

気候変動問題に対するブルーカーボン生態系 および関連生態系の環境面での貢献

渡邊 敦

1. はじめに

今年の8月に公表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の自然科学的根拠に関する第6次評価報告書によると、世界の平均気温は1850年～1900年と比べ2011～2020年には1.09℃高くなっており、海上でも0.88℃昇温したと報告されている¹⁾。こうした気候の変化により、我々を取り巻く海洋環境も変化している。海水の極端な高温が一定期間続く海洋熱波の頻度は増え、海面は上昇、海洋酸性化は進行し、強い熱帯低気圧の発生割合が上昇した可能性も高い。

気候および海洋の変化に伴い、沿岸域でも様々な現象が見られている。熱帯、亜熱帯の海では、サンゴが白くなりやがて死ぬ白化現象が世界各地で繰り返し報告されている。海水温上昇によりウニやアイゴ等の藻食動物の食害が増え、また海藻・海草類が枯死することで、藻場の衰退や藻場構成種の変化が見られている。台風やハリケーンの襲来による高潮、高波による沿岸域の被害も国内外で報告され、ニューヨークや大阪、東京など大都市圏の沿岸部での浸水被害は記憶に新しい。

こうした沿岸域で見られる気候変動問題に対し、ブルーカーボン生態系および関連する生態系は、課題解決にどのように貢献し得るのであろうか？ 本稿では、気候変動の原因となる温室効果ガス(GHG)の排出抑制に繋がる「緩和」効果と、気候変動に伴い生じる影響や被害を防止あるいは軽減する「適応」効果に分け、沿岸生態系の環境面での

貢献を紹介する。

2. 緩和面での貢献

温室効果ガスの排出抑制(緩和)に直接貢献する生態系としては、本特集号のテーマであるブルーカーボンを創出する生態系が挙げられる。代表的なものは海草藻場、塩性湿地、マングローブ林で、これらをIPCCでは沿岸湿地(Coastal wetlands)という言葉で総称する。沿岸湿地では、**目に見えない生体内よりもはるかに多量の炭素を、地下部の土壤内に長期間、蓄えることで、二酸化炭素(以下CO₂)の吸収源として機能する。**沿岸湿地の再生や造成は、新たな吸収源を産み出す。一方、港湾やマリーナ等の建設のための掘削や浚渫で沿岸湿地を失うと、吸収源を失うだけでなく、長期間蓄えられた炭素を大気に戻し、気候変動を加速することに繋がる。故に沿岸部の開発をおこなう際には、沿岸湿地を保全する、インフラの一部として計画に含める(ブルーインフラと呼ばれる)、という対策が気候変動緩和の観点から求められる。

新たなブルーカーボンの供給源として期待されるのは、コンブ類、カジメ類、ホンダワラ類などの大型海藻である。海藻は通常、岩礁域やコンクリート構造物に固着して生育し、上述の沿岸湿地のように土壤を持たない。しかし、ある推定によると海藻の純一次生産量のうち10.1%が水深1,000 m以深の深海に隔離されている²⁾とされ、これは長期的な吸収源に繋がり得ることを示唆する。日本での研究から、海藻が難分解性の溶存有機物として炭素を生態系外に輸送していることも明らかにされている³⁾。沿岸湿地とは違い、海藻は生産の場(ソース)と主な隔離、貯留の場(シンク)が異なるため、シンクをソースと結び付け、またソースでの保全がシンクの増加に結び付くことを立証するために、新たな科学的手法やブルーカーボンとしての算定ガイドラインを作る必要がある。一方で、日本では海藻類の藻場が、沿岸湿地を全て合わせたよりも大きな面積を有しており、ブルーカーボンとしても高いポテンシャルを持つと推定されており⁴⁾、これは世界全体でも同様の推定がなさ



Environmental Contributions of Blue Carbon Ecosystems and Related Ecosystems to Climate Change Issues

Atsushi WATANABE

2004年 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻 博士(理学)

現在 笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部 主任研究員

連絡先: 〒105-8524 東京都港区虎ノ門1-15-16 笹川平和財団ビル6F

E-mail a-watanabe@spf.or.jp

2021年9月13日受理

表1 ブルーカーボン生態系の面積

	日本 ⁴⁾	豪州 ⁵⁾	インドネシア	世界 ⁶⁾
海草藻場	620	93,000～128,000	30,000 ⁷⁾	350,000
塩性湿地	470	14,000～15,000	不明	380,000
マングローブ林	30	3,000～11,000	42,550 ⁸⁾	81,849
海藻藻場	1,720	35,000～71,000	不明	3,400,000 ²⁾
海岸線延長 ⁹⁾ (km)	35,307	25,760	54,716	1,593,137
沿岸域の面積 ^{注1)}	160,470 ¹⁰⁾	1,976,110 ¹¹⁾	2,039,381 ¹²⁾	27,000,000 ¹³⁾

