

植生砂州における洪水後脱窒ポテンシャルの 定量化の試み

QUANTIFICATION OF DENITRIFICATION POTENTIAL OF VEGETATED SANDBAR AFTER FLOOD

尾花まき子¹・黄 躍滔²・辻本哲郎³

Makiko OBANA, Yuetao HUANG and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博（工） 名古屋大学大学院助教 工学研究科（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

²修（工）Huadian Electric Power Research Institute（〒310-030 Xihu Science and Technology Park, Hangzhou）

³フェロー会員 工博 名古屋大学名誉教授 工学研究科（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

This study is focused on the denitrification of sand bar driven by subsurface water flow in aim to the quantification of ecological function in a river. Denitrification in the sand bar is mainly influenced by advection of subsurface water flow and reaction of microorganism according to the soil and environmental condition (potential) of each site. We proposed the new method for quantify the denitrification potential based on the field observation result which include morphological and hydronic parameters before and after flood. An empirical formula which quantifies the potential according to landscape elements in sand bar was created by using the field data. It was found that the denitrification potential has highest value in riverine vegetated area just after flood.

Key Words : Denitrification, potential, subsurface water flow, vegetated sand bar, after flood

1. まえがき

本研究では、河川が有する生態系機能の定量化を目的として、河道内砂州の水質浄化機能として注目されている砂州伏流水による脱窒作用に着目する。砂州の伏流水により駆動される脱窒は、主に、場に依存する土壤環境条件（ポテンシャル）による反応とその場を通過する伏流水による移流の効果が支配的である。近年、河道における樹林化が顕在化しているように、砂州は、裸地域と植生域を代表としたさまざまな景観要素の組み合わせによって構成されている。そのような場の特性に応じた脱窒機能が評価可能な平面2次元解析の仕組みの構築に向けて、ここでは、洪水の低減期に砂州内横断方向へ伏流水が駆動する現象に着目し、洪水後の窒素濃度変化を連続的に現地計測した結果を用いて、特に場に依存する脱窒ポテンシャルを抽出・定量する手法を提案する。

2. 洪水前後での現地観測

(1) 現地観測の概要

現地観測は、中部地方の一級河川庄内川の16.8km地点左岸砂州にて実施した（図-1参照）。その地点の平均河床勾配は1/1800程度、低水路幅は約130mであり、対象砂州の縦断距離は約500mである。対象とした砂州において、地形測量と伏流水動態観測を行ったところ、全砂州が冠水するような洪水直後の伏流水動態は、高水敷から

