシステム強化。年間500万ドル。
	農地土壌の炭素吸収・固定の予測および定量化のためのデータモデルプラットフォーム	5	5	既存のデータベースとモデルの統合。3年間の開発期間内で年間500万ドルなど。
実証	農業土壌炭素プロセスを改善する実験的ネットワーク	6-9	>12	年間60万ドル/箇所、10～15の地域で実施予定。ランドグラント大学とUSDAの調査。合計600～900万ドル。
実装	土地所有者間のインセンティブと公平性に対する土地所有者の反応に関する社会科学研究	1	3	研究結果と技術を実装するためのアウトリーチ教育プログラム。USDAとNSF。3年間で3つのプロジェクト。年間100万ドル。
	実証試験のスケールアップ	2	3	年間4～5の地域プロジェクトが実施予定。USDAによる教育プログラム。

（全米アカデミーズの資料¹を元にCRDSが作成）

また、元DOE長官のモニツ氏らが立ち上げた非営利団体Energy Futures Initiativeが、陸域の生物学的なCO₂除去のための研究開発・実証プログラムについて、投資のポートフォリオを提案している²。ここには種々のアプローチによる土壌炭素貯留の強化、植物の特性に関する理解とその応用、ELSIへの対処などが優先事項として挙げられている。また、研究開発の促進に向けてコベネフィットを強調することや炭素クレジットの評価に向けた基礎的な検討も重要としている。

いずれの取組みにおいても、CO₂除去（緩和）だけではなく、気候変動による影響とそれへの対策（適応）の必要性を指摘し、具体的な課題を明記している。

2.1.2 欧州

これまで、ネガティブエミッション技術ははモラルハザードを引き起こす可能性があるとして積極的に考慮されてこなかったが、2030年55%削減目標に対し、ネガティブエミッションの重要性が強調された。

「Fit for 55」で2050年に向けて必要な変革の推進に向け、土地利用セクターには炭素管理のためのより良いインセンティブが必要であることが明記されている。それに対応して、農業・林業におけるネガティブエミッション技術の真正性をモニタリング・検証するための規制枠組みを開発し、2023年に公表する予定である。

また、2021年よりEUカーボンファーマーミング・イニシアチブが開始された。これは新しいグリーンビジネスモデルとして炭素農業（カーボンファーマーミング（Carbon farming））を推進し、農業従事者へのインセンティブの仕組み構築を目指している。カーボンファーマーミングとは、気候変動を緩和する目的で、農場レベルで炭素貯留（メタン、N₂O排出含む）を管理する農法であり、コベネフィットとして気候変動適応、生物多様性保全による環境経済学的メリット等への期待もある。このカーボンファーマーミングに対してEUでは、技術ハンドブック（EUにおける成果主義的炭素農業）を発刊（2021.2）し、5つの有望な分野のレビューとそのスキームを特定した。また炭素クレジットに対しては成果ベース（評価困難な場合は行動ベースとのハイブリッドなども考慮）での報奨金を支給することとしており、その次のステップとしてEU-ETS（排出権取引）で取り込むことを検討している。

2 <https://static1.squarespace.com/static/58ec123cb3db2bd94e057628/t/6011a6f0e5315209523218f2/1611769596475/From+the+Ground+Up.pdf>

(HORIZON2020)

陸域でのネガティブエミッション技術に関するプロジェクトはNEGEMとLANDMARCがHORIZON2020で示されている。それぞれ、ポテンシャル評価やモデルの開発を目的としており、国際的な連携を行いながら進められている。

表 2-2 欧州でのネガティブエミッションに関するプロジェクト（陸域）

	研究課題	予算 (€)	期間 (年)	備考
欧州	Quantifying and Deploying Responsible Negative Emissions (NEGEM)：責任のあるネガティブエミッションの定量化と展開	5,817,835	5	Horizon2020のNEGEMプロジェクト。期間は2020年1月から2024年3月。主たる研究機関はフィンランドのVTT。他、イギリスのドラックス発電所、オランダのSAPPI製糸会社など。
	Land-Use Based Mitigation for Resilient Climate Pathways (LANDMARC)：回復力のある気候経路のための土地利用ベースの緩和策	7,062,988	5	Horizon2020のLANDMARCプロジェクト。期間は2020年7月から2024年6月。主たる研究機関はオランダのデフルト工科大学。他、ドイツのカッセル大学など。

(HORIZON2020の資料³を元にCRDSが作成)

2.1.3 論文動向

Web of Scienceで農地での炭素固定に関する論文調査を行った。キーワードを『agriculture "carbon storage"』としたところ、米国、中国、ドイツが上位であり、日本は12位であった。(2021年11月実施)

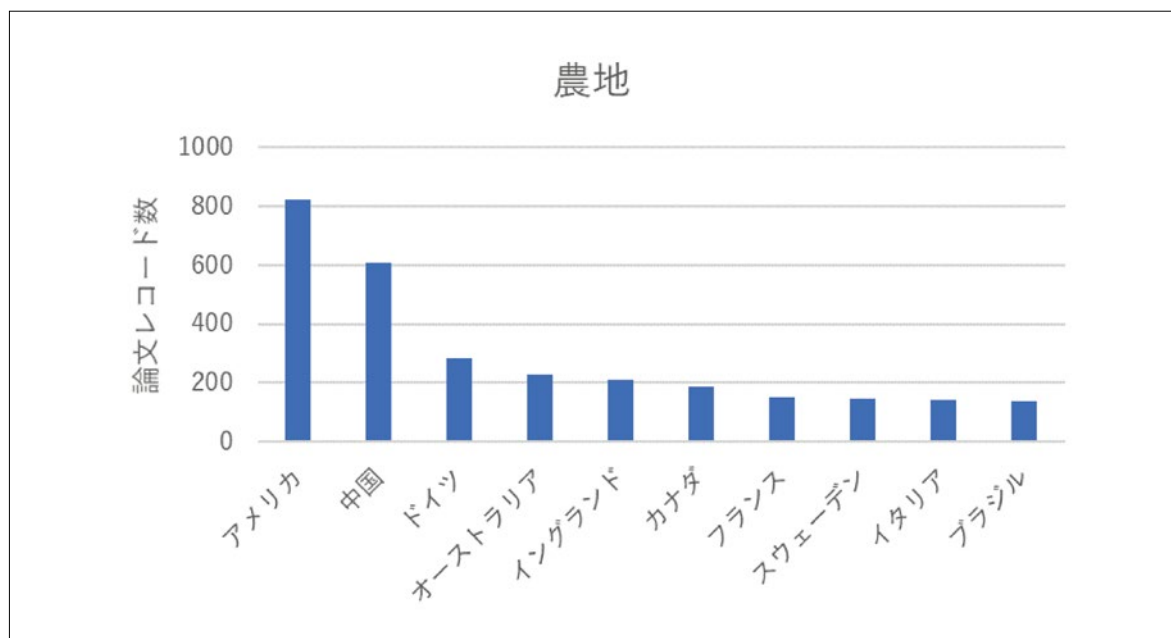


図 2-1 農地炭素固定に関する各国の論文動向

³ CORDIS,
(<https://cordis.europa.eu/search?q=contenttype%3D%27project%27%20AND%20programme%2Fcode%3D%27LC-CLA-02-2019%27&p=1&num=10&srt=/project/contentUpdateDate:decreasing>) (2022年2月アクセス)

図2-2にキーワード毎の論文数を示す。「炭素吸収源（Agriculture "carbon sink"）」と「モデリング（modeling）」というキーワードでの傾向が概ね同じであることに対して、「スマート農業（Smart agriculture）」というキーワードが近年大きく増加傾向であることがわかる。実装に向けた研究開発が国際的にも進められていることがわかる。

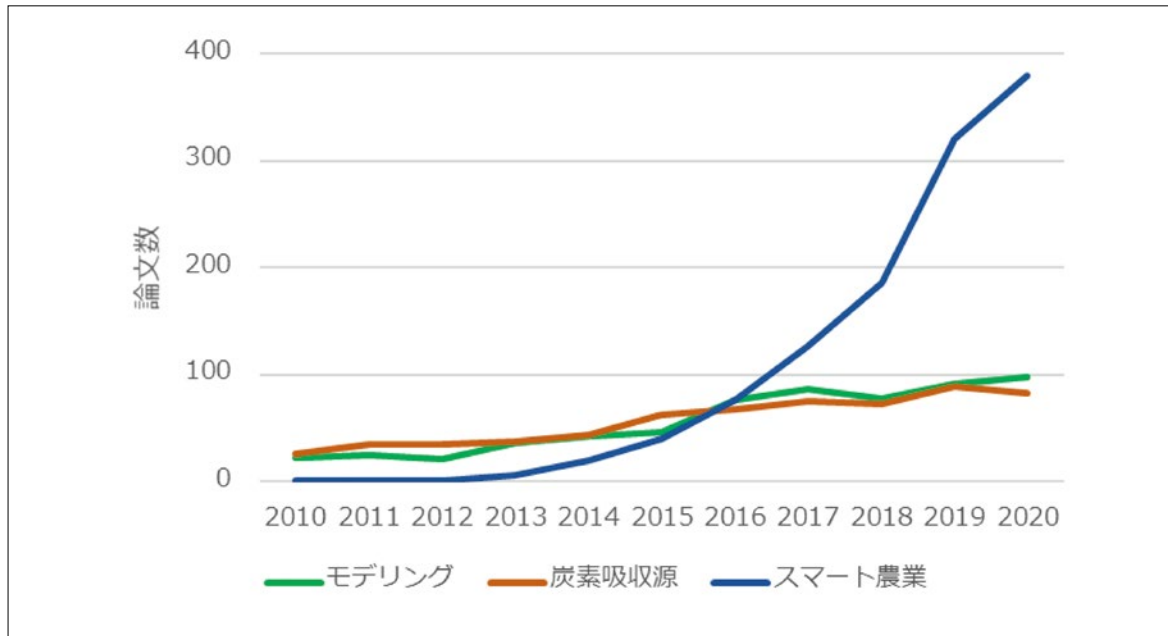


図2-2 農地炭素固定に関する論文数内訳

2.2 国内の動向

図2-3は農地に関連する日本の基本計画および戦略についてまとめたものである。作物の栽培に関するものが中心となるが、2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略では、バイオ炭を用いたCO₂の吸収・固定について明記されている。

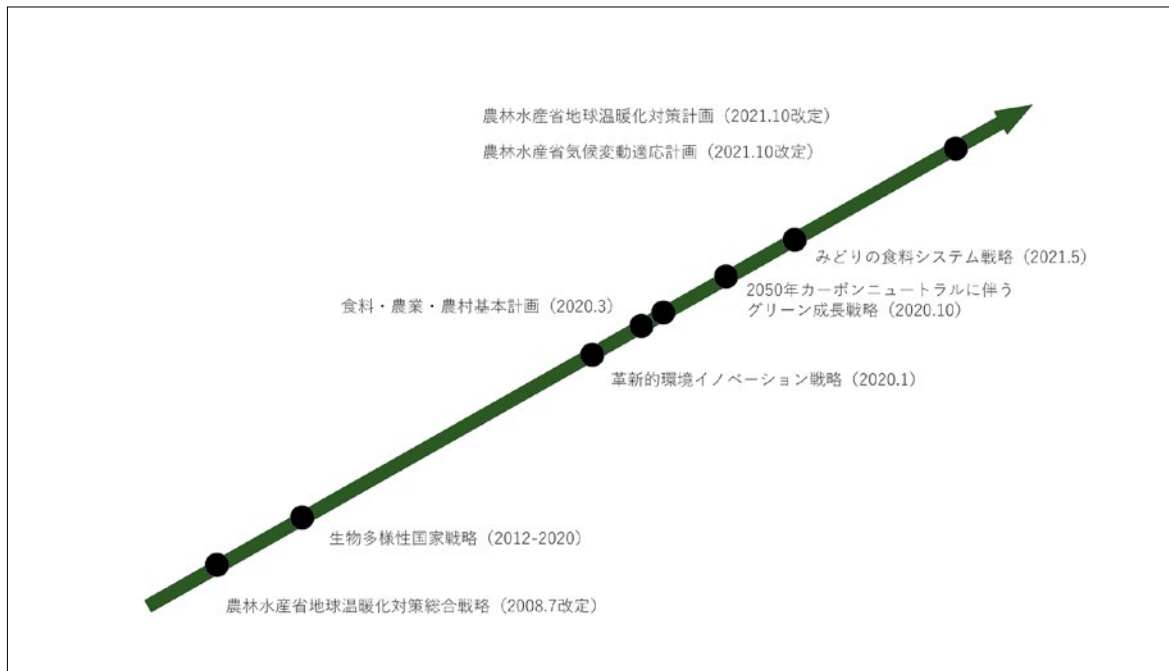
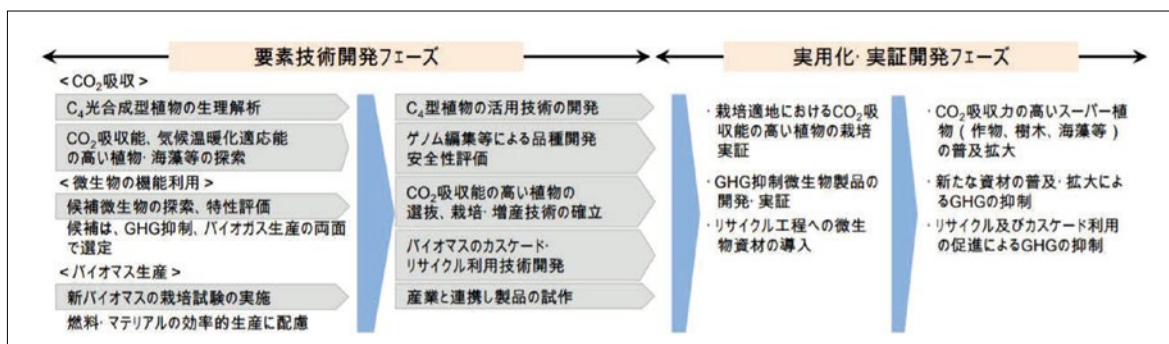


図2-3 日本の農地における基本計画および戦略

2.2.1 革新的環境イノベーション戦略による技術的な課題⁴

革新的環境イノベーション戦略「V 農林水産業・吸収源」において、農林水産資源の有効利用および炭素吸収源として活用するための目標が示されている。

図2-4は、ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用に関する、要素技術開発フェーズから実用化・実証開発フェーズに向けたロードマップである。技術開発課題および実施体制について、表2-3に示す。要素技術開発フェーズから実用化・実証開発フェーズに向けて、ゲノム編集などを使った生産量向上技術と、気候変動に対応した品種等を開発することを目的としている。

図2-4 ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用⁴

4 統合イノベーション戦略推進会議決定，2020.1，
<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf>，（2022年2月アクセス）

表 2-3 技術開発課題と実施体制（ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用）⁴

技術開発課題	実施体制
乾燥地、やせた土壌でも生産可能なC4光合成型植物の活用促進技術の開発や技術の海外展開を進める。	要素技術開発段階からの企業の関与、実用化開発フェーズベンチャー企業等を取り込み、国外での大規模実証やビジネス展開も目指し、国研、大学、企業等が共同した実施体制を構築する。
高いCO ₂ 固定能や窒素固定を持つ植物・海藻、土壌からのメタン排出を抑制する微生物、気候変動耐性の高い植物等の活用促進技術を開発する。	
遺伝子改変された植物・微生物の封じ込め技術など、安全性を評価確保するための周辺技術も併せて開発する。	

また、農地における炭素固定量を上げるため、バイオ炭の活用についても示されている。図2-5は、バイオ炭活用による農地炭素貯留の実現に関する、要素技術開発フェーズから実用化・実証開発フェーズに向けたロードマップである。技術開発課題および実施体制について、表2-4に示す。要素技術開発フェーズから実用化・実証開発フェーズに向けて、バイオ炭供給技術の開発や実証化、それに伴うモニタリング技術などが挙げられている。

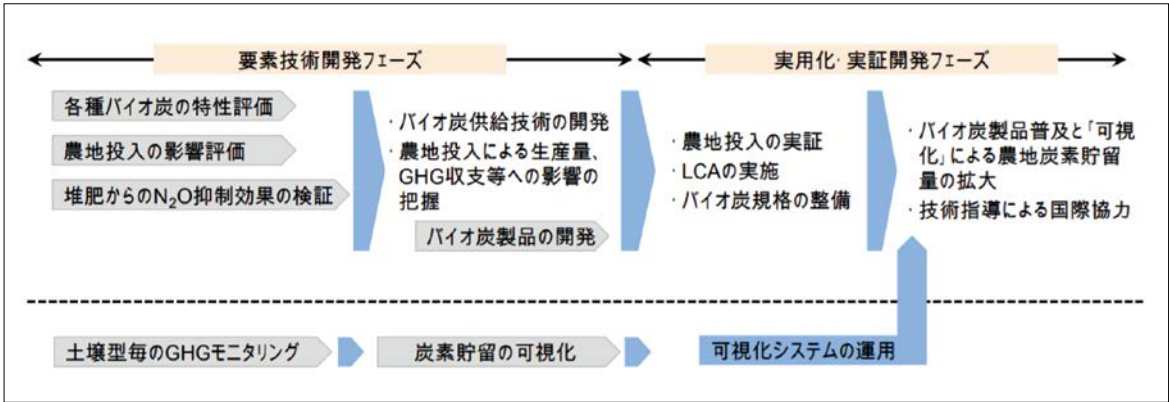


図 2-5 バイオ炭活用による農地炭素貯留の実現⁴

表 2-4 技術開発課題と実施体制（バイオ炭活用による農地炭素貯留の実現）⁴

技術開発課題	実施体制
農地をCO ₂ の吸収源にするため、新たな吸収源として算定可能なバイオ炭の投入や評価にかかる研究開発を進める。	公的研究機関を中心に、様々な研究機関、大学、企業等との共同体制を構築する。
農地での炭素貯留を可視化するシステムの開発を進める。	
技術開発の実施に当たっては、農地での実証を踏まえバイオ炭の普及までを含んだシステムとしてコスト削減を行う。	

2.2.2 具体的な研究開発課題

(科研費)

研究課題統合検索（GRANTS）から、関連のある研究開発課題を抽出した。なお、検索に用いた用語は、「農地 炭素固定」、「農地 炭素貯留」、「農地 CO₂吸収」などである（2021年11月実施）。農地を炭素固定のために活用するための研究は、国内でも古くから盛んに行われてきた。農地の炭素固定に関する、国内での主要な研究開発課題を図2-6、表2-5に示す。特に直近5年でも科研費の採択課題は増加傾向である。2021年現在進行中の研究開発課題は、バイオ炭の二酸化炭素貯留量算出や、土壌有機炭素の蓄積・分解を制御するメカニズム、土壌有機物の安定化に関する過程と実体の追求などである。平成29年度からは、基盤研究A「地球陸域表層で土壌有機物が分解を逃れ蓄積していくメカニズムの探索」が約4300万円の規模で実施された。

	H12	H13	H14	H15		H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	R2	R3	R4	R5
1																		基盤研究C		
2																		基盤研究B		
3																		基盤研究B		
4																		基盤研究A		
5																		基盤研究B		
6																		基盤研究C		
7																		特別研究員奨励費		
8																		基盤研究B		
9																		基盤研究B		
10																		基盤研究A		
11																		基盤研究A		

図2-6 農地炭素固定のファンディング実績

表2-5 農地炭素固定の研究開発課題例

	課題名
1	バイオ炭の二酸化炭素貯留量算出に用いる国内基準データの作製
2	土壌有機炭素の蓄積・分解を制御するメカニズムの解明
3	土壌有機物の安定化－その過程と実体の追求
4	地球陸域表層で土壌有機物が分解を逃れ蓄積していくメカニズムの探索
5	土壌有機炭素の各種安定化機構の解明
6	木質系バイオマスを出発物質とした高CO ₂ 吸蔵機能を持つ炭素材料の開発
7	農地土壌へのバイオ炭施用による一酸化二窒素の発生経路および削減メカニズムの解明
8	未利用木質バイオマスを用いた炭素貯留野菜によるCO ₂ 削減社会スキームの提案と評価
9	土壌圏における炭化物の動態と炭素蓄積への寄与
10	食料生産が困難な荒廃地での植林・バイオマス利用による炭素（CO ₂ ）の循環・固定
11	地球温暖化抑止対策のための土壌生態系炭素収支モデルの構築

土壌の炭素貯留効果については未だ明らかになっていないことが多い。炭素と窒素の総合評価、長期的モニタリング、多様な資材と多様な環境条件での評価が求められている。

バイオ炭を用いた土壌貯留や、土壌改良効果を評価するに当たっては、LCAの側面、生物多様性の側面から検討することが不可欠である。

今後農地での炭素固定量を継続的に増加させていくにあたり、気候変動などを考慮したより正確なモデリングに加えて、スマート農業などの工学的なアプローチを組み合わせることが必要となる。

(SATREPS)

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）での農地に関連する課題は、以下の通りである⁵。

表 2-6 進行中の SATREPS 関連採択課題例（農地）

課題名	年度	共同研究相手国
環境・エネルギー（地球規模の環境課題）		
オイルパーム農園の持続的土地利用と再生を目指したオイルパーム古木への高付加価値化技術の開発	平成30年度（2018年度）	マレーシア
砂漠化対処に向けた次世代型「持続可能な土地管理（SLM）」フレームワークの開発	平成28年度（2016年度）	エチオピア
食料安全保障を目指した気候変動適応策としての農業保険における損害評価手法の構築と社会実装	平成28年度（2016年度）	インドネシア
環境・エネルギー（低炭素社会）		
脱炭素社会に向けた炭酸塩化を利用したカーボンリサイクルシステムの開発	令和2年度（2020年度）	南アフリカ
タイ国・生物循環グリーン経済実現に向けたウキクサホロビオント資源価値の包括的開拓	令和2年度（2020年度）	タイ
バイオマス・廃棄物資源のスーパークリーンバイオ燃料への触媒転換技術の開発	平成28年度（2016年度）	タイ
熱帯荒廃草原の植生回復によるバイオマスエネルギーとマテリアル生産	平成27年度（2015年度）	インドネシア
生物資源		
バングラデシュ稲の安全性と高栄養価に貢献する育種および水管理法の確立と普及	令和3年度（2021年度）	コロンビア
高栄養価作物キヌアのレジリエンス強化生産技術の開発と普及	令和元年度（2019年度）	ボリビア
スーダンおよびサブサハラアフリカの乾燥・高温農業生態系において持続的にコムギを生産するための革新的な気候変動耐性技術の開発	平成30年度（2018年度）	スーダン
ミャンマーにおけるイネゲノム育種システム強化	平成29年度（2017年度）	ミャンマー
ストライガ防除による食料安全保障と貧困克服	平成28年度（2016年度）	スーダン

5 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）HP, <https://www.jst.go.jp/global/kadai/list.html>, (2022年2月アクセス)

肥沃度センシング技術と養分欠乏耐性系統の開発を統合したアフリカ稲作における養分利用効率の飛躍的向上	平成28年度（2016年度）	マダガスカル
ブルキナファソ産リン鉱石を用いた施肥栽培促進モデルの構築	平成28年度（2016年度）	ブルキナファソ
エビデンスに基づく乾燥地生物資源シース開発による新産業育成研究	平成27年度（2015年度）	チュニジア、モロッコ
生物遺伝資源と分子遺伝学を利用した養蚕研究基盤構築	平成27年度（2015年度）	ケニア
ベトナム、カンボジア、タイにおけるキャッサバの侵入病害虫対策に基づく持続的生産システムの開発と普及	平成27年度（2015年度）	ベトナム、カンボジア、タイ

2.3 社会・経済的な課題

• 社会的な課題

農地での炭素固定量を上げるため、作物の根やバイオ炭を用いた検討がなされているが、短期的な取り組みでは、大気中の炭素を土壌に固定できる期間は数十年程度と言われており、超長期での炭素固定能は難しい。農地土壌を炭素の吸収源として機能させ、そのポテンシャルを評価するには、継続的に炭素源（有機物）を確保し施用できるかどうかも含めて評価する必要がある。未利用有機資源を継続的に投入していく仕組み作りが求められている。

また、農業を営む目的は多くの場合、作物を栽培するためであるため、農地の炭素固定のための取り組みと競合する部分が出てくる状況にある時は、農家の方々へのコンセンサスが取りにくいという課題がある。コスト面、技術面の両方でインセンティブが得られるような技術が求められている。

• 経済的な課題

農地での炭素固定量を増やすためには、広く活動していくことができるための資金援助が必要である。研究費の獲得のためにどのような評価が必要であるのか、また、横断的なコスト評価が可能であるのかを検討することが、今後求められている。

また、農家の方々が活動に協力するにあたり、経済的な損失がある場合は、活動を広げていくことが難しいことが予測されるため、Jクレジットなどのインセンティブは不可欠である。

• 法的・規制に関する課題

農林水産省は「J-クレジット制度におけるバイオ炭の農地施用にかかる方法論」において、バイオ炭のカウントを国内のものに限定している。地産地消の観点から、総合的にどれだけ土壌に炭素が蓄積されたかというのを把握することが重要である。

また、耕作放棄地を有効利用することは、炭素固定量を増やす上で重要であるものの、個人の所有している耕作放棄地を法人が運営していくためには、法的な課題などがネックとなり、ハードルが高い。土地を有効活用していくことが可能な仕組みが求められている。

2.4 具体的な取組事例

• 農研機構での土壌炭素貯留への取り組み

第3回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ（2020年9月8日）⁶にて、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）での土壌炭素貯留への取り組みが示された。

4パーミルイニシアチブは、全世界の土壌中に存在する炭素の量を毎年4/1000ずつ増やすことができれば、将来の大気CO₂の増加量をゼロに抑えることができるという計算に基づき、2015年のCOP21で、フランス主導で始まった土壌管理技術などによる土壌炭素を増やす活動を推進する取り組みである。世界の14名の科学者からなる科学技術委員会にて、農研機構から参加している。

バイオ炭については、土壌炭素貯留（吸収源）の算定方法が、“2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use”に提示された。

また、農地土壌に蓄積する炭素量の増減を計算し、土壌の二酸化炭素（CO₂）吸収量として示すウェブサイト『土壌のCO₂吸収「見える化」サイト』⁷を作成し、HP上で公開している。対象とする農地を地図上で選び、栽培する作物や栽培管理方法を選択することで、その農地の土壌炭素量の変化が予測できる。

• 山梨県における4パーミルイニシアチブへの取り組み⁸

土壌中の炭素量を毎年4パーミル（4/1000）増やすことができれば、大気CO₂の増加量を相殺し、温暖化を防止できるという取り組みに基づいた国際的な取り組みとして、「4パーミルイニシアチブ」がある。

山梨県では、果樹園の土壌に炭素を貯留する取り組みを行い、環境に配慮した農作物として、付加価値を向上させるという取り組みを行っている。概要は、図2-7に示すとおり、果樹剪定枝、果樹の下草、果樹に施す堆肥を、果樹園の土壌に蓄積させる仕組みである。

6 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：農業由来温室効果ガス排出削減技術の開発，第3回グリーンイノベーション戦略推進会議WG，資料3-1，
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/003_03_01.pdf，（2021年12月22日アクセス）

7 『土壌のCO₂吸収量「見える化」サイト』，
<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>，（2021年12月アクセス）

8 山梨県における4パーミルイニシアチブの取り組み，
（<https://www.pref.yamanashi.jp/nou-han/documents/4pergaiyou.pdf>）2021年12月22日アクセス

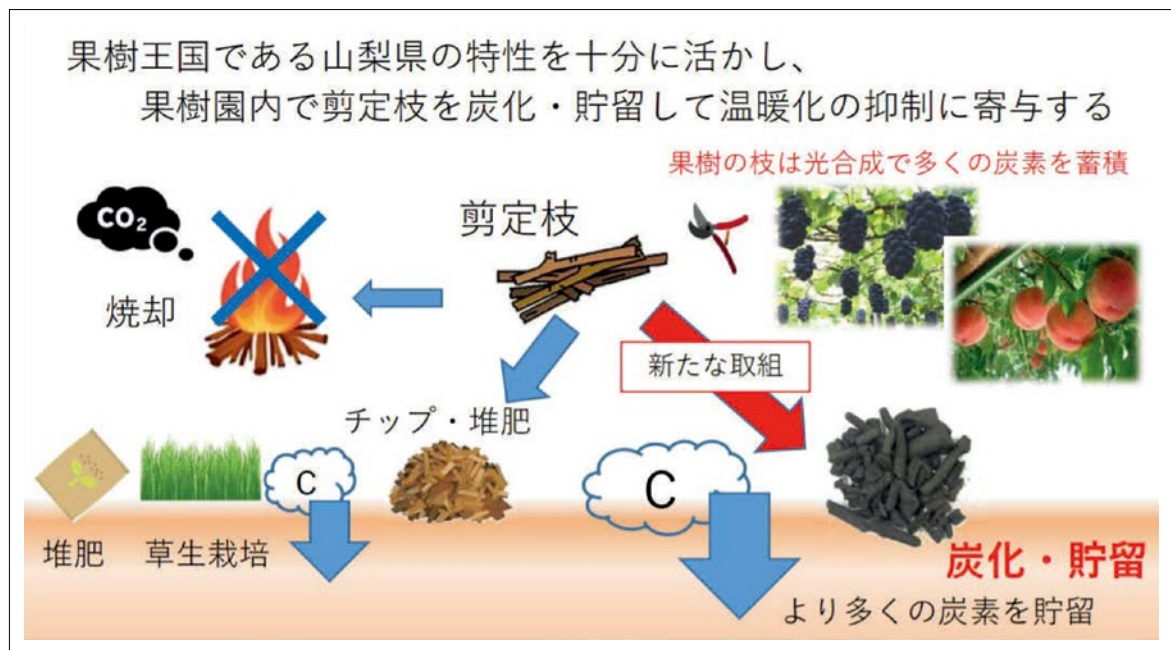


図2-7 山梨県の果樹園での4パーミルイニシアチブへの取り組み⁹

具体的な取り組みとしては、試験研究（炭化の方法、煙の発生量、炭素の貯留量、土壌改良効果、生育への影響）、現地実証（実用段階での課題把握、地域への普及加速化）、ブランド化（CO₂削減の評価と認証制度創設、新たな付加価値によるブランド化）について、進めている。

果樹園という限定された範囲ではあるものの、他県への波及を念頭に置き、4パーミルイニシアチブ推進全国協議会が2021年2月に立ち上げられており、東京や神奈川、茨城、栃木、埼玉、新潟、静岡、愛知、三重、山口、佐賀、大分と山梨の13都県、農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）が参加している。

・バイオコミュニティ関西（BiocK）⁹

具体的な取り組み事例として、2021年7月に発足したバイオコミュニティ関西（BiocK）がある。「持続可能な社会実現のため、バイオファーストの発想を広げ、国際都市型バイオコミュニティの形成をめざす」というビジョンを掲げ、関西を拠点にバイオ分野における究極のエコシステムをつくることを目的としている。

複数のバイオメタン分科会やプラスチック分科会など、複数の分科会と委員会により構成され、企業、団体、アカデミア、金融機関、ベンチャーなどと連携・支援・協力しながら進める体制となっている。表2-7に示す4つのアクションプランを明示している。

⁹ バイオコミュニティ関西 (BiocK) 紹介資料
(https://kinkibio.com/wp-content/uploads/2021/10/20211008_BiocK%E7%B4%B9%E4%BB%8B%E8%B3%87%E6%96%99-ver4.pdf) 2021年12月22日アクセス

表2-7 4つのアクションプラン

名称	概要	目標
アクションⅠ	基本方針および基本計画の策定	BiocKの活動の基本方針を策定し、産業界のニーズと関西の各研究機関の状況を踏まえ、関西に求められる機能を明らかにし、具体的な基本計画を策定する。
アクションⅡ	国内外への発信力強化	関西のバイオ分野のポテンシャルと活動情報を集約し、国内外へ発信するための機能を強化する。
アクションⅢ	イノベーションの促進	バイオ分野の新事業を継続的に送出し、社会課題の解決に貢献するため、企業によるオープンイノベーションや産学連携事業を促進し、またスタートアップ支援を実施する。
アクションⅣ	ネットワークの強化	各研究拠点の連携強化、異分野との融合促進を行い、また、これまで構築されてきた研究成果や施設の活用促進を図るとともに、海外クラスターとの交流を行う。

2.5 CRDS主催のワークショップで議論された課題のまとめ

バイオマスを紹介した大気中CO₂の吸収とその長期の固定に注目し、国内外の研究開発動向や今後に向けた挑戦的課題を俯瞰的に整理するため、2021年度に2回のワークショップを開催した。ワークショップの具体的なプログラム、趣旨、および議論の詳細についてはAppendixに記載している。本節では、ワークショップで議論された議論について、農地に関連する部分についてを、キーワードごとに整理して以下に示す。

(CO₂吸収、固定増加の方法)

- ・光合成の観点からCO₂の供給を上げること、CO₂の固定能を上げること、光エネルギーの変換効率を上げることの三つともえで対応。遺伝子組み換え（GM）に頼らない方法として、ゲノム編集に期待している。
- ・バイオマスを使うとCO₂を吸収する面的な広がりが必要。このため人口密度の高い国内で植物を植えても効果が見えてこない。栽培に適した場所でバイオマスを生産するような植物の改良あるいは開発し、海外で実装し、トータルとして二酸化炭素の削減に、地球全体での削減貢献をすべき。
- ・光合成効率を増やすよりも、CO₂濃度の急激な増加に対してその効率を低下させないための対策が必要。

(植物の収穫性の向上)

- ・陸上植物の場合には生育ステージによって必要な要因が違うので、温度、水、CO₂の3つの要因を見ることが必要。収量性を上げることは、植物の収量は、集団で見ることが重要。10%、20%の増収であれば、植え方の工夫などで今の植物でもできるのではないかと。肥料の効率的な利用を微生物等と併せてさらに効率化できるような技術になると思った。

(温暖化の陸域植物への影響)

- ・農耕地では窒素栄養など、人為的に増やすことができるが、森林は大体痩せ地であって、CO₂過多になると、窒素栄養と炭素栄養とのバランスが気になってくる。体内の栄養代謝バランスの崩れが生じる可能性に関して、植物ごとに違うが、留意しておかなければならない。

(生育適地拡大)

- ・植物を育てている場所には、生育適地と、その周囲の準生育適地、その他は生育不適地（砂漠のような

植物が育つには難しい土地)がある。生育適地に関しては、面積当たりの生産性をどのように増やすかという論法でよい。準生育適地については、面積がかなりあるが、幾つかの環境要因で生育が不安定となっている。ここで安定させるためには、強い植物にする技術を導入した植物を育てることができれば、準耕作地が次第に耕作適地になり、何年か継続していくと、水をキープしやすくなる等、生育の環境がよくなる。そうなれば、その周りにさらに準耕作適地ができ、さらに適地を広げていくことで、植物が生育できる面積が結果としては増やせ、それがCO₂の大きな削減効果につながる。

- ・ 農作物の収量の不安定化を招いているのは、おそらく温度と水。とくに水については、水に対する耐性、水が少ないこと、多いことに対する耐性を持たせる、温度の高低に対して耐性を改良する等によって、準耕作地でも安定して生産できるようになり、バイオマスの安定生産につながるのではないか。

(農地の炭素蓄積・GHG抑止)

- ・ 農地、特に水田ではメタンの削減が重要になるが、それを削減するには水管理が重要。栽培の途中で乾かす、中干しをすることは一般的におこなわれているが、そのインセンティブは現場の農家に委ねられている。難しくないが、それができるような仕組みになっていないことが問題。水田以外でも、畑や草地での炭素貯留の管理を試されてはいるが、同様に仕組みづくりはされていない。

(GHG評価のばらつき)

- ・ 農地に関しては、ばらつきは高い。どのくらいばらつきがあるのかは、国の温室効果ガスの排出量の算定の中で出すようになっていたと思う。これを小さくしていくために、モデルの精度を上げる必要がある。現在、農地の温室効果ガス関係では、排出係数を使って行っているの、モデルを使ってそこを精緻化していくのが重要。

(炭素資源利用)

- ・ 広いところでバイオマス植物を作って買ってくればよいという議論もあるが、輸送にエネルギーがかかる。バイオマスの場合、地産地消でやらないと元は取れない。ローカルにエコロジカルな生産方法もあり、この土地で一番効率のいい植物、エネルギーがかからない最適な植物でやらないといけない。そうなるのに、土の状態、病原体など、ローカルな問題が出てくる。これは農家が一番よく知っていて、研究者はよく分からない情報だったが、これからはそれを全部デジタル化することが可能になる、地道な研究が必要。
- ・ 研究開発課題、藻類の利用については、基礎的なところからやっている。例えば、生育段階で藻類もその成分が変わる。栄養の結合状態や環境の条件によっても変わってくるので、いろいろな成分がどのくらいできるのか、どのような環境ならどのような応答をするのかについて見ている。その上で、例えばバイオジェット燃料を作りたいならば、バイオジェット燃料の燃料になる部分を多くするにはどのような制御、どのような環境条件を整えることがよいか見ている。

同時に、単純に利用だけではなく、その利用法によってCO₂がどのくらい増減するか、エネルギーの使用量がどのくらい増減するか、そうしたLCAやTEA、経済性の分析、環境性の分析、その定量化をやるようにしている。そこが見えてこない限り研究すべき優先順位をつけること自体が難しい。また、利用のための研究では、脂質やその他のいろいろな成分の分離や精製の方法、例えば油脂植物としてパームや大豆、菜種がある。油の成分が違っている。藻類の場合はリン脂質と脂質が多く、大きく違う部分があり、それを分離する技術や精製する技術、そのための工学的な手法は続けている。

(植物の病気)

- ・ 日本は島なので、ほかの国よりは危険度は低い、特に食料品の輸入は多く、それにくっついてくる菌は

沢山ある。例えば、かんきつ系やお茶など、大量生産しているところに一回入ると、一気に広がるので、危険なものはどんどん増えている。

(ビジネス化に向けた課題)

- ・ カスケード利用が重要。例えば、燃料を作る場合、脂質を抽出し、その中で燃料になる部分は脂質の中の脂肪酸の部分が主になる。脂肪酸部分以外の脂質全て燃料にならずに残渣、バイプロダクトとして出てくる。その中に、例えばカロテノイド、ステロール部分があったりするが、そうしたものは、例えば化粧品用途やほかの産業で利用できる。

ただし、一社では難しい。燃料を作る会社は、化粧品にどういうものが使われるのか、どれぐらいの単価で売れるのか、どういう精製技術が必要なのか分からない。なので、MATSURIプロジェクトを立ち上げて、各企業の知見を集めて、例えば脂質については化粧品、燃料、プラスチックを作ることをやる、その他のたんぱく質、水化物に関しても同様に利用できる方法を、知見を持つ会社と一緒に進めているというのが現状。それがない限り、藻類、バイオマス全体を使える藻類であっても、LCA的にもエネルギー収支的にも合わない。

むしろ農業のほうが残渣の部分が出てくるので、それを有効利用していく必要があるが、同時にその利用方法を考える必要がある。例えば、発電についてバイオマス、農業残渣をボイラーでそのままでは燃やせない。加工することが必要になる。そのとき、エネルギー収支的にどうなるのか、燃やしたほうがいいのか、地面に埋めたほうがいいのかを判断した上で、定量的に何の研究を進めるかを考えるべきだが、そこが今あまり定量的に評価されていないと思っている。ヤシガラを日本に持ってきて燃やす話もあるが、エネルギー収支的にどうなっているのか議論する場すらない。その利用方法を研究する基礎研究の部分は重要で有意義な技術であり、知見だと思うが、それが実際出来上がったときに本当にCO₂削減に貢献しているのかを評価することをやるべきではないか。

- ・ バイオマスは石炭に比べると相対的に発熱量が低いので、普通の発電の場合は発電効率が低い。さらに廃棄物の場合は含水の問題があるため、そこでも下がってしまう。資金を掛けれる場合は、ガス化してコンバインド発電する方法が一つの技術的な回答ではあるし、事例も研究開発レベルでは行われている。資金があれば、CO₂の分離回収もある程度簡単にでき、技術的な解決はある。

(研究開発)

- ・ ゲノム系は遅れている。インフォマティクス系も同様。全体を見る方法論がまだ弱いく、一つの植物を見て、一つの現象を見るというものが多く、全体を見る手法論は、海外では進んできているという印象。
- ・ 海外では、情報全体を網羅的に取り、それから当たりを探していくことが様々な植物種で行われている。日本は、例えばイネなど特殊な、代表的な作物ではできているが、それ以外の作物ではできていない。海外は、園芸作物でも全く同じようなことをやろうとしている。日本は、稲ではできていてもというのが現状だ。
- ・ バイオマス植物についても研究開発投資や人材育成をおこなっている研究室が少なく、限られたところしかない。しかも、大学ではないところで開発しているので、人材育成という点では、ゲノムに関係したような俯瞰的な情報収集を行って絞り込んでいくようなことをやる人材の養成もできていない。その辺を早急にやっていかなければ、方法論で遅れが出る。

大量のデータを取った後の機械学習などの方法論は、非常に新鮮。そうしたものが使える状態がまだ日本では少ないので、その研究開発とそれを担う人材の養成方法を検討していかないと海外との差が出る。

- ・ 植物の基礎科学全体で攻めなければならない。その姿勢を維持しなくては、本当の意味での国際競争力は保てない。
- ・ 視野をもう少し広く、長期的な視点も持てるようなお金が使えることが大事。全体的に植物科学を、環

境など、幅広い様々なものが関係したものとして考えることを忘れてはならない。

- ・様々なものが立ち上がっていく状況がある程度維持できていれば、研究の交流はあるので、構えなくてもいい。ただ、何かひとつに特化して、これだけで全て解決できる、といったやり方は宜しくない。植物栄養、病害菌、気候など、総力戦でやっていくことが大切。基礎系の研究者としては大きなプロジェクトに高額な投資をするのではなく、全体的に攻め、ベースが保証されていることが大事と思っている。
- ・ゲノムデータによるオミックス解析に関してコマツナは、1か所のオープンなグリーンハウスでおこなっている。他でも同じデータになるのか、あるいはその土地で違うデータになるのか、違うならばどのくらい変動があるのか、ということを調べている。ゲノムデータによるオミックス解析の他の植物への展開は難しいが、やるべき。企業と連携して、依頼している農家の土を送ってもらい、どのくらいの菌がいるかなど、土壌を使ってどういった収量が出るかと併せて、どの程度のコリレーションがあるか等、をやっている。農家との連携が重要。

農水の実験圃場よりも、すぐにフィールドに行き、実際何が起きているかを見て、それをまとめたほうが多様な情報が入ってくる。コリレーションを取るのには難しいが、技術は大分コリレーション的な方面に広げていくというところ。基礎的な技術も同時にレベルを上げてなくてはならない。例えば、メタゲノム解析にしても、最新のシーケンサーを使ってどこまでいけるのかなど、それはラボの中での技術にもなるが、そういった基本技術の向上も重要。連携のところは企業をかませたり、大学の先生に頼んでデータを集めてもらったりしている。

見ているものは、植物側は転写された遺伝子群、つまりトランスクリプトームと、さらに物質群つまりメタボロームでどんなものが上がり、下がっているか、それから、土壌に関してはイオンがどのくらいあるのか、イオノームというイオン量など、窒素、NMRで見られるような一次代謝物、アミノ酸などを見て、それらの相関性、そして微生物を見ている。

(気候変動の影響)

- ・気候が変動していくと、例えば2050年断面で、CO₂濃度、温度、降水の条件が変わってくる可能性がある。そのときにCO₂の吸収や固定の能力が変化する必要があり、この評価が必要と思っている。
- ・土壌の将来のポテンシャルの点で、気候変動が、土壌の炭素貯留量やそれに関係する植物の生育に影響が出てきている。気候が変わり、温度上昇、雨が極端に増減することも大きな影響になる。とくに乾燥は、植物のNPPが低下し、その分、炭素のたまる量が減る。温度上昇は土壌から炭素が抜けていくので、炭素がたまりにくくなる。この辺はモデルの中に組み込んでいく必要がある。我々のグループで、流域単位での土砂流出の研究者は、モデルの中にそうした気候変動のシナリオも組み込んでやっているところがあるが、現状は始めたばかり。
- ・やはりライフサイクルの評価が必要。あまり広い範囲から燃料を集めると、ライフサイクルで見た運搬CO₂が出てしまうという問題は当然ある。その意味では、大規模化は規模の経済は働くが、トレードオフになり、あまり大規模化できない。
イギリスの例では、大規模にチップを作って、それを運んでというモデルだが、運搬もゼロエミッションにしないと、全体でのCO₂が下がっていかない課題がある。
- ・ミンクスの研究は、様々な文献のサーベイを行い、副作用があることをまとめたもの。土壌の質や反射率、生物多様性や生態系、さらには測量等の競合の問題、土壌、水質汚染、N₂Oの話も出ていた。あと炭素蓄積のパーマネンス（永続性）の話も出ていたので、それらは国内でも評価をされると思う。実際の研究は今のところはない。そうした研究が必要という段階で止まっている。文献情報がまとまっていない。日本語の文献にまで広がっていかねばならないし、海外でのメタ分析と少し違う手法でやる必要がある。
- ・将来の気候とも絡むが、気候モデルと土地利用モデルを組み合わせ評価を行っていくことが必要。国際的には、CMIP6という気候モデルの比較と、LUMIPという土地利用（Land Use）のMIPがある。

MIPは、モデルインターコンパリゾン、すなわち、モデル間比較をし、単一のシナリオによらずに不確実性や多様性を出していくという意味で、幅を見る研究が必要。土壌の炭素がどれぐらいの範囲で増えるかについての既存の研究例もある。

(放牧等による砂漠化問題)

- ・ 人の食生活の問題があり、肉をどれだけ食べたいか等も影響している。最近の流れとしては、植物を使ってたんぱく質を作る、虫の話等ある。植物を使って植物の成分を変更し、植物由来のたんぱく質を使って食べられるようにする等、環境破壊を食い止めることと併せて、植物を使ってたんぱく質を作る仕組みを強化することも、有効。CO₂を吸収できる面積を減らさないことばかりではなく。

(農家との連携・DX)

- ・ 米国では各州に大学、農学部があり、そこがエクステンションを持っていて、それぞれの農家と話す時間を必ず取らなければならない。地方のローカルな人に対するサイエンスを必ずやらなければならない。それが日本はあまりないという印象がある。県にそれぞれ農学部がある一方、うまく連携が取れていないような印象。
農家は高齢者が多いが、若い人が出てきていて、スマホを持って畑に行く。トラクターも全部自動化されることを考えると、IT待ったなしになっている。そこで農家がデータをこちらのコンピューター上にくれ、そこが繋がれば、デジタルトランスフォーメーションは起こると思っている。米国などは既にそうになっている。
- ・ 日本の場合は県に農業改良普及センターがあり、そこにエクステンションの人たちがいて、彼らが農家と直接つながっているので、そうした仕組みを上手に利用できると新しい仕組みが作れるのでは。
また、最近の先進的な中規模種苗会社は、種を売るだけではなく、実際に自分たちが種を販売している農家の土壌分析や肥料分析、病害虫の分析をスマホでできる仕組みをつくっており、そうした情報含めてサービスをするところもある。つまり、いま議論していたことを先取りしているところが国内でも出てきているので、そうしたことを科学的に裏づけることができるとよい。

(植物、微生物、環境を取り扱うプロジェクト)

- ・ 今までは植物、微生物など、生き物ごとにプロジェクトをつくっていたが、植物は環境中にいる微生物と一緒に生活しており、そこでパフォーマンスを発揮するので、両方一緒に取り扱えるようなプロジェクト、そうした視点での研究開発が必要になってくる。今もホロゲノミクスなど課題として上がってきているが、そうした植物、微生物、環境も一緒に見て、植物の改良をしていくような取り組みが重要。
- ・ 燃やすという方法が一番コスト的には手がかからない。例えば、トマトを1トン生産すると1トンバイオマスが出てくるが、これを循環させないと、農家の人たちはそれを畑に埋めてしまったり、チップして畑にすき込むのが今の利用法の形態である。燃やすことで熱量がどのぐらい出るかわからない。これは収穫した後の残ったバイオマスを利用し尽くすことが大事なことなので、その視点も入れて開発をやるのがよい。
- ・ 日本の場合は法律の壁もあるが、その辺も含めてバイオマス発電を、電力会社への売電ではなく、自分たちで使うといったことも考えていくと効率がよくなる。

(「長期」の定義)

- ・ 農作物では、稲のような一年生の場合、その1年が短期になる。果樹、ミスカンサスのようなバイオ作物の多年生は一定程度成長した頃までが短期、そこから成育が安定してくるまでが長期で40年などの年月になる。畑に関しては、10年ぐらいが長期といえる。

- ・どのくらいが「長期」かの質問を受ける。ジオロジカルに何千年何万年ためる必要はなく、大気中の例えばCO₂濃度を下げることが目標であれば、200年後、300年後の、世界人口が増えなくなり人為排出が増えなくなるところまでの時間スケール。

つまり、数百年ぐらい貯留することができれば、それは長期と思っている。逆に、数年や数十年、一時的に貯留しても戻るのであれば、2050年頃には全く意味がない。どこまで長期かを示すこと、

さらに、長期的に大気中のCO₂から隔離するためには、炭素プール中に長期的に炭素がたまらなければならない。森林の地上部だけを見ては足りず、森林生態系の土壌や地上部、地下バイオマスだけを見ていても足りない。

オンサイトとオフサイト全てを見て、トータルとして大気とのやり取りの上で、大気以外の炭素プールにどれだけ長期的に炭素を保持しておけるかが重要。そうした各生態系、陸も海も関係なしで、どれだけ系全体としての大気とのやり取りが長期的になされているか、特にオフサイトのほうは、全く研究されていないと思う。その辺がサイエンスとして今後最も重要になると思っている。

(海外の活用)

- ・農地についての研究開発課題は、たまることは分かっているので、どういったものが使えるか、どれくらい効果があるかを整備していく必要がある。特にサイエンス的に、何をどのように使ったらどのくらいたまる等は新しくない。なので、私の専門の土壌学の分野よりも、むしろ地域的な自然の情報整理等が必要と思う。

実際に使用されるときに、どのくらいの範囲の物の動きであればネガティブになるか、遠いと、逆にエネルギーを消費して、コストがかかることはあるので、そうしたことが必要と思う。そうした取り組みを日本全国で検証していくことは大切と思う。

欧米でそうしたものがなされているとは聞かないが、バイオチャー単体でやっているというよりは、エネルギーを作り出すときに出てきたバイオチャーを、そのまま農地に炭素貯留として蓄え、かつ、生産性を上げるように活用していくようになされている。

- ・基本的にバイオマスの利用は、地産地消でやるべき。遠方から大量に持ってきて、それをバイオマス発電の燃料にする等よりも、その地域でどのくらいのポテンシャル、実際の利用可能性があるのか、上限をしっかり把握した上で、その地域で持続的に回すということが基本。
- ・場所によって使えるものとそうでないもの、輸送コストなどがかかってくるものなどあるため、いかにそこにある資源を開発するか、ということが重要。

また、バイオマス発電の原料が大量に海外から入ってきている話があったが、農業では、燃やした後に出てくる灰も含め、重金属などの有害物質が含まれていなければ、土の改良材として利用できる。ただし、バイオマス発電、特に有機物で出てくる炭、今のところ海外から輸入したもので作られた炭は、その国の炭素貯留にカウントされていないので、その意味でも、日本でできたものを使って土にためていく、その持続的な活用のための仕組みが必要だ。

(J-クレジット関連)

- ・J-クレジット等の最近の方法論として入れられたのがバイオ炭で、海外から輸入されて作ったものはカウントせず、認められない。以前IPCCで最近変わったのか、あるいは変わるはずだが、日本でバイオ炭の炭素貯留効果をカウントするときは、活動量を把握しなければならない。

例えば、現時点では木炭やもみ殻炭はどのくらい出てきて、どれくらい販売されたのか、どれくらい土の中に入ったか、ということのカウントできているが、地産地消の課題は、どれくらい作られ、施用されているのか、数字として出す必要がある。そうでないと、実際にたまっていたとしても、国としてどれほどたまったのか報告することができない。

(法律による障壁など)

- ・農地に関しては、耕作放棄地を使ってバイオ燃料を作る方法もあるが、それをできるのは法人と思う。個人の畑が耕作放棄されてしまった土地を法人が所有するところはハードルが高いので、耕作放棄地の活用は、やはり農地をいかにこれから造っていくか、その辺の法律の改定が必要と思う。

(ファンディング)

- ・モデル分析の視点からは、コンソーシアムのようなものをつくった上で、ポテンシャルとコストがどれぐらいなのかということを出せば、モデル分析に乗せることができる。ほかの工学的オプションについてはある程度追加もできるが、範囲が広く、オプションもかなり多いので、もう少し横断的に見て、それがどう
いう課題であるのかを含めて、コスト、ポテンシャルの研究が必要ではないかと思っている。
- ・バイオ炭関係では、エネルギーとも絡む。例えば、コストがかかるので、民間が入ってこない部分では、経産省などが家畜排せつ物のメタン発酵などのプラントを造って実証試験をしても、そうした実証試験でできたエネルギー、資材を、農業関係に利用しようとしたとき、省庁が違っていると融通が利かないことも出てくる。柔軟に対応できるような仕組みがある予算が必要。

3 | 森林におけるネガティブエミッション技術

森林伐採や焼失の影響で、世界の森林は減少傾向である。森林破壊を食い止めることで、世界で年間のヘクタール当たりでの炭素量で96～103 (Mg C / ha / y) の炭素が維持できるといわれている。森林での炭素固定量を増加させるためのネガティブエミッション技術として、植林や森林管理などが挙げられる。

植林によって期待される世界の炭素貯蔵量は、2.8-6.4 (Mg C / ha / y) 程度、既存の森林の適切な森林管理を行うことさらに0.2-2.5 (Mg C / ha / y) 程度である。森林の高齢化に伴い木材の炭素吸収率は年々減少していくため、適切に管理していく必要がある。¹

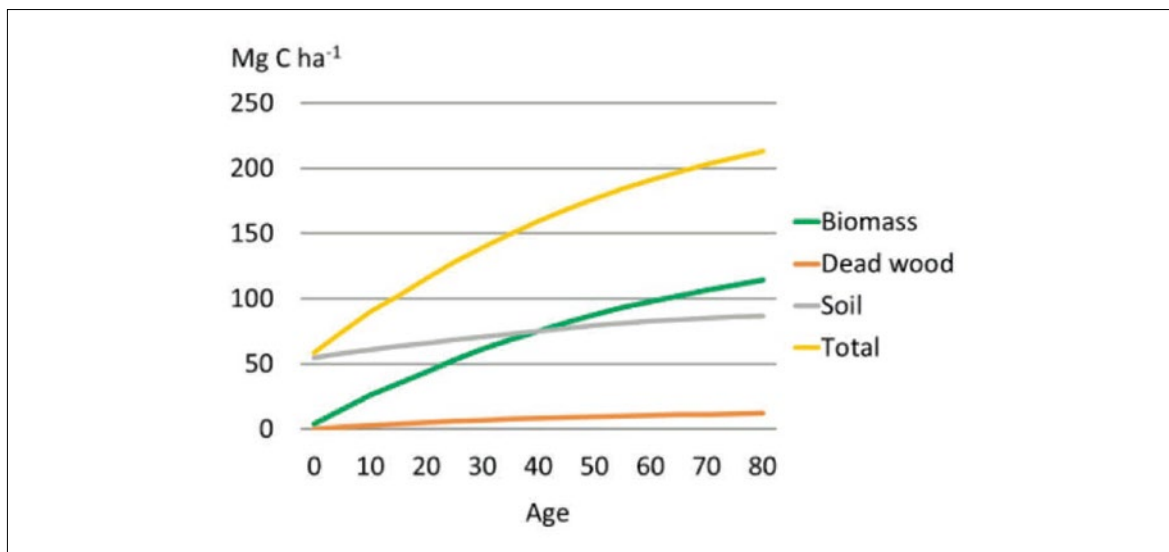


図3-1 植林による炭素固定量¹

(Smith et al., 2006.)

