

記載例

「貯水池を対象とした水草植栽の推進と二酸化炭素吸収量の評価技術の開発」

神戸大学工学研究科 中山 恵介

1 研究の背景と目的

ブルーカーボン研究では、沿岸域の植物プランクトン、海藻、水草が対象とされてきた (Nellemann, UNESCO, 2009). 一方で、研究代表者らの研究により、中栄養以上の淡水湖沼内における単位面積あたりの CO_2 の吸収量や貯留割合は沿岸域と同等である可能性が示し、Freshwater Carbon と名付けた (Lin ら, Sci. Total Environ., 2022). 世界的にみて、沿岸浅海域の約 3 倍の面積を有する淡水湖沼は、大きな CO_2 の吸収ポテンシャルを有している. しかし、ブルーカーボンによる CO_2 の吸収および貯留割合の評価技術が存在するが、植栽により水草がどの程度成長し、 CO_2 を吸収しているかは未だに未解明である. そこで本研究では、水草植栽の有効性、および Freshwater Carbon による CO_2 の吸収量の評価技術の開発を目的とする.

2 研究方法・研究内容

烏原貯水池は兵庫県神戸市中央区に位置し、日本で最も古い歴史を持つ貯水池の一つである. 本貯水池は、新湊川水系の石井川、烏原川、および天王谷川を水源としている. 有効貯水容量は 1315 m^3 、集水面積は 19.76 km^2 である. 水質サンプルの採取は、原則として月に 1 回実施された. 測定された項目は以下の通りである.

- ✓ 透明度、水温 (wt), pH, 濁度 (turb), 色度 (chrom), 電気伝導度 (cond)
- ✓ 全アルカリ度 (TA), 溶存酸素 (DO), クロロフィル a 濃度 (Chl.a)
- ✓ マンガン濃度 (Mn), BOD, COD, 全有機炭素 (TOC)
- ✓ 全窒素濃度 (TN), アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), 硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)
- ✓ 全リン (TP), リン酸態リン, 過マンガン酸カリウム消費量, 塩化物イオン

測定は、水面付近、水深 1 m, 4 m, 8 m, 12 m, および湖底付近の計 6 箇所で行われた. また、解析に必要な風速 (WS) データは気象庁の資料から抽出されている. 2000 年 6 月から 2008 年 6 月にかけて、貯水池に洪水調節機能を持たせるための運用が行われた. この期間、洪水に備えて水位を -18 m 以下に下げる渇水状態が維持された. その後、2010 年に河川からの放流が再開され、水質維持を目的とした曝気 (ぼっき) が実施された. この運用変更により、プロジェクトの前後で水質状況に変化が生じた. 本分析では 2010 年以降のデータのみを使用している. なお、リン酸、過マンガン酸カリウム消費量、塩化物イオンの 3 項目については近年測定されていないため、初期データベースを構成する 8 年間のデータのうち、計 19 の水質項目が分析対象となっている.

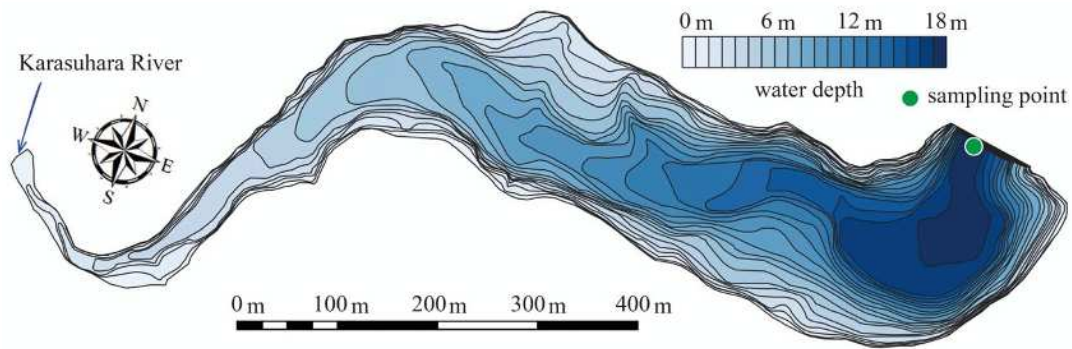


図-1 烏原貯水池の水深図と計測地点.

