

マングローブ湿地と海洋間の炭素循環研究

中　村　　航*

1. はじめに

熱帯・亜熱帯の沿岸域に分布するマングローブ林は，地球上でも有数の炭素に富む生態系であり，単位面積当たりの炭素隔離量は一般的な陸上森林の約 3 倍に達する（Donato et al., 2011）．近年では，ブルーカーボンの概念の普及に伴い，マングローブ林が有する高い炭素貯留能力に注目が集まっている．一方で，マングローブの炭素循環には，長年にわたり「Missing carbon」と呼ばれる問題が存在してきた．マングローブ林の純一次生産速度（NPP）は，土壌への有機炭素埋没速度の 10 倍以上に達し，従来知られていた炭素フローだけでは固定された炭素の行方を十分に説明できなかった．この問題を説明する仮説の一つとして，有機物の分解によって生成された溶存無機炭素（DIC）が，潮汐によって隣接する海洋へ輸送されるという仮説が提唱された（Bouillon et al., 2008）．その後，観測事例の蓄積により，DIC の海洋輸送はマングローブ生態系における主要な炭素フローの一つとして認識されるようになった（Maher et al., 2018; Santos et al., 2021）．

近年ではさらに議論が発展し，海洋へ輸送された DIC のうち，どの程度が大気への CO_2 放出を免れ，海洋に長期的に隔離されるのかという点に関心が集まっている（Santos et al., 2021; Reithmaier et al., 2023）．一般に，有機物の好気的分解では CO_2 が生成され，水中の CO_2 分圧が上昇することで大気への CO_2 放出が促進される．一方，マングローブ湿地では DIC の増加とともに全アルカリ度（TA）が増加することが知られている．TA の増加は水中の炭酸平衡を変化させ，DIC が重炭酸イオン（HCO_3^-）などの形で存在することを促すため，生成された DIC の一部は CO_2 として大気に放出されずに海洋へ輸送され，長期的に保持される可能性がある．こうした TA の増加には，硫酸還元に伴うパイライトの形成や炭酸塩の溶解などが関与しており，その炭素隔離機構は岩石の風化を介した海洋への炭素貯留とも共通する点が多い．これは，マングローブ生態系には，従来注目されてきた土壌への有機炭素貯留に加え，有機物が分解された後も海洋に DIC として炭素を隔離するという，「見逃されてきた」炭素貯留機能が存在する可能性を示している（Santos et al., 2021; Reithmaier et al., 2023）．

私は博士課程を通じて，隆起サンゴ礁を後背地にもつ日本のマングローブ湿地を対象に，マングローブ湿地から海洋へ輸送される DIC の動態と，その炭素貯留機能について研究してきた．もともと理工学部の土木系学科の出身であり，海洋化学とは縁遠いところから始まった研究であったが，港湾空港技術研究所（港空研）の桑江さんの研究グループをはじめ，多くの方々からのご厚意とご助言に支えられながら研究を進めることができた．これらの研究成果の一部は，すでに和文解説として報告しているため（中村ら，2025），本稿では，マングローブクリークからの CO_2 排出，同位体を用いた炭素フローの追跡，そして時間軸を考慮した炭素循環の評価という博士課程で取り組んだ

*ケベック大学リムースキ校海洋科学研究所

46 回石橋雅義先生記念講演会（令和 8 年 4 月 25 日）講演

一連の研究について，当時の研究環境や研究を進めるなかでの試行錯誤も交えながら紹介したい．

2. クリークからの CO_2 排出を捉える

今でこそ，マングローブの炭素循環に関する研究背景を一通りのストーリーとして説明できるようになったが，研究を開始した当時は何も知らなかったと言っても過言ではない．もともとブルーカーボン研究に興味があり，博士研究のテーマを自分で決められる環境にいたことから，高い炭素隔離能力を持つ一方で，その水域が大気への大きな CO_2 排出源となるという，一見矛盾するマングローブの炭素循環に興味を持った．また，打算的ではあるが，競争率の高そうな海草藻場を避け，分布域が限られ調査の難しいマングローブを研究対象に選んだという側面もあった．

