

見島湖における水質汚濁メカニズムの解明  
—見島湖底泥からのリンの溶出速度について—

藤田和男, 金子英史, 中野拓也, 山本 淳

【調査研究】

## 児島湖における水質汚濁メカニズムの解明

- 児島湖底泥からのリンの溶出速度について -

Elucidation of water pollution mechanism in Lake Kojima  
-Study on Phosphorus Elution Rate from the Sediment of Lake Kojima-

藤田和男, 金子英史, 中野拓也, 山本 淳(水質科)

Kazuo Fujita, Hidefumi Kaneko, Takuya Nakano, Jun Yamamoto (Water Section)

### 要 旨

笹ヶ瀬川河口, 倉敷川河口及び湖心底泥からのリン溶出速度について水温 7 ~ 30℃, 嫌気条件で室内実験を行ったところ, 水温が高く溶存酸素が低いほど溶出速度は大きく, 0 ~ 27 mg/m<sup>2</sup>/day の範囲にあった。底層の溶存酸素(月平均値)は夏期に低く冬期に高い傾向があり, 笹ヶ瀬川河口では 5.3 ~ 14 mg/L, 倉敷川河口では 5.7 ~ 13 mg/L, 湖心では 6.0 ~ 13 mg/L の範囲にあった。年間のリン溶出速度の変化を推算したところ, 笹ヶ瀬川河口では 0 ~ 9 mg/m<sup>2</sup>/day, 倉敷川河口では 0 ~ 13 mg/m<sup>2</sup>/day, 湖心では 0 ~ 11 mg/m<sup>2</sup>/day の範囲にあり, 河川及び湖内底泥からの年間のリン溶出量は 12,000 kg と推算された。

[キーワード: リン溶出, 底泥, 児島湖]

[Key words: Phosphorous release, Sediment, Lake Kojima]

### 1 はじめに

近年の児島湖の水質を昭和 50 年代と比較すると, COD, 全窒素については改善が見られるが, 全リンの値は一時期改善が見られたものの最近では横ばいで推移しており, 明らかな改善傾向は見られていない。ちなみに, 湖心の全窒素(T-N)は 1.1 (mg/L) (平成 25 年度平均値)<sup>1)</sup>と, 環境基準(1 mg/L)を上回っているものの減少傾向にある一方, 全リン(T-P)は 0.18 (mg/L) (平成 25 年度平均値)<sup>1)</sup>と, 環境基準(0.1 mg/L)の約 2 倍の値で推移<sup>2)</sup>している。この要因の一つとして, 底泥からの無機態リンの溶出や, 陸上部からの流入が考えられており, 「第 6 期湖沼水質保全計画」では児島湖の水質汚濁メカニズムの解明に向けて, 底泥からのリン溶出因子に関する調査が提言されている。

本研究では, 湖内及び流入河川における底泥からのリン溶出量の把握とその要因を解明するため, 湖心及び流入河川のリン溶出状況を把握することを目的とした。リン溶出速度が水温及び溶存酸素によりどの程度変化するかを調べるために, 流入河川 2 地点及び湖内 1 地点で底質の組成調査及びリン溶出実験(嫌気及び好気条件)を

行った。併せて, 水中の溶存酸素濃度の推移を把握するために, 湖内 2 地点で底層の溶存酸素の連続測定を行った。また, 湖内のリン溶出速度の面的な分布を調べるために, 湖内 22 地点で採泥し底質の組成を調査するとともに, 室内実験(水温 4 段階, 嫌気条件)によりリン溶出速度を測定した。また, 得られたリン溶出速度と溶存酸素との関係, そして湖内での底層溶存酸素測定結果から, 湖内 2 地点での年間のリン溶出速度の変化を推算し, 湖内の水質への影響を検討した。

### 2 材料および方法

底泥採取地点は, 笹ヶ瀬川河口, 倉敷川河口, 湖心(北緯 34 度 35 分 02 秒 東経 133 度 56 分 41 秒の地点, 以下「湖心 3」とする)(図 1)であり計 12 回(2013 年 4 月 ~ 2014 年 3 月)エックマン採泥器により採泥した。底層溶存酸素はウィンクラー・アジ化ナトリウム変法<sup>3)</sup>で測定し, 併せて倉敷川河口及び湖心に溶存酸素計(JFE アドバンテック製 RINKO W)を設置し底泥表層から 50cm 直上の溶存酸素濃度を連続測定した。

