

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20500

研究課題名(和文)炭素同位体とチャンバー法を用いた海草・海藻による直接的な大気中CO<sub>2</sub>吸収の実証研究課題名(英文)Verification of the direct uptake of atmospheric CO<sub>2</sub> by coastal macrophyte using carbon isotopes and chamber method

研究代表者

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・主任研究官

研究者番号：20725618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸植生域が大気中CO<sub>2</sub>の正味の吸収源となることが近年分かってきた。本研究では、藻場における大気CO<sub>2</sub>吸収過程として、海面に露出した葉部からの直接的CO<sub>2</sub>吸収を実測する。海草の光合成を阻害しない透過フローティングチャンバーを開発し、海草場のCO<sub>2</sub>ガス交換量を実測した。計測の結果、亜寒帯と温帯の海草藻場において、夏季に日スケールでCO<sub>2</sub>吸収源になっていることが分かった。一方、本研究では明確な直接的CO<sub>2</sub>吸収をCO<sub>2</sub>交換量として検出することはできなかった。海草による直接的CO<sub>2</sub>吸収がCO<sub>2</sub>交換量に顕著に寄与するかどうかは、藻場の特徴(葉の露出時間や露出長等)に依存する可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海草等が大気に露出した際の直接的CO<sub>2</sub>吸収という未知の炭素フローの実測を行ったことは、学術的・社会的に意義のある成果と考えている。沿岸植生による大気CO<sub>2</sub>除去機能は気候変動緩和策への活用が期待されているが、大気CO<sub>2</sub>除去の過程には未だ評価できていない未知の炭素フローも残されている。ブルーカーボン生態系とも呼ばれる沿岸植生を大気CO<sub>2</sub>除去の目的で社会的に活用していく上では、こうした過程の解明を進めていく必要がある。

研究成果の概要(英文)：Recent studies have found that vegetated coastal habitats such as seagrass meadows can be a net sink for atmospheric CO<sub>2</sub>. This study aims to measure the direct CO<sub>2</sub> uptake from seagrass leaves exposed to the atmosphere in seagrass meadows. I developed a transparent floating chamber that does not inhibit photosynthesis of seagrasses, and measured CO<sub>2</sub> gas exchange rates in seagrass beds. The measurement results showed that seagrass meadows in the subarctic and temperate sites acted as CO<sub>2</sub> sinks on a daily scale during summer. On the other hand, direct CO<sub>2</sub> uptake was not detected as CO<sub>2</sub> exchange rates. This study suggested that whether direct CO<sub>2</sub> uptake by seagrasses contributes significantly to CO<sub>2</sub> exchange rates or not may depend on the characteristics of the seagrass meadows (e.g., exposure time and length of exposed leaf).

研究分野：生物地球化学

キーワード：海草藻場 大気CO<sub>2</sub>吸収 ブルーカーボン CO<sub>2</sub>フラックス アマモ 沿岸域

### 1. 研究開始当初の背景

海洋が大気中 CO<sub>2</sub> の重要なリザーバーとなっており、気候変動の緩和に貢献していることが広く認識されている。これに対して、沿岸浅海域は陸域由来有機物の分解や呼吸が卓越する場であるため、CO<sub>2</sub> の放出源として認識されてきた (Regnier et al., 2013 *Nature Geosci.*)。しかしながら、最近の研究によって、植生の分布する沿岸域においては大気中 CO<sub>2</sub> の吸収源となり得ることが明らかとなってきた。

研究代表者らのグループでは、日本の様々な緯度帯に分布する海草場において現地調査を実施し、海草場が大気中 CO<sub>2</sub> の正味の吸収源となっていることを世界で初めて実証した (Tokoro et al., 2014 *Glob. Change Biol.*)。そして、生態系による光合成と呼吸の収支である生態系純生産量によって、吸収源となるか放出源となるかが決定されるということを示した。すなわち、海草場が大気中 CO<sub>2</sub> を吸収する際の炭素フローは、1) 基礎生産者 (海草・微細藻類) が光合成により水柱の溶存無機炭素 (DIC) を取り込むことで、2) 化学平衡の変化により水中 CO<sub>2</sub> 分圧が低下し、3) 大気から水中へ CO<sub>2</sub> が吸収される、という流れで説明される。海草による大気中 CO<sub>2</sub> の取り込みは水塊を介したフローが一般的であるが、低潮位時に海草の葉部が海面に露出することで、水塊を介さない直接的な CO<sub>2</sub> 吸収フローが存在している可能性がある。海草による大気中 CO<sub>2</sub> 利用の可能性はこれまでの研究でも予見されていたが、定量化による実証はされていなかった。研究代表者らは従来の手法とは異なり、海草と溶存無機炭素の放射性炭素同位体を分析することによって、海草による大気中 CO<sub>2</sub> の同化を実証し、大気露出した際に葉に残る水の薄膜が効率的な大気中 CO<sub>2</sub> 吸収に貢献している可能性を示した (Watanabe et al., 2015 *Biogeosciences*) (図 - 1)。