研究室としてマングローブを対象とした調査は初めてであったため，まずは指導教員の佐々木淳教授とともに石垣島と西表島を視察し，調査地を選定するところから始まった．最終的に，クリーク内の流況を捉えやすく，渦相関法による観測タワーの設置にも適していた石垣島の吹通川マングローブ林を調査地に選定した（図 1）．博士研究を進めるためには早期のデータ蓄積が必要であったことから，研究初年度は，①渦相関法による群落スケールの CO_2 収支の観測，②可搬型 CO_2 計によるマングローブクリーク内の CO_2 分圧の連続観測，③採水試料を用いた DIC と TA の測定，という 3 つを目標に掲げた．

調査には，当時同じ研究室の修士課程に在籍し，



図 1　幻となった渦相関法のための観測タワーとクリークでの CO_2 分圧測定の様子

ミャンマーの森林管理局でマングローブ林の管理に携わっていた Phyo さんにも参加していただいた．2 人で計 37 日間，石垣島のマンスリーマンションに滞在し，特別研究員奨励費を惜しみなくつぎ込み，さらには研究室の運営費にも大きな負担をかけながら，要所では港空研の渡辺さんや国立環境研究所の所さんにもご協力いただき，何とか調査を完遂した．残念ながら測器の故障により渦相関法による観測は実現しなかったが，クリーク内の CO_2 分圧については約 3 週間にわたる連続観測データを取得できた．足場の悪いマングローブ林の中を，毎日約 35 kg もの鉛バッテリーを運搬・交換する作業に付き合っていただいた Phyo さんには，今でも頭が上がらない．

観測の結果，吹通川マングローブ林では，下げ潮時にクリーク内の CO_2 分圧が 4000〜6000 µatm まで上昇し，満潮時の 10〜15 倍に達することが明らかになった（図 2）．また，満潮から干潮にかけて DIC と TA の濃度もそれぞれ約 1.5 倍に増加し，その増加幅は 1000 µmol/kg 以上に達した．DIC と TA の変動パターンから，CO_2 分圧の上昇には複数の有機物分解過程が関与しており，主に好気的分解と硫酸還元が寄与していることが示唆された．さらに，CO_2 分圧には大潮・小潮に対応した約半月周期の変動も認められた．これは，日潮不等に伴うマングローブ土壌の冠水時間の変化によって，小潮時には TA に対する DIC の生成量が相対的に大きくなることに起因すると考えられた（Nakamura et al., 2024）．

3. 炭素収支を捉える

1 年目の調査で，マングローブクリークからの CO_2 排出を捉えることができたが，「見逃されてきた」マングローブの炭素貯留機能を評価するためには，DIC の海洋輸送量も合わせて定量化する必要があった．そのためには，詳細な流況観測に加え，海洋へ輸送される DIC のうち，マングローブに由来する量を明らかにする必要があった．また，これらを実現するためには，特別研究員奨