変数間の因果関係を仮定し、最適化を評価するための統計的手法を用いてパス図を作成し、変数間の影響度を調査した。構造方程式モデリング (SEM) は、社会科学をはじめ多くの分野で広く利用されている強力な多変量解析手法である。SEM は、測定誤差を考慮しつつ、変数間の線形な因果関係を同時に検証することが可能である。SEM の図において、一方通行の矢印は因果関係を示し、双方向の矢印は相関関係を示す。パス係数の絶対値が大きいほど関係性が強いことを示し、正の値は正の相関、負の値は負の相関を意味する。一般的に、適合度指標 (GFI) が 0.9 超、長方形近似の平均二乗誤差 (RMSEA) が 0.1 未満、および比較適合度指標 (CFI) が 1 に近い場合、解析結果は良好であるとみなされる。

一方で、2021 年から実施されてきたササバモの烏原貯水池への植栽について、現地においてその効果を検討した。目視によるササバモの存在範囲の確認、およびササバモのみならず、他の水草も発生していたことから、それらも対象として発生範囲について計測した。

3 研究成果

2010 年から 2018 年にかけて、DIC、CO₂、DOC、水温、および DO は大きな季節変動を示した (図-2)。各図において、黒線は上層の水質条件を、赤線は下層の水質条件を示している。上層と下層における DIC、CO₂、水温、および溶存酸素の差は顕著であり、特に 2010 年、2016 年、2017 年においてその傾向が強かった。これらの年において成層化が生じた原因の一つは明確である。烏原貯水池では水質問題に対処するため通年で曝気 (ばっき) を実施しており、これが成層形成を抑制する役割を果たしている。しかし、2010 年は曝気装置が通年で稼働しておらず、2017 年は装置の不備により曝気システムが作動しなかったため、下層と上層の水が混合されなかった。その結果、成層が発生し、上層と下層の差が拡大した。2016 年と 2017 年にはこの傾向が顕著に現れ、上層の DO が約 6 mg/L であったのに対し、下層では約 3 mg/L まで低下した。下層の溶存酸素は上層と混合されず、DOC の値についても上層と下層の差はおよそ 1 mg/L に達した。一方で、成層の影響はクロロフィル a (Chl.a) でも観察されたが、周期的な変動は明確ではなく、その変動状況は非常に複雑であった。水温および DO のグラフとの比較から、成層が発達している時期には上層の Chl.a が相対的に大きくなる傾向が確認された。これに伴い、2017 年の上層における CO₂ は相対的に小さくなり、大気から CO₂ が吸収された。

