

未攪乱底泥コアを用いた連続培養系での酸素消費・溶出実験

中村 由行* ・ 井上 徹教** ・ 山室 真澄***
 神谷 宏**** ・ 石飛 裕*****

1. 緒 言

湖沼や沿岸海域において、底質による酸素消費速度 (SOD) やリンの溶出速度を精度良く推定する事は、物質循環の把握のために、また環境アセスメントの一環として重要である。

水・堆積物間のフラックスの推定は、間隙水の鉛直濃度分布測定と拡散係数から推定する間接的方法と、チャンパー現場法やコア室内法による直接的方法によって行われている (日本海洋学会, 1986)。間隙水分析による間接的方法では、溶出量は鉛直濃度勾配と拡散係数の積で与えられる。しかしながら、界面における両者の値を求めることは困難であり、間接法による推定精度は一般に低い。

チャンパー現場法は現場底泥上に直接筒上のチャンパーを固定し、内部の直上水における濃度変化からフラックスを見積もる方法である。現場の底泥を直接用いる利点はあるが、底層水と底泥を隔離するために水流の影響を反映できない欠点がある。最近、チャンパー内で水流をコントロールし、かつ濁度をモニターできる装置も提案されているが一般に装置が高価で大きくなり、機動性に欠ける。

採取した底泥を用いて室内実験で SOD や溶出量を求める方法は、より簡便な方法である。底泥を混合して実験する手法が数多く報告されているが、現地での値を推定するためには、底泥の鉛直構造を保存した、未攪乱底泥コアを用いるのが望ましい (福原・田中, 1978)。また、従来の実験方法としては、直上水に関してバッチ法が主流であるが、流動などの水理条件に注意が払われた実験はきわめて少ない。さらに、バッチ法では DO 濃度などの直上水の水質条件が短時間に急変するため、例えばリンの溶出速度の DO 濃度依存性を抽出する事は困難である。

そこで、本研究では、室内実験法の簡便さを残しながら

ら、直上水の流動並びに DO などの溶存物質濃度条件をコントロールできる実験系として、連続培養系での実験装置を作成した。この方法においては、直上水を任意の速度で攪拌すると共に、DO および栄養塩濃度が一定の水が連続的に未攪乱底泥コア直上に供給される。供給水流量及び水・底泥間のフラックスに応じた定常状態が達成できるため、現場条件に合わせて実験条件を設定できるのみならず、溶出に影響する各因子の影響度を個々に抽出できる特徴をもっている。本研究では、この実験装置を用いて、直上水の流動ならびに DO 濃度条件が SOD およびリンの溶出フラックスにどのように影響するかを調べた。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験装置を図-1 に示す。この実験系では下流部に配置されたポンプ (日本テクニコン (株), 比例定量ポンプ II 型) により生じる負圧によって供給水がサンプルコア内に、サンプルコア内の水が DO メーター (TOA 製 DO meter DO-25A), または栄養塩測定のためのサンプリングに送られる連続培養型となっている。供給水流量を変化させることで、直上水の底泥との接触時間 (直上水の滞留時間) を積極的に変化させ、最終的に定常状態となった際の直上水の水質条件 (DO 濃度等) が異なる実験を行うことが可能である。

夏季の実験 (1994 年 8 月) に対してはスターラーで行っていた直上水の攪拌を、秋季実験 (同 11 月) ではプ

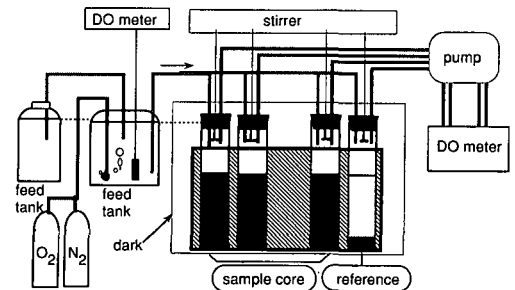


図-1 実験装置の概略図

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科
 ** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科博士課程
 *** 理博 通産省工業技術院地質調査所
 **** 島根県環境生活部環境保全課
 ***** 理博 島根県衛生公害研究所

ラステック製のプロペラで行うように変更した。プロペラは、スピード・コントロールモーター (ORIENTAL MOTOR, PSH425-401P) の発生した駆動力を、ラステック製のシャフト及びプーリーを用いて伝達することで回転させる。プロペラの攪拌速度はスピード・コントロールモーターの回転速度、またはプーリーの径を調節することで変化させ、直上水の水利条件を変化させる。このことにより、直上水の水利条件を積極的にかつ容易に変化させることができ、水利条件が水・底泥界面における物質移動フラックスに与える影響を定量的に評価することができるようになった。