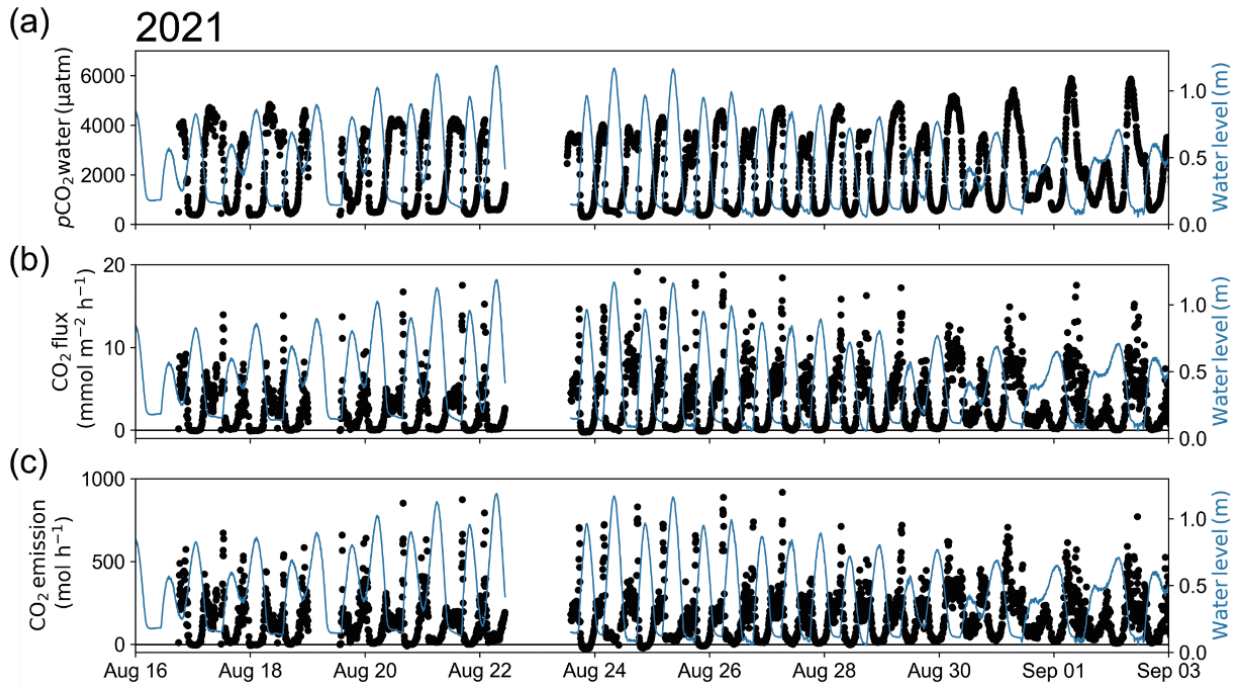


図 2　2021 年の観測で明らかになった潮汐（青線）に対する（a）クリークの CO_2 分圧，（b）クリークから大気への CO_2 フラックス，（c）クリーク全体からの CO_2 排出量の時系列変化（Nakamura et al., 2025a）.

励費だけでは足りず，追加の研究費の確保も課題であった.

まず，DIC の起源を明らかにするため，その供給源を反映する DIC の安定炭素同位体比（$\delta^{13}C_{DIC}$）の測定を計画した．そこで，東京大学大気海洋研究所の宮島さんにメールで連絡したところ，大変快くご協力いただけることとなった．宮島さんには，同位体分析のみならず，マングローブ水域の炭素循環について多岐にわたりご教示いただき，現在も多くのことを学ばせていただいている.

また，マングローブ土壌とクリークの間の間隙水交換を定量化するため，ラドンやラジウム同位体を用いた観測も実施したいと考えていた．幸運にも，港空研の渡辺さんが別の科研費課題でマングローブ調査を実施することとなり，地下水交換の研究を専門とする福井県立大学の杉本さんの研究室も交え，吹通川で合同観測を実施できることとなった．当時，杉本研究室の博士課程に在籍していた中島さん（現・大気海洋研究所特任助教）にも大変お世話になり，私の研究に必要な短寿命ラジウム同位体（^{224}Ra，^{223}Ra）の分析も実現した．今振り返っても，大変幸運な巡り合わせであったと思う.

資金面でも，深田研究助成と東京大学挑戦的新領域博士研究助成制度に採択され，2 年目も Phyo さんとともに計 43 日間，石垣島のマンスリーマンションに滞在して調査を実施することができた．多くの方々の協力により，同位体を用いた観測も実現し，クリーク内のラジウム同位体濃度が上昇する際に，DIC と TA も増加し，$\delta^{13}C_{DIC}$ が低下する様子を捉えることができた（図 3）．この結果から，マングローブ土壌からの間隙水交換が，クリークへの DIC と TA の主要な供給経路であることが示された．また，短寿命ラジウム同位体の半減期の違いを利用して水の滞留時間を推定したところ，約 1 日という結果が得られた．すなわち，間隙水交換によってクリークに供給されたマングローブ由来 DIC の多くが，比較的短時間で沿岸海域へ輸送されることが示唆された．さらに，$\delta^{13}C_{DIC}$ を用いた起源解析から，供給された DIC の約 9 割がマングローブ由来，残りの約 1 割が炭酸塩由来であることも明らかになった.

