

第3回「理想の追求」研究報告

研究期間：2012年4月1日～2015年3月31日

都市型ブルーカーボン:新たな沿岸海域炭素循環像の構築

プロジェクトリーダー

桑江朝比呂 港湾空港技術研究所

プロジェクトメンバー

所立樹 港湾空港技術研究所
渡辺謙太 港湾空港技術研究所
鈴木昌弘 産業技術総合研究所
鶴島修夫 産業技術総合研究所
山田奈海葉 産業技術総合研究所
小川浩史 東京大学
神田穰太 東京海洋大学
久保篤史 東京海洋大学
相馬明郎 みずほ情報総研
中島典之 東京大学



1. 研究の背景と達成目標

これまで、陸域からの負荷を受ける沿岸域では有機物が分解する場、すなわち CO₂ の放出源と考えられてきた。とりわけ、都市河川が流入し人間活動の影響を受けた内湾は、大量の CO₂ 放出を伴う場所であると認識されてきた。ところが近年、沿岸生態系が高い CO₂ 吸収能力あるいは炭素貯留能力を有する事例が報告された。国連環境計画(UNEP)は、沿岸域で吸収・貯留される炭素を「ブルーカーボン」と新たに称し、その重要性をアピールした。したがって、「沿岸海域が CO₂ の吸収源」であるという、新たな仮説を検証することは重要である。そこで本研究では、都市河川-沿岸域-外洋域、さらに大気-海水-海底堆積物を含めた広範なかつ長期的な炭素輸送像全体を「都市型ブルーカーボン」という新たな概念としてとらえ、上記の仮説を検証し、さらには「気候変動の緩和」に寄与する「豊か」で「美しい」都市海域の構築と維持管理を追求することを目的とする。具体的には、(1) 都市型ブルーカーボンを通じた大気中 CO₂ の削減に寄与する「未知」のフローを、実証データならびに数理モデル解析により明らかにすること、そして(2) 炭素貯留、生物生産、水質改善の3つの機能を調和させる都市型ブルーカーボン像を提示すること、の2点である。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

【主な研究成果】

- ・ 大気中 CO₂ 吸収源となっていることを、複数の都市海域で実証、既往の知見やデータ解析から、吸収源となる条件を機構的に説明、未知の炭素フローの一端を解明
- ・ 炭素貯留、生物生産、水質改善の3つの機能を定量的に表現し、下水処理法、浅海域生態系の再生などの施策の効果を予測できる「ブルーカーボン数理動態モデル」を構築
- ・ 「気候変動の緩和」に寄与する「豊か」で「美しい」都市海域を実現するため、炭素循環の現地計測手法、試料分析手法、海域の現状評価と将来予測可能な数理モデルなど、新たなツールを新たに提案
- ・ プロジェクトメンバーの久保篤史(キャンボン財団奨学生)が博士の学位を取得

【社会、学術へのインパクト】

- ・ 気候変動枠組み条約(UNFCCC) 科学技術に関する補助会合(SBSTA)における我が国の気候変動対策への取り組みを説明する position paper において、研究成果(海草場が大気中 CO₂ の吸収源)をインプット
- ・ IPCC 湿地ガイドラインの2014年改定時の政府査読担当
- ・ 予想されるブルーカーボン増減量の国別報告書インベントリへの算入や、IPCC 湿地ガイドライン改定の対応のため、環境省検討会の委員として、我が国全体のブルーカーボン量の計測、報告、検証の方法について議論スタート
- ・ トライアスロンの開催に伴う参加者の移動や会場運営で発生する CO₂ をブルーカーボンによってオフセットするという、世界初のブルーカーボンオフセットクレジットの社会実装がスタート。そのオフセット量の算出法などについて、検討委員として助言
- ・ 海草場という生態系の重要性として、従来から知られていた稚仔魚の成長の場という役割に、気候変動の緩和という新たな価値を付加。海草場の保全や再生の考え方に、新たな視点を導入
- ・ 環境省環境研究総合推進費「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究(S-14)」がスタート。このプロジェクトにおいて、本研究で新たに構築したブルーカーボン数理動態モデルをさらに発展させた研究を実施

