

ブルーカーボン生態系の活用

— その特徴と温室効果ガス吸収源対策への貢献 —

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 佐々木 淳

1. ブルーカーボンとは

(1) ブルーカーボンのはじめ

ブルーカーボンの用語が初めて使われたのは2009年に発行された、国連環境計画によるレポート「BLUE CARBON: THE ROLE OF HEALTHY OCEANS IN BINDING CARBON¹⁾」(以降BCレポートと略す)である。当時から熱帯雨林の急速な減少は大きな問題となっており、世界中の人々に認知されていたところであるが、沿岸植物生態系である海草藻場や塩性湿地、マングローブ林の減少速度が熱帯雨林の4倍にも達しており、さらに加速傾向にあったことはほとんど認識されていなかった。これらの沿岸植物生態系は生物多様性、水質浄化、水産資源、減災といった、生態系サービスを提供していることから重要であり、それが危機に瀕しているとの認識の下、その減少に歯止めをかけたいというモチベーションが伝わってくる。さらに、当時から熱帯雨林等ではREDD+ (開発途上国における森林減少・劣化の抑制、森林保全、持続可能な森林経営、森林炭素蓄積を増加させることにより、温室効果ガス排出量を削減あるいは吸収量を増大させる取組、図-1) といった国際的な取り組みがなされなされていた一方、海域の状況やポテンシャルはほとんど認知されていなかった。

(2) 炭素の吸収・排出と貯留

主なブルーカーボン生態系は海草藻場、海藻藻場、塩性湿地、マングローブ林といった、沿岸の湿地や干潟・浅場における植物生態系である。植物は一般に光合成によってCO₂を吸収・固定して有機物を生産する(一次生産)。枯死や動物による摂餌を通し、生産された有機物の一部は無機物に分解されてCO₂に戻るが、一部は100年から1000年以上の長期間、あるいは半永久的に底質中に貯留されたり海水中に留まる。これが「海洋生態系

によって隔離・貯留される炭素」と定義されるブルーカーボンである。地球全体で見ると、生物量(バイオマス)では陸上植物の0.05%に過ぎない海洋植物が地球上の全一次生産の約55%を占めており、さらに海洋面積の0.2%に満たない沿岸の植物生態系によるCO₂吸収が海洋全体の半分を占めている。

海洋表層のCO₂分圧は一般に大気中よりも低いため、海洋は大気中のCO₂を吸収しており、両者のCO₂分圧の差が大きいほど海洋による吸収が大きくなる(風等による海面の状態にも依存する)。海水中に溶解したCO₂は化学平衡によりその多くが炭酸水素イオン(HCO₃⁻)と炭酸イオン(CO₃²⁻)に解離し、これら3態を足したものを溶存無機炭素(DIC)という。海水には強アルカリの陽イオンと強酸の陰イオンが多量に含まれており(これらは完全に解離している)、その差分を全アルカリ度(TA)と呼ぶ(図-2)。HCO₃⁻とCO₃²⁻(共に陰イオン)がTAを埋め合わせることで電気的中性を保とうとし、

DICがTAを越えると、越えた分だけCO₂として存在する。そのため、DICに占めるCO₂の割合は小さく(1%以下)、大気との交換に関わるのはCO₂のみであるため、海水のCO₂吸収ポテンシャルは高い。

海洋植物は海水中のCO₂を吸収して一次生産を担い、植物や魚介類、バクテリア等の呼吸によってCO₂を排出している(図-3)。同時に炭酸系の化学平衡によってCO₂は変動しており、光合成によって表層海水中のCO₂が低下すると大気からさらにCO₂が溶解する。後述の通り、一次生産の一部は懸濁態有機物として底質等に貯留され、難分解性溶存態有機物(RDOC)として海水中に貯留される。一方、貝殻やサンゴの骨格はカルシウムイオンと炭酸水素イオンが結合した炭酸カルシウムで構成されるが、十分なカルシウム(アルカリ度)の供給がなければその過程でCO₂が排出されるため、貝殻やサンゴの骨格形成はCO₂の排出源とみなされている。