食糧との競合や生物多様性を損ねることのない安全な範囲で、森林管理を行うことにより、毎年約2.5Gt / y CO₂の炭素固定が可能であるされているが、最新の技術を用いることにより、約3.3 Gt / y CO₂まで可能であると算定されている。

1 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. , Chapter:3 Terrestrial Carbon Removal and Sequestration <https://doi.org/10.17226/25259>. (2022年2月アクセス)

3.1 海外の動向

3.1.1 研究開発動向¹

米国の全米アカデミーズの資料（Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda (2019) Chapter: 3）を参考に、現在推進されている研究開発動向は以下のとおりである。

表 3-1 基礎研究から実装に向けた課題等（森林）

	研究課題	推定予算 (\$M/y)	期間 (年)	備考
基礎研究	木材の保存	2.4	3	それぞれ80万ドルで3つの3年プロジェクト。米国合衆国森林局（USFS）、米国環境保護庁（EPA）、アメリカ国立科学財団（NSF）。
応用研究	森林資源増強プロジェクトのモニタリング	>5	>3	システム開発と運用。3年間で年間100万ドル。USFSのForest Inventory and Analysis (FIA) プログラム、7000万ドル／年の規模で運営。
実証	森林実証プロジェクト：伐採された木材の収集、処分、保存の増加。と森林の回復	4.5	3	使用後の木材製品の廃棄と収集するための実証プロジェクト（50万ドル／年）。木材を保存するためのプロジェクト（50万ドル／年）。森林修復の実証プロジェクト（50万ドル／年）。米国農務省（USDA）と米国環境保護庁（EPA）。3年間で3つのプロジェクト。年間150万ドル。
実装	燃料のためのバイオマスの伝統的な使用を減らすことのGHGと社会的影響に関する研究	1	3	USDAおよびNSF。年間で年間100万ドル。

全米アカデミーズ資料¹ から抜粋し、CRDSが作成

3.1.2 論文動向

Web of Scienceで農地での炭素固定に関する論文調査を行った。キーワードを『forest"carbon storage"』と設定したところ、米国、中国、ドイツが上位であり、日本は17位であった。（2021年11月実施）

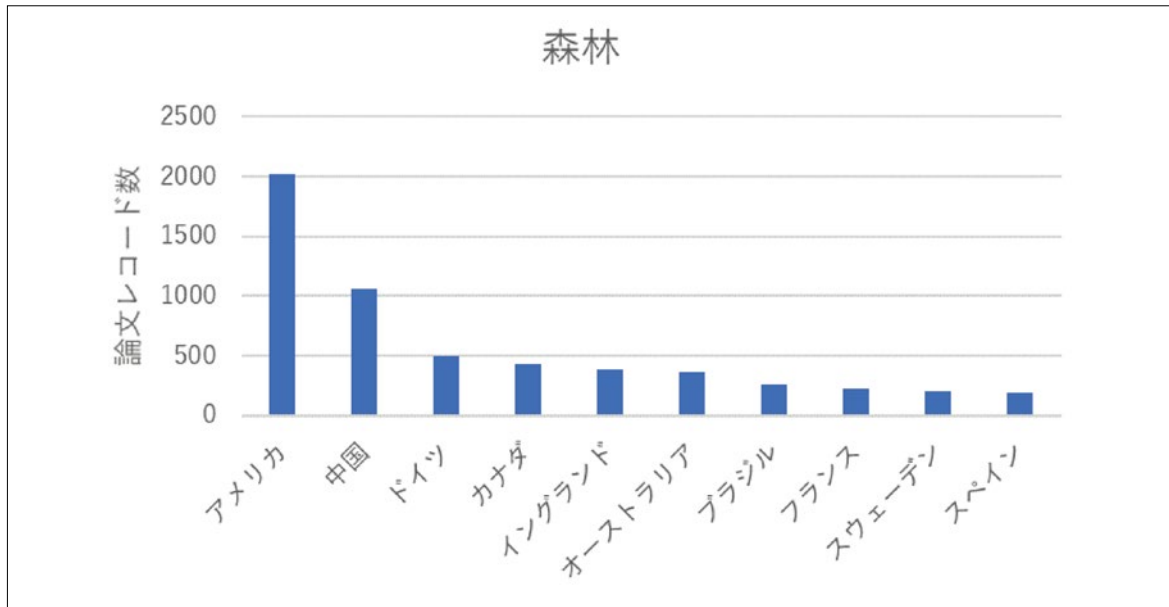


図3-2 森林炭素固定に関する各国の論文動向

図3-3にキーワード毎の論文数を示す。「炭素吸収源(forest"carbon sink")」と「モデリング(modeling)」というキーワードで近年論文数が増加傾向であることがわかる。「スマート林業 ("Smart forestry")」についても増加傾向であるものの、その割合は限定的であった。

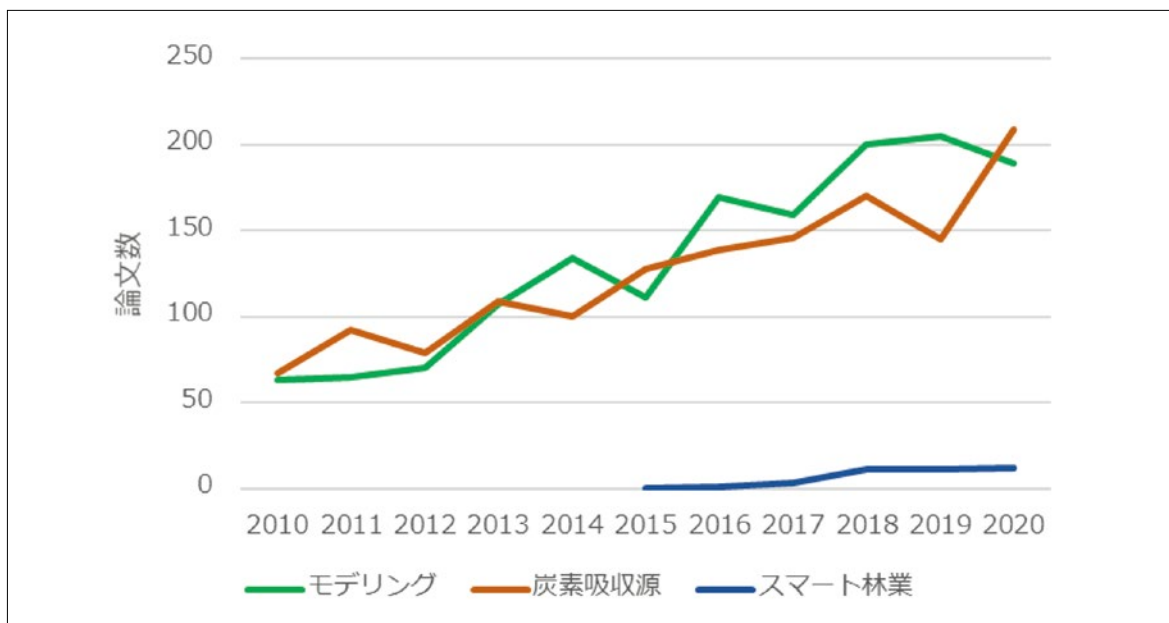


図3-3 森林炭素固定に関する論文数内訳

3.2 国内の動向

図3-4は森林に関連する日本の基本計画および戦略についてまとめたものである。2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略では、森林資源の循環利用、エリートツリーなどの新たな技術の開発等について明記されている。

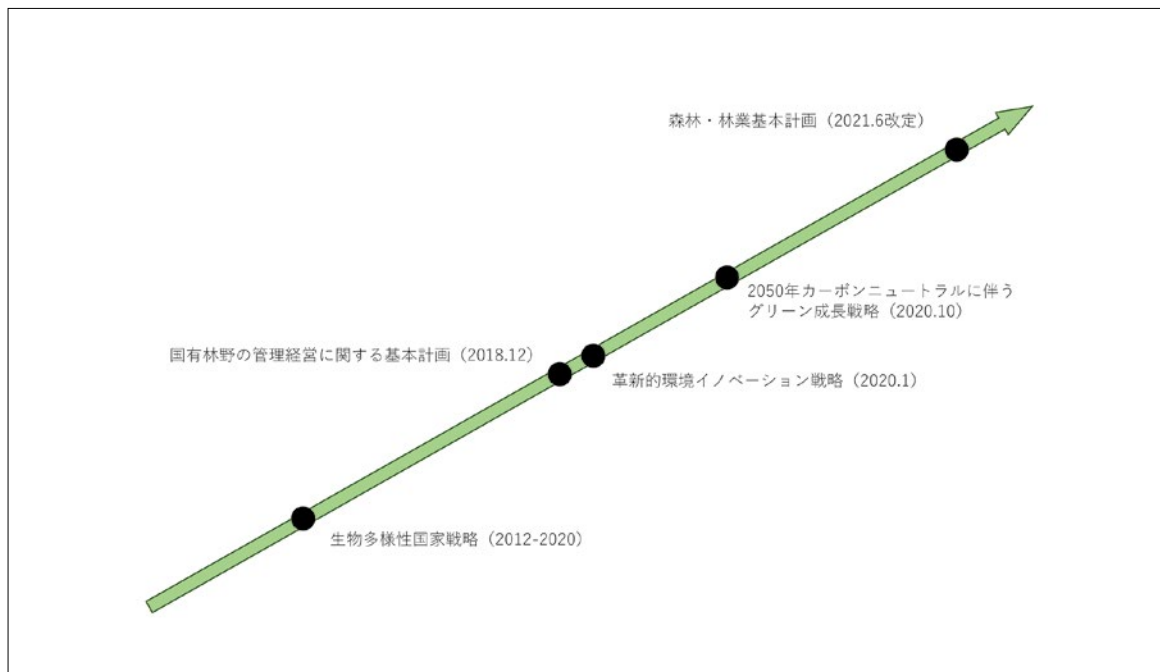
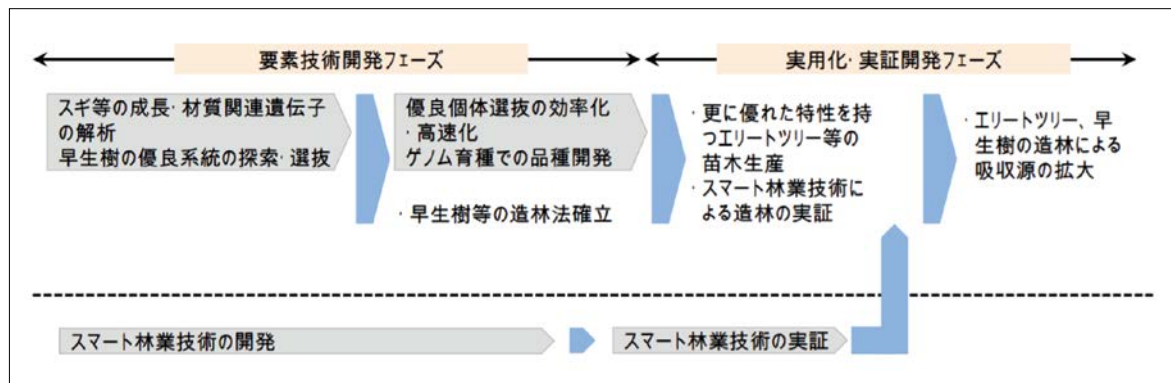


図3-4 日本の森林における基本計画および戦略

3.2.1 革新的環境イノベーション戦略による技術的な課題²

革新的環境イノベーション戦略では、2050年までに、森林において、大気中のCO₂の炭素を有機物として隔離。貯留するため、成長に優れた苗木の普及に向けた技術開発を行うとともに、既存技術と同等のコストとすることを目指すことが示されている。図3-5は、スマート林業の推進、早生樹・エリートツリーの開発・普及に関する、要素技術開発フェーズから実用化・実証開発フェーズに向けたロードマップである。技術開発課題および実施体制について、表3-2に示す。要素技術開発フェーズから実用化・実証開発フェーズに向けて、スマート林業技術の開発と実証を目的としている。

2 統合イノベーション戦略推進会議決定、2020.1,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf>, (2022年2月アクセス)

図3-5 スマート林業の推進、早生樹・エリートツリーの開発・普及²表3-2 技術開発課題と実施体制（スマート林業の推進、早生樹・エリートツリーの開発・普及）²

技術開発課題	実施体制
樹木選抜の効率化・高速化等の育種基盤技術の高度化により、成長に優れた早生樹やエリートツリーの品種等の効率的な開発を行うとともに、それらを活用した造林技術の確立に向けた実証を行う。	公的研究機関を中心に、様々な研究機関、大学、企業等との共同体制を構築する。

3.2.2 具体的な研究開発課題

〈科研費〉

研究課題統合検索（GRANTS）から、関連のある研究開発課題を抽出した。森林を炭素固定のために活用するための研究は、国内でも古くから盛んに行われてきた。個々の研究テーマを大別すると、①特定の品種や地域におけるもの、②モデル化、③スマート林業などである。

〈モデル化〉

検索に用いた用語は、「森林 炭素固定 モデル化」、「森林 炭素貯留 モデル化」、「農地 CO₂ 吸収 モデル化」などである（2021年11月実施）。森林の炭素固定に関するもののうち、モデル化に関連する国内での主要な研究開発課題を図3-6、表3-3に示す。2021年現在進行中の研究開発課題は、「針葉樹の炭素固定量予測モデルの精緻化に向けた光呼吸代謝の解明」、「竹林は地球温暖化を緩和しうるのか？：モウソウチク林の炭素固定量の算定と将来予測」などがあり、いずれも基盤研究（B）として進行中である。

森林・炭素固定														
	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	R2	R3	R4	R5	
1									基盤研究(B)					
2									基盤研究(B)					
3								研究活動スタート 支援						
4							若手研究(B)							
5					基盤研究(A)									
6				若手研究(B)										
7				基盤研究(A)										
8			基盤研究(C)											
9		基盤研究 (B)												
10	若手研究(B)													
11	基盤研究(C)													
12	基盤研究(B)													
13	ALCA													

図3-6 森林炭素固定のモデル化に関連するファンディング実績

表3-3 森林炭素固定のモデル化に関連する研究開発課題例

	課題名
1	針葉樹の炭素固定量予測モデルの精緻化に向けた光呼吸代謝の解明
2	竹林は地球温暖化を緩和しうるのか？：モウソウチク林の炭素固定量の算定と将来予測
3	孟宗竹林の拡大影響評価に向けた蒸散及び炭素固定量の時空間変動の解明
4	周北極域森林生態系の気候変動への応答：観測データ体系化と気候モデル高度化への応用
5	バイオチャーを用いた森林における炭素隔離効果と生態系応答機構の解明
6	マルチスケール対応型バイオマス物質循環プロセスコアモデルの開発
7	森林生態系の炭素代謝プロセス動態の時空間的変動機構の統合的解明と温暖化影響予測
8	気候変動にともなう多雪地ブナ林の動態と炭素固定量の変化
9	ギャップ・モザイク構造を考慮した成熟林の炭素吸収能力の再評価
10	環境面から見た木質バイオマスの有効利活用方法の提案－炭素固定評価手法の提案を通して
11	人工林における炭素固定能の樹木形質を利用した広域的評価
12	未利用木質バイオマスを用いた炭素貯留野菜によるCO2削減社会スキームの提案と評価
13	気孔形成転写因子と樹木の炭素固定作用の関係の解明

また、森林の炭素固定に関するもののうち、スマート林業に関連する国内での主要な研究開発課題を図3-7、表3-4に示す。2021年現在進行中の研究開発課題は、「空と陸の次世代レーザセンシング統合による立木の高精度な品等区分技術の開発」や「ドローンによるスマート林業の為の全自動森林調査法の確立」など、どちらも基盤研究（B）として進行中である。

今後の具体的な研究開発の取り組みとして、森林での炭素固定量を、より正確に予測するため、気候変動が進んだ段階での気候パラメータの変化変動によるCO2吸収量の変化を予測することが必要となることが予

測される。不確定性の評価を行いつつも、政策や土地利用の影響も考慮した予測が必要となる。

また、生物多様性の側面やLCA評価を同時に行っていくことは重要である。ネットゼロエミッション目標値に対する森林・木材産業の貢献度や有効性の評価が必要である。

土地利用変化、政策、気候変動の影響を総合的に検討することができる炭素シミュレータの開発が、日本の土地利用や森林管理を促進させると考えられる。

〈スマート林業〉

検索に用いた用語は、「スマート林業」、「森林 DX」などである（2021年11月実施）。森林の炭素固定に関するもののうち、スマート林業に関連する国内での主要な研究開発課題を図3-7、表3-4に示す。2021年現在進行中の研究開発課題は、「空と陸の次世代レーザセンシング統合による立木の高精度な品等区分技術の開発」、「ドローンによるスマート林業の為に全自動森林調査法の確立」などがある。なお、後者は研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）のトライアウトとして進行中である。

スマート林業

	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	R2	R3	R4	R5
1										基盤研究(B)			
2										A-STEP			
3							基盤研究(B)						
4		挑戦的萌芽研究											

図3-7 森林炭素固定のスマート林業に関連するファンディング実績

表3-4 森林炭素固定のスマート林業に関連する研究開発課題例

	課題名
1	空と陸の次世代レーザセンシング統合による立木の高精度な品等区分技術の開発
2	ドローンによるスマート林業の為に全自動森林調査法の確立
3	次世代レーザセンシングによる高精度な広葉樹天然林の樹種別資源量の算定方法の開発
4	我が国における持続的な木質バイオマス利用の最適化に向けたシステムモデルの構築

木材利用に関する今後の課題としては、伐採木材製品（HWP）による長期蓄積、木材の新規利用方法の可能性の追求などの課題が残されている。建築、家具、土木、その他の新素材など、よりリアリティのある将来シナリオを検討していく必要がある。

スマート林業の大規模実証や木材利用に際し、工学的オプションを適切に組み合わせることにより、森林でのネガティブエミッション技術が促進されることが考えられる。

(SATREPS)

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)での森林に関連する課題は、以下の通りである³。

表 3-5 進行中の SATREPS 関連採択課題例（森林）

課題名	年度	共同研究相手国
環境・エネルギー（地球規模の環境課題）		
気候変動適応へ向けた森林遺伝資源の利用と管理による熱帯林強靱性の創出	令和3年度（2021年度）	インドネシア
天然ゴムを用いるグローバル炭素循環プロセスの科学技術イノベーション	令和3年度（2021年度）	ベトナム
アンデス-アマゾンにおける山地森林生態系保全のための統合型森林管理システムモデルの構築	令和2年度（2020年度）	ペルー
サラワク州の保護区における熱帯雨林の生物多様性多目的利用のための活用システム開発	令和元年度（2019年度）	マレーシア
在来知と生態学的手法の統合による革新的な森林資源マネジメントの共創	平成29年度（2017年度）	カルメーン
生物資源		
ゴムノキ葉枯れ病防除のための複合的技術開発	令和2年度（2020年度）	インドネシア
難防除病害管理技術の創出によるバナナ・カカオの持続的生産体制の確立	令和2年度（2020年度）	フィリピン
遊牧民伝承に基づくモンゴル草原植物資源の有効活用による草地回復	令和元年度（2019年度）	モンゴル

3.3 社会・経済的な課題

・社会的な課題

森林所有者の高齢化が進んできていると同時に、民有林の所有者が不明なところが多くなっている。森林の情報を見える化し、情報を共有できる仕組みが必要である。また、エリートツリーなどを含めて、どのような品種を今後植える必要があるかについては、「早く成長するだけでいいのか」などのコンセンサスは常に求められている。

また、再造林については、マーケットとしての需要と労働力があるかどうかと同時に、国土保全の問題が生じるかについて検討する必要がある。

・経済的な課題

日本の林業における GDP は、約 2500 億円で全体の約 0.04% である。ドイツでは林業分野での GDP が全体の 5% を占めていることから、森林資源の産業構造に大きな開きがある。欧州では、森林所有者が積極的

3 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）HP, <https://www.jst.go.jp/global/kadai/list.html>, (2022 年 2 月アクセス)

に参加できるよう、様々なインセンティブが得られる制度がある。下記はその一例である。

表 3-6 欧州での森林所有者に対するインセンティブの例

国／団体	制度の名称	概要
フィンランド	メツォプログラム (Forest Biodiversity Programme for Southern Finland (METSO))	生物多様性のために土地を利用する場合、本プログラムから森林所有者に対して対価が支払われる。金額は、土地の価値と利用期間によって決定される。
クロアチア	森林管理計画	400,000ユーロを超える収入のあるすべての法人もしくは個人は、総収入の0.0265%を税金として、森林生態系サービスのために支払う。これが森林所有者に分配される。
フランス	低炭素ラベル (Label bas-carbone)	フランスの低炭素ラベルは、温室効果ガスの削減効果に応じて、プロジェクト毎に環境への効果や有効性を付与する制度。この認証制度は、投資の有効性などを保証するものと考えられており、企業や自治体からの資金提供が期待できる。
ポルトガル	森林生態系サービス (Forest Ecosystem Services (FES))	ユーカリのプランテーションの再生、自生種の植栽、非木材製品の開発を含むプロジェクトに対しての資金提供が行われる。
ドイツ	連邦水管理法 (Federal water legislation)	森林所有者は、地下水保護地域での管理制限に対する補償金を受け取ることができる。
世界自然保護基金 (WWF)	グリーンハートコルクプロジェクト (The green heart of cork initiative (GHOC))	コルクの森林と、それに伴う生態系サービスを保護するためのプロジェクト。炭素貯留、浸食防止なども含まれる。コカ・コーラポルトガルなどを含む、3つの民間企業によって支援されている。

・法的・規制に関する課題

森林を利用する際、行政の手続きが国、県、市町村などでそれぞれ異なっていたりなど、その煩雑さが障壁の一つともなっている。また、耕作放棄地に新たに木を植えることは、農地法との兼ね合いの中で問題となるのかどうか等、国の政策として指針を出し、指針を示せるかが課題である。

3.4 具体的な取組事例

・レーザーセンシングによるスマート精密林業コンソーシアム⁴

産学官の具体的な取り組みとして、レーザーセンシングによるスマート精密林業コンソーシアムがある。森林管理・供給を最適化・省力化、既コスト大幅削減、生産量向上で、木材生産の安定供給に寄与する研究開発が求められる中、航空機・ドローン・バックパックのレーザーセンシング情報をかけ合わせた統合技術によるシステム化、データベース化の技術開発に取り組んでいる。

このコンソーシアムでは、4つのフェイズに分け、それぞれの実施目標を定めている。表3-7はそれぞれのフェーズの概要である。

4 レーザーセンシングによるスマート精密林業コンソーシアム HP
(<https://www.shinshu-u.ac.jp/zukan/communication/forestry2017.html>) 2021年12月22日アクセス

表3-7 4つのフェイズ

フェイズ	概要	目標
第1フェイズ	3つのレーザーセンシング（LS）情報の統合	航空機による空からのLSによる「高精度の森林資源情報」を活用。ドローンによる空からのLS「森林の見回りと森林調査による情報」、調査の省力化や間伐木の確認など、資源情報の更新。「地上での収穫調査情報（木材の曲がりなどの品質、素材生産量など）の算定、計測。
第2フェイズ	高精度情報の整備と運用体制の確立	資源管理は4次元情報（多時期計測により時間軸も加味した情報）で一元管理。施業履歴、更新情報を併せて管理し、「精密林業」としてデータを配信可能にする。
第3フェイズ	収穫と素材生産	伐採などのアシストと生産量の自動集計など、「収穫情報の見える化」の実現。履歴管理と次回施業の指標の作成から適切な施業時期の算定を可能にする。
第4フェイズ	要素技術を掛け合わせた統合技術の確立	現場で使えるデータの体制づくりと展開。国際競争力のある地域イノベーションを目指したスマート精密林業を先導する。

3.5 CRDS主催のワークショップで議論された課題のまとめ

バイオマスを介した大気中CO₂の吸収とその長期の固定に注目し、国内外の研究開発動向や今後に向けた挑戦的課題を俯瞰的に整理するため、2021年度に2回のワークショップを開催した。ワークショップの具体的なプログラム、趣旨、および議論の詳細についてはAppendixに記載している。本節では、ワークショップで議論された議論について、森林に関連する部分についてを、キーワードごとに整理して以下に示す。

（生物多様性の効果）

- ・植林地では単位収量当たりで杉が最も吸収効率が高い。天然林の場合、人が植えて管理し、操業的に回している人工林と、天然に生えている天然林の2種類に分けられる。天然林は、種の多様性が高い森林のほうが吸収効率は比較的良好という研究成果も出ている。しかし、天然林の問題は、林齢という概念がなく、様々な林齢の林が同時に存在しており、樹木個体が存在している。結局、例えば台風のような災害が森に起きた場合、木が倒れて、これまで稼いできた炭素が放出側に回ってしまう。実際、吸収側か放出側かは、現在、計算しようとしているシミュレーションの中で実態に近づけたい。

（GHG評価のばらつき）

- ・森林については、将来のポテンシャルの最大と最小を現在のプロジェクトで計算、算定することを開始したところ。森林の場合は、政策に関わる人工林もあるので、政策的なパッケージや、気候変動に伴う気候変化シナリや土地利用の変化シナリオが絡んだ複雑なシミュレーションになる。加えて、社会経済的に伐採木材製品（HWP）について将来需要の伸びによっても変わってくる。

（気候変動の影響）

- ・今回やろうとしている吸排出係数は、気候変動が起きたときにレスポンスの変化も含めた吸排出係数計算を、種類ごとに行うもの。今までは一本の線の状態で例えば、杉ばかり。しかし、その気候変化に対する反応も含めて、北海道と九州では気候も品種も違う。それらを全て含めた上で気候変動へのレスポ

ス解析を行い、吸排出係数を新たに計算したい。

- ・現在我々が持っているデータは、多様性基礎調査などのデータで、5年に1度ずつ、全国4キロ格子の格子点においてモニタリング調査を継続しており、その変化した値を使って基本的なカーブを描く。そこにいかに気候変動の変化を予測で入れるかが問題になる。なかなか難しいが、現時点でできることはやっというというのが今回のプロジェクト。

（「長期」の定義）

- ・どのくらいが「長期」かの質問を受ける。ジオロジカルに何千年何万年ためる必要はなく、大気中の例えばCO₂濃度を下げることが目標であれば、200年後、300年後の、世界人口が増えなくなり人為排出が増えなくなるところまでの時間スケール。つまり、数百年ぐらい貯留することができれば、それは長期と思っている。逆に、数年や数十年、一時的に貯留しても戻るのであれば、2050年頃には全く意味がない。どこまで長期かを示すこと、さらに、長期的に大気中のCO₂から隔離するためには、炭素プール中に長期的に炭素がたまらなければならない。
森林の地上部だけを見ては足りず、森林生態系の土壌や地上部、地下バイオマスだけを見ていても足りない。オンサイトとオフサイト全てを見て、トータルとして大気とのやり取りの上で、大気以外の炭素プールにどれだけ長期的に炭素を保持しておけるかが重要。そうした各生態系、陸も海も関係なしで、どれだけ系全体としての大気とのやり取りが長期的になされているか、特にオフサイトのほうは、全く研究されていないと思う。その辺がサイエンスとして今後最も重要になると思っている。

（法律による障壁など）

- ・耕作放棄地に木を植えることが農地法に引っかかるのか等の問題を国、政策としてどうするかが、ネットゼロの社会を達成するための試金石になっている。

（ファンディング）

- ・話をしたプロジェクトは、当森林総研の交付金プロジェクト。ある程度成果のめどが立たないと公的資金は応募しづらい。昨今は森林だけでのプロジェクトは、認められづらい。また、ネガティブエミッションだと、科研のネタにはなりづらいと思う。むしろ、例えば、農地や沿岸域などと組んだ上で、例えば環境省の推進費等に応募する、というのはあるかもしれない。

4 | 海洋におけるネガティブエミッション技術

本章では、海洋におけるネガティブエミッション技術として、一般に沿岸部ブルーカーボンと呼ばれている海藻・海草、マングローブ、塩性湿地についてまとめる。

世界の炭素固定量はそれぞれ、海藻・海草が48～112 Mt / y C、マングローブが31～34 Mt / y C、塩性湿地で5～87 Mt / y Cとされている。ただし、沿岸湿地の開発および修復を行うことで、2倍以上の炭素固定が可能となることが示されている。気候変動の影響を考慮しながら適切なアプローチをしていくことが求められている。

気候変動などの影響は、今後100年の間に海面上昇、土砂災害、気温上昇、光害、塩害など、様々な形で現れてくると考えられており、これらへの対策は急務である。全米アカデミーズ¹ではこれらへの取り組みとして、5つのアプローチを提案している。

- 1 沿岸部での湿地や生態系の管理の強化
- 2 荒廃している沿岸部の修復
- 3 浸食された海岸部の再開発と修復
- 4 海面上昇への対応
- 5 炭素固定能力の強化

人々が生態系から得られる恩恵は、漁業や観光業の活性化、水質改善など様々であるが、一方で沿岸部ブルーカーボンを進める上でのリスクも指摘されている。表4-1に示すようにこれらのメリットとデメリットをそれぞれ考慮し、安全かつ安価に炭素固定量を増加させることができるように検討していく必要がある。

表4-1 ブルーカーボンの価値とリスク

ブルーカーボンの価値	ブルーカーボンのリスク
原材料・食糧の供給	食糧との競合
自然災害抑制	土地の制約
浸食の抑制	海岸線の変化
水質汚染の抑制	汚染物質の蓄積、濃縮
漁業の維持	漁業権の侵害
有機物の蓄積	生態系への影響
景観・文化の維持	景観の阻害

1 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. , Chapter:2 Coastal Blue Carbon
<https://doi.org/10.17226/25259>. (2022年2月アクセス)

4.1 海外の動向

4.1.1 米国での研究開発課題

ブルーカーボンに関する具体的な研究開発課題を以下ものが挙げられている。

- ➡ 沿岸部の土壌における有機炭素（OC）密度の増加
- ➡ 既存の湿地での侵食を遅らせる
- ➡ 海面上昇が懸念されている地域での、湿地の拡大
- ➡ 鉱物堆積物の利用
- ➡ 工学的アプローチによる沿岸部の開発・復興
- ➡ バイオ炭や木材のような、長期的かつ高濃度で土壌へ炭素固定が可能な技術

また表4-2は上記に関する研究開発課題とその予算規模等を示す。

表4-2 基礎研究から実装に向けた課題等（ブルーカーボン）

	研究課題	推定予算 (\$M/y)	期間 (年)	備考
基礎研究	沿岸生態系をネガティブエミッション技術として活用するための基礎研究	6	5-10	国立科学財団（NSF）環境生物学部門（DEB）、NSF 海洋科学部門（OCE）、米国合衆国エネルギー省（DOE）、米国航空宇宙局（NASA）、米国陸軍工兵司令部（USACE）、R&D 業界、建設業界（A&E）、その他財団等。\$200 万／年（5 年、10 年）。
応用研究	気候変動を考慮した沿岸部のマッピング	2	20	NASA、DOE、米国海洋大気庁（NOAA）、米国合衆国森林局（USFS）、米国合衆国環境保護庁（EPA）等。 \$200 万／年（塩性湿地:\$150 万、海草:\$50 万）。
	各地での沿岸部開発や科学的知見の統合	2	20	NSF、EPA、米国合衆国魚類野生生物局（USFWS）、USACE、NOAA、州政府機関、省庁、学界、非政府組織（NGO）、作業部会等。 \$200 万／年（20 年）。
実証	炭素固定のための実証プロジェクトやフィールド実験	10	20	NSF（DEB）、NOAA、USACE、DOE、R & D、A & E、その他財団等。\$1000 万／年（20 年）。
実装	炭素の吸収・固定に関する科学的および実験的知見を統合するためのネットワーク形成	40	20	NOAA Sea Grant、NSF、DOE、NASA、USFWS、USACE、州政府機関、その他財団等。 \$3000 万／年（20 年）。
	沿岸部ブルーカーボンの社会実装（社会科学、経済、政策研究）	5	10	NSF、NOAA、EPA、州政府機関、財団。 \$500 万／年（10 年）。

全米アカデミーズの資料¹を元に CRDS が作成

米国では、基礎研究から実装フェーズに向けた研究開発課題がそれぞれ示されており、それぞれ政府機関や財団等から資金提供を受け、各プロジェクトが進められている。

4.1.2 欧州での研究開発

海洋でのネガティブエミッション技術に関するプロジェクトとして、HORIZON2020の中でOceanNETsが実施されている。ここでは海洋ベースのネガティブエミッションの実現可能性とインパクト調査が目的である。

表 4-3 欧州でのネガティブエミッション技術に関するプロジェクト（海域）

	研究課題	予算 (€)	期間 (年)	備考
欧州	Ocean-based technologies to remove carbon dioxide : CO ₂ を除去する海洋ベースの技術	7,310,895	5	Horizon2020のOceanNETsプロジェクト。 期間は2020年1月から2024年3月。主たる研究機関はドイツのライプニッツ海洋科学研究所。 他、ノルウェーのベルゲン大学など。

4.1.3 論文動向

Web of Scienceでブルーカーボンに関する論文調査を行った。キーワードを『"blue carbon"』としたところ、米国、オーストラリア、中国が上位であり、日本は6位であった。（2021年11月実施）

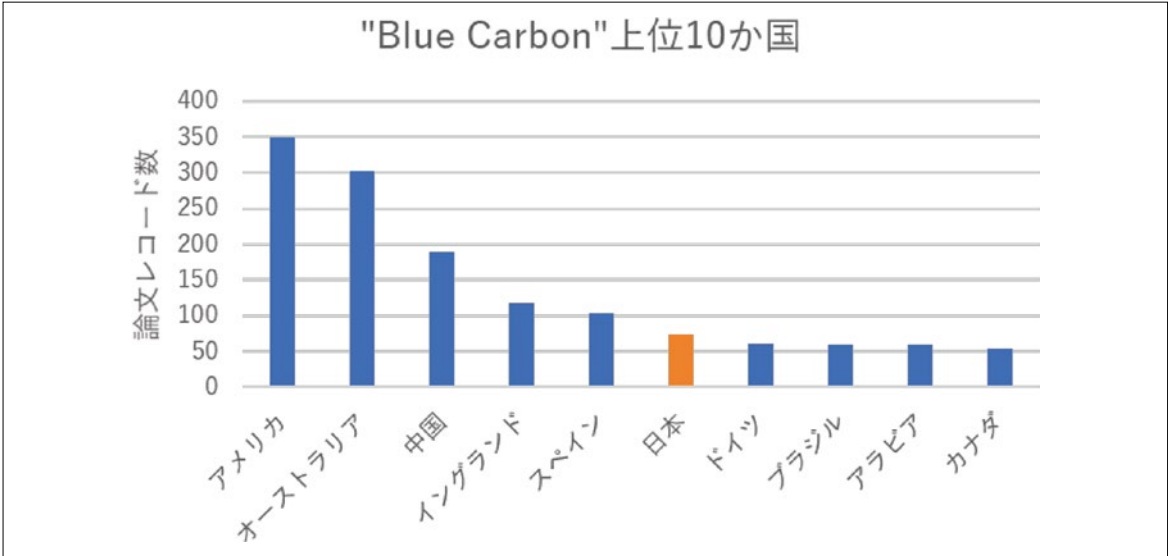


図 4-1 ブルーカーボン各国の論文動向

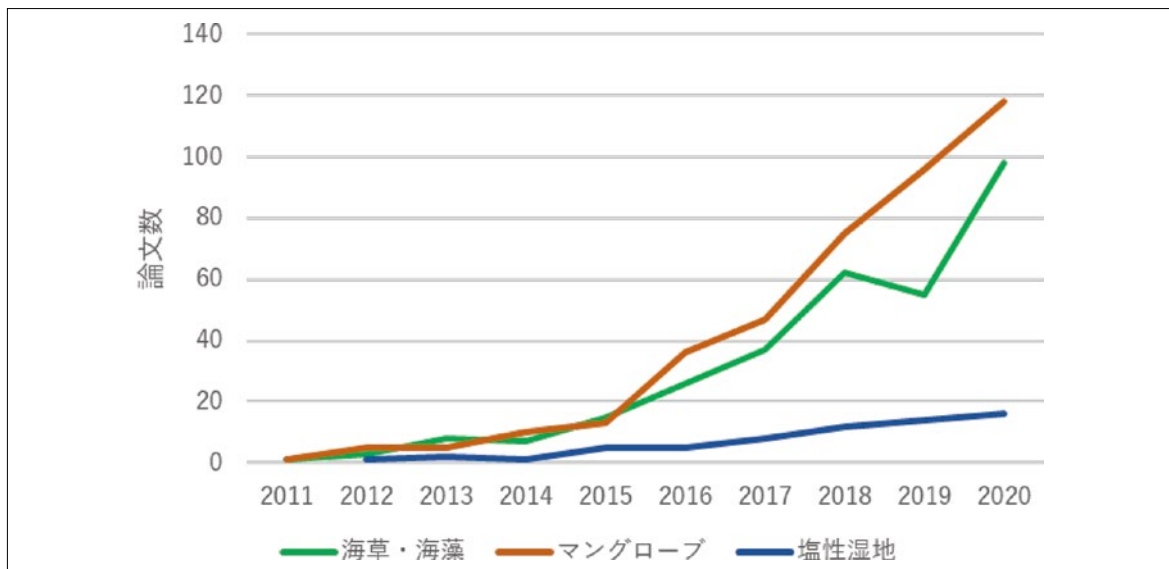


図4-2 ブルーカーボン論文内訳

ブルーカーボンに関連する論文について、海草・海藻、マングローブ、塩性湿地の3つのキーワードに分けたところ、海藻・海草に関する研究論文が最も多いことが分かった。マングローブについても近年上昇傾向がみられており、直近10年では、3つのキーワードはすべて上昇傾向である。

4.2 国内の動向

図4-3は海洋に関連する日本の基本計画および戦略についてまとめたものである。海洋生物多様性保全戦略にはじまり、海洋基本計画などでその維持管理について方針が定められてきた。2020年に発表された革新的環境イノベーション戦略および2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略では、海洋での炭素固定を促進させるための計画についても示されている。

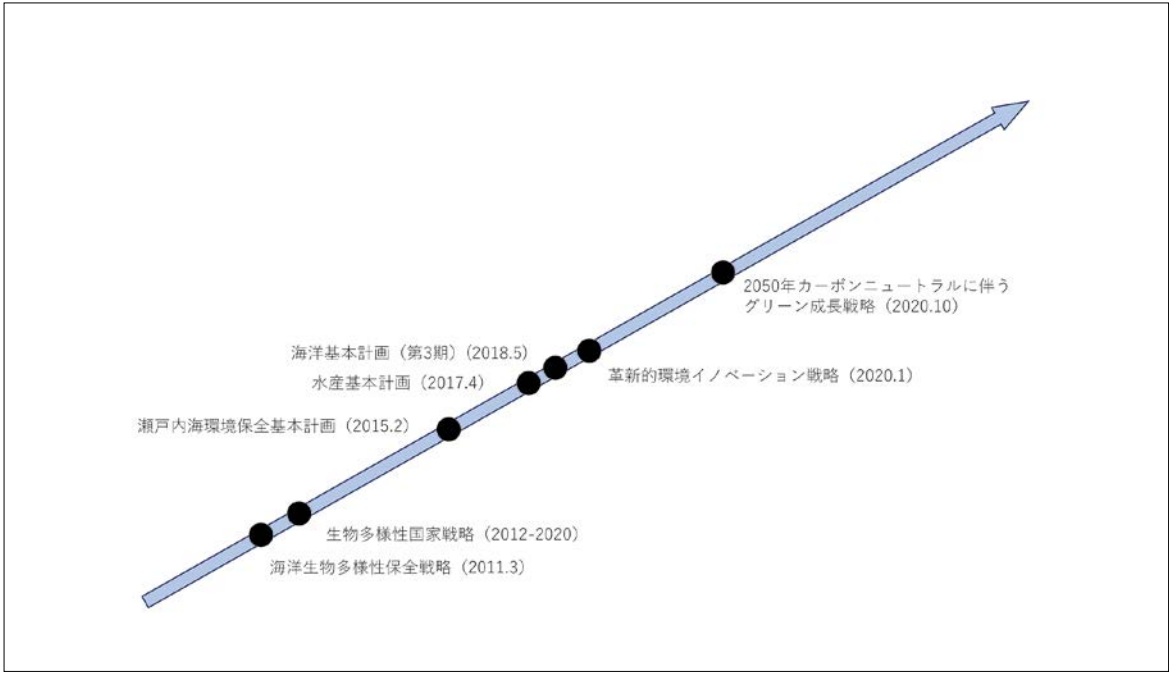


図4-3 日本の海洋における基本計画および戦略

4.2.1 革新的環境イノベーション戦略による技術的な課題²

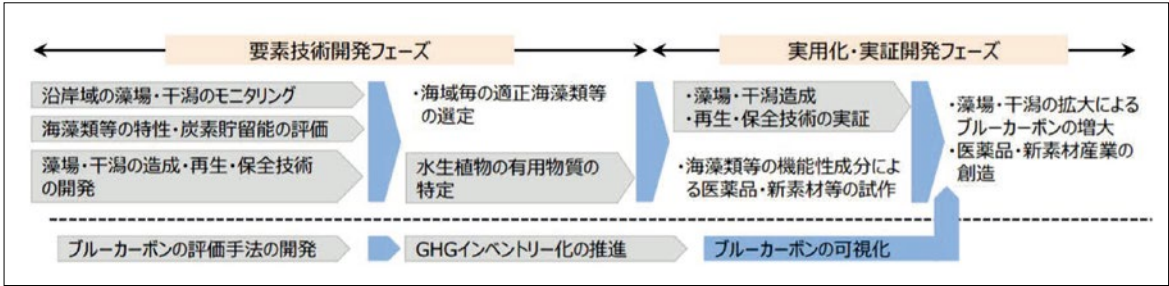


図4-4 革新的環境イノベーション戦略（ブルーカーボン）の概要²

革新的環境イノベーション戦略では、2050年までに、海洋（藻場・干潟）に大気中のCO₂の炭素を有機物として隔離・貯留する藻場・干潟等による炭素貯留技術（ブルーカーボン）を確立し、産業持続可能なコストでの実用化を目指すことが示されている。図4-4は、ブルーカーボンのロードマップである。要素技術フェーズの前半は、藻場・干潟の造成・再生・保全技術の開発、水生植物の有用物質の特定、後半は藻場・干潟の造成・再生・保全技術の実証、海藻類等による医薬品・新素材等の試作などが挙げられ、期間はそれぞれ前半が2021～2024年、後半は2025～2030年を目標としている。また、実用化フェーズでは、藻場・

2 統合イノベーション戦略推進会議決定、2020.1,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf>, (2022年2月アクセス)

干潟の拡大によるブルーカーボンの増大、医薬品・新素材産業の創造などを含めて、2030～2050年ごろを目標としている。

表4-4に、ブルーカーボンの技術開発課題と実施体制を示す。要素技術フェーズから、実用化・実証化フェーズに進めていくためには、いくつかの技術開発課題がある。それぞれの課題において、政府、大学、メーカー、企業、各自治体、NPO団体や漁業協同組合など、広く連携をしながら進めていく必要がある。

表4-4 ブルーカーボンの技術開発課題と実施体制²

技術開発課題	実施体制
バイオ技術の活用等により、効率良く海中のCO ₂ を吸収する海藻類等の探索と高度な増養殖技術の開発を進める。	高度な増養殖技術や新素材の開発には、ベンチャー企業等も巻き込みつつ、国外での大規模実証、ビジネス展開も踏まえ、大学、メーカー、企業が共同した実施体制を構築する。
海藻類等を新素材・資材として活用するための技術開発を民間主導でナショナルプロジェクトの下に行う。	藻場・干潟の整備はNPOや漁業協同組合等の取組と連携しつつ、地方自治体、民間企業等で実施する。
藻場・干潟等におけるCO ₂ 吸収量推計手法の開発を行う。	CO ₂ 吸収量の推計手法は、学識経験者、関係省庁等により検討する。
藻場・干潟造成・再生・保全技術の開発・実証を進める。	藻場・干潟造成・再生・保全技術の開発・実証は、民間企業等が実施する。

4.2.2 具体的な研究開発課題

(科研費)

研究課題統合検索（GRANTS）から、関連のある研究開発課題を抽出した。

〈海藻・海草〉

検索に用いた用語は、「海洋 炭素固定 海草」、「海洋 炭素固定 海藻」、「海洋 炭素貯留 海草」「海洋 炭素貯留 海藻」、「海洋 CO₂吸収」、「ブルーカーボン」などである（2021年11月実施）。海藻・海草について、国内での主要な研究開発課題を図4-5、表4-5に示す。

	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	R2	R3	R4	R5	R6
1										基盤研究B				
2										若手研究				
3										基盤研究C				
4										基盤研究A				
5										基盤研究B				
6										基盤研究C				
7							挑戦的萌芽研究							
8			基盤研究B											
9	挑戦的萌芽研究													

図4-5 海藻・海草のファンディング実績

表 4-5 海藻・海草の研究開発課題例

	課題名
1	大都市内湾における環境管理の理念構築に資するブルーカーボン像の提示
2	海草の形態変動のモデル化と海草藻場炭素動態モデルへの発展
3	海洋への炭素固定量増加に寄与する海草藻類の難分解成分蓄積の環境応答性の解明
4	食物網構造とCO ₂ ガス交換のカップリングによる浅海域における炭素循環の統一的理解
5	ブルーカーボン生態系からの有機炭素の外洋移出・隔離過程の実証技術開発とモデル化
6	ブルーカーボン生態系モデルの構築と都市浅海域における炭素貯留・隔離機能の解明
7	脂肪酸バイオマーカーを用いた海草起源の埋没する炭素の検出および定量化手法開発
8	地球環境変動に連動する藻場生態系の炭素固定機能とデトリタス連鎖系の応答
9	光学新技術による海底の炭素貯留過程の評価：海草の地下部生産と分解の非破壊的測定

海洋での炭素固定に関する研究として、海藻・海草に関する研究は、古くから盛んに行われており、特に直近5年でも増加傾向である。2021年現在進行中の研究開発課題は、大都市湾での検討、海藻・海草の炭素動態モデルの検討、環境応答性の解明や実証にむけた技術開発などである。平成30年度からは、基盤研究A「食物網構造とCO₂ガス交換のカップリングによる浅海域における炭素循環の統一的理解」が約4400万円の規模で進行中である。

〈マングローブ〉

検索に用いた用語は、「海洋 炭素固定 マングローブ」、「海洋 炭素貯留 マングローブ」、「海洋 CO₂ 吸収 マングローブ」、「ブルーカーボン マングローブ」などである（2021年11月実施）。マングローブについて、国内での主要な研究開発課題を図4-6、表4-6に示す。

	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
1											国際共同研究加速基金					
2											特別研究員奨励費					
3										基盤研究C						
4							特別研究員奨励費									
5					挑戦的萌芽研究											
6			基盤研究A													
7		挑戦的萌芽研究														
8		基盤研究B														
9		特別研究員奨励費														
10	基盤研究A															

図 4-6 マングローブのファンディング実績

表4-6 マングローブの研究開発課題例

	課題名
1	荒廃地へのマングローブの植林は生態系炭素貯留量をどのくらい増大させるか
2	マングローブ林内のブルーカーボン生態系モデルの構築と長期的な炭素隔離量の評価
3	マングローブ植林による炭素貯留メカニズム解明及びポテンシャル評価
4	マングローブ林内土壌への有機炭素貯留における新メカニズムの提唱
5	マングローブ林のミッシング炭素 - 分解呼吸によるCO ₂ は何処に行く? -
6	コーラル・トライアングル超多島域におけるブルーカーボン動態と地球環境影響予測
7	マングローブ林の炭素循環 - 土壌生態学の創生 -
8	マングローブ再生林のCO ₂ 固定能モデルと有機炭素供給力の定量評価に関する研究
9	生態・水文・地球化学的観測とモデリングによる沿岸生態系のブルーカーボン動態解析
10	立地環境の異なるマングローブ林の炭素蓄積過程の解明と衛星技術によるその高精度把握

マングローブに関する研究は、古くから盛んに行われており、炭素固定に関する研究についてもこれまで検討されてきた。2021年現在進行中の研究開発課題は、マングローブ林での生態系モデルの構築と長期的な炭素隔離量の評価や、炭素貯留メカニズム解明及びポテンシャル評価などである。令和3年度からは、国際研究加速基金として「荒廃地へのマングローブの植林は生態系炭素貯留量をどのくらい増大させるか」が約1900万円の規模で進行中である。

〈塩性湿地〉

検索に用いた用語は、「海洋 炭素固定 塩性湿地」、「海洋 炭素固定 干潟」、「海洋 炭素貯留 塩性湿地」、「海洋 CO₂吸収 塩性湿地」、「ブルーカーボン 塩性湿地」などである（2021年11月実施）。マングローブについて、国内での主要な研究開発課題を図4-7、表4-7に示す。

	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	R2	R3	R4
1									基盤研究C			
2					若手研究B							
3					若手研究B							
4				基盤研究C								
5		若手研究B										
6	基盤研究C											

図4-7 マングローブのファンディング実績

表 4-7 マングローブの研究開発課題例

	課題名
1	炭素固定機能の向上に向けた沿岸域の生態系相互作用の解明
2	物質循環を駆動する河口干潟の炭素固定機能の動態解明
3	都市沿岸域に存在する人工湿地のCO ₂ 収支における基礎生産者の寄与の定量評価
4	都市の人工塩性湿地におけるブルーカーボン機能の定量的評価に関する研究
5	河口干潟における埋没する炭素固定機能の評価
6	都市型人工塩性湿地における生物圏と環境圏間の炭素フラックスの実態と機序解明研究

塩性湿地に関する研究は、直近10年では主に基盤Cや若手研究などで進められてきた。2021年現在進行中の研究開発課題は、基盤研究Cとして「炭素固定機能の向上に向けた沿岸域の生態系相互作用の解明」が約430万円の規模で進行中である。

(SATREPS)

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）での海洋に関連する課題は、以下の通りである³。

表 4-8 進行中の SATREPS 関連採択課題例（海洋）³

課題名	年度	共同研究相手国
環境・エネルギー（地球規模の環境課題）		
アラル海地域における水利用効率と塩害の制御に向けた気候にレジリエントな革新的技術開発	令和2年度（2020年度）	ウズベキスタン
ジブチにおける広域緑化ポテンシャル評価に基づいた発展的・持続可能水資源管理技術確立に関する研究	平成30年度（2018年度）	ジブチ
コーラル・トライアングルにおけるブルーカーボン生態系とその多面的サービスの包括的評価と保全戦略	平成28年度（2016年度）	フィリピン、インドネシア
環境・エネルギー（低炭素社会）		
水処理システムと湿式抽出法による藻類の高効率燃料化の融合と実用化	平成27年度（2015年度）	南アフリカ
生物資源		
ナイルの源流エチオピア・タナ湖で過剰繁茂する水草バイオマスの管理手法と有効利用プロセスの確立	令和2年度（2020年度）	エチオピア
世界戦略魚の作出を目指したタイ原産魚介類の家魚化と養魚法の構築	平成30年度（2018年度）	タイ

3 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）HP, <https://www.jst.go.jp/global/kadai/list.html>, (2022年2月アクセス)

チリにおける持続可能な沿岸漁業及び養殖に資する赤潮早期予測システムの構築と運用	平成 29 年度（2017 年度）	チリ
マリカルチャビッグデータの生成・分析による水産資源の持続可能な生産と安定供給の実現	平成 28 年度（2016 年度）	インドネシア
微細藻類の大量培養技術の確立による持続可能な熱帯水産資源生産システムの構築	平成 27 年度（2015 年度）	マレーシア

4.2.3 今後期待される研究開発

気候変動への対応が急務であり、実装フェーズに向けた工学的なアプローチも積極的に取り入れていく必要がある。今後取り組むべき工学的な課題として、気候パラメータの変化変動によるCO₂吸収・放出の変化への予測や、地下部の動態解明に向けた技術開発（イングロスコア法とリターバッグ法の併用による生産量推定、細根の動態を観測するルートスキャナ法）、空中+海上ドローンなど広域連続長期間測定可能な技術開発、廉価なセンサー開発とデータ取得等が期待される。

4.3 社会的・経済的な課題

• 社会的コンセンサス形成

沿岸部での土地開発は、気候変動、生物多様性、地域産業など様々な影響を与える可能性がある。例えば、沿岸部での炭素固定能力を高めるため、炭素吸収能力の高い植物を設置することで、既存の生態系を破壊してしまうことや、漁業権を侵害してしまうリスクがある。政府、企業、市民団体と地域の人々の間でコンセンサスを形成していくことが必要である。

• 経済的な課題

沿岸部は、海面上昇や洪水などの影響を受けやすい地域であるため、適切な開発および維持管理が求められている。また、沿岸部での災害は、地域の人々への影響やインフラへの被害を増大させるだけではなく、多額の費用がかかることが知られている。このような災害時や維持管理には、安定かつ柔軟な資金供給体制が必要である。

また、現場で主体的に取り組む団体（NPO、漁業者、市民団体等）への資金環流や、企業からの参入障壁を下げるためのJブルークレジットの導入など、各ステークホルダーへのインセンティブを維持するための経済的な仕組みづくりが求められている。横浜市ブルーカーボン事業では、横浜ブルーカーボン・オフセット制度を採用しており、産官学民の連携を促している。

研究開発におけるファンディング体制については、生物多様性やLCA評価を含めた包括的な評価ができることや、申請手続きが煩雑過ぎないような仕組みが重要である。

• 法的・規制に関する課題

「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」（通称：ロンドン条約）では、水銀などの有害廃棄物を投棄することを禁止しており、鉄などの散布が限定的であったり、海底への炭素固定についても制限がある。総合的評価の下、規制を見直すことが求められている。

また、地域の規制の課題も挙げられる。例として、ベトナムの一部の地域では一切の伐採が禁止されていることから、維持管理が困難である。特に途上国でのマングローブ林の維持管理などをより効率的に行うこ

とができるよう検討していく必要がある。

4.4 具体的な取組事例

• 国際ブルーカーボンイニシアチブ⁴

国際ブルーカーボン・イニシアチブは、コンサベーションインターナショナルが、国際自然保護連合（IUCN）や国際連合教育科学文化機関（UNESCO）とのパートナーシップを通して始めた取り組みである。地球規模で沿岸部の海洋生態系を保全し、回復させることを通して、気候変動の緩和を進める統合的なプログラムを実施している。具体的な取組事例は以下のとおりである。

- ➡ 科学と政策に関する国際的なグループ間の連携に関する調整
- ➡ ブルーカーボンを国際的な政策に統合するための支援
- ➡ インドネシア、フィリピン、エクアドル、コスタリカなどにおいて、国がブルーカーボンの保全を進めていくための中央政府との協働
- ➡ 沿岸生態系の炭素量を測り、モニターしていくために優先度が高い科学的な研究の特定と実施
- ➡ 炭素を隔離・貯留するために沿岸生態系を保全する、保全及び管理手法の開発

• せとうちネット⁵

せとうちネットは、「瀬戸内海環境保全基本計画」の変更が平成27年に閣議決定されたことをうけ、行政、地域住民、企業、研究機関等が一体となって総合的な沿岸域の環境保全を進めていくための環境省主体のネットワークである。瀬戸内海における水質、底質、藻場・干潟等の自然環境に関する情報、国及び関係府県が実施している環境保全の取組等を掲載している。

4 Coservation International HP,
<https://www.conservation.org/japan/initiatives/climate-change/blue-carbon>, (2022年2月アクセス)

5 せとうちネット HP
(http://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/index.html) 2021年12月22日アクセス



図4-8 セとうちネットの体制図

(https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/setouchiNet/seto/)

せとうちネットでは、沿岸部での様々な取り組みを行っているが、その中でもブルーカーボンに関連する具体的な取り組みは、以下のとおりである。

表4-9 瀬戸内海における取組事例（抜粋）

名称	湾・灘区分	都道府県
アマモ場再生事業	播磨灘	岡山県
藻場の保全及び再生の取り組み（笠岡地区）	備讃瀬戸	岡山県
藻場の保全及び再生の取組（邑久町）	播磨灘	岡山県
アマモ場づくり活動	備後灘 備讃瀬戸 播磨灘	香川県
投石による藻場造成	響灘	福岡県
堺泉北港堺2区における人工干潟の整備	大阪湾	大阪府
瀬戸内海における難分解性有機物に関する調査	大阪湾 播磨灘	兵庫県
漁場環境の保全（第2期） （藻場・干潟の保全・再生）	響灘 周防灘 伊予灘 安芸灘	山口県

・里海ネット⁶

里海ネットでは、環境省が主体となり、里海づくりに関連する情報を発信している。平成30年度では690団体が関連しており、国、漁業関係者、研究機関など様々な団体が活動している。

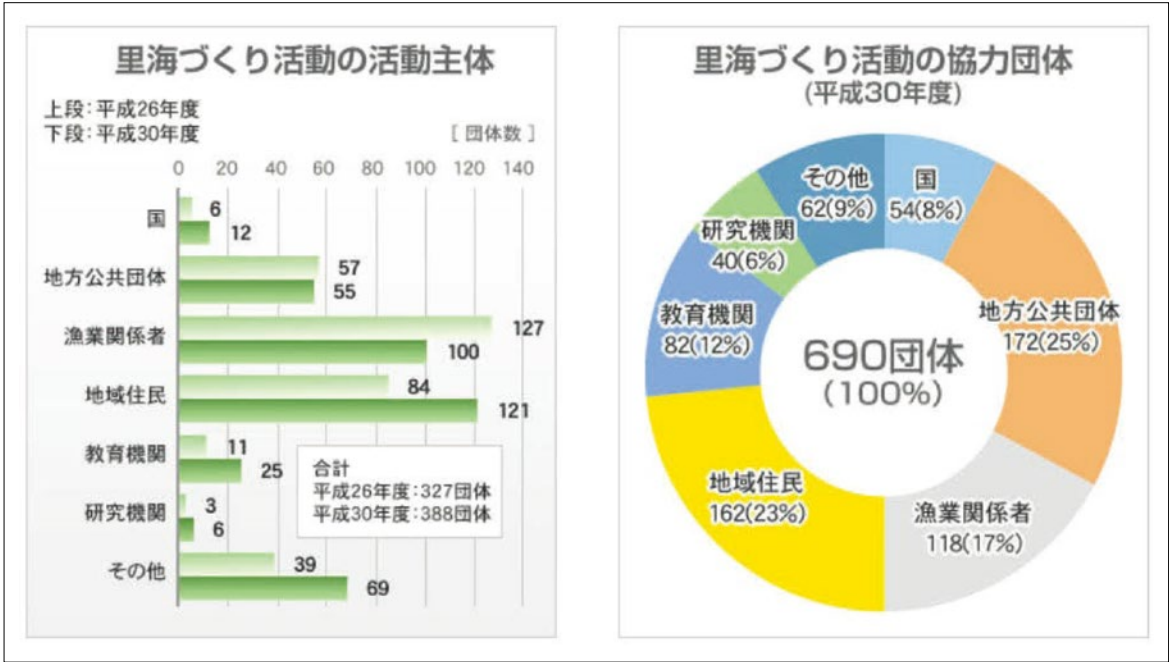


図 4-9 里海づくり活動の協力団体⁶

里海づくり活動に関連の深い事業の例として、自然再生事業（環境省、国土交通省、農林水産省）、里海創世支援事業（環境省）、環境・生態系保全活動支援推進事業（水産庁）、水産多面的機能発揮対策事業（水産庁）などがある。

なかでもブルーカーボンに関連のある、水産多面的機能発揮対策事業では、水産業・漁村の多面的機能の効果的・効率的な発揮に資する地域の取組を支援することにより、水産業の再生・漁村の活性化を図ることを目的に、漁業者等が行う水産業・漁村の多面的機能の発揮に資する活動に対し、一定の費用を国が支援しているものである。事業期間は、平成25～平成27年度（1期）、平成28～令和2年度（2期）である。活動内容には、藻場・干潟の保全が含まれている。

6 環境省：里海ネットHP, <https://www.env.go.jp/water/heisa/satoumi/>, (2022年2月アクセス)

図4-10 里海づくり活動の協力団体⁶

4.5 CRDS主催のワークショップで議論された課題のまとめ

バイオマスを介した大気中CO₂の吸収とその長期の固定に注目し、国内外の研究開発動向や今後に向けた挑戦的課題を俯瞰的に整理するため、2021年度に2回のワークショップを開催した。ワークショップの具体的なプログラム、趣旨、および議論の詳細についてはAppendixに記載している。本節では、ワークショップで議論された議論について、海洋に関連する部分についてを、キーワードごとに整理して以下に示す。

(生育適地拡大)

- ・ マングローブの場合は、人為的に植えることも吸収量を増やす方法の一つ。一方、自然に、例えば、デルタがどんどん前進している場所では、マングローブ林も拡大しているところがある。そうした場所で新しく森ができれば吸収源になるので、その見積りもおこなっていくことが重要。人為的に植える場合は、その立地に合ったものを植えなければ育たないので、最大限の効果を発揮させるためには、立地条件を把握することが重要。

(生物多様性の効果)

- ・ 海洋については、例えばアマモと大型海藻が共存している場所があり、どちらかを一方的に増やす、あるいは、両方入れると相乗効果が上がるか等の研究はないのが現状。長期的にどうなのか、国内の各環境条件においてどうなのかということは、分かっていない。
- ・ マングローブは、微妙な立地環境の違いで樹種がすみ分けている。植林をするときは、まずはその立地環境を把握した上でそこに合ったものを植えることが必要。その立地環境に合わないものを植えた場合は、成長が遅くなってしまう。また、マングローブも、台風の影響は大きい。同じ樹種を人工的に植えるところでそうした被害が出る。

(GHG評価のばらつき)

- ・ 自然相手の将来予測なので不確実性が高く、その不確実性を小さくすることが大事。海の場合は、現状では、現地観測のデータが少な過ぎて、モデルの検証も難しい。コストの低いセンサーやリモセンを海洋に投入し、何かしら間接的にでも使えるデータを集めることが大事。その上で、生態系モデルや全球モデル、CMIP等を併せるのは、AIやPCが進化していけば、できるかと思う。

(気候変動の影響)

- ・ 地上部・地下部バイオマスについて、温暖化による成長量変化に対応したモデルにするつもりでいる。
- ・ マングローブについては海面上昇の影響がある。海面が上がると、マングローブは根っこの生産量を高める可能性がある。マングローブ泥炭を蓄積できるリゾフォア属に関しては、既にその反応が出ていると思われ、表層侵食が見られない。その他の樹種は、今の海面上昇に対しても追いつかず表層侵食が起こっている。気温の上昇で多少CO₂の吸収力が上がるのかもしれないが、それ以前に海面上昇の影響が大きいのではないかと思う。
- ・ 2100年までの将来予測を沿岸生態系全てに行っており、現在論文を執筆中。海面上昇が進むと、自然に、それに応じて適正な水深帯や潮間帯、陸側に、生息分布を変えていく。だが実際は、沿岸部は護岸があるなど、陸側にシフトできないエリアも多く、最終的に水没するという根本的な問題がある。この影響が大きい。

(海外の活用)

- ・ マングローブは日本にもあるが、その面積は狭いので、国内でその固定力を期待するよりも、海外、例えばエビ養殖池で破壊されたところの再生を日本が支援していく、といったスタンスが必要。
- ・ 日本は海岸線世界第6位だが、実際には深い海域であり、光が届いて海藻がたくさん生える場所はない。やはりマングローブや海藻は東南アジアが一番多いというのが現状。
一方、そのような自然の状態を考えた上で、将来的に人為介入によって吸収量を増やすことであれば、沖合養殖や、海洋の場合は三次元的な活用が可能性を秘めている。その意味では、EEZを広く持つ日本は有利かもしれない。技術的には可能だが、コスト、例えばEEZ内で自由にやることができるか等、国際交渉的な話が出てくるかもしれない。
- ・ CCSの回収と運搬は、工学的にはできる。やはり貯留のところは、日本は陸域では行いづらい。海洋とすると、海外と比較した場合にはコストが上がる。貯留地点については、石油やガスの採掘、試掘をしたところはデータがそろっているので、省庁などで行った貯留地点の検討も、そうしたデータがあるところをやっている。その意味では、理論的にはポテンシャルはあるが、それを永続的にはいかないので、やはり基本的にはエネルギー、特に産業用のエネルギーをかなりゼロに近いところに持っていく必要がある。RITEが、エネルギー基本計画の基本政策部会分科会に出した資料で、回収したCO₂を海外に持っていくオプションが入っていた。国内で貯留できない場合には、そうしたことを考えないと答えが出ない。極端なことをしない限り、2050年カーボンニュートラルは難しい。

(法律による障壁など)

- ・ 関連法は大きく関係している。例えば、海の場合は、漁業権が設定されているところでは漁業者の了解なしでは手をつけられない状態であり、港湾法の適用内の港湾では、優先的に物流のために使うので、法律を変えていくことが一番手っ取り早い。一つのインセンティブになると思う。例えば港湾の場合、港湾区域内で洋上風力発電施設を作るとする港湾法の改正が近年あったために、洋上風力が岸边から造られている現状があるように、法令が変われば、実際にやれることはある。
- ・ マングローブに関しては、国内は分布面積も狭くほとんどが国立公園になっているため難しいが、海外の

場合、例えば植林をして、それを持続的に利用しようとした場合、ベトナムの植林を行っている地域では、今一切伐採が禁止されているので、それなりに育ってきていても間伐も入れられない状況がある。そのような地域でいかに森を管理していくか、方針さえできれば持続的な利用も可能になると考えている。ただし、途上国では難しいとも思う。

(ファンディング)

- ・ファンディングについては現状ではよくないと思っていたので技術研究組合をつくった経緯がある。結局、産官学民が自由に使える予算がなければ、こうした問題は解決が難しいと思う。
今、研究者がもらっている予算は、どの省庁でも学術への貢献が求められている部分が強く、そうすると、研究をしてしまう。本当に将来ゼロエミッションをやりたいのであれば、本来は成果として求めるべき。そうした場合、研究論文などの評価ではない方法の予算の枠組みや、契約期間、契約方法、管理など、それらがもっと自由になればよいと思う。
企業側に立つと、間接経費や少しの収益は認めるようなインセンティブがない限り、乗ってこない。そのような少し柔軟なファンディングの制度に変えていく必要がある。既存のものでは、出尽くしている気がするので、根本的に変えなければならないと思う。
- ・研究に関しては、科研費等でつないできている。一方、ベトナムでマングローブ植林は、我々が植林をしている面積は非常に限られているが、森林面積としては4万ヘクタールぐらいある。これはベトナム戦争のときに一旦枯葉剤で丸裸にされた場所。それを地元の人たちが植林し、4万ヘクタールの森を回復させた。今は伐採が禁止されている場所だが、資源としてはもったいない。
地産地消で、例えば小規模なバイオマス発電のプラントを実験的に作る資金があれば、我々のNGOなどでさらに活動を広げたりできると思う。ベトナムでも、間伐材の使い道がはっきりしていないので、伐採に踏み切れないと思う。そうした資金援助も考えてもらえればと思う。

5 | まとめ

本章では、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術について、農地、森林、海洋の全体として、国内外の動向、今後の推進が期待される研究開発課題、およびネガティブエミッション技術の社会実装に向けて検討が必要な社会・経済的な課題を記述する。

5.1 国内外の動向

5.1.1 海外の動向

欧米では、ネガティブエミッション技術の重要性が強調されており、様々なプロジェクトが現在進行中である。

図5-1は、全米アカデミーズで推奨されている研究開発課題をまとめたものである。基礎から実装まで様々な課題が挙げられている。特にCO₂の吸収源としての技術（緩和）だけではなく、気候変動への対応（適応）としての必要性が強調されていることが特徴として挙げられる。

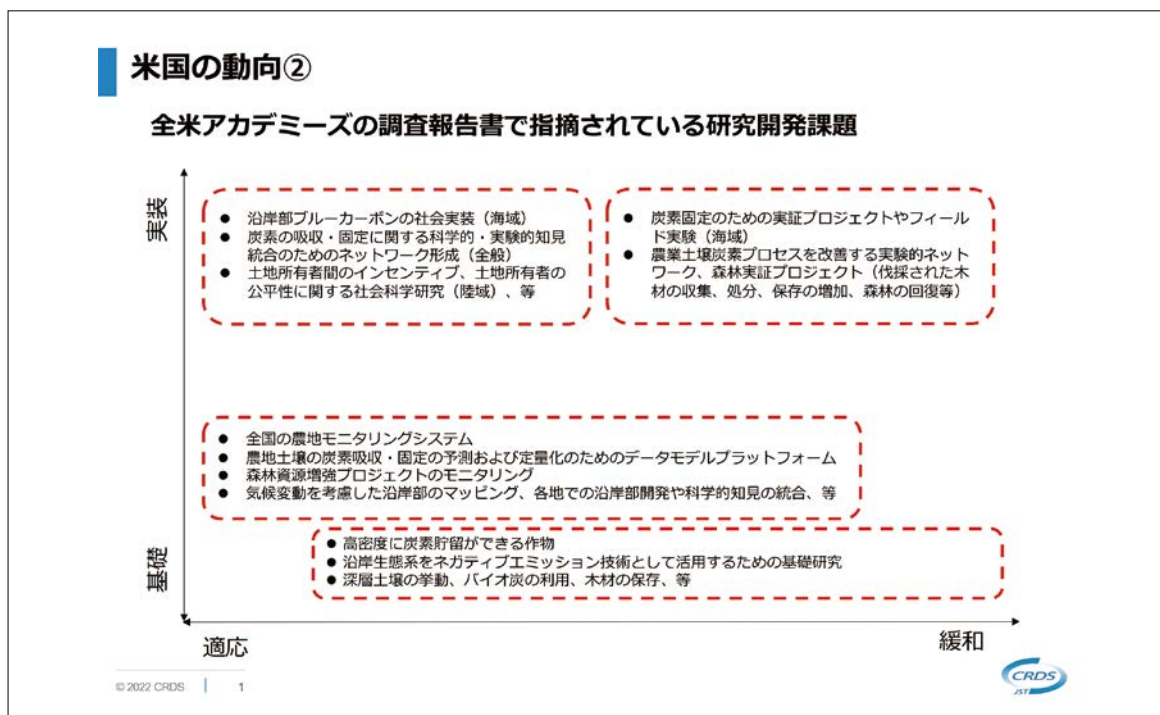


図5-1 全米アカデミーズで明記されている研究開発課題

5.1.2 国内の動向

革新的環境イノベーション戦略には技術的な課題について明記している。また、科研費を中心に、複数の研究開発課題が現在進行中である。

5.2 今後実施が期待される研究開発課題

本調査の一環で開催したワークショップでの議論を元に、今後実施が期待される研究開発課題に関する論点として、以下に示す7つのカテゴリーおよびその他を分類、抽出した。それらの議論のまとめを示す。

表 5-1 WSで議論された研究開発課題まとめ

	研究開発課題例	具体的な内容
適応	①温暖化進展段階でのCO ₂ 吸収・放出の変化	海面上昇など、気候変動に関連するパラメータの組込。
	②コベネフィットの観点からの研究 (コベネフィットとして生物多様性や環境保全)	気候モデルと土地利用の両面からの検討。バイオ炭による土壌改良効果など。
	③炭素循環の総合評価	海洋と大気炭素循環の理解。土壌中の炭素と窒素の総合評価。より詳細な現象解明など。
	④植物の環境適応能力の向上	準耕作地・非耕作地での水、温度、塩などに対する耐性、病虫害耐性など。
緩和	⑤植物の収量性の向上 (単位面積・単位資源投入量当たりの収量)	植物へのCO ₂ 供給促進、光合成CO ₂ 固定能増強、光エネルギー変換効率の増強など。
	⑥バイオマス残渣の循環利用、評価 (多様な資材と多様な環境条件での利用・評価)	地熱を使った冬季の植物栽培。工場や発電所、焼却場の排ガス(CO ₂)利用、藻類の大規模培養、木材利用の新規利用方法の可能性の検討など。
	⑦生物機能利用と工学的オプションの組み合わせ技術	長期的なモニタリング、農林水産業のDX化、省エネルギー化。吸収源拡大の候補地の開拓・創出に向けた社会実装への具体的な取組。

① 温暖化進展段階でのCO₂吸収・放出の変化

2050年には、CO₂濃度、温度、降水の条件が変わってくる可能性があり、そのときにバイオマスのCO₂の吸収や固定の能力が変化すること考えられるため、これを評価していくことが必要である。

(WS議論抜粋)

- ➡気候変動が、土壌の炭素貯留量やそれに関係する植物の生育に影響が出てきている。気候が変わり、温度上昇、雨が極端に増減することも大きな影響になる。とくに乾燥は、植物のNPPが低下し、その分、炭素のたまる量が減る。温度上昇は土壌から炭素が抜けていくので、炭素がたまりにくくなる。
- ➡水田ではメタンの削減が重要。栽培の途中で乾かす、中干しをする方法があるが、現場の農家に委ねられている。難しくないが、それができるようなインセンティブ、仕組みになっていないことが問題。
- ➡沿岸生態系は海面上昇が進むと、自然に、陸側に、生息分布を変えていくが、実際は、沿岸部は護岸があるなど、陸側にシフトできないエリアも多く、最終的に水没するという根本的な問題がある。
- ➡地上部・地下部バイオマスについて、温暖化による成長量変化に対応したモデルにする。
- ➡バイオマスによる吸排出係数は、気候変動が起きたときにレスポンスの変化も含めた吸排出係数計算を、種類ごとに行う。