底泥の組成(乾燥減量, 強熱減量, COD, T-P)は,

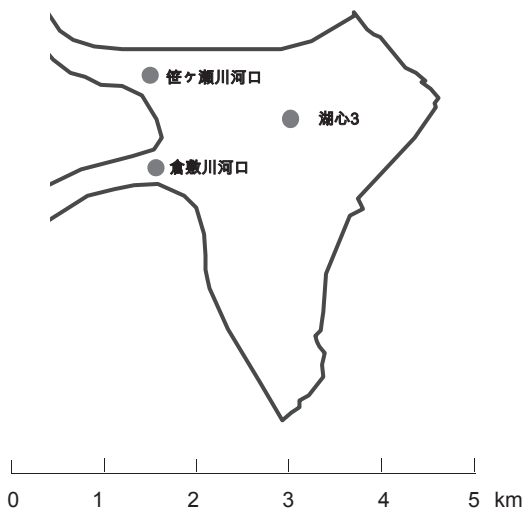


図1 調査地点



図2 溶出実験

底質調査法<sup>3)</sup>に準じて測定した。また、粒径はレーザー回折式粒子径分布測定装置(島津製作所製 SALD-3100)で測定した。

溶出実験は、1 L 容器に底泥を 200mL、蒸留水を 700mL 入れ、好気条件では、上層水を空気で曝気し好気状態(溶存酸素 > 6 mg/L)を維持した(図2)。また嫌気条件は溶存酸素濃度が概ね 1mg/L 以上となったとき窒素を曝気することにより溶存酸素濃度を約 0.5mg/L とした。なお、窒素は窒素ガス発生機(ジーエルサイエンス製 NM910)、または窒素ガスボンベ(純度 99.995% 以上)から通気した。溶出実験の水温については、恒温器を用いて3地点(笹ヶ瀬川河口、倉敷川河口、湖心)での採水時の水温を参考に4月は14℃、5月は20℃、6月は26℃、7月は27℃、8月は30℃、9月は27℃、10月は19℃、11月は16℃、12月は8℃、1月は6℃、2月は5℃、3月は14℃とした。溶出したリン(PO<sub>4</sub>-P)は、工場排水試験法 K0102<sup>4)</sup>に準じて測定し、溶存酸素は、溶存酸素計(横河電機製 YK-200PDO)で測定した。

### 3 結果および考察

#### 3.1 底質の性状調査

表1に3地点(笹ヶ瀬川河口、倉敷川河口、湖心3)での底泥測定結果を示す。底泥を目視で観察したところ、

表1 底泥調査結果(笹ヶ瀬川河口、倉敷川河口、湖心3)

|        | 調査日   | 泥温<br>(°C) | 含水率<br>(質量%) | 強熱減量<br>(質量%) | ORP<br>(mV) | T-P<br>(mg/g) |      |
|--------|-------|------------|--------------|---------------|-------------|---------------|------|
| 笹ヶ瀬川河口 | H26   | 4.8        | 12.8         | 68.9          | 28.6        | -207          | 3.35 |
|        |       | 5.13       | 20.5         | 69.3          | 16.6        | -215          | 2.36 |
|        |       | 6.3        | -            | 68.7          | 17.6        | -             | 2.32 |
|        |       | 7.14       | 27.0         | 63.2          | 29.4        | -180          | 3.46 |
|        |       | 8.5        | 28.2         | 72.1          | 16.4        | -288          | 4.10 |
|        |       | 9.11       | 26.2         | 65.2          | 17.7        | -239          | 4.10 |
|        | 10.27 | 18.5       | 53.5         | 9.4           | -177        | 1.22          |      |
| 倉敷川河口  | H26   | 4.8        | 13.9         | 66.2          | 13.0        | -201          | 3.2  |
|        |       | 5.13       | 21.0         | 64.0          | 11.1        | -205          | 1.8  |
|        |       | 6.3        | 26.0         | 59.6          | 26.6        | -267          | 1.0  |
|        |       | 7.14       | 27.5         | 65.9          | 27.8        | -270          | 2.3  |
|        |       | 8.5        | 31.0         | 72.6          | 14.0        | -281          | 3.3  |
|        |       | 9.11       | 28.7         | 66.2          | 14.1        | -237          | 1.1  |
|        | 10.27 | 19.0       | 60.7         | 13.8          | -187        | 0.5           |      |
| 湖心3    | H26   | 4.8        | 14.1         | 65.0          | 11.9        | -163          | 1.93 |
|        |       | 5.13       | 21.5         | 72.3          | 13.8        | -189          | 1.23 |
|        |       | 6.3        | 26.5         | 42.2          | 5.4         | -120          | 3.37 |
|        |       | 7.14       | 27.5         | 41.9          | 5.2         | -265          | 0.94 |
|        |       | 8.5        | 29.0         | 47.7          | 6.3         | -316          | 2.09 |
|        |       | 9.11       | 29.5         | 44.8          | 6.7         | -243          | 0.44 |
|        | 10.27 | 21.9       | 41.3         | 5.6           | -290        | 0.4           |      |

笹ヶ瀬川河口及び倉敷川河口は泥質、湖心3は概ね泥質で少量の砂質が混合した状態であった。土粒子を礫(2,000 $\mu$ m以上)、砂(62.5～2,000 $\mu$ m)、シルト(3.9～62.5 $\mu$ m)、粘土(3.9 $\mu$ m以下)の区分で分類すると、測定期間内での粒径の平均値は、笹ヶ瀬川河口が22 $\mu$ m、倉敷川河口が31 $\mu$ m、湖心3が20 $\mu$ mでいずれもシルトが多かった。また、底泥中のT-P(平均値)は、笹ヶ瀬川河口では2.9 mg/g、倉敷川河口は2.1 mg/g、湖心3は1.7 mg/gで、昨年度調査した4地点(笹ヶ瀬橋、倉敷川橋、湖心1、湖心2)の結果<sup>5)</sup>と比較すると泥質の倉敷川橋及び湖心2に近い値であった。

### 3.2 リン溶出実験

リン溶出実験について、各水温での実験結果を図3-1～図3-3に示す。いずれの地点でも、嫌気条件で好気条件よりも溶出速度が高かった。また水温が高いほど溶出速度が高い傾向があった。

