

淡水域ブルーカーボン実証実験地における基礎的環境調査

摺石 瑞希* 宇野 宏司**

A Basic Environmental Survey at the Freshwater Blue Carbon Demonstration Test Site

Mizuki SURIISHI* Kohji UNO**

ABSTRACT

A Blue carbon is a generic term for carbon dioxide (CO₂) absorbed by marine organisms, and is attracting attention as a global warming countermeasure due to its high CO₂ absorption efficiency. Kobe City has begun efforts to expand the Blue Carbon Project, which has been implemented in marine areas, to freshwater areas such as lakes, marshes, and reservoirs. In this study, a basic environmental survey of the planned demonstration site was conducted to determine whether the remaining Satoyama reservoirs in the suburbs have the environmental potential suitable for the growth of waterweeds as a CO₂ sink, in order to widely develop the Blue Carbon Project for freshwater in the future. As a result, from the viewpoint that the pCO₂ in Okuikue Pond is higher than that in Karasuhara Reservoir, the site of the preceding demonstration experiment, waterweeds and other plants are expected to be activated through transplantation of waterweeds.

Keywords : blue carbon, freshwater area, water plant growth, stratification, pCO₂

1. はじめに

地球温暖化対策として全世界が温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)の排出削減に取り組む中、優れた CO₂ 吸収源として、ブルーカーボンが注目を集めている。ブルーカーボンとは、海の生物を通じて吸収・貯留された CO₂ のことで、2009 年国連環境計画(UNEP)の報告書において命名された⁽¹⁾。地球温暖化におけるブルーカーボンを隔離・貯留する海洋生態系として、海草藻場、海藻藻場、湿地・干潟、マングローブ林が挙げられ、これらの生態系を軸としてブルーカーボンに関する研究や開発が活発に行われている。図 1 にブルーカーボン吸収・貯留の仕組み⁽²⁾を示す。

海水への CO₂ 吸収量には、水温、塩分、CO₂ 分圧(以後、pCO₂)等のパラメータが関係していることが明らかにされている。田多ら⁽³⁾は、成層の成長に伴い、表層に植物プランクトンによる光合成の影響が集中することで、溶存無機炭素(DIC)が低下し pCO₂ が小さくなることを報告している。また、齋藤ら⁽⁴⁾は、混合状態の異なる条

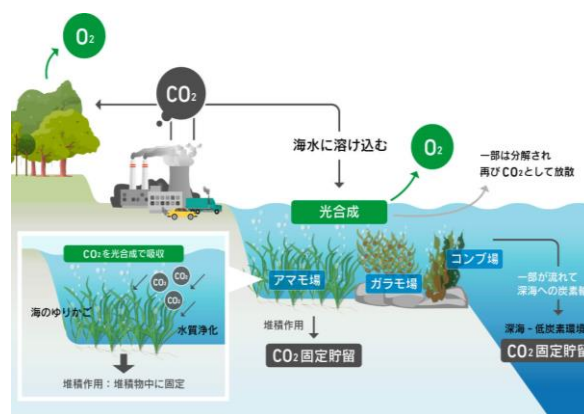


図 1 ブルーカーボン吸収・貯留の仕組み⁽²⁾

件で現地調査を実施した結果、強い成層の発達に伴う植物プランクトンによる光合成の集中により DIC が低下することを示している。加えて、日中における CO₂ の吸収量が混合状態によらず CO₂ 吸収傾向にあることを指摘している。このように、これまで海域でのブル

* 専攻科 都市工学専攻

** 都市工学科 教授



図2 鳥原貯水池での実証実験の様子



図3 調査地点(奥池・口池)

ブルーカーボンに関する研究については多くの知見が集約されつつあるが、淡水域においてはほとんど展開されてこなかった。

淡水域ブルーカーボンの先行研究として、神戸市では、2020年度より鳥原貯水池(同市兵庫区鳥原町)において、ササバモ(*Potamogeton wrightii* Morong)の移植実験を行い、同種の定着性を確認した事例(図2)がある⁽⁵⁾。ササバモは沈水植物の一種であり、大阪府レッドリスト2014によると「準絶滅危惧種」に指定されているが、北海道、本州、四国、九州と広範囲に生育し、主に湖沼・河川・水路で自生している。花期は7~9月、花茎は4~11cmで、冬には地下茎の先端に殖芽を形成して越冬するという特徴がある⁽⁶⁾。

