

[寄稿]

ブルーカーボン生態系修復による温暖化対策の現状と今後の展開

酒井 裕司 (工学院大学 先進工学部
環境化学科 准教授)



1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた具体的な取り組みは世界中で加速化しており、各国で、様々な技術やそれらの導入方法、さらに導入に伴う政策や制度などの検討が進められている。

2015年の国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) 第21回締結国会議 (COP21) での「パリ協定」採択後、各国において、大気中の二酸化炭素 (CO₂) を除去・隔離し排出量をマイナスにする技術 (ネガティブエミッション技術 (NETs)) の導入と開発も急速に進行している。NETsには以下の技術が挙げられる⁽¹⁾。

- 植林／再植林
- 土壌炭素貯留
- バイオ炭
- BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
- DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)
- 風化促進や鉱物化
- 海洋肥沃化など

海洋利用による NETs として、海洋肥沃化の他にも、海洋アルカリ度の向上、沿岸生態系のブルーカーボン管理、その他 (大型海藻養殖を含む) のアプローチが提案されている。なかでも、植林／再植林、森林管理、農地への土壌炭素貯留、沿岸生態系のブルーカーボンなどを活用した土地利用に基づく技術は、自然の生態系を利用した技術で、BECCS、DACCS、鉱物化といった他の技術よりも低コ

ストで広範囲に実施できるということで注目されている⁽²⁾。ここで、「ブルーカーボン」とは、藻場・浅場など沿岸の海洋生態系に取り込まれた炭素のことで、そのような生態系を「ブルーカーボン生態系」と呼ぶ。これらの生態系を活用した技術は、陸域および沿岸域などの自然生態系における炭素吸収量、隔離量および貯蔵量を保持・増加させることに寄与している。

ブルーカーボン生態系を含む自然生態系を基盤とした対応策は、国連自然保護連合 (IUCN) により、「自然を基盤とした解決策」 (NbS) として、「社会課題に効果的かつ順応的に対処し、人間の幸福及び生物多様性による恩恵を同時にもたらし、自然のあるいは改変された生態系の保護、持続可能な管理、回復のための行動」のように定義されている⁽³⁾。すなわち、NbSは、環境、社会、経済における利点を提供しつつ、生物多様性と人間の生活への好循環をもたらしものということもできる。NbSには、生態系修復 (回復) に関するアプローチをはじめ、気候変動への適応と緩和に関する生態系を基盤としたアプローチや、防災・減災、さらに沿岸や水資源の管理などに関するアプローチなどがある。

NbSは、緩和と適応の両面での気候変動対策であるだけでなく、生物多様性の保全にも寄与するなど、地域に適合した導入や活用により複数の課題を同時に解決できる可能性を有しているため期待されている。

なかでも、高い炭素貯留ポテンシャルを有

するブルーカーボン生態系は、①気候変動対策への貢献、②災害・防災などへの寄与、さらに、③環境、社会、経済における生物多様性と人間生活と自然との共生への重要な貢献といった点で注目されているが、年々生育面積が減少しているという現状から、保全かつ修復の重要性が認められている。

このような背景のもと、本稿では、NbSのなかでもブルーカーボン生態系に着目し、これらの炭素貯留に関する機能や生態系利用による炭素隔離技術の実証例、そして、今後の展開や可能性について概説する。

2. ブルーカーボン生態系と炭素貯留

(1) 分布と炭素貯留能力

2009年に国連環境計画(UNEP)から「ブルーカーボン報告書」⁽⁴⁾が出版されたことで、ブルーカーボン生態系がそれまで以上に注目され始めた。図1にブルーカーボン生態系の分布とマングローブ林、塩性湿地、海草藻場の画像を示す。

地球上の炭素循環に重要な役割を担う海洋のうち、大型の植物が繁茂するブルーカーボン生態系(約4900万ha)は、海洋面積のわずか0.5%以下の生育面積にもかかわらず、年間の炭素貯留量は、海洋の堆積物中で年間に貯留さ

れる全炭素量の50%~71%にも達すると報告されている。また、ブルーカーボン生態系に存在する植物の総現存量は、陸上植物の僅か0.05%に過ぎないが、年間の炭素貯蔵量は地球上のすべての陸上植物が貯蔵する炭素量に匹敵するとも報告されている。そのため、ブルーカーボン生態系は、非常に効果的な炭素吸収源(ブルーカーボン・シンク)と位置付けられており、その炭素吸収速度は、熱帯林と同程度もしくはそれ以上である。また、海藻類では、大型海藻がブルーカーボン・シンクの主な対象になると考えられ、日本国内でも導入の期待度が高く、大量培養が目指されている。

(2) 消失が続くブルーカーボン生態系

このように、温暖化対策としても重要なブルーカーボン生態系であるが、表1に示すように、消失し続けている。

ブルーカーボン生態系の特徴と状況を以下に述べる。

① マングローブ林

マングローブ林は、最も炭素貯留量の豊富な熱帯・亜熱帯林である。マングローブ林および塩性湿地は、年間約6~8MgCO₂e/haの炭素を貯留すると推算される。これは、天然の熱帯林の約2~4倍の量に相当し、陸上森林よりも

