

## 〈論文〉

## 霞ヶ浦の底泥表層の巻き上げ時における栄養塩類と鉄・マンガンの溶出特性

中 藺 孝 裕<sup>1)</sup>, 阿 部 千 雅<sup>2)</sup>, 鈴 木 穰<sup>3)</sup><sup>1)</sup> 独土木研究所水環境研究グループ (〒305-8516 つくば市南原1-6 E-mail: nakazo55@pwri.go.jp)<sup>2)</sup> 国土交通省国土計画局 (〒100-8918 千代田区霞が関2-1-2)<sup>3)</sup> 独土木研究所水環境研究グループ (現所属: 材料地盤研究グループ)  
(〒305-8516 つくば市南原1-6 E-mail: ysuzuki@pwri.go.jp)

## 概 要

霞ヶ浦の底泥表層は、浅い湖沼特有の巻き上げが発生しているが、これに伴う底泥からの栄養塩類や金属類の溶出挙動は明確ではない。このため本研究では、霞ヶ浦の底泥を用いて、底泥の巻き上げ強度やDO条件を変えた溶出実験を行い、これらが栄養塩類等の溶出挙動に与える影響を検討した。その結果、底泥巻き上げに伴い、 $\text{NH}_4\text{-N}$ やFeは底泥間隙水からの回帰により、直上水の濃度が上昇するのに対し、他の栄養塩類等はDO濃度条件の影響を受け、好気条件では溶出が抑えられることが明らかとなった。

キーワード: 底泥, 溶出, 栄養塩類, 金属類, 巻き上げ

原稿受付 2009.6.11

EICA: 14(2・3) 45-52

## 1. は じ め に

湖沼においては、水質汚濁防止法や湖沼水質保全特別措置法が施行・改正され、工場の汚濁物質排出規制が強化(平成17年6月)されたものの、河川・海域に比べ水質環境基準の達成率が低く、更なる改善が求められている。指定湖沼の一つ霞ヶ浦においても然りで、汚濁要因としては、生活排水や農畜産排水等の外部汚濁要因<sup>1)</sup>と、プランクトン等の死骸の蓄積を原因とする底泥からの溶出負荷による内部汚濁要因<sup>2-6)</sup>が挙げられる。

近年の霞ヶ浦の底泥表層付近は一般的に浮泥と呼ばれる微細な粒子の層であり、含水比は1000%を超え、浅い湖沼特有の巻き上げが発生している。懸濁物質が水中に回帰することによる濁度の増加が問題となっており、それによる底泥からの栄養塩類の溶出も、内部汚濁の一因として懸念されている<sup>7-9)</sup>。湖沼内における底泥の巻き上げに関する研究<sup>10-14)</sup>が実施されているが、現場での計測に基づくものであり、制御された実験において、溶存酸素濃度条件の影響や栄養塩類の溶出機構、藻類増殖に影響を与える微量金属の溶出特性について検討された例はない。

このため、霞ヶ浦西浦(湖心)の底泥を用いて、底泥巻き上げ時の栄養塩類および金属類の溶出について詳細な挙動の確認を行い、その特性を評価した。

## 2. 実 験 方 法

## 2.1 底泥採取

霞ヶ浦西浦の底泥採取地点は、Fig. 1に示す湖心(以下、St.1と言う)とし、平成17年の10、11月の秋季底泥を採取して、実験に用いた。なお、底泥採取地点の水深は約6mであり、底泥上の直上水のDOは6mg/L以上であった。

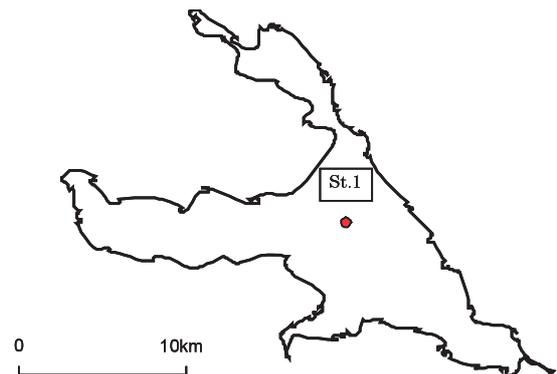


Fig. 1 Locations of sampling site in Lake Kasumigaura-Nishiura

底泥は、船上より不攪乱柱状採泥器(離合社製)を用い、アクリル製円筒(内径10cm又は4cm×高さ50cm)内にコア試料として複数本採取した。採取した底泥試料は、低温を保ち底泥表面を攪乱しないように実験室に運搬した。また、底泥直上水を底泥表面上の約50cmから水中ポンプを用いてポリタンク内に

採取した。

採水時に、現地において表層と下層（底泥直上水）の水温、DO、pHは、水質計（U-22DX、HORIBA製）を用い測定した。採取した底泥試料の一部は、表層：0-10 cm、中層：10-20 cm、下層：20-30 cmに切り分けた後、各種分析に供した。

## 2.2 底泥溶出実験

10、11月に採取した湖心の底泥を用いて、巻き上げ方法の異なる2つの溶出実験を嫌気および好気条件下で行うとともに、比較として静置溶出実験（攪拌無し）を行った。なお、別途実施した静置溶出実験において再現性が確認されているため、各1条件において実施した。実験期間は15日間とした。底泥の採取時期と巻き上げ溶出実験の内容をまとめてTable 1に示す。