装置の特性を考慮して、夏季の実験では主としてフラックスと DO 濃度の関係に着目し、秋季の実験では直上水の流動条件がフラックスに及ぼす影響について調べた。コアには、内径 8.5 cm、外径 9.5 cm、高さ 50 cm の円形のアクリルパイプを用いた。これらのコアは恒温水槽内に設置され、コア内の堆積物及び直上水を一定温度に保った。

(2) 実験方法

今回実験の対象としたのは、島根県東部に位置する汽水湖である宍道湖の湖心部の堆積物である。宍道湖は面積約 80 km²、平均水深約 4.5 m、湖心部の水深が約 6 m のわが国を代表する汽水湖であるが (図-2 参照)、他の多くの水域と同様に近年富栄養化が深刻な問題となっている。主な宍道湖への流入河川としては西側から斐伊川の流入がある。湖水は東端の大橋川を通じて中海さらには日本海と連絡している。こうした地形条件ため、中海には比較的安定した高塩分水層が形成されているのに対し、宍道湖では天文潮や低気圧の通過による日本海の海面上昇に伴い不定期に海水が湖心部にまで逆流する。この時、宍道湖湖心部底層には厚さ数 10 cm の明確な高塩分水層が形成され、そこではしばしば貧酸素化がおこっている。

実験は 1994 年の夏季 (8 月) と秋季 (11 月) に行い、補助的に 1995 年の夏季 (8 月) にも実施した。採泥は船上より上記のアクリルパイプを直接底泥に差し込むことにより乱さないように行った。また、採泥時には採泥現

場付近の水温・電気伝導度・DO 濃度・栄養塩類等の鉛直分布も測定している。それによると 1994 年における採泥時の水深は、夏季で 5.7 m、秋季で 5.3 m であり、底層水の水温は夏季で 29.1°C、秋季で 14.8°C であった。採泥したサンプルコアはただちに実験室に持ち帰り、実験装置に設置した。肉眼によりサンプルコアを観察したところ、上部 3~6 mm に酸化層、それ以深に還元層が確認された。

サンプルコアは採泥現場付近の状況に合わせて、暗幕で覆い暗条件として用いた。恒温水槽内は採泥時の現場水温にあわせて夏季実験では 29°C、秋季実験では 15°C と設定した。サンプルコア内の水の攪拌は、夏季にはスターラーにより行ったが、秋季には上述のように水・底泥界面より約 11 cm 上方に設置したプラスチック製のプロペラによって行い、プロペラの回転速度は底泥が巻き上がらない範囲の約 64, 93, 135 rpm の 3 種類を設定した。レーザー・ドップラー流速計を用いた流速測定の結果から、これらの回転速度において、直上水の流速はそれぞれ $\bar{u}=1.47, 1.82, 3.22$ (cm/s) であった。夏季実験においては攪拌条件は同一とし、供給水の流量条件を 2 種類で実験し、各条件につき 2 本ずつのサンプルコア (CORE 1~4) と底泥のかわりにガラスビーズをつめたリファレンスコア (CORE 5) の合計 5 本を用意した。一方、秋季実験においては 3 種類の攪拌条件と 2 種類の供給水流量との組み合わせ計 6 条件について各 2 本ずつのサンプルコア (CORE 1~12) と 1 本のリファレンスコア (CORE 13) の合計 13 本を用いた。

供給水は、採泥現場付近の底層水を濾紙 (Whatman GF/C) で濾過したものを窒素・酸素混合ガスで曝気することにより DO 濃度を調整して用いた。供給水及び流出水の DO 濃度は、DO メーター (TOA 製 DO meter DO-25A) によりモニターした。DO メーターの校正は、採泥現場付近で採水した底層水を用いた亜硫酸ナトリウム 10 w/v% 溶液を 0%, 空気により 30 分以上曝気したものを 100% として 2 点校正により行った。

供給水を流し始めてから約 24 時間後に DO 濃度測定 (供給水については 30 分毎に、コアからの流出水については 30 分毎に 1 コアずつ順番に DO メーターで測定) を開始した (RUN 1)。流出水は 1 時間 (夏季) 又は 2 時間 (秋季) 毎にサンプリングし、アンモニア・硝酸・亜硝酸・正リン酸についてはオートアナライザー (ブランルーベ製 TRAACS800)、全リン (ペルオキシ二硫酸カリウム分解後オートアナライザ)、全窒素 (三菱化成 (株) 製 TN アナライザ: TN-05)、珪素・溶存鉄・マンガン (セイコー電子製プラズマ発光分析装置 ICP-400)、電気伝導度 (TOA Conductivity meter CM-40S) と pH (TOA HM-60S) を測定した。RUN 1 終了後供給水の DO 濃度と流