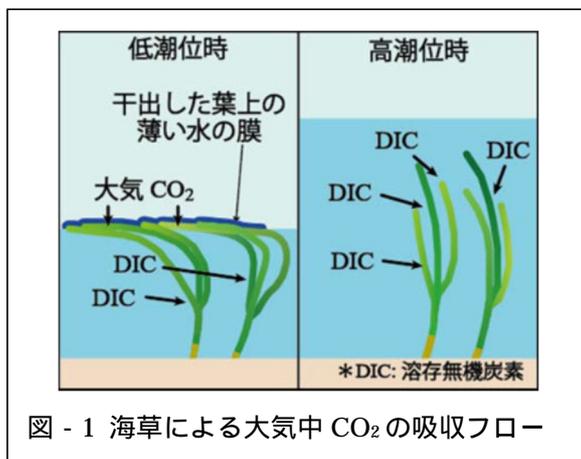


図 - 1 海草による大気中 CO<sub>2</sub> の吸収フロー

### 2. 研究の目的

本研究では沿岸植生による大気中 CO<sub>2</sub> 吸収フローの実測を目指す。すなわち、直接的 CO<sub>2</sub> 吸収フローの時空間的な普遍性、規模、メカニズムを明らかにすることである。沿岸植生による直接的 CO<sub>2</sub> 吸収の研究事例はこれまでに皆無であるが、海草や大型海藻が低潮位時に海面に露出する光景は多くの海域で観察されるため、気候帯等に関わらず普遍的なフローであることが予見される。本研究では、この炭素フローの時空間的な普遍性と規模、そしてそれらを決定するメカニズムについて、現地調査による解析を実施する。そして、沿岸植生が有している炭素隔離機能の定量的理解に資することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 透過フローティングチャンバーの開発

直接的 CO<sub>2</sub> 吸収を実測するために、透過フローティングチャンバーの開発を行った。開発にあたっては、当所所有のフローティングチャンバー (Tokoro et al., 2007 *J. Mar. Sys.*) と同様の構造で設計し、内部で光合成を行えるよう、材質は光が透過するアクリル製とした (図 - 2)。

#### (2) フローティングチャンバーによる計測

直接的 CO<sub>2</sub> 吸収を実測するため、実験サイトとして北海道のコムケ湖 (亜寒帯)、東京湾の横浜海の公園 (温帯) を選定した。これらの藻場の主要構成種はアマモである。実験はアマモの葉が伸長し、海面に到達する夏季に実施した。実験は各サイトで葉の露出度が異なる 2 実験区 (露出区、非露出区) を設定した。また、日中及び夜間において、それぞれ満潮 (完全水没) から干潮 (大気露出) までの CO<sub>2</sub> ガス交換速度の変化を実測した。計測では、透過フローティングチャンバーを水面に浮かべ、内部の CO<sub>2</sub> 濃度変動を連続測定し、CO<sub>2</sub> ガス交換量を直接的に測定した (図 - 2)。



図 - 2 透過フローティングチャンバーによる海草藻場での計測状況

### (3) バルク法による CO<sub>2</sub> ガス交換量の推定

藻場内海水と大気 CO<sub>2</sub> 分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) 差による CO<sub>2</sub> ガス交換量が 2 実験区 (露出区, 非露出区) で同等であることを確認するために, フローティングチャンバーによる計測中に表層水を採取し, CO<sub>2</sub> 分圧の測定を行った. 表層水サンプルの DIC 濃度, 全アルカリ度 (TAlk) は炭酸系測定装置 (ATT05, 紀本電子製) により実施した. 計測された DIC 及び TAlk から平衡計算により表層水  $p\text{CO}_2$  を計算した. また, 大気  $p\text{CO}_2$  は CO<sub>2</sub> センサー (CO2-09, 紀本電子製) により実測した. 実験サイト近傍の AMeDAS から取得した風向・風速データを用いて, バルク式により水面を介した CO<sub>2</sub> ガス交換量を計算した.

### (4) 放射性炭素同位体法

放射性炭素同位体濃度 ( $^{14}\text{C}$ ) を大気中 CO<sub>2</sub> のトレーサーとして利用し, 海草による大気中 CO<sub>2</sub> 同化量の推定を試みた. 各サイトにおいて, 植物試料と海水試料を採取した. 植物試料中の有機炭素および海水試料中の DIC を CO<sub>2</sub> ガスとして抽出し, 加速器質量分析計により分析した. 分析結果から葉および溶存無機炭素の  $^{14}\text{C}$  を算出した. 大気中 CO<sub>2</sub>, 溶存無機炭素, 葉の  $^{14}\text{C}$  を比較し, 大気中 CO<sub>2</sub> 同化量の評価を試みた.

