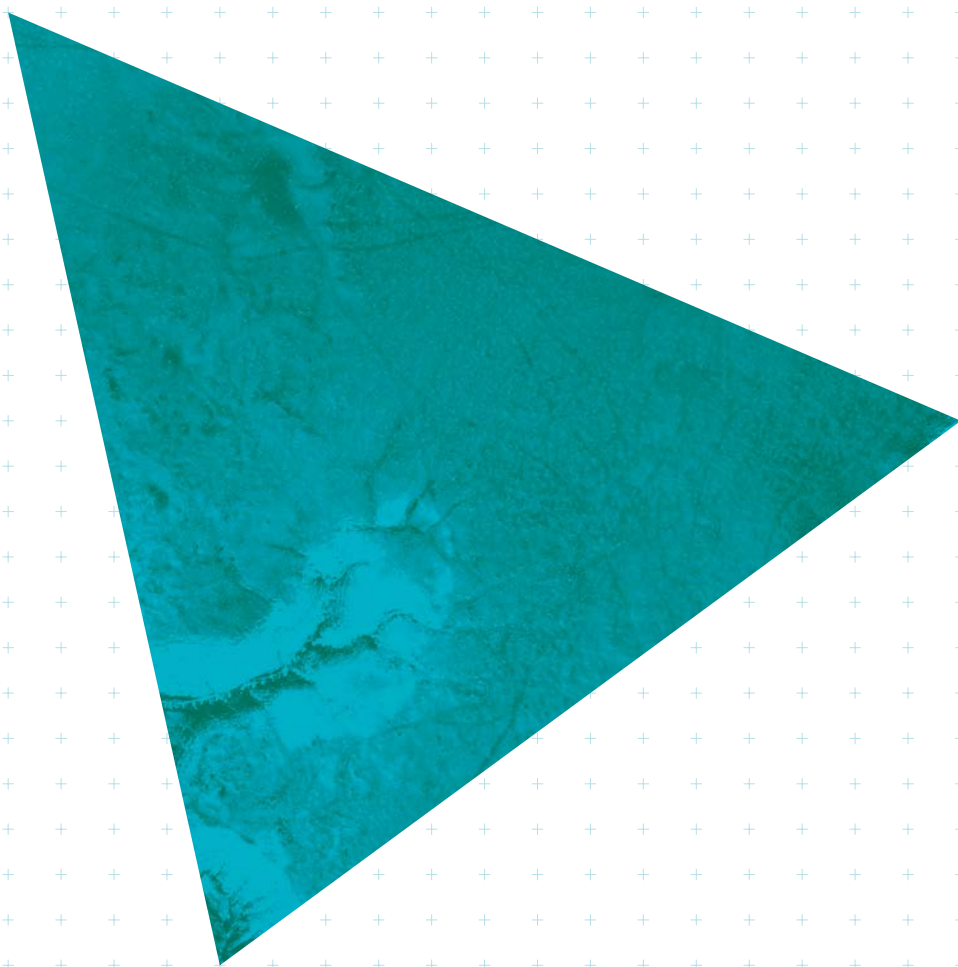


科学技術未来戦略ワークショップ報告書

バイオマス・ネガティブエミッション 技術の実用化加速基盤研究 (第1回) および (第2回)



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が2022年11月18日（金）、11月21日（月）の2回に分けて開催した、科学技術未来戦略ワークショップ「バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究」での議論の内容をとりまとめたものである。

2050年カーボンニュートラルの実現には、大気中CO₂除去技術であるネガティブエミッション技術（Negative Emissions Technologies：NETs）が必要となる。本ワークショップでは植林や沿岸部ブルーカーボンなどの陸域、海域におけるバイオマスを活用したNETsにおける実用化加速のための基盤研究の課題およびその対応の方向性を明らかにすることを目的に実施した。

以下にワークショップでの議論の概要をまとめる。

【科学技術的課題】

• 共通

→研究・観測の検討時間から考えると炭素循環・固定の時間スケールが長期（百年～数千年）に及ぶため、モデルが必須となる。その精度を高めるために観測との融合が必要。

• 陸域

→陸域生態系の詳細解明のためには長期的な取組が必要。

→長期観測のルールを探るためにさまざまなサイトでの観測が必要。さらに地上での観測データや衛星データなどの観測データを複合的に解析するようなビッグデータ解析技術が必要。

→地上部に比べて地下部、土壌の分解や安定性の評価が困難であることも課題。

→光合成においては炭素のみならず窒素、リン等の関連性の研究も重要。

→ゲリラ豪雨や熱波などの極端現象がモデルに取り入れられていない。そのような地球臨界現象の影響について生態系の応答や炭素循環への影響は大きな課題。

→メタンの影響は大きく今後の課題。

• 海域

→海中の観測技術は陸上と大きな差があり、困難。

→海中での海藻類の分解過程を理解する上でブレークスルーになるのは海藻由来物質の化学トレーサーとその分析の技術開発が必要。

→衛星観測の解像度などの仕様は、陸域観測に合わせており、高解像度などのより海域に合わせた技術への対応が必要。

→温暖化影響：海洋熱波などのパルス的にくる外乱が課題となる。それらの予測やどの程度の変動が起きるかを見ていく必要がある。

• 農地

→RothCモデルの改良・精度向上：農地の土壌炭素量を推定するRothCモデルの精度を上げるためには土壌タイプ（活性鉄、活性アルミニウムなど）との関連性の研究が重要。炭素、窒素、リンは連動しながら物質は循環するのでその理解も重要。炭素飽和に関する研究も重要。

→農地からのメタン発生抑止対策は今後の大きなターゲット。N₂Oについても窒素も含めた研究は複雑となるが重要。

• 森林

→地下部の測定の技術のブレークスルーが必要

→老齢木の課題：老齢木は、CO₂の吸収量は飽和し、定常状態が常識とされていたが、老齢木で構成さ

れる森林の観測で予想外に高い吸収量が観測されることからその解明が必要。遺伝子の発現を見ることで、老齢木がアクティブかは分かる可能性がある。

- **バウンダリー問題：**農地と自然生態系、河川のバウンダリー問題も含めてモニタリングしていくことが、今後の気候変動対応で重要。国の組織の縦割りの問題があることから、その打破が課題。

【社会実装に必要な技術】

- **海域：**ブルーカーボンを増やす上での優先課題は、洋上風車といった三次元構造物の活用や、魚と海藻の養殖の統合、比較的温暖化に強い種苗生産などが挙げられる。
- **農地：**バイオ炭を用いたNETsは迅速に実施可能であり、技術的な障壁も低い。耕作放棄地が増えているので、リグニンをつくるものを植えて、炭素を貯めるために使うことも一方策。大規模社会実装を考えるのなら、例えば限界集落を使って実証実験をやることもあり得る。

【炭素の価値の評価】

- 価格は地域差があってしかるべき。複合的な資金の提供メカニズムがあり、国の助成金に頼るだけではなくて、民間も投資した成果がクレジット、オフセットという形として返ってくる必要がある。
- カーボンの取引価格は需要と供給の関係で大要が決まるが、コベネフィットの価値で炭素価格を上げることは可能。価格が上がれば、還元されてプロジェクトの質も上がる。そのためには定量的な評価として生物多様性や、ほかの生態系サービスを測ることも重要。
- 測定方法、価格の根拠などは研究成果をベースとした国際的なルールメイキングが必要。

【推進のための仕組み】

- **共通：**日本でのバイオマスによるCO₂吸収量の目標値を定めることが重要（京都議定書時は目標値設定）
- **森林：**長期モニタリングの仕組みとして、国のサポートが重要（欧米では進んでいる）。モニタリングとしてはフラックス計測と土壌サンプリングが必要。
- **農地：**圃場試験は重要であるが、研究者のモチベーションにはなりにくいのでインセンティブが必要。
- **農地：**地方大学がリーダーとなり、地方の農業試験場や普及センターと連携し、さらには農協を巻き込むことが良い。

目次

1	開催趣旨	1
1.1	開催概要	1
1.2	趣旨説明	1
2	陸域バイオマス・ネガティブエミッション	6
2.1	陸域生態系モデルによる ネガティブエミッション研究について	6
2.2	地上観測・衛星観測・モデリングを統合した陸域における 温室効果ガス吸収・排出量の把握	18
2.3	陸域でのバイオマス吸収量を増やすための技術的課題検討	24
2.4	土壌炭素（土壌有機物）の役割、存在形態、 貯留ポテンシャル	32
2.5	農業におけるこれまでの土壌への有機物施用技術と これらからの土壌炭素貯留技術	44
2.6	総合議論（陸域）	53
3	海域バイオマス・ネガティブエミッション	57
3.1	藻場の CO ₂ 隔離過程に関する 研究と港湾分野における動向	57
3.2	研究課題探索：ブルーカーボン生態系の CO ₂ 吸収源算定と生態特性	66
3.3	ブルーカーボンの将来予測－未来の生態系を用いた試み－	76
3.4	ブルーカーボンを推進する上での政策的課題 海外との比較、普及に向けてボトルネックとなっている 科学技術的課題	85
3.5	総合議論（海域）	98
4	まとめ	105
付録 1	プログラム	107
付録 2	参加者リスト	108

1 | 開催趣旨

1.1 開催概要

日時：（第1回）〈陸域〉 2022年11月18日（金）13：30～18：00

（第2回）〈海域〉 2022年11月21日（月）13：30～18：00

場所：（第1回）TKP市ヶ谷カンファレンスセンター カンファレンスルーム4B および Teams

（第2回）国立研究開発法人科学技術振興機構 東京本部別館 2階会議室A② および 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）

（プログラム、参加者リストは付録に記載）

1.2 趣旨説明

徳永 友花（JST CRDS）

パリ協定の2℃目標はCO₂の排出抑止策のみでは達成できず、これを達成していくためには、2050年頃までには大気中のCO₂の除去量として約50億トン/年、その先においても200億トン/年程度が必要とされている。ネガティブエミッション技術（以下、NETs）は負の排出技術として、積極的に大気中のCO₂の濃度を低減させるための技術であり、現在様々な方法が検討されている。（図1-1-1）

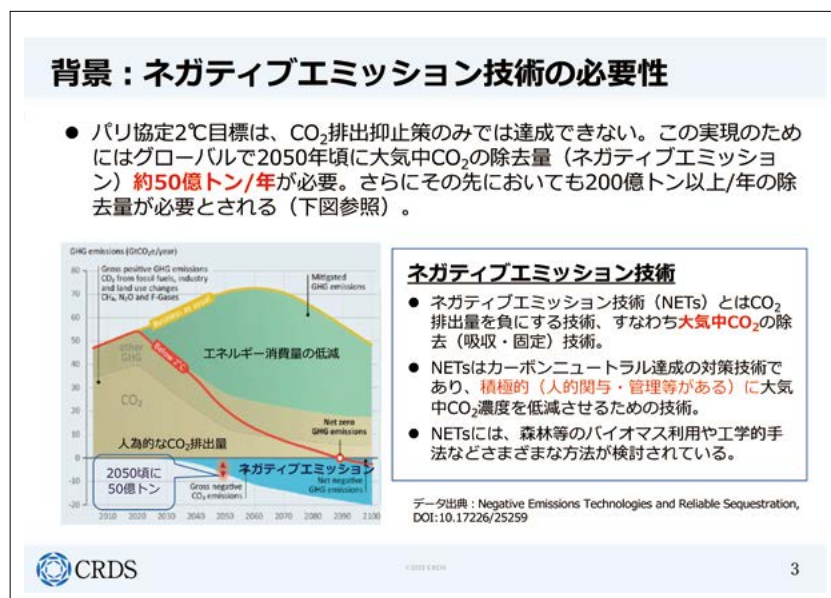


図1-1-1 ネガティブエミッション技術の必要性

NETsとしては、工学的手法やバイオマスを利用するものなどがあるが、今回のワークショップでは図1-1-2における赤枠の部分、バイオマスを活用したものの中で、ブルーカーボンや土壌炭素貯留、植林、バイオ炭などを対象にする。こうしたバイオマスを活用したNETsによるCO₂の吸収・固定、社会実装は一部行われているものの、それを加速するためにはどうしたらいいのかということは、まだこれからの段階と考えている。利点の一つは、ほかの工学的手法などに比べてコストが低いこと、あとは安全性が高いことが挙げられる。（図1-1-2）

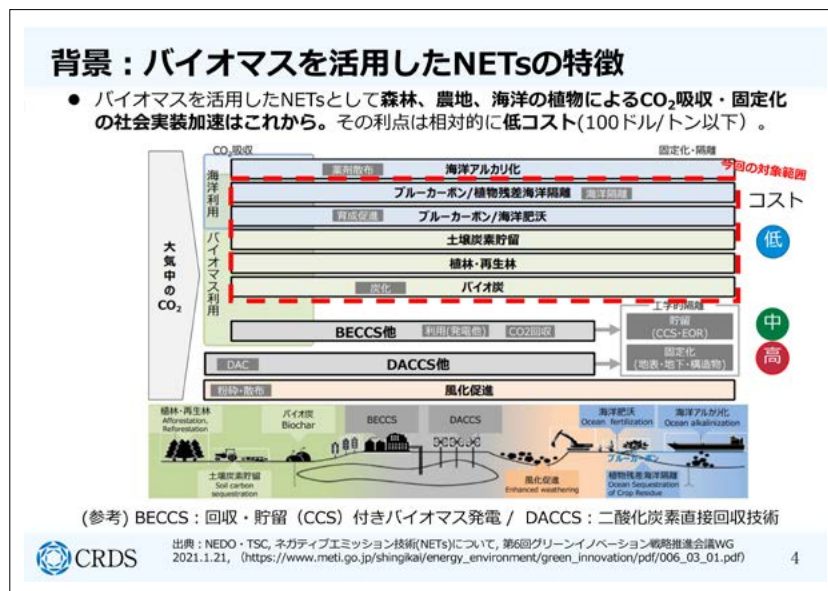


図1-1-2 バイオマスを活用したNETsの特徴

国内の状況としては、2050年カーボンニュートラルの達成のために、大気中のCO₂の除去量として年間約2億トン以上が必要とも言われており、各種CO₂排出削減策の対応はもちろんであるが、CO₂除去量も同時に増やしていく必要がある。現在は必要とされる年間除去量2億トンに対して、2020年の段階で約5,000万トン程度に留まっており、これを増加させるために必要な研究開発や施策などが重要と考える。

背景：国内の状況

- 我が国においても2050年カーボンニュートラル達成のためには大気中CO₂の除去量（ネガティブエミッション）として**2億トン以上**※1が必要
- 現状、国内バイオマス資源による大気中CO₂吸収・固定量は年間約**5000万トン**（森林が大半、農地の土壌貯留は1000万トンレベル。海洋は沿岸部藻場以外はほとんどカウントされていない）。この量を増加させる研究開発や施策による社会実装の加速は重要



環境省、地球温暖化対策計画（<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/beppeyou.pdf>）をもとに、CRDSが作成
* 浅海生態系は2013年（桑江他、土木学会論文集2019）による。 ※1：RITE2050シナリオ試算結果より



5

図1-1-3 国内の状況

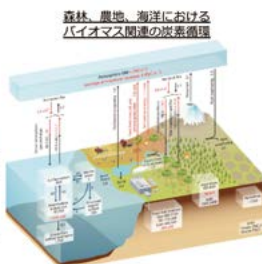
農地、海洋での人為的なバイオマス生産は、本来、食料や木材生産などが目的であり、NETsの観点からCO₂の吸収・固定量がどの程度か、CO₂の吸収のためにどうしたら良いかなどの知見は十分ではないと考える。このため本ワークショップではバイオマスNETsの社会実装の加速に向けての問題点と対応について、我々が考える今後の方向性も提示し、議論したい。

サイエンスとしての課題の一つは炭素循環や炭素動態の解明である。そのためには、CO₂の吸収・固定のメカニズムや計測データの不足による吸収・固定量の不確かさという課題の解決が必要と考える。もう一つは、炭素固定量増大の方策、CO₂の吸収・固定量増加の技術が十分ではないと考える。一方で、従来の食料生産や木材生産との両立することも課題と考える。このような対応のための研究開発や社会実装への施策推進が重要であり、そのためにはバイオマスのCO₂の吸収・固定源のポテンシャルを拡大するための研究開発や施策に加え、科学的エビデンスの拡充をしていくことで不確かさを解消し、国際的ルール化へ寄与することが重要と考えている。

今後の方向性（案）：バイオマスNETsの社会実装加速

問題点と対応

- 森林、農地、海洋でのバイオマスは本来、食糧・木材生産等が目的。このためCO₂吸収・固定化に焦点を当てた知見は必ずしも十分ではない。
 - ① 炭素循環・動態の解明：CO₂吸収・固定のメカニズムや計測データの不足による吸収・固定量の不確かさ（特にバイオマス地下部、土壌、海洋の炭素循環・動態の知見が不足）
 - ② 炭素固定量増大の方策：CO₂吸収・固定量増加のための技術が十分ではない。および食糧・木材生産との両立が課題。



出典：Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda (2019)Chapter:1 <https://doi.org/10.17226/25259>

● 研究開発や社会実装への施策推進が重要

- バイオマスのCO₂吸収・固定源のポテンシャルを拡大するための研究開発や施策
- 科学的エビデンスの拡充により不確かさの解消と、国際ルール化への寄与。



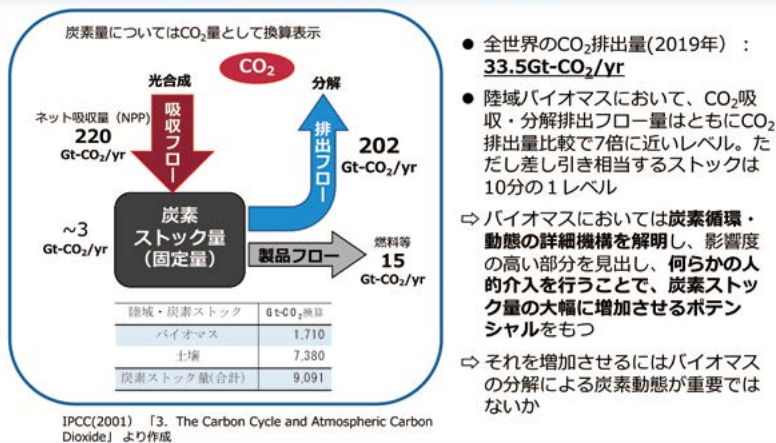
© 2022 CRDS

6

図 1-1-4 今後の方向性（案）

図1-1-5に陸域バイオマスの炭素フローとストックの例を示す。炭素のストック量を増やすための方策についても議論したい。

陸域バイオマスの炭素フロー・ストック



© 2022 CRDS

7

図 1-1-5 陸域バイオマスの炭素フロー・ストック

炭素ストック量を増やすためには、吸収量を増し、分解による排出量を減らすことが必要である。図中の数字はIPCCの2001年報告書からであるが、光合成による吸収量と分解量はいずれも大きな値である。具体的には世界の年間CO₂排出量が33ギガトンに対して、一桁が大きい値であり、光合成の炭素フローに寄与することで炭素ストック量を増やすことができるポテンシャルは大きい。CO₂吸収量を上げるための研究とCO₂排出削減のための分解抑制の研究との両方が必要と考えるが、仮に分解を少しでも抑制できれば、炭素ス

ク量が増える。このためバイオマスの分解のメカニズムや炭素動態が分かると、炭素ストック量を増やす上で着目すべき点が分かると考えている。このように分解のメカニズムを含めた炭素動態が重要と考えており、本日はこのあたりも議論したい。

また、サイエンスの議論とは別に、社会的な問題、科学と技術と相反するものや、合意形成、法的課題、社会・経済的な課題も重要と考える。技術的な課題、社会的課題など、いろいろな問題が複雑に絡み合っていると思うが、サイエンスがどのように社会的な問題に貢献できるかという道筋も明らかにしていきたい。

バイオマスNETsの実装段階における課題例		
● バイオマスNETs推進のためには、相反する課題や合意形成・法的課題など社会・経済的課題への対応も重要		
	技術的な課題	社会・経済的な課題
森林	- より吸収量の高い木が求められているが生態系への影響などが不明 - 水不足への懸念	- 所有者不明の民有林が多いことやインセンティブが十分ではないことから、土地所有者への合意形成が困難 - 林業従事者の高齢化
農地	- 作物収穫の過程でGHGを排出する - 地域毎の特性理解 - 作物収量への影響に対する懸念	- 環境対策への理解と方法論に対する認知度が低い - 研究者、農業従事者、自治体などのコミュニティの連携が不足
海洋	- 国内でのポテンシャルは小さい - 維持管理を継続できるかどうか	- 漁業者や地域住民への合意形成 - 国際的なルールメイキング

図 1-1-6 バイオマス NETs の実装段階における課題例

本ワークショップでは、前半は有識者の方々のプレゼンテーション、後半は全体討論による討論を行う。バイオマスが関連する炭素循環の中で、例えば大気中のCO₂削減に効果的なフロー・ストックを見いだす上で、サイエンスとして未解明はどこか、また、炭素の固定量増加のために効果的な方策とその基盤となる科学技術は何か、あとは社会・経済的な課題やコベネフィットについての議論、研究プロジェクトなどの推進方法の具体的なイメージや時間軸などを中心に議論したい。

2 | 陸域バイオマス・ネガティブエミッション

2.1 陸域生態系モデルによるネガティブエミッション研究について

伊藤 昭彦（国立環境研究所 地球システム領域物質循環モデリング・解析研究室 室長）

「陸域生態系モデルによるネガティブエミッション研究について」のタイトルで、植物の生態学、陸域の生態学に基づいて構築されたモデルにより、どのようにネガティブエミッションの研究に貢献できるかについて話題提供をする。今回は陸域生態系モデルの話と、それをさらに気候モデルとつなげた地球システムモデルを用いた研究の話、ネガティブエミッションについてCO₂の固定とメタンの話、最後に私が代表のデジタルバイオスフェアについて紹介する。

エジプトのシャルム・エル・シェイクでCOP27に参加してきた。メインの仕事がジャパンパビリオンのサイドイベントであったが、COP27の温暖化対策に関するハイレベルな会合で、特に各国が提出している排出削減の目標、NDC（国が決定する貢献）をより野心的な方向に持っていく大きな目的があるが、直前に出された統合報告書で、現状では2℃以上の温度上昇が生じてしまい、1.5℃、さらにはネガティブエミッションにはおぼつかないような規模であることが改めて明らかになっている。

また、その会期中の11月11日に、毎年世界の二酸化炭素の収支の統合報告であるグローバルカーボンプロジェクトの最新版¹が発表された。その中でも、陸域生態系は、年間11ギガトン（Gt）あるいは11ペタグラムのCO₂、炭素量に直すと3ペタグラム（Pg = 10¹⁵ g）の吸収量となっている。（図2-1-1）これをどのように活用していくかということも今回の趣旨になるが、一番注目されたのは人為的な排出量が増えており、コロナで一瞬減ったもののそれが回復し、あと9年ほどで1.5℃の許容排出量を超えてしまうことである。その中でどのようにネガティブエミッションを実現していくか大きなテーマになると思う。

1 Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I.T., Olsen, A., Peters, G.P., et al. (2022). Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data* 14, 4811–4900. 10.5194/essd-14-4811-2022.

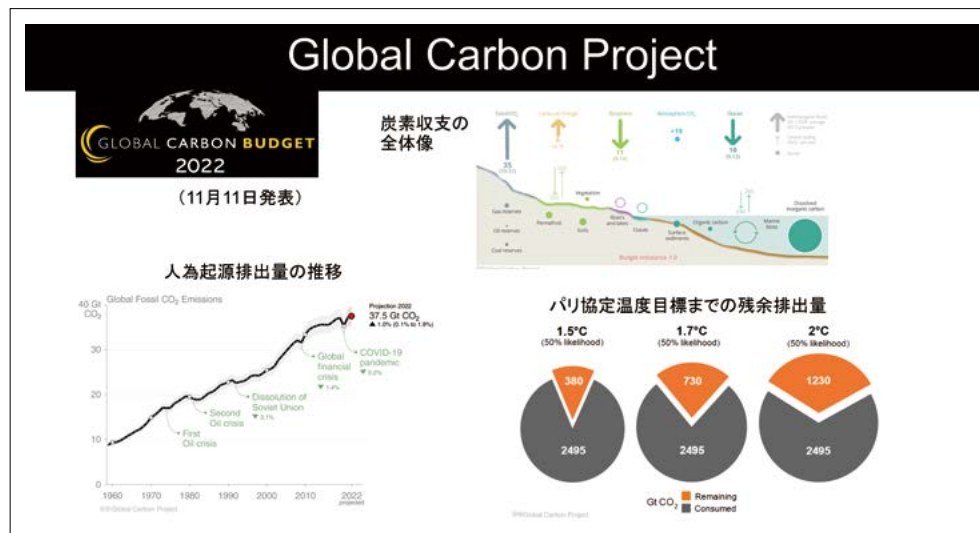


図2-1-1 Global Carbon ProjectによるグローバルなCO₂収支とそれに基づくパリ協定温度目標までの許容排出量 (Friedlingstein et al., 2022)

私の専門は陸域生態系のモデルであり、炭素循環・窒素循環などの物質循環を扱うモデルを構築してきた。陸域生態系は、光合成でCO₂を吸収し、呼吸でCO₂を放出するが、光合成が呼吸を上回っている期間は、いわばネガティブエミッションになっており、それを大きくすることが一つの課題となる。

このモデルは、VISIT² (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) と呼ばれているが、陸域生態系の炭素プールをコンパートメント化し、その間での炭素のフローであるとかを数式化して解いていく。また窒素も同様である。気象条件や土地利用の条件などを入れることで、その生態系でのCO₂の交換量、メタン、N₂Oといった温室効果ガスの交換量が出てくる。もちろん土壌炭素も出てくる。(図2-1-2)

- 2 Inatomi, M., Ito, A., Ishijima, K., and Murayama, S. (2010). Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems* 13, 472–483. 10.1007/s10021-010-9332-7.

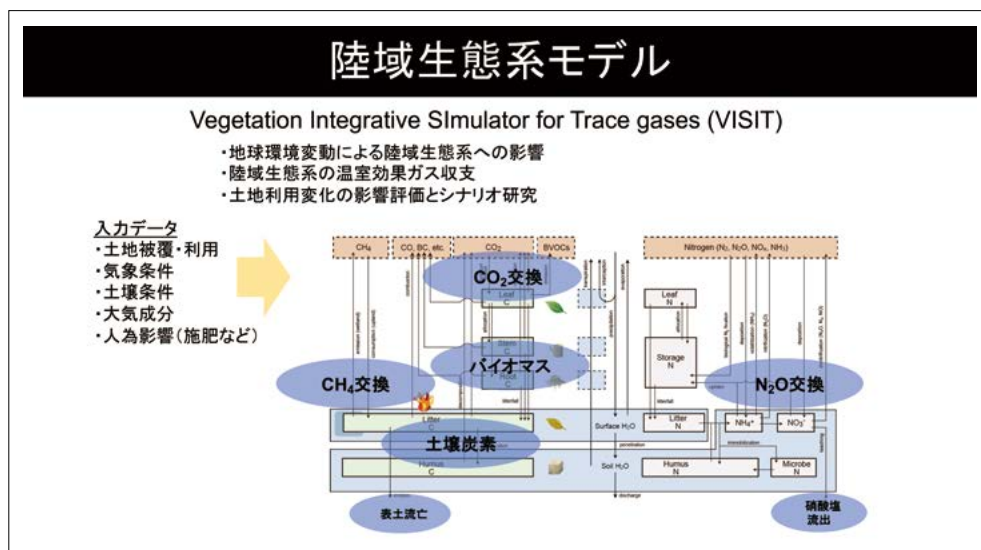


図2-1-2 陸域生態系モデル（VISIT）の構造と推定可能なネガティブエミッション関連変数（Inatomi et al., 2010）

これは地球環境変動が起こったときに生態系への評価から出発しており、それを観測データにより高精度化していく中で、温室効果ガスの収支評価の用途へも最近は重要になっている。また、さらには植林を含む土地利用変化の影響やシナリオ研究にもこのモデルを応用している。

計算例を示す。（図2-1-3）グローバルに0.5度メッシュで計算³しており、2000年代、最近の状況を示しているが、左側は光合成によるCO₂吸収量を示しており、赤い場所が熱帯多雨林で非常に高い生産量であり、1ヘクタール当たり年間20トン以上、30トン程度の吸収量である。温帯では温度が下がり、日射量も下がるので、10トン程度ぐらいとなり、亜寒帯ではさらに落ちる。乾燥地では主に水の制限によりCO₂の吸収量が落ちる。全球合計で陸域だけの結果で年間133ペタグラムである。これは人為的な放出量の大体12～13年分に相当する。

3 Ito, A. (2019). Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment. *Earth System Dynamics* 10, 685–709. 10.5194/esd-10-685-2019.

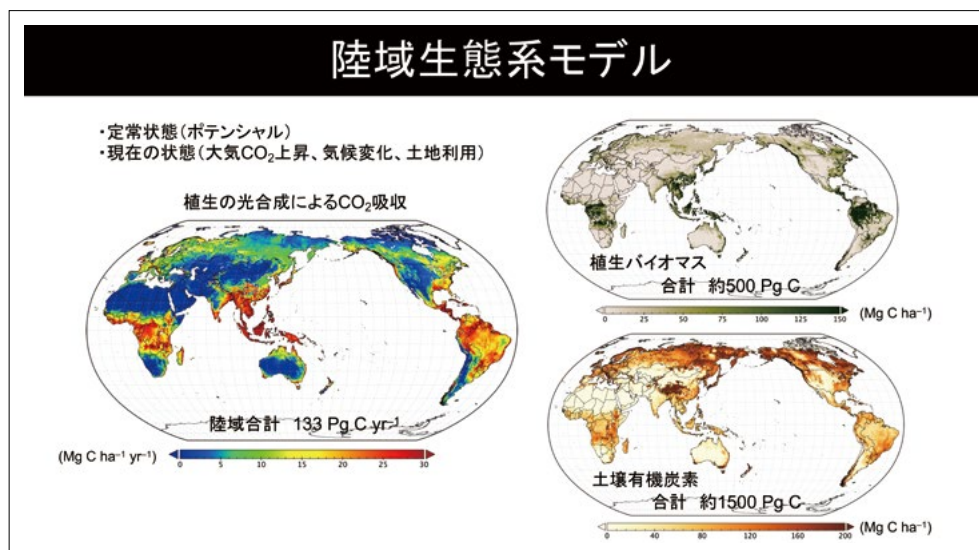


図2-1-3 VISITモデルで推定された光合成CO₂吸収、植生バイオマス、土壌炭素のグローバルな分布（Ito, 2019）

先ほどのモデルを解くことで、バイオマスの分布、土壌炭素の分布も推定することができる。同様に、熱帯多雨林にバイオマスが多いということが明らかに出てくる。土壌炭素はまた全く違うメカニズムが働いており、温度が低い亜寒帯林やツンドラ地域、湿原に多くの炭素がたまる。逆に熱帯は温度が高いために分解が進み、土壌の貯留量が少なめになる。このため生態系全体の合計では、熱帯が必ずしも高いというわけではなく、むしろ亜寒帯のように寒いところが全体としての貯留量が多い場合もある。

このようにモデルにより、どの場所でどれくらいのCO₂吸収量があるか、炭素ストックのポテンシャルがどれくらいか、その環境変動が起こった場合、どの程度増減するかなどを評価できる。

陸域でのCO₂の吸収で一つ重要なのは、かなり年々変動が激しいことである。長期的にCO₂濃度が上がっているため、それが施肥効果をもたらし、陸域への吸収量は増えているが、例えば温暖化が起こって温度上昇の効果が働く、あるいはエルニーニョ現象で干ばつや熱波が来る、あるいは人為的な森林破壊が起こることなどで、年々の吸収量が変化し、場合によっては放出側に回ることもある。

そういった複雑な年々変動はあまり分かっていなかったが、最近の研究によってメカニズムが明らかになり、大体は変動をモデルの中でシミュレートできるようになってきている。どの場所でどの要因が効いているかなどの、要因分離の評価がこのモデルで行うことができる。（図2-1-4）

また、予測もこのモデルで行われており、ISI-MIPという影響評価モデルの相互比較プロジェクトの研究例がある。これはIPCCが出しているCMIP5やCMIP6の結果を入力データにして、2100年までの生産力や炭素の貯留量の変化をモデルでシミュレートした例である。これはアジアの例であるが、アジア地域、南アジア、東南アジア、東アジア地域でRCP2.6という温暖化を抑制するシナリオとRCP8.5のBAUに近いシナリオの場合で、どれくらい炭素の収支が変わっていくかを示している。全体的にアジア地域では生産力も増え、炭素ストックも増える傾向にはあるが、モデルによる応答感度などが違うため、モデルによって定量的な評価というのは変わってくることが分かる。このようなシミュレーションを行うことで、生態系によるネガティブエミッションの基礎情報を提供できるのではないかと考えている。

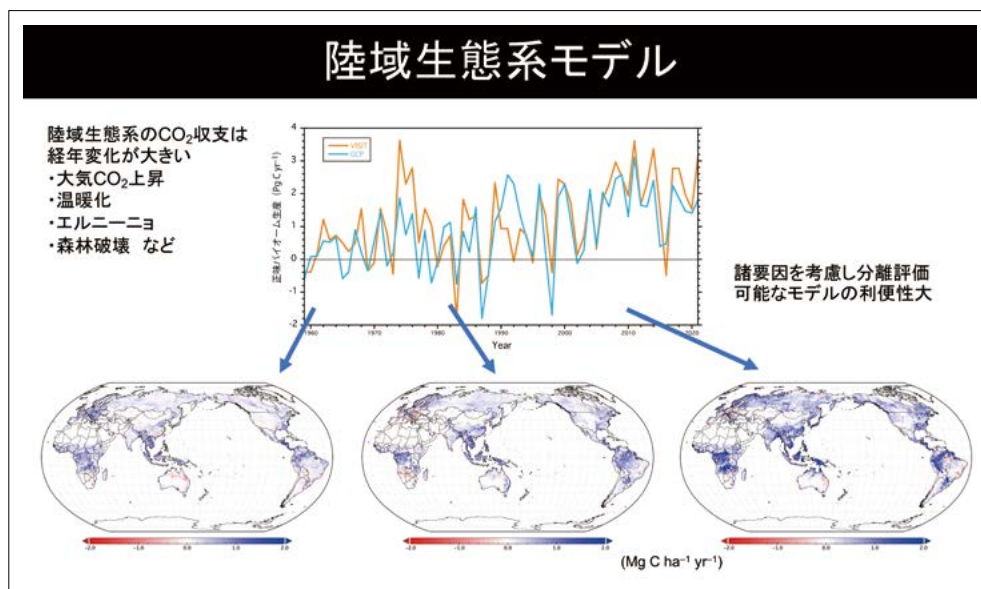


図2-1-4 陸域生態系CO₂収支の年々変動と変化の分布（モデル推定）

（VISIT: Ito, 2019; GCP: Friedlingstein et al., 2022）

ここまではどちらかというと生態学的な話で、社会・経済的な要素がかなり少なかったが、実際に考えていく中では、植林や土壌への炭素貯留のそれぞれのオプションがどれくらいのポテンシャルを持っているか、どれくらいのコストが必要かということを考えなければならない。私の研究の中では直接は扱っておらず、他の研究を参照した。例として、ドイツのSabine Fussらの研究者が多くの研究のレビューとして、植林では大体3～5ペタグラムぐらいのポテンシャルがあり、コストとしてはトンCO₂当たり50ドルぐらい必要ということをもとめている。

またネガティブエミッションの実施によりどれくらいのリスクがあるかも評価しなければならない。ここでは生物多様性への影響として、土地利用変化や外来種の侵入、あるいは土壌や大気の汚染、資源に対するプレッシャーなどが起こり得ることをまとめた研究例⁴を示している。（図2-1-5）

さらに最近Nexusという概念が出されており、ネガティブエミッションのような気候変動の対策により、食料や水資源あるいは人間健康などの別なセクターに影響が及ぶことが言われており、そのような影響の連鎖を見ていく必要がある。IPBES（Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services（生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学—政策プラットフォーム））がNexusの報告書を執筆中であり、私もそのリードオナーサーで参加しており、そのようなNexusに関する分析も進んでいるという話をした。

4 Dooley, K., Harrould-Kolieb, E., and Talberg, A. (2021). Carbon-dioxide removal and biodiversity: A threat identification framework. *Global Policy 12 (Supplement 1)*, 34–44. 10.1111/1758-5899.12828.



図 2-1-5 ネガティブエミッション対策実施に伴うリスク
(Dooley et al. 2021)

社会・経済的な要素を入れた私の研究として環境省の推進費のS10の課題の中で実施した例⁵がある。（図 2-1-6）

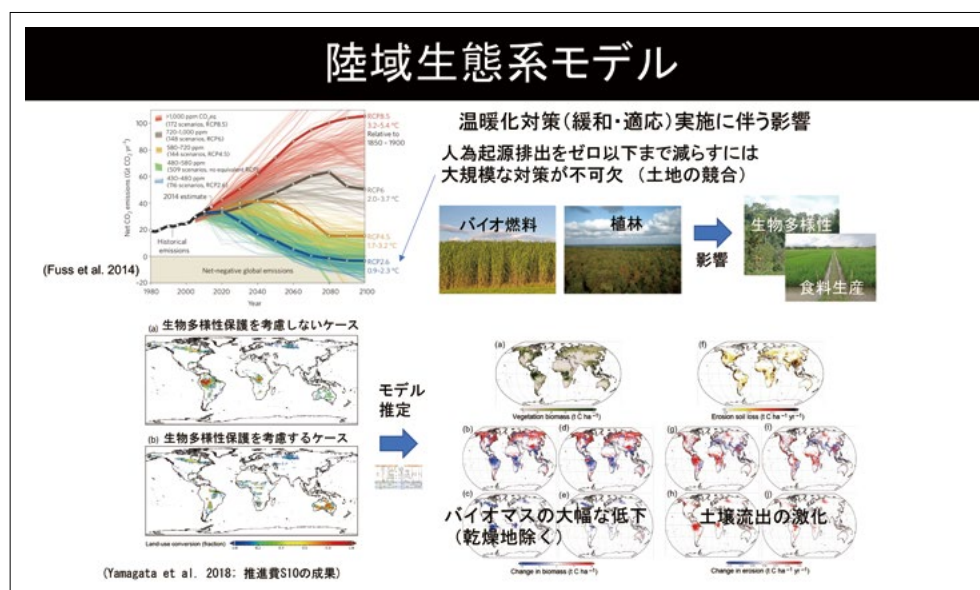


図 2-1-6 ネガティブエミッションに向けた対策実施に伴う影響評価例。
(Yamagata et al. 2018)

5 Yamagata, Y., Hanasaki, N., Ito, A., Kinoshita, T., Murakami, D., and Zhou, Q. (2018). Estimating water-food-ecosystem trade-offs for global negative emission scenario (IPCC-RCP2.6). Sustainability Science 13, 301–313. 10.1007/s11625-017-0522-5.

これはネガティブエミッションのためにバイオ燃料の栽培を拡大した場合に、どの程度の影響が生態系に及ぶかを評価したものである。先ほどのモデルに別な社会・経済的なモデルで予測したバイオ燃料作物の栽培のデータを入力することで、例えば熱帯林が大幅に伐採された場合には森林バイオマスの大幅な低下が起こってしまう、逆に熱帯林は保護し他の場所でバイオ燃料の栽培をするとそれが土壌流出の増加を招くなどの計算結果が得られている。

次に、地球システムモデルの話をする。今までの話題は陸域生態系の中で閉じた話であるが、陸域生態系の炭素収支が変わると、それが大気CO₂濃度も変えて、気候を変えてしまうという、そういったフィードバック効果があり、それが地球システムモデルと呼ばれている。昨年ノーベル物理学賞の真鍋先生が開発された大気大循環モデルに炭素循環のモデルをつなげたようなモデルであり、そのようなモデルにより現在、世界中で予測が行われている。ここではJAMSTEC、海洋研究開発機構が開発しているMIROC-ES2L⁶というモデルに我々のモデルをつなげて評価した研究の話である。（図2-1-7）

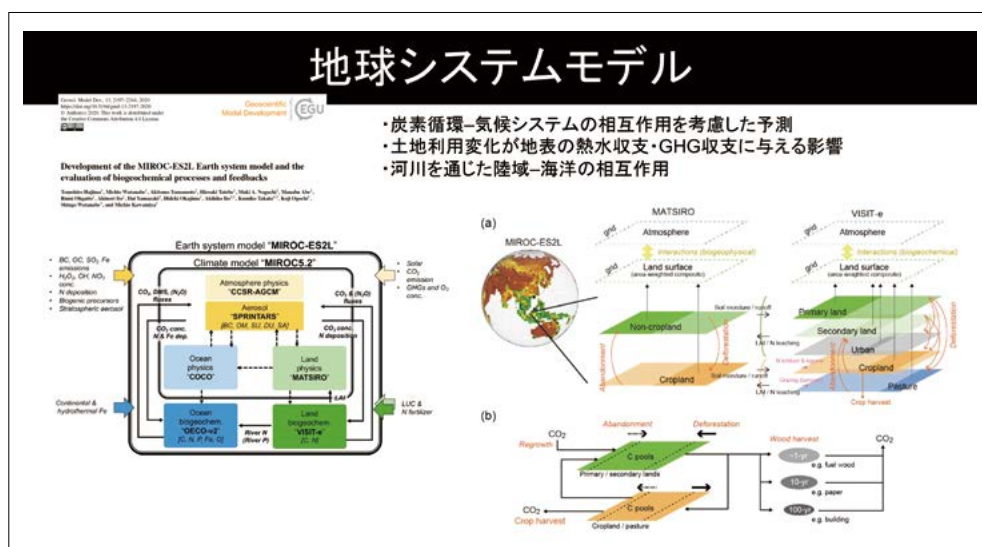


図2-1-7 土地利用を組み込んだ地球システムモデル（MIROC-ES2L）の説明

そのような地球システムモデルを用いた計算はいろいろと行われているが、ここでは土壌炭素の例、4パーミルと呼ばれる土壌炭素を0.4%ずつ毎年増加させることで人為排出量を相殺できるというイニシアチブについて、それが地球システムモデルの中で達成可能かを検討⁷したものである。ここでは15種類の地球システムモデルの分析結果を集計し、土壌炭素量の変化の傾きをみたものである。15種類の中には4パーミルを達成するモデルはなく、せいぜい1パーミルぐらいの土壌吸収量になる。4パーミルには届かないものの、その4分の1でも特段の管理や炭素固定の施業をしない状態の土壌で達成できる結果であり、それなりの機能を持っていると言える。（図2-1-8）

- 6 Ito, A., and Hajima, T. (2020). Biogeophysical and biogeochemical impacts of land-use change simulated by MIROC-ES2L. Progress in Earth and Planetary Science 7, 54. 10.1186/s40645-020-00372-w.
- 7 Ito, A., Hajima, T., Lawrence, D.M., Brovkin, V., Delire, C., Guenet, B., Jones, C.D., Malyshev, S., Materia, S., McDermid, S.P., et al. (2020). Soil carbon sequestration simulated in CMIP6-LUMIP models: implications for climatic mitigation. Environmental Research Letters 15, 124061. 10.1088/1748-9326/abc912.