② コベネフィットの観点からの研究

ネガティブエミッション技術を推進するにあたり、生物多様性や環境保全などのコベネフィットについても同時に考えていくことが重要となる。

(WS 議論抜粋)

- 海洋については、生物多様性の効果の研究はない。長期的にどうか、国内の各環境条件でどうかは、分かっていない。
- 植林地では単位収量当たりで杉が最も吸収効率がよい。天然林は、種の多様性が高い森林のほうが吸収効率は比較的よい。しかし、天然林の問題は、林齢という概念がなく、台風のような災害が森に起きた場合、一斉に倒れ、炭素が放出側に回ってしまう。

③ 炭素循環の総合評価

地球全体での評価、温室効果ガス全体としての評価に加えて、LCAや経済性の評価など、総合的に評価していくことが必要である。

(WS 議論抜粋)

- バイオマスではCO₂を吸収する面的な広がりが必要。海外で実装し、トータルとして地球全体での削減貢献をすべき。
- 農地についての課題は、むしろ地域的な自然の情報整理等が必要。
- 副作用として、土壌の質や反射率、生物多様性や生態系、さらには測量等の競合の問題、土壌、水質汚染、N₂Oがある。炭素蓄積のパーマネンス（永続性）も評価が必要。
- 気候モデルと土地利用モデルを組み合わせでの評価が必要。
- 農地に関しては、ばらつきは高い。モデルの精度を上げる必要がある。
- 森林については、将来のポテンシャルの最大と最小を現在のプロジェクトで計算、算定することを開始したところ。シナリオが絡んだ複雑なシミュレーションになる。社会経済的に伐採木材製品（HWP）についての将来需要の伸びによっても変わってくる。
- 海洋では不確実性が高く、その不確実性を小さくすることが大事。現状では、現地観測のデータが少な過ぎて、モデルの検証も難しい。
- LCAやTEA、経済性の分析、環境性の分析、その定量化が重要。そこがないと研究の優先順位自体が難しい。
- モデル分析の視点からは、横断的に見て、それがどういう課題であるのかを含めて、コスト、ポテンシャルの研究が必要。
- 森林の地上部だけを見ていては足りず、森林生態系の土壌や地上部、地下バイオマスだけを見ていても足りない。オンサイトとオフサイト全てを見て、トータルで大気以外の炭素プールにどれだけ長期的に炭素を保持しておけるかが重要。特にオフサイトのほうは、全く研究されていない。
- 人の食生活の問題がある。CO₂を吸収できる面積を減らさないことばかりではなく。植物を使ってたんぱく質を作る仕組みを強化することも、有効。
- 地産地消の課題は、どれくらい作られ、施用されているのか、数字として出す必要がある。そうでないと、実際にたまっていたとしても、国としてどれほどたまったのか報告することができない。

④ 植物の環境適応能力の向上

気候変動への対応として、植物の環境適応能力を高めることも重要である。

(WS 議論抜粋)

- 植物には、生育適地と、その周囲の準生育適地、その他は生育不適地（砂漠のような植物が育つには難しい土地）がある。準生育適地で安定させるために、強い植物にする技術を導入できれば、準耕作地が次第に耕作適地になり、さらに適地を広げることで、育成適地を増やせ、それがCO₂の大きな削減効果につながる。
- 光合成効率を増やすよりも、CO₂濃度の急激な増加に対してその効率を低下させないための対策が必

要。

- ➡森林はほとんどが痩せ地であって、CO₂過多になると、窒素栄養と炭素栄養とのバランスが課題。
- ➡マングローブの場合は、最大限の効果を発揮させるためには、立地条件を把握することが重要。

⑤ 植物の収量性の向上

植物の炭素固定能をより高めることで、単位面積あたりの炭素固定量を高めることが可能となる。

(WS 議論抜粋)

- ➡光合成の観点からCO₂の供給を上げること、CO₂の固定能を上げること、光エネルギーの変換効率を上げることの三つともえで対応。遺伝子組み換えではない新たな技術としてゲノム編集に期待している。
- ➡農作物の収量の不安定化の原因は、温度と水。とくに水に対する耐性、温度の高低に対して耐性を改良する等によって、準耕作地でも安定して生産できるようになる。
- ➡陸上植物の場合は、温度、水、CO₂の3つの要因を見ることが必要。植物の収量は、集団で見るのが重要。
- ➡植物側は転写された遺伝子群、土壌に関してはイオノームというイオン量など、窒素、NMRで見られるような一次代謝物、アミノ酸などを見て、それらの相関性、そして微生物を見ている。
- ➡植物栄養、病害菌、気候など、総力戦でやっていくことが大切。その姿勢を維持しなくては国際競争力が保てない。

⑥ バイオマス残渣の循環利用、評価

残渣の有効利用をすることで、バイオマスを効率よく利用していくことが可能となる。輸送にかかるエネルギーを抑えることや、法的な規制が課題となることもある。

(WS 議論抜粋)

- ➡農業は残渣の部分が出てくるので、それを有効利用していく必要があるが、同時にその利用方法を考える必要がある。定量的に何の研究を進めるかを考えるべき。
- ➡バイオマスは、輸送にエネルギーがかかる。地産地消でやらないと元は取れない。そうすると土の状態、病原体など、ローカルな問題が出てくる。これは農家が一番よく知っていて、デジタル化が重要。
- ➡収穫した後の残ったバイオマスを利用し尽くすことが大事。日本の場合は法律の壁もある。

⑦ 生物機能利用と工学的オプションの組み合わせ

DXやスマート農業、センサの有効利用など、工学的なアプローチをしながら、省エネルギーで低コストに進めていくことで、社会実装に向けた技術的な課題に取り組む必要がある。

(WS 議論抜粋)

- ➡バイオマスは相対的に発熱量が低いので、発電効率が低い。さらに廃棄物の場合は含水の問題がある。資金があれば、技術的な解決はある。
- ➡海外では、情報全体を網羅的に取っている。日本は、イネなど特殊な、代表的な作物ではできているが、それ以外の作物ではできていない。
- ➡メタゲノム解析にしても、基本技術の向上も重要。
- ➡企業と連携、農家との連携が重要。
- ➡フィールドで、実際何が起きているかを見て、それをまとめたほうが多様な情報が入ってくる。
- ➡米国では各州に大学、農学部があり、エクステンションを持っていて、それぞれの農家とのつながりがある。県にそれぞれ農学部がある一方、うまく連携が取れていないような印象。
- ➡デジタルトランスフォーメーションは起こる。米国などは既にそうになっている。
- ➡日本の場合は県に農業改良普及センターがあり、そこにエクステンションの人たちがいて、彼ら農家と

- 直接つながっている。そうした仕組みを上手に利用できると新しい仕組みがつかれる。
- ➡最近の先進的な中規模種苗会社は、情報含めてサービスをするところもある。国内でも出てきているので、科学的に裏づけることができるとよい。
 - ➡プロジェクトは植物、微生物、環境も一緒に見て、植物の改良をしていくような取り組みが重要。
 - ➡バイオマス植物についても研究開発投資や人材育成をおこなっている研究室が少なく、限られたところしかない。
 - ➡日本でできたものを使って土にためていく、その持続的な活用のための仕組みが必要。
 - ➡研究論文などの評価ではない方法の予算の枠組みや、契約期間、契約方法、管理など、それらがもっと自由になればよいと思う。
 - ➡少し柔軟なファンディングの制度に変えていく必要がある。柔軟に対応できるような仕組みがある予算が必要。
 - ➡長期的に取り組めるような研究計画が立てられる予算が必要。

以上のことから気候変動の影響を考慮したより詳細なモデリングや、工学的なオプションとネガティブエミッション技術の適切な組み合わせなど、適応と緩和の双方の側面から課題が抽出された。

5.3 社会との関わりの観点からのその他の課題

研究開発を進めていくと同時に、社会実装に向けた課題についても同時に考慮していく必要がある。農地、森林、海洋のそれぞれで社会的・経済的な課題がそれぞれ挙げられたが、共通項目として検討する必要がある項目を以下に示す。

表 5-2 社会実装に向けたその他の課題のまとめ

課題	対策例
食料との競合	耕作不適地の有効活用など、農作物生産と土地利用で競合しない取組。
土地の制約	陸域については農地法等、海域についてはロンドン条約等、NETsの開拓に伴う既存の条約や法整備との齟齬への対応（規制の見直しなど）。
気候変動による海岸線の変化などの影響	気候変動適応策の実施（例：米国海洋大気庁（NOAA）のNational sea grant プログラムでは、大学を中心に適応策関連の34のプログラムが進行中）。
既存の生態系への影響	陸域あるいは海域での大規模なNETsの展開や、遺伝子組み換え生物の導入などによる既存の生態系や生物多様性への影響、その他社会的・倫理的観点からの懸念への対応。生態リスク評価やリスクコミュニケーション。
汚染物質の蓄積、濃縮	CO ₂ 吸収に伴って生じる汚染物質の蓄積、濃縮による影響の総合的な評価と対応策の検討。
地場産業の権利の侵害	現場で主体的に取り組む団体への資金環流や、企業からの参入障壁を下げるためのJクレジットの導入など、各ステークホルダーへのインセンティブを維持するための経済的な仕組みづくり。（例：フィンランドのメッツォプログラム（森林）、ドイツの連邦水管理法（海洋）など、土地所有者へのインセンティブが維持される仕組み）。
景観・文化の侵害	土地所有者や地域住民からのコンセンサスを得るための工夫が必要。インセンティブとそれに伴う公平感などの社会学的な取組など。

5.4 おわりに

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は、カーボンニュートラルの実現のために重要な技術である。これらの技術は、CO₂の吸収源としての技術（緩和）にとどまらず、気候変動への対応（適応）としても多種多様な効果があり、持続可能な社会を築いていく上でも重要である。

社会実装に向けては、生態系への影響や、地場産業への影響などを含めた様々な社会的・経済的な課題がある。各々の地域でそれらを総合的に考慮していかなければならない。

農地、森林、海洋それぞれの分野で、産官学の連携による具体的な取組も進められている。今後、より長期的に、より広範な活動を推進していくことが、必要である。

6 | 謝辞

本調査あたり、ヒアリングにご協力いただいた大学、研究機関、企業の方々ならびに、ワークショップにご参加いただきました有識者の皆様に、心より感謝申し上げます。

Appendix1 俯瞰ワークショップ カarbonニュートラルの実現に向けた生物機能を 活用したネガティブエミッションに関する研究開発課題（テーマ1）

1. 概要

日時：2021年7月20日 9時30分～15時

場所：オンライン（Teams）

主催：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（CRDS）

環境・エネルギーユニット

2. 開催趣旨

JST研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的なニーズを踏まえて、国として重点的に推進すべき研究領域や課題、その推進方策に関する提言を行っている。この活動の一環として、科学技術分野を俯瞰する「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を検討する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催してきた。

2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すとした菅総理の宣言を受け、経済と環境の好循環に繋げるための産業政策として「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。同戦略ではカーボンニュートラルへの転換イメージが示されており、電力部門の脱炭素化や、民生・産業・運輸での電化、水素化、炭素（CO₂）を循環的に利用するカーボンリサイクルに加えて、足りない部分の補填として大気中CO₂を吸収・固定化するネガティブエミッション技術が重要とされている。

カーボンリサイクルやネガティブエミッションに関しては、人工的なプロセスやシステムを新たに開発しようとする検討が実施される一方、生物を介した炭素資源利用、及び、炭素の吸収・固定も選択肢に含まれる。森林や農地、沿岸生態系などに吸収された炭素を循環的に利用したり、長期間固定化したりすることを通じてカーボンニュートラルの実現に貢献することが期待されている。

このような背景を踏まえ、CRDS環境・エネルギーユニットでは、バイオマスによる炭素資源利用、及び、炭素の吸収・固定がカーボンニュートラル実現に果たす貢献の潜在的な大きさ、そのために必要な挑戦的研究開発課題や分野横断的に取り組むべき課題、社会実装を見据えた際の経済的な課題や社会的、倫理的、法的課題（ELSI）などについて俯瞰的に検討を行うワークショップの開催を企画した。関連分野の専門家の方々に最新の研究開発動向などを基にした具体的な課題等についてお話しいただき、それらを基に、バイオマスによる炭素資源利用、及び、炭素の吸収・固定がカーボンニュートラルに果たす役割の大きさや今後の課題について議論を行った。

なおここでは、テーマを2つに大別し、テーマ1では生物を介したCO₂吸収原単位の増加と炭素資源利用として、主に植物の品種改良、育成・収穫、エネルギー利用等を対象とする。テーマ2では森林・農地・沿岸部での炭素固定（ネガティブエミッション）として、海藻・海草、マングローブ、農地土壌炭素貯留、森林での炭素固定などを検討範囲と想定している。

3. プログラム（敬称略）

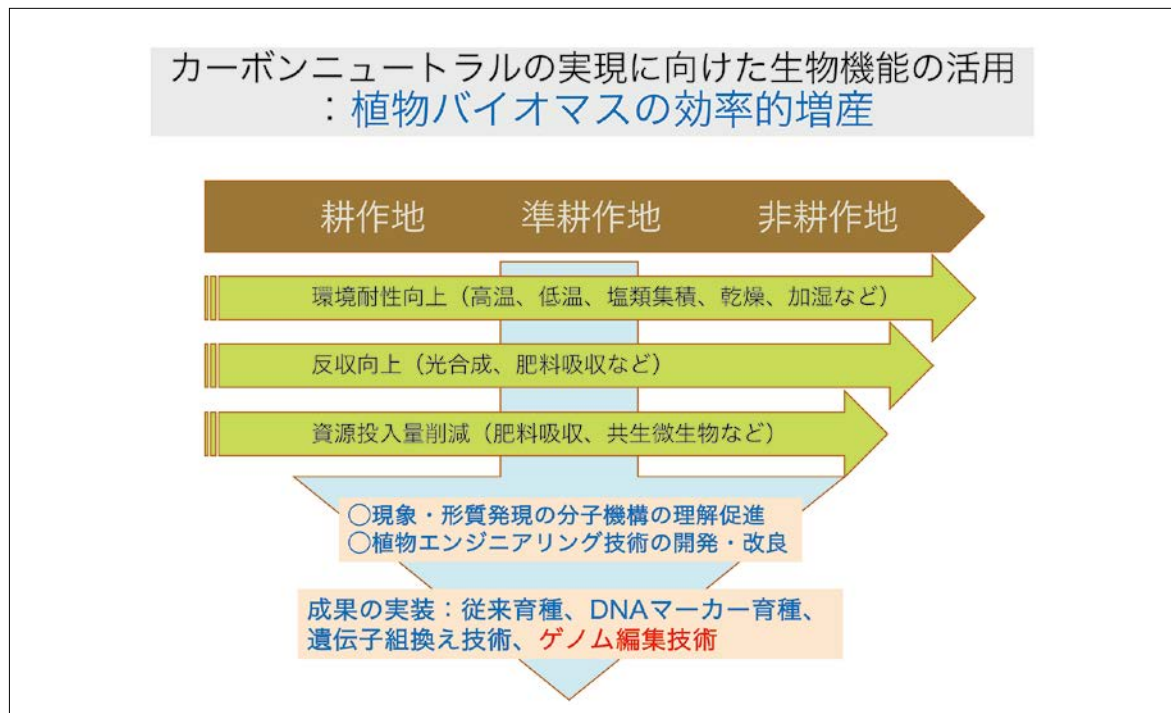
〈テーマ1：7月20日 9時30分～15時〉

タイムスケジュール	議題
9：30-9：50	開催挨拶、趣旨説明 CRDS
9：50-10：20	講演① 江面 浩
10：20-10：50	講演② 木下 俊則
休憩（10分）	
11：00-11：30	講演③ 射場 厚
11：30-12：00	講演④ 白須 賢
昼休み（60分）	
13：00-13：30	講演⑤ 星野 孝仁
13：30-15：00	全体討論 WS 招聘者、参加者

A1.1 ゲノム編集技術の利用に関する現状と展望

江面 浩（筑波大学 生命環境系 教授/つくば機能植物イノベーション研究センター
センター長）

本日は、ゲノム編集技術の利用に関する現状と展望ということでお話をさせていただく。カーボンニュートラルの実現に向けた生物機能の活用には、植物バイオマスの効率的な増産をどのようにしていくかであると思っている（図A1-1-1）。



図A1-1-1 植物バイオマスの効率的増産戦略

植物を生産する場合、実際の耕作地で生産する場合と、非耕作地で生産する場合とがある。私はこの耕作地と非耕作地の間にある準耕作地が大事であると思っている。準耕作地とは、何とか作物は栽培できるが、環境によってうまく育たなかったりする不安定な地域の耕作地のことである。この準耕作地でしっかりと作物や植物を安全で安定して生産できることがバイオマスでのCO₂固定を加速することになる。

そのために、過去にいろいろな研究が行われており、環境耐性の向上、例えば高温であるとか、低温であるとか、塩類集積耐性であるとか、乾燥であるとか、あるいは加湿などの耐性の研究がある。過去の事例では、単位面積当たりの収量というのは、農作物の例では、耕作地面積は変わらないが、単位面積の収量を増加して反収を増やすことを目的とするため、光合成の研究や材料になる肥料の吸収などの研究が行われてきた。

加えて、バイオマスをつくる上では、二酸化炭素を減らす視点から、そこに、バイオマスの生産のために投入するような資源を削減したいということで、肥料の吸収の研究や、あるいは微生物を介してなるべく効率的に肥料を使い切る研究が今まで行われてきた。

このような現象の、形質発現の主に分子機構の理解促進の研究が行われており、ポテンシャルのある研究成果がたくさん出ていること、それを今度は実際にその知見を使って利用するときに植物のエンジニアリング技術が必要のため、DNAマーカーの研究に始まり、最近では遺伝子組換え技術やゲノム編集技術といった新

しい技術がバイオマスを増産するためのテクノロジーとして開発されてきている。

このときに、今一番鍵となっているのは、メカニズムも大分分かっており、植物も作れるが、実際にそれを作って世の中に出そうとすると世の中に出ていかないことであると思っている。

それで、この分野の開発を進めていく上では、新しい技術を使って、我々の今日の前にある植物のパフォーマンスを飛躍的に向上することも必要で、それを、そういう植物を実際に外で育てていくときに科学と違う面で研究者の方々はいろいろな悩みに直面して、なかなか研究成果が得られない、また、技術を課題解決に使っていけないという現実があると思われる。

例えば遺伝子組換えでいえば、もう何十年も日本で研究開発をやっているが、実際に外に植えられる遺伝子組換え作物は花が2つで、それも現在では日本では生産されていない。そういう点が実はボトルネックになっていると思っている。

最近ではゲノム編集技術が登場して大分様相が違ってきていることを本日は皆さんにお話をしたい。ゲノム編集技術を世の中に出していくという点に関しては、遺伝子組換え技術よりもかなり社会の理解が得られやすい状況がつくられている。日本だけではなく、その影響が海外にも及び、日本と同じような利用に関する法整備が今どんどん海外で進んできているというのが重要なポイントである。

ここから先はゲノム編集技術の話になるが、ゲノム編集技術は、既にいろいろな方法が開発されているが、使い勝手のよさというふうな点で群を抜いているのがCRISPR/Cas9という技術である。その開発者が2020年にノーベル化学賞を受賞され、今後のライフサイエンス全般、特に医学や農業に大きな革命をもたらすというところで期待が大きくなっている。今後この技術が世の中に出ていけるかがポイントになっていると思っている。

この技術に関しては、要素技術をつくる点では日本の先生方が非常に先端を切っていた。利用に関しては、我々がCRISPR/Cas9を使ってトマトの機能性を向上させ、実際に販売できるようところまで最初に持ち込んだ。世界に先駆けて日本で商業化が始まったということで、これは世界初になると思う。要素技術開発と商業化といった頭のところとお尻のところを我々日本は頑張っているのも、かなり注目を海外から集めているという状況である。

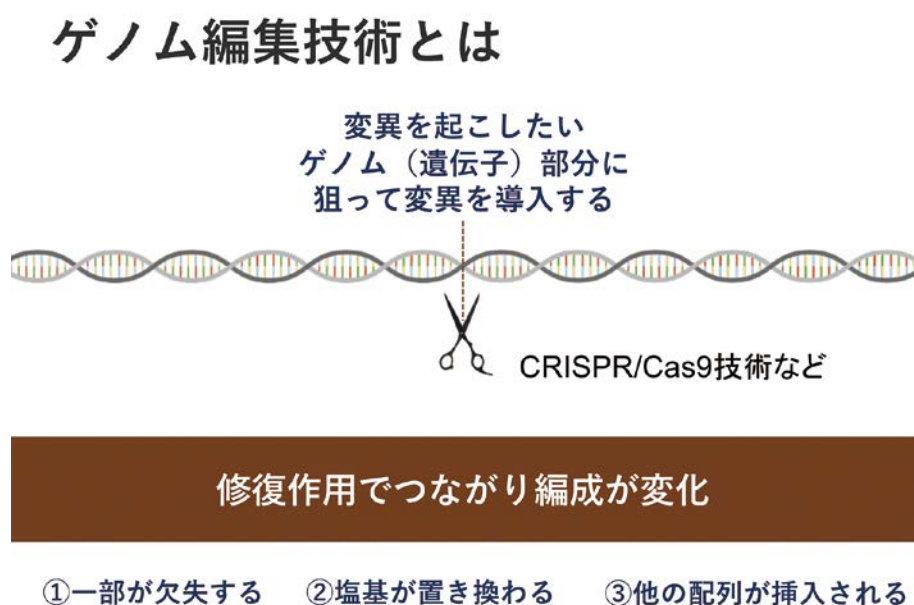
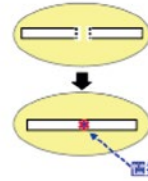
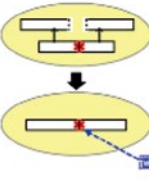
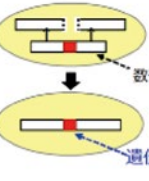


図 A1-1-2 ゲノム編集技術による遺伝子変異の創生

従来の突然変異育種技術は、ゲノム中にランダムに変異を入れるというような技術でしたが、ゲノム編集技術は、狙った遺伝子により正確に突然変異を入れるという技術で、今世界的に利用が広がっている（図A1-1-2）。ゲノム編集技術の規制に関しては、以下の表がそのまとめになる（図A1-1-3）。ゲノム編集技術によってSDN-1、2、3、食べる分類ではタイプ1、タイプ2、タイプ3という分類があるが、遺伝子を切っただけ、あとはその修復は自然に任せるものと、修復にテンプレートを入れるようなタイプと、切ったところに新しい遺伝子を入れてしまうという作り方によって規制が変わる。

ゲノム編集技術の分類			
分類	タイプ1 (SDN-1)	タイプ2 (SDN-2)	タイプ3 (SDN-3)
変異を発生させるしくみ	・お手本は導入しない。  ・切断されたDNAが自然修復される際に、エラーにより変異が発生。	・狙った箇所の配列の1～数塩基を変異させたお手本となるDNA断片を導入。  ・自然修復の際、導入したお手本DNA断片と同じ配列に修復される。 ・1～数塩基を置換・欠失・挿入。 ・狙った位置に、目的とする変異を正確に導入できる。	・狙った箇所の配列に遺伝子を組み込んだお手本となるDNA断片を導入。  ・自然修復の際、導入したお手本遺伝子を元に複製される。 ・狙った位置に、有用遺伝子を導入できる。
最終品の外来DNAの有無	ゲノムに外来DNAは残らない。	ゲノムに導入したDNA（またはその複製物）が残る。	ゲノムに導入した遺伝子（またはその複製物）が残る。
自然突然変異との比較	自然突然変異でも起こりうる。		自然突然変異では起こらない。

欧州委員会共同研究センター報告書の分類を参考に作成。

図A1-1-3 ゲノム編集技術の分類

一般的に、タイプ1で作ったもの、これに関してはデータを提供した後、遺伝子組換えに当たらないということで、普通にどこでも栽培できる。タイプ2に関しては現在議論中になる。タイプ3に関しては、遺伝子組換えとして扱う技術となっている。

例えば日本でゲノム編集作物を栽培しようとなると、まず栽培するための許可を取るために環境省、農水省に届出を行うことになる（図A1-1-4）。ここでGMかGMじゃないかの判断がされる。

食品として利用する場合には厚生労働省に届出を行うことになる。ここで食べていいかどうか、遺伝子組換え食品として扱うかが決められる。SDN-1で作られたか、いろんな毒性についての確認、オフターゲットであるかなどの情報も提供し、その結果食用としてよいということになれば、普通の食用の作物として利用可能となる。

このような規制の下、日本では、世界に先駆けてゲノム編集植物を実際に産業利用できる状況のところに来ていて、あとはこれが実際に科学的に正しいこととか、法律的に正しいこと、そして、これを実際に使う一般の皆さんがどのように受け止めるかが非常に重要な点で、なかなか科学的に正しいと幾ら説明してもまず理解してもらえない場合もあるので、いかに理解してもらえかが非常に重要なポイントになると思われる。

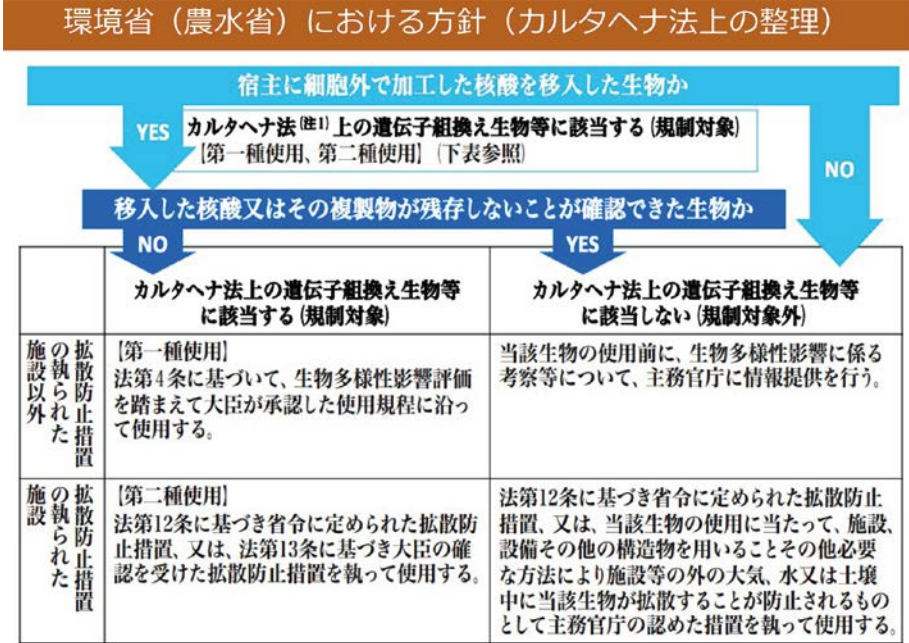


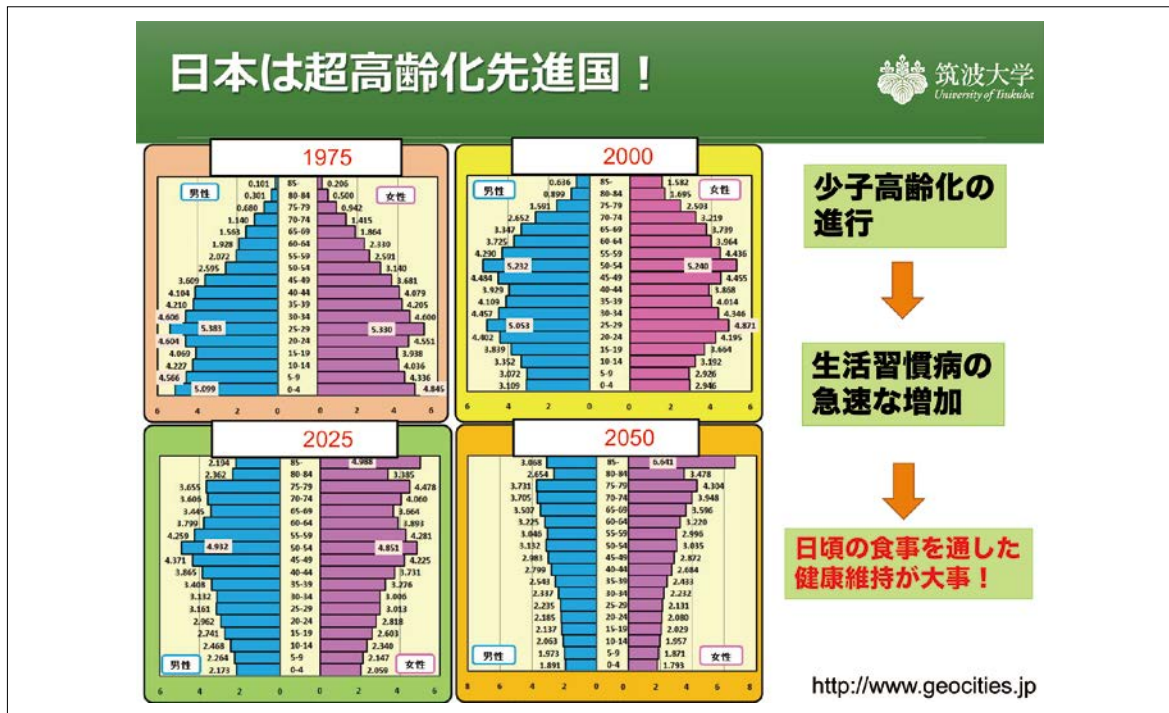
図 A1-1-4 環境省／農水省によるゲノム編集植物の取り扱い方針

これは我々の事例である。理想のトマトを作りたいということで、様々なゲノム編集のターゲットになるような遺伝子の探索をしている（図 A1-1-5）。本日は、GABAという機能性成分を増やす事例を紹介する。消費者が最初に受け入れやすい形質という観点でまずは選んでいる。



図 A1-1-5 トマトの重要育種形質の事例

次のスライドは人口の変化を、1975年から2050年にかけて予測も含めて示している（図A1-1-6）。少子高齢化が進行し、それから経済的な変化もあり、食生活の変化がどんどん日本では起こってきており、そのようなことが起因となって生活習慣病が急増している。実はそれがローブローのように社会的な大きな課題になってきていて、これを何とか解決しないといけないという状況に今来ているのだと思う。この状況は日本だけではなく、実は政治が安定しているような国は同じような経過をたどって社会で変化しているので、同じような課題が顕在化している。



図A1-1-6 我が国の人口構成の推移と社会的課題

日本の例でいうと、この状況を解決するには、日頃の食事を通じた健康の維持のために、体にいい食料を生産、開発することが大切だということで、最初の事例としてCRISPR/Cas9の技術を使い、GABAというアミノ酸をたくさん増やす研究を行った。

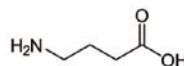
GABAは、全ての生物が持っているアミノ酸である。人に対しては、健康機能性があるとされていて、血圧の上昇抑制や、ストレスの緩和等の効果がある（図A1-1-7）。

機能性トマトを開発したい：GABAとは？

γ-アミノ酪酸：GABA

4炭素非タンパク質構成アミノ酸

動物では、抑制性の神経伝達物質



Gamma - Amino Butyric Acid

健康機能性成分として注目されている

軽症高血圧者
通常高血圧者
血圧上昇抑制

ストレス緩和

高血圧症は世界に10億人
日常的な“食”生活を通じて
高血圧予防するのに有効な成分

リラックス効果
睡眠改善効果



図 A1-1-7 GABAとヒトに対する機能性

血圧上昇に関しては、高血圧は予備軍も含めて世界に10億人いると言われており、薬の服用や、あるいはいろいろな食事療法をして改善しようという状況であると思う。新しい技術がこのような人々に貢献できることを示すことが、この技術が世の中に受け入れられることに効果があるのではと、我々は取り組んでいる。

GABAについては、以下の図の代謝経路で細胞の中で作られる。特にGADという酵素が重要な働きをしていることが分かり（図A1-1-8）、遺伝子からたんぱく質が作られたときに、酵素活性を抑制する尻尾がついているので、これをゲノム編集技術でしっぽのつけ根の部分に突然変異、ストップ・コドンを入れて、そしてこれを切り落とし、GAD酵素の活性を上げるということを行った（図A1-1-9）。

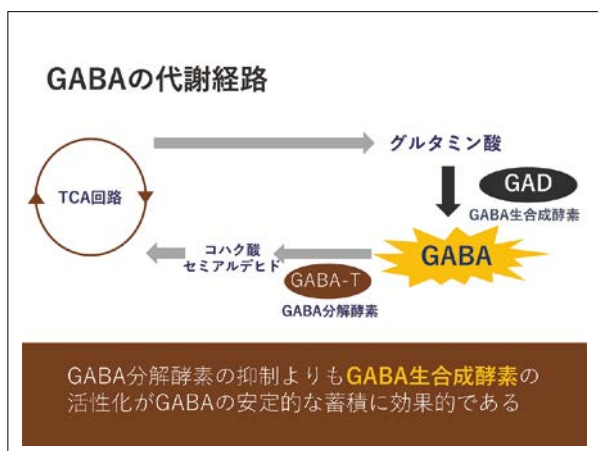


図 A1-1-8 植物におけるGABAの代謝経路とGABA蓄積の鍵酵素

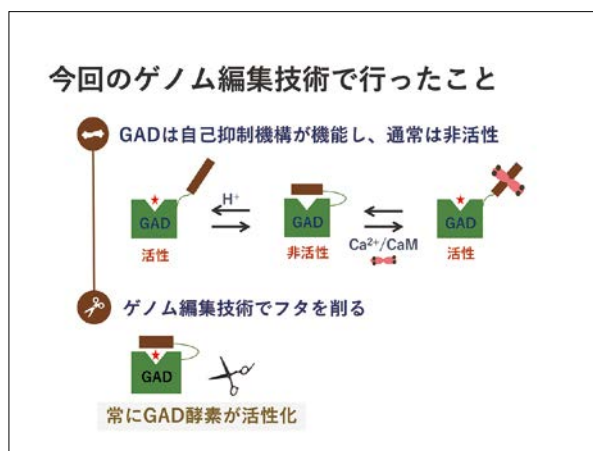
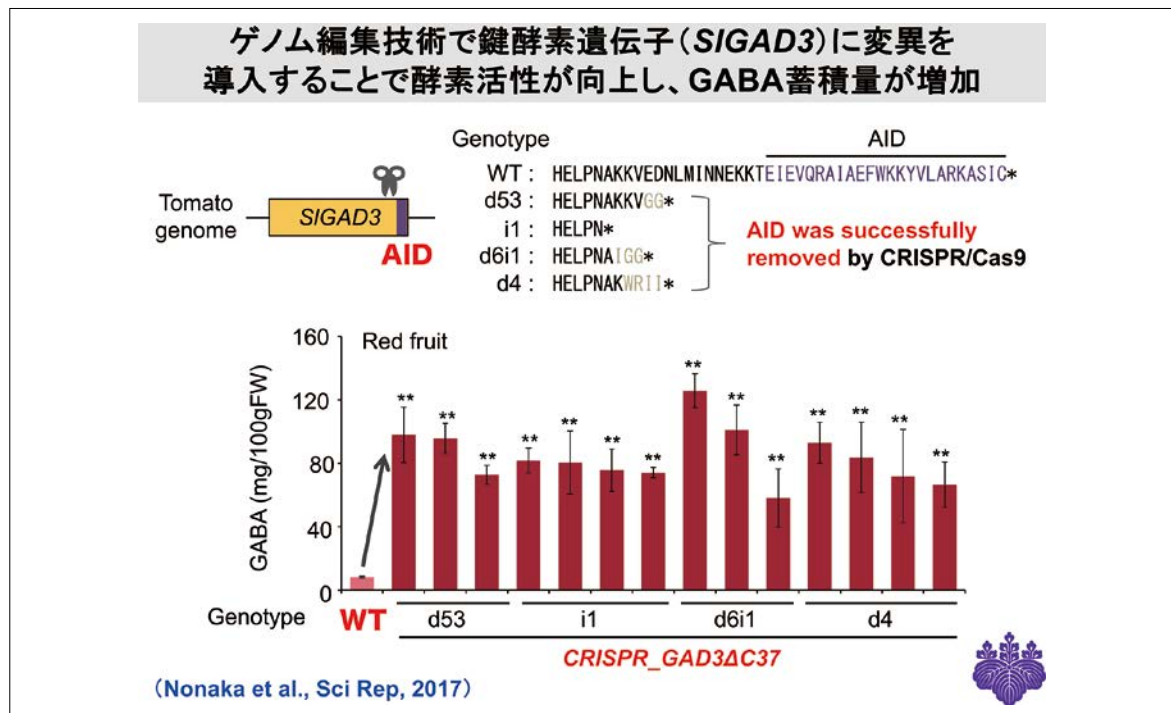


図 A1-1-9 GABA生合成酵素(GAD)の活性制御とゲノム編集技術によるGAD高機能化

そうすると、実際このスライドにあるように、これが元の品種だが、ゲノム編集してストップ・コドンを入れて尻尾を切った酵素を作る植物体、変異体については、御覧のようにGABAの量が元の系統よりもはるかに多くなっている（図A1-1-10）。

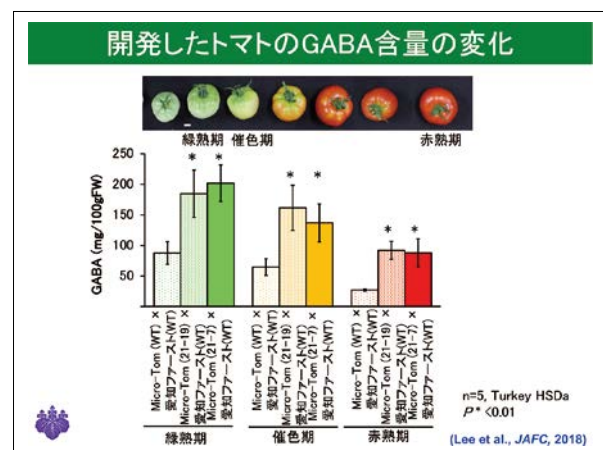


図A1-1-10 実験トマト品種のゲノム編集技術によるGABA高蓄積化

実験品種では、10倍から15倍に増えた。この変異体がF1品種の親系統として利用できることも確認できた（図A1-1-11、図A1-1-12）

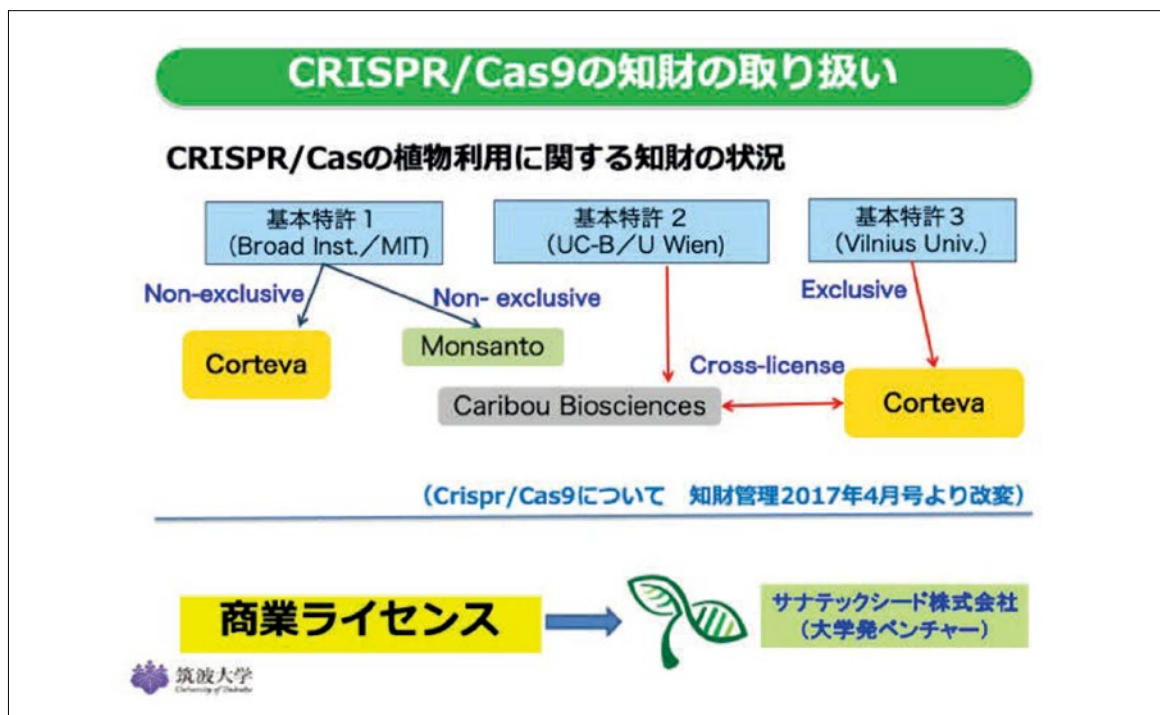


図A1-1-11 実験用GABA高蓄積トマトを用いたF1系統の作成



図A1-1-12 実験用F1系統の果実でのGABA蓄積量の変化

一応 POC の実験がこれでできたので、これを社会実装しようという段階になった。そのときに一番課題になるのは CRISPR/Cas9 に関する知財で、ここにあるような3つの機関が基本特許を持っており、これを何とかしないと、研究としては成立するが、実際に世の中に製品を出していく段階では成立しない。動物のゲノム編集技術は非常に複雑にいろいろなところがライセンスを持っていて、ライセンスをクリアするのが非常に大変である。植物に関しては、デュポン、今はコルテバという会社だが、ここが知財を一本化している（図A1-1-13）。ここと話をしてまとめれば知財として使っていき、商業利用ができるということになっている。



図A1-1-13 CRISPR/Cas9に関わる知財の取り扱い

我々もこの技術を使って実際にトマトを開発したいということで開始した。そのときに、商業ライセンスは実は大学は取れないので、大学発のベンチャーとして、サナテックシードという会社を設立した（図A1-1-14）。ここはGABA高蓄積トマトの開発と社会実装を担う形で、成果の実装を現在進めている。その会社が、先ほどのコルテバから知財のライセンスを受けて開発を行っている。



図 A1-1-14 GABA 高蓄積トマトの社会実装を目指した大学発ベンチャー企業の設立

開発自体は、POCができているので実は1年半ぐらいで実際の品種が開発できている状況である。実際に開発した品種を日本で市場に出していくには、先ほどの2つの役所に届出をし、この#87系統と、会社が持っているトマトのF1品種の親を使った（図A1-1-15）。

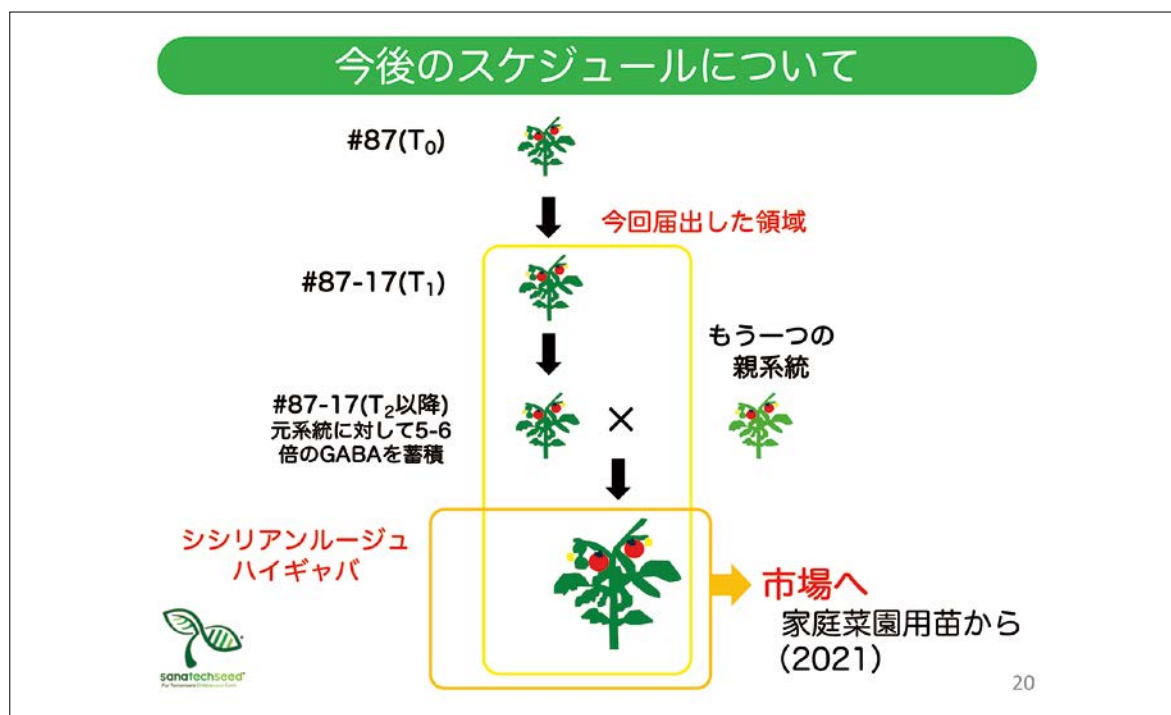


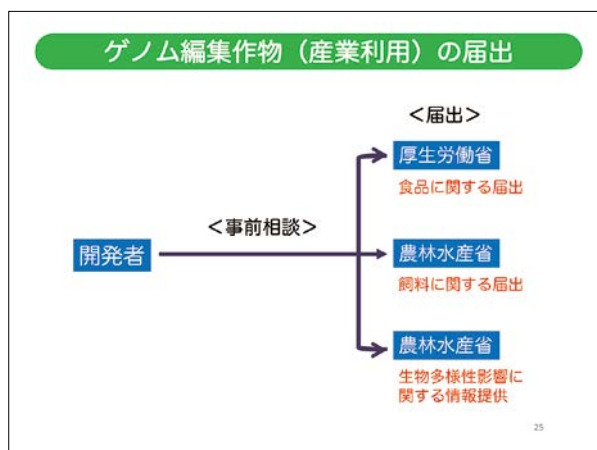
図 A1-1-15 大学発ベンチャー企業による商業用 GABA 高蓄積品種の開発

実際に親系統を高GABAにして、それで今回の形質は優性形質として発現するので、この届出を行った#87系統ともう一つの親を使ってF1を作って市場に出していく。

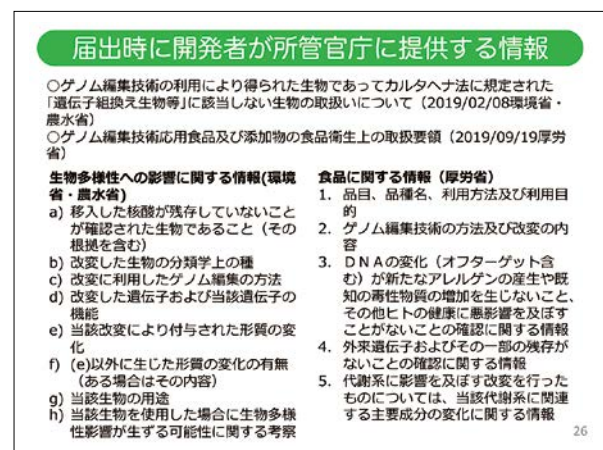
ここからがポイントだが、こういう新しい技術って、例えば999人賛成で使いたいという人がいて、1人、いや、ちょっとという人がいると、意外と世の中に出ないというのは、過去のGMの例でもよくあるので、そこをどのようにクリアしていくかが大きな課題であった。

開発者が直接使える人のところに出していければよいのではと考え、家庭菜園をやっている皆さんに直接苗を配った。その結果、驚いたことに、5,200件ぐらいあったと思うが、5,000件を超える申込みがあった。実際に今年の5月12日から家庭菜園用の苗として、最終的には4,000件を超える皆さんに苗を配った。皆さん各家庭で苗を実際栽培され、今月から収穫が始まっている。オープンチャットで意見交換できるようにしている。数千人の皆さんが楽しそうに新しい技術を楽しんでいるというのが分かる。今後は、これを冬場は加工食品も作り提供していくような形で進めていく。

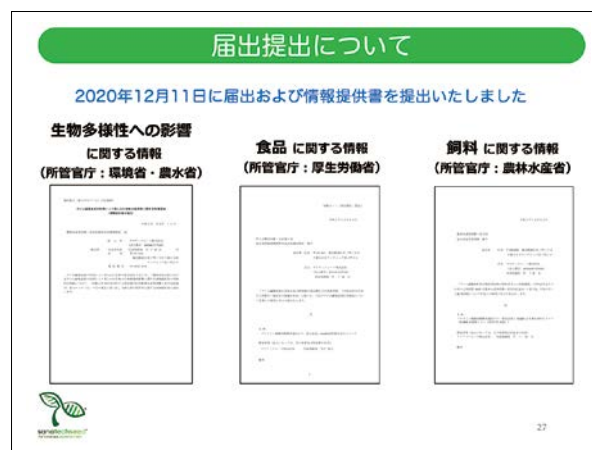
ゲノム編集作物は、開発者が事前相談を行った上で、厚生労働省、環境省／農水省に3つの届出をすることによって一般の作物として利用できるようになる（図A1-1-16、図A1-1-17、図A1-1-18）。この中では、大事な点は、こういう作物、植物が環境に対して安全であるか、食品に対しても安全であるかについては、事前相談の段階で専門家の確認を受けていることである。



図A1-1-16 我が国におけるゲノム編集作物の届出の流れ



図A1-1-17 ゲノム編集作物の届出時に提供される情報



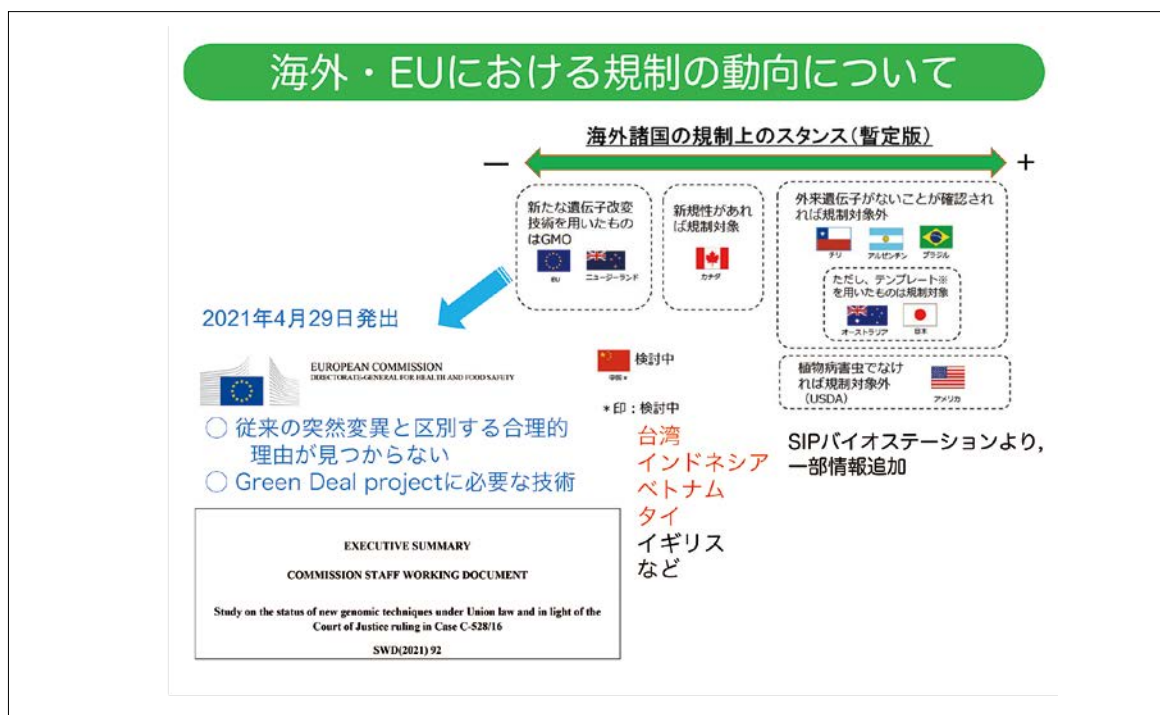
図A1-1-18 GABA高蓄積トマトの届出の確認書

当初こういうことがマスコミに全然報道していただけて、開発者が届出だけで実用利用でき、安全性の確認ができていないということがメディアから報道された。しかし、最近ではメディアの皆さんの理解が進み、かなりスムーズに世の中に出ていけるのではないかと考えている。実際に届出をしたことで、我々はこれを、表示、つまりラベルを使って世の中に出していく。実際に世の中に出していく上で日本では表示は義務ではないのだが、世界初の開発のプロダクトということもあり、消費者の皆さんの中にはやはり情報提供してほしいということがあるので表示はしていく（図A1-1-19）。



図A1-1-19 GABA高蓄積トマトの表示ラベル

最後のスライドになるが、これが重要であると思いまとめた（図A1-1-20）。海外の機関での規制の動向が大分今変化しつつある。スライドの図はゲノム編集の規制に関わる海外のスタンスを表している。国のスタンスで、プラスのほうポジティブ、それからマイナスのほうネガティブになる。



図A1-1-20 世界のゲノム編集作物の取扱いルール状況

ところが、ヨーロッパが、半年ぐらい前にこのステージメントの見直しをしようということで、再調査を行い、4月29日に新しいステートメントを発出した。その中ではEUは、EUの規制が30年前に作られたものであり、科学技術の進歩に合っていないこと、従来の突然変異と区別するのは合理的ではないということ、ヨーロッパが今進めているグリーンディール政策の実施に必要な技術であるということ、などをステートメントとして出してきており、ヨーロッパもだんだんプラス側に寄ってくると思われる。

我々の事例のトマトについてもこの再調査の中で検討されたようである。今、同じような見直し、検討が台湾、インドネシア、ベトナム、タイ、イギリスで急速に進んでいる。こういうゲノム編集技術を使うバックグラウンドはこれからますますよくなっていくのではと予想しており、こういう新しい技術を使って改良した植物がだんだん普通に栽培できるような時代が絶対来るということを結びにして、私の話題提供としての発表を終わりにさせていただく。

(Q&A)

Q：ゲノム編集技術の応用先の展開の見通しについて、今回御紹介いただいたGABAのような食品としての価値を高めるような機能の付与というのが、まずは農家にとっても大きなモチベーションとしてはあってこのような研究も集中しているのではと想像したのだが、今回のテーマにあるようなカーボンニュートラルという観点では、食品の高機能性以外に例えばエネルギー作物ですとか樹木のほうへのゲノム編集技術を活用した展開というのは、現状どのような状況か。

A：いわゆるエネルギー植物と言われているような樹木などのハードバイオマスのことか。そのような展開でも使われ、研究としては行われている。エリアンサスとミスカンサスのようなソフトバイオマスであれば、それについてもこのような技術の展開が行われていると理解している。

ただ、植物種によっては初期のゲノム編集技術というようなものだと、この植物ではできる、この植物ではできないということがあるので、新しいジンデリバリー方法を開発して、例えば組織培養を使わないでゲノム編集をしてしまう技術開発も急速に進んでいる。そこがクリアされると、かなりいろいろな植物種でゲノム編集を利用して改良していくというようなことができるようになってくると思う。

植物の遺伝子機能の開発に関しては、1990年代からかなり基礎研究のところに大きなお金をつぎ込んで、いわゆるベースになる研究というのは山ほどある。あとはその成果をジンデリバリーの方法を大幅に改良することなどによってどんな植物でもできるような形になると、その過去30年間の基礎研究の成果がこのゲノム編集技術を使って、これは機能性改良だけではなく、生産性向上であったり、光合成特性の改良などに使えるようになるのではと思う。

現在、ジンデリバリーに関しては、面白い国産のジンデリバリーの技術の開発も、JSTの未来社会創造研究開発事業などで行われているので、あと5年、10年でできると、一気にいろいろな植物種に、エネルギー植物も含めて、場合によっては水の中のブルーカーボンなんかも含めたような植物も含めて、このような技術が展開されると思われる。それまでにとにかく一般の皆さんの理解を得ることがまずは大切で、今回は人が直接利益を見ることができる機能性に注目している。実際には多分いろいろな植物でいろんな形質について改良可能になってくると思う。

- Q：ゲノム編集して作られたトマトや、その例えば何世代かにわたる安定性というものはいかがか。例えば、その後いろんな交配を繰り返して、ある管理状態で交配させないというのかもしれないが、その安定性について伺いたい。あと、自然環境なり栽培環境の安定性というのはどのように考えられているのか。そこまで全部うまくいっているということなのか。
- A：突然変異の入れ方はゲノム編集を使っているが、従来の突然変異の品種改良で使うような手法と、変異を入れた変異と全く同じなのである。我々が届出をする前の段階で入れた突然変異が世代を超えて安定して伝わるということを証明して、それで初めて届出をするので、入れた突然変異によっては消えてしまうものがあるかもしれないが、遺伝的に安定していることが実は届出が受理される条件になっているので、その辺の確認は行っている。
- Q：そうすると、かなり大変な作業で、単に編集してうまくいったというだけでは済まない、かなりの作業が残っているということか。
- A：種を3回、自殖して種を3世代進めればいだけなのでそんなに大変な仕事ではない。普通に品種改良をやっている人であれば皆さんがやっている方法と同じである。
- Q：いわゆるこういうものに対して各国の規制、日本も含めて、食べるものとなると、当然すごく色々な規制がかかってくると思うが、先ほどのエネルギー作物等、基本的には食べないものとなった場合に規制というのは全く同じなのか、それとも一応日本、取りあえず御存じの範囲の中でどのように違いがあるのかないのかをお聞きしたい。
- A：規制は全く同じであるが、ただ、例えば食べないものであれば、先ほどの農水省とか環境省への生物多様性影響に関してありませんという届出だけで済む。ですから、樹木とか食べないような先ほどのエネルギー植物みたいなものは栽培だけなので、農水省、環境省への届出だけで済むということになると思う。ちなみに規制は、国際的なハーモナイゼーションが非常に大事だということで、それこそ毎日、毎週のようにいろいろな国でワークショップが行われ、いろいろな規則を合わせていこうと進んでいる。日本が最初に始めたため、日本の法規制にいろいろな国が、特に東南アジアは合わせていこうと今進んでいる。日本で開発したものをそういうところに持ち出そうとしたときには、規則が同じで、届出の言語を変えればよいような感じになるので、かなり出ていきやすくなるのではないかと考えている。
- Q：ある意味、そういう意味でも先行的に標準化していくというメリットもあるということか。
- A：規制のルールが、日本標準がアジア標準になり、それから欧米はかなりアジアに食料を輸出しているので、それが世界標準になるのではないかと思います、ワークショップを毎日のように飽きずに出席している。
- Q：高機能トマトの場合コスト的にはどのようになって、また、エネルギー作物に転換の場合には、食料とコスト的にはどのように違いがあるか伺いたい。
- A：実験したりするところや開発したりするところはそれほどかからないと思うが、知財化された技術（ゲノム編集技術）を使うため、知財が関わってきますので、その部分をどのように対応するかによってコ

ストが違ってくると思う。

ただ、知財は利用者と当事者の1対1の関係で決まるので、一応標準的なルールはあるが、あとは交渉で何とでもなるのではと私自身は思っている。

CRISPRに関しては、もう公表されているところでは、実施する企業の規模によってライセンス料が違い、あとは何をするかによっても違ってくるため、その辺は交渉次第ということになると思う。トマトに関しては、その辺の知財も含めて、何とかクリアできそうと判断し、事業化を始めている。

A1.2 植物の生産量を増加させる技術開発の一例 ～食糧増産とCO₂や肥料の削減に期待～

木下 俊則（名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所・
名古屋大学大学院理学研究科 教授）

私が現在進めている研究にフォーカスして、バイオマスの増加や、CO₂及び肥料の削減に期待できる技術開発の成果の一部を紹介する。

この話を進める中で、一つキーとなる酵素が、細胞膜プロトンポンプ、プロトンATPaseという酵素で、これについてまず簡単に紹介させていただく。この酵素は、ATPの加水分解エネルギーを利用して水素イオンを細胞の外へ能動輸送する酵素で、植物の細胞膜に局在する10回膜貫通領域のタンパク質で、藻類からいわゆる維管束植物まで高度に保存され遺伝子ファミリーを形成しているもので、例えば実験でよく使われるシロイヌナズナであれば11個、イネであれば10個の遺伝子ファミリーを形成している。

この酵素は様々な生理現象に関与することが知られているが、働きとして、植物の恒常性の、細胞の恒常性維持とか、この酵素によって作り出された細胞膜を介したプロトンの電気化学ポテンシャル勾配を利用した様々な二次輸送体と共役した物質輸送といったものに関わるといことが知られている。

具体的に関わる生理現象については多くのことが知られているが、根における養分吸収、そして気孔開口において重要な働きをしていることが知られている酵素になる。

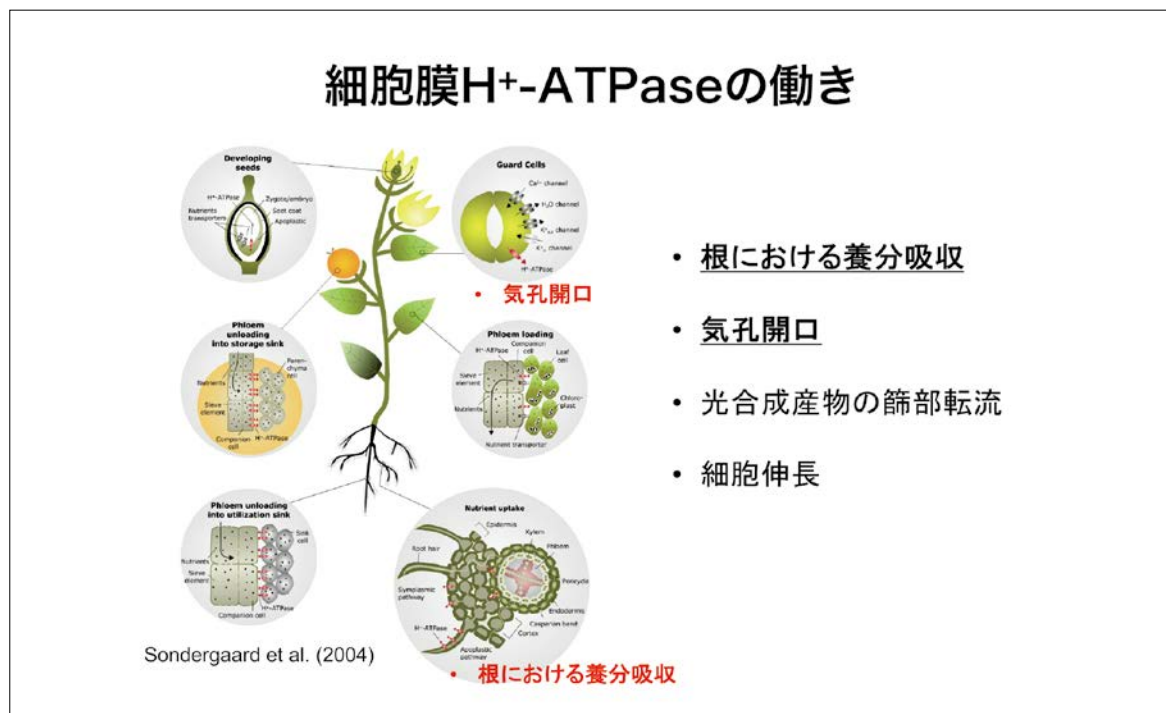


図 A1-2-1 細胞膜 H⁺-ATPase の働き

実際に私が研究対象としている気孔について次に簡単に紹介する。表皮に存在する気孔というのは、一对の孔辺細胞によって構成されているもので、植物と大気間のガス交換を担う重要な働きをしている。例えば、気孔は、光合成を盛んに行う太陽光に応答して開口し、それによって大気中から二酸化炭素の取り込み、そして、蒸散を行い、蒸散に伴って根における養分吸収を行うという重要な働きを担っている。

私たちの目では、植物の葉に存在する気孔というのは肉眼では見えないが、植物の葉っぱを100倍以上に倍率を上げて見ると気孔が見えてくる。

植物にもよるが、気孔は植物の葉の1ミリ平方角に100個から200個程度あると言われていて、植物というのはこの気孔の開度を厳密に制御することで二酸化炭素の取り込みや水の損失を制御するという重要な働きを担っている。朝、日が昇ると太陽光にตอบสนองして気孔が開くのを日々繰り返している。

