

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-B-8

海岸におけるグリーンインフラの活用

港湾空港技術研究所・沿岸環境研究グループ長

桑江朝比呂

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

海岸におけるグリーンインフラの活用

Utilization of Coastal Green Infrastructure

桑 江 朝 比 呂

Tomohiro Kuwae

1. はじめに

海岸も陸域と同様、グリーンインフラの活用場としての可能性が高いことが知られているが、グリーンインフラの文脈のなかで海岸が語られることは、陸域と比較すると現在のところずっと少ないように思われる。また、「ブルーカーボン生態系」として気候変動の緩和に寄与する海岸や浅海域は、グリーンインフラに期待される重要な機能の一つであろう。そこで本稿では、著者が所属している国土交通省港湾局所管の研究所の立場から、どのような視点でグリーンインフラを捉えているかについて述べてみたい。さらに、ブルーカーボンの概要や、ブルーカーボンを活用した気候変動対策に関する国内外の動向についても紹介する。

2. 港湾におけるグリーンインフラ

港湾法に定められている港湾施設には、コンクリート構造物といった様々な人工資本（グレーインフラ）が含まれるが（図1）、港湾区域において「海浜」と定義されている砂泥などの自然資本（グリーンインフラ）も、港湾環境整備施設とされている。この海浜という場において、砂浜、干潟、藻場といった浅場の保全や再生が実施されている。また、浅場の保全や再生により、港湾区域全体としてグレーインフラとグリーンインフラとの調和を図るといふ、重い使命も担っている。

両インフラの調和を図る具体的なアプローチとしては、例えば、航路を適切な水深に維持するための浚渫によって発生する土砂の有効活用による浅場造成や、生物の生息に適した構造形式を防波堤や護岸に取り入れるといったことである。

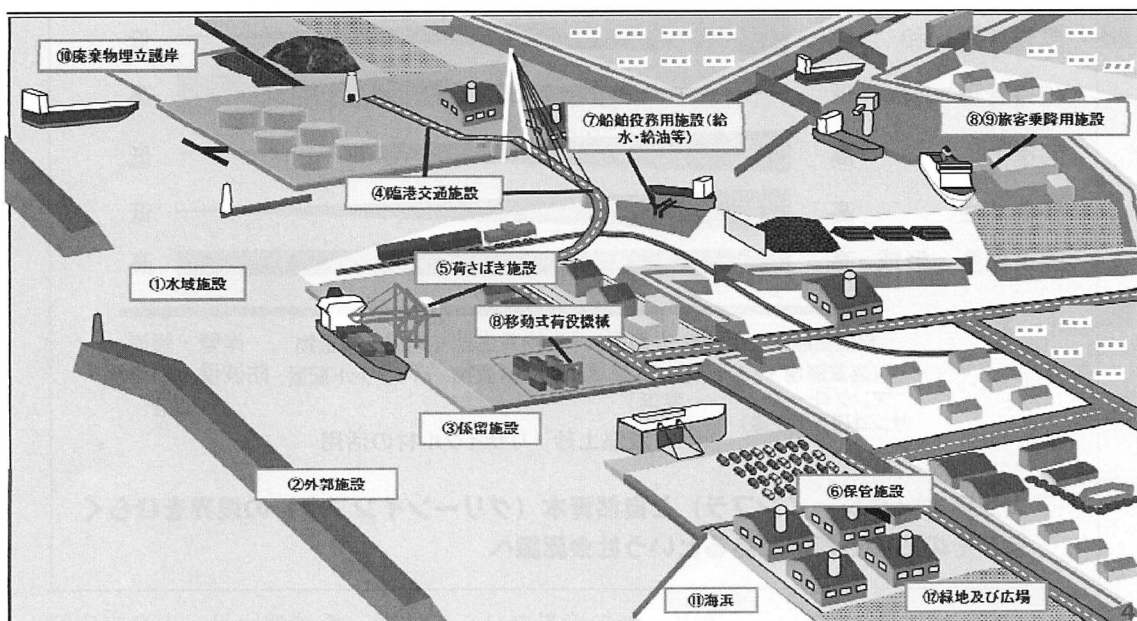


図1 港湾法で定められている様々な港湾施設。国土交通省HP <http://www.mlit.go.jp/common/001230738.pdf>

3. 今後20年程度で顕在化する課題

このような港湾施設の新設や維持管理には、これまで公共事業として税金が投入され実施されてきた。しかしながら、今後の20年を考えると、高度成長期につくられたグレーインフラの老朽化に伴う更新の必要性が加速するのに対し、少子化、高齢化、低経済成長、そして増税回避など今般の経済社会情勢を勘案すると、グレーインフラの更新に見合う税収の増額が見込める余地はなさそうである。さらに、気候変動による影響や被害が今後拡大していくとの前提に立つならば、公共財政はますます厳しくなると予想される。