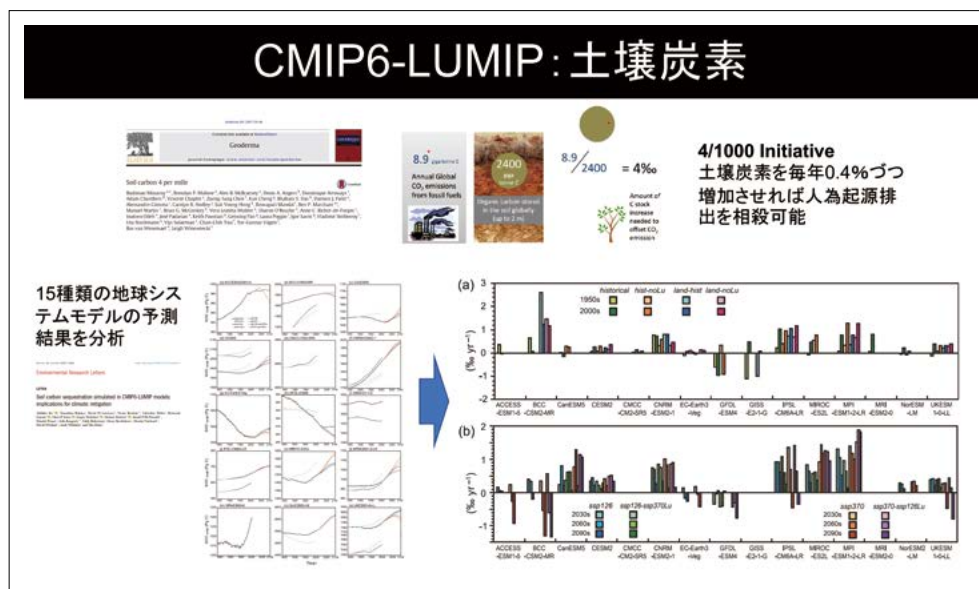


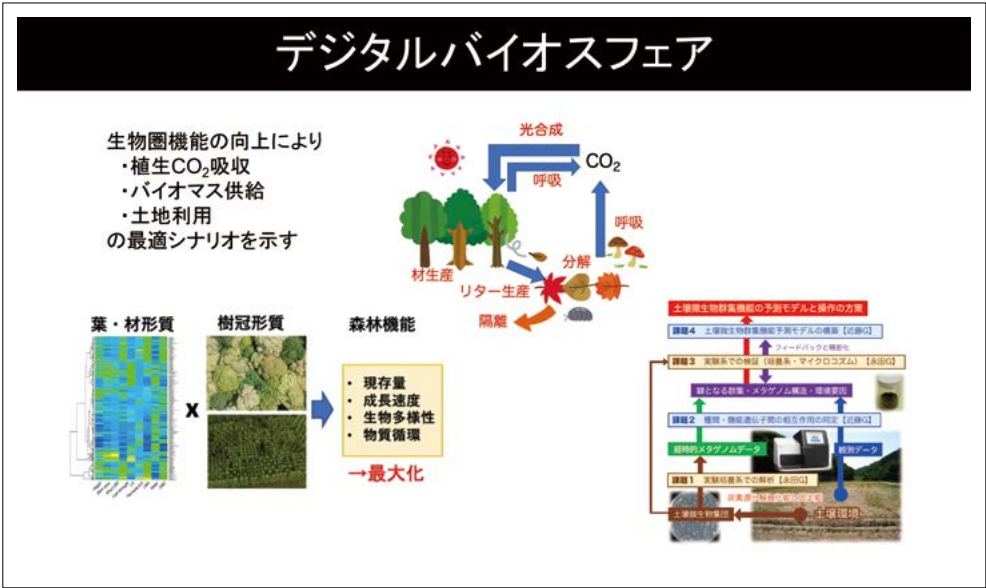
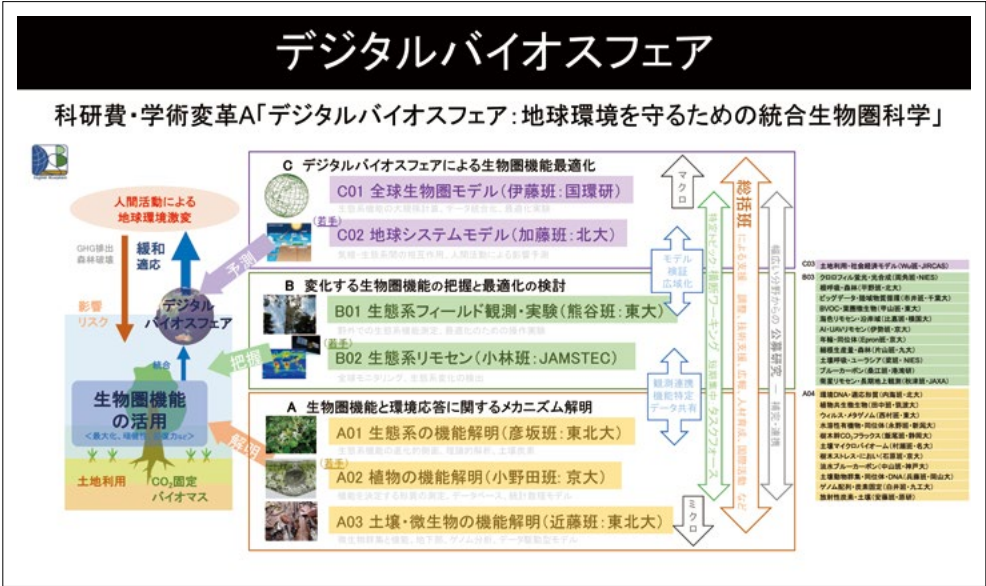
図2-1-8 土壌への炭素固定に関する地球システムモデル予測結果の分析例
(Ito et al., 2020)

またイギリスの研究の例として、ネガティブエミッションを模したような、大気CO₂濃度の低下の影響をみた場合、濃度が低下している時期に生態系からの炭素は放出となっている。このためネガティブエミッションを工学的に行ったとしても、それを相殺するような生態系からの放出が起こる可能性もあるといった複雑な現象も起こる可能性があることなどが、地球システムモデルの研究からは言える。

次にメタンに関する話をする。メタンも温室効果ガスとして重要であり、その削減もネットゼロ以上の達成には不可欠である。特に昨年のCOP26ではグローバルメタンプレッジと呼ばれる世界全体のメタン排出削減について各国ビジョンで同意されており、そういった中でもメタンは注目されている。

国環研でもメタンに関する研究が進められており、これはアジア地域でのメタンの収支をいろんなデータを集計したものであり、それに基づくことで、どの地域のどのセクターを優先的な排出削減の対象とすべきかという検討が進められている。メタンのネガティブエミッションは吸収であるが、実際はメタンの吸収の大部分は大気中での化学反応であり、ごく一部は土壌中でのメタン酸化菌による吸収による。工学的にはゼオライト（沸石）を用いた化学反応によって大気中のメタンをCO₂に転換させることで、メタン削減を進めることが提唱されている。そういったメタンの吸収によって、どれくらい温暖化の抑制につながるかを、先ほどの地球システムモデルを用いて検討しており、大規模に6ペタグラムのメタンを吸収した場合、大体1℃程度の温暖化の抑制が可能であると言われている。このようなメタンの削減ポテンシャルなども今、評価されている。

昨年から始めたデジタルバイオスフェアと呼ばれる科研費の学術変革の話をする。これは地球環境を守るための統合生物圏科学であり、生物圏の機能を活用する、先ほどのCO₂の吸収効果やバイオマスの供給効果機能などを向上させ活用することで地球環境の激変を防ごうという話である。国立環境研究所や各大学などの研究所の人が参加し、現地での観測やメカニズム解明、モデル開発などを進めている。植物の光合成機能やバイオマスの供給機能を決めているそれぞれの形質について分析を行い、その形質に基づいて、どの形質を操作することによって機能を向上させることができるかということなどを検討していく。また、土壌については、土壌炭素量を決めている土壌微生物の鍵を特定して、それをどのように操作すれば土壌炭素量を増大させることができるかということなども研究をしている。最終的には全球で1キロメートルメッシュという高い分解能のモデルを用いて、どの場所ですりょういうふうな操作管理を行うことで生態系の機能を最大限活用することができるかなどのシミュレーションを行っていく予定である。今進めているこのような研究が、恐らくネガティブエミッションにも関係が深い課題になり得るのではと考えている。(図2-1-9～図2-1-11)



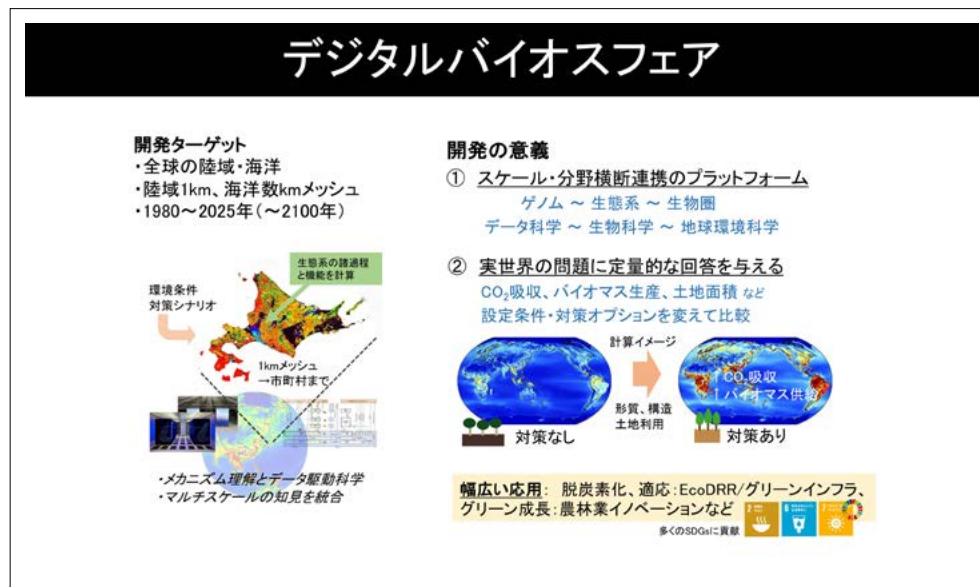


図2-1-11 デジタルバイオスフェアプロジェクトで実施される生物圏機能評価に関するモデル開発の説明（申請書より）

最後にCO₂の吸収量やバイオマス生産量などのネガティブエミッションを改善する指標について、評価可能なモデルをつくってきており、それに関する研究が進められている。そのような基礎研究だけは進んでいるが、技術の開発・普及、社会実装などについては応用的な研究も同時に進める必要があると考えている。（図2-1-12）

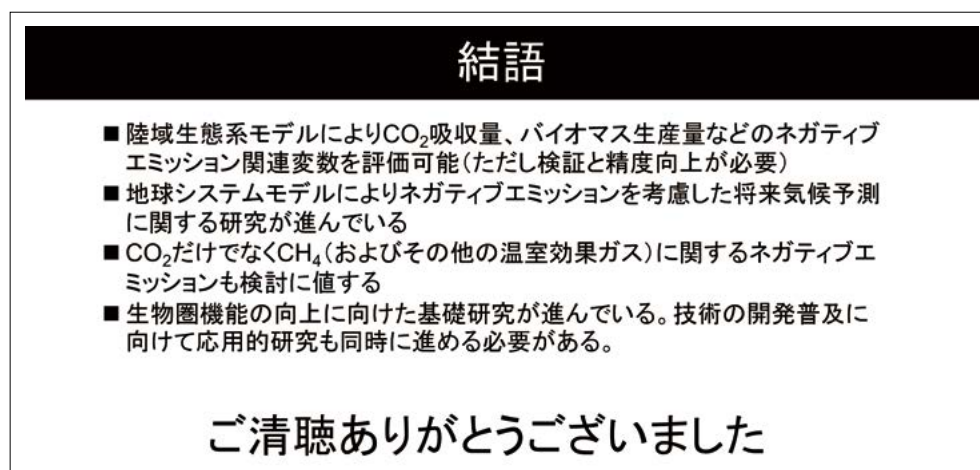


図2-1-12 まとめ

【質疑応答・コメント】

Q：土壌炭素4パーミルのイニシアチブについて、具体的な方法は？

A：現在、そのための研究開発が行われている段階である。大部分の施策は自然生態系ではなく、農地の土壌のように人間の管理が行き届けるところでやるものなので、例えば耕起（tillage）の方法を変える、あるいはバイオ炭の投入、微生物の操作などの大胆な手法が必要と思う。自然の生態系の中では毎年4パーミルずつ増やすというペースには及ばない。

Q：メタンの影響はCO₂と比較した場合、どれぐらいのインパクトか、数字はあるか。

A：メタンは、単位量当たりの温室効果はCO₂より高く、期間が短くなるほど高い。20年程度だと大体80倍、100年で大体25～30倍。2030年～2050年の近未来だと、CO₂と同等レベルの効果。100年、例えば21世紀末までだと、大体3割程度。なおメタン削減は対流圏オゾンの生成なども関連し、大気質の改善ともコベネフィットがある。

Q：メタンの吸収においてCCSのような発想の研究はあるか。

A：大気中のメタンは濃度が低いいため、それを吸収するというよりは、発生源から高濃度のガスを直に回収して使うことが現実的な考え方である。例えば廃棄物、埋立地から出てくるメタンをバイオガスとして収集・回収してバイオガス発電に使うなどがある。

Q：モデルの検証と精度向上が必要とあるが、現状どの程度の精度であり、今後どの程度向上が必要か。

A：精度の評価が難しい。直接観測結果と比較、例えば日本全体、地球全体というスケールでは難しく、同じような他の十数個のモデルとの比較では±20%程度ばらつく。これを数%までにすることはまだできていない。これから考えると10%、20%の誤差があるのが現状。それが±5%ぐらいまでになると、もう少し政策にも使ってもらえると思うが、まだそこまでは精度が至っていないし、観測との比較もまだ十分に行われていないのが現状。そのような研究がまだまだ必要。

Q：そのためにはどういう研究が必要か。

A：一つは、現地での陸域フラックス観測点が世界中に何百点もあり、日本にも二、三十か所あるが、これらの観測場所をモデルで評価し、どの場所がずれているかを観測との比較で明らかにする。その上でその部分のパラメータや定式化を改良することで重点的に高精度化する必要がある。1か所2か所では駄目で、異なるタイプの生態系で、熱帯多雨林から温帯林、亜寒帯林など、多くの実施が必要。もう一つは、人工衛星のデータの活用である。現在人工衛星のデータの種類も精度も上がっているが、それを十分モデルに今まで反映できておらず、それを取り入れたい。最近注目されているのは、植物のクロロフィル蛍光、植物が光を受けたときに一部のエネルギーがクロロフィルから蛍光として放出されるが、これを人工衛星で測れるようになっている。それを測ることでモデルに反映させ、光合成のCO₂の吸収量の推定精度を上げていくための研究が行われている。そのようなことでモデルの精度が徐々に上がっていくと思う。

Q：デジタルバイオスフェアにおいてネガティブエミッション技術の推進のために必要な観点から国際的に認められそうなモデルや技術など、国際連携した場合における日本の強み、日本が負けない技術、サイエンスとして盛り上がっている分野がどこなのか。また、例えばある部分は海外のデータが豊富で、一部これを使うなど、国際的な連携の中での日本の強み、ここは他国が強いといった部分はあるか。

A：サイエンスとしての興味は、先ほどのクロロフィル蛍光の話もあるが、最近の注目は、CO₂の施肥効果と呼ばれる、大気中のCO₂濃度が上がることで植物の光合成を促進する量が、観測などから最近低下してきたと言われている。その原因は植物に対するCO₂の飽和ということが一つ考えられているし、もう一つは窒素の栄養源の制限も言われているが、まだ分かっていない。さらに、原因が分かっていないがゆえに、モデルの中でもうまく再現できていないのが現状。そのためCO₂の施肥効果と時間的な変化について、メカニズムを明らかにした上でモデルに取り入れることが、現在重要な課題になっている。もう一つは、最近ゲリラ豪雨や熱波のような極端現象が注目されており、それが生態系にどのように影響を与えるかが、うまくモデルの中に取り入れられていない。過去に起こったことがない激しい環境変動の影響について生態系がどのように応答するかは、原理的にも予測が難しい。それを生理的なメカニズムから積み上げたモデルを用いることで、少しでもよく予測できるようにしたい。その一番の極端な例として、植物、特に森林などが枯死、ダイバックと呼ばれている現象が起こると言われているが、そういった地球臨界現象（ティッピングエレメント）が起こったときに生態系がどのように応答するか、炭素循環が変わるかをシミュレートすることは、大きなチャレンジになっていくと思う。

A：世界で競争において日本が頭一つ抜けているようなところはないものの、先ほどのデジタルバイオスフェアは、1キロメートルメッシュで世界でも類のない高い分解能を持たせることにより、例えば市町村レベル、自治体レベルまで解像することができる。それによりローカルな現象もみることができ、それを踏まえた対策も行うことができる強みにつながると考えている。またメカニズムを掘り下げること、今まで再現できなかった現象を予測に反映することが可能になることが期待される。

2.2 地上観測・衛星観測・モデリングを統合した陸域における温室効果ガス吸収・排出量の把握

市井 和仁（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 教授）

地上観測と衛星観測（リモートセンシング）を組み合わせた、陸域における温室効果ガスの吸収・排出量の推定方法について、日本で行われている取組なども紹介しながら説明する。私自身は千葉大学環境リモートセンシングセンターに所属しており、一つの専門は衛星観測である。衛星観測から地球表層環境を知ること、特に陸域生態系の変動モニタリングを重要な研究テーマとしている。またAsiaFlux、JapanFluxと呼ばれる大気と植生、陸の間のCO₂の収支を測る現地観測ネットワークの委員長をしている。これらの状況も併せて説明する。

まずはじめに、陸域、特に広域における温室効果ガスの吸収や排出量の把握のために実施されていることを図2-2-1に示す。観測を基盤とした手法として、一つはトップダウンアプローチと呼ばれ、CO₂濃度などの大気中の濃度を測定し、それがどこから来たかを逆に推定する手法である。例えばCO₂濃度を日本の観測衛星GOSATなどを使って測ることも可能になっている。もう一つはボトムアップアプローチと呼ばれ、地表面の一個一個のプロセスや場所で、CO₂の吸収排出量を集計し、全体としてのCO₂の流れ、どれだけの収支があるかを求めていくアプローチである。この場合、主に地上の観測でフラックス（流れ）の量を計測する。衛星だと直接の流れの量は分からないが、地表の葉やバイオマスの量を把握することができる。これらを組み合わせて、温室効果ガスの吸収・排出量を推定している。

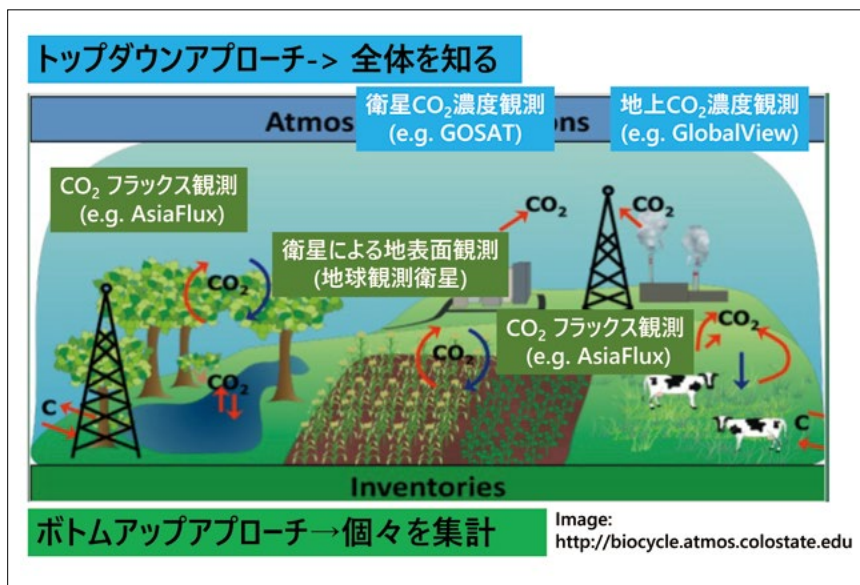


図2-2-1 陸域における温室効果ガス吸収・放出の把握の概要

背景の図引用 <http://biocycle.atmos.colostate.edu>（2023年2月23日アクセス）

CO₂の吸収・排出量の把握を考えるため陸域の炭素循環のシステムとして植生と土壌によるCO₂に着目する。植物は図2-2-2に示すように、光合成によりCO₂を吸収、呼吸によりCO₂を放出する。さらに土壌からの有機物分解、他には土地利用変化や火災などの攪乱の効果、河川の流出などに伴った溶出という効果が必要になる。

陸域におけるCO₂の吸収量・排出量を把握する上で2つのアプローチがある。一つはバイオマス、または土壤炭素などを直接的に測るというアプローチである。全体量が分かり、それにより、例えば毎年あるいは5年に1回測ることでその変化量が分かる。蓄積量とその変化量を測るという方法である。もう一つの変化を測る方法として、例えば大気・陸域間での交換量を測ることである。

広い範囲で温室効果ガスの吸収・排出を推定するには、サイト観測が重要である。リモートセンシングが必要となる。生態系モデルなどのモデルも必要となる。これらを組み合わせて、地上観測・衛星観測・モデリングを相互に補強しながら実施する必要がある。

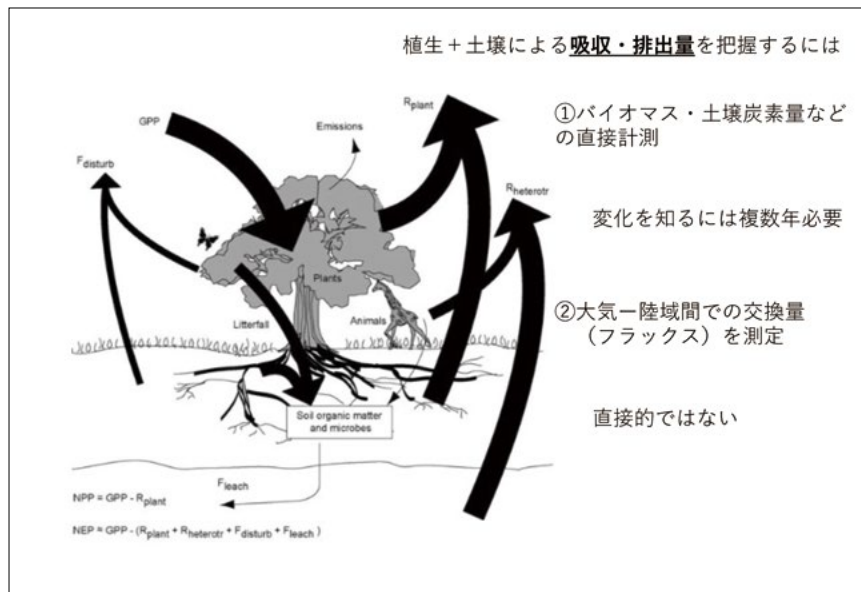


図2-2-2 陸域におけるCO₂の流れ（炭素循環）

引用（図） Chapin et al. (2002)

観測のネットワークに関して説明をする。陸域生態系は、空間的に不均質性が高く、気候帯によっても違うため、様々な場所での観測が必要である。例えば日本全体でCO₂、温室効果ガスの収集が重要であり、そのため観測ネットワークが整備されている。これらの代表的ネットワークは、主には日本では大学、研究機関などが実施しているが、それらが連合して、より密なネットワークを構築しようとしている。代表的なものとして、JaLTERという長期生態系ネットワーク、もう一つは日本のフラックス研究ネットワークJapanFluxがある。さらに生物多様性のネットワークJ-BONもある。今回はJaLTERとJapanFluxを説明する。

生態系において、木が光合成をして呼吸をして分解が起こるが、先ほどの生態系ネットワーク、JaLTERは、生態系の仕組みを解明したいことという目的があり、例えばバイオマスをそのまま測る、葉っぱの量を測るなど、自動化が難しいところを扱うことが多い。そのようなものを測定して、生態系の仕組みの解明を目指している。もう一つのJapanFluxは、森林の上まで行くタワーを建てて、そこにセンサーを置き、大気と陸の間のCO₂、水、熱などの交換量を測定している（図2-2-3）。これは微気象学の分野に基づいた手法であり、風の流れ、濃度を測ることで、交換量を測るということになる。JaLTERとJapanFluxは、ばらばらではなく、共同でやっていることが多い。JapanFluxでは日本で38、世界で数百あり、1,000を超えるぐらいのサイトがある。観測データを公開しているのは200～300ぐらいである。

このようなネットワークを構成する各サイトは基本的には各研究者が自主的に運営しているものがほとんどである。これに定常的に予算が措置されている状況ではなく、いろいろな予算を組み合わせ、裏で支えてもらいながら手弁当のような形で運営している。

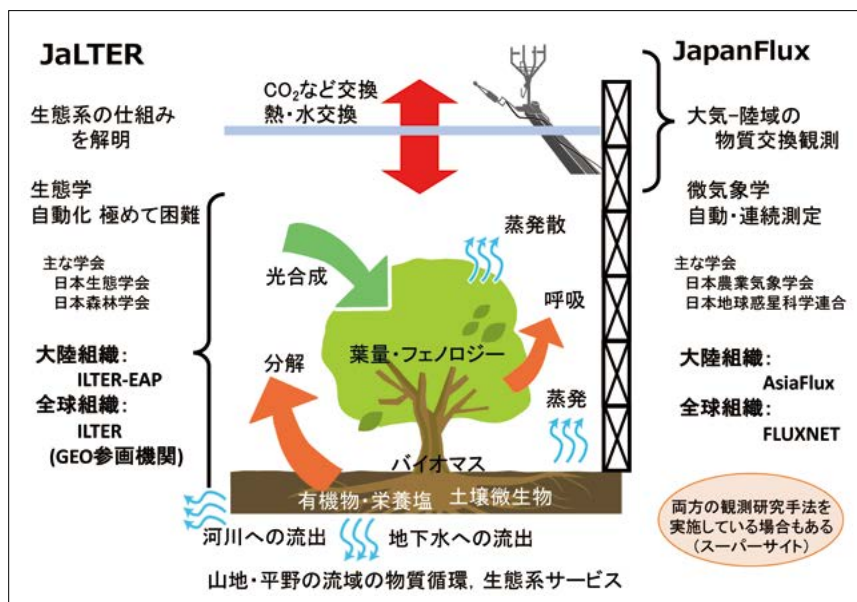


図2-2-3 JaLTER, JapanFlux各ネットワーク観測研究の特徴

次に、中身についていくつか動向を紹介する。一つは、地上観測サイトのデータである。地上観測サイトのデータのみでは広域の評価が難しいため、広域化する部分を機械学習により実現させることがある。地上観測点をいろいろと集め、リモートセンシング、衛星データを集め、モデルをつくり、広い範囲について推計することを実施している。（図2-2-4）

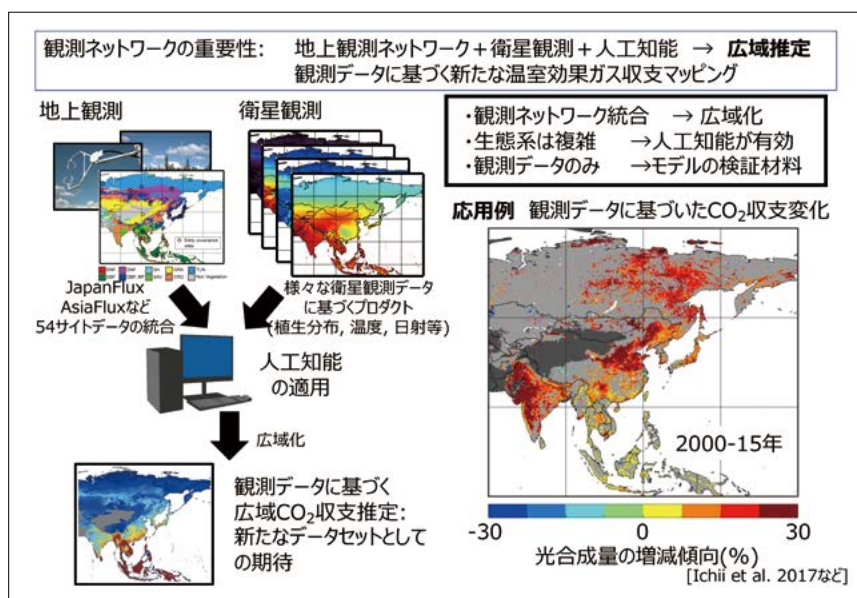


図2-2-4 地上観測・衛星観測と機械学習を用いた炭素フラックス広域推定手法の概念

この方法のメリットは地上観測のネットワークを比較的簡単に組み合わせることで、生態系の複雑なプロセスなどを、機械学習・人工知能が吸収してうまくいくこともある。これらは観測データだけを使っているため、モデルの検証データとしても使える。アジアの例以外にも韓国のグループに私の手法を移行し、韓国の国内の

CO₂の流れなどを実施した研究もある。国ごとになると、例えば1キロなど、かなり細かい、衛星の分解能そのままに近いデータが出来上がる。

2つ目として、静止衛星から陸域観測である。これまでの衛星観測による陸域モニタリングの分野では、極軌道衛星と呼ばれる1日1回の観測が定番となる衛星での観測が主要である。しかし、雲が多い場所では、長期にわかって地表面を観測できないという問題があった。それが天気予報でもおなじみの日本のひまわり8号の静止衛星が新たな地球観測分野を開こうとしている、気象衛星の性能が大幅に向上しており、雲の識別だけではなく、陸面が見える精度を持つことで、今まで雲が多かった場所でも植生が詳細に見えるようになったことも、一つの最近のトピックである（図2-2-5左）。

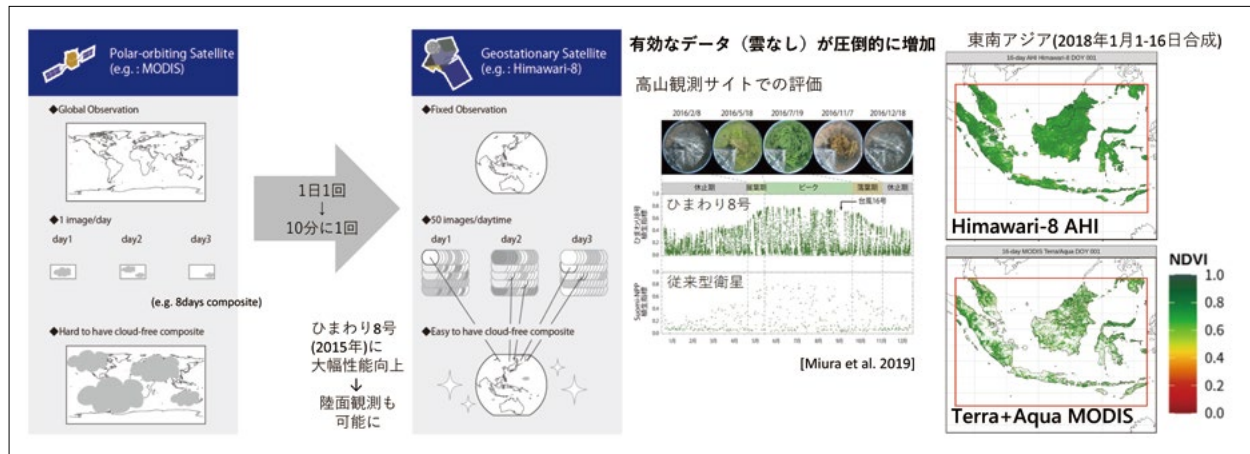


図2-2-5 静止衛星による陸面観測の利点と成果の概要

いくつかの研究例を紹介する。例えば高山サイトでは一日一回ではまばらなデータとなる（図2-2-5）。値が小さいところは全部雲の影響を受けているところであり、実質の植生の変化は、この上端に沿うものとなる。静止気象衛星ひまわり8号の場合、10分に1回という高い観測の頻度のおかげで、ほぼ連続した値が取れてくる。この応用の一つが熱帯雨林の植生のモニタリングである。この例は2018年1月の16日間のデータを集め、雲のないデータから地図を作ると、従来型のは衛星を2つ使っていても、かなりの欠損値がある。しかし、ひまわりの場合、きれいな画像ができ、きれいな植生の状況が分かる（図2-2-5右）。

そして、3つ目については最近注目されている衛星技術として、樹高を測ることがあげられる。これは直接バイオマスに関連する計測だが、レーザーを使って、30メートル程度の直径にピンポイントで当て、戻りを見ることによって樹高が把握することができる。観測された樹高とモデルによりバイオマスに変換する。国際宇宙ステーションに搭載されているGEDIセンサーにより計測し、そのデータがGoogle Earth Engineで簡単に得られることもあり、注目をされている（図2-2-6）。日本でも同じようなものとしてMOLIが計画されている。これらの計測は、点を対象としたものであり、それを平面化するための技術開発も進められている。

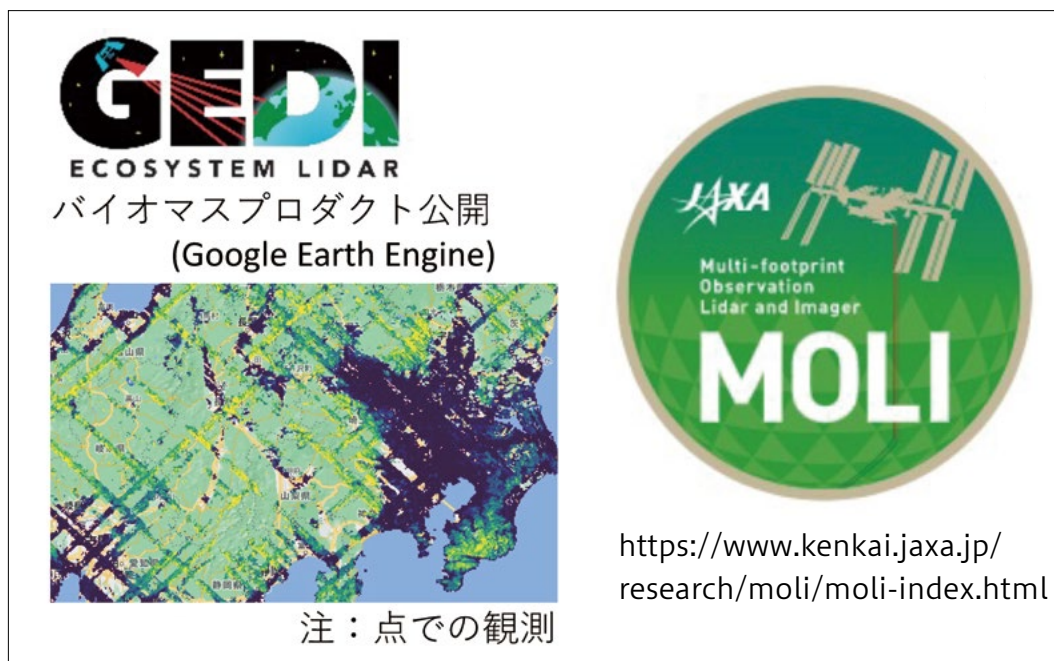


図2-2-6 衛星搭載ライダーからの樹高の推定、バイオマスの推定の例

4番目として、土壌呼吸量の推定がある。炭素収支において土壌は不確実な部分が多いとされている。土壌からのCO₂の放出量やメタンの吸収・排出量というのを直接測るアプローチがあり、日本には統一的な観測手法をもつサイトが分布している。これらを機械学習使って広い範囲で推定するようなことも可能になってきている（図2-2-7）。

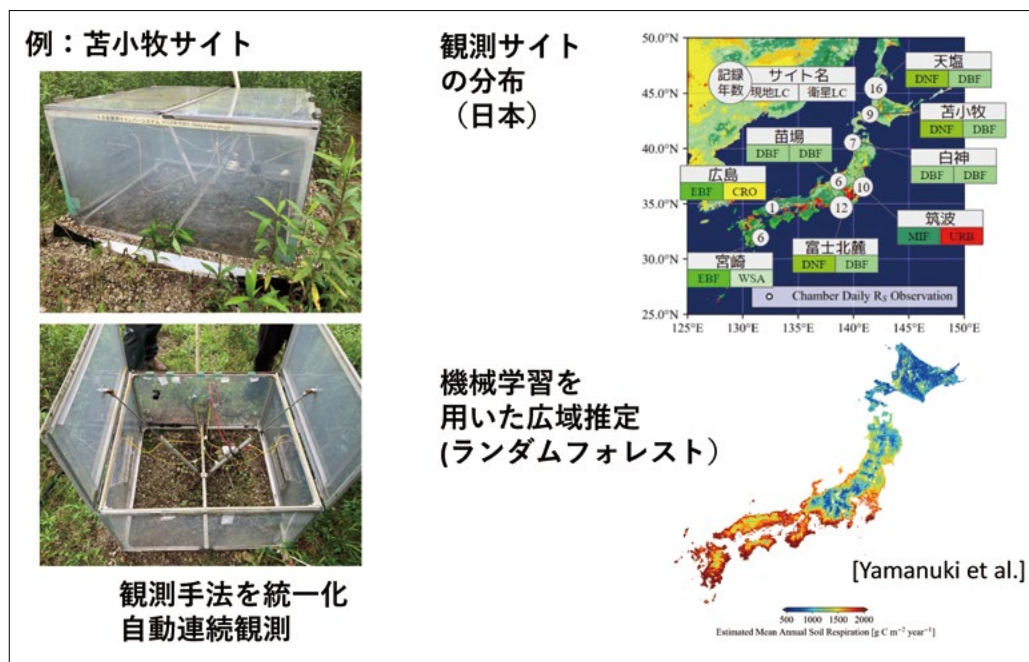


図2-2-7 土壌からの温室効果ガス吸収・放出量の計測とその応用例

最後に炭素固定を考えると、伐採や植林の炭素動態は、重要な要素である。観測ネットワーク、観測サイトレベルで、幾つかのところで攪乱を起こし（例えば森林を切ってその後に植林をするなど）、その後のCO₂の収支を観測するといった、大規模に自然の実験をしているサイトもある。北海道の一番北にある北海道天塩サイトではそのような実験をしており、伐採して20年ぐらいになるが、その期間の炭素収支を継続的に観測している。このサイトでは航空機搭載ライダーによるバイオマスの推定といった航空機リモートセンシング観測も実施し、バイオマスの推定を数年に1回規模で実施している。そのような研究が広がると日本の炭素吸収に関する理解もより進むだろう。

以上をまとめると、地上観測ネットワークがあり、一部、伐採・植林も含んでいるようなサイトもあり、ネガティブエミッションの評価には良い研究サイトがある。また、バイオマスを測るには、レーザーで樹高を測ることは進んでいるが、複数年の観測データがあることにより吸収量が分かるため、観測ではデータの継続性が問題になってくる。衛星観測については、蛍光、これまでに広く使われてきた地球観測衛星、静止気象衛星など、より多くの観測が得られるようになっている。機械学習は、観測データの量と質が向上することで、さらに活用が広がる。吸収量の増減の議論をするときには、どれだけのエリアでどの程度植生が変化したかというデータも重要になってくる。

【質疑応答・コメント】

Q：観測がボランティアベースで、ネットワーク的に行われているが、データの管理、データの集積、データパッケージとして今後いろんな研究に使えるようにする必要があると考えるが、データの整理、処理というのはどうなっているのか。国はそこに関与する必要があるのではないか。

A：そのとおりである。国の関与、もしくは、ある程度強制的なメカニズムが必要と思う。実際はデータ管理、品質管理、データ公開に関しても、今の段階ではボランティアである。諸外国の状況、グローバルな状況を見ると、データを出すところが大事になってきている。ファンドでサポートできていないので、データを集めるところ、データを処理する、そしてそれを使って解析をするところまでを含めて、何かパッケージになるとよい。諸外国の状況として、アメリカ、オーストラリア、中国、EUは観測ネットワークを気象観測のように実務的にオペレーショナルに動かすファンドが10年ぐらいの単位でついている。それによってデータをマネージするデータ管理グループも形成され、そこでデータを管理している。観測のグループ、ネットワークの立場から、そういったサポートがあるとありがたい常にある。

Q：国として、組織として必要との声は上げていないか。

A：そういう声をいろんなところで上げている。例えば文科省の地球観測推進部会など。

Q：動向4での土壌呼吸量の推定で、小さいボックスで測定できることに驚いた。この測定方法が妥当なのか、また森林の場所や土の種類が違っていると違うのではないか。日本全国の土壌の呼吸量を知る上で、この土壌の呼吸量の推定は技術としてどのあたりで、難しさがどこにあるのか

A：置く場所による代表性が少なくなるように、半径四、五十メートルぐらいに20個程度同じようなチャンバーを置いて、空間的な違いが無くする努力をしている。また、チャンバーのスタイル自体もいろいろとある。日本のグループではこの形のチャンバーを、空気が漏れないようにとか、工夫されている。チャンバーの作り方など国際的に統一できていないこともあり、グローバルでの評価が難しくなっている。まずはアジア展開をして、それから世界標準にしたいという日本の研究者もいる。

Q：炭素収支の研究対象に農耕地は入っていないか

A：森林と草原が対象であるが、農地も観測サイトはある。例えばJapanFluxの中にも水田や畑地のサイトがある。

Q：日本は非常に急傾斜が多い中で、レーザー計測の衛星観測にほかの国と違った何か技術などが求められるか。

A：日本の地形が急峻なところを意識したアルゴリズムの開発等がされている。

2.3 陸域でのバイオマス吸収量を増やすための技術的課題検討

光田 展隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門 副研究部門長）

私は産総研・生物プロセス研究部門の副研究部門長であるが、今日の話は兼務先のゼロエミッション国際共同研究センターの研究に関連すると考えている。私がやってきた植物バイオテクノロジーの研究結果に基づいて、技術的課題にどんなことが残されているかを紹介する。

IPCCの6次報告書のワーキンググループ3の報告書によると、2100年に気温上昇1.5℃あるいは2℃以内に抑えるには、バイオマスエネルギーを含む再生可能エネルギーの供給を格段に増やす必要がある。また運輸部門に関してもバイオ燃料を含む再生可能エネルギーを大きく増やす必要があると考えられている。そのため、土地の利用を大幅に変える必要があると言われている。すなわち、森林は増やし、牧草地は減らし、エネルギー作物の作付を大幅に増やす必要がある。結果的に食糧生産に使う面積は大きく減らしていかなければならないだろう。

そういった背景を踏まえたうえで、ここから先は、私が取り組んできた研究の紹介とそこから導き出される課題を説明する。今日説明する研究成果のほとんどは、JSTのALCAプロジェクトで一昨年ぐらいまでの8年半ほど実施していた研究の成果である。植物のCO₂固定能を強化した革新的バイオマス植物をつくるための研究をやってきたが、アプローチは主に3つある。ALCAでは物質合成系、すなわち、シンク能の強化をやっていた。特に木質（二次細胞壁）生産の増強である。ただ、これだけでは厳しいとも言われ、最近は光合成の強化もやっている。あとは、環境ストレス耐性も重要であり、これらを主に転写因子の操作でやっていることが私の研究の一つの特徴と思う。（図2-3-1）

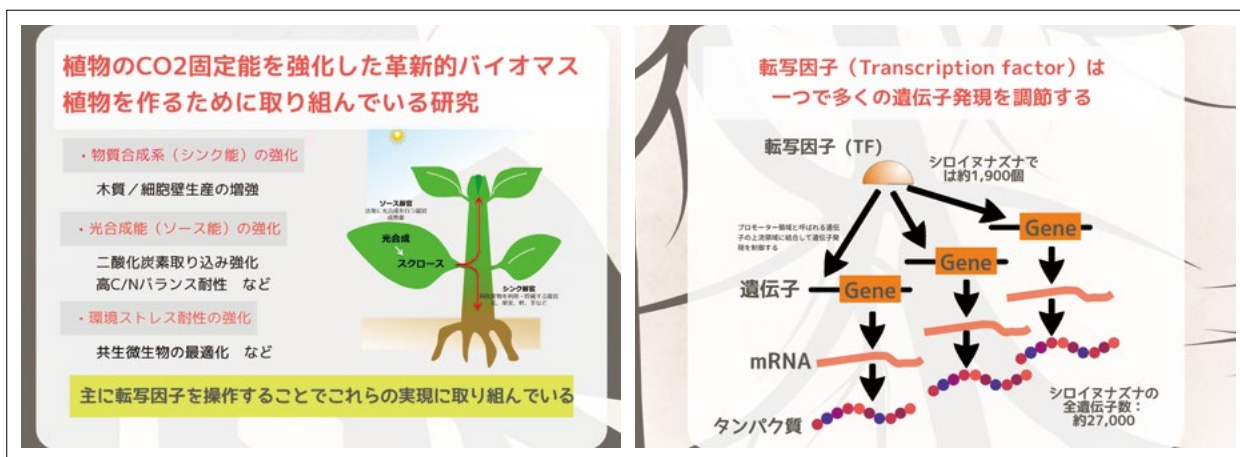


図2-3-1 講演者が取り組んできた研究とその対象

転写因子とは、1つでほかの多くの遺伝子発現を調節するものである。例えばモデル植物のシロイヌナズナであれば、全遺伝子は2万7千個程度であるが、そのうちの大体7～8%が転写因子である。転写因子を研究する理由はいろいろあるが、1個操作するだけでたくさんの遺伝子発現を変えられるところがポイントである。この転写因子に関して産総研では独自のCRES-T技術というものがある。これは平たく言えばアクセルをブレーキに変えるような技術であり、転写抑制ドメインというブレーキ部品のようなものをアクセルに付加することで、遺伝子の働きを強制的に抑えることができる技術である。この技術を使っていろいろやってきた。（図2-3-2）