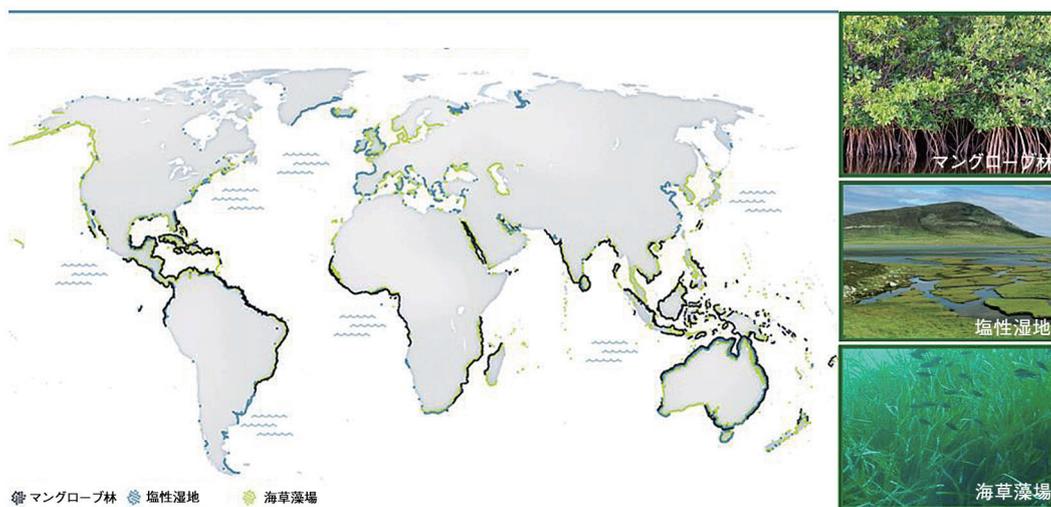


図1 ブルーカーボン生態系の分布と画像⁽⁴⁾⁽⁵⁾

表1 ブルーカーボン生態系の面積と消失率⁽⁶⁾

ブルーカーボン生態系	面積 [km ²]	消失率(現状) [%/年]
マングローブ林	138,000	0.11
塩性湿地・干潟	55,000	1-2
海草藻場	325,000	2-7
海藻藻場	3,540,000	不明

高い炭素貯留ポテンシャルがある。例えば、2000年～2012年のマングローブ林の面積と炭素貯留量の変化を全球的に評価した研究では、2012年でのマングローブ林による全球レベルでの炭素貯留量は、4.19 Pgと推算され、インドネシア、ブラジル、マレーシア、パプアニューギニアの国々で約半分を占めている⁽⁷⁾。

しかし、マングローブ林の破壊傾向は、1900年代初期よりも減少したものの、今なお、年0.11%の率で消失している。地域では、東南アジアで最も多く消失しているが、ラテンアメリカやアフリカでも消失している。全球的には、42%のマングローブ林は、保護地域に存在している。例えば、Global Mangrove Watchプロジェクトは、マングローブ林のさらなる損失を食い止めるための目標を発表し、2030年までに40万haを回復すると報告している⁽⁸⁾。このような目標を多く実現させるためにも、地方自治体や地域社会との連携を強化し、政策的にも連携することが、将来のマングローブ林の保全と修復を強化する上で重要なステップとなると考えられる。

② 塩性湿地

塩性湿地は、海岸に存在する湿地・沼地であり、潮汐の影響を受け、満潮時には定期的に塩水が浸水する地帯である。塩性湿地は、鉱物堆積物と有機物の蓄積によって形成され、潮汐の影響を受ける生態系であり、深さ数メートルにもなる土壌中には、塩性湿地生態系におけるほとんどすべての炭素が含有されている。2000年～2019年の間に、全球的には約1453km²が消失した。なかでも、米国やロシ

アが消失量の約64%を占め、16.3 Tg-CO₂の炭素貯留量の損失にあたと推算されている。

③ 海草藻場

海草は水草の一種で、海水中で育成し、大部分の炭素は土壌に貯留される。海草は、多い場合には、面積当たり陸上森林の約2倍程度の炭素を貯留する。海草は熱帯から寒帯まで分布しているが、その多くは熱帯域・亜熱帯域に分布し、スガモやアマモの仲間は温帯域から寒帯域に分布する。地球上の炭素循環にも重要な炭素貯留域でもあり、食料安全をサポートし、かつ、生物多様性、水浄化、海岸線保護、病害軽減などの多くの機能も有する。

全球レベルでは、海草の消失が急速に進行しており、年間6.5億tCO₂の貯留量が消失していると推算されている⁽⁹⁾。ただし、海草の生育面積やそれらの変化については、正確な炭素貯留量の推算に更なる解析が必要である。

(3) ブルーカーボン生態系の保全（維持）と修復（再生）

以上のような各生態の消失の状況からも、ブルーカーボン生態系の保全（維持）と修復（再生）が必要であることは言うまでもない。

海藻養殖の拡大、乱獲の廃止なども含めた、ブルーカーボン生態系での対策と炭素吸収の潜在能力が表2のように試算されている。対象となるブルーカーボン生態系である、マングローブ林、塩性湿地・干潟、海草藻場、海藻藻場については、保全（維持）と修復（再生）の категорияに分けて試算されており、マングローブ林、塩性湿地・干潟、海草藻場では、

表2 ブルーカーボン生態系での対策とCO₂吸収の潜在能力の試算⁽⁹⁾

対策の種類	対象	緩和試算値(2030年)		緩和試算値(2050年)	
		[GtCO ₂ e/年]		[GtCO ₂ e/年]	
保全(維持)	マングローブ林	0.02-0.04		0.02-0.04	
	塩性湿地・干潟	0.04-0.07		0.04-0.07	
	海草藻場	0.19-0.65		0.19-0.65	
	海藻藻場	試算不可		試算不可	
修復(再生)	マングローブ林	0.05-0.08		0.16-0.25	
	塩性湿地・干潟	0.004-0.01		0.01-0.03	
	海草藻場	0.01-0.02		0.03-0.05	
	海藻藻場	試算不可		試算不可	
海藻養殖の拡大		0.01-0.02		0.05-0.29	
乱獲の廃止		試算不可		試算不可	
Total		0.32-0.89		0.50-1.38	