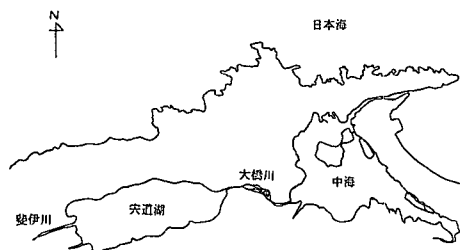


図-2 宍道湖・中海とその周辺図

量を変化させ、約24時間経過後再び測定を開始した (RUN 2)。さらに秋季実験においては現場水温 (15°C) で RUN 1・2 を行った後、水温を 30°C に変更した後、RUN 3 を行った。全ての RUN 終了後、底泥の間隙率や間隙水中の栄養塩濃度 (上述のオートアナライザー)・二価鉄 (フェナントロリン吸光光度法)・堆積物の有機炭素及び窒素 (柳本製 CHN コーダー-MT5)・全リン (ペルオキシニ二硫酸カリウム分解後オートアナライザ) を測定し、さらにベントスの同定を行った。

また、これらの実験に並行して、採泥現場付近における溶存物質濃度の鉛直方向分布の観測も 1~2 日毎に行った。これは内径 40.5 mm、外径 48 mm、長さ 2 m の円形のアクリル管を底泥に直接差込み、約 30 cm の底泥と共に底層水試料を乱さないように採取するものである。採取した底層水は実験室に持ち帰り、アクリル管内の底泥を細い棒をつけたゴム栓で押し上げて、アクリル管の最上部から数 cm 毎に直上水を採水する。こうして分取した試料を用いて、栄養塩濃度等を測定した (神谷ら, 1996)。

3. 結果と考察

(1) 夏季実験

1994 年 8 月に行った実験 (夏季実験) 結果の一例を図-3 に示す。夏季実験では主としてフラックスと DO 濃度の関係に着目した。

連続培養系での実験結果から、溶出フラックスは次式によって計算される。

$$V \frac{dC_{out}}{dt} = Q \cdot C_{in} - Q \cdot C_{out} + Flux \cdot A \cdots \cdots (1)$$

ここで、 V は CORE 内の直上水体積、 C_{in} は供給水の溶存物質濃度、 C_{out} は流出水の溶存物質濃度、 Q は供給水流量、 A は CORE 断面積を表す。

図-3 に示された様にほぼ定常状態が達成された場合には、フラックスは供給水と流出水の濃度差に比例する。式 (1) より CORE 1 (DO 濃度が約 0.6 mg/l) でのリンの溶出フラックスは約 15 mg/m²/day と求められたのに対して、CORE 3 (DO 濃度が約 0.2 mg/l) では約 24 mg/m²/day であった。この様に、直上水の DO 濃度の減少に伴ってリンの溶出フラックスが増大することが、いずれの実験においても確認された。また、1995 年 8 月には同程度の水温で DO 濃度が 2 mg/l 以上の実験を行ったが、リンの溶出は観測されなかった。

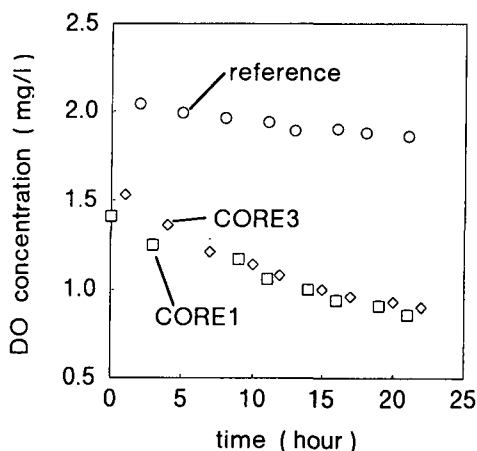
1994 年 8 月 6 日及び 8 日には現場 (底面付近の DO 濃度は 0.3 mg/l、水温は 29°C 程度) においてもリンの鉛直方向濃度分布を測定した。観測期間中現場付近の流況は穏やかであり、この時形成されていた下層部の高塩水層は安定していた。この 2 日間でのリン濃度の増加量を鉛