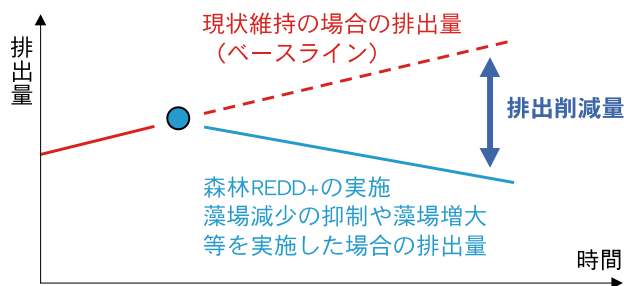


図-1 森林REDD+の実施や藻場増大等の取り組みの実施時の排出量と取り組みを実施しない場合(ベースライン)の排出量の差分を排出削減量とみなす²⁾

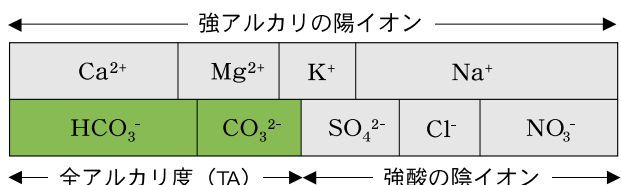


図-2 海水中における全アルカリ度のイメージ

2. ブルーカーボン生態系の種類と特徴

主要なブルーカーボン生態系はマングローブ林、湿地・干潟、海草藻場、および海藻藻場である。マングローブ林は森林によるCO₂吸収の一部として、東南アジア等の国ではインベントリに登録されているものであるが、潮間帯に位置し、陸上林とは大きく異なる物質循環過程を有することから、陸上林とは別に考慮すべきものである。また、海草は砂泥域に、海藻は岩礁域に生息し、CO₂の貯留過程は大きく異なる。特に海藻は人工石を活用した岩礁域の造成適地が広く存在し、ワカメ、コンブ、ノリといった海藻養殖の観点からも将来性が期待されている。底質環境でみると、泥（シルト、粘土）のように粒径の小さい底質はより多くの有機物を保持することで炭素貯留機能が高くなる。また、底質中では無酸素環境が支配的であるが、粒径の小さい底質ほどその傾向が強い。無酸素環境下では有機物分解速度が小さくなることから、泥質の底質は炭素貯留機能が高い。以下では生態系の特徴と生態系サービスの観点から見たコベネフィット（相乗便益）について概観する。

(1) 海草藻場

日本における代表的な海草はアマモである。アマモは内湾等の比較的静穏な砂泥質の浅場に生息し、生育環境が良好であれば急速に繁茂し、海の雑草と呼ばれることもある。かつては内湾や内海の砂泥質の浅場に普通に見られたが、埋立による生息適地の減少、水温上昇、濁度の上昇、刈り取り（繁茂すると小型船舶航行の支障になる等、沿岸域の利用の妨げになることもある）等によって著しく減少してきた。2000年頃からはアマモ場による水質浄化機能や魚介類の産卵場や稚魚の隠れ家になるといった、アマモ場生態系の重要性が広く認識され、アマモ場の再生が活発に行われるようになってきた。このようにアマモ場は以前から注目されてきたが、その底質中に炭素を貯留する働きが高く、ブルーカーボン生態系としてもその重要性が認識されるようになった。海草藻場による純一次生産と炭素の貯留過程の全体像を図-4に示す。

