

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05533

研究課題名(和文) 河川 湖沼のコネクション：霞ヶ浦流域圏におけるリン化合物負荷の定量化に関する研究

研究課題名(英文) The connection between river and lake: quantification of phosphorus compounds in Lake Kasumigaura Basin

研究代表者

篠原 隆一郎 (Shinohara, Ryuichiro)

国立研究開発法人国立環境研究所・地域環境研究センター・主任研究員

研究者番号：00610817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は霞ヶ浦流域における懸濁粒子及び底泥に含まれるリンの形態について定量化を行い、それぞれにおける有機態リンの循環を明らかにしたものである。懸濁物質の動態について霞ヶ浦で観測を行ったところ、懸濁態リンのほとんどは有機態リンであり、微生物のバイオマスと、リンの変動が一致していることが明らかになった。底泥におけるリンの変動を観測・解析したところ、底泥固相に含まれる有機態リンが冬～春にかけてソースとなっていることが明らかになった。河川～湖沼に渡る懸濁粒子中のリンの形態を観測したところ、河川では無機態リンが60～80%を占めていた一方で、湖沼では有機態リンが主要なリンの形態であった。

研究成果の概要(英文)：In the current study, we quantified P compounds classes in sediment and suspended particles in a shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan. We found that biogenic P classes are predominant in suspended particles and they change the particulate P (PP) concentrations. In sediment, organic P in the solid phase is the most important source for P in pore water, at least from December to April. From inflow river to the lake, we found that inorganic P is dominant in the inflow river whereas organic P is dominant in the inside of Lake Kasumigaura.

研究分野：応用生態工学

キーワード：リン 有機態リン 31P NMR ヌクレオチド

## 1. 研究開始当初の背景

通常、湖沼中のほとんどのリン(P)は、金属成分に吸着しているか、または植物プランクトンおよびバクテリアに含まれる懸濁態として存在する(図1)。懸濁態リン(PP)は、分解および無機態リンの放出などのプロセスによって、湖水中に溶存するPの供給源となっており、それによって植物プランクトンのリン制限を緩和し、湖の富栄養化に寄与する。湖沼内部では、バクテリアや植物プランクトンの取り込みおよび堆積物の再懸濁などがPP濃度に影響を与え、特に水が浅い湖沼では後者、つまり、浅い湖沼における底泥巻き上げりが、水中のPP濃度に対してより強く影響を与えると考えられている。PP濃度に影響を及ぼす以上のようなプロセスは、懸濁物に含まれるリンの化合物組成(例えば、生物体に含まれるジエステル結合態リン、モノエステル結合態リンおよび金属成分に吸着しているオルトリン酸態リン)をも変化させ、これは水中へのリン供給のメカニズムを変化させる可能性がある[例えば、酵素加水分解(オルトリン酸モノエステルのホスホモノエステラーゼ：pH変化による鉱物粒子上リンの吸着と放出)。つまり、水柱のリン循環を理解するためには、(1)PP濃度に影響を及ぼすプロセスと、(2)懸濁物に含まれるリン化合物の組成の変化を明らかにする必要があるといえよう。

風によって発生する底泥の巻き上げりは一般に、浅い湖沼ではPP濃度を増加させるとされている一方、浅い湖沼でもリン濃度は必ずしも風速と相関があるとは限らない(例えば Vest Stadil Fjord; Søndergaard et al., 2003)。このような湖では、生物由来のリン、つまり、植物プランクトンや、バクテリアなどの微生物によって生合成されたリンがより強く水中のPP化合物や、その濃度に影響を与えている可能性がある。例えば、夏期に植物プランクトンの生産量が高い霞ヶ浦では、有機態リンのPPに対する割合が無機態リンよりも大きい。霞ヶ浦の中心におけるオルトリン酸塩とピロ/ポリリン酸：36.6%;モノエステルとジエステル結合態：63.4%; Shinohara et al., 2012)。つまり、PPの多くは、底泥巻き上げりによって供給された無機態リンではなく、植物プランクトンやバクテリアによる溶存態リンの取り込みによる生物由来のリンから構成されている可能性がある。PPの化合物組成の詳細な分析は、PPの分解性・生物利用可能性をより詳細に明らかにすることができるため、湖沼におけるリン循環を研究する上では重要である。しかし、霞ヶ浦については、堆積物の再懸濁や生物生産がPP濃度に対してどの程度強く影響を与えるかどうかについての報告はない。

