

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289151

研究課題名(和文) 水質障害原因藻類の生活環と湖内循環過程の生化学的マーカーを活用した解析手法の構築

研究課題名(英文) Development of assessment methodology on behaviors of water quality threatening algae in lakes considering their life cycle and using biochemical markers

研究代表者

梅田 信(Umeda, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10447138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：湖沼の富栄養化現象に関する解析として、気候変動などで環境条件が変化した際の水質的な応答について検討した。また水環境解析手法の構築としては、湖沼における水質と生態(藻類および二枚貝類)の相互的な連関を踏まえた環境解析手法の構築について、十三湖におけるヤマトシジミを対象としての検討を行った。生化学的マーカーを用いた湖沼水環境解析として、脂肪酸を用いた分析手法を検討した。また、湖水の窒素循環に関して、天然トレーサーである窒素や酸素の安定同位体を用いて解析を行う方法の検討を行い、湖沼に存在する硝酸態窒素の起源に関する解析方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We investigated a prediction methodology to assess water quality response to future environmental changes on lakes and reservoirs like climate change. We also developed an aquatic environmental model expressing interaction between ecological factors and water quality in lakes. An analysis method of lake environment using biochemical marker was investigated by using fatty acid. In regard to cycling of nitrogen in lake water body, an analysis method by the use of stable isotopes of nitrogen and oxygen was applied, and we proposed an assessment method of sources and origins of nitrate nitrogen in lake water.

研究分野：水工学

キーワード：湖沼環境

1. 研究開始当初の背景

湖沼やダム貯水池などの閉鎖性水域は、水道用水を含む水資源として重要なものであり、水質管理の必要性は論を俟たないところである。一方で、閉鎖性水域の水質改善が遅々として進まないことは、環境基準の達成率が低いことなどからも指摘され、我が国の水環境管理における課題となっている。

流域内の下水道等の整備が進み、確かに効果の見られた湖沼も多く存在する。しかし、COD や窒素、リン濃度など通常の水質指標で改善された水域でも、水質問題は解決していない事例が多い。その多くは、本研究で着目する閉鎖性水域内に生息している藻類が問題となる現象である。

この大きな要因として藻類の「内部負荷」が挙げられる。水質問題の原因になる藍藻類は、底質上で越冬し、夏期に再浮上し増殖をするという生活環を持つものがある。アオコ等の問題が常態化している閉鎖性水域では、湖内で増殖している藍藻のかなりの部分が、このように湖内に蓄えられている個体が、水中へ回帰し、増殖したものの可能性があると考えられつつある(矢島ら, 2011 など)。

2. 研究の目的

本研究では、生活環に基づく藍藻の循環、およびその消長に重要な因子である栄養塩(特に窒素)の時空間的な循環プロセスを現地観測ベースに解明をし、水質問題の解決および予測・予防に役立つ知見を得ることを目的とする。

ダム貯水池など閉鎖性水域の水質管理では、藻類(植物プランクトン)が起因となって生じる問題(代表的にはアオコや異臭味の発生)の解決が大きな課題である。夏期の藻類増殖の要因として、藻類の生活環が大きく関与している可能性が、近年指摘されている。本研究の目的は、このプロセスに基づく季節的な藻類の消長について解明することである。また現地観測により、脂肪酸や安定同位体といった生物学的、地球化学的な指標を用いて、藻類挙動を把握するための手法構築も目的の一つとする。さらに従来生態系モデルを発展的に改良し、藻類の生活環を組み込んだ閉鎖性水域の水環境シミュレーターを開発し、これを用いて、気候変動も含めた将来的な水質管理に関する展望と提言を行うことを目標とする。

3. 研究の方法

(1)ダム貯水池の水理構造

福島県三春町の阿武隈水系大滝根川上に位置する三春ダムを対象とした。複雑な形状をした貯水池内において、特に入江部ではアオコの集積が顕著に見られる。現在までに利水上の問題は発生していないが、湖内負荷の蓄積による水質悪化が懸念されている。水質悪化の対策として、三春ダムでは、曝気式循環施設5台をはじめとした様々な水質保全施

設が設置されている。また藻類増殖の顕著な夏期は、表層取水により、ダムサイトの水面近くにおける藻類の増殖や集積を妨げる運用を、近年行っている。

曝気循環施設が複数設置されている貯水池下流部において、小型船に SonTek 社の River Surveyor M9 を搭載して航行する曳航式観測により流動の空間分布観測を実施した。ダムサイトからおよそ 40m 間隔で、16本の測線について計測を行った。測定区間中心部の水深が約 32m であるのに対し、測定された水深は中心部で約 20m である。曝気装置の散気口水深は約 17m であり、今回の観測範囲は表層から散気口のやや下層までとなっている。測定の際は、誤差を抑えるために、平均的には 0.7m/s 程度のできるだけ低速で、貯水池横断方向を航行しながら、1 秒間隔でデータを取得した。また、流速計に搭載の GPS で、測定位置も同時に記録した。今回の観測に用いた ADP の特徴は、水深や湖底の形状により、計測層厚、セル数、最浅測定深度を計測中に自動設定することである。湖岸付近の浅い位置では計測層厚が最小 0.02m と小さくなるのに対し、水深の大きい湖の中心部では計測層厚 2m と測定地点により大きく異なる。