直方向に積分すると、現場でのリンの溶出フラックスは約 15 mg/m²/day であったと推定された (神谷ら, 1996)。

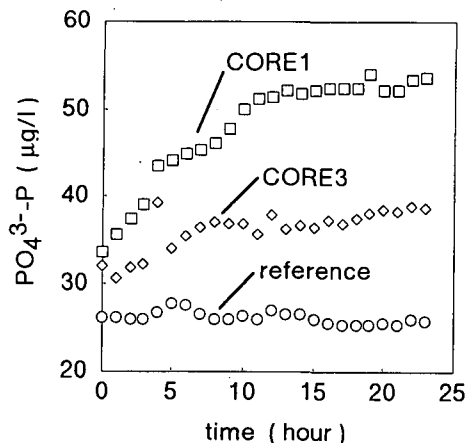
以上の実験結果及び現場観測から得られた推定値を用いて、直上水の DO 濃度とリンの溶出フラックスとの関係を示したものが図-4 である。これをみると、DO 濃度の増大に伴いリンの溶出フラックスは減少し、DO 濃度が約 2 mg/l でリンの溶出は止まることがわかる。以上の結果から夏季における宍道湖湖心部でのリンの溶出フラックスと DO 濃度との関係を求めると次式のようになる。

表-1 各コアへの流量

	CORE 1	CORE 3	reference
流量 (ml/min.)	4.14	6.21	6.16



(a) DO 濃度の時間変化



(b) リン濃度の時間変化

図-3 1994 年 8 月夏季実験結果 (RUN 1)

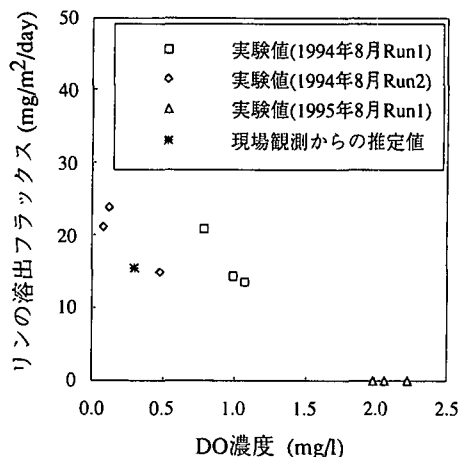


図-4 夏季の宍道湖における DO 濃度とリンの溶出フラックスとの関係

$$\left. \begin{aligned} [P\text{-Flux}] &= -10.6 [DO] + 23.0 & (DO < 2 \text{ mg/l}) \\ [P\text{-Flux}] &= 0 & (DO \geq 2 \text{ mg/l}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

また、実験結果と現場観測からの推定値との間には有意な差は見られず、本研究において提案した実験方法の現場再現性が示された。

(2) 秋季実験

秋季実験 (1994 年 11 月) においては、直上水の流動がフラックスに及ぼす影響を主として調べた。秋季実験から得られた実験結果の一例を図-5 に示す。これを見ると攪拌速度が増大するにつれて SOD も大きな値をとることがわかる。これは、以下のようなことが原因であると考えられる。つまり、攪拌速度が大きくなるほど水・底泥界面付近の流速は大きくなり、境界層の厚さが減少する。その結果として界面付近における DO の鉛直方向濃度勾配が大きくなるため、拡散速度 (SOD) が増加すると考えられる。

また、水温を 15°C に設定した条件 (RUN 1, 2) での実験では、直上水は十分に貧酸素化していたにもかかわらず底泥からのリンの溶出は確認されなかった。実験と並行して行った現場観測 (底層付近の水温は約 15°C) ではリン濃度は水深方向に一様であり、現場においても底泥からのリンの溶出はなかったものと思われる。しかし、水温を 29°C に上げて再度実験を行うと (RUN 3), 相当量のリンの溶出が観測された。これらの結果から、水温が約 15°C となる秋季においては、直上水の DO 濃度が 1 mg/l 以下になる期間が数日程度継続してもリンの溶出はないことがわかる。これは水温が低いために、底泥内部の酸化還元電位が十分に下がらないことが原因であると考えられる。この結果についても、実験結果と現場観

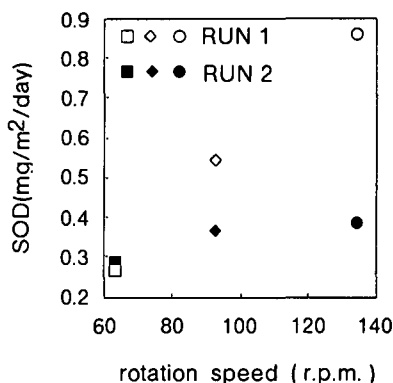


図-5 攪拌速度と SOD との関係

測との間には良い一致が見られ、本実験方法の現場再現性が示された。

RUN 3 における攪拌速度とリンの溶出フラックスとの関係を図-6 に示す。DO 濃度はいずれもほぼ 0 mg/l である。これを見ると SOD が小さな値を取る場合には、攪拌速度の増加に伴ってリンの溶出フラックスも単調に増加するが、SOD が相対的に大きな値を取る場合には、リンの溶出速度はある値で極大値を取り、その後減少することがわかった。これは、中村ら (1994) が示した理論解析の結果と一致するものであり、リンの溶出フラックスに対する直上水の DO 濃度と流速への依存性が示された。