溶出速度を水温に対してプロットしたものを図4に示す。リン溶出速度を表す式は、文献<sup>6)</sup>では、

$$Vp = E_{DP} \cdot \theta_{DP}^{-(T_{opt} - T)^n}$$

で表されている。溶存酸素濃度の影響及び最適水温との関係を考慮し、以下の式で近似した。

$$Vp = E_{DP} \cdot \theta_{DP}^{-(T_{opt} - T)^n}$$

$$E_{DP} = Ea(Eb - DO)$$

ただし、 $E_{DP}$ :リン溶出速度係数(mg/m<sup>2</sup>/day)、 $\theta_{DP}$ :1.00～1.06の係数(-)、 $T_{opt}$ :最適水温(°C)、 $T$ :水温(°C)、 $n$ :次数(-)、 $Ea$ :溶存酸素濃度に関する係数(L/m<sup>2</sup>/day)、 $Eb$ :溶存酸素濃度に関する係数(mg/L)、 $DO$ :溶存酸素濃度(mg/L)。ここで溶出速度に関する次数 $n$ を設定し、リン溶出係数 $E_{DP}$ を溶存酸素濃度の関数としている。式中の次数 $n$ を文献<sup>6)</sup>と同じく1とした場合は水温の増加に伴い溶出速度が一方向的に増加する曲線となるが、次数 $n$ が2とした場合は最適水温をピークとし水温の増加及び減少に伴い溶出速度が減少する曲線となる。ここでは $n$ を2と仮定した。溶存酸素の影響については、 $(Eb - DO)$ により $DO$ の低下に伴いリン溶出速度が増加する直線関係を仮定している。

今回の水温(5～30°C)及び嫌気条件の溶出速度は笹ヶ

瀬川河口の底泥では0～26 mg/m<sup>2</sup>/day、倉敷川河口の底泥では1～27 mg/m<sup>2</sup>/day、湖心3では0～27 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲にあった。

児島湖底泥のリン量と溶出速度(夏期)の関係を図5に示す。データは今回調査(3地点:笹ヶ瀬川河口、倉敷川河口、湖心3)、前回調査(4地点:笹ヶ瀬橋、倉敷川橋、湖心1、湖心2)<sup>5)</sup>及び文献値(笹ヶ瀬川5地点、倉敷川5地点、湖内5地点、27°C)<sup>7)</sup>を用い、以下の反応速度式<sup>8)</sup>で近似した。

$$Vp = Vmax \cdot P / (K + P)$$

ただし $V_p$ :リン溶出速度(mg/m<sup>2</sup>/day)、 $V_{max}$ :最大溶出速度(mg/m<sup>2</sup>/day)、 $P$ :底泥中のT-P量(g/kg)、 $K$ :基質飽和定数(g/kg)。底泥中のT-P量が少ないと溶出速度は小さく、T-P量が大きくなるに伴い溶出速度は大きくなる傾向が伺われ、嫌気状態における最大の溶出速度は文献値の47 mg/m<sup>2</sup>/dayであった。

### 3.3 底層溶存酸素及びリン溶出速度の推算

底層の溶存酸素濃度を図6(a)に示す。溶存酸素濃度は夏期に低く冬期に高く、月毎の平均値は笹ヶ瀬川河口では5.3～14 mg/L、倉敷川河口では5.7～13 mg/L、湖心3では6.0～13 mg/Lの範囲にあった。

室内実験で得られたリン溶出速度と溶存酸素濃度及び水温の関係、そして笹ヶ瀬川河口、倉敷川河口及び湖心3地点の底層の溶存酸素濃度及び水温の推移から、年間のリン溶出量の推移を推算した(図6(b))。リン溶出速度(月平均値)は笹ヶ瀬川河口で0～9 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲で変化し、年間の平均値は1.4 mg/m<sup>2</sup>/dayと計算された。倉敷川河口では0～13 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲で変化し、年間の平均値は2.5 mg/m<sup>2</sup>/dayと計算された。湖心3では0～11 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲で変化し、年間の平均値は2.0 mg/m<sup>2</sup>/dayと計算された。

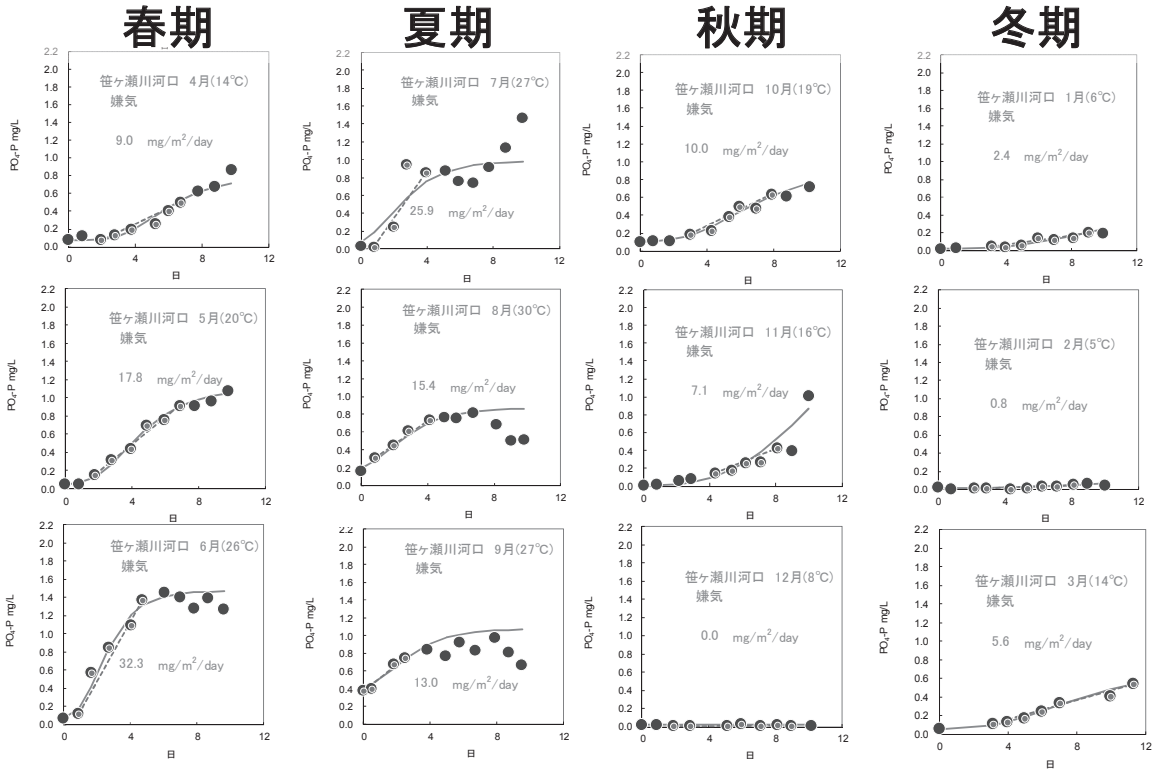
$$Vp = E_{DP} \cdot \theta_{DP}^{-(T_{opt} - T)^n}$$

