

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：82627

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630251

研究課題名（和文）気液固相中の炭素安定同位体測定手法開発によるブルーカーボン研究の新基盤技術創出

研究課題名（英文）Establishing the foundation of blue carbon studies by developing the methodology for the measurement of carbon stable isotopes in gases, liquids, and solids

研究代表者

桑江 朝比呂（Kuwaie, Tomohiro）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長

研究者番号：40359229

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：沿岸域はCO<sub>2</sub>の排出源と考えられてきた．ところが近年，海洋植物が豊富で活発な浅海域が大気中CO<sub>2</sub>の吸収源となっていて，吸収されたCO<sub>2</sub>がブルーカーボンとして貯留されている事例も散見されている．しかしながら，流動や物質の生成消費の時空間変化が激しく複雑な場という海域特性により，「吸収された大気中CO<sub>2</sub>が本当にその場で貯留されているかどうか」は不明であった．本研究では，大気中CO<sub>2</sub>の吸収や炭素隔離貯留機能に関連する炭素循環を炭素起源別に定量化可能にし，「ブルーカーボン研究」という新学術分野の基盤技術を創出するため，三相（気相・液相・固相）すべての炭素同位体比と炭素量を定量化する手法を開発した．

研究成果の概要（英文）：“Blue carbon”, which is carbon captured by marine living organisms, has recently been highlighted as significant carbon stocks due to the high burial rates and long-term sequestration. However, how much the atmospheric CO<sub>2</sub> taken up through air-sea gas exchange is sequestered, as organic blue carbon in shallow coastal ecosystems, is unclear. Moreover, linkages between the dynamics of the organic carbon derived from multiple sources and the carbon sequestration are poorly understood. We developed the methodology for the measurement of carbon stable isotopes in gases, liquids, and solids to quantify the relative abundance of multiple carbon sources and establish the foundation of blue carbon studies.

研究分野：沿岸生元素循環，沿岸生態学，沿岸環境工学

キーワード：気候変動 二酸化炭素 生態系サービス 環境計測 同位体

### 1. 研究開始当初の背景

これまで、海洋による CO<sub>2</sub> 吸収は外洋で発揮されていて、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 CO<sub>2</sub> の排出源と考えられてきた。ところが近年、海洋植物が豊富で活発な浅海域が、大気中 CO<sub>2</sub> の吸収源となっていて、吸収された CO<sub>2</sub> がブルーカーボン（海洋生物によって取り込まれた炭素）として浅海域に貯留されている事例も散見されている。しかしながら、河川・海底・外洋の影響を受け、流動や物質の生成消費の時空間変化が激しく、複雑な場という海域特性により、「吸収された大気中 CO<sub>2</sub> が本当にその場で貯留されているかどうか」は不明であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、大気中 CO<sub>2</sub> の吸収や炭素隔離貯留機能に関連する炭素循環を炭素起源別に定量化可能にし、「ブルーカーボン研究」という新学術分野の基盤技術を創出するため、三相（気相・液相・固相）すべての炭素同位体比と炭素量を定量化する手法を開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

浅海域生態系には様々な起源の無機炭素や有機炭素が混在している。したがって、ブルーカーボン（海洋生物によって海中に取り込まれた炭素）の貯留量を正確に推定するためには、浅海域の各境界（陸域、沖合、大気）から流入してくる各炭素を区別して定量化する必要がある。そこで本研究では、現地調査と採取試料の化学分析およびデータの統計解析によって、三相（気相・液相・固相）を網羅した炭素動態を評価する手法を開発した。

三相の炭素動態を実測するモデル水域として、北海道根室市に位置する風蓮湖を選定した。風蓮湖はオホーツク海に開口した汽水湖で、湖面積の大部分を海草藻場（アマモ場）が占めている（図1）。加えて、河川からの陸域負荷も受けており、多様な炭素起源が存在するため、モデル水域として好適であった。適風蓮湖では特に以下の2つの炭素動態に焦点を当てて現地観測を実施した。