3. 研究成果

計測技術や解析技術の新たな開発により、都市型内湾海域における未知の炭素フローの一端を明らかにした。主な研究成果について以下に簡潔に示す。

(1) 沿岸海域が大気中 CO_2 の正味の吸収源であることの実証

沿岸海域が気候変動の緩和に寄与するのは、フロー（大気中 CO_2 を直接吸収）もしくはストック（海域中に炭素を貯留）の2つの過程である。したがって、このフローやストックを厳密に定量し、沿岸海域による気候変動緩和機能を検証することが重要である。

陸域からの負荷を受け有機物分解する沿岸域は CO_2 の放出源と考えられてきた。しかしながら、海草は活発な光合成能力を示すことから、「有機物の分解に伴う CO_2 の発生を上回るほど海草場が一次生産（光合成）を行えば、 CO_2 を吸収するのではないか」との仮説を立てた。

しかしながら、沿岸海域は陸・河川・外洋の影響を受ける複雑な場であるため、炭素フローやストックの実態把握は困難を極める。そこで、最先端の現地観測技術（図2）やデータ解析技術を開発して用いることにより、この未知なる炭素フローやストックの解明に挑戦した。

風蓮湖（北海道根室市）、久里浜海岸（神奈川県横須賀市）、吹通川河口（沖縄県石垣市）の海草場において、現地観測、水底質の化学分析、そしてデータの統計解析を実施した。その結果、通説とは異なり、内湾河口域の海草場が大気中の CO_2 を吸収できることを突き止めた（Tokoro et al. 2014, 図3, 4, 5）。特に風蓮湖では、年間平均でも CO_2 を大気から吸収していた。海草場の一次生産が呼吸や分解を卓越すればするほど、大気中 CO_2 を吸収することも明らかにした。



図1 海草(アマモ)の濃密な生息(風蓮湖)

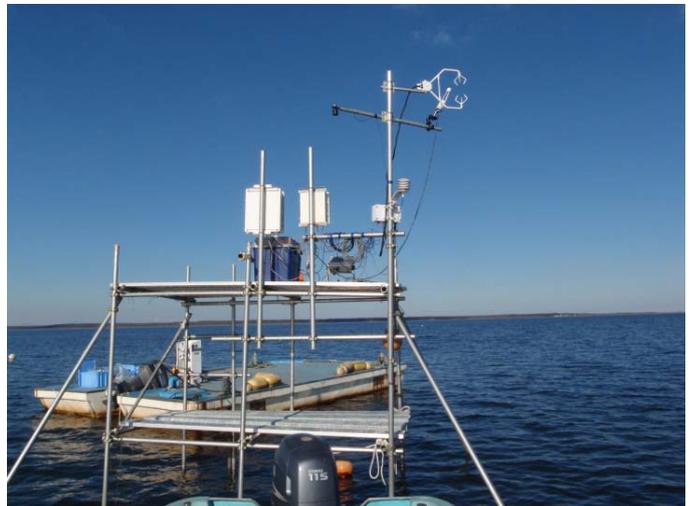


図2 大気と海水の間の CO_2 吸収・放出（フラックス）を観測する装置。上：渦相関システム（大気中 CO_2 濃度と鉛直風速の変動成分を連続観測する手法）、下：チャンバーシステム（チャンバー内に閉じ込められた大気中の CO_2 濃度の経時変化を観測する手法）

