

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560522

研究課題名（和文） 陸水域における砂質底泥への乱れの浸透と水・底泥間での物質移動に関する研究

研究課題名（英文） Mass transfer at the sediment/water interface for permeable sediments in an inland aquatic system

研究代表者

東野 誠 (HIGASHINO MAKOTO)

大分工業高等専門学校・都市・環境工学科・准教授

研究者番号：90311117

研究成果の概要（和文）：本研究では、陸水域での水質と生態系変化を高精度に予測し、かつ環境アセスメントに適用し得るモデル開発を最終目標とし、現時点で未解決である課題、すなわち、1)水域底部に堆積した底泥内部での生物過程、およびそれと物質移動との相互作用、および2)砂や砂礫で構成された透水性底泥、つまり砂質底泥に対する底泥直上の乱れの内部への浸透と、それによる物質移動への影響を、研究代表者のこれまでの基礎研究を有効に活用するとともに、理論的・実験的検討を通して、定量的に表現する手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：Mass transfer at the sediment/water interface, e.g. dissolved oxygen uptake, phosphate release and so on, plays an important role for water quality and ecosystem in rivers, lakes, and reservoirs. Sedimentary oxygen demand (SOD) is the oxygen flux from water column over a sediment to the sediment surface, and has been studied for mainly impermeable organic sediments. SOD for sandy permeable sediment has not been investigated. This study considers a sandy permeable sediment. In impermeable sediments, molecular diffusion is a major mechanism for mass transfer. On the other hand, interstitial water motions caused by near-bed turbulence penetration has a significant effect on mass transfer for sandy permeable sediments. A model for pore water flow induced by pressure fluctuations at the sediment/water interface due to near-bed turbulent coherent motions has been developed. The model incorporates microbial oxygen uptake in the sediments. The proposed model quantifies SOD for not only impermeable organic sediments, but also sandy permeable sediments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：環境水理学，水資源，水環境

1. 研究開始当初の背景

湖沼，貯水池，エスチャラー等の水域底部に堆積した底質と直上の水柱との間の物質

交換は，古くから検討が行われてきた研究テーマの一つである．底質による溶存酸素(DO)の消費とそれに伴う水域底部の貧酸素化，

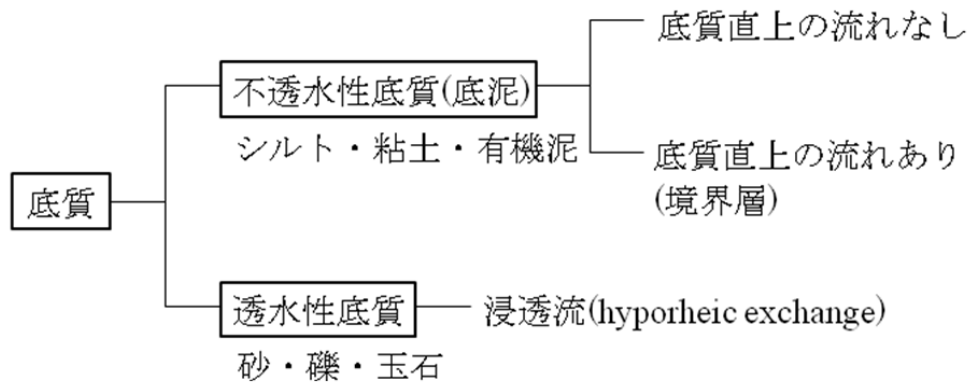


図-1 底質の種類と水・底質間の物質移動

および底質からのリンの溶出は、水・底質間での物質交換の典型的な例と言えよう。これら水・底質間の DO やリンの移動に関しては、多くの研究成果が国内外の学術雑誌等に公表されている。この度、研究代表者は、日本学術振興会 平成 22～24 年度科学研究費補助金 基盤研究(C)「陸水域における砂質底泥への乱れの浸透と水・底泥間での物質移動過程に関する研究」が採択され、3 年間、研究を遂行する機会を得た。上述のように、これまでに、水・底質間での物質移動に関する多くの研究成果がある中で、本研究の意義と特色を以下に整理する。