表3 ブルーカーボン生態系における炭素貯留量・貯留速度⁽¹⁰⁾

生態系	面積	炭素貯留量	炭素貯留速度	炭素貯留量(年間)
	[km ²]	[MgC/ha]	[gC/m ² /年]	[TgC/年]
マングローブ林	138,000	864	163	23
塩性湿地	51,000	162	151	7.7
海草藻場	177,000	140	101	18

保全(維持)の値は、2030年と2050年とで変化はない。修復(再生)の炭素貯留量は、2050年で増加している。2050年ではマングローブ林が最も高い増加幅を示しており、修復(再生)の炭素吸収能力は、塩性湿地・干潟、海草藻場よりも高いと言える。また、海藻藻場に関しては、表1で消失率が不明であると示した通り、現状では、緩和試算値が算出されていない。さらに、海藻養殖の拡大による効果が期待されており、2030年から2050年への増加が確認できる。

表3の通り⁽¹⁰⁾、マングローブ林の炭素貯留量は、塩性湿地、海草藻場よりも多い。塩性湿地の約5.3倍、海草藻場の約6.2倍で、年間の炭素貯留量も最も高い数値となっている。

以上のことから、ブルーカーボン生態系が地球上での炭素貯留に関係する重要な生態系であり、温暖化対策としても保全や修復が必要で

あることが分かる。なかでも、炭素貯留能力の高いマングローブ林、海草と海藻藻場などでの修復(再生)の取り組みと今後の展開について以下で概説する。

3. マングローブ生態系と植林/再植林によるブルーカーボン貯留

マングローブは、熱帯・亜熱帯地域の汽水域に生息している植物の総称である。その生育環境は、塩分濃度、潮汐、温度、降水量や土壌環境などの影響を受ける。また、マングローブは、耐塩性植物、好塩性植物で、様々な根の形態(通木根、支柱根、膝根、板根など)を有しているという特徴もある。このようなマングローブの多くは、一般的に、樹上で幼植物体にまで成長する胎生種子を生育し、それが成熟して落下し、着床した場所で発根し

て成長する。また、塩分濃度により、生育に適した樹種が変わるという特徴もある。

マングローブは、主に北緯 32 度から南緯 38 度の熱帯・亜熱帯地域、112 カ国に存在し、世界の海岸線の約 12% を占めている⁽¹¹⁾。表 3 で示したように、その面積は約 13 万 8,000 km² で、東南アジアが 33.5% を占める。なかでもインドネシアが世界全体の 20.9%、東南アジアの 60% 以上を占めて世界最大である。次いで、南米、中央・北アメリカと続き、ブラジルが 8.5%、オーストラリアが 6.5% を占める⁽¹²⁾。

全球でのマングローブの平均総炭素貯留量は、692.8 ± 23.1 MgC/ha と報告されている。

そのうち、深さ 1m の土壤中の平均炭素貯留量は、516.4 ± 19.8 MgC/ha と全体の約 74% を占め⁽¹³⁾、それはバイオマス中の炭素貯留量の約 2.9 倍である。また、マングローブは、根を有するため、他の陸域系の樹種と比較して、地下部バイオマスによる炭素貯留量が高いのも特徴である。さらに、各国での研究事例から、土壤中炭素貯留量には地域差があることも確認されつつあるが、一般的な森林生態系よりも炭素貯留量が多いことから、表 4 に示すように、土壤中と地上部および地下部バイオマスを含めたマングローブ林が注目されている。

表 4 マングローブ林でのバイオマス（地上部・地下部）、土壌中および総炭素貯留量⁽¹³⁾

地域	炭素貯留量 (地上部バイオマス) [MgC/ha]	炭素貯留量 (地下部バイオマス) [MgC/ha]	炭素貯留量 (土壌) [MgC/ha]	総炭素貯留量 [MgC/ha]
アフリカ	89.5	88.0	402.4	638.8
東南アジア	115.7	44.9	656.1	806.4
南, 東アジア	94.2	35.9	445.4	482.8
中央・北アメリカ及び カリブ海周辺	92.5	41.4	577.4	730.1
南アメリカ	104.3	85.2	236.9	419.4
中東	30.6	41.2	150.9	224.9
オーストラリア及び ニュージーランド	55.1	79.7	465.3	563.4
太平洋諸島	213.7	172.9	599.7	987.4

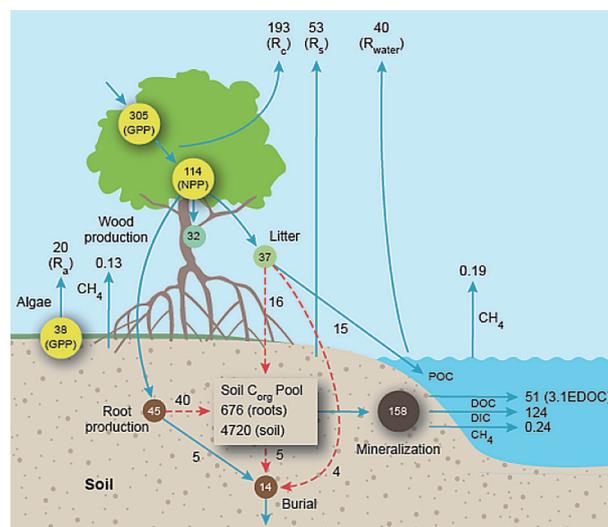


図 2 マングローブ生態系における炭素フローのマスバランスモデル⁽¹⁴⁾

マングローブ生態系における炭素循環について図2に示す。林冠部および林床部の植生が、光合成によって大気から吸収した炭素は、マングローブ林全体の「総一次生産量」(GPP)と呼ばれる。GPPから植物体(葉,地上部,根)の呼吸(独立栄養呼吸)によって放出された炭素を差し引いた値が生態系の「純一次生産」(NPP)となる。図2には、土壌炭素についての無機化から、溶存有機炭素(DOC),溶存無機炭素(DIC),粒状有機物質(POC),交換性溶存有機炭素(EDOC),そして、メタン(CH₄)も含めた炭素フローが年間ベースの数値(TgC/year)で示されている。このような図からもマングローブ生態系での炭素貯留を定量的に理解することができる。