アマモが密生すると静穏域が形成され、有機物を含む懸濁物の底質への堆積を促進し、地下茎の存在は底質を安定化させ

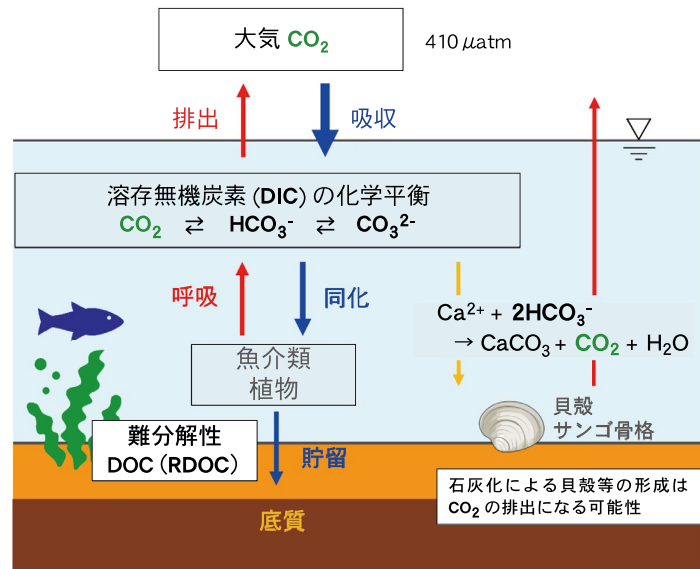


図-3 海水と大気間のCO₂の吸収・排出と海水中における炭素の生物化学過程

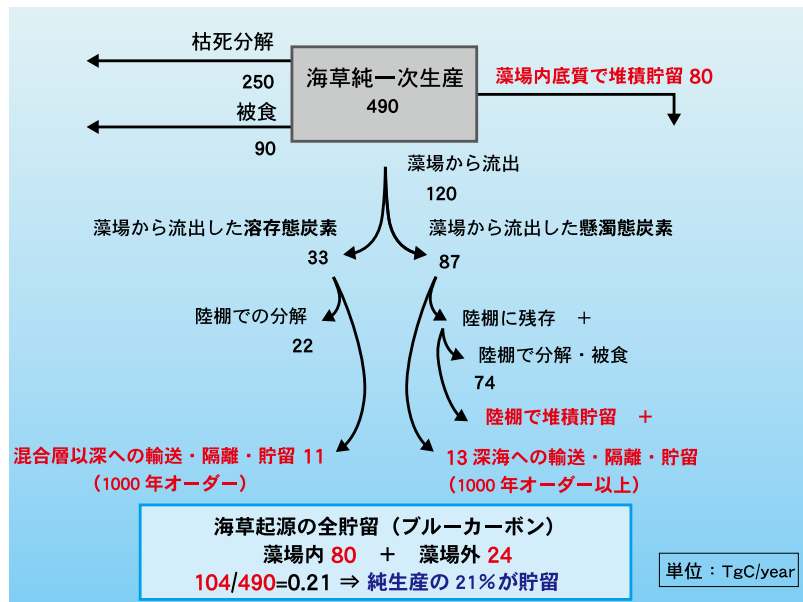


図-4 全球における海草藻場による純一次生産と炭素貯留過程³⁾

る働きがあり、藻場の底質は炭素を長年にわたって貯留する。アマモの葉上には付着藻類が、藻場の底質には底生微細藻類が生息し、これらを含むアマモ場生態系全体としての炭素貯留効果はアマモ単体の3倍にも及ぶと考えられている。また、周辺の生息環境が適していれば、アマモ場は外縁から効率的に生息域を拡大していくと期待される。

沖に流出した草体や藻場起源の粒状有機物（ここでは両者を合わせて懸濁態有機物と呼ぶ）の一部は陸棚や深海底に堆積し、貯留されていく。懸濁態有機物の一部は分解されて溶存態有機物（孔径0.2～1μmの濾紙を通過する有機物の総称）になる。また、そもそもアマモや微細藻

類は溶存態有機物を放出している。これらの溶存態有機物は水中で無機物に分解され、一部はCO₂として大気に回帰するが、海洋中の中深層（深度1000～3000m）や深層（深度3000m以深）に輸送された分は海洋大循環によって1000年以上の時間スケールで海洋中に留まり、大気中に回帰しないと考えられる。気候変動対策の観点やブルーカーボンの定義として100年以上大気に回帰しないことをもって貯留と見なす流れから、この溶存態有機物は貯留と見なすことができるだろう。同様の考えに立てば、懸濁態有機物についても、中深層以深に到達した時点で貯留と見なすことができる。さらに、溶存態有機物の一部は海水中で