(1) 固相（堆積物）への炭素貯留過程。堆積物は浅海域の炭素貯蔵庫として、最も重要なものと考えられている。しかしながら、陸域に接している浅海域は、ブルーカーボンだけでなく、陸上植物により取り込まれた炭素（グリーンカーボン）も流入して貯蔵されている。本研究では、固相の元素比（C/N比）および安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ）を網羅的に収集し、有機物起源混合モデル（Bayesian mixing model; SIAR）による統計解析を適用することにより、炭素貯留過程を定量的に推定する手法を開発した。

(2) 気相（大気中 CO<sub>2</sub>）の海草による直接取り込み。一般に、海草は水中の溶存無機炭

素を炭素源として取り込んでおり、水柱を介して間接的に大気中 CO<sub>2</sub> を隔離していると考えられている。しかし、水深が1m程度と浅い海草藻場では低潮位時に海草の葉部が海面に露出する様子がしばしば観察される（図1）。このような条件下では、海草はあたかも陸上植物のように、気相の大気中 CO<sub>2</sub> を液相の無機炭素を介さずに直接取り込む可能性がある。このような過程を実証するためには、気相と液相の炭素源を区別する必要があるが、これまでの研究で用いられてきた炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）では区別が困難であった。そこで本研究では、 $\delta^{13}\text{C}$  と同様に炭素の起源推定に用いることが出来る放射性炭素同位体濃度（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）に着目して、三相にまたがる炭素移動の解析方法を開発した。

(3) 液相（難分解性溶存有機炭素）の起源。これまで浅海域における炭素貯留の研究は、堆積物への埋没過程に焦点があてられてきた。一方、生物化学的に難分解な溶存有機炭素（DOC）が生成され長期的に液相に炭素が隔離される過程も存在する。DOCの安定同位体比分析はこのような過程の解析においても優れた手法である。しかしながら、海水中のDOC濃度は低く、なおかつ塩分が分析の阻害物質となるため、その分析は困難である。本研究では、ハロゲントラップによる塩素の除去機構をそなえた前処理ラインを開発し、液相の炭素同位体分析手法を検討した。

### 4. 研究成果

予想される起源有機物（陸上植物、植物プランクトン、海草藻類）とその混合物である堆積物（ブルーカーボンの長期的な貯蔵庫）および懸濁態有機物（堆積物へ沈降する炭素の指標）の元素比（C/N比）および安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ）を網羅的に測定し、統計モデルを適用することで有機物の構成割合を定量化した（図2）。その結果、陸上植物や海草に由来する有機炭素は植物プランクトンに由来するものに比べて、数倍から数十倍程度多く堆積物中に貯留されていることを突き止めた（Watanabe and Kuwae 2015a, 図3）。また、風蓮湖のアマモ場堆積物に貯



図1 風蓮湖の海草藻場（アマモ場）。低潮位時には海面にアマモの葉部が露出する。

留されている有機炭素の半分程度は陸域から流入してきたグリーンカーボン由来であることが定量化された。

風蓮湖において、塩分勾配に沿って採取した海草（アマモ）と溶存無機炭素試料について、 $\delta^{13}\text{C}$  および  $\Delta^{14}\text{C}$  の分析を実施した。その結果、これまでの知見と同様に、 $\delta^{13}\text{C}$  では大気中  $\text{CO}_2$  と溶存無機炭素を区別することができなかった。一方、 $\Delta^{14}\text{C}$  の値を用いると期待通りに大気中  $\text{CO}_2$  と溶存無機炭素を区別することができた（図 4 a）。そして、アマ

