

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14308

研究課題名(和文) 微粒子陸水工学の確立と環境生物化学への応用

研究課題名(英文) Study on Fine Particulate Matter from Viewpoints of Limnological Engineering and Application to Environmental Biochemistry

研究代表者

梅田 信 (Umeda, Makoto)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10447138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：ダム湖や自然湖沼において、浮遊微粒子の挙動は、工学的および環境的な問題と強く関わっている。本研究では、微粒子の水理学的挙動に関して、水温成層した貯水池において湖水流動と懸濁粒子に関する現地観測を行った。その結果、流速変動量は、鉛直成分が水平成分と同オーダーの大きさで生じており、このような流動が、湖水中で懸濁物質の長期浮遊が維持される要因である可能性が推測された。浮遊懸濁物質に関わる化学的な挙動については、三酸素同位体トレーサーを利用して、水柱や粒子内、堆積物中における酸素消費速度を見積もることに挑戦し、ある程度酸素消費速度の速い環境で実測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Behavior of fine particulate matter in lakes and reservoirs is deeply related to environmental and engineering problems in those water bodies. Measurements were conducted in thermally stratified reservoirs on hydrodynamic conditions of water flow and fine suspended particles. The results showed velocity fluctuations of the same magnitude in vertical direction as horizontal directions, which could be one of the main factor of long term suspension of fine particular matter in the water bodies. As for chemical behavior of suspended particles, quantification of oxygen consumption rate in those environment of water column, inside of particle, and bottom sediment was undertaken using triple oxygen isotope tracer. The results of the measurements indicated validity of the method proposed in this study in the environment of fast oxygen consumption.

研究分野：環境水理学

キーワード：環境水理学 湖沼 懸濁物質

### 1. 研究開始当初の背景

湖沼やダム貯水池は、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。これに対して、近年顕在化してきたと考えられている温暖化の影響により、過剰に増殖した植物プランクトンや、豪雨で生じた微細土砂粒子が、水道水の浄水過程に影響を及ぼす事象も多発している。すなわち、植物プランクトンによる水道水の異臭味や、極度な濁りが、水道供給の停止を招く。

上記の工学的な問題に加え、濁質フロックの内部で生じる生物化学反応により、亜酸化窒素やメタンのような温室効果ガスの排出や栄養塩循環に影響している可能性が指摘されている。さらに、密度成層水域中の粒子沈降速度と、フロック内の移流拡散のバランスが、窒素や酸素の供給速度を通じて、生物化学反応条件に影響を及ぼすのではないかと推測されている。

これらのことから、微粒子に係わるマクロ・ミクロな環境水理学的挙動の解明が、ローカルおよびグローバルな水環境問題の解決に寄与すると考えられる。

### 2. 研究の目的

ダムは、治水や利水などに関して重要な役割を担っている社会資本である。しかしながら、ダムの建設、供用が、河川環境に対して影響を及ぼしていることも多く指摘されてきている。河川の物質移動や生態系の面からは、ダムの上流域で生産された土砂に加え、リンやシリカ等の栄養物質が、ダム貯水池内でトラップされ、下流河川や海域へ影響を及ぼすという事例もある。また、洪水調節の機能とのトレードオフとして、一時的に貯め込んだ洪水を、その後放流をするという機能操作のために生じる河川水質的な問題が、濁水長期化現象である。これにより、ダム及び下流河川の景観が損なわれたり、魚類等の水産資源に悪影響を及ぼしたりする。そのため、濁水長期化現象に関しては、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、水温成層した貯水池での微細懸濁粒子の挙動は、水理学的にも十分に解明されていない。そのため、下流河川での水利用や漁業活動のために、洪水発生後に濁りの継続状態を予測する場合にも、十分に精度を持った予測を行う事が難しい。そのような課題に対し、本研究では、水温成層したダム貯水池において、現地観測を実施し、濁質挙動に対する水理学的な詳細メカニズムの解明に向けた検討を実施した。

また、上記の工学的な問題に加え、濁質フロックの内部で生じる生物化学反応により、亜酸化窒素やメタンのような温室効果ガスの排出や栄養塩循環に影響している可能性が指摘されている。さらに、密度成層水域中の粒子沈降速度と、フロック内の移流拡散のバランスが、窒素や酸素の供給速度を通じて、生物化学反応条件に影響を及ぼすのではないかと推測されている。大気中のメタンは