まず第一に、これまでの水・底質間の物質移動に関する研究は、シルトや粘土、あるいは有機泥というような、いわゆる不透水性の底質、すなわち、“底泥”を対象としたものが殆どであった(図-1)。このような底泥による DO 消費速度や底泥からのリンの溶出速度(フラックス)が個々の底泥を対象として実験的に測定されてきた。1980 年代以降、水・底泥間での物質移動フラックスに及ぼす底泥直上の流れの影響について検討が行われるようになってきた。これには、1980 年代の微小酸素電極の開発が契機となった。それまでの DO 測定用に使用されていた電極は、空間分解能が十分ではなく、水・底泥境界面近傍の DO 濃度が急激に変化する領域(数 mm 程度)での DO の測定がほぼ不可能であった。一方、新しく開発された微小電極は、 μm のオーダーの空間分解能で DO 濃度分布を測定することが可能であり、これによって水・底泥境界面近傍での DO 濃度分布の測定が行われ、“濃度境界層”、すなわち、水・底泥境界面近傍の DO 濃度が急変する層の存在が確認された。底泥直上の流れが水・底泥間での DO やリンのフラックスに及ぼす影響は、上述の濃度境界層の概念を用いて次のように説明される。すなわち、底泥直上の流速が大

きくなると、水・底泥境界面直上に形成される濃度境界層厚さが小さくなり、そこでの濃度勾配が大きくなる。水・底泥間の DO やリンのフラックスは濃度勾配に比例するから、流速の増大とともに濃度勾配が大きくなればフラックスも増加する。これを応用したものが“境界層モデル”であり、1990 年代以降、理論的・実験的に検討が行われるようになった。

次に、図-1 に立ち返り、透水性底質について述べる。従来、水理学・河川工学において、礫や玉石等の河床材料を対象として浸透流に関する検討が行われてきた。すなわち、河床直上の乱流(surface flow)と河床との相互作用、surface flow によって引き起こされる浸透流(subsurface flow)、および乱流と浸透流との間の相互作用等について研究が行われた。このような透水性底質は、水理学・河川工学では研究の対象であったが、1990 年代後半まで DO やリン等の物質移動の研究の対象とはならなかった。ところが、21 世紀になり、砂や礫を対象として物質移動の研究が行われるようになった。これは、透水性底質内部に生ずる浸透流が物質移動に及ぼす影響に着目するものである。河床が礫や玉石で構成された河川を考えれば、河床直上は発達した乱流であるが、河床の底質内部に生起する浸透流は底質表面を除けば Darcy 則で表現されるような層流であろう。一方、底質表面では、底質材料の大きさや河床の形状(凹凸の有無)によって上層の乱流との間で運動量の交換が行われ、これによって、直上の水柱との間で物質交換が活発となる薄い領域(hyporheic zone)が形成されると考えられる。この hyporheic zone、あるいは hyporheic zone が形成されることに伴う直上の水柱と底質との間の DO やリンの移動は“hyporheic exchange”と呼ばれ、近年、検討が行われるようになったテーマである。

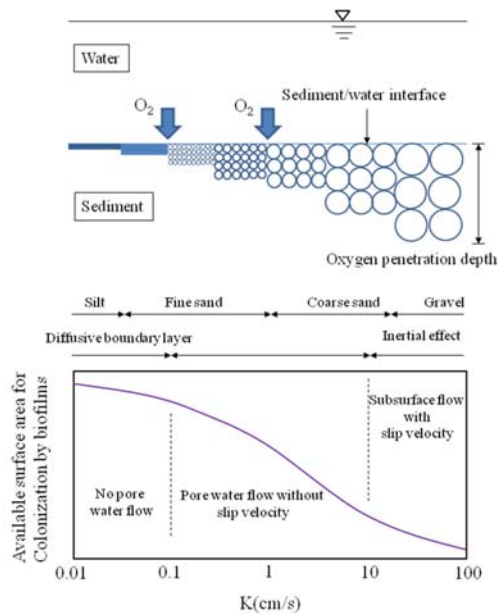


図-2 底質粒径と水・底質間での物質移動、および底質の有機物含有量との関係

不透水性底質，すなわち，底泥においては，水・底泥境界面近傍，および底泥内部では分子拡散による物質移動が支配的となる．底泥直上に流れがある場合には，前述のように底泥表面直上に形成される濃度境界層は流速によって厚さが変化するので，水・底泥間での物質移動フラックスは流速の影響を受けるが，境界層内での物質移動は分子拡散である．他方，透水性底質における *hyporheic exchange* では，底質内部での浸透流，あるいは，*hyporheic zone* での直上の乱流渦の浸透に起因する移流による物質移動が支配的となる．ここで，分子拡散による物質移動フラックスについて再考すれば，底泥直上の流速が大きく，境界層での濃度勾配がいかに大きくなろうとも，水環境や生態系の問題で対象となる DO やリン等の分子拡散係数の大きさ（例えば，DO の分子拡散係数は純水の動粘性係数の約 1/500）を想起すれば，移流による物質移動フラックスとは比較にならない．これに関しては，後述する「研究成果」に掲げた論文 3)の中で詳述されている．以上のように，透水性底質においては，*hyporheic exchange* に起因する物質移動フラックスは，一般的に底泥における分子拡散による物質移動フラックスより数倍～数オーダー大きく，水環境や生態系に大きなインパクトを持つことが理解されよう．