以上のように、マングローブ植林/再植林による炭素貯留量の増加が注目され、これまで多くの研究例がある⁽⁷⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。最近の報告⁽¹⁶⁾では、これまで世界中で実施されてきた370以上の植林および再植林試験のデータから、植林よりも再植林の方が単位面積当たりの炭素貯留量が高いこと、より炭素蓄積の高い場所における潮間帯における位置、より高い窒素利用量、低塩分濃度などの条件が炭素貯留量の増加に関係していることが示された。世界中のマングローブ伐採地での再植林では、40年間で約680 TgCO₂-eqの吸収を促進することができた。干潟での同面積の新規植林よりも60%高いこともあり、温暖化対策におけるNbSとして有用な手法であることが示されている。

また、筆者らが実施したタイ南東部エビ養殖放棄池(ASP)での再植林では、図3に示すように、18年間で生態系炭素貯留量が約180 MgC/ha増加したという結果が得られた。これは、エビ養殖放棄池で再植林をしなかった土壌堆積のみの地域(NPA)での炭素貯留量の約2.6倍であった⁽¹⁷⁾。また、タイ南東部では、安定同位体窒素および炭素の分析結果から一次生産者から最終消費者までのフードチェーンを推定することで、破壊された生

態系の修復段階の進行も確認できるようになった⁽¹⁸⁾。このように、再植林による生態系炭素貯留量の増加効果と生態系修復効果を科学的に実証でき、さらに修復地域での漁業などに与える経済効果、修復活動を通じた環境教育の効果など、マングローブがもたらす様々な効果を確認することができた。

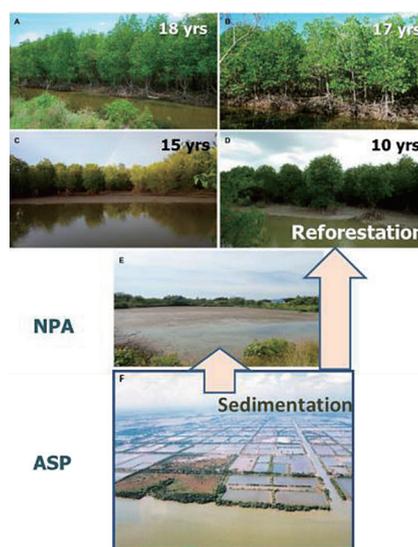


図3 タイ南東部エビ養殖放棄地でのマングローブ再植林の生育状況⁽¹⁹⁾

このように、各地域における生態系環境の修復効果を、環境面、経済面、社会面などの多方面から研究調査し科学的に報告された実証例は、ブルーカーボン生態系を保全・修復していく上で重要なデータとして解析され、今後の新たなカーボンクレジットの概念や試算などにとっての貴重なデータとなる。

4. 海藻(海草)生育,藻場造成による炭素貯留

海草および海藻も、マングローブ林、塩性湿地と同様、炭素貯留にも貢献する生態系である。海草藻場における炭素貯留量は、前出の表3に示すように、マングローブ林の約6分の1と少ないが、年間では塩性湿地よりも多いなど、ブルーカーボン生態系として注目されている⁽²⁰⁾。現時点で海藻は、「ブルーカーボン・シンク」という扱いではないが、なかでも、大

型海藻による炭素吸収能は非常に大きいと期待されており、特に、日本では導入の促進が図られている。

海洋植物は、海水中を浮遊する植物プランクトンの種と、海底に定着して生活する大型底生植物の種の2つに大別でき、さらに後者を海藻類と海草類に分けることができる。

海藻類は、底生植物であり、海底に固着して底生生活を営む。一般に、海藻類は、数mm～10m以上になる藻体を海底に固定させ、波浪などで流出しないよう岩盤などの硬質で安定的な基質を選択して生育する。特に、コンブ、アラメ・カジメ、そしてホンダワラの仲間（ガ

ラモ）が、炭素の隔離速度が大きい大型海藻である。つまり、生育に伴う堆積物を持たないために炭素貯留機能は無いが、成長速度が速いことが隔離機能を高くしている。さらに最近では、図4に示すように、海藻内に隔離した炭素が輸送され、堆積作用を持つ沿岸浅海域の他の生態系や深海へ到達することで炭素貯留に貢献すると報告されている⁽²¹⁾。さらに、図5に示すように、天然大型海藻における炭素フローと隔離の経路における概念図内に定量的なデータもあり、隔離に関する炭素量についても定量的に概算できるようになってきている。図5で長期間の炭素貯留を示している経路が新たに