(3) 間接法によるフラックスの推定法との比較

間接法によるフラックスは底泥内部の濃度勾配を用いて、次式により算出される。

$$\text{Flux} = -\phi^3 D \frac{\Delta C}{\Delta z} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ϕ は間隙率、 D は分子拡散係数、 ΔC は底泥中での濃度差、 Δz は鉛直方向の距離を表す。定常状態ではフ

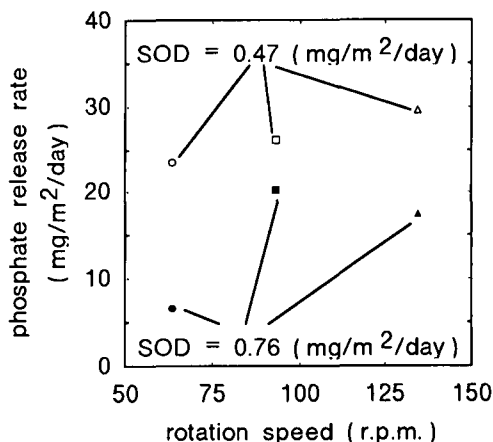


図-6 攪拌速度とリンの溶出フラックスとの関係

表-2 式(1), (3)から得られたリンの溶出フラックスの比較 (mg/m²/day)

	CORE 1	CORE 2	CORE 3	CORE 4
式(1)	15	3.2	24	21
式(3)	4.8	4.1	5.3	36

ラックスは流出・入水の濃度差に比例することがわかる。夏季実験の結果を用い、式(1)及び(3)からそれぞれ得られたリンの溶出フラックスを表-2に示す。これを見ると、両者の計算値がかなり異なることがわかる。これは、間隙水の水質分析においては界面における濃度勾配の値を正確に推定できるだけの分解能が期待できないためであると考えられる。また、一般に bioturbation が活発な堆積物においては、実際のフラックスは分子拡散によるフラックスよりもかなり大きくなる事が知られている。この様な理由から連続培養系での実験から式(1)を用いて求めた溶出フラックスは、間接法による式(3)を用いた評価方法よりも信頼できると考えられる。

4. 結 言

直上水を任意の一定速度で攪拌すると共に、DO 濃度や栄養塩濃度が一定の水を連続的に未攪乱底泥コアに供給する連続培養系での実験法を提案した。その実験装置を用いた実験結果から、底泥からのリンの溶出フラックスの DO 濃度への依存性が定量的に示された。また、直上

水の攪拌速度(流速)が大きくなるにしたがって SOD は増大し、その値は直上水の DO 濃度にも大きく依存することがわかった。さらに底泥からのリン溶出速度に関する、本実験方法の現場再現性が示された。また、リンの溶出フラックスに対する直上水の DO 濃度と流速への依存性も明らかになった。

謝辞：採泥と水質の分析にご協力頂いた島根県衛生公害研究所水質科の皆さんと(株)類設計室の御子神学氏に感謝します。また本研究は環境庁公害防止等試験研究「富栄養化湖沼における食物連鎖を利用した水質浄化技術に関する研究」(研究代表者：山室真澄)の一環として行われ、本研究の遂行に当たっては、一部文部省科学研究費補助金、一般研究(c)「流れ系における水・底泥界面での物質移動に関する研究」(研究代表者：中村由行)の補助を受けた。

参 考 文 献

- 神谷 宏, 石飛 裕, 井上徹教, 中村由行, 山室真澄(1996): 宍道湖の底層水に蓄積する栄養塩の起源, 陸水学会誌(投稿中).
- 中村由行, 御子神学, 朴 崎篤(1994): 底層水の流動がリンの溶出フラックスに及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1081-1085.
- 日本海洋学会編(1986): 沿岸環境調査マニュアル(底質・生物篇), 恒星社厚生閣
- 福原春夫・田中哲治郎(1978): 底泥からのリンの溶出, 諏訪湖集水域生態系研究報告第1号, pp. 47-54.