2. 研究の目的

本研究では，透水性底泥，すなわち，砂質底泥を対象として，*hyporheic exchange* に起因する水・底泥間での溶質移動フラックスを

高精度に推定し得るモデルの構築を目的とした．具体的に，次の各点に絞って検討を行った．まず，1)底泥内部での微生物の増殖，代謝，およびこれに伴う有機物質，栄養塩等の基質の収支を定量化するために理論的・実験的検討を行う．次に，2)底泥直上の乱れの底泥内部への浸透と物質移動への影響を明らかにするために，実験とコンピュータシミュレーションによる検討を行う．最後に，3)文献調査等に基づいて水域における流れや水深等の水理条件，水温，溶存酸素や栄養塩等の環境条件から水質や生態系の変化を予測するためのモデルを構築する．

3. 研究の方法

本研究は，研究代表者の所属する大分工業高等専門学校，および研究代表者がこれまで共同で行ってきた Stefan,H 教授(海外共同研究者)の所属するアメリカ合衆国，ミネソタ州，ミネソタ大学セントアンソニーフォールズ研究所において遂行された．水工水理学，流体工学に関する種々の大規模実験施設を有するセントアンソニーフォールズ研究所では，底泥直上の乱流の底泥内部への浸透に関する実験を実施した．一方，大分工業高等専門学校では，底泥直上の乱流の底泥内部への浸透に関する文献調査を実施するとともに底泥内部での微生物の増殖，代謝，およびそれに伴う溶存酸素，有機物質，栄養塩の生成・消費過程をモデル化した．並行してコンピュータシミュレーションモデルの開発，研究の総括を行った．

4. 研究成果

本研究(2010～2012 年度)で得られた成果は，後述の「研究成果」で示すように学術論文7編，口頭発表5編に集約される．論文 1)，2)では，砂や礫で構成された底質を対象として，底質直上の乱流の組織構造に起因する乱流渦が底質内部へと浸透して *hyporheic exchange* を駆動すると考え，その過程をモデル化した．論文 3)では，このモデルによって推定した *hyporheic SOD* と，従来の底泥を対象とした境界層モデルによる *SOD* とを比較し，*hyporheic flow* が物質移動に及ぼすインパクトの大きさを示した．ここに，*SOD* (Sedimentary Oxygen Demand)とは，底質直上の水柱から底質表面へと移動する DO のフラックスである．論文 4)では，底質が礫や玉石等の粒径の大きい材料で構成されている場合の *hyporheic exchange* について，論文 1)で構築したモデルを更に発展させることによって検討した．以上のように，論文 1)，2)，4)は，*hyporheic exchange* のモデル構築とそれによる透水性材料で構成された底質内部での物質移動過程を再現することを目的としていた．これに対して，論文 3)，6)では，

hyporheic flow における SOD を定量的に表現することを目的とした。シルト・粘土・有機物質で構成された底泥(不透水性底質)と砂(透水性底質)とでは底質表面の酸化層(酸素が存在して好氣的に保たれている層)の厚さが異なる(例えば、底泥の場合には数 mm, 砂の場合には数 cm)ことが知られている(楠田哲也編: 自然の浄化機構の強化と制御, 技報堂出版, 1994.(166p.)). シルトや粘土で構成された底泥は不透水性で底泥内部では分子拡散によって物質は移動する。一方、底泥は有機物質を高濃度に含有することが多く、底泥表面直下のごく薄い層にのみ DO が存在する。これに対して、砂・礫・玉石のような材料で構成された底質は透水性で、内部に生起する浸透流や乱流渦の浸透による hyporheic flow に起因する移流が物質移動に対して支配的となる。反面、底質中に含まれる有機物量は上述の不透水性の底泥ほど多くはない。これを模式的に示したのが図- 2 である。この図のように、底質粒径とともに浸透流速、および底質内部での物質移動速度は増大する。他方、粒径とともに底質の比表面積は減少し、これに伴ない底質が含有する微生物が利用可能な有機物量も減少する。したがって、粒径が小さければ底質内部での DO 移動速度が SOD を律し、粒径の増大とともに律則段階が微生物による DO 消費速度へと推移する。このような底質粒径による律則段階の推移を定量的に表現した研究例は見当たらなかった。文献 6) では、文献 1)~4) で構築した hyporheic flow のモデルと研究代表者が従来取り組んできた底質内部での微生物の増殖に伴う酸素消費過程のモデルに基づいて、底質を構成する砂・礫・玉石が球形、という条件下ではあるが、粒子径の増大とともに DO 浸透深さも増大すること、および SOD の粒子径への依存性、すなわち、①SOD は砂に対しては粒子径とともに増大する(hyporheic flow 流速が大きくなる)、②礫や玉石で構成された底質に対しては粒子径とともに SOD は減少する(底質が含有する有機物質量が少なくなる)、ことを示した。なお、これらはいずれもモデルによるシミュレーション結果であり、論文査読者からは実験結果・実測値との比較によるモデルの妥当性の検証が十分でないとの指摘を受けた。文献 5) はダム・貯水池を対象とし、貯水池操作による定期的な水の交換が行われるという想定の下、SOD を定量化し、底泥直上に流れがある場合と比較したものである。文献 7) は軟弱な有機底泥が湖沼や貯水池に堆積しており、このような底泥が水域に生起する内部波や内部静振による流れに対応して流動する場合を想定し、底泥直上の乱れが内部へと伝播してゆく特性について検討したものである。