一方で、河川から湖沼へと供給されるリンについても、湖沼における栄養状態に対して極めて重要であると考えられる。通常では河川は湖沼に対してリンの供給源であり、特に

無機態リンが最も重要であると考えられている。一方で、湖沼内部では有機態リンが極めて重要な役割を果たしていると考えられている。そこで本研究では、河川—湖沼に至る、それぞれの場における懸濁粒子・底泥に着目し、各々に含まれるリンの形態を分析した。

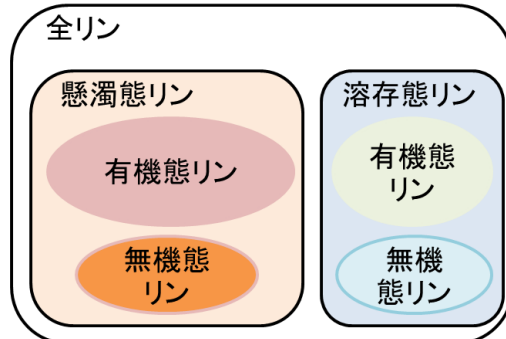


図1. 全リンに対する懸濁態リン、溶存態リンの分類。

## 2. 研究の目的

本研究では、茨城県県南に位置する霞ヶ浦を対象に、リンの動態を詳細に把握することを目的とし、以下の3つのテーマについて研究を行った。霞ヶ浦は指定湖沼の一つであり、2011年には大規模なアオコ発生が観測されている(図2)。またそれぞれの研究について、以下の研究上の問いに対する答えを得ることを個々の研究テーマに対する目的とした：

- 霞ヶ浦の懸濁粒子のリンの動態についての研究—巻き上げりと植物プランクトンに含まれるリンの変動要因に関する研究
- 堆積物の巻き上げり及び、生物生産のどちらが主にPP濃度をコントロールしているか？
  - リンの化合物組成物が、「PP濃度に影響を及ぼすプロセス」によってどのように影響を受けるか？

霞ヶ浦の底泥中に含まれるリンの動態についての研究—霞ヶ浦の底泥中に含まれる有機物の重要性について

- 霞ヶ浦の底泥中に含まれる有機態リンは、底泥間隙水中のリンの主要なソースになっているかどうか？



図2. 霞ヶ浦で発生したアオコ

霞ヶ浦の河川～湖沼に流入する懸濁粒子の特性についての研究

- 霞ヶ浦流入河川，霞ヶ浦湖内において，どのような有機態リン，無機態リンが多く，どのような物質に含まれているのか？

及び については古典的な分析手法に加えて， $^{31}\text{P}$  NMR 法を用いて研究を進め， については，古典的な分析手法及び，数値計算モデルを用いて研究を進めた．

### 3. 研究の方法

#### 3-1. リンの分析方法について．

リンの分析方法については，古典的に使用されている酸抽出を用いたリンの分析方法及び，新しい分析方法である  $^{31}\text{P}$  NMR を用いた手法を用いて研究を行った．具体的な分析手法は以下の通りである．

[古典的に使用されている分析手法]

図 3 にリンの分析手法を示す．懸濁物・底泥粒子中に存在するリンは，焙焼後酸抽出法 (PP) ，及び，酸による直接抽出法 (PIP) を使用する．本研究では  $1\text{mol L}^{-1}$  の塩酸を用いて抽出を行い，モリブデン青法を用いて定量を行った．POP 濃度については，PP 濃度から，PIP 濃度を差し引くことで定量する．

[ $^{31}\text{P}$  NMR を用いた分析手法]