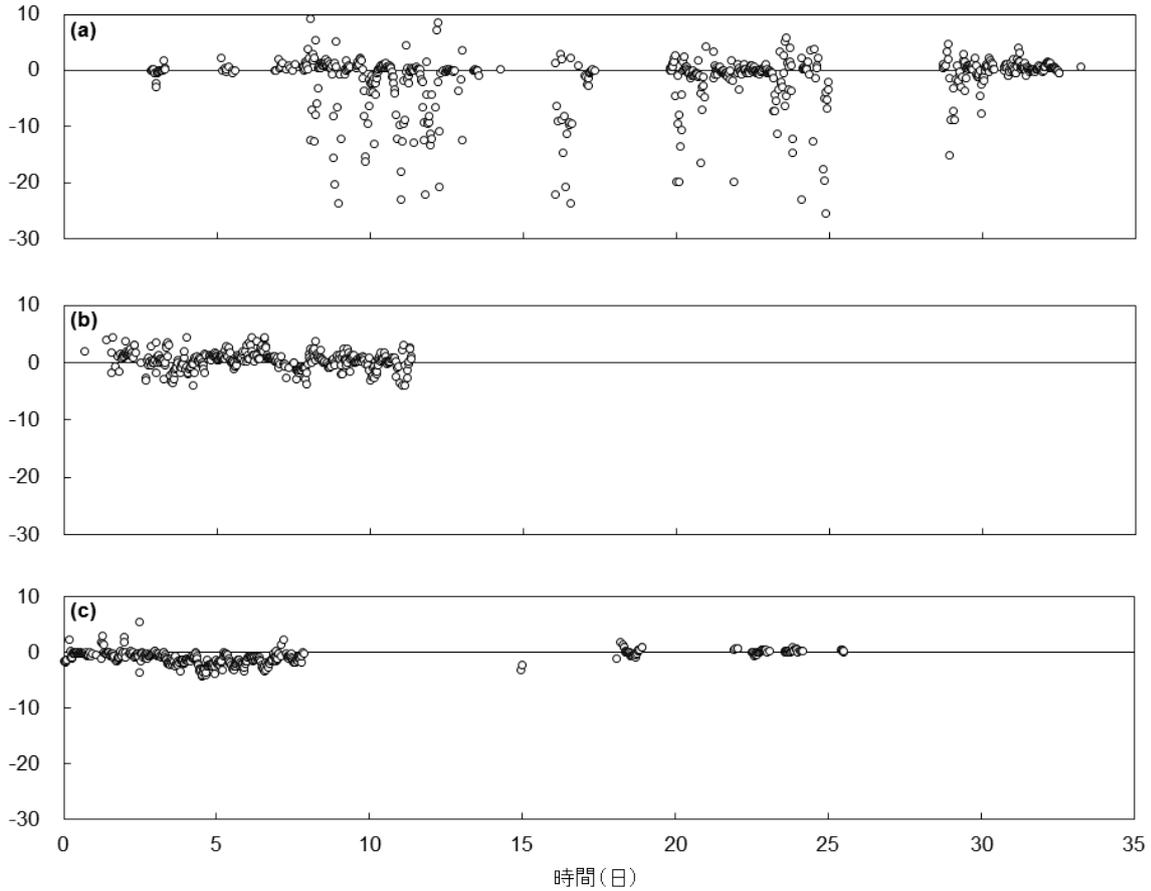


図3 渦相関法で計測された大気-海水間の CO_2 フラックス ($\mu\text{mol-C}/\text{m}^2/\text{s}$) (Tokoro et al. 2014). a): 風蓮湖 (夏季), b): 風蓮湖 (冬季), c): (沖縄県石垣市吹通川河口). 30 分ごとに連続的にフラックスが計測されている. 大気-海水間の CO_2 フラックス. マイナスは大気→海水の方向(大気中 CO_2 の吸収)を示す.

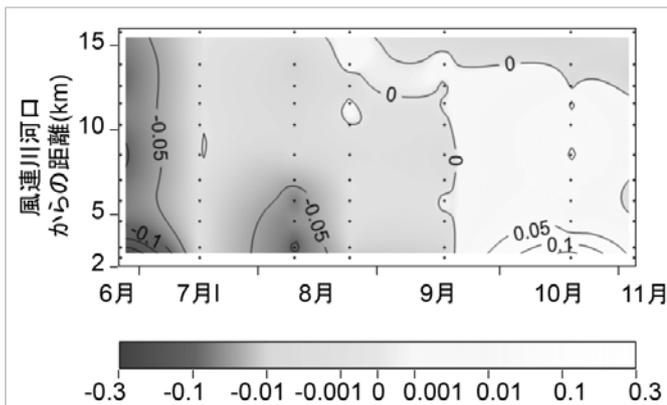


図4 バルク法(大気と海水中との間の CO_2 分圧差とガス交換係数を用いる手法)で計測された風蓮湖における大気-海水間の CO_2 フラックス ($\mu\text{mol-C}/\text{m}^2/\text{s}$) (Tokoro et al. 2014). 年間スケールで大気中の CO_2 が海域へ吸収されている(フラックスの平均値: $-0.018 \mu\text{mol C}/\text{m}^2/\text{s} = 24 \text{ g CO}_2/\text{m}^2/\text{年}$). 12月~4月は結氷期.