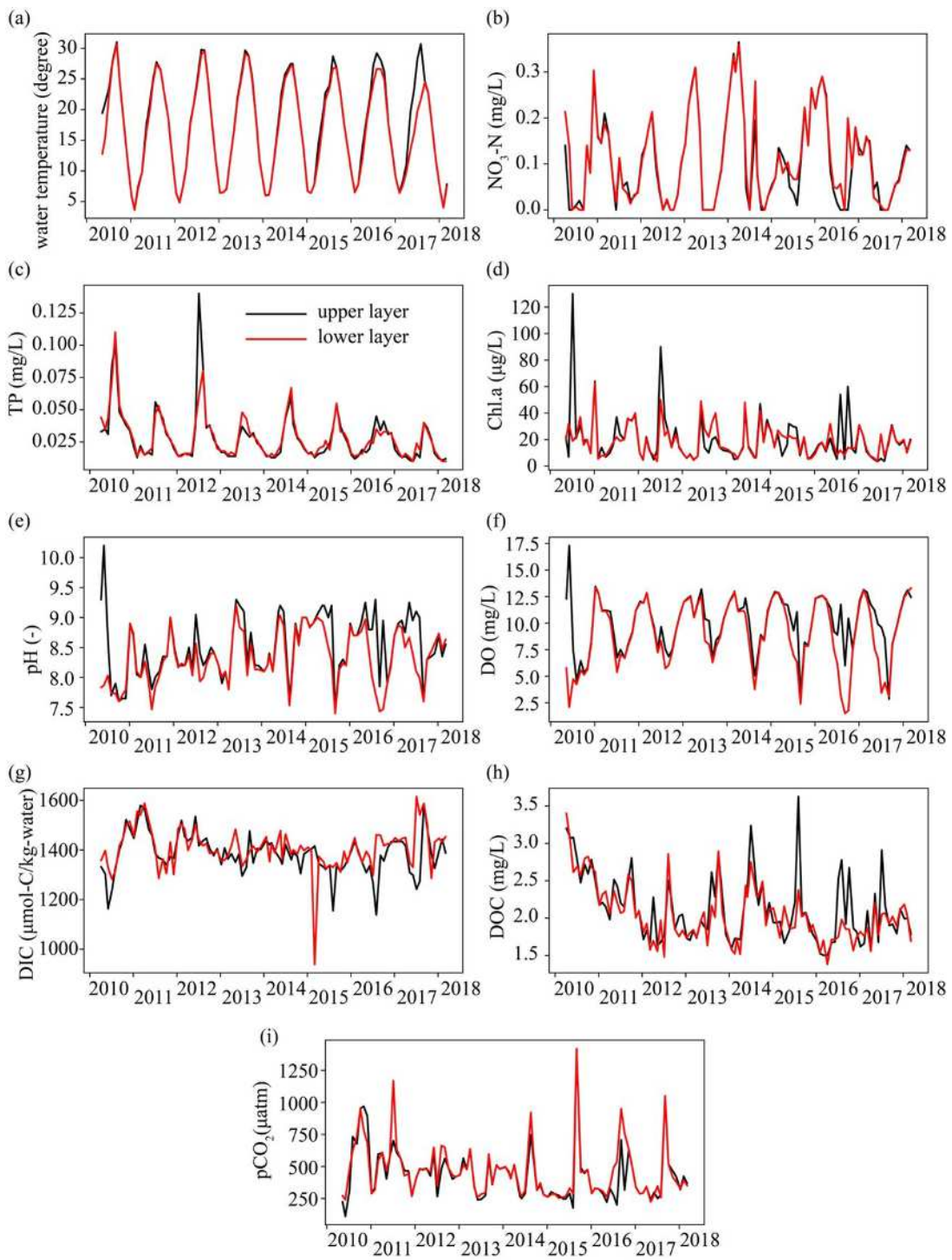


図-2 烏原貯水池の計測地点において計測された水質の時系列. (a) 水温 (°C), (b) $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L), (c) TP (mg/L), (d) Chl.a (µg/L), (e) pH, (f) DO (mg/L), (g) DIC ($\mu\text{mol-C/kg-water}$), (h) DOC (mg/L), and (i) pCO_2 (μatm).

構造方程式モデリング (SEM) による DIC の因果関係解析まず, CO_2 を中心としたパスの構築を試みた. 単純相関分析の結果を用いることで, すべてのパスを考慮する必要のない初期モデルの提案が可能となる. 風速は上下層の混合を促進すると考えられるため変数として追加し, SEM 分析を行った. なお, 単純相関分析では風速と他の

要因との間に強い相関は見られなかった。SEM 分析における初期パスの決定過程では、各要因間の具体的な関係を検討し、不適切と判断された一部のパスを削除した。本研究の目的は DIC に対する各要因の影響を調べることであるため、各要因と DIC 間のパスを優先し、有意でないパスを除去した上で SEM 分析を実施した。設計したパスを段階的に最適化し、パス図のモデル適合度を向上させた。この初期パスを用いた SEM 分析の結果、亜硝酸態窒素、風速、全リン、DOC が DIC に影響を及ぼしていることが示された (図-3a)。

しかし、この時点でのモデル適合度は $GFI = 0.65$ であり、より適合度の高いモデルを作成する必要がある。CO₂ は DIC から算出されるため、次に CO₂ を決定する DIC に焦点を当てたパスの構築を試みた。DIC のみに影響するパスを排除することでモデルを最適化した。その結果、各要因が DIC に及ぼす影響は主に上層で見られ、下層の DIC への影響は明確ではなかった。上層の DIC に影響を与える主な要因は、風速 (ws)、DOC、HNO₃、全リン (TP)、および下層の DIC である。DOC は上層の DIC と負の相関を示しており、植物プランクトンの光合成などの生物学的プロセスが DIC の変動に影響していることを示唆している。一方で、全リンはクロロフィル a に影響を与えており、栄養塩として植物プランクトンの増殖に寄与し、間接的に DIC へ影響を及ぼしていると考えられる。これらを考慮し、上層 DIC、上層 DOC、上層亜硝酸態窒素、風速、上層全リン、上層 Chl.a、および下層 Chl.a を用いて分析を行った。適合度向上のために一部のパスを削除した結果、モデルの適合度は 0.92 となった (図-3b)。この結果は十分に信頼できると言える。

全リンに加えて、栄養塩としての亜硝酸態窒素も植物プランクトンの増殖に影響を及ぼしている。これは、栄養塩と植物プランクトンの生物学的プロセスが DIC に影響を与えることを示唆している。また、風速と DIC の相関も明らかになり、パス係数は以前よりも増加した。DIC と風速の正の相関は、上層における垂直混合の強化によるものであり、それが下層への DIC 供給に寄与していると考えられる。パス解析において、DOC は DIC を減少させる能力があることが証明された。また、Chl.a も同様に DIC を減少させる能力を示した。以上の結果から、閉鎖性淡水域としての烏原貯水池において成層が存在することが示された。富栄養化物質の中では窒素が生物学的プロセス (呼吸、分解、光合成) に影響を与える支配的な要因であり、Chl.a、DOC、および亜硝酸態窒素が DIC に顕著な影響を及ぼしていた。これらの結果は、烏原貯水池における水生植物や藻類の生育状況が大気中の CO₂ 吸収に影響を与えることを示唆している。

