

## 湖沼における植物プランクトンによる CO<sub>2</sub> 吸収量の評価手法の開発

### Estimation of carbon dioxide capture in an eutrophic lake due to phytoplankton

中山 恵 介  
Keisuke Nakayama

#### 1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル実現に向けてあらゆる分野の緩和策を総動員する必要がある。その一つとして、水生生物の作用により大気中の CO<sub>2</sub> を貯留する「ブルーカーボン」増強の技術開発が世界的に成されている。ブルーカーボンで対象となっている沿岸域が占める面積は 180 万 km<sup>2</sup> である一方で、陸水湖沼の全面積は 500 万 km<sup>2</sup> であるが、淡水カーボンに関する研究成果がほとんど存在せず、その価値の定量評価が行われていない。しかし申請者らは、中栄養以上の湖沼において水中 CO<sub>2</sub> 分圧が海藻場の水中 CO<sub>2</sub> 分圧に比較して低いことを見出した。つまり、沿岸域の約 3 倍の面積の湖沼は、国土における CO<sub>2</sub> 貯留量を正確に評価する上で無視できないだけでなく、CO<sub>2</sub> の吸収源として大きく貢献できる可能性がある。

そこで本研究では、神戸市が所有する烏原貯水池やため池において、植物プランクトンを対象とし、現地観測、室内実験および数値モデルによる陸水湖沼の CO<sub>2</sub> 吸収量の定量的な評価手法を開発することで、最終的にはカーボンクレジット化による社会実装に資する CO<sub>2</sub> 貯留量の定量評価を目指すことを目的とする。

#### 2. 烏原貯水池における現地観測

##### 2. 1 烏原貯水池の概要

本研究では、Nagatomo et al. (2023)<sup>1)</sup>による Freshwater Carbon に関して、富栄養湖である烏原貯水池を対象として研究を実施した。烏原貯水池は日本の兵庫県神戸市 (N34° 41' 30" and E135° 9' 19") に位置する淡水湖である。水表面は 115,396 m<sup>2</sup>、総体積は 1,154,000 m<sup>3</sup>、最大水深は 19 m であり、流入河川は烏原川である (図-1)。夏季において、烏原貯水池の底に蓄積した有機物の分解と、成層の発達により、下層に貧酸素水塊が発生する。下層の貧酸素水塊の発生を抑制するために、烏原貯水池では、2021 年 5 月から 10 月まで曝気装置が稼働していた。曝気装置は、空気をディフューザーに送り込み、ディフューザーは貯水池の低層付近に空気を放出し、放出された空気は水面まで上昇する。その結果、烏原貯水池の下層の酸素濃度を高めることができ、さらに、鉛直混合が促進されることにより、貯水池内の成層が弱まる (Sakaguchi et al., 2023)<sup>2)</sup>。烏原貯水池は、典型的な富栄養湖であり、水表面付近における硝酸性窒素、アンモニウム性窒素、全リン、クロロフィル a (chl.a) の平均値は、2010 年から 2018 年まで、0.116 mg L<sup>-1</sup>、0.0122 mg L<sup>-1</sup>、0.0284 mg L<sup>-1</sup>、20.5 μg L<sup>-1</sup>であった。流入河川の流量は、洪水期でも 0.24 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> で一定に制御されており、烏原貯水池内の水の滞留時間は 56 d である。植物プランクトンの光合成による pH の最大値は約 9.3 であった。したがって、烏原貯水池は典型的な富栄養化した淡水湖と考えられる。