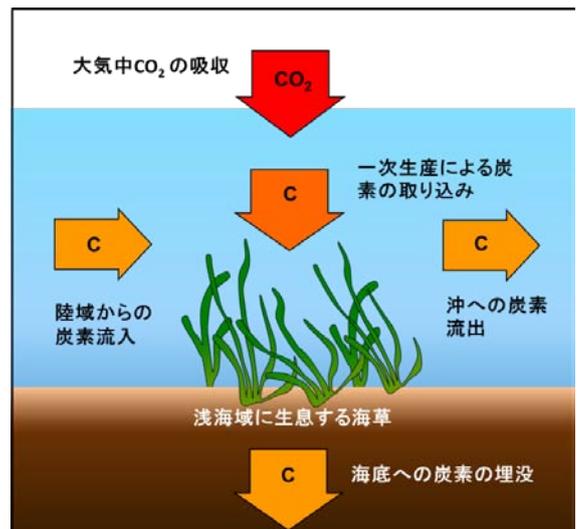


図5 海草場における一次生産(光合成)により, 海草場内の炭素や陸から流入した炭素が取り込まれる. 水中の炭素減少に応じて, 大気中の CO_2 が海水に吸収される. 海底に埋没した炭素は, 数千年スケールで隔離貯留される.

(2) 沿岸海域に長期間隔離される炭素の起源、その量、そしてその速度の定量

海洋生物によって吸収・固定された炭素は、生物の枯死・沈降を経て堆積物中に埋没する。埋没した有機炭素の一部は分解を免れて大気中 CO₂ から長期間隔離される。そのため大気中 CO₂ の隔離プロセスとして極めて重要なものである。沿岸海域には陸域から流入する有機物や海草藻場・干潟で生産される有機物など、様々な起源のものが堆積する。したがって、これらの有機物をその起源ごとに定量評価する手法を開発した。

実海域で採取した堆積物コア(図6)の年代測定(放射性炭素同位体比)と有機物の起源推定(安定同位体分析, 元素分析, 色素分析)を組み合わせ、どこから来た有機物がどれくらいの速度で埋没しているかを調査した。調査フィールドの一つである北海道風蓮湖では、堆積物表面から2 mの深さに2,000~8,000年前の有機物が隔離されていることがわかった。この年代測定の結果から、風蓮湖全体(57.4 km²)では年間225~518トンの炭素が埋没していると計算された。特に海草の生息密度が高い場所での堆積速度が速かったことから、海草による有機物のトラップ効果が堆積速度に重要な役割を果たしていることが示唆された。

さらに、また有機物の起源推定の結果から、堆積物には陸上植物由来の有機物、植物プランクトン、海草由来の有機物(図7)が混在しており、様々な起源の有機物が堆積物中に長期間隔離されていることが明らかとなった。特に、陸上植物や海草由来の有機炭素は、植物プランクトン由来に比べて選択的に堆積物中に埋没していることが世界で初めて定量的に明らかとなった(Watanabe and Kuwae 2015)。

(3) 内湾の水中に長期間隔離される難分解性炭素の起源とその定量

沿岸海域に隔離される炭素としては、上述の堆積物にプールされるほか、難分解性の溶存有機物として水中にもプールされることが知られている。そこで、東京湾とモデル海域とし、塩分とクロロフィル a 値から内湾の海水中に含まれる難分解性の溶存有機炭素の起源を推定した。その結果、陸域起源が21~32%、植物プランクトン起源が8~10%、外洋水起源が59~69%、と推定された(Kubo et al. 2015)。また、現在の溶存有機炭素濃度を1970年代と比較した結果、流域での下水処理の整備により、難分解性の溶存有機



図6 上:堆積物コアの採取状況, 下:採取された堆積物コア断面の様子.

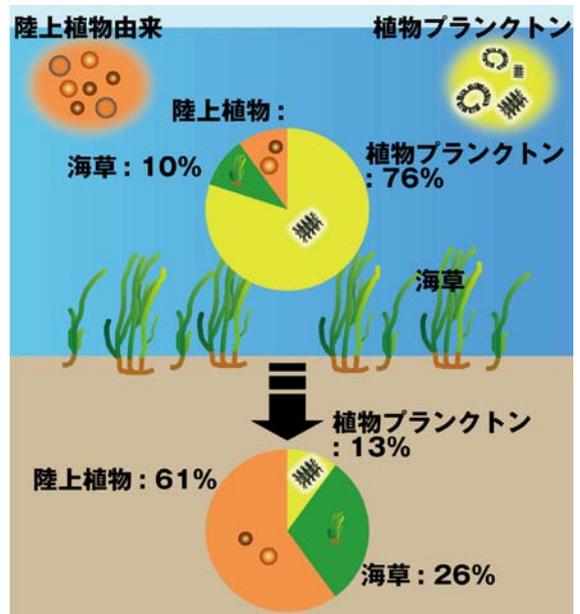


図7 網羅的な化学分析により、隔離された炭素の起源を定量化し、海草由来の炭素は貯留率が高く、植物プランクトン由来は貯留率が低いことを実証(Watanabe and Kuwae 2015)。