それではどうすればよいのか。コスト削減はもちろんであるが、課題を解決できるほどの劇的な削減はおそらく期待できない。国策としては、インフラ更新までの寿命を長くすることを重点課題にしている。私見としては、インフラ整備における便益を上乗せし、費用対効果（B/C）を改善すること、そして、非公共（企業や家計）からの資金調達が今後重要になると考えている。この2つのうち、本稿では、便益上乗せに着目したい。

4. インフラ整備における便益の上乗せ

港の基本的な要求性能は、海域を穏やかにして船が着岸できるようにすること、つまり静穏性の確保である。この性能を有する港湾や海岸インフラ（グレーインフラ＋グリーンインフラ）に便益を上乗せすることを考えた場合、どのような便益のタイプがあるのか、そして、それを実現するためにはどのような具体的な技術があるのかのかについて整理したのが図2である。

上乗せできる便益のタイプとしては、津波、高潮、高波の防災減災効果、ブルーカーボン生態系を二酸化炭素吸収源として活用することによる気候変動の緩和効果、波や流れを減衰させ国土を保全する効果、サンゴや有孔虫といった造礁生物による地盤の形成効果、あるいは、グレーインフラの多機能性がもたらす上記以外の生態系サービス（例えば食料供給）が挙げられる。

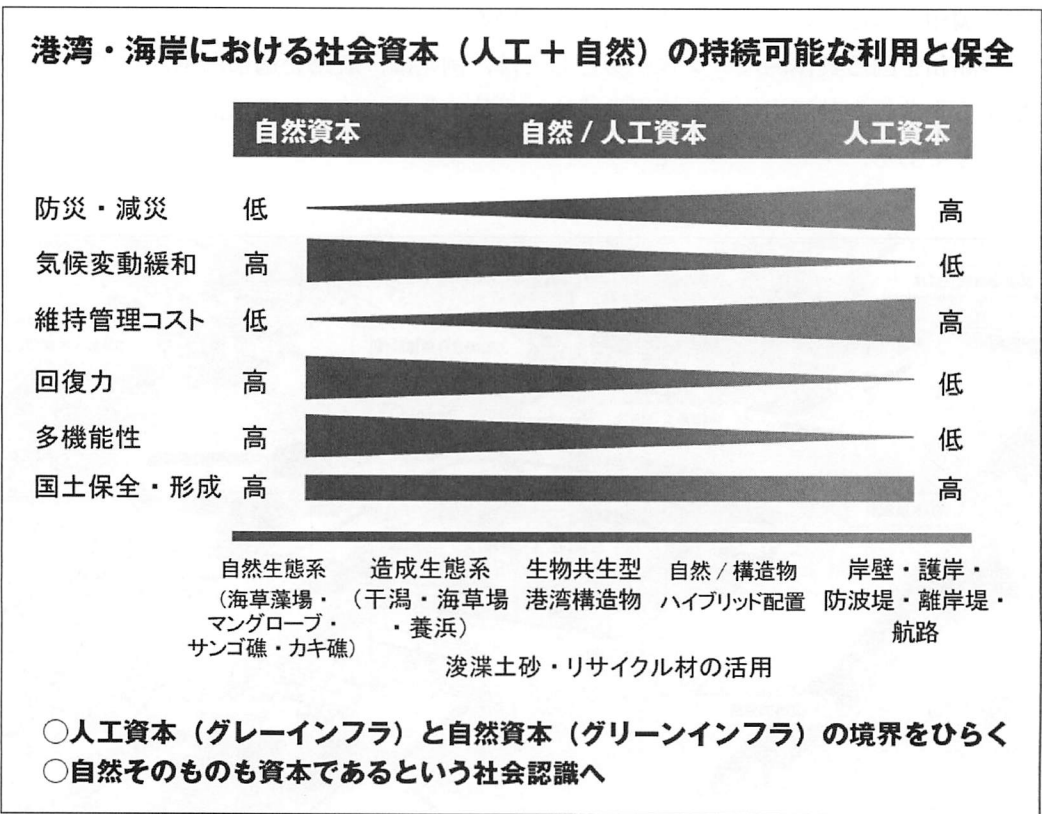


図2 海岸や港湾や海岸においてグレーとグリーンの境界をひらく技術。桑江朝比呂，未発表資料

5. グリーンインフラとグレーインフラのトレードオフ

これらの便益発揮のうえでは、グリーンインフラとグレーインフラには一長一短がある（図2）。例えば、減災防災であれば、グレーインフラ100%でガチガチに防護した方がグリーンインフラより高い効果が得られるものの、グレーインフラの維持管理コストは高く、気候変動の緩和効果をはじめとするその他の機能も期待できないため、グリーンインフラには及ばないというトレードオフがある。