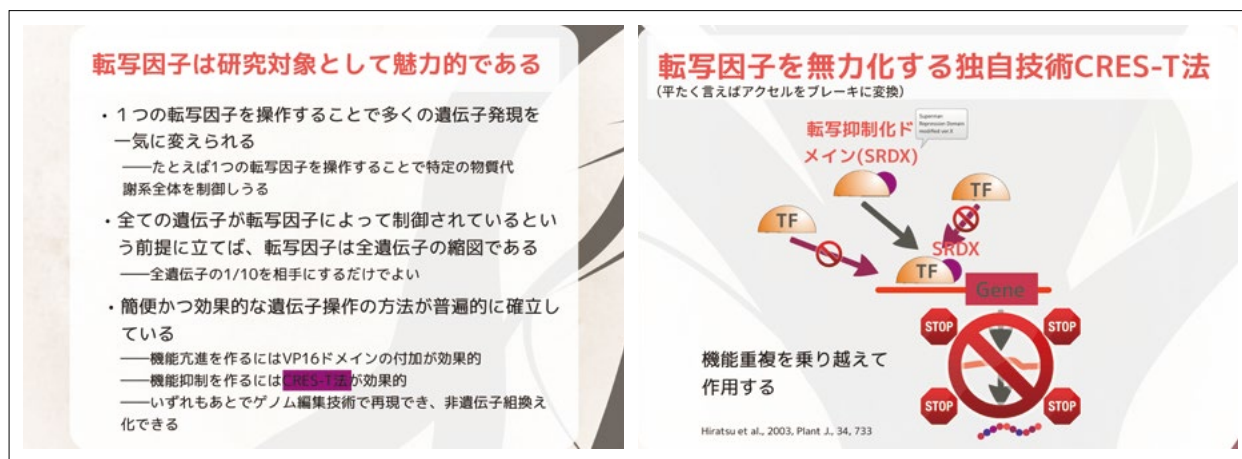


図2-3-2 転写因子を研究対象とする利点と転写因子に関する独自技術

一例として、例えば雄しべと雌しべをつくるような転写因子、AGAMOUSをブレーキに変え、無効化する
と雄しべと雌しべが花びらになり、八重咲きの花をつくることができる。形だけでなく、例えば代謝パスウェイなどもCRES-T技術で簡単に変えることができる。たとえばNSTという私が発見した転写因子にCRES-T技術を適用すると、図2-3-3の右側の左端にある写真のように、直立できない植物になるが、これはNSTが木質形成を制御している転写因子であり、無効化した結果、木質がなくなるためである。この写真は二重変異体の写真であるが、CRES-Tでやっても同じである。右側の写真は通常株とCRES-T適用株の茎の断面の比較図である。(図2-3-3) ちなみに、NSTという転写因子は、種を超えて保存されており、ナズナだけでなく、ポプラ、イネでも同じような働きがある。



図2-3-3 CRES-T技術の適用事例

このNSTの発見が2007年であり、ここから私のゼロエミッション研究が始まったといえる。このNSTが制御している木質（リグノセルロース、二次細胞壁などともいう）は陸上最大のバイオマス資源であり、年間生産量は500億トンとも言われている。そのうち人間が使用しているのは大体50億トンと言われており、植物の乾燥重量の半分以上はこの木質である。植物種によっては、たとえば樹木などでは90%以上木質だったりする。木質は木造建築、紙、新素材、バイオ燃料、バイオマス発電など、様々なことに使われており、ゼロ

エミッション、ネガティブエミッションの鍵となる物質である。

たとえば、このNST転写因子を強化すると、木質をたくさんつくる植物を開発できる。これはALCAによる研究成果であるが、例えばポプラに、強い活性を持つイネのNST転写因子を導入すると、遺伝子組換えにはなるが、木質を多くするためのポプラをつくることができる。切片を比べると、イネNST転写因子を導入した方の細胞壁がより厚くなっている。これは木質を多くためているということである。成長はあまり変わらず、密度は大体4割増しになる。強度も強くなるので、木造建築に使うときにメリットになる（図2-3-4）。

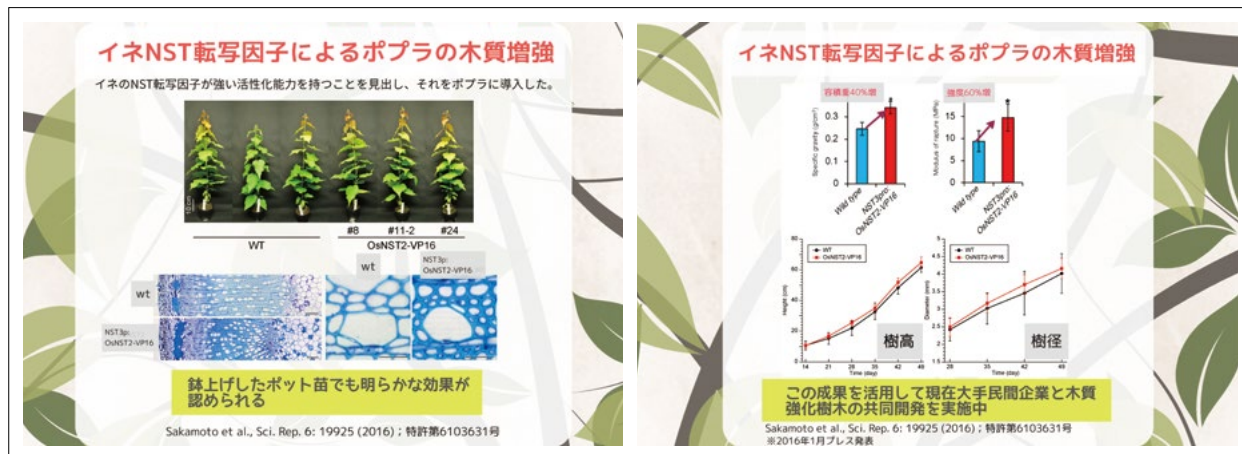


図2-3-4 NST転写因子の強化による木質増強

しかし、この技術にも色々な課題はある。（図2-3-5）

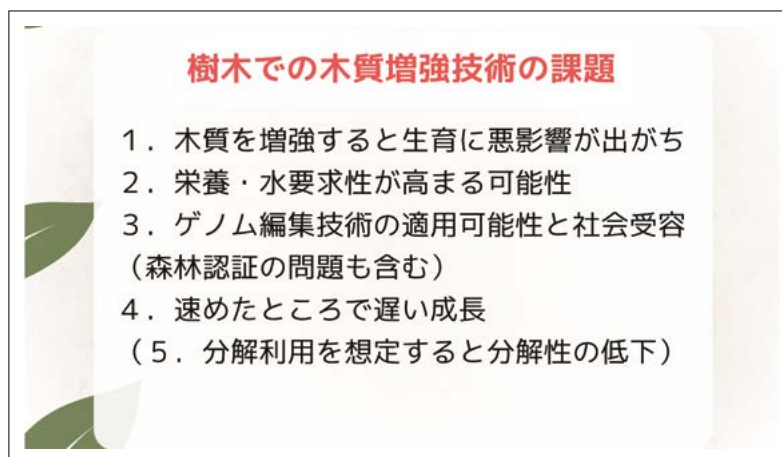


図2-3-5 木質増強技術の課題

たとえば、木質を増やすと条件によって成長に悪影響が出る。また栄養や水の要求性が高まる可能性がある。実験では、栄養も水も十分なので、きれいな結果出すが、自然環境だとそうはいかないのではとの指摘を受けている。それから、社会受容性が進まない遺伝子組換えではなく、ゲノム編集技術でやろうとしているが、何でもできるわけではない。塩基置換も可能なパターンが決まっており、できない可能性もある。社会受容の

問題、特にこのような技術を使用して開発した樹木が森林認証を受けられるかという問題もある。また速く木質が蓄積されるといっても、木はやはり成長が遅い。また用途によっては木質が増えると硬くなって分解しづらくなる問題もある。

木質は重要であるが、木質だけがバイオマスではないことも認識しておくべきである。木質は二次細胞壁であるが、植物は二次細胞壁だけではなく一次細胞壁もある。木質は、木部にしかないので、草本の場合は必ずしも二次細胞壁だけでなく、一次細胞壁も重要である。ALCAで実施した研究により、ERF 転写因子の特定の一群が一次細胞壁形成を制御できることを見出した。（図2-3-6）



図 2-3-6 一次細胞壁形成を制御できる新しい転写因子の発見

一次細胞壁はリグニンがないため分解性の高い細胞壁をつくることができる。例えば、セルロースをセルラーゼで糖化するときの糖化性が高くなる。その結果、糖収量が増えるような植物をつくることができる。ただ、一次細胞壁は樹木ではバイオマスに占める割合が小さいため、この技術が有効に使える可能性があるのは、草本植物である。たとえばイネ科の大型単子葉植物であるソルガム、エリアンサス、スイッチグラス、ミスカンサスなどが近年注目されている。そういった植物では一次細胞壁の強化に意味があると想定される。本研究で見出されたERF 転写因子を強化することで、リグニンが少なくなり、それでいて細胞壁が厚くなり、バイオマス量が増えると想定される。リグニンを減らした牧草をつくると、牛が食べたときにげっぶが少なくなり、メタン放出が減るため、そういう目的にも利用できるかもしれない。（図2-3-7）

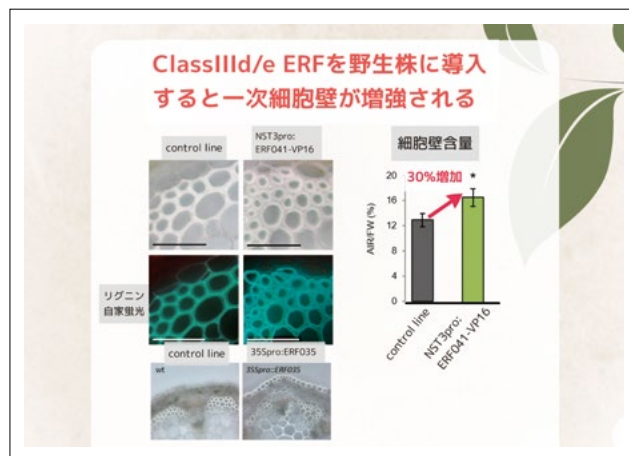


図2-3-7 一次細胞壁増強

草本系植物の研究においても課題はある。まず、操作対象とすべき細胞壁がいまだにわからないことが挙げられる。樹木では二次細胞壁が重要であるが、草本系のバイオマスで一次細胞壁と二次細胞壁のどちらが重要なのかはよく分かっていない。また、一次細胞壁を操作対象とすると、いまのところ遺伝子組換えにならざるを得ず、社会受容の問題が出てくる。さらには、イネ科植物の場合、ナトリウムやカリウムなどの灰分が多く含まれており、用途（例：バイオマス発電に用いようとする炉を傷める）によっては問題になる。また草本系はバイオマスとして利用されてきた歴史がないので、インフラが未整備であるうえ、確立された用途が決まっていない。木に比べると密度が低く、輸送効率が悪いので、長距離を運ぶとエネルギー収支が合わなくなる。密度を上げる手段もあるが限界がある。加えて、耕作地の問題として食糧生産との競合がある。農地法によって企業の農地取得が難しいという問題もある。また、草本系バイオマスはJクレジットの対象になっていないとか、FITの対象にもならないといった問題もある。

木本でも草本でもシンクキャパシティを増やすだけでなく、光合成も向上させる必要性をよく指摘されるので、最近では産総研ゼロエミッション国際共同研究センターにおいて光合成の研究も行っている。光合成活性を制御するような転写因子も見つかりつつあるが、光合成が上がると窒素と炭素のバランスが崩れるのでそれに耐えられるような植物を作ることも同時にやっている。最終的には、光合成も上げて、さらにシンクキャパシティも強化した植物をつくりたいと思っている。（図2-3-8）

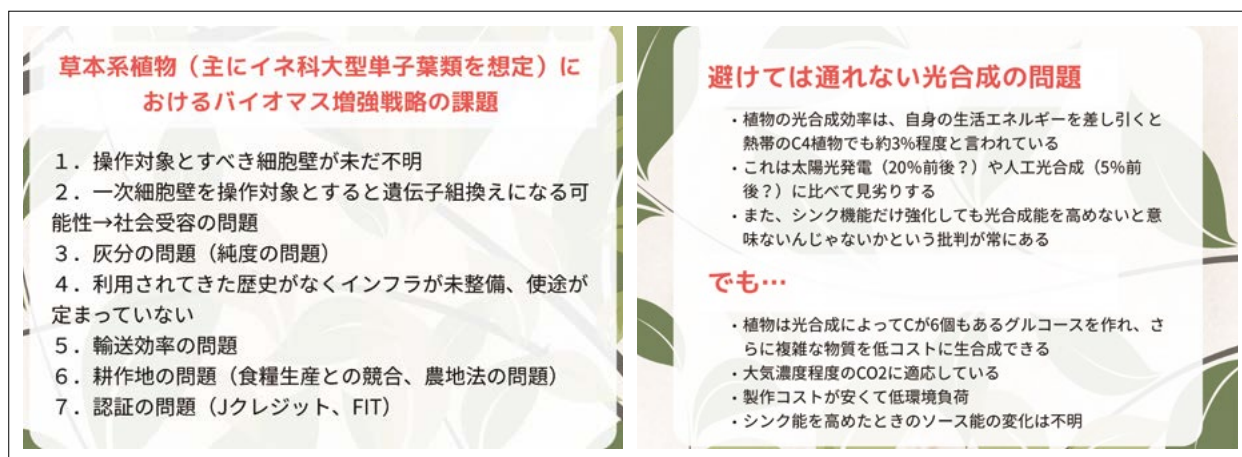


図2-3-8 草本植物でのバイオマス増強戦略の課題と光合成の問題

しかし、光合成の強化研究にもいろいろ課題はある。たとえば、栄養や水の要求性が高まる、植物全般に適用可能か分からない、ゲノム編集技術の適用可能性や社会受容の問題、組合せが必要、などといったことがあげられる。（図2-3-9）

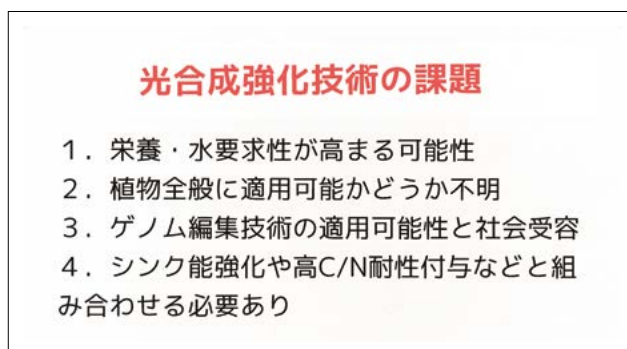


図2-3-9 光合成強化研究の課題

植物・微生物共生の研究も産総研内の別のグループと共同して実施しており、共生微生物を最適化することで成長を早めることができつつある。この利点は、遺伝子組換えではなく、微生物をうまく施肥することで成長を早められることにある。しかし環境中でどのように適用するのか、植物に定着させるにはどうしたらいいのかなど、技術的な課題はある。（図2-3-10）



図2-3-10 植物共生微生物の探索

全体的な課題をまとめたい。個々の要素技術の課題を克服するには、幅広い植物生理学の知識・技術が必要で、木質形成、細胞壁形成、光合成だけで十分ということではない。とはいえ、近年要素技術はかなり出そろいつつあるので、それをうまく組み合わせることでトレードオフの問題を克服することは重要だと思われる。しかし、いかにして研究者をそのような研究に取り組ませるかは大きな課題だと思われる。みんな自分の得意なことはやりたがるが、自分が得意なことと別の人の得意なことを組み合わせると何かやってほしいと言うと、消極的になりがちである。また、圃場試験は大事であるものの、論文が書きにくく、労力のわりに報われないこともあり、研究者のやる気が起きにくい。これにいかによりインセンティブをつけて、推進できる体制をつくるか

は重要な課題だと思われる。また経済性は重要な指標であり、ネガティブエミッションを促進するためには、FITのようなインセンティブ制度が発電以外の分野にも必要であろう。技術的課題もさることながら、社会的課題がいろいろあり、社会全体として取り組む必要があると考える。（図2-3-11）

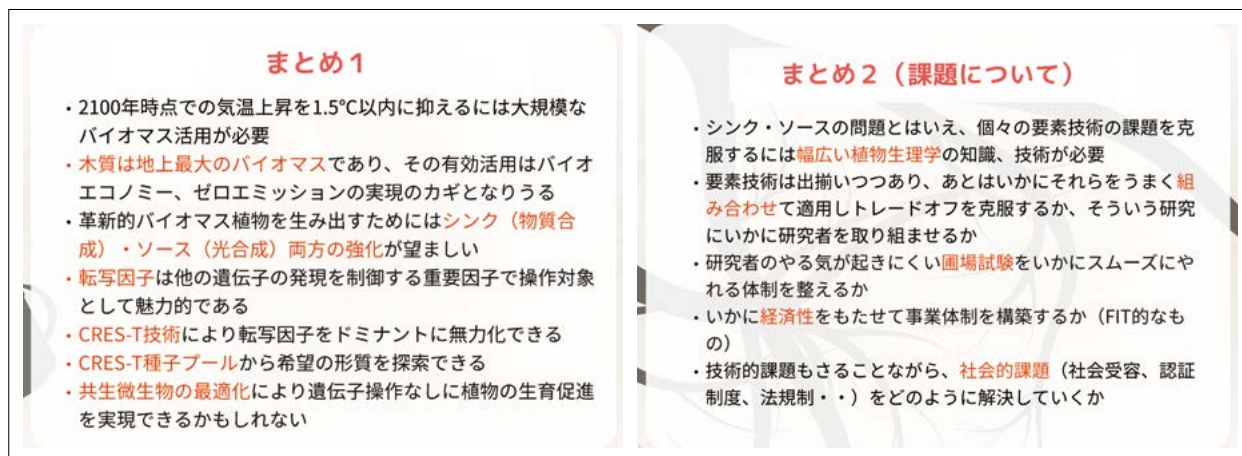


図2-3-11 全体的なまとめと課題

【質疑応答・コメント】

Q：樹木に関して、最初の成長の段階から組換えが必要なのか。

A：最初から必要。種子ではないが、最初の段階で細工が必要。時間がかかるが、何十年も待ってられないので、2～3年で評価する仕組みを整える必要がある。

Q：実際の応用を考えたときに、何十年かを待つ必要があるとなると、有効な手段といえるのか。

A：それが樹木、とくに針葉樹の課題と考えている。樹木はいくら速くしても草本植物に比べると成長は遅い。ただ、広葉樹であれば5～10年のスパンで考えられる。

Q：そういう意味では、一次細胞壁の方が1年などのサイクルで動くので良いのか。

A：草本植物を対象にしたほうが速いと思う。ただそれを使ってきた歴史がないので、実際に使おうとすると容易ではない。農地との競合の問題や輸送効率の問題もある。一方、樹木は使われてきた歴史があり、インフラが整っている。

Q：草は灰分が多く、バイオマス発電に向かないか。

A：その通り。燃焼炉の改良と植物の改良と両方必要。

Q：アメリカではソルガムとか、エネルギー植物系が注目されている。光田先生の研究は日本よりもアメリカとか海外から注目度が高いのではないかと。また海外の研究動向はどうか。

A：草本の研究結果は、特許は出しているが、論文発表はこれからの状況。国際学会での発表はしており、反響も大きく、インパクトはあると考えている。一次細胞壁に注目しているアメリカの有名な研究者がおり、私の研究とは内容は異なるが一次細胞壁を操作する研究成果で「Nature Biotechnology」に論文が出ている。

Q：光合成の遺伝子研究が紹介されていたが、操作しているのは転写因子か。500個の転写因子をすべて無効化したのか。

A：その通り。全部の転写因子にCRES-T技術を適用したライブラリーがあるので、その中から光合成活性が上がるものを探した。

Q：光合成の研究で、同じようなものがないか。

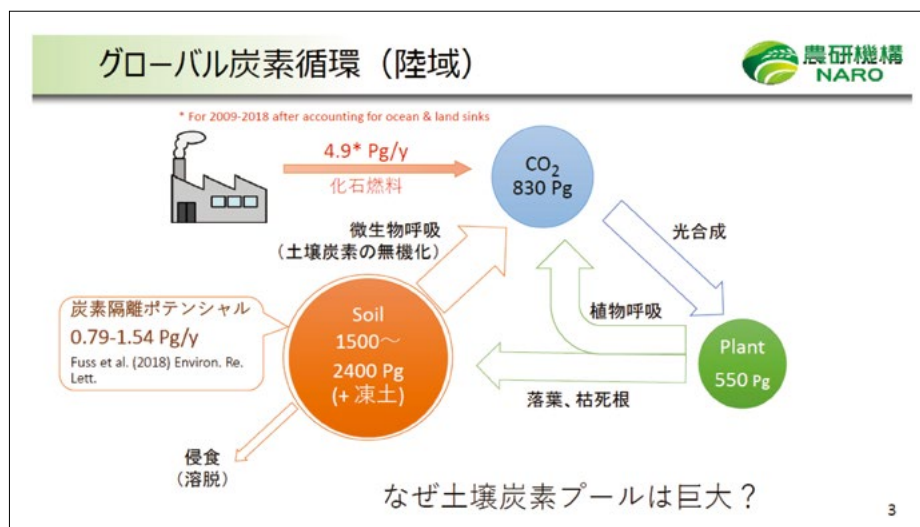
- A：転写因子を対象とした光合成の研究はほぼやられていない。
- Q：最後のまとめで、研究者の強み同士を一緒にやっても、モチベーション上がらないという話あったが、やはり研究資金のようなインセンティブが重要か。
- A：研究者にとって論文を出すことは基本的なモチベーションにはなるが、論文を出して終わりにになりがち。やはりみんな自分のことをやりたいので、個々の研究は放っておいてもみんな自分でやる。それらを統合して何かつくるところにモチベーションがない。そこをファンディング機関が動機づけ、何かインセンティブをつけられるかが重要ではないか。
- C：木質増強でのバイオマス量増強というのは、土壌中の炭素貯留の鍵となる技術と感じている。また一次細胞壁の増強は、イネで考えると倒れないことは大きな生産コストを下げる。農水省等々含めて、連携して、産業応用できれば、経済的ベースで強い技術になると思った。
- C：木質増強は根の炭素蓄積を増やす技術でもあるが、経済的なベネフィットがないと事業者はやらない。何かJクレジットなどメリットを持たせることが必要。炭素貯留に経済合理性を持たせるかが必要。またイネが倒れにくくなることは、十分価値があるが、木質増強というよりは短稈性を持たせることの方が効果的かもしれない。
- Q：一次細胞壁を増やすということが糖収量を増やすのでエネルギー作物としての優位性は増すが、全体としての糖収量は強度や成長量も含めトータルで見ないといけない。全体量として見たときに、倒れやすくなる、成長が遅いなどの負の影響はないか。
- A：確認できている範囲では特段の悪影響は観察されていない。

2.4 土壌炭素（土壌有機物）の役割、存在形態、貯留ポテンシャル

和穎 朗太（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
上級研究員）

私は農研機構農業環境部門の上級研究員であり、本日の話題提供は、最初に土壌炭素（土壌有機物）の役割や、そもそも土壌有機物とは何か等、複雑でブラックボックスとして扱われている土壌有機物の存在形態といった基礎的な側面ものを説明する。最後に貯留ポテンシャル、最近注目されている土壌炭素の貯留ポテンシャルについて話したい。

まず、炭素循環における土壌炭素の位置づけについて説明する。グローバルレベルで見た推定値には当然幅があるが、土壌炭素プールは図2-4-1の通り巨大であり、大気にCO₂として存在する炭素量の2～3倍にのぼる。



帯など有機物の分解が何倍も速い地域や、乾燥地など植物生育（有機物の生産）が遅い地域など炭素貯留の増加が難しい土壌も多く存在し、また炭素を増やすと今度は窒素の供給が植物生育を制限する等の様々な問題があるため、毎年0.4%増を世界中の土壌で達成することは現実的ではない。しかし、4パーミルという数値にこだわらず土壌有機物の増進は地球や人類の持続性を高めるうえで正しい方向であるのは明らかであるため、世界的にいろいろな国や企業や自治体やNGOが参画し、土壌炭素の研究や実証実験が活発に行われている。

図2-4-1に戻る。そもそも、なぜ土壌炭素プールはこれほど大きいのか？単純な答えは、インプットに比べてアウトプットが少ないからである。確かに落葉や枯死根など中にはリグニン等の分解しづらい有機化合物が含まれるが、それらを分解しエネルギーを獲得できるように進化した糸状菌も土壌中にはいるので、植物が合成した有機物は基本的にすべて微生物によって分解可能であり、その結果CO₂として大気に戻る。ではなぜ巨大な土壌炭素が存在するのか？その答えは、土壌鉱物（無機物）との結合にある（図2-4-2）。凍土や湿地など微生物分解が非常に遅い土壌も一部存在するが、世界の大部分を占める一般的な土壌では、その9割以上の重量は鉱物粒子でできている。土壌に枯死した根や落ち葉が入った後、その一部またそれを分解する微生物の合成する有機物と鉱物粒子が様々な結合をすることによって、有機炭素が安定化し、その結果として土壌炭素貯留が促進する。ここ数十年で明らかになってきたこの土壌中での有機物の安定化プロセスについて次に説明する。

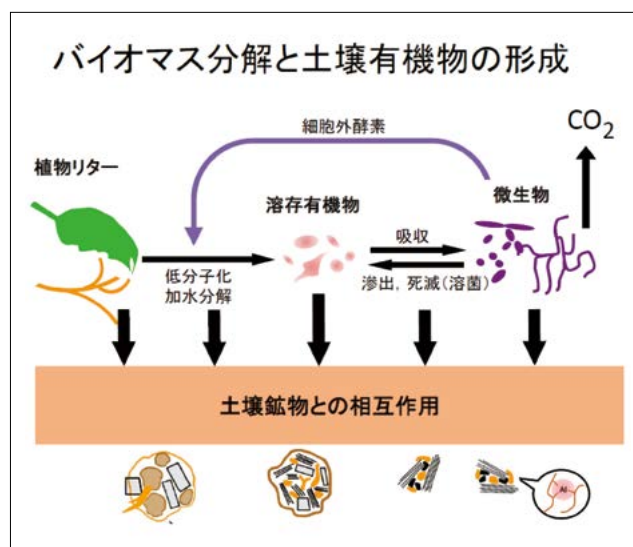


図2-4-2 植物バイオマスの分解と土壌鉱物との相互作用の模式図

図2-4-3はハワイで行われた研究であるが、単一の岩石タイプ（玄武岩）が生成する土壌が数千年、数万年と最終的に300万年かけてどのように変化するかを調べている。そこで岩石風化によって土壌中の鉱物がどのように変化していくかを見ると、玄武岩に含まれていた一次鉱物が溶解してゆくのに対応して、溶出した元素同士が結合し安定な結晶性二次鉱物が形成される（図2-4-3左）。より詳しく初期の10万年間を見てみると、一次鉱物の溶解に伴いまず生成するのは、二次鉱物のなかでも活性アルミニウム、活性鉄とも呼ばれる非晶質鉱物（低結晶性二次鉱物）であることが分かる。非晶質鉱物はそこまで安定でないため、最終的には溶解し、最も古い土壌には結晶性二次鉱物だけが残存することになる。この非晶質鉱物の増加および減少ときれいに対応して、土壌炭素の貯留が変化する（図2-4-3右）。また、土壌炭素つまり土壌有機物は植物の養分を多く含むため、土壌炭素が最大になるタイミングで森林の生産性も最大化する。更に、放射性炭素濃度（Δ

14C)の結果から、非晶質鉱物の増加に伴い土壌炭素の貯留量が増えるだけでなく、長期的に安定化された炭素が増加することが示されている。つまり、岩石風化（つまり土壌生成）に伴う非晶質鉱物の増減が、土壌炭素の貯留量や滞留時間を支配していることが示された。これらの研究が引き金となり、鉱物と有機物の相互作用が、土壌炭素動態、炭素循環の観点から研究されるようになってきた。

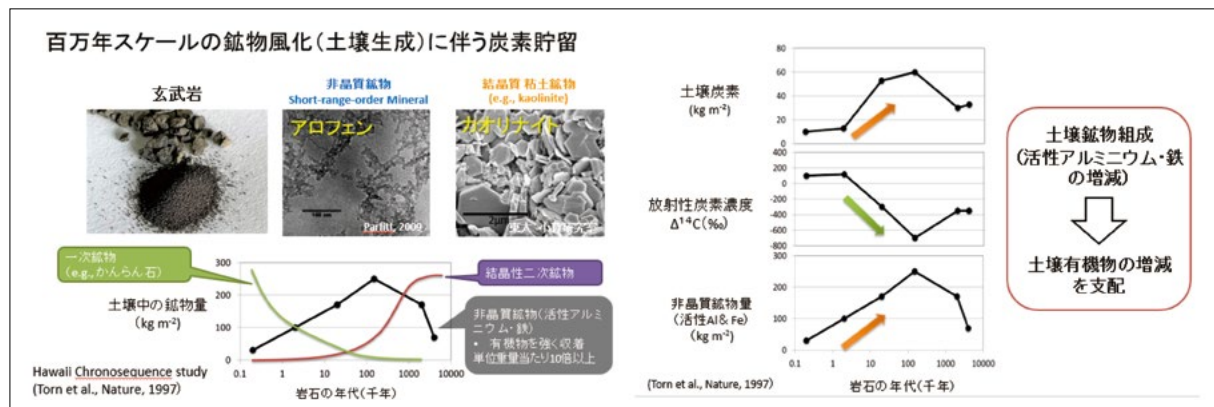


図2-4-3 百万年スケールでの土壌鉱物風化と土壌炭素貯留の変化

(Torn et al. (1997) から作成)

この非晶質鉱物や活性鉄、活性アルミニウムが多い土壌が、我が国の代表的な土壌タイプである火山灰土壌（黒ボク土）である。図2-4-4に、私たちが九州で行った研究を示す。火山活動が活発な地域では、写真のように少し深いところからオレンジ色の特徴的な火山灰層（7,300年前に降下したアカホヤ火山灰）が観察できる。攪乱の少ない地点で土壌を垂直に数メートル掘って、その側面（土壌断面）を見てみると、数千年前に降下した火山灰、約5千年前に降下した火山灰といったように年代の分かる特徴的な火山灰層があり、その間に黒っぽい土壌ができていたことが観察できる。つまり、火山灰が積もり、それを母材に土壌が生成し、また噴火で火山灰が積もるといった繰り返しによって、日本の多くの地域では土壌がどんどん上に出来てゆくという。世界の多くの地域では、地表面の岩石が母材となり、それが風化（溶解）する過程で土壌が生成するため、カサは減り地表面は徐々に下がっていく。よって、日本のような火山地帯の累積的に上方に発達する土壌は非常にユニークであり、この厚くフカフカな土壌が豊かな森林や自然を育てていると言える。この断面の異なる深度から約1,000年間かけてできた土と5,000年間かけてできた土を採取し、その中の有機物を調べてみても、炭素濃度と活性鉄、活性アルミニウム濃度の間には強い線形な関係があった。つまり、活性鉄、活性アルミニウム成分と結合することで土壌有機物が安定化していることが示唆された。

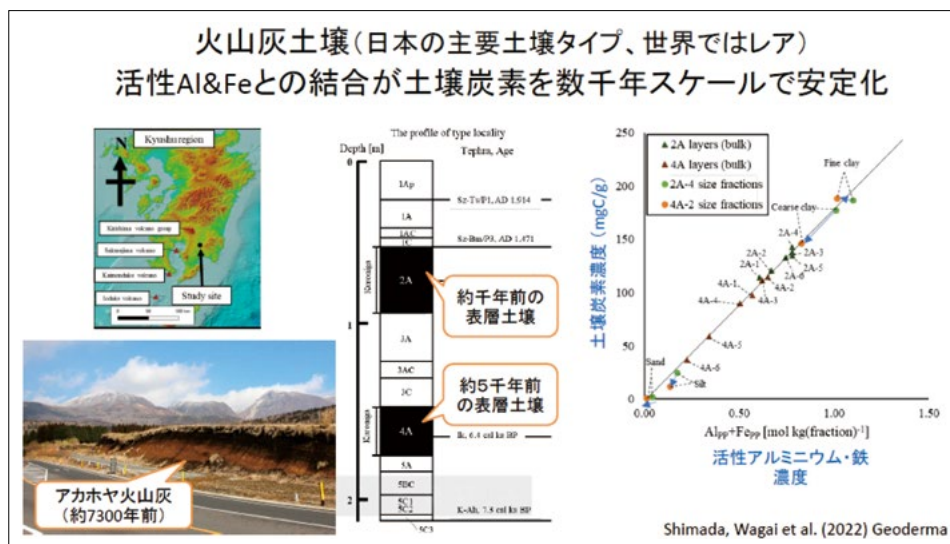


図2-4-4 九州の火山灰土壌（埋没層）を利用した数千年スケールの土壌炭素と活性鉄・アルミニウムの関係性の評価¹

このほかにも土壌粒子をサイズや比重で分離し、放射性炭素分析、微細構造分析、放射光分析などを駆使して評価したところ、ミクロスケール、サブミクロスケールにおいても、こういった鉄やアルミニウムと炭素が共存していることが分かってきた。つまり、両者が強く化学結合することで形成される金属・有機物複合体が鉱物粒子同士をつなぐ接着物質となって強固な土壌団粒構造の形成を可能にし、また土壌有機物の長期的な貯留を可能にしていることが示唆された。

土壌有機物の安定化のメカニズムは大きく3つに分けられる(図2-4-5)。一つは分子構造、例えばセルロースよりリグニン、更に炭化物のほうが微生物による分解が遅いことは、有機化合物の分子構造の違いによる。しかし、実際の土壌の大部分は鉱物粒子であるため、土壌中の非晶質鉱物、鉄やアルミニウム、カルシウムといった無機成分と有機物（その表面に座すカルボキシ基などの官能基）の化学的な相互作用によっても有機物は安定化されている。

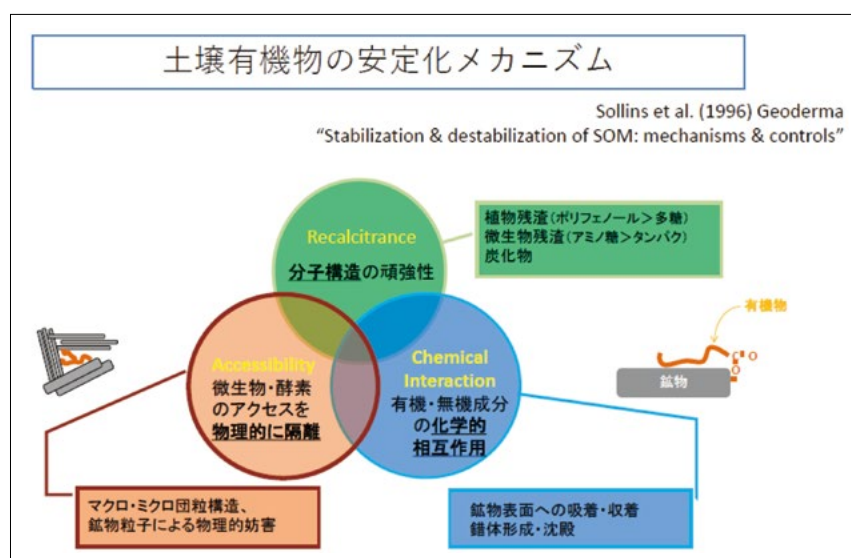


図2-4-5 土壌有機物の安定性を決める3つの直接的なメカニズム

¹ Shimada et al. 2022. Geoderma <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115820>（2023年3月1日アクセス）

また、土壌中の一部の有機物は、土壌中のミクロ、ナノサイズの微細粒子に物理的に囲まれることで安定化していると考えられている。一般的な表層土壌には、図2-4-6右に例示されるような数十から数百ミクロン直径の団粒と呼ばれる3次元構造物が多く存在しているため、有機物がその中にトラップされている場合、酸素、水、微生物の酵素といった分解反応に必須の物質から有機物が「物理的に隔離」されることでも、有機物の安定化は起こる。つまり、タンパクのように有機物自体の分子構造は分解されやすくても、鉱物粒子などの土壌無機成分との化学的あるいは物理的な相互作用によって安定性が高まる。

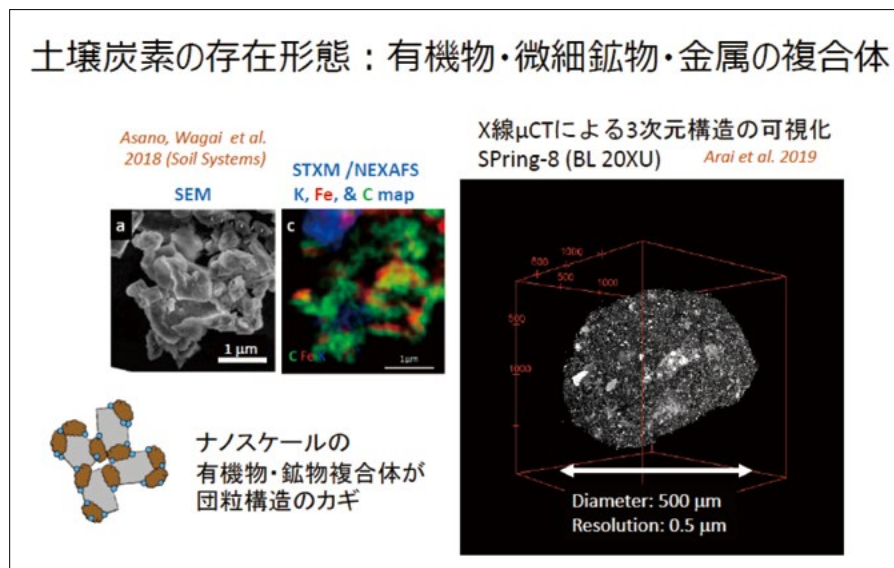


図2-4-6 先端的手法によって示されたミクロスケールにおける土壌炭素・土壌有機物の存在形態

左：黒ボク土から分離した微粒子の電子顕微鏡写真および炭素、鉄、カリウムの元素マッピング²（KEK, BL13A, STXM-NEXAFS分析）右：黒ボク土の耐水性マクロ団粒の立体構造のX線CT法による可視化（SPring-8, BL: 20XU）

以上の話から土壌有機物がどのように形成されるかを一言でまとめると、植物の力と微生物の力、そして土壌鉱物との交わり（相互作用）によると言えるだろう。植物がCO₂をセルロースなどの有機物に変換し（光合成）、その有機物が土壌に入り、それをエネルギー源とする土壌微生物群集が有機物を代謝（分解）する。その過程で大部分の炭素は酸化分解によりCO₂に戻るが、残存する有機物は低分子化され、表面が酸化され、水に溶けやすくなったり、土壌鉱物や土壌水中の金属イオンと結合しやすくなる。これによって、有機物と土壌無機成分の相互作用が起こり、有機物が安定化する（図2-4-7）。

土壌有機物が注目される大きな理由の1つは、自然生態系に存在する窒素や硫黄、最大8割のリンが土壌有機物として存在しているからである。微生物分解によりこれらの養分元素が溶け出し、それを再び植物が使うことで、陸上生態系で炭素や窒素などの元素が健全に循環しているのである。

2 Asano et al. (2018) DOI: 10.3390/soilsystems2020032.

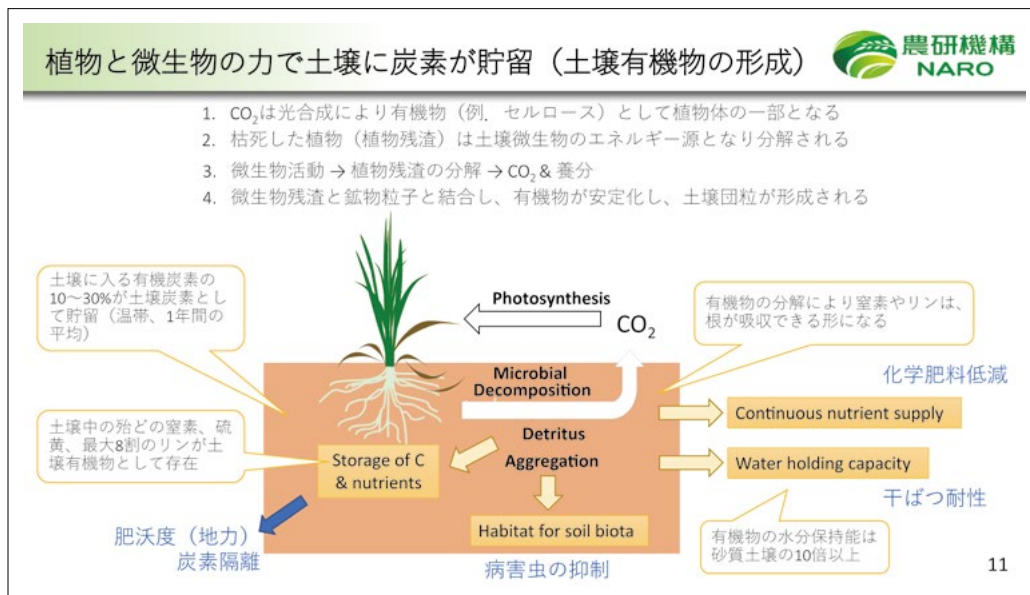


図2-4-7 陸域生態系における炭素循環と土壌炭素により生じる正の効果

一方で、この土壌中に残された微生物の死骸や、微生物によってある程度分解作用を受けた有機物が鉱物と結合することで、団粒化（図ではAggregationと記載）つまり鉱物と有機物の相互作用による三次元構造の形成が起こる。そして、団粒構造中に存在するたくさんの隙間が多様な微生物の住処になっている。これらの隙間は大きさまで、また連結しているもの、行き止まりのものがある。このため土壌には、空気や水の通りやすさや水分保持能力が異なる多様な部位が存在している。団粒のサイズ感としては、1mmの4分の1（直径250 μm）以上がマクロ団粒と呼ばれる。これを崩すと、その中にミクロ団粒や小さな隙間がある。この隙間には細根、線虫などの土壌動物、また膨大な数の糸状菌や細菌が生きている。つまり、土壌（特に表層土壌）には信じられないぐらいの生物多様性が存在する。以上の通り、土壌は炭素貯留、養分循環、多様な微生物の住処、通気性や水分保持機能を併せ持つ。言い換えると、健全な土壌はこのような複数の重要な働きを持っている。

私たちのグループは、上述の土壌の多機能性の基盤には「有機物・鉱物の相互作用によって形成される土壌有機物および団粒構造」があると考え、その形成メカニズムや動態に注目して研究を進めている。X線CTを使うと、一粒一粒の団粒の内部構造が可視化できる（図2-4-8）。この手法は、X線の減衰率が気相、固相（また固相中の鉱物と有機物）で異なるということを利用している。青で見えているものが孔隙であり、土壌の内部は意外に隙間だらけであることがわかる。この隙間に微生物もいるし、雨が降ると水が流れたり、乾燥しても細かい隙間に水が残る。このような団粒構造が土壌の表層に発達している。

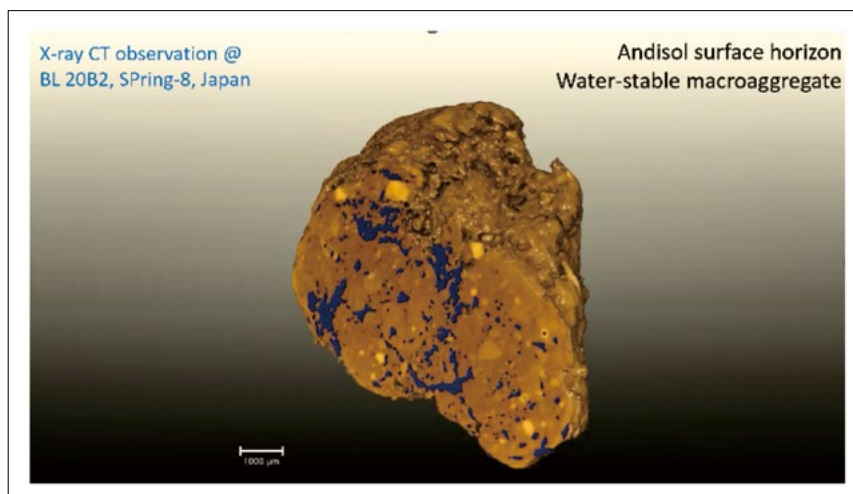


図2-4-8 耐水性土壌マクロ団粒のX線CT法による内部構造の可視化

(Shimada, Wagai, unpublished data, Spring 8, BL 20B2)