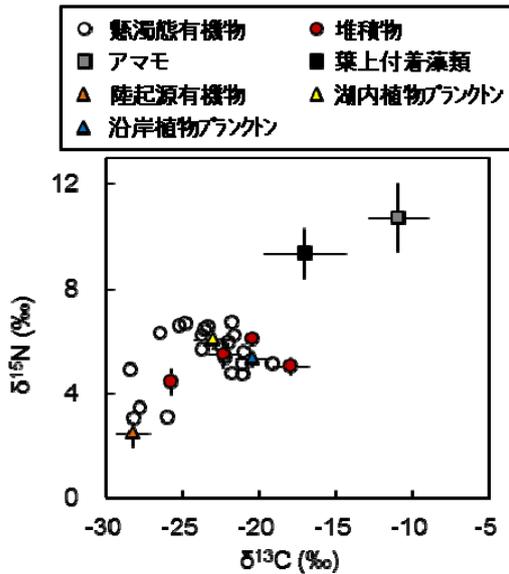


図 2 起源有機物とその混合物である堆積物および懸濁態有機物の安定同位体比。統計解析により、堆積物と懸濁態有機物に占める各起源有機物の構成割合を定量化した。

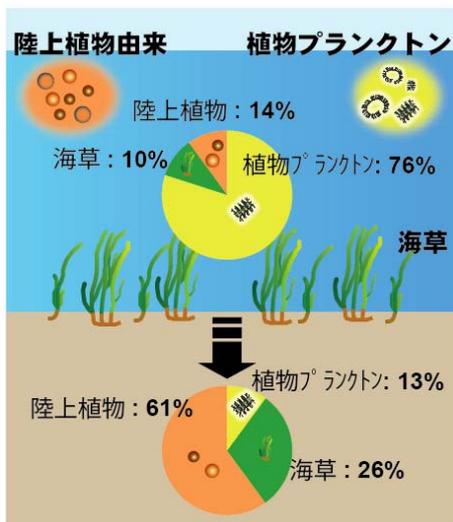


図 3 安定同位体比解析により推定された各起源有機物の構成割合。堆積物には植物プランクトンに比べて、陸上植物や海草が多く貯留される。

モは溶存無機炭素よりも有意に高い  $\Delta^{14}\text{C}$  を示し、溶存無機炭素よりも  $\Delta^{14}\text{C}$  のより高い大気中  $\text{CO}_2$  を同化していることが示された。炭素源混合モデルによって大気中  $\text{CO}_2$  の寄与率を解析した結果、アマモによる大気中  $\text{CO}_2$  の利用割合は 0~40%で変化し、平均は 17%であった (Watanabe and Kuwae 2015b, 図 4 b)。つまり、アマモ草体内に貯留された炭素の少なくとも 17%程度は大気  $\text{CO}_2$  の直接取り込みによるものであることを意味している。三相の同位体解析によって、「アマモは水中の溶存無機炭素を主な炭素源として使っている」という従来の考え方に加えて、「葉が干出する条件下ではアマモは大気中  $\text{CO}_2$  も炭素源として直接的に同化する」ということを実証することができた（図 5）。

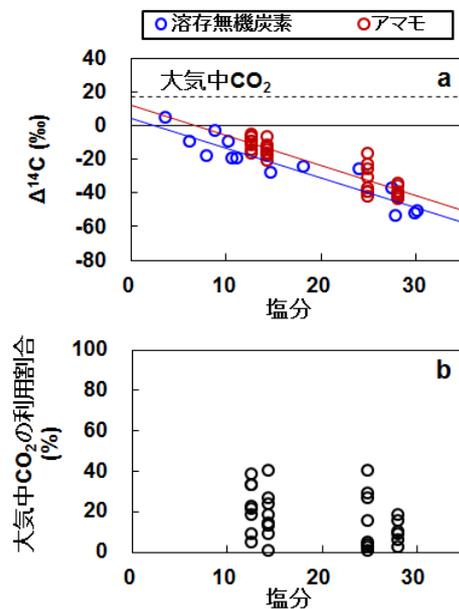


図 4 (a) アマモと溶存無機炭素の  $\Delta^{14}\text{C}$ 。溶存無機炭素よりも  $\Delta^{14}\text{C}$  の高い大気中  $\text{CO}_2$  をアマモが同化していることが示された。(b)  $\Delta^{14}\text{C}$  から推定された大気中  $\text{CO}_2$  の利用割合。