気孔は、植物が生きていく上で非常に重要な働きを担っている。私はこれまで主に気孔がどのようにして開くかという基礎研究をずっと進めてきた。その結果、光にตอบสนองして気孔が開く際に、光受容体として機能する青色光受容体、フォトロピンや、気孔が開くときのエンジンのような働きをする、先ほども説明した細胞膜プロトンポンプという酵素の関与を明らかにしてきた。

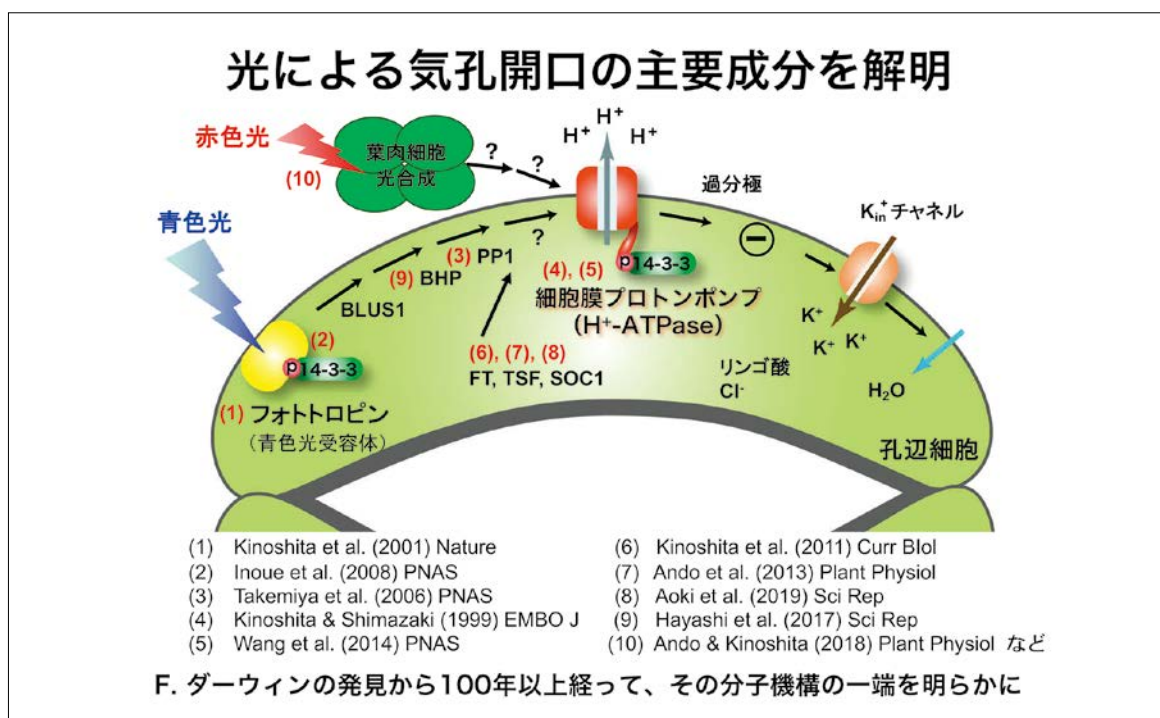


図 A1-2-2 光による気孔開口の主要成分を説明

ただ、気孔が開くメカニズムについてはまだまだ不明の部分が多い。こういった分子気孔の解明を目指して基礎研究を進めている。加えて、気孔開度の制御を行うことについても取り組んできた。例えば、ケミカルスクリーニングによって得られた気孔開口を抑制する新しい化合物を用いた実験結果になるが、この化合物自身がどのようにして気孔開口を抑制するかということも基礎研究としては非常に興味がある。この化合物をバラの葉っぱにスプレーして、切り取ってしばらく置いておくと、当然葉っぱはしおれていくが、特にSCL1や4は、葉がしおれていくのをほぼ抑制することができるということが分かってきた。こういった化合物を使うと、植物の鮮度維持や、乾燥地で非常に植物が乾燥ストレスにさらされて育ちにくいような環境でも生育を可能にするようなことにつながっていくのではないかと考えている。

更に、ここではモデル植物のシロイヌナズナを用いた実験結果になるが、気孔が開くときにエンジンの働きをする非常に重要な細胞膜プロトンポンプを孔辺細胞のみで過剰に発現させることによって、シロイヌナズナの気孔開口が促進され、それに伴って光合成活性が増加して、最終的に植物の生産量が増加するということが分かってきた。これらの結果から、実際に気孔開度は光合成や生産量の制限要因となっていることを初めて実証することができ、気孔開度が植物の成長や乾燥耐性にとっても重要であるということが分かってきた。

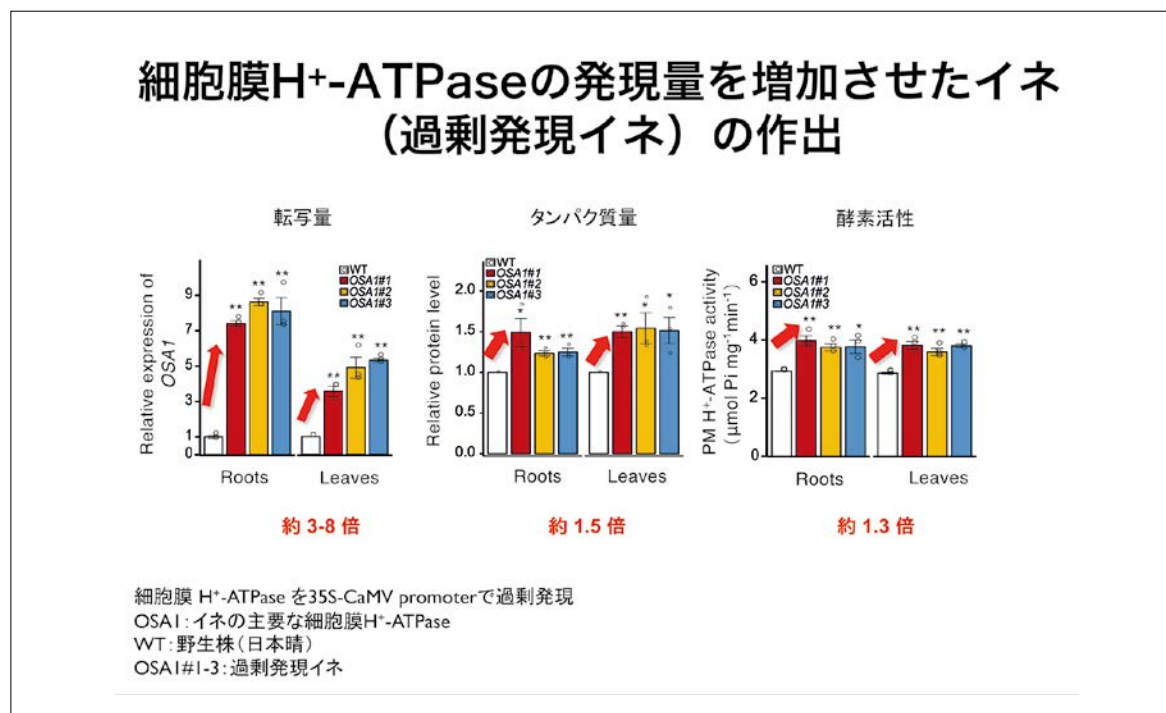
ここまでは、主に気孔に着目して進めてきた研究についてだが、細胞膜プロトンポンプという酵素は、気孔のみならず、根における養分吸収においてもかなり重要な働きをしていることが分かってきたので、そちらにも着目しながら研究を並行して進めてきた。

ここではイネを使った研究成果を紹介させていただく。まずイネの根におけるプロトンポンプの働きについて解析を進めた結果、これまでリン酸やカリウムといったイオンの吸収にプロトンポンプが重要であるということとは知られていたが、新たにイネの主要な窒素の無機養分であるアンモニウム、その取り込みにもプロトンポンプが重要であるということが解析の結果分かってきた。

これらの結果を考えると、細胞膜プロトンポンプを植物体で増やすことで、光合成による炭素の吸収のみならず、根における養分吸収、特に窒素とか、そういったものの両方がバランスよく高まるということが予想された。

これまでの研究から、実際植物に対して炭素だけを増やす、二酸化炭素だけを増やすということをやってもある程度のところで頭打ちがある。また、窒素だけを増やすということでもある程度で頭打ちがあるということが知られていて、この窒素と炭素、両方をバランスよく増やすことが植物の生育にとって非常に重要であるということが知られていたもので、その両方を改変する、良くするために、このプロトンポンプが有用ではないかということが分かってきた。

そこで、このプロトンポンプを、ここでは35Sカリフラワーモザイクウイルスプロモーターという、植物の全体で発現を増やすプロモーターを使って発現量を増やした。以後、過剰発現イネと呼ぶが、プロトンポンプを増やしたイネの作出を行った。



図A1-2-3 過剰発現イネの作出¹⁾

- 1 Zhang M, Wang Y, Chen X, Xu F, Ding M, Ye W, Kawai Y, Toda Y, Hayashi Y, Suzuki T, Zeng H, Xiao L, Xiao X, Xu J, Guo S, Yan F, Shen Q, Xu G, *Kinoshita T, *Zhu Y (2021) Plasma membrane H⁺-ATPase overexpression increases rice yield via simultaneous enhancement of nutrient uptake and photosynthesis. Nature Communications, 12, 735. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-20964-4>

以後の実験ですと基本的には3系統のものを、野生株と比較しながら調べているのだが、その結果、これら過剰発現イネでは、転写量、たんぱく量、プロトンポンプの酵素活性がこのように高まった植物体を作ることができた。

そこで、まずこのイネの気孔の表現型の観察を行った。その結果、期待した通り、気孔は暗い状態や気孔を閉じさせるホルモンのあるアブシジン酸を含む状態では気孔は閉じているが、光を当てることによって気孔が開口し、それが20%から25%程度開度が上昇していることが分かってきた。

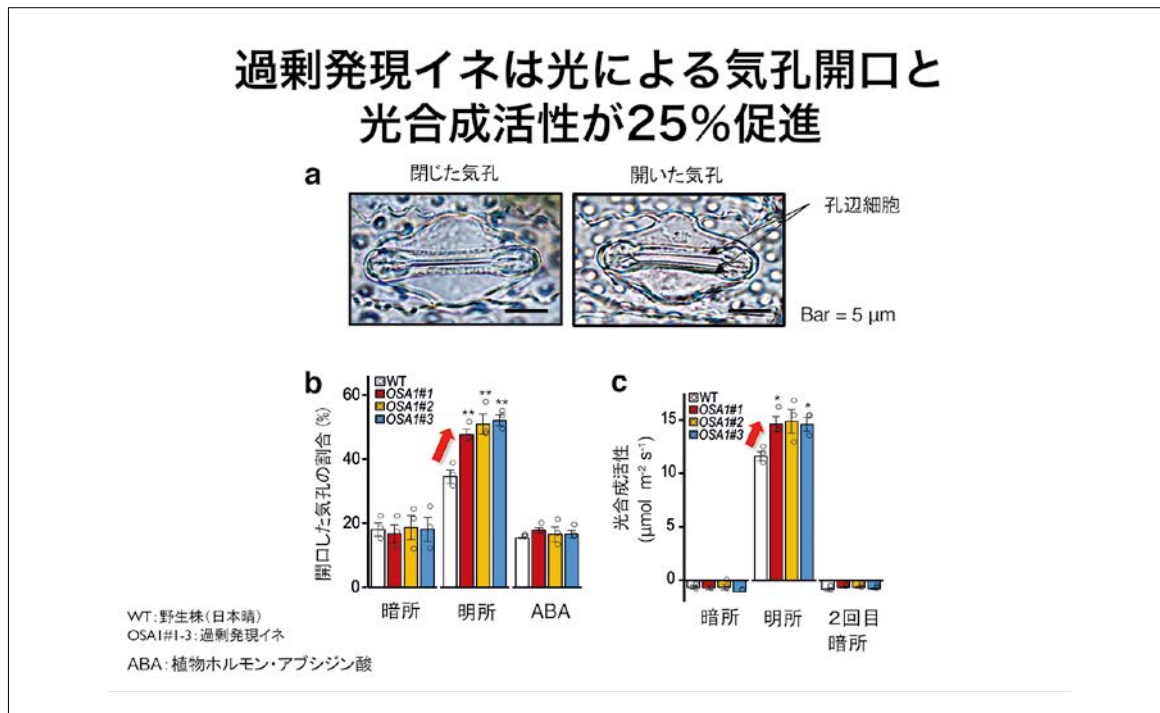
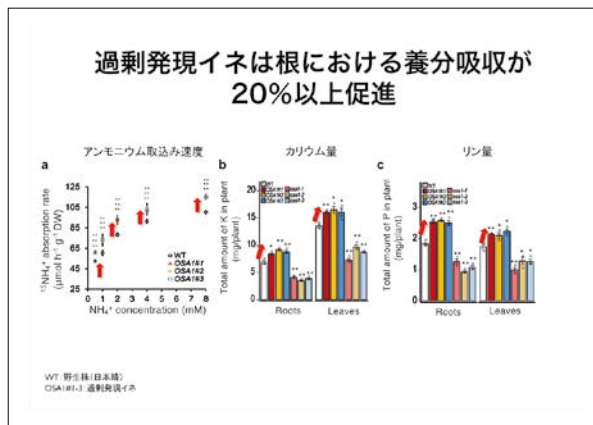
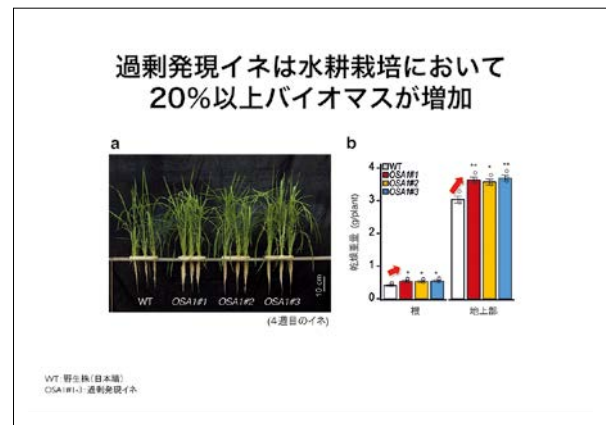


図 A1-2-4 光による気孔開口と光合成活性¹

それと同時に、光合成蒸散測定装置によって光合成活性を測定すると、葉っぱの単位面積当たりの光合成活性が約25%増加していることが分かってきた。

次に、根のほうの養分吸収はどうかということで、過剰発現イネにおけるアンモニウムの取り込み速度やカリウム量、リン酸の量というのを測定した結果、予想どおり、これらのイオン、正確に言うとアンモニウム取り込み速度が20%程度増加していて、カリウムやリンの量も20%以上増加しているということが分かり、これらの植物では炭素と窒素がバランスよく増えていることが分かってきた。

そこで、これらのイネを用いて生育を調べてみた。まずは実験室内でできる水耕栽培によって調べたのだが、野生株のイネと比較して、これらのイネではやはり一回り大きくなっていて、根や地上部において大体20%以上、バイオマスが増加していることが分かってきた。

図 A1-2-5 過剰発現イネの養分吸収¹図 A1-2-6 過剰発現イネのバイオマス¹

これまで、私たちだけではここまでしか実験ができなかったが、実際にこの技術が野外の厳しい環境でも役立つものかどうか、通用するかどうかに関して、遺伝子組換えイネを栽培可能な隔離野外圃場を持っている中国の南京農業大学のデュー教授との共同研究により、収量評価試験を行った。

年を変え、場所も変えて、4か所でその収量評価試験を行った。南京や2017年の鳳陽のいわゆる田んぼに、普通のイネと同じような植え方で生育させて、その評価を行った。

スライドの図は2017年、南京の5か月齢のイネで、収穫直前の状態のものだが、ここまで成長してきた。この状態では少し分かりにくいので、ランダムにイネを抜いて、バケツに移し替えたのが次のスライドである。やはり野生株と比較してこれら過剰発現株というのは一回り大きく育っている。おのおのイネモミの量も増えていそうな写真であった。

図 A1-2-7 圃場での収量量評価
(1-3週齢)図 A1-2-8 圃場での収量量評価
(約5ヶ月齢)

そこで、これらの収量を厳密に測定した結果が次のスライドになる。その結果、過剰発現イネは全ての野外水田において約30%以上収量が増加していることが分かった。よって、バイオマス増加、もしくは収量の増加という点ではかなり有用な技術ではないかと現在考えている。

通常、イネの収量というのは20%前後は環境条件によって変動すると言われている。今回示したように4か所の圃場で平均30%以上収量が増加する結果は、これらの変化を上回る収量の増加で常に効果が期待できる技術ではないかと考えられる。

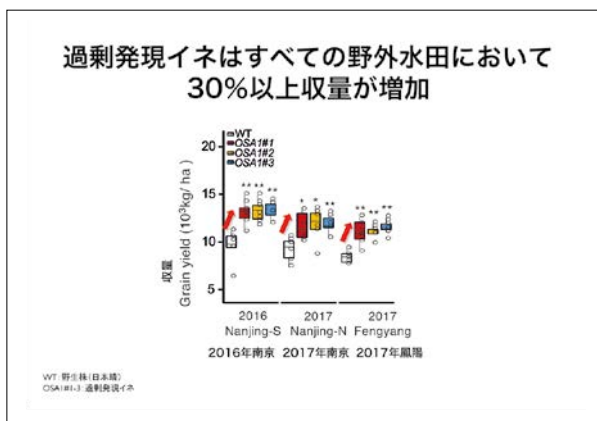


図 A1-2-9 過剰発現イネの野外
水田での収量¹

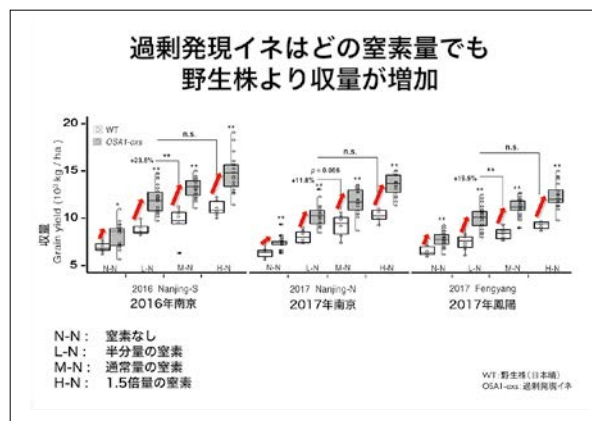


図 A1-2-10 過剰発現イネの窒素
量ごとの収量¹

加えて、私たちは、窒素の施肥量を変える実験も同時に行った。具体的には、通常の窒素量に対して1.5倍に増やした場合と、その半分、もしくは窒素肥料を与えないといった4つの条件で各フィールドにてイネを育てた。

その結果、全ての窒素肥料の条件下において、白いのが野生株で、灰色が過剰発現イネになるのだが、過剰発現イネではどの窒素量でも、野生株よりも収量が増加しているということが確認できた。

その一部を抜き出すと、このように半分の窒素量で育てた場合も通常量の窒素の場合も過剰発現イネの収量が多いが、興味深いのは、半分量の窒素で育てた過剰発現イネは、通常の窒素量で育てた野生株と比較して、収量が10から20%程度多いということが分かり、この結果から、窒素の施肥量を半分に減らしても、過剰発現イネであれば通常を上回る収量を得ることができるのではないかと考えている。

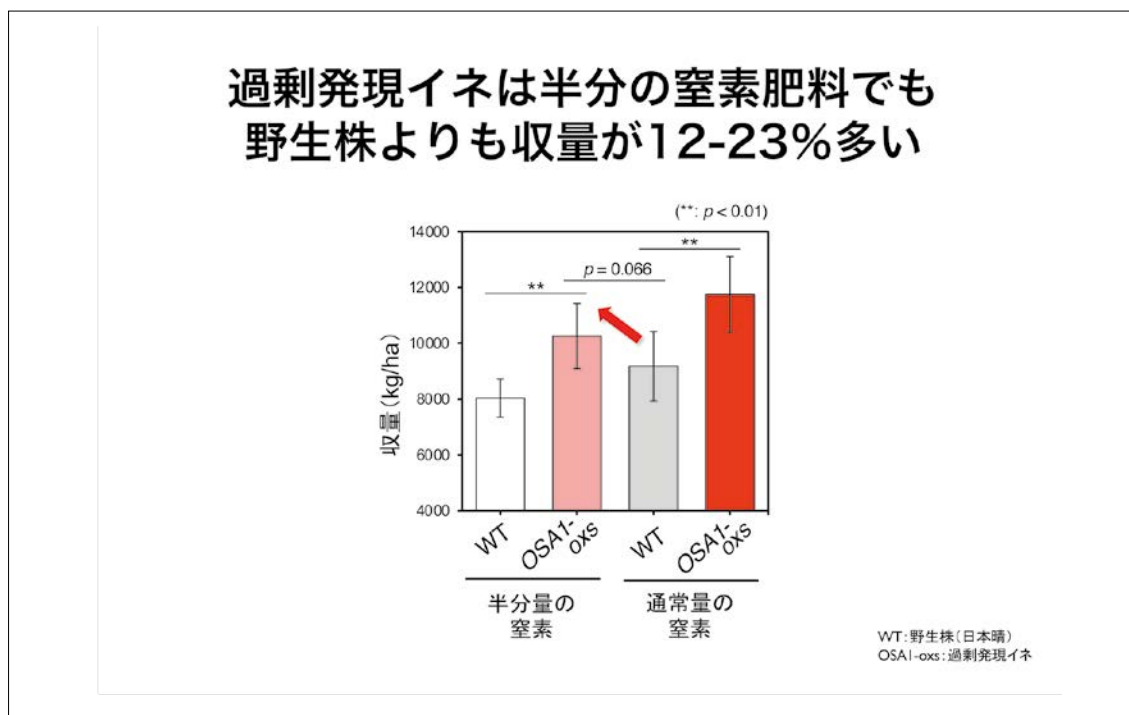


図 A1-2-11 過剰発現イネの収量の比較¹

以上、結果をまとめると、我々の取り組む技術は、野外圃場においてもプロトンポンプの過剰発現イネの収量が30%以上に増加できたことから、バイオマスの増加を期待できる技術で、現在問題となっている地球温暖化の原因となっている二酸化炭素や、環境汚染の原因となっている窒素の削減に期待できる技術ではないかと考えている。

論文の中で、私たちはこの植物をポンプ植物と名づけた。今後の展開としては、植物における気孔開口や、根における養分吸収は、基本的にはどの植物でも共通していることが知られているので、この技術を様々な作物での有用性を確認していくことが重要であると考えている。

もう一点は、現在、この植物は遺伝子組換え技術で作出したものになるので、例えばゲノム編集によってプロトンポンプの発現量を増加させることができるかどうか、もしくは活性制御におけるネガティブレギュレーターの変異体でプロトンポンプの活性を上昇させることができないか、さらに気孔開口を促進する化合物を用いることで遺伝子組換えに頼らない方法でポンプ植物が作出できるのではないかと考えていて、現在、そういった方面の解析も進めている。

(Q & A)

Q：このポンプ植物はエネルギー植物や森林にも応用可能か。

A：十分可能であると考えていて、今植物として木本のポプラで試している。同じような効果が出てきていることが分かっているので、様々な植物でできるのではないかと考えている。ただ、エネルギーに有用な植物は私たち自身では研究対象にできないので、今後は共同研究でそういった植物を扱っている方と一緒に連携していければと考えている。

Q：プロトンATPaseを使って気孔を開くことで成長を促すことは理解できたのだが、一方で、いわゆる乾燥耐性というところではやはり逆に別な考え方がないと駄目ということなのか。当然、イネなどはニーズが十分にあるという前提で、そこがボトルネックにはならない植物であるが、いわゆる水の少ないところとか、耐性というのはいかがか。

A：おのおのの植物の水利用効率を計算することができるが、やはりこのポンプ植物は気孔がより大きく開いている分、水利用効率が10から20%低い。ということは、水の量を単純に言うと10から20%増やしてあげないとこのいい効果は引き出せないということになる。この植物を利用するにはある程度水がちゃんと確保できたことが重要となる。

ポンプ植物の気孔はより大きく開くが、閉じるときはきちんと閉じる性能を持っているため、例えば暗い状態であると気孔は閉じていて、アブシジン酸が増加するようなときも気孔は閉じるので、野生株と同程度の乾燥耐性は持っている植物ではないかと考えている。

Q：植物の生産性を考えたときに、単位肥料当たりどのくらい取れるかというのはすごく重要な視点で、先ほどのデータから見るとかなり肥料を減らせるということは、肥料1グラム当たりの収量が増えているということだと思うが、水についても質問があり、植物を栽培するときに水がかなり重要な要因になってくるので、例えば水1グラムに対してどのくらいバイオマスが生産できるかという視点で計算をすると、前の回答で収量が3割増えて、水が一、二割減るのであれば、水1グラム当たりのバイオマスの生産性も増えているということになるのか。

A：水利用効率10から20%増やしても、収量が30%増えるのであればそういう計算はできていると思っている。

Q：水利用効率がちょっと下がってしまうというお話だったと思うが、水利用効率はどのような時期に下がっているか。

A：できれば全てのステージにおいてこれを調べたかったが、調べたのがちょうど田植前後の3週間から4週間程度の芽生え後で、あともう一つは田んぼに植えてから収穫の2週間ほど前の4か月齢ぐらいのところであった。でも、両方で大体10から20%程度低くなっているということで、生育期間通して基本的には少し気孔が開きぎみの分、水がたくさん要するという印象を受けている。

Q：今までの水利用の観点だが、養分吸収の促進というのも、基本的には水の吸収を言ってみればがばがば水を飲む植物だから、それに付随して窒素やリンと一緒に取り込みが良くなると、そのような副次的な効果と見たほうがいいのか。

そうだとすると水田だと分かりやすいのだが、ポプラでも同様の効果が見られたとなると、そういう水の移動だけに頼らなくてもある程度積極的に吸い上げられるようにも思えるのだが、その辺の養分吸収について、水の関わり合いについて教えていただきたい。

A：今回の植物は、根におけるプロトンポンプの量も増えていて、そこでの活性も増えているので、恐らく気孔が開くことによって水がたくさん取り込まれることで入り込むという養分吸収がプラスアルファとなる。根における養分吸収も高まっているので、水の流入だけに頼っている部分ではないと考えている。

Q：気孔の開閉の制御の部分で、葉っぱがしおれていくものに対して、制御したものに関しては葉っぱの鮮度が保たれているという話があったが、例えば塩の濃度が高い部分であるなど一般的に栽培が難しいと言われていたところではこういった能力が植物に必要なのか。

A：まさしくそこを今後やっていきたいと思っている。これはあくまでも切り取った葉っぱに振りかけるとこういう差が出たということで、今進めているのは、土壌中の水分をどんどん抜いていくときにこういったものをかけておくと、いわゆる乾燥耐性が高まるかどうかについてである。全てではないが、幾つかのものは乾燥耐性が高まっているのではないかなというふうなことが分かってきている。ただ、今言われた耐塩性に対しても効果があるかというのは、そこはまだ全くやっていない状況である。

Q：窒素以外に関しては、リンなどは、ほかにもあると思うのだが調べられているのか。

A：ここでは窒素、リン、カリウムと枝葉養分だけを対象としているが、15種類程度の、いわゆるマイナーミネラルも含めて一応質量分析で測定しており、基本的には過剰発現イネでは取り込み量、いわゆる含量が増えているという結果が出てきている。

Q：皆共通の仕組みで促進されているということか。

A：そうですね。いわゆるイオン性のミネラルは大体プロトンポンプの濃度勾配というか、水素イオン濃度勾配を利用して共役して運ばれていると言われている。

Q：収穫量も増えるということで、植物体のサイズも同じように並行して大きくなるという理解で合っているか。

A：そうですね。いわゆる花を咲かせる前は葉っぱの重量も増えていて、この収穫前の条件での状態で見ると分かるように、背丈も少し高くなっている。稲穂の部分以外も大きくなっている、植物全体的に大きくなっていると思っている。しかし、稲穂だけを除いて厳密に最後収量のところを測ってはいない。

Q：なるほど、歩留まりが良くなったりしないのか一瞬期待してみたのだが。

A：厳密に比較というか、比例関係見たことがないので何とも言えないが、植物体自身も大きくなっているという感じはある。

Q：SR比やCN比は動いてくるか。シュートルート比、地上部と地下部の割合の重さの割合についてである。

A：そこは大体同じ感じで増えているという感じだ。

Q：なるほど。では本当に全体が大きくなったという感じなのですね。

A：今僕たちが調べている限りではそういう印象を受けている。

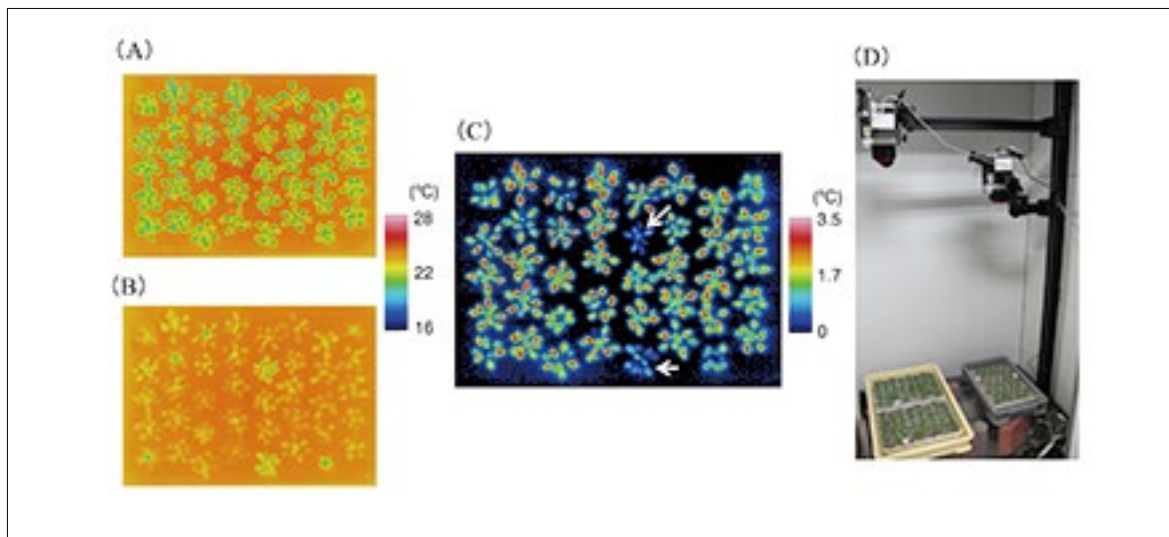
A1.3 地球高CO₂化と植物の環境適応

射場 厚（九州大学理学院 生物科学部門 植物生理学研究室 教授）

本講演では植物のCO₂適応に関わる機能因子についてお話しする。

気孔は外部環境と体内とをつなぐ通路であり、植物は気孔を通して二酸化炭素（CO₂）の取り込みと蒸散を行う。気孔を構成する一対の孔辺細胞は、光強度、乾燥、CO₂濃度（[CO₂]）といった様々な外部環境シグナルを受容する。受容された環境情報は気孔で統合され、植物体の成長・生存に最適となるようその開度が調節される。従って気孔は植物の環境感知メカニズムを解明する上で重要な器官であると考えられる。しかしながら、その具体的な分子機構は未だに不明な点が多い。その要因の一つとして遺伝学的な解析がこれまで困難であったことが挙げられる。通常、変異株を単離するためには、数万個体のオーダーで植物体をスクリーニングする必要がある。その膨大な数の植物体における気孔開度を1個体ずつ測定すると非常に手間がかかるため、そのような解析はハードルが高かった。

気孔を介してCO₂が吸収されるとき、同時に水蒸気が放出（蒸散）される。気孔の開口によって蒸散量が増加すると、蒸散とともに熱も奪われ、葉面温度は低下する。逆に、気孔が閉鎖すると蒸散量が減少し、葉面温度は上昇する。サーモグラフィにより植物の葉面温度変化を可視化することで植物の気孔応答を測定することができる²。この技法の利点は、一度に大量の数の植物を網羅的かつ非破壊的に観察できることである。植物は低[CO₂]環境下では気孔を開き、高[CO₂]環境下では気孔を閉じる。それぞれの[CO₂]環境下で順応させた植物の葉面温度を測定し、その差分を取ると、葉面温度変化を気孔開閉応答性として評価することができる（図 A1-3-1）。



図A1-3-1 サーマグラフィを用いた気孔CO₂応答性変異株のスクリーニング

(A) 低 [CO₂] (0 ppm) 条件下で2時間順応させたシロイヌナズナ変異株のサーモグラフィ画像。(B) 高 [CO₂] (1,000 ppm) 条件下で1時間順応させたシロイヌナズナ変異株のサーモグラフィ画像。(C) Bの画像からAの画像を差し引きし、CO₂応答性を可視化した。赤くなるほどCO₂応答性が高く、青くなるほどCO₂応答性が低いことを示す。白矢印で指した植物はCO₂応答性に異常を持つ変異株である可能性があると考えられる。(D) 温度・湿度・[CO₂]精密制御チャンバーを用いたサーマルイメージングシステム。

2 Negi J, et al. (2013) New approaches to the biology of stomatal guard cells. Plant Cell Physiol. 55, 241-250.

私たちは、[CO₂] 変化に対する葉面温度変化を指標に変異株スクリーニングを行い、多数のCO₂非感受性変異株を単離し、その原因遺伝子の解析から植物のCO₂感知・適応に関わる重要因子の同定を進めてきた² (図 A1-3-2)。

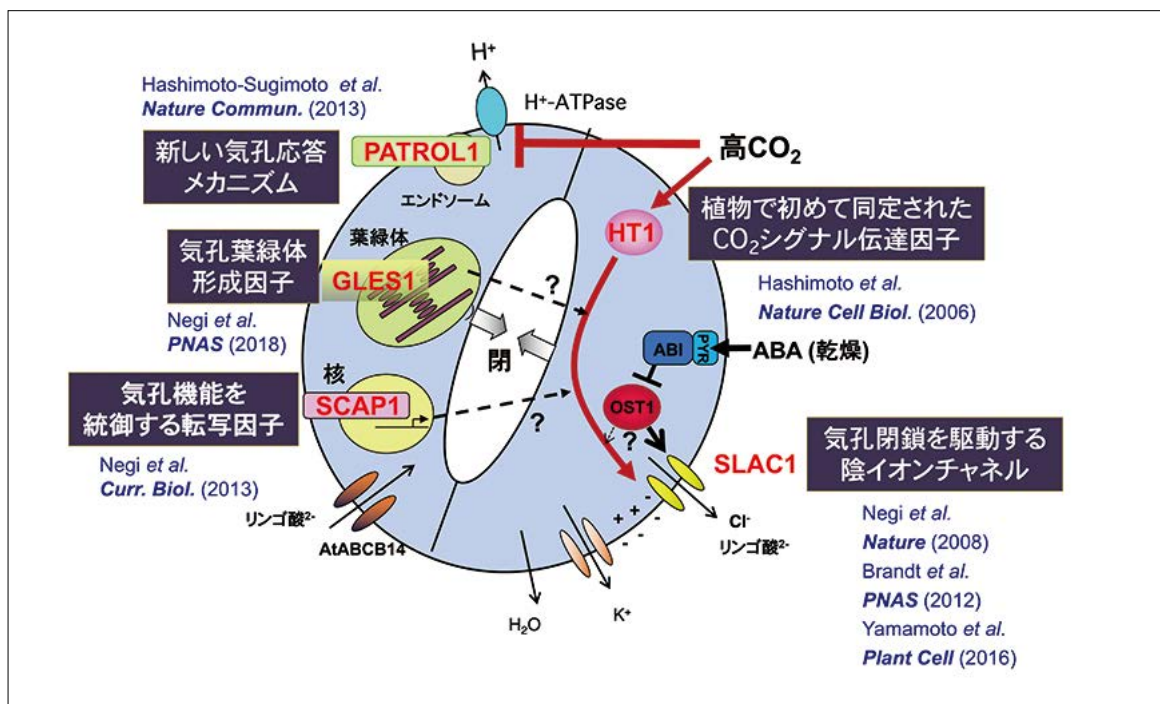


図 A1-3-2 サーマルイメージングを用いた順遺伝学アプローチによって同定されたCO₂関連気孔機能因子

さらに、同様の技法を野生シロイヌナズナ集団に対しても用い、[CO₂] 変化に対する気孔応答性に特徴を持つエコタイプを選抜した³。ここでは、変異株やエコタイプの解析によって得られた、分子レベルでの植物におけるCO₂環境情報の受容、伝達、統合機構についての研究成果を紹介する。

• 気孔におけるCO₂応答のマスターレギュレータHT1

high temperature 1 (*ht1*) 変異株は低 [CO₂] 条件下でも常に高い葉面温度を示す劣性変異株として単離された^{4,5}。これらの変異株の気孔は [CO₂] 変化に応答せず、閉じたままになる。逆に、優性突然変異株 *ht1-3* は高 [CO₂] 条件下でも常に低い葉面温度を示していた⁵。特に、*ht1-2*、*ht1-3* は低 [CO₂] が誘導する気孔開口が全く起こらず、むしろわずかに閉じるという反応が見られ、高 [CO₂] が誘導する気孔閉鎖が起こらず、わずかに開口した^{4,5}。さらに、光照射や気孔閉鎖ホルモンであるアブシジン酸 (ABA) に対する応答性を調べたところ、*ht1-2*、*ht1-3* ともその応答性は正常であった一方、光照射による気孔開口反

- 3 Takahashi S, et al. (2015) Natural variation in stomatal responses to environmental changes among *Arabidopsis thaliana* ecotypes. *PLoS One* 10, e0117449.
- 4 Hashimoto M, et al. (2006) *Arabidopsis* HT1 kinase controls stomatal movements in response to CO₂. *Nat. Cell. Biol.* 8, 391-397.
- 5 Hashimoto-Sugimoto M, et al. (2016) Dominant and recessive mutations in the Raf-like kinase HT1 gene completely disrupt stomatal responses to CO₂ in *Arabidopsis*. *J. Exp. Bot.* 67, 3251-3261.

応は低下していた^{4, 5}。また、*ht1-2*変異株においては青色光による気孔開口反応は低下するが損なわれなかった^{4, 5}。これらのことからHT1がCO₂シグナル伝達経路の主要な制御因子であり、光シグナル伝達経路にも一部関与していることが示唆された。

HT1はアミノ酸配列の解析からRaf様グループCのMitogen activated protein kinase kinase kinase (MAPKKK)に分類されることがわかった⁵。HT1の特性を解析するために、カルシウムキレート剤やプロテインキナーゼ阻害剤を用い、HT1のキナーゼ活性を測定した。その結果、HT1活性はカルシウムキレート剤の影響を受けず、また、セリン/スレオニンキナーゼ阻害剤によってわずかに活性が抑制された⁵。さらに、C-Raf1キナーゼ阻害剤によって活性が有意に抑制された⁵。これらのことから、HT1はカルシウムイオン非依存性のセリン/スレオニンRaf1キナーゼファミリーに属していることが示唆された。

近年、HT1を中心としたCO₂シグナル伝達経路が徐々に明らかにされつつある。気孔閉鎖に重要な役割を果たしているOPEN STOMATA1 (OST1)とHT1の二重変異株*ost1-3/ht1-2*を作成し、CO₂応答性の解析を行った結果、HT1は機能的にOST1の上位にあることが示唆された⁶。また、アフリカツメガエル卵母細胞を用いたin vitro実験において、陰イオンチャネルであるSLOW ANION CHANNEL-ASSOCIATED 1 (SLAC1)のOST1による活性化が、HT1によって阻害されたが、気孔応答に関与すると言われているMPK12を共発現させるとSLAC1の活性化が見られた⁷。このことから、MPK12がHT1のはたらきを抑制することが明らかとなった。HT1とOST1との間にどのような相互作用があるのか、また、それがSLAC1の活性化にどのような影響があるのかはまだ明らかになっておらず、in vivoにおける検証実験が必要である。

• 気孔閉鎖を駆動する陰イオンチャネルSLAC1は異なる部位でCO₂とABAのシグナルを受容する

気孔開閉運動において、その駆動力を形成するのに重要なはたらきをしているのが孔辺細胞膜に存在するプロトンポンプやイオンチャネルである。気孔が高[CO₂]やABAを感知すると孔辺細胞から陰イオンの放出が始まる。これが端緒となって、細胞外への水の流出が生じ、気孔が閉じる。これまで、電気生理学的な手法により、高[CO₂]やABAなどによって孔辺細胞膜上に陰イオン電流が生じており、この電流には、ゆっくり活性化されるS (slow)型と、素早く活性化されるR (rapid)型の二通りが検出されることが報告されている⁸。[CO₂]非感受性変異体として単離された*carbon dioxide insensitive 3 (cdi3)*変異体の原因遺伝子は、S型陰イオンチャネルSLAC1をコードしていた⁹。SLAC1は真菌や細菌のジカルボン酸/リンゴ酸輸送体の遠縁のオルソログであり、孔辺細胞の細胞膜で特異的に発現している⁹。アフリカツメガエル卵母細胞を用いた電気生理学的手法より、SLAC1単体では陰イオンチャネル活性を示さないが、リン酸化因子を同時に発現させることで活性を持つことが示された^{10, 11}。

SLAC1の活性化にはN末端領域に存在する特定のアミノ酸がリン酸化されることが重要であり、これまで

- 6 Matrosova A, et al. (2015) The HT1 protein kinase is essential for red light-induced stomatal opening and genetically interacts with OST1 in red light and CO₂-induced stomatal movement responses. *New Phytol.* 208, 1126-1137.
- 7 Hōrak H, et al. (2016) A dominant mutation in the HT1 kinase uncovers roles of MAP kinases and GHR1 in CO₂-induced stomatal closure. *Plant Cell* 28, 2493-2509.
- 8 Schroedar JJ, et al. (2001) Guard cell signal transduction. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52, 627-658.
- 9 Negi J, et al. (2008) CO₂ regulator SLAC1 and its homologues are essential for anion homeostasis in plant cells. *Nature.* 452, 483-486.
- 10 Lee SC, et al. (2009) A protein kinase-phosphatase pair interacts with an ion channel to regulate ABA signaling in plant guard cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 21419-21424.
- 11 Geiger D, et al. (2009) Activity of guard cell anion channel SLAC1 is controlled by drought-stress signaling kinase-phosphatase pair. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 21425-21430.

その部位の探索が行われてきた。ABAシグナル伝達因子の一つであるOST1は、N末端領域に存在する120番目のセリンを、また、CALCIUM-DEPENDENT PROTEIN KINASE 6 (CPK6)は59番目のセリンをリン酸化し、SLAC1を活性化する^{10, 11, 12, 13}。逆に、ホスファターゼであるABA INSENSITIVE 1 (ABI1)は59番目のセリンを脱リン酸化することでSLAC1を不活性化する¹³。このようなABAを介したSLAC1の活性化制御メカニズムに加え、SLAC1がCO₂によって活性化されるのに必要な領域が近年明らかになった¹⁴。SLAC1機能欠損変異体にSLAC1タンパク質のC末端またはN末端、また、N末端とC末端の両方を欠失させたコンストラクトを導入し、CO₂とABAに対する気孔応答性を調べた結果、いずれの形質転換植物もABA応答性の欠失は相補されなかったがCO₂応答性は回復した¹⁴。また、N末端とC末端の両方を欠失させたSLAC1形質転換植物を用いてHCO₃⁻またはABAによって生じるS型の陰イオン電流を測定したところ、ABAによる陰イオン電流の発生は消失していたのに対して、HCO₃⁻による陰イオン電流の発生は観測された¹⁴。さらに、SLAC1の膜貫通領域に存在するアミノ酸の詳細な解析によって、CO₂応答に関与している可能性のある2つのアミノ酸が見つかった¹⁴。これらのことから、SLAC1のCO₂シグナル受容部位は膜貫通領域に存在しており、SLAC1はCO₂シグナルとABAシグナルを独立して受信していることが明らかになった。SLAC1のさらなる機能解析から植物のCO₂感知メカニズムの解明のみならず、農業面では乾燥や高[CO₂]環境に適応力のある有用植物の開発につながることが期待される。現在、これらの研究を土台に、ゲノム編集技術を用いて、耐乾燥性をもつ高CO₂適合型イネ品種の開発に着手している。高CO₂環境での植物の成長評価には、九州大植物フロンティア研究センター (<http://plantfrontier.kyushu-u.ac.jp>) に設置されている高精度環境シミュレーター (図 A1.3.3) が用いられている。この設備は、CO₂、湿度等の精密制御が可能なサッシュレス (屋外の自然光に近い環境が得られる) 閉鎖型温室で、対照反復実験も可能なシステムになっている。

- 12 Mori IC, et al. (2006) CDPKs CPK6 and CPK3 function in ABA regulation of guard cell S-type anion- and Ca²⁺-permeable channels and stomatal closure. PLoS Biol. 4, e327.
- 13 Brandt B, et al. (2012) Reconstitution of abscisic acid activation of SLAC1 anion channel by CPK6 and OST1 kinases and branched ABI1 PP2C phosphatase action. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109, 10593-10598.
- 14 Yamamoto Y, et al. (2016) The transmembrane region of guard cell SLAC1 channels perceives CO₂ signals via an ABA-independent pathway in Arabidopsis. Plant Cell 28, 557-567.



- ・温度、湿度、日長、CO₂濃度を精密にコントロールし、対照反復実験が可能
- ・サッシュレス構造により、自然光に近い光環境での経時測定が可能

図 A1-3-3 九州大学植物フロンティア研究センター 高精度環境シミュレーター

(写真：射場先生よりご提供)

・膜交通因子を介した孔辺細胞・副細胞コミュニケーションによる新しい気孔応答機構

proton ATPase translocation control 1 (patrol1) 変異株は *ht1* 変異株と同様、低 [CO₂] 条件下でも常に高い葉面温度を示す変異株として単離された¹⁵。*patrol1* 変異株は低 [CO₂]、光による気孔開口反応が低下しており、野生株よりも成長が遅かった¹⁵。PATROL1はDomain of Unknown Function 810、および動物の神経細胞で神経伝達物質の分泌に関わるMunc13の機能を司るMUNドメインを持つ¹⁵。MUNドメインはSNARE複合体の形成を促進することにより細胞内膜小胞の接合に関わる¹⁶。近年の立体構造解析、コンピュータ予測によりMUNの立体構造は他の小胞繫留因子と類似していることが推定された¹⁷。

これらのことからPATROL1が植物でも膜輸送に関わっており、それが植物の気孔運動や生育速度に関与している可能性が示唆された。GFP標識を施したPATROL1 (GFP-PATROL1) における細胞内局在を調べたところ、孔辺細胞膜上とエンドソームにドット状の構造をとって存在していた¹⁵。さらに、細胞質内のGFP-PATROL1ドットの密度は環境に応じて変化していた¹⁵。光や水分が十分な条件下では細胞質内のGFP-PATROL1ドット密度は減少しており、細胞膜の局在は増加していた¹⁵。逆に、暗所や乾燥条件下では細胞膜への局在は減少し、細胞質内のドット密度は増加していた¹⁵。また、GFP-PATROL1とRFP-AHA1を共発現させた形質転換植物の孔辺細胞を観察すると、PATROL1は孔辺細胞膜上に存在するプロトンポンプAHA1を細胞質側から裏打ちするように局在していた¹⁵。

- 15 Hashimoto-Sugimoto M, et al. (2013) A Munc13-like protein in Arabidopsis mediates H⁺-ATPase translocation that is essential for stomatal responses. Nat. Commun. 4, 2215.
- 16 Ma C, et al. (2011) Munc13 mediates the transition from the closed syntaxin-Munc18 complex to the SNARE complex. Nature Struct. Mol. Biol. 18, 542-549.
- 17 16. Pei J, et al. (2009) Remote homology between Munc13 MUN domain and vesicle tethering complexes. J. Mol. Biol., 391, 509-517.

これらのことから、PATROL1は、気孔が開くときにはAHA1を細胞膜上に配置し、閉じるときにはその一部を残して細胞質内へ回収する役割を担っていると考えられる。PATROL1の植物組織における発現部位を調べたところ、PATROL1は孔辺細胞だけでなく、それを取りまくように存在している副細胞にも存在していることが明らかになった¹⁸。副細胞においても、PATROL1はAHA1と共局在しており、気孔開閉時の副細胞におけるPATROL1とAHA1の挙動を観察すると、孔辺細胞におけるそれらの動態と真逆になることを見出した¹⁸。これらの知見から、孔辺細胞と副細胞からなる気孔装置には、PATROL1を介した水-イオンシャトル輸送システムが存在すると考えられる（図 A1-3-4）。

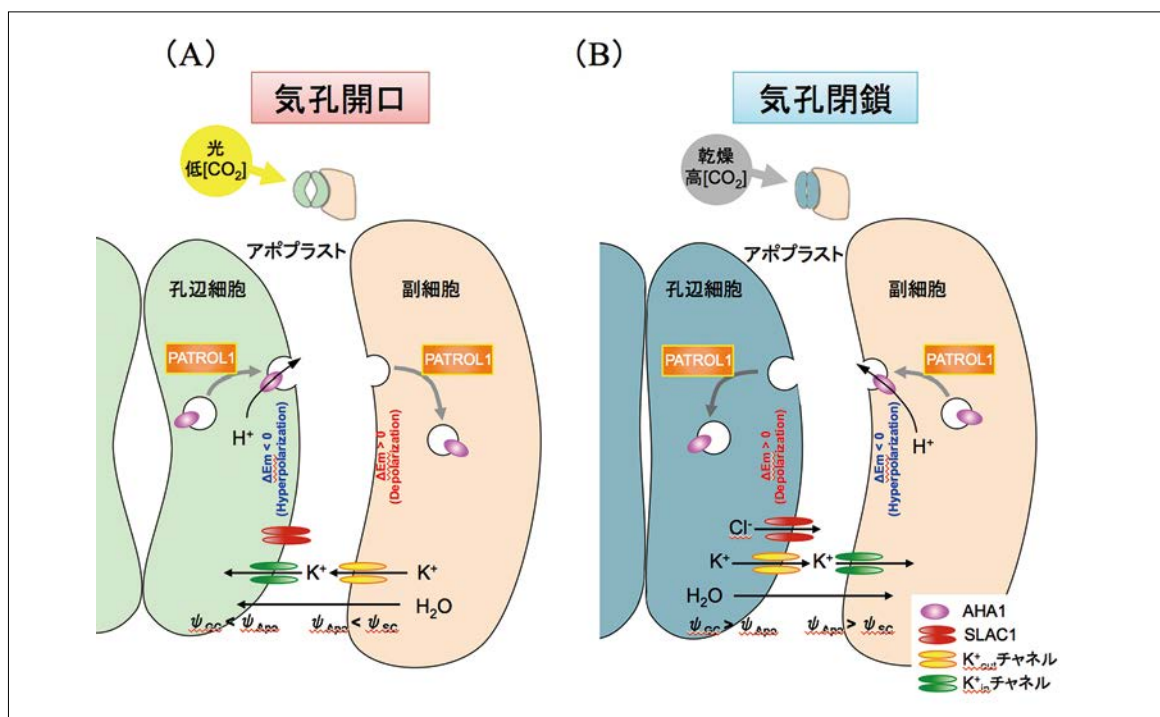


図 A1-3-4 気孔装置におけるPATROL1が介在する水-イオンシャトル輸送モデル(文献¹⁸を改変)

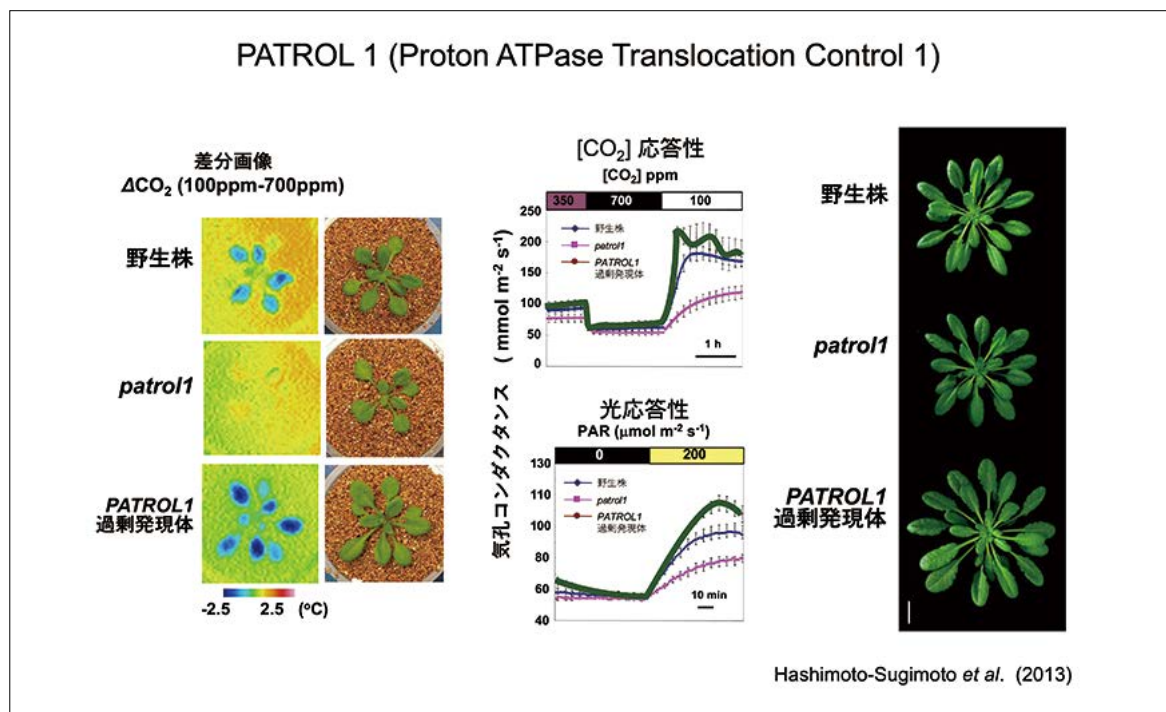
(A) 気孔開口：シロイヌナズナ孔辺細胞においてPATROL1はPM H⁺-ATPase (AHA1)を細胞膜へ局在化させる。一方、副細胞においては細胞膜からAHA1を撤収する。K⁺イオンは副細胞から脱分極によって活性化されたK⁺outチャネルによって放出され、孔辺細胞においては過分極によって活性化されたK⁺inチャネルによって取り込まれる。アポプラストを介して両細胞間に水ポテンシャル差が生じ、副細胞から孔辺細胞への水の移動が起こる。(B) 気孔閉鎖：孔辺細胞においてPATROL1はAHA1を細胞膜から撤収する。一方、副細胞においてはAHA1を細胞膜へ局在化させる。K⁺イオンは孔辺細胞から脱分極によって活性化されたK⁺outチャネルによって放出され、副細胞においては過分極によって活性化されたK⁺inチャネルによって取り込まれる。アポプラストを介して両細胞間に水ポテンシャル差が生じ、孔辺細胞から副細胞への水の移動が起こる。 ψ_{Apo} 、 ψ_{GC} 、 ψ_{SC} はそれぞれアポプラスト、孔辺細胞、副細胞の水ポテンシャルを示す。 ΔE_m は膜電位の大きさを示す。PATROL1: PROTON ATPASE TRANSLOCATION CONTROL 1.

PATROL1によるAHA1の細胞膜への局在化はエキソサイトーシスによって、また、撤収はエンドサイトーシスによって行われ、細胞膜とPATROL1とが相互作用していると考えられる。エキソサイトーシス/エンドサイトーシスに関わる膜結合タンパク質、セカンドメッセンジャーに対する特異的阻害剤を作用させたときの[CO₂]または光強度変化に伴う気孔応答性を調べた結果、ホスファチジルイノシトール4キナーゼ (PI4K)

¹⁸ Higaki T, et al. (2014) Dynamics and environmental responses of PATROL1 in Arabidopsis subsidiary cells. Plant Cell Physiol. 55, 773–780.

阻害剤が[CO₂]変化に伴う気孔開閉と同時にPATROL1の孔辺細胞内動態を特異的に阻害することを見出した¹⁹。よって気孔のCO₂制御にはPI4Kによる生成物、ホスファチジルイノシトール4リン酸が関与していることが示唆された。さらに、PI3K阻害剤が気孔の明・暗応答を特異的に阻害することを見出した¹⁹。このことは気孔開閉制御において、異なるホスホイノシタイドが関与することを示唆している。

PATROL1過剰発現株（PATROL1-OX）の気孔コンダクタンス（蒸散速度）は低[CO₂]処理によって野生株より速く、大きく上昇しており、光に対する応答性も同様であった¹⁵（図A1-3-5中央）。8時間明、16時間暗の短日条件で7週間育てた植物を育てると、PATROL1-OXの地上部の生重量は野生株よりも32%増加した¹⁵（図A1-3-5右）。また、林床環境を擬似的に再現した短時間で強光と弱光が激しく入れ替わる光環境下では、PATROL1-OXと常に気孔が開いている*slac1*、*ost1*は、最大光合成速度に達するまでに要する誘導時間は野生株と比べ短縮されていた²⁰。PATROL1-OXは野生株が気孔を開くタイミングでより速く大きく気孔を開き、野生株が気孔を閉じるタイミングでは正常に気孔を閉じることで、水分の過剰な放出を防ぎつつ、効率の良い光合成が可能になっていると考えられる。



図A1-3-5 *PATROL1*過剰発現体と野生株、*patrol1*変異株とのサーモグラフィ差分画像（左）、気孔のCO₂・光に対する応答性（中央）、成長（右）における比較

副細胞は気孔開閉機能を強化するはたらきがあることが示されており²¹、これらの知見は、PATROL1に関する研究が新しい細胞間コミュニケーションの解明に貢献するだけでなく、有用植物のバイオマス生産性の向

- 19 Takahashi S, et al. (2017) Differential effects of phosphatidylinositol 4-kinase (PI4K) and 3-kinase (PI3K) inhibitors on stomatal responses to environmental signals. *Front. Plant Sci.* 8, 677.
- 20 Kimura H, et al. (2020) Improved stomatal opening enhances photosynthetic rate and biomass production in fluctuating light. *J. Exp. Bot.* 71, 2339-2350.
- 21 Raissig MT, et al. (2017) Mobile MUTE specifies subsidiary cells to build physiologically improved grass stomata. *Science* 355, 1215-1218.

上にも進展をもたらすことが期待される。

• CO₂ 応答に特徴的形質を持つシロイヌナズナエコタイプの気孔応答

モデル植物であるシロイヌナズナは北半球を中心に世界中に分布しており、それぞれの棲息地環境に適応して多様な形質を獲得している²²。シロイヌナズナにはこのようなDNAレベルで分化した多数の型(エコタイプ)が1,000系統以上報告されている²³。一般的に、エコタイプを用いた研究は形態学的な面から棲息地環境と植物の表現型との関わりを探索する研究に重点がおかれている。しかしながら、エコタイプ間の多様性について生理学的な面からの研究例は少ない。

北アフリカ西方沖に位置する島国の、標高およそ2,000 mの高地に棲息するエコタイプCape Verde Islands (Cvi-0)²⁴は、これまでにオゾンや塩害に対する高感受性、サリチル酸とジャスモン酸の過剰産生性、また低い病害抵抗性を示すエコタイプとして知られていた。Cvi-0の[CO₂]変化に対する気孔応答性をサーモグラフィで調べ、シロイヌナズナ標準系統のCol-0と比較したところ、高[CO₂]条件下でも常に低い葉面温度を示していた²⁵。Cvi-0の気孔開度、気孔コンダクタンスを測定すると、Cvi-0はCol-0と比べ、高い開度、コンダクタンス値を示し、それらの変化率も低下していた²⁵。さらに明・暗、湿度変化に対しても応答性が低く、気孔を閉じにくい形質を持っていることがわかった²⁵。その原因として、Cvi-0はCol-0と比べABAを多く合成するが、ABAに対する気孔応答性が低下していること、孔辺細胞内のイオン・有機酸の蓄積量が増加していることが考えられる²⁵。

最近、Cvi-0のこの特徴的形質は、MPK12に生じたアミノ酸置換によるものであり²⁶、このアミノ酸置換がMPK12とそのターゲットであるCO₂シグナル伝達因子HT1との結合能を減少させ、HT1が不活性型の状態を維持できなくなることが明らかになった²⁷。

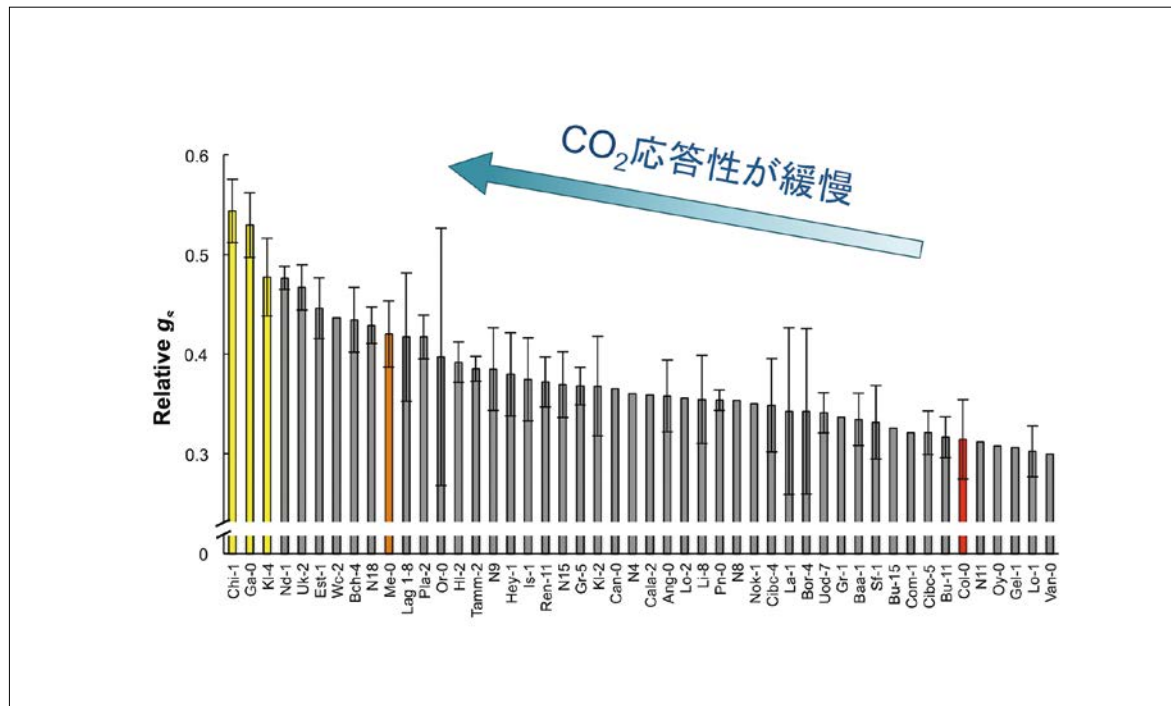
• 気孔のCO₂ 応答性が緩慢なシロイヌナズナエコタイプの環境応答性

Cvi-0の解析から、エコタイプ集団の中にも気孔応答性に興味深い形質を持つものがあることがわかった。気孔の環境応答メカニズムの解明には、変異株を用いて一つの遺伝子に焦点を当てて研究が行われているが、環境変化に対してはたらくシグナル伝達経路には、多くの遺伝子が関わった複雑なネットワークが形成されていると考えられる²⁸。エコタイプ集団を用いて環境変化に対する気孔応答性を見ることで、野生植物に備わっている環境シグナル伝達情報の統合機構について新しい知見が得られることが期待される²⁹。

Arabidopsis Biological Resource Center等から入手したエコタイプ集団についてサーマルイメージング解析を行い、[CO₂]変化に伴う葉面温度変化が小さいエコタイプを選抜した³。さらにこれらの系統につい

- 22 Mitchell-Olds T and Schmitt J (2006) Genetic mechanisms and evolutionary significance of natural variation in Arabidopsis. *Nature* 441, 947-952.
- 23 The 1001 Genomes Consortium (2016) 1,135 genomes reveal the global pattern of polymorphism in Arabidopsis thaliana. *Cell* 166, 481-491.
- 24 Lobin W (1983) The occurrence of Arabidopsis thaliana in the Cape Verde Islands. *Arab Info. Ser.* 20, 119-123.
- 25 Monda K, et al. (2011) Environmental regulation of stomatal response in the Arabidopsis Cvi-0 ecotype. *Planta*. 234, 555-563.
- 26 Marais DLD, et al. (2014) Variation in MPK12 affects water use efficiency in Arabidopsis and reveals a pleiotropic link between guard cell size and ABA response. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 111, 2836-2841.
- 27 Jakobson L, et al. (2016) Natural variation in Arabidopsis Cvi-0 accession reveals an important role of MPK12 in guard cell CO₂ signaling. *PLoS Biol.* 14, e2000322.
- 28 Hetherington AM and Woodward FI (2003) The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature* 424, 901-908.
- 29 Alonso-Blanco C and Koornneef M (2000) Naturally occurring variation in Arabidopsis: an underexploited resource for plant genetics. *Trends Plant Sci.* 5, 22-29.

