

ブルーカーボン生態系におけるメタン放出は二酸化炭素吸収量をどの程度打ち消すのか？

久保 篤史

静岡大学

概要

本研究では、北海道紋別市のコムケ湖に広がるアマモ場において、海草場の CO₂吸収効果がメタン(CH₄)放出によってどの程度相殺されるのかを明らかにするため、CH₄(拡散およびバブル放出)と CO₂(拡散)のフラックスを季節的に観測した。

湖内 15 定点において表層水の化学特性と CH₄濃度、CO₂分圧を測定し、フローティングチャンバーによってバブル由来 CH₄フラックスも定量化した。CH₄は全観測点で過飽和となっており、特に 8 月に濃度およびフラックスが高かった。一方、CO₂は第 1 湖で未飽和が多く、吸収域として機能していた。CH₄放出のうちバブルの寄与は約 24%であり、CO₂の吸収量に対して CH₄放出(GWP-100 基準)の打消し率は約 8.2%、GWP-20 では約 24.6%であった。一方、第 2・3 湖では CO₂は放出域となっており、CH₄放出はさらに大きく、CO₂放出量の 2~4 倍の温室効果を持つ CH₄が排出されていた。

この結果から、湖全体での CO₂吸収量を第 1 湖のみで評価した場合、実態より 1.89 倍過大評価されることが明らかとなった。さらに、堆積物から水中への CH₄供給も季節的に異なり、6 月は堆積物起源、8・10 月は淡水流入由来の影響が大きいと推察された。

本研究により、ブルーカーボン生態系におけるメタンの寄与は無視できず、特にバブル放出の定量が正味の GHG 収支評価に不可欠であることが示された。今後は一酸化二窒素(N₂O)を含めた温室効果ガスの包括的評価が課題である。

1. 研究目的

海草場は大気中の二酸化炭素(CO₂)の吸収域として知られている⁽¹⁾。海草によって吸収された CO₂は有機炭素となり植物体に固定され、その後一部の有機炭素は堆積物へと長期間貯留される。そのため、海草場は気候変動の緩和策として有効である可能性があり、CO₂収支や堆積物への有機炭素貯留量の評価が精力的に行われている⁽¹⁾。水生植物場は CO₂の吸収域となる一方、メタン(CH₄)の放出域となる可能性がある。CH₄は CO₂より非常に強い温室効果ガスである。CO₂と比べた温室効果(温暖化係数(GWP))は 20 年間で比較(GWP-20)したときは約 84 倍、100 年間で比較(GWP-100)したときは約 28 倍である。そのため、CO₂の吸収量を主に評価している現在は、水生植物場における正味の温室効果ガス収支を過大評価している可能性がある。

近年、アマモ場における CH₄生成は、堆積物中有機炭素のメタン発酵ではなく、植物の二次代謝で生成するメチル化合物の分解で生成していることが指摘されている⁽²⁾。メチル化合物は主にメタン生成菌が利用することができ、水素イオンや酢酸イオンを介した反応とは異なり硫酸還元菌と競合することがない。メチル化合物は植物の枯死後も体内に残存するため、埋没した後の堆積物中からも供給される可能性がある。そのため、他の水生植物場に比べ、比較的塩分の高い海域に生息するアマモ場でも大気へ CH₄が放出されている可能性がある。例えば、アマモ場におけるメタン生成速度を推定した結果、0.09~2.7 Tg のメタンを大気に放出している可能性を指摘している⁽³⁾。しかし、これまでの報告は限られた季節による観測であり、アマモ場における CH₄フラックスを時空間

変動も含めてカバーしたものはほとんどなく、その推定には大きな不確かさがある。

CH₄はCO₂に比べ水中への溶解度が約30倍低い。そのため、堆積物中の全溶存ガス圧が静水圧と大気圧の和を上回るとバブルとして水中に放出されることが知られている。例えば、淡水の水生植物場において、CH₄フラックスの約48%がバブルで放出していると報告されている⁽⁴⁾。そのため、バルク法(大気中濃度と表層水濃度の差とガス交換係数から算出)を用いたフラックス評価では、バブルの影響を評価することができないため過小評価となる可能性があり、フラックスチャンバーを用いた評価が必要とされている⁽⁵⁾。しかし、淡水域でのチャンバーを用いた観測結果は多数あるものの、アマモ場から大気へのバブルを含めたメタン排出量の評価はほとんど行われていない⁽⁶⁾。