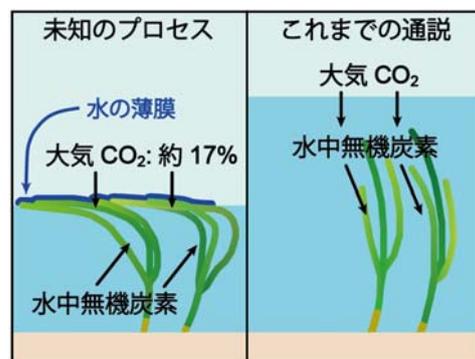


図 5 想定されるアマモによる大気中  $\text{CO}_2$  の直接取り込みプロセス。アマモは炭素源として平均 17%を大気中  $\text{CO}_2$  から利用している。



渡辺謙太・桑江朝比呂・三戸勇吾・高橋俊之・大西晃輝・井芹絵里菜・秋山吉寛・吉田稔・鳥羽光晴・岡田知也 (2015) 干潟における調整サービスの現況・持続可能性の定量評価. 土木学会論文集 B2-71 (海岸工学) : I1483-I1488 (査読有り).

所立樹・桑江朝比呂 (2015) 渦相関法による沿岸域の大気中 CO<sub>2</sub> 吸収・放出量のデータ品質管理. 土木学会論文集 B2-71 (海岸工学) : I1747-I1752 (査読有り).

所立樹・渡辺謙太・田多一史・桑江朝比呂 (2015) 港湾におけるブルーカーボン (CO<sub>2</sub> 吸収と炭素隔離) の計測手法のガイドライン. 港湾空港技術研究所資料 No. 1309, pp. 1-29 (査読有り)

田多一史・所立樹・渡辺謙太・茂木博匡・桑江朝比呂 (2015) 国内の様々な浅海域における海水中 CO<sub>2</sub> 分圧の実測と統計モデルによる予測. 土木学会論文集 B2-71 (海岸工学) : I1333-I1338 (査読有り).

[学会発表] (計 36 件)

Kuwae, T. (2017) Projecting global value of climate change mitigation and adaptation by coastal ecosystems. Blue Carbon Workshop- the role of coastal ecosystems in climate change mitigation and adaptation (招待講演).

渡辺謙太・清家弘治・安達寛・柴沼成一郎・長坂洋光・所立樹・田多一史・門谷茂・桑江朝比呂 (2017) 北海道東部の潟湖における有機炭素貯留特性. 日本生態学会第 64 回大会.

堀正和・桑江朝比呂 (2017) 沿岸浅海域のブルーカーボン推定-大気から海底貯留までのプロセス評価-. 日本生態学会第 64 回大会.

Watanabe K. and T. Kuwae (2016) Carbon Sequestration Processes in a Shallow Seagrass Meadow: Isotopic Approaches. The 2016 Ocean Science Meeting.

Tokoro and T. Kuwae (2016) Evaluation of the eddy covariance method for the assessment of coastal CO<sub>2</sub> flux. The 2016 Ocean Science Meeting.

Tokoro, T. and T. Kuwae (2016) Characteristics of coastal CO<sub>2</sub> flux estimated from comparison of eddy covariance method with conventional methods, Oceanflux Greenhouse Gases Evolution, Brest, France.

Tanaya, T., K. Watanabe, S. Yamamoto, C. Hongo, H. Kayanne, and T. Kuwae (2016) Characteristics of organic carbon accumulation in subtropical seagrass meadows. The 2016 Ocean Science Meeting.