一方，炭素収支を評価するための流況観測には苦戦した．観光業との兼ね合いからクリーク中央

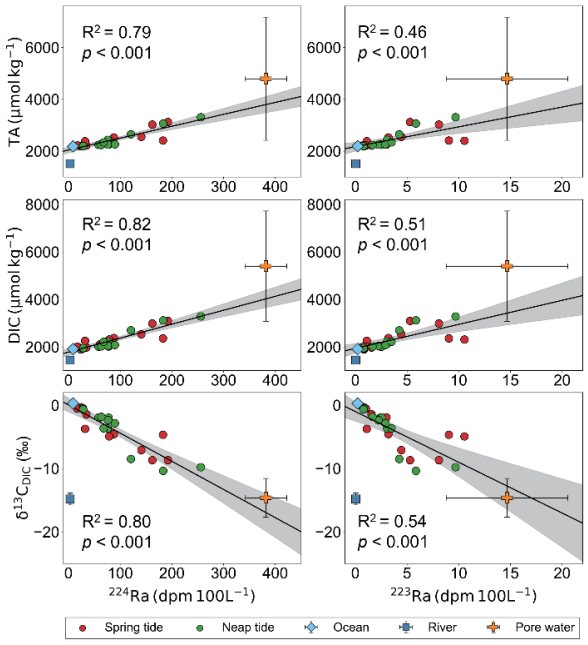


図 3　短寿命ラジウム同位体比（^{224}Ra，^{223}Ra）と TA，DIC，$\delta^{13}C_{DIC}$ の関係．赤と緑は大潮・小潮時のクリークでの時系列採水結果であり，外洋水（水色）と間隙水（橙色）の間に位置することが分かる（Nakamura et al., 2025a）．

部に流速計を常設することができず，クリーク脇の測定値から推定した水交換量には大きな不確実性が残った．連続観測を諦め，数時間おきにクリーク中央部で流速を測定する方法も試みたが，十分な精度を得ることはできなかった．いくら DIC 濃度や同位体比を正確に測定できても，水交換量の推定に大きな不確実性があれば，DIC 輸送量の推定値が大きく変わり，炭素収支の結論そのものが左右されてしまう．

悩んだ末，我ながら名案と思える方法にたどり着いた．吹通川では国土地理院の数値標高モデルが利用可能であったため，これと高時間分解能で観測した水位データを組み合わせることで，潮汐に伴うマングローブ水域内の貯水量の変化を連続的に計算できると考えた（図 4）．実際に計算してみると，各時刻における水域内の水量を算出することができ，その変化量を積算することで，日単位の水交換量を高い再現性で推定することができた．

こうして，吹通川マングローブ林の炭素収支を評価した結果，生産された DIC のうち，約 11%

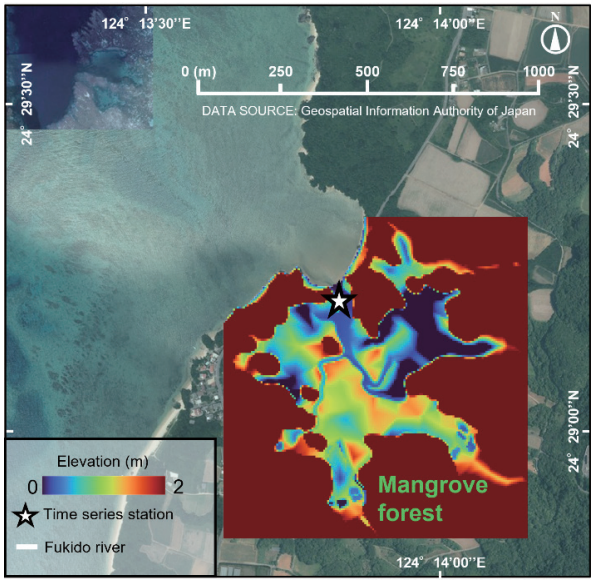


図 4　吹通川マングローブ水域の数値標高モデル．潮間帯に生育するマングローブ林の標高が陸域と比較して低い様子が分かる．

が CO_2 として大気に放出される一方，残りの約 89% は大気に放出されることなく沿岸海域へ輸送されることが明らかになった（Nakamura et al., 2025a）．さらに，港空研の皆さんによる過去の渦相関法を用いた観測では，隣接する沿岸海域が大気中 CO_2 の吸収源として機能していることが報告されていた（Tokoro et al., 2014）．これらの結果は，マングローブ湿地から大量の DIC が海洋へ輸送される一方で，そのすべてが直ちに大気へ放出されるわけではなく，海洋における炭素貯留に寄与している可能性を示唆している．他地域のマングローブ湿地における観測例と比較しても，吹通川では CO_2 として大気に放出されずに海洋へ輸送される DIC の割合が高く，その一因として炭酸塩の溶解に伴う TA の増加が考えられた．