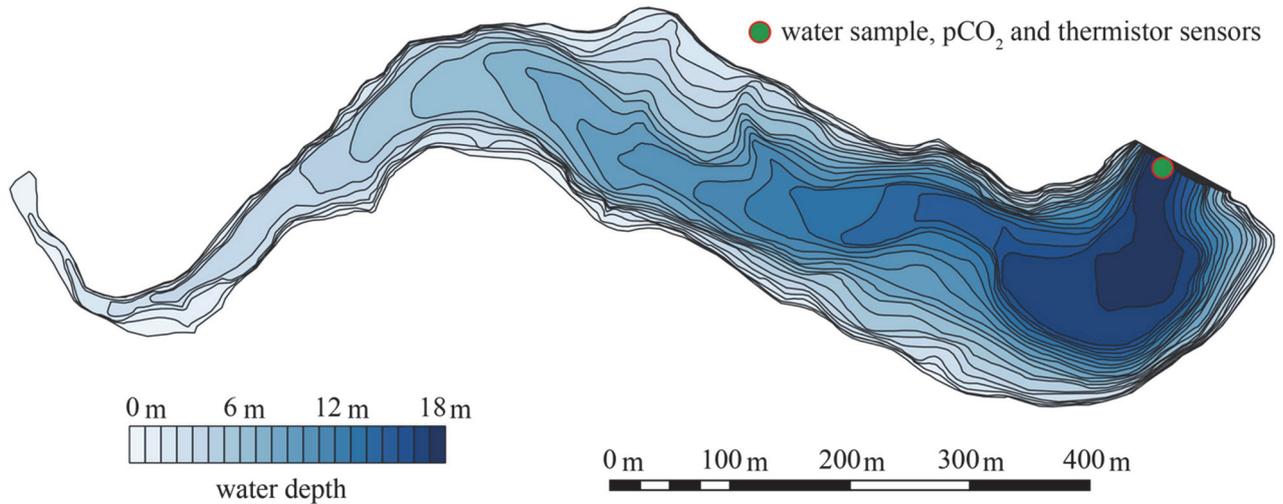


図-1 琵琶湖の湖底までの水深分布図.

鳥原貯水池において、曝気装置が稼働していたため、2021年8月から9月の水温における上層と下層の差は約4度で成層が弱かった(図-2)。2021年10月から2022年4月までは上層と下層にほとんど差はみられなかった。2022年5月から9月までは曝気装置が動いていなかったことから、強い成層が生じていた。水表面における $pCO_2$ は、成層が生じている2021年8月から9月や2022年5月から9月において、植物プランクトンによる光合成活動が活発になるため大気 $pCO_2$ である $440 \mu atm$ よりも小さくなっていた(図-3(a))。一方で、貯水池底部における $pCO_2$ は、2021年8月から9月において水表面よりも大きくなっていた。水表面におけるpHは、すべての期間において8.0以上と大きくなっていった(Figure 3b)。特に成層が生じている2021年8月から9月および2022年5月から9月では8.5以上となっており、植物プランクトンの光合成による上昇の影響が確認できた。成層が生じている期間のDICにおける上層と下層の差は $100 \sim 500 \mu mol kg^{-1}$ となっていた。TAではその差が小さく、年間を通した変化は小さかった(Figure 3c and 3d)。chl.aにおいても上層や下層の差や、年変化は小さいが、2021年4月や10月は上層と下層の差が大きくなっていった(図-3(e))。Lake Mongerについて、2024年2月29日および3月1日において、chl.aの値は $20.0 \mu g/L$ から $30.0 \mu g/L$ 、pHは9.75から9.85、植物プランクトンは、*Microcystis wesenbergii* Cyanophytaと*Pseudanabaena acicularis* Cyanophytaが卓越していた。Lake Mongerは平均水深が1.0 m以下であることから、水草が存在しない状態であったこともあり、成層は存在していなかった。