て気孔コンダクタンス測定を行い、[CO₂] 変化に対する応答性が特に緩慢である3系統のエコタイプ、Köln (Kl-4)、Gabelstein (Ga-0)、Chisdra (Chi-1) を見出した³ (図A1-3-6)。気孔コンダクタンスは気孔密度、気孔サイズ、気孔開度に影響を受けることが知られている。これらの要素をCol-0と比較したところ、Kl-4、Ga-0、Chi-1は気孔密度、気孔サイズについては、Col-0との違いは見られなかったが、[CO₂] 変化に対する気孔開度の変化率は小さくなっていた³。つまり、Kl-4、Ga-0、Chi-1は気孔開度変化が小さいことにより、緩慢なCO₂ 応答性を示していた。



図A1-3-6 シロイヌナズナエコタイプ集団の気孔で見られる多様なCO₂ 応答性 (文献³を改変)

縦軸は0 ppm [CO₂] で2時間順応させたときの気孔コンダクタンス (g_s) を1とした際の、1,000 ppm [CO₂] で1.5時間順応させたときの相対的なg_sを示す。すなわちグラフの左側に名前がのっているエコタイプほどCO₂ 応答性が緩慢であることを意味している。Chi-0、Ga-0、Kl-4 (黄パー) は特に緩慢なCO₂ 応答性を示す。巨大気孔を持つMe-0 (オレンジパー) も解析したエコタイプ集団の中では緩慢なCO₂ 応答性を示した。赤パーは標準系統Col-0。エコタイプ集団のCO₂ 応答性には幅があることが、この図から見てとれる。

Kl-4、Ga-0、Chi-1が他の重要な環境要因である明・暗、湿度、ABAにどのような応答性を示すのかについても調べたところ、明・暗の変化に対する気孔応答性は、CO₂ 応答性と同様、Col-0と比べ緩慢な応答性を示した³。一方で、湿度変化に対してはCol-0と同程度の応答性を示したが、ABAに対してはCol-0と比べ緩慢な応答性を示した³。これらの知見は、環境シグナル伝達経路において、光とCO₂のシグナル伝達経路はその一部を共有しているが、湿度に対するシグナル伝達経路は独立して制御されていることを示唆している³。また、湿度応答にはABAシグナル伝達経路とは独立した経路が存在することも示唆された³。シロイヌナズナ変異株を用いた研究においても、光とCO₂のシグナル伝達経路がリンクしているかどうかということは現在でも議論が続いている³⁰。また、乾燥を感知して気孔閉鎖させるシグナル伝達経路には、ABA依存のお

30 Roelfsema MR, et al. (2002) CO₂ provides an intermediate link in the red light response of guard cells. Plant J. 32, 65-75.

よびABA非依存的な経路が存在することが過去の研究において示唆されていたが³¹、これらの知見はABA非依存的な経路の存在を裏付けた。

• 巨大気孔を持つシロイヌナズナエコタイプ Me-0 の環境適応

Mechtshausen (Me-0) は [CO₂] 変化に伴う葉面温度変化が小さい47系統の中から注目されたエコタイプで、気孔の長径がCol-0と比べて約1.5倍という特徴的な形質を示している³² (図 A1-3-7)。

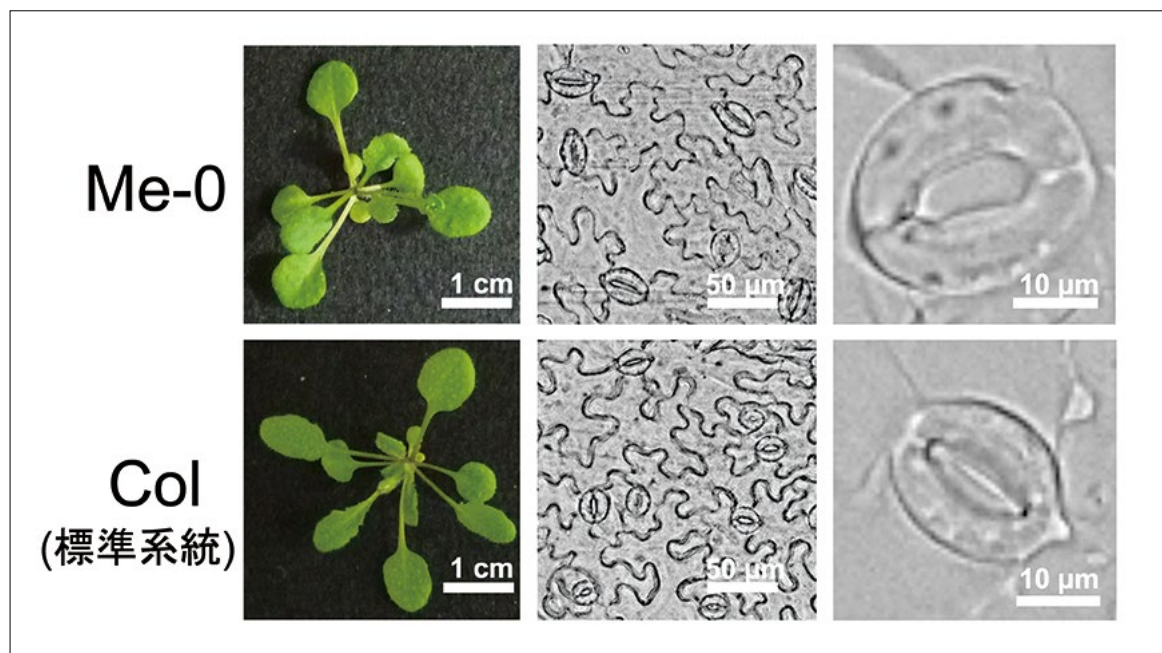


図 A1-3-7 巨大気孔を持つシロイヌナズナエコタイプ Me-0

気孔面積は約1.9倍を有しており、気孔密度は約60%まで低下している³²。細胞サイズ拡大を引き起こす原因の一つに、倍数性の増加が考えられるが、Me-0の孔辺細胞内の核を蛍光顕微鏡およびフローサイトメトリを用いて調べた結果、Me-0では2倍体である標準Col系統（2倍体Col）のほぼ2倍で、人為的に作製されたCol 4倍体系統（4倍体Col）とほぼ同じ核サイズ及びDNA量を有していた³²。さらに4倍体Colの気孔サイズおよび密度はMe-0とほぼ同等であった。このことから、Me-0の気孔が巨大化している原因は倍数性の増加であることがわかった。CO₂および明暗応答に対する気孔コンダクタンス変化を測定したところ、Me-0は、2倍体Col・4倍体Colよりも高いコンダクタンスを示す一方で、4倍体Colでは、Me-0のような気孔コンダクタンスの上昇は見られなかった³²。

このMe-0と4倍体Colの気孔コンダクタンスの差は、各々の気孔開口能力にある可能性が考えられる。ABAに対する応答性を調べたところ、4倍体Colは2倍体ColおよびMe-0に比べてABA感受性が高いことがわかった³²。他のシロイヌナズナエコタイプ（あるいは他植物種）においても人為的に倍数性増加を引き起

31 Assmann SM, et al. (2000) ABA-deficient (aba1) and ABA-insensitive (abi1-1, abi2-1) mutants of Arabidopsis have a wild-type stomatal response to humidity. Plant Cell Environ. 23, 387- 395.

32 Monda K, et al. (2016) Enhanced stomatal conductance by a spontaneous Arabidopsis tetraploid, Me-0, results from increased stomatal size and greater stomatal aperture. Plant Physiol. 170, 1435-1444.

こすとABA応答関連遺伝子の発現変動^{33, 34}や気孔コンダクタンスの減少³⁵が見られることが報告されており、シロイヌナズナにおいて倍数性の増加は遺伝子レベルで気孔閉鎖誘導を引き起こす可能性があるが、Me-0では倍数性増加による気孔開口能力の低下が抑えられており、気孔サイズの拡大がもたらす潜在的ガス交換能力の向上を十分に活かすことができるのではないかと考えられる。Me-0から得られた知見は、高等植物の4倍体は潜在的には高いガス交換能力を持つが、実際にガス交換効率を上昇させるには、巨大気孔を開かせるための高い気孔開口能力が必要であることを示唆している³²。地球の大気中におけるCO₂濃度はかつて現在よりはるかに高い濃度の時期があり、その頃の植物表皮の気孔はMe-0のように巨大であった（図 A1-3-8）。Me-0の巨大気孔は近未来に到来するであろう高CO₂環境での植物の営みを予測する上で、有用なツールになる可能性がある。

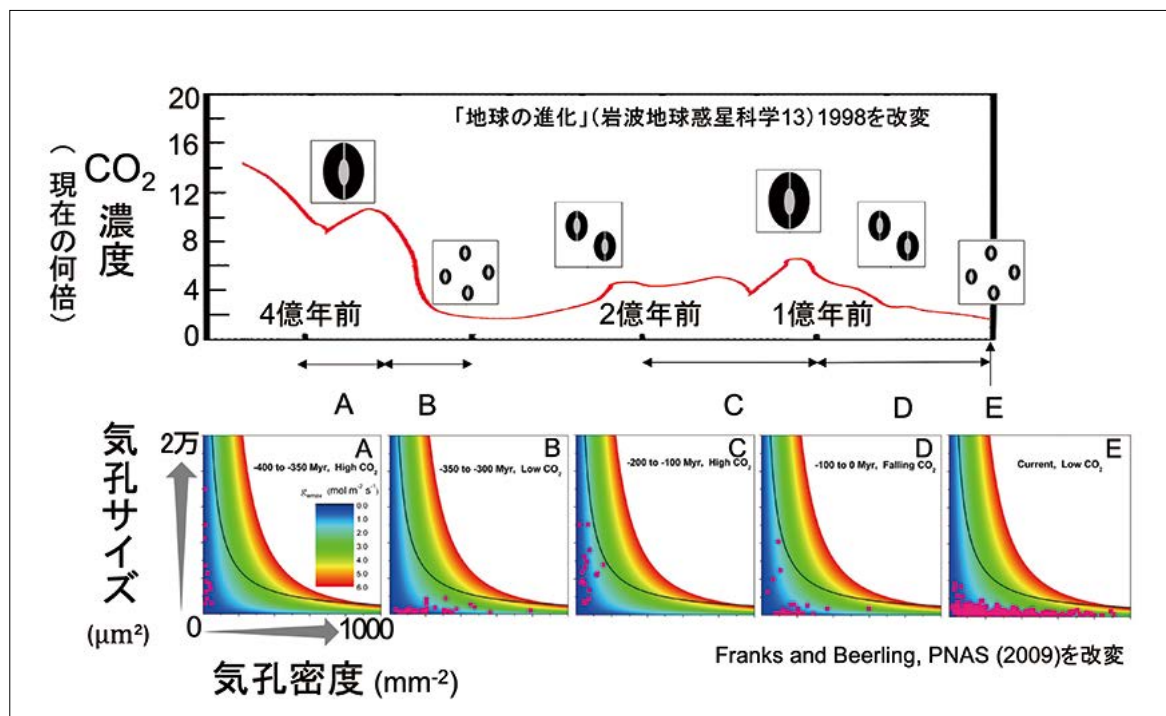


図 A1-3-8 地球の進化にともなう CO₂ 濃度の変遷と気孔サイズの関係

本講演で紹介したシロイヌナズナ変異株、エコタイプにおける一連の研究は、気孔のCO₂感知およびその情報制御に未解明の機構が存在していることを示している。未同定の因子や、すでに発見された因子の新しい役割を探索することによって、これまで点と点でしか浮かび上がっていなかった植物のCO₂環境に対する適応機構の全体像が見えてくるものと考えている。気孔開閉によるCO₂の取り込みと蒸散量の調節は、植物の光合成効率、水利用効率に深く影響を及ぼすことから、植物の成長、ひいては食料生産性や気候変動にともなう植物生態系への影響に重要な意味を持つのではないだろうか。

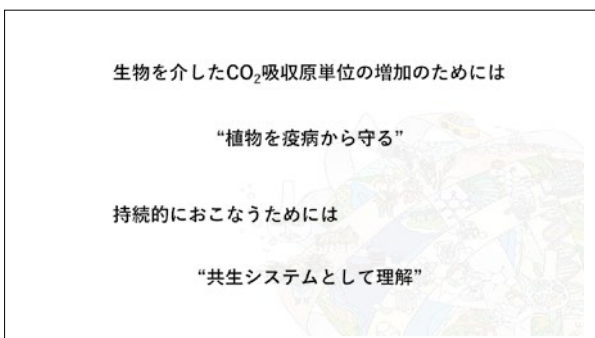
- 33 Allario T, et al. (2013) Tetraploid Rangpur lime rootstock increases drought tolerance via enhanced constitutive root abscisic acid production. *Plant Cell Environ.* 36, 856-868.
- 34 Pozo JC and Ramirez-Parra E (2014) Deciphering the molecular bases for drought tolerance in Arabidopsis autotetraploids. *Plant Cell Environ.* 37, 2722-2737.
- 35 Kondorosi E, et al. (2000) Plant cell-size control: growing by ploidy? *Curr. Opin. Plant Biol.* 3, 488-492.

A1.4 バイオマスと植物共生研究

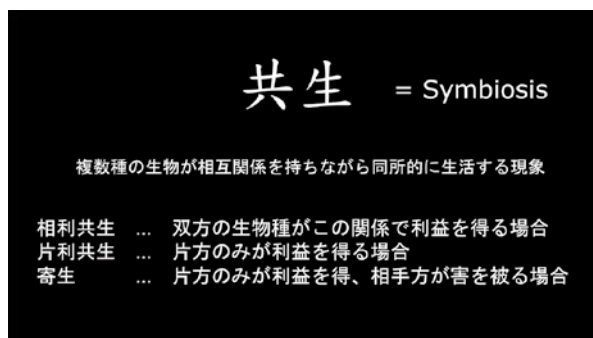
白須 賢（理化学研究所 環境資源科学研究センター グループディレクター）

今日は、私の研究、植物との共生研究について話をする。本日の課題は、生物を介したCO₂吸収原単位の増加であり、その収量を何%上げられるかであるが、私は違う考え方を持っており、増加のためには減少を止めるということが一番大事と考えている。これは一言で言うと疫病から守るということである。収量が10%程度上昇できるとしても、畑が全滅するとゼロになるため、疫病から守ることが大事になる。

今まで当然やられてきたことであるが、現代ではそれを持続的に行うために共生システムとして理解しながら、これを現実の農業に落とし込むことが大事と考えている。



図A1-4-1 背景と目的



図A1-4-2 共生とは

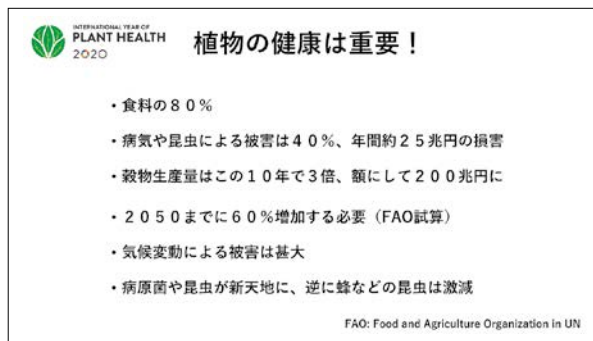
共生というと、両方の生物種がお互い利益を得る場合と考える方が多いが、実は一緒に相互関係を持ちながら同所的に生活している現象を全て共生と呼ぶ。これが、例えば片方だけが利益を得る場合、片利共生あるいは寄生と呼ばれているが、寄生も共生の一部である。

害を被っているのは、ある意味一部を見ているだけであり、生物としては、あるときは利益を得ているが、後になると害を被るといったような、かなりダイナミックなプロセスであるので、一緒に生活しているという相互関係を研究することが大事と考える。

植物の共生とSDGsのつながりは、SDG課題の2、3、13、14、15など、食料、健康、環境関連の課題が挙げられる。共生研究としてうれしいのは、今まで収量を上げるのには何をしても良いところから、環境のことを考えながら農業をやりたいというところへ世界中が考えるようになってきたことである。

2020年はINTERNATIONAL YEAR OF PLANT HEALTHの年で、大々的に国連が実施する予定であったが、人間の健康のほうが重要になってしまった。もちろん植物の健康は重要で、食料の80%は植物が占めており、常に40%ほどの被害がある。つまりバイオマスを上げる、食料を上げるというためにはこの被害を減らす必要がある。

これは、額にして25兆円規模の損害であるが、穀物生産量の全体量は上がってきており、それにつれて損害の量も上がってきている。FAOの試算では、穀物生産量は60%以上増加する必要があるが、気候変動によって被害は大きくなってきている。またグローバリゼーションで病原菌や昆虫までもグローバリズ化して、非常に大きな問題になっている。



図A1-4-3 植物の健康の重要性



図A1-4-4 食糧安全保障への課題

疫病は混沌を生み出す。人間ではコロナが今大きな問題で、100年に一度の疫病でも大きなインパクトを与えるが、それは植物の病気でも同じである。過剰な肥料、農薬は環境を脅かすことになる。さらに、この今、Climate Emergencyと呼ばれる気候非常事態がさらなる脅威になっていることはほぼ間違いないと考える。

病害については10年ぐらい前であるが「Science」誌が食糧安全保障、フードセキュリティを脅かす病原体として7つをリストアップしている。小麦さび病、ジャガイモ疫病、バナナ黒シガトカ菌、キャッサバ褐色条斑病、大豆さび病、イネいもち病、ストライガであり、ストライガは寄生植物であるが、アフリカで非常に大きな問題になっている。



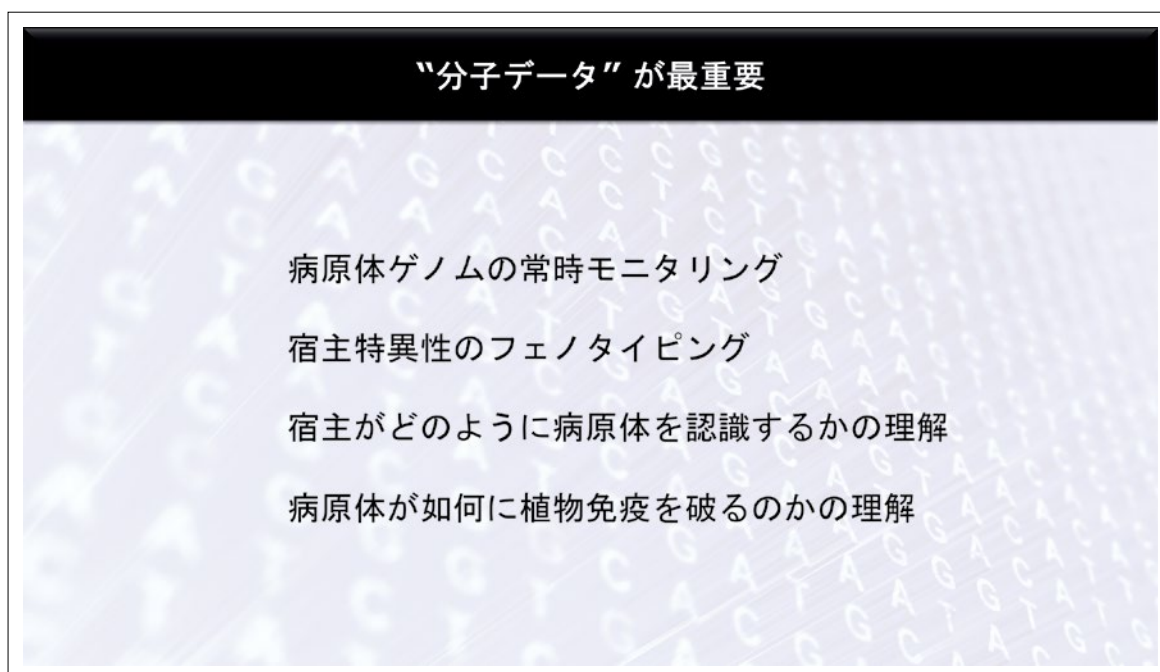
図A1-4-5 バイオマス植物の危機

10年ほど前にアフリカ・スーダンに行き、寄生植物のストライガがどのくらいの被害を出しているかを調べに行った。スーダンのソルガムという食料で現地の農民の主要植物であり、バイオマスでも使われてきているC₄植物である。高温でも育つ植物であるが、寄生植物ストライガが入ったために全面ストライガになっている畑が多くある。このため食料として非常に大きな問題になっているが、バイオマス系植物でも同様に危ない例が幾つも出ている。1つの例として、ゴムの木、パラゴムノキがあげられる。1940年代に南米の葉枯れ病

がブラジルのパラゴムノキ農場を全滅させており、ブラジルではゴムノキを作れない状態になっている。農場を造ったのは自動車メーカーのフォードだが、フォードがいまだにタイヤを作れてないのはこれが理由である。

この葉枯れ病が南米からアジアのほうに来ないようにしているが、ほかにも根の白腐病があり、これはアジアのほうでは大きな問題になってきている。これは一回入ってしまうと全滅まで行ってしまうということで、非常に神経質になって管理をしている。ですので、これからもそれが大きな問題となってくる。

疫病は、ある病原体が新しい宿主にジャンプしたりするときに非常に大きな問題となる。一例として、イネの場合、イネのいもち病はイネに対しては当然大きな問題になるが、小麦にはかからないと言われていた。これがブラジルで小麦いもち病が発生して、これが同じ *Magnaporthe oryzae* が引き起こすことが分かってきた。ブラジルからバングラデシュに10年ほど前に飛んで、去年には、ザンビアで発見されたということで、南米、アジア、それからアフリカまでどんどん増えていることで大きな問題になってきている。こういうことがグローバル化、そして恐らく気候変動に絡んでいると思うが、すぐに大陸を超えていくということがこれからの脅威になるだろうと考える。



図A1-4-6 分子データの重要性

これをいかに対策するかは、一言で言えばコロナと同じような状況であり、分子データが最重要になる。病原体の常時モニタリングをすることと、それから宿主がどういうふうに変わっていくかという、そういうフェノタイピングをしっかりとしておくことである。

実際に宿主はどうやって認識しているのか、あるいは病原体がその機構をどうやって破っていくかを理解しながら、この情報を使っていくことが大事になる。

理研では、これを中心に病原体のゲノムを読んでいくということを始めている。始めたのは10年ほど前からであるが、最近技術が上がってきて数多くのゲノムを読んでいる。特にこの真核生物のゲノムサイズが大きい、これも染色体から、テロメアからテロメア、つまり完全染色体で読めるようになってきた。このため、これから病原体のゲノムを全て読んでいく必要があり、いつ始めるのかという点では今が始める時期だと思っている。日本の病原体の全てゲノムを読まなくてはいけないと考える。

ゲノムを読むことでどうするかであるが、モニタリングすることは非常に大事ということと、実際の感染のメ

カニズムを理解して、それをうまく利用して感染防除に努めるということである。

ゲノムを利用した一例、寄生植物、ストライガのゲノムでソルガムが出してくる物質があり、これを認識する受容体をゲノムの中から見つけてきて解析している。ストライガは、受容体が化合物を認識すると発芽する。発芽して、宿主の根に向かって生えていき、そこに到達すると、そこに根毛のようなものができ、根っこをつかみ込んで、宿主からキノンというDMBQの物質、これは細胞壁の分解し酸化したものであるが、これを認識して、吸器と言われる部位を作り中に侵入していく。これに関する受容体も最近であるが見つけて発表したところである。

これまでに解読してきた病原体ゲノム	
寄生植物	<i>Striga</i> (2019) <i>Phtheirospermum</i> (2020)
カビ	<i>Fusarium</i> spp. (2019, 2021) <i>Colletotrichum</i> spp. (2021, 2019, 2016, 2013, 2012)
卵菌	<i>Phytophthora</i> spp. (2021)
線虫	<i>Meloidogyne</i> spp. (2019)
細菌	<i>Pseudomonas</i> spp. (2021)

図A1-4-7 これまでに解読したゲノム

共生として良いこととしては、窒素やリンの持続的供給にある。現代の農業は、ハーバーボッシュから作られているアンモニアを肥料にしてN₂Oのような物質を出してしまうような問題がある。

また海のほうの富栄養化とかも大きな問題を出している。これの回避する方法のひとつは、根粒菌等の微生物の利用である。本来、Lateral rootという側根の形成の因子が根粒の形成に関与しているが、これらを変換させることによって窒素工程をほかの植物で作る研究を理研でおこなっている。

リンのほうも大きな問題がある。リン鉱石はモロッコの砂漠、2番に中国であり、この2つの国に敵対してしまうと肥料に問題が起きてしまう。これをうまく回避するには菌根菌等の微生物を使うことが一番と考えている。

菌根菌は、リンを供給してくれるカビとして重要であり、理研BRCで菌根菌の培養システムの確立と、多様な菌根菌のコレクションを始めたところである。

こうした菌根菌や有用菌の日本にいる菌種のライブラリをつくることと、ゲノムを読むことが重要で、さらに次の研究になると、メタゲノム時代が始まったところである。

自分のラボのイネの共生する微生物のメタゲノムを解析したものの一例であるが、これまでは菌を単離し、1ゲノムずつ読むことが多かったが、今だと取ってきてそのまま全部読むという、ハイスループットができるような機器が出てきた。

その1つであるパックスバイオの最新型で読んでいるデータであるが、コンティグスで26,000、完全ゲノムあるいはプラスミドになったものであるサーキュラーコンティグは153、また一回のリードで1.4ギガベースが読める。非常に長く読めるため、種レベルでの出現頻度の定量に使える。今まで16Sというアンプリコンを見ていたが、これは種レベルの同定はできない。種のレベルになると代謝が違ふ、まだ知られてない種が出てくる、そういう意味で種のレベルでの解析が可能になる。そして、有用遺伝子群を探してくることで、新しい新規遺伝子の宝庫になるわけである。

それと非常に長く読めることで、研究の中で全然培養できなかった微生物のゲノムが完全に分かることがあった。今度はゲノムを見て、どうして培養できないのかをゲノムから見て考える研究を行っている。

ゲノムデータをどう利用するかであるが、オミックス的な解析を使って全体的に見る、植物を今まで一つ一つ見ていたものを、菌も含めて全部を一体として考えるということである。

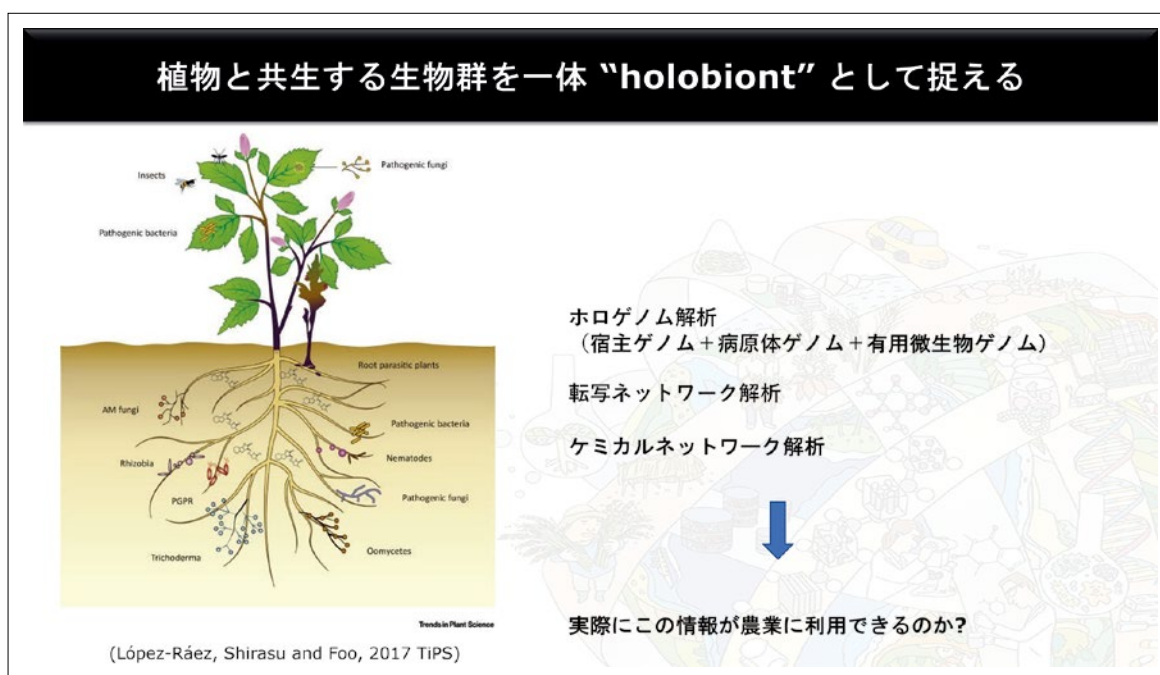


図 A1-4-8 植物と共生する生物群

それが実際に農業に利用できるかがこれからの課題であるが、オミックス技術で植物の葉っぱや実、あるいは根っこ、それから土壌までも全部一遍に読んでしまう。情報を全部集めて、その相互作用、それからネットワーク解析、それからシステムとして理解し、フィールドに行って実際の圃場あるいは畑でどのような微生物がどういうふうに動いているかという、そしてそれが収量にどう関係しているかを研究できるようになってきた。

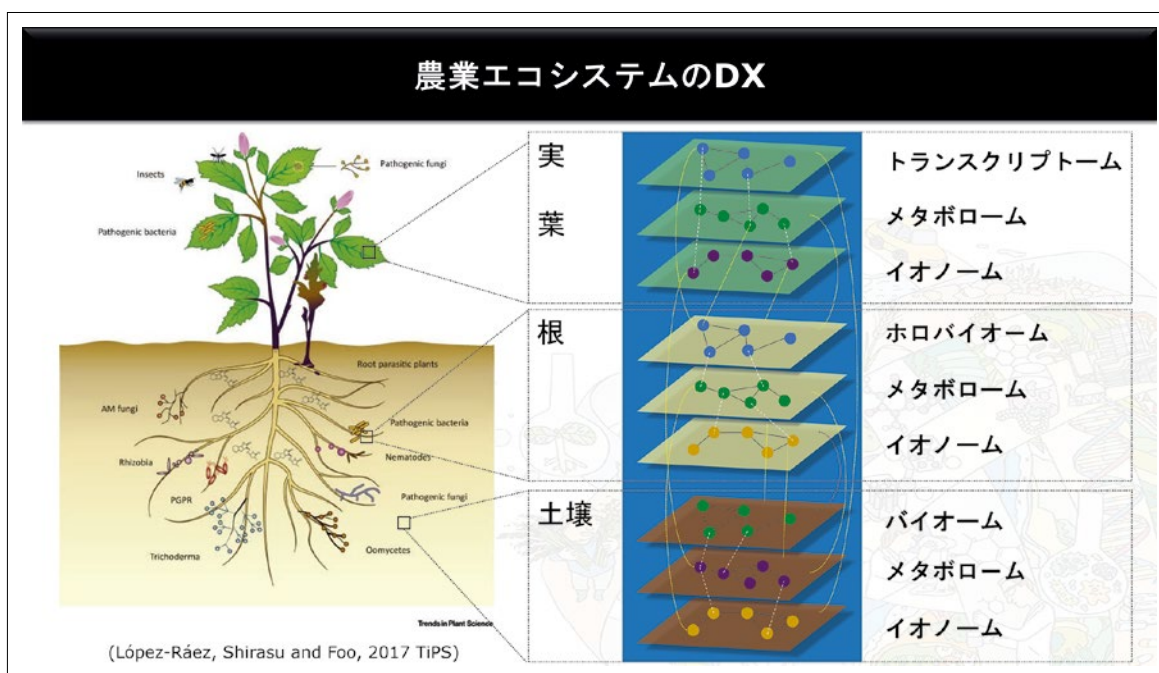
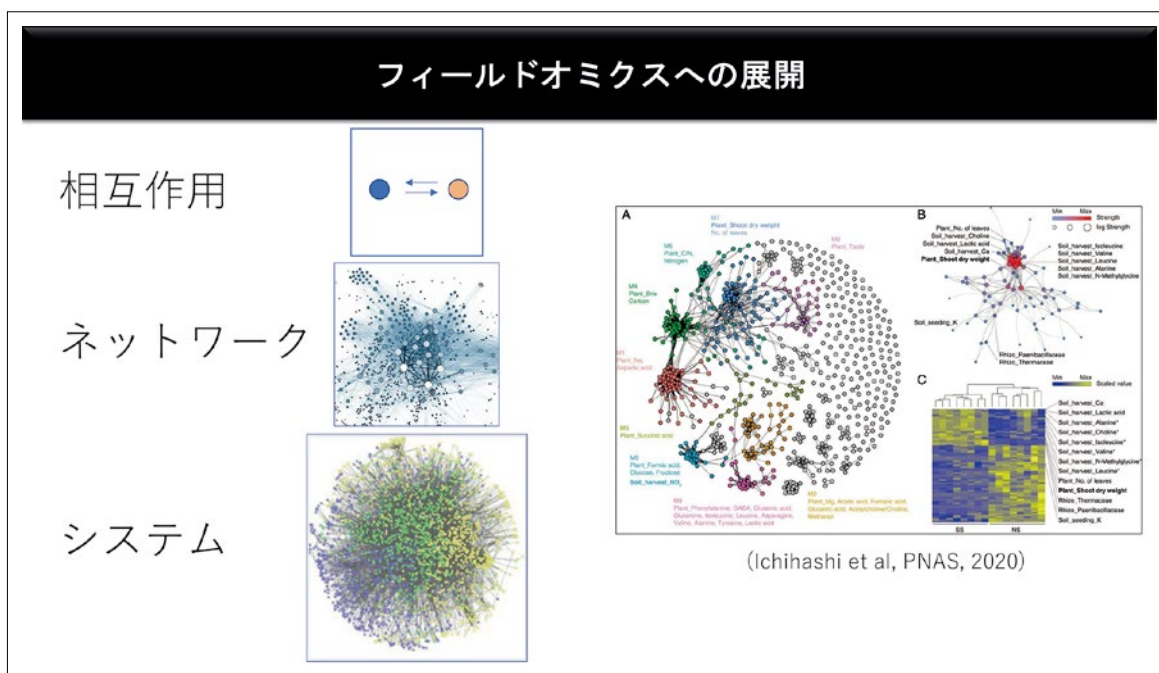


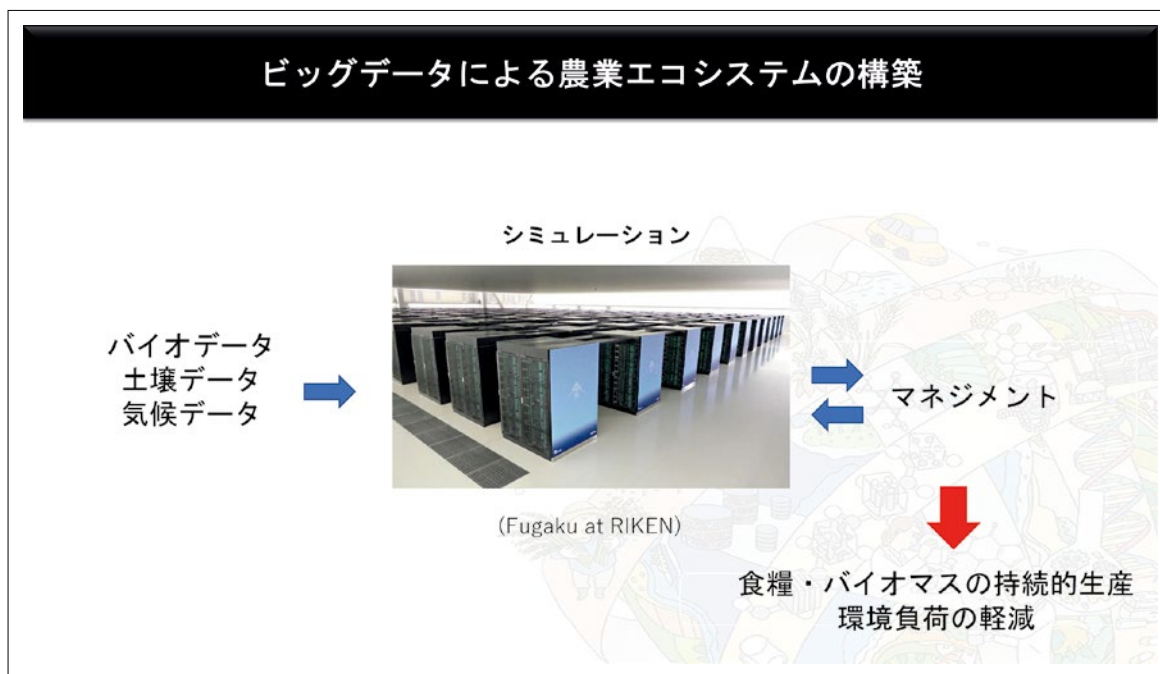
図 A1-4-9 農業エコシステムの DX

図A1-4-10は、コマツナの圃場で何が起きているかを分子レベルで全て調べ、実際に土壌内のあるアミノ酸が大きな要因になっていることを発見した研究である。こうしたことがこれから実際の圃場、実際の植物で使われていくことになるかと思う。



図A1-4-10 新疫病の拡大

そうすると、ビッグデータ解析が必要になる。バイオデータ、土壌データ、気象データ、それらを入れてシミュレーションしてマネジメントする、マネジメントしてうまくいったデータ、あるいはうまくいかなかったデータをフィードバックしてシミュレーションを続けていくことである。これを使って、食料バイオマス持続的生産、環境負荷の軽減に向けて使っていくことがこれからの研究の方向性と、農業そのものの方向性になっていると思う。



図A1-4-11 分子データの重要性

(Q & A)

Q：新たな宿主に移ると新しい疫病が発生するとのことであったが、潜在的な新しい宿主は予測することは将来的にできるか。今の状況だと、それが起きてからできるだけ迅速にゲノムの解読などをできるだけスピードを上げてやっていくのが基本的な今の対応と思うが、そこを将来的な宿主を予測するという方向性については見通しがあるか。

A：例えば、いもち病の場合、小麦は今までもいもち病に耐性がある。その理由は、いもち病のあるたんぱく質を認識できるため、免疫システムをオンにできる。新しく疫病になったものは、認識される部位を自分のゲノムの中で改変して見つからないようになったためである。ということは、イネのいもち病が持っているたんぱく質、つまり、分泌されるエフェクターと呼ばれるたんぱく質が、例えば100とか200とかあり、どれが小麦に認識されているかを理解しておけば、その変異が入ったものが畑上にあることが分かればジャンプする可能性が高い。そのある意味組合せを全て理解しておくということが大きなデータとしては重要になってくる。

Q：実際に国内外で取組はされているか。

A：エフェクターと言われるたんぱく質のどれが認識されるかという研究は実施されている。違う植物に例えばそれを打ち込むことができ、反応するかどうかを見る。これとこれはトマトに入れたら反応するなどの研究はされており、だからトマトはこの菌を認識できるようなことはある程度見ている。大抵の場合、それが幾つかあり、1つだけだとそこを菌が改変してすぐにジャンプできてしまう。しかし大体3つ4つ以上を、菌として失いたくないたんぱく質を、そういう抵抗性のある植物で認識できており、それ

で守っている。しかしながら、4つとも全部の変異が突然起こるというよりは大体においては中間になる植物がいる。一気にジャンプしないけれども1個、2個ぐらい落とすと入れるようなものがいて、そこからもう一回ジャンプする、つまり変異が起こるプールができてしまうとジャンプしやすくなる。

植物として、病原体が中間体のプールになりそうな植物のゲノムも分かれば、ジャンプしやすくなることが分かってくると思う。

Q：外部環境によって異なる疫病の影響を受けやすかったり、受けやすくなかったりということは必要ないか。

A：非常に大きい問題である。気候データとの絡みもあるが、湿度、温度がどのくらいになるとある病気が非常に多く出るとかはある程度データが蓄積されてきている。それを全部加味してAIを使うなどして、疫病が起こりやすい条件も予測しながらやっていくことになる。

Q：いもち病などの疫病をもたらす菌と、あと助けてくれるような菌根菌とか根粒菌とかが、そういう根圏あるいは植物体の地上部でも菌同士のバランスはどうか。

A：今まさにその研究が始まったところである。それはシークエンサーが出てきたこともあり、そのどの土壌中の菌と根圏にいる菌がいた場合、その病気が入りやすいか、あるいは入りにくいかを相関ではあるが、データを取る人は今数多くいる。ただ、実験室内での実験が難しい。それは全ての菌を取ってくる、取ってきた土を保存して何回も同じ実験ができるとか、そうした部分が非常に難しく、技術的にはまだハードルがあるが、その方向で実験しているのは間違いない。ある圃場に毎年同じ時期に行き、例えば雨の日の後のこの土地の土を取り、それに対してどういうマイクロバイオームの全体像があり、それに対して菌がどのくらい入りやすくなるかどうかというような研究はやり始めているところだと思う。

Q：ストライガの例にあるように化学物質をまくような実装に向けた動きはどんな感じか、何か生物に効いてしまう材料を畑にまいて良いのか、レギュレーションなど。

A：名古屋大学のITBMでも人工の化合物をまいて発芽できるか、自殺発芽できるかというような実験はされている。ストライガの場合、範囲が広いので化合物をまくのはかなり難しく、金銭的にも難しい。それと土の中ですぐ分解する物質である。そういう物質だと何度もまく必要があり、種は40年ぐらい残っているので、それをせん滅させるのが非常に難しいと予測される。つまりケミカルでコントロールするのは多分非常に難しい。駆逐するのに根気が必要。

Q：駆逐は無理でもミテゲーションは可能か。

A：減らすことと、あとは教育である。うまく教育してそこを減らしていくということである。スーダンではストライガの畑について、川から水を流して別な場所を畑にするとのことであったがストライガの種を灌漑で運んできてしまうため、また数年後全部ストライガになってしまう。それをさせないような教育も含めてやっていかないと解決は難しい。

A1.5 微細藻類を用いたバイオジェット燃料生産について

星野 孝仁（ちとせ研究所 本部長）

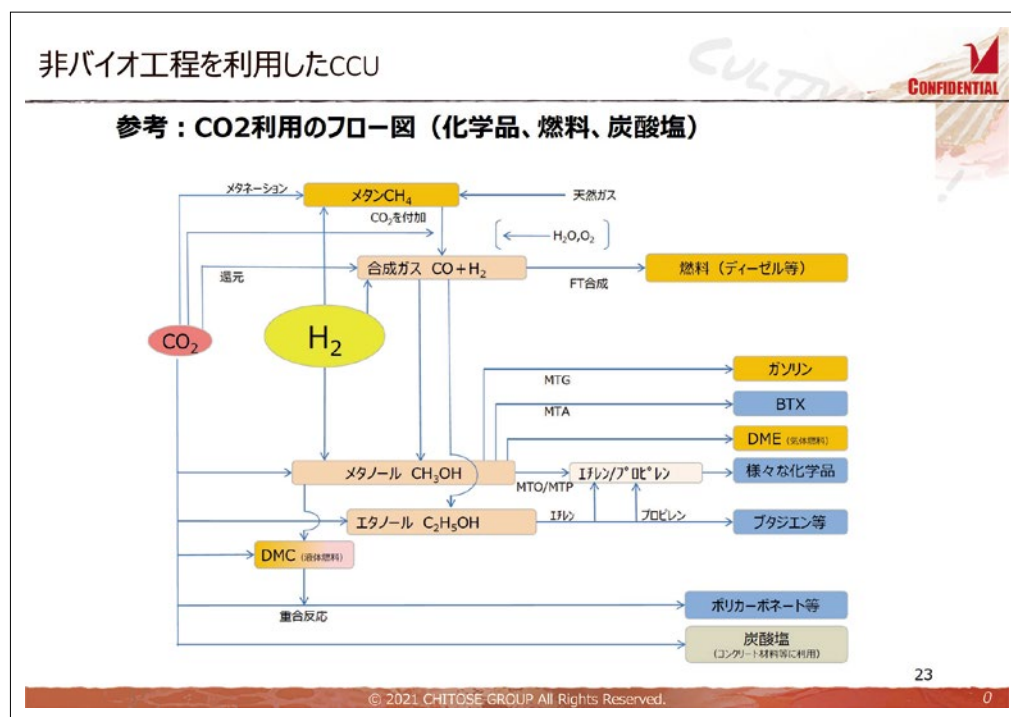
微細藻類を利用したカーボンニュートラルの実現に向けた可能性と、微細藻類を産業活用することにおける現状の課題に関して報告する。

まず、CCUSのコンセプトについては、経産省から出ている「カーボンリサイクル技術ロードマップ」というところから引用している。CCUSというのはCarbon、Capture、Utilization、Storageで、二酸化炭素を回収し、それを貯蔵したり利用したりする。

カーボンキャプチャーとストレージがよく話されており、今のところそのUの部分、ユーティライゼーションが非常に、今、世の中的には少ないので、これを活性化させていかなければいけないという話になっている。

ユーティライゼーションの方法としてEOR、これは濃縮した二酸化炭素をガス田に入れて、ガスや石油のリカバリーを誘発するものである。あとは、ドライアイスなどの溶接に使う形であるCO₂の直接利用、最後にもう1つ、リサイクルと呼ばれる部分がある。リサイクルのところに関して、大きく分けて2つある。非バイオの方法とバイオの方法というのが規定されている。

図A1-5-1はそのうちの非バイオの部分である。基本的にはCO₂を何らかのエネルギー、この場合は水素がほとんどであるが、それを利用して色々な有機物に変えていこうという方法のフローになっている。

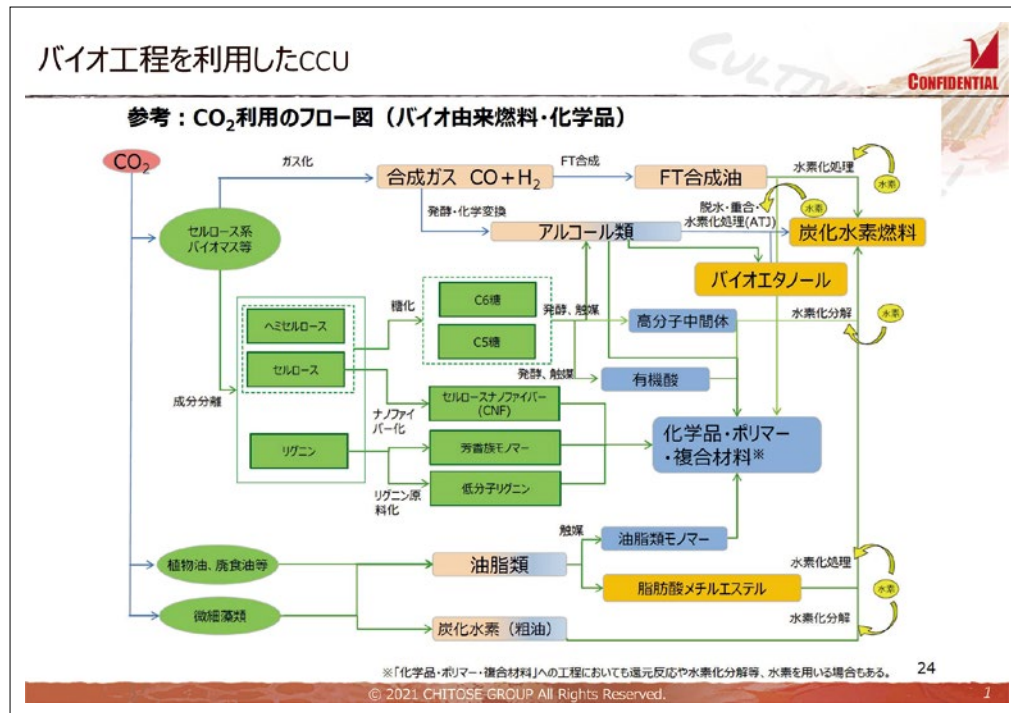


図A1-5-1 非バイオ工程を利用したCCU³⁶

ただし、基本的にCO₂を還元して何かしらの有機物に変えていくときに、エネルギーが必要になってくる。

36 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ，
<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>, P27-28, 2019.6 (2021年12月6日時点)

ここでは水素となっているが、水素を作るためのエネルギーとして何かが必要である。基本的にこの非バイオを利用した工程でCCUをやろうとした場合は、化石燃料に頼らないとするのであれば、再生可能なエネルギーというのが非常に十分以上あるような世の中ではないとなかなか難しいと考えている。バイオの工程を利用したCCUで、今、想定されているメジャーなところで図A1-5-2があり、これは経産省の資料から引用したものである。

図 A1-5-2 バイオ工程を利用したCCU³⁶

化成品原料と燃料用、主に2つある。燃料用では、CO₂を燃料にリサイクルしていくのにどのような方法があるのか、今どのような方法が検討されているのかという部分がある。

陸上植物を利用する方法は3種類、①セルロースやリグニンを利用する方法、②陸上植物由来の廃食油を利用する方法、③陸上植物由来のバイオマスを直接利用（熱分解を経由するもの）、が考えられる。①と②はエネルギー収支の観点から、現状利用が難しいか、もしくは不十分。③であれば可能性があるかもしれない。陸上植物以外の光合成生物を利用する方法としては、微細藻類の利用が考えられる。

化成品も基本的には同じで、樹脂の原料を作る方法として、リグニン、ヘミセルロースを使う場合、リグニンとセルロースを効率的に分離する技術や、それを大規模に実証することがまだ全然行われていない状況と
思っている。

セルロースが分離できて、それを糖化してアルコールのようなものに変換していくところ、さらにそれが全部できたとしてエネルギー収支が合うのかどうかというのが非常に難しいところである。これが仮にうまくいったとしても、なかなかエネルギー収支的には難しいだろうと考えられている。

リグニンに関しても同様で、セルロースからリグニンが分離できたとして、リグニンのモノマー、原料化できる部分だけを適切に裁断して原料化するというのは非常に難しい。さらにそれを大規模に実証するということはまだ全然行われていないのではないかと考えている。

植物残渣を利用する方法として今一番可能性があるようなところでは、セルロースだけを分離してきて、それを切ったり、どうしたりということはあまりせずに、セルロースナノファイバーみたいな形で利用していくと

ということが可能なのかもしれない。それ以外は、食物残渣の場合は熱分解して合成ガス、もしくは藻類を使うルートというの、今、検討されている。

廃食油がよく話題になるので、参考までに調べたところ、日本全体で1年間に植物性油脂というのは260万トン程度利用されている。260万トン使用されているうち、回収されているものが、大体事業、外食産業や食品製造業が主であり、32万トンから35万トン、家庭用のものとして10万トン前後のものが回収されている。

ただ、そのうちの大半の部分が飼料用や工業用で使われており、廃棄されている部分、再利用が可能な部分というのは非常に限られている。

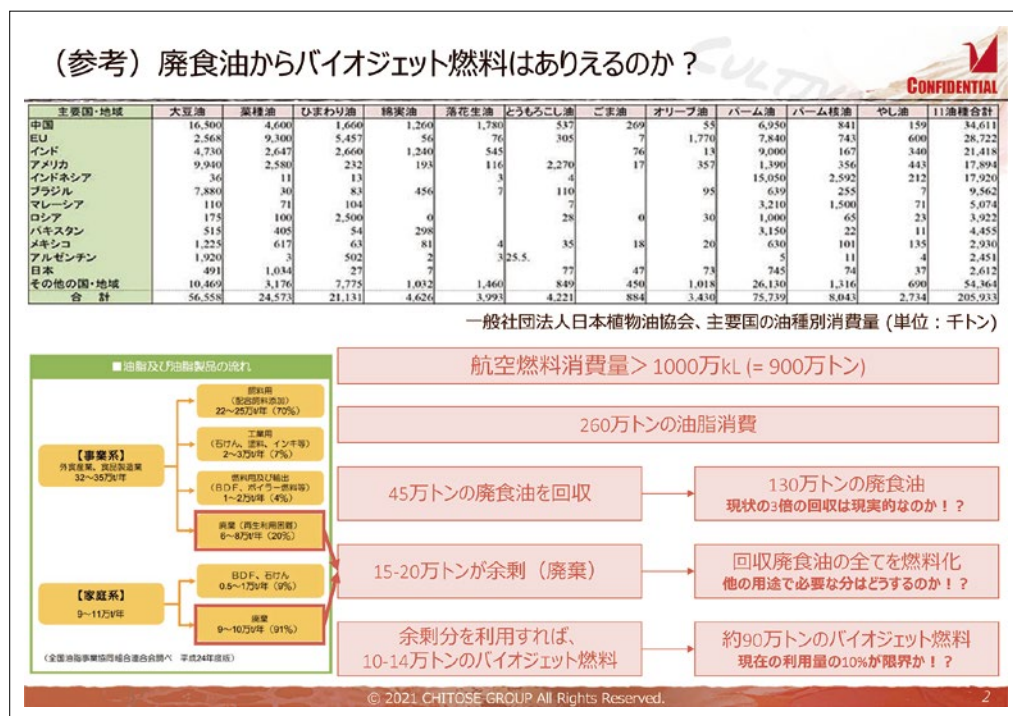


図 A1-5-3 廃食油とバイオジェット燃料

日本の国際航路、国内航路で利用されている航空燃料の総量、1年間当たりは、コロナ前の数字にはなるが、大体1,000万キロリットル、900万トンぐらいになる。それと比較して、そもそも植物性油脂の使用量は約260万トン。回収されているものは、今現在、45万トン程度ある。そのうち利用されていないもので、燃料用途なり、なんの用途で利用可能なのは恐らく15万トンから20万トンであろうと言われている。

余剰分を利用すると、恐らく10万トンから15万トンぐらいのバイオジェット燃料というのが生産できるだろうと考えられている。このため、日本国一国だけではあるが、使用している航空燃料の約0.1%程度はこれで賄えるという話になる。これは、補填するという意味では有意義な技術だと思うが、これで燃料生産というのが解決すると言われると、それは難しいだろう。仮に、例えば回収量を今現在の約3倍、つまり需要の半分を回収したとして、その回収した油を全部燃料化する、ほかの用途を一切無視して燃料化する、さらに、それをバイオジェット燃料に変えていくとやったところでも、生産できるバイオジェット燃料の量というのは90万トン程度であり、使用量に対してMAX10%が限界ではないかと考えている。これはあくまでも試算なので、もっと全量回収すればこの倍ぐらいはいくのかかもしれないが、いずれにせよ将来的に目指している航空燃料を代替するには程遠い状況ではないかと思っている。

そういう理由があって藻類というのが注目されている。藻類が陸上植物の生産と比較して優れている部分は大きく3つある。生産性が高いこと、効率的省資源であること、最後に、用途の多様性というのがある。この

高生産性の部分に関しては、基本的に光合成のメカニズム自体は同じで、光合成効率自体も植物と変わらない。このため、生産性が高いところというのは、そこではなくて別の理由による。そこが端的に表れるのが収穫係数の部分である。藻類というのは生産したバイオマスの全体を回収し、それを利用することができるのに対して、例えば、トウモロコシやお米は、生産したバイオマス全体のうち、収穫して利用できる部分というのが50%、大体の穀物において30%から50%ぐらいの間を示している。この時点で半分ロスしてしまうが、藻類にはそういうところがないという部分大きい。

ほかに、回収する部分に関しても、産業利用がしにくい成分をあまり作らない。植物体は陸上に生えているため、セルロースやリグニンという構造を維持するための物質を生産する必要があるが、微細藻類は基本的に水の中にぷかぷか浮いているため、構造体を作るための成分を作る必要がない。その分エネルギーを人が活用しやすい形の物質に変換することができる。

天災や天候不順があると、その年の穀物や、その周期の穀物の生産量がぐんと下がってしまうが、藻類というのは、ダブリングタイム自体が非常に短く、収穫するものも細胞そのものなので非常に短い。

昔アリゾナにいたときにやっていたものは、非常に生育の遅い藻類だが、それでも播種した後、大体1週間も経てば真っ黒になり、ここから連続的に収穫が可能になる。台風や天候不順などで、培養がクラッシュした場合でも播種し直せば、1週間後にはまた収穫を始められる。こうした部分が高生産性に結びついている。

次に、省資源という部分についてである。1つ目が、淡水資源の使用量が非常に少ないということである。今、世の中の淡水資源のうち70%が農業に利用されている。ほかの陸上植物や動植物と比べ、例えば1キロ当たりのバイオマスやたんぱく質を生産するために必要な淡水の量が非常に少ない。その上、藻類の多くが汽水域であり、海水でも生育が可能のため、淡水の使用量が最小化できるということが大きな利点としてある。

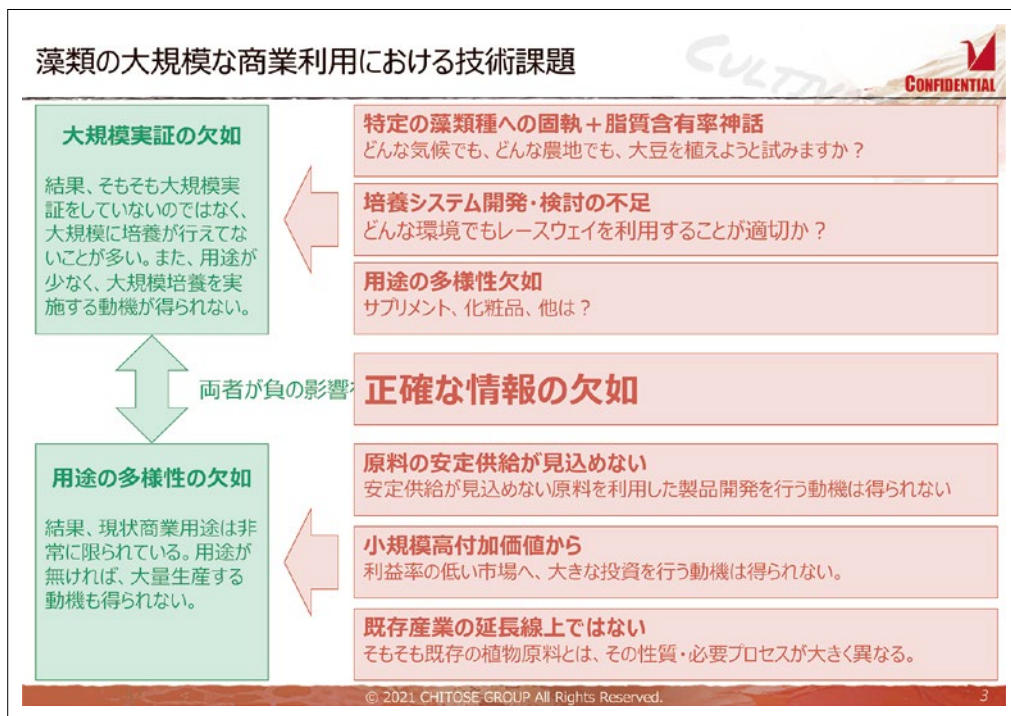
2つ目は、基本的に池さえ造っておけば培養ができるというところで、農地、農耕適地というものをあまり必要としないというところが大きな利点としてある。農業ができる土地であれば、しっかり農業をやれば良いと思っているし、できない土地でも培養ができるというのが、純粋に光合成による一次生産量を増やせるというところで微細藻類の優位点なのではと考えている。

3つ目は、高濃度CO₂、ポイントソースの高濃度CO₂が使いやすいというところがある。陸上植物でも、もちろん大気中のCO₂濃度を上げると生産性が非常に上がると思うが、ハウス等のコントロールされた区域ではある程度できると思うが、土壌ではそれが難しい。ただ、微細藻類の場合は液体の中に浮いているため、液体にCO₂を溶解させることで、ある程度高濃度のCO₂を有効に利用することができるというメリットがある。

最後に、用途の多様性について述べる。これは生産性のところとも関係するが、セルロースやリグニンのような活用が難しい成分を作らない分、例えばほかの穀物類と比較して、大豆と同等や、それ以上の脂質含有量を持っている。たんぱく質に関しても大豆以上、ものによってはお肉以上のたんぱく質の含有率を示している。

そのほかにも、カロテノイド系は光合成をするのでそのような色素系のものや、EPAやDHAに代表されるような高濃度の不飽和脂肪酸などを色々作れる。また、作っている量は、セルロース、リグニンを作るエネルギーをこっちに回せる分、普通の穀物と比べて高い。

微細藻類はこれだけ優位点を持っていながら産業活用されていないところの大きな課題として、いまだに大規模実証というのがなかなか行われていない部分がある。



図A1-5-4 藻類の大規模な商業利用における技術課題

これには幾つか理由があるが、1つは用途の多様性が欠如している部分がある。微細藻類を利用した商品と考えるときに思い浮かべられるのが、化粧品であったり、サプリメントであったりということに限られるのかと思うが、そういう用途がないために作る意味もないというところであまり生産されていない。これがお互いに負の影響を及ぼし合っている状況である。

大規模実証ができていない大きな理由として、特定の藻類種への固執や、脂質含有率神話のようなものがあるのではないかと考えている。どの企業の方も今まで扱ってきた藻類種に愛着があったり、こだわりがあったりということがある。ただ、どんな気候でも、どんな農地でも同じような大豆をどこでも植えましようというような乱暴なことは普通はしないと思うが、微細藻類の業界ではそういうことが行われている。

バイオシステムに関しても、昔からあるレースウェイ（池）を使ってやるものばかりが検討されていて、ほかの方法があまり検討されていなかったり、単純に用途が欠如しているので大規模実証する動機が得られなかったりする。原料の安定供給が見込めないので大規模実証を行うことができない。昔からの小規模高付加価値から小さい規模で事業を始めて拡大していくという話があるが、そこは小規模の高付加価値で利益率が高いところであまりうまくいっているビジネスであり、そこから、あえて利益率の低いリスクの高い大規模の投資を行うような大規模のところに進んでいく動機が得られない。基本的に色々な技術の部分で既存産業の延長線上ではないところがある。

最後は、正確な情報の欠如という部分がある。基本的にはこだわりがなく、環境や目的に応じた藻類種を活用して、脂質の含有率より、どちらかというバイオマスの生産性を重視した培養方法であったり、藻類種の選択であったりというを行っている。

あとは、用途を開発していくためにも大規模な生産規模の確立、バイオマス全体を利用するような用途の開発、多様な用途に対して全体のプロセス、産業構造、サプライチェーンを的確につくっていくということを実際にやっいてこうとしている。それを踏まえて、それら全体を進めていく上でも正確な情報というのが必要である。

6月17日、藻類由来のバイオジェット燃料を使った商業フライトが実施された。このときに、そのNEDOから報告がでた。すばらしい報告だった点は、どのような燃料がどれだけ混ぜられたかという正確な数字を

きっちり出してきた。これは非常に、英断だったと思っている。これがあるおかげで、現状がどのくらいあるのか、現状の技術水準はどの程度なのかというのが分かってくる。

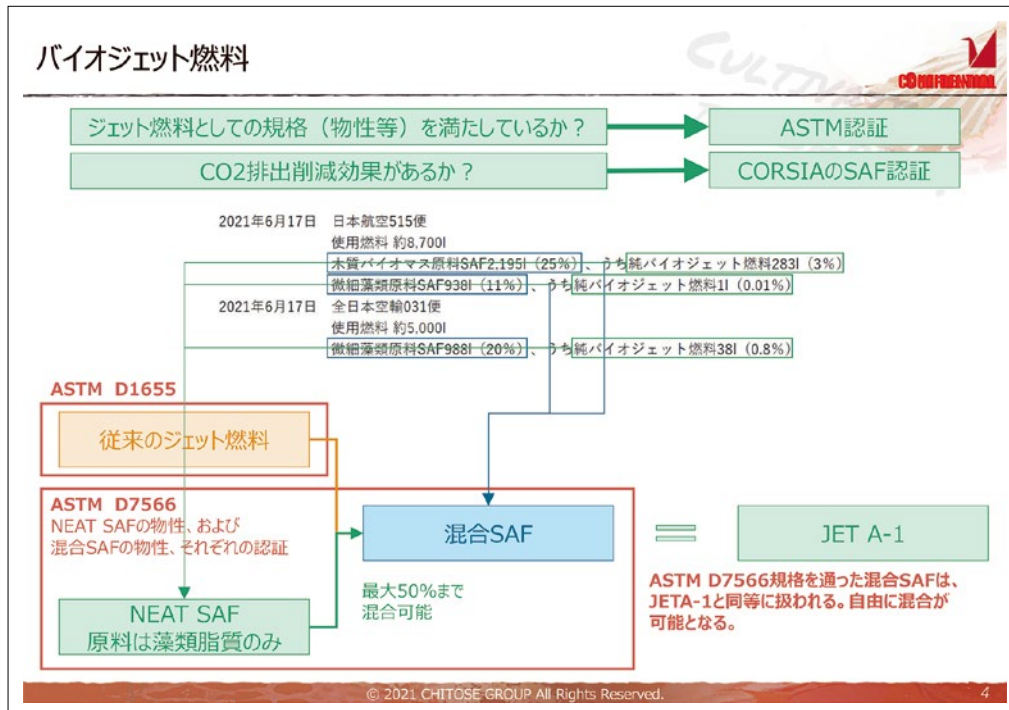


図 A1-5-5 バイオジェット燃料認証への動き

その一方、バイオジェット燃料は規格があり、まず、NEAT SAFと呼ばれるものがある。これは藻類であったり、木質バイオマスであったりという、そういうものからできた油の量、燃料の量で、これをASTM D7566と呼び、規定されている。それを従来のジェット燃料と混合して、ジェット燃料としての規格を満たしているかどうかというのが判断される。

基本的には、NEAT SAFというのは混合SAFに最大50%まで混ぜることができる。ここで規格を通ったものがほかのジェット燃料と同等にミックスできるという状況になっている。

ただ、ここでは、例えばある事業者が石油系の燃料に5%混ぜて使ったと書いてあっても、NEAT SAFが全燃料に対して5%なのか、藻類由来、廃食油由来のNEAT SAF両方合わせたNEAT SAFが全燃料に対して5%なのか、それとも混合SAFが全燃料に対して5%なのか、この辺が全然分からない状況である。このような情報の出し方をされてしまうと、現在の技術水準の把握や、必要な研究開発、適切なリソースの分配、利用というのが非常に困難になってしまう。このため、正直で正確な発表をすることが非常に重要であろう。

(Q&A)

Q：今まではオープンポンドがコスト的には安く上がると言われていたが、だんだん閉鎖型の培養技術でもコストは下がってきていると聞いているが、今の微細藻類の培養技術の最前線はどのようなものか。

A：今までほとんどオープンレースウェイポンドであるとか、開放型のポンドというものが利用されてきた。あのシステム自体は1950年代、60年代に開発されたもので、かつ乾燥地帯での運用というのを念頭に置いたシステムである。そういう場所であれば、いまだに一番安いシステムだろうと見込まれているし、利用価値がある。

ただ、例えば我々が今試しているような熱帯では年間を通じて気候は温暖だが、毎日スコールのよ

うな雨が降る土地であり、かつ周りが生物多様性の非常に豊かな地域であるため、オープンシステムだと簡単にいろんな生き物が入ってきてコンタミを起こしてしまう。そういうところではオープン型のシステムというのは不適切であろうと考えている。

我々は、どちらが優れているというよりは、目的と立地に合わせて一番適切なものを選んでいくのが必然であろうと考えている。その中で、例えば今マレーシアでやっているところでは、クローズドなシステムを使っており、それでやったほうが、その場所で、例えば燃料用やバイオマスを大量に作るということを目的とした場合、オープンレースウェイよりも優れていると私は考えている。

一概にどちらがいいというのはなかなか言えないとは思いますが、適材適所という形で進めていくのが正しいのかと思っている。

Q：アカデミアの要素技術開発として、どのようなことがこれから必要か。

A：現行の農業と大きく違う点として、微細藻類というのは大量培養を実証して、うまくそれを運用していくということがなかなかまだ難しい状況である。

例えばゲノム編集や品種改良などを行ったときに、それを実際に外に持ち出してワイルドタイプのものと比較してどちらのパフォーマンスが優れているか、というようなことを検証するための場所さえまだない。ワイルドタイプのポテンシャルをちゃんと引き出すところまでも行っていないというのが現状だと思っている。

確かにそのような技術は、微細藻類のほうでも華々しく報じられ、研究論文として非常に多くあるが、それよりはもっと地味なところ。生産において一番CO₂やエネルギーがかかっているところ、例えば、今我々が使っているシステムだと二酸化炭素を供給する曝気システムのところだが、曝気量を下げることによって攪拌が十分回り、CO₂が十分に供給できるような、かつ、O₂を完全に外に出せるような方法であったり、そのためのエンジニアリングであったりというところを地味に、どこまで曝気量を下げられるかというのを研究したりなど、そういうところのほうがかはるかに産業利用という面から見ると重要であると考えている。

産業方面から求められている部分と学術界で脚光を浴びている部分というのは、ずれが生じている状態なので、そこを合わせることをしていく必要があるのではないかと考えている。

Q：今、研究されている藻類は、太陽エネルギーのうちの単位面積当たり何%ぐらいエネルギーが取れているか。その藻類は燃料に加工したときに、それが何%ぐらいになるのか。

A：光合成効率で言うと、システムとしては、高いものだと3%から5%程度で、通常は3%以下。1%から3%の間が多い。そのうち燃料の部分は、重量比で言うと、バイオマス中10%から30%程度のもが多い。エネルギー量で言うと、脂質の部分のエネルギー密度が少し高いためもう少し高い、例えば15%から35%ぐらいが燃料として利用可能な原料になる。

Q：ある敷地があったときに、太陽光パネルを使ってエネルギーを回収するか、藻なり、ほかの植物を使って吸収するかと、それを有用なエネルギーに変えていくかという競争になると思うが、他と比較した時のメリットは何か。

A：太陽光エネルギーの太陽光発電は電気なので、電池が開発されて大量の電気を安価にため込むことができるならそれでいいと思っている。ただ、現在それが無いので、電気は作って電気として利用すればいい。電気で作れないもの、燃料などの色々な物質の部分というのは、やはり光合成に頼る必要があるのではないかと考えている。

Q：太陽光で作った電気で水素を作り、それとCO₂との合成と、FT合成という形でもジェット燃料は作れると思うが、どちらがいいか。

A：それが可能であればそれが一番いい。あとは、その設備を造ったり、インフラを造ったりというところ

ろで、どちらが最終的にいいかということになる。

微細藻類の大きいところは燃料、脂質の部分と同時にほかのたんぱく質、炭水化物を同時に生産できるという部分で、それらをトータルで見たときに、二酸化炭素の排出量やエネルギーの使用量などを判断して一番いいものを使っていけばいいと考えている。

Q：二、三十年前から過去にも藻類のプロジェクトがあったが、過去のプロジェクトの問題点と、今のプロジェクトではどの点が改善されているか。

A：幾つか問題はあるが、大規模培養の問題点について。うまくいっていないところの大きな理由はコンタミネーションである。ほかの藻類、バクテリアやカビ類によるコンタミネーション、捕食者によるコンタミネーションというものがある。

そこが一番問題になる理由として、開放型が使われてきてしまったということと、脂質含有率が高い藻類を使おうとするあまり、脂質含有率の代わりとしてバイオマスの生産性を犠牲にしてしまうことがある。成長は遅いが含有率が高い。でも、それやってしまうと、やはり、コンタミネーションの入ってくるスペースというのが大きくなってしまう。バクテリアのほうが早く成長してしまう。その2つが大きな原因だと思っている。

確かに砂漠地帯のような降雨が少なかったり、周りの生物多様性が少ない部分であれば、そのようなオープンシステムを使っていくというのはいいと思うが、熱帯の生物多様性が豊かで、かつ雨が降るような地域では、別の方法で別の藻類を使っていくということを適切にやっていく必要がある。それがあれば、今想定しているようなバイオマスの生産性というのは十分可能であろうと考えている。

Q：ラボレベルのスケールから大規模に移ることで生物的な要因などで何か状況が大きく変わるようなところというのはあるか。それがアカデミアのほうに共用できるような余地があるか。

A：例えばレースウェイを考えると、1メートルのレースウェイ、長さが10メートル、幅が1メートル程度、往復で20メートルというレースウェイを考えたとき、それをパドルホイール、水車一つで回す場合に、そこで攪拌が起きて二酸化炭素の大気からの取り込みと酸素の放出というのが行われ、それが一回転して戻ってくるまでに大体二酸化炭素は消えてしまって、酸素は過飽和の状態になってしまっている。

それで培養がうまくいったとして、それを10倍に広げたときに水車の数が何個要するのか、それをやることでどれぐらいの攪拌、二酸化炭素の溶け込みが期待できて、O₂の解放ができるのか。酸素が多くなってしまうと、やっぱりバクテリアの繁殖などが高くなってしまうため、それを防ぐためにはどのような攪拌システム、エネルギー効率のいい攪拌システムを考えるか、そういうところは十二分にアカデミアでもやれる研究だと思っている。

ただ、非常に地味な研究になってしまうため、藻類だけにかかわらず、例えば発酵のほうでも同じことが言えると思う。一番エネルギーがかかっている部分というのは、例えば、発酵の種類にもよるが、酸素の供給や、攪拌の効率、そこに使う電気量などである。

CO₂の削減を考えたときに、生産量を増やすというのは一つの手ではあるが、同時にそのエネルギー量を減らすということを地道に研究していくというのも非常に有意義である。

ただ、恐らく、例えば学術界においてインパクトファクターが低い論文になってしまう等ということがあると思うので、そういうところを研究するというのももっと評価されてもいい。すぐに応用できる、かつ色々な方面に、色々な分野に応用できるような研究というのは幾らでもあると思っていて、そういうところをもう少し評価するようなシステムというのが世の中にできるといいと考えている。

Q：ユーグレナの技術やボトリオコッカスなど、リリースだけをみるとうまくいっているように見えるが、技術開発の部分など、実状はどうか。

A : まず、いい藻ができた、見つけてきた等、品種改良によってワイルドタイプと比較して、例えばバイオマスの生産性が非常に向上した藻があったとして、それはラボレベルでは間違いなく検証できる。ただ、屋外の、例えば気候がいろいろ変動していったり、降雨があったり、ほかの生き物が入ってくるような状況で、それが同じような再現性を得られるかどうかを評価するためのプラットフォーム自体がまだ存在しない。

例えば農業の場合は圃場があり、既に今まで慣行農業として確立された生産方法があり、そこで大規模に比較することができるプラットフォームというのが確立されている。それがまだないので、まず品種改良したものをどうこうというよりは、ワイルドタイプの時点で、かなりバイオマスの生産性を屋外で再現できるシステムの構築というものを、そこに必要な基礎研究というものに積み重ねていく必要がある。

例えば曝気方法やエネルギーをどうやって減らしていくか、攪拌がどれぐらい必要なのか等、本当に地道な研究になる。遠心分離機で固液分離した後の水を再利用していくときの滅菌方法や、どういうバクテリアがいるとこのような問題が起きるから、それをモニタリングするシステムをつくるといったことや、培地の成分が変化したときにこのような変化が表れるので、そうなる前にこのような追肥をしていくといったこと、水をきれいにしていくことなど、地道なところが非常に多い。

Q : 使われる藻類はどのようにお探しになるか。

A : 今はそれほど特別なものを使おうと思っていない。例えばクロレラやクラミドモナスなど、要は、バクテリアにおけるイーコライのようなモデルストレインを使って、それを大量に生産できるシステムをつくるということが喫緊の課題だと感じている。それができて初めて色々な藻類をちゃんと現場環境で比較できるというプラットフォームが出来上がる。

A1.6 全体討論

○（司会）

全体討論の議論は、CO₂の吸収量を増やす具体的な研究開発課題と炭素の資源利用の問題、つまり研究開発課題をCO₂の吸収と利用に分けて研究開発課題を洗い出すことが一つの目的である。

その中で、例えば海外と比較、ボトルネック課題、実証レベルの課題、それらがカーボンニュートラルへの量的な貢献を議論する。全体的に研究開発課題の整理がしたい。

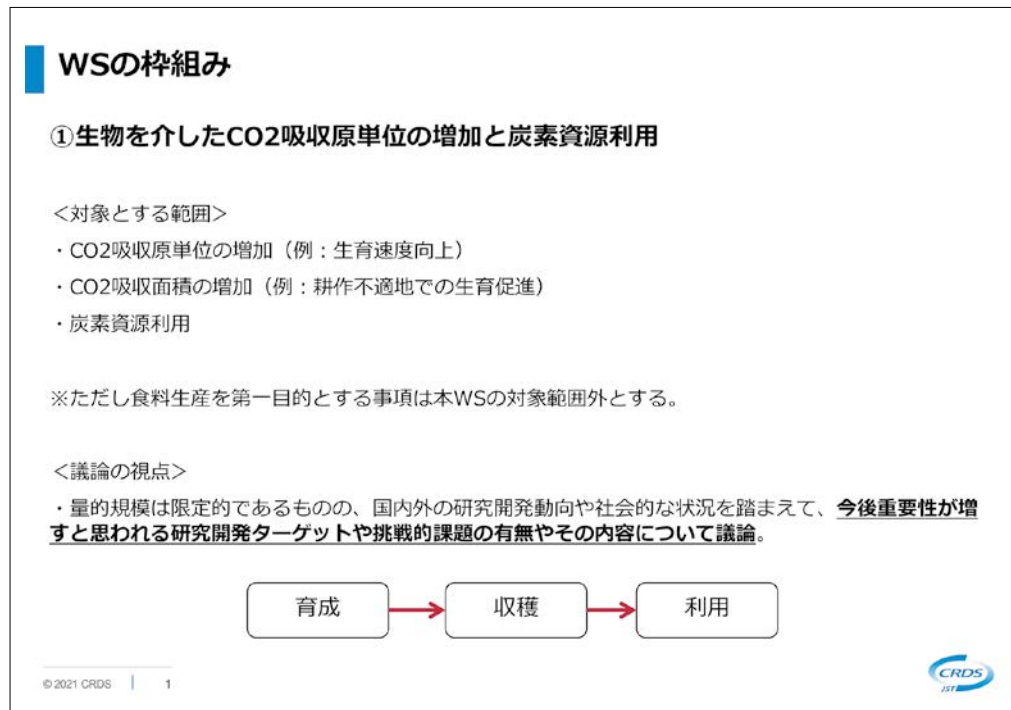


図 A1-6-1 第1回ワークショップの全体討論の枠組み

○（司会）まず、CO₂の吸収源単位の増加の課題を整理したい。

○CO₂固定能を上げるにはルビスコを賢くすることによって、CO₂を吸収するプロジェクトがアメリカやオーストラリアなどが資金を出し合って進めている。他にも、光合成について、たまったスクロースを代謝に流すなどのやり方があるが、GM（遺伝子組換え）ができてしまう。多くは国内であり使えず、圃場試験もやりにくい。光合成CO₂固定能増強は重要ではあるが、国民の共感が得られない課題であり、これを植物科学のやるべきこととして位置づけるのを悩んでいる。

○光合成の観点からCO₂の供給を上げること、CO₂の固定能を上げること、光エネルギーの変換効率を上げることで、三つどもえで攻めていくことが良い。結局はGMの問題にぶつかってしまい、例えば気孔開口促進したものも、技術的には面白いだけで、企業と連携で、組換え体を使うことで企業のイメージが崩れ、そこで話が止まることが実際多かった。光が見えてきたのは、ゲノム編集である。ここは実用的になりつつあり、遺伝子組換えに頼らない方法を模索することが大切である。こうした技術の実現には遺伝子組換え以外の技術を整えることが、植物科学には重要である。

- GMを育てている国々があり、日本で育てると価格も高くなるので、海外で植えて、それを日本が買う、という人たちもある。そうしたサプライシステムあるいはビジネスモデルを考えることも可能ではないか。
- 日本の企業でも、GMの技術を確立して海外に売るところもある。実際に我々の組換え体を共同研究、あるいはライセンスアウトしたのは、海外の企業だった。だが、日本の予算を使っことを咎められたこともあり、難しい。
- カーボンニュートラルに取り組むには、大量にバイオマスを購入するなど、例えばニューソルガムといったテクノロジーは日本で開発し、海外で植えて、それを日本が買い戻すということも考えられる。
- 長い目で見た場合はそれもあり得るが、JSTのALCAなどでは、海外と組むのは難しいという議論があったようだが。
- 縛りは全くない。
- 現実に社会実装されればよい。
- ALCA、未来創造で、植物により二酸化炭素を減らし、それを利用する研究に長年関わっている。だが、二酸化炭素の排出日本だけでなく様々な国であり、国内で植物を植えても効果が見えてこないと思う。実装の場を考えると、人口密度の高いところでバイオマスを大量に作るのは無理がある。こうした開発に当たっては、日本国内と考えると先が見えず、効果が薄れてきてしまうので、栽培に適した場所でバイオマスを生産するような植物の改良あるいは開発し、そこで実装し、トータルとして二酸化炭素の削減に、地球全体での削減貢献をすべき。
- 結局、バイオマスを使うと面的な広がりを持たせて二酸化炭素を吸収するエリアをつくるかということであり、その中でどれだけ効率を上げるかということになると思う。効率のいいところで、多くやることが必要ではないか。そのリミッターが外れれば、研究開発も知見を投入できるのでは。
- 例えば、農業の穀物で、実環境で体何%の光合成効率が実務上向上させられるか。
- 光合成効率を増やすよりも、CO₂濃度の急激な増加に対してその効率を低下させないにはどうするかという感覚である。
- 現状の農業における光合成効率は収穫物に対して1%以下だと思うので、その25%というと、全体として0.25%ぐらいの効率アップがマックスというのがコンセンサスか。これを前提とすると、例えば1%、1.25%という数字で、慣行農業でどこがバイオマス生産の制限か。温度、水、CO₂の供給か。
- 植物なので、生育のステージで必要とするマックスが違ってくる。水が大量に必要な生育段階もあり、肥料などが必要な生育段階もある。また、光が律速になることもある。藻類だと大体均一に培養しているので簡単だが、陸上植物の場合には生育ステージによって必要な要因が違うので、温度、水、CO₂の3つとも必要。

収量性を上げることは、植物の収量は、集団で見ることが重要。バイオマスを作るときの要は、1個体での話ではない。単位面積当たりの収量性を上げていくことが重要であり、1平米当たり何グラム光合成で作れるか、その部分を上げることができればバイオマスの生産が増える。バイオマスの増産を考えると

きは、単位面積当たりのバイオマスを増やす発想が重要。

10%、20%の増収であれば、植え方の工夫などで今の植物でもできるのではないかと。アメリカやオーストラリアによる投資で行われているプロジェクトについても、目標が個体ベースか、面積当たりかによって難しさが変わってくる。

目指すべきは、1平米当たりのバイオマスの生産だと思う。これまで基礎研究から成果までを見返すと、個体当たりの増加をいうことが多い。

今回の発表では、面積、栽植密度にして、稲の収量が3割ぐらい、バイオマスが増えているので、このような技術が大面積で使用できればと思う。バイオマス、二酸化炭素の吸収の点では、肥料の効率的な利用を微生物等と併せてさらに効率化できるような技術になると思った。

○水田での我々の試験は、25平米ずつ区画をやり、その単位面積当たりで30%程度の増加の結果だった。

○その結果を見て、単純に面積を増やしていけば本当にバイオマスの生産がそのぐらい増えるということが分かるデータと思う。

○現在の環境が維持されず、CO₂の濃度が急激に上がっていることに対して、研究者の知識が少なく、予測ができない。農林水産省のプロジェクトで森林とCO₂との関係について10年ほど前にやっていたが、そこで、森林総研と高CO₂化が樹木への影響について研究をした。農耕地というよりも森林によるCO₂の吸収が、近未来の話としてシリアスである。農耕地では窒素栄養など、人為的に増やすことができるが、森林は大体痩せ地であって、CO₂過多になると、窒素栄養と炭素栄養とのバランスが気になってくる。体内の栄養代謝バランスの崩れが生じる可能性に関して、植物種違うが、留意しておかなければならないという印象を持っている。

○植物の疫病について諸外国と一緒に考えていく必要があるのか。

○日本は島なので、ほかの国よりは危険度は低いが、特に食料品の輸入は多く、それにくっついてくる菌は沢山ある。例えば、かんきつ系やお茶など、大量生産しているところに一回入ると、一気に広がるので、危険なものはどんどん増えている。

エネルギーを考えるならば、全体を考えなければならないと改めて思った。例えば、広いところでバイオマス植物を作って買ってあげればいいという議論もあるが、結局、作ったものを持ってくるという、輸送にエネルギーがかかる。そうすると、結局、ローカルに作り、ローカルで消費するという、地産地消でやらないと元は取れない。地産地消は、それぞれの土地でそれぞれに最適な植物を選び、最適な栽培をやるしかない。それは、CO₂の、例えばシロイヌナズナの光合成能力を10%上げたとしても、その土地でシロイヌナズナが生えなければ意味がない。その土地で一番効率のいい植物、エネルギーがかからない植物でやらないといけない。するとさらに、土の状態、病原体など、ローカルな問題が出てくる。これは農家が一番よく知っていて、研究者はよく分からない情報だったが、これからはそれを全部デジタル化することが可能になるので、地道な世界と思う。

そのため、遺伝子を換えてというより、もっと地道な、一つ一つローカルの最善のものを探するような研究の方向性もある。結局、エネルギーを回収するとき、とくに量を考えるならば開放型でやると、その土地の開放型がどういうものなのかを理解しない限り、そこでは生産できない。直接的に増量するよりも、ローカルに、エコロジカルに考えた生産方法を考えていく必要がある。

○研究開発の現状はいかがか。海外と比較したときの日本の研究開発の立ち位置、ボトルネック等いかが

か。

○ゲノム系はかなり遅れているのではという印象。インフォマティクス系も同様。全体を見る方法論がまだ弱いというか。一つの植物を見て、一つの現象を見るというのが八割方。全体を見ていく手法論は、海外ではかなり進んできているというのが印象。

○海外との付き合いでは、情報は全体を網羅的に取り、それから当たりを探していくことが様々な植物種で行われている。日本は、例えばイネなど特殊な、代表的な作物に関しては一生懸命やろうとしているが、海外のグループは、園芸作物でも全く同じようなことを今やろうとしている。日本は、稲ではできていても、それ以外の作物ではできていないというのが現状だ。

これは、バイオマス植物についても同じで、研究開発投資や人材育成をおこなっている研究室が少なく、限られたところしかない。しかも、大学ではないところで開発しているので、人材育成という点では、ゲノムに関係したような俯瞰的な情報収集を行って絞り込んでいくようなことをやる人材の養成もできていない。その辺を早急にやっていかなければ、方法論で遅れが出る。

大量のデータを取った後の機械学習などの方法論は、非常に新鮮。そうしたものが使える状態がまだ日本では少ないので、その研究開発とそれを担う人材の養成方法を検討していかないと海外との差が出る。

○（司会）次に、面積的にCO₂の吸収量を上げるというところの説明をお願いしたい。

○植物を育てている場所には、生育適地と、それを取り囲むような準生育適地、その他は生育不適地すなわち砂漠のような植物が育つには難しい土地がある。生育適地に関しては、1平米当たりどれほど生産性を増やすかという論法でよい。準生育適地については、幾つかの環境要因で生育が非常に不安定である。しかし、生育適地の周囲が準生育適地になっているため、面積としては結構ある。そこでの生産の安定の結果が出ていないのは、生育不適地を意識して、強い植物を作ろうとしているからと考える。

準耕作地でのバイオマス生産を安定させる、つまり技術を導入した植物を育てるようになれば、準耕作地が次第に耕作適地になってくる。すると、そこを何年か続けていると、水をキープしやすくなる等、生育の環境がよくなる。そのようになれば、その周りにさらに準耕作適地ができてくる。このように、適地を広げていくようなことができれば、植物が生育できる面積が結果としては増やせ、それがCO₂の大きな削減効果につながる。

○具体的にどういった植物に可能性があるか等、研究の現状はいかがか。

○回答が難しいが、農作物の収量の不安定化を招いているのは、おそらく温度と水。とくに水については、水に対する耐性、水が少ないこと、多いことに対する耐性を持たせる、温度の高低に対して耐性を改良する等によって、準耕作地でも安定して生産できるようになり、バイオマスの安定生産につながるのではないかと。

○内モンゴルやアフリカで干ばつなど、水が少なくて植物があまり育たないときに、羊などの家畜が草、植物を食べてしまい、それ以上の植物が生えないため、結局、砂漠や非耕作地になっていく。そうした循環を止めなければ、単に植物によるCO₂吸収や固定以上に全体の環境問題にも影響すると思う。それらについての世界的な動きや国内での動きはあるのか。

- 研究者から話を聞くと、おそらく人の食生活の問題と思う。肉をどれだけ食べたいか等も影響している。最近の流れとしては、植物を使ってたんぱく質を作る、虫の話等ある。植物を使って植物の成分を変更し、植物由来のたんぱく質を使って食べられるようにする等、環境破壊を食い止めるようなことと併せて、植物を使ってたんぱく質を作る仕組みを強化することも、有効と思う。CO₂を吸収できる面積を減らさないことばかりではなく。
- かつてのユーラシア大陸、イラン、イラクも緑に覆われていたが砂漠化したのは放牧のせいだと言われている。その辺を改善することをしていただけるとよいと思う。
- 陸域の生物と藻類とは全く違うという感じがした。その上で、例えば気孔の開閉を制御する技術や乾燥など気候とは、別な技術が要らと思った。シーズ、技術として、具体的に将来やっておくべきところは共通化されるのか、されないのか。各植物に特化する話なのかについて聞きたい。アプローチとしては、理研の白須さんの部分と個別を常にキャッチボールしながらやっていくことが重要か。
- そのとおり。白須先生の研究とは切り離せないほど重要。ただ植物の基礎科学全体で攻めなければならない。その姿勢を維持しなくては、本当の意味での国際競争力は保てない。
視野をもう少し広く、長期的な視点も持てるような、少しおおらかなかたちでお金を使うことが大事。全体的に植物科学を、環境など、幅広い様々なものが関係したものとして考えることを忘れてはならない。
- そのような組織づくり、とくに日本は、どのような状況か。
- 様々なものが立ち上がっていく状況がある程度維持できていれば、研究の交流はあるので、構えなくてもいい。ただ、何かひとつに特化して、これだけで全て解決できる、といったやり方は宜しくない。植物栄養、病害菌、気候など、総力戦でやっていくことが大切。何かすごいプロジェクトに、高額のお金を使うのではなく、全体的なところで攻めていくことがベースとして保証されていることが大事だと、基礎系の研究者としては思っている。
- 発表の最後のほうで農業エコシステムDX、あるいはフィールドオミクスへの展開があったが、いろいろなオミクスが、蓄積されて、それを最大限活用していくサイエンスで歴史のある取組だと思う。今、現状ではどの辺までを目指しているのか。小松菜の例では、どれくらいの複雑さの状況の中でどういうことを知ることができてきているのか。
- コマツナに関しては、1か所のオープンなグリーンハウスの状況でおこなっている。市橋先生による研究だが、ほかのところでも同じデータが出てくるのか、あるいはその土地で違うデータが出てくるのか、違うならばどのくらい変動があるのか、ということを調べているところ。
これをほかの植物に展開していくかは難しいが、やるべき。コマツナは年に何回も生やせて、成長が早いので、実験的にはよかったが、ほかの植物にも展開していくことが必要。企業と連携して、その企業が頼んでいる農家に土を送ってもらい、どのくらいの菌がいるかなど、土壌を使ってどういった収量が出るかと併せて、どのくらいコリレーションがあるか等、今やっているところ。農家とうまく連携できるかが重要になってくる。
農水の実験圃場よりも、すぐにフィールドに行って、実際何が起きているかを見て、それをまとめたほうが多様な情報が入ってくる。コリレーションを取るのは難しいが、技術は大分コリレーション的な方面に広げていくというところ。

上記はフィールドのデータ集めだが、基礎的な技術も同時にレベルを上げてなくてはならない。例えば、メタゲノム解析にしても、最新のシーケンサーを使ってどこまでいけるのかなど、それはラボの中での技術にもなるが、そういった基本技術の向上も重要。連携のところは企業をかませたり、大学の先生に頼んでデータを集めてもらったり、そうしたようになっている。

見ているものは、植物側は転写された遺伝子群、つまりトランスクリプトームと、さらに物質群つまりメタボロームでどんなものが上がり、下がっているか、それから、土壌に関してはイオンがどのくらいあるのか、イオノームというイオン量など、窒素、NMRで見られるような一次代謝物、アミノ酸などを見て、それらの相関性、そして微生物を見ている。

○どれぐらいデータが必要かということに関しては、農家情報は、重要と思う。

企業には、農家のローカルで具体的な問題を、サイエンスの言葉に変換できる研究員の方がいる。農家が言うことは、実はサイエンス的にはこういう問題かもしれないというふうに、企業の研究者が翻訳しつつ、そこに大学や研究所の研究者が入ってくると、産学連携かつローカルに現実的な問題が解決できると思う。企業は圃場を持ち、データを取っているのが、宝の山。植物で産学連携は、これまでしっくりこなかったが、最近はそこが大事と思う。

○アメリカでは各州に大学、農学部があり、そこがエクステンションを持っていて、それぞれの農家と話す時間を必ず取らなければならない。地方のローカルな人に対するサイエンスを必ずやらなければならない。それが日本はあまりないという印象がある。県にそれぞれ農学部がある一方、うまく連携が取れていないような印象。

また、農家は高齢者が多いが、若い人が出てきていて、スマホを持って畑に行く。これからトラクターも全部自動化されることを考えると、IT待ったなしになっている。そこでどれくらい農家がデータをすぐにこちらのコンピューター上にくれるか、そこがつながっていけば、デジタルトランスフォーメーションは起こると思っている。アメリカなどは既にそうなっている。

○アメリカは農家が企業のような状態。日本はそうした数が多くないので、農家と多く連携している企業について考えるのがはやい。そのように考えると、JST、企業とアカデミアという仕組みがあるので学振よりも可能性はあるかもしれない。

○日本の場合は県に農業改良普及センターがあり、そこにエクステンションの人たちがいて、彼らが農家と直接つながっているので、そうした仕組みを上手に利用できると新しい仕組みがつくれるのでは。

また、最近の先進的な中規模種苗会社は、種を売るだけではなく、実際に自分たちが種を販売している農家の土壌分析や肥料分析、病害虫の分析をスマホでできる仕組みをつくっており、そうした情報含めてサービスをするところもある。つまり、いま議論していたことを先取りしているところが国内でも出てきているので、そうしたことを科学的に裏づけることができるとよい。

さらに、今までは植物、微生物など、生き物ごとにプロジェクトをつくっていたが、植物は環境中にいる微生物と一緒に生活しており、そこでパフォーマンスを発揮するので、両方一緒に取り扱えるようなプロジェクト、そうした視点での研究開発が必要になってくる。今もホロゲノミクスなど課題として上がってきているが、そうした植物、微生物、環境も一緒に見て、植物の改良をしていくような取り組みが重要。

○(司会) 最後に、炭素資源の利用について。残渣の有効利用、とくに藻類の利用で、幾つか技術的な課題について、研究開発課題として近年行われているテーマがあるか。

○研究開発課題、藻類の利用については、基礎的なところからやっている。例えば、生育段階で藻類もその成分が変わる。栄養の結合状態や環境の条件によっても変わってくるので、いろいろな成分がどのぐらいできるのか、どのような環境ならどのような応答をするのかについて見ている。その上で、例えばバイオジェット燃料を作りたいならば、バイオジェット燃料の燃料になる部分を多くするにはどのような制御、どのような環境条件を整えることがよいか見ている。

同時に、単純に利用だけではなく、その利用法によってCO₂がどのぐらい増減するか、エネルギーの使用量がどのぐらい増減するか、そうしたLCAやTEA、経済性の分析、環境性の分析、その定量化をやるようにしている。そこが見えてこない限り研究すべき優先順位をつけること自体が難しい。

また、利用のための研究では、脂質やその他のいろいろな成分の分離や精製の方法、例えば油脂植物としてパームや大豆、菜種がある。油の成分が違っている。藻類の場合はリン脂質と脂質が多く、大きく違う部分があり、それを分離する技術や精製する技術、そのための工学的な手法は続けている。

○バイオマス発電での農業残渣、例えば、トマトを収穫した後のつるや茎をバイオマス発電で燃やしたらFITになるか等についてお聞きしたい。

○燃やすという方法が一番コスト的には手がかからない。例えば、トマトを1トン生産すると1トンバイオマスが出てくるが、これを循環させないと、農家の人たちはそれを畑に埋めてしまったり、チップして畑にすき込むのが今の利用法の形態である。燃やすことで熱量がどのぐらい出るかわからない。これはとにかく、ほかの作物の場合でも、収穫した後の残ったバイオマスを利用し尽くすことが大事なことで、その視点も入れて開発をやるのがよい。

○営農型太陽光発電（ソーラーシェアリング）はどうか。

○発電した電気をどのように使うかだと思う。電力会社にだけ買ってもらうのではなく、自分たちが利用することを考えることが必要。例えば大学では、農場で発電し、それを大学で利用すれば高い電気を電力会社から買わなくてもよくなるという話もある。作物も発電のユニットが効率よくやれるならば、農家が自分たちの生産に使うなど、大きなスケールではなくても、やっていけばいいと思う。

ただし、日本では規制があって難しいと聞いている。例えば、ある企業がメタン発酵の巨大な施設、その隣に大きな温室を造って、そこでトマトを栽培している。メタンで得た電気を温室に直接流すことを考えたが、それは法律で許されていないとのことだった。日本の場合は法律の壁もあるが、その辺も含めて一体で考え、バイオマス発電を、電力会社を買ってもらうのではなく、自分たちで使うといったことも考えていくと効率がよくなると思った。

○微細藻類で質問したい。微細藻類の場合、カスケード利用というのがある。NEDO事業でもそのカスケード利用するという事業者をうたっていると思う。燃料以外に、化成品や高付加価値品も同時に生産することを考えながら事業性を高めていくという観点の培養技術や、微細藻類自体の改変など、そういった研究開発もアメリカなどはやっているが、その動向については、どのように考えるか。また、そういう方向性は。

○それが一番、今重要。例えば、燃料を作る場合、脂質を抽出し、その中で燃料になる部分は脂質の中の脂肪酸の部分が主になる。脂肪酸部分以外の脂質全て燃料にならずに残渣、バイプロダクトとして出てくる。その中に、例えばカロテノイド、ステロール部分があったりするが、そうしたものは、例えば化粧品用途やほかの産業で利用できる。

ただし、一社では難しい。燃料を作る会社は、化粧品にどういうものが使われるのか、どれぐらいの単価で売れるのか、どういう精製技術が必要なのか分からない。なので、MATSURI プロジェクトを立ち上げて、各企業の知見を集めて、例えば脂質については化粧品、燃料、プラスチックを作ることをやったり、その他のたんぱく質、水化物に関しても同様に利用できる方法を、知見を持つ会社と一緒に進めているというのが現状。それがない限り、藻類、バイオマス全体を使える藻類であっても、LCA 的にもエネルギー収支的にも合わない。

むしろ農業のほうが残渣の部分が出てくるので、それを有効利用していく必要があるが、同時にその利用方法を考える必要がある。例えば、発電についてバイオマス、農業残渣をボイラーでそのままでは燃やせない。加工することが必要になる。そのとき、エネルギー収支的にどうなるのか、燃やしたほうがいいのか、地面に埋めたほうがいいのかを判断した上で、定量的に何の研究を進めるかを考えるべきだが、そこが今あまり定量的に評価されていないと思っている。ヤシガラを日本に持ってきて燃やす話もあるが、エネルギー収支的にどうなっているのか議論する場すらない。その利用方法を研究する基礎研究の部分は重要で有意義な技術であり、知見だと思うが、それが実際出来上がったときに本当にCO₂削減に貢献しているのかを評価することをやるべきではないか。

- そういったコンソーシアムの中にアカデミアも入ったり、相互にコミュニケーションできるような場があると、研究が発展するということもあるわけか。

Appendix2 俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた生物機能を 活用したネガティブエミッションに関する研究開発課題（テーマ2）

1. 概要

日時：2021年8月30日 13時30分～18時

場所：オンライン（Zoom）

主催：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（CRDS）
環境・エネルギーユニット

2. 開催趣旨

開催趣旨はテーマ1と同様である。テーマ2では森林・農地・沿岸部での炭素固定（ネガティブエミッション）として、海藻・海草、マングローブ、農地土壌炭素貯留、森林での炭素固定などを検討範囲と想定している。テーマ2では、招聘有識者からご講演いただいた後、参加者間で全体討論を行った。

3. プログラム（敬称略）

〈テーマ2：8月30日 13時30分～18時〉

タイムスケジュール	議題
13：30-13：50	開催挨拶、趣旨説明 CRDS
13：50-14：20	講演① 当真 要
14：20-14：50	講演② 松井 哲哉
休憩（10分）	
15：00-15：30	講演③ 藤本 潔
15：30-16：00	講演④ 桑江 朝比呂
16：00-16：30	講演⑤ 黒沢 厚志
休憩（10分）	
16：40-18：00	全体討論 WS 招聘者、参加者

A2.1 土壌改良とカーボンマイナス-土壌の健康と温暖化影響評価-

当真 要（北海道大学大学院農学研究院 土壌学研究室 教授）

私からは、農地の圃場の炭素固定に関連して、土壌の健康と温暖化影響評価に関して話をする。

土壌の炭素固定について話をする上で、土壌の健康についてまず紹介したい。ソイルヘルスというコンセプト、これは以前よりあったが、最近では、人が資源として利用するための土壌を健康に保つというような観点から、今は陸域生態系の生産性とか多様性、環境サービスを維持するための土壌の能力と定義されている。この土地や土壌が提供する財やサービスと題され、土壌が食料や繊維、バイオ燃料などのバイオマスを生産するためだけではなく、土壌による水の浄化とか水圏の汚染の抑制、そして温室効果ガス放出の抑制とか吸収による気候変動の緩和、地上の生物多様性や病原体の抑制などに関連する土壌の生物多様性など、様々な環境サービスを、土壌が担っている。したがって、土壌を健康にすることは、これらのサービスに関する能力を最大限発揮するように土壌を管理し、改良していくことになる。



図 A2-1-1 土壌の健康

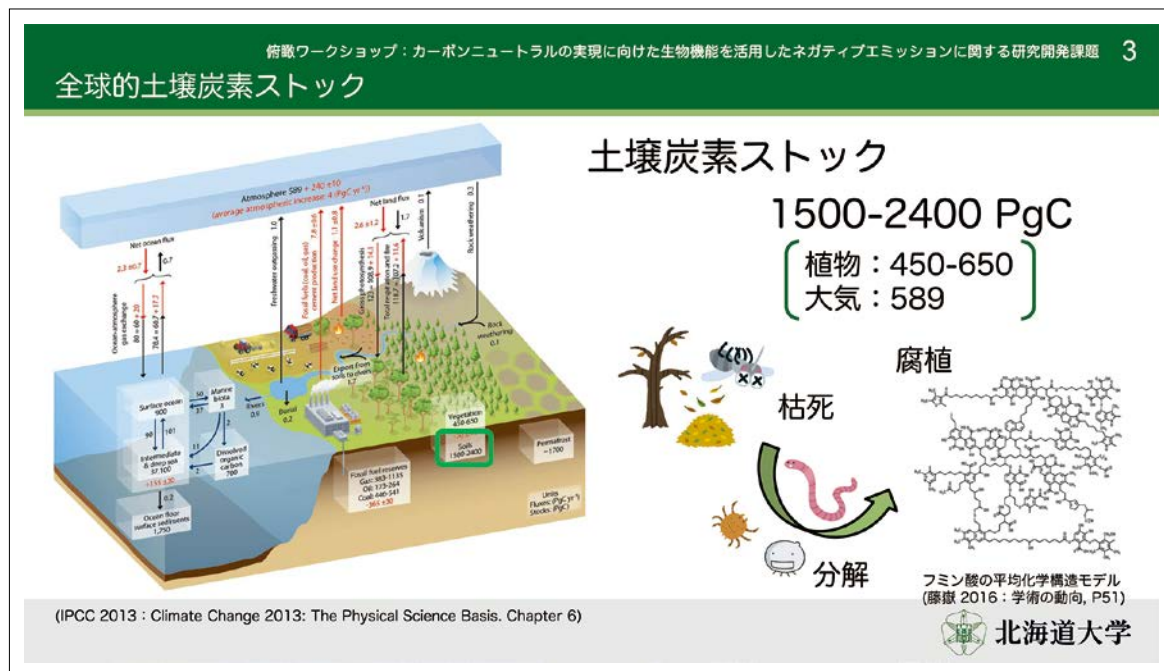


図 A2-1-2 土壌の有機物

その土壌の健康を保つ、土壌を健康にするための必要不可欠なものが、有機物になる。土壌有機物の機能として、植物の生産性とか生物の多様性、環境浄化などに関連するものが挙げられている。すなわち、土壌の有機物の存在が土壌の健康を支えるキーとなっている。ただ、この機能のほとんどは特に新しいものではなく、昔から経験的にされているもので、周辺の森から集めた草木とか家畜の排せつ物を集めて堆肥化し、それを農地へ施用し、継続的、持続的に作物を栽培してきた。

最近になって特に注目されているのが、その有機物の組成の中心となっている炭素であり、土壌の炭素貯留機能であり、土壌が地球上の主要な炭素ストックとなっている。海洋よりは少ないが、この炭素ストック量は、全球的に1,500～2,400ペタグラムカーボンとされていて、これは植物バイオマス炭素とか、大気中の炭素の3～4倍程度になる。

この土壌中の炭素の形態は、基本的には腐植物質と言われるものが多く、構造が特定できていない複雑な影響物となっている。この腐植物質は、動植物の枯死したものが土壌中で動物や微生物によって分解され、環境中で科学的に変化しながら安定的な形となっていき、それが土壌の塊、団粒などの中で、さらなる分解とか、あるいは流れて融合から守られるようになり、あるいはこれ自体が粘土などの二次鉱物と言われる無機鉱物と結合して分解されにくくなることで、炭素が蓄積していき土壌に蓄えられることになる。大事なところは、この分解から安定化に至るまでに非常に長い時間がかかることである。

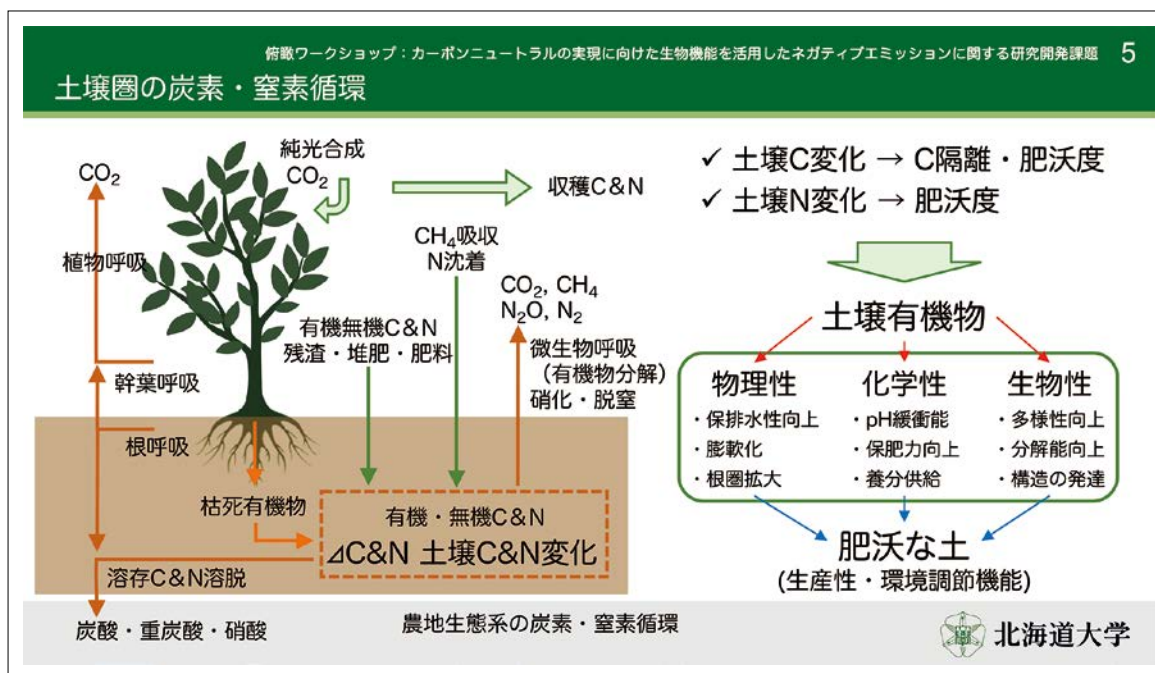


図A2-1-3 全球的土壌炭素ストック

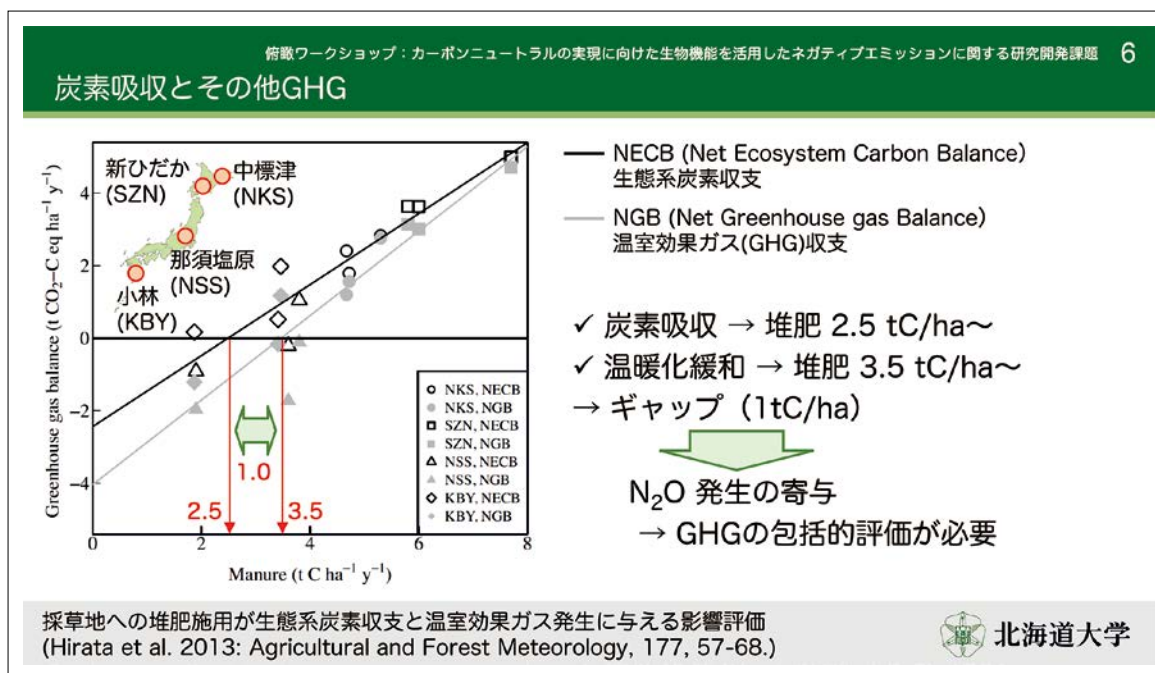
日本の土壌環境基礎調査のデータを用いて、農地での作付回数と土壌炭素の濃度、含量の変化について、牛ふんオガズ堆肥、これを毎年10アール当たり3トン施用している圃場の土壌炭素の変化を示した回帰式をしてみる。この処理では、土壌炭素が増加している傾向が見られるが、同時にこの変化の傾向が明らかになるのは大体20回程度の作付を超えた辺りからということもわかる。すなわち、もともと土壌中に炭素量が多く、施用する有機物に含まれる炭素の量に比べると非常に多いために、継続して有機物を施用し、有機物が安定化して蓄積していくことで、その効果が初めて評価できてくることになる。農地の作目を変えたときの土壌炭素量の変化は、小麦と休耕の組合せでの栽培体系では土壌炭素が減少している。これは、耕起に伴う、耕すことによって土壌有機物の酸化的な分解、すなわちCO₂が放出することによって土壌炭素が減少していることを示している。このような土壌炭素の減少についても、長期的な調査により初めて明確になる。

この農地を含む土壌の炭素循環を考えると、その他の元素の動態も密接に関連し、特に炭素ストックや温暖化緩和の観点においては、窒素の動態を絡めて考えていく必要がある。その理由は、窒素が植物の多量必須要素であり、植物が炭素を固定、成長する上で第一の制限因子になることが多いことに加えて、農地において肥料として施用され、用いられる窒素から発生する一酸化二窒素、N₂Oが農業分野から発生する温室効果ガスの主要な部分を占めていることが挙げられる。

土壌、植物の生態系が動いている中で、特に農業生態系の炭素や窒素のストックになっているのは、土の部分になる。この土壌中の炭素量や窒素量が増加することは、基本的に土壌の有機物が増えることであり、土壌が健康になる、すなわち肥沃になっていくことを意味しており、生産性が向上し、環境調節機能が上昇すると同時に、炭素を多く蓄えることになる。このことから、土壌の炭素ストック、炭素吸収を評価する上で、窒素を含めた総合的な評価を行う必要がある。



図A2-1-4 土壌圏の炭素・窒素循環



図A2-1-5 炭素吸収とその他GHG

農地の炭素貯留と温暖化影響について、炭素と窒素を含めた評価及び長期的な有機物の施用効果について事例を紹介する。

最初の研究は、日本の牧草地で実施された。炭素の貯留に加えて、メタンやN₂Oも含めた地球温暖化に対する影響を総合的に評価している。この研究の重要なところは、北海道から九州までを同じ実験系で評価していることである。日本は南北に長く多様な気候帯が存在するため、普遍的な研究を行う上で、多点的な研究

が重要になっている。つまり、1か所で実施した結果が、必ずしも他のところで当てはまらないことが多くある。この気候に関しては、最近では人工気象環境下での実験でもできるが、農地の生態系においては、その場所の地質や地形、気候などで成立している生態系であるため実験室で再現できないことがあり、ある環境で研究を行うには現地で実施するということが必須である。

生態系炭素収支、すなわち生態系の炭素固定は直線関係があるが、堆肥の炭素施用量のヘクタール当たり2.5トンが、この草地において、炭素の吸収と減少の閾値になっている。この研究における炭素の施用量は、それぞれの地域の慣行で施用されている量、多くは堆肥中の養分組成に基づいて量は決められるが、これが牧草地での堆肥施用量を決める難しい点になっている。これを無視して施用量を増やしてしまうと、牧草の収量や品質に悪影響が出てくることがある。

温室効果ガス収支の閾値が大体堆肥施用量の3.5トンである。すなわち、3.5トン以上になると、土壌への酸素貯留に加えて温暖化の緩和になる。この炭素固定と温暖化緩和に関する堆肥施用量のギャップが約1トンになるが、これは堆肥によって発生するN₂Oのために、温暖化を緩和する目的の場合、3.5トン以上堆肥を入れないと効果が出てこないことになる。

堆肥施用量の2.5トンの場合は土壌炭素量が増えるので、土壌の肥沃度の改善が推測できるが、温暖化緩和の目的、カーボンシンクとして牧草地に求める場合は3.5トン以上を施用する圃場管理を考えていく必要があることになる。この堆肥の種類に関しては成分によっては生産物に影響が出る可能性があるため、土地土地でどのようなタイプの影響物が得られるのかということも含めて考慮していく必要がある。

このように、牧草地の例であるが、農地生態系では窒素に由来する温室効果ガスの寄与が無視できないことになる。

次の研究は水田における温室効果ガス収支を調べたものである。水田は日本の農地の半分強を占めており、農業由来の温室効果ガスとして、メタンの大きな発生源となっている。この研究では、39年以上の長期的に稲わらとか、あるいは稲わら堆肥を施用した場合と、新規でそれらを施用した場合の影響を評価している。

炭素収支は、稲わらをそのまま入れずに、稲わらを堆肥化して入れることで、より圃場への炭素の貯留効果は高くなるが、メタン発生は、新鮮な有機物を施用である稲わらが高くなる。この効果は、新規で施用した場合よりも長期連用したときに顕著で、長期的に施用することで蓄積する炭素からのメタン発生が増えることを示している。

温室効果ガス収支は、全部の試験区においてマイナスになる、つまり温暖化促進をする結果になり、カーボンシンクどころかカーボンソースであることが言える。

これはメタンが原因になっており、しかも短期的なわら施用の場合は、無施用よりも温室効果ガス収支が低くなり、長期連用では無施用と同等であり、その原因は土壌炭素の蓄積効率の低下とメタン発生の増加によるものである。

これは温暖化抑制を期待した有機物の施用効果は、ある一定期間を経過すると頭打ちになり、それ以上の効果は期待できないと言える。しかも、効果がなくなった時点で有機物の施用を止めると、投入する炭素はない一方で、出ていくものが継続され、水田が炭素のさらなる放出源となることが懸念される。もちろん、生産性維持には有機物の施用は行うべきであるが、このようにメタンが多く発生するため、温暖化の緩和を目指すには、例えば中干しなど、栽培途中で水田を乾かしてメタンの発生を抑制するような管理方法も導入していく必要がある。

このような試験が実施できたのは、国の長期試験として、各県の拠点において長期連用試験が実施されていたため、どこでもできるわけではない。しかも、今のところ、堆肥を中心とした特定の有機物で実施している長期連用試験があり、その他の有機物のデータがないというのが現状である。この研究を実施した研究者は、同じ場所で家畜ふん堆肥の連用試験水田での結果も報告している。同じ堆肥でも材料の異なるもの、稲わらを使っているもの、家畜ふんを使っているものの試験では、家畜ふん堆肥で土壌炭素が増加する一方で、温室効果ガス排出量も増えやすい。したがって、やはり水田においては、メタンの発生量を抑制する栽培管理

を組み合わせない限り、カーボンシンクとしての機能は期待できないことになる。

このような結果は、違う地域で同じとなることはまず考えられない。より一般化した数値を得るには、牧草地での研究と同様に、様々な環境をカバーする多点での検証がさらに必要になる。

この試験では、有機資材を人為的に投入するという方法で土壌への炭素貯留を期待したものであるが、有機栽培の中でも特に資材の投入が少ない緑肥を用いた水田における事例を紹介する。

最近では、炭素の貯留が安全・安心な食料生産と結びつけられることが多くなった。すなわち有機物を肥料として作物を生産する有機栽培が一般的であるが、さらに土壌の能力を引き出して栽培する、より低投入型の栽培方法は、緑肥などを用いた栽培方法がある。

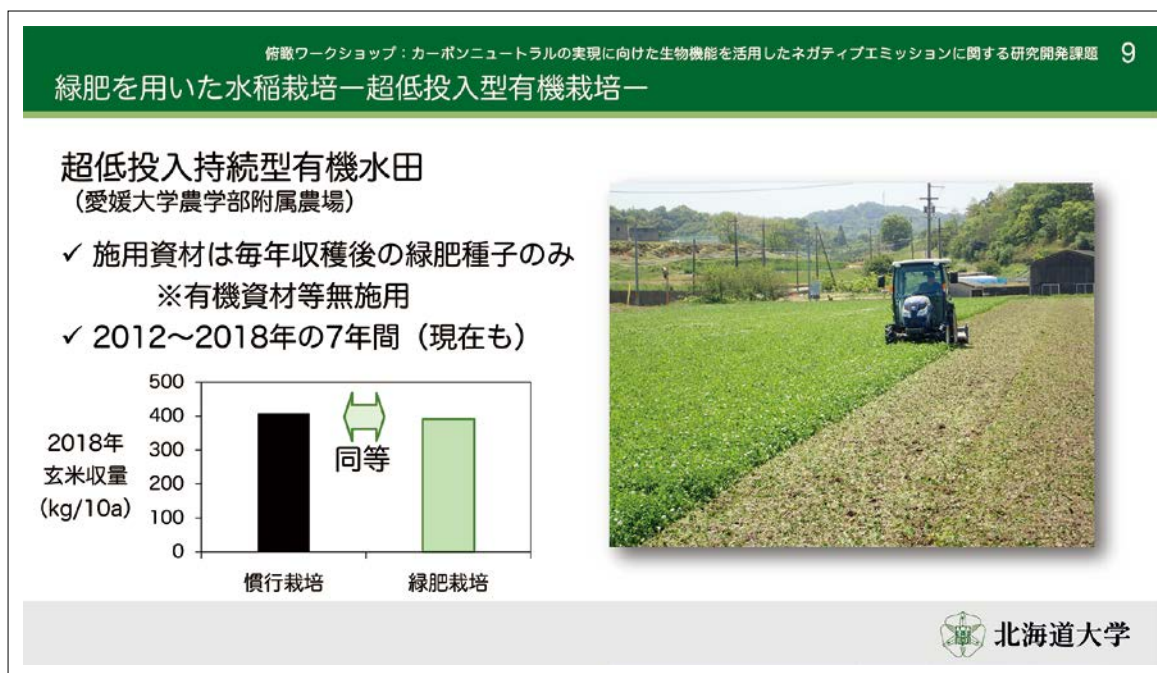


図 A2-1-6 緑肥を用いた水稲栽培－超低投入型有機栽培－

愛媛大学農学部附属農場での実験として、白クローバーを冬にカバー作物として育て、クローバーの固定した窒素を初夏にすき込んで水稲の肥料とする栽培がある。これを10年以上継続しており、7年間この栽培方法を継続している圃場では、慣行の化学肥料を用いた栽培方法と同程度の玄米の収量が確保できている。

その圃場で、炭素収支や温室効果ガス収支を調査すると緑肥栽培では、白クローバーの炭素が圃場にすき込まれ、その影響で圃場は炭素のシンク、炭素収支は吸収に働くが、一方で新鮮な白クローバー、有機物をすき込むことになるため、メタンの発生量が非常に増加するという結果になり、温暖化は促進する影響を与える。したがって、このような栽培方法を行っている水田においても、メタンの発生量を抑制する栽培管理を組み合わせない限り、カーボンシンクとしての機能は期待できないことになる。

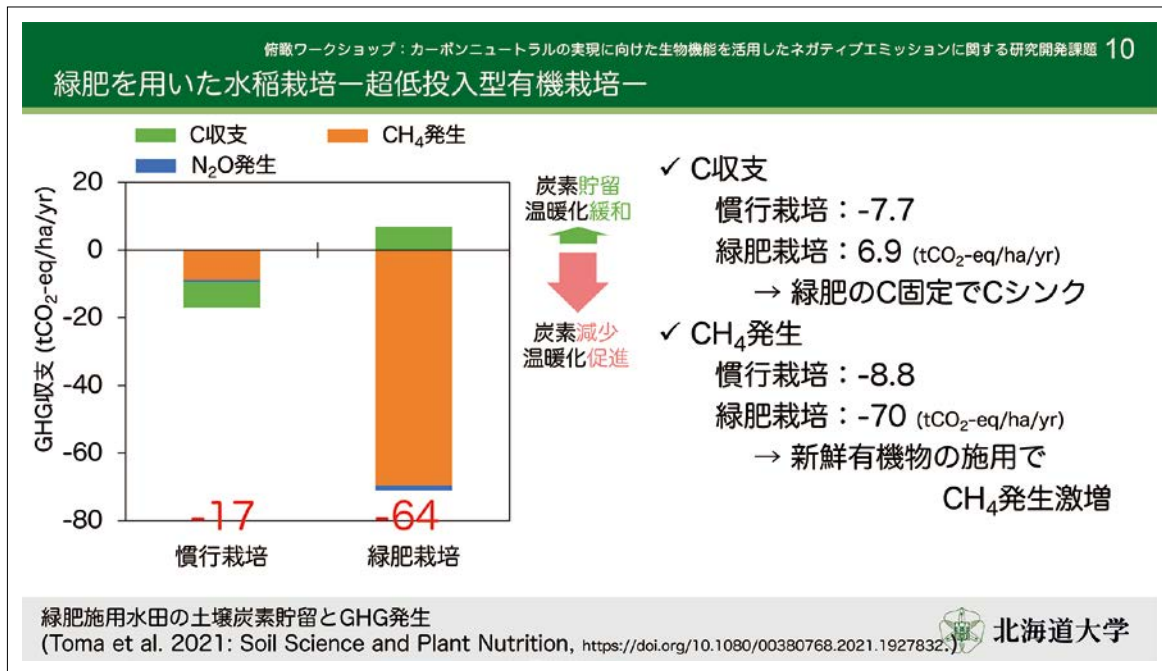


図 A2-1-7 緑肥を用いた水稻栽培の GHG 収支

農地への炭素貯留に関して、最近特に増えてきているのがバイオ炭の炭素貯留効果と作物生産に関する内容の研究である。Web of Scienceで「Biochar/Soil/Carbon Sequestration」をキーワードに検索したときの論文数の推移であるが、2010年あたりから顕著に増え始めていて、10年後の昨年、2020年には4倍ぐらいになっている。

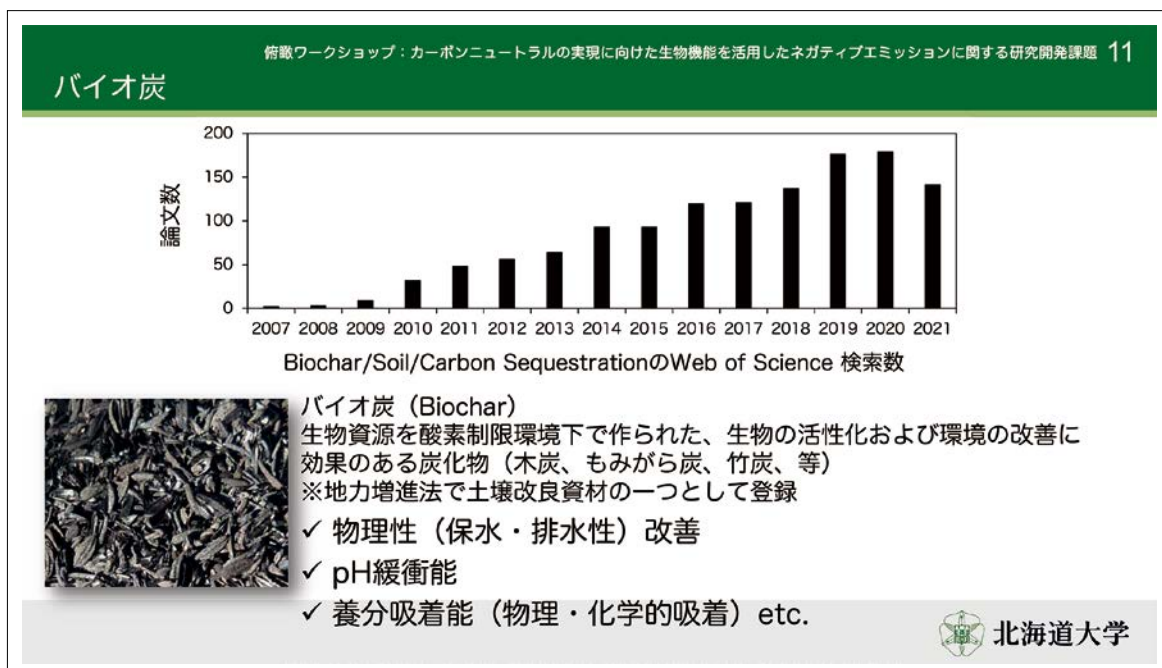


図 A2-1-8 バイオ炭

バイオ炭は日本でも、地力増進法で以前より土壌を改良するための資材として登録されている。この効果は、土壌の保水性とか排水性の改善、pHの緩衝能や養分の吸着による補肥力の向上が挙げられ、有機資材同様、バイオ炭の施用も農地の環境を保つために効果的な資材である。最近多くなっている論文のイントロでは、やはり炭素貯留効果の記述があり、この難分解性の炭素を主体とするバイオ炭の炭素貯留としての機能が注目されている。

このバイオ炭を水田に施用した場合の炭素収支や温室効果ガス収支の研究を紹介するが、結果は、堆肥や緑肥を施用した場合と異なる。特に、同じ炭素でもバイオ炭の場合、メタンの発生量はほとんど変わらない。ただし、こちらの研究も長期的な評価をまだ十分行っていないため、まだこれからである。

この研究は2年行っているが、1年目に水稻の生育が、竹炭の施用で改善した結果、刈り株などが増え、それが次年度のメタン発生量の増加の原因になっている可能性が指摘されている。その結果、1年目だけに入れたバイオ炭の貯留効果は、その後のメタン発生量の増加により3年程度で効果がなくなる可能性もある。