Tanaya, T., K. Watanabe, and T. Kuwae (2016) Evaluation of the contribution of coral-derived organic matter to total

sedimentary organic matter by elemental and isotopic analysis. 13th International Coral Reef Symposium, Honolulu.

Moki, H., K. Taguchi, Y. Nakagawa, K. Hata, and T. Kuwae (2016) Estimation of the Physical Environments Influenced by Seagrasses in a Shallow Coastal Water Using a Numerical Model, The 2016 Ocean Science Meeting.

Moki, H., K. Taguchi, Y. Nakagawa, K. Hata, and T. Kuwae (2016) The Development of a Hydrodynamic Model to Investigate the Effects of Submerged Aquatic Vegetation (SAV) Drag Force on the Current Field. 7th India-Japan Symposium on Science and Technology for Sustainability (ISAJ Symposium-2016).

Wyatt, A., T. Miyajima, J. Leichter, T. Naruse, T. Kuwae, S. Yamamoto, N. Satoh, and T. Nagata (2016) Ecological and biogeochemical impacts of internal waves on mesophotic coral ecosystems: testing eddy covariance and isotope approaches, Iriomote, Japan. The 2016 Ocean Science Meeting.

Akhand, A., Chanda, A., Manna, S., Hazra, S. and Kuwae, T. (2016) Temporal Variability (Diurnal, Seasonal and Decadal Scale) of CO<sub>2</sub> Dynamics and Air-Water CO<sub>2</sub> Flux in a Tropical Macro-Tidal Estuary, East Coast of India. 2016 AGU Fall meeting

Yamamoto, S., H. Kayanne, C. Hongo, T. Tanaya, K. Watanabe, and T. Kuwae (2016) Dissolution of carbonate sediment at seagrass meadow estimated by total alkalinity flux and pore water profiles. 13th International Coral Reef Symposium, Honolulu.

桑江朝比呂・井上智美 (2016) ブルーカーボン (沿岸生態系) による緩和策と適応策. 日本生態学会第 63 回大会 (招待講演).

桑江朝比呂・伴野雅之・柳嶋慎一・中川康之・栗山善昭・棚谷灯子・井上智美・山野博哉・馬場繁幸 (2016) マルチコプターを用いた空撮によるマングローブ-干潟-海草場-サンゴ礁の地形測量の試み. 日本サンゴ礁学会第 19 回大会

桑江朝比呂・神田穰太・久保篤史・中島典之・小川浩史・相馬明郎・鈴木昌弘 (2016) 人間活動の影響を受けた河口浅海域における大気中 CO<sub>2</sub> の吸収に関する現地観測と生態系モデリング. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.

渡辺謙太・棚谷灯子・門谷茂・桑江朝比呂 (2016) サイズ分画と同位体分析による海草場堆積物の有機炭素貯留特性の評価.