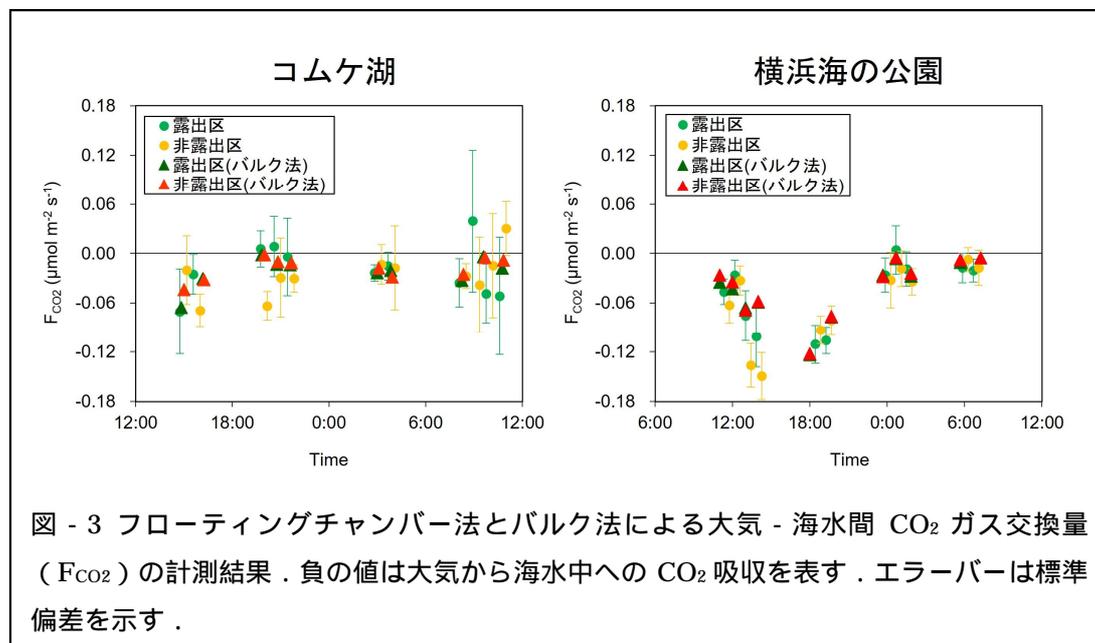
## 4. 研究成果

### (1) 海草藻場における直接的 CO<sub>2</sub> 吸収実測の試み

本研究では, 新たに開発したフローティングチャンバー法によって海草藻場による直接的な大気 CO<sub>2</sub> 吸収の実測を試みた. フローティングチャンバー法及びバルク法による CO<sub>2</sub> ガス交換量の計測結果を図 - 3 に示す. 夏季の計測結果から, コムケ湖及び横浜海の公園の海草藻場ともに, 大気 CO<sub>2</sub> の日スケールでの吸収源になっていることが分かった. 光合成が卓越する日中のみならず, 呼吸が卓越する夜間でも CO<sub>2</sub> を吸収しており, 1 日を通して大気から CO<sub>2</sub> を吸収していた. 既往研究でも示されているように, 生物活動の日周期がある藻場では 1 日を通じた観測が重要である (Tokoro et al., 2014 *Glob. Change Biol.*). 本研究の結果も, 海草藻場が実際に大気 CO<sub>2</sub> を日スケールで吸収する場であることを示した.

一方, 本研究では明確な直接的 CO<sub>2</sub> 吸収を CO<sub>2</sub> 交換量として検出することはできなかった. 透過フローティングチャンバーによって計測された露出区の結果は, 非露出区及びバルク法による海面での CO<sub>2</sub> 交換量の結果と明確な差異がなかった. このことから, 本研究で選んだ藻場においては, 少なくとも, 直接的 CO<sub>2</sub> 吸収が日スケールの CO<sub>2</sub> ガス交換量に有意に影響を与えるほどの規模ではないことが示唆される. 先行研究では北海道・風蓮湖において, 放射性炭素同位体法によって直接的 CO<sub>2</sub> 吸収が CO<sub>2</sub> ガス交換量に寄与することが予見されていた. 大気への葉の露出時間や葉の露出長は直接的 CO<sub>2</sub> 吸収に影響すると考えられるが, こういった要素は海草の葉長や水深, 潮位差などに起因すると考えられる. こうした要因の差によって, 本研究では直接的 CO<sub>2</sub> 吸収が明確ではなかったと考えられる.