4. 炭素循環を時間軸で捉える．

博士課程 2 年目を迎えるにあたり，もう一つどうしても取り組みたい研究があった．それは，放射性炭素同位体比（$\Delta^{14}C$）を用いて，マングローブの炭素循環を時間軸で捉える研究である．きっかけは，Maher et al.（2017）を読んだことであった．この研究は，$\Delta^{14}C$ 分析により，マングロー

ブから流出する DIC が，数百年以上前に固定・蓄積された有機物の分解に由来する可能性を示したものである．特に革新的だと感じたのは，従来の炭素収支に関する研究に，炭素が「いつ固定されたものなのか」という時間の概念を導入した点であった．

気候変動緩和策としてマングローブのブルーカーボンを考えるうえでは，土壌に蓄積された有機炭素がどの程度長期的に保持され，数百年から数千年という時間スケールで大気への CO2 放出を抑制できるのかを評価することが重要である．一方，前述のように，DIC の海洋輸送はマングローブ生態系における極めて大きな炭素フローである．この DIC の生産を支えているのは，近年固定された有機物なのか，それとも長い年月をかけて土壌に蓄積されてきた古い有機物なのか．この疑問を明らかにしたいと考えた．

$\Delta^{14}C$ を用いた研究を何としても実施したいと思い，国内で分析可能な機関を探していたところ，大気海洋研究所の横山研究室で測定できることが分かった．早速，横山先生にメールで連絡し，直接研究計画を説明する機会をいただいたところ，快く放射性炭素分析にご協力いただけることとなった．

同年の夏には，吹通川において，マングローブ土壌やクリーク水に加え，沿岸海域に生育する海草やサンゴなどの試料を網羅的に採取し，$\Delta^{14}C$ 分析を実施した．その結果，夏季の大潮時に吹通川から流出する DIC は，明確に低い $\Delta^{14}C$ 値を示すことが明らかになった（図 5）．さらに，炭酸塩溶解に伴う古い炭素の供給による影響を補正し，マングローブ土壌有機物の $\Delta^{14}C$ と比較したところ，流出する DIC には，深さ 45〜83 cm に埋没した約 80〜630 年前に固定された有機物の分解に由来する炭素が含まれている可能性が示された（Nakamura et al., 2025b）．これらの結果は，マングローブからの卓越した DIC 輸送には，近年固定された炭素だけでなく，数百年前に固定され，土壌中に隔離されてきた古い炭素も関与していることを示唆している．また，沖合に生育する海草やサンゴは主に，マングローブではなく外洋水由来の DIC を取り込んでいることも明らかになった．

5. その他のマングローブ研究と今後の展望

マングローブ学会での出会いをきっかけに，南山大学の藤本先生のご厚意により，これまでに 3 度，ミクロネシア連邦ポンペイ島でのマングローブ調査に参加させていただいた．ポンペイ島には，日本の亜熱帯域では見られないほど大きく発達した熱帯マングローブ林が広がっていた．調査を通じて，マングローブ林の立地動態や海面上昇の影響など，それまでの化学観測だけでは十分に捉えられていなかった，森林としてのマングローブの側面を学ぶことができた．また，藤本先生の調査でご一緒した森林総合研究所の小野さんには，マングローブ土壌について多くのことをご教示いただき，その奥深さを知る機会となった．

また，本稿では詳しく紹介しなかったが，博士課程 3 年目には吹通川以外の 7 つのマングローブクリークでも調査を実施し，2025 年度には石垣島の名蔵アンパルマングローブ林と奄美大島の住

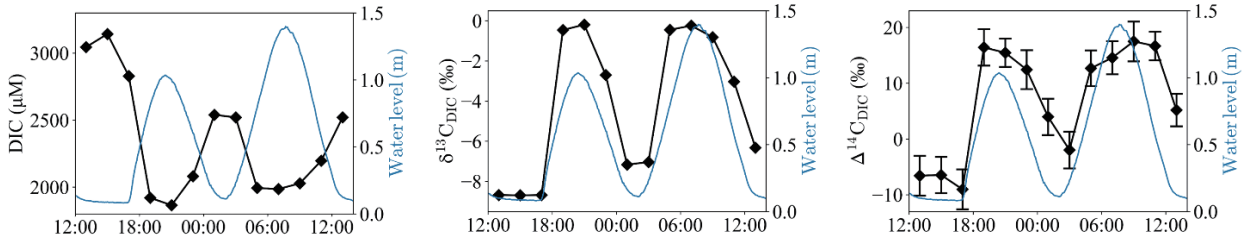


図 5　吹通川マングローブクリークにおける DIC 濃度，$\delta^{13}C_{DIC}$，$\Delta^{14}C_{DIC}$ の時系列変化．マングローブから海洋へ物質が輸送される下げ潮時に DIC 濃度が増加し $\Delta^{14}C_{DIC}$ が下がる様子が見られる（Nakamura et al., 2025b）．