(2)ダム貯水池への栄養塩負荷の推定

全国の国土交通省および水資源機構が管理し、利用目的に上水道がある多目的ダムのうち、流入河川の TP 濃度の実測値が得られた 65 のダムを研究対象とした。流入河川の TP 濃度は、ダム管理者である国土交通省や水資源機構が測定した値から求めた。基本的には 1990 年代のデータを平均した。各ダム湖の集水域情報の解析には、GIS ソフトを利用した。まず、国土地理院が整備した基盤地図情報のうち、10m メッシュの標高データをもとに集水域を生成した。生成した集水域の精度を確認するため、すべての集水域について『ダム年鑑 2010』に記載されている流域面積との比較を行なっている。次に、集水域における人口及び土地利用情報を求めた。人口については、国立環境研究所が作成した 3 次メッシュデータから、2010 年から 2100 年までの 5 年間隔の値を算出した。土地形態の判別には、国土交通省が提供している国土数値情報の細分メッシュデータのうち、1997 年もしくは 2009 年に作成されたものを使用した。ただし、流入河川の水質データと利用期間が近い年をダムごとに選択している。また、TP 濃度との関係を検討するため、土地形態を 7 項目に分類して解析した。流入河川の TP 濃度と流域背景の関係性を調べるため、TP 濃度を目的変数、人口密度や土地利用形態を説明変数として重回帰分析を行った。さらに、標準偏回帰係数を求め、TP 濃度に対する説明変数の影響度を評価した。また、人口の予測値と回帰式を用いて、流入河川の TP 濃度の将来変化を推定した。

(3)安定同位体を用いた栄養塩循環解析

培養に頼らずに湖沼における包括的な窒素循環速度を定量することを目的に、湖水中に溶存する NO_3^- の天然同位体トレーサーである三酸素同位体組成 ($\Delta^{17}\text{O}$) を指標に用いた窒素循環速度の定量法 ($\Delta^{17}\text{O}$ 法) を検討した。 NO_3^- の $\Delta^{17}\text{O}$ 値は、大気中の窒素酸化物 (NO_x) の酸化・沈着に由来する大気硝酸 ($\text{NO}_3^-_{\text{atm}}$) (^{17}O 値 = +26 ‰程度) と、有機態窒素の再無機化に由来する再生硝酸 ($\text{NO}_3^-_{\text{re}}$) (^{17}O 値 = ± 0 ‰) との間で値が大きく異なる上に、一般の同位体分別過程 (同化や脱窒など) では変化しない。従って水環境中の NO_3^- の ^{17}O 値を定量することで、水塊内の全硝酸 ($\text{NO}_3^-_{\text{total}}$) に占める $\text{NO}_3^-_{\text{atm}}$ の混合比を定量化することが出来るので、これに大気から湖面への $\text{NO}_3^-_{\text{atm}}$ 沈着速度データを加えて解析することで、湖水に対する $\text{NO}_3^-_{\text{re}}$ 供給速度や一次生産速度が定量できる可能性を検討した。

観測は、福島県にある三春ダム (湛水面積: 2.9 km², 最大水深: 25m) で行った。観測は、2013年の7月, 10月, 12月の計3回行い、三春ダムの湖心および主要な流入流出河川で採水した。水試料は、直ちに0.2 μm のフィルターでろ過し、分析まで冷蔵保存した。 NO_3^- の各同位体組成の測定には化学法を使って試料中の NO_3^- を N_2O に変換し、これを連続フロー型の質量分析システムで定量した。