### (1) 静置溶出実験

コア試料の上層水を排除した後、底泥の厚さを15 cm程度にあわせ、予め1.0  $\mu\text{m}$ のGF/Bろ紙（ワットマン社製）でろ過した直上水を底泥表面を乱さないよう底泥上30 cmまでサイホンにて注入した。次いで、20°Cの恒温室（暗条件）にてAir曝気による好気条件（DO：8 mg/L以上）とN<sub>2</sub>曝気による嫌気条件（DO：1 mg/L以下）で静置状態（攪拌無し）の溶出実験を15日間行った。

### (2) 連続攪拌巻き上げ溶出実験

底泥巻き上げ方法をFig. 2に示す。連続攪拌巻き上げの系a)は、実験期間中を通して160 rpmで攪拌を行い、実験期間中の直上水のサンプリング頻度は、1~2日に1回とした。

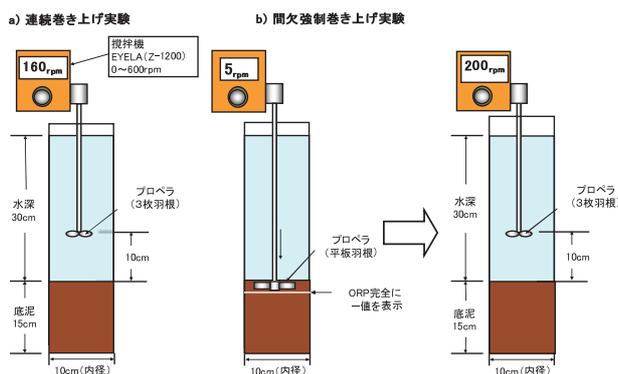


Fig. 2 Experimental apparatus for sediment resuspension and nutrients release

なお、a)における連続攪拌強度は、濁度が平成12~15年の西浦現地自動観測の測定値（霞ヶ浦河川事務所<sup>15)</sup>の平均値である30度となるように設定した。

### (3) 間欠強制巻き上げ溶出実験

底泥を強制的に巻き上げる間欠強制巻き上げの系Fig. 2 b)を設定した。実験期間15日中に2回（8、15日目）、ORP値が完全にマイナス値を示す還元層（3 cm）まで平板プロペラを静かに下げ、初期は緩やかな攪拌速度5 rpm（2 min）で底泥層を崩した。その後、3枚羽のプロペラに直ぐに交換し、攪拌速度200 rpm（9 min）で巻き上げを行った後、攪拌を停止した。実験期間中は、AirまたはN<sub>2</sub>曝気を連続して行い、直上水のサンプリング頻度は、通常の1~2日の1回に加えて、巻き上げ直後には高くした。

## 2.3 底泥中のORP測定

底泥中の酸化層と還元層の濃度境界層を把握することは底質状況を知る上において重要<sup>16-18)</sup>であり、底泥中の酸化還元電位（ORP）測定には、一般的にハンディタイプの測定器が用いられている。しかしながら、センサー部分が太いため、底泥によっては表面数mmの酸化層と還元層の境界を詳細にプロファイルすることが、難しい状況にある。よって、巻き上げ実験の前後に底泥中のORPの鉛直分布を詳細に測定するため、Fig. 3に示す装置を用いた。土壌Eh計（PRN-41：藤原製作所社製）のセンサー部に微小Eh電極を用いることで、深さ0.5 mmの間隔でORPの変化を調べた。

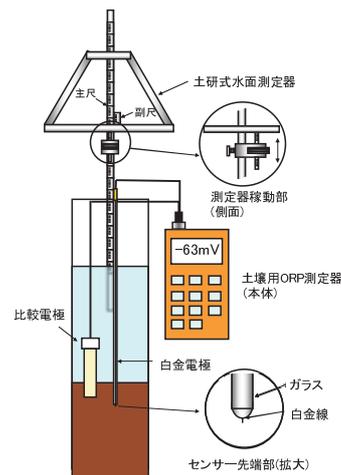


Fig. 3 Details of ORP measurement of Sediment

Table 1 Experimental conditions

| 巻き上げ条件     | 攪拌条件                                   | 試験期間 | DO・曝気条件 |                    | 水温   | 採取底泥 |     |
|------------|--|------|---------|--------------------|------|------|-----|
|            |  |      | Air・曝気  | N <sub>2</sub> ・曝気 |      | 10月  | 11月 |
| 静置(巻き上げ無し) | -                                      | 15日  | ○       | ○                  | 20°C | ○    | ○   |
| 連続攪拌       | 直上水 160rpm(6時間)                        | 15日  | -       | ○                  | 20°C | ○    | -   |
| 間欠強制巻き上げ   | 底泥中 5rpm(2min) → 直上水 200rpm(9min) (2回) | 15日  | ○       | ○                  | 20°C | -    | ○   |