最後に、再び地球規模の土壌炭素の話に戻り、世界の現状と今後への展望を考えたい。アメリカのFoley博士グループが世界の統計データを収集して行った地球規模の食料問題と環境問題の解決を模索した研究がある（Feley et al. 2011, Nature）。2050年までに改善すべき環境問題として温室効果ガスの発生、生物多様性の損失、持続的でない水資源の利用、水質汚染が挙げられているが、土壌炭素貯留を含む土壌の適切な管理によって、これらすべての課題の改善が可能である。また、まだしばらく続く世界の人口増加に対して農業生産の側面で改善すべき点として、生産性・生産量の増加、食料生産システムのレジリエンスの向上（例えば、干ばつ等の気候変動に対して）、食料の公平・効果的な分配（飢餓の回避、フードロス減少）が挙げられているが、前者2点については、やはり土壌炭素の管理が重要になる。この論文の補足資料に重要な情報があり、彼らはSoil carbon deptという食料生産と土壌炭素のトレードオフに関する指標を考案している。ある土地の単位面積当たりの作物生産量を分母に、作物生産に伴う土壌炭素の損失量を分子にしたこの指標で見ると、年間1トンの収穫物を得るのに50トン以上の土壌炭素の損失を生じさせる脆弱な場所として、土壌侵食や土壌有機物分解が進みやすい湿潤熱帯地域などが示されている。全世界を対象としているため空間分解能や誤差の問題はあるものの、人間にとって必須な食料生産とそれを持続的に行うために必要な土壌等の環境保全の両者を同時に考慮した点が画期的であり、今後の土地開発・土地利用の計画や評価では、このような視点が重要である。

そもそも土壌炭素をどの程度ためられるのかを推定するためには、今までの人間活動によってどの程度の土壌炭素を失ったかを知ることが重要になる。これはSanderman et al.（2018, PNAS）の研究であるが、過去1万2,000年の人類活動で約130Pgの炭素が失われたと推定される。その主な原因は、土壌炭素が豊富な草原地帯の農地への転換であり、それが産業革命後の農機具の機械化に伴い加速したと考えられる（図2-4-9）。この土壌炭素の損失量は、過去の研究による推定値とも整合的であり、人類の化石燃料消費で生じさせた炭素（CO₂）の総量の約3割に相当する。逆の視点から考えると、劣化した土壌や生態系を修復し、適切に管理・保全することで、土壌に最大で130Pgの炭素を追加的に貯めることが可能だと言える。

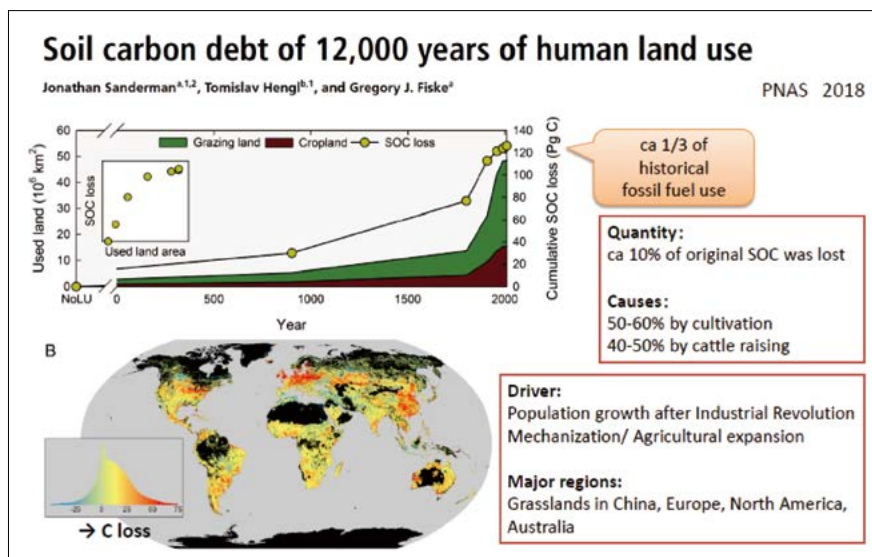


図2-4-9 過去一万二千年の人間活動による土壌炭素の損失³

土壌炭素の損失の主要な原因は、有機物分解だけでなく、土壌侵食による土壌炭素に富む表層土壌の流亡である。土壌ができるのには非常に時間がかかり、世界の土壌の平均として、およそ100年間で平均1ミリ～4ミリの土壌が生成される。一方で、侵食により表層土壌が失われる速度は、この10～100倍である。土壌侵食の一番の原因は農業によるものであり、特に耕起、特に重機で大規模に行う耕起によって侵食が進む。

では、失われた土壌炭素をどうやって回復させることができるのだろうか。これには、大きく3つの方法がある。一つ目は、有機物のインプットを増やすことである。緑肥、堆肥などの有機物の投入、マルチング、また、休閑期間に炭素や養分を土に入れるためのカバークロップ栽培（特にマメ科などの窒素固定植物）により土壌への有機物のインプットを増加させることができる。さらに熱帯では、畑の間に木を植え、より深いところまで入る根によって養分や水分を有効利用させ、落ち葉を土へ戻す等の様々なAgroforestryの生産システムが開発・導入されてきている。また、製造に投資が必要なもののバイオ炭の投入は、土壌中での分解は非常に遅いため、土壌炭素貯留を高める有効な方法と言える。二つ目は、土壌有機物の損失を低減する方法である。例えば、不耕起農法による団粒などの土壌構造の維持・促進、天地返しによる表土と下層土の入れ替え、水田のような湛水管理が挙げられる。しかし、湛水管理は強力な温室効果を持つメタンを放出するというトレードオフがあるので注意が必要である。三つ目は間接的であるが、水や肥培管理の最適化により作物生産性を上げることで、作物の根や切り株から土壌に入る有機物を増やすことができる。我々が行っている農研機構（つくば市）の長期連用試験では、化学肥料の代わりに落ち葉堆肥を入れた不耕起栽培を数十年継続することにより、従来の耕起栽培に比べて表層土壌の団粒構造が発達し、土壌炭素の貯留量も2倍近くに達すると同時に、土壌生物の多様性が高まり土壌菌叢（マイクロバイーム）も大きく変化している（図2-4-10）。

3 Sanderman et al. 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>（2023年3月2日アクセス）



図2-4-10 土壌炭素貯留を増加・維持するための管理手法

では、土壌の炭素隔離（貯留）ポテンシャルはどの程度あるのだろうか？ IPCCのワーキンググループ3の最新の報告では、農業セクターによる炭素隔離、特に土壌炭素隔離は比較的安価に達成でき、高いポテンシャルがあると考えられている。しかし、不確定要素も多く、図2-4-11にもそれが反映されている。

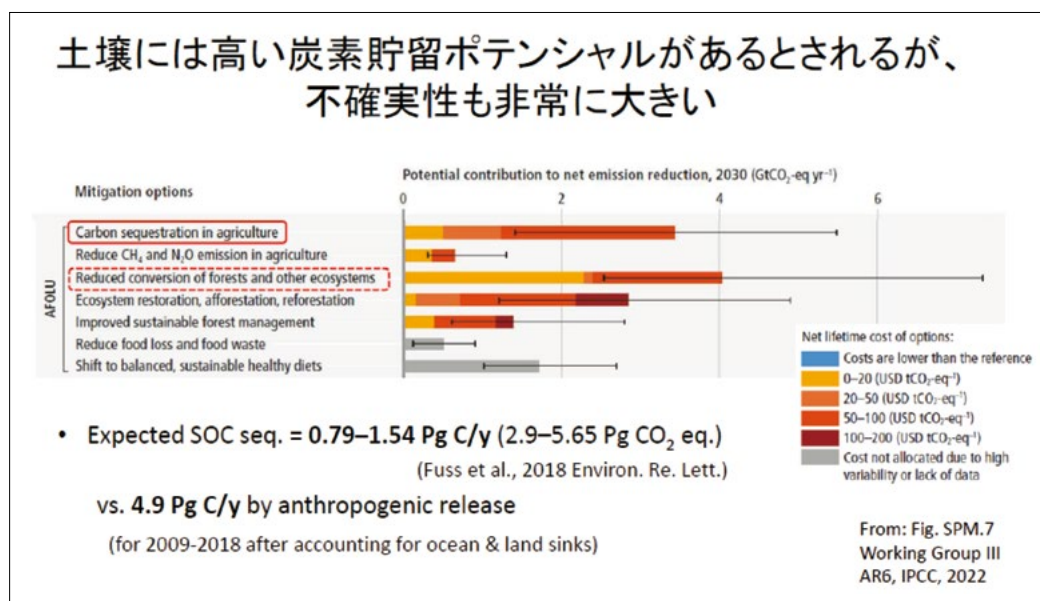


図2-4-11 土壌炭素貯留（隔離）ポテンシャル⁴

土壌炭素隔離ポテンシャルの不確定要素をここで網羅することはできないが、重要な要素を幾つか挙げる。そもそも土壌は多様であり、不均質に分布しているため、隔離ポテンシャルも異なる。土壌は、5つの条件、

4 IPCC Working Group III, SR6, 2022

すなわち岩石（母材）、気候、地形、植生、時間の影響を強く受けて形成されるた、これらの組み合わせによって世界の土壌は少なくとも12タイプに分類することができる。土壌タイプや気候条件などに対応して、農業生産システムも多様である。これらの空間的な不均質性があり、作物生産地帯も局在化している。例えば、最も集中的、集約的な作物生産が行われているのは、比較的肥沃で管理しやすい土壌タイプであるMollisolやAlfisolであり、このような土地では食料生産とバイオエネルギー作物生産の競合が起こりやすい。

別の重要な不確定要素として、土壌炭素隔離を正確に定量化することが原理的に難しい点が挙げられる。ある土地のどの状態の初期値として、そこからどれくらい土壌炭素が増えたかを調べる方法は、現在活発に議論されている（図2-4-12）。1つ確実に言えることは、土壌炭素量が変化するには非常に時間がかかり、定量も難しいため、長期的なモニタリングが重要である。また割愛するがカーボンクレジットの話もかなり進んでいる。

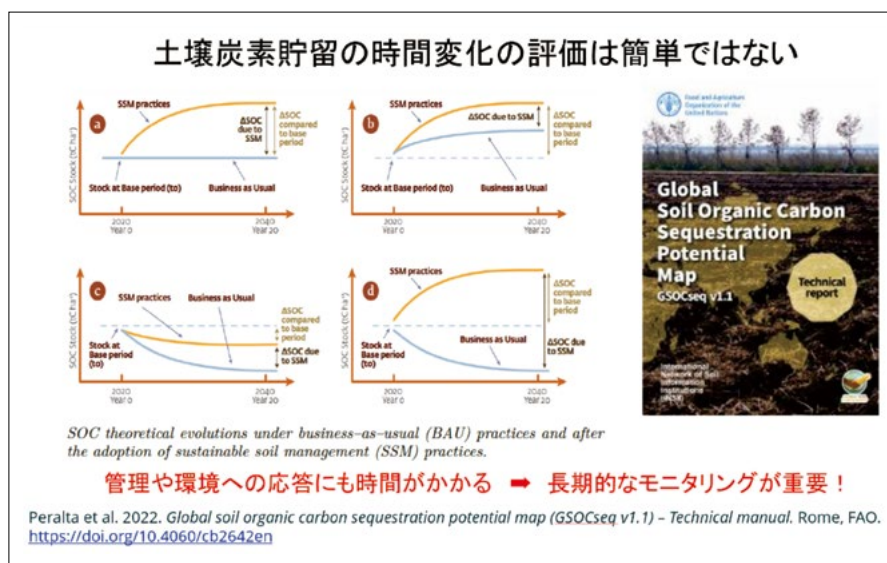


図2-4-12 土壌炭素の変化量の推定手法

最後に、以上の話を3点でまとめる。

- ①土壌に有機物を増やすことは、土壌保全や生物多様性の向上など様々な生態系サービスや農業生産上のコベネフィットと直結するので、炭素隔離や温暖化緩和のためだけでなく、食料安全保障や持続性の観点からも重要である。
- ②土壌は非常に不均質で、多様な特性を持っているため、土壌炭素の変化や貯留ポテンシャルを評価しづらいという問題があり、定量評価の際の不確実性が高い。また土壌は、炭素だけでなく、窒素やリンの循環の調整や生物多様性の維持など地球規模の環境問題の解決に重要な要素である。よって、長期的なモニタリング、管理記録や分析手法の記録・標準化、試料の保管・共有が重要である。こういったことはアメリカなどでは国の予算で積極的に行われている。ゼロエミッションの達成は当然大事であるが、土壌や生態系の保全および食料生産の持続性は継続的に高めていく必要があるため、農地、林地を含めた長期的な土壌モニタリングなどをこの機会に実施することが重要である。
- ③火山岩や火山灰からできる黒ボク土と呼ばれる日本に広く分布する土壌は、大量の炭素の効果的な貯留を実現しており、それが1,000年、数千年スケールでも十分に安定化している。しかしそのメカニズムには不明な部分が残されているため、これらを解明することで新たな技術開発や効果的な土壌の肥沃度管理が可能になるだろう。

【質疑応答・コメント】

Q：鉄と炭素の共有結合が起こっているとの話があったが、どんな化合物ができていますか。

A：生物が合成するセルロース、リグニン、タンパク等の様々な生体高分子が土壤中で徐々に酸化分解されることで官能基が生じる。中でも、特にカルボキシル基を多く持つのが土壌有機物の特徴である。そのカルボキシル基と遊離した鉄やアルミニウムや錳物表面の水酸基が化学的に結合する。液相で起こるこの反応はキレーション（錯体形成）と呼ばれ、土壌錳物表面の固液反応の場合、配位子交換反応と呼ばれる。これらの結合は強固でほぼ不可逆的な反応であり、このように無機成分と結合した有機物は、微生物分解に対して高い安定性を持つことが実験からも証明されている。

Q：カルボキシル基と金属とのキレートが高次的にできるのか。

A：それが1つ。ただし土壌中の炭素量はそれだけでは説明できないくらい多いので、物理的に土壌粒子に囲まれることによって、酵素がアクセスできなくなるという物理的隔離メカニズムの重要性も指摘されている。微細な土壌団粒構造の形成や安定化に、鉄やアルミニウムが関与していることも明らかになってきている。

Q：土壌の炭素貯留のポテンシャルについて、長期的なモニタリングでも、今現在の段階で100年後とか200年後の予想をすることが難しい。またシミュレーションでの予測もあると思うが、予測の方法論および予測と実際の差分はどの程度か。

A：土壌炭素の長期変化の予測は、森林よりも、かなり制御されているシステムである農地のほうが進んでいる。農地に関しては多くの地域で長期連用試験圃場というものが昔からあり、一今それが廃止される傾向にあるのが問題であるが一、数十年、イギリスでは長いところで100年間、同じ管理を継続している。つまり、1つの試験区では、毎年堆肥を入れ続け、その隣の区ではコントロールとして化学肥料を入れながら、同じ作物栽培を継続している。これらの試験区の炭素インプット量、土壌炭素量、および気候や土壌理化学性情報を基に、土壌炭素の年次変化を予測するシミュレーションモデルが開発され、将来の気候変動に対する土壌炭素の応答の予測などに多用されている。数十年から100年程度の時間スケールの実測値を用いてモデルをキャリブレーションしているため、数十年単位の土壌炭素変化についてはある程度の良い再現性がある。しかし、それを超えると難しい。また自然生態系、つまり植物バイオマス炭素と土壌炭素の将来予測はより複雑である。植生が温暖化に対してどう応答するか、および土壌炭素がどう応答するかについて、現在利用されている複数（10程度）の地球モデルの予測結果を比較をすると、植生モデルに比べて土壌のモデルのほうがより不確実性が高いことがモデル比較研究から示されている。よって、不確実性をいかに下げることが重要で、そのためには土壌のモニタリングおよび土壌炭素の分解や安定化の仕組みを解明し、モデルを精緻化する必要があると考える。

Q：日本での温暖化による土壌の炭素貯留への影響についての研究はあるか。

A：土壌炭素プールの温度応答の研究は行われてきている。温度上昇の影響だけに絞ればかなり分かっているが、実際の温暖化応答を予測するうえで難しいのは、温度だけでなく水分条件が変わるためである。温度は上がるが水分条件はある程度の湿潤な範囲内に収まっていれば、10℃の上昇に対して土壌炭素の微生物分解によるCO₂放出速度は、およそ2倍～3倍上がる。この分解の温度依存性を決める要因として土壌有機物の質（難分解性炭素の割合）が重要であることも示されている。しかし、水分条件が大きく変わると問題は著しく複雑になる。例えば、強い乾燥が入ると、先ほどの団粒構造の中の間隙ネットワークの中で水分が残る部分が減少し、水がないと移動できない線虫やアメーバなどの微生物捕食者の移動が制限されるため、有機物の分解プロセスも変化する。また分解者の住み家である団粒構造自体が乾湿の繰り返しにより変化するため、土壌微生物の分解活動の変化を予測することが難しくなる。よって、温度変化よりも、温暖化による土壌水分（酸化還元）環境の変化にともなう物質循環の予測が難しく、これが重要なテーマとして残されていると言える。我々も現在そのような

側面の研究を進めている。

- C：植物の生育にとっても団粒構造ができているほうが都合がよく、成長が大きく変わる研究がある。リグニン由来の低分子リグニンを土にまくことで土壌を団粒化を促進するみたいなことができる研究開発を聞いたことがある。改めて、植物の成育に団粒構造が重要であり、かつ炭素の貯留にも効くことがわかった。
- A：数ミリスケールのマクロ団粒ができることが植物生育に重要と考えられている。このサイズの団粒には多数の隙間があり、酸素が入り、根が発達しやすくなる。同時に、水も抜けやすいため、排水性もよくなる。マクロ団粒の形成は堆肥を入れることで進むので、リグニン系の資材も有効だろう。しかし、これらマクロ団粒は形成も早い、崩壊も早い。つまり崩れやすい。長期的に団粒が維持され、炭素が貯まり、また肥沃度が維持向上されるためには、それより1オーダー、2オーダー小さい空間スケールで形成される団粒構造—ミクロ・サブミクロン団粒と呼んでいる—が重要になる。そこでは、有機物と金属などの無機成分の強い結合により物理的に安定な構造が形成されるからである。このようなミクロ団粒の一部として炭素や窒素、リン等の養分が長期的に貯留する。ミクロ団粒の多くはマクロ団粒の一部として存在しているため、土壌は階層的な構造を持つ。これが土壌の不均質性および物理化学的および生物学的な多様性と密接に関係しているため、これらをどう切り分けたり総合的に評価できるかが、非常にチャレンジングだが本質的な研究課題だと考えている。

2.5 農業におけるこれまでの土壌への有機物施用技術とこれらからの土壌炭素貯留技術

加藤 拓（東京農業大学 応用生物科学部 農芸化学科・准教授）

欧米ではカーボンファームという農地などに土壌中の炭素を貯留させる農業生産方法を法的に整備していく話が進んでいる。アメリカでは本年8月に成立した歳出・歳入法（インフレ削減法）に、農業の気候変動対策が盛り込まれており、既に欧米では農地への炭素貯留が施策として既に動いている状況である。

土壌炭素の起源は、植物が大気中から吸収した炭素が主である。土壌中から大気へと放出される炭素には複数の経路がある。植物由来の粗大有機物が分解することで出る CO_2 や、腐植化という土壌固有の有機物（腐植）へと微生物によって生合成される段階で出る CO_2 や、この腐植が分解されることで出る CO_2 がある。いずれも、微生物活動に由来するので、土壌中から排出される CO_2 は基本的に微生物による呼吸が起源になっている。つまり、土壌中に貯留する炭素とは、土壌中で分解されない、もしくは、その時点で残存している炭素であると言える。（図2-5-1）

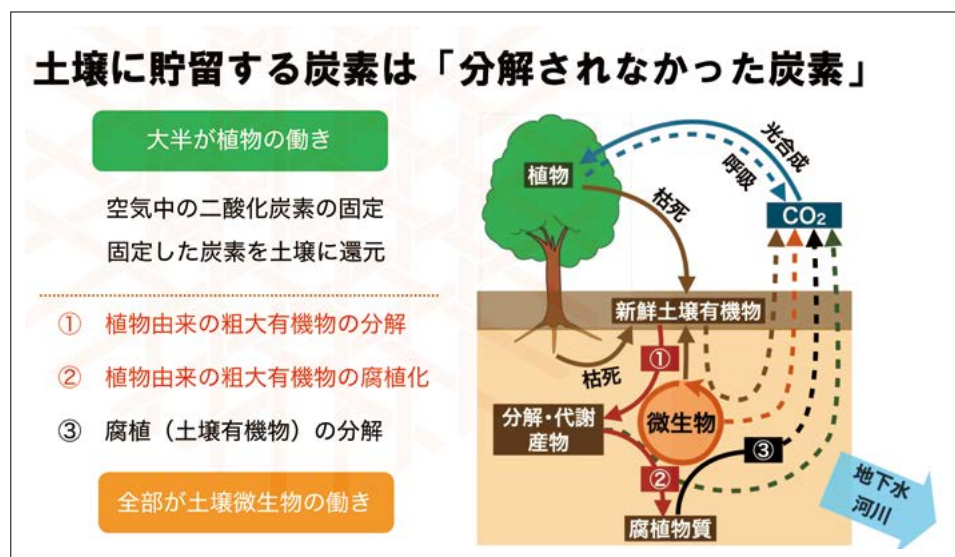


図2-5-1 土壌に貯留する炭素貯留における植物と微生物の役割

日本の土壌図を見ると、北海道の道東付近、東北地方の太平洋側や関東、九州の鹿児島や熊本に、炭素貯留量が多い黒ボク土が分布しているのがわかる。この黒ボク土は、地球の陸域面積に占める割合は1.5%程度であるが、日本の農耕地だと60%程度を占めている。黒ボク土は世界で最も土壌に炭素を貯留できる土壌型のひとつで、日本はこの世界では稀な土壌型が広範囲で分布している国と言える。この黒ボク土には、冬場にマイナス 20°C ぐらいまでになる北海道の道東や九州の鹿児島などでも、同じように分解しなかった炭素が多量に貯留する面白い化学的特徴がある。

農業は基本的に炭素を土壌から放出する系の産業になる。基本的に畑は栽培時に耕すので、土壌中に大気中の酸素が入ることで微生物活性が上昇し、腐植が分解されることで土壌炭素が減少する。図2-5-2に赤枠でくくった箇所のCと記載しているところは化学肥料区になるが、そのひし形のマークを基本点と考えると、10年、20年、30年と使っていくと、化学肥料のみで耕していくと土壌中の炭素濃度は減少する。Mとある

のはManure（堆肥）の略であるが、反当たり1トンぐらい堆肥を入れていくとほぼ維持できる、これが2倍量の堆肥入ると土壤炭素濃度は増加する傾向になる。これは北海道十勝地方のデータであるが、基本的に耕すと土壤中の炭素は減少するが、有機物を入れることで土壤中の炭素は維持できることはが解っている。

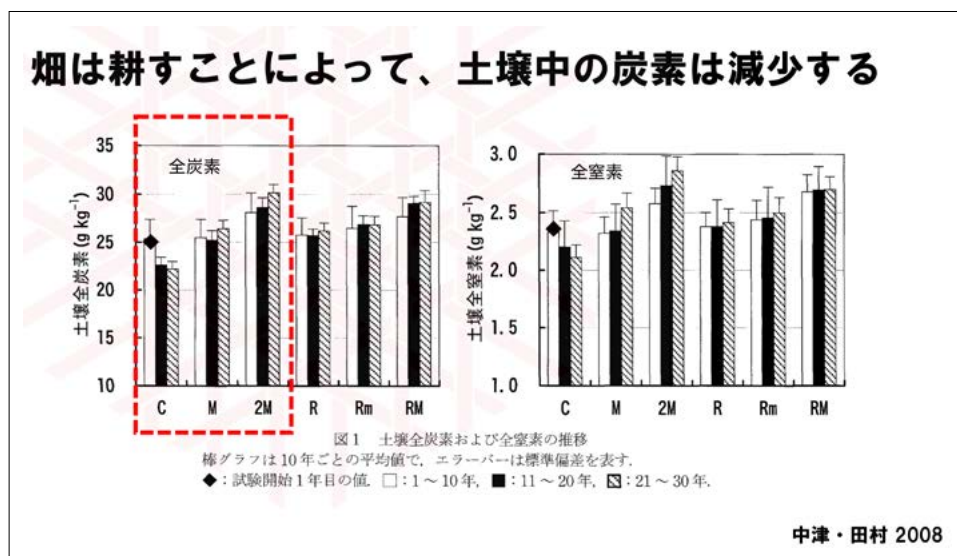


図2-5-2 畑への堆肥長期連用施用に伴う土壤中の全炭素量と全窒素量の推移

このため、昔から農地においては土壤中に有機物（堆肥）を施用して、土壤の機能性を維持してきた。図2-5-3に赤枠で囲っている堆肥・厩肥、有機物肥料、微生物資材を施用することで、土壤中にある有機物の中のバイオマス量が増えること、また、生産性の向上に伴う動植物遺体や腐植（腐植物質・非腐植物質）の増加していく流れも従来から解っている（図2-5-3）。

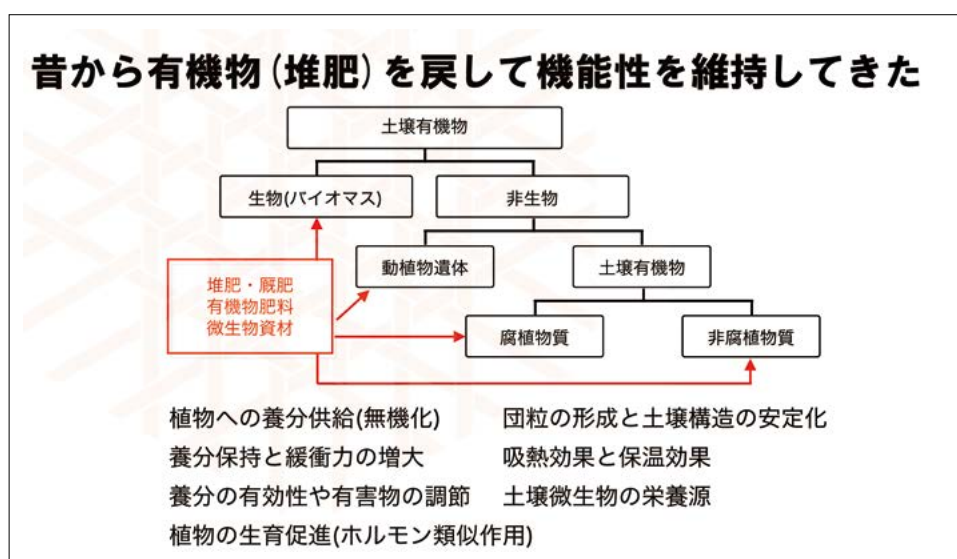


図2-5-3 有機質資材の施用が土壤の機能性向上に果たす役割

従来行われている土壌中の有機物を増やすことは、「低炭素社会を目指している」今日の課題とは目的が異なる。従来研究されてきた土壌に有機物を施用する行為は、植物への養分供給や、養分保持、緩衝力の増大、吸熱反応を上げて土壌温度を上げる、土壌中の微生物を増やして代謝を上げて土壌中の養分循環を上げるなど土壌の機能性を高めることが目的である。日本では土壌中に有機物を施用する実験を試験場レベル、国の研究室レベル、大学レベルでやってきた歴史がある。これら実験の目的は、有機物を施用して、農作物生産を向上させることである。これは炭素を貯留させることを目的としたカーボンファームの話と、意味が同じようである。土壌中に有機物を入れる目的は、あくまでも作物の生産上の環境を改善することであり、カーボンニュートラルやカーボンネガティブは、大気中のCO₂を土壌中に隔離することで土壌中に炭素を隔離することが目的になっている。このため、これまで農業で行われてきた有機物施用とカーボンファームによる炭素施用では目的が違っており、この目的の違いをどのように整理するかが大事になる。（図2-5-4）

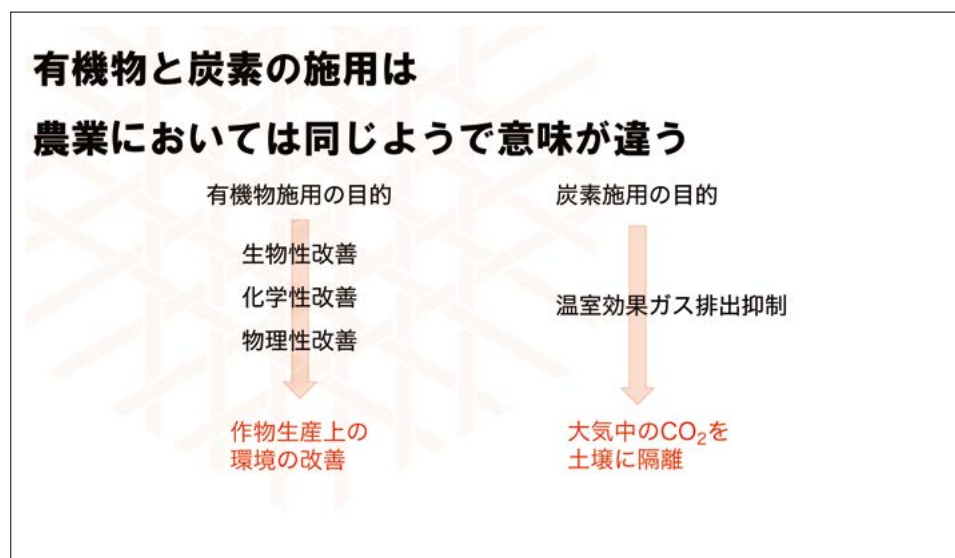


図2-5-4 有機質資材ならびに炭素の施用目的の違い

実際に最適かどうかは別として、従来から堆肥を入れていく農業生産方法として、有機農業が一般的に知られている。畑において堆肥などの有機物にバイオ炭を加える実験では、10年間にわたって堆肥とか炭を使ってくると、堆肥とバイオ炭の組み合わせでハウレンソウの収量を10年間の累積で20%以上増やすことが可能とのデータや、10年間にわたって炭素を使うと土壌中の炭素量が増加すること、そして、土壌中の団粒形成が促進され、物理性の改善にも効果があるというデータが日本でもある。（図2-5-5）

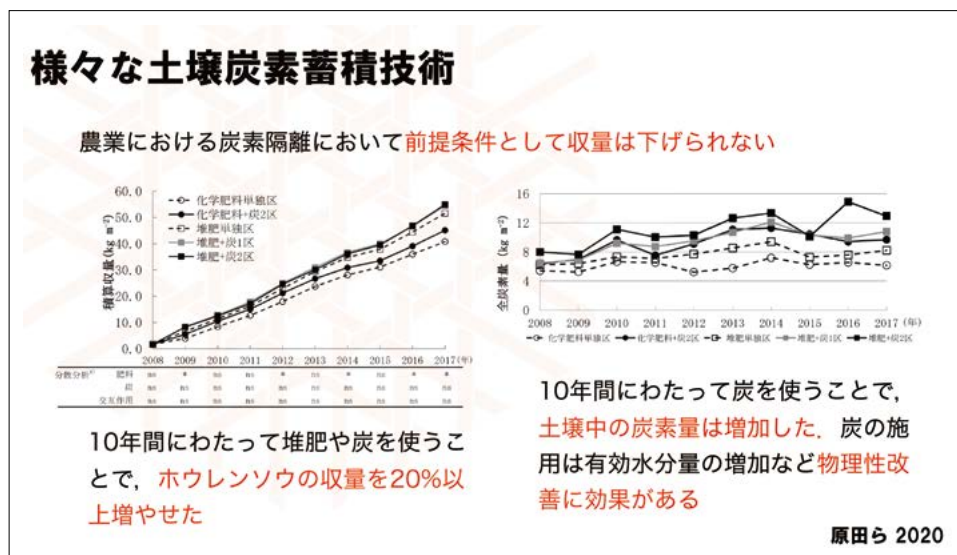


図2-5-5 有機物資材（堆肥）と炭素（バイオ炭）の施用が、設栽培における作物収量と土壌炭素貯留に与える影響

また、茶園での茶木の場合、樹齢30年生以降から茶木が同化する炭素量よりも土壌中に貯まる炭素量の方が多くなる。茶木は有機物をかなり入れる少し変わった栽培方法ではあるが、土壌中に炭素隔離となれば効果のある栽培と言える。一方、茨城のナシ園での果樹の話であるが、化学肥料を使いながら落ち葉を掃かずそのままにしておくと、土壌中の炭素は維持することができるとの報告もある（図2-5-6）。

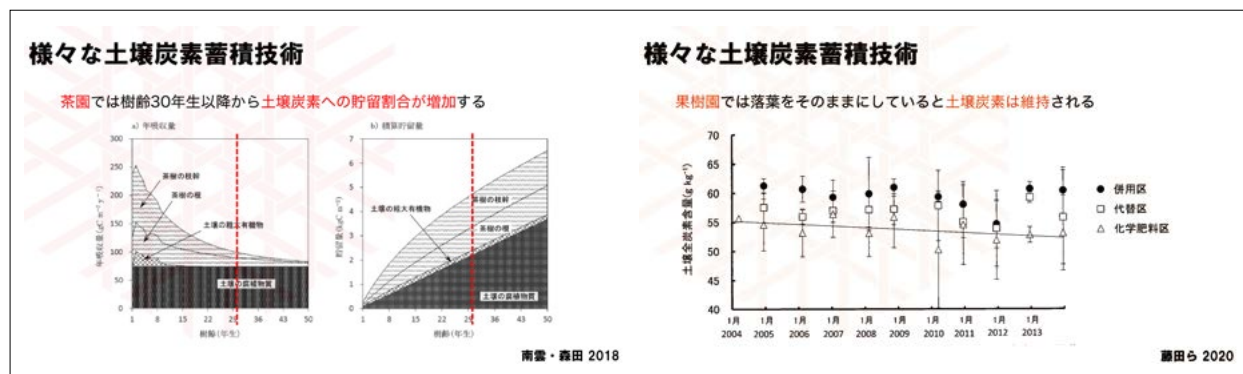


図2-5-6 施用有機物の管理が、茶および果樹栽培における土壌炭素貯留に与える影響

ここまでを総括すると、農業においては、様々な有機物施用の技術が数十年間続けられており、それらのデータからは、土壌における有機物施用と炭素隔離は、ほぼ同じ意味合いであり、炭素隔離によって作物生産性の維持・向上ができることが言える。農業では有機物を入れる（炭素隔離をする）前提条件として絶対に収量を下げられない。収量を下げても良いが、その場合は農作物の経済的な単価を上げなければならないが、通常、有機農業であっても単価が上がることは期待できない。このため基本的に農業で単価上げるには別な経済的な条件の付加が必要になる。したがって、農業の有機物施用や炭素施用の前提条件は、収量を下げないことがポイントになってくる。

基本的に農業は土壌中の炭素を減少させる方向になる。土壌に貯留する炭素とは、森とか林で考えるとわ

かるように、分解されなかった有機物中の炭素である。では、どうやったら分解されないかという話になる。微生物がアクティブになると、有機物が分解されてCO₂放出につながる。微生物活性を抑制すると土壤中の有機物の分解が抑制され、土壤に炭素が貯まる。しかし、農業では土壤中の微生物を活性化させることで、土壤中の養分循環速度を上げ、作物の生産性を向上させるということが基本概念にあるので、微生物活性を抑制するという考え方が難しい。一方で、炭素を貯留させる技術として、世界中での共通技術は、不耕起・省耕起という栽培方法である。これらの栽培法では、耕起をしないことで土壤中への空気の供給が抑えられるので、好気性の微生物の活性が抑えられて微生物の呼吸量が下がり、土壤中の有機物の分解が抑制される。これらは、必要以上に微生物活性を上げない（余分に呼吸量を上げない）栽培法と言えるが、不耕起・省耕起にしても先ほどの前提条件（収量は下げられない）は崩れない。不耕起・省耕起により、地温の上昇、有機物分解、CO₂放出量が抑制され、土壤中に結果として炭素が貯まるというデータは既に北海道で出ている（図2-5-7）。

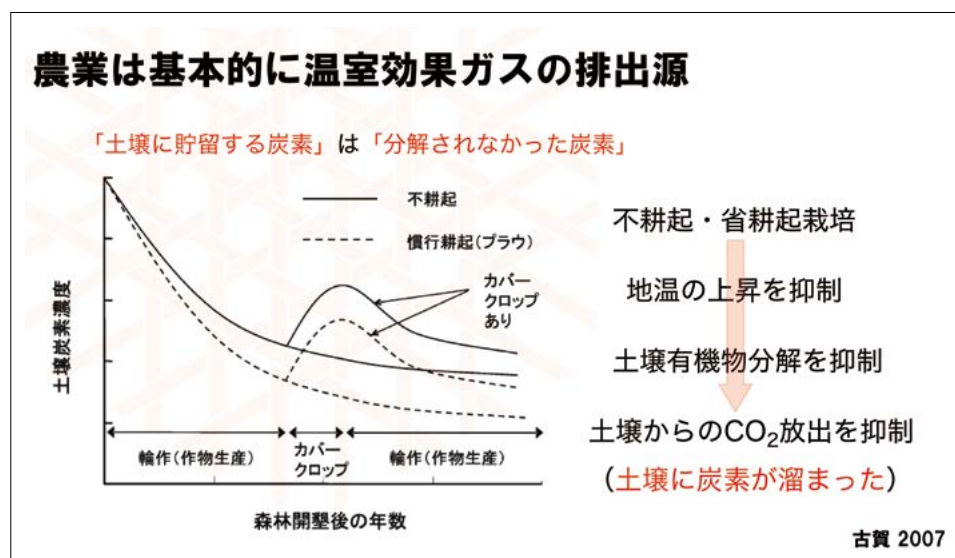


図2-5-7 不耕起など土壌管理方法の違いが土壌炭素貯留に与える影響

もう一つはメタンであり、農地での一番の発生源は水田である。コメは日本の穀類の中でも主要な農産物であるが、水田では酸素がないため嫌気的になって有機物が還元され、メタンが放出される。メタンの温室効果係数はCO₂の28倍と言われているが、このメタンの排出源の3分の2以上は農業由来と言われ、うち3分の1程度が水田から出ている。環境省のプレスリリースによると、年々メタンの放出量は上がっており、全大気中の平均濃度は2011年以降で去年が最大になったという報告もある。メタン発生源は農業由来が大きいと言われている以上、農業からのメタン発生抑制対策は、今後の大きなターゲットになる（図2-5-8）。

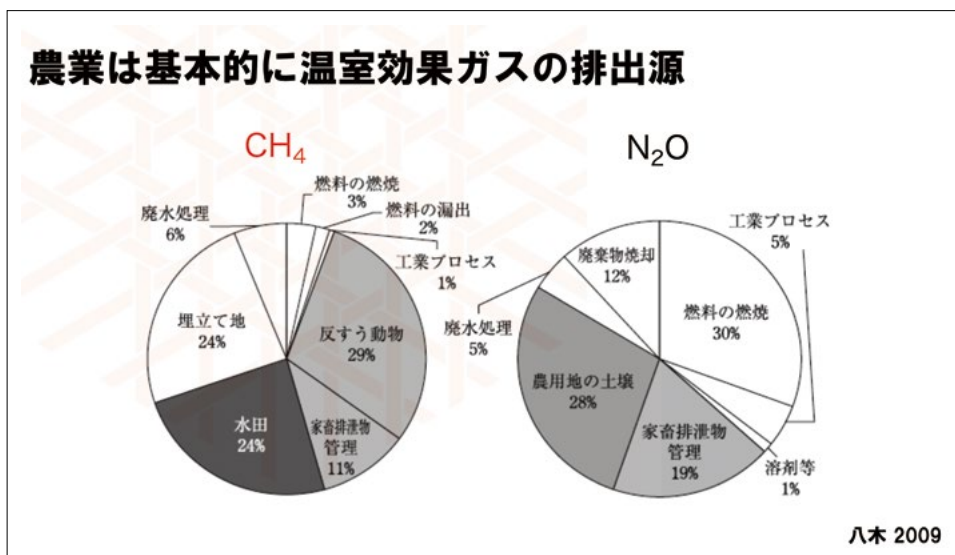


図2-5-8 日本におけるCH₄およびCO₂排出起源

このようなメタンの発生源の抑制は、栽培法により工夫されている。例えば不耕起栽培として一番初めに取組まれた事例が稲作だと思うが、水田の不耕起栽培では5年以内で考えるとメタンの発生量を50%に削減できる。さらに5年目以降はメタンの発生量は多くなるが、その分、炭素貯留量が増えていくので、炭素隔離という面では、不耕起栽培は水田において非常に大きなメリットが出てくる。温室効果ガスの発生量も20%削減できたとの報告が出てきている（図2-5-9）。

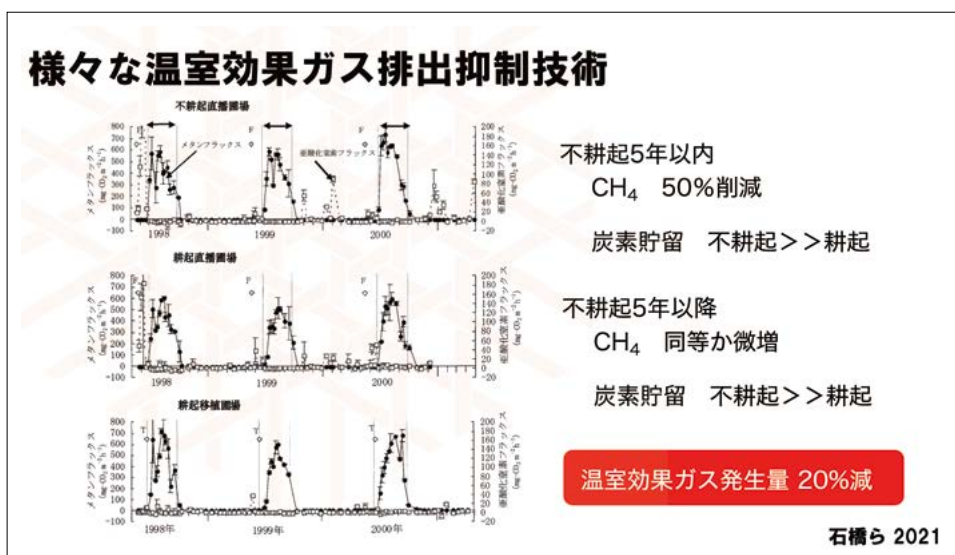


図2-5-9 不耕起が土壌炭素貯留に与える影響

有機物と炭素の施用は農業において同じようで意味が違うとお話した。有機物の施用の目的は生産性の向上であるが、炭素を入れる目的はCO₂を土壌に隔離させることである。五十年以上前から農業で培われてきた技術は、炭素隔離にすり替えてもうまくいく。ただ、炭素隔離にシフトする最初の入口が大事である。農水省が出している今のカーボンファームのイメージでは、左側がベースラインとなる。要は土壌中の炭素量

が規定されていて、その後、プロジェクト実施後に炭素が貯まることが基本の概念になっている。目的は、難分解性の土壌有機物を増加させ、炭素隔離をすることである。前提条件として収量を下げないことさえ守られていれば、これまでの農業の施策でつくってきた技術が、カーボンファーマーミングにある程度当てはめることができると思う。

ここまでを総括すると、従来の農業技術、有機農業に限らず、有機物を施用していく有機的な農業と、炭素蓄積、温室効果ガス排出抑制を目的としたカーボンファーマーミングにおける農業技術は、ある程度は一致していると考える。ただ、温室効果ガス排出量、抑制技術の本質は、基本的には土壌中の有機物の管理し、CO₂を抑制するもしくは炭素を土壌にため込むという管理にある。このため、総合的に土壌環境の構築を持続的にさせていくためにも、今後のカーボンファーマーミングは、炭素を隔離することだけに着目した話ではなく、従来から持っている生産性を落とさないことを前提とした条件づけの下、カーボンファーマーミングの技術をアカデミックな方法で上げていかないと、現地への普及は難しいと考えられる。

では、どのようにカーボンファーマーミングを普及させるかということについて私見を述べる（図2-5-10）。カーボンファーマーミングの一般化はあきらめたほうが良い。現状、Jクレジット系で考えられるような農耕地での炭素隔離のツールとしてあるのは、バイオチャーを入れること、もしくは、不耕起栽培の2つである。バイオチャーを入れることは、土壌中へカーボンを直接インプットしていくこと、不耕起栽培は土壌から二酸化炭素排出を抑制させるということがポイントである。バイオチャーを例にする。カーボンファーマーミングの一般化をあきらめるとするのは、ネガティブな話ではない。現状、バイオチャー利用の理想型は施用地域から発生する有機質系資源で行うことである。理由は、軽いと体積が大きくなり、輸送費がかかるためである。ここはかなりのコストになるので、理想は発生地域で使用するこである。あと、もう一つは、バイオチャーといっても原料で性状が異なるところがある。350℃以上燃焼でも、原料が竹なのか、木質系なのか、それとも草木系なのかで全然違う。土壌型によってバイオチャーの分解率も違う。作物の作型、畑なのか果樹なのかでも分解率が違う。施用時期も、北海道の道東であると、散布できるのは4年に1回ぐらいである。あと、夏まきのか、それとも冬に向かって秋にまきのかというスタートの時期も違うので、マニュアル的なモデルをつくるのは難しい。