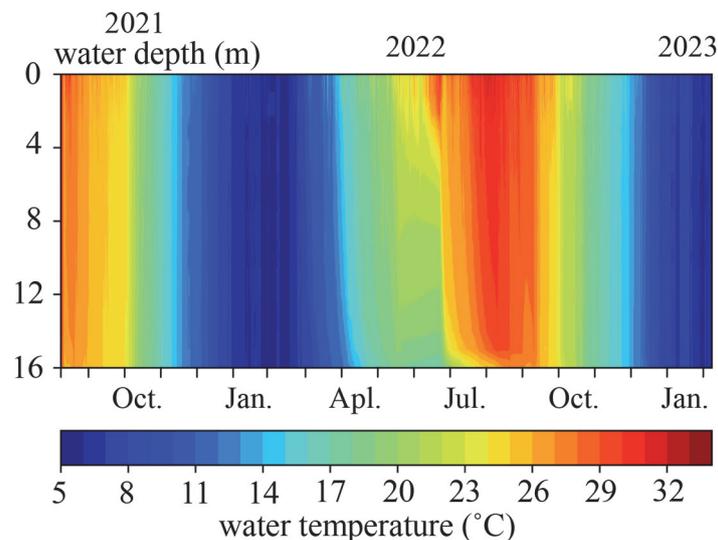


図-2 現地観測結果による水温の鉛直分布の時系列.