## 2.4 水質および底質分析

表層, 中層, 下層に切り分けた底泥は, 遠心分離により間隙水を採取するとともに, 強熱減量, 窒素およびリン含有量, 粒度分布を測定した。

分析用に採水した直上水および間隙水の試料は, GF/Bろ紙(保留粒子径: 1.0 μm)によるろ過を行った後, 栄養塩自動分析装置(TRAACS2000型: ブラン・ルーベ社製)にてアンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N), 亜硝酸性窒素(NO<sub>2</sub>-N), 硝酸性窒素(NO<sub>3</sub>-N), 溶存態窒素(D-N), オルトリン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P), 溶存態リン(D-P)の濃度を測定し, 溶存態有機物(DOC)の分析には全有機体炭素計(TOC5000型: 島津製作所社製)を用いた。

また, 栄養塩類と共に藻類増殖の必須微量元素である<sup>19-21)</sup>鉄(Fe)とマンガン(Mn)についても, 溶存態の測定を行った。金属類の分析は, ろ過試料についてICP-MS(X7CCT: サーモエレクトロン社製)によりMnを, ICP-AES(Optima3000: パーキンエルマージャパン社製)によりFeの分析を行った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 現地水質と実験供試底質の性状

試料採取時におけるSt.1の水質をTable 2に示す。DOは約7 mg/L, pHは約8と10月と11月では差は認められなかった。水温は10月には18℃であったが, 11月時点は11℃と, 7℃の低下が確認された。D-P, D-Nは共に10月は11月の2倍以上の濃度であった。

泥質はシルト分: 59~73%, 粘土分: 26~40%, 砂分: 1%と, シルト, 粘土分が多い性状であった。なお, 表層部分の含水比は600%を越え高かった。

10月に採取した底泥鉛直方向における底泥間隙水中のNH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, DOCおよびIL(Ignition Loss: 強熱減量)をFig. 4に示す。なお, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, DOCの現地底泥直上水中(底泥表面より50 cm付近)の濃度も併せてFig. 4上の深度0 cmの位置に示す。

NH<sub>4</sub>-N濃度は, 底泥表層の間隙水中で0.9 mg/Lほどあり, 一方, 直上水が0.02 mg/Lと低いことから, 底泥間隙水の蓄積が大きいことが分かった。これとは逆にNO<sub>3</sub>-N濃度は, 直上水0.75 mg/Lに対して, 底泥表層間隙水0.1 mg/Lであり, 好気状態下で酸化態となった窒素が, 直上水から底泥中へ拡散しているものと考えられる。PO<sub>4</sub>-P濃度については, 直上水と

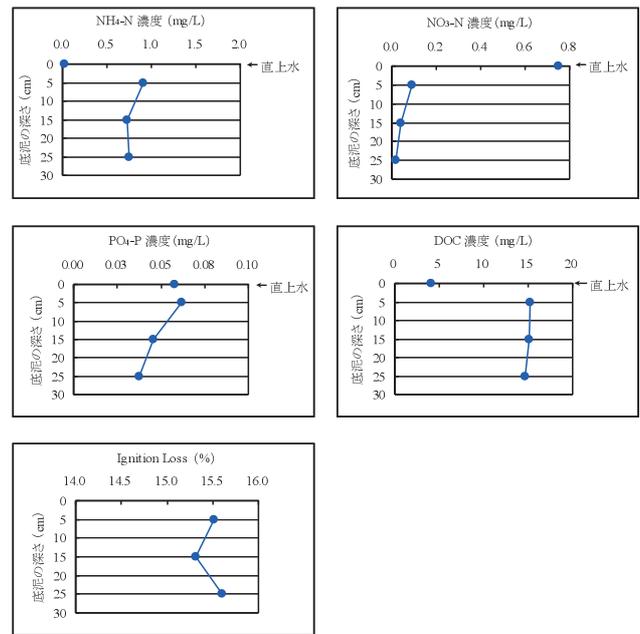


Fig. 4 Profiles of liquid phase concentration in the sediment along depth with surface water concentration (October)

底泥表層の濃度は変わらず, 濃度均衡が生じていると考えられる。また, 表層から中層, 下層へと濃度が低下する傾向が確認された。DOC濃度は, 直上水濃度が4.1 mg/Lに対し, 底泥間隙水の濃度は3倍以上であった。

仮に巻き上げが生じた場合, 水中への栄養塩類の回帰が起りやすい状態であることが分かった。なお, 強熱減量(IL)は15.5%であり, 同時期に別途分析を行った琵琶湖(南湖)が9%であった<sup>22)</sup>のに比べると高い値を示した。これは藻類発生による有機物負荷量が多いためと推察される。

### 3.2 底泥溶出特性

#### (I) 底泥巻き上げ時のSS濃度の特徴とpH等の変化

静置溶出実験(以降, 静置実験)時の直上水のSS濃度は好気条件で36 mg/L, 嫌気条件で24 mg/Lであった。連続攪拌巻き上げ溶出実験(以降, 連続巻き上げ実験)時の直上水のSS濃度は好気条件で900 mg/L, 嫌気条件で1,500 mg/Lであった。

底泥を強制的に巻き上げる間欠強制巻き上げ溶出実験(以降, 間欠巻き上げ実験)による直上水のSSの濃度変化をFig. 5に, pH, DO, DOCの経時変化をFig. 6に示す。この時のSS濃度は最大で約20,000 mg/Lであったが, 実験コア試料中の直上水が30 cm