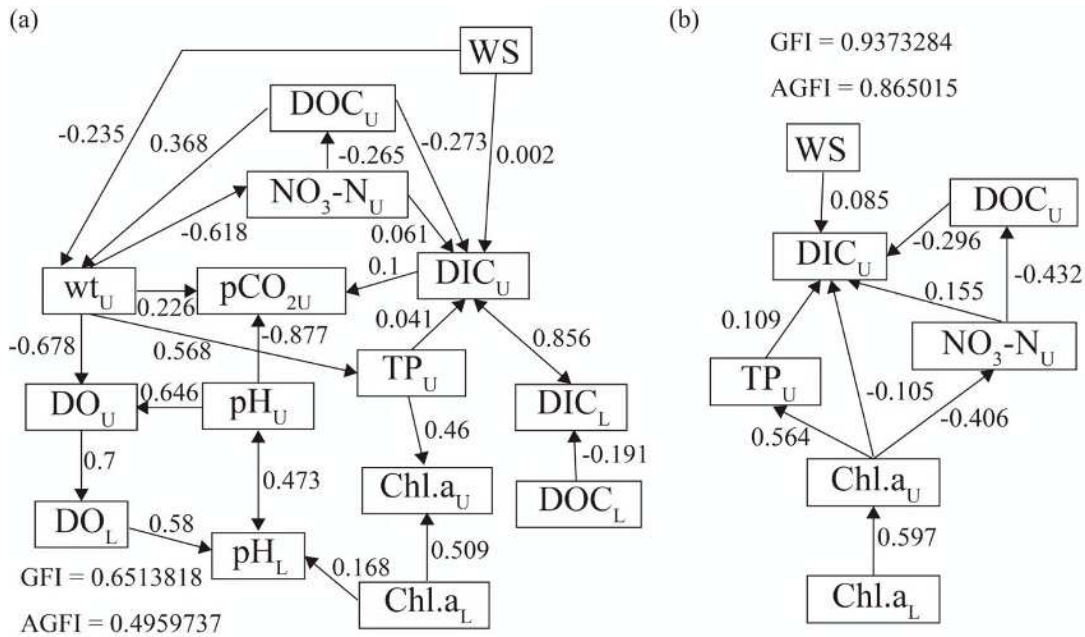


図-3 SEM 解析の結果. (a) 全てのパスを含んだ結果. (b) DIC_U に対して最適な結果.

現地において、植栽の効果を検証した。鳥原貯水池において、158 m²を対象として2021年から2023年までの3年間で植栽を行った。2024年と2025年は植栽を行わず、植栽の効果が自然の力により繁茂できるかを検討した。その結果、対象とした158 m²において、ササバモが繁茂したことを確認できた。また、対象とした158 m²だけでなく、周辺領域においてエビモおよびササバモが繁茂していた。エビモは、ササバモを植栽した際についてきた水草であり、その量は僅かであった。しかし、エビモはササバモと同様に繁茂しており、各シュートの発生間隔は10 cmから30 cmであった。かなりの植生密度であり、植栽が成功したことを示す結果であると思われる。また、ササバモは他の領域にも繁茂し始めていた。なお、鳥原貯水池において水草が全滅した理由は外部から持ち込まれた亀による食害である。2021年から神戸市により亀を除外する試みが続けられており、植栽が成功した大きな理由の一つであることを記しておく。

4 生活や産業への貢献および波及効果

① 脱炭素社会の実現に向けた新たな評価軸の提供

これまで沿岸域に限定されていたブルーカーボンの知見を淡水域へと拡張し、「Freshwater Carbon」としての\$CO₂\$吸収ポテンシャルを定量化する技術を開発した。これにより、自治体や企業が管理する貯水池や湖沼を新たな炭素吸収源として客観的に評価し、カーボンオフセット等の環境戦略へ活用する道を開くものである。

② 科学的根拠に基づく効率的な貯水池管理の実現

曝気(ばっき)の運用状況が水温成層の形成および\$CO₂\$吸収挙動に与える影響を明らかにした。この知見は、水質維持と炭素固定を両立させるための最適な貯水池運用プロトコルの策定に直接的に寄与するものである。

③ 生物多様性の復元と地域環境の価値向上

外来種(カメ)の防除と併用した水草植栽手法により、ササバモやエビモの自立

的な繁茂を確認した。この成果は、全国の貯水池における生態系再生のモデルケースとなり、水辺環境の利活用や環境教育といった生活面での波及効果をもたらす。

④ 高度な環境解析技術の産業への応用

構造方程式モデリング (SEM) を用いて複雑な水質変数間の因果関係を特定する手法は、高い信頼性を持つことを示した。本手法は、環境コンサルティングや水処理産業における水質予測・評価技術の精度向上に大きく貢献するものである。