このため、実際にはバイオチャーは現実的に導入可能な地域資源にしていくということが大事である。そうすれば、自ずと作型、土壌型はある程度決まってくる。それに基づいて土壌炭素の貯留量評価をしていく。流れとしては、ステークホルダーや共に技術を普及をしていく人をJクレジット系で経済評価できる人のところまで繋げる必要がある。ここをうまく繋げないと地域内でのマッチングがうまくいかない。このマッチングをうまくするためには、組織として得意なところにお金を振ることである。バイオチャーを作るところは実際に動くところなので、これは農協とか民間企業の話になる。作型、土壌型を組み合わせでどうやったら一番うまくいくの考えるのは、地方農試、地方にある研究センター、もしくは地方大学になる。炭素貯留を実際評価するのは、アカデミックな話になるので、国の国研や大学がやっていくべき話となる。出てきた案を広げていくのは、ステークホルダーと直結している農協普及センターであり、技術を吸い上げて普及するのは農協普及センター、地方農試のような地方の公立機関になる。Jクレジット化してインセンティブをつけることができるのは、農研機構や大学の社会経済系の先生である。

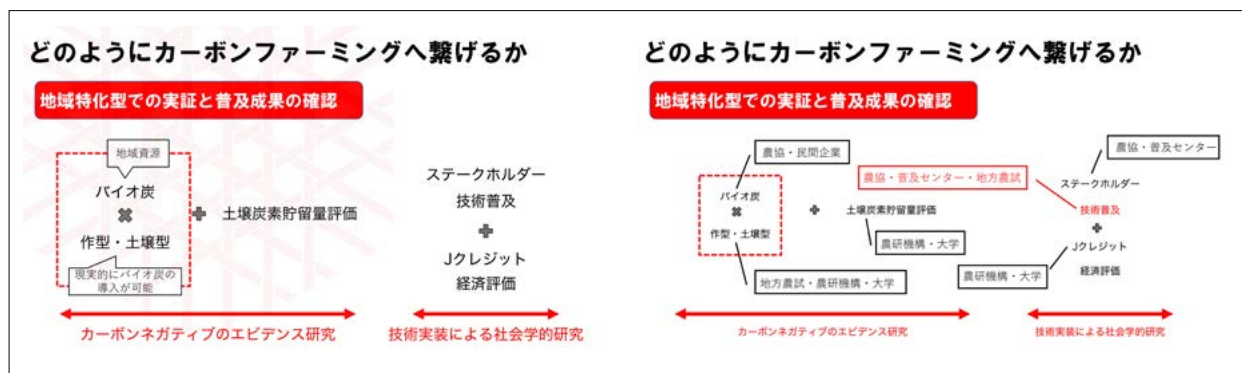


図2-5-10 カーボンファームを普及させるための方法案

我々のような研究サイドはアカデミックな研究が得意だが、実際それを地域にどれだけ落とせるのかとなると苦手である。そういうときには、実際にその技術を実装できる普及先、利用を期待できる地域、地域資源、既に示されているJクレジット化に必要なエビデンスの項目を、地方大学の社会系・経済系の先生方とか地方農試普及センター、農協、農研機構の各研究センターで、出口を決めることが良い。この出口を決めて、必要な研究項目に落とし、これを公募すると日本全国からプロが来る。私の理想であるが。そうすると、項目一個一個がアカデミックな研究テーマになり得ることになるので、公募で予算づけをすることで専門家が集まってくると思う（図2-5-11）。



図2-5-11 カーボンファームの研究と実装の枠組み案

【質疑応答・コメント】

Q：焼成温度によってできるチャーのマイクロ構造やその中に残る有機質の量も変わる。そのような構造が違うことを考慮した上で、地域ごとで利用すると効果があると思うが。

A：その通り。地域によって燃焼炉の性質も違うし、出てくる有機物の原材料が違う。そういった意味で一般化というより地域ベースでベストな方法を決めるのが得策だと思う。そのような地域地域の策定は、地方農試・普及センターの得意技と考える。なので、バイオチャーを入れることに関しては地方農試・

普及センターのレベルまで落とすことがポイントと思う。

- C：大学の学問や論文レベルとして、バイオチャーの構造やチャーの中の有機物と炭素の割合が焼成温度によって変わるのでその効果についてカーボンファーマーミングとして突き詰めることが良い。
- Q：窒素肥料を入れた後の N_2O 、一酸化二窒素の発生の問題もあるが、本日の CO_2 を中心としたカーボンファーマーミングの話題の延長戦で問題ないのか。
- A：変わると思う。 N_2O は、 CO_2 のデータと研究の量が違い過ぎる。このため今は N_2O がどれだけ発生し、その変化のパターンという基礎的な段階と考えている。農地に関しては値もケースによってばらついており、 N_2O はこれからのターゲットになる。10年、20年後ぐらいには窒素は重要でアカデミックには進んでいると思う。窒素も含めた研究は複雑になるので、今は CO_2 に特化していると思う。
- Q：地域特化型としていろいろなステークホルダーを束ねて、誰かがリーダーシップ取って動くことが必要になると思うが、それは誰と考えるか。
- A：基本的には地方大学と思う。地方大学のネットワークは強く、地方の農業試験場や普及センターに人材を出している。そういうところと連携しながら、国の統括になり、東北農研、北海道農研、さらには農協を巻き込むことが良い。特にこのカーボンとかの土壌の話は、インセンティブつけた形で普及・展開を総合でできるようなところは、社会系の先生などがリーダーとなるスタイルが理想的と考える。
- Q：バイオテクノロジーへの期待という観点であるが、微生物活性の CO_2 呼吸量は少なめだが、生産性は現状維持あるいは少し上げるような微生物、農業資材の開発はあるのか。
- A：ある。植物に何かをつけて代謝を上げる、植物自体の機能性を上げることに期待している。ただし、土壌中に菌を入れて変化させるのは、ほぼファンタジーと思う。考えれば普通のことだが、外部から菌を土壌中に入れて、その菌がそのまま土壌中に広がっていたら、世界中の土壌は微生物に対して非常に脆弱だと言える。ただ微生物を植物にも共生させた状態で微生物を動かすことは、かなり技術としての期待度が高い。
- Q：日本で不耕起栽培が広がっていない理由は何か。
- A：不耕起栽培は地域で広がるものである。愛知県では稲作で早い段階から実施しており、また技術も非常に高い。広がっていない理由は、例えば、新しい技術を40代ならコストをかけてでも試そうと思えるが、80代では試す気にはならない。また、稲作のやり方は北海道と本州で違う。田植も違うし、機械も違うし、様式も違う。そのような地域性もあるので、不耕起を導入するにしてもトライアンドエラーはでてくる。従来の技術でおいしいもの、きちんとしたものができているという状況で、年に一作・二作しかできない生産者が栽培法を変えるのは、そもそも難しいのである。また、不耕起でカーボンが溜まると行っても、カーボンが貯まること自体は、農家にとってインセンティブにはならない。

2.6 総合議論（陸域）

2.6.1 概要（議論したい内容）

【バイオマスNETsの実用化加速のために必要な共通課題】

- バイオマスが関連する炭素循環のなかで、大気中のCO₂削減に効果的なフロー・ストックを見いだす上で未解明の部分はどこか。
 - ➔ 陸域生態系の詳細解明（例：老齢木の把握）
 - ➔ 植物の根などの分解特性の解明
 - ➔ CO₂貯留量の定量化
- 炭素固定量増加のために効果的な方策と、その基盤となる科学技術は何か。
- 社会・経済的な課題やコベネフィットについて。
- 推進方法の具体的なイメージや時間軸など。

2.6.2 今後求められている科学技術上の課題

【陸域生態系の詳細解明に必要なこと】

• 長期的な取り組み

A：陸域生態系の詳細解明のためには長期的な取組が必要。陸域生態系は、数百年、数千年規模のタイムスケールで動いているものもあり、長期的なダイナミクスを観測した例はない。またモデルでの表現も難しい。しかしそれがないと地球環境変動のスケールでの応答は見えてこない。それをいかにして理解して、メカニズムを落とし込んだ上でモデル化していくかは、大きなチャレンジである。特に森林が草原に変わる、森林のタイプが変わるなどの生態系の種類が変わるなど、単に生理的な応答だけではなく、もっとダイナミクスな挙動モデル化が難しい。それはDGVMと呼ばれている、動的植生モデルで扱うことが、ここ二、三十年のトレンドではあったが、そのモデルの振る舞いを拘束することが難しく、将来予測をした場合にモデルによって振る舞いが違い、不確実性が生じる。それをどのように絞り込んでいくかは、質的なところから詰める必要があり、大きな課題である。そのような長期的なところは、科学的に分かっていないし、解明していかないと、ネガティブエミッションに生態系を使うとしても、いつまでも未知な部分が残ってしまう。

• 観測とモデルの融合

A：基本として長期観測が必要。データを長期観測した上で、その変わりゆくポイントが出てくるところでの起こりゆく変化を見ることである。もう一つは、観測もさまざまなサイトがあり、それで初めて普遍的なルールが出る。必ずしも直接地上で観測したものだけでなく、衛星データなどのいろいろな観測データがあり、それを複合的に解析するような技術、要するにビッグデータ解析技術が必要になる。ビッグデータ解析、もしくはモデルと観測データを融合させる技術が必要になる。観測は、結局モデル評価にもつながってくる。

• 老齢木の課題について

A：老齢木の把握は、古くて新しい問題で、生態学的には老齢木から構成される森林は、CO₂の吸収量は飽和し、定常状態が常識とされていたが、今日、フラックス観測で、老齢木で構成される森林の観測で、若干ながら吸収量が観測される。その理由は解明されておらず、単に観測のエラーか、それとも我々の知らないメカニズムで老齢木にも炭素が貯められていくのか、あるいは、貯められた炭素が流出や溶脱により地下から抜けて、炭素の収支として釣り合っているのかが分かっていない。そういうものが分からないと、生態系の本当の炭素収支の中での役割が、定量化できない。

Q：老齢木の研究において植物分野からの知見などのニーズは。

A：植物分野の人は植物の年輪を見たりとか本数を見たりとかいうところに行くが、例えば地球化学の人たちから見ると、例えば、放射性同位体を使うと、その中に貯められている炭素がどれくらいの年代を持っているかが見えてきたりする。そういった違う業界の人たちの違う見方というのを入れていくと、一気に進む部分もあるが今後の課題。

Q：老齢木や、いろいろな植物のCO₂の吸収特性などを正確に知りたいというニーズがある中で、植物分野の研究者が貢献できることはあるか。

A：光合成の活性は測れるので、老齢木の光合成は植物生理学の観点から直接測れるが、別に植物の研究者でなくでもできる。老齢木は何十年という話になるので、実験室でやることは難しい。これを実験室の環境で1年に3つ、4つの年輪を作る方法もあり、人工的に老齢木のようなものを短期間に作り、実験することはできる。それでも、例えば3か月でできるかといったらできない。

A：遺伝子の発現を見ることで、老齢木がアクティブかは分かたりする。遺伝子発現は植物の研究者しかできない。あと、代謝物分析も考えられるが、結果は分からない。

【バイオマス地下部、土壌における分解の研究について】

Q：地下部でも植物の根や有機炭素など、炭素の分解特性の解明が重要ではないか。あとは、Cover cropの効果など、アクションによるCO₂の貯留量の定量化が必要ではないか。また土壌中での分解の計測は正確に測ることが難しいのではないか。

・長期モニタリング（フラックス計測と土壌サンプリング）と国としての仕組み

A：日本でもモニタリングネットワーク、JaLTERがあるが、国のサポートが重要と考える。アメリカでは、NEONという観測ネットワークとして、全米20か所ぐらいを30年間モニタリングしようとしている。また生態系の炭素や窒素のほとんどは土壌に貯まっているので、土壌や地下部も含めたモニタリングが重要。日本は欧米と比較して足りない。アメリカではフラックス計測と同時に土壌のサンプルに予算をかけている。毎年サンプルを採取し、それを使った研究ができる仕組みになっている。その他、農地と自然生態系、河川のバウンダリー問題も含めてモニタリングしていくことが、今後の気候変動対応で重要になってくる。国の組織としては、いわゆる縦割りの問題があり、それをどう打破するのかが、避けられない問題である。

・RothCモデルの改良

A：地下部、土壌の分解や安定性の評価が困難であり、モデルを改良するために基礎研究を続けている。モデルはRothCモデル（ローザムステッドモデル）という単純化されたモデルで、数十年スケールであればそれなりにあるが、入れる堆肥や有機物の質の情報は、農家にそれほどなく、不確実性がある。また、RothCモデルでは長期的に炭素が貯まるかは粘土含量で決まるが、実際は活性鉄、活性アルミニウムなどの土壌タイプが重要でありモデル自体を改良する必要がある。あと、炭素、窒素、リンは連動しながら物質は循環する。特に窒素負荷や窒素、リンの循環の乱れが、いわゆる水質問題や外来種問題などの生態学的な問題にも密接に関わっているため、そこを理解してモデル化したり管理したりすることが重要である。

・RothCモデルの精度

A：同じシナリオで毎年稲わらを何トン入れると推定すれば、10年、20年はプラスマイナス20%ぐらいでは合うレベルであるが、100年ぐらいの時間や、例えば稲わらやバイオ炭を入れて、貯まるが、どこかで平衡になり炭素飽和が起こるかは、議論がある。そこはモデルに反映されておらず、大きな不確実性がある。入れ続けたときに、その飽和レベルは何か決めるのかなどは、サイエンスとして議論が続いている。

C：補足である。RothCは、農地限定である。イギリスの有機物連用圃場で出来たモデルに対して、日本

の黒ボク土でフィッティングするように、係数を変えることでつくっている。森林のような枝やリターが入るというモデルではない。

C：森林のモデルはCENTURY、伊藤氏のVISITなどがあり、構造はかなり似ており、一次反応式を組み合わせたようなモデルである。

【地下部における分解抑制に関する課題】

Q：地下部における分解抑制によりネガティブエミッションを増す観点で、農地でも可能性があるのか、農地でなく別のところがいいのか。

A：森の地上部は例えば今ならAIで樹木投影図が自動的に出せるほど工学的に進歩しており、バイオマス量の計測ができる。これが地下部となると、根を掘り出すことは、演習林などで可能であるが、根の測定のために3D画像を10メートル規模で撮っても、バイオマス量の画像解析ができない。未だに根を切り取り、重量と密度を測ってバイオマス量を出すアナログ的な方法である。地下部の測定の技術のブレークスルーが必要。森林の中で土壌中のCO₂量を測る方法は、それが微生物由来か、あるいは根由来か、有機物由来かというルートは分からないが、世界的な公定法としてオーソライズされていると考えている。あと、農地については管理されているので、CO₂量計測が問題ないと思われるが、ケース・バイ・ケースである。農地は耕しやすいように整地しているが、それは基盤改良事業という土木工事なので、1つの畑の中でもガスフラックスが違ってくる。炭素のガスフラックスのオーダーが10%、20%で1個の圃場でずれることは当たり前にある。農地でも、例えば水田だと水が入るところと出るところでは全然違うなどがあり、フラックスも平均化するのは難しい。ただ、ずれることを前提にその幅内で考えることが大事。

2.6.3 社会実装に向けた課題に関する議論

- ・社会・経済的な課題：地域での実際の理解、自治体等の協力、森林などでの林業従事者が高齢化。
- ・技術的課題：水不足への懸念、コベネフィットやコンフリクトとして、例えば栄養や水の要求性が高まる可能性など。

【コベネフィットやコンフリクト】

A：成長が良いのは、負の側面もあり、例えば水の要求性が増える、栄養要求性が増えるなどは技術的な課題である。でも、研究者はあまりやりたがらず、悪いところは見たくないというのがある。何か仕組みが必要。圃場試験をやれば良いが、インセンティブが必要。

【生態系への影響は】

A：生態系への影響の懸念が何を指すかはっきりしない。そもそも人工林や畑は人間が管理するものである。組換え植物などは、生態系への影響というよりも社会受容が問題と考える。いいもののメリットは説明することは必要と考えるが、つくったものを別の人が評価することも必要とも思う。

【社会・経済的な課題】

A：森林に関する社会・経済的な課題として、現在のパリ協定では、日本の提出した温暖化対策の中で森林にどれくらい吸収量を求めるべきかがまだ定められていないことが大きな問題と考える。1997年の京都議定書では、森林の吸収源が条文の位置づけられており、それで日本の6%削減の中の3.7%程度を森林の吸収源とする方針が出され、前回はそれに向けて政府は補助金を出した。現在、森林環境税とか導入されているが、今後その対策を整備することが必要。

A：日本では草地で炭素がたまっている土があるが、基本的には元草地か現在草地の場所だけである。日本は降雨量が多く、文化的な背景で、野焼きをして草地の一部が炭素貯留されている。阿蘇は、温帯地域で炭素貯留している土壌タイプになる。これはアジアモンスーン地域で多分ナンバーワンの炭素保有量を持っているエリア、日本が誇るべきエリアだと思う。日本の草地は、大事な資源としての位置づけになっている。草地のバイオマス量は基本的には地下部の土壌でのバイオマス量になり、遺伝資源の宝庫ともいわれており、その維持も課題と思う。

A：バイオマスセクターで炭素を貯めるなら、バイオ炭は手っ取り早く、技術もあるので、日本の場合は、バイオ炭はその一つとなる。社会的に考えると、一番の問題はやっぱり人口減少である。耕作放棄地が増えているので、乱暴ではあるが、リグニンをつくるものを植えて、炭素を貯めるために使うことも考える必要がある。大規模社会実装を考えるのなら、例えば限界集落を使って実証実験をやることもあり得る。

Q：ファンドにおいて、今ない課題で必要なものはあるか。

A：炭素、窒素、リンの動態が課題と考える。

3 | 海域バイオマス・ネガティブエミッション

3.1 藻場のCO₂隔離過程に関する研究と港湾分野における動向

渡辺 謙太 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
沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 主任研究官

港湾空港技術研究所ではブルーカーボン生態系を活用したCO₂隔離に関する研究を進めている。本日は港湾分野におけるブルーカーボンの取組と藻場のCO₂隔離過程に関する研究を紹介したい。

最初に2019年にブルーカーボンの研究者が取りまとめたブルーカーボン研究における10の課題を示す。①気候変動（海面上昇や水温上昇等）が堆積物への炭素貯留にどのように影響するのか、②攪乱が起きたときに海底堆積物に貯留されている炭素はどうなるか、③大型海藻による炭素隔離機能はあるのか、④全球全体でブルーカーボンの分布面積や吸収量はどれぐらいか、⑤有機炭素、無機炭素といった炭素の複雑な動態がCO₂吸収にどのように影響するのか、⑥堆積物に貯留されている炭素の起源は、⑦炭素貯留速度は何によって決まるのか、⑧ブルーカーボン生態系からの温室効果ガス排出量はどれぐらいか、⑨CO₂隔離量の推定の不確実性をいかに減らすか、⑩どういった沿岸域管理をすることでブルーカーボンを増やしていくか、これらが今後の研究課題だとして取りまとめられた。（図3-1-1）

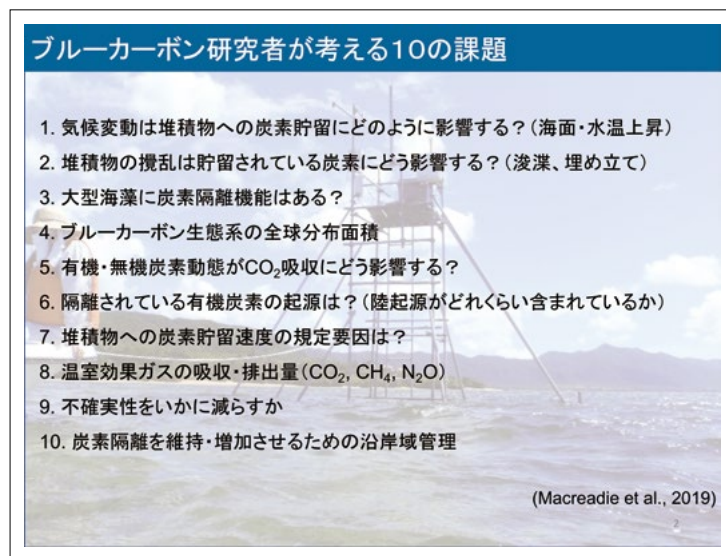


図3-1-1 ブルーカーボン研究者が考える10の課題
(Macreadie et al., 2019)

港空研でも、これらに対応する研究を行っており、今回、①⑥⑦⑩の課題解決に向けた研究を紹介する。

まず、広大なアマモ場を有する北海道東部にある汽水湖をモデルサイトとした研究を紹介する。北海道東部は千島海溝周辺で数百年周期の大きな地震が起きる場所であり、こうした大地震に伴って地殻変動が過去周期的に起きた場所である。過去に起きた地殻変動は、今現在進行している気候変動による海面上昇のナ

チュラルアナログになっており、過去に地盤沈降し相対的に海面上昇が起きた場所では、現在の海面上昇と同じようなことが起きていると言える。（図3-1-2）



図3-1-2 地殻変動を海面上昇のナチュラルアナログとした研究

（Watanabe et al., 2019）

こういった場でブルーカーボン生態系がどう変化し、炭素貯留がどう変わったかを堆積物コア（柱状サンプル）を採取し分析した。図3-1-3はある地点のコアの分析結果であるが、ほかのコアでも同様の過去の履歴が見られた。コアの表層から下部に向かって過去3,500年ぐらい前まで遡っており、茶色、緑、青で示したのは有機物の起源になる。陸上植物由来が茶色で、アマモ由来が緑、海洋プランクトン由来が青である。炭素貯留速度を一番右に示しているが、これが高いほど多くの炭素が貯まった時代となる。

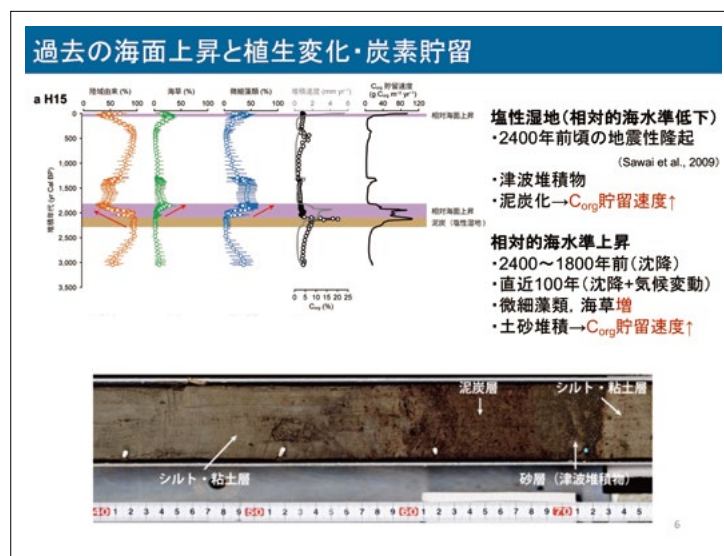


図3-1-3 堆積物コアの分析から得られた有機物起源と炭素貯留速度の時間変化

（Watanabe et al., 2019）

この場所は、2,400年前頃に大地震があり陸地が大きく隆起したことが知られている。この際の相対海面低下によって浅い海底が陸地化し、塩性湿地が広がったと考えられる。その履歴が2,400年前ぐらいの茶色で示しているところで、海が陸地化して塩生湿地が広がり、炭素が多く貯まった時代である（図3-1-3）。その後、1800年前ごろにかけて紫で示すように海洋プランクトン由来、アマモ由来のものが増えていくフェーズがあり、これは地盤沈下により相対海面上昇が起きた時代です。このときも炭素貯留速度は速く、海面上昇が起きたときに塩生湿地は沈みアマモ場の広がる浅い海域になったが、そのときに水深が増えていくことで土砂がたまるスペースが確保できて、ブルーカーボンがたくさん貯まったことが分かった。簡単な模式図でまとめると、相対的に海面が低下したときには、緑で示す塩性湿地が広がり、炭素がたくさん貯まる。海面上昇が起きると、塩性湿地は海中に沈んでしまうが、堆積スペースができることでアマモ由来の炭素が貯まりやすい環境になる。さらに水深が増えることで、海面上の波浪の影響が減衰するので、土砂の攪乱も少なくなり炭素が貯まりやすくなったと考えられる。このように将来、海面上昇により湿地が沈むことが予想されるが、藻場では海面上昇に追いつく形で炭素が貯まる可能性がある。このようなフィードバックの可能性が現地調査から見えてきた。（図3-1-4左）

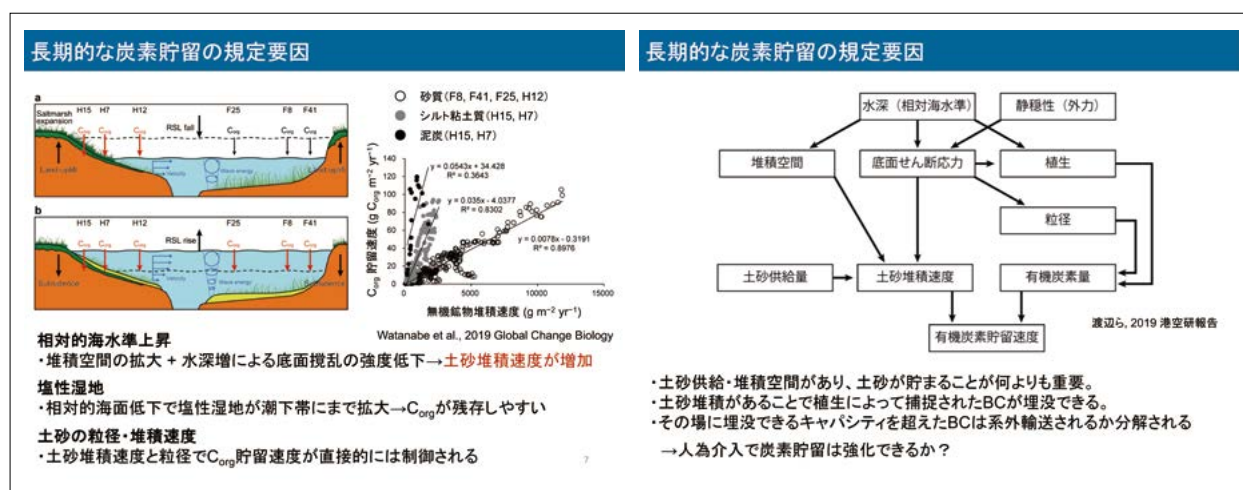


図3-1-4 海面変動と植生変化・炭素貯留の関係
(Watanabe et al., 2019)

有機炭素貯留速度は、いろいろな要因で決まっている。最も重要なのは有機炭素供給量であり、植生の種類と粒径に依存している。土砂の粒子が細かいと表面積が大きくなるため、有機物がより多く保持できると考えられる。陸上土壌でもそのようなメカニズムがあり、海洋堆積物でも同じことがあると考えられる。もう一つ重要なのは土砂の堆積で、植物によって多くの炭素が供給されたとしても、それを埋没させる土砂が堆積しないと炭素は貯まらない。つまり、河川からの供給もしくは沿岸漂砂による土砂の供給が重要であり、かつそれが貯まるような堆積空間が維持されることが大事である。また、適度な水深があることで波や流れが底面に作用する働き（底面剪断応力）が弱まり、このようなことが複合的に働き炭素貯留速度が決まると考えている。（図3-1-4右）

次に人為介入によって炭素貯留が強化されるのかということについても北海道の藻場をモデルサイトに調査した。モデルサイトとしたオホーツク海側にあるコムケ湖は、湖口が非常に狭いラグーンとなっている。湖口は人工的に掘った水路になっており、ここから海水が入ることによって塩分が維持されている。このため、緑色で示す範囲に大きなアマモ場が広がっている。この汽水湖は元々湖口が季節的に開閉する湖である。1947年や1953年の空撮写真を見ると、湖口には砂が堆積し、開閉していることが見て取れる。春には融雪出水に

より砂州が壊れて海水交換が起きるが、夏になるまた閉塞してしまい、湖中の塩分が安定しない水域であった。塩分が不安定なので、元々アマモは少なかったようだ。しかし、1977年に人工湖口を造ることで今では安定的なアマモ場ができています。（図3-1-5左）

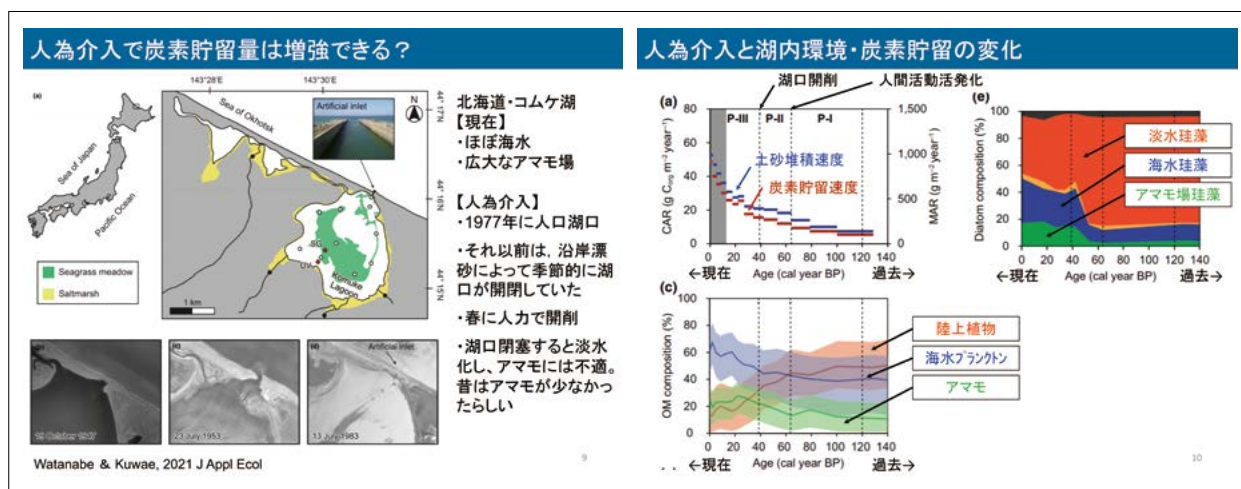


図3-1-5 過去の人為介入（海岸工事）による炭素貯留の変化を調べた研究
 (Watanabe and Kuwae, 2021)

コムケ湖でも堆積物コアを採取し、過去環境の変化を調べた。図では横軸に年代を取り、左が現在で右が140年前である。赤で示した炭素貯留速度は過去から現在にかけて上昇しており、特に1977年の湖口開削後ぐらいいからより多く貯まるようになっている。それ以前の70年前辺りも、人の定住がはじまり、湖口の人力掘削など人為介入が始まった時期であり、炭素貯留速度は徐々に増えている。右図に示したのは、堆積物中の珪藻遺骸構成であるが、これも人為介入が始まった時代に淡水起源のものが減り、海水プランクトンやアマモ場にいるものの割合が増えているとことが分かる。左下で示したのは、安定同位体比という化学トレーサーで調べた有機物起源であるが、これも陸域由来が減り海水プランクトン由来、アマモ由来のものが人為介入の時代とともに増えていることが分かる。（図3-1-5右）

こうした分析結果から以下のようなことが分かる。コムケ湖は元々自然変動による湖口開閉のために環境が不安定であり、アマモ場は多くなかった。しかし、入植に伴って人為介入が始まり、徐々に海水交換頻度が増えることでアマモ場が拡大した。さらに近年の土木工事により湖口が常時開いた状態になってからは安定的な藻場が広がり炭素がたくさん貯留されている。コムケ湖の人為介入は藻場を増やすことを意図して行われたものではないが、人為介入によってブルーカーボンを増やせる可能性があることを過去の堆積物の履歴から調べた研究となる。

もう一つ、大型海藻に関する研究を紹介する。大型海藻は岩盤や構造物など固い基盤に生息する種類である。ブルーカーボン研究はもともと生態系内の堆積物に炭素が貯まっているという知見からスタートしているため、堆積物上に形成されない大型海藻藻場の研究は遅れていた。2016年に出版されたレビュー論文の中で、大型海藻が枯れて沖合に輸送されて、最終的には深海等に隔離されることで、CO₂隔離に貢献する可能性が指摘された。深海輸送のほかにも、大陸棚等の藻場外の堆積物に貯まる過程、難分解性の溶存有機炭素（DOC）を放出する過程でも炭素を隔離している可能性がある。もう一つはアルカリ度を介した炭素隔離過程も考えられる。アルカリ度が高いと溶存無機炭素がCO₂ではなくイオンの形で水中に保持される。アルカリ度は海藻が嫌氣的に分解される過程で上昇するため、こうしたプロセスも炭素循環においてCO₂を隔離する重要な役割を果たす。

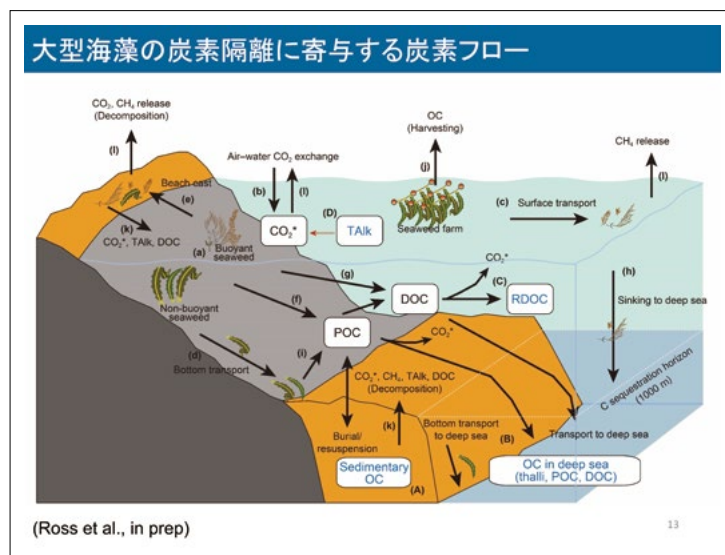


図3-1-6 大型海藻の炭素隔離に寄与する炭素フロー

図3-1-7に2016年にまとめられた炭素収支の推定を示す。特に我々の研究所ではこの難分解性DOCの放出を調べている。2016年の推定では生産された炭素のうち、20%程度が溶存態として系外に出ていき、最終的に基礎生産量の7%ぐらいが中深層に輸送されて隔離されると予測されている。この7%という数値は予測であり、その確からしさを確認することが本研究の動機となっている。植物が出した有機物は元から難分解のものもあれば、バクテリアの分解過程を経て、微生物が変成する難分解性物質もある。そういったものが時間をかけて深いところに輸送されたり、水中に残ったりしていると考えられる。

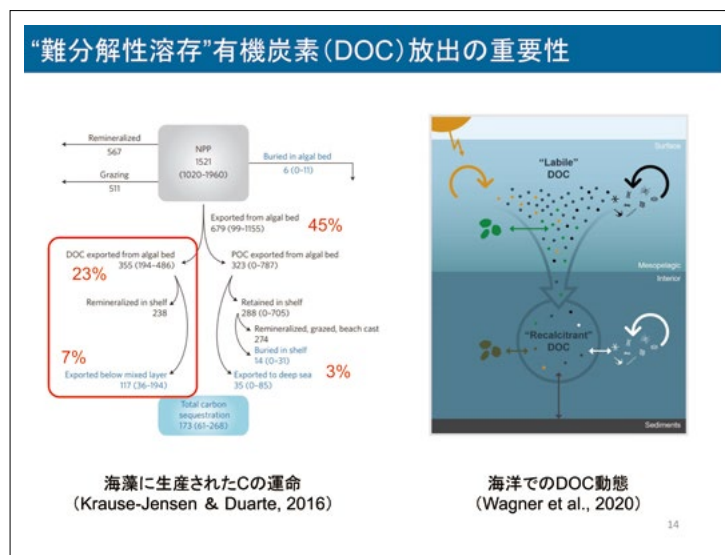


図3-1-7 難分解性溶存有機炭素による炭素隔離の可能性

我々の研究グループでは、日本の近海でよく見られる2タイプの藻場（コンブ場とガラモ場）でフィールドバッグ実験を行った。この実験では現場で海藻にバッグをかぶせることで、海藻がどの程度の速度でDOCを放出しているのか、海藻由来DOCがどれぐらい分解されにくいかを調べている。（図3-1-8 左）分解に関しては1

年間ぐらい暗条件でDOCを微生物に分解させ、その残存率を調べている。この分解による減衰カーブをモデル式でフィッティングさせ、気候変動対策でよく用いられる100年という時間スケールに外挿した際に、どの程度残存するのかを計算している。（図3-1-8右）

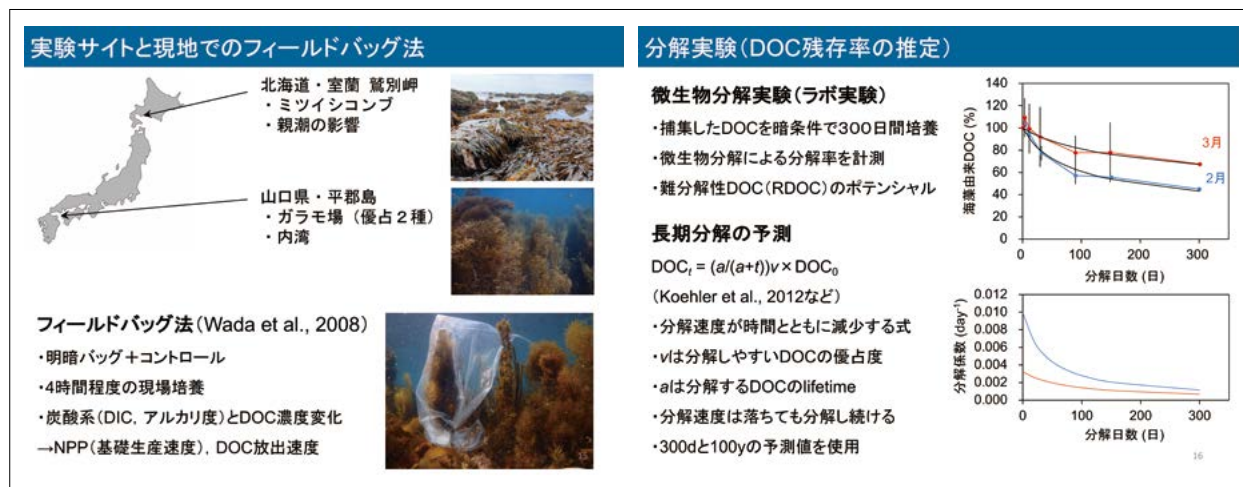


図3-1-8 海藻由来溶存有機炭素の分解実験

例えば北海道のコンブ場では年間1m²当たり1キロぐらいの炭素が吸収されていて、そのうち4割程度がDOCとして系外に放出されている。そのうち100年残存する割合は15%程度と予測され、最終的には年間基礎生産の5%程度は難分解性DOCとして水中に残っている可能性があるとの推定結果を得た。ガラモ場のほうも同程度の割合であった。このような知見をいろいろな藻場タイプなどに展開していくことも、農水省のプロジェクトで実施している。（図3-1-9）

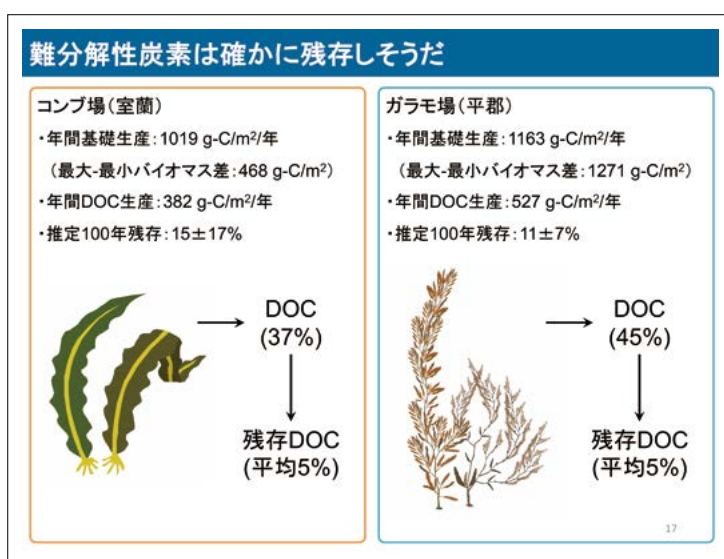


図3-1-9 大型海藻から放出される難分解性溶存有機炭素の割合

渡辺ら, 2022 (日本地球惑星科学連合2022年大会)

大型海藻に関してはいろいろな研究の必要性が議論されており、国際共同研究の中で取りまとめている段階である。先ほど述べたようにさまざまな炭素隔離プロセスがあるものの、それらが定量化されていないことが大きな課題である。また、こうしたプロセスにおける炭素フローを観測する方法も開発を進める必要があり、数値シミュレーションも取り入れていく必要がある。天然藻場を保全再生して、脱炭素で使っていくにあたり、CO₂吸収量にどれぐらい実際に寄与があるかも調べないといけない。また、漁獲目的の海藻養殖においてどれぐらい炭素隔離ポテンシャルがあるか。あとは養殖海藻による排出削減（食用以外に燃料や畜産用の飼料等）。脱炭素を目的とした大量養殖のための技術課題やそれに伴う利益やリスク。特にリスクとしては人為的な生態系を造るため他の生物への攪乱や、深海に多くの炭素を送り込むことによる影響、養殖施設による海洋ごみの問題、栄養塩の競合など、このようなリスクも考えられている。大規模養殖をやるにあたっての国際法や国内での政策やガバナンスに関してもいろいろ詰めていく必要がある。大規模養殖に関してはやり方などがいろいろ考えられているが、今現在、行われている養殖のほかに、脱炭素目的であれば全て深海に落とせば効率が良いので、そういったことを実現する形式や、沖合の洋上風力などのプラットフォームを有効活用する方法、あるいは養殖施設を生物分解する素材で作って海に流して海洋を漂わせるなどの方法も考えられている。（図3-1-10）

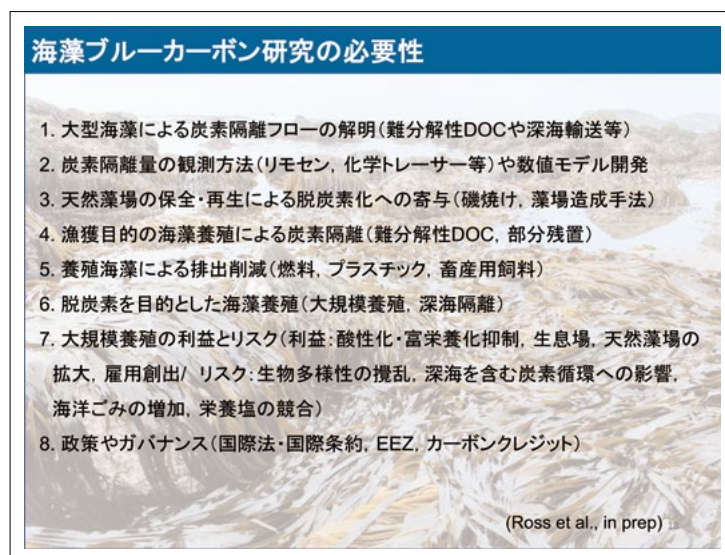


図3-1-10 海藻ブルーカーボン研究の課題

最後に港湾分野での取り組みの紹介をする。港湾分野ではカーボンニュートラルポートと銘打って、港湾全体で脱炭素をしていく長期目標があり、その中でブルーカーボンや洋上風力が位置付けられている。今現在、他省庁と連携して、国交省ではインベントリへのブルーカーボン算入に向けた検討をしている。研究面では我々がやっているような定量化手法の開発やメカニズムの解明、さらにブルーカーボンの炭素動態モデルの開発なども進めている。また、港湾構造物に生物共生機能を付けることで藻場の基盤として構造物を使う研究も行っている。

最後にカーボנקレジットの話をする。国土交通省の認可法人であるジャパンプルーエコノミー技術研究組合（JBE）が国交省と協力し、Jブルークレジット制度の運用を進めている。昨年度は横浜や徳山下松、兵庫運河、あと、北九州の民営護岸、こうした4つのプロジェクトが認証されて実際にクレジットの取引が行われている。それに関する方法論やプロジェクト要件などが手引きとしてまとめて、公表されている。今後もブルー