放射性炭素同位体法による大気中 CO<sub>2</sub> 同化量の評価についても, 本研究の実験サイトにおいては適用が困難であった. 大気 CO<sub>2</sub> の  $^{14}\text{C}$  は 20‰程度であるが, コムケ湖と横浜海の公園の DIC はそれぞれ  $11.8 \pm 2.9\text{‰}$ ,  $-0.2 \pm 3.6\text{‰}$  であった. 実験サイトの DIC と大気 CO<sub>2</sub> の  $^{14}\text{C}$  は近い値を示しており, 海草へのこれらの寄与率を正確に計算することは困難である. 先行研究では, 親潮流域である風蓮湖において, DIC の  $^{14}\text{C}$  は  $-50\text{‰}$ 程度と大気 CO<sub>2</sub> と明確な差があるため, 本手法が適用できたと考えられる.



本研究の結果から、海草による直接的 CO<sub>2</sub> 吸収が CO<sub>2</sub> 交換量に顕著に寄与するかどうかは、藻場の特徴（葉の露出時間や露出長等）にも依存する可能性があることが示唆された。また、海草による顕著な直接的 CO<sub>2</sub> 吸収が普遍的ではない可能性も示された。一方、亜寒帯と温帯の 2 サイトにおいて、藻場が日スケールで大気 CO<sub>2</sub> を吸収していることを実測した。大気 CO<sub>2</sub> 除去を目的として藻場等を活用していく際に、堆積物等への炭素貯留の計測だけでなく、大気 CO<sub>2</sub> 吸収量の実測をしていくことがますます重要になると考えられる。本研究から見出された課題も踏まえて、今後も藻場等による大気 CO<sub>2</sub> 吸収量の計測手法を発展させていく必要がある。

## (2) その他の成果

本研究の主要な成果は上記のとおりであるが、その他の成果の概要を下記に示す。

沿岸植生の大気 CO<sub>2</sub> 吸収の規定要因を検討していく中で、生態系と系外の間での横方向の炭素輸送が大きく影響することが分かってきた。山口県・平郡島の大型海藻藻場（Watanabe et al., 2020 *Biogeosciences*）や沖縄県・石垣島のマングローブ 海草藻場 サンゴ礁連続帯（Akhand et al., 2021 *Sci. Total Environ.*）において、横方向の炭素輸送と CO<sub>2</sub> ガス交換量の関係性について評価した。

北海道・コムケ湖のアマモ場において現地調査を実施し、人為介入によるアマモ場の拡大が堆積物への炭素貯留量を増加させることを明らかにした（Watanabe and Kuwae, 2021 *J. Appl. Ecol.*）。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Watanabe Kenta, Kuwae Tomohiro	4. 巻 58
2. 論文標題 An unintended ecological benefit from human intervention: The enhancement of carbon storage in seagrass meadows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Ecology	6. 最初と最後の頁 2441 ~ 2452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1365-2664.13977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakakuni Masatoshi, Watanabe Kenta, Kaminaka Khoki, Mizuno Yukiko, Takehara Keiko, Kuwae Tomohiro, Yamamoto Shuichi	4. 巻 793
2. 論文標題 Seagrass contributes substantially to the sedimentary lignin pool in an estuarine seagrass meadow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 148488 ~ 148488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2021.148488	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akhand Anirban, Chanda Abhra, Watanabe Kenta, Das Sourav, Tokoro Tatsuki, Chakraborty Kunal, Hazra Sugata, Kuwae Tomohiro	4. 巻 153
2. 論文標題 Low CO2 evasion rate from the mangrove-surrounding waters of the Sundarbans	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biogeochemistry	6. 最初と最後の頁 95 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10533-021-00769-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Akhand Anirban, Watanabe Kenta, Chanda Abhra, Tokoro Tatsuki, Chakraborty Kunal, Moki Hirotada, Tanaya Toko, Ghosh Jayashree, Kuwae Tomohiro	4. 巻 752
2. 論文標題 Lateral carbon fluxes and CO2 evasion from a subtropical mangrove-seagrass-coral continuum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 142190 ~ 142190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.142190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Watanabe Kenta, Yoshida Goro, Hori Masakazu, Umezawa Yu, Moki Hirotada, Kuwae Tomohiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Macroalgal metabolism and lateral carbon flows can create significant carbon sinks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 2425 ~ 2440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/bg-17-2425-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 渡辺謙太、吉田吾郎、堀正和、梅澤有、茂木博匡、桑江朝比呂
2. 発表標題 温帯ガラモ場の代謝と炭素収支が大気中CO2吸収に与える影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

主任研究官: 渡辺 謙太   港湾空港技術研究所 沿岸環境研究グループ <a href="https://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/watanabe/">https://www.pari.go.jp/unit/ekanky/member/watanabe/</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------