本研究では、北海道紋別市に位置するアマモ場であるコムケ湖において、フラックスチャンバーとバルク法を用いて正味の大気-海水間および堆積物-海水間におけるメタンフラックスの評価を行い、アマモ場におけるメタン収支の季節変化と変動要因推定を行った。

2. 研究方法

観測は北海道紋別市に位置するコムケ湖で観測をおこなった。コムケ湖は、面積5.81 km²、最大水深は3.8 mで第1湖から第3湖で構成されている。第1湖は全域にアマモ場が広がっている一方、第2・3湖は湿地帯に位置している。観測は2024年6月、8月、10月に行い、第1湖で12点、第1湖と第2湖の間・第2・3湖で1点ずつの計15点を定点とした。15定点では約5時間おきに約24時間表面採水観測を行った。表面採水時に塩分・水温・水深・溶存酸素濃度を、水温・塩分センサー(EC300, YSI Nanotech)・溶存酸素センサー(WQ-300, Horiba)で測定した。また、流入河川5点でも表面採水を行った。表層水はバケツで採取し、100 mL ガラスバイアル2本に分注し、CH₄濃度と全炭酸・アルカリ度分析用の試料とした。得られた全炭酸・アルカリ度からCO₂sysを用いて二酸化炭素分圧を算出した。

バブルで排出されるCH₄測定のために、5定点ではフローティングチャンバーを約24時間設置した。チャンバー回収時に時刻・シリンジに貯まった空気の量を記録し、その後シリンジ内の空気をシリンジ(5mL テルモシリンジ)で抜

き取り、真空バイアル(Exetainer 12 mL vial 839W, Labco)内に5 mL 注入した。フローティングチャンバーは、Wartman 博士作成のものと同様のものを作成した。

フローティングチャンバー観測を行った観測点では、アクリルコアを用いたダイバーによる直接採泥を行い、堆積物表層の間隙水メタン濃度分析用サンプルと炭素含有量測定用試料を採取した。

大気-海洋間のガス交換量は、CH₄は拡散とバブルの和、CO₂は拡散のフラックスとして評価した。拡散によるCH₄フラックス F_{dif} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)は以下の式(1)で計算した。

$$F_{dif} = k \times (C_{water} - C_{air}) \quad (1)$$

[C_{water}]は水中のCH₄濃度、[C_{air}]は大気中のCH₄濃度を示している。一方、CO₂フラックス F ($\text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)は以下の式(2)で計算した。

$$F = k \times K_0 \times (pCO_{2,water} - pCO_{2,air}) \quad (2)$$

K_0 はヘンリー定数、 $pCO_{2,water}$ と $pCO_{2,air}$ は海水・大気の一酸化炭素分圧を示している。また、式(1)・(2)の k はガス交換係数を表している。

バブルによるメタンフラックス(F_{eb} ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)は以下のとおり算出した。

$$C_{CH_4} = \frac{([CH_4] \times 16.01 \times P/1000)}{(8.3144 \times T)} \quad (3)$$

$$F_{eb} = C_{CH_4} \times V / S \times t \quad (4)$$

[CH₄]はチャンバーのシリンジ内にたまったガス中のメタン濃度、Pは海面気圧、Tは絶対温度を示している。

堆積物-水中間の拡散メタンフラックス J ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)は、以下の式(5)で計算した。

$$J = \Phi \times D_s \times \Delta C / \Delta z \quad (5)$$

Φ は空隙率、 D_s は拡散係数($\text{cm}^2 \text{day}^{-1}$)を示している。

3. 研究結果

コムケ湖第 1 湖にある湖口に近い観測点はその他の点に比べ塩分は高くなっていた一方、第 1 湖奥部や第 2 湖からの流入部で低かった。しかし、第 1 湖内で大きな違いは見られなかった。水温・塩分の日周変動は明瞭な変化が見られず、塩分と潮位も相関はみられなかった。