神戸市内の都市河川流域には農業用ため池が多数残存している。それらは、淡水域ブルーカーボンの固定源となる水草の生育ポテンシャルが高い空間となりうるが、近年は管理者の高齢化や離農化によって放棄さ

表1 調査概要

内容	目的	測定項目	調査地点
連続モニタリング調査	水草育成場の物理的環境把握	平均風向風速 水温・気温・水深	奥池
採水調査	水草育成場の化学的環境把握、炭素固定機能評価	栄養塩 T-N, T-P 全アルカリ TA 無機溶存炭素 DIC クロロフィル	奥池 口池

れているところも多く、適切な管理がなされていないために水質悪化が進み流域の環境劣化を招くなど、その機能を十分に発揮できていない状況にある。このような都市近郊に残存する未活用・放棄された貯水池を淡水ブルーカーボンの固定源として活用することが可能となれば、里山の再生のみならず、低炭素社会の実現にも貢献できることが期待される。しかし、当然のことながら、そのような小規模ため池の物理環境や水質についてはデータが皆無なため実証実験を展開できるかどうかの判断がつかない。

このような社会背景を踏まえ、本研究では、都市近郊に残存する農業用ため池を対象に、淡水域ブルーカーボン実証実験の展開のための基礎的環境調査を実施し、ササバモなどの水草の生育に適したポテンシャルを有するかどうか、先行実証実験地で取得されたデータと比較によって検討した。

2. 研究方法

本研究で対象とする実証実験地である奥池(同市須磨区)は、かつては数十世帯で構成された小さな集落が農業用ため池として使用していたが、現在は数世帯が利用することにとどまっている。

図3に本研究での調査地点(奥池・口池)を示す。また、調査概要を表1に示す。調査は2021年9月より開始し、現在も継続中である。淡水ブルーカーボンの実証実験が始まって間もない奥池では、ブルーカーボン機能を評価する上で重要な指標である、溶存CO₂が炭酸イオンや炭酸水素イオンに解離できる能力を表し、CO₂の移動速度を見積もるためのパラメータであるTA(全アルカリ度)、水中の無機炭素成分である溶存CO₂、炭酸水素イオン、炭酸イオンの総量であり、TAと同様にCO₂の移動速度を見積もるためのパラメータであるDIC(溶存無機炭素)、ササバモ等の水草の成長を促す栄養塩量を見積もるためのパラメータであるT-N(総窒素量)、T-P(総リン量)を調べる採水調査と、成層構造や物理環境を把握するための連続モニタリング調査を実施した。連続モニタリング調査では、月1回のペー

表2 水質分析方法の概要

指標	分析方法	分析装置・使用薬品等
TA DIC	クローズドセル法	・全アルカリ度滴定装置 (ATT-15: 紀本電子工業製) ・飽和塩化第二水銀溶液
T-N T-P	連続流れ分析法	・オートアナライザー (QuAAtro 2HR: ビーエルテック製)
クロロフィル	in vivo 蛍光光度法	・アクアフルオハンドヘルド蛍光光度計 (AquaFluor: TURNER DESIGNS) ・ローダミン溶液

スで稼働中の機器からのデータ回収とメンテナンスを実施した。採水は2022年7月までに計7回実施した。なお、奥池の下流で接続する口池では、採水調査のみ行った。また、採水調査にて得られたデータを先行実証実験地である鳥原貯水池のものと比較し、水草の生育に適したポテンシャル空間を有するか検証した。

2.1 連続モニタリング調査 奥池での連続モニタリング調査では、水深、池畔の気温と大気圧(以上, HOBO U20L-04, Onset 社), 風向・風速(KDC-S04-05103, Northone 社), 表層0.2m水温 (HOBO TidbiT v2 UTBI-001, Onset 社)と底層直上の水温・水深(HOBO U20L-04, Onset 社)を1時間ごとに測定した。なお、水深については、現地で計測された水圧と気圧データから大気補正を行った上で換算して求めたものである。