本研究では，NaOH-エチレンジアミン四酢酸 (EDTA) 抽出法によって，懸濁粒子中のリンを抽出した．本方法では，懸濁した粒子および底泥中のリンを， $0.25\text{mol L}^{-1}$  NaOH および  $0.05\text{mol L}^{-1}$  EDTA を含む  $50\text{mL}$  の溶液中で 4 時間抽出した．全リン濃度 ( $P_{\text{NaOH-EDTA}}$ ) の測定のために，抽出液 ( $1\text{mL}$ ) を回収した．濾液を直ちに凍結させ ( $-30^\circ\text{C}$ ) ，その後数日間凍結乾燥した．

$^{31}\text{P}$  NMR による分析の直前に，凍結乾燥した濾液を  $1.5\text{mL}$  の NaOH-EDTA 溶液 [ $0.15\text{mL}$  の  $\text{D}_2\text{O} + 1.35\text{mL}$  NaOH ( $1\text{mol L}^{-1}$ ) および EDTA ( $0.1\text{mol L}^{-1}$ )] に再溶解し，溶解した試料を  $5\text{mm}$  の NMR チューブに移した．NMR については，JNM-ECA 500 (JEOL, 東京) を用いて， $^{31}\text{P}$  については  $202.5\text{MHz}$  で測定し， $^{31}\text{P}$  NMR スペクトルを測定した．サンプルは， $15\text{-}\mu\text{s}$  パルス ( $30^\circ$ ) ,relaxation delay を 5 秒で分析した．各サンプルについて，約 15,000 スキャン (約 23 時間) を行い，NMR のスペクトルを測定した． $\text{D}_3\text{PO}_4$  (Sigma-Aldrich Japan K.K., Tokyo, Japan) を約 10 倍 (8.5%) に希釈し，外部標準として使用した ( $\delta = 0\text{ ppm}$ ) ．得られたスペクトルについて定量は Delta 5.0.4 (JEOL, 東京) で処理した．

#### 3-2 サンプルングと実験手法の概要

霞ヶ浦の懸濁粒子のリンの動態についての研究—巻き上がりと植物プランクトンに含まれるリンの変動要因に関する研究

について

湖水 (全量  $\sim 20\text{L}$ ) のサンプルを  $4\text{L}$  容器 (ポリプロピレン) で採取し，酸洗浄 ( $1\text{mol L}^{-1}$  HCl) を行った  $20\text{L}$  容器 (高密度ポリエチレン) に移し，5 分以内に実験室に運んだ．サンプリング直後に，pH 計 (Horiba, D55S, Kyoto, Japan) および水温を水銀温度計で測定した．POC, PON, PP, PIP および POP の濃度の分析のために，各水試料の  $200\text{mL}$  サブサンプルを予め焼いた Whatman GF/F ガラス繊維フィルターでろ過し (公称孔径:  $0.7\mu\text{m}$ ) ，分析まで  $-20^\circ\text{C}$  で保存した．本サンプルを用いて，上記に示した，PIP, PP を分析した． $^{31}\text{P}$  NMR 分光法では，水試料  $10\text{L}$  を直ちに予め燃焼した GF/F フィルターで濾過し， $^{31}\text{P}$  NMR 法で分析可能になるまで  $-20^\circ\text{C}$  の冷凍庫に保存した．

霞ヶ浦の底泥中に含まれるリンの動態についての研究 霞ヶ浦の底泥中に含まれる有機物の重要性について

堆積物のコア試料は，長さ  $0.5\text{m}$  のアクリルパイプを取り付けた離合社の重力式コアサンプラーを用いて水深  $6\text{m}$  の湖心で採取した (Rigo, Tokyo, 日本) ．泥温測定のために新たなコアを採取し，底質の水 (底質の表面のすぐ上) を採取し，底泥直上水とした．