グリーンインフラは適切に維持管理することにより、劣化を防ぐことができるばかりか、生物の成長や分布拡大による機能強化も期待できる。あるいは、被災時にも自己回復力を見込めるため、結果として維持管理コストが低減可能である。

中には、グリーンインフラとグレーインフラの中間に位置するインフラをつくる技術もある。実際、社会実装済みの中間インフラとしては、干潟や海草場の造成（図3）、砂浜における養浜、生物共生型の港湾構造物（図4）などがある。

6. 今後重要になる中間インフラ

今後20年程度で顕在化する課題に対処するためには、この中間インフラこそが重要になってくると考えられる。なぜなら、各現場においては、抱える課題やリスク（立地条件、人材、財政、気候変動など）の種類や



図3 1990年代後半から始まった、浚渫土砂を用いた砂質干潟造成。
写真：左、国土交通省中部地方整備局、右：国土交通省中国地方整備局

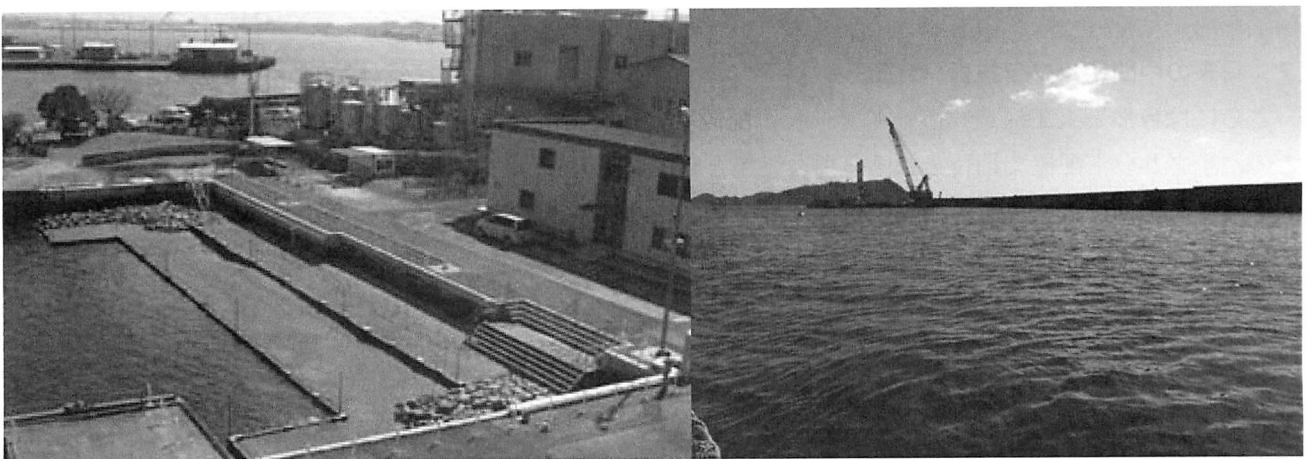


図4 左、2000年代前半から始まった、生物共生型護岸の整備。船の航行や着岸を妨げないように、階段式になっている。写真：国土交通省関東地方整備局。

右、2010年代から始まった、高知県須崎市の須崎港における生物共生型防波堤の整備。

大きさが異なるため、グリーンインフラ100%やグレーインフラ100%の両極端の技術が唯一解あるいは最適解となる可能性が低いからである。

図3に示す干潟や砂泥性海草藻場の保全や再生には、砂泥基盤材料として浚渫土砂やリサイクル材を有効活用することが多い。具体的なリサイクル材としては鉄鋼スラグや石炭灰などの副産物である。干潟の修復や造成は、「自然再生」という言葉がまだなかった1990年代の後半から社会実装されてきた技術である。現在では三河湾をはじめとして、全国に100カ所以上の実績がある。

近年では、防波堤に生物共生機能を付加する取り組みが始まっている（図4）。これは、大津波に対する「粘り強さ」を確保するため、防波堤の断面を拡大するという改良によって、防波堤港内側に新たにできる浅い水深帯をうまく活用し藻場を造成するアイデアである。