カーボンを活用したクレジット制度は広がりを見せると期待される。（図3-1-11¹）

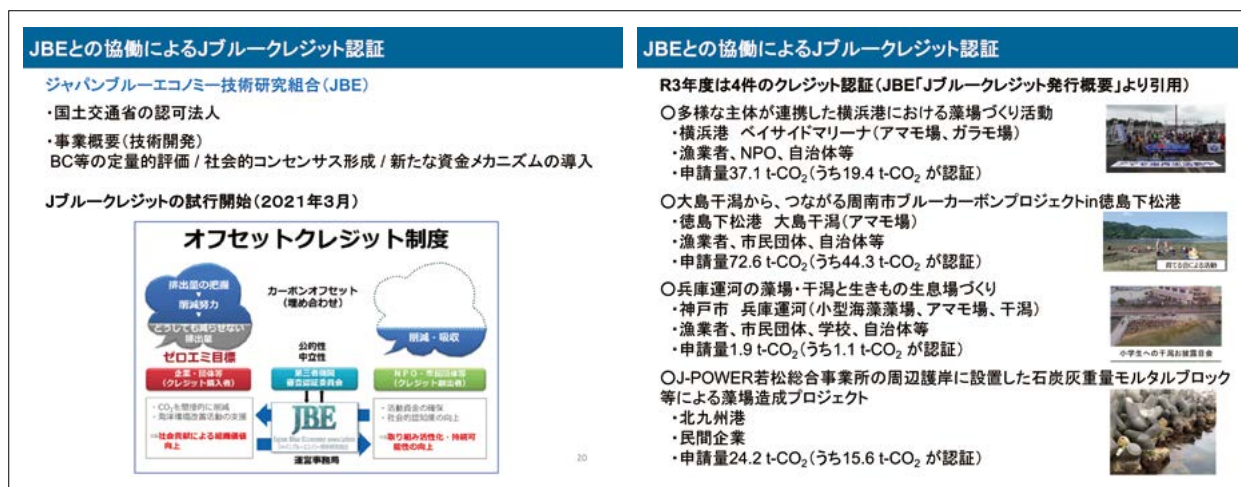


図3-1-11 Jブルークレジット制度（ジャパンプルーエコノミー技術研究組合 HP より引用）

【質疑応答・コメント】

Q：難分解性の溶存有機炭素がどのぐらいの割合であるのかは、これからさらに調べる必要があると考えるが、どこをさらに研究しなければならないか。

A：2016年の推計の中で、基礎生産量に対するDOC放出量（23%）は実測を元に行っている。ただ、その後、深海に移送する7%は予測されたものであり、海藻由来DOCが本当にこれだけ輸送されているかの実証はなされていない。我々の分解実験の結果からは平均5%程度が難分解性DOCと推定され、この数値のオーダーは先ほどの予測値と近く、分解実験のアプローチからも、この程度の値との予測は出ている。ただ、これは微生物の分解実験であり、自然に海中で希釈されていく過程でこんなに分解するのか、もしくは本当にこんなに残るのかはまだ分からない。もう一つは、このように分解されたものが深海や海中に残っているはずであるが、海藻由来のものを区別して現場で測ることは現状ではできない。このあたりが大きな課題である。分解実験では残るという結果が出ているが、海に本当に残っているという証拠がないことが一つ課題である。

Q：カーボンクレジット化しようとする、実測値がないと難しいとの理解でよいのか。

A：カーボンクレジットに関しては、文献値を使った計算式によって運用がされている。実際に隔離されている量を各サイトで実測することは技術的に非常に難しく、クレジット創出者がそれをすることは現実的ではないためである。農水省プロジェクトなどでは知見を集めてこうした標準的な値・方法論を作ることになる。

Q：沿岸域で植生が海域によって異なると思うが、炭素隔離にはどこが向いているか。

A：炭素隔離の効率を重視するのであれば、水温は分解に効くので、低いほど分解が遅く貯まりやすいと考えられる。また植物なので栄養環境がよい場所の成長が早い可能性がある。ただ、北の海だと温度が低い、日照時間が短いなどの影響はある。もう一つとして大型海藻は深海輸送が重要なので、深海に流れやすいような立地のほうがたくさん貯まる可能性がある。

Q：準備されている論文は包括的プロセスが書かれていると思った。こういった点については未解明か。

1 Jブルークレジット：<https://www.blueeconomy.jp/credit/>（2023年2月23日アクセス）

- A：深海輸送での証拠はあるが、特に難分解性 DOC やアルカリ度はほとんど分かっていない。
- Q：アルカリ度が分かっていないのはその通りと思ったが、嫌気分解が起こるとメタンも出る。温室効果ガスでみると、アルカリ度で吸収できる分がメタンで温室効果が上がってしまうのことも考えたが、どうか。
- A：メタンに関しては、海水域だと多くはないと思うが、当然、測らなければいけない部分である。メタンと N_2O のような CO_2 以外の GHG も一緒に測ることが必要となる。特に海でアルカリ度に効くのは硫酸還元であり、その後、鉄とくっついてパイライトという鉱物ができ安定的にアルカリ度が出るということなので、嫌気反応の種類によっても違う。
- Q：こういったメカニズムの解明と定量化は、いろいろな海域でやるなどして、グローバルに標準的な手法で測るとよいと思うが、国際的なプロジェクトでの動きはどうか。例えば UNEP など国際的な動きはないか。
- A：海藻に関してはヨーロッパのグループが主体でやっている。実際の海藻養殖でどれぐらい炭素が貯まっているかを世界全体、いろんなところで測るというプロジェクトであり、日本も我々が参加して計測している。

3.2 研究課題探索：ブルーカーボン生態系のCO₂吸収源算定と生態特性

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 沿岸生態系暖流域グループ長

私は水産研究・教育機構に所属している関係上、本日は、農林水産省で取り組んでいるプロジェクトの内容を中心に紹介する。海洋隔離、植物残渣であるブルーカーボンが一番大きいネガティブエミッション技術になると言われている。また海洋肥沃化と同様に、ブルーカーボンは、海洋アルカリ化と比べればコストが安いということでも注目されている。

ブルーカーボンは、我が国の温室効果ガスインベントリに入っておらず、登録に向けた方向性も考えて進める必要があるため、その算定はIPCCの湿地ガイドラインに沿った形を基準として行っている。このガイドラインはブルーカーボン生態系に関わる概要が記述されているが、我々の対象である藻場は、維持、造成、再生に当たる人為活動の部分のガイダンスがなく、各国が独自方法論を用いるとされていて、塩性湿地も同様の状態になっている。このため、Tier2、Tier3として吸収係数を提示していく必要がある。



ブルーカーボンによるCO₂吸収

表 2：湿地ガイドラインにおけるブルーカーボンの方法論概要

対象区分	炭素プール	人為活動				備考			
		維持	造成・再生	損失	排水				
マングローブ林	バイオマス	森林と同じ方法論 (成長量と蓄積量の独自係数提示)			造成・再生と同じ	ふん尿中 窒素分 由来の N ₂ O 排出			
	枯死有機物	森林と同じ方法論 (蓄積量の独自係数提示)			独自方法論 と係数提示				
	土壌	デフォルト =0	独自方法論と 吸収係数提示	独自方法論と 独自係数提示					
塩性湿地	バイオマス	ガイダンス なし (独自の Tier3 方法 論を適用 した場合のみ 算定可)	Tier2 以上で のみ考慮	土地利用変化の方法 論 (独自係数提示) 泥炭採取の方法論適 用 (実質無視)	造成・再生と 同じ				
	枯死有機物	独自方法論と吸 収係数提示	独自方法論と吸 収係数提示	独自方法論と独自係 数提示	独自方法論 と係数提示				
	土壌								
海草藻場	バイオマス	ガイダンス なし (独自の Tier3 方法 論を適用 した場合のみ 算定可)	Tier2 以上で のみ考慮	土地利用変化の方法 論 (独自係数提示) 泥炭採取の方法論適 用 (実質無視)	ガイダンス なし				
	枯死有機物	独自方法論と吸 収係数提示	独自方法論と吸 収係数提示	独自方法論と独自係 数提示					
	土壌								

藤井・佐藤 (2020)

図3-2-1 IPCC 湿地ガイドラインにおけるブルーカーボンの方法論概要

この状況に対応するため、農林水産技術会議で令和2年度から脱炭素・環境対応プロジェクトが始まり、今はみどりの食料システム戦略実現技術開発事業に名前が変わっているが、ここでは吸収量の定量評価をするための評価モデル（吸収係数の確立）と、吸収源を実際に増やしていくための藻場の形成拡大技術の開発を行っている。我々のグループではブルーカーボンに関する国連の2009年報告書が出る1年前から準備を始め、水産庁と国交省の事業を経て、当時から一緒に実施してきたメンバーと各府県のメンバーとで本事業でも現場実装する形で進めている。（図3-2-2左）

ブルーカーボンと陸域のグリーンカーボンの大きな違いは、バイオマスそのものが貯留源になっていないところにある。バイオマス由来の有機炭素が堆積物中にたまる場合、海洋の中の別な場所に炭素がたまる場合、あるいは沖合に流れていき深海に落ちてしまう場合、RDOCとして海中に残る場合の4つのプロセスが中心となってCO₂を海中に貯留することになる。（図3-2-2右）

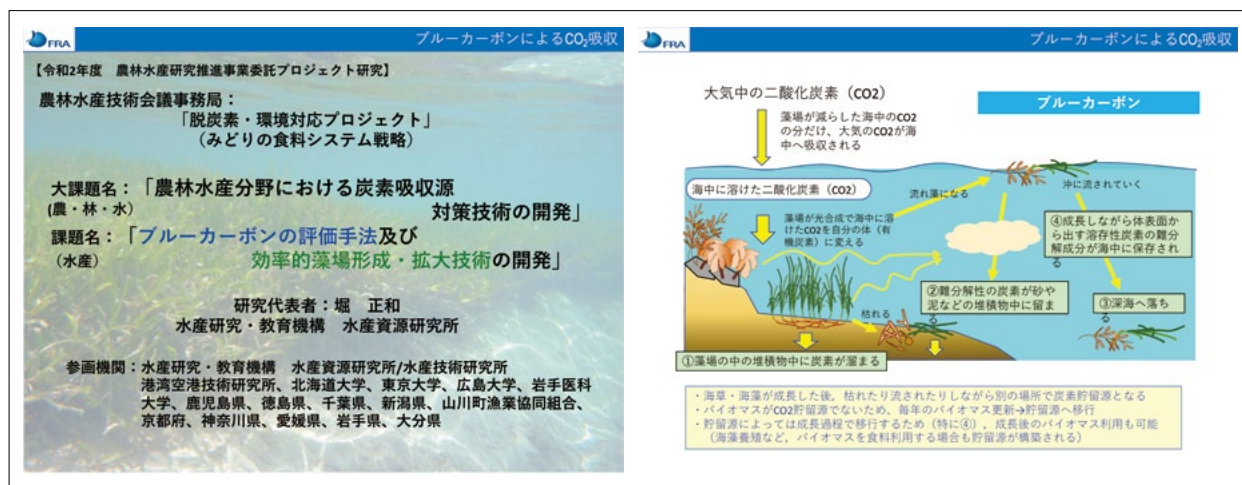


図3-2-2 農林水産技術会議プロジェクトの参画機関（左）、および藻場生態系における4つの有機炭素貯留プロセス（右）（堀が作成）

ブルーカーボンの算定に使える現時点での吸収係数については、桑江氏を中心にブルーカーボン研究会でまとめており（桑江ら2019）、図3-2-3左に記載した種類となる。アマモ場、ガラモ場、コンブ場、アラム場、マングローブ、干潟の6タイプについて、文献値から吸収係数を作り、これにより吸収量を算定しているが、実際の我が国沿岸の海域には海草だけでも20種類近くあり、海藻にいたっては1,000種類以上ある。このため、それら全てを対象にした吸収係数の評価手法を作る必要があり、この農水プロジェクトの中で進めている。天然藻場に加えて、吸収源拡大のためには海藻養殖がこれからの本流になると考えているため、海藻養殖についても吸収係数の算定を進めている。（図3-2-3右）



図3-2-3 吸収係数の対象となる藻場の種類

（農林水産技術会議プロジェクト研究資料を改変・右図のノリ

養殖の引用：<https://mainichi.jp/graphs/20160405/hpj/00m/040/005000g/20160405hpj00m040043000q>（2023年2月22日アクセス）

IPCCガイドラインに沿った計算とすれば、単位面積当たりの吸収量となる吸収係数を作り、それに活動量を掛けるという形になる。（図3-2-4左）吸収係数を計算するためにはCO₂の隔離量として、実際に植物が

ブルーカーボンによるCO₂吸収

IPCCガイドラインに準拠した算定手法 (Tier 2~3)

各海域タイプによるCO₂吸収量 (貯留量) = 吸収係数 × 面積 (活動量)

↓

CO₂隔離量 × 残存率

海域の植物が、一次生産として有機炭素化した大気中CO₂量
 海域の植物によって隔離された大気中CO₂のうち、分解されずに貯蔵される割合

吸収係数

・ 全国の海草・海藻海域を評価するための海域タイプすべてのパラメータが確定、計算可能に

海草類：6タイプ	アマモ型、タチアマモ型、スガモ型、亜熱帯小型、亜熱帯中型、亜熱帯大型
冷温帯性コンブ類：2タイプ	マコンブ型、ナガコンブ型
暖温帯性コンブ類：3タイプ	アラメ型、カジメ型、ワカメ型
ガラモ類：2タイプ	温帯性ホンダワラ型、亜熱帯性ホンダワラ型
小型海藻類：4タイプ	緑藻類、紅藻類、褐藻類、サンゴ藻類
海藻養殖：4タイプ	コンブ類養殖、ガラモ類養殖、ノリ養殖、ワカメ養殖

21タイプ×9海域の吸収係数
(2022年度末に海域タイプ別面積と併せて、公開予定)

それに先駆け、計算式はクレジットの計算にも使うため公表を先月10月にしている。この吸収係数は、その場の植物性生産量に対し、残存率、生態系変換係数と呼ばれるものと炭素含有量をかけ、それをCO₂換算するという形で単純な計算式である。貯留源に4つのプロセスがあるため、4つのプロセス別に項を計算する。それぞれ各地域の漁業者、NPO、行政担当者など専門外の方が計算する際、計算式の全部のパラメータを現場で取得することは不可能なため、海藻の最大現存量を示すB_{max}のパラメータだけを現場で測れば、残りのパラメータは各海域の標準指標値を我々のプロジェクトで準備するため、実際の吸収量を計算可能になる。(図3-2-5左)

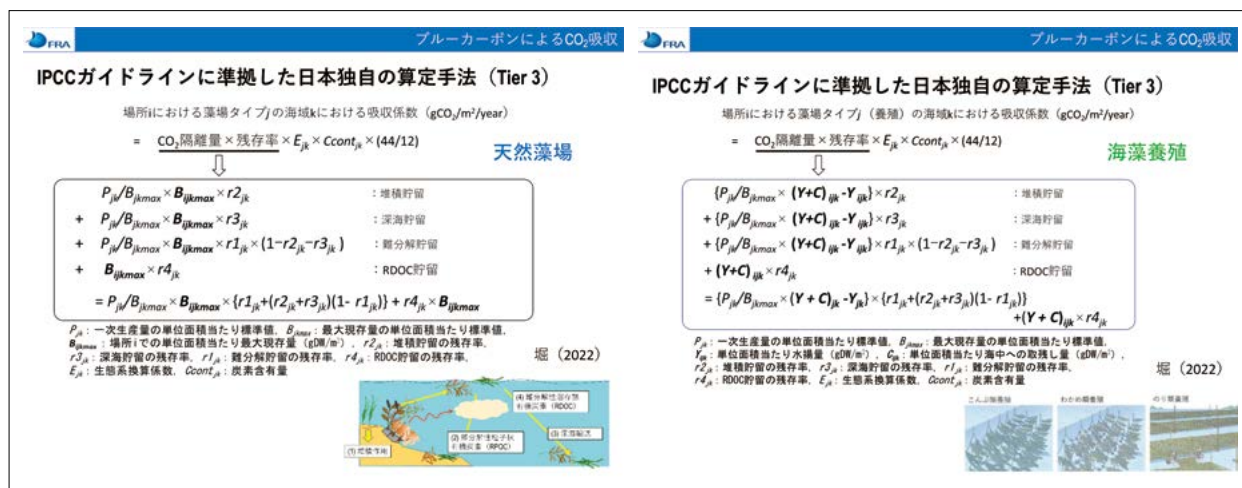


図3-2-5 天然藻場および海藻養殖を対象とした吸収係数の算定式（堀（2022）を改変）

天然藻場だけでなく、海藻養殖の算定式も作ってある。海藻養殖の場合、その場の植物生産量の全量が出荷されるのではなく、地域や養殖している経営体によって出荷する割合が異なり、例えばきれいな部分だけ切り取って出荷したり、またワカメなどの場合はめかぶと葉状部の両方を出す場合と葉状部だけ出荷したりする場合など、それぞれで変わるので、それらを考慮する必要がある。このため、天然藻場のB_{max}に当たるパラメータを出荷する水揚げ量と海の中に残す残置量という2つの数値に分けて計算する式にしてある。水揚げした分はそれ以降の貯留プロセスへの移行はないので、その量を差引く計算方法になっている。（図3-5-2右）活動量（全国評価のための面積）の計算は環境省の最新の衛星画像の結果を用いているが、海域や種類によって画像解析の正誤のばらつきが大きいので、現在は新しい手法でそれを修正し、実際の全国の藻場面積を再計算し直している。それも3月末の段階で公表する予定であり、今は具体的数値を言えないが、2019年の論文の値である全国吸収量が130万から400万トンの値と桁は変わらない値になりそうである。

具体的数値は公開できないため、藻場別に吸収係数の大きさを図3-2-6で確認する。比較のために林野庁の公表データから広葉樹のCO₂の貯留速度、それと樹齢50年から80年の一番成長が良い時期の杉の人工林の値、緑のバーのばらつきが海草藻場になる。矢印の部分はアマモであるが、現時点の計算値で、杉人工林と同程度の値を持っており、ほかの海草類だとさらに超えるぐらいの吸収係数となり、さらに広葉樹と比べるとかなり大きくなることが分かった。茶色のバーが海藻藻場であり、海草の藻場よりも少し値は落ちるが大差はない。ただ、海藻の種類によりばらつきが大きい。この上位にくるものとして、ホンダワラ類の値が高くなる傾向にある。コンブの仲間もバイオマスがほかの海藻よりも大きく、一次生産量も高いので、上位にくる。一方で、ノリやテングサのような紅藻類の仲間は、一次生産は大きいですが、人間が食べてもおいしいので、すなわち分解されやすい。このため残存率が低くなり、値は下位のほうになる。海藻養殖は日本国内で30万トンぐらいであり、この黄土色が海藻養殖の値である。我々も驚いたが、海藻養殖のほうが天然の海藻よりも吸収係数の数値が大きくなることもある。その理由は集中的に生産量を上げて生産するので、単位面積当たりの最大現存量が天然の藻場よりかなり大きくなることで、最終的な吸収量も大きくなるためである。

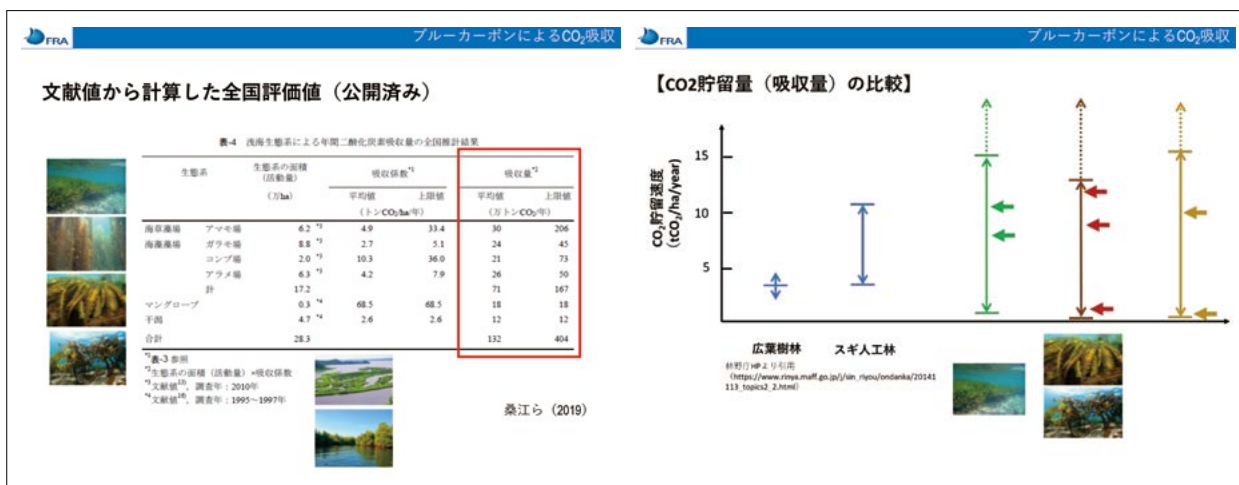


図3-2-6 CO₂吸収量の比較：文献値から推定した公表論文の値（左）と、農林水産技術会議プロジェクト研究の評価モデルで推定した値を藻場の種類別に傾向を整理（農林水産技術会議プロジェクト研究資料を改変）

海藻養殖の場合は最後に取り上げるが、海中に残置する量も少なくない場合もあり、なおかつ収穫前の成長過程で出すRDOCによる残存プロセスがあるので、海藻養殖は天然藻場と遜色ない値となる場合があることが分かった。このことから、今後海藻養殖を増やすことで吸収源としての可能性は大きくなると考えている。天然の藻場は分布可能な成育場所が決まっており、地形からどのぐらいの面積になるか推定できるが、森林面積と比べるととても小さい。日本の利点を生かすならば、海藻養殖を使って広い海面を使うことを考えている。

必要となる研究課題であるが、残存プロセスや残存プロセスを経たのちの貯留源に関する科学的な実証が足りない。我々もこの算定をするに当たり、その根拠を論文化しているが、我々だけではなくいろんな地域で様々な条件での値が定量的に出ることさらに信頼性が上がると考えている。なので、定量的な検証についての研究課題を増やしていく必要がある。

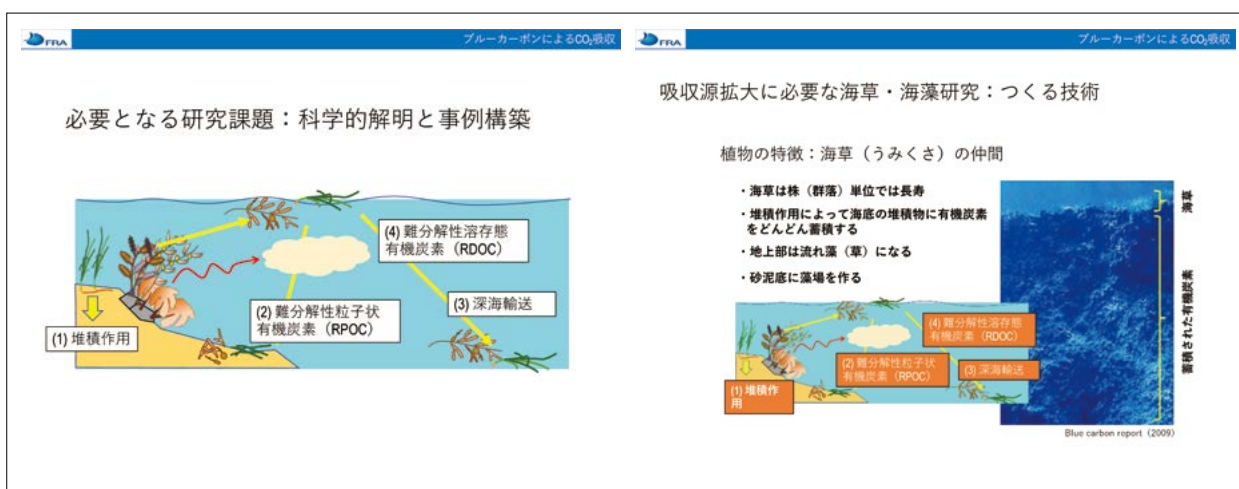


図3-2-7 ブルーカーボン生態系による吸収源の信頼性を高めるために必要となる研究課題：4つの貯留プロセスと貯留源の定量評価（堀が作成）

あと、個々の植物で見ると、海草で炭素貯留量が高い理由は生活史の特性上、全ての貯留プロセスを使うためである。海草は長寿であることから堆積作用がかなり大きい。これはブルーカーボンレポート、2009年の国連報告書での値の根拠になった写真であるが、上のほうに草体長1メートルぐらいの海草が写っており、その下の土壌部分に海草が貯めた有機炭素の層があり、堆積作用の大きさを示している。それに加えて、海草の仲間の地上部は切れると浮くため、沖合に流れていき深海へ移送される量がある。海草の仲間は海藻と違って被子植物なので、根、茎、葉の区別があり、海洋でデンプンを作り、地下茎に貯蔵しているところがバイオマス利用としても期待されている。



図3-2-8 アマモを例とした海草類の生物的特徴（堀が作成）

あと、海草の種類によるが、特にアマモ（*Zostera marina*）の株は1,000年以上生きる。森林と同じように同じ場所にずっと堆積を続けるので、かなり貯留源として価値が高い。瀬戸内海で測ったところだと5,000年以上、縄文海進が終わった後、そのまま数千年を生残しているアマモ場が日本国中にたくさんある。そういったところも期待されている。この海草は、種子植物なので種を作り（有性生殖）、栄養繁殖（無性生殖）もする。まだ養殖という形ではされていないが、これからバイオマス活用を検討する上で、広い表現型可塑性、生活史多型を使っていろいろな研究課題を作ることで、いろいろなバイオマス活用の可能性が出ると考えている。

コンブの仲間が深海に輸送される話をしたが、この部分は科学的な根拠の事例が少ない。産総研とJAMSTECが深海で採取した泥を我々も一部提供してもらい、環境DNAを使って解析し、確かに深海には到達している点は確認している。沖縄県海域の沿岸から水深1,000メートルぐらいにかなりマコンブ類の環境DNAがたくさん積もっている。そこから真北に上がると渤海湾があり、中国のコンブ養殖産地であるので、たぶんそこから流れていると考えているが、科学的な検証がまだできていない。なので、現時点でのコンブ類の吸収係数は、難分解性溶存態有機炭素、難分解性懸濁態有機炭素の2つの貯留プロセスで計算している。コンブ類の仲間は養殖が確立しており、その最大の科学的進展は、収穫するコンブ胞子体ではなく、配偶体を試験管でコントロールできるようになったことから種苗生産が可能になった点である。

ただ、逆に天然の海域で配偶体がどういう条件で成長し、卵と精子を出して胞子体を形成するかがあまり分かっていない。磯焼けしている海域では、配偶体は確認できるものの、成熟して卵と精子を出さない場合もある。そこに栄養塩が加わると卵と精子が出て胞子体を形成する場合があるなど、元々、コンブというのは栄養塩の高いところの海域にいるが、そういった栄養条件や環境要因の違いにより配偶体の動態が大きく変わりそうなことが分かってきている。このような天然海域での生活史循環の挙動が不明な点が多く、天然のコン

ブの分布を制御できていないところである。

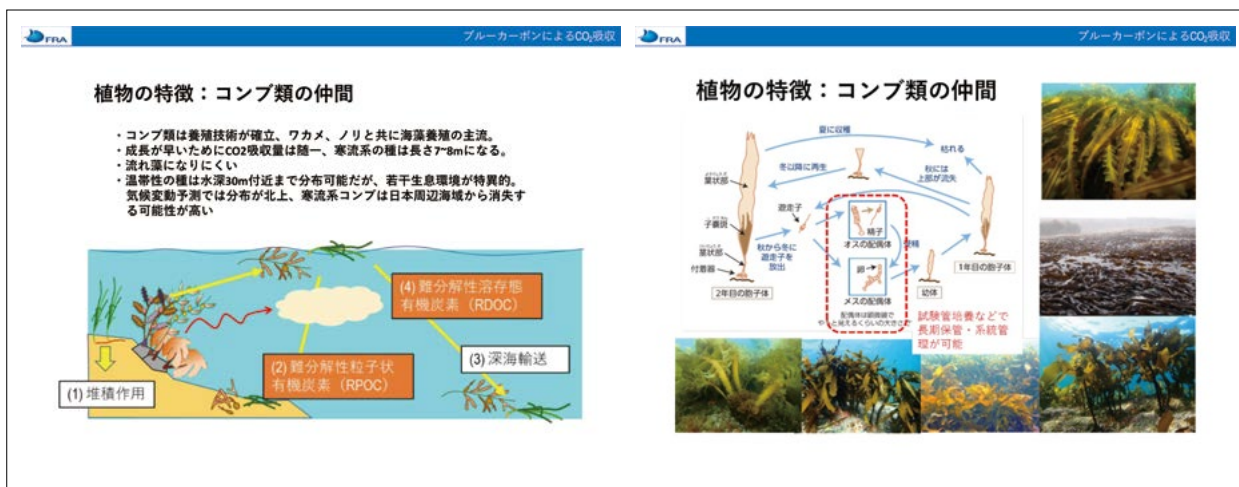


図3-2-9 コンブ類の生物的特徴とCO₂貯留プロセスとの関係

（水産研究・教育機構（2022）をもとに堀が作成）

最後、ホンダワラの仲間は岩礁域に生息するが、一部は砂地の転石に生えるので、転石に生息するものは砂地での堆積作用を持っているものもいる。ガラモ（ホンダワラ類）の特徴は草体に気泡があるので流れ藻になる点である。これは水産上すごく重要であり、最近、サンマが不漁、ブリの豊漁などの話があるが、サンマもブリも産卵、稚仔魚期にこの流れ藻を利用している。なので、流れ藻がたくさん増えることは、水産資源にとってもプラスになるので、ガラモの仲間が増えることで資源回復にも貢献させることができる。ただ、このブルーカーボンの仕組みが国際的に広がった場合、日本の周辺海域で流れている流れ藻は中国由来のものも多いため、中国が国内でブルーカーボンに活用させて、中国から流れ藻が出てこなくなると困ったことになる。水産資源にとって痛手を被るので、国内由来の流れ藻を増やす必要がある。このホンダワラの仲間の生活史であるが、コンブ類と比べると単純で、雄株と雌株から精子と卵が出て、それがすぐ幼体となり成長するという生活史である。この生活史を持っているがゆえに、幼体で厳しい環境条件を耐えることができ、例えばアカモクという1年生のホンダワラの仲間だと、春先に卵と精子が出るが、その後幼体は夏の暑い過酷な時期を乗り越え、秋口から大きく成長を始める。この幼体がどのような環境で成長を止めるか、成長を始めるか、その人工的な制御はうまくできていない。ここをうまく生物学的にコントロールができるようになると、ホンダワラの仲間もコンブ類と同じように自在に種苗生産が可能となり、養殖や藻場再生に使えると考えており、研究を始めている。ホンダワラの強みのもう一つは、種類はかわるものの北は北極域から南は熱帯域までかなり広く分布域を持っているので、さまざまな海域で海藻類を生やすことができることと考える。

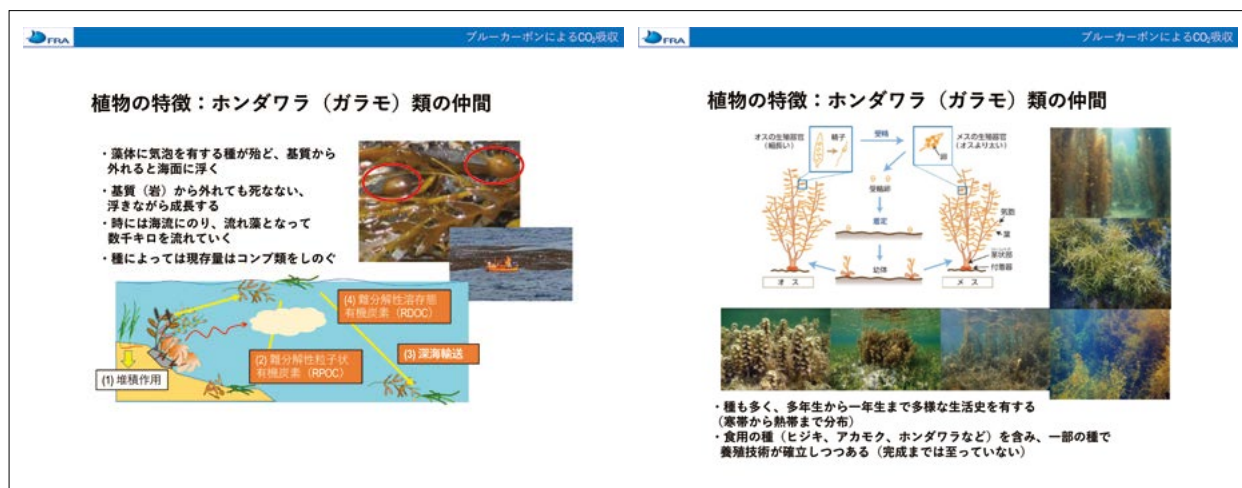


図3-2-10 ホンダワラ類の生物的特性とCO2貯留プロセスとの関係
（水産研究・教育機構（2022）をもとに堀が作成）

以上、吸収源を拡大してするためには吸収係数を大きくすることと、活動面積を増やすことであるが、吸収係数を増大するためには、海草、海藻の生活史制御の研究が不足している。その部分をうまく使って吸収係数の高い種類を選択したり増大技術を確認したりする必要があると考える。また活動面積を増やすためには、天然の藻場だけではなく、海藻養殖を増やす必要がある。



図3-2-11 吸収源拡大に必要となる研究課題の考え方（堀が作成）

そうすると沖合、外洋域への海藻増殖展開を考える必要がある。例えば、外洋に行くと基本的に栄養塩がなくなるが、昨年度、海の中でも窒素の固定共生菌がいることが分かったので、それらをうまく使った新しい栄養塩の仕組みの作り方があある。また、沖合養殖となると魚でもまだ事例として多くなく、そういった大規模な養殖システムの開発もあわせて進める必要がある。欧米、中国ではかなり進んでおり、日本は大きく遅れているので、うまく対応できれば良いと考えている。あとは、吸収源を増やすことは良いが、増やした吸収源で生産されるバイオマスを利用する必要があるので、バイオマス活用との両輪で進めていく必要がある。バイオ

マス活用についても企業と一緒に活動しているが、グリーンイノベーションやムーンショットの研究とも連携しながら取り組んでいるところである。

【質疑応答・コメント】

Q：活用の話もあったが、固定であれば、活用しなくても良いと思った。活用としてどういうものをイメージしているか。

A：作ってそのまま全部海に捨てることであればネガティブエミッション技術としては大きいですが、それだと作り手のモチベーションがでない。水産庁、企業やSDGsの考え方では漁業者での取り組みの中での実施として考えており、そうすると作ったものを使うということである。ただ、食用は頭打ちなので基本的には、食用外の利用、すなわち工業的利用である。バイオマス活用について、私も企業と一緒にやっているが、燃料とプラスチックだと欧米が10年以上先にやっている。アメリカのほうでは海藻からのバイオマス燃料にかなりめどをつけており、また欧州のほうでもアルギン酸を取った後に肥料にする、残渣をプラスチックにするなど、カスケード利用が前提になっている。カスケード利用のサプライチェーンとバリューチェーンがうまく合うかを企業と一緒にやっている。

Q：コンブの生態系が分からないという話があったが、コンブは食用なので過去から研究されているのではないか。

A：我々が見えているもの、コンブなら可視的な孢子体の状態はよく研究はされているが、見えない配偶体世代の種苗生産研究や、天然海域の生態系の中での配偶体の挙動に関する研究はそこまで進んでいない。今はどの海域でも海藻が減り、磯焼け対策を実施しているが、うまくいかない原因は、これまでは海藻が幾分か残存している状態が前提の対策であり、全くない状態からの対策が見付かっていない。それらを研究しないと磯焼けの回復にはつながらないし、必要となる環境条件の解明にはならない。

Q：海底にでん粉などの炭素が貯留していくと、層が厚くなり、圧力も高く、冷えた状況と考えるが、そういうところで貯留されるものはそのままの形で貯留されているか。

A：浅いところはそのまま残っている部分もあるが、同位体などで調べるとバクテリアに形が変わって残るものも多い。

Q：そのときに土砂が混ざる場合が多いのか。それともその他の動植物の有機物が貯留するのか。

A：土砂、炭酸カルシウム由来のものなど場所により違うが、基本的に堆積作用のある海藻の仲間が形成される場所は河口域など浅場で土砂が堆積しやすいところに形成される。このため、土砂と一緒にという部分が多く、有機物だけがたまることは基本的にない。

Q：河口域と深海でどちらが優位か。

A：貯留源となる堆積作用が起きるには、藻場そのものの構造があってこそたまるので、藻場のある浅海域が主。深海輸送の部分は沖に流され、浮力を失ったものが落ちてくる。そこは調査ができていないので必要。深海に海藻、海草が行くことは確かであるが、その後どのような過程で土壌中に入るかはわかっていない。

Q：貯留量が130万トンから400万トンぐらいの話があったが、サイエンス、技術により1,000万トンを超えることはできるか。

A：海藻養殖ができる海面は今の法制度の第一種漁獲漁業権で大体56万ヘクタールぐらいあるが、現時点ではその10分の1も使っていない。現行法で面積を増やすだけでも10倍以上の量が作れるはず。4桁に寄せたいと考えている。

Q：沖合の展開で、例えば実質的にどの辺りを想定しているのか。

A：企業との話をしている段階であるが、第3フェーズまで考えており、第1フェーズが洋上風力ぐらいの沖合である。洋上風力とのセットなど。不沈式の沖合養殖として魚類養殖が、欧米と中国で始まって

おり、それと同じ場所でやるのが第2フェーズ。第3フェーズは完全な外洋である。そこまでの時間スケールを計算しながら議論を進めている。

3.3 ブルーカーボンの将来予測 -未来の生態系を用いた試み-

和田 茂樹 筑波大学 下田臨海実験センター 生物海洋学研究室 助教

私は筑波大学下田臨海実験センターで、ブルーカーボン関連の研究をしてきたが、我々のグループの特色として将来予測、特に気候変動に関わる将来予測について紹介する。まずMacreadieらが2019年に発表したブルーカーボンの10個の課題の一つである気候変動の影響について紹介する。



図3-3-1 ブルーカーボン研究の課題

ブルーカーボンに対する気候変動の影響も解析は大変である。その理由の一つは一次生産で有機物が作られて、それがバイオマスになったものが埋没する、土壌に入る、プロモートされるなど、様々なプロセスがブルーカーボンに関連しており、気候変動はそれぞれのプロセスに影響を及ぼす可能性がある。そのため、個別のプロセスに対する気候変動の影響の解析でブルーカーボンの包括的な予測をするのは難しい。

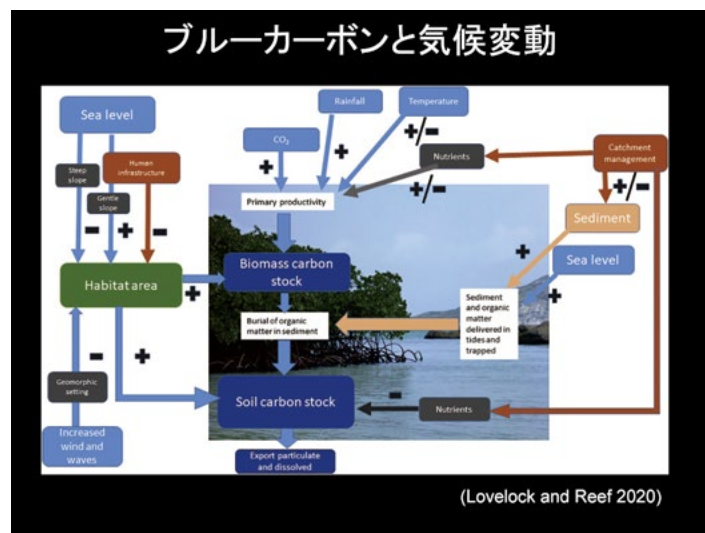


図 3-3-2 気候変動がブルーカーボンに及ぼす影響

過去の例を出すと、例えば図 3-3-3 左での左のグラフは地中海のカブレラ群島における 2002 年から 2006 年の年間最高水温と海草の藻場での海草の死亡率の関係を示している。最高水温が上がると海草の死亡率が増大することから、水温の上昇はブルーカーボン生態系に影響を及ぼすと言われている。図 3-3-3 左の右の図は、Shark Bay での海草の研究例である。3 つ並んだ図の左が 2002 年、真ん中が 2014 年の海草藻場の分布を示しており、黒い色の濃いところは海草の密な群落の分布を示している。2002 年の辺りに黒い濃いところがあるが、それが 2014 年になると減っている。この間には強い海洋熱波が 2010 年から 2011 年にかけて起こっており、このように大きな水温上昇のイベントがあると海草の藻場は消えてしまう。一番右は 2002 年と 2014 年を引き算したもので、赤い場所が海草の藻場が消えたところになる。

このように過去のブルーカーボン生態系の変遷と、そのときに起こった環境パラメータの変化から将来のブルーカーボン生態系の有り様を予測することが、研究の方向性の一つである。最近、日本沿岸でもブルーカーボン生態系は変わっている。私がいる下田の臨海実験センターでも磯焼けが激しく出ており、散々たる状態になっている。これがなぜ起こっているのかは、決定打の証拠がないが、黒潮が蛇行して水温が上がった影響なども要因の一つとして考えられている。

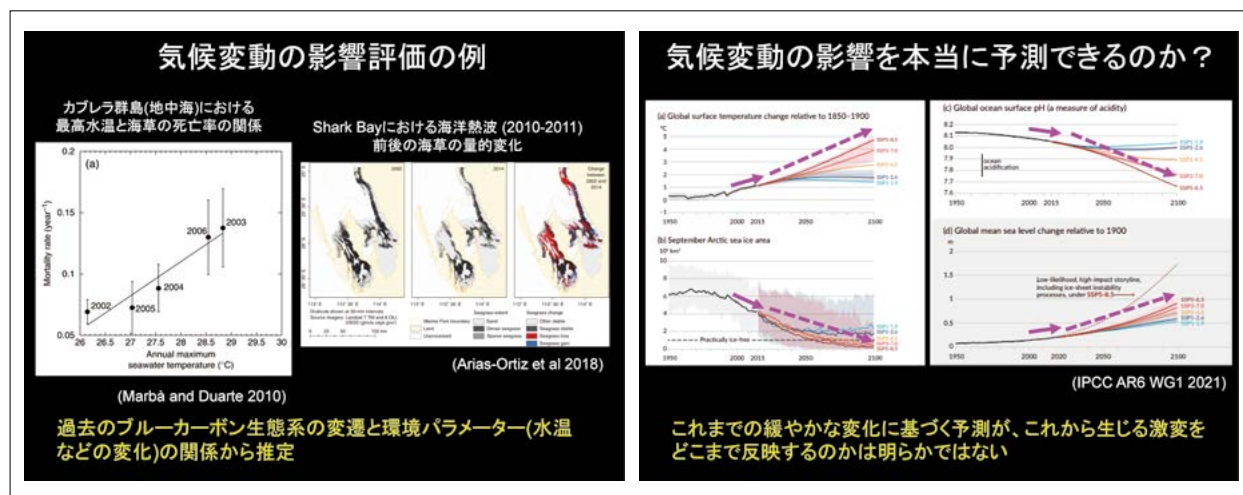


図 3-3-3 ブルーカーボンの変化の例と気候変動の進行

このように、ここ最近で起こっている変化から将来を予測していく試みは重要であるが、図3-3-3右のIPCCの報告書にあるように、表面水温、表面pH、海氷の面積、海水準の変化は、これ以降さらに深刻化していくと予測されている。これまでの変化から今後を予測しようという動きは、おおむね2000年から2010年の辺りの変化を基に行われているが、例えばSSPSが8.5で進むことがあった場合には海洋環境の変化は現在の緩やかな変化とは比較できないほど劇的なものとなる。そのため、過去にないレベル変化に起因する将来予測の妥当性に関しては、明示できるものはほとんどない。

私たちのグループのアプローチは、ほかのグループと少し変わっており、気候変動のナチュラルアナログを使う方法である。ナチュラルアナログという言葉は、直訳すると自然の類似物である。海の中でスポット的にCO₂が高いところが存在しており、そういうところの生態系と通常の生態系を比較することで、こちらが仮想的な未来の生態系、こちらが現在の生態系として丸ごと比較できる。