採取したコアは，暗所で保管し，できるだけ早く ( $\sim 3$  時間) 実験室に運んだ．それを冷蔵庫 (約 24 時間) に貯蔵し， $\text{N}_2$  雰囲気下で可能な限り早く， $0\text{-}1.5$ ,  $1.5\text{-}3.0$ ,  $3.0\text{-}6.0$ ,  $6.0\text{-}9.0$ ,  $9.0\text{-}12.0$ ,  $12.0\text{-}15.0$ ,  $12.0\text{-}15.0$ ,  $15.0\text{-}18.0$ ,  $18.0\text{-}21.0$ ,  $21.0\text{-}24.0$ ,  $24.0\text{-}27.0$ ,  $27.0\text{-}30.0$ ,  $30.0\text{-}33.0\text{ cm}$  に切り分けた．

各々の底泥深度のコアに対して，全リン，無機態リン，有機態リンおよびホスホモノエステラーゼ活性の分析のために，堆積物の一部 (湿重量約  $5\text{g}$ ) をポリプロピレンバイアルに取り，残りの底泥について  $3500\text{rpm}$  で 15 分間遠心分離し，底泥粒子及び，間隙水を分離した．間隙水については  $\text{N}_2$  雰囲気下で GF/F フィルター (孔径:  $0.7\mu\text{m}$ ) で濾過し，分析まで  $-30^\circ\text{C}$  でバイアルに保存した．

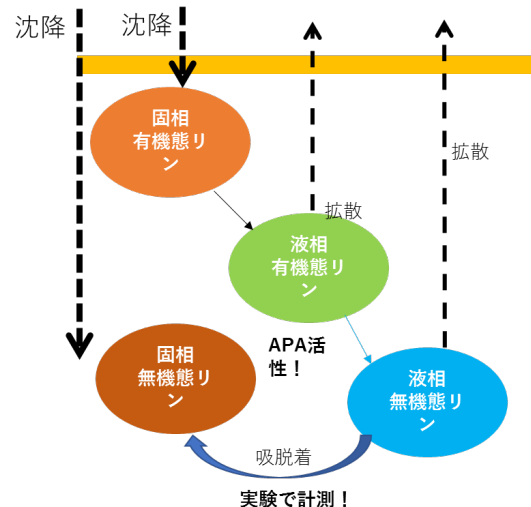


図 3: 作成したマスバランスモデルの概要



[数値計算モデルの概要]

底泥中の数値計算モデルについては、以下のような一次元の拡散方程式に、想定されるプロセスのマスバランスを導入したモデルを作成し、計算を行った。

$$\varphi \partial_t C_p = \partial_z (\varphi D_p \partial_z C_p) + \varphi \Sigma R_p \text{ (pore water)}$$

$$(1 - \varphi) \partial_t C_s = \partial_z ((1 - \varphi) D_s \partial_z C_s) + (1 - \varphi) \Sigma R_s \text{ (sediment)}$$

ここで、 $\varphi$  は空隙率(無次元)、 $\partial_t$  と  $\partial_z$  はそれぞれ堆積物中の時間と深さに対する偏微分、 $C_p$  は間隙水中のリン濃度(mg L<sup>-1</sup>)、 $C_s$  は底泥固相のリン濃度(mg g<sup>-1</sup> dw)、 $D_p$  は補正された分子拡散係数、 $D_s$  は生物擾乱の拡散係数(cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)、 $z$  は底泥の深さ(cm)、 $R_p$  と  $R_s$  は物質収支モデルにおける項である。

物質収支モデルについては、図3に示すマスバランスモデルを作成し、計算を行った。

霞ヶ浦の河川～湖沼に流入する懸濁粒子の特性についての研究

霞ヶ浦の流入河川(桜川)を含む7地点で採水を行った。湖水のPP, PIP, POP分析のために、アクリルチューブサンプラー(長さ2m)で採集し、水を酸洗浄したポリカーボネートボトル(2L)に貯蔵した。サンプルは冷暗状態で保管し、できるだけ早く実験室に運んだ。実験室では、予め燃焼させた(470℃で2時間)GF/F グラスファイバーフィルター(0.7μm, Whatman, USA)でろ過した。フィルターを直ちに凍結させ(-20℃)、数日間凍結乾燥させた。