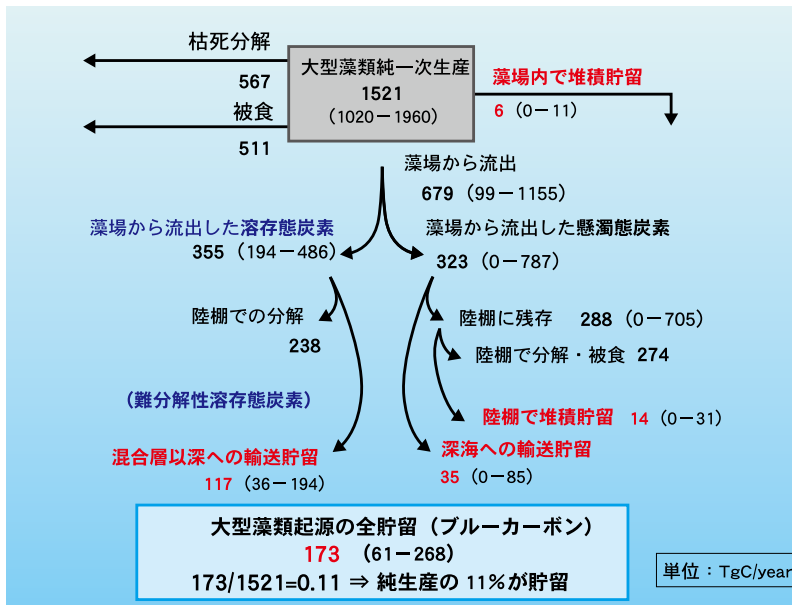


図-5 全球における海藻藻場による純一次生産と炭素貯留過程⁴⁾

はほぼ分解されない RDOC であり、存在する深度に関わらず貯留と見なすことができ、溶存無機炭素に分解されないことから、海洋酸性化を引き起こすこともない。

(2) 海藻藻場

海藻 (大型藻類) は海草と異なり、茎・葉・根が分かれておらず、胞子によって繁殖し、岩礁を生育場としている種が多い。日本ではガラモ場 (ホンダワラ類)、アラメ場、カジメ場、コンブ場、ワカメ場等が代表的である。海藻類は古くから肥料、食用に供され、コンブやワカメ等の褐藻類に特有なアルギン酸は医薬品や化粧品等の工業用途に活用されている。また、ノリ、ワカメ、コンブ等の海藻養殖も盛んであり、世界的にも持続可能な食料生産として海藻養殖に注目が集まりつつある。BC レポートでは情報不足から海藻はブルーカーボン生態系として見なされていなかったが、近年の研究では海草藻場以上の炭素貯留ポテンシャルを持つと考えられている。海藻藻場による純一次生産と炭素の貯留過程の全体像を図-5に示す。

海藻は光合成によって CO₂ を吸収し生長するが、岩礁帯から離脱すると流れ藻となり、しばらくは光合成を行いながら漂う。なかでもホンダワラ類は気泡を持ち、浮力の効果で洋上を漂流し、その過程で徐々に気泡が壊れて浮力を失っていくと最終的には深海に沈んでいく。流れ藻となった海藻は海草と同様に、懸濁態

有機物や溶存態有機物として輸送される。懸濁態有機物の一部は中深層以深に到達した段階で貯留と見なすことができ、さらに深海底の底質中に貯留される。一方、溶存態有機物についても海草と同様に中深層以深に到達すると貯留と見なせ、RDOC については存在する深度にかかわらず貯留と見なせる。

海藻類は光合成の過程で比較的多くの RDOC を常時放出していることが知られるようになってきた。養殖によって生産された海藻が食に供されると無機態に分解されるため、炭素貯留効果は期待できないと思われるかもしれないが、養殖中に常時放出される RDOC は炭素貯留への貢献と考えられる。海藻養殖は食料生産としての高い便益があり、気候変動の緩和と生態系サービスの相乗効果が特に期待されるブルーカーボン生態系である。

そこで、海藻藻場の拡大が期待されるが、生息場が岩礁帯のため、水深や光環境の適地において人工石等を活用した岩礁帯の造成が有効と考えられる。鉄鋼スラグと港湾等における浚深土砂を活用して人工土や人工石をつくる技術があり、実海域にも展開されている。海草の場合は浅場における砂泥質の環境が必要であり、その造成適地は限られるが、海藻藻場造成の適地は広く存在し、ポテンシャルが高い。一方、海藻藻場では磯焼けと呼ばれる、栄養塩不足、高水温、食害等による藻場の衰退がしばしば見られ、海藻藻場の造成にはさまざまな技術的課題がある。食害を受けにくい造成基盤の開