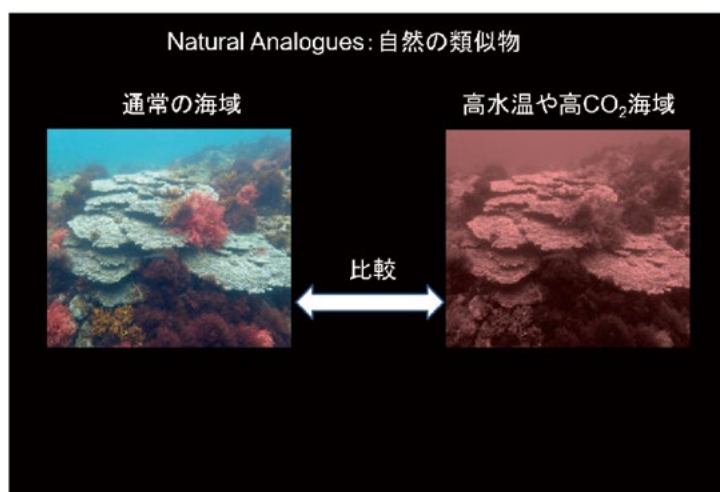


図3-3-4 ナチュラルアナログを利用した試み

これがナチュラルアナログを使ったメリットである。ナチュラルアナログはいろいろ種類があるが、我々が主に使っているのは自然の高CO₂海域であるCO₂シープである。この海域では、海底から二酸化炭素が湧き出しており、その二酸化炭素がその周りに溶け込むことで周囲の海域が丸ごと高いCO₂にさらされている。いわゆる海洋酸性化のナチュラルアナログという場所を見ることができる。CO₂シープの一つは伊豆諸島の式根島にあり、噴出するガスの組成はほぼピュアな二酸化炭素である。マッピングの中で赤い色の部分はCO₂濃度が高く、噴出部から近いところである。青いところは通常のCO₂の場所であり、噴出のない場所を現在の海、噴出のある場所を未来の海として比較し、研究を行っている。（図3-3-5左）



図3-3-5 式根島 CO₂シープ

左がコントロール海域で右が高 CO₂ 海域である。左のコントロール海域は、大きな円盤状のサンゴがあり、海藻も比較的体サイズの大きいものが見えている。それに付いている魚、キンギョハナダイなどがたくさん見えるが、右の CO₂ の高い海域は海底がほとんど小型の藻類である。Turf Algaeと言われるグループであるが、それに覆われてしまい水中景観が変わるほど劇的な生態系の変化が起こっている。（図3-3-5 右）

今、いろんなプロジェクトをこの場所でやっているが、今年から特に焦点を当てて科研で実施しているプロジェクトが CO₂ シープを利用して、CO₂ が上昇した環境下でのブルーカーボン进行评估することである。図は海藻藻場の炭素の収支を示した模式図である。海藻が二酸化炭素を吸収し光合成を行っているが、それがブルーカーボンになるためには、藻場外に輸送されて深海に埋没するプロセスが重要になる。（図3-3-6）

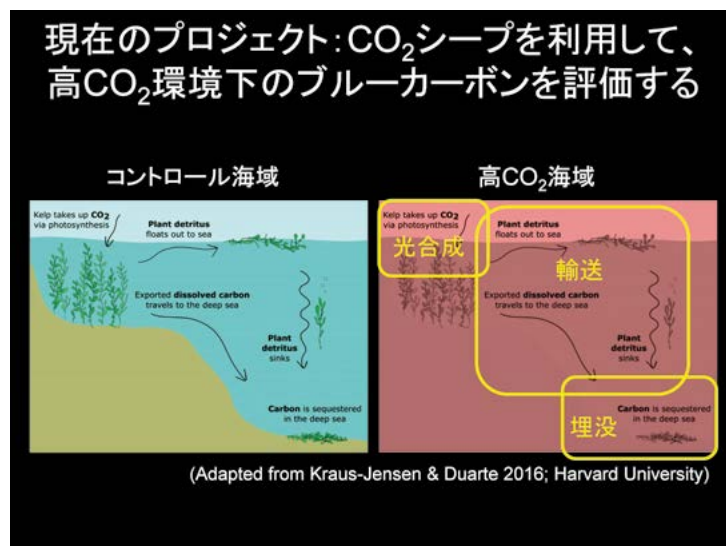


図3-3-6 CO₂ シープを利用したブルーカーボンの将来予測

将来、現在の海藻がなくなったとしても、その生態系に何も無いわけではなく、さきほどのマット状の小さな藻類に覆われたりする。要は違う生態系に変わるわけである。CO₂ シープを利用し、光合成、有機物の輸送、埋没などの一連の動きを解析することで、生態系の変化がブルーカーボンに及ぼす影響の解明に取り組

んでいる。

今まで出ているものを紹介する。例えば光合成の測定を試みており、ここでは透明のプレートに海の中で係留している。この透明のプレートをフロートに付けて海に係留することで、1カ月、2カ月すると藻類が付着する。これは藻類の自然群集が付着したものであるが、このプレートを切り取り、明培養をすると、光合成で酸素が生産される。すなわち、光合成の測定が可能となる。光合成のデータを出す前に、何の藻類が付着しているのかを見せる。図3-3-7左の右上に2つ並んだ写真があるが、左側がコントロール海域で右側が高CO₂海域に係留したプレートに付いた生き物である。左は基部になるところから生物体が伸長していることが確認でき、海藻の幼体である。海藻は多細胞の藻類であるが、ほとんどの海藻類は仮根と呼ばれる付着器で海底に付着し、そこを始点にして体を伸長させる。右の高CO₂海域では単細胞の藻類が優占する。この写真は、珪藻の一種のピダルフィアというグループである。珪藻を含む微細藻類は、細胞外に分泌した粘液を用いて海底に付着する。次に光合成を見ると、左が通常海域で右が高CO₂海域に係留したものであり、単位面積当たりの光合成は高CO₂海域で増加する。

これは二酸化炭素が増えると光合成の基質が増え、光合成が増大したと考えると矛盾はない。CO₂の施肥効果とも呼ばれるが、理論的に整合性が取れる結果である。光合成が増えることは、自分の体を作る、エネルギーを作る能力が増えることなので、バイオマス量も増大することが予測される。しかし、光合成色素であるクロロフィルaを指標としてバイオマスを評価してみると、変化はほとんどない。つまり、光合成は増える、自分の体を作る能力はあるが、体は増えないというパラドックスが生じる。理由を考えると、藻類の種構成の変化が重要と考えられる。現在の海は、大型藻類が仮根で海底に付着している。一方で、将来は珪藻のような微細藻類が粘液で付着するような海が広がると予測される。このような状態で太陽が当たり光合成をすると、海藻が優占する現在の海では植物体が海底に強く付着しているので、作ったエネルギーが流されることなく沿岸に保持される。そうすると、沿岸域にはエネルギーが集中し、それを求めて沿岸の生物多様性が維持されていると考えられる。一方で、将来の海になると珪藻が緩くくっついていていだけなので、少しの波で外れてしまい、エネルギーが藻場外に輸送され、生物多様性という点からは恐らくネガティブに働くと考えている。（図3-3-7右）

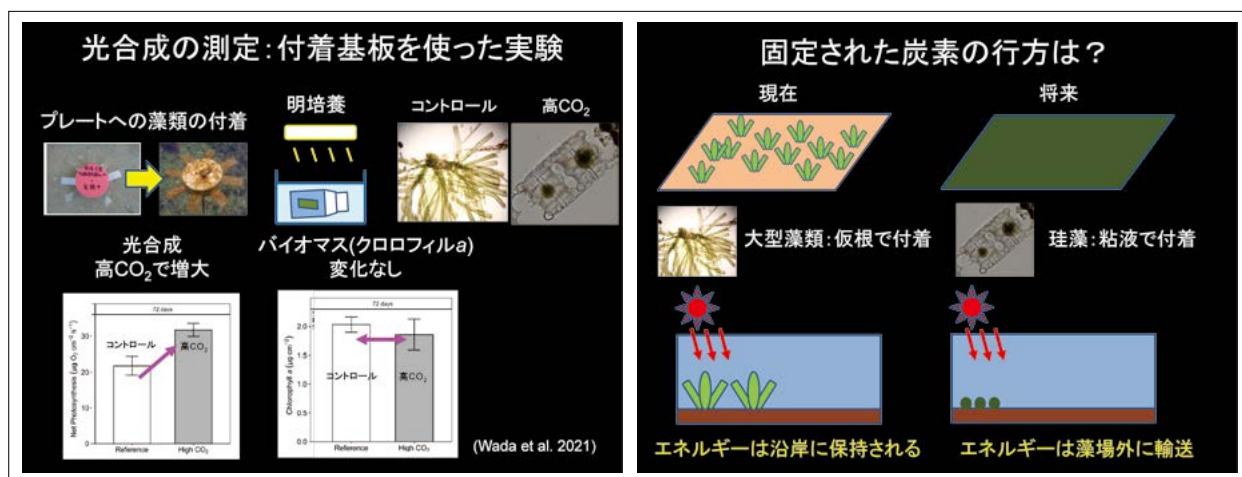


図3-3-7 光合成への影響と沿岸物質循環の変化

ただ、有機炭素の隔離の点からは、光合成が増える、輸送量が増えることで恐らくブルーカーボンにとってはプラスに働くと考えている。輸送量が増える点に関して、実証してみた。



図3-3-8 藻類の脱離試験

図3-3-8は水中スクーターを利用した実験した結果である。水中スクーターは海中を泳ぐための装置であるが、これを逆手に持って海の中で水流を発生させ、海底に当て、前後で比べた。図3-3-8左でのコントロール海域は、水流をあてた前後でほとんど違いはない。一方で、高CO₂海域では水流をあてると珪藻類のコロニーがはがされて裸地となることから、高CO₂海域で優占するTurf Algaeが脱離しやすいことは確かである。今までの結果から、二酸化炭素が増えると光合成が増える。光合成が増えた後に輸送量も増え、それによりブルーカーボンの強化が起こると考えている。ただ、埋没なども見ていく必要がある。

ブルーカーボンが増えることは重要であるが、ただ増えればいいのかは別話である。我々は式根島の一つの生態系を使い、通常海域と高CO₂海域において生態系サービスを見積もり、炭素隔離以外の価値も評価することを環境省の推進費で行った。図3-3-9右に示す通り、生き物の生息場、生物多様性、漁業、観光業への影響を、社会科学と自然科学の両面から行っている。これをレーダーチャートにしたのが図3-3-9左である。この図の見方は青い線がコントロール海域であり、これを1として赤い線の高CO₂海域の値を比較したものである。赤い線が青よりも中に入っていると生態系サービスの劣化となる。光合成は別のパラメータでも測っており、そのときはあまり変わらない結果。一さきほどは増えると言ったが、光合成に関してはネガティブな影響はないと考えている。そのため、ブルーカーボンの点に関しては、ネガティブなことは起こらないと思うが、ほかのサービス、例えば漁師の認知が下がる、水産の有形魚類が減る、サンゴが減るなどは著しく低下する。このようなコベネフィットを考慮して将来予測することが重要である。

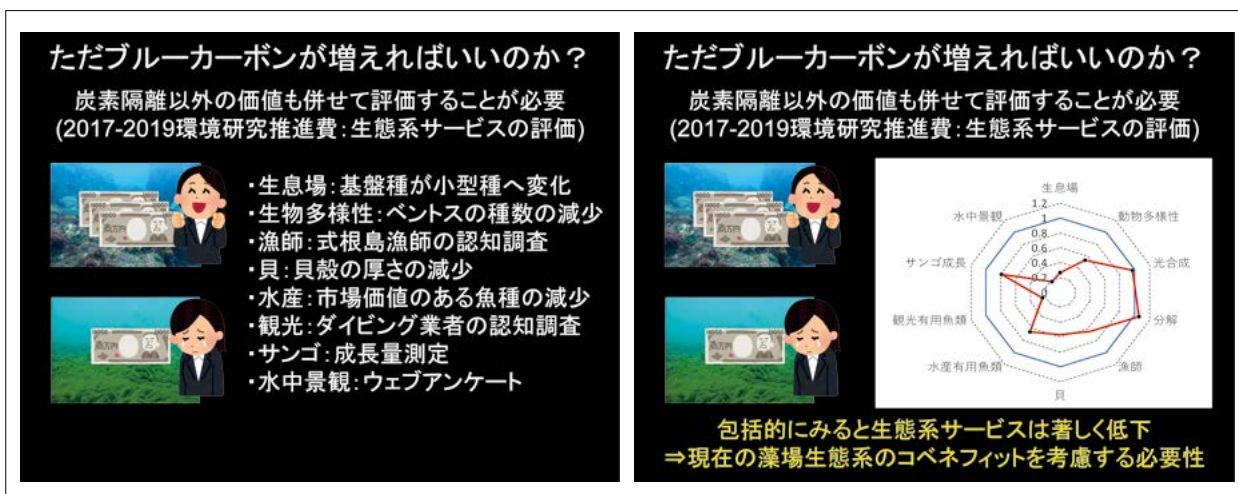


図 3-3-9 海洋酸性化が生態系サービスに及ぼす影響

式根島の例を紹介したが、式根島はいわゆる暖温帯海域であり、海藻藻場に加えてサンゴがところどころに生えているような生態系である。ほかのエリアの海藻藻場、ほかのブルーカーボン生態系に対しても我々は興味を持っており、筑波大学の下田臨海実験センターがコアとなりJSPSのCore-to-Coreというプロジェクトを進めている。自然の海洋酸性化生態系をつなぐ国際共同研究拠点、ICONAというもので、主にフランス、イタリアとの共同プロジェクトである。世界各地にある式根島のようなCO₂シープを利用することに加えて、高水温・高CO₂・低酸素の海域、具体的には閉鎖性の高い湾も対象にしている。閉鎖性の高い湾では、滞留した有機物が分解されてCO₂濃度が上昇し、酸素が低下する。さらに、閉鎖性が高いので水温が高いという特徴があり、これから起こる温暖化、酸性化、貧酸素化のナチュラルアナログになる。世界各地のナチュラルアナログをつなぎ、将来予測をやっていく活動であるが、このプロジェクトの一つのアウトプットとして、様々な海域のブルーカーボンの評価も行う予定である。（図 3-3-10）



図 3-3-10 ナチュラルアナログを幅広く利用するための国際拠点

最後にまとめである。気候変動の進行でブルーカーボンの量的変化が引き起こされる。今のところ、海藻藻場、式根島はブルーカーボンの強化が考えられるが、コベネフィットも考えていく必要がある。またほかの場所も評価していく必要がある。（図3-3-11）

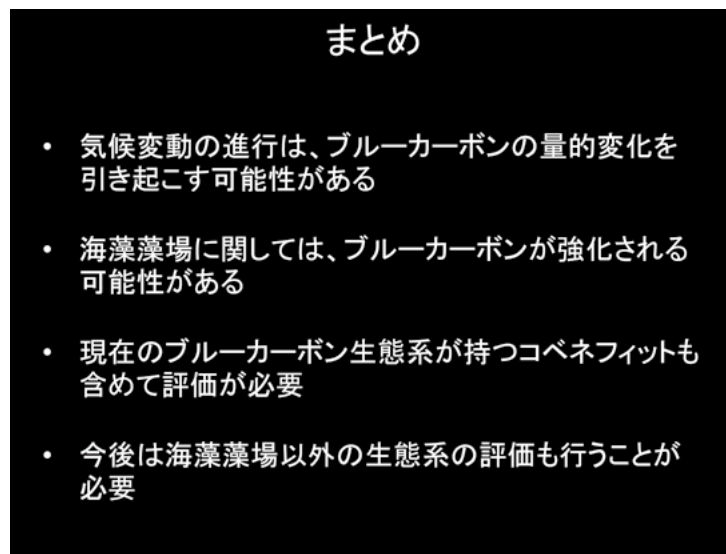


図3-3-11 まとめ

【質疑応答・コメント】

Q：光合成でクロロフィルaが使われるが、光合成とクロロフィルaは違う意味で使っているか。

A：光合成は酸素を作り出す量、エネルギーを作る量であり、クロロフィルaは光合成の色素である。海洋酸性化の進行に伴い光合成は増大する。ほぼすべての一次生産者が光合成で二酸化炭素を取り込む際に、ルビスコと呼ばれる酵素を用いる。今の海の中の二酸化炭素濃度は、ルビスコの効率を十分に発揮できないレベルであり光合成効率が低くなっている可能性がある。そのため、二酸化炭素が増えると、光合成に施肥効果が現れる。

Q：クロロフィルaが変わらないというのは、光合成の中でクロロフィルaは関わっているが、それは変わらずに全体的なエネルギー生産量が変わるということか。

A：クロロフィルaは藻類のバイオマスの指標にもされる。つまり、バイオマスに変化が現れず、光合成を行う活性のみが上がるということである。体やエネルギーを作る能力は上がっても、その分が植物体に反映されないということから、輸送で失われる分があるはずである。

Q：藻場の未来としては、どちらが望ましいか。

A：おそらくブルーカーボンやネガティブエミッションという点で考えると、ポジティブな面はある。ただ、藻場が持っている漁業資源を作り出すことや、観光資源として例えば釣りをする人にとっての資源など、ほかの資源を考えるとマイナスは大きい。そのため、トータルで見ると一般的には望ましくないという認識である。

Q：CO₂濃度が増えると藻場にはよくないとなると、コベネフィットとして両立させるような技術、方策はあるか。

A：現在トライしている課題の一つである。例えば、サンゴや大型の海藻はその生物体が構造物であり、小型の動物の生息場となる。しかし、小型の藻類に覆われることで生息場が消え、生物多様性の損失につながる。しかし、その対応策として漁礁のような構造物を投入すると、生息場を提供することにな

り生物多様性の維持につながると考えている。フランスのグループとの共同研究が準備段階にあるが、CO₂シープの中に構造物を入れたときにどれくらい生物多様性が上がるか、それによりコベネフィットを上げるという適応策の検証を検討している。

Q：微細藻類から燃料や物質生産するという話があり、CO₂シープのような環境に優占する珪藻の微細藻など、新しい生物や環境を利用していくという可能性はあるか。

A：先のCOP27で、フランス側のサイドイベントでのトピックに、筑波大学下田臨海実験センターのAgostini Sylvain 助教が登壇した。この時のトピックでは、CO₂シープなどのナチュラルアナログを利用していくことが議論となった。このイベントはサンゴ礁の復元がメイントピックであったが、ナチュラルアナログに生息する生き物、つまり高CO₂などに耐性を有する生物をいかに利用するか議論されている。

Q：CO₂シープの場合は地下からCO₂が出ているので、局所的に、安定的に高CO₂環境になっていると思うが、将来的に海中のCO₂濃度が高まり海全体のCO₂濃度が全体的に高まることや、局所的にCO₂濃度の変動がある場合でもこういったCO₂シープのような劇的な海洋生態系の変化が起き得ると考えたほうがよいか。

A：CO₂シープも完璧ではないところがあり、場所によってのグラジエントがあるので、完璧ではない。ただ、例えば実験室下の水槽実験などで、二酸化炭素の増加に対して石灰化生物がネガティブな影響を受けることがみられている。CO₂シープにおいても同様に、サンゴや貝のような石灰化生物が高CO₂環境下で減少する。このように、ナチュラルアナログと実験室での水槽試験を組み合わせしていくことは非常に重要であり、その両方で共通して得られる知見は、将来高確率で起こる現象と考えられる。

Q：CO₂シープでCO₂がたくさんあると光合成が上がって珪藻が増える理由は、CO₂によってpHが変わることと、それで植生が変わることのどちらの影響が大きいのか。

A：CO₂が増えるとpHは下がる。珪藻のような小さなものが増えるのは、全てのCO₂シープで起こっているわけではないが、一般的に生態系の環境が大きく変化して極端な状態に近付くと、小さなものが優先しやすいと言われている。短期間で自分の体を作り消えていくような、いわゆる日和見種に変わっていくとされており、通常の穏やかな環境から激しいほうに変化する時の一つの結末とされている。ただし、その変化が生じた要因は特定が難しく、CO₂が直接影響したのか、生物間の競争に影響した結果なのかは分からない。

3.4 ブルーカーボンを推進する上での政策的課題 海外との比較、普及に向けてボトルネックとなっている科学技術的課題

渡邊 敦 笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部 上席研究員

私は笹川平和財団海洋政策研究所、およびジャパンプルーエコノミー技術研究組合に所属している。本日はブルーカーボンを推進する上での課題を紹介したい。ブルーカーボンが気候変動対策、コベネフィット策として理想的に活用されるためにどのようなギャップがあるかを考えてみると、気候変動対策としての量を満たすこと、およびコベネフィットの可視化をして、それが包摂され、自然、社会に公平に配分されていくところの科学的な根拠や仕組みが必要である。また、炭素価値以外をなるべく損なわないといったバランス、これに資する人材育成の確保を総合的に進めていく必要がある。（図3-4-1）

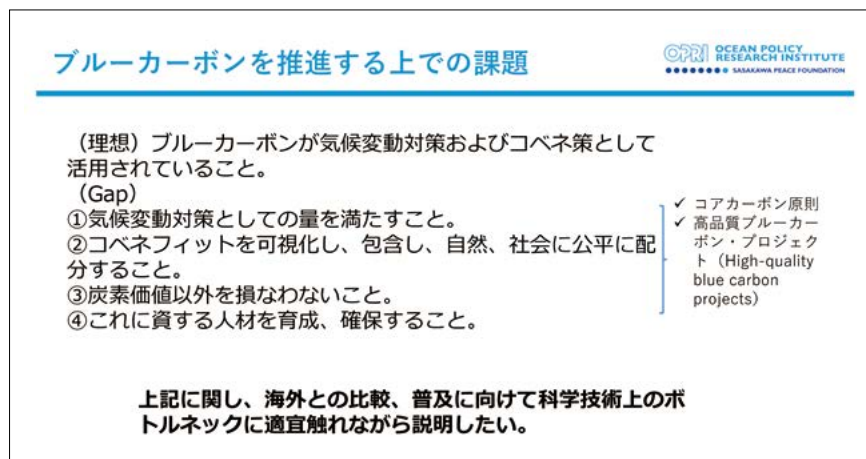


図3-4-1 ブルーカーボンを推進する上での課題

これらは、後述するカーボンクレジットに関するコアカーボン原則や最近COPで発表された高品質のブルーカーボンプロジェクトというガイドラインにも書かれている内容であり、それらが政策的、社会的ニーズとしてあり、そこにどう諸科学が貢献するかということと思う。そういったところを海外との比較や普及に向けてのボトルネックとして説明する。



図3-4-2 ブルーカーボン生態系の定義

ブルーカーボン生態系は、2009年の国連環境計画の報告書が定めた海草、マングローブ、塩性湿地がアクションブル・ブルーカーボン生態系、実行可能なブルーカーボン生態系として位置付けられている。実行可能というのはIPCCのガイドラインなどを満たし炭素市場の方法論が確立されクレジット化ができ、社会の仕組みも織り込んで気候変動対策として考えられているものであり、ここでは従来型ブルーカーボンと呼ぶことにする。一方、海藻、大型藻類はエマージング・ブルーカーボンの代表格であり、ここでは新興のブルーカーボンと呼ぶ。(図3-4-2)

図3-4-3は2021年頃に出たブルーカーボンのポテンシャルを概算した論文の引用であるが、これを見ると濃い青系が従来型ブルーカーボンの量が多い国になり、オーストラリア、アメリカ、インドネシアの順で、続いて、メキシコ、サウジアラビアといった国が大きい。こういった量は従来型のブルーカーボンが生存できる砂泥質の浅海域の面積で規定されている。このため日本の海岸線は長く、EEZも世界で6番であるものの、浅海域が少ないので現存量は限定的である。ただ一方、新興のブルーカーボンは考慮されておらず、そこを含めると日本も量が増えるし、養殖までも含めるとさらに増える。浅海域の面積を調べると、オーストラリアやアメリカ、インドネシアなどで水深10メートルまでの海域が多いことが分かる。

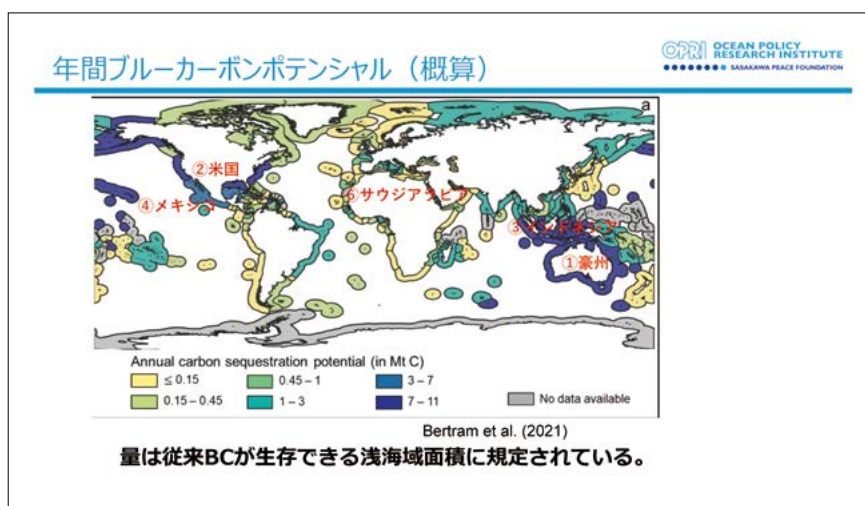


図3-4-3 各国の従来型ブルーカーボン生態系のポテンシャル

一方、大型海藻の中でもケルプ、コンブ類の面積は、今まではきちんとした推定がなかったが、近年グローバル・ケルプレポートという報告書を国連環境計画とノルウェーのブルーフォレストネットワークの報告の中で値が取りまとめた（発行時期未定）。それによると、ケルプ、コンブ類の藻場面積は全球で大体140万平方キロメートルである。海草藻場が全球で30万平方km、日本の国土面積程度と言われているが、その5倍ぐらい大きいと推定されている。マングローブや塩性湿地と比べても、4桁以上大きな数字となっている。ただ、海草は潜在的にはコンブ類と同程度の面積があると言われており、実際、世界最大の海草藻場がバハマで昨年発見されている。そういったところから、まだ面積が増える可能性はある。表中の日本の面積推定値は、私のほうで追加している。（図3-4-4）



図3-4-4 ケルプ（昆布）林および他の沿岸生態系の面積比較

年間のブルーカーボンポテンシャルについて、桑江氏がまとめた論文によると日本での従来型+新興ブルーカーボンに現在130万から404万トンぐらいの幅でその吸収量が推定されており、これが2030年には再生、創出活動を通じ拡大可能と考えている。日本の年間CO₂排出量は10億トン程度なので吸収量は森林など全部の吸収源が4～6%ぐらいであり、海も活用していくべきである。（図3-4-5）

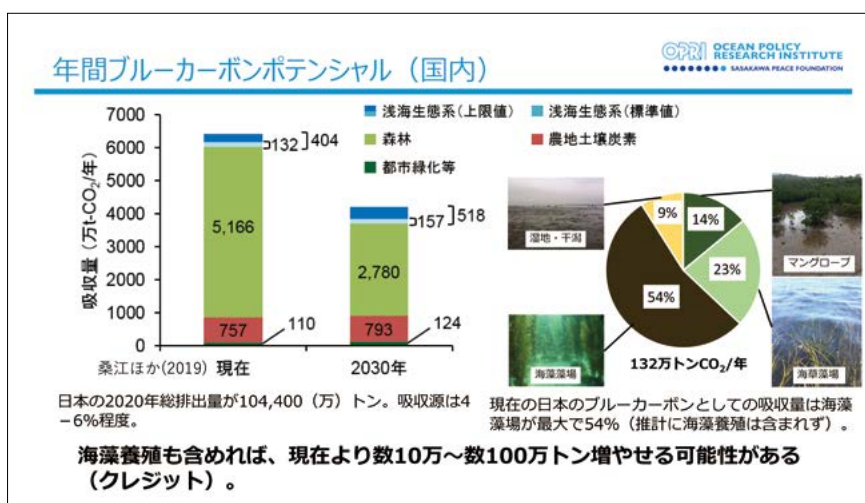


図3-4-5 日本の年間ブルーカーボンポテンシャル及び他の吸収源との比較

ブルーカーボンの内訳であるが、大型海藻類が50%を超え、量が一番大きくなっている。これには海藻養殖を含めていないので、海藻養殖まで含めれば、現在より数十万から数百万トンを増やせる可能性がある。再生や保全で増やしたものはクレジットの対象になるため、クレジットのポテンシャルも同じようにある。

ブルーカーボンの量を増やす上の優先課題は天然海藻、養殖海藻を増やすことと思う。課題は以下の開発や研究、実証を進めていくことであり、作る技術、守る技術、それを使っていく技術、それをちゃんと測って報告し、そういったものを組み合わせながらやっていく上で、これらに係る研究開発が重要となる。（図3-4-6）

ブルーカーボンの量を増やす上での優先課題

CPRI OCEAN POLICY RESEARCH INSTITUTE
SASAKAWA PEACE FOUNDATION



天然海藻・養殖海藻を増やすこと。課題は以下の研究・開発、実証。

1. **創る技術。** 種苗生産、浮体式養殖場、多栄養段階統合養殖（IMTA）、洋上風力発電&コンブ養殖場
2. **守る技術。** 除去・利用する技術：磯焼け対策、草食動物・グレイザー（例えばウニ）の除去・利用。
3. **使う技術。** 食用、バイオエネルギー、飼料、肥料、化粧品、医薬品、新素材（代替プラなど）
4. **測る技術。** 航空レーザー測量（ALB）、オートドローン、大型藻場自動判別（機械学習）、原位置リアルタイムモニタリング、環境DNA、大規模養殖のためのEIA、LCA（費用対効果）。



図3-4-6 ブルーカーボンの量を増やす上で必要な技術

測る技術に関しては現存量を測る、最適な生息空間を測定する、その環境変動を測ることもあるし、また深海に輸送されたものを環境DNAで測る、大規模養殖したときの環境影響評価をする、それから、海藻の場合は乾燥工程や、ライフサイクルで見たときの費用対効果、CO₂排出も測れることと並行してやっていく必要がある。

ジャパンプルーエコノミー技術研究組合（JBE）を運営しており、こういった研究開発も含めて、科学、工学、経済、社会学を融合させたアプローチを開発していこうとしている。特に経済的なものや、社会的なコンセンサスについては、2020年度からJブルークレジットを2020年度から立ち上げたときから取り組んでいる。昨年度の例として、4カ所で実証を行っている。（図3-4-7）



図3-4-7 Jブルークレジットの実証（2021年度）

それぞれに特色のある主体が力を合わせて、さまざまな技術やネットワークを活用してクレジットを創出している。これは昨年まで港湾内に限られていたが、今年はクレジット認証手引きを作り、これを使って申請しやすいように工夫しながら、最新の知見をガイドライン、手引きとして公表しながら、多様な人が申請できるような仕組みを作っている（2022年度は21件の実証を実施¹）。

少しカーボנקレジット制度を補足すると、大きく分けて二つあり、規制市場と言われるコンプライアンス市場、国連、政府間がやり取りする市場と自主的市場として、民間を含めボランタリーな市場がある。私たちが行っているJブルークレジットはボランタリー市場であり、国とのやり取りもしながら運用している。（図3-4-8）



図3-4-8 カーボנקレジットに関する規制市場と自主的市場

1 令和4年度（2022年度）Jブルークレジット認証・発行について：
<https://www.blueeconomy.jp/archives/2022-jbc-register/>（2023年2月22日アクセス）

ブルーカーボンの量は、これから正確には出てくるが、初年度1件、2021年度4件であったものが今年は現時点で21件の認証があり、量としても3,000トンぐらいの規模になりそうである。クレジットの数、量、質の多様性が増えてきている。（図3-4-9）

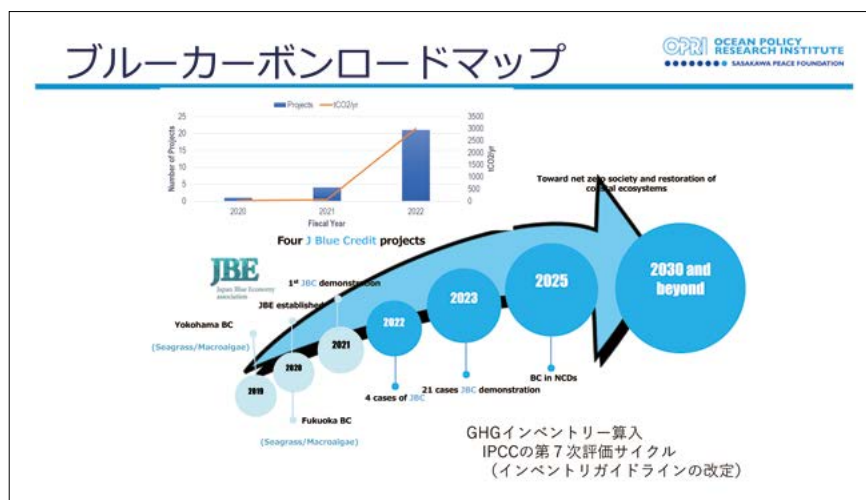


図3-4-9 日本のブルーカーボン・ロードマップとJブルークレジット実証状況

今後、温室効果ガスのインベントリへの算入を目指している。特に堀氏が中心に進めている海藻のブルーカーボンをインベントリに入れることは、まだ世界でどこもやっていない。その算入を行うこと、あとは国際的にそれに並行して、IPCCの第7次のサイクルに乗せ、インベントリガイドラインの改訂の動きにも打ち込んでいくことがよいと考えている。

ちなみに、JBEでは、ジャパンブルーエコノミー推進研究会（BERG）を運営しており、設立時14のメンバーから現在個人会員40、団体会員60と100を超えるまでに増え、非常に多様な主体、会員が参加している。作る技術、測る技術、使う技術、守る技術をお互いの得意を生かして開発していこうとしている。

最近出たFriessの論文で、世界で行われているブルーカーボンプロジェクトがまとめられているが、熱帯、亜熱帯域のマングローブのクレジット化について途上国を舞台に先進国が協力してやっている事例がほとんどである。日本は、特色のあるブルーカーボンの実証をしており、図3-4-10は元論文に加筆したものであるが、今回のCOP27を通じてシンガポール、インドネシアなど、東南アジアも最近、動きが活発化している。日本は先進国内で海草、海藻のブルーカーボンの算定とか、認証、販売を可能にしている、ユニークなことをやっている。そういったものを親和性の高い国々と今後の共同研究などを通じて、広げていけると良いと思う。

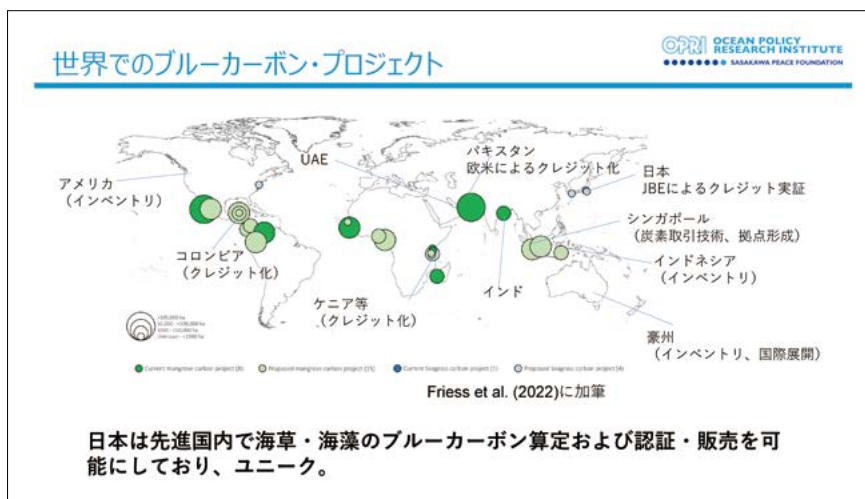


図3-4-10 世界のブルーカーボン・プロジェクトと比較したJブルークレジットの特徴

ブルーカーボン・プロジェクトを実践する上での課題として、社会的課題、ガバナンス上の課題、経済的課題、それから、技術科学的な課題がこの論文でまとめられている。社会的には炭素価値や、生態系から得られる便益（コベネフィット）を公正に分配する、あと、スチュワードシップ ー海の守り人という日本語ににくい概念であり、海の地先の管理を自分事化するようなイメージ ー、そういった意識を作り、改善しながらやっていくことの必要性や、ガバナンス上は土地の所有権と炭素価値の関係性の明確化していく必要がある。経済的にはクレジットも含め、炭素の価値以外のコベネフィットも科学的に評価し包含し、それを資金メカニズムにする、あと、こうしたプロジェクトへの投資を呼び込める仕組みを作ることで、現状資金不足のために需要よりも少ない供給を増やすことである。また、科学・技術的には、標準化され、コスト効率良くパラメータ化する研究、さらに、日本も含めIPCCのTier2、Tier3に足る知見を作り、提供していくことや、海面変動とか気候変動に伴う空間・時間条件がブルーカーボン生態に与える影響の将来予測をやっていく必要がある。これら各課題は互いに連携しているため、学際的、相互連関的に進めていく必要がある。（図3-4-11）



図3-4-11 ブルーカーボン事業を実践する上で考慮すべき点

こういったプロジェクトはブルーカーボンに限らないが、炭素プロジェクトを作るときには、コアカーボン原則に定める必要がある。例えば、二重計上のない仕組みを作る、ほかのところで炭素を排出してしまうことや環境に悪影響を与えないかを考慮する、といったことだ。環境だけでなく、社会経済的な状況も考慮し、ステークホルダーと対話しながらプロジェクトを進めることが求められている。（図3-4-12）

コアカーボン原則	
コアカーボン原則で求められる項目	判断基準
現実性	実際に削減が生じたものを対象とする
追加性	取組の実施によって追加的に吸収されたもの
現実的に信頼できるベースライン	ベースラインの設定方法、定期的な再設定
測定・報告・検証	測定精度、審査機関、頻度の報告内容
永続性	永続的な削減・吸収を対象とする
リーケージがないこと	リスクがある場合はリスク緩和等が必要 対象地域外での排出増加がないか
二重計上のないこと	重複した発行・売却がないか
危害を与えないこと	影響評価、ステークホルダーとの対話

(TSVCM: Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets) が提案している「自主的炭素市場における品質評価原則（コアカーボン原則）」

図3-4-12 ブルーカーボン事業が満たすべきコアカーボン原則

今回のCOP27で11月8日にリリースされたのが、世界経済フォーラム、コンサベーションインターナショナル、セールスフォースなどが一緒に作った高品質ブルーカーボン原則・指針である。これも炭素価値を生み出す際に、自然を守っているか、生物が増えているか、地域の社会経済に貢献しているか、コミュニティをエンパワーしているかなどが重視されており、そういった事例を作り、高品質なブルーカーボンプロジェクトを増やすことが重要視されている。（図3-4-13）

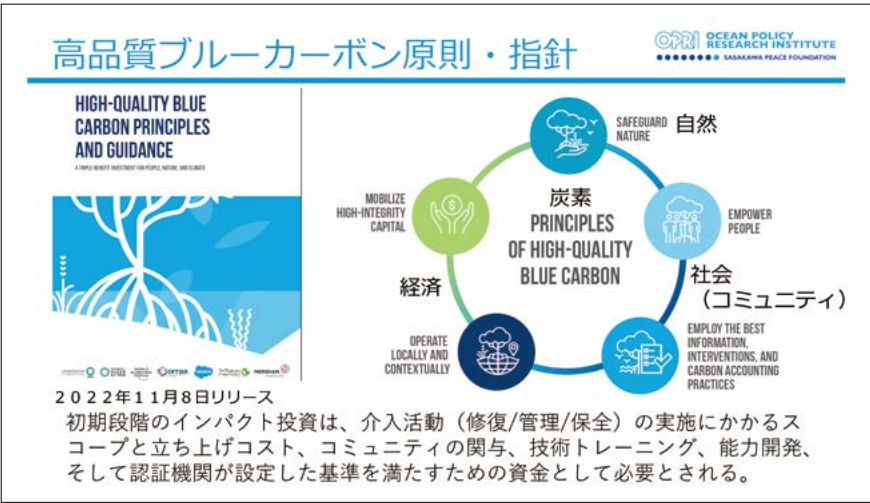


図3-4-13 COP27で公表された高品質ブルーカーボン原則・指針

具体的な例として、ケニアのガジ（Gazi）というマングローブ林の保全再生のプロジェクトの例を紹介する。ここでは年間約3,000トンの二酸化炭素クレジットを創出している。プロジェクトが裨益するのは沿岸の住民であり、マングローブの保全再生活動もしながら地域の子供の教材へのアクセス、清潔な水へのアクセスといった社会課題も解決しながら雇用創出も目指していくモデルであり、国際的にも注目されている。似たような環境のケニア隣国の別地域として、タンザニア、マダガスカル、モザンビークにも広がるモデルとなっている。クレジットで入る金の94%ぐらいは地域社会への貢献や、マングローブの整備や、計測、報告、検証、それから、事務局経費、雇用としてのプロジェクトコーディネーターに充てられており、このような仕組みが高品質の一つの事例と思う。（図3-4-14）

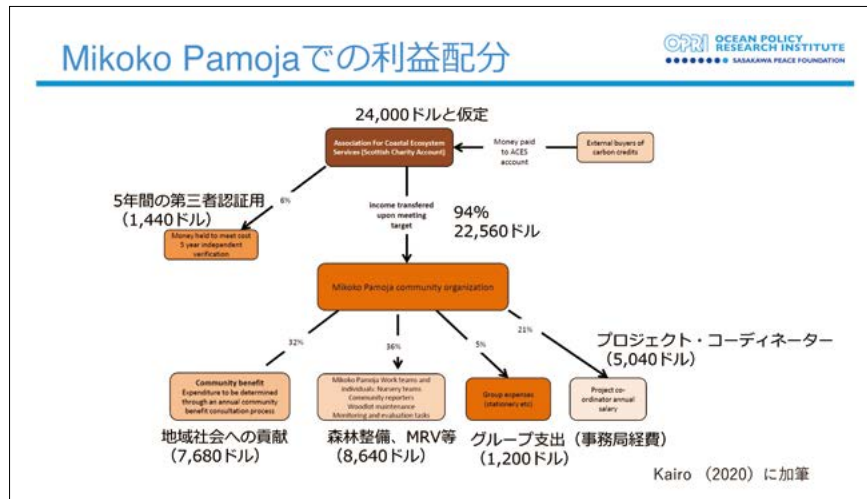


図3-4-14 ケニアのブルーカーボン・クレジットの利益配分

また、今後の動向を占う上ではパリ協定6条の議論があったが、こういったところで二国間取引がどうなるかが非常に重要になってくる。（図3-4-15）



図3-4-15 カーボンのクレジットの動向に関わるパリ協定第6条

パリ協定6条をめぐるのは、途上国から幾つか懸念が示されている。こういった二国間取引で民間が他国のホスト国の炭素を買って使ってしまうと、ホスト国が自国のNDC達成に必要な炭素を確保できないという懸念である。また各国では透明性が高い国内炭素市場の政策、法律、仕組みを構築しながら、かつ国際的に進める必要がある。それにより、売り過ぎやダブルカウティング等をなくする仕組みをつくる必要性の議論が活発化している。

それから、海藻養殖を大規模にやった場合であるが、国際法への抵触という懸念があり、海の深海投棄に関してはロンドン条約に抵触しないか、それから、生物多様性や、沖合でやる場合UNCLOSという国連海洋条約への抵触が指摘されている。（図3-4-16）