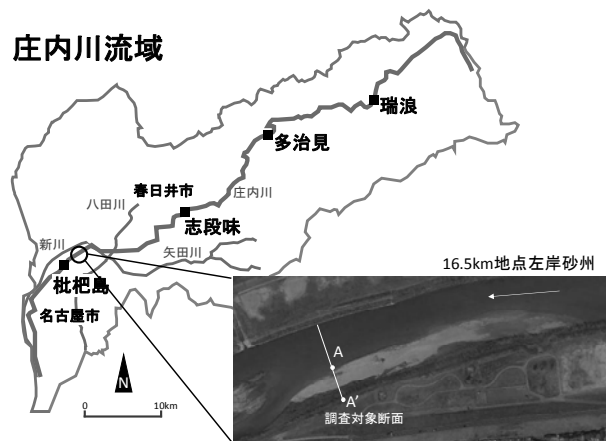


図-1 庄内川流域図と調査対象砂州

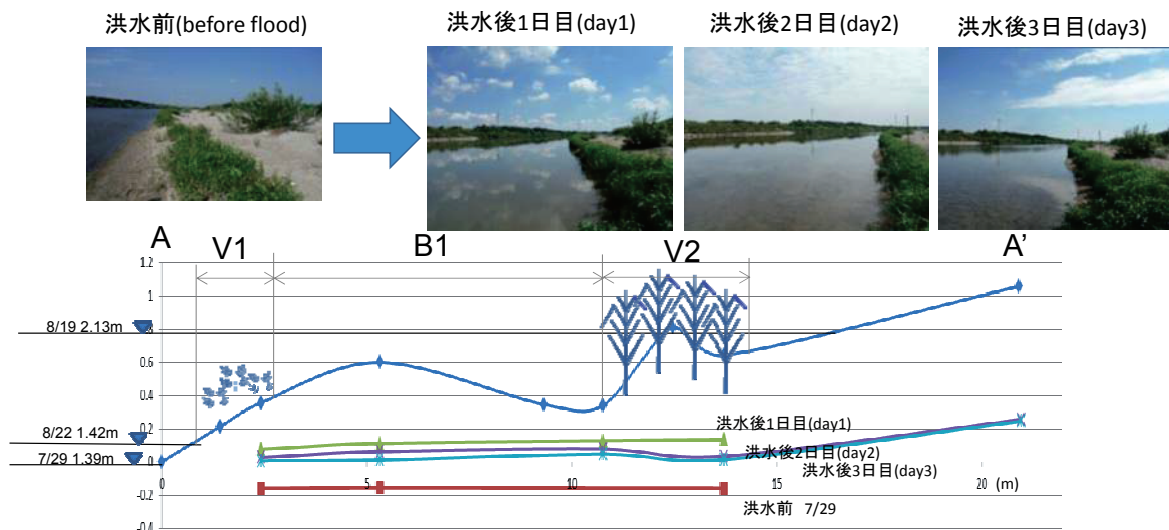


図-3 対象断面A-A'の比高と伏流水位変動



図-2 調査対象断面の概要

低水路に向けての横断方向流れが支配的であった。一方、脱室ポテンシャルは、砂州の土壌環境条件と相関があることから、砂州上の景観要素（裸地域や植生域）によるポテンシャルの違いを考慮できるように伏流水の流線に沿って植生域と裸地域が交互にあるような横断面を調査対象として選定した。調査対象断面の様子を図-2に示す。水際から高水敷にかけて緩やかに比高が高くなっており、その間ヤナギタデやツルヨシなどの草本植生が点在している。また、砂州の高水敷寄りにたまりがあることが確認され、それは上流から全長約300mにも及んでいることから、平時時には閉鎖性水域となっているが、洪水時には表流水の通り道となっており定期的の上流からの河川水の供給があることが確認された。

現地観測は、2014年夏季の洪水前（7/29）と洪水後（8/20-22）3日間にて、水質観測を連続的に行った。3日間の洪水後調査直前の8月19日に、計測地点が全水没する洪水が起こっており、洪水後調査は、ゆるやかに水位

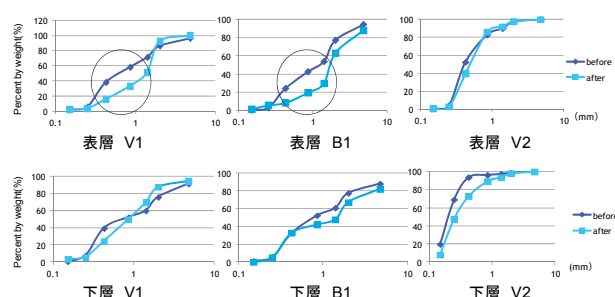


図-4 計測地点における洪水前後での粒度分布

が低減していく過程で行われた。計測地点は景観要素ごとに4地点設定し、それぞれの地点にて埋設した観測井により伏流水を採水し、溶存酸素DO、pH、酸化還元電位ORP、水温や溶存窒素三態（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ ）を計測した。同時に、対象とした横断面での地形測量と伏流水動態調査、各景観要素の表層と下層（地表下約30cm）での河床材料調査も実施した。

(2) 物理基盤特性

図-3に、地形測量および伏流水位観測により得られた調査対象横断面A-A'における比高と調査期間中の伏流水位変動を示す。この図より、砂州比高は水際から高水敷にかけて緩やかに増加していることが見てとれる。伏流水位は、洪水後3日間で徐々に水位が低減している様子が確認されており、特に洪水後の結果を見ると、高水敷から水際にかけて動水勾配がついていることから、伏流水は高水敷から水際に向かう流動特性を有することが推察される。植生は、水際部分（V1）にヤナギタデ群落が生息域から下流に向かい、畝状に見られるほか、内陸部（V2）にはツルヨシ群落が確認された。