このような護岸や防波堤の部材には、図5に示すような浚渫土砂とリサイクル材を有効活用して造られたブロックも使用され始めている。

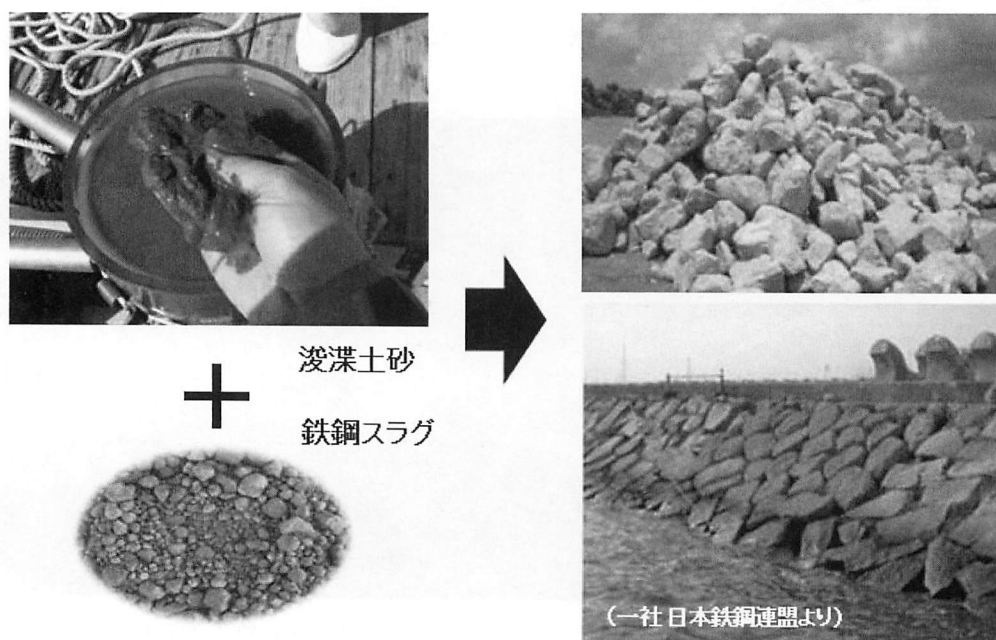


図5 浚渫土砂やリサイクル材の有効利用の例。浚渫土砂に鉄鋼スラグを混合して作られた護岸用石材。

写真：日本鉄鋼連盟

7. 将来の中間インフラ技術

さらには自然と人工構造物のハイブリッド配置といった新たな技術の開発も重要である（図6，図7）。このハイブリッド配置で期待される重要な効果として以下の3点が挙げられる。

第一に、周期の短い風波を植生抵抗によって低減させ、将来風波の程度や頻度が気候変動によって高まる場において海岸侵食が抑制される。

第二に、植生抵抗により流速が低減し、生態系内に懸濁物質がトラップされ堆積して自然に嵩上げされることにより、気候変動による海面上昇の対策となる。

第三に、もしコンクリート等で建設されたグレーインフラの更新が、上述のような公共財政難などの理由により遅延したり実施されない場合でも、グリーンインフラによる波浪や流速の低減効果により、多少なりとも浸水や侵食被害のリスクを分散あるいは低減することが可能となる。