面積の単位は全てkm²。

生態系の面積は推定手法や推定年が異なるため単純な比較はできないが、半定量的な比較には資すると考える。

れている(表1)。なお豪州やインドネシアは日本よりはるかに広大なブルーカーボン生態系を有することが表1から見て取れるが、これは海岸線の長さとは関係していない。むしろ浅海域の面積と関係していると考えるのが妥当である(もちろん気候帯の違いも影響するが)。日本の場合は大陸棚の面積が狭く直ぐに急峻な陸棚斜面を通し深海に至るため、ブルーカーボン生態系が分布可能な面積は限られる反面、生態系外に輸送されたブルーカーボンが深海に運ばれやすいという特徴も有すると考えられる。

なお海藻の場合、天然のものに加え、養殖のものもブルーカーボンの候補になる。沖合での海藻養殖が拡大すると、2050年には海藻養殖によるブルーカーボンがマングローブ林によるものと同程度になるという試算がされている¹⁴⁾。また養殖海藻は、吸収量を増やす以外に、他の分野のGHG排出を抑制することが期待される。1つは海藻を使った製品がCO₂排出量の多い製品の代替になることで、バイオ燃料、バイオプラスチック、飼料、肥料、食品などの分野に可能性がある。また最近の研究で、紅藻の一種であるカギケノリ(*Asparagopsis taxiformis*)を飼料に2%混ぜると、牛などの反芻動物からのメタン排出量を最大99%削減できることが示されている。このように海藻利用は、間接的にも緩和に役立つことが期待されている。

3. 適応面での貢献

本稿では気候変動に伴い生じる影響や被害を、ブルーカーボン生態系が防止あるいは軽減することを、「適応」と考えることとする。その場合、気候変動によりブルーカーボン生態系や沿岸生態系に対し生じる影響や被害を始めに説明しておくことは、理解の一助となるだろう。

代表的な影響は、強い台風やサイクロン、ハリケーンな

ど熱帯低気圧の発生割合や海面水位の上昇による、高潮や高波、海岸侵食であろう。カテゴリ3～5の強い熱帯低気圧が、過去40年で増加していることが示されており、また海面水位も1901年から2018年の間に世界平均で約0.20m上昇したと言われている¹⁾。更に温暖化やその他の要因により海洋生物種のより低温な海域や深い場所への分布の変化が生じ、漁業生産性やその他の生態系サービスの供給に影響を及ぼすと指摘されている。熱帯から亜熱帯の沿岸域では、温暖化や海洋熱波の影響でサンゴの白化が頻発している。サンゴの白化と死滅でサンゴの作る生態系であるサンゴ礁が劣化すると、生物多様性や漁場機能、沿岸の防波堤効果が低減する可能性が高い。

少し脱線するが、サンゴ礁生態系をマングローブ林や熱帯性の海草藻場との関係から考えてみる。サンゴ礁が海面付近まで成長することで、沿岸側に内湾的な静穏なラグーン(礁湖)が形成され、そこに海草藻場やマングローブ林が発達する環境ができる。サンゴ礁環境の劣化はラグーンの静穏な環境の維持を困難にする可能性がある¹⁵⁾。熱帯、亜熱帯ではサンゴ礁環境の維持は間接的にブルーカーボン生態系の維持に関係し、こうした連結性を考慮すると広義にはブルーカーボン生態系の持続可能性に寄与するサンゴ礁は、ブルーカーボン生態系の一部と考えることができる。

上述した気候変動による沿岸域へのリスクに対し、生態系を活用した適応策(Ecosystem-based Adaptation, 以下EbA)はどのように貢献し得るか考えてみる(表2)。マングローブ林は、高潮や高波の減衰効果や海岸侵食の防止効果を持つと言われている。そのEbA上の効果はマングローブの樹高、形状や森林の幅等の物理的特性に依存し、また森林の生長に伴い効果が時間的に大きく変化するという特徴を有する。一方で、コンクリート製の防波堤等の構造物と比較すると、導入コストや維持管理費が格段に低いという面も有する。故に東南アジアや太平洋やインド洋の島しょ国、カリブ海の沿岸国、島しょ国などでは有効かつ現実的な適応策になると考えられる。また健全なマングローブ林はある

注1)沿岸域の面積として、日本以外は地質学的(科学的)な意味での大陸棚(概ね水深130m程度)の面積を引用した。一方、日本については水深100m以浅の沿岸海域の面積を引用した。

表2 沿岸生態系と期待される適応効果や課題

生態系	期待される効果	特徴	課題
マングローブ林	高潮対策, 海岸侵食対策	導入コストや維持管理費が低い, ある程度の海面上昇に追いついて生長可能, ブルーカーボン	陸域側の開発がマングローブ林の拡大を阻害する, 適応効果の定量化と時間変化
サンゴ礁	高潮対策, 海岸侵食防止	ある程度の海面上昇に追いついて成長可能, 背後の礁湖内に静穏な環境を創出	高水温や酸性化ストレスに弱い, 石灰化により海水中にCO ₂ を出す, ブルーカーボン生態系との相互作用の理解
塩性湿地	高潮対策, 浸水対策	湿地は高い高潮減衰効果を持つ, 大都市の沿岸にも存在する	陸域側の開発が塩性湿地の拡大を阻害する
海藻藻場	波浪エネルギーの減衰, 底質の安定化 (主に低エネルギー環境下)	ある程度の海面上昇に追いついて成長可能	高海水温による生長阻害, 草食性魚類による食害

程度の海面上昇には追いついて、上方および陸側に生長できると予測されているため、長期的な適応効果も期待できる。ただし課題もある。マングローブ林の陸側が既に開発され人工物がある場合、陸側への拡大は阻害されてしまう。また高潮、高波の減衰効果や海岸侵食の防止効果が森林の物理的性状に左右されるため、インフラ（ブルーインフラ）としての機能も時間的に変化する。故に沿岸部を保護するインフラとしてマングローブ林の利用を考える場合、これらの時間変化を定量的に評価する必要がある。

次にサンゴ礁生態系を活用したEbAについて考えてみる。海面付近まで成長したサンゴ礁は天然の防波堤と呼ばれ、海岸侵食を防止する機能を持つ。また台風時の高波から海岸線を守る効果も持つ。実際、サンゴ礁がなければ、高潮の洪水による年間予想被害額が2倍になり、暴風による被害も3倍になると算定されている¹⁶⁾。サンゴ礁は氷期から間氷期の海水準上昇にも追いついて成長したことが分かっており、このことから健全なサンゴ礁は100年に1 m程度の海面上昇に追いついて上方成長できる可能性がある。ただし、近年サンゴが高海水温による大規模白化で死滅することが頻発しており、被害からの回復が追いつかない海域が多い。更にサンゴは石灰化により炭酸カルシウムの骨格を形成し、これが地形を作る素材となるが、海洋酸性化は石灰化を阻害することが分かっている。またサンゴは石灰化する際に、炭酸カルシウムの中にCO₂を固定はするが、石灰化反応は海水中のpHを下げるためCO₂の放出に繋がる（簡略化した化学式ではCa²⁺ + 2HCO₃⁻ = CaCO₃ + H₂O + CO₂と表される）。故に石灰化で放出するCO₂を上回る量のCO₂を光合成で固定しないと緩和には繋がらず、ブルーカーボン生態系としての機能を期待することは難しい。こうした課題はあるものの、インドネシア、フィリピン、マレーシア、メキシコ、キューバ、それに米国といった国はサンゴ礁の適切な管理によって洪水対策費の大きな軽減が期待でき、サンゴ礁の管理を国家の国民経済計算や企業の

保険に考慮する必要性が指摘されている。

塩性湿地を活用したEbAは、2012年のハリケーン・サンディによる高潮に伴う洪水被害で大きな注目を集めた。このハリケーンは、米国北東部のニュージャージー州やニューヨーク州等の沿岸域に甚大な被害をもたらした。ハリケーン・サンディを対象に、塩性湿地がある場合とない場合で洪水被害を比較した研究では、湿地の存在により6億2,500万ドルの直接被害を回避できたと試算している¹⁷⁾。特筆すべきは、ニューヨーク州のように高度に都市化した場所では、残された湿地面積は小さいが、湿地が保護する資産の価値が高いため、絶対的な被害回避価値は高く算出された点だ。このことは、大都市域の沿岸に残された塩性湿地や干潟が、減災の面からも重要であることを示している。

海藻藻場によるEbAとしては、主に波浪の営力が小さい低エネルギー環境下である内湾域（日本だと東京湾や瀬戸内海）などで、波浪エネルギーの減衰や底質の安定化に貢献すると言われている。また海藻藻場は堆積作用が十分期待される場所であれば、海面上昇に追いついていくことで、こうした機能を維持できる可能性がある。一方温帯域のアマモは、海水温の上昇や台風による波浪による攪乱等の物理的要因や、草食性魚類による食害という生物的要因で、分布域の減少が懸念される。