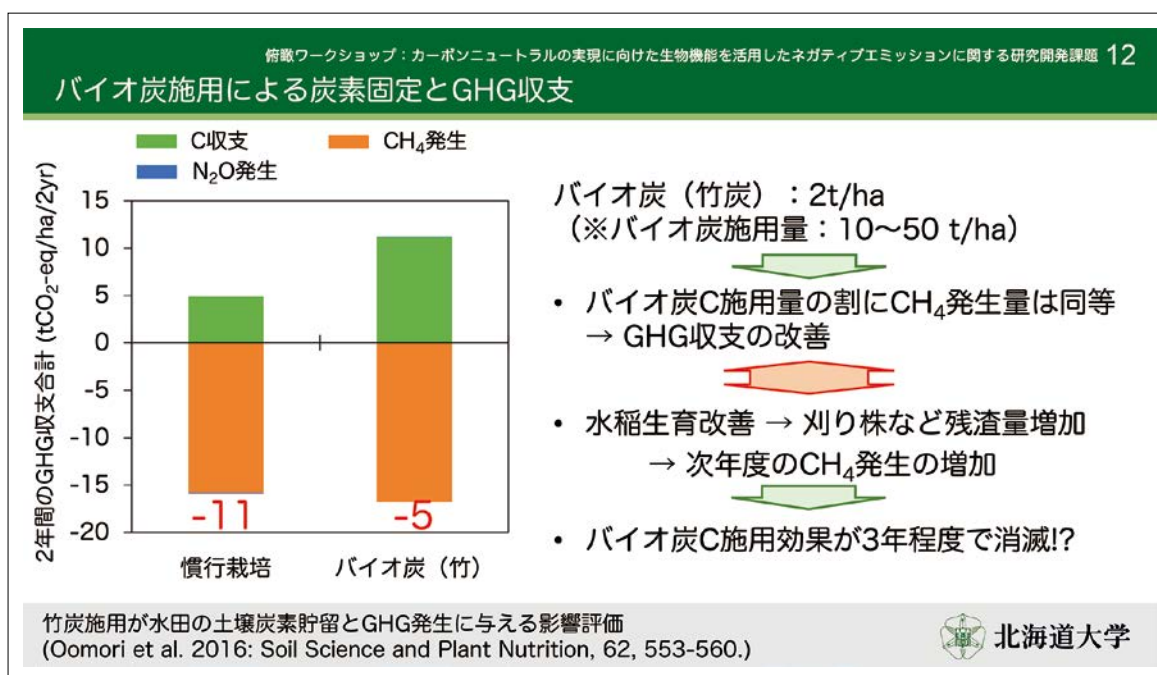


図 A2-1-9 バイオ炭施用による炭素固定とGHG収支

同様の効果は畑でも生じる可能性があり、バイオ炭は、畑、土壌の余剰の硝酸を吸着する特性もあるので、その硝酸から発生するN₂Oにより温暖化の抑制効果が小さくなることも考えられる。

しかしながら、バイオ炭は、農地土壌への炭素貯留、カーボンシンクという点では、今のところ最も効果の高い資材と考えている。バイオ炭を土壌の炭素貯留として持続的に利用するための課題は、資源の多様性と偏在性、そして経済性になると思う。

日本各地でバイオ炭の原料になる有機物があるが、それぞれが場所によって異なり、また材料によってもバイオ炭としての効果が異なるので、地域に合った材料、適した場所で用いることが必要である。そのために、木質炭化学会では、様々なバイオ炭の規格を整理している状況である。

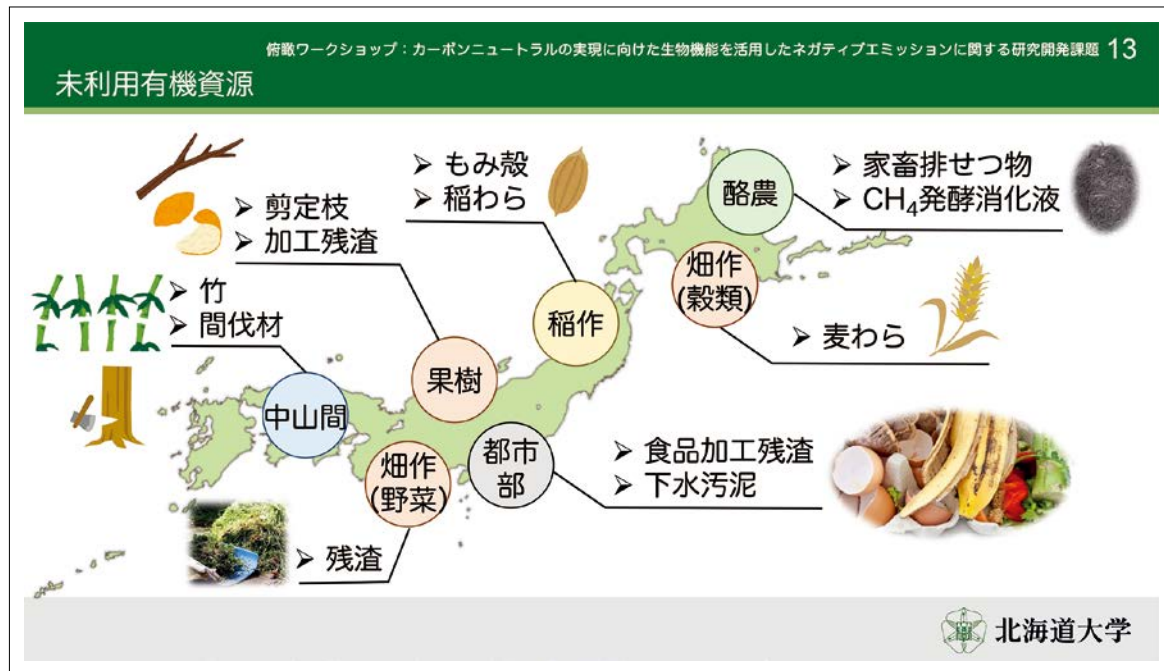


図 A2-1-10 未利用有機資源

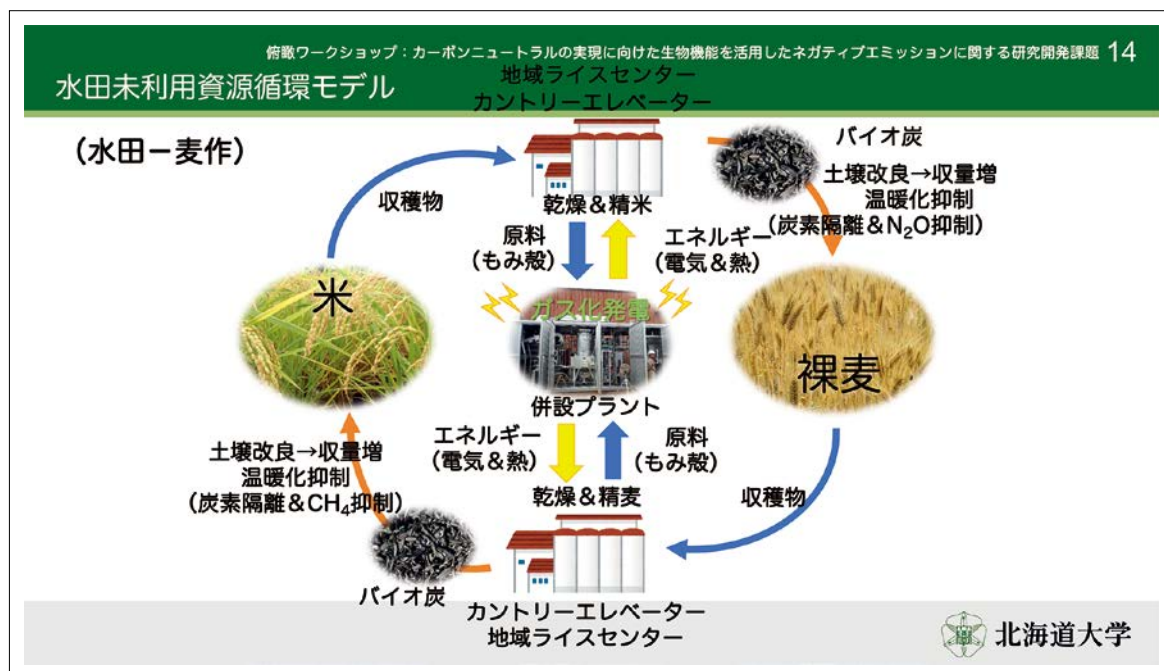


図 A2-1-11 水田未利用資源循環モデル

このバイオ炭の精製は熱エネルギーも得ることができるので、エネルギー分野と農業分野が融合して仕組みづくりをしていく必要がある。モデルとして提案されている例は、例えば、地域の資源を用いて有機物を炭化する。そのエネルギーは熱や電気として利用するとともに、炭化物を農地で利用するという循環型である。農村の水田と麦作、地域のモデルになるが、循環が経済的に成り立つような仕組みができない限り、なかなか農地を主要なカーボンシンクとして機能させるのは難しいと思う。

まとめ

- 土壌への炭素貯留（有機物施用）は土壌の環境調節機能の向上に加え作物生産性の向上も期待できるwin-winな関係
- 土壌のカーボンシンク効果

炭素と窒素の総合評価
長期的モニタリング
多様な資材と多様な環境条件

での評価が必要

- バイオ炭は土壌の健康とカーボンシンクに有望な資材



北海道大学

図A2-1-12 まとめ

(Q&A)

Q：土壌の炭素動態のモデルとして文献あるいは農研機構の研究などを見るとRothCモデル（ローザムステッドカーボンモデル）が伝統的にあり、それを使って土壌の炭素動態をモデル化しよう、評価しようという研究動向としてあると思うが、土地による違いや条件による違いが大きく、評価はまだ道半ばという気がする。モデル開発という点から、研究としてどういう進捗にあるか。

A：知っている範囲であるがモデルに関して、RothCは畑地で開発されたものなので、日本では水田に合うモデルに改良するとかをやられていると思う。あとは、大きな流域レベルでのモデルの評価で、例えばSWATモデルであれば、水と同時に懸濁物質の移動が入ってくるので、それに炭素や窒素を絡めたりでモデルの改良をしている。

Q：モデル開発と、発表にあったような比較的長期にわたる実地試験を組み合わせることが重要との理解でよいか。

A：モデルは現地実施の実証データが必要なので、現場の試験をずっとやっているところをモデル研究者が利用している。なので、モデル研究者に求められて長期連用の試験というのを実施するわけではなくて、どちらかかというのを利用していると思う。

Q：土壌への炭素貯留で、長期的に例えば炭素プールとして機能するためには、究極的には土壌中の炭素濃度の上昇、あるいは土壌量そのものが増えていくことが必要と思うが、バイオ炭や農地土壌炭素が何年ぐらい持続可能なのか。例えば炭素だけ、有機物だけを考えても、濃度的に飽和し、それ以上追加的な吸収、貯留はないのではないかと。メカニズム的なところを教えてください。

A：その通り。入れていくと、分解する量も増えるので、それが釣り合う。いずれその段階に必ずなる。ただし、いつなるのかは、使うものと、あと栽培方法によって違ってくると思うので、モデルも活用しながら現場のデータを利用してやっていくしかない。しかしモデルでは実測データが必要なので、データがないものは、難しい。その中でも、有機物の中ではバイオ炭がより長期的にためる可能性があると思う。それは分解しにくいから、それだけたまっていく可能性はある。

Q：土壌そのものを積み上げる方法はあまり考えられていないか。

A：基本的には、母材からそういった鉱物が増えることは人為的にはなく、自然的に風化していくことになるので、かさが増えるというのは、有機物が増えるということと思う。

A2.2 ネットゼロエミッションの達成に必要な森林吸収源の評価： 研究計画紹介

—— 松井 哲哉（国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 室長）

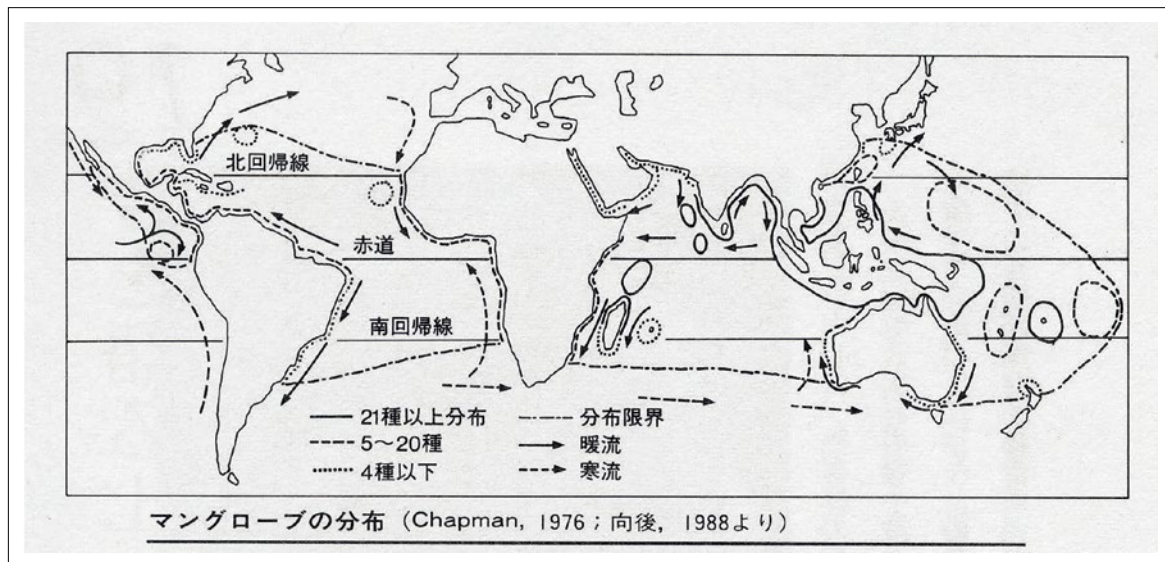
（公開前情報を含むため、非公開）

A2.3 マングローブ生態系の炭素固定機能と研究課題

藤本 潔（南山大学 総合政策学部 教授）

私も20年以上前であるが、森林総研に在籍しており、その頃から、マングローブ生態系の炭素固定機能に関する研究を行っている。現在も森林総研と共同で実施している。今日は、世界の動向も踏まえて話をします。

マングローブは熱帯・亜熱帯の海岸線で、特に潮間帯の上部という非常に限定されたところに生育する樹木の総称である。マングローブという名前のある木があるわけではない。マングローブの樹種は数十種類に及ぶ。このため「マングローブ生態系ではこれだけの炭素の固定機能がある」というひとくりにした言い方は誤りであり、樹種ごとに、あるいは立地環境ごとに評価しないといけない。また分布面積が現在は1,500万ヘクタール、大体日本の面積の40%ぐらいに当たるが、これは最近、三、四十年間に、主にエビの養殖池の開発によって破壊されてきた結果で、それ以前はこれをはるかに超える面積があった。



図A2-3-1 マングローブの分布¹

分布範囲は、北緯32度から南緯38度の間で、気候的には最寒月の平均気温が16℃以上の地域に分布する。太平洋の北限は鹿児島県の喜入、大西洋の北限がバミューダ諸島付近で、南限はオーストラリアのメルボルン付近である。いずれも大陸東岸にあり、海流の影響を受けている（図A2-3-1）。

東南アジアの辺りが最も分布する種数が多く、そこがマングローブの発祥の地と考えられている。それから東西に広がっていくが、東太平洋には分布していない。日本も沖縄、特に西表島には結構立派なマングローブの森があるが、そこには7種ほどが分布している。

図A2-3-2は、我々が30年以上調査しているミクロネシアのポンペイ島のサンゴ礁上のマングローブ林であるが、海側のゾーン、その背後の薄緑色のゾーン、さらにその背後の深緑のゾーンに分かれているのがわかると思う。真ん中のもっこりしたところは、陸地である。こういう植生配列をなすのがマングローブ林の特徴で、これを帯状（おびじょう）構造と呼んでいる。「たいじょう」構造と言う人もいる。英語ではzonationと

¹ 藤本潔 1993: マングローブの輪. 日本林業技術協会『熱帯林の百不思議』p.44-45, 東京書籍

呼ばれている。



図A2-3-2 ミクロネシア連邦ポンペイ島のマングローブ林の带状構造
(藤本先生撮影)

林内ではゾーンごとにいろいろな樹種がすみ分けているが、例えば一番海側には、支柱根が極めて複雑に発達した群落がある。そうかと思うと、タケノコのように地表面から垂直に無数に呼吸根が出てくる樹種もある。森の奥のほうに入ると、立木密度も少なくなる。図A2-3-3はポンペイ島の主要群落の景観写真であるが、PRと記載している林分は支柱根が高密度に発達しているが、PCと記載している林分はPRに比べると樹木サイズが大きくて立木密度も少なくなっている。PKと記載している林分は、人が膝を立てたような形の根っこ「膝根(しっこん)」が四方八方に無数に発達している。PEと記載の林分はかなり立木密度が少なく、クライマックスに近づいたような群落である。このように一つの島の中でも全く違った様相を呈するというのがマングローブ林の特徴である。



図 A2-3-3 ミクロネシア連邦ポンペイ島の主要群落
(藤本先生からご提供)

先ほどの膝根が発達していた林分は、実は異常な状態である。本来、膝根は膝頭だけが少しだけ頭を見せるというのが正常な状態であるが、温暖化で海面が上がってきており、それに伴って表層が侵食されたため、このような景観となったと考えられる。ご覧のように根っこの量が極めて多く、炭素貯留には地下部のバイオマスが非常に重要な役割を担っていることが分かると思う。



図 A2-3-4 表層侵食で膝根が露出した林分と正常な林分の比較
(藤本先生撮影)

マングローブ生態系の炭素固定機能の評価に必要な情報とその現状については、地上部と地下部に分けて考える必要がある。地上部は、現存量、生産速度（生産量）、蓄積速度のデータが必要になる。地上部現存量のデータは世界各地で蓄積されており、樹種、地域ともに満遍なく得られている。生産量も比較的データはそろっているが、一部の地域でデータが不足しているところがある。我々が調査を行っているミクロネシアのデータも、非常に大きなバイオマスを抱えており、生産量や蓄積速度について現在論文を書いているところである。

地下部に関しては、明らかにデータが不足している。根のバイオマスは莫大であるが、実測したデータは非常に少ない。樹種によってはデータが全くない。呼吸根を持つ樹種は、ケーブル根を木の根元から四方八方にかなり遠い距離まで伸ばしており、それを全部調べた研究例は皆無と言ってもよい。このため、これからはこの地下部バイオマスのデータを蓄積する必要がある。

地下部生産量に関する情報も非常に少ない。特に、細根（直径2ミリ以下の根っこ）についての生産量に関する研究は多少あるものの、細根は生産される一方で分解するため、生産力は、分解量を考える必要がある。しかし既存の論文では、この分解量を無視したものがほとんどであり、最近、我々がこの分解量を推定する方法を考えて、論文で公表した。

呼吸根と共に、支柱根（地上部に無数にタコの足みたいに発達する根っこ）の生産量に関するデータは皆無と言ってもよい。

土壌中の炭素蓄積量に関するデータは90年代中頃まで皆無であったことから、我々は90年代半ばからその研究をスタートさせた。90年代の末以降、徐々にデータが増えつつあるが、まだまだ不足している。樹種別、地域別、立地環境別にデータを蓄積する必要がある。このため、土壌中の炭素蓄積速度に関しても明らかにデータが不足している。

次に総論的にまとめた論文を紹介したい。地上部現存量を推定するためには、まず、木を切り倒して全重量を量る伐倒調査が必要であり、それに基づいて相対成長式を作成する。伐倒調査は破壊的調査であり、どこでもできるものではないため、一般的には既存の相対成長式に直径のデータを当てはめて地上部の現存量

を推定する。岐阜大の小見山先生が作成した樹種にかかわらずの相対成長式があり、その式では ρ に樹種ごとの材密度を入れることで直径を計測すればおよそその地上部現存量を推定することができる。ミクロネシアのポンペイ島は伐採が禁止されているため、既存の相対成長式を利用してきた。成長量に関しては、固定プロットにおける毎木調査を数年おきに実施し、そこから成長量を見積もることになる。直径の計測は胸高直径といって、大体1.3メートルの高さを測ることになっているが、支柱根を持つ樹種の場合、1.3メートルのところに幹がないので、一番高い支柱根の上30センチを測ることが共通認識となっている（図A2-3-5）。

炭素固定機能の評価に必要な情報とその現状

- 地上部
 - 現存量（1）：データ多い（樹種、地域共）
 - 生産量(蓄積速度)（2）：比較的多い。樹種別・地域別データやや不足
- 地下部
 - 根現存量（3）：データ少ない。樹種別・立地環境別・地域別データ不足。呼吸根データ皆無
 - 根生産量（4）：細根データ少しあるが、分解量を無視したものがほとんど。呼吸根・支柱根データ皆無
 - 土壌中蓄積量（5）：90年代末以降徐々に増加。樹種別・立地環境別データ不足
 - 土壌中蓄積速度（6）：樹種別・立地環境別・地域別データ不足
- 総説論文または主要論文（詳細はスライド21参照）
 - Twilley et al. (1992): 1, 3, Komiyama et al. (2000): 1, 3, Komiyama et al. (2005): 1, Komiyama et al. (2008): 1, 2, 3, 藤本(2003)・Fujimoto (2004): 5, 6, Donato et al. (2011): 1, 5, Alongi et al. (2012): 5, 6, Bukoski et al. (2017): 1, 5, Fujimoto et al. (2021): 4

図A2-3-5 炭素固定機能の評価に必要な情報とその現状

一方、地下部現存量の正確なデータを得るためには大がかりな掘り取り調査が必要となる。我々はポンペイ島で一度だけ特別許可をもらい、直径10センチぐらいのリゾフォラ（支柱根を持つ樹種）を1本伐倒し、地下部の根っこを土壌と共に全て掘り出し、土を洗い出して重さを量る調査を行ったことがある。洗い出した根っこを、生きている根っこと死んでいる根っこに分け、さらに根っこのサイズ別に分類した。掘り出すこと、洗い出すこと、さらには根っこを分ける作業も膨大な時間と労力がかかる調査となるため、世界的にも非常にデータが不足している。

最近では細根の生産量調査を実施している。これは、2ミリメッシュの穴が開いたプラスチック製のパイプを根っこの周りにセットし、新しい根っこがどのくらい入ってくるを観測する。これをイングロースコア法という。

一方で、生産された根っこが死ぬと直ちに分解を始めるため、その分解量も見積もる必要がある。リターバッグ法といって、根っこをナイロン製の袋に入れて土の中に埋めておくことでどの程度分解したかを調べる。この2つの方法を組み合わせて、実際の生産量を推定する。

樹種が違くと根っこの形も異なるため、セットの仕方も異なる。リゾフォラの仲間は支柱根をもち、さほど遠くまで根っこを伸ばさないため根元に接近させて設置するが、オヒルギやマヤブシなどの呼吸根を持つ樹種は四方八方にケーブル根を伸ばすため、比較的広い範囲にイングロースコアを設置している。

最近ではルートスキャナ法で、根っこがどういうふうに変化して、どういうふうに変化していくのかを実際に土壌断面にスキャナーを設置して、その画像を解析する方法も開発が進んでいる。

堆積物中の炭素蓄積量の調査は、深くまで有機物層が堆積する場合もあるため、不攪乱コアを採取するサ

ンプラーが必要となる。そのために、我々はその道具から開発し、5メートルぐらいの深さまで採取したことがある。マングローブ泥炭と呼ばれる非常に有機物に富んだ堆積物は、そのほとんどがマングローブの死根からなる。

図A2-3-6は、90年代の初めにTwilleyが総説論文でまとめた緯度帯別の地上部現存量と地下部現存量の表を日本語でまとめ直したものである。これをみると、低緯度ほど現存量は大きく、高緯度に行くにしたがって小さくなることがわかる。地下部のデータは非常に少ないが、同じように低緯度から高緯度側に向かって少なくなるという傾向が認められている。

マングローブ林の緯度帯別現存量と炭素含有率 45%で推定した蓄積炭素量 (Twilley et al. 1992 より作成)					
	0-10°	10-20°	緯度帯 20-30°	30-40°	合計
マングローブ林面積 (10 ⁶ ha)	13.28	7.25	3.14	0.33	24.00
対単位面積現存量 (t/ha)					
地上部 (標準偏差)	283.6 (90.5)	141.6 (77.8)	120.6 (16.5)	104.2 (64.2)	178.2 (112.2)
地下部 (標準偏差)	171.1 (123.6)	171.8	69.2	95.5 (76.3)	146.3 (110.2)
対分布面積現存量 (Gt)					
地上部	3.78	1.03	0.38	0.03	4.98
地下部	2.27	1.25	0.22	0.03	3.71
合計	6.04	2.27	0.60	0.06	8.69
蓄積炭素量(Gt C)					
地上部	1.70	0.46	0.17	0.01	2.34
地下部	1.02	0.56	0.10	0.01	1.69
合計	2.72	1.02	0.27	0.02	4.03

図 A2-3-6 マングローブ林の緯度帯別現存量と炭素含有率 45%で推定した蓄積炭素量

地上部の生産速度は主に幹の生産量であり、特に低緯度地域では、樹高が10メートルを超えるような樹木サイズになると、年間20トンにも達するような林分もあることが分かっている（図A2-3-7）。

マングローブ林の地上部の純一次生産量(NPP)と林冠高(H) (Komiya et al. 2008)

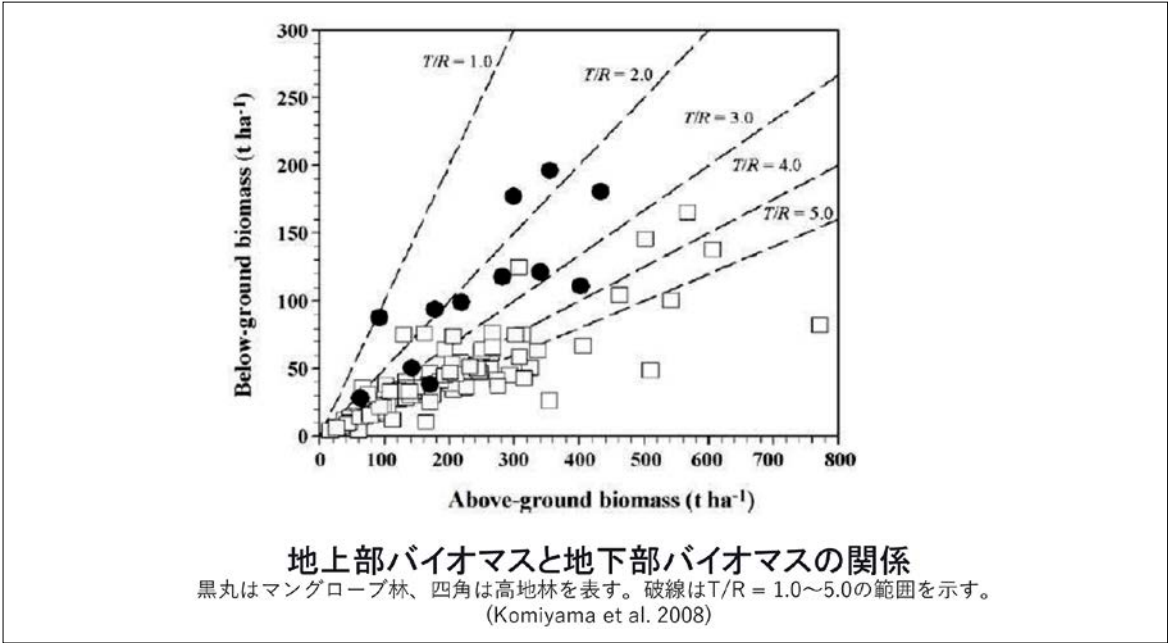
Type	H (m)	Latitude (°)	Y (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	L (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	NPP (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Country	References
<i>Rhizophora</i>	3.5	8.15	6.77	6.24	13.01	Sri Lanka	Amarasinghe and Balasubramaniam (1992)
<i>Rhizophora</i> + <i>Avicennia</i>	3.5	8.15	5.62	5.52	11.14	Sri Lanka	Amarasinghe and Balasubramaniam (1992)
<i>Rhizophora</i>	3.5	8.15	4.33	4.41	8.74	Sri Lanka	Amarasinghe and Balasubramaniam (1992)
<i>Avicennia</i>	3.5	8.15	1.40	3.74	5.14	Sri Lanka	Amarasinghe and Balasubramaniam (1992)
<i>Rhizophora</i> + <i>Bruguiera</i>	30	8.30	—	—	19.50	PNG	Robertson et al. (1991)
<i>Avicennia</i> + <i>Sonneratia</i>	30	8.30	—	—	13.88	PNG	Robertson et al. (1991)
<i>Rhizophora</i>	7	25.27	—	—	12.10	Florida	Ross et al. (2001)
<i>Rhizophora</i>	0.5	25.27	—	—	8.10	Florida	Ross et al. (2001)
<i>Rhizophora</i> + <i>Avicennia</i>	6	18.40	1.99	4.96	6.95	Mexico	Duy et al. (1996)
<i>Avicennia</i>	4	18.40	0.92	3.07	3.99	Mexico	Duy et al. (1996)
<i>Avicennia</i>	6	18.40	2.02	4.10	6.12	Mexico	Duy et al. (1996)
<i>Rhizophora</i>	11	8.00	20.00	6.70	26.70	Thailand	Christensen (1978)
<i>Rhizophora</i>	21	4.50	12.38	11.26	23.64	Malaysia	Ong et al. (1995)
<i>Rhizophora</i>	8.6	18.00	3.07	9.49	12.56	Puerto Rico	Golley et al. (1962)
<i>Avicennia</i>	20	18.40	12.06	12.52	24.58	Mexico	Duy et al. (1987)
<i>Rhizophora</i>	6	18.40	7.72	8.35	16.07	Mexico	Duy et al. (1987)
<i>Rhizophora</i>	24	19.10	—	—	16.80	Dominica	Sherman et al. (2003)
+ <i>Laguncularia</i>							
+ <i>Avicennia</i>							
<i>Rhizophora</i>	24	19.10	—	—	23.60	Dominica	Sherman et al. (2003)
+ <i>Laguncularia</i>							
+ <i>Avicennia</i>							
<i>Rhizophora</i>	7.2	7.50	—	—	22.90	Indonesia	Sukardjo and Yamada (1992)
<i>Rhizophora</i>	31.5	5.00	—	—	17.70	Malaysia	Putz and Chan (1986)

The growth increment (Y) and litter production (L) were used in the summation method for NPP using 12 studies, while other eight studies used different methods including the photosynthetic and the light absorption methods.

図A2-3-7 マングローブ林の地上部の純一次生産量 (NPP) と林冠高 (H)²

一方、根っこが非常に発達することがマングローブの特徴であり、T/R比 (Tは地上部バイオマス、Rは根バイオマス) が1に近い、つまり根っこのバイオマスが地上部に匹敵するほど非常に大きいことが報告されている (図A2-3-8)。

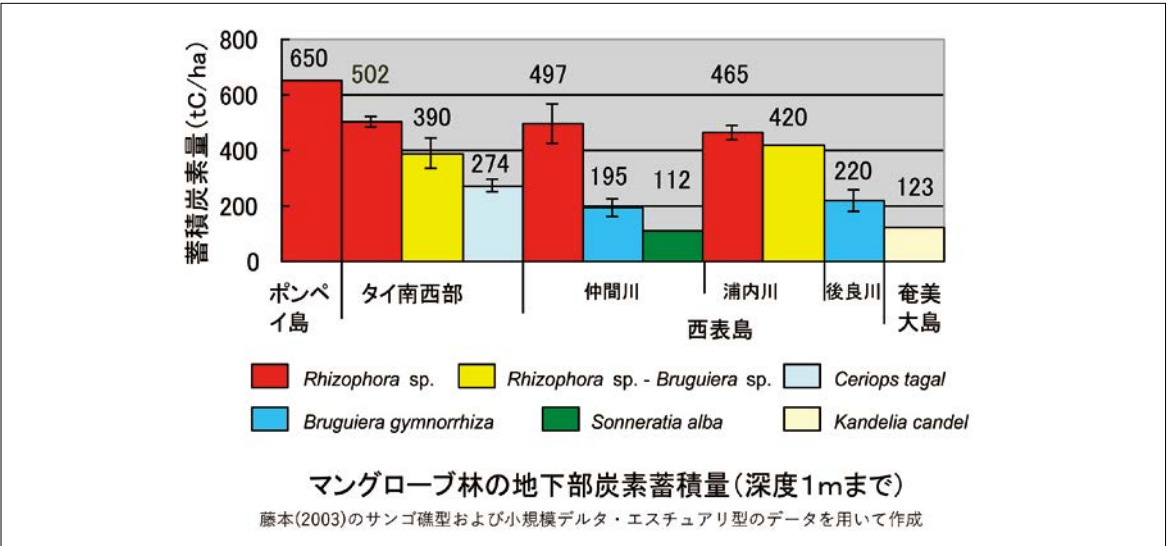
2 Komiya et al. 2008: Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic botany* 89: 128-137



図A2-3-8 地上部バイオマスと地下部バイオマスの関係²

細根の生産量について、最近我々が明らかにした西表島とポンペイ島の値で比較すると、熱帯中核域のポンペイ島の細根生産量は西表島よりも明らかに大きい。樹種別に見ると、オヒルギとハウガンヒルギの値が大きい、これは対象木の樹木サイズが大きいためである。

地下部（土壌中）の炭素蓄積量のデータとして、我々が90年代の半ばぐらいから集めたデータであるが、樹種ごとに異なることが明らかになっている（図A2-3-9）

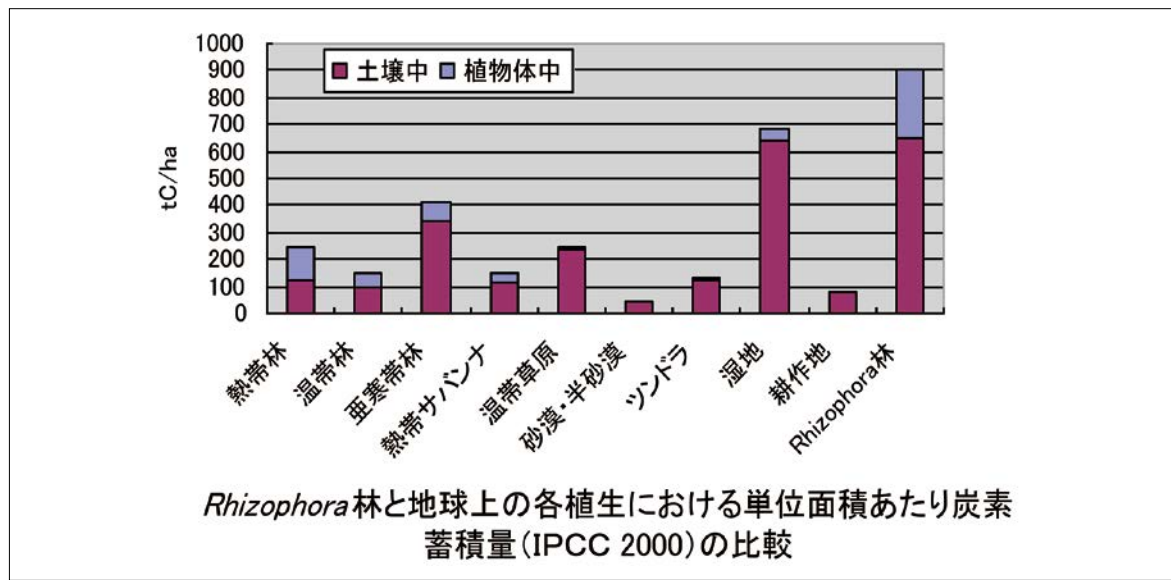


図A2-3-9 マングローブ林の地下部の炭素蓄積量³

3 藤本潔 2003: マングローブ生態系の炭素蓄積機能. 宮城豊彦・安食和宏・藤本潔『マングローブ-なりたち・人びと・未来-』p.132-138, 古今書院

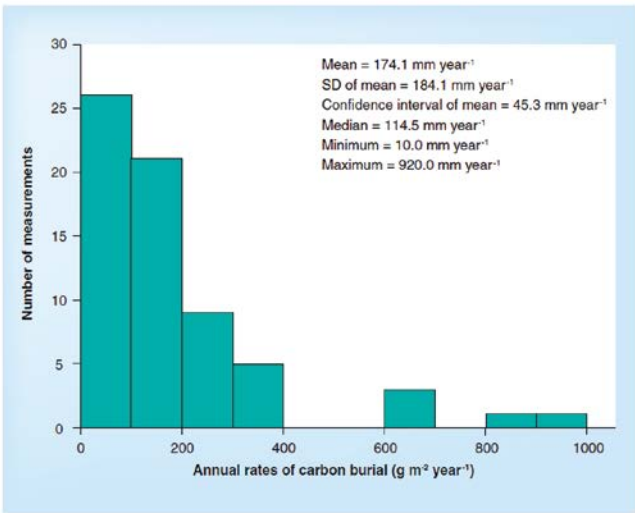
支柱根を持つ樹種のリゾフォアは地下部の蓄積炭素量が非常に大きく、大きいところで1メートルまでの深さでヘクタール当たり650トンにもなる。しかし、リゾフォアの分布北限に近い西表でも500トン近くあり、タイのデータとあまり変わらない。これは、つまり地下部は入れ物の大きさは一定のため、北限（高緯度地域）でも十分な時間が経過すれば熱帯域と同程度まで炭素を蓄積できることを示している。

最も地下部の蓄積量が大きいリゾフォア林について、地上部のバイオマスと併せて他の気候帯の森林、あるいは植生帯と比較すると、地球上で最も単位面積当たりの蓄積炭素量が大きい生態系となることが分かる（図A2-3-10）。



図A2-3-10 炭素蓄積量の比較

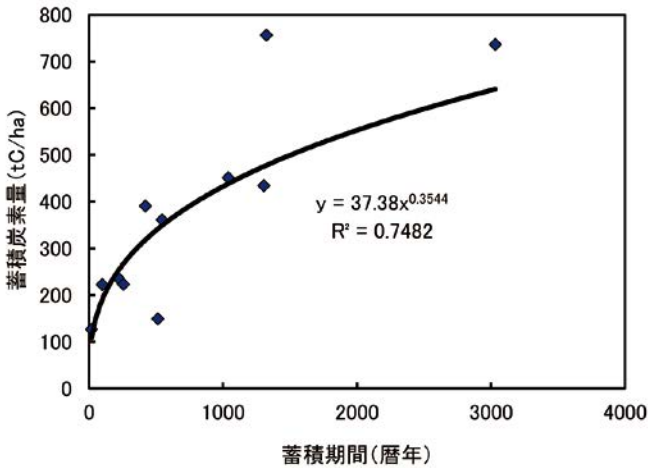
地下部の炭素蓄積速度をまとめたグラフをみると、現状ではデータが少なくばらつきが大きいことがわかる（図A2-3-11）。炭素蓄積速度は、地域ごと、立地環境ごとに異なっているので、今後データをさらに蓄積する必要がある。



世界中のさまざまなマングローブ林で推定された地下部炭素蓄積速度 (Alongi 2012)

図 A2-3-11 地下部炭素蓄積速度⁴

最後になるが、マングローブ泥炭を生産するリソフォラ林の地下部の蓄積炭素量と蓄積期間の関係についてグラフを作成してみた (図 A2-3-12)。現状ではデータが少なく、このグラフにはいろいろな地域のデータが交じっている。蓄積速度を正確に見積もるためには、今後は地域ごとに、樹種別にデータを蓄積し、このようなグラフを作成することが必要である。



ヤエヤマヒルギ属 (*Rhizophora*) が優占するマングローブ林における地下部炭素蓄積量と蓄積期間の関係 (藤本 2003)

図 A2-3-12 地下部炭素蓄積量と蓄積期間の関係³

4 Alongi 2012: Carbon sequestration in mangrove forests. Carbon Management 3 (3): 313-322.

(Q & A)

- Q：マングローブ林の地上と地下の炭素の割合がどのぐらいと予測されているかということ、および地下部の例えば炭素固定量が今分かっていない部分、予測できていない部分がどれくらいなのか。
- A：深さ1メートル当たりで比較すると、炭素量で大体最大で650トンぐらいで、地上部は二百数十トンぐらいであり、地下部が非常に大きい。ただし、これはマングローブ泥炭という有機物層を作るリゾフォラ属だけである。ほかの樹種に関しては幅があり、樹種によってデータが全くないものもあれば、ある程度そろっているものもある。
- Q：収集したデータを基に、炭素固定の多い種類のマングローブを増やすとか、そのような樹種を北限のほうに持っていけるように改良しようとか、それは生態系を壊すからあまりやらないことなのか。これからのデータを生かしてどこに向かっているのか。
- A：天然分布に従って森林は整備していくべきと思っている。天然分布していない樹種をそこに植えて増やそうというのは、方向として間違っている気がする。
- Q：生態系を開発などで壊されないように維持していくためという方向か。
- A：基本的にはその通り。破壊された森を回復させるときは、立地環境を考慮して植える必要がある。潮間帯のどの部分に植えるのかによって全く違った樹種を選定する必要がある出てくるので、細かい樹種選定の上で植林をやっていく必要があると思う。
- Q：泥炭層を形成するのはリゾフォラ属のみとのことであるが、何が原因で分解されず泥炭層になれるのか。
- A：かなりの速度で分解もしているが、それを上回る生産量があるということ。それとマングローブは1日のうちの半分は海面下にあるため、言わば還元状態であり、陸上の森林に比べると分解速度が遅い。
- Q：稲も水に浸かっているメタンが出て、土壌が困っていると思うが、マングローブに関しても、同じような状況か。
- A：メタンは調べていないのでよく分からないが、発生していると思う。しかし生産力が大きいので蓄積量のほうが大きい。
- Q：気候変動の影響についての見通しについて質問したい。今後、海面水位の上昇や海水温の変化があったときに、この分布域、あるいはその現存量がどのように変化するか。
- A：一番関わってくるのは、海面上昇と思う。既に表層侵食といった目に見える影響が出ている林分があり、この先を懸念している。一方で、表層侵食が見られない林分もある。支柱根を出して泥炭を生産するリゾフォラ属は、現在の海面上昇に対しては耐えており、樹種による違いもある。

A2.4 ネガティブエミッション技術としてのブルーカーボン

桑江 朝比呂（国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
沿岸環境研究グループ長）

まず、気候変動、脱炭素社会をなぜ実現しなければならないのか。以前、環境省の推進費S-14で実施された研究成果によると、気候変動対策しないと、世界のGDP5%程度の年間被害、損失がありそうで、2度目標等を達成したとしても1%程度の被害があるということであり、やはり経済面からも非常に脅威だという内容が示されている。

温暖化を抑制するためには、大気中の温室効果ガス（CO₂がメイン）を減らす必要があり、排出削減だけでは濃度が下がらないため、別の場所に例えばCO₂を動かさなければならない。そのような吸収源が必要で、森林を吸収源として使う以外に海に吸収させるということで、ブルーカーボンが最近着目されている。

ブルーカーボンという言葉そのものは、大気中の二酸化炭素が海に吸収されて、海底や水中の生物に貯蔵された炭素である。森林と違い、炭素が貯まる主たる炭素プールは海底泥や深海ということになる。水、海水があるため、海底泥の中は基本的に嫌気状態になる。そうすると、陸上の土壌と比べて分解速度は相当抑えられる。最近の研究では、塩分18以上になると、比較的なかなかメタンが生成しない。それは酸化還元電位が下がらないということがあるためで、メタンを排出せずに、土壌に貯留された有機物は分解しにくい。このため、一度海底中に入った炭素は、何百年、何千年スケールでターンオーバーが起きるといったことで、半永久的に貯蔵されていくという利点がある。また、海底泥が攪乱を受け再懸濁したとしても、また沖のほうに流れていって、もう一回再堆積すれば、大気に戻る前にもう一度嫌気状態に入るということで、自然攪乱にも強いというメカニズムがある。

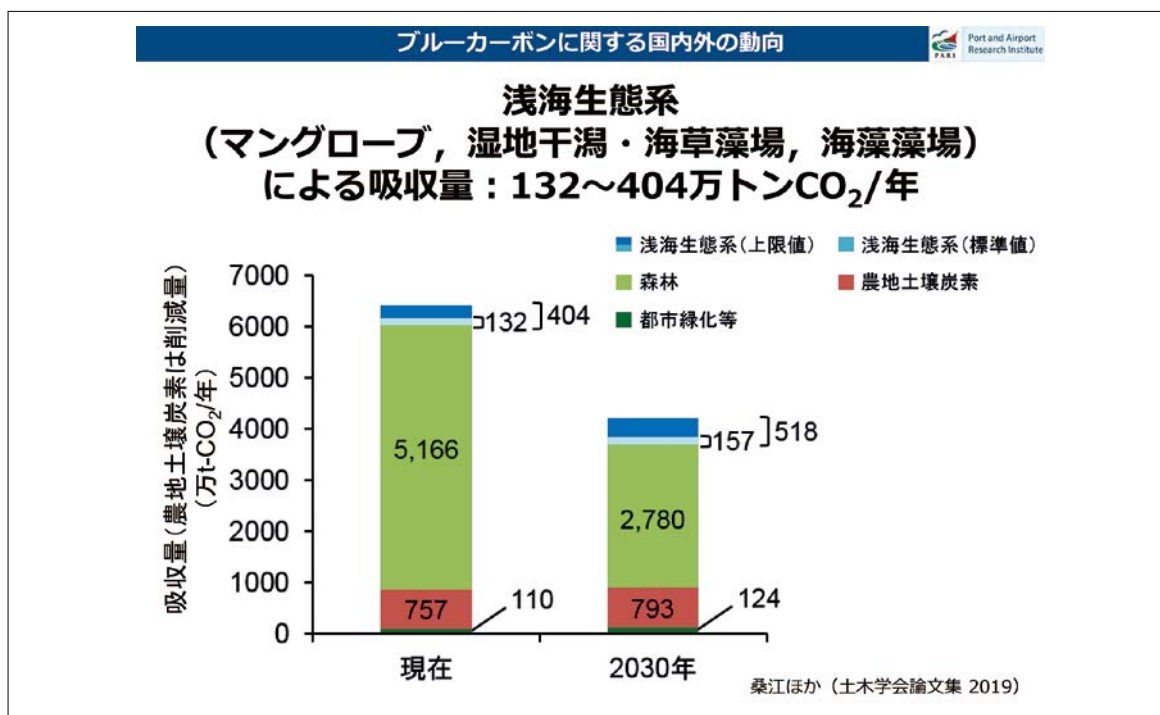


図 A2-4-1 ブルーカーボンに関する国内外の動向

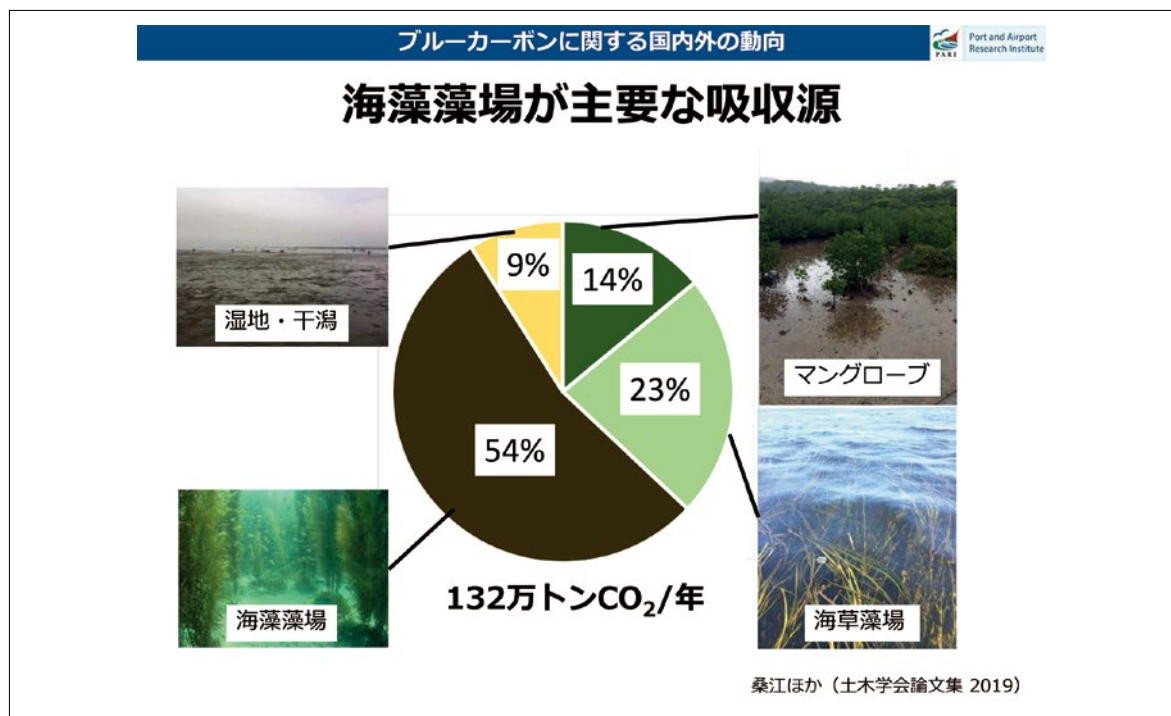
ブルーカーボンは、まだ世界的にも国内的にも全体の見積りが少ない状況である。図 A2-4-1 には、今の

ところ国内で正式にインベントリーとして定められている森林、農地土壌炭素、都市緑化の3つと合わせて、ブルーカーボンのポテンシャルを示している。森林については吸収量がどんどん減っている。これは森林の高齢化に伴うもので、追加的な生長量すなわち貯留量が少なくなってくるということである。農地土壌炭素は吸収源として国では整理されているが、実際には排出削減、つまり、このぐらいの排出削減が見込まれるということになる。

都市緑化に比べると、ブルーカーボンは恐らくポテンシャルとしては大きい。また、ブルーカーボンは、将来的にまだ増やせる余地がある。

まずこのカウントの中に海藻の養殖というものは一切入っていない。また、過去の自然状態でのブルーカーボンの吸収量を示しているため、もし今後、新しい基盤へ定着や沖合への養殖のようなことを考えれば、この値は伸ばせる余地があるということになる。

現状では、図A2-4-2に示したとおり、ワカメ、コンブといった海藻の藻場が約半分を占めており、4分の1が、アマモを代表とする海草の藻場である。残りはマングローブと湿地干潟で年間吸収されており、平均的に130万トン程度、年間で吸収されているという見積りとなっている。



図A2-4-2 ブルーカーボンの内訳

土壌中に蓄積するアマモやマングローブと違い、大型海藻は岩礁で基本的に生えるため、その場の下には炭素を貯留する場所がない。しかし、溶存の難分解性有機炭素を放出して水中にとどまるもの、もしくは、藻体が流れていって深い海に落ちているもの、こういうものを含めると、それなりの炭素貯留量が見込めるということになる。

全球でどのような生態系がより多くの炭素を吸収しているかという見積りをしたところ、単位面積当たりはマングローブが一番大きい。しかし、全球の面積を掛け合わせると、海藻の藻場がポテンシャルとしては大きそうだという結果になっている。

このようなことから、マングローブ、塩性湿地、海草藻場などが典型的なブルーカーボンの生態系として約10年前からよく知られているが、最近では第一線の研究等では、この海藻のほうの吸収量や炭素貯留量に注目

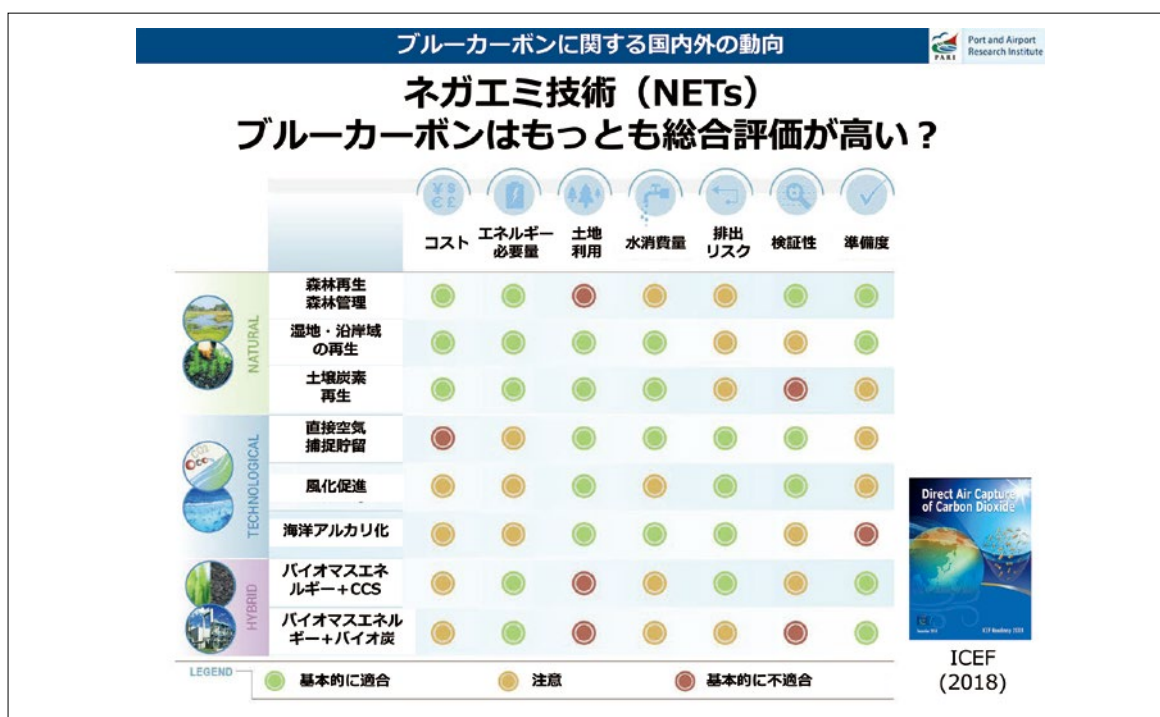
が集まっており、意欲的に研究されているという段階になっている。

海洋全体の緩和策の中では、ブルーカーボンは「生態系」というカテゴリーに位置する。2030年の薄い青で示したところまでだと、再エネ、例えば洋上風力に比べても非常に大きな割合を占めている。海全体では2度目標、1.5度目標に対して10%から20%程度の寄与ができるのではないかと見積もられている中、2030年までは特にブルーカーボン生態系の役割が大きそうである。

一方、2050年まで、少し長期で見ると、やはり洋上風力や海洋エネルギーの寄与が高まる。本日のテーマはネガティブエミッション技術ということだが、海外の企業などでは2030年までにニュートラル、もしくはネガティブにするための目標が立てられているので、このような話は、おそらく国内企業でもこれからどんどん出てくると思っている。やはり実社会でもネガティブエミッション技術というのは、今後注目が集まってくるだろうと思っている。

図A2-4-3では、ICEFがネガティブエミッション技術について、自然を使う技術が、BECCSやDACCSなどの他の技術と比較されている。

上段に並べられている様々な制約条件に対し、緑が適合で、赤が不適合をしめしている。ブルーカーボンは、上から2番目の湿地・沿岸域の再生というところになり、ここには赤印がついていない。社会実装の上での障壁というのは比較的少ないという特徴が整理されている。



図A2-4-3 ネガティブエミッション技術の総合評価（ICEF）

また、NAS（National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine）では、ブルーカーボンは例えば年間当たり、単位面積当たりだと除去量は少ないが、メリットとしては、やはりコストが低いと評価されている。これはもともと海洋生態系、沿岸生態系は、別の目的、例えば生物、有用種を獲るということや水質浄化など、そのような他の目標のために保全、再生が行われていた。これにブルーカーボン、CO₂の吸収というコベネフィットに注目した形での投資、つまりコストがかかるだけのことなので、実際には追加的にはモニタリングに係る費用程度で済むため、トータルとしてはブルーカーボンはコストパフォーマンスが高いという評価がされている。

ただ、海面上昇などで、どの程度このブルーカーボンの生態系がインパクトを受けるかということについては、まだよく分からないところがあるため、このような部分は技術課題、研究課題としては残されているという評価になっている。

IPCCで数年前に出た海洋・雪氷圏の報告書では、削減効果は小さいけれども、ほかのコベネがあるので便益がコストを上回る政策オプションだという、No regrets オプションという整理がなされている。

このような話をすると、自然の生態系をどんどん増やせばいいということに基本的にはなるが、実際は、なかなか公共事業というのは、維持管理、モニタリングのほうまで予算がつくことは少ない。実際に海辺、特に港湾などでは、実際にアマモを植えるということになると、どうしても地元のNPO、市民団体のボランティアベースの活動に頼らざるを得ない。やはりこれを持続可能にするためには、この資金調達というのが一つの大きな課題だろう。

2050年ネットゼロに向けて、小規模のボランティアベースの手作業的な取組はどうしてもやはり足りないものがある。そういうところに対しては、税金以外の新しい資金の導入や、企業や大規模団体の参画がどうしても必要になる。

社会を変え実装するときに、よく言われるのはヒト・モノ・カネ・シクミが必要という話があるが、この中で、まずシクミがやはりブルーカーボンでは足りないということがあったため、技術研究組合を設立した。ここでは、小規模な団体への資金環流なども一つの目標になっているが、より広くは、科学的な根拠、数値や経済評価などの具体的な指標を提供することによって、ブルーカーボンやブルーエコノミーの取組を技術開発していくということを狙っている。

◆ 次世代以降も持続的に海から恵みを受けられるようにする、新たな方法や技術の開発

◆ 国の認可のもと、企業、自治体、NGOやNPOをはじめ、各法人や各団体の皆様と対等な立場、異業種連携

◆ 科学技術的な根拠、数値、経済価値、具体的手法によってニーズに応える

ニーズ

【NPO】地元の海での環境活動を全国に知ってもらい、活動資金を得たい

【企業】自社におけるESGの取り組みを数値化（KPI）したい、SBT（企業版2度目標）達成に将来BCを活用したい

【教育】目の前の海岸や岸壁に育っている海藻が、どのくらい二酸化炭素を吸収しているか調べる方法を知りたい

図A2-4-4 ネガティブエミッション技術の総合評価（ICEF）

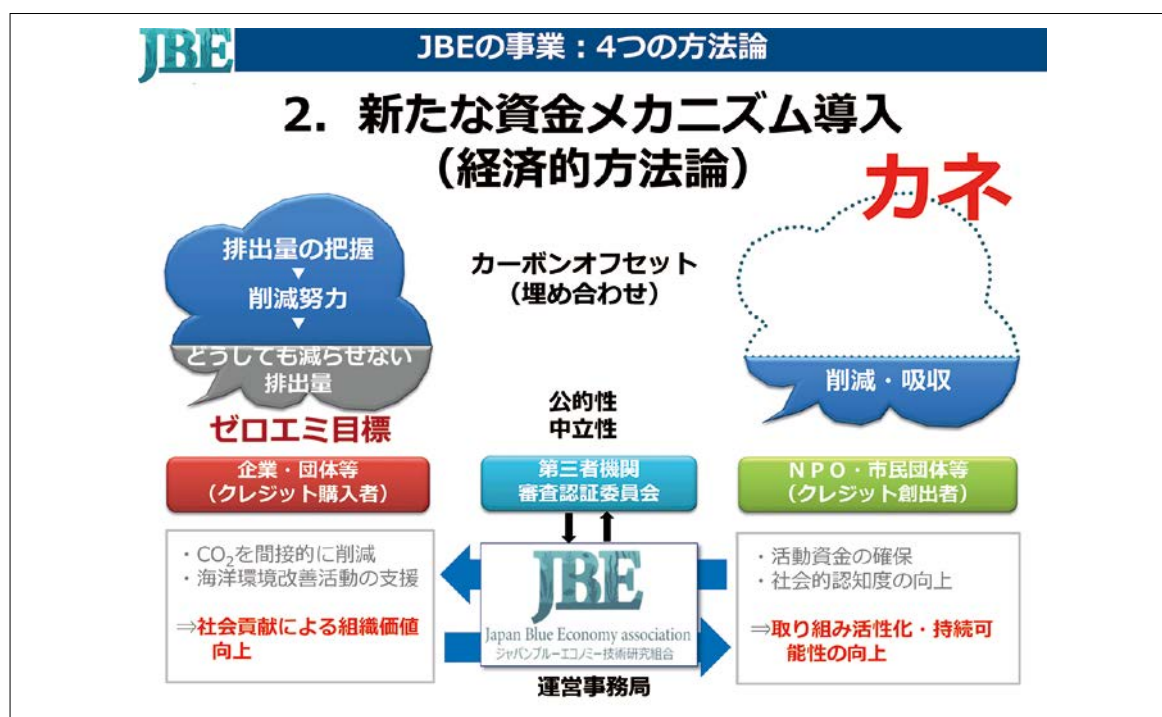
活動資金を地元のNPO等が得られるようにクレジットの仕組みを整えたり、企業の立場からは、ESGの取組を近い将来数値化したりして公表していかなければならないなか、SBT、すなわち企業独自の目標達成のための行動計画指標として定量値を示すニーズが高まる可能性がある。こういったところに応えていくような技術研究や開発をしていかなければならない。

海の大きな課題は、実際にその場でどのぐらいCO₂を吸収しているか、なかなか見える化が難しい。なるべく安いセンサーを大量に作って現地に入れるなど、そうしたことも必要になるので、測器の開発も今後必要なものになるだろう。

大きくは、科学的な点、技術的な点、経済的な点、そして社会的な点から、やはり研究開発をして社会実装していかなければならない。例えば、藻場を1ヘクタール再生したら年間1,000万ぐらいの価値があるとする。ただし、これは、温暖化抑制の面だけを見た場合である。藻場を再生すれば、ほかのコベネフィットと言われるような色々な恵みが生まれる。このようなものを定量化して将来的には貨幣換算化することで、実際の環境価値が、今知られているうちの5倍になるというような、定量化、数値化ができるようになっていけばいいと思っている。

実際に測るという点では、最近やはりドローンが威力を発揮していて、空中だけではなく、水上を走るボートみたいなものもある。これをやると、水中の様子を映像で捉えられるだけでなく測深機ついているので深さが分かったりする。

次に、お金が環流する仕組みについて、代表例は、おそらく環境価値の取引である。カーボンでいえばカーボンオフセット、クレジットになる。今試行段階だが、これらについてもどんどん進めていこうと思っている。森林の分野ではJ-クレジットがあるが、海の場合はJ-クレジットは適用外であるため、独自で今、制度そのものをつくり上げようとしている。



図A2-4-5 新たな資金メカニズム

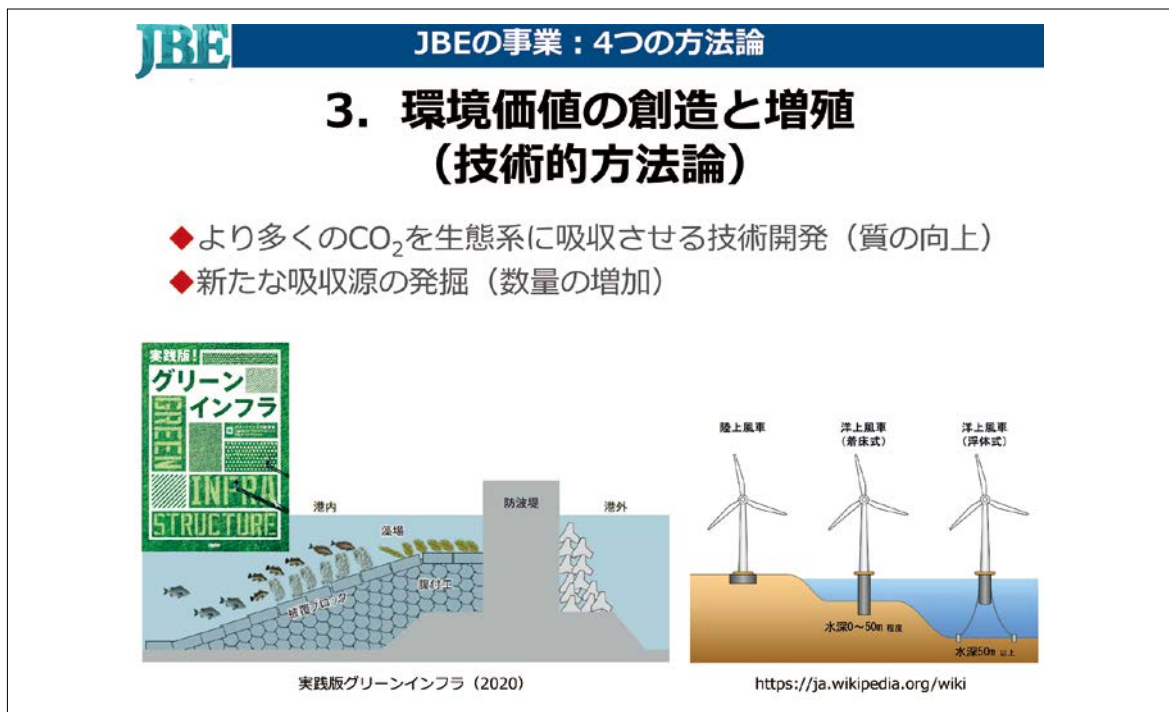
海を活用した気候変動の緩和策というのは、ブルーカーボン以外にも様々な海運、海洋エネルギーや洋上風力といった排出削減の技術もある。これらも基本的には取引の対象にすることが可能である。もし気候変動対策が環境価値を生み出すとすれば、取組の前と後、ビフォーアフターで削減効果や吸収効果が生まれれば、その差を定量化して認証を受ければ、それが取引可能になるということになる。このような取引を通じて、経済的に「てこ」をきかせ、より得意なところがどんどん削減や吸収の取り組みを実施し、そこに資金が投入されてより取り組みが加速され、結果として地球全体として大気中CO₂の削減が加速するということは、意味