炭素で39%、易分解性の溶存有機炭素で76%減少していることが明らかとなった。

(4) 都市域がCO₂の吸収源になり得る機構的な仮説の提示と、都市型ブルーカーボン数理動態モデルの開発による仮説検証

なぜ都市域が大気中CO₂の吸収源になり得るかについて、既往の知見をとりまとめ機構的な仮説を提示した(Kuwae et al. under review). 内湾複合生態系モデル(ECOHYM, 干潟・浅海域-湾央域及び底生系-浮遊系を連結, 炭素-窒素-リン-酸素の共役循環の解析が可能)をベースに, 水処理法, 浅海域生態系の再生などの施策が炭素貯留, 生物生産, 水質改善に与える影響を定量的に予測できる「ブルーカーボン数理動態モデル」を新たに構築した。「気候変動の緩和」に寄与する「豊か」で「美しい」都市海域を構築や維持管理に資するツールとなっているか, 東京湾をモデルケースとして試算を実施した。詳細については, 今後順次公表予定である。

4. 今後の展開

緩和効果のみならず適応効果の定量化ならびに経済評価など, ブルーカーボン研究を格段に発展させるため, 国内外の世界第一線の研究者との国際共同研究を展開している。その研究では, 全球の浅海域において, 本研究で構築した「ブルーカーボン数理動態モデル」に, 波浪モデルや地形・粒径モデルをカップリングさせ, 気候変動予測や緩和・適応策に対する沿岸生態系の緩和・適応機能の応答を定量的に予測する計画である。さらに, 社会経済動態モデルとのカップリングにより緩和・適応策の有効性について経済的に評価する。

この研究により, 沿岸生態系ベースの海岸防御が, 構造物のようなハード的な海岸防御と比較し費用便益の観点から有利なのかどうかの推定や, 全球において, どのような生態系や地理的条件の場合に沿岸生態系ベースの緩和・適応策が効果的であるかの判定が可能になると期待される。

5. 発表実績

【主要発表論文】

Watanabe, K., and T. Kuwae (2015): How organic carbon derived from multiple sources contributes to carbon sequestration processes in a shallow coastal system? *Global Change Biology*, in press, DOI: 10.1111/gcb.12924

Kubo, A., M. Yamamoto-Kawai, and J. Kanda (2015): Seasonal variations in concentration and lability of dissolved organic carbon in Tokyo Bay. *Biogeosciences* 12, 269-279.

Tokoro, T., S. Hosokawa, E. Miyoshi, K. Tada, K. Watanabe, S. Montani, H. Kayanne, and T. Kuwae (2014): Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, 20, 1873-1884.

【主要招待講演】

桑江朝比呂 (2015): 海草場や内湾におけるCO₂吸収の意義, 第3回国際ブルーカーボン・シンポジウムin横浜, 横浜市情報文化センター

Kuwae T. (2014): CO₂ sequestration and carbon storage by estuarine and shallow coastal ecosystems. Blue Carbon International Workshop, Yokohama

桑江朝比呂 (2014): 東京湾の海草場におけるブルーカーボン研究, 第15回東京湾シンポジウム, 横浜赤レンガ倉庫

【主要報道発表】

2015年4月17日 毎日新聞 夕刊(14面), 沿岸植物CO₂吸収に貢献 港湾空港技術研 プランクトンより多く

2015年3月9日 東京新聞 朝刊 神奈川版(20面), 沿岸部のブルーカーボン研究先駆者 桑江朝比呂さん(44歳) 海の植物でCO₂削減

2014年3月24日 毎日新聞 朝刊 全国版(2面総合面), 海草が繁殖した沿岸域 実はCO₂の吸収源 港湾空港技術研 温暖化防止に効果

2014年1月10日 毎日新聞 朝刊 全国版(19面), CO₂吸収源 海に注目 温暖化に挑む