溶存酸素飽和度は、大部分で過飽和であるものの、湖口に近い観測点では大気平衡に近かった。湖中心の観測点では、全ての観測月において夜間から明け方にかけて未飽和となっていた。底層の溶存酸素飽和度は、10 月は表層と同程度であったが、8 月は一部の観測点で表層より底層で溶存酸素飽和度が高かった。一部の観測点では表層より低く、夜間に未飽和となっていた。コムケ湖第 2 湖・第 3 湖に位置する観測点では、第 1 湖に比べ塩分・溶存酸素飽和度共に低くなっていた。

コムケ湖第 1 湖の観測点では、二酸化炭素分圧は多くの観測時間・観測月において未飽和であった。コムケ湖第 2 湖・第 3 湖の観測点では比較的過飽和のことが多かった。ただ、いずれの場合も明瞭な日周変化は見られなかった。 CH_4 濃度は全ての観測月・観測点で過飽和になっていた。また、 CH_4 濃度の日周変化も、その他のパラメータと同様に明瞭な日変化は見られなかった。

コムケ湖第 1 湖の二酸化炭素分圧は、8 月以外は塩分と有意な相関関係 ($r=-0.36, -0.21, 0.49$; 6 月と 10 月は $p<0.05$)、 CH_4 濃度は 6 月のみ塩分と有意な負の相関関係 ($r=-0.47, -0.14, -0.15$; $p<0.05$)が見られた。また、二酸化炭素分圧と CH_4 には有意な相関関係はみられなかった ($p>0.05$)。二酸化炭素分圧と溶存酸素飽和度は、6・8 月の観測で有意な負の相関関係が見られた ($r=-0.41, -0.21, -0.36$; $p<0.05$)が、 CH_4 と溶存酸素飽和度には有意な相関関係はみられなかった ($p>0.05$)。

コムケ湖第 1 湖と第 2・3 湖における二酸化炭素分圧・ CH_4 濃度の季節変化を Fig 1., 2.に示した。コムケ湖第 1 湖における二酸化炭素分圧は年間を通して大部分が未飽和であったが、10 月は他の月に比べ有意に低くなっていた。一方、 CH_4 濃度は 6 月に最も低く、8 月が最も高くなっており、二酸化炭素分圧とは異なる季節変化であった。コムケ湖第 2・3 湖は、二酸化炭素分圧は年間を通して過飽和のことが多く、8 月に高くなっていた。第 1 湖とは異なり、

CH_4 と二酸化炭素分圧の季節変動は同様に 8 月に高くなっていた。

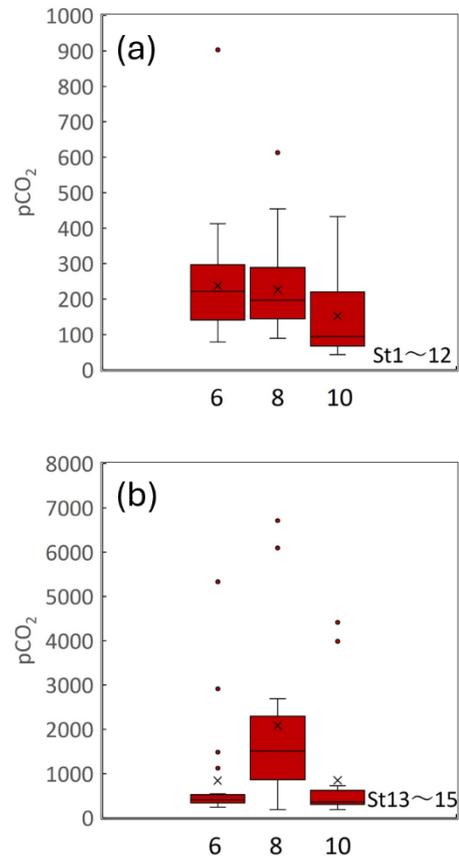


Fig 1. Seasonal variations of pCO₂ in Komuke Lagoon of (a) first basin and (b) second and third basin.