用川マングローブ林において，$\Delta^{14}C$ を用いたさらに詳細な調査を実施することができた．これまでの研究を通じて，マングローブ湿地における炭素収支については多くのことが明らかになってきた．一方で，なぜ長年土壌に隔離されてきた古い有機物が分解されるのかなど，その過程に関する疑問は今なお尽きない．今後も，陸と海の境界に位置するマングローブ湿地を研究の場として，炭素をはじめとする物質の移動や変換過程を明らかにし，地球表層における物質循環の理解を深めていきたい．

謝辞

海洋化学奨励賞への応募を勧めてくださった滋賀県琵琶湖環境科学研究センターの山口さん，推薦頂いた横山先生，ならびに選考委員の皆様に心より感謝申し上げる．また，これまでの研究を通じて，共同研究や野外調査，分析など，様々な形で支えてくださったすべての皆様に，この場を借りて深く御礼申し上げる．

引用文献

1. Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. Nature geoscience, 4 (5), 293–297.
2. Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., ... & Twilley, R. R. (2008). Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. Global biogeochemical cycles, 22 (2).
3. Maher, D. T., Call, M., Santos, I. R., & Sanders, C. J. (2018). Beyond burial: lateral exchange is a significant atmospheric carbon sink in mangrove forests. Biology letters, 14 (7), 20180200.
4. Santos, I. R., Burdige, D. J., Jennerjahn, T. C., Bouillon, S., Cabral, A., Serrano, O., ... & Tamborski, J. J. (2021). The renaissance of Odum's outwelling hypothesis in'Blue Carbon'science. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *255*, 107361.
5. Reithmaier, G. M., Cabral, A., Akhand, A., Bogard, M. J., Borges, A. V., Bouillon, S., ... & Santos, I. R. (2023). Carbonate chemistry and carbon sequestration driven by inorganic carbon outwelling from mangroves and saltmarshes. *Nature Communications*, *14* (1), 8196.
6. 中村航，渡辺謙太，所立樹，遠藤徹，桑江朝比呂，佐々木淳．2025 年．石垣島吹通川河口におけるマングローブ湿地を介した無機炭素動態．月刊海洋 2025 年 4 月号．
7. Nakamura, W., Naing, P. T., Watanabe, K., Tokoro, T., Gempei, K., Endo, T., ... & Sasaki, J. (2024). Changes in DIC/TA ratio by tidal asymmetry control pCO2 over a spring-neap tidal cycle in a subtropical mangrove forest in Japan. *Geochemical Journal*, *58* (1), 28–45.
8. Nakamura, W., Watanabe, K., Nakajima, T., Sugimoto, R., Miyajima, T., Tokoro, T., ... & Sasaki, J. (2025a). Insights into the comprehensive carbon cycle in a mangrove ecosystem: A case study for understanding carbon burial, outgassing, and outwelling in a subtropical island. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *130* (12), e2025JG009232.
9. Maher, D. T., Santos, I. R., Schulz, K. G., Call, M., Jacobsen, G. E., & Sanders, C. J. (2017). Blue carbon oxidation revealed by radiogenic and stable isotopes in a mangrove system. Geophysical Research Letters, 44 (10), 4889–4896.
10. Nakamura, W., Tsuchiya, K., Watanabe, K., Miyajima, T., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., ... & Sasaki, J. (2025b). Radiocarbon analysis reveals decomposition of old soil organic

carbon into dissolved inorganic carbon in a subtropical mangrove ecosystem. *Limnology and Oceanography*, *70* (6), 1740–1754.

11. Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E., Tada, K., Watanabe, K., Montani, S., ... & Kuwae, T. (2014). Net uptake of atmospheric CO 2 by coastal submerged aquatic vegetation. *Global change biology*, *20* (6), 1873–1884.