以上のように、砂・礫・玉石で構成された

透水性底質を対象として、底質直上の乱れの内部への浸透とそれによって駆動される流れ(hyporheic flow)を再現するためのモデル(hyporheic flow model)を構築した。また、hyporheic flow model を底質による DO 消費過程に応用し、粒径による底質内部の DO 移動速度と微生物による DO 消費速度の変化特性、すなわち、SOD の底質粒径への依存性を定量的に表現し得るモデルを構築した。これによって、底質直上の流れ、および様々な底質、すなわち、粘土やシルト等の不透水性の底泥から砂・礫・玉石等の透水性底質のように、幅広い環境条件に対する SOD 推定のための手法を提示した。

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 7 件)

- ① Higashino, M. : Quantifying a significance of sediment particle size to hyporheic sedimentary oxygen demand with a permeable stream bed, *Environmental fluid mechanics*, 13(3), pp.227-241, doi: 10.1007/s10652-012-9262-3, 2013, 査読有.
- ② Higashino, M. and Stefan, H.G. : Model of turbulence penetration into a suspension layer on a sediment bed and effect on vertical solute transfer, *Environmental fluid mechanics*, 12(5), pp.451-469, 2012, 査読有.
- ③ Higashino, M. and Stefan, H.G. : Non-linear effects on solute transfer between flowing water and a sediment bed., *Water Research*, 45, pp.6074-6086, 2011, 査読有.
- ④ Higashino, M. and Stefan, H.G. : Dissolved oxygen demand at the sediment-water interface of a stream: near-bed turbulence and pore water flow effects., *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol.137, No.7, pp.531-540, 2011, 査読有.
- ⑤ Higashino, M. : Oxygen consumption by a sediment bed for stagnant water: Comparison to SOD with fluid flow., *Water Research*, 45, pp.4381-4389, 2011, 査読有.
- ⑥ Higashino, M., Clark, J. and Stefan, H.G. : Reply to comment by F.Boano et al. on "Pore water flow due to near-bed turbulence and associated solute transfer in a stream or lake bed", *Water Resources Research*, Vol.46, W10802, doi: 10.1029/2010WR009468, 2010, 査読有.
- ⑦ Higashino, M., Clark, J.J. and Stefan, H.G. : Pore water flow due to near-bed turbulence and associated solute transfer in a stream or lake bed, *Water Resources Research*, Vol.45,

W12414, doi:10.1029/2008WR007374,
2009, 査読有.

〔学会発表〕(計5件)

- ① 東野 誠 : 砂や礫で構成された透水性底質による酸素消費過程に関しての一考察, 平成 24 年度日本水環境学会九州支部研究発表会, 2013 年 2 月 16 日, 北九州市産業学術推進機構産学連携センター.
- ② 東野 誠 : Hyporheic flow での SOD に及ぼす底質粒径の影響, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, 2012 年 3 月 3 日, 鹿児島大学.
- ③ 東野 誠 : 透水性底質表面での物質移動に関する一考察, 平成 23 年度日本水環境学会九州支部研究発表会, 2012 年 3 月 10 日, 北九州市立大学.
- ④ 東野 誠 : SOD に及ぼす透水性底質内部への乱れの伝播の影響, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会, 2011 年 3 月 5 日, 九州工業大学.
- ⑤ 東野 誠 : 乱れの透水性底質内部への伝播における非線形性の影響, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 崇城大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東野 誠 (HIGASHINO MAKOTO)
大分工業高等専門学校・都市・環境工学科・准教授
研究者番号 : 90311117

(2) 研究分担者 なし ()

研究者番号 :

(3) 連携研究者 なし ()

研究者番号 :