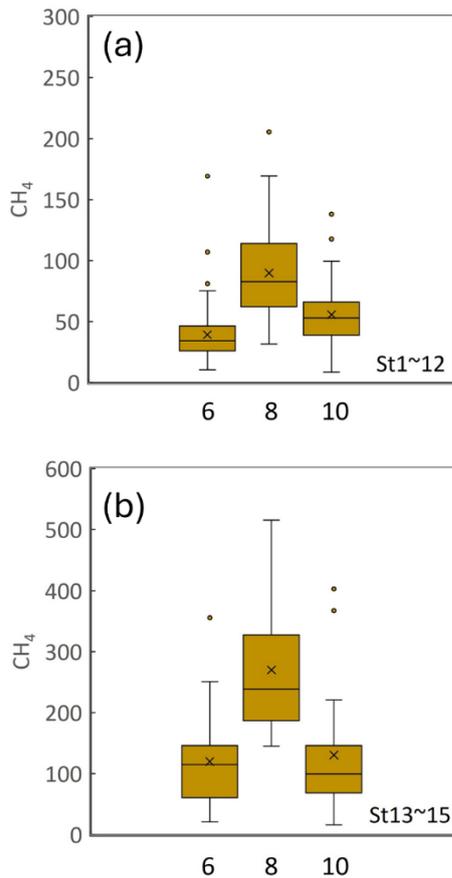


Fig 2. Seasonal variations of CH₄ in Komuke Lagoon of (a) first basin and (b) second and third basin.

コムケ湖に流入する河川水では二酸化炭素分圧・CH₄濃度は全て大気の数値に比べ高くなっており、河川の観測点全てでコムケ湖内の観測点15点全てより高かった。一方、溶存酸素飽和度は多くの場合未飽和となっていた。溶存酸素飽和度は8月に最も低くなっている一方、二酸化炭素分圧は最も高くなっていた。CH₄濃度は6月に最も低くなっており、8・10月に高くなっていた。

CO₂とCH₄の拡散フラックスとフローティングチャンバーによるメタンのバブルによるフラックスの季節変化をFig 3., 4.に示した。二酸化炭素分圧は10月に最も低くなっていたが、フラックスは各月において有意差がみられなかった。これは6月の観測時の風速が非常に速かったことに起因している。6・8・10月の平均風速はそれぞれ、 4.1 ± 2.6 , 1.8 ± 1.1 , 3.0 ± 1.1 m/sであった。フローティングチャンバーによるメタンフラックスはメタン濃度、拡散フラックスと同様に8月に最も高くなっていた。

二酸化炭素フラックスは、最も吸収量の多かった観測点で -8.8 ± 6.92 mmol m⁻² day⁻¹であった。一方、CH₄の拡散フラックスは 35.8 ± 41.2 μmol m⁻² day⁻¹、CH₄のバブルフラックスは 12.6 ± 15.3 μmol m⁻² day⁻¹でありCH₄の放出域であった。また、拡散によるフラックスの約24%がバブルとして排出されていた。バブルの寄与はコムケ湖第1湖で17.0~31.7%であり、CH₄収支評価を行うには無視できない結果であった。一方、コムケ湖第3湖は最もCH₄の拡散フラックスが高かった(91.9 ± 88.8 μmol m⁻² day⁻¹)が、バブルでの排出はコムケ湖第1湖と同程度であった(9.4 ± 7.2 μmol m⁻² day⁻¹)。