2.2 採水分析による各指標の測定 採水は奥池の最深地点(図3の○地点)で実施した。底層水は、ゴムポートからハイロートを垂下し、底層直上にて採水し、直ちに表層水をポリ瓶(500ml), デュラン瓶(100ml)に満水状態で充填した。

採水後の各水質の分析方法の概要を表2に示す。大気-水中間のCO₂の移動に関する重要なパラメータとされるTA(全アルカリ度), DIC(無機溶存炭素)については、水試料100mLあるいは250mLをデュラン瓶にて採取後、速やかに80μLあるいは200μLの飽和塩化第二水銀溶液を添加し、全アルカリ度滴定装置(ATT-15: 紀本電子工業製)を用いたクローズドセル法により測定した。TNとTPについては未ろ過試料を分析に供した。分析はオートアナライザー(QuAAtro 2HR: ビーエルテック製)を用いた連続流れ分析法により行った。

2.3 pCO₂の計算 水中の各炭酸系の濃度を求めるためには、pCO₂, pH, 全炭酸、及びTAの4項目のうち、任意の2項目の値を使用すれば、残りの2項目の値を求めることができる。本研究では、水質分析で得られたTA, pHからCDIAC(Carbon Dioxide Information

表3 気温・水温・風向風速の統計値

期間		期間I 2021年 09月	期間II 2021年 11月	期間III 2021年 12月
気象イベント		なし	寒冷前線通過	3つ玉低気圧
平均値	気温(°C)	22.7	11.2	6.7
	表層水温(°C)	23.4	13.4	10.1
	底層水温(°C)	21.8	13.0	9.7
	水深(m)	2.5	2.1	2.2
	平均風速(m/s)	0.5	0.5	1.0
標準偏差	気温(°C)	±1.7	±2.5	±3.2
	表層水温(°C)	±0.6	±0.9	±1.0
	底層水温(°C)	±0.1	±0.4	±0.3
	水深(m)	±0.2	±0.2	±0.1
	平均風速(m/s)	±0.5	±0.4	±0.8
出現風向	最頻出	北 (27.0%)	北北東 (34.2%)	北北東 (24.8%)
	次点	北北東 (19.5%)	東北東 (14.2%)	東 (18.0%)
	次々点	西北西 (12.6%)	北 (9.7%)	東北東 (12.4%)

Analysis Center)が提供するpCO₂の計算ソフトのCO2SYSを用いてpCO₂を計算した⁷⁾。

3. 結果と考察

3.1 連続モニタリング調査 各期間の気温・水温・風向風速の統計値を表3に示す。また、図4~図6に気象擾乱に起因する成層破壊が見られた時の2パターンと晴天時の1パターン、合計3パターンの連続モニタリング結果を示す。なお、これらの図における降雨量は、気象庁アメダスの観測点「神戸」の時間雨量データ⁸⁾を使用した。

図4のような成層期においては、晴天時では太陽光の影響を受け周期的に変化する表層水温に対し、底層水温はそれに応じた変化が見られずほぼ一定で推移し、期間全体にわたり成層が形成されている様子が確認できる。一方、図5や図6のような混合期においては、晴天時では日射量が低いために表層と底層の水温差が小さいために殆ど成層は形成されず、また水深が低いため風等の攪乱によって表層と底層の水が混合しやすい状態となっている。

図5では、風はそれほど強く吹いておらず、寒冷前線通過時の集中的な降雨によって水深が増加し、一時

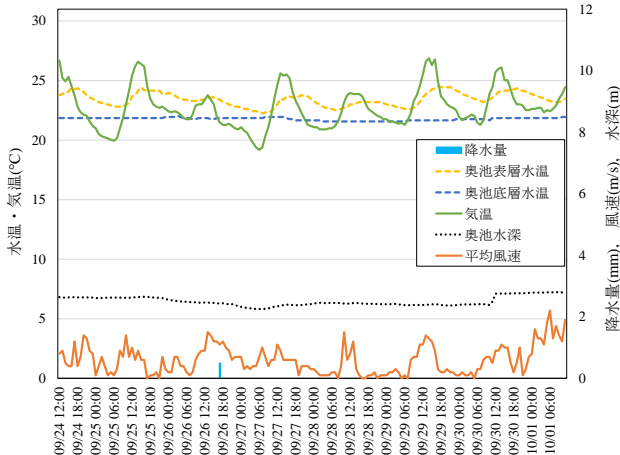


図4 連続モニタリング結果(期間I)