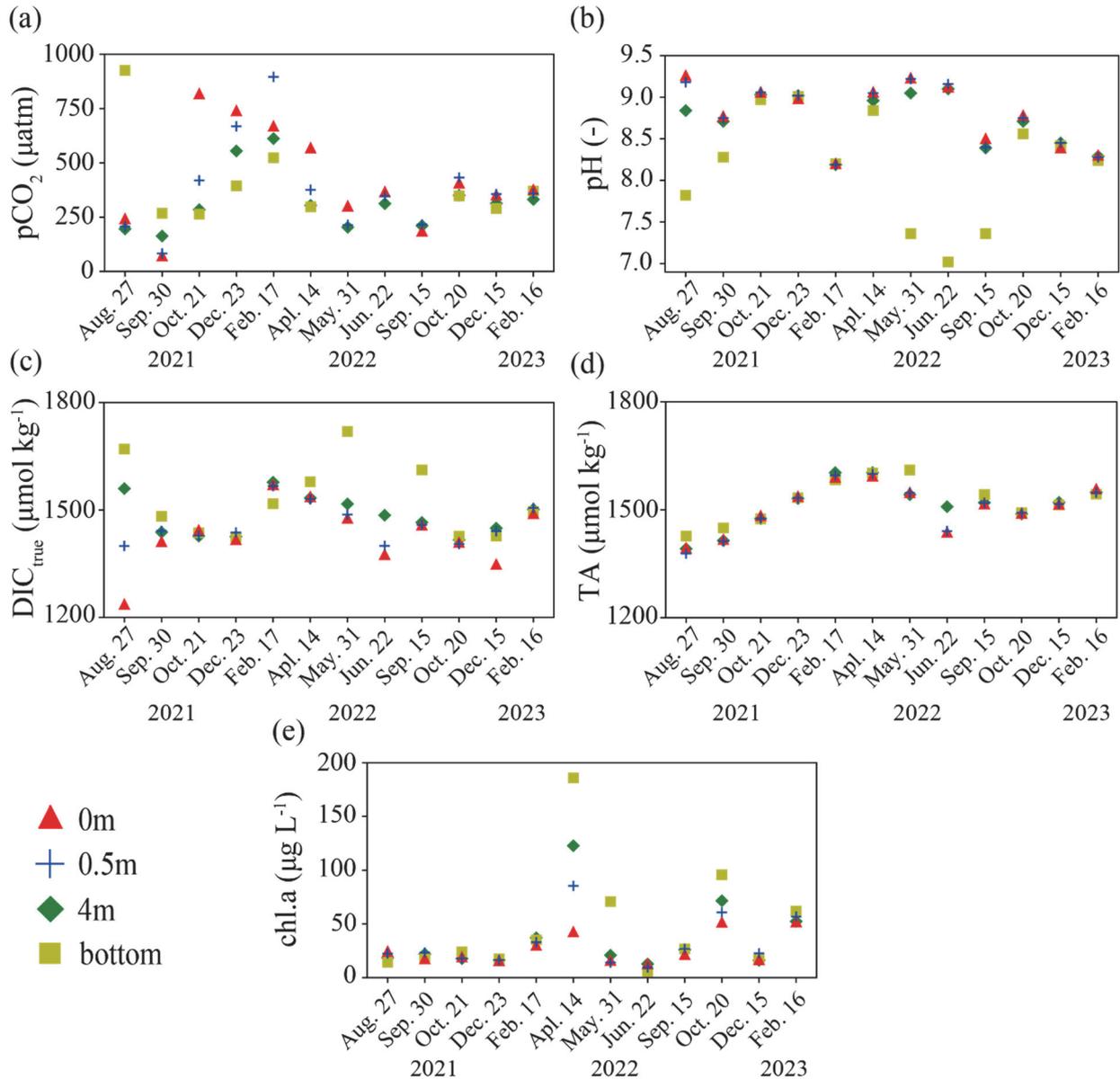


図-3 採水による水質計測結果.

## 2. 2 新たな水中二酸化炭素分圧の推定手法の開発

水温、pH および TA の観測値を用いて化学平衡方程式から計算を行った  $p\text{CO}_{2\text{pH}}$  は、直接計測を行った  $p\text{CO}_{2\text{obs}}$  とは一致せず、小さかった ( $r: 0.76$ ;  $p\text{-value}: 0.00$ ; root mean square error (RMSE): 202.5) (図-4). この誤差は、植物プランクトンが、光合成により pH を増大させたことによるものだと考えられる. そこで pH について、Sakaguchi et al. (2023) <sup>2)</sup> を利用し、以下の様に修正することとした.

$$\text{pH}_{\text{cor}} = \begin{cases} \text{pH}_{\text{obs}} & \text{pH} \leq 7.7 \\ \beta[\text{pH}_{\text{obs}}]^\gamma & \text{pH} > 7.7 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\text{pH}_{\text{cor}}$  は修正後の pH の値、 $\beta = 4.0$  and  $\gamma = 0.32$ ,  $\text{pH}_{\text{obs}}$  は観測による pH の値である.

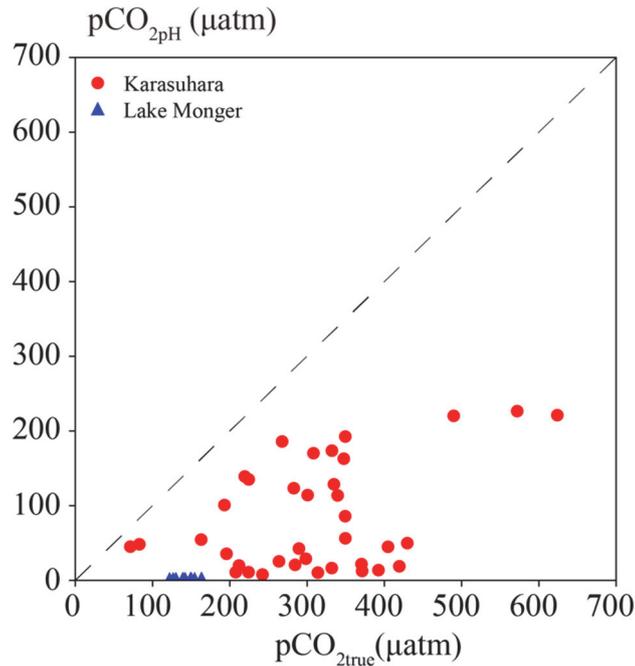


図-4 採水による水中二酸化炭素分圧と既存の式で推定された水中二酸化炭素分圧.