堆積物から排出されるCH₄フラックスの全観測月における平均フラックスは 48.3 ± 71.9 μmol m⁻² day⁻¹であった。

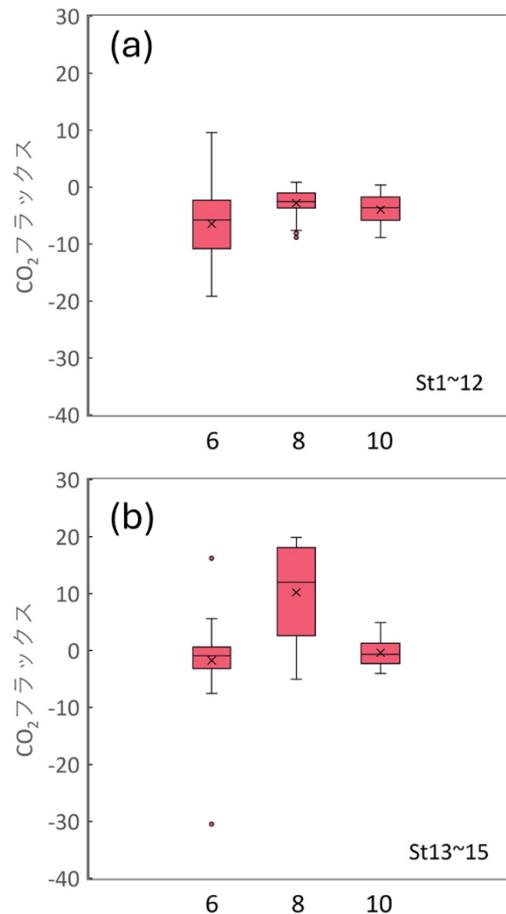


Fig 3. Seasonal variations of CO₂ flux in Komuke Lagoon of (a) first basin and (b) second and third basin.

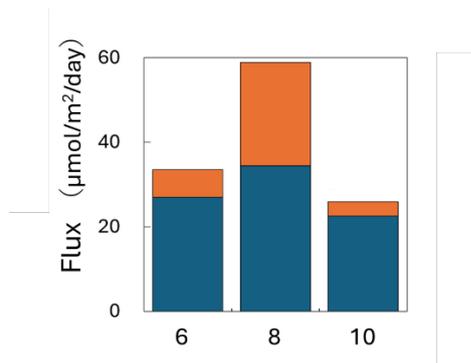


Fig 4. Seasonal variations of CH₄ flux in Komuke Lagoon. Orange and blue bar indicates ebullitive and diffusive flux, respectively.

4. 考察

コムケ湖第1湖の二酸化炭素分圧は全287データのうち277データで大気中の二酸化炭素分圧より低くなっており(平均 $212 \pm 125 \mu\text{atm}$), 二酸化炭素の吸収域として機能していた。一方, CH₄ は全データで大気濃度より高くなっており放出域となっていた(平均 $60 \pm 35 \text{ nmol L}^{-1}$)。CO₂ と CH₄ (拡散)・CH₄ (バブル)の平均フラックスはそれぞれ -5.83 ± 6.92 , 35.6 ± 8.2 , $11.3 \pm 10.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。この結果を, 地球温暖化係数(GWP-20・100)を用いて補正すると, それぞれ $-93.6 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, $17.5 \cdot 5.8 \text{ gCO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, $5.5 \cdot 1.8 \text{ gCO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ となり CO₂ 吸収量の CH₄ 放出によるキャンセル率はそれぞれ約 24.6%・8.2%であった。コムケ湖第2・3湖の二酸化炭素分圧は全60データのうち36回で過飽和であった(平均 $527 \pm 522 \mu\text{atm}$)。CH₄ は第1湖同様に全データで大気濃度より高くなっており放出域となっていた(平均 $118 \pm 80 \text{ nmol L}^{-1}$)。フローティングチャンバーを行ったコムケ湖第3湖における観測点での6~10月のCO₂・CH₄ (拡散)・CH₄ (バブル)の平均フラックスはそれぞれ $0.95 \pm 17.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $91.9 \pm 88.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, $10.5 \pm 7.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。地球温暖化係数(GWP-20, 100)を用いて補正すると, それぞれ $15.3 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, $45.1 \cdot 15.0 \text{ gCO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, $5.2 \cdot 1.7 \text{ gCO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ となり CO₂ 放出量に対して4.3倍・2.1倍になる。

コムケ湖第1・2・3湖の面積をそれぞれ 4.22 km^2 , 0.60 km^2 , 0.73 km^2 とすると, コムケ湖全体での CO₂ 吸収量は $-2.10 \text{ GgCO}_2 \text{ year}^{-1}$ となる。これは, コムケ湖第1湖の CO₂ 吸収量 ($-3.95 \text{ Gg year}^{-1}$) だけで評価した吸収量は