4. おわりに

本稿では、ブルーカーボン生態系および関連する生態系を対象に、気候変動の緩和や適応面での貢献について解説した。気候変動に対する貢献に絞り説明したが、これらの生態系はそれ以外に実に多くのコベネフィット（相乗便益）を人間に対してもたらすことが知られている。水産物を供給する食料供給機能、有機物の分解や微生物の除去による水質浄化機能、観光・レクリエーションの場の供給機能、

祭事や神事をおこなう場としての文化的機能、教育や研究の場としての機能、等である。これらの機能を通じ、沿岸生態系の保全や再生は、気候変動対策以外にも多くの課題解決を実現することができると考えられる。

緩和や適応、その他のコベネフィットが発揮されるためには、保全や再生活動が持続可能な体制、資金源を持って推進される必要がある。ブルーカーボンによる緩和機能に対しては、ブルーカーボンクレジット等の炭素価値を、保全や再生活動の実施者に還流する仕組みが動きを活発化させている。一方、サンゴ礁やマングローブ林が持つ海岸防護機能に対しては、CSR活動によるサンゴやマングローブ再生が主な資金源になっているが、一部ではメキシコで実施されているパラメトリック保険を利用した保全信託ファンドも作られている。これはあるパラメータ（この場合は風速）が指定の領域で閾値を超えた場合に、民間（対象地域のビーチ沿いのホテル等）や慈善団体等から集めた資金を、被害を受けたサンゴ礁の回復活動に迅速に回すものだ。今後、科学的な検証が可能で、かつ柔軟かつ持続可能な運用が可能な資金メカニズムの導入が期待される。

EbAを最大限に発揮するには、様々な資金メカニズムを作ることと並行して、生態系劣化の原因となっているローカルな要因を減らしていくことが最優先されるべきだ。例えばマングローブの保全および再生は、費用便益分析から

コストの3倍の便益をもたらすと試算されているが、再生はこの値が2倍なのに対し、保金は88倍と非常に大きくなっている¹⁸⁾。このことから、沿岸生態系にダメージを与える活動を避ける政策が優先されるべきということが分かる。ブルーカーボン生態系のEbAが最大限に発揮されれば、気候変動の緩和やその他のコベネフィットも発揮される可能性が高く、気候変動に適応した脱炭素社会を目指す中で優先されるべき環境政策課題だと考えられる。

参考文献

- 1) IPCC: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- 2) Krause-Jensen, D. and C. M. Duarte: *Nat. Geosci.*, **9**, 737-742 (2016)
- 3) Watanabe, K. et al.: *Biogeosciences*, **17**, 2425-2440 (2020)
- 4) 桑江朝比呂ら: 土木学会論文集(海岸工学), B2-75, 10-20 (2019)
- 5) Filbee-Dexter, K. and T. Wernberg: *Sci. Rep.*, **10**, 12341 (2020)
- 6) Macreadie, P. I. et al.: *Nat. Comm.*, **10**, 3998 (2019) (ただし海藻藻場については7の文献を参照した)
- 7) Alongi, D. M. et al.: *Wetlands Ecol. Manage.*, **24**, 3-13 (2016)
- 8) Burke, L., E. Selig and M. Spalding: *Reefs At Risk in Southeast Asia*, World Resources Institute, Washington DC, USA (2002)
- 9) 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/kaigandukuri/sugata01.html>
- 10) 松石秀之ら: 大林組技術研究所報, **11**, 100-104 (1975)
- 11) オーストラリア政府: <https://www.environment.gov.au/system/files/resources/b0f1600e-0400-4f9f-8192-7bcf7f127da2/files/benthic-report.pdf>
- 12) Geography of Indonesia: <https://www.confiduss.com/en/jurisdictions/indonesia/geography/>
- 13) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源気候: <https://oilgas-info.jogmec.go.jp/term/1001150/1001177.html>
- 14) Hoegh-Guldberg, O. et al.: *The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action*, World Resources Institute, Washington, DC, USA (2019)
- 15) Watanabe, A. and T. Nakamura: *Carbon dynamics in coral reefs*, pp.273-293, Springer Nature, Singapore (2018)
- 16) Beck, M. W. et al.: *Nature Comm.*, **9**, 2186 (2018)
- 17) Narayan, S. et al.: *Sci. Rep.*, **7**, 9463 (2017)
- 18) Konar, M. and H. Ding: *A Sustainable Ocean Economy for 2050, Approximating Its Benefits and Costs*, World Resources Institute, Washington, DC, USA (2020)