Table 2 Water quality of the surface water

| 採水日    | 採水地点  | 水温(℃) | DO(mg/L) | pH  | D-P(mg/L) | D-N(mg/L) | DOC(mg/L) | NH <sub>4</sub> -N(mg/L) | NO <sub>3</sub> -N(mg/L) | PO <sub>4</sub> -P(mg/L) |
|--------|-------|-------|----------|-----|-----------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 10月26日 | 底泥直上水 | 17.9  | 7.06     | 7.8 | 0.08      | 1.60      | 4.05      | 0.02                     | 0.75                     | 0.06                     |
| 11月29日 | 底泥直上水 | 11.4  | 6.91     | 8.1 | 0.03      | 0.82      | 6.04      | 0.02                     | 0.37                     | 0.004                    |

であることより、現地水深 6 m に換算すると 1,000 mg/L であり、濁度は 1000 程度となる。平成 12 年度以降の霞ヶ浦湖心で観測される最大の濁度が 150~200 度であることから、この実験における底泥の巻き上げ強度は、湖心での最大濁度の 5 倍程度と考えられる。

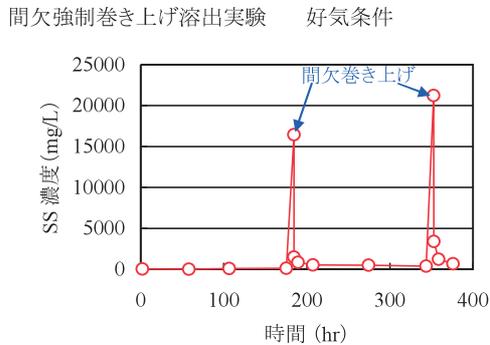


Fig. 5 Change of suspended solids(SS) concentration in intermittent forced resuspension experiment

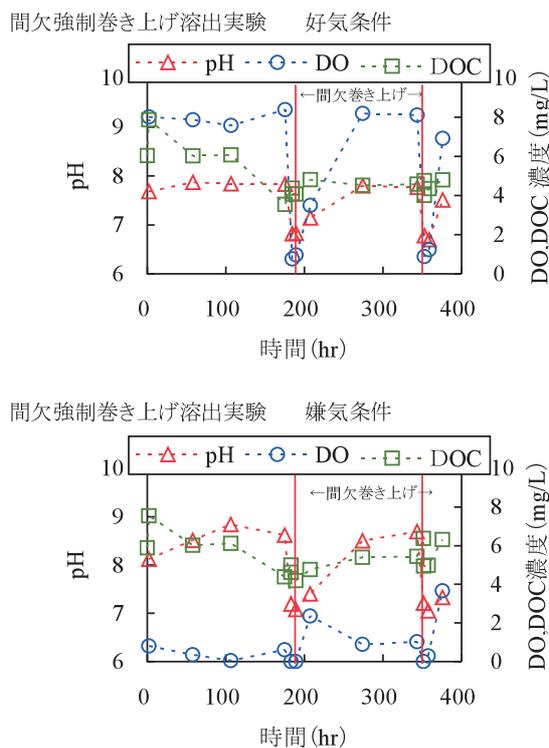


Fig. 6 Changes of pH, DO, DOC concentration in intermittent forced resuspension experiment

実験中の pH および DO, DOC の濃度は、底泥の巻き上げ時に下がる傾向を示した。pH は、好気条件下において通常時は 7.7 であったが、巻き上げ直後には 6.8 付近まで低下した。嫌気条件下において通常時は 8.6 ほどであったが、巻き上げ直後には 7.2 付近まで低下した。しかしながら、巻き上げ後 9 日目には元の pH に回復した。DO 濃度は、好気条件下で強い底

泥の巻き上げが起こった際は、8 mg/L が瞬時に 0.7 mg/L まで減少した。これは、嫌気状態の底泥が直上水と混合され、化学的反應による急激な DO の消費が起こったためと考えられる。一方、嫌気条件においては、強い巻き上げ時に DO 濃度が上昇した。この要因は、試験期間中に N<sub>2</sub> 連続曝気を行っていたが、装置上部の密閉が不完全であった影響と考えられる。DOC に関しては、一回目の巻き上げ時に濃度の低下が生じたが、好気と嫌気での濃度差は少なかった。

## (2) 底泥巻き上げ方法と N, P の溶出特性

間欠巻き上げ実験と連続巻き上げ実験および静置実験の好気条件（但し、連続巻き上げ実験を除く）と嫌気条件における栄養塩類 (NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P) の溶出挙動の結果を Fig. 7, 8 に示す。