があることだろうと思っている。

技術的には、これまで天然岩礁や自然の砂泥の環境以外にも、人工構造物を積極的に利用して吸収する場所を増やすこと、自然よりもさらに単位面積当たりの吸収量を上げるための技術開発が今後必要になる。特に今後、海では洋上風力という海洋構造物がどんどん増えてくる。この海洋構造物にいかにして藻を生やすかなど、そういうこともおそらく重要な技術開発になると感じている。

2030年に46%削減というのは相当高い目標であり、おそらく国民全体の行動がかなり変容しないと達成できないような目標になっている。人類というのは今までの行動を変容するのが非常に苦手で、それを拒むようなこともよくあるため、実際に行動変容しなければいけない時の障壁、もしくは起爆剤というのがどういうものになるか。

海というのは、様々な関係者が利用するような海域であるため、その海域をどうコンセンサスを得て利用していくのか。また、陸上の土地利用と全く同じで、調整や合意というのが必要になる。それをスムーズに進めるためにはどうすればいいかというところでは、やはり社会的な方法論というのは非常に重要な位置を占める。



図A2-4-6 環境価値の創造と増殖

港湾のセクターでも、2050年のカーボンニュートラルポートを目指す政策を掲げており、陸上での対策と、ブルーカーボンという吸収源をうまく活用し、例えば99%、もしくは99.5%とかを今後排出削減して、残りの0.5%から1%、その程度吸収源で賄うことで、トータルとしてニュートラルとかネガティブに持っていく。そのような社会になることを目標に現在研究開発を進めている。

(Q & A)

Q：アカモク場などでの、難分解性の有機炭素について、さらなる研究の展望や期待などはあるか。

A：難分解物質の正体がそもそもよく分からない。最先端の分析機器を用いてもなかなか物質を特定できない状況にある。まずこの難分解の物質がどういうものであり、それをたくさん生成させるにはどうすればよいかを調べていかなければならない。フェノール類やリグニンのようなものだということまでは

分かっていて、それに関連するような論文なども最近出ているが、やはり正体ということになるとまだまだ分からないところがある。

また、どの藻からは、どのくらい難分解なのか、分解されるとしたらどのような要因で分解されるのか、それが生物的にバクテリアなのか、光分解なのか等、色々な説がある。その辺も今後もっと研究が進まなければならない点だと感じている。

Q：ポテンシャルなども含めて、見える化するという研究は、日本や海外でどのように進んでいるか。

A：海藻の藻場が実際どのくらい吸収しているか、今後どれだけ増やせる余地があるかということについて、今、ブルーカーボンの最先端の研究をしているグループは注目しているところである。

Q：藻の場合は、海水のCO₂を吸収し、結果的にそれで大気中のCO₂が下がるという、2段階構造になっていると思うが、現実には、藻として固定されたCO₂のどれくらいが大気からの分で、海洋から流れ込んできたものはどれくらいかというのは研究されているか。

Q：例えば水中の深いところでCO₂を植物で吸収しても、全体量のCO₂量が水の中のほうが圧倒的に多いと、いわゆる大気中のCO₂削減効果は少なくなるのではないかと思うが、現状はどうか。

A：水の中の炭素動態と大気と海水下のガスフラックスを両方測っている例は、非常にブルーカーボンの世界では少ない。実際には、私たちはむしろ大気から水へどれだけ吸収するかというのに着目してこれまで研究はしてきたが、確かにガス交換の速度が遅いという点はある。その代わり、森林と違い、フラックス自体は小さいかもしれないが、吸収方向の正味のフラックスでの持続力があるというところなので、そういった差引きで収支的に見ると、十分吸収源になり得るといった見積りになっている。

実際、大気から正味で海水へ入ってくる炭素フラックスは、水中から海底へ入る炭素フラックスよりも大きく不釣り合いとなっている。おそらくその理由としては、水平方向にかなりの炭素が流れていて深い海に落ちているからだと思われる。水中の表面のCO₂濃度が結果的に下がり、やはり大気から入っていくというプロセスが、現状では過小評価されているのではないかと、今仮説を立てている。

Q：海には、陸上からの有機物の川等からの流れ込みが、陸上からの栄養として海中生物に影響していると思うが、成長や密度についてはどうか。

A：非常に大事である。まず大型海藻でも、最近磯焼けが起きている。その大きな理由の一つは栄養が少なくなっていることと高水温と言われている。やはり一次生産量を上げるということは大事だが、過度に上げ過ぎると透明度が落ちてしまって大型海藻の生産力は落ちる。一方、富栄養化が進むと大型海藻は育たなくなるが、逆に植物プランクトンが増えてくるため、プランクトンの吸収というのがやはり大きいということになる。結果として、やはり炭素を吸収させるのは、それを光合成させるための窒素、リンが必要である。

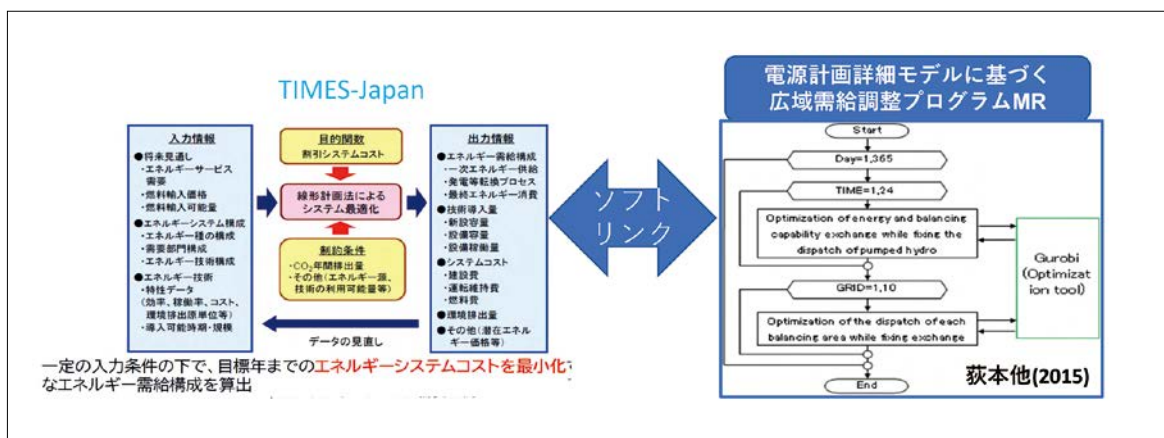
そのような意味で、環境整備も含めてトータルで管理していかなければならない。下水処理が非常に大きな役割を果たしており、異分解性の炭素は下水処理場でかなり除去する。一方、窒素、リンというのは炭素に比べて除去率が少なかったり、難分解性の炭素が最後、分解せずに流れてきたりするため、下水処理場での水処理が結果として海の吸収量を増やしている。ただし、下水処理場からCO₂が出てきてしまっているところをうまくキャプチャーしなければいけないというのが課題である。

A2.5 カーボンニュートラルとネガティブエミッションの役割

黒沢 厚志（エネルギー総合工学研究所 主席研究員）

本日は、カーボンニュートラルとネガティブエミッションの役割について、最近発表した学会の資料をベースに説明する。

カーボンニュートラルの実現は、日本も国際的に公約したが、エネルギー部門での対策以外も重要であり、この分析では森林吸収源等で年間約4,000万トンの吸収が可能と仮定している。今日の発表はエネルギー部門の中にBECCSというバイオマスCCSのオプション、ダイレクトエアキャプチャー+CCS（DACCS）のオプションを組み込むとどうなるかが主題である。モデル自体は線型計画法で、主にエネルギー部門の諸変数について、需要を与えて供給と転換を最適化するというものであり、TIMES-JAPANモデルと東大の電源計画モデルとをソフトリンクしたものである（図A2-5-1）。



図A2-5-1 分析のフレームワーク

主な前提条件は、ネガティブエミッションとして前述のBECCSとDACCSを仮定した。設備容量の上限として、2050年において、既存の文献等をベースに太陽光発電が300ギガワット、風力発電100ギガワット、または140ギガワットで感度分析をしている。原子力は、60年運転を前提として、2050年の設備容量は約23.5ギガワットを仮定した。また最近着目されている技術の一つにカーボンニュートラルLNGがあるが、現在は、いわゆるクレジットを取得して、みなしのゼロエミッションエネルギーとして使われている。将来は、これを海外でDACを使って作ることも可能としており、例えばオーストラリアでDACとメタネーションを組み合わせ、LNG価格はCSIROの技術経済推計に準拠している。最終エネルギー需要は、中庸のSSP2シナリオをベースに推定している。

試算シナリオは6ケース分析した。日本の旧削減目標は2030年26%減、2050年8割減であり、CO₂貯留は年間5,000万トンを上限とした。新目標は、2050年はネットゼロエミッションで、2030年は46%減の設定にしている。このカーボンニュートラルの場合は、ネガティブエミッションを導入しないと解が出ない。CO₂貯留量は年間2億トンで、かなり楽観的な値を与えている。カーボンニュートラルLNGの有無、風力発電の上限量については感度分析を行った（表A2-5-1）。

森林吸収量は人為的な森林農地管理であり、自然吸収を含まないが、そこで4,000万トン分のCO₂排出等をオフセットできるとしている。

表 A2-5-1 試算シナリオ 黒沢他（2021）

シナリオ	CO ₂ 制約/CO ₂ 貯留上限 /ネガティブエミッション	風力発電 上限	カーボン ニュートラル LNG
OLD-W100	旧想定/中位/なし 2030年26%減 2050年80%減 CO ₂ 貯留中位(5000万t/yr)	100 GW	なし
OLD-W140		140 GW	なし
OLD-CNG		100 GW	あり
CN-W100	カーボンニュートラル/高位/あり 2030年46%減 2050年NZE CO ₂ 貯留高位(2億t/yr)	100 GW	なし
CN-W140		140 GW	なし
CN-CNG		100 GW	あり

一次エネルギーの解析結果は、再エネのシェアがかなり増えるが、その中ではバイオマスや廃棄物が旧設定だと3%から4%、新設定で12から13%と、シェアが増加している。またカーボンニュートラルLNGや輸入水素などの海外からのゼロエミッションエネルギーも重要になり、ある程度のシェアを占める。カーボンニュートラルケースの場合は、そのシェアが増えることが試算された（図A2-5-2）。

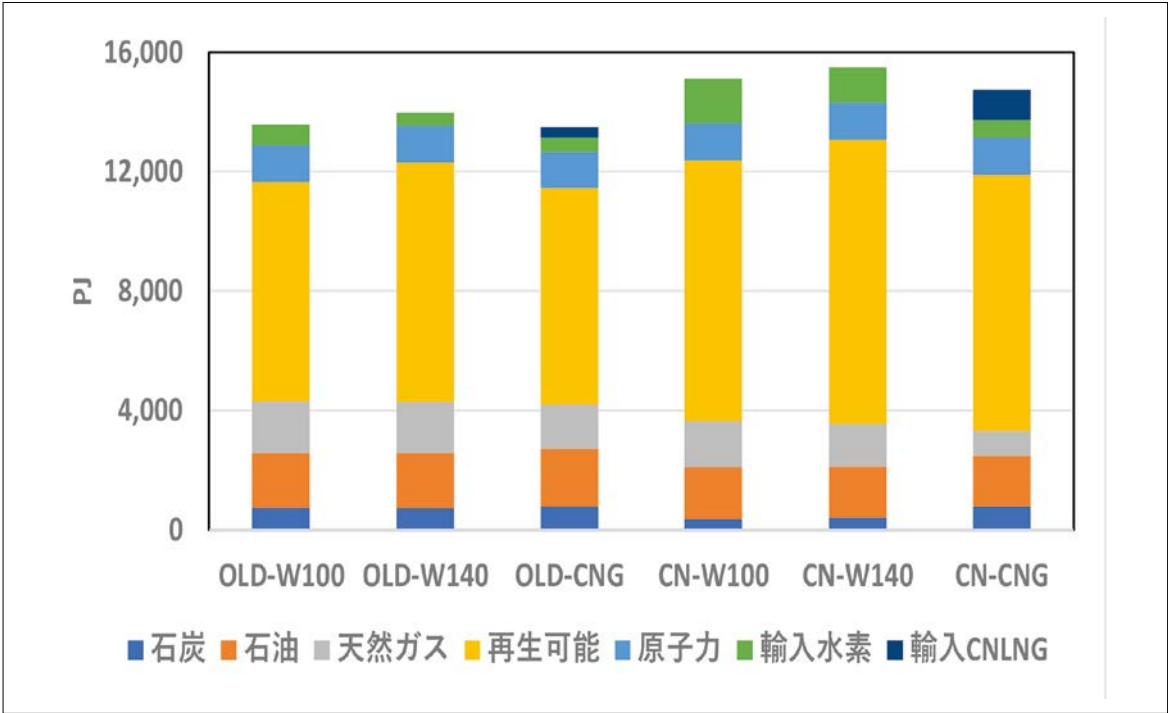
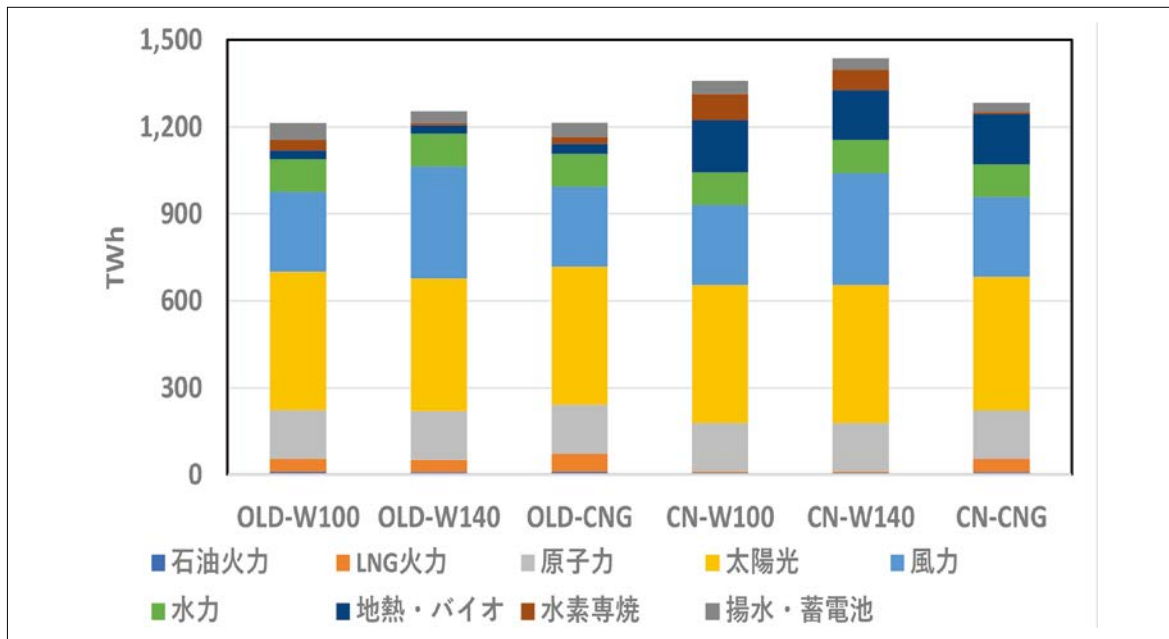


図 A2-5-2 一次エネルギー需要 黒沢他（2021）

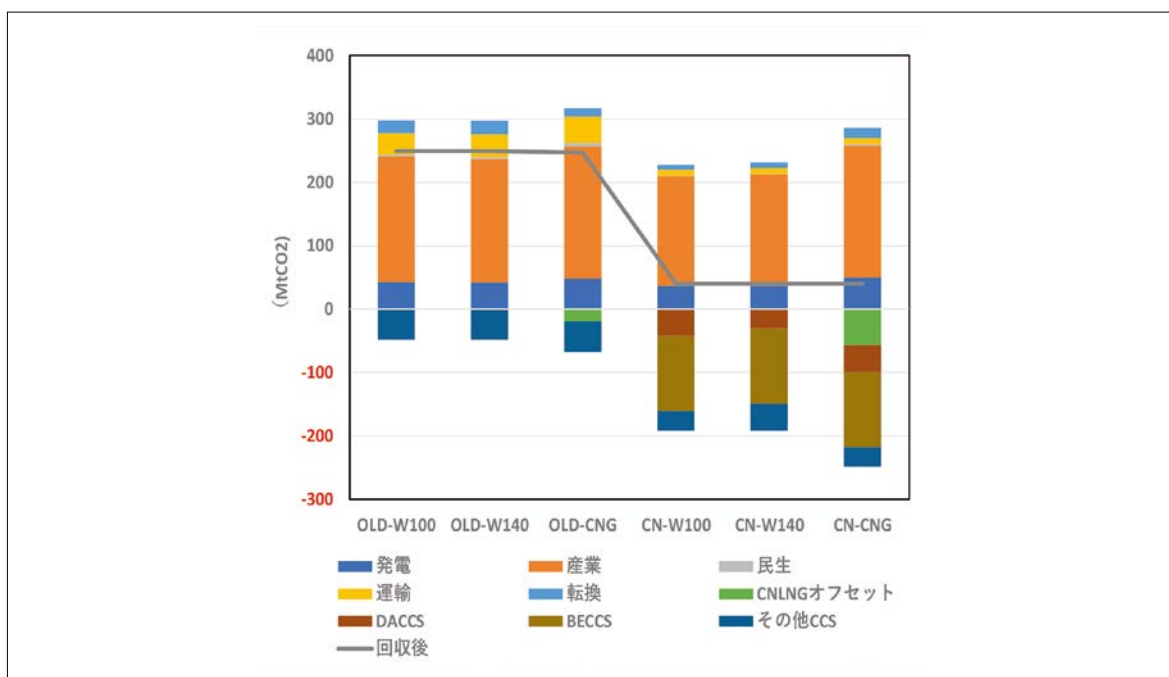
発電量は再エネがかなりのシェアを占め、太陽光が3割から4割程度、風力は2割から3割程度となる。その意味で、電源は非化石燃料系の発電比率が増え、結局ゼロエミッションになり、かつ BECCS 発電もあるので、最終的にはネガティブエミッションになっている。この場合の BECCS 発電のシェアは、カーボンニュートラルケースでは、右側の3つのケースで約12%から13%に達している（図A2-5-3）。



図A2-5-3 発電量 黒沢他（2021）

CO₂排出は、2050年で年間の正味排出量が、旧削減想定で2億5000万トン、新削減想定で4000万トンCO₂となる。後者は、オフセット分のCO₂に対応しており、森林等の吸収を含めると、これでゼロエミッションになる。（図A2-5-4）

その意味で、ネガティブエミッションの貢献は、特にカーボンニュートラルの2050年条件では非常に重要になり、最大の寄与を占めるのがBECCSの1億2000万トンCO₂、次にDACCSの2500～4200万トンCO₂となっている。

図A2-5-4 CO₂収支 黒沢他（2021）

もう一つのポイントは、産業での排出削減の難しさである。この部分のCO₂排出のシェアがなかなか減らず、旧想定で6割から7割ぐらい、新想定でも7割から8割ぐらいの排出が、産業部門で残るというシミュレーション結果になっている。そのほかのセクターについては、CO₂排出がかなり減り、民生等ではほぼゼロエミッションとなり、運輸では、カーボンニュートラル条件では3～4%、発電は14～17%に減少する。マクロ的には、産業分の排出をネガティブエミッションでオフセットしているという構造が見える。

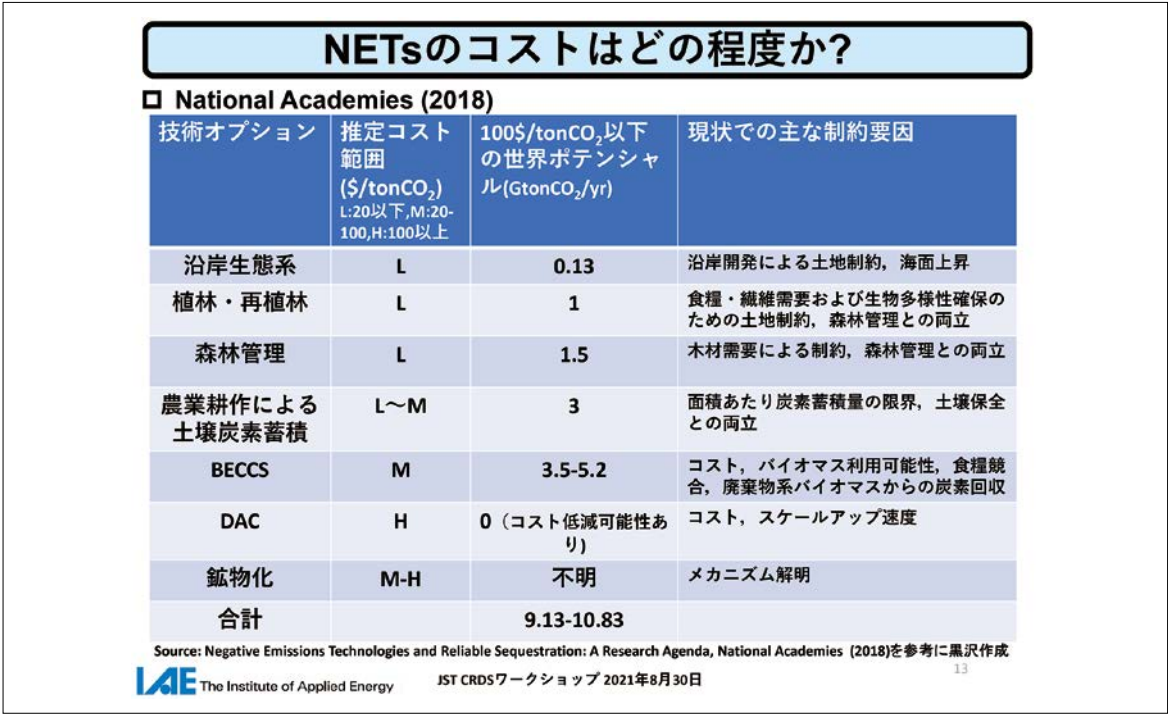


図 A2-5-5 ネガティブエミッション技術のコスト

図 A2-5-5 はナショナルアカデミーズの 2018 年報告のものであり、推定コストで、100 ドル以下での世界ポテンシャルが評価されている。生物起源のオプションは、沿岸生態系、植林・再植林、森林管理、農業耕作による土壌炭素蓄積、BECCS などが生物起源である。この中では、BECCS の効果がポテンシャルとして一番大きく、続いて土壌炭素蓄積、森林管理、植林・再植林、沿岸生態系である。ただ、コストを含めて、将来に関してはかなりの不確実性があるため、今後も研究の蓄積が必要と考える。

Minx の 2018 年のペーパーであるが、彼が提唱しているのは、単一のネガティブエミッション技術に依存するということではなく、ポテンシャルやコストを考えて、組み合わせる。また、いろんな形での副作用として、プラスやマイナスがあり、それぞれのネガティブエミッションの特性を考えて、地域に合ったネガティブエミッションを組み合わせ導入していくのが良いとしている（図 A2-5-6）。

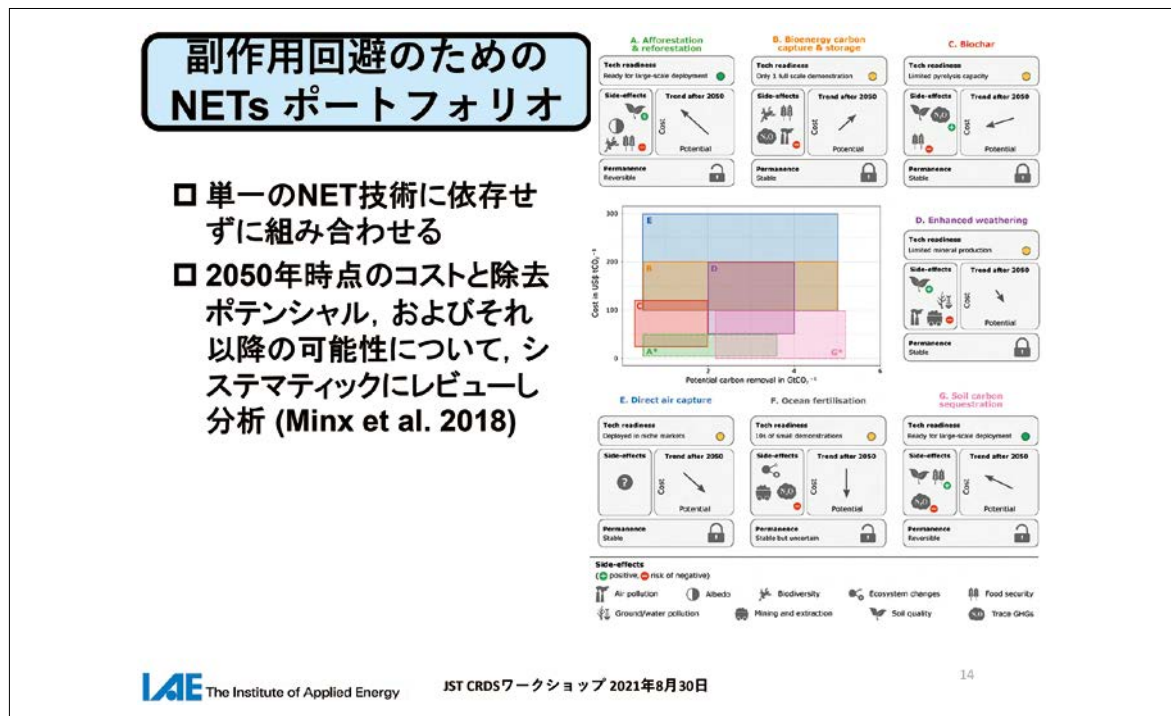


図 A2-5-6 副作用回避のためのポートフォリオ

BECCSの事例としては、アメリカ・イリノイ州のディーターで、既に年間100万トン規模の地中貯留が行われており、この場合のCO₂のソースは、バイオエタノールの製造時のオフガスを脱水したものである。それを工場敷地内のオンサイトでの砂岩層に年間100万トン注入している。アメリカには、地下に物質を注入する場合、規制があるが、USEPAの地下注入規制のクラスVIというのに対応したものである。技術的には、ウェットな条件で水分を取ればほとんどピュアなCO₂になるため、回収コストも非常に安くなると言われている。

また日本では、環境省で実証している福岡県でのバイオマス回収の実証試験が行われている。これはプラントの写真であり、もともと石炭だった燃料をバイオマス（PKS）に変更している。ただ、貯留までは実施されておらず回収後のCO₂については、現在は放散している。

イギリスには大規模な計画があり、DRAX Powerという、石炭発電所を木質ペレット燃料に変更し、出力はほぼ変えずに0.66ギガワットのユニットを4つ、出力は2.6ギガワットで、かなり大規模な商用規模の発電所に改造する予定がある。現在パイロットプラントで回収試験中である。最終的な最大回収量は年間800万トンであり、2024年に回収を含めたプラントを完成させ、2027年に稼働予定である。当初は地中に貯留するが、別のプラントから出てくる天然ガスのCO₂や、水素生産と組み合わせてCO₂を利用する計画もある。

以上、まとめると、2050年のネットゼロCO₂排出のためには、再エネの国内ポテンシャルが限定的という前提条件では、回収CO₂を国内で大量貯留も可能とした上で、吸収源とかBECCSという生物機能を利用したネガティブエミッション、DACCSという工学的なネガティブエミッション、海外でのネガティブエミッション技術を利用した水素以外のCO₂フリーのエネルギーキャリア輸入がCO₂削減に寄与するという分析結果になっている。生物学的と工学的なアプローチを組み合わせている。

ネガティブエミッション技術のオフセットは、排出削減の難しい産業部門で主に用いられる分析結果になった。ネガティブエミッション技術開発については、BECCSが先行しているが、今後はいろいろな実証プロジェクトを実施し、経験を蓄積する必要がある。

(Q & A)

Q : BECCS が解決策と言うのは分かるが、バイオマス燃料の分量があるか。エネルギー全体のエネルギーのポートフォリオを見た段階で、バイオマス燃料に頼ると日本では、2、3年で全部はげ山になるのでは。

A : 説明時に省略したが、バイオマスには廃棄物も含んでいる。その意味で、廃棄物や農産廃棄物などの廃棄物系の資源も含めており、国内ポテンシャルがあるという前提の下に想定している。

Q : この程度の量は、森林の再生産などを考えても可能だという上限の量になるのか。

A : その通り。

Q : BECCSとして日本での地下貯留の事例はあるか。

A : BECCSではないが、CO₂地下貯留の一番大規模な事例は、苫小牧での実証プロジェクトであり、累積で30万トンの実績がある。今は、貯留試験が終わったところであるが、かなりのスピードでCO₂の貯留を解決しないと、国内でBECCSを全部完結することは不可能である。従来想定では年間5,000万トンであり、井戸1本で年間100万トン程度と仮定すると、約50本になるが、2億トンとなると、その4倍ぐらいの井戸を掘ってオペレーションする必要があり、場合によっては回収したCO₂を海外に持っていくことになるかもしれないが、現実的かという点では、いろんな議論が必要と考える。そういう意味で、前提条件付の結果である。

Q : 森林吸収等で4,000万トンをシナリオの前提で置かれていることについて、この数字の根拠や何らかの吸収源に対する方策で改善を行ったとき、この数字が大きく変わる見込みがあるのか。

A : 京都議定書の第一約束期間の47メガトンの森林吸収で農地は入っていないが、バイオマス利用で、人工林の30%程度を管理をしてバイオマスを利用する。そうなるとその部分の吸収量は減るため、森林の吸収は30メガトン程度を想定している。あとブルーカーボンや、農地土壌の少ない規模で10メガトンぐらい人為的な管理で自然吸収できれば、40メガトン程度を想定している。

Q : 現在のバイオマス、例えば発電に使っているバイオマスを見ても、国内で賄えている量は、少なく、PKSの輸入、木質チップや木質ペレットの輸入などFITによって海外依存が進みつつある。FITが厳しくなり、認証した材料しかと認めないなど厳しくなる中、このバイオマス発電は今後も現状のように進まないと思うが、これだけの量のBECCSを実現するために、バイオマス発電はどういう方向に行くかと予想しているか。

A : ごみ発電のところからもCO₂が回収できることを想定しており、それを含めてBECCS発電のシェアがカーボンニュートラルシェアでは12%程度導入可能である。そういう意味で、国内の木質だけだと制限があり、農産廃棄物などを最大限入れてやっとこの数字になる。楽観的かもしれないが。

Q : 海外からバイオマスの輸入量が今後増えるか。

A : FITに関しては経済原理が優先されて、売電価格との見合いで海外のものが輸入されるというところが合理的である。イギリスのDRAXも、チップはアメリカで作っていると聞いており、経済的なインセンティブによって、そういうことが起るのも現実の姿としてある。

Q : 経済が優先すると、海外からの輸入になり、バイオマスを奪い合うようになる世界になるのか。

A : そういう意味では、取り合いになると思う。バーニングパワーが重要である。ヨーロッパも域内でバイオマスが生産できるが、足りないのでアメリカで作って東海岸から輸入したほうが安いということが現実として今起こっている。

Q : モデル上は森林吸収量を固定とした前提になっているが、何かの経済的な原則をもっと増やすことができれば、森林吸収量を当然増やしていくことができると考えてよいか。

A : その通り。森林吸収量等のオフセットがもし2倍になれば、かなり楽になるというのは明らかであり、海外からバイオマスを輸入してBECCSを行うなどの必要性が減る。

A2.6 全体討論

A2.6.1 全体討論での議論

○(司会) 全体討論では、大きく、森林、農地、沿岸生態系の3つにおけるCO₂の吸収、及び長期の炭素固定に関する具体的な研究開発課題について議論したい。

WSの枠組み

②森林・農地・沿岸部での炭素固定（ネガティブエミッション）

＜対象とする範囲＞

- ・一般的にネガティブエミッションとして扱われる、森林、農地（土壌炭素貯留）、沿岸生態系（海藻・海草、マングローブ）における炭素の吸収、およびより長期の固定にかかるもの。
- ・維持・管理手法、長期固定のための仕組み作り、量的貢献のポテンシャル評価などにかかる科学技術。

＜議論の視点＞

- ・国内外の研究開発動向や社会的な状況を踏まえて、**今後重要性が増すと思われる研究開発ターゲットや挑戦的課題の有無やその内容について議論。**
- ・**量的拡大に向けた今後の方向性、同時に考慮すべき経済社会、環境、倫理、法的観点からの課題などについても議論。**

維持・管理

仕組み

ポテンシャル
評価

© 2021 CRDS | 1



図A2-6-1 第2回ワークショップの枠組み

- (司会) まず、具体的な研究開発課題で、それぞれの森林、農地、沿岸生態系に関してどんなものがあるのかということについて、補足やコメントはあるか。
- 気候が変動していくと、例えば2050年断面で、CO₂濃度、温度、降水の条件が変わってくる可能性がある。そのときにCO₂の吸収や固定の能力が変化する必要があり、この評価が必要と思っている。
- 土壌や森林生態系、マングローブなど、気候変動の影響による吸収あるいは放出の増減等をどの程度研究の中に組み込まれているか。
- 地上部・地下部バイオマスについて、温暖化による成長量変化に対応したモデルにするつもりでいる。
- マングローブについては海面上昇の影響があると思う。海面が上がると、マングローブは根っこの生産量を高める可能性がある。マングローブ泥炭を蓄積できるリゾフォラ属に関しては、既にその反応が出ていると思われ、表層侵食が見られない。その他の樹種は、今の海面上昇に対しても追いつかずに表層侵食が起こっている。気温の上昇で多少CO₂の吸収力が上がるのかもしれないが、それ以前に海面上昇の影響が大きいのではないと思う。

- 2100年までの将来予測を沿岸生態系全てに行っており、現在論文を執筆中。藤本先生が言われたように、海面上昇が進んでくると、自然に、それに応じて適正な水深帯や潮間帯、陸側に、生息分布を変えていく。だが実際は、沿岸部は護岸があるなど、陸側にシフトできないエリアも多く、最終的に水没するという根本的な問題がある。この影響が大きい。
- 土壌の将来のポテンシャルの点で、どこまで今後の気候変動が組み込まれているか把握できていないが、土壌の炭素貯留量やそれに関係する植物の生育に影響が出てきている。今おこなっている範囲でだが、気候が変わり、温度が上がってくること、その他、雨が極端に増減することも大きな影響になる。とくに乾燥しているところは、植物のNPPが低下し、その分、炭素のたまる量が減る。温度が上がっていくと土壌から炭素が抜けていくので、恐らく今後の気候変動のシミュレーション状態だと、炭素がたまりにくくなる。この辺はモデルの中に組み込んでいく必要がある。我々のグループで、流域単位での土砂流出の研究者は、モデルの中にそうした気候変動のシナリオも組み込んでやっているところがあるが、現状は始めたばかりというところ。
- 「長期」はどのくらいの時間的なスパンを指しているか。
- 明確に使い分けていないが、例えば農作物では、稲のような一年生の場合、その1年が短期になる。果樹、ミスカンサスのようなバイオ作物の多年生は一定程度成長した頃までが短期、そこから成育が安定してくるところまでを長期といえる。40年などの年月になる。畑に関しては、10年ぐらいたと長期といえる。
- 農地土壌に関して、ヨーロッパやアメリカでは土壌の炭素蓄積に評価が高いが、日本ではそうではないのは、水田が多いためか、あるいは、水田以外はまだ評価していないからなのか。例えばイギリスでは、生態系保全とともに農地土壌を保全して炭素も蓄積するが施策的されているが、そうしたことがなされていないのは、水田の難しさがあるのか。
- 水田は、難しくないが、それができるような仕組みになっていない。例えば、水田ではメタンが重要になるが、それを削減するには水管理が重要。栽培の途中で乾かす、中干しをすることは一般的におこなわれているが、そのインセンティブは現場の農家に委ねられている。水を使う水利権は、使った量に依存しないので、無理してでも水も減らしてコストも下げようといったことがない。そのような仕組みがあれば、農地、特に水田はメタンの削減は大きくなると思っている。特に重要視していないわけではないが、それぞれの場所でどうやって、どこから有機物を持ってくるのか、バイオ燃料の発電でも同じだが、現場では問題になっている。
- 水田以外の評価もなされているということでよい。
- 水田以外だと、畑や草地での炭素貯留の管理を試されてはいるが、そのための仕組みづくりはされていない。収穫物にメリットがないところに取り組めないのが、補助金もあるが、重要なことは仕組みづくりかと思う。
- 私も、どのくらいが「長期」かの質問を受ける。ジオロジカルに何千年何万年ためる必要はなく、大気中の例えばCO₂濃度を下げることが目標であれば、200年後、300年後の、世界人口がこれ以上増えなくなり人為排出が増えなくなるところまでの時間スケール。つまり、数百年ぐらい貯留することができれば、それは長期と思っている。
- 逆に、数年や数十年、一時的に貯留しても戻るのであれば、2050年頃には全く意味がない。どこまで

長期かを示すこと、さらに、長期的に大気中のCO₂から隔離するためには、炭素プール中に長期的に炭素がたまらなければならない。森林の地上部だけを見ては足りず、森林生態系の土壌や地上部、地下バイオマスだけを見ていても足りない。オンサイトとオフサイト全てを見て、トータルとして大気とのやり取りの上で、大気以外の炭素プールにどれだけ長期的に炭素を保持しておけるかが重要。そうした各生態系、陸も海も関係なしで、どれだけ系全体としての大気とのやり取りが長期的になされているか、特にオフサイトのほうは、全く研究されていないと思う。その辺がサイエンスとして今後最も重要になると思っている。

○大規模に森林をリニューアル、大規模な伐採をして新たに成長させていく方策の話があったが、国内で伐採適齢期にきている森林は大分あると聞いた。大規模に伐採して、新たに植林をしていくことは、日本だと現状無理なのか、ある程度の規模ならあり得るのか。

○まず実際マーケットが現時点でどれだけの木材を求めているのかの需要の関係がある。他は、労働力の問題がある。日本の林業の現場での労働力は、ほとんどが高齢者。しかも、過去数十年の林業の低迷によって労働者人口も非常に減っているため大規模な伐採は物理的に無理がある。その要因が解決されないならば、科学的なシミュレーションとしては可能であっても、現実的には不可能と思う。もう一つは、国土保全の観点から、日本全国が一時的にほぼはげ山になるとその間に豪雨がいった場合、土壌の保水力がなくなっているため土砂災害が起きやすくなる。そうしたことを総合的に考える必要がある。その他は政策的な問題として、どこまで林野庁としてできるのかがある。さらに、日本は、土地が余っていない。これ以上大規模に植林地を拡大しようとしてもない。耕作放棄地が唯一考え得るところ。

○バイオチャーの炭素貯留や土壌改良効果の評価について、そのバイオチャーを作るまでにかかるエネルギー等も評価に入っているのか。

○バイオチャーの生産は入っていない。ただし、バイオチャーを作る過程で出る燃料を使って、そのバイオチャーを回していくような、例えばもみ殻炭は、燃料を得るために使っているものなので、生産にかかるコストあるいはエネルギーはあまりない。基本的に炭素は大気から光合成によるので、炭素自体はニュートラルである。作った後にどこに持っていくかというところを含めて、ライフサイクルアセスメントの評価は必要になってくる。

○森林や海藻も同様だが、生物の多様性、植生の多様性が影響しているのか。例えば、戦後の杉の植林もそうだが、ある特定の針葉樹だけではなく、広葉樹も入れたりするなど、森林全体のバランスが重要といった考え方はあるのか。森林に限らず、海のブルーカーボンでも、生物多様性のバランスを取ったほうが比較的安全性があるという考え方はあるのか。農地の輪作も同様と思うが。それぞれの専門の方に聞きたい。

○海について。指摘のとおり、例えばアマモと大型海藻が共存している場所があり、どちらかを一方的に増やす、あるいは、両方入れると相乗効果が上がるか等、そういった研究はないのが現状。長期的にどうなのか、国内の各環境条件においてどうなのかということは、分かっていない。

○森林について。単位収量当たりでは、杉の植林地が最も吸収効率がよい。ただし、生物多様性という意味では、低くなる。あくまでも植林地での話であり、天然林の場合は、森林は大きく分けて、人が植えて管理し、操業的に回している人工林と、天然に生えている天然林の2種類に分けられる。天然林は、種の多様性が高い森林のほうが吸収効率は比較的良好という研究成果も出ている。しかし、天然林で問題になるのは、林齢という概念が存在しないところで、様々な林齢の林が同時に存在しており、樹木個体が存在してい

る。結局、例えば台風のような災害が森に起きた場合、木が倒れて、これまで稼いできた炭素が放出側に回ってしまう。天然林で、原生林は人間の手を加えないことが前提条件なので、その場合は吸収源側から放出側が変わってしまっている。そうしたモザイク状態が現在の天然林の姿であり、実際のところ、吸収側か放出側かは、現在、計算しようとしているシミュレーションの中で実態に近づけたいと思っている。

○マングローブについて。マングローブは、微妙な立地環境の違いで樹種がすみ分けている。植林をするときは、まずはその立地環境を把握した上でそこに合ったものを植えることが必要。その立地環境に合わないものを植えた場合は、成長が遅くなってしまう。

実は20年ほど、ベトナムでマングローブ植林事業をNGO活動としておこなっているが、我々が植林している場所は、以前はどういうわけか人工的にユーカリを植えた場所だった。確かに潮は及ばないが、ユーカリはその立地に合うものではないので、全く成長せずにやぶになっていた。我々がその微妙な起伏に応じて適切なマングローブ樹種に植え替えた後は、結構立派に育っている。

また、マングローブも、台風の影響は大きい。常襲地ではあまり起こらないが、めったに台風が来ないところで大きな台風が来た場合は一斉に倒れるという事例がベトナムでもある。やはり同じ樹種を人工的に植えるところでそうした被害が出る。

○マングローブの研究開発課題の現状を聞きたい。海外の研究と国内の研究の温度感はいかがか。

○マングローブは日本にもあるが、その面積は狭いので、国内でその固定力を期待するよりも、海外、例えばエビ養殖池で破壊されたところの再生を日本が支援していく、といったスタンスが必要。

○これについて、例えば、海藻、海草はいかがか。

○日本は海岸線世界第6位と聞くと、実際には深い海域であり、光が届いて海藻がたくさん生える場所は多くない。やはりマングローブや海藻は東南アジアが一番多いというのが現状。

一方、そのような自然の状態を考えた上で、将来的に人為介入によって吸収量を増やすことであれば、沖合養殖や、海洋の場合は三次元的な活用が可能性を秘めている。その意味では、EEZを広く持つ日本は有利かもしれない。技術的には可能だが、コスト、例えばEEZ内で自由にやることのできるか等、国際交渉的な話が出てくるかもしれない。

○農地についての研究開発課題は、実際にたまることは分かっているので、どういったものが使えるか、どれくらい効果があるかを整備していく必要がある。特にサイエンス的に、何をどのように使ったらどのくらいたまる等は新しくない。なので、私の専門の土壌学の分野よりも、むしろ地域的な自然の情報整理等が必要と思う。

実際に使用されるときに、どのくらいの範囲の物の動きであればネガティブになるか、遠いと、逆にエネルギーを消費して、コストがかかることはあるので、そうしたことが必要と思う。そうした取り組みを日本全国で検証していくことは大切と思う。

欧米でそうしたものがなされているとは聞かないが、バイオチャー単体でやっているというよりは、エネルギーを作り出すときに出てきたバイオチャーを、そのまま農地に炭素貯留として蓄え、かつ、生産性を上げるように活用していくようになされている。

○バイオマス、BECCSについて、どの程度の発電効率を考えてやっているのか。例えば、石炭火力で40%、一番よい場合で43%だが、バイオマスだと20%いかないぐらい、廃棄物発電に至っては10%。建築廃材

がある場合は、10%いかないぐらいが、ごみ発電。

○石炭に比べると相対的にはやはり発熱量が低いので、普通の発電の場合は発電効率が低い。さらに廃棄物の場合は含水の問題があるため、その部分でも下がってしまう。もしお金をかけていい場合は、ガス化してコンバインド発電する方法が一つの技術的な回答ではあるし、事例も研究開発レベルでは行われている。お金をかけられるのであれば、CO₂の分離回収もある程度簡単にでき、技術的な解決はある。

○結局、様々な処理をしていくと、発電量に比べてエネルギーを食い過ぎる。また、バイオマスは季節商品で、分散しているので、実はバイオマスそれ自身が持っているエネルギーより大きなエネルギーをかけてバイオマスを集めて集荷しているという例も多々見られるが、その辺はどのようにカウントしていくのか。

○やはりライフサイクルの評価が必要。あまり広い範囲から燃料を集めると、ライフサイクルで見た運搬のところのCO₂が出てしまうという問題は当然ある。その意味では、大規模化したほうがいろいろ規模の経済は働くが、そこのトレードオフになり、あまり大規模化できない。

先ほどのイギリスの例では、大規模にチップを作って、それを運んでというモデルだが、運搬のところもやはりゼロエミッションにしないと、全体でのCO₂が下がっていかない課題がある。

○ネガティブエミッションに関するポートフォリオの研究について、日本として、ネガティブエミッション、ポートフォリオ、これらがどうあり得るかという研究はなされているのか。

○ミンクスの研究自体は、様々な文献のサーベイを行い、こうした副作用がある、ということをもとめたもの。土壌の質や反射率、生物多様性や生態系、さらには測量等の競合の問題、土壌、水質汚染、N₂Oの話も出ていた。あと炭素蓄積のパーマネンス（永続性）の話も出ていたので、それらは国内でも何らかの評価をされると思う。

○実際の研究は今のところはない。そうした研究が必要という段階で止まっている。文献情報がまとまっていない。日本語の文献にまで広げていかなければならないし、海外でのメタ分析と少し違う手法でやる必要がある。

○(司会) カーボンニュートラルに向けたCO₂吸収量及び固定量のポテンシャル評価に関する科学技術について、実際に二酸化炭素の吸収量を上げるための技術や、固定量を推定するポテンシャル評価がどのぐらいか、モデルの正確性や、その際に検討しなければならない課題等、補足やコメントをいただきたい。

○将来の気候とも絡むが、気候モデルと土地利用モデルを組み合わせ評価を行っていくことが必要。国際的には、CMIP6という気候モデルの比較と、LUMIPという土地利用（Land Use）のMIPがある。MIPは、モデルインターコンパリゾン、すなわち、モデル間比較をし、単一のシナリオによらずに不確実性や多様性を出していくという意味で、そうした幅を見る研究が必要。土壌の炭素がどれぐらいの範囲で増えるかについての既存の研究例もある。

○国内でCO₂の大量貯留を仮定することは、例えば2050年に向けてどのぐらい現実的な仮定か。

○CCSの回収と回収したものを運ぶところは、工学的にはできる。やはり貯留のところは、日本は陸域では行いづらいこともあり、海洋とすると、海外と比較した場合にはコストが上がる。貯留地点については、石

油やガスの採掘、試掘をしたところに関してはデータがそろっているので、環境省などで行った貯留地点の検討も、そうしたデータがあるところをやっている。その意味では、理論的にはポテンシャルはあるが、それを永続的にやるわけにはいかないの、やはり基本的にはエネルギー、特に産業用のエネルギーをかなりゼロに近いところに持っていく必要がある。

RITEが、エネルギー基本計画の基本政策部会分科会に出した資料で、回収したCO₂を海外に持っていくオプションが入っていた。国内で貯留できない場合には、そうしたことを考えないと答えが出ない。極端なことをしない限り、2050年カーボンニュートラルは難しい。

○サイエンス的な課題というよりも、技術的な課題のほうが大きいのか。

○技術的には、やればできる、お金をかければできるが、それを永久に続けるわけにはいかないというところがある。アメリカではすでに年間2,000万トンか3,000万トンぐらい、EORのためにやっている。陸域ならばほぼ問題ないし、ノルウェー等でも、年間貯留量100万トンぐらいの井戸がある。日本でお金をかけてやる価値があるかどうかは、技術というよりは政策判断ではないか。

○現在は、生物等による二酸化炭素の吸収量が全体排出量に比べて極めて少ないので、吸収量の幅が問題にならないが、2040年、2050年になると、かなりシビアにそのあたりを見積もらなければならなくなると思う。例えば、農地や森林、ブルーカーボン、マングローブといったものが大体最大どれだけ吸収できるのか。最低値と最高値はどれぐらいか、その幅があって予測できる。その予測値を狭めていくこと、予測値を上げるための科学技術的な努力も必要。まずはその辺の精度をどのように考えている。それぞれの分野でお聞きしたい。とくに、吸収量、固定量に関して。

○農地に関してのポテンシャルは、把握していないが、ばらつきは高い。どのぐらいばらつきがあるのかは、国の温室効果ガスの排出量の算定の中で出すようになっていたと思う。これを小さくしていくために、モデルの精度を上げる必要がある。現在、農地の温室効果ガス関係では、現地に合ったモデルというよりも排出係数を使って行っているの、モデルを使ってそこを精緻化していくかが重要。やっているはずではあるが、様々な条件が大き過ぎて、逐一そこまでできていないのが現状ではないか。

○森林については、将来のポテンシャルの最大と最小を、本日発表のプロジェクトにおいて計算、算定しようとする努力を開始したところ。森林の場合は、政策に関わる人工林もあるので、政策的なパッケージを何種類か準備することも関係しており、それにプラスして気候変動に伴う気候変化シナリオや土地利用の変化シナリオ、日本では土地利用の変化は大きくないが、そうしたシナリオが絡んでくるので、非常に複雑なシミュレーションになる。加えて、社会経済的に伐採木材製品（HWP）について将来需要の伸びによっても変わってくる。

○将来を予測するには、自然相手では不確実性が高いので、その不確実性を小さくすることが大事。海の場合は、まだ現状把握にもデータが少な過ぎて、測るにもコストがかかる状況。その意味では、まずは安いセンサーや安いリモセンを海洋に投入し、何かしら間接的にでも使えるデータを集めることが大事。その上で、生態系モデルや全球モデル、CMIP等を併せるのは、今でもやっているが、AIやPCが進化していけば、できるかと思う。ただし、現状では、現地観測のデータが少な過ぎて、モデルの検証まではなかなか難しい。

○マングローブの場合は、人為的に植えることも吸収量を増やす方法の一つ。一方、自然に、例えば、デルタがどんどん前進している場所では、マングローブ林も拡大しているところがある。そうした場所で新しく森

ができれば吸収源になるので、その見積りもおこなっていくことが重要。人為的に植える場合は、その立地に合ったものを植えなければ育たないので、最大限の効果を発揮させるためには、立地条件を把握することが重要。

- 樹齢や樹種により炭素の収支推定モデルに当たって吸排出係数をテーブル化することを発表で聞いたが、細かい計算だと感じた。この値は、今の段階では自分で求めなければならないのか。あるいは、統一化されている数字はあるか。
- 今回やろうとしている吸排出係数は、気候変動が起きたときにレスポンスがいかに関わるかも含めた吸排出係数計算を、種類ごとに行うもの。今までは一本の線の状態。例えば、杉ばかり。しかし、その気候変化に対する反応も含めて、北海道と九州では気候も品種も違う。そういったものも全て含めた上で気候変動へのレスポンス解析を行い、吸排出係数を新たに計算したい。
- 気候変動が収まらない限りは、係数を出し続けたいといけないということか。
- やってみないと分からない。現在我々が持っているデータは、先ほど紹介した多様性基礎調査などのデータで、5年に1度ずつ、全国4キロ格子の格子点においてモニタリング調査を継続しており、その変化した値を使って基本的なカーブを描く。そこにいかに気候変動の変化を予測で入れていくかということが問題になる。なかなか難しいが、現時点でできることはやっていこうというのが今回のプロジェクト。
- (司会) 3番目は、今まで議論してきた炭素の固定について、長期固定を進めていく上での維持管理の方法や仕組みづくり、社会的な課題、経済的な課題の観点から、森林、農地、沿岸生態系で、それぞれどのような技術、研究があればさらに炭素固定が進むか、現状、課題を議論したい。
- 基本的にバイオマスの利用は、地産地消でやるべき。遠方から大量に持ってきて、それをバイオマス発電の燃料にする等よりも、その地域でどのくらいのポテンシャル、実際の利用可能性があるのか、上限をしっかりと把握した上で、その地域で持続的に回すということが基本。
- 場所によって使えるものとそうでないもの、輸送コストなどがかかってくるものなどあるため、いかにそこにある資源を開発するか、ということが重要。また、バイオマス発電の原料が大量に海外から入ってきている話があったが、農業では、燃やした後に出てくる灰も含め、重金属などの有害物質が含まれていなければ、それなりに土の改良材として利用できる。ただし、バイオマス発電、特に有機物で出てくる炭、今のところ海外から輸入したもので作られた炭は、その国の炭素貯留にカウントされていないはずなので、その意味でも、日本でできたものを使って土にためていく、その持続的な活用のための仕組みが必要である。
- J-クレジット関連はどうか。
- J-クレジット等の最近の方法論として入れられたのがバイオ炭で、海外から輸入されて作ったものはカウントせず、認められない。以前IPCCで最近変わったのか、あるいは変わるはずだが、日本でバイオ炭の炭素貯留効果をカウントするときは、活動量を把握していなければならない。例えば、現時点では木炭やもみ殻炭はどのくらい出てきて、どれくらい販売されたのか、どれくらい土の中に入ったか、ということをカウントできているが、地産地消の課題は、どれくらい作られ、施用されているのか、数字として出していく必要がある。そうでないと、実際にたまっていたとしても、国としてどれほどたまったのか報告することができ

ない。

○長期的な仕組みや社会経済的な課題に関して、農地、森林、沿岸地域、それぞれに法律があることで、それら法律の存在が今日議論していることの障壁になっている側面はあるのか。

○耕作放棄地に木を植えることが農地法に引っかかるのか等の問題を国、政策として、ハードルを越えていけるかどうか、ネットゼロの社会を達成するための試金石になっている。そのような本気度の確認を、研究サイドから社会に上げていきたい。

○関連法は大きく関係している。例えば、海の場合は、漁業権が設定されているところでは漁業者の了解なしでは手をつけられない状態であったり、港湾法の適用内の港湾では、優先的に物流のために使うので、法律を変えていくことが一番手っ取り早い。一つのインセンティブになると思う。例えば港湾の場合、港湾区域内で洋上風力発電施設を作るとする港湾法の改正が近年あったために、洋上風力が岸边から造られている現状があるように、法令が変われば、実際にやれることはある。

○マングローブに関しては、国内は分布面積も狭くほとんどが国立公園になっているため難しいが、海外の場合、例えば植林をして、それを持続的に利用しようとした場合、ベトナムの植林を行っている地域では、今一切伐採が禁止されているので、それなりに育てきても間伐も入れられない状況がある。そのような地域でいかに森を管理していくか、方針さえできれば持続的な利用も可能になると考えている。ただし、途上国では難しいとも思う。

○農地に関しては、耕作放棄地を使ってバイオ燃料を作る方法もあるが、それをできるのは法人と思う。個人の畑が耕作放棄されてしまった土地を法人が所有するところはハードルが高いので、耕作放棄地の活用は、やはり農地をいかにこれから造っていくか、その辺の法律の改定が必要と思う。

○ファンディングについて聞きたい。それぞれの研究課題を実現するために、今は科研費や、農水省、国交省、環境省等があるが、さらにどのようなファンディングがあるとよいと思うか。

○今日話したプロジェクトは、当森林総研の交付金プロジェクト。ある程度成果のめどが立たないと公的資金は応募しづらい。昨今は森林だけでのプロジェクトは、認められづらい。また、ネガティブエミッションということだと、科研のネタにはなりづらいと思う。むしろ、例えば、農地や沿岸域などと組んだ上で、例えば環境省の推進費等に応募する、というのはあるかもしれない。

○ファンディングについては現状ではよくないと思っていたので技術研究組合をつくった経緯がある。結局、産官学民が自由に使える予算がなければ、こうした問題は解決が難しいと思う。

今、研究者がもらっている予算は、どの省庁でも学術への貢献が求められている部分が強く、そうすると、研究をしてしまう。本当に将来ゼロエミッションをやりたいのであれば、本来は成果として求めるべき。そうした場合、研究論文などの評価ではない方法の予算の枠組みや、契約期間、契約方法、管理など、それらがもっと自由になればよいと思う。

企業側に立つと、間接経費や少しの収益は認めるようなインセンティブがない限り、乗ってこない。そのような少し柔軟なファンディングの制度に変えていく必要がある。既存のものでは、出尽くしている気がする。なので、根本的に変えなければならないと思う。

○研究に関しては、科研費等でつないできている。一方、ベトナムでマングローブ植林は、我々が植林をしている面積は非常に限られているが、森林面積としては4万ヘクタールぐらいある。これはベトナム戦争のときに一旦枯葉剤で丸裸にされた場所。それを地元の人たちが植林し、4万ヘクタールの森を回復させた。そうした経緯もあり、今は伐採が禁止されている場所である。しかし、資源としてはもったいない。地産地消で、例えば小規模なバイオマス発電のプラントでも実験的に造ってみるといった資金があれば、我々のNGOなどでさらに活動を広げたりできると思う。ベトナムでも、間伐材の使い道がはっきりしていないので、伐採に踏み切れないと思う。そうした資金援助も考えてもらえればと思う。

○モデル分析の視点からは、皆さんがコンソーシアムのようなものをつくった上で、ポテンシャルとコストがどれぐらいなのかということを出せば、モデル分析に乗せることができる。ほかの工学的オプションについてはある程度追加もできるが、範囲が広く、オプションもかなり多いので、もう少し横断的に見て、それがどういう課題であるのかを含めて、コスト、ポテンシャルの研究が必要ではないかと思っている。

○長期的に取り組めるような研究計画が立てられる予算が必要。確実に成果が出るかと言われると、そうではないところもあるので、チャレンジング。現在のように短期的な結果ばかり求められているなかでは、短期的なデータしか積み上がらない。

そのほか、バイオ炭関係では、エネルギーとも絡む。例えば、コストがかかるので、民間が入ってこない部分では、経産省などが家畜排せつ物のメタン発酵などのプラントを造って実証試験をしても、そうした実証試験でできたエネルギー、資材を、農業関係に利用しようとしたとき、省庁が違うのでその辺は融通が利かない、といったところも出てくる。予算的にひもづけがないような、柔軟に対応できるような仕組みがある予算が必要。

付録1 俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた生物機能を活用したネガティブエミッションに関する研究開発課題（テーマ1）参加者リスト

(敬称略)

氏名	所属	役職
講演者		
射場 厚	九州大学	教授
江面 浩	筑波大学	教授
木下 俊則	名古屋大学	教授
白須 賢	理化学研究所	グループディレクター
星野 孝仁	ちとせ研究所	本部長
研究開発戦略センター（CRDS）		
佐藤 順一	環境・エネルギーユニット	上席フェロー
中村 亮二	環境・エネルギーユニット	フェロー／ユニットリーダー
上野 伸子	環境・エネルギーユニット／CRDS連携担当	フェロー
尾山 宏次	環境・エネルギーユニット	フェロー
竹内 良昭	環境・エネルギーユニット	フェロー
徳永 友花	環境・エネルギーユニット	フェロー
長谷川 景子	環境・エネルギーユニット	フェロー
前川 智美	環境・エネルギーユニット	フェロー
松村 郷史	環境・エネルギーユニット	フェロー
桑原 明日香	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
小泉 聡司	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
用貝 広幸	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
福井 弘行	ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
府省関係者		
石川 有希	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	
對崎 真楠	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	専門官
栗辻 康博	文部科学省 企画評価課	国際情報分析官
久保田 唯史	文部科学省 企画評価課	室長補佐
田端 千夏	文部科学省 企画評価課	行政調査員
科学技術振興機構関係者		
渡邊 敬信	低炭素社会戦略センター	上席フェロー
加藤 真一	未来創造研究開発推進部	調査役
菊池 邦生	未来創造研究開発推進部	副主幹

研究機関等		
木邑 敏章	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） 新エネルギー部	主査
黒沢 厚志	エネルギー総合工学研究所	主席研究員
桑江 朝比呂	海上・港湾・航空技術研究所	グループ長

付録2 俯瞰ワークショップ カーボンニュートラルの実現に向けた生物機能を活用したネガティブエミッションに関する研究開発課題（テーマ2）参加者リスト

(敬称略)

氏名	所属	役職
講演者		
桑江 朝比呂	海上・港湾・航空技術研究所	グループ長
黒沢 厚志	エネルギー総合工学研究所	主席研究員
当真 要	北海道大学	教授
藤本 潔	南山大学	教授
松井 哲哉	森林総合研究所	室長
研究開発戦略センター（CRDS）		
佐藤 順一	環境・エネルギーユニット	上席フェロー
中村 亮二	環境・エネルギーユニット	フェロー／ユニットリーダー
上野 伸子	環境・エネルギーユニット／CRDS連携担当	フェロー
尾山 宏次	環境・エネルギーユニット	フェロー
竹内 良昭	環境・エネルギーユニット	フェロー
徳永 友花	環境・エネルギーユニット	フェロー
長谷川 景子	環境・エネルギーユニット	フェロー
前川 智美	環境・エネルギーユニット	フェロー
松村 郷史	環境・エネルギーユニット	フェロー
桑原 明日香	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
小泉 聡司	ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
曽根 純一	ナノテクノロジー・材料ユニット	上席フェロー
福井 弘行	ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
岩瀬 公一	科学技術イノベーション政策ユニット	上席フェロー
吉田 有希	企画運営室	主査
五所 亜紀子	企画運営室	フェロー
佐藤 むつみ	CRDS連携担当	フェロー
田子 智久	海外動向ユニット	フェロー
府省関係者		
石川 有希	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	
對崎 真楠	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	専門官
栗辻 康博	文部科学省 企画評価課	国際情報分析官
科学技術振興機構関係者		
山田 興一	低炭素社会戦略センター	LCS研究顧問

大矢 克	未来創造研究開発推進部	課長
加藤 真一	未来創造研究開発推進部	調査役
菊池 邦生	未来創造研究開発推進部	副主幹
研究機関等		
加藤 悦史	エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部	副部長

付録3 ヒアリングにご協力いただいた有識者

(敬称略)

氏名	所属	役職
石原 靖久	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 研究プラットフォーム運用開発部門 技術開発部 観測技術研究開発グループ	グループリーダー
三輪 哲也		調査役
加藤 正人	信州大学先鋭領域融合研究群 山岳科学研究拠点 森林計測・計画学研究室	教授
桑江 朝比呂	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所	沿岸環境研究グループ長
香坂 玲	名古屋大学大学院環境学研究科 社会環境学専攻 環境政策論講座	教授
塩田 肇	横浜市立大学 生命ナノシステム科学研究科	准教授
白戸 康人	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	気候変動緩和策研究領域長
田谷 全康	東亜建設工業株式会社 土木事業本部 土木部	担当部長
寺内 元基	公益財団法人 環日本海環境協力センター (NPEC)	
仲岡 雅裕	北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター	教授
林 潤一郎	九州大学 先導物質化学研究所	教授
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 水産資源研究センター 社会・生態系システム部 沿岸生態系グループ	グループ長

作成メンバー

佐藤 順一	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
徳永 友花	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
上野 伸子	フェロー	(環境・エネルギーユニット／CRDS連携担当)
尾山 宏次	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
関根 泰	フェロー／教授	(環境・エネルギーユニット／早稲田大学)
前川 智美	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
吉田 修一郎	特任フェロー／教授	(環境・エネルギーユニット／東京大学)
中村 亮二	フェロー／ユニットリーダー	(環境・エネルギーユニット)

調査報告書

CRDS-FY2021-RR-05

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 March 2022

ISBN 978-4-88890-780-4

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

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>