年間のリン溶出量は笹ヶ瀬川河口で0.5 g/m<sup>2</sup>/year、倉敷川河口で0.9 g/m<sup>2</sup>/year、湖心3で0.7 g/m<sup>2</sup>/yearと計算された。

これまでに、児島湖について室内の溶出試験で報告された値<sup>5), 9)～11)</sup>は0～47 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲であった。米国Shagawa湖では夏期に3.1～4.2 mg/m<sup>2</sup>/day、湯乃湖では0～5 mg/m<sup>2</sup>/day<sup>12)</sup>であった。また手賀沼の

# 笹ヶ瀬川河口

## 嫌気



## 好気

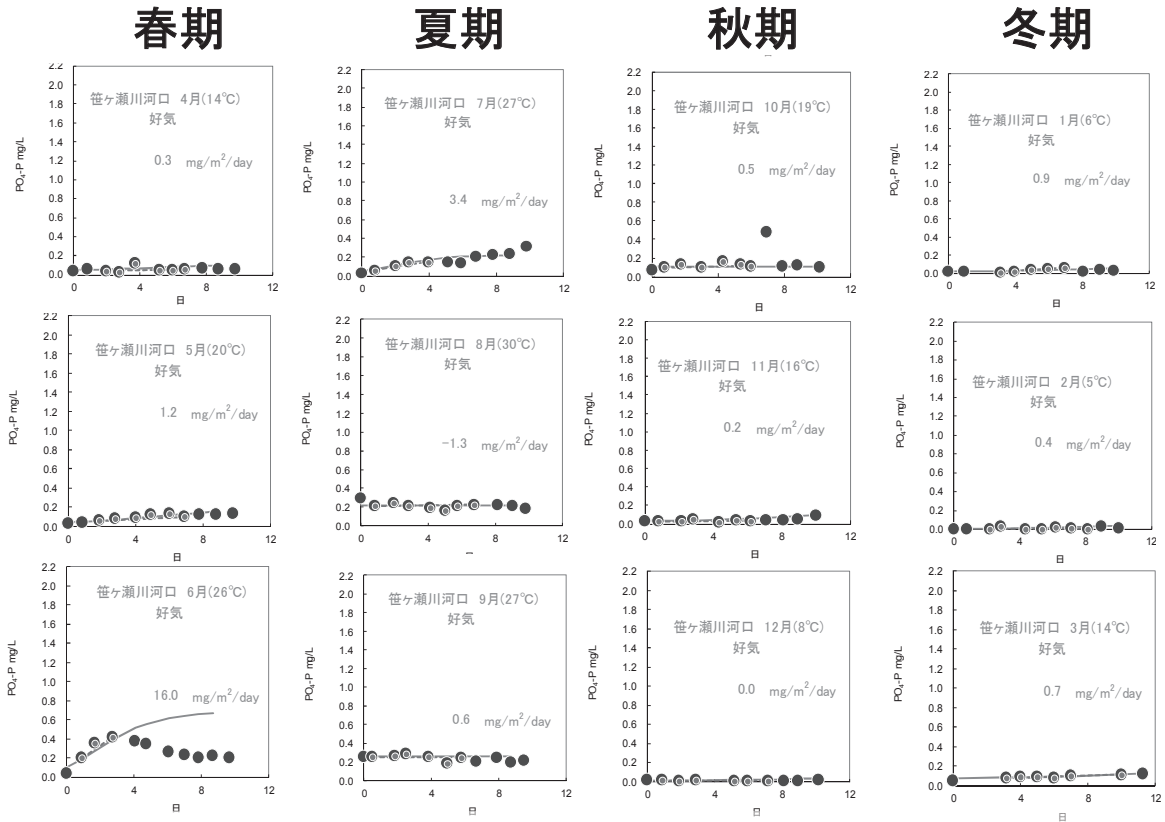


図3-1 溶出実験結果(笹ヶ瀬川河口)