<sup>31</sup>P NMR 用の分析試料については、2017年12月にサンプリングを行った。NMR 用試料についてはPP, PIP, POPのサンプリングから1週間以内に採水した。NMRの分析のために、20L以上濾過が必要であるが、ポンプ(Model: VFP002, Masterflex L/S, Cole-Parmer, Illinois, USA)及び、カートリッジフィルター(0.45μm: MCG-045-C10S Advantec, Tokyo, Japan)を用いて現場で濾過を行った。その後、2時間以内に実験室に持ち帰り、凍結して保管した。その後、上記の抽出を行い、NMRで分析を行った。

4. 研究成果

霞ヶ浦の懸濁粒子のリンの動態についての研究 巻き上がり植物プランクトンに含まれるリンの変動要因に関する研究についての研究成果

底泥の再懸濁が起こったとしても、測定の結果、PP濃度が物理的パラメータに有意に相関しなかった。観測された風速(1.7~8.7 m s<sup>-1</sup>)と波長(1.51~9.14 m)のかなりの範囲にもかかわらず、風速はPP, PIP, POPの濃度と相関がなかった。むしろ、PP, PIPおよびPOPの濃度はすべて懸濁性有機炭素濃度と有意に相関し、PPおよびPOP濃度もまたpHと有意に相関していた。これらの結果は、霞ヶ浦のPP濃度の変化が、底泥再懸濁によって供給される無機態リンではなく、植物プランク

トンやバクテリアのリン摂取によって制御されるという仮説を裏付けている。

この研究で見出されたPP(21.2%)中のPIPの割合は、底泥の再懸濁がリンのソースである他の浅い湖沼より極めて小さい。さらに、PP中の大部分(79.0%)は、POPであり、生物由来のリンが霞ヶ浦のPP濃度を制御しているという仮説を裏付けていた。

霞ヶ浦の底泥中に含まれるリンの動態についての研究 霞ヶ浦の底泥中に含まれる有機物の重要性について、に関する研究成果

底泥から上層水へのリンフラックスは、通常、水柱中のリン供給の大部分を占める。霞ヶ浦の場合、湖底堆積物からのリンフラックスは、水柱に投入された全リン供給の28.8%を占める。現在の研究の最も重要な点は、間隙水中の有機態リン供給とその無機化が、冬から春に間隙水中の無機態リンを供給する主要な経路であったことである。12月~4月の4ヶ月間の堆積物中の無機態リンと有機態リンの変化率を考えると、有機態リンの分解と無機態リンの吸着は同程度であった。

霞ヶ浦の堆積物中のホスホモノエステラーゼ活性は、高く(図4)、例えば、中国のLake Taihuにおける5.82 μmol g<sup>-1</sup> dw h<sup>-1</sup>などと同程度であった。本研究の結果は、有機態リンが間隙水中でオルトリン酸へと急速に加水分解されることを反映しているものと考えられる。霞ヶ浦での高アルカリフォスファターゼ活性は、堆積物表層に存在している分解されやすい有機態リンの割合が大きいいため、妥当な結果と言えよう。

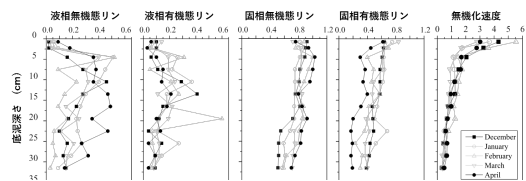


図4: Shinohara et al. (2017)を一部改編 左から底泥中に含まれる間隙水中の無機態リン、有機態リン、固相の無機態リン、有機態リン、アルカリフォスファターゼ(無機化速度)活性。