(4)湖沼生態系モデルの検討

本研究で構築した解析方法は、湖水環境解析部と生態系解析部の二つの部分から構成されている。湖水環境解析については、梅田ら (2008) が湖内の塩分と溶存酸素の解析に用いた手法をベースにして組み立てたものである。対象とする湖沼では、成層が明確に形成されていることを考慮して、鉛直一次元の空間分割によるものである。湖内の水理条件解析は、流入出を考慮した水収支の解析と、塩分および水温を考慮した密度成層の解析から成り立つ。水質環境解析は、植物プランクトンを中心として無機態および有機態の窒素とリンの物質循環を考慮する低次生態系モデルを採用した。ただし、本解析では動物プランクトンについては考慮しないNPD型の解析を行った。ヤマトシジミの個体成長解析は、Kooijman (2009) による動的エネルギー収支 (Dynamic Energy Budget) モデルを用いた。この解析手法の枠組みでは、3つの状態変数 (体積 V , 蓄積エネルギー E , 蓄積生殖エネルギー E_R) により、生物個体の生息状態を表現している。DEBモデルは、ヤマトシジミの個体成長解析の方法である。そのため、湖水質解析を反映させ、湖内における個体群としての解析を行うには、両解析方法を接続し、水質解析における空間分割 (本研究では鉛直一次元) に応じた生息域ごとの解析、および成長段階に応じた殻長ごとの解析を行うようにする必要がある。

ヤマトシジミの湖内における生息密度の

初期条件を、現地測定結果に基づいて、深度方向の区画別に設定をする設定を採用した。ただし、ヤマトシジミの生息場所は必ずしも成層条件に対応するとは限らない。むしろ底質条件に大きく左右される。ただし、対象とした湖の条件を考えると、水深が深い湖心部では底質が泥質であり、ヤマトシジミの生息密度は極めて低く、それ以外の浅場が砂質または砂泥質で、生息密度が高いという傾向がある。したがって、ある程度は鉛直一次元解析でもヤマトシジミの検討も可能であると考えられる。ヤマトシジミの年齢構成およびサイズ構成に関しても分類し解析を行った。サイズ構成は、殻長 1mm 間隔で計数を行った。年齢構成に関しては、同一産卵日の個体群を単位として解析を行った。すなわち、各鉛直層において、産卵日別・殻長別の個体数を格納する変数を用意して、その個体群について成長解析を行った。その結果として、同一層・同一産卵日の個体群を単位とする解析となった。

4. 研究成果

(1)ダム貯水池の水理構造

水深 2m の測定結果によると、下流部の曝気施設において、近傍の測線で曝気施設を中心とした放射状の流れが見られた。一方で、さらに外側の測線では、そのような明確な流れは消えている。このことから、曝気による上昇、下降流 (内部、外部ブルーム) の範囲は、直径 100m 程度であることが分かる。一方、中層の水深 12m では、表層とは異なり、概ね上流側へ向かうような流動が見られた。このように、曳航式観測により、曝気式循環施設が複数ある貯水池内での空間的な流動構造を捉えることができた。この結果から横断面内の通過流量を推定したところ、流入量や放流量と比べてかなり大きな流動量が推定された。流量の推定精度の問題が含まれる可能性はあるが、既往研究における知見とも対比すると、曝気循環により誘起される流量はかなり大きいことが推測される。また、鉛直的な流動構造の形成に対しては、ダムからの取水深度の影響が大きいと考えられる。したがって、選択取水と曝気循環の両者のバランスを考えた運用がこれらの効果を大きく左右する可能性がある。

(2)ダム貯水池への栄養塩負荷の推定

集水域の人口密度および土地利用形態と、流入 TP 濃度の統計的関係の解析について、説明変数には、TP 濃度との相関が 0.70 以上の要素 (人口密度、農地・森林・建物用地の割合) を選定した。しかし、土地割合の項は互いの相関が高く、多重共線性が発生する可能性があるため、最も相関の高い農地を採用した。重回帰分析から式 (1) が得られた。

$$P = 0.009 + (2.7 \times 10^{-4} D_p) + 0.14 R_a \quad (1)$$

ここで P は流入河川の平均 TP 濃度 (mg/l), D_p は人口密度 (人/km²), R_a は農地の割合で

ある。式(1)の定数項 0.009 は、人為的な負荷がなくても生じる TP 濃度と考えることができ、人口密度と農地によってさらに TP が増加していくと解釈できる。この式による決定係数は 0.77 であり、比較的高い再現性を確認した。標準偏回帰係数は人口密度が 0.50、農地が 0.43 で、流入 TP に与える影響は人口密度のほうが大きいことが示唆された。

将来展望については、人口シナリオの解析結果から、日本の人口は減少傾向にあり、2100 年には現在の半数以下となる集水域もあることを確認した。また、将来人口と式(1)より、人口が減少するダム湖においては、TP 濃度も減少していくことが示された。