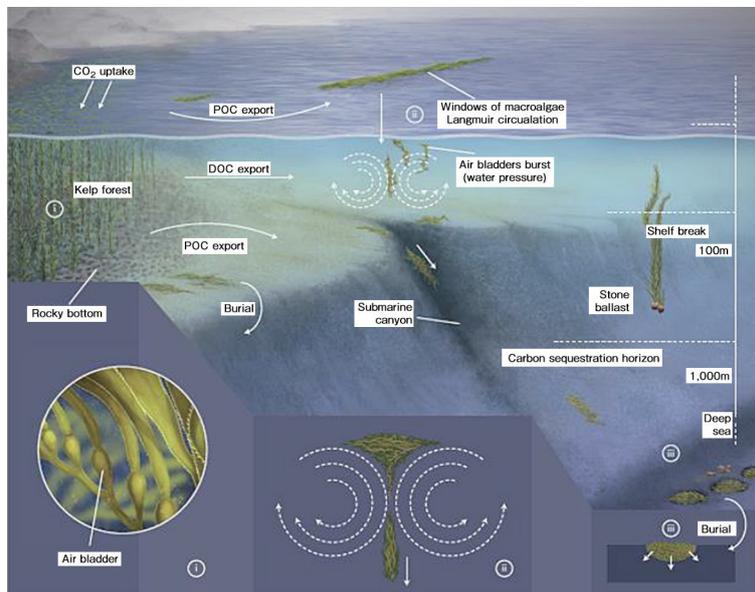


図4 大型海藻による炭素輸送および隔離フローの概念図⁽²¹⁾

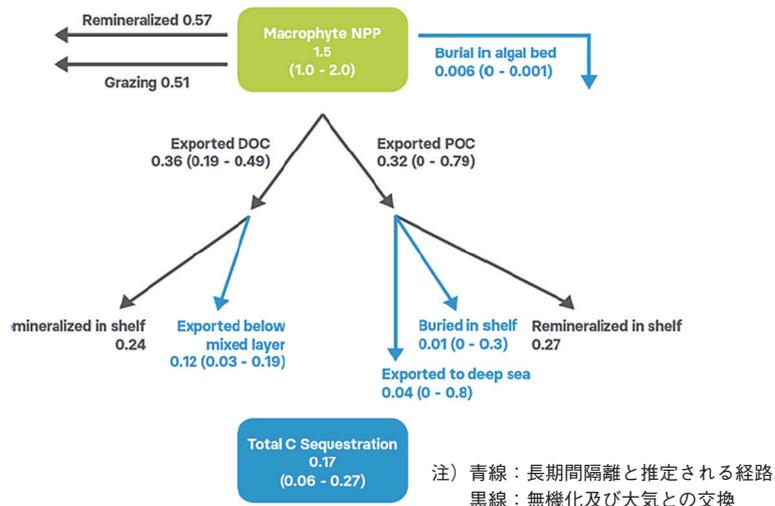


図5 天然大型海藻における炭素フローおよび隔離経路の概念図 (単位：PgC/yr)⁽²²⁾

着目されており、研究が進められている。

また、海草類は、底生生物であるが、分類学上、海藻類とは異なり、被子植物の仲間、海中で花を咲かせて種子をつくる顕花植物である。つまり、根、茎、葉の区別を持ち、砂泥域などの海底に根と地下茎を伸長させて定着するという特徴を持つ。このような生態的な特性が、海草類の炭素隔離・貯留機能の高さにつながっており、海草藻場は一次生産力が地球上でも最も高いブルーカーボン生態系の1つとして報告されている⁽²³⁾。特に、海草類では、海底堆積物から海中に出ている葉の部分の成長速度が速く、さらに、海中に覆い茂るような葉が、海水の流速を減衰させ水中浮遊する有機物の堆積を促進することでも炭素貯留機能を高めている。そして、地下茎が海底堆積物内に繁殖しているため、底質の流出を防ぐだけでなく、安定した底質が堆積した有機物の再懸濁を抑制して炭素貯留能を高めている⁽²⁴⁾。さらに、地下茎や根の成長により、海底内土壌に有機物を蓄積することも炭素貯留能の向上に貢献している。なかでも、北半球の温帯域から亜寒帯域に分布するアマモは、生育分布が広い海洋植物で、草本であるが、生育期間が平均約60年と長く⁽²⁵⁾、生育に適した環境下においては、株が千年以上の寿命を持つという特性があり⁽²⁶⁾、長期間の炭素貯留を可能にするとして注目されている。

そして、日本国内での海草・海藻の生産による年間での炭素隔離量の算出結果⁽²¹⁾から、表5に示すように、沿岸浅海域で隔離される有機炭素量は、約470万トンCO₂/年と推算され、

海藻による炭素貯留への貢献が大きいことも分かってきた。ただし、前出の表1、表2のような海藻藻場でのデータがないことにも関係するが、コンブ場をはじめ他の海藻種などでの実証に伴う基礎的知見が少ないことや、前出の図4、図5で示したような未解明の隔離炭素量におけるデータの精度などからも、今後も海藻生育域での精確な観測と測定が必要である。この点に関して、後述のように、最近、国内でも試算に関するハンドブックが発刊された。

また、前述のように、海藻生育地域だけでなく、他のブルーカーボン生態系での海底堆積物、生態系内外の水中における難分解性溶存有機物、生態系外（陸棚、深海）での堆積物中における炭素貯留量の試算や貯留期間などの詳細な分析や解析が行われることで、よりブルーカーボン生態系における炭素貯留と隔離量の高さが示され、展開が進んでいくと考えられる。

海草・海藻藻場における炭素貯留量として算定できるプロセスには、次の4つが挙げられる⁽²⁷⁾。

- 堆積貯留：枯れた海草・海藻が藻場内の海底に堆積して長期間貯留されるプロセス
- 難分解貯留：枯れた海草・海藻、その細分化された破片が流出して長期間CO₂に変換しない難分解性の細片（粒子状）で、藻場外の沿岸域に堆積して長期間貯留されるプロセス
- 深海貯留：波浪などで破碎された海草・海藻が流れ藻となり沖合に流出して、浮力を無くし深海へ沈降し長期間貯留されるプロセス
- 難分解性溶存態有機炭素（Refractory Dissolved Organic Carbon: RDOC）貯留：海草・海藻が放出する難分解性の溶存態有機炭素が長期間にわたり海水中に貯留されるプロセス