これらの知見を基に作成した数値計算モデルで計算した結果を以下の図に示す(図5)：

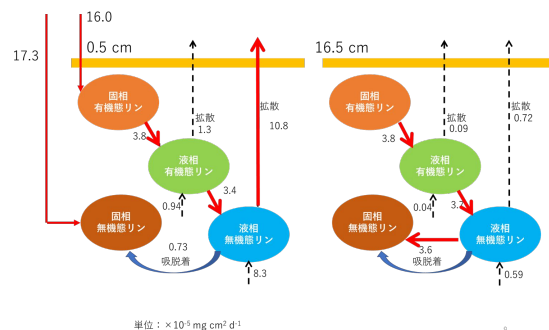


図5: Shinohara et al.(2017)より作成。底泥中0.5cm,16.5cm中におけるリンのフラックス

本研究におけるシミュレーション結果は、主要な無機態リンの挙動が底泥におけるの表層 1cm とより深い層とで異なることを示している(図 5)。表層では、間隙水中の有機態リンから無機化された間隙水中の無機態リンは水柱に拡散・溶出する。一方で、より深い層のほとんどの無機化された無機態リンは、底泥粒子に吸着する。底泥から水柱へのリンの放出が、どの程度の層から行われるかという情報は限られているが、我々の物質収支モデルの結果は底泥表層 2cm だけがリンの溶出に影響を及ぼすという過去の研究にも一致していた。

#### 霞ヶ浦の河川～湖沼に流入する懸濁粒子の特性についての研究、に関する研究成果

河川から湖沼まで、PIP 比率は減少している一方で、POP は増加していた(図 6)。河川では PIP が一貫して流入河川の PP の 60～85% を占める一方で、POP 濃度は霞ヶ浦の湖で高くなっており、河川と湖沼において、リンの組成が全く異なっていることが明らかになった。事実、NMR で測定を行った結果、河川ではオルトリン酸のピークが最も大きい一方で、湖沼では、有機態リン、特に核酸に含まれるリン(ヌクレオチド)が、検出されたリン化合物の中では最も多い結果となっていた。

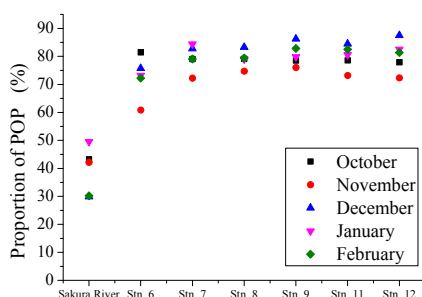


図 6: 桜川～霞ヶ浦の流出地点までの有機態リンの割合の変化

#### [参考文献]

Søndergaard, M., Jensen, J.P., Jeppesen, E., 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506, 135-145.

Shinohara, R., Imai, A., Kawasaki, N., Komatsu, K., Kohzu, A., Miura, S., Sano, T., Satou, T., Tomioka, N., 2012. Biogenic phosphorus compounds in sediment and suspended particles in a shallow eutrophic lake: A 31P-Nuclear Magnetic Resonance (31P NMR) study. *Environmental Science & Technology* 46, 10572-10578.

Shinohara, R., Hiroki M., Kohzu A., Imai A., Inoue T., Furusato E., Komatsu K., Sato T., Tomioka N., Shimotori K., Miura S. (2017) Role of organic phosphorus in sediment in a shallow eutrophic lake. *Water Resources Research*, 53, 7175-7189

#### 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 5 件)

1) Shinohara, R., Ouellette, L., Nowell, P., Parsons, C. T., Matsuzaki, S., Voroney, R.P. (2018) The composition of particulate phosphorus: a case study of the Grand River, Canada. *Journal of Great Lakes Research*. In press.(査読有り)

2) Shinohara, R., Iwata, T., Ikarashi, Y., and Sano, T. (2018) Detection of 2-aminoethylphosphonic acid in suspended particles in an ultraoligotrophic lake: a 2-dimensional nuclear magnetic resonance (2D-NMR) study. *Environmental Science and Pollution Research*. In press. (査読有り)