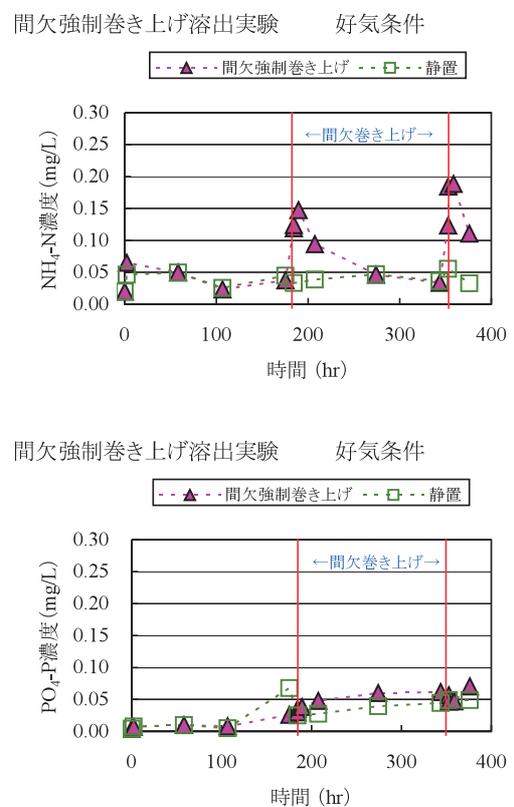
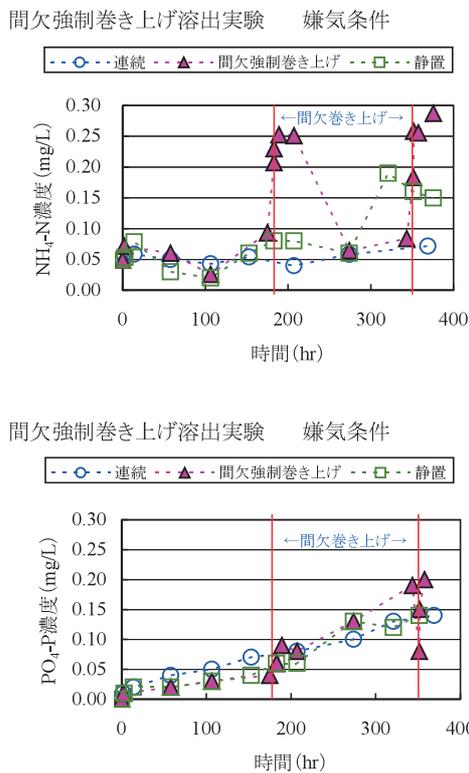


Fig. 7 Comparison of NH<sub>4</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P concentration between intermittent forced resuspension experiment and no mixing experiment under aerobic condition

好気条件における間欠巻き上げ実験の溶出 NH<sub>4</sub>-N 濃度は、静置実験に比べ、顕著に高い溶出を示した。一方、PO<sub>4</sub>-P 濃度に関しては、間欠巻き上げ実験と静置実験の間に顕著な差はなく、底泥が高濃度で巻き上がった場合でも、直上水が予め好気状態であれば、リンの溶出が抑制されることが明らかとなった。これは、PO<sub>4</sub>-P が Fe, Mn 等の酸化状態にあるイオンと結合することにより、溶出が抑えられたものと考えられる。



**Fig. 8** Comparison of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$  concentration among experiments of intermittent forced resuspension, continuous mixing and no mixing under anaerobic condition

嫌気条件においても、間欠巻き上げ時の溶出  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度は、静置実験および連続巻き上げ実験に比べて顕著に高く、好気条件と同様に、数日後に濃度レベルが低下した。なお、静置実験の後半において  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が高い値を示したのは、底泥下層の嫌気層に溜まったガス泡が噴出し、直上水中に  $\text{NH}_4\text{-N}$  を放出したことが原因と考えられる。

$\text{PO}_4\text{-P}$  濃度の経時的上昇は、好気条件に比べて、3倍程度の大きさであったが、巻き上げ方式の違いによる顕著な差は見られなかった。むしろ、間欠巻き上げを行った直後には  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度が低下する傾向も見られた。

以上の好気および嫌気条件での巻き上げにおける  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の溶出現象から考えると、 $\text{NH}_4\text{-N}$  については、底泥内の移動が溶出の律速となっており、底泥の巻き上げにより、顕著に溶出量が増加するが、 $\text{PO}_4\text{-P}$  については、嫌気条件では不溶態から溶存態への変換が律速となっており、巻き上げによる溶出速度の変化は小さく、また、好気条件においては、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の不溶化反応が卓越しているものと考察される。

なお、連続巻き上げ実験と静置実験を比べると、両者間の溶出傾向には、ほとんど差異が見られなかったことから、常に 1,500 mg/L の底泥が巻上がっている

ような状態と、それを引き起こしている底泥表面の流速によっては、溶出速度は増加しないことが明らかとなった。

間欠巻き上げにおける  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度増加の原因を調べるため、底泥間隙水中に存在する  $\text{NH}_4\text{-N}$  が直上水に放出されることを仮定し、底泥直上水: 0.02 mg/L、間隙水中  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度: 0.91 mg/L、含水率: 87%、底泥密度: 1.08 g/cm<sup>3</sup>、底泥比重: 2.6 g/cm<sup>3</sup> の条件の下で、巻き上げ後の直上水  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度は以下のように計算される。

底泥  $V$  (cm<sup>3</sup>) に含まれる水の体積と質量を、それぞれ  $V_w$  (cm<sup>3</sup>)、 $M_w$  (g) とし、底泥(乾燥)の体積と質量をそれぞれ  $V_s$  (cm<sup>3</sup>)、 $M_s$  (g) とすると、以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \frac{M_w}{V_w} &= 1.0 & \textcircled{2} \frac{M_s}{V_s} &= 2.6 & \textcircled{3} \frac{M_w}{M_w + M_s} \times &= 87.0 \\ \textcircled{4} \frac{M_w + M_s}{V_w + V_s} &= 1.08 \end{aligned}$$

これを解くと、底泥の体積含水率  $\theta = \frac{V_w}{V_s + V_w} = 0.94$  と計算される。本数値より、巻き上げ直後の直上水の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度 ( $C_T$ ) は、間隙水中  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が 0.91 mg/L であることから、

$$C_T = \frac{0.91 \times 3 \text{ cm} \times 0.94 + 0.02 \times 30 \text{ cm}}{30 \text{ cm} + (3 \text{ cm} \times 0.94)} = 0.096 \text{ mg/L}$$

0.096 mg/L となることから、濃度増加は底泥間隙水からの放出が主要因であると考えられる。

なお、好気条件における、巻き上げ後に再度  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が低下する原因については、**Fig. 9** に I-N および  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度変化を示すように、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度低下時に  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が増加していないことから硝化反応によるものではなく、また、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度低下に伴って I-N が減少していることから、水中から取り除かれたことによると考えられる。一方、嫌気条件においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度が増加した原因は、底泥中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  が遊離しやすい状態であり、DO 濃度が 0 mg/L でなかったため、硝化反応が起こったものと考えられる。pH が 9 未満であり、水温も 20℃ であることから、アンモニア分子としての揮散は考えにくい。以上のことから、一旦溶出した  $\text{NH}_4\text{-N}$  が、再度底泥に吸着することにより、濃度が低下したものと考えられる。

**(3) 底泥巻き上げによる栄養塩類と Fe, Mn の溶出挙動**

間欠巻き上げ実験における好気・嫌気条件下における金属類 (Fe, Mn) の溶出を **Fig. 10, 11** に示す。好気条件においては、間欠巻き上げによって Fe 濃度が増加したが、Mn 濃度の増加は観察されなかった。一方、嫌気条件においては、間欠巻き上げにより、Fe

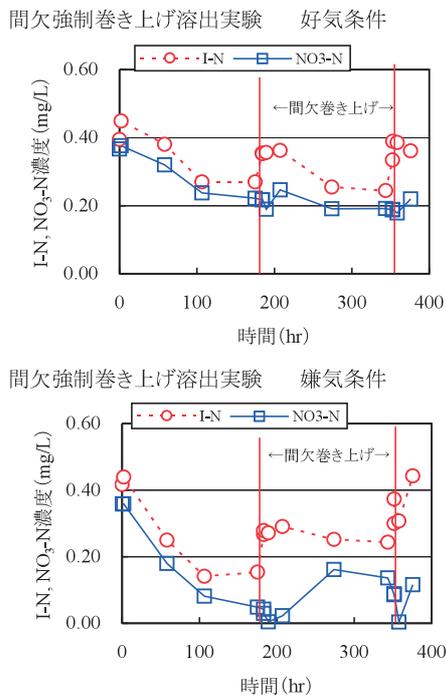


Fig. 9 Changes of I-N and  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in intermittent forced resuspension experiment under aerobic and anaerobic condition

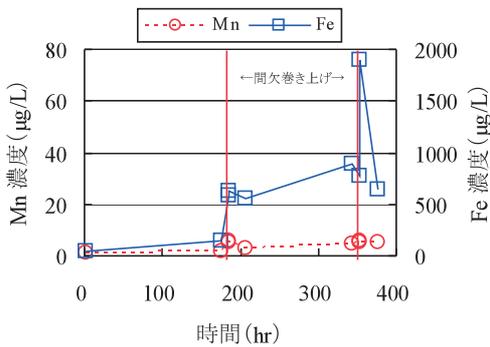


Fig. 10 Change of Fe and Mn concentration in intermittent forced resuspension experiment under aerobic condition

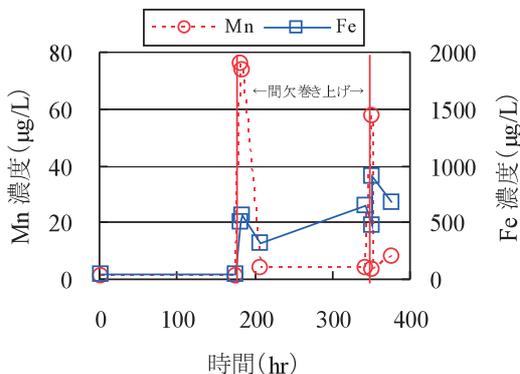


Fig. 11 Changes of Fe and Mn concentration in intermittent forced resuspension experiment under anaerobic condition

とともに Mn の濃度増加が見られた。しかし、Mn については巻き上げ後に速やかに濃度が減少した。このように、金属の種類によって溶出傾向に差異が見られ、Mn については、より DO 条件の影響を受けやすい特性を持つこと、また、Fe と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の動態は好気条件では必ずしも一致するものではないことが明らかとなった。

霞ヶ浦の底泥については、風浪等により巻き上げが生じているが、巻き上げにより溶出速度が増加するのは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Fe、および、嫌気条件下での Mn であり、底泥直上水の環境が好氣的に保たれていれば、 $\text{PO}_4\text{-P}$  や Mn の溶出は抑制されていると考えられる。

### 3.3 巻き上げによる ORP の鉛直変化

間欠的な強制巻き上げ実験を行った 1 回目と 2 回目の、実験前後の底泥中の ORP 値の鉛直変化を Fig. 12 に示す。Fig 上の 0 (cm) は底泥表面を指す。

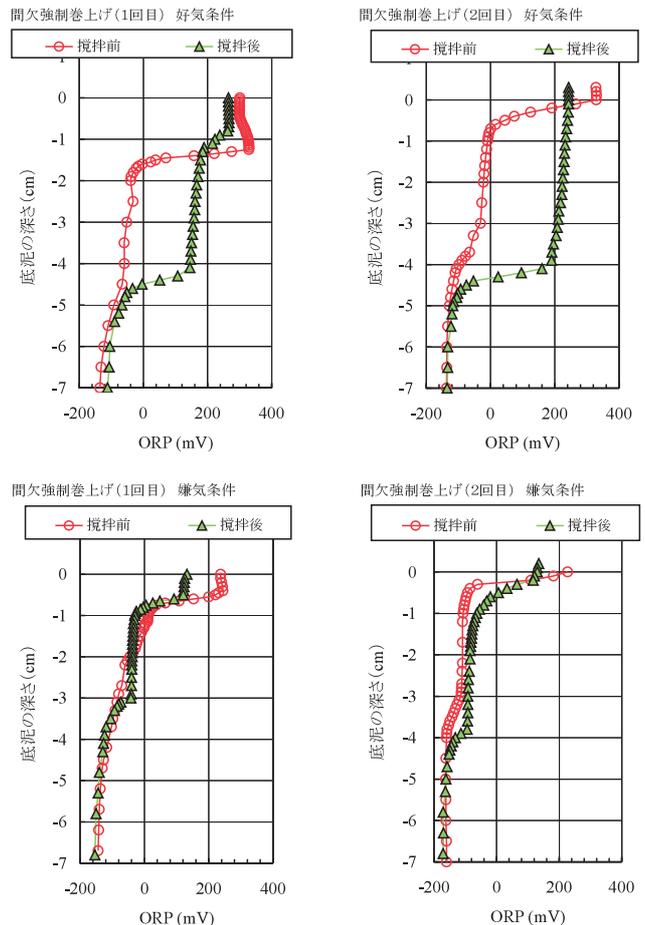


Fig. 12 Change of ORP in sediment before and after the forced resuspension under aerobic and anaerobic condition

好気条件下においては搅拌前の ORP は、底泥深さ 1.0 cm 付近まで 400 mV の酸化状態であったが、その点を境に ORP 値の低下が進み 1.5 cm から負の値を示

し、還元層となっていた。巻き上げを3 cm 付近まで行ったことにより、ORPの酸化層は4.0 cm 付近まで200 mVの酸化状態が確認された。しかし、2回目の巻き上げ直前には、深さ数 mm で還元状態となる状態に戻っており、巻き上げによって、第1回目と同様の底泥中ORPの酸化状態への変化が確認された。

一方、嫌気条件下においては、巻き上げ前の酸化層厚さが0.5 cm と薄い状態にあり、巻き上げ後においても、底泥深さ方向の還元状態に大きな変化はなかった。

#### 4. ま と め

本研究では、霞ヶ浦において問題となっている内部負荷の一要因として、底泥の巻き上げと溶出特性の関係について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 底泥の巻き上げにより、好気・嫌気両条件下において、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出は促進されたが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出促進はほとんど見られなかった。なお、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、溶出後に再度底泥に吸着される挙動を示した。
- 2) 巻き上げによる $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の増加は、底泥間隙水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ が放出されたことが主要因であると考えられ、底泥からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出は、底泥内の移動が律速となっていると考えられる。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、嫌気条件では不溶態から溶存態への変換が律速となっており、好気条件においては、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の不溶化反応が卓越しているものと考えられる。
- 3) 底泥巻き上げにより、好気・嫌気両条件下においてFeの溶出促進が見られたが、Mnについては、嫌気条件のみにおいて、溶出が促進された。Mnの溶出は、底泥直上水中のDO条件の影響を受けやすいものと考えられる。
- 4) 霞ヶ浦西浦においては、底泥直上水DO濃度は夏季においても5mg/L以上の好気状態が続くことが多い<sup>15)</sup>ことから、巻き上げにより溶出速度が増加するものは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ およびFeであり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ やMnの溶出は抑制されると考えられる。一方、嫌気条件になると、巻き上げによりMnの溶出が増加すると考えられる。