表5 日本国内における藻場での海草・海藻の生産によるCO₂隔離量⁽²⁰⁾

海草・海藻種	海草・海藻生産量 [kg 乾重/m ² /年]	炭素含量 [%乾重]	CO ₂ 隔離量 [トンCO ₂ /ha/年]	面積 [ha]	総CO ₂ 隔離量 [トンCO ₂ /年]
アマモ場	1.0±0.7	35.0	12.6±8.9	61,667	508,459
コンブ場	6.2±6.8	30.0	60.5±71.8	20,356	1,159,836
アラメ場	2.1±0.4	32.5	24.6±4.7	63,120	1,631,851
ガラモ場	1.4±0.2	32.0	16.0±2.6	88,041	1,413,685
計					4,713,831

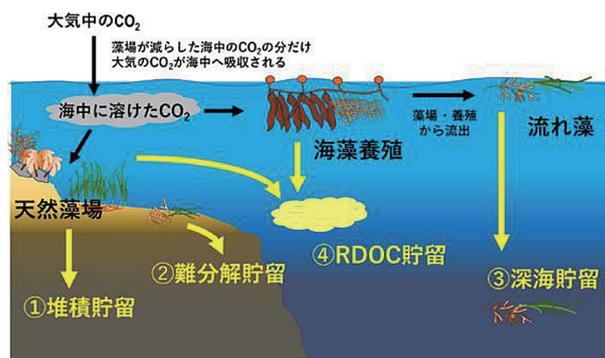


図6 ブルーカーボン生態系での大気中 CO₂ に由来する有機炭素の流れと貯留プロセス (27)

それぞれのプロセスへの炭素フローおよび貯留期間などの解明が今後も研究され、図6に示すような海草・海藻藻場における炭素フローの定量化が行われるような知見が蓄積されていくことになる。

5. ブルーカーボン生態系を利用した実践例と今後の展開

2006年のIPCCによる温室効果ガス収支に関するインベントリ作成のガイドラインが2013年に改訂された。それまで着目されてこなかった浅海域の植生が、「湿地」の項目の中に「沿岸湿地」として新たに導入されることになった。その後、前述のように、マングローブ林をはじめ、海草および海藻藻場も炭素吸収源として注目されてきていることから、ブルーカーボン生態系の保全（維持）および修復（再生）の実施が今後も注目され続けるであろう。そこで、以下にブルーカーボン生態系を利用した実践例について簡単に紹介する。

欧米を中心に、海洋NETsに関するプロジェクトが進められている。特に、米国、オーストラリアでは、生態系保全の観点からもブルーカーボン分野の研究が積極的に行われ、インベントリへの算入や独自の評価手法開発も着手されている。なかでも、ブルーカーボン管理とは、マングローブ・塩性湿地・沿岸海草の藻場などの生態系の保全（維持）および修復（再生）によるNETsのことであるが、現時点では、

海藻藻場や大型海藻養殖はブルーカーボン管理の対象ではなく、沿岸における海藻類を含む他の炭素隔離の可能性について議論がなされているところである。また、「その他の海洋NETs」のうち、海洋バイオマスのNETsオプションとして大型海藻養殖などが含まれている。大型海藻養殖とは、沿岸、沖合におけるコンブなどの大型海藻の養殖を指す。

以上のように、欧米では、海洋NETsに関して、プロジェクト体制で総合的な研究開発が進められている。一方で、日本では、精確および迅速な観測技術など要素技術の開発が進められているが、欧米のような今後の大規模化のための生産技術や観測技術など多面的な研究開発への更なる取り組みとあわせて海洋NETsが実施される必要があると考えている。日本国内では、自主的なクレジット制度が整備されてきており、Jブルークレジットが取り込まれつつある。しかし、今後のクレジット認証のためには、定量的な炭素吸収能の評価、さらには、賦存量管理を把握するための海洋観測技術の開発が進められる必要がある。そのような観測技術の例を図7に示す。最近、農林水産省が2021年5月に策定した「みどりの食料システム戦略」で、炭素吸収源としての「海洋生態系で貯留される大気中CO₂由来の炭素（ブルーカーボン）」の活用が位置付けられ、2023年度からわが国におけるCO₂など温室効果ガスの排出量と吸収量とをとりまとめたデータ目録（温室効果ガスインベント

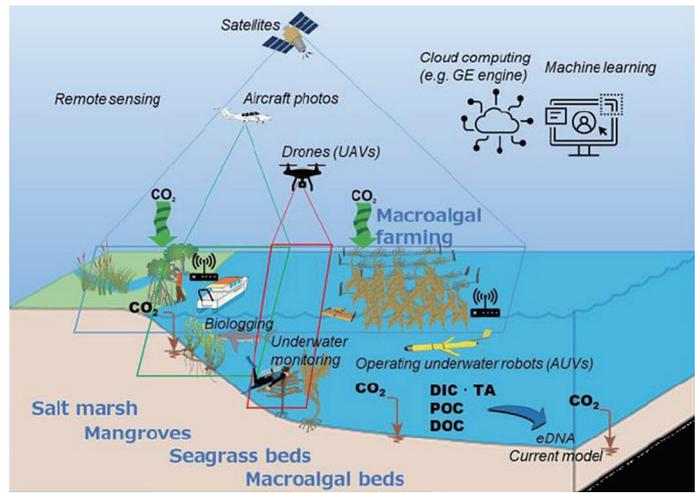


図7 ブルーカーボン算出のための正確なパラメータ化改善のための観察技術およびツール⁽¹⁰⁾

り)への登録が開始され始めている。また、海草・海藻藻場の炭素貯留量の算定に向けたガイドブックも、2023年11月に(国研)水産研究・教育機構から公開され、今後、気候変動対策技術としてのブルーカーボン生態系への理解が深まり、漁業関係者、自治体、企業、NPOなどの関係者による同ガイドブックの活用が進むことが期待できる。