日本地球惑星科学連合 2016 年大会.  
渡辺謙太・桑江朝比呂 (2016) 放射性炭素同位体による海草の大気由来 CO<sub>2</sub> 同化の定量化. 日本生態学会第 63 回大会  
棚谷灯子・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2016) 安定同位体比を用いたサンゴ由来有機物の堆積物への蓄積特性の検討. 日本サンゴ礁学会第 19 回大会  
棚谷灯子・渡辺謙太・山本将史・本郷宙軌・茅根創・桑江朝比呂 (2016) 亜熱帯性海草藻場における有機炭素蓄積量の制御条件としての海草現存量. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.  
田多一史・所立樹・渡辺謙太・山本将史・中山恵介・桑江朝比呂 (2016) 日本の浅海域における海水中 CO<sub>2</sub> 分圧に係る現地観測とパス解析. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.  
上中剛生・中國正寿・渡辺謙太・桑江朝比呂・山本修一 (2016) 有機物組成からみた風蓮湖堆積物へのアマモ由来有機物の寄与. 日本地球化学学会年会.  
山本将史・茅根創・本郷宙軌・棚谷灯子・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2016) 渦相関法と間隙水鉛直プロファイルを用いたサンゴ礁海草帯堆積物のアルカリ度フラックスの観測. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.  
川名優孝・刑部真弘・清水悦郎・三上己紀・桑江朝比呂 (2016) 産学官民連携による新しい研究連携組織の構築について. 産学連携学会第 14 回大会.  
Tokoro T. and T. Kuwae (2015): Evaluation of the Eddy Covariance Method for the Assessment of the Blue Carbon. 7th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces.  
Moki, H., K. Watanabe, K. Taguchi, Y. Tsuji, T. Tokoro, S. Montani, and T. Kuwae (2015) Estimation of carbon accumulation rate in shallow coastal waters using a numerical model. Meeting of Asia Oceania Geophysical Society (AOGS), Singapore  
桑江朝比呂・伴野雅之・中川康之・相馬明郎・茂木博匡・渡辺謙太・所立樹・栗山善昭 (2015) ブルーカーボン研究の将来: 気候変動の緩和と適応の両得. 海岸工学講演会 (招待講演).  
桑江朝比呂 (2015) 堆積物-水界面における渦相関法を用いた酸素フラックスの直接測定. 海洋理工学会平成 27 年度秋季大会プログラム (招待講演)  
渡辺謙太・桑江朝比呂 (2015) 浅海域の複数起源有機物動態と炭素隔離過程. 平成 26 年度高知大学海洋コア総合研究センター共同利用・共同研究成果発表会  
棚谷灯子・渡辺謙太・山本将史・本郷宙軌・茅根創・桑江朝比呂 (2015) 亜熱帯性海草藻場の有機炭素蓄積特性. 第 18 回サン

ゴ礁学会.  
茂木博匡・田口浩一・中川康之・畑恭子・桑江朝比呂 (2015) 沿岸メソスケールにおけるアマモ流動阻害効果の解析, 平成 27 年度日本海洋学会秋季大会公演要旨集.  
Kuwae T. (2014): CO<sub>2</sub> sequestration and carbon storage by estuarine and shallow coastal ecosystems. Blue Carbon International Workshop, Yokohama (招待講演).  
桑江朝比呂・所立樹・渡辺謙太・三好英一・茂木博匡・田多一史 (2014) 沿岸生態系における炭素フロー: ブルーカーボン研究. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会 (招待講演).  
渡辺謙太・門谷茂・桑江朝比呂 (2014) 河口域-海草場の堆積物に埋没する有機物の時空間的分布. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会  
茂木博匡・渡辺謙太・所立樹・桑江朝比呂 (2014) 沿岸海洋炭素循環モデルの基本構造について. 平成 26 年度海洋理工学会講演要旨集.  
茂木博匡・渡辺謙太・所立樹・門谷茂・桑江朝比呂 (2014) 北海道風蓮湖における海草場起源の POM 輸送解析. 平成 26 年度日本海洋学会秋季大会.

[その他]  
ホームページ等  
「ブルーカーボン: 海草や陸上由来の炭素は海底に貯留されやすい」  
[http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/bluecarbon\\_selective\\_storage.html](http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/bluecarbon_selective_storage.html)

「アマモは海中からだけでなく大気中の CO<sub>2</sub> も直接吸収している」  
[http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/assimilation\\_of\\_atmospheric\\_co2\\_by\\_seagrasses.html](http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/assimilation_of_atmospheric_co2_by_seagrasses.html)

「ブルーカーボン: 海草場は大気中 CO<sub>2</sub> を正味で吸収している」  
[http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/bluecarbon\\_co2sink.html](http://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/kuwae/bluecarbon_co2sink.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桑江朝比呂 (KUWAE, Tomohiro)  
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長  
研究者番号: 40359229

### (2) 研究分担者

渡辺謙太 (WATANABE, Kenta)  
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官  
研究者番号: 20725618