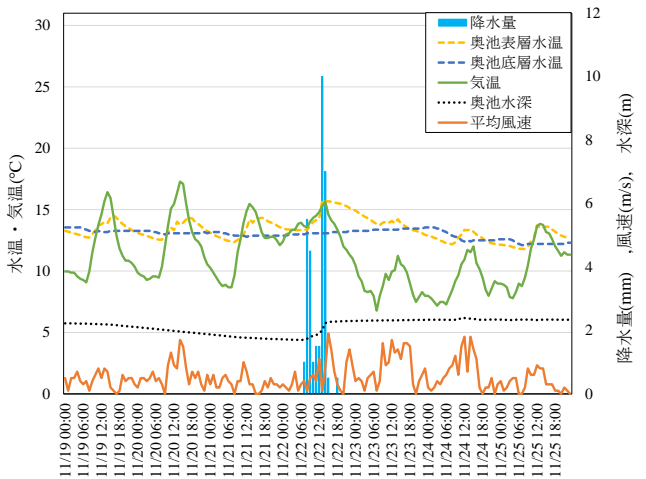


図5 連続モニタリング結果(期間II)

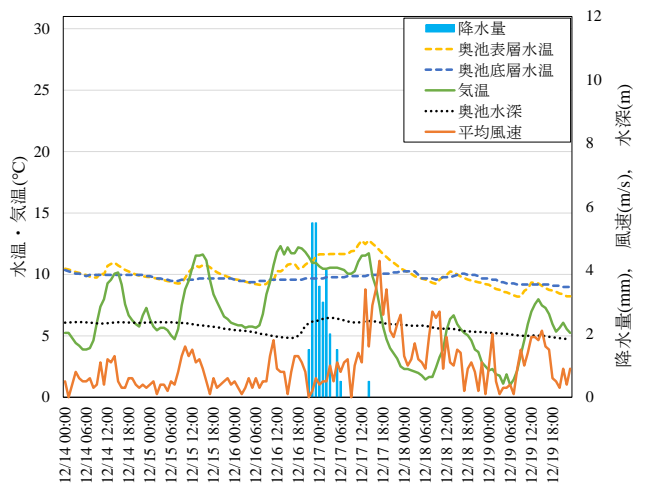


図6 連続モニタリング結果(期間III)

的に混合状態が解消されたと考えられる。これに対し、図6では、降雨によって水深が増加したが、降雨直後

表4 月毎の成層形成の割合, 降水日数, 降水量, 平均水深

	月降水量 (mm)	成層 形成 割合 (%)	平均 水深 (m)	降水 日数 (日)
2021年 9月	64.8	98.8	2.47	2
10月	43.0	52.3	2.03	6
11月	59.0	52.3	2.06	7
12月	45.0	52.3	1.90	7
2022年 1月	16.5	42.2	0.75	2
2月	18.0	47.0	0.44	2
3月	86.5	67.2	0.99	8
4月	102.0	99.4	1.97	7
5月	91.0	100.0	2.76	11
6月	77.0	100.0	2.64	8
7月	244.0	100.0	2.59	13