代表的な温室効果ガスの1つであるが、その発生源(供給源)や挙動については未解明な部分が多い。ダム湖を含む湖沼などの水圏環境はメタンの主要発生源となっており、水圏から大気へのメタン放出量の変化は、大気中のメタン濃度を激変させるポテンシャルがある。したがって湖沼などの水圏におけるメタンの起源や挙動を正確に理解することは非常に重要である。また、湖沼などの水環境中では、浮遊懸濁物質などの有機物粒子の分解等により、溶存酸素が消費されることにより、粒子内や堆積物中などに還元環境を形成し、これが温室効果気体であるメタンや亜酸化窒素を生成する場となっている。そのため、浮遊懸濁物質などの粒子内や堆積物中における溶存酸素消費速度を定量することは、湖沼環境を評価する上で重要である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 微細粒子挙動の水理学的検討

本研究では、一級河川・北上川水系胆沢川に建設された胆沢ダム貯水池を対象とした。胆沢ダムは、従来供用されていた石淵ダムの再開発として、その約2km下流に建設され、2013年に竣工した大規模なダムである。その結果、滞留時間が長い貯水池へと再開発された経緯もあり、洪水流入後の貯水池内における濁水の滞留と濁水放流の長期化について懸念される面があり、貯水池内での濁水挙動についての検討が必要とされている。

貯水池において、濁水の挙動が問題となる時期は、洪水の発生と水温成層の形成が重なる夏季の成層期である。このことを踏まえ、2ケ年に渡って、夏期の現地観測を実施した。2016年においては、9月12日に現地観測を実施した。この時の貯水池の概況としては、観測実施前の8月22日に、台風9号によりピーク流入量が約474 m<sup>3</sup>/sの比較的大きな洪水が生じていた。またその後も100 m<sup>3</sup>/sを超える小規模な洪水が2回流入していた。なお、8月22日の台風洪水での、洪水時回転率(洪水流入量/総貯水容量の比)は0.11であったことから、分類としては、成層破壊が生じない小規模洪水であり、洪水はすべて貯め込むような運用がなされていた。

本研究の現地観測実施時の成層条件を確認するために、水温および濁度の詳細な鉛直分布を計測した。計測には、多項目水質計RINKO-Profilier (JFEアドバンテック株式会社製)を用いた。また、湖水中に浮遊する微粒子の挙動に直接的な影響を及ぼすと考えられる湖水の流動の計測を行った。時空間的により細かな流速の変動を計測できるよう、超音波ドップラー式3次元精密流速計VECTOR (Nortek社製)を用いた。この流速計では、センサー近傍でサンプル範囲が約0.9cm<sup>3</sup>から3.5cm<sup>3</sup>程度での流速を測定している。サンプリングレートは1~64Hzの計測が可能なものである。この流速計(全長0.82m、水中重量約4.9N)を、水中での測定時に姿勢を

安定させ、また動揺を出来る限り小さくするための仕掛けを考案して設置した。流速計は、小型のブイ等を用いて流速計を含めた水中重量が概ねゼロになるように調整した架台に取り付けた。これを浮力約  $1.0 \times 10^2$  N の水中ブイ、および湖底上に設置した水中重量約  $2.5 \times 10^2$  N の重りを用いて、計測深度で固定した。また流速測定中は、観測船と水中ブイの間のロープには不要な張力が掛からないようにし、水中ブイの浮力によって流速計の位置と姿勢が維持できる仕組みとした。これにより、表層から底層までを水深別に計測した。測定深度は、水温躍層の状況等を考慮して設定した。ただし、流速計を係留したロープの長さなどに誤差があり、実際の計測水深は設定水深と一致しないため、流速計に内蔵されている圧力計から求めた水深を測定水深とした。各水深での計測は、サンプリング周波数 16Hz 乃至 64Hz で約 10 分間ずつ行った。また、測器に内蔵された傾斜度計のデータを用いて、係留された測器の揺動状況を推定し、過度な揺れが生じていないことなどを確認した。