(3)安定同位体を用いた栄養塩循環解析

分析の結果、ダム湖内の NO_3^- の ^{17}O 値は +0.5 ‰前後であり、 NO_3^- の混合比は 2 %程度であることが分かった。これは、貧栄養湖における NO_3^- の混合比(摩周湖 10 %、支笏湖 12 %、倶多楽湖 21 %)に比べると有意に低い。この混合比と大気からの沈着速度(0.8 kmol/day)を用いて、湖内の総硝化速度(NO_3^- 生成速度)を見積もったところ、河川からの NO_3^- 流入速度と同程度であることが分かった。また、得られた総硝化速度と湖内の総 NO_3^- 量から見積もった湖内の NO_3^- の平均寿命は、およそ 50 日程度であった。これは貧栄養湖における NO_3^- の平均寿命(1年-数年)より有意に短く、貧栄養湖に比べて生産(硝化)も消費(同化)も活発であることが確認された。

(4)湖沼生態系モデルの検討

計算は、2011 年 10 月 1 日から 2012 年 10 月 31 日の約 1 年間を対象として行った。生物の生息基盤環境と言える湖内水温の検証については、流入出部近くの観測点において底面から 0.2m の位置で測定されたデータとの比較を行った。計算結果は、やや過小評価気味であるものの、概ね測定値を再現していると言える結果であった。ヤマトシジミの再生産状況についての再現性に関しては、約 2 週間間隔で 7 月から 9 月に行った観測に基づいて湖内 7 地点における浮遊幼生数の平均値と、本論文の解析により得られた着底稚貝数の湖内平均密度とを比較した。両者は単純に比較することはできないが、7 月に観測と計算の両方で値が小さく、再生産は活発ではない傾向が一致した。ヤマトシジミの稚貝および成貝の成長については、殻長 1cm 前後で過小評価しており、殻長 0.5cm 前後で過大評価となる結果であった。この両者のバランスで、総個体数としては概ね整合するような結果が得られている。過大・過小評価に関しては、計算結果の殻長約 1cm 以上は 2011 年から生息していた個体群で、それより小さいものが 2012 年に加入した個体群である。実測ではこれが連続的に分布を形成しているのに対し、解析では分離した結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

(1) 梅田信, 西村亜紀, Atas Pracoyo, 田中仁, 佐々木幹夫: 汽水湖におけるヤマトシジミ生息に関する解析手法の構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), 72, I_649-I_654, 2016 査読有。

(2) Megumi Fujibayashi, Hitoshi Tanaka, Osamu Nishimura: Food Sources Assimilated by Unionid Mussels Using Fatty Acid Trophic Markers in Japanese Freshwater Ecosystems, Journal of Shellfish Research, 35, 231-235, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.2983/035.035.0125>, 査読有。

(3) 角皆潤, 中川書子: 安定同位体を指標に用いた窒素酸化物の起源解析と窒素循環定量への応用, エアロゾル研究, 31, 5-14, 2016, 査読有, <http://doi.org/10.11203/jar.31.5>。

(4) 桑原亮, 梅田信: 流域背景に基づくダム湖流入河川の栄養円濃度および負荷量の統計的解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71, I_745-I_750, 2015, 査読有, http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_745。

(5) 堀井貴之, 梅田信, 佐藤洋人, 木村文宣: 曝気式循環施設により成層破壊されている三春ダム貯水池内の流動構造, 土木学会論文集 B1 (水工学), 70, I_1615-I_1620, 2014, 査読有, http://doi.org/10.2208/jscejhe.70.I_1615。

〔学会発表〕(計 18 件)

(1) 梅田信, 西村亜紀, Atas Pracoyo, 田中仁, 佐々木幹夫: 汽水湖におけるヤマトシジミ生息に関する解析手法の構築, 土木学会水工学講演会, 2016 年 3 月 16 日, 東北工業大学(宮城県・仙台市)。

(2) 中川書子, 木幡祐介, 角皆潤, 小松大祐, 田中敦, 梅田信: 自然同位体トレーサーを用いた新生産・再生産速度の定量: 人口同位体トレーサー添加培養との比較, 日本地球化学会第 62 回年会, 2016 年 9 月 16 日, 横浜国立大学(神奈川県・横浜市)。

(2) M. Umeda, R. Kuwahara, Y. Ishiyama: Prediction of Reservoir Water Quality in Japan under a Future Climate Change, AOGS 12th Annual Meeting, 2015 年 8 月 2 日, Suntec Convention Centre Singapore (Singapore)。

(4) 中川書子, 大山拓也, 角皆潤, 梅田信: 富栄養化湖沼における窒素循環速度の定量: 硝酸の天然同位体トレーサーを用いた解析, 日本地球化学会第 61 回年会, 2014 年 9 月 16 日, 富山大学(富山県・富山市)。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅田 信 (UMEDA, Makoto)

東北大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10447138

(2) 研究分担者

中川 書子 (NAKAGAWA, Fumiko)

名古屋大学 大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：70360899

藤林 恵 (FUJIBAYASHI Megumu)

秋田県立大学 生物資源学部・助教

研究者番号：70552397

(3) 連携研究者

()

研究者番号：