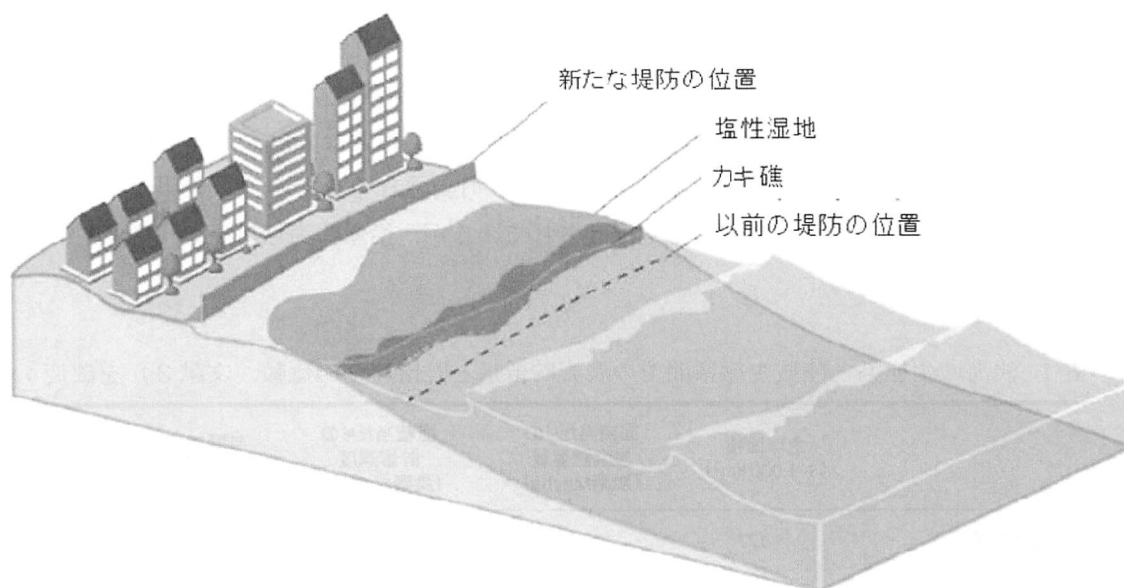


図6 広域における自然/構造物 ハイブリッド配置. 文献1) を改変.

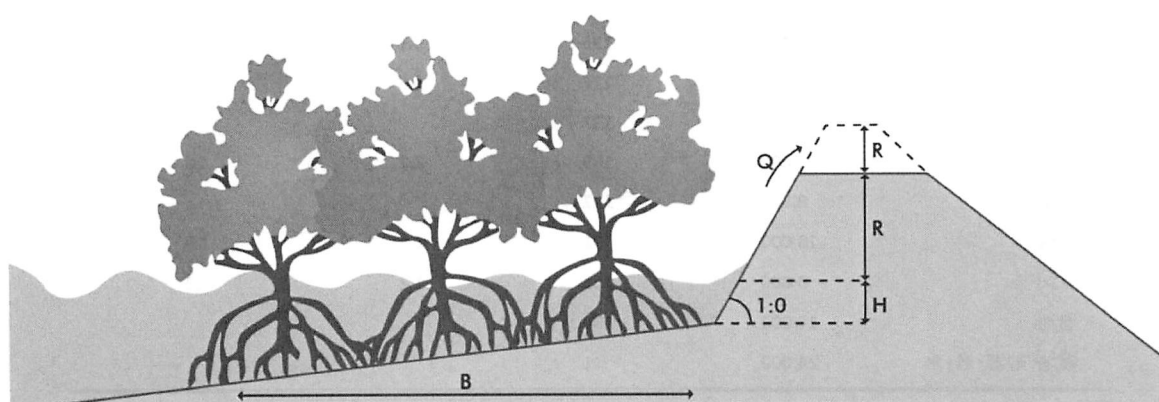


図7 狭域における自然/構造物 ハイブリッド配置²⁾. マングローブによる波浪減衰効果により、堤防の高さを低くし、安全要求性能を満たしつつ費用対効果を上昇させることが可能.

8. 自然に介入すること

港湾や海岸におけるグレーインフラとグリーンインフラとの調和のための社会実装は、上述のように20年以上前から本格化した歴史がある。しかしながら当初は、自然に手を加えることが社会的にまだほとんど許容されない時代において、綿密な予備調査や実験による技術的裏付けと強い意志決定による、先駆的かつ挑戦的な試みであった。

今でこそ、「自然再生」という言葉は一般的になっている。また、生物多様性の危機の一つには「手入れ不足の危機」が含まれ、人が自然生態系に介入する方がよいと考えられている。しかし、当時はまだ、「手つかずの自然が最良」、「自然は、そのまま保存すべき」という考えが主流であった。

「20年という時間スケールは、人のマインドセットや行動規範を変えるのに十分である」ということは、一連の経験から学んだ教訓である。本稿で紹介した「自然と人工構造物のハイブリッド配置」を都市海岸に整備するといった発想や技術は、現時点では奇想天外で実装不可能、あるいは夢物語と思われる向きもあるかもしれないが、20年後にはごく当たり前のコンセプトであり技術となっているのではないだろうか。

9. ブルーカーボンとは

海洋生物によって大気中の二酸化炭素が取り込まれ、海洋生態系内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。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（表1）。陸域と比較して海洋が炭素貯蔵庫として重要なのは、海洋堆積物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る点である。全球の海底堆積物へは、年間2.4億トンの炭素が新たに埋没し貯留すると推計されているが、沿岸浅海域はそのうちの約79%（1.9億トン）を占めている（図8）。

表1 浅海域生態系と陸域生態系間での炭素貯留量と貯留速度の比較. 文献3）を改変

	全球面積 (×1,000 km ²)	面積当たりの 炭素貯留量 (炭素Mg/ha)	面積当たりの 貯留速度 (炭素g/m ² /年)	年間炭素貯留量 (炭素Tg/年)
海草藻場	177	140	101	18
マングローブ林	138	864	163	23
塩生湿地	51	162	151	7.7
泥炭地	3,341	1,497	11	36
熱帯林	19,623	238	4.0	79
温帯林	10,400	196	5.1	53
亜寒帯林	13,700	117	4.6	49
熱帯サバンナ/草地	15,000	187		
温帯草地	9,000	159	2.2	20
灌木地	8,500	122		
砂漠	18,000	91	0.8	14
ツンドラ	8,000	166	1.2	10
農地	14,000	150		
極地:砂漠・岩・氷	24,000	1		