3) Shinohara, R., Hiroki M., Kohzu A., Imai A., Inoue T., Furusato E., Komatsu K., Sato T., Tomioka N., Shimotori K., Miura S. (2017) Role of organic phosphorus in sediment in a shallow eutrophic lake. *Water Resources Research*, 53, 7175-7189.(査読有り)

4) Shinohara, R., Imai, A., Kawasaki, N., Komatsu, K., Kohzu, A., Miura, S., Sano, T., Satou, T., Tomioka, N., Shimotori, K. (2017) Changes in the composition of phosphorus (P) compound groups in sediment and P in sediment pore water in a shallow eutrophic lake: a 31P NMR study. *Limnology*, 18, 141-151. (査読有り)

5) Shinohara, R., Imai, A., Kohzu, A., Tomioka, N., Furusato, E., Satou, T., Sano, T., Komatsu, K., Miura, S., Shimotori, K. (2016) Dynamics of particulate phosphorus in a shallow eutrophic lake. *Science of the Total Environment*, 563, 413-423. (査読有り)

##### 〔学会発表〕(計 9 件)

篠原隆一郎, 広木幹也, 高津文人, 今井章雄, 井上徹教, 古里栄一, 小松一弘, 佐藤貴之, 富岡典子, 霜鳥孝一, 三浦真吾 (2018) 霞ヶ浦底泥中における有機態リンの動態. 第 52 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 188

Shinohara R., Tomoya Iwata, Yoshiki Ikarashi, Sano T., Kohzu A. (2017) Analysis of phosphorus compounds by using 2D (1H 31P)-nuclear

magnetic resonance (NMR) spectroscopy in an oligotrophic environment. ASLO 2017 Aquatic Sciences Meeting, -

篠原隆一郎, 広木幹也, 高津文人, 今井章雄, 井上徹教, 古里栄一, 小松一弘, 佐藤貴之, 富岡典子, 霜鳥孝一, 三浦真吾 (2017) 浅い湖沼における底泥有機態リンの動態について. ELR2017 Nagoya/ 8th ICLEE, ELR2017 Nagoya/ 8th ICLEE, 56

篠原隆一郎, 今井章雄, 高津文人, 富岡典子, 古里栄一, 佐藤貴之, 佐野友春, 小松一弘, 三浦真吾, 霜鳥孝一 (2016) 霞ヶ浦における懸濁態リンの変動要因についての検討. 土木学会環境水理部会研究集会2016 in 香川, 同予稿集

篠原隆一郎, 古里栄一 (2016) 生物地球化学的な場における物理条件の重要性. 土木学会環境水理部会, なし

Shinohara R., Imai A., Kohzu A., Tomioka N., Furusato E., Sato T., Sano T., Komatsu K., Miura S., Shimotori K. (2016) Dynamics of Phosphorus in suspended particles in a shallow eutrophic lake: a 31P NMR study. American Geophysical Union Fall Meeting 2016, -

Shinohara R., Imai A., Komatsu K., Kohzu A., Miura S., Sano T., Sato T., Tomioka N., Shimotori K. (2015) Phosphorus (P) speciation in aquatic macrophytes around Lake Kasumigaura: A 31P NMR study. Water and Environment Technology Conference 2015, WET2015, 43

篠原隆一郎, 今井章雄, 霜鳥孝一, 高津文人, 佐藤貴之, 小松一弘, 富岡典子, 三浦真吾 (2015) 霞ヶ浦における粒子状物質の動態について. 応用生態工学会 第19回郡山大会, 同予稿集, 147

篠原隆一郎, 今井章雄, 富岡典子, 高津文人, 小松一弘, 佐藤貴之, 佐野友春, 三浦真吾, 霜鳥孝一 (2015) 霞ヶ浦の懸濁物に含まれる有機態リン化合物の動態について. 地球惑星科学連合 連合大会 2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://crispus.web.fc2.com/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

篠原 隆一郎(SHINOHARA, Ryuichiro)

国立研究開発法人 国立環境研究所・地域

環境研究センター・主任研究員

研究者番号：00610817