### 2. 3 水中二酸化炭素分圧の日変動

水中二酸化炭素分圧の日変動は、二酸化炭素の吸収量に影響を与える。そこで、鳥原貯水池において2023年7月19日から21日にかけて、 $p\text{CO}_2$ の連続観測 (Pro-Oceanus, Mini CO2) を行った (図-1)。計測器は、水深0.5 mに設置し、30分間隔で $p\text{CO}_2$ を計測した。連続観測期間における $p\text{CO}_2$ は、植物プランクトンの活動により日変動をしており、計測期間中、水中の $p\text{CO}_2$ は、日中において約 $300 \mu\text{atm}$ ほど大気の $p\text{CO}_2$ よりも小さく、夜間において、ほぼ同程度となっていた (図-5)。通常、水表面における二酸化炭素フラックスを評価する際、月に1度程度の観測結果が用いられることが多い。例えば、採水する時間が午前10時であれば、図に示されるように水中二酸化炭素分圧はかなり大きな値であり、吸収側であれば、二酸化炭素フラックスを過小評価していることになる。一方で、採水時間が午後4時であれば、水中二酸化炭素分圧が最も減少する時間帯に対応するため、二酸化炭素フラックスを過大評価することとなる。その割合は、午前10時であれば真値の2分の1、午後4時であれば真値の2倍程度となる。1ヶ月の間でも、水中二酸化炭素分圧の値は大きく変化しており、水表面における正しい二酸化炭素フラックスを評価するためには、1時間間隔での計測結果を利用することが必要であると考えられる。

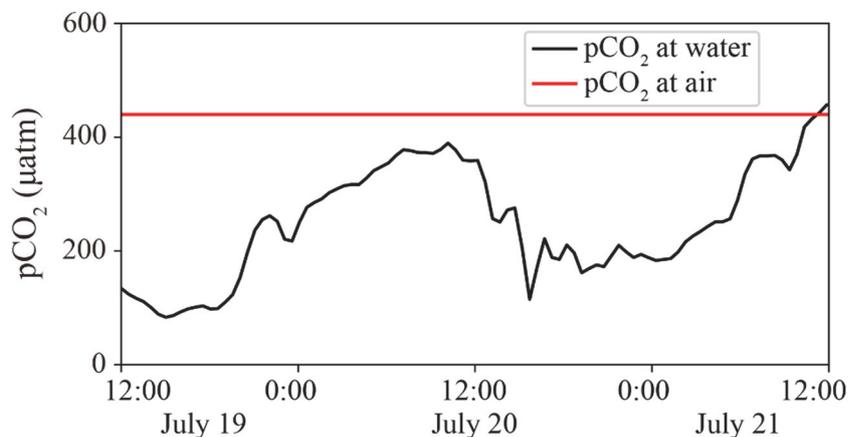


図-5 現地観測による水中二酸化炭素分圧の時系列変化.

### 3. おわりに

本研究では、烏原貯水池を対象とした現地観測を実施し、水表面における二酸化炭素フラックスに関する検討を行った。その結果、水中二酸化炭素分圧は数時間の間に日変動により大きく変化しており、定期観測のみを用いた解析を行うと、対象領域の二酸化炭素の吸収量を過小もしくは過大評価してしまうことが示された。つまり、高精度な二酸化炭素の吸収量を推定するためには、1時間間隔での計測結果を利用する必要がある。しかし、1時間間隔での水中二酸化炭素分圧の観測結果を得ることは容易ではないことから、3次元数値シミュレーションを活用した評価を行うことが、高精度にデータを補間する上で、一つの可能性として考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) Nagatomo, K., Nakayama, K., Komai, K., Matsumoto, H., Watanabe, K., Kubo, A., Tada, K., Maruya, Y., Yano, S.I., Tsai, J.W., Lin, H.C., Vilas, M., Hipsey, M.R.: A spatially integrated dissolved inorganic carbon (SiDIC) model for aquatic ecosystems considering submerged vegetation, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 128(2), e2022JG007032, 2023.
- 2) Sakaguchi, J., Nakayama, K., Komai, K., Kubo, A., Shimizu, T., Omori, J., Uno, K., Fujii, T.: Carbon dioxide uptake in a eutrophic stratified reservoir: Freshwater carbon sequestration potential, *Heliyon*. 9 (10), e20322, 2023.

#### 著 者

中山 恵介      所員, 博士 (工学), 水工学