# 倉敷川河口

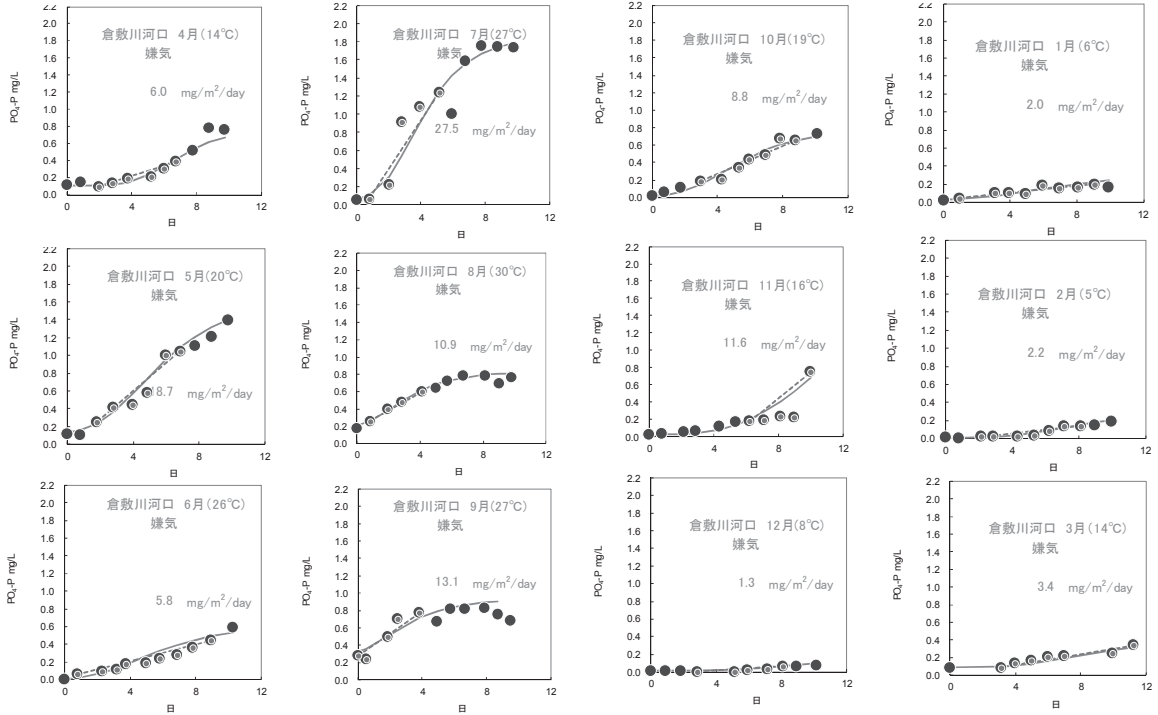
## 嫌気

### 春期

### 夏期

### 秋期

### 冬期



## 好気

### 春期

### 夏期

### 秋期

### 冬期

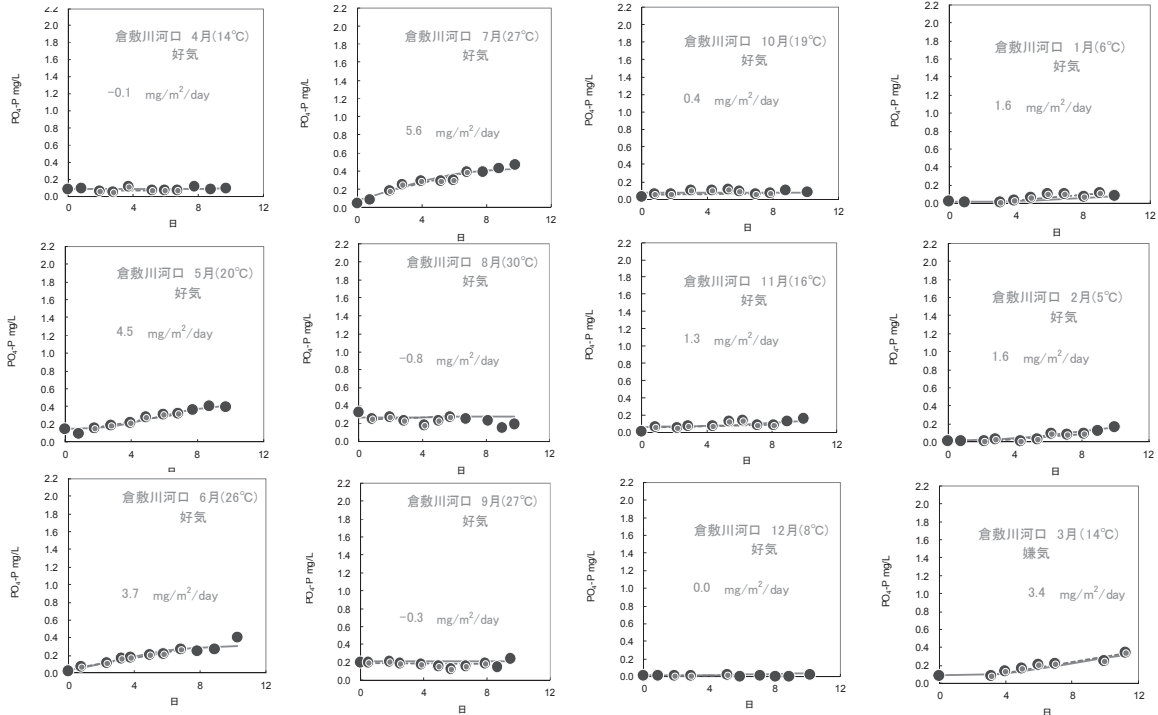
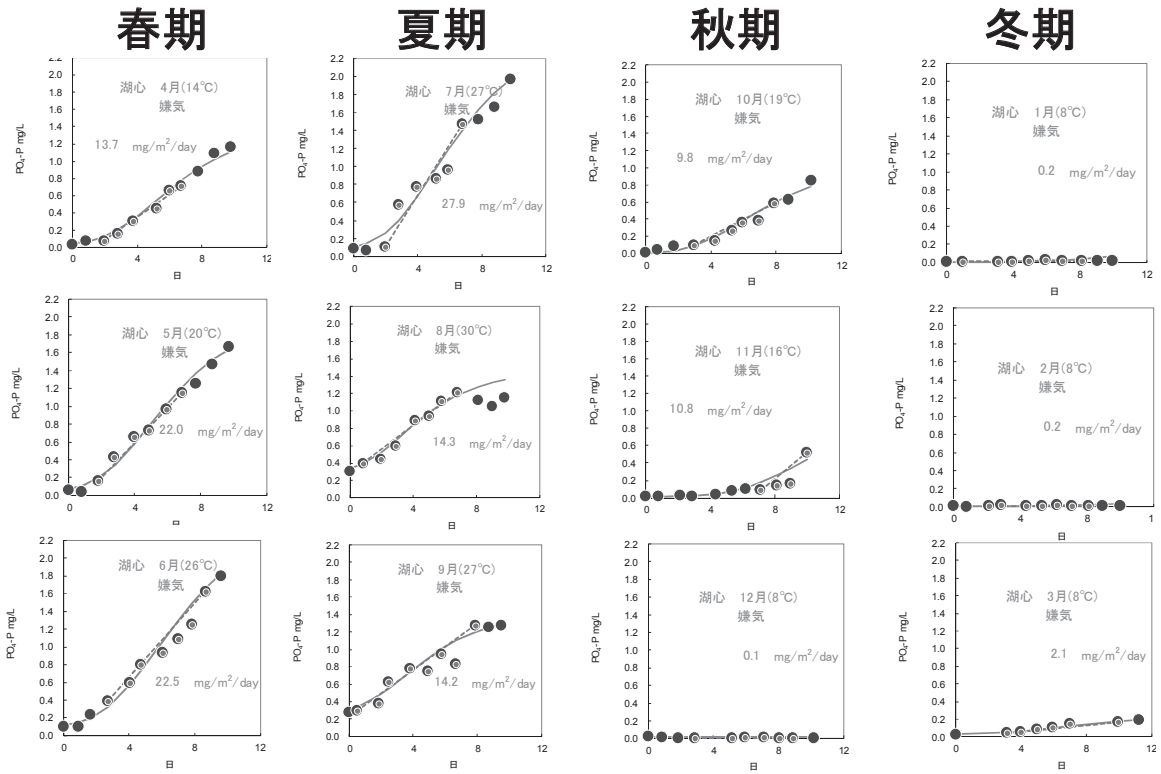