1.89倍過大評価となっていた。また, Eyre et al. (2023) は世界のアマモ場における有機炭素貯留速度に対する CH₄・一酸化二窒素を合わせたキャンセル率を推定しており, キャンセル率を 33.4%(GWP-20)・7.0%(GWP-20)と報告している⁽⁷⁾。コムケ湖第1湖では100年スケールでの有機炭素貯留速度は $14.7 \pm 1.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ と報告されている⁽⁸⁾。そのため, 本研究から得られたメタンフラックスによるキャンセル率を評価すると 23.7%(GWP-20)・7.8%(GWP-20)となり, 世界のアマモ場に比べ CH₄ による炭素貯留効果の中央値に比べ打消し率は低かった。コムケ湖は人工的に水路を開いたことにより海水交換が増加し, アマモ場が拡大して有機炭素貯留速度が増加している。しかし, 炭素貯留速度は世界のアマモ場における中央値 (25.1 ± 5.3) に比べ低いものの, コムケ湖同様に *Zostera sp.* が優占するアマモ場とは同程度であった。*Zostera sp.* のアマモ場では打消し率が 25.8%(GWP-20)・-0.8%(GWP-20)と報告されていることよりコムケ湖は *Zostera sp.* のアマモ場で比較すると打消し率は高くなっていた。これは主に CH₄ フラックスがコムケ湖の方が1.5倍程度高いことに起因していると考えられる。Eyre et al. (2023) の評価ではバブルによるフラックスの評価を行っていないこと, コムケ湖ではメタンフラックスの約24%がバブルによるものであることを考えると, 総合的な結果である。そのためにも, アマモ場でもバブルを含めたフラックス推定を行っていくことはより詳細に温室効果ガス収支推定を行っていくうえで重要である。

コムケ湖第1湖における CH₄ 収支を Fig 5. に示した。6月は堆積物から水中へのフラックスが大気へのフラックスに比べ高くなっていたが, 8・10月は堆積物からのフラックスより大気へのフラックスの方が高くなっていた。そのため, 6月は堆積物からの CH₄ 供給, 8・10月は低塩分域からの CH₄ 供給の影響が大きかったと考えられる。河川水の CH₄ 濃度は10月に最も高く, 次いで8月に高くなっていた。一方, 6月は8月の5分の1程度であった。第1湖と第2湖の間にある観測点においても同様の傾向であったため, 6月は淡水からの CH₄ 供給が相対的に少なかったと考えられる。また, 底層の溶存酸素飽和度は8月に低くなっていた。そのため, バブルでのフラックスが高くなっていたと考えられる。

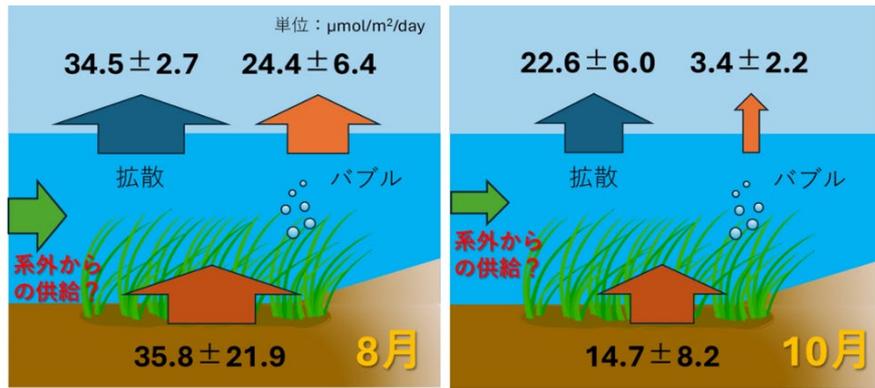


Fig 5. Mass balance of CH₄ in Komuke Lagoon (first basin).

5. 今後の課題

本研究では CO₂・CH₄ より強力な温室効果ガスである一酸化二窒素の測定を行っていない。一酸化二窒素は GWP-100 が 265 と非常に高い。Eyre et al. (2023) はアマモ場における一酸化二窒素フラックスを $-0.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ と見積もっており、 $-3.9 \text{gCO}_2\text{-eq m}^{-2} \text{year}^{-1}$ の吸収量となることを報告している⁽⁷⁾。そのため、アマモ場において一酸化二窒素はわずかに吸収域として機能している可能性がある。しかし、アマモ場における大気-水中間の一酸化二窒素フラックスの評価はほとんど行われていない。例えば、Al-Haj et al. (2022) は二酸化炭素吸収に比べて無視できると報告している⁽⁹⁾。しかし、季節変化を考慮した一酸化二窒素のフラックス推定は行われていない。そのため今後は、正味の温室効果ガス収支推定を行っていくことで、ブルーカーボン生態系の真の炭素貯留効果が明らかにしていく必要がある。