#### (2) 微粒子の生物化学的挙動の検討

酸化的な湖沼環境で過飽和化しているメタンの起源を特定するため、琵琶湖をフィールドとして、水柱中の溶存メタンの炭素・水素安定同位体比を指標に用いてメタンの起源と水環境における挙動を検討した。酸化的な水環境試料に溶存するメタンについて、炭素同位体比を指標として利用した研究は過去に複数存在したが、水素同位体比を用いた研究はほとんどなかった。しかし炭素と水素の両方を指標として利用することにより、生成後の分解の進行に関わらず、起源を特定することができる可能性がある。そこで本研究では、炭素と水素同位体比の両方を同時に定量して、湖沼中のメタンの酸化の進行度合を評価した。さらに、これを補正した新しい指標を導入し、メタンの起源を推定できるようにした。

水環境における溶存酸素消費速度の定量に関しては、三酸素同位体トレーサーを利用することによって、水柱や粒子内、堆積物中における酸素消費速度を見積った。すなわち、水柱中の酸素消費反応は  $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  と表されるため、酸素原子の一部を  $^{17}\text{O}$  に置換した  $\text{O}_2$  を水試料に添加し、生成する  $\text{H}_2\text{O}$  の  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  比の時間変化を測定することで、酸素消費速度を見積もる手法を試み、これを沿岸海域の環境を対象に実測を行なった。

湖沼やダムなどの水環境中の硝酸は、一次生産や生態系構造を直接的に左右する可能性が高い。そのため、水環境中の硝酸がどのような過程で生成または消費され、それがどの程度の速度で進んでいるのかについて知る必要がある。しかし、系外からの流入はもちろん、系内における硝化による生成、および同化や脱窒による消費など、多様な供給・

消費過程を考慮せねばならないため、水環境中の硝酸濃度の制御因子を明らかにすることは容易ではない。この点を考慮し、本研究では湖沼や河川水中に溶存する硝酸の窒素・三酸素同位体組成に着目し、この時空間変化を調べ、系内の脱窒・同化・硝化速度を個別に見積った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 微細粒子挙動の水理学的検討

観測時の概略としては、次のような状況であった。水平流速の各成分が  $1\text{cm/s}$  以下程度での変動であった。観測当日はほぼ無風であり、またダムへの流入量も平水流量に概ね近い流量であったため、流動への外力要因が小さい状況であった。

図1は、2016年9月の胆沢ダムにおける結果であり、各水深の流速について、平均値および標準偏差を方向成分別に示したものである。ここで、生データに見られたやや大きな変動は、流速計自体が揺動した動きを捉えた速度である可能性があるため、このような変動を示すデータについては除去して整理する必要がある。しかしながら、本論文の計測で得られているデータからは、客観的に除去する方法を構築することができなかつたため、時系列グラフの目視により概ね安定していると判断したデータを抽出し、平均および標準偏差の導出に用いた。また、本来本研究で使用した流速計では乱流強度等の算出も可能であるが、測定データの不確実性についての評価が十分できず、また整理対象とすることができたデータが細切れのような状態ともなってしまったことから、簡易的な評価方法として、測定値の標準偏差により評価をおこなった。

図上段において水深 5m の東西流速が飛び抜けて大きな値が出ている。これは水深 5m 以浅ではダムからの取水や弱いながらも湖面風の影響が見られたものと考えられる。それより下層については、表水層の水深 20m 以浅でやや大きな値が出ているが、深水層と比較して大きな差があるというほどではない。標準偏差（水平方向成分）については、水温躍層にあたる水深 20m から 22m で流速変動が小さくなっていることが見られる。これは、密度成層の効果により運動が抑制されている状況が現れた可能性があると考えられる。

一方で鉛直方向成分（図下段）については、平均流速が水平方向成分に比較して桁違いで小さい。このような平均流速の差に対して、標準偏差は、水平方向の半分程度と比較的大きな流速変動が、鉛直方向に対しても生じていることが分かる。このような大きな流速変動が、本研究の観測で対象としたような懸濁粒子を長期間に渡る浮遊状態を維持している機構であると考えられる。