図3-2 溶出実験結果(倉敷川河口)

# 湖心3 嫌気



# 好気

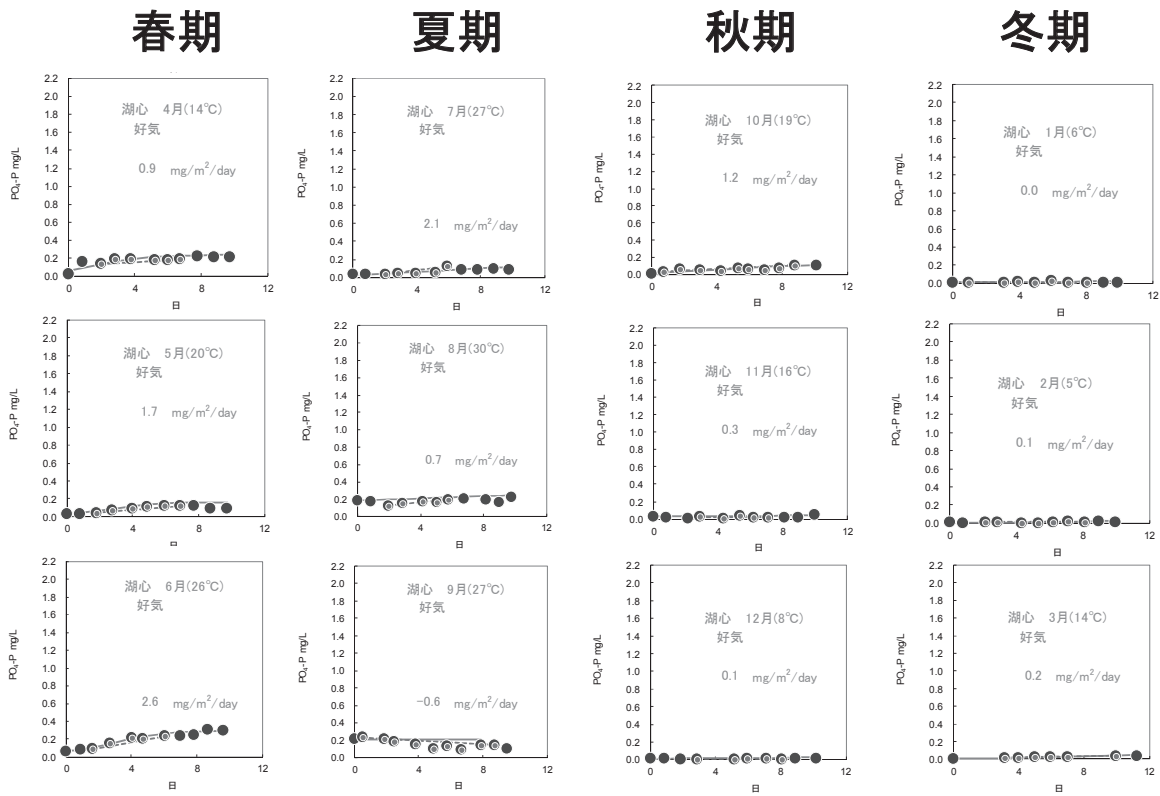


図3-3 溶出実験結果(湖心3)