6. 文献

- Rosentreter, J. A., Laruelle, G. G., Bange, H. W., Bianchi, T. S., Busecke, J. J. M., Cai, W.-J., Eyre, B. D., Forbrich, I., Kwon, E. Y., Maavara, T., Moosdorf, N., Najjar, R. G., Sarma, V. V. S. S., Van Dam, B., and Regnier, P., 2023, Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink. *Nature Climate Change*, **13**, 579-587.
- Schorn, S., Ahmerkamp, S., Bullock, E., Weber, M., Lott, C., Liebeke, M., Lavik, G., Kuypers, M. M. M., Graf, J. S., and Milucka, J., 2022, Diverse methylotrophic methanogenic archaea cause high methane emissions from seagrass meadows. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**, e2106628119.
- Garcias-Bonet, N., and Duarte, C. M., 2017, Methane production by seagrass ecosystems in the Red Sea. *Frontiers in Marine Science*, **4**, 340.
- Baur, P. A., Pinilla, D. H., Glatzel, S., 2024, Is ebullition or diffusion more important as methane emission pathway in a shallow subsaline lake?, *Science of The Total Environment*, **912**, 169112.
- Wik, M., Varner, R. K., Anthony, K. W., MacIntyre, S., and Bastviken, D., 2016, Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release, *Nature Geoscience*, **9**, 99-105.
- Yau, Y. Y. Y., Reithmaier, G., Majtényi-Hill, C., Serrano, O., Piñeiro-Juncal, N., Dahl, M., Mateo, M. A., Bonaglia, S., and Santos, I. R., 2023, Methane emissions in seagrass meadows as a small offset to carbon sequestration, *Biogeosciences*, **128**.
- Eyre, B. D., Camillini, N., Glud, R. N., & Rosentreter, J. A., 2023, The climate benefit of seagrass blue carbon is reduced by methane fluxes and enhanced by nitrous oxide fluxes. *Communications Earth & Environment*, **4**, 1-9.
- Watanabe, K., and Kuwae, T., 2021, An unintended ecological benefit from human intervention: The enhancement of carbon storage in seagrass meadows, *Journal of Applied Ecology*, **58**, 2441-2452.
- Al-Haj, A. N., Chidsey, T., and Fulweiler, R. W., 2022, Two temperate seagrass meadows are negligible sources of methane and nitrous oxide. *Limnology and Oceanography*, **67**, 193-207.

Seasonal Variation of Methane Fluxes in Seagrass Meadow in Lake Komuke, Hokkaido

Atsushi Kubo

Shizuoka University

Summary

This study evaluated the extent to which methane (CH₄) emissions offset carbon dioxide (CO₂) uptake in seagrass meadows, focusing on Komuke Lagoon in northern Japan, which is dominated by *Zostera marina*. Seasonal observations were conducted from June to October 2024 at 15 sites using both the bulk method and floating chambers to quantify CH₄ and CO₂ fluxes. CH₄ was supersaturated at all sites throughout the study period, with peak emissions occurring in August. In contrast, surface water in Komuke Lagoon first basin remained largely undersaturated with respect to CO₂, indicating net atmospheric CO₂ uptake. Ebullition accounted for approximately 24% of total CH₄ fluxes, indicating its significant contribution. Based on global warming potential (GWP) metrics, CH₄ emissions offset 24.6% (GWP-20) and 8.2% (GWP-100) of CO₂ uptake in the first basin. However, the second and third basins acted as CO₂ sources and exhibited even higher CH₄ emissions, resulting in CH₄-induced warming effects that exceeded CO₂ emissions by factors of 2 - 4. The study also identified seasonal variations in CH₄ sources, with sediment-derived CH₄ dominating in June and freshwater-derived CH₄ contributing more substantially in August and October. These findings underscore the importance of accounting for CH₄ emissions - particularly from ebullition - when evaluating the net greenhouse gas (GHG) budget of blue carbon ecosystems. The results also suggest that CO₂-based assessments alone may substantially overestimate the GHG mitigation capacity of seagrass meadows. Future studies should incorporate nitrous oxide (N₂O) measurements to enable a more comprehensive evaluation of GHG dynamics in coastal vegetated systems.