#### 謝 辞

本研究を実施するに当たり、現地調査及び情報提供において協力を頂いた、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所の関係者には、ここに謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 加藤 亮, 石島智恵, 黒田久雄, 中曾根英雄, 桐 博英: 畜産排泄物規制前後の栄養塩の流出特性, 水環境学会誌, Vol. 29, No. 11, pp. 687-692 (2006)
- 2) 川嶋宗継, 原 博一, 松坂 修, 堀 太郎, 高松武次郎, 小山睦夫: 琵琶湖における水質変動, 滋賀大学教育学部紀要 自然科学, No. 33, pp. 67-101 (1983)
- 3) 細見正明: 底質からの窒素およびリンの溶出とその制御, 水環境学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 91-95 (1993)
- 4) 宗宮 功: 自然の浄化機構, 技報堂出版, pp. 117-134 (1995)
- 5) 福島武彦, 川村修平, 恩田裕一, 今井章雄, 松重一夫: 霞ヶ浦, 諏訪湖における底質長期変化と栄養塩類収支, 水環境学会誌, Vol. 28, No. 5, pp. 313-319 (2005)
- 6) Jordan, P. and Rippey, B.: Lake sedimentary evidence of phosphorus, iron and manganese mobilisation from intensively fertilised soils, *Water Research*, Vol. 37, Issue 6, pp. 1426-1432 (2003)
- 7) 長廣 遥, 岩永修二, 梅田 信, 石川忠晴: 霞ヶ浦湖心部における強風時の濁度変化について, 土木学会第55年次学術講演会, pp. 594-595 (2000)
- 8) 関 智弥, 福島武彦, 今井章雄, 松重一夫: 霞ヶ浦の濁度上昇と底泥巻き上げ現象, 土木学会論文集 G, Vol. 62, No. 1, pp. 122-134 (2006)
- 9) Kristensen, P., Sondergaard, M. and Jeppesen, E.: Resuspension in a shallow eutrophic lake, *Hydrobiologia* 228, pp. 101-109 (1992)
- 10) 佐々木久雄, 西村 修, 須藤隆一: 浅い内湾底泥の巻き上げが栄養塩溶出に及ぼす影響, 水環境学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 51-59 (1995)
- 11) Inoue, T. and Nakamura, Y.: Diel variation of resuspension and effect of resuspension on phosphate release rate from the sediment, Submitted to FMTM, pp. 1-8 (2001)
- 12) Evans, R. D.: Empirical evidence of the importance of sediment resuspension in lakes, *Hydrobiologia* Vol. 284, pp. 5-12 (1994)
- 13) Qin, B., Hu, W., Gao, G., Luo, L. and Zhang, J.: Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 49, No. 1, pp. 54-64 (2004)
- 14) Niemisto, J., Holmroos, H., Pekcan-Hekim, Z. and Horppila, J.: Interactions between sediment resuspension and sediment quality decrease the TN: TP ratio in a shallow lake, *American Society of Limnology and Oceanography* Vol. 53 (6), pp. 2407-2415 (2008)
- 15) 霞ヶ浦河川事務所, 西浦現地自動観測所水質データ, 平成12-15
- 16) 中村由行: 底質の酸素消費過程における濃度境界層の役割, 水環境学会誌, Vol. 16, No. 10, pp. 732-741 (1993)
- 17) 小池勲夫: 海底境界層における窒素循環の解析手法とその実際, 社団法人産業環境管理協会, pp. 51-67 (2000)
- 18) 井上徹教: 水・堆積物界面における物質移動について, ヘドロ, No. 92, pp. 10-15 (2005)
- 19) Tada, C., Itayama, T., Nishimura, O., Inamori, Y., Sugiura, N. and Matsumura, M.: The Effect of Manganese Released from Lake Sediment on the Growth of Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*, Japan, *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, Vol. 38, No. 2, pp. 95-102 (2002)
- 20) Schallenberg, M. and Burns, C. W.: Effects sediment resuspension on phytoplankton production: teasing apart the influences of light, nutrients and algal entrainment, *Freshwater Biology*,

Volume 49 Issue 2, pp. 143-159 (2004)

- 21) 藤永太郎, 宗林由樹, 一色健司: 海と湖の化学——微量元素で探る——, 京都大学学術出版会, pp. 312-332 (2005)
- 22) 鈴木 穰, 阿部千雅, 中菌孝裕: 底質の酸素条件が藻類増殖に与える影響に関する調査, 平成 18 年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第 4080 号, pp. 169-176 (2007)

## Characteristics of Nutrients, Iron and Manganese Release from Sediment during Resuspension in Lake Kasumigaura

Takahiro Nakazono<sup>1)†</sup>, Chica Abe<sup>2)</sup> and Yutaka Suzuki<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Water Environment Research Group, Public Works Research Institute

<sup>2)</sup> National and Regional Planning Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

<sup>3)</sup> Water Environment Research Group, Public Works Research Institute

(Present address: Material and Geotechnical Engineering Research Group)

† Correspondence should be addressed to Takahiro Nakazono:

(Water Environment Research Group, Public Works Research Institute E-mail: nakazo55@pwri.go.jp)

### Abstract

In Kasumigaura, resuspension of sediment often occurs, however, the effect of the resuspension on the behavior of nutrients and metals release is not clarified. This research aimed at investigating the effects of sediment resuspension together with DO condition on the nutrients release from the sediment by carrying out experiment using Kasumigaura sediment. The results show that the concentration of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and iron increased after the resuspension of sediment, while the release of other nutrients was suppressed under the aerobic condition.

**Key words:** sediment, release, nutrients, metals, resuspension