発等、藻場造成における技術革新が期待される。

(3) マングローブ林

マングローブ林は熱帯・亜熱帯域の河口潮間帯に生息し、日本では鹿児島県と沖縄県に分布している。その一次生産は陸域熱帯の陽樹と同程度に高く、地下部 (根) の割合が大きいことから、落葉に加えて地下部の発達による炭素貯留効果大きい。マングローブ林の存在は波を減衰させ静穏な環境をつくることから土粒子の堆積を促進し、しばしば数メートルにおよぶ底質が形成され、多量の有機炭素が蓄積されている。下げ潮時にマングローブ沼地から流出する水塊の CO₂ 分圧を調べると、6000 μatm を越える高い値が観測されることもある。この流出水中の DIC の起源には未解明の部分が多いが、マングローブ沼地の底質中で分解された炭素が地下水を通して供給されていると考えられ、平均的には100年から1000年以上前に生産された有機物が流出しているようである (マングローブ林が形成される以前の生態系による有機物の可能性もある)。このことはマングローブ沼地の持つ高い炭素貯留機能を示しているが、マングローブ林が失われると CO₂ の大きな排出源となることも示唆され、その保全と再生が重要である。

マングローブ林の幹や気根には消波効果があり、十分な樹林帯幅を有するマングローブ林は津波に対する減災効果も大きい。土砂堆積を促進することで、海岸侵食の緩和に有効であり、気候変動による海面上昇に対しては継続的に地盤高を上昇させることでマングローブ林を維持できる可能性もある。こういった海岸防護機能に加え、生物の生息場やさまざまな資源の提供等、多くの生態系サービスを提供している。

3. ブルーカーボンを活用した吸収源対策の取組

日本におけるブルーカーボンを政策の中に位置づけていく動きは2017年のブルーカーボン研究会の設立が画期となった。それ以前から港湾空港技術研究所や(国研)水産研究・教育機構を中心にブルーカーボンに関わる科学技術研究が展開され、その成果は堀・桑江編 (2017)⁵⁾ にまとめられ、ブルーカーボンに関する科学的知見が蓄積されつつあった。2015年のパリ協定では国が決定する貢献

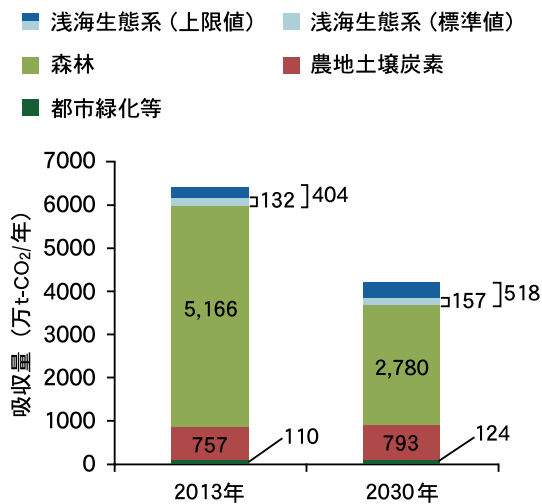


図-6 日本全国における2013年と2030年におけるブルーカーボン生態系によるCO₂吸収量の推計値 桑江ら (2019)

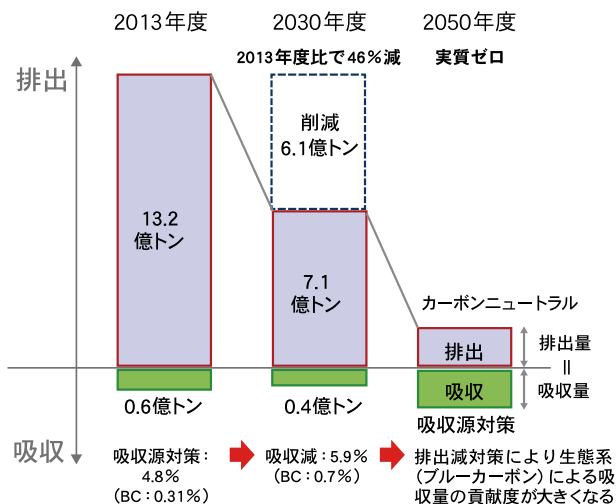


図-7 カーボンニュートラルの達成に向けたCO₂の排出と吸収源による吸収のタイムライン

(NDC) として温室効果ガスの削減目標の宣言が要請され、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) において、温室効果ガスインベントリ (一国が1年間に排出・吸収する温室効果ガスの量をまとめたデータ) 報告書の提出が義務づけられた。パリ協定では森林等の吸収源対策の強化に言及され、世界的にも吸収源対策の一つとしてブルーカーボンへの関心が高まっていた。2017年11月のブルーカーボン研究会において、ブルーカーボン生態系は有効な吸収源となりうるものであり、十分に精査を行った上で「地球温暖化対策計画 (温対計画) における吸収源対策」として定まることを目標に、検討を進めていくことが決議された。