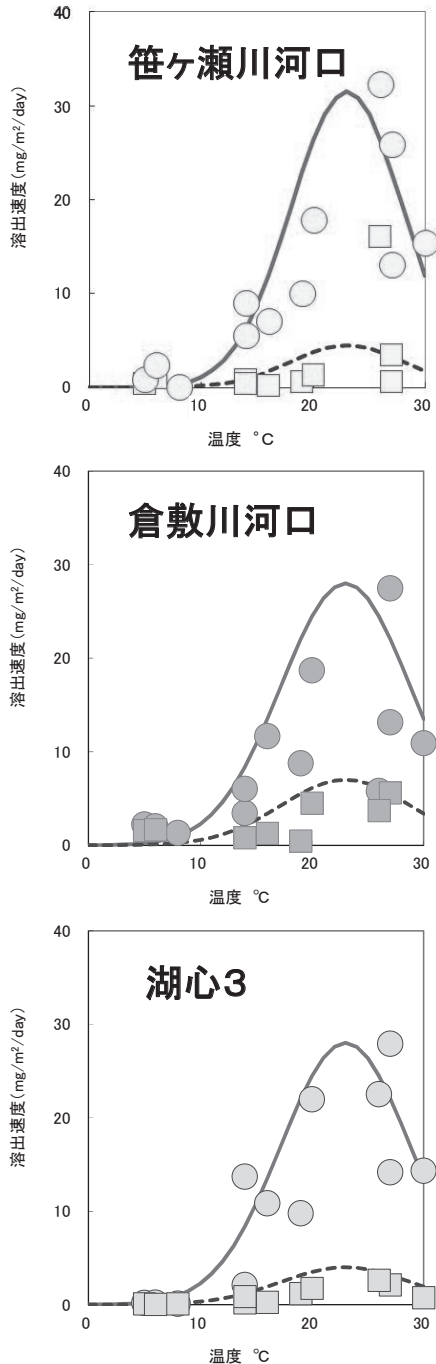


図4 溶出実験結果(水温と溶出速度の関係)  
 -○- : 嫌気条件  
 --□-- : 好気条件

沼内2カ所(手賀沼中央及び根戸下)では、夏期に10 mg/m<sup>2</sup>/day(手賀沼中央)及び30 mg/m<sup>2</sup>/day(根戸下)が報告されている。本報の値も含め、概ねリン溶出速度は0~40 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲内にあると考えられる。

得られた溶出実験結果から、河川及び湖内からの溶出量を推算した。過去の報告<sup>7)</sup>では笹ヶ瀬川(0.88 km<sup>2</sup>)、倉敷川(1.24 km<sup>2</sup>)及び湖内(7.01 km<sup>2</sup>)の6ヶ月間(27℃ :

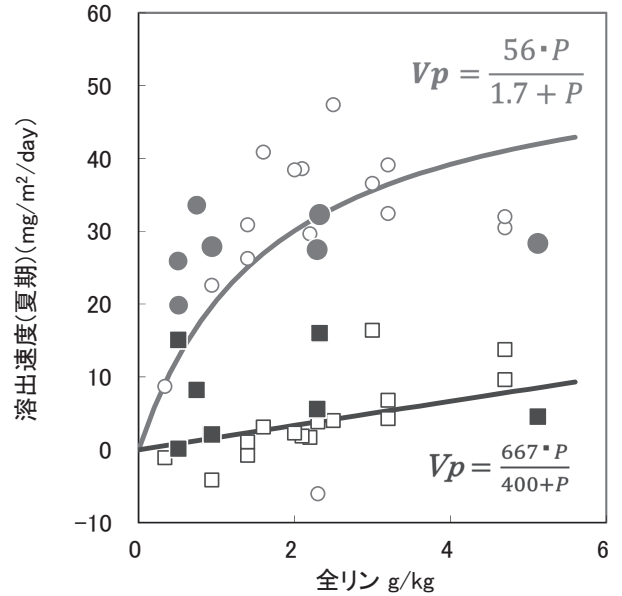


図5 底泥リン量と夏期の溶出速度の関係  
 ● : 嫌気条件(今回の3地点及び前回の4地点<sup>5)</sup>)  
 ○ : 嫌気条件(文献値<sup>11)</sup>)  
 ■ : 好気条件(今回の3地点及び前回の4地点<sup>5)</sup>)  
 □ : 好気条件(文献値<sup>11)</sup>)

3ヶ月間及び5℃:3ヶ月間)のリン溶出量はそれぞれ425 kg, 1,916 kg及び5,789 kgと試算されている。前回(笹ヶ瀬川橋, 倉敷川橋, 湖心1, 湖心2)<sup>5)</sup>及び今回(笹ヶ瀬川河口, 倉敷川河口, 湖心3)の調査結果及び河川及び湖内の面積(笹ヶ瀬川:0.88 km<sup>2</sup>, 倉敷川:1.24 km<sup>2</sup>, 湖内:10.88 km<sup>2</sup>)<sup>7)</sup>からリン溶出量を推算すると河川3,300 kg/year(笹ヶ瀬川1,300 kg/year, 倉敷川1,900 kg/year, 数値は四捨五入のため内訳の合計が総数に合わない), 湖内8,800 kg/year, 河川と湖内の合計は12,000 kg/yearであった。

今回の計算結果は限られたデータに基づいた推算値であり、計算の基礎データとなる流域内の調査を加え、より長期的な期間に当てはめて検討する必要があると考えられ、次年度は湖南部及び水深が深いと予想される樋門付近で新たな地点を選定し継続調査を行う予定である。また今回は過去の報告<sup>7)</sup>と同様に嫌気及び好気条件を設定し室内実験を行っているが、実際の現場の状況に近い結果を得るためには現場の溶存酸素濃度に設定して溶出実験を行うことが望ましいと考えられ、機器の追加等も含め今後の検討課題とする。