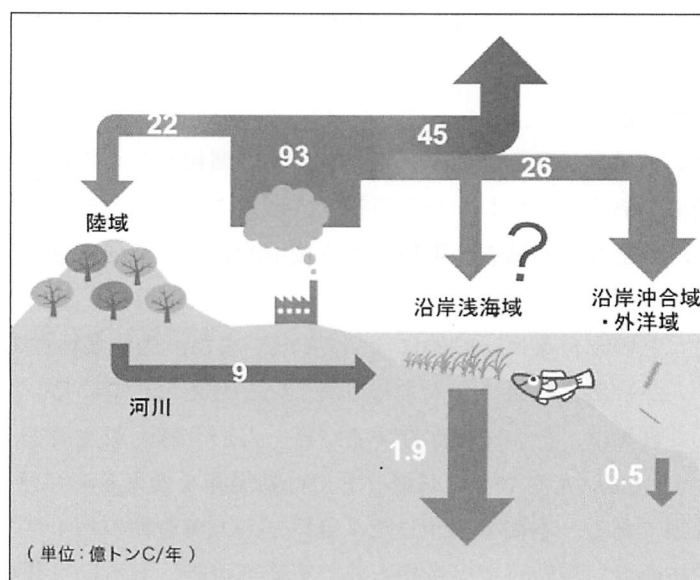


図8 全球における炭素循環図。大気は文献4），海洋は文献5），河川は文献6）を参照。沿岸浅海域の海底堆積物には毎年1.9億トンの炭素が貯留され，その速度は沿岸沖合域や外洋域よりずっと速い。

したがって、温室効果ガスのうちもっとも主要なCO₂を、大気外へ隔離し貯留させる、いわゆるCCS (Carbon Capture and Storage) の仕組みが、海洋生態系とりわけ沿岸浅海域において有効に機能している。UNEPは浅海生態系の保全が気候変動対策の側面においても重要であることを主張している。それは、堆積物中に長期間貯留されるはずのブルーカーボンも、もし人為影響などによって攪乱を受けると酸化分解を受けて無機化され、CO₂となり大気へ容易に回帰してしまうからである。

10. ブルーカーボン生態系における炭素貯留とCO₂吸収

海草藻場、塩生湿地、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、これらの生態系内の海底堆積物が、ブルーカーボンの主要な貯蔵庫となっている（表1）。しかしながら、ブルーカーボンの総量や堆積物中へのブルーカーボンの貯留速度、あるいは浅海生態系と大気との間のCO₂ガス交換については知見が限られており、現在世界中でその計測が勢力的にすすめられている。

気候変動の緩和の観点からみると、長期間で見た場合の海面でのCO₂ガス交換による大気中CO₂の正味吸収（吸収した総CO₂量－放出した総CO₂量がプラス）は直接的な過程であり、海中への炭素貯留による大気へのCO₂回帰の抑制は間接的な過程である。この2つはまったく別の過程であり、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CO₂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待たないだろう。

11. CO₂は正味で排出？

炭素貯蔵庫としてブルーカーボン生態系の堆積物が重要であることはわかってきた。それでは、沿岸浅海域は本当に大気中のCO₂を正味で吸収するのであろうか。実は沿岸浅海域は、陸域から流入した有機物が分解され無機化する場、すなわちCO₂の正味の排出源との見方が一般的である。すなわち、沿岸浅海域は「有機物を長期間貯留するプラスの機能と大気中にCO₂を正味で排出するマイナスの機能」を合わせ持つ。

それでは、地球上のすべての沿岸浅海域は、CO₂の排出源となっているのか。もし、吸収源となり得る条件があるならば、有機物を貯留しかつ大気中のCO₂を正味で吸収する、気候変動の緩和策として魅力的な沿岸浅海域が想定可能となる。

そこで、沿岸浅海域の中でも一次生産速度が高い海草藻場に特に注目し、大気中のCO₂を正味で吸収するかどうか検証してみた。その結果、渦相関法をはじめとする新たな計測技術の開発と導入によって、海草場が年間を通じて大気中CO₂の正味の吸収源となり得ることを、世界で初めて実証した（図9）。その場の一次生産速度が高く、呼吸分解速度が低ければ、大気中のCO₂は正味で吸収されるのだ。北海道の風連湖のアマモ場では、年間1,400トン（1 ha当たり年間約0.24トン）のCO₂が、正味で吸収されていると見積もられた。