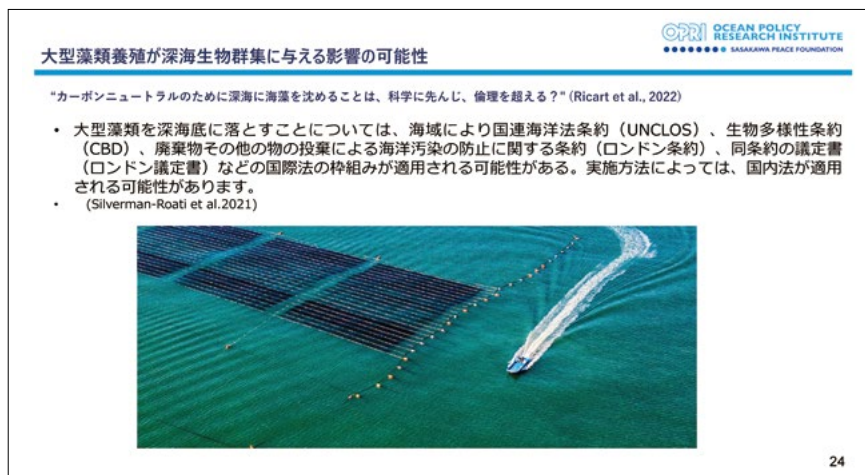


図3-4-16 海藻養殖の規模拡大の際に考慮すべき国際条例等

先ほどの炭素取引で自国の炭素が確保できなくなる懸念から、パプアニューギニア、インドネシア、ホンジュラス、インドなどは炭素の国際取引にネガティブであったが、今回のCOP27では大分態度が変わってきた。インドネシアではデジタルでやり取りできる仕組みをシンガポールなどと一緒に作り、国際取引にも対応できる法制度も整備していると聞いている。COP27期間中にインドネシアで開催されたG20でもオーシャン20（O20）が開催され、海の課題が重要とされ、マングローブをインベントリに入れて本格運用フェーズに入ることになる見込みだ。私はインドネシア政府のパピリオンで開催されたイベントにも出たが、海草藻場の再生、保全、更にIPCCガイドラインの高次の方法論、Tier2、3などを日本の例を参考に開発したいという話を受けた。また海藻養殖もインドネシアはポテンシャルが高いので、関心を示していた。

またシンガポールにこういったブルーカーボンを国際的に、特に東南アジアと太平洋地域で広げるための研究機関を作ることも宣言された。これはアマゾンが出資してコンサベーションインターナショナルとともに進めるプロジェクトで、そこをプラットフォームにして東南アジアや太平洋諸島の関係者が活用することで、ブルーカーボン気候変動対策に組み込む。さらに各国のNDCにブルーカーボンを算入するための政策決定者に向けたトレーニングを実施し、かつ保全・再生を担う地域コミュニティへの教育も行っていく。クレジット化もその中で行い、マングローブに加えて海草、大型海藻も対象にすることも視野に入れている。

最後に炭素価値を進める上で、コベネフィットを可視化していく必要がある。沿岸域の環境価値の定量化ハンドブックでは、温暖化の抑制であるブルーカーボンの価値と、それ以外の生物多様性、教育の利用、人間のレクリエーションの利用、生物多様性などを加味した価値は炭素価値の5倍ぐらいあるとの研究例もある。（図3-4-17）

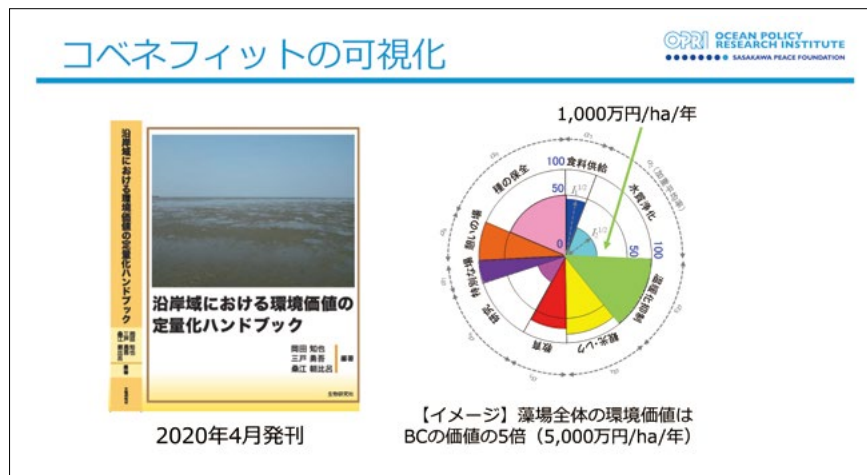


図3-4-17 ブルーカーボン生態系の持つ炭素貯留以外の環境価値の可視化

こういったものを国際的に展開していく必要があり、今回のCOP27でもフランスのマクロン大統領が生物多様性クレジットの議論をしていた。これは海洋の文脈の中での話であり、2025年の国連海洋会議がフランスで行われ、そこに向けて既に生物多様性クレジットの方法論を構築するためのハイグループを立ち上げたという宣言があった。（図3-4-18）

実際、Plan vivoという認証団体ではカーボンクレジットよりも少し複雑であるが、生物多様性のクレジット化として測定基準のバスケットを作り、例えばサンゴ礁の場合では5つぐらいの項目にわたって、総合的な点数で生物多様性が増やせたかを評価する方法論を作っている。このような流れに乗り遅れず、例えば日本が大型海藻藻場を重視するのであれば、それに対する炭素価値と生物多様性価値を同時に評価する手法を開発していくことが重要である。12月には生物多様性のCOP15があるので、この議論が進むと考えている。

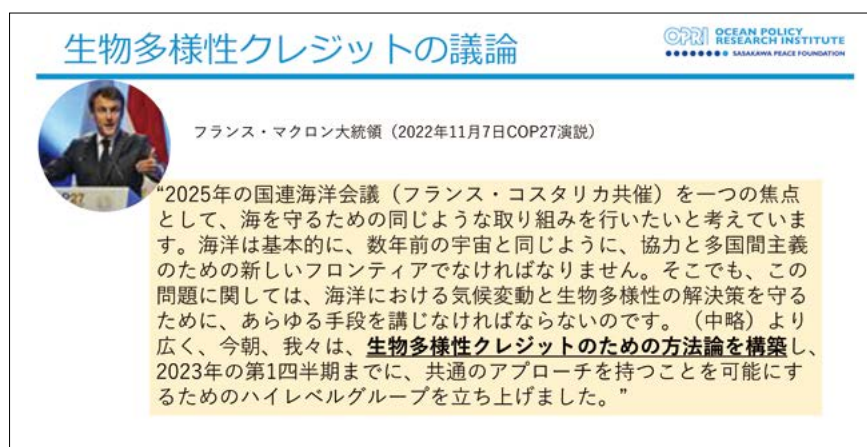


図3-4-18 コベネフィットの一つとしての生物多様性クレジットの議論

最後にまとめとして、量を増やす技術開発、大型海藻の養殖やそれから作ったものの深海隔離、産業上の利活用、経済合理性の分析も含めて検討していく必要がある。深海隔離も重要である。また炭素価値とコベネフィットの可視化も進める必要があり、市場のブロックチェーン技術などによる市場関係者とのやり取りも重要になると考える。また、国際協力に関して、JST-SATREPSなど、いろいろな仕組みがあるので、日本の知見を各国の政策やブルーカーボンに関して社会的なニーズがあるところで、例えば海草、海藻のTier2、3

設定に貢献するような国際共同研究を実施することも重要と考える。（図3-4-18）

まとめにかえて


**OCEAN POLICY
RESEARCH INSTITUTE**
 ***** SASAKAWA PEACE FOUNDATION

1. 量を増やす技術開発

- ・日本は大型海藻の養殖が重要。
- ・作ったものの深海隔離、産業上の利活用（経済合理性含む）を検討すべき。
- ・深海隔離はその輸送経路と底生生物への影響を評価する研究も必要。

2. 炭素価値及びコベネフィットの可視化、普及

- ・高品質ブルーカーボンプロジェクトは、コベネフィットの評価と公正な分配が鍵。
- ・透明性のあるブロックチェーン技術などを活かした市場形成の検討が必要。
- ・炭素+生物多様性クレジットに足る科学的知見が必要。

3. 国際協力

- ・日本の知見を基にブルーカーボン（特に海草、海藻）のTier2,3設定に寄与するなど、相手国のニーズに合致した国際共同研究。

図3-4-19 ブルーカーボンの保全・再生・創出を進めるための提案

【質疑応答・コメント】

- Q：世界でのブルーカーボンのプロジェクトにおいて、例えば国が資金を出して大型プロジェクトをやっている、それとも炭素クレジットのような形で取引をしているか
- A：両方ある。GAFAなどが出資して、それを環境NGOが現地でのキャパビルや実践を現地の人たちと一緒にやりながら、それを政府の公認を受けていることが途上国では多い。一方、UAEやアメリカなどは、政府が中心になり現地の研究機関、場合によって、UAEはほかの国の研究機関と組んでやっている事例がある。
- Q：例えば海藻とか海草でのクレジット化での取引の開始に当たって、国際的な基準の統一、価値の統一、取引の数を増やすような課題がたくさんあるのか。また、そういった課題に向けて国際的にはどういう状況か。
- Q：ブルーカーボンのクレジット化まで進めている先進国の事例は日本だけで、国内の仕組みなので、国際的な取引までは検討は進んでいない状況である。一方、インドネシア、インド、バングラデシュなど、大きなブルーカーボン生態系・ポテンシャルを持っている国々、その中でも海草が多いインドネシアとかは、これを国内のインベントリやNDCとしての温暖化のカーボンニュートラルリティの目標に活用したいと考えており、マングローブに次いで関心が高まっている。ただし将来的に取引をする上で透明性の担保が問われるので、ブロックチェーンを使った技術等で二重計上を避ける対策をするなどの制度整備の議論が進んでいる。
- Q：ケニアの例で。炭素クレジットが経済的に成立するのか。税金、補助金をつぎ込まなければいけないのか。またこれが先進国でも経済的に成立するのか。
- A：コストに対するベネフィットの評価など、持続可能性の検討は重要。JBEの実証では、通常のクレジット額より1桁以上高い金額で平均的に販売して取引している。ただそれで足りるかという、測定・検証などには足りると思うが、浅場を作る、漁場を増やすなど、ブルーカーボン生態系に関連するけれど違う目的に使われる予算も必要となる。ブレンディッドファイナンスというか、民間と公共の資金をうまく組み合わせないと持続可能にならない。ただ、クレジットは一つ重要な切り札になると考えており、適切なクレジットの金額については、事例が増えてきたら分析したい。
- Q：カーボンクレジットの場合は指標として炭素貯留量があるが、生物多様性は何が指標になるのか。客観性を担保する議論はあるのか。

- A：重要だと思う。民間の認証団体が考えているのは、炭素と比べると複雑である。サンゴ礁の例では三次元的な凹凸の場のほうが生物は住みやすい多様性が増える。生物多様性では対象によって変わるが、サンゴ礁の場合は商業的に利用される魚、脊椎動物の多さなどを指標に、保全などを実施している場所とそうじゃない場所での比較を通して、どれくらい生物多様性が上がったということを評価している。
- Q：測定基準バスケットは、今のところサンゴ礁だけか。
- A：海よりも陸上が先行している議論であり、事例は少ないと思う。ただ一方、マクロンの発言は海の文脈の中で発言しており、海の生物多様性クレジットを議論するとしており、その根拠となる情報というのがどれくらいあるのか、またブルーカーボンに関連するような測定基準の枠組みがどの程度考えられているのかについては注視していきたい。
- Q：こういうものがあると調査しやすいと思うが、その一方で抜け落ちた項目の価値が落ちてしまうことの危険性は考えられているか。
- A：まだ完成したものではないので、今の最近の技術で、その場を評価しつつ、実際の魚や対象とするものが増えた、減ったというのを評価できるようにしていければと思う。サンゴ礁に限っても環境価値はこれだけでなく、それ以外の価値、生物多様性に関する価値が抜け落ちているようなものがあるのかもしれない。それが重要になる場所では、それも拾っていく必要もある。ただ、やみくもに増やすと現実的な仕組みとして使えないので、バランスを取っていくことになる。

3.5 総合議論（海域）

3.5.1 概要（議論したい内容）

【バイオマス NETs の実用化加速のために必要な共通課題】

- バイオマスが関与する炭素循環のなかで、大気中の CO₂ 削減に効果的なフロー・ストックを見いだす上で未解明の部分はどこか。
→ 藻類の海中での分解特性の把握
- 炭素固定量増加のために効果的な方策と、その基盤となる科学技術は何か。
- 社会・経済的な課題やコベネフィットについて。
- 推進方法の具体的なイメージや時間軸など。

3.5.2 今後求められている科学技術上の課題

【バイオマスの分解特性の把握】

- 分解速度の解明とトレーサーの技術開発

Q：バイオマスの分解特性などをサイエンスとして深めていくための技術、取組が必要か。

A：貯留速度を計算する上で分解特性を明らかにしたい。土壌の鉱物組成、微生物組成との関係における分解特性の解明が必要となる。我々は、難分解性の分解実験をやるが、100年ぐらいのスケールとなると、モデルを使うため、その精度も問われることもあるため、基準化も必要である。

Q：海藻や海草などの海中での分解特性の把握で、より詳細に現象解明していくためにモデルや観測の観点からのコメントは。

A：一番ブレークスルーになるのは、海藻由来物質の化学トレーサーである。海中で炭素の動態は外洋を中心によく研究されていて、炭素全体の流れはある程度分かっているが、それを細分化して海藻の寄与を解析する手法がない状態である。最近、環境 DNA の技術などにより、懸濁体、粒子状の堆積物は、DNA を使ってどの種かが分かるようになった。ただ、溶存体となると DNA では難しく、このためには例えばプロテオミクスのようなたんぱく質の構造解析の知見、化学物質の構造に詳しい研究者が必要と思う。モデルも例えば海流のモデル化や生物の代謝のモデル化はあるため、分解速度も分解実験のパラメータを使えば、それなりに予測はできる。しかし、それを確認する手だてがない。現場で海藻の動態を把握するトレーサーの技術開発とモデルと両方をやらないといけない。

- 溶存体の計測・トレーサーによる計測

Q：溶存体の計測が難しいという意味は。希薄過ぎるためか、あるいは何を測っているか分からないということか。

A：環境 DNA は DNA なので、細胞に残されている DNA を測るが、溶存体は、糖や腐食物でよく分からない溶存体であったりする。このため溶存体を見るには DNA では難しい。

A：海藻が出している物質が特定できればよい。海藻の有機物をノンターゲットで、分解能の高い質量分析計で測る研究が最近、出てきている。その構造が同定でき、ほかの植物プランクトンが出しているものと違うと分かれば使えるかもしれない。

A：環境 DNA と堆積物の関係の論文を作成したが、年代が浅い堆積物層だとそのまま細胞の中に残っているものもあるが、古くなると細胞から出てしまい、DNA だけ例えば鉱物吸着された状態で出てくるので、有機物とも合わなくなったりする。そのためどう合わせるのか評価で苦労している。それにはトレーサーがないと難しいと思っている。例えば海の中で堆積物を取ったときに集水域に人が多いとか、森が多いとかは森のキノコが持っている難分解性の物質を指標にすることが、陸域ではやられている。

トレーサー研究として、海藻しか持っていない物質や機能性物質を探すことがやられている。トレーサーになるものが見つかれば、深海、浅場、堆積物も分かる。その部分は、海のほうは陸ほど進んでいない。

- A：海藻のトレーサーになる化学物質を追跡したが、海藻の有機物は沿岸から沖に流されて、そこから下にいくという横で縦という2段階になる。横はある程度、出せる。腐食様物質という特徴的な特性を持つ物質で、海藻の藻場から沖に向かって真っすぐ海水を採取すると、濃度勾配が見える。河川の影響がないところでは、海藻は大体1キロから2キロぐらい沖ぐらいまでいくが、そこから下の2段階目は難しい。そこまでに希釈されるので、高分解で特徴付けられるような手法か分析手法が、必要になる。
- A：ただ、海藻の溶存有機物は植物プランクトンと比べて特徴的で、例えばハロゲン系を含むものが多い。沿岸でハロゲン化合物を出すので、それをターゲットにしていく。もう一つ、総体として流されていくプロセスでの分解について、分解性は化学的な特性に依存し、科学的な特徴付けで易分解のもの、難分解のものを分けることができるので、分解速度は化学組成を生かす方法ができそうである。そのような化学的な指標での分解実験は大変であり、一回やるのに何カ月、何年かかるが、化学的な方法で代用できる手法が確立できそうである。
- A：海藻はヨウ素を蓄積し、生体防御の反応のために細胞外に分泌する。それを粘液と一緒に出したりする。

・海中での計測

- Q：海中でも海底の下の計測技術が必要かと思うが、例えば深海の海底で、例えば炭素の量を測ることは、陸域と共通するのか、海底のための技術が必要か。
- A：海中と陸上で、観測技術は大きな差がある。それは炭素を調べるだけではなく、植生を調べることや、衛星画像だけでフラックスを測ることもできない。海の中は、観測技術に関しては陸でできるから海でできるとはならない。

【モデル構築のエフォート】

- Q：国際的にも認められるモデル構築にどの程度の研究エフォートが必要か。2～3年のプロジェクトでは難しいと思うが。
- A：現場で測って現場の減衰率にフィッティングさせた数式を持ってくることになるが、例えば分解特性が分かり、それがパラメータ化できるのであれば、最初からモデルの計算で対応できる。5年ぐらいのタイムスパンでチームを組んで行う必要がある。イメージとしてはCRESTの一つの領域の中の1チーム程度は必要と思う。
- A：一般化がモデルの利点なので、シンプルに作るための絞り込みなど、それなりの労力はかかる。また数理の研究者と現場で測る研究者の両輪でやらないといけない。

【ブルーカーボンの効果としての時間スケール】

- Q：ブルーカーボンのネガティブエミッション技術の効果としては、100年ぐらいのスケールが目安か。時間スケール感は。
- A：例えばオーストラリアのブルーカーボンのインベントリでは、100年は貯留される考え方となる。気候変動対策で2100年ぐらいの目標を考えると、100年ぐらいのスケールは必要。しかし100年でも研究している時間スケールからすると予測が難しい。分解実験でも1年のエフォートを割いているが、100年後の予測にはまだ程遠く、難しい。

【予測の確からしさへのアプローチ法】

- Q：100年後の予測の確からしさの確認のアプローチとして、気象学では過去に起きた事象を改めて再現

してどれくらい予測できているか、実際に起きたこととの差分を見て精度を確認するというアプローチがあると思う。過去の地層を調べながら何が起きたかを確かめるアプローチがあったが、そういう過去のデータの掘り起こしから、100年後の予測に生かせるアプローチはあるか。

- A：例えば堆積物中の環境 DNA を測る論文が出始めており、堆積物ではできる。しかし、水中は難しい。ただ、海の中にある溶存有機炭素の年代は放射性炭素で測れるが、海藻由来が特定できればクリアな証拠となる。海藻由来のものが特定できて年代が分かることが目標と思う。

【バックグラウンドとしての海洋環境の影響】

- Q：バックグラウンドとしての海洋環境の現象理解、具体的には海洋熱波や磯焼けなどの沿岸域に直接的に影響を及ぼすような現象の理解はブルーカーボンに直接影響を及ぼすため重要と思うがどうか。あと遠洋での養殖を考えると、そういうところに影響を及ぼすような現象があると思うが、特に注目すべき現象は何か。
- A：将来予測は今現在の植生が2100年にどこまで変わるの分布予測を行っているところであるが、パルスのくるディスターバンスが温暖化の激化にどのぐらい沿岸域にくるかが課題となる。海洋熱波が一番難しく、1日、2日ならよいが、例えば3日、4日続くと枯れてしまうこともある。また日本の場合には海洋熱波よりも、降雨の激増が気にはなるところである。沿岸域は浅いので、淡水がいきなり入ることでダメージを受けることもある。海洋熱波と降雨激増などのイベントは数年で起きるので、海流の動きやそれらを予測しながら、どの程度の変動が起きるのか、パルスのディスターバンスが起きるのかは見ていく必要がある。

【温暖化による生物への影響】

- Q：温暖化による生物への影響などコメントは。
- A：特に日本の太平洋側は魚の食害で磯焼けが進んでいる。下田も大変であるが、多分、日本の南側はほとんどであり、三重や三浦半島でも起こっている。高知では海藻、カジメがなくなりサンゴが侵入することが起こっている。それに対してどうアプローチするか、例えば下田だと、ブダイとかの食害が原因ということで、例えばゲージみたいなものを海藻にかぶせて残す。そのようなアプローチは研究者だけでは駄目で、ステークホルダーとやる必要がある。
- Q：こういった温暖化の影響や沿岸区の状況の予想は難しいか。
- A：予測は不可能ではない。ナチュラアナログは予測に向けたものであり、海洋生態系は単純化することが言われている。例えば大きな生物が小さくなる、寿命の短い短寿命のものに変わり、それぞれ小さなものになると、単純なものに海の中が単純な構造になっていくという、シンプリフィケーションが起こっており、避けられないと思う。なので、例えば構造物を入れるなど、何かアダプテーションが必要と思う。

【ブルーカーボンの量を増やすための技術やサイエンス】

- Q：ブルーカーボンの量を増やす上で、技術やサイエンスは。
- A：特に藻場、海草、海藻、特に海藻に着目したときに、黒潮の蛇行の影響で減っており、それをモニタリングし、測定された環境因子を活用して、生物増減に一番効く物理的なパラメータと、生物がそこにどのように関係するかなど食外生物の生存を将来予測のモデルの検証として整理していくことも良いと思う。それから、海洋酸性化は日本の沿岸はCO₂シープを除くと、海外の湧昇域例と比較して影響は少ないと思うが、どこで閾値がくるのか分からず、そういった影響が場の構成、石灰化生物が減り、それがどう影響するかにもつながるので、総合的に評価できるとよい。ブルーカーボンを増やす上での優先課題は、地形が単純化していくのであれば、三次元的な構造として構造物である洋上風車を活用す

る、また多段階な栄養を統合した養殖をやる、魚と海藻の養殖を一緒にやる、さらに比較的温暖化に強い種苗生産により短い季節で多くを育てることやその周辺技術、場の創出と場の適した種苗を確保し、実証していくことが必要と思う。測る技術も必要で、堆積物の中の環境DNAの活用は、こういったフィールドでやるのが一番いいのか、モデル化も含めての検討する、あとは大型藻類を自動判別するようなシステムを作る、いろいろ機械学習も取り入れた測る技術も、並行して開発していけるといい。場の創出というところでは、多角的な技術への視点が重要と思った。

【社会実装を加速させていくために必要な技術】

Q：ホンダワラのように一種の生物多様性にも絡んだ魚類の保護、いろんな魚が卵を産み、海の生物多様性を育てていくあたりの研究がされているのか。日本は本来、海辺の植生を増やすことによってブルーカーボンも増えるが、それだけでなく魚とか、魚系の海の中の生物多様性に効くなどの基礎的な研究、技術はどうか。コベネフィットも含めて。

A：流れ藻の研究は、スケールを大きくしていくと観測技術の問題がでてくる。流れ藻の研究は、人工衛星を使って計算したが、人工衛星は森を対象としており、海のことは考えていない。我々が使ったGCOM-Cは例えば解像度が250メートルぐらいであるが、流れ藻はテニスコート2面ぐらいの解像度が必要となる。GCOM-Cのスケールだと、流れ藻の10%も満たない。このため過小評価になっているが、それで計算し、評価している。人工衛星は、陸の仕様でつくられるので、最初から海の仕様がもりこまれるような行政的な仕組みを望んでいる。

Q：また、そこで例えば航空機とかドローンを使えば、識別能力を1メートルとか、人工衛星の組合せだと思うが。

A：森林の規模と比べると、藻場の規模や干潟の規模も小さめなので、衛星と合わせて航空機やドローンの提案もしている。

【陸域と海域の視点】

Q：陸域と海域がはっきり分かれているが、海と陸はつながっているの、そこをグレーにして炭素動態を見るような視点の研究はないか。

A：トレーサビリティは一つのトピックになっていて、河川から入ってくる溶存有機物が海の中にどう入っていくかの研究はあるが、海の入ると塩の問題で分析が難しくなり、ハードルが上がる。溶存有機物に関しては海の研究と陸の研究は、分析のハードルが変わる。

【窒素固定共生菌の開発】

Q：窒素固定共生菌の開発、発見について、成果が出ているのか。

A：まだそこまでは出ていない。海にも窒素固定共生菌がいることが去年、見付かったという論文が出たので、それを実際に使って海藻養殖や沖合で植物を育てるのに利用できないかを民間の企業が研究を始めたところである。外洋では栄養塩の問題と構造物の問題が出てくるので、そこをクリアしていくための技術開発と思う。

【アメリカでの大型藻類活用】

Q：アメリカでの大型藻類の物質活用は、農務省がリードしているのか。

A：アメリカではエネルギー省DOEで、ARPA-Eがある。この1年、2年でかなり進んだと聞いている。養殖ベースで行っている海藻養殖は農務省USDAが管理しており、それは海洋養殖と一緒に複合で行われているところが多い。海洋大気庁NOAAもブルーカーボンという形でFisheriesの中で取り組んでいる。三つの中で予算の順番は、エネルギー省、農務省、NOAA。

3.5.3 社会実装に向けた課題に関する議論

全体討論では、社会実装に向けた具体的な課題、社会経済的な課題を中心に考えていきたい。例えばコベネフィットやコンフリクトする部分を考える。

【コンフリクトの課題】

- Q：生息場とか、生物多様性を両立するための技術の話もあったが、例えば観光用の魚類、貝類などがブルーカーボンを大規模に実装していく上で、失われる可能性があるとの話があった。バイオマスも土地を使う以上、難しいが、どういった指標を持って、それをよしとするのか。
- A：海で何かをやりそうとするとき、漁業者とのコンフリクションは大きい。ブルーカーボンを上げるために何かをすることで漁業資源が下がる、漁業がしにくくなるとなると、社会実装が難しくなる。漁業でコベネフィットを下げないかをケアすることが現実的な社会実装では大きい。
- Q：魚を守るというのは、観光用もあるかと思うが。
- A：漁業権の問題で漁業者がNGを出すと観光業も動けない。今の日本の沿岸文化的には漁業者の合意を取るかであり、魚が取れば、プラスで生物多様性が上がり、ほかの観光業もプラスになることが多い。

【コベネフィットの可視化】

- Q：ブルーカーボンを社会実装していく上で、コベネフィットの可視化は。
- A：国際的に言われているのは、ブルーカーボンの保全・再生はSGDsの目標で見たときに、コベネフィット、負の影響はなく基本的に経済にも環境にも社会にも相乗効果があると認知されている。あと、海藻の養殖に関しては、環境の影響はよく分からないが、それ以外は基本的には社会にも経済的な評価がされている。これはコンテキストで違う評価がされていて、グローバルに欧米から見たらそういう評価が下される。日本だと、漁業者が沿岸に関しては重要なステークホルダーとなる。JBEのクレジットでも漁業者が主体的に関わっており、先進的なことを行っている漁業者のうまくいっている事例を増やしながら、どういうニーズがあるのかを酌み取り、それに応えていくことと思う。なので、生物多様性のクレジットに足るような科学的な知見を日本からも生み出していく。日本の場合、いろんな生物がいて単純ではないので、その難しさも含めて行えるとよい。藻場の生き物が増えることで生計を立てている漁業者は、そこで増えるようなものが直接的に増えるというデータを示せばよいと思うが、藻場が増えると沖合の魚も増えることも期待している。しかし、それらは気候変動の影響、植物プランクトンが海域で減る、貧栄養化などの影響が大きいので、整理しながらブルーカーボンで増やせる生物多様性、里海的な考え方を説明して理解を得ることも重要になる。

【生物多様性の評価】

- Q：生物多様性の評価がブルーカーボンとどのくらい密接に結び付いているかという研究は、進んでいるのか。そこにもサイエンスの課題は残されているか。
- A：基本、漁業者でも魚が取れている人はあまり興味を持たない分野で、魚が取れなくなった人とか、藻場と一緒に生活してきた人たちがブルーカーボンを気にしていろいろ取組をしている。なので、生物多様性についてこういった漁業者はよく知っていて、温暖化で経験知（伝統知）が使えなくなっている。なので、何かおかしいという感覚で、その原因について何か知らないかと聞かれることが多い。実際、IPBES（生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学・政策プラットフォーム（IPベス、イプベスとも呼ばれる））も今のIPCCと一緒に報告書を作ったりしているが、気候変動対応と生物多様性の問題は両軸で同時に行っていくべきものと思う。

【環境への負の影響】

- Q：例えばブルーカーボンを大規模に実装していく、人間の手で増やしていくという行いが天然藻場を損ねてしまう可能性があるか。天然藻場とか、元々あったところを守っていくところとバッティングするところはあるか。
- A：水産庁で藻場の造成を行ってきた範疇だと、ブルーカーボンはコベネフィットとなる。藻場の機能の部分大きくして、漁場としての価値を上げていくのが水産庁の藻場の行政であり、100年前から変わらず藻場を作るのはいいことだということで進んでいる。
- A：これから海藻養殖していくときに、海外の例で大規模に海藻養殖すると、植物プランクトンの自生産が減って魚が減るのではと言われており、日本でも起こり得ることがネガティブな部分である。

【ブルーカーボンによる炭素の価値の評価】

- A：カーボンの価格は取引の中で決まるので、大きくは需要と供給である。とはいえJブルークレジット制度ではストーリーを重視している。例えば昨年度、試験的にコベネフィットの貨幣換算を提示した場合と提示しない場合で、どれぐらい買手の反応がどうかの実験をしたところ、コベネフィットの価値を示すと単価が非常に上がった。生物多様性のクレジット化は今、始まったばかりであり、カーボンが先行しているが、Jブルークレジットに関してはストーリーを示したり、今後はコベネフィットの価値を提示することで、炭素価格を上げたりすることは可能になると思う。価格が上がれば、還元されてプロジェクトの質も上がるので、価格を上げることは重要なことであり、そのためには定量的な評価として生物多様性や、ほかの生態系サービスを測っていくことも同時に重要になる。

【研究プロジェクトなどの具体的なイメージや時間軸について】

・炭素価値、炭素の付加価値

- Q：炭素の付加価値は、普及に重要なファクターではないか。また国際的に統一された価格が必要ではないか。またそのための日本の国際的な取組としての連携の必要性は。
- A：価格は地域差があってもいいと思う。適切な価格は日本の社会経済状況や藻場が気候変動などの影響で保持できなくなり、人間が元の藻場を守るための追加的な活動に対して、しかるべき対価が支払われるべきである。そういう意味で、藻場の再生、水産庁は藻場を作ることに助成をしているが、それと並行して炭素価値を作るところも支払われて、それで初めて持続可能になるという、複合的な資金の提供メカニズムがあり、国の助成金に頼るだけではなくて、民間も投資した成果がクレジット、オフセットという形として返ってくる必要があると思う。現在は相対取引で価格を決めていく実証をしているが、それは取組のストーリー、苦勞も評価された価格になると思う。一方で海藻の養殖を大規模にやることは、漁業者の活動の一環として炭素吸収する活動となるので、それは違う評価がされる。それも含めて幾つかのレイヤーで仕組みをつくりながら、それぞれ実施していく必要がある。一方、国際的に統一すべき部分もあり、測り方、価格的な根拠などは研究成果がベースになり、国際的なところでルールメイキングをして作っていくことになるので、科学と政策の融合として進めていければ考える。
- Q：国際連携による研究開発で、知見を海外に共有することのメリット、ルールメイキングに資するなど、連携することで得られること、国際的な価値につながることは。
- A：一緒に研究しているイタリアのチームと情報共有していると、特にヨーロッパのグループは、日本より海岸線の長さは小さいものの、海洋保護区を作り、その有効性の評価も進んでいる。日本の基準をそこに輸出していくことも重要だと思うが、概念的なものを輸入することも重要と思う。
- Q：例えば海藻の藻場を守るというところで何かそこに価値は出せないのか。増やすことでなく例えば温暖化に適応させたり、緩和させたりとかの知見は。
- A：維持も対策として有効で農水省のプロジェクトでは失われていくものを止める技術開発も行っている。

水産現場としても適応も高温耐性など、遺伝子組換えはできないので、時間が掛かる選抜育種的なものを行っている。

【研究開発の時間軸】

- A：バイオマス活用の部分は、2030年までに例えば欧州は炭素ベースで数百万の目標を立てている。中国はブルーカーボンとして海藻養殖をやっており、アメリカはバイオマス産業で再エネの10%は海藻という話もしているなど、大きな枠組みでの取組は進んでいる。それをネガティブエミッション技術に入れるとなると、早く進むと思う。森林のインベントリを見ても、科学技術で突き詰めるところと、そうではないところの整理がまず大事である。その整理は多分、1年、2年でできると思う。炭素は吸収源とそれを求めるほうは民間の研究所も数年前から始まっている。民間は5年タームで動いているので2025年の段階でその整理はでき、次の2030年までの5年でどこに注目すべきかはっきり見えると思う。
- A：時間軸的なところでJBE技術研究組合では、数字の目標として2030年に1万トン、2050年に100万トンを目指してやろうとしている。1万トンはもう少し早く達成する感じもある。一方で例えばブルーカーボンで1,000万トン、クレジットとして100万トンを目指して、数字を掲げた上で、それを技術研究開発で埋めていけるかという考え方もある。海外の事例として、アメリカ、ヨーロッパを含め、かなり大型藻類の実装、実験、沖合の浮体での海藻は中国が進んでおり、それをノルウェーは逆に輸入して海藻養殖の大規模化を行ったりしている。それらの国際的動向もにらみながら、日本の目標値をどう埋めていけるかを考えいとよい。

4 | まとめ

全体まとめ

陸域と海域の2回に分けて開催した「バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究」に関するワークショップの議論の概要を以下にまとめる。

【科学技術的課題】

• 共通

→研究・観測の検討時間から考えると炭素循環・固定の時間スケールが長期（百年～数千年）に及ぶため、モデルが必須となる。その精度を高めるために観測との融合が必要。

• 陸域

- 陸域生態系の詳細解明のためには長期的な取組が必要。
- 長期観測として、普遍的なルールを探るためにさまざまなサイトでの観測が必要。さらに地上での観測データや衛星データなどの観測データを複合的に解析するようなビッグデータ解析技術が必要。
- 地上部に比べて地下部、土壌の分解や安定性の評価が困難であることも課題。
- 光合成においては炭素のみならず窒素、リン等の関連性の研究も重要。
- ゲリラ豪雨や熱波などの極端現象がモデルに取り入れられていない。そのような地球臨界現象の影響について生態系の応答や炭素循環への影響は大きな課題。
- メタンの影響は大きく今後の課題。

• 海域

- 海中の観測技術は陸上と大きな差があり、困難。
- 海中での海藻類の分解過程を理解する上でブレークスルーになるのは海藻由来物質の化学トレーサーとその分析の技術開発が必要。
- 衛星観測は陸域観測に合わせており、海域に合わせた対応（より高解像度など）が必要。
- 温暖化影響：海洋熱波などのパルス的にくる外乱が課題となる。それらの予測やどの程度の変動が起きるかを見ていく必要がある。

• 農地

- RothCモデルの改良・精度向上：農地の土壌炭素量を推定するRothCモデルの精度を上げるためには土壌タイプ（活性鉄、活性アルミニウムなどの）との関連性の研究が重要。炭素、窒素、リンは連動しながら物質は循環するのでその理解も重要。炭素飽和に関する研究も重要
- 農地からのメタン発生抑止対策は今後の大きなターゲット。N₂Oについても窒素も含めた研究は複雑となるが重要。

• 森林

- 地下部の測定技術のブレークスルーが必要。
- 老齢木の課題：老齢木は、CO₂の吸収量は飽和し、定常状態が常識とされていたが、老齢木で構成される森林の観測で吸収量が観測されることからその解明が必要。遺伝子の発現を見ることで、老齢木がアクティブかは分かる可能性がある。

- **バウンダリー問題**：農地と自然生態系、河川のバウンダリー問題も含めてモニタリングしていくことが、今後の気候変動対応で重要。国の組織の縦割りの問題があることから、その打破が課題。

【社会実装に必要な技術】

- **海域**：ブルーカーボンを増やす上での優先課題は、三次元的な構造物、例えば洋上風車の活用や、魚と海藻の養殖を統合する、さらに比較的温暖化に強い種苗生産など。
- **農地**：バイオ炭は手取り早く、技術もある。耕作放棄地が増えているので、リグニンをつくるものを植えて、炭素を貯めるために使うことも一方策。大規模社会実装を考えるのなら、例えば限界集落を使って実証実験をやることもあり得る。

【炭素の価値の評価】

- 価格は地域差があってしかるべき。複合的な資金の提供メカニズムがあり、国の助成金に頼るだけではなくて、民間も投資した成果がクレジット、オフセットという形として返ってくる必要がある。
- カーボンの取引価格は需要と供給での大きさは関係が決まるが、コベネフィットの価値で炭素価格を上げることは可能。価格が上がれば、還元されてプロジェクトの質も上がる。そのためには定量的な評価として生物多様性や、ほかの生態系サービスを測ることも重要。
- 一方、国際的に統一すべき部分として、測定方法、価格の根拠などは研究成果をベースとして、ルールメイキングをすべき。

【推進のための仕組み】

- **共通**：日本でのバイオマスによるCO₂吸収量の目標値を定めることが重要（京都議定書時は目標値設定）
- **森林**：長期モニタリングの仕組みとして、国のサポートが重要（欧米では進んでいる）。モニタリングとしてはフラックス計測と土壌サンプリングが必要。
- **農地**：圃場試験は重要であるが、研究者のモチベーションにはなにくいのでインセンティブが必要。
- **農地**：地方大学がリーダーとなり、地方の農業試験場や普及センターと連携し、さらには農協を巻き込むことが良い。

【社会的課題】：コンフリクトとコベネフィット

- ➡ 海洋の場合、漁業者とのコンフリクションは大きい。漁業でコベネフィットを下げないかをケアすることが現実的な社会実装では大きい。漁場としての価値を上げていくための藻場の造成とブルーカーボンはコベネフィットがある。
- ➡ 一方で大規模に海藻養殖すると、植物プランクトンの生産が減って魚が減るのではと言われており、日本でも起こり得ることがネガティブな部分である。
- ➡ ブルーカーボン（マングローブ、藻場など）の保全・再生は負の影響はなく基本的に経済にも環境にも社会にも相乗効果がある。海藻の養殖に関しては、環境の影響は分からないが、それ以外は基本的には社会にも経済的な評価がされている。生物多様性のクレジットに足るような科学的な知見を日本からも生み出していくことも重要。
- ➡ 生物多様性の評価：気候変動対応と生物多様性の問題は両軸で同時に行っていくべき。

付録1 プログラム

第1回および第2回のプログラムは以下のとおりである。

●第1回：〈陸域〉 2022年11月18日（金）13：30～18：00

時間	内容
〈20分〉13：30～13：50	挨拶（佐藤）、趣旨説明（徳永）
〈160分〉13：50～16：30 （20分発表＋10分質疑）×5人 ＝150分 （※途中10分休憩）	第一部 有識者によるプレゼンテーション 1. 伊藤 昭彦（国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域 物質循環モデリング・解析研究室・室長）「陸域生態系モデルによるネガティブエミッション研究について」 2. 市井 和仁（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・教授）「地上観測・衛星観測・モデリングを統合した陸域における温室効果ガス吸収・排出量の把握」 3. 光田 展隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門・副研究部門長）「陸域でのバイオマス吸収量を増やすための技術的課題検討」 4. 和穎 朗太（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・上級研究員）「土壌炭素（土壌有機物）の役割、存在形態、貯留ポテンシャル」 5. 加藤 拓（東京農業大学 応用生物科学部 農芸化学科・准教授）「農業におけるこれまでの土壌への有機物施用技術とこれからの土壌炭素貯留技術」
〈10分〉16：30～16：40	休憩
〈80分〉16：40～18：00	第二部 全体討論 ・今後求められている科学技術上の課題 ・社会実装に向けた課題
18：00	閉会

●第2回：〈海域〉 2022年11月21日（月）13：30～18：00

時間	内容
〈15分〉13：30～13：50	挨拶（佐藤）、趣旨説明（徳永）
〈130分〉13：50～16：00 （20分発表＋10分質疑）×4人 ＝120分 （※途中10分休憩）	第一部 有識者によるプレゼンテーション 1. 渡辺 謙太（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 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ・主任研究官）「藻場のCO₂隔離過程に関する研究と港湾分野における動向」 2. 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・沿岸生態系暖流域グループ長）「研究課題探索：ブルーカーボン生態系のCO₂吸収源算定と生態特性」 3. 和田 茂樹（筑波大学 下田臨海実験センター 生物海洋学研究室・助教）「ブルーカーボンの将来予測－未来の生態系を用いた試み－」 4. 渡邊 敦（笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部・上席研究員）「ブルーカーボンを推進する上での政策的課題 海外との比較、普及に向けてボトルネックとなっている科学技術的な課題」
〈10分〉16：00～16：10	休憩
〈110分〉16：10～18：00	第二部 全体討論 ・今後求められている科学技術上の課題 ・社会実装に向けた課題
18：00	閉会

付録2 参加者リスト

〈第1回〉（敬称略）

招聘有識者

伊藤 昭彦	国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域・室長
市井 和仁	千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・教授
光田 展隆	国立研究開発法人産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門・副研究部門長
和穎 朗太	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・上級研究員
加藤 拓	東京農業大学 応用生物科学部 農芸化学科・准教授

バイオNETsチームメンバー（主催）

佐藤 順一	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・上席フェロー
徳永 友花	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
池元 英樹	九州大学先端医療オープンイノベーションセンター・学術研究員
上野 伸子	研究開発戦略センター 連携担当 / 環境・エネルギーユニット・フェロー
尾山 宏次	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
河原崎 里子	低炭素社会戦略センター・研究員
菊池 邦生	未来創造研究開発推進部 低炭素研究推進グループ・主幹
菊地 乃依瑠	研究開発戦略センター 科学技術イノベーション政策ユニット・フェロー
中村 亮二	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
西田 勇一	研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ・主任専門員
用貝 広幸	研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー

JST 内部関係者

魚崎 浩平	（国研）物質・材料研究機構・フェロー / （国研）科学技術振興機構・上席フェロー（CRDS）
小泉 聡司	研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー
鈴木 和拓	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
高野 暁巳	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
土山 和夫	未来創造研究開発推進部 低炭素研究推進グループ・主任専門員
長谷川 景子	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
真崎 仁詩	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー

省庁関係者

石川 有希	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課・行政調査員
小野山 吾郎	文部科学省 政策科学推進室・室長
田端 千夏	文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課 戦略研究推進室・行政調査員
田村 嘉章	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課・課長補佐

〈第2回〉（敬称略）

招聘有識者

渡辺 謙太	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・主任研究官
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・沿岸生態系暖流域グループ長
和田 茂樹	筑波大学 下田臨海実験センター 生物海洋学研究室・助教
渡邊 敦	笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部・上席研究員

バイオNETsチームメンバー（主催）

佐藤 順一	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・上席フェロー
徳永 友花	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
上野 伸子	研究開発戦略センター 連携担当 / 環境・エネルギーユニット・フェロー
尾山 宏次	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
河原崎 里子	低炭素社会戦略センター・研究員
菊池 邦生	未来創造研究開発推進部 低炭素研究推進グループ・主幹
菊地 乃依瑠	研究開発戦略センター 科学技術イノベーション政策ユニット・フェロー
桑原 明日香	研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー
中村 亮二	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
西田 勇一	研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ・主任専門員
用貝 広幸	研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー
吉田 修一郎	東京大学大学院農学生命科学研究科・教授

JST 内部関係者

安藤 裕輔	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ・副調査役
魚崎 浩平	(国研)物質・材料研究機構・フェロー/(国研)科学技術振興機構・上席フェロー(CRDS)
佐々木 崇史	戦略研究推進部 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ・主査
鈴木 和拓	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
鈴木 恵子	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ・主査
高野 暁巳	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
長谷川 景子	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
真崎 仁詩	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー

省庁関係者

尾崎 翔美	文部科学省 研究開発局 海洋地球課・係員
小野山 吾郎	文部科学省 政策科学推進室・室長
高橋 可江	文部科学省 研究開発局 海洋地球課・行政調査員
田端 千夏	文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課 戦略研究推進室・行政調査員
田村 嘉章	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課・課長補佐

統括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	(研究開発戦略センター (CRDS) 環境・エネルギーユニット)
リーダー	徳永 友花	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット)
メンバー	上野 伸子	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット/連携担当)
	尾山 宏次	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット)
	河原崎 里子	研究員	(低炭素社会戦略センター (LCS))
	菊池 邦生	主幹	(未来創造研究開発推進部)
	菊地 乃依瑠	フェロー	(CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット)
	桑原 明日香	フェロー	(CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
	関根 泰	フェロー/教授	(CRDS 環境・エネルギーユニット/早稲田大学)
	中村 亮二	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット)
	西田 勇一	主任専門員	(研究プロジェクト推進部)
	用貝 広幸	フェロー	(CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
	吉田 修一郎	特任フェロー/教授	(CRDS 環境・エネルギーユニット/東京大学)
	吉田 有希	主査	(CRDS* 企画運営室/人社基盤グループ)
	池元 英樹**	学術研究員	(九州大学)

*2022年9月まで

**PM 研修生として

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2022-WR-09

バイオマス・ネガティブエミッション技術の 実用化加速基盤研究 (第1回) および (第2回)

令和 5 年 3 月 March 2023

ISBN 978-4-88890-829-0

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



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>