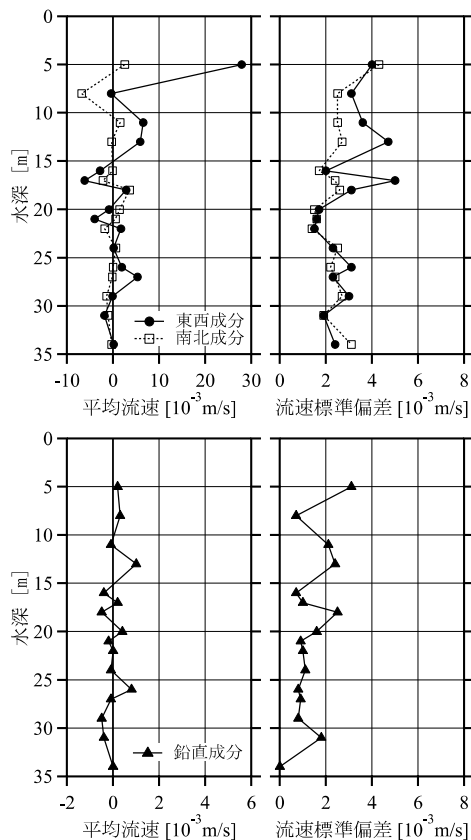


図 1 2016 年 9 月の胆沢ダム貯水池における流速変動の鉛直構造（上段：水平方向成分，下段：鉛直方向成分）

(2) 微粒子の生物化学的挙動の検討

表層水の過飽和をもたらすメタンの起源としては、河川からの流入、湖底堆積物からの供給、沈降粒子から供給の3つの可能性を考え、それぞれについて同位体比を定量化し水柱のメタンと比較した。その結果、対象水域である琵琶湖において、表層で過飽和となっているメタンは、河川からの流入によって供給されている可能性が高いことが分かった。本研究で開発した手法は、今後様々な湖沼環境に応用し、メタンの起源や挙動に関する知見を深めることができると考えられる。

<sup>17</sup>O 法により求めた水柱中の酸素消費速度は 1.5-40 μmol/L/day 程度であり、表層が速く、深度が大きくなるにつれて小さくなる結果となった。この結果と堆積物表面における酸素消費速度との比較から、対象沿岸海域の貧酸素水塊の形成には、海底堆積物よりも水柱中の酸素消費の方が高い寄与を持つ可能性が示された。

硝酸挙動に関しては、琵琶湖への流入河川の流下過程における各成分（水中の全硝酸、大気沈着由来の硝酸および硝化によって生成する硝酸）の混合比を正確に定量し、この時空間変化から、系内の脱窒・同化・硝化速度を個別に見積もることに成功した。

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 4 件)

- (1) Tsunogai, U., T. Miyauchi, T. Ohyama, D.D. Komatsu, M. Ito, and F. Nakagawa (2018) Quantifying nitrate dynamics in a mesotrophic lake using triple oxygen isotopes as tracers. *Limnology and Oceanography*, 63, Issue S1, S458-S476.
- (2) 水田直樹, 梅田信, 小堀文裕, 水温成層したダム貯水池における流速分布と懸濁粒子に関する現地観測, 土木学会論文集 G(環境), 73, I\_315-I\_321, 2017.

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) 内藤雄太, 梅田信 (2018) 密度成層した貯水池における流動解析, 東北地域災害科学研究集会.
- (2) 三好 友子, 角皆 潤, 中川 書子, 鋤柄 千穂, 伊藤 昌稚, 小松 大祐 (2017) 安定同位体を指標に用いた酸化的水圏環境における過飽和メタンの起源解明. MIS19-P04, JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- (3) 水田直樹, 梅田信, 小堀文裕 (2017) 水温成層したダム貯水池における流速分布と懸濁粒子に関する現地観測, 土木学会地球環境シンポジウム.
- (4) 柏木 章吾, 角皆 潤, 伊藤 昌稚, 鋤柄 千穂, 中川 書子 (2017) 酸素の微量同位体トレーサーを用いた水柱中の酸素消費速度定量法開発. 3D04, 2017 年度日本地球化学会第 64 回年会.
- (5) 池上 文香, 角皆 潤, 小幡 祐介, 安藤 健太, 中川 書子 (2017) 硝酸の三素同位体組成を利用した河川水中窒循環速度測定. 3P19, 2017 年度日本地球化学会第 64 回年会.

〔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

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )