

# 浅海生態系を介した炭素フロー

桑江 朝比呂・堀 正和

## 1. はじめに

浅海域における干潟、藻場、湿地、あるいはマングローブは、水質浄化、食料供給、観光、レクリエーションといった様々な恵み(生態系サービス)を私たちにもたらす。その中でも、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の吸収という新たな恵みが注目されている。

海洋生物によって大気中のCO<sub>2</sub>が取り込まれ、海洋中に貯留された炭素のことを、2009年に国連環境計画(UNEP)は「ブルーカーボン」と名付けた<sup>1)</sup>。陸域や海洋は、地球における炭素の主要な貯蔵庫となっているが、海洋が炭素貯蔵庫として特に重要なのは、海底泥中に貯留されたブルーカーボンが長期間(数千年程度)分解無機化されずに貯留され保存性が極めて高い点である。

海底には年間1.9~2.4億トンの炭素が新たに埋没し貯留されると推定され、浅海域はそのうちの約73~79%(1.4~1.9億トン)を占めるとの報告がある(図1)<sup>1,2)</sup>。したがって、温室効果ガスのうち最も主要なCO<sub>2</sub>を、大気外へ隔離し貯留させる仕組みが、浅海域において有効に機能している。

本稿では、はじめに浅海域にブルーカーボンが貯留されるメカニズムや貯留速度について概説し、ブルーカーボンを取り巻く現象が、炭素の輸送や物質変換といった化学工学に馴染みのあるものであるイメージを持っていただく。次に、他の様々な気候変動緩和技術と比較した場合のブルーカーボンの活用技術の長所短所について述べる。

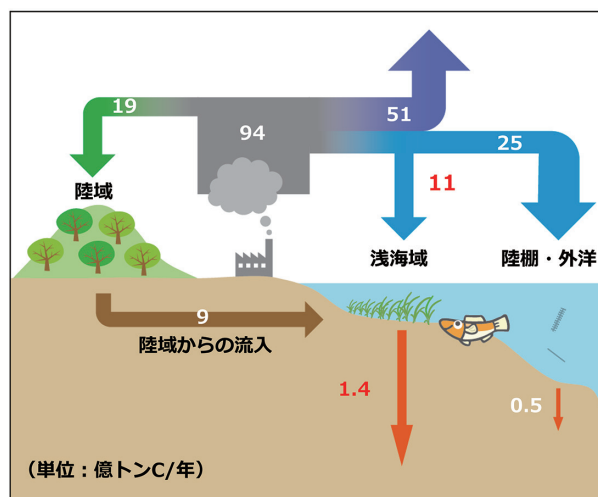


図1 全球の生態系による大気中CO<sub>2</sub>の吸収速度と炭素貯留速度。浅海域の海底堆積物への炭素貯留速度は、陸棚や外洋域よりずっと速い(参考文献2)のFig.13.1を改変)

## 2. 浅海域にブルーカーボンが貯留されるメカニズム

大気-海洋間におけるCO<sub>2</sub>ガス交換過程では、大気中のCO<sub>2</sub>分圧と海中に溶けているCO<sub>2</sub>分圧に差が生じた時、分圧の高い方から低い方へCO<sub>2</sub>が取り込まれる(図2)。したがって、大気中CO<sub>2</sub>の吸収源となるためには、大気中のCO<sub>2</sub>分圧より海中のCO<sub>2</sub>分圧が低くなるのが必須である。

海洋植物が光合成により取り込んだ水中のCO<sub>2</sub>は体内で有機炭素に変換される。さらに藻場内では、藻草体の立体構造によって水流が弱められることにより、水中に漂う有機炭素もトラップされる。例えば、瀬戸内海のアマモ場で



Carbon Flow Through Marine Ecosystems  
Tomohiro KUWAE  
1995年 京都大学大学院農学研究科修士課程修了  
2001年 博士(農学)(京都大学)  
現在 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究グループ グループ長  
連絡先: 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1  
E-mail kuwae@p.mpat.go.jp



Masakazu HORI  
2003年 北海道大学大学院水産科学研究科博士後期課程修了 博士(水産科学)  
現在 (国研)水産研究・教育機構 水産資源研究所 社会・生態系システム部 沿岸生態系暖流域グループ グループ長  
連絡先: 〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4  
E-mail mhori@affrc.go.jp

2021年6月24日受理

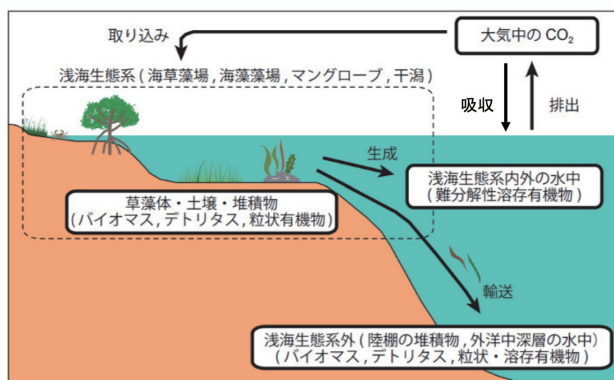


図2 大気中のCO<sub>2</sub>と生態系内に蓄積されている炭素との関係。太枠内は炭素プール（炭素蓄積場所）を示している。IPCCガイドライン等では「炭素プール内で増減した炭素量」＝「大気とのCO<sub>2</sub>交換量」とみなされている（参考文献4）の図1より転載

は、5千年以上の長期間、有機炭素が堆積し貯留され続けていることが報告されている<sup>3)</sup>。

藻場から流出した流れ藻の一部は沖合に流れ、さらにその一部は沈降して深海まで輸送される。深海に到達した有機炭素はたとえ分解無機化されたとしても、再び海表面に達するまでには数千年を要する。そのため、この深海への輸送は長期間炭素を貯留するための重要なメカニズムとみなされている。

あるいは、海草・海藻類の成長過程で体表面から分泌する溶存有機炭素の一部には難分解成分が含まれる。この難分解性溶存有機炭素の正体は、実は未だ明らかではない。

水中の無機炭素（炭酸、重炭酸、CO<sub>2</sub>）からは、貝類の貝殻やサンゴの骨格といった炭酸塩も形成される（石灰化）。この炭酸塩の貯留過程も大気中CO<sub>2</sub>の吸収に寄与すると思われるが、実は、石灰化の化学反応式は「水中の無機炭素 → 炭酸塩 + CO<sub>2</sub>」と表される。したがって、石灰化はCO<sub>2</sub>分圧を上昇させてしまうため大気中CO<sub>2</sub>の吸収に寄与しない。

### 3. 炭素貯留量もCO<sub>2</sub>の正味吸収量とみなす理由

森林生態系や海洋生態系がどのくらいのCO<sub>2</sub>を大気から吸収しているのかを直接計測する手法として、渦相関法やチャンパー法などが知られている。しかしながら、直接計測する手法は、高度な専門技術が必要でありかつ計測器の費用も高いため、現状では研究レベルでの適用にとどまっている<sup>5)</sup>。したがって、実務用に作成されている気候変動に関する政府間パネル（IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change）のガイドラインでは、直接計測の代わりに「生態系内で増減した炭素量」＝「大気とのCO<sub>2</sub>交換量」とみなすことによって、生態系内への炭素増減量を計測するよう定められている。すなわち、生態系内への炭素蓄積量が増加すると、

その分大気中のCO<sub>2</sub>を吸収したとみなす（図2）。

浅海域のうち海草藻場、塩性湿地、マングローブといった砂泥性の浅海生態系は「ブルーカーボン生態系」と呼ばれ、植物体ではなく海底泥がブルーカーボンの主要な貯蔵場所となっている。気候変動の緩和の観点から見ると、長期間で見た場合の海面でのCO<sub>2</sub>ガス交換による大気中CO<sub>2</sub>の正味吸収（吸収した総CO<sub>2</sub>量 > 放出した総CO<sub>2</sub>量）は直接的な過程であり、海中の炭素プールへの貯留による大気へのCO<sub>2</sub>回帰の抑制は間接的な過程である（図2）。この2つは全く別の過程であり、どちらも気候変動の緩和には有効である。どちらがより重要かについては論争があるだろうが、長期的に大気中のCO<sub>2</sub>を正味吸収し、なおかつ、炭素を海中に長期間貯留することの両方ができれば、気候変動の緩和にとってより好ましいのは論を俟たないだろう。

### 4. 浅海生態系におけるCO<sub>2</sub>吸収速度の推計

CO<sub>2</sub>吸収速度の観測や解析は、現在広がりを見せている。国内では海草藻場に加え、海藻藻場、干潟、湿地、サンゴ礁などで観測が進められている<sup>4,5)</sup>。しかしながら、浅海生態系が、実際どのくらいのCO<sub>2</sub>を吸収し、大気中CO<sub>2</sub>の削減に直接寄与しているのかについて、全球規模での推計はされていなかった。

そこで、筆者らの著書において、炭素貯留機能が高いことで知られるブルーカーボン生態系（海草藻場、マングローブ、塩性湿地）だけではなく、大気中CO<sub>2</sub>の吸収源として潜在能力を有する海藻藻場、干潟、サンゴ礁、内湾域も含んだ浅海生態系全体を対象とした国内外の既往研究例や報告値がとりまとめられ、大気中CO<sub>2</sub>の吸収速度が全球推計された<sup>2)</sup>。

その結果、現時点での知見やデータの制約上、ばらつきが大きく不確実性が非常に高いものの、吸収速度は11（-63～80）億トンC/年と推定された（図1）。これまでの最新の情報によると、陸域による大気中CO<sub>2</sub>の吸収速度が19億トンC/年程度、そして海洋全体（といっても陸棚と外洋のみで浅海生態系は含まれていない）による吸収速度は、25億トンC/年程度と見積もられていた。今回、浅海域の吸収速度が11億トンC/年程度と初めて見積もられたことは、これまでの海洋全体の吸収速度が過小評価されていて、逆に陸域の吸収速度が過大評価（他の炭素循環量の残差として間接的に見積もられているため）している可能性を示している。

これまで浅海生態系が果たす気候変動の緩和効果としては、海底への炭素貯留能力だけが注目されていたが、推計された海底への炭素貯留速度の約8倍もの大気中CO<sub>2</sub>の吸収能力がある可能性が今回示された。このことは、現在でも未だ定量化がほとんど進んでいない浅海生態系内外の水

中に「難分解性溶存有機炭素」として貯留される炭素あるいは、浅海生態系外(陸棚や外洋中深層の海底や水中)に生物体(バイオマス)、粒状有機炭素(アトリタス)、あるいは溶存炭素として貯留される炭素の寄与が予想外に大きいことを示唆している(図2)。いずれにせよ浅海生態系が気候変動の緩和に果たす役割は、予想以上に大きいかもしれない。

これまで浅海生態系によるCO<sub>2</sub>吸収量の全国推計例はなかったため、「ブルーカーボン研究会」<sup>6)</sup>における検討結果をもとに全国推計が初めてなされた<sup>4)</sup>。その結果、現状におけるCO<sub>2</sub>吸収量の平均値は132万トンCO<sub>2</sub>/年、上限値は404万トンCO<sub>2</sub>/年と見積もられた(図3)。その内訳を見ると、コンブ類やホンダワラ類といった岩礁性の海藻藻場の寄与が最も大きく、次いでアマモ場などの砂泥性の海藻藻場となっている(図4)。

我が国の現在の最も大きな吸収源は森林であるが、高樹齢化に伴い2030年までには大幅な減少が予想されている。

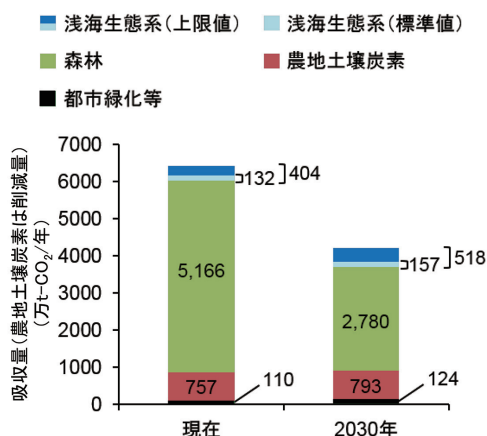


図3 浅海生態系(マングローブ、海草藻場、海藻藻場、干潟)におけるCO<sub>2</sub>吸収量の全国推計値と我が国の他の吸収源の値(温暖化対策計画参照)との比較。現在と2030年における自然生態系を対象とした既往文献から得られた吸収係数の平均値と上限値(不確実性を考慮し、統計的に全データの95%が入る範囲の上限)を示している。2030年の試算は、浅海生態系の保全・再生が進捗した場合の面積増加を仮定している(参考文献4)の図2を改変)

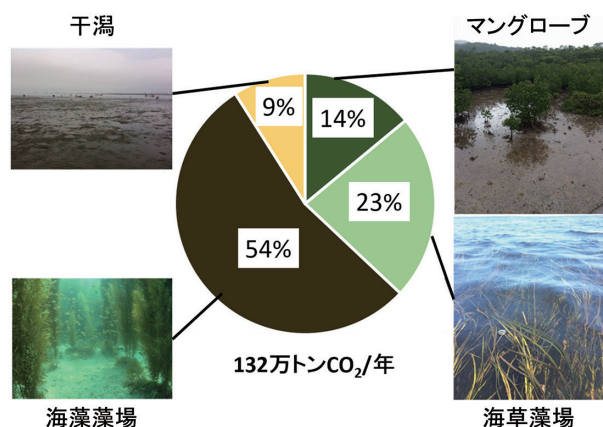


図4 浅海生態系におけるCO<sub>2</sub>吸収量の全国推計値(図2の現在値)の内訳

それに伴い、上述の2030年における浅海生態系の試算を仮に用いると、図3中のすべての吸収源による吸収量に対して平均値で約4%、上限値で約12%と現在よりも大きな寄与が見込まれることになる。

## 5. ネガティブエミッション技術としてのブルーカーボン

海洋や陸域のような吸収源については、大気中のCO<sub>2</sub>を直接除去する技術、すなわちネガティブエミッション技術(Negative Emission Technologies: NETs)としての評価もされ始めている<sup>7,8)</sup>(ICEF, 2018; NASEM, 2019)。NETsには、森林管理や土壌管理、あるいは湿地・沿岸域(ブルーカーボン生態系)再生といった自然ベースの技術、直接大気中のCO<sub>2</sub>を捕捉し貯留する、工業ベースの技術、あるいは、バイオマスエネルギーを利用しその時に排出されるCO<sub>2</sub>を回収し貯留サイトへ輸送し封入するBECCS(Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)といったハイブリッド技術が提案されている(図5)。ここでは、NETsを自然ベースの技術と工業ベースの技術の2つに分けて比較してみる。











第一に、自然ベースの技術は、社会実装への障壁が小さく、持続可能といった長所がある。海洋鉄散布をはじめ、CCS(Carbon Capture and Storage)や藻類バイオ燃料プラントといった工業ベースの技術は、コスト、製造・輸送過程におけるCO<sub>2</sub>排出、環境への悪影響などの諸問題を多かれ少なかれ抱えることになり、社会実装のためには解決すべき障壁が存在する。一方、自然ベースの技術はこの障壁が小さい。

第二に、自然ベースの技術は、気候変動の緩和だけでなく、多くの副産物、言い換えると様々なコベネフィット(食料供給、水質浄化、観光、減災などの生態系サービス)も期待できる。

第三に、自然ベースの技術は、自然プロセスを用いた緩和策のため、工業ベースの技術より不確実性が高く、さらに、効率が低い(例えば、大気からのCO<sub>2</sub>吸収速度が遅い)といった短所がある。

実際、ブルーカーボンに対する評価は、上記の自然ベース技術の特徴を反映したものとなっている。例えば、NETsとしてのブルーカーボンの評価は、長所短所や技術ポテンシャルを総合的に判断して、最良の部類となっている(図5)。

また、全米科学技術医学アカデミー(NASEM)のレポートでは、「ブルーカーボンは他のNETsよりもCO<sub>2</sub>除去ポテンシャルが低い(全球で1.3億トンCO<sub>2</sub>/年程度)ものの、ブルーカーボンへの投資はそもそも他の生態系サービスや気候変動への適応をターゲットとしたものが多いため、NETsとしての追加的なコストは低い(0~20 USD/トンCO<sub>2</sub>)。今後、海面

		 コスト	 エネルギー 必要量	 土地 利用	 水消費量	 排出 リスク	 検証性	 準備度
 NATURAL	森林再生 森林管理	○	○	●	●	●	○	○
	湿地・沿岸域 の再生	○	○	○	○	●	●	○
	土壌炭素 再生	○	○	○	○	●	●	●
 TECHNOLOGICAL	直接空気 捕捉貯留	●	●	○	○	○	○	●
	風化促進	●	●	○	●	○	○	●
	海洋アルカリ化	●	●	○	○	○	●	●
 HYBRID	バイオマスエネ ルギー+CCS	●	○	●	●	○	●	○
	バイオマスエネ ルギー+バイオ炭	●	○	●	●	●	●	○

LEGEND ○ 基本的に適合    ● 注意    ● 基本的に不適合

図5 様々なネガティブエミッション技術(Negative Emission Technologies: NETs)の比較。ブルーカーボンは「湿地・沿岸域の再生」として整理されている(参考文献7)のFig.1-2を改変)

上昇や気候変動、あるいは沿岸域管理が将来のCO<sub>2</sub>吸収速度へ与えるインパクトについて、さらに理解を深める必要がある」と述べられている。海面上昇によってブルーカーボン生態系への炭素貯留速度は速まるとの予測もあるものの、更なる研究の蓄積が待たれる課題である<sup>9)</sup>。

以上をまとめると、ブルーカーボンを活用した技術を導入するにあたっては、社会実装への障壁が少なく、コベネフィットが得られるという長所と、隔離・貯留やCO<sub>2</sub>除去効率が低いという短所を念頭におく必要がある。

参考文献

- 1) Nellemann, C. *et al.* : Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland (2009)
- 2) Kuwae, T. and M. Hori (eds.) : Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation, p.373, Springer Singapore (2019)
- 3) Miyajima, T. *et al.* : *Global Biogeochem. Cy.*, **29** (4), 397-415 (2015)
- 4) 桑江朝比呂ら : 土木学会論文集, B2-75 (海岸工学), 10-20 (2019)
- 5) 堀正和・桑江朝比呂 編著 : ブルーカーボン-浅海におけるCO<sub>2</sub>隔離・貯留とその活用-, p.254, 地人書館 (2017)
- 6) ブルーカーボン研究会, <http://www.wave.or.jp/bluecarbon/index.html>
- 7) ICEF (Innovation for Cool Earth Forum) : Direct Air Capture of Carbon Dioxide, ICEF Roadmap, p.39 (2018)
- 8) NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) : Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda, p.495, The National Academies Press, Washington, DC (2019)
- 9) Watanabe, K. *et al.* : *Glob. Change Biol.*, **25** (3), 1063-1077 (2019)