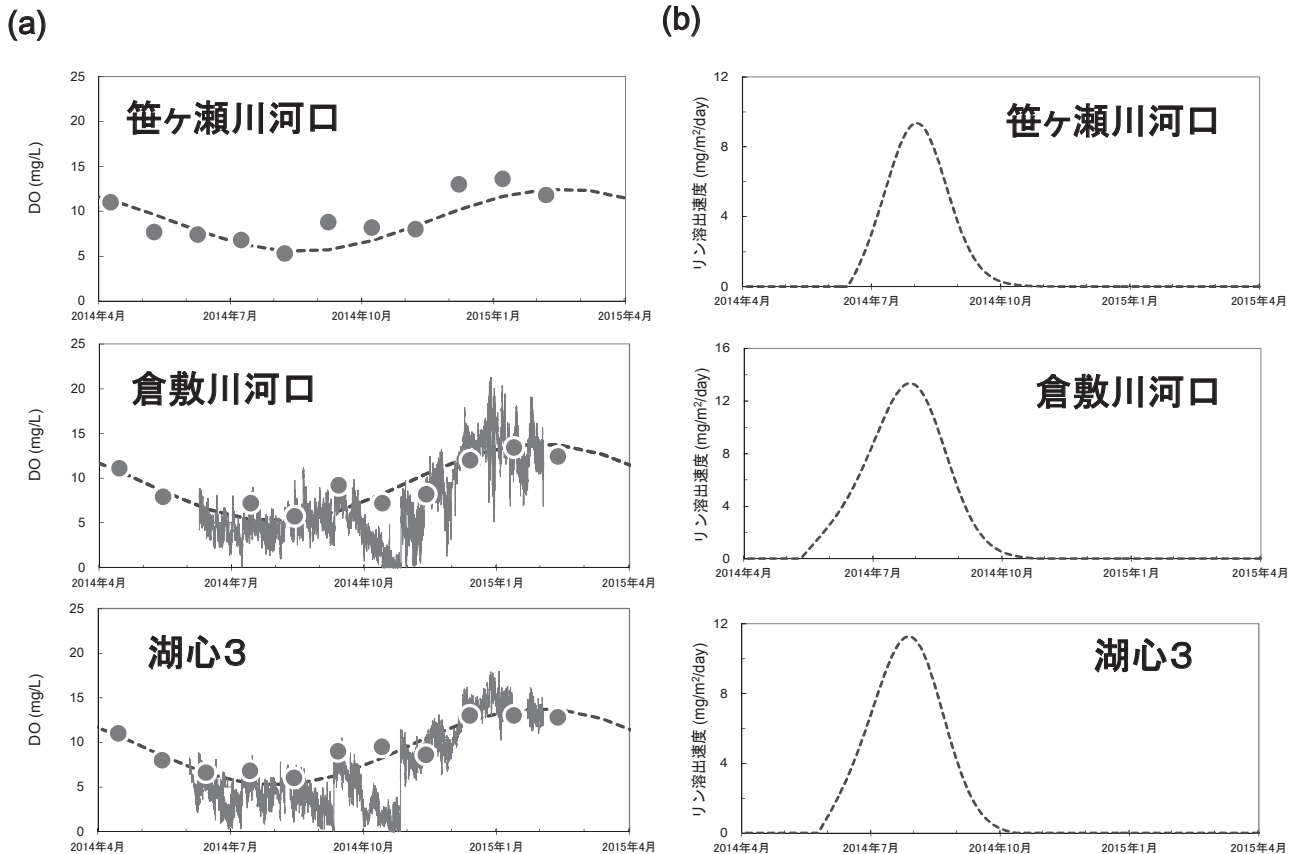


図6 底層の溶存酸素濃度及びリン溶出速度推算値

(a) 底層8の溶存酸素

—：測定値(DO計)、●：測定値(ウィンクラー-アジ化ナトリウム変法)、  
----：予想値

(b) リン溶出速度推算値

----：予想値

#### 4 まとめ

笹ヶ瀬川河口、倉敷川河口及び湖心底泥のリン溶出速度を室内実験で調査し、水温5～30℃、嫌気条件において0～27 mg/m<sup>2</sup>/dayの範囲にあった。

底層溶存酸素(月平均値)は笹ヶ瀬川河口では5.3～14 mg/L、倉敷川河口では5.7～13 mg/L、湖心では6.0～13 mg/Lの範囲にあり、夏期に低く冬期に高かった。

底層中のリン量が多いとリン溶出速度が大きい傾向が見られた。

年間のリン溶出速度は笹ヶ瀬川河口で0～9 mg/m<sup>2</sup>/day、倉敷川河口で0～13 mg/m<sup>2</sup>/day、湖心で0～11 mg/m<sup>2</sup>/dayと推算された。両河川及び湖内からの年間のリン溶出量は12,000 kgと推算された。

#### 文 献

- 1) 岡山県環境文化環境管理課：平成25年度公共用水域及び地下水の水質測定結果，2014
- 2) 岡山県：児島湖ハンドブック，18-19，2015
- 3) 環境省水・大気環境局編：底質調査法，2012
- 4) 平河喜美男編：工場排水試験法 JIS-K0102，日本規格協会，東京，2010
- 5) 藤田和男，難波あゆみ，河野裕明，中野拓也，山本淳：児島湖及び流入河川底泥からのリンの溶出速度について，岡山県環境保健センター年報，38，15-27，2014
- 6) 岡山県：平成23年度指定湖沼汚濁負荷量削減状況調査，148，2012
- 7) 岡山県，(株)エクスラン・テクニカル・センター：平成22年度児島湖環境負荷影響調査業務調査結果報告書，43，2011

- 8) Eric E. Cornn, Paul K. Stumpf, George Bruening, Roy H.Doi(1988)コーン スタンプ生化学 第5版(田宮信雄, 八木達彦訳), 東京化学同人, p.108
- 9) 岡山県, (株) ウェスコ:平成3年度児島湖水質保全計画基礎調査業務報告書, 83, 1992
- 10) 山本弘捷, 熊城一男, 清水光郎, 畑宏:底質中の栄養塩類の挙動に関する調査研究 第7報 児島湖底泥からの栄養塩の溶出について, 岡山県環境保健センター年報, 8, 155-158, 1984
- 11) 熊城一男, 山本淳, 吉村広:児島湖底質からの窒素・リンの溶出について, 岡山県環境保健センター年報, 10, 173-175, 1986
- 12) 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, 16, 91-95, 1993