CO₂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すすめられている⁸⁾。

12. 他の緩和技術との比較

気候変動の緩和技術には、プラントから排出されるCO₂を化学工業的に回収し、貯留サイトへ輸送し封入するCCSあるいは海洋鉄散布といった人為ベースの技術や、森林管理や土壌管理といった生態系ベースの技術も提案されている。ここでは、人為ベースと生態系ベースの緩和技術を比較してみる。

第一に、生態系ベースの技術は、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や藻類バイオ燃料プラントといった人為ベースの技術は、コスト、製造・輸送過程におけるCO₂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、生態系ベースの技術はこの障壁が小さい。

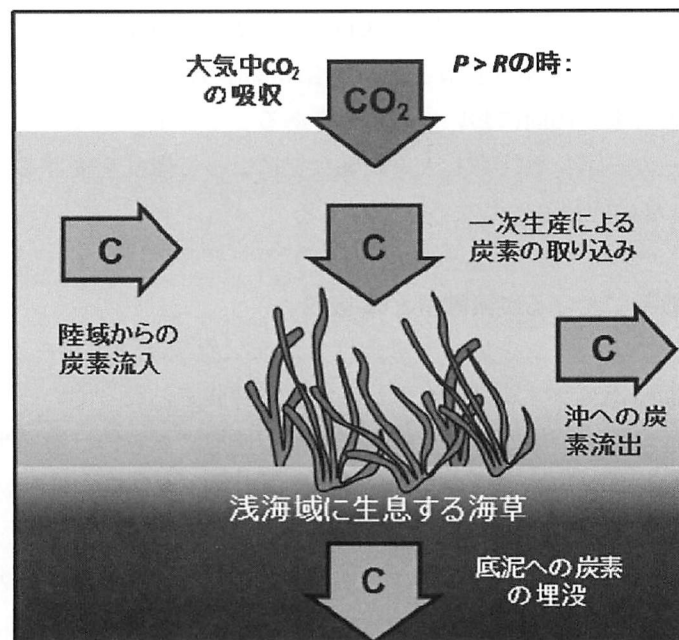


図9 海草場における炭素フロー図. 文献7)を改変. 生態系全体の総生産速度 (P) が呼吸分解速度 (R) を上回る場では, 年間を通じて大気中 CO_2 を正味で吸収しうる.

第二に, 生態系ベースの技術は, 気候変動の緩和だけでなく, 他の生態系サービス (食料供給, 水質浄化, 観光レク, 防災減災など) の効果 (コベネフィット) も期待できる.

第三に, 生態系ベースの技術は, 自然プロセスを用いた緩和策のため, 人為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_2 隔離速度が遅い) といった短所がある.

したがって, ブルーカーボンを活用した緩和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_2 吸収の効率が低いという短所を念頭におく必要がある.

1.3. 国内における社会実装例

横浜市は, トライアスロン大会で発生する CO_2 を海の活用により相殺する「ブルーカーボンオフセット」を, 2014年から世界で初めて社会実装している (図10). このクレジットは, 浅海生態系の再生効果に対してではなく, 海産物の栽培加工の工夫や, 海水を活用したヒートポンプによる CO_2 の排出抑制効果に対して創出された. 現在, 浅海生態系の再生によるクレジット創出の準備が進んでいる.

1.4. パリ協定とブルーカーボン

2015年のCOP21で採択された, 2020年以降の新たな法的拘束力を持つ枠組み (パリ協定) では, 各国が温室効果ガスの排出削減に関してNDC (Nationally Determined Contributions「自国が決定する貢献案」とUNFCCCでは定義) 掲げ, 相互に検証し合う仕組み (プレッジ&レビュー方式) が基本方針となっている. しかも5年ごとに各国は前向きで野心的なNDCの見直しが求められるため, NDCは科学技術の進展や社会情勢の変化に応じて柔軟性を持つ.

現時点で実際にNDCとしてブルーカーボンあるいは浅海域生態系の活用について具体的に言及している国は果たしてどのくらいあるのか, 2016年に調査が実施された (図11). その結果, パリ協定NDCで浅海域あるいはブルーカーボンの活用と言及している国は, 緩和効果に対して151カ国中28カ国 (19%), 適応効果に対して151カ国中59カ国 (39%) であった. 残念ながら, 日本はいずれにも言及していない.