ブルーカーボン管理および大型海藻養殖のような海洋NETsの日本国内での利点としては、排他的経済水域の広く(世界第6位)海岸線も長いこと、土地、水資源の競合がないこと、多くのコベネフィットを有すること、海藻養殖技術を有すること、藻場造成技術を有すること、発展途上国へ展開(技術移転)の可能性を有していることなどが挙げられる。一方で、気候変動等により環境変化(藻場減少)が生じる

こと、産業従事者(関連水産業)/関連研究者が減少すること、藻場造成・大型システム設置にコストがかかること、漁業権および沖合漁場の使用権利に問題があること、評価方法が未確立(炭素吸収能評価、賦存量、環境影響など)であることなどの多くの検討項目に対しても、適宜、措置や対応なども検討していく必要があると思われる。前述のガイドブックの中では、藻場タイプや海域区別の炭素貯留量を算定する具体的方法も示されており、藻場の炭素貯留算定手法も公開されているため、今後の日本国内におけるブルーカーボンのクレジット化に向けて着々と進行していると言える。他の懸念事項などにも配慮しつつ、他国に無い新たなクレジット化のための概念導入なども検討しつつ発展していくものと思われる。

最後に、2050年を視野に入れた海洋ベース

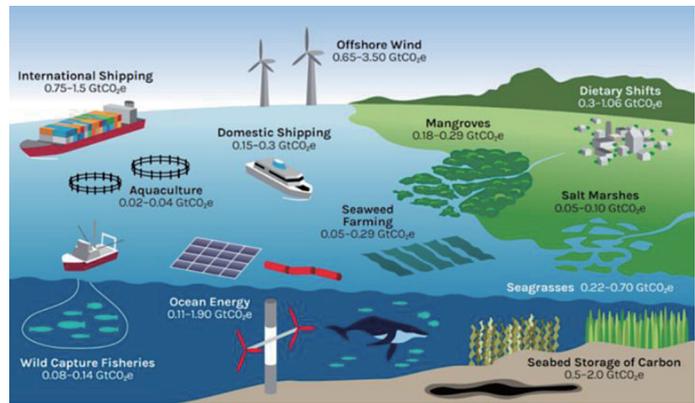


図8 海洋ベースの緩和策および関連する2050年における年間緩和ポテンシャル⁽⁶⁾

の地球温暖化緩和策としては、図8に示すように、今回本稿で取りあげてきた自然生態系利用による対策や養殖以外にも、洋上風力や波力を利用したエネルギー利用なども含め、沿岸域における統合的な環境およびエネルギーシステムなどの導入を挙げることができる。図中に示されている炭素吸収による緩和ポテンシャルからも、各海洋ベースでの技術のポテンシャルを把握することができる。このことから、本稿で述べてきた沿岸域での自然を基盤とした温暖化対策の取り組みだけでなく、海藻養殖の拡大、さらには洋上風力や波力などのエネルギー利用も考慮した沿岸域生態系での新たな地域での共生も含めた展開が重要である。

6. おわりに

カーボンニュートラル実現に向けた具体的な取り組みが、日本のみならず、世界各国で加速している中、沿岸浅海域でのブルーカーボン生態系に着目した海洋における気候変動対策への機運が高まってきている。そのような対策がNbSとして、地球上の生態系修復とともに炭素貯留を目指せることの意義は非常に大きい。今後も持続可能な気候変動対策への1つのアプローチとして、ブルーカーボン生態系修復技術が確立し普及されるであろう。

まずは、対象とするブルーカーボン生態系における生物種の違いや地域差も含めて、炭素貯留に関する知見を確立することが必要である。しかし、各種ブルーカーボン生態系での炭素フローや炭素貯留年数などを明確な数値として決定することや、その後のバイオマスを有効に利用する際の方法論など、今後のクレジット化の実用に向けて検討すべき内容も多く存在する。クレジット化実現のためにも、今後も実践的な導入事例における炭素フローと貯留量を精確に分析・調査して試算することが必要である。

具体的には、ブルーカーボン生態系での海

底堆積物、生態系内外の水中における難分解性溶存有機物、生態系外（陸棚、深海）での堆積物中における炭素貯留量の試算や貯留期間などの詳細な分析や解析が行われることで、より精確なブルーカーボン生態系における炭素貯留と隔離量とそれらのポテンシャルが示され、展開していくと考えられる。マングローブに関しては、ブルーカーボン生態系の中でも生態系炭素貯留評価の実施例や導入事例が多いことから、米国やオーストラリアをはじめ、日本でもカーボンクレジットとしての導入が進んできている。今後も、マングローブだけでなく、海草や海藻藻場などブルーカーボン生態系の生存面積と炭素貯留量を精確に把握するために、上述の炭素隔離量と期間の各生態系での科学的かつ高精度な炭素吸収能を評価すること、さらに、賦存量管理を把握するための各海域での生態系に適合した海洋観測技術やモニタリング技術などの開発も必要になってくる。そして、このようなブルーカーボン生態系を活用した炭素貯留・隔離のNETsは、低濃度の炭素を低コストで固定できる能力やコベネフィットを持つという特徴があるため、環境影響やその後のベネフィットについても科学的な評価が重要となってくるであろう。

そして、日本国内では、まず2030年での目標設定のために、NDCとしての設定、さらに、ブルーカーボン・オフセット制度やクレジット制度へのブルーカーボン生態系の活用を目指す必要がある。そのような課題もあるなか急速に進展しているので、今後の動向に着目していく必要がある。そこでは、算定に活用可能な統計情報の収集のための調査結果の活用や新規データベースの開発も必須になり、今後の継続的なデータ更新も必要になってくるであろう。

また、ブルーカーボン生態系での修復技術方法も含めた炭素貯留に関係する科学的な根拠となるデータの収集および算定方法の確立は重要である。具体的には、沿岸の海藻養殖が貢献する吸収量をわが国のインベントリに登録