図-4に、洪水前後で計測した各地点の表層と下層の粒度分布の結果を示す。D₆₀粒径は0.21~2.1mmに分布しており、裸地域の粒径は植生域の2倍程度となっている。

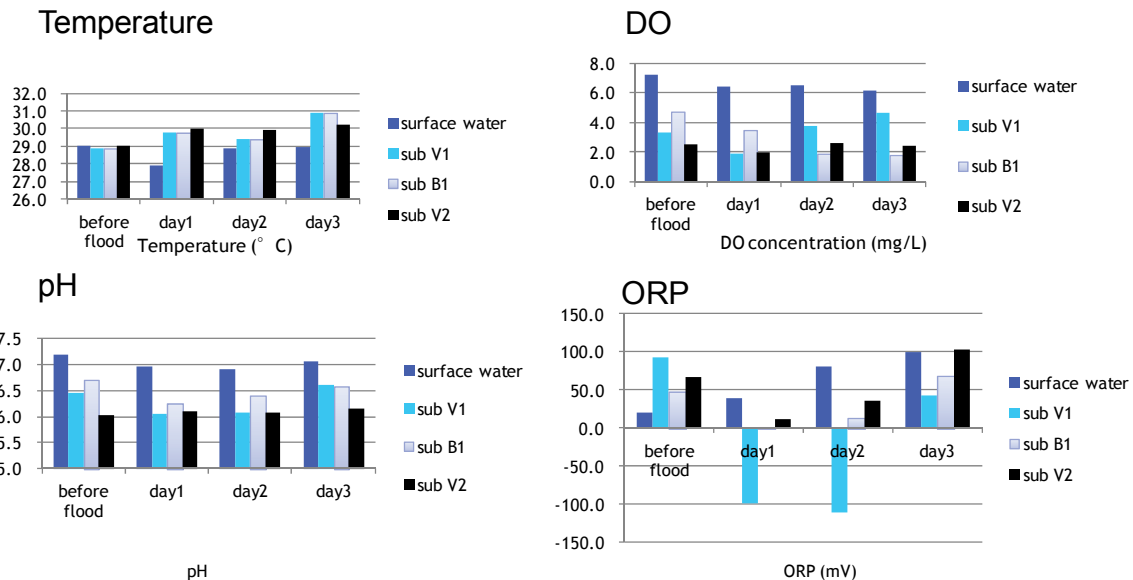


図-5 各地点での伏流水質

洪水前後で比較すると、表層と下層のいずれでも微小ではあるが洪水後の粒径のほうが粗くなっていることが確認された。

(3) 各地点における伏流水質

各地点において計測された伏流水質の結果を図-5に示す。先述した合計7計測項目のうち、脱窒作用は、特にDO, pH, ORP, 水温という4項目に至適性があるりと同時に、これらは植物の有無、粒度分布など場の条件にも影響される²⁾ため、本研究ではこれらを脱窒ポテンシャルとして抽出した。図-5に示した結果は、各景観で3回計測した平均値を示している。

結果を見ると、DO, ORPについては表流水質と比較して顕著に違いが出ており、いずれも表流水より低くなっていることから伏流水はより嫌氣的で還元的な環境下にあることが考えられる。時系列変化を見ると、それらは洪水後1日目に最も濃度が低く、水位の低減に伴いゆるやかに増加し、表流水質に漸近していく。また、地点間変化では、砂州水際の植生部(V1)にてDO, ORP, pHとも最も低いことから、そこでの脱窒ポテンシャルが高いことが推察される。裸地や植生域という景観についての違いはここでは顕著には見られなかったが、植生域はいずれも裸地域よりDOが低く、特にORPは水際植生域で顕著に低いことから、裸地域よりも嫌氣的で還元的