諸外国が, 予想外に早く浅海域やブルーカーボンを活用して, 気候変動の緩和や適応に取り組んでいるこ

とがわかりいただけたと思う。日本も世界第6位の海岸線の長さを活かし、浅海域やブルーカーボンの活用を一刻も早く気候変動対策の手段としてNDCに明記すべきと考える。

幸いなことに現在、沿岸環境に深く関わる国交省、水産庁、環境省が連携し設置された「ブルーカーボン研究会」において、浅海域生態系を我が国の地球温暖化対策計画に吸収源として正式に定め、NDCへの明記を狙った検討が進んでいる¹¹⁾。

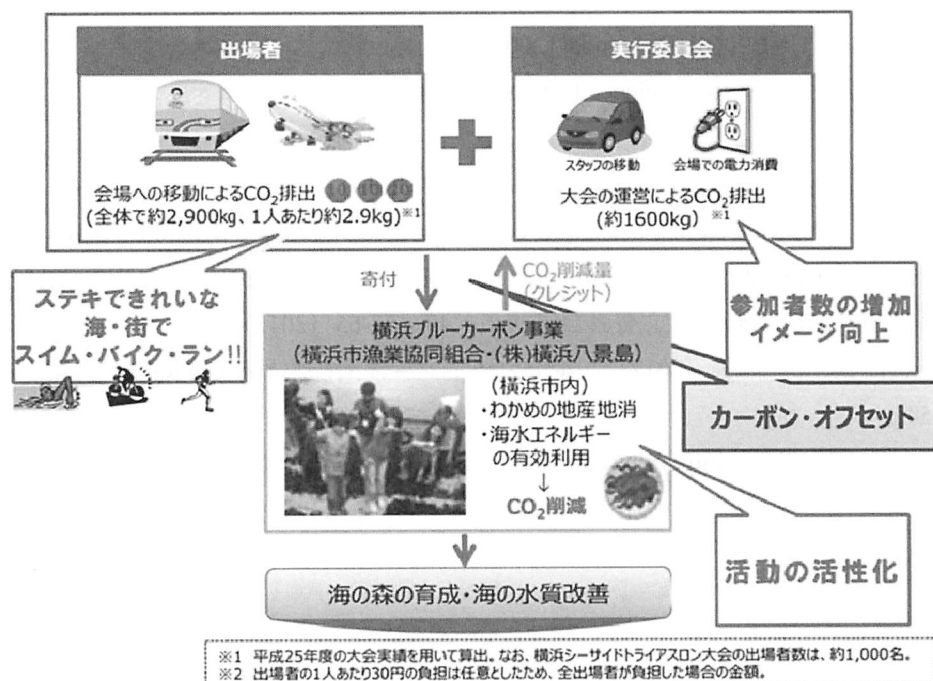


図10 ブルーカーボンを活用したカーボン・オフセット制度を導入した「横浜ブルーカーボンオフセット事業」の概要。文献9)を改変。具体的には、トライアスロン大会の開催で排出されるCO₂を、地元産わかめの地産地消などによるCO₂削減分で相殺している。



図11 パリ協定のNDCで浅海域あるいはブルーカーボンの活用に関及している国(2016年時点)。文献10)より引用。緩和効果のみが薄青色、適応効果のみが中青色、緩和と適応の両効果に関及している国を濃青色で示している。

引用文献

- 1) Sutton-Grier, A. E., et al.: Environmental Science & Policy, 51, 137-148 (2015)
- 2) World Bank: Implementing nature based flood protection : principles and implementation guidance (2017)
<http://documents.worldbank.org/curated/en/739421509427698706/Implementing-nature-based-flood-protection-principles-and-implementation-guidance>
- 3) Bridgham, S. D.: In D. P. Batzer and R. R. Sharitz (eds.) Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands, p. 277-309, University of California Press (2014)
- 4) Nellemann, C., et al.: UNEP, GRID-Arendal (2009)
- 5) Le Quéré, C., et al.: Earth System Science Data, 8: 605-649 (2016)
- 6) IPCC: AR5 (2013)
- 7) Tokoro, T., et al.: Global Change Biology, 20, 1873-1884 (2014)
- 8) Kuwae T, Hori M (eds) Blue carbon in shallow coastal ecosystems: carbon dynamics, policy, and implementation. Springer, 390 p. (2018) <https://www.springer.com/us/book/9789811312946>
- 9) 山田ほか：環境システム研究論文発表会講演集，43，57-65（2015）
- 10) 堀正和・桑江朝比呂 編著（2017）ブルーカーボンー浅海におけるCO₂隔離・貯留とその活用ー，地人書館，254 p.
- 11) ブルーカーボン研究会．<http://www.wave.or.jp/bluecarbon/index.html>