当時のNDCでは温室効果ガスの排出量を2030年度に2013年度比26%削減すること、およびその2.6%を吸収源の強化で確保することが定められていたが、吸収源としては森林、農地土壌炭素、および都市緑化等が定められ、ブルーカーボンは含まれていなかった。そのため、日本全国のブルーカーボンによるCO₂吸収量の見込みを推定することが急務となり、ブルーカーボン研究会において2013年と2030年におけるCO₂吸収量の全国推計を行うことになった。推計方法の詳細は桑江ら (2019)⁶⁾を参照願いたい。推計の結果を図-6に示すが、2030年のCO₂年間吸収量は森林等の既存の吸収源対策による吸収量の最大12%に相当し、NDC目標値の0.4%を担うことができると算定された。ブルーカーボンによる吸収量は森林には及ばないものの都市緑化等を上回り、農地土壌

炭素に迫る値であったことから、温室効果ガスインベントリへの算入に向けた検討を始めるべきとの機運が高まった。

これを受けて、2019年には国土交通省により「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」が設置され、ブルーカーボンをCO₂吸収源として活用していくための検討が始まった。具体的には、ブルーカーボン研究会等による議論を踏まえ、ブルーカーボン生態系によるCO₂吸収量の算定方法について検討し、環境省の森林等の吸収源分科会等における検討に向けた基礎資料を作成することで、温室効果ガスインベントリへの算入に向けた検討を主な役割としている。2020年度から始まった、「ブルーカーボンの評価手法および効率的藻場形成・拡大技術の開発」における研究成果等を踏まえ、ブルーカーボン生態系の種類やCO₂吸収量算定手法の再考、吸収量算定を将来的に継続的に行っていくための体制づくり、ブルーカーボンの普及啓発に寄与する具体策等について検討が行われている。さらに、ブルーカーボンを活用した気候変動の緩和と適応へ向けた取組を加速することを目的に、新たなカーボンクレジット制度として、ジャパブルーエコノミー技術研究組合 (JBE)が創設した「Jブルークレジット⁷⁾」制度が動き出している。

2021年には菅首相によって2050年カーボンニュートラルが打ち出され、2030年におけるCO₂削減量の目標値は2013年比46%に引き上げられた。CO₂の排出を完全にゼロにすることは不可能

なため、カーボンニュートラルの達成には吸収源による吸収が不可欠である (図-7)。新たな吸収源としてブルーカーボンの貢献に期待が高まっており、Jブルークレジットをはじめとする適切なインセンティブを付与することが重要である。また、ブルーカーボン生態系の造成方法やCO₂吸収量の評価においては多くの課題が残されており、今後の科学技術面での発展も期待される。

《執筆者問合せ先》

jsasaki@k.u-tokyo.ac.jp

【参考文献】

- 1) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valedes, L., De Young, C., Fonseca, L., et al. (2009). Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment, UNEP (02)/B659. (Norway: GRID-Arendal).
- 2) JICA WEB https://www.jica.go.jp/activities/issues/natural_env/platform/reddplus/about/index.html
- 3) Duarte, C. M. and Krause-Jensen, D. (2017). Export from seagrass meadows contributes to marine carbon sequestration. *Front. Mar. Sci.* 4. doi:10.3389/fmars.2017.00013
- 4) Krause-Jensen, D. and Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nat. Geosci.* 9, 737-742. doi: 10.1038/ngeo2790
- 5) 堀正和, 桑江朝比呂編著 (2017). ブルーカーボン: 浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用, 地人書館.
- 6) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳 (2019). 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 75(1), 10-20.
- 7) JブルークレジットWEB <https://www.blueeconomy.jp/credit/>