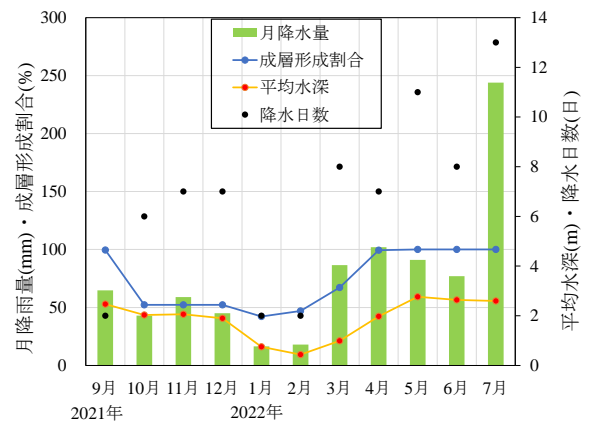


図7 成層形成の割合推移

に 10m/s を超える強い風が吹いたため、すぐに混合状態へと遷移した。当時は表3に示すように、北北東の風が卓越していた。これは南北方向に開かれた谷の下手から風が吹き寄せる方向に相当するため、現地では地形効果によって局所的に風が強められる可能性が高いと考えられる。

木村ら⁹⁾は、表底層の水温差と成層強度の間には強い相関関係があることを報告している。ここでは、表底層の水温差が正の場合に成層が形成されているとみなして、その期間の割合を月別に算出した。

表4に、2021年9月から2022年7月までの月毎の成層形成の割合, 降水日数, 降雨量, 平均水深の値を、図7にそれらの推移を示す。水深の深い春季・夏季は期間中成層が維持されているが、秋季・冬季では、水

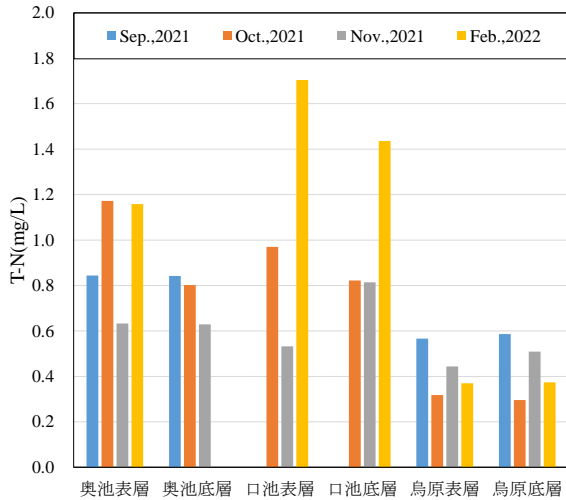


図 8 水質分析結果 (T-N)

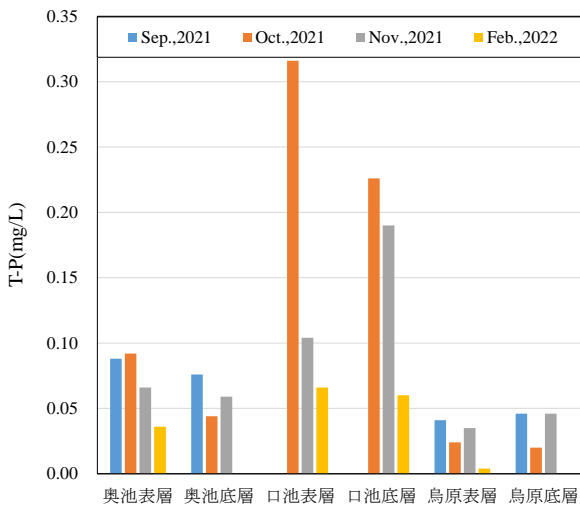


図 9 水質分析結果 (T-P)

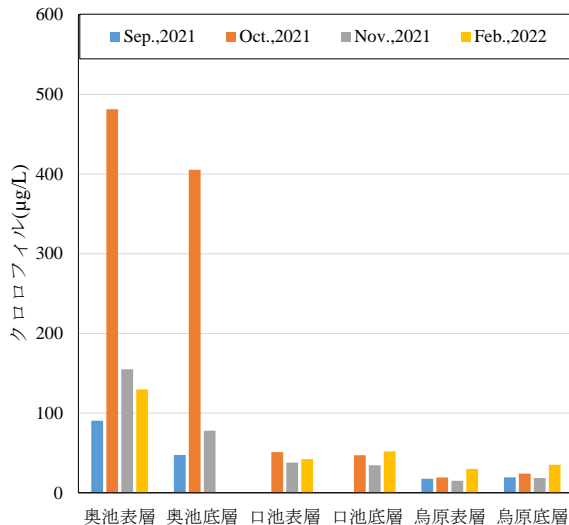


図 10 水質分析結果 (クロロフィル)