することを旨とすることや、ブルーカーボン生態系による炭素貯留量の算定方法の明確化、国内ボランティアクレジット制度の拡大などの取り組みを継続して進めていくことも必要であろう。さらに、炭素除去市場の創出と拡大のために、未だ国際的に確立されていないNETsの重要性や概念について国内外で理解を図りつつ、各々の技術と目的および段階に応じた最適なルール形成を構築する必要もある。

参考文献

- (1) Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. O., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L., Wilcox, J., Dominguez, M. M. Z. (2018), "Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis" *Environmental Research Letters*, Vol.13, 063001
- (2) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM), "Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda", Washington, DC, The National Academies Press (2019)
- (3) International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2020), "Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions: first edition"
- (4) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds.). (2009), "Blue Carbon. A Rapid Response Assessment." United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no
- (5) the BLUE CARBON initiative, <https://www.thebluecarboninitiative.org/>
- (6) Watanabe, A., Kuwae, T., Duarte, C. M., Kohsaka, R., Quevedo, J. M. D., Nagai, H. (2023), "Blue Carbon Roadmap: Carbon Captured by the World's Coastal and Ocean Ecosystems" (ICEF Innovation Roadmap Project)
- (7) Hamilton, S. E., Friess, D. A. (2018), "Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012" *Nature Climate Change*, Vol.8, 240-244
- (8) Leal, Maricé and Spalding, Mark D (editors), 2022 *The State of the World's Mangroves 2022*. Global Mangrove Alliance
- (9) Hoegh-Guldberg, O., et al. 2019. "The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action." Report. Washington, DC: World Resources Institute
- (10) Batzer, D.P., Sharitz, R. R. (eds.) (2014) *Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands*, p.277-309, University of California Press (Chapter 7: Bridgham, S. D.: Carbon Dynamics and Ecosystem Processes)
- (11) Basha, S. K. C. (2018) "An overview on global mangroves distribution" *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol.47, 766-772
- (12) Spalding, M., Blasco, F., Field, C. Eds. (1997) "World mangrove atlas", 178 pp, Smith Settle UK
- (13) Alongi, D.M. (2022), "Impacts of Climate Change on Blue Carbon Stocks and Fluxes in Mangrove Forests" *Forests*, Vol.13, 149
- (14) Alongi, D.M. (2022), "Carbon Cycling in the World's Mangrove Ecosystems Revisited: Significance of Non-Steady State Diagenesis and Subsurface Linkages between the Forest Floor and the Coastal Ocean" *Forests*, Vol.11, 977
- (15) Liu, H., Ren, H., Hui, D., Wang, W., Liao, B., Cao, Q. (2015), "Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China" *Journal of Environmental Management*, Vol.133, 86-93
- (16) Song, S., Ding, Y., Li, W., Meng, Y., Zhou, J., Gou, R., Zhang, C., Ye, S., Saintilan, N., Krauss, K. W., Crooks, S., Lv, S., Lin, G. (2023), "Mangrove reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change" *Nature Communications*, Vol.14, 756
- (17) Sakai, Y., Kouyama, T., Kakinuma, K., Sakaguchi, Y., Yuasa, N., Thongkao, S., Boonming, S., Chantrapromma, K., Kato, S. (2023), "Recovery of mangrove ecosystem carbon stocks through reforestation at abandoned shrimp pond in Southeast Thailand" *Ecosystem Health and Sustainability*, Vol.9, Article 0018
- (18) 加藤茂, 酒井裕司, 小島紀徳, 「マングローブ植林による生物多様な生態系回復と炭素隔離」, *日本海水学会誌*, 第67巻6号, 305-317, 2013 (総説)
- (19) 酒井裕司, 「自然を基盤とした沿岸生態系修復によるブルーカーボン貯留」, *日本福祉大学経済論集*, 第67号, 13-31, 2023年9月
- (20) 堀正和・桑江朝比呂・所立樹・渡辺謙太・吉田吾郎・仲岡雅裕他, 「ブルーカーボン—浅海に

における CO₂ 隔離・貯留とその活用」 地人書館,
2017 年 5 月

- (21) Krause-Jensen, D., Duarte, C. (2016),
“Substantial role of macroalgae in marine carbon
sequestration” *Nature Geoscience*, Vol.9, 737-742
- (22) Fujita, R. M., Collins, J. R., Kleisner, K. M.,
Rader, D. N., Augyte, S., and Brittingham, P.
A., (2022) . Carbon sequestration by seaweed:
background paper for the Bezos Earth Fund -
EDF workshop on seaweed carbon sequestration.
Environmental Defense Fund, New York, NY.
URL
- (23) Duarte, C. M., N. Marbà, E. Gacia, J. W. Four-
qurean, J. Beggins, C. Barrón, and E. T. Apostolaki
(2010), “Seagrass community metabolism: Assess-
ing the carbon sink capacity of seagrass meadows”
Global Biogeochemical Cycles, Vol.24, GB4032
- (24) Hendriks, I. E., Sintès, T., Bouma, T. J., Duarte,
C. M. (2008), “Experimental assessment and
modeling evaluation of the effects of the seagrass
Posidonia oceanica on flow and particle trapping”
Marine Ecology Progress Series, Vol.356, 163-173
- (25) Hemminga, M. A., Duarte, C. M. (2000),
“Seagrass Ecology” Cambridge University Press.
- (26) Reusch, T. B. H, Bostrom, C., Stam, W. T.,
Olsen, J. L. (1999), “An ancient eelgrass clone in
the Baltic” *Marine Ecology Progress Series*, Vol.
183, 301-304
- (27) 水産研究・教育機構, 「海草・海藻藻場の
CO₂ 貯留量算定ガイドブック」, 2023 年 11 月