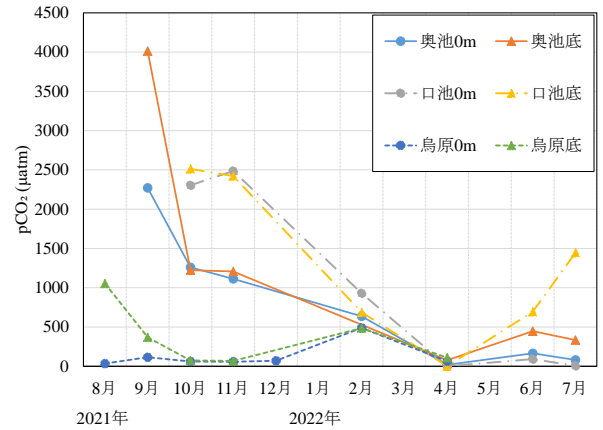


図 11 奥池, 口池, 鳥原貯水池の pCO₂推移

位低下に伴い、表層と底層での混合が容易に生じやすくなる傾向がうかがえる。なお、12月から翌年1月にかけて平均水深が大きく減じているのは、季節的な降雨量の減少に加え、「掻い掘り」によって人為的に池の水が抜かれたためである。

3.2 採水調査 図8, 図9に2021年9月, 10月, 2022年1月, 2月にそれぞれ実施した奥池・口池及び先行実証地である鳥原貯水池での栄養塩(T-N, T-P)の測定結果を示す。なお、奥池は8月, 12月, 2月(底のみ), 口池は8, 9, 12月, 鳥原貯水池は12(底のみ), 6, 7月は未測定である。

T-N, T-Pともに、奥池, 口池の栄養塩の値は表層と底層のいずれとも鳥原貯水池の値よりも大きな値を示していた。また、奥池, 口池は、鳥原貯水池に対し、比較的季節的変動が大きい傾向が見られた。この原因については今後のさらなる調査・分析が必要であるが、鳥原貯水池と比較して相対的に貯水量が少ない奥池, 口池では、降雨時の近隣住宅地から集積してきた雨水排水の流入や、底質からの溶出が影響している可能性が考えられる。

図10に奥池, 口池と鳥原貯水池のクロロフィルを示す。奥池は、下流に接続する口池や、鳥原貯水池での値と比較して総じて高い値が出ている。しかし、現地での目視レベルでの観察からは、当該期間中にアオコが発生するような状況は確認できなかった。これについては、継続的な調査・分析を行い、成因を明らかにする必要がある。

図11に奥池, 口池, 鳥原貯水池のpCO₂推移を示す。奥池では夏季である9月においてピークの値となり、秋季, 冬季となるにつれてpCO₂の値が減少する傾向が見られた。また、図7より成層形成割合とも似たような季節的傾向を示すことから、pCO₂の推移は成層強度に依存していると考えられる。また、図11では4月の値が全て0に近い値をとっている。この原因として、CO₂SY_SによるpCO₂の計算結果が全て絶対値で表示

されているからであると考えられる。もし正負の値を考慮するのであれば、恐らく冬季は $p\text{CO}_2$ の値が正となるため CO_2 放出傾向となり、4月を超えて夏季に近づくにつれ $p\text{CO}_2$ が負の値となり、 $p\text{CO}_2$ が吸収傾向になると考えられる。さらに、先行実証実験地である烏原貯水池に比べ、奥池、口池は全体的に $p\text{CO}_2$ の値が高くなっている。この原因として、図10に示されているように、奥池、口池は烏原貯水池に比べてクロロフィルが高密度で存在しており、植物プランクトンによる光合成や呼吸といった炭素を循環させる生物活動が盛んであるためであると考えられる。通常、海水域では、海水に溶け込んだ CO_2 の一部は海洋酸性化の原因となる無機炭素になる。しかし、植物の光合成によって無機炭素の割合は保たれ、吸収された無機炭素は植物の成長に使用される。さらに、植物に吸収された無機炭素は、動物の成長に不可欠な有機炭素へと変化する。このように、海洋において、 CO_2 は、生態系の物質循環に欠かせない物質となっている。 $p\text{CO}_2$ は、 CO_2 の濃度に依存して増加することから、 CO_2 濃度が高い奥池のような淡水域においても、水草移植後に水草やその他の生物の生物活動が活発になると考えられる。

4. まとめ

本研究では、都市近郊に残存する里山ため池が、淡水域ブルーカーボンにおける固定源となりうる水草の生育に適した環境ポテンシャルを有するかどうかを調べるため、実証実験地にて、物理的・化学的な環境の把握を目的に調査を行い、以下の結論を得た。

連続モニタリング調査の結果より、奥池は冬季に水位が極端に下がり、表層と底層の混合が生じやすくなる傾向が明らかになった。その原因の一つである「掻い掘り」は、急激な水位変動を引き起こし、ササバモ等の水草へのストレスになるといわれているため、このような人為的行為は慎重に行う必要がある。

採水調査の結果より、奥池・口池は、先行的に実証実験が進められている烏原貯水池よりも富栄養な状態であることがわかり、ササバモの生育に必要なレベルの栄養塩を含むことが明らかになった。

奥池・口池の $p\text{CO}_2$ を算出し、先行実証実験地である烏原貯水池と比較した結果、奥池は、 $p\text{CO}_2$ が高いため、今後水草移植後の水草やその他の生物の生物活動の活発化が期待される。

今後は、ササバモ移植後のため池の物理的・化学的環境の変化や水質調査にて得られた DIC や EC 等のその他の指標からも炭素固定機能について評価していく必要がある。

謝辞

本研究の一部は神戸大学院工学研究科市民工学専攻の中山恵介教授、北見工業大学地球環境工学科環境防災工学コースの駒井克昭教授、神戸市水道局水質試験所の清水武俊係長、上鶴哲矢様の支援を受けて進められました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 国土交通省：ブルーカーボンとは
https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000069.html
(最終閲覧日：2023年1月3日)
- (2) ENEOS イノベーションパートナーズ合同会社：事業紹介 二酸化炭素を海洋生物、ブルーカーボンで固定化。壮大な事業の協業先を求む
<https://www.eneos-innovation.co.jp/major-projects/blue-carbon>
(最終閲覧日：2023年1月3日)
- (3) 田多一史, 中山恵介, 駒井克昭, Jeng-wei TSAI, 佐藤之信, 桑江朝比呂：成層を考慮したアマモ場における溶存無機炭素の変動解析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.74, No.2, pp.I_444-I_449, 2018.
- (4) 齋藤直輝, 熊柄, 小森博仁, 矢野真一郎, 中山恵介, 駒井克昭, 矢島啓：八代海におけるブルーカーボン動態把握のための海水中 CO_2 に関する現地調査, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.901-906, 2020.
- (5) 朝日新聞デジタル：ko-do 神戸の鼓動, 行動に移すチカラ 山のブルーカーボン 水資源・外来種・温暖化…すべてつながった
https://www.asahi.com/ads/ko-do/bluecarbon/report_02/
(最終閲覧日：2023年1月3日)
- (6) 地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所：水草図鑑(在来種) ササバモ
http://www.kannousuiken-osaka.or.jp/zukan/zukan_database/mizukusa/3550b31d5590e31/2550bc5a881af9c.html
(最終閲覧日：2023年1月3日)
- (7) Lewis, E. and D.W.R. Wallac: Program developed for CO_2 system calculations. ORNL/CDIAC-105, Carbon Dioxide Information Analysis Center, pp. 1-21, 1998.
- (8) 気象庁：アメダス 過去の気象データ,
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/ctrn/index.php>
(最終閲覧日：2023年1月3日)
- (9) 木村晴保, 章守宇：水柱位置エネルギーによる浦の内湾の成層度と水温・塩分成分ならびに底層 DO の関係, 農業土木学会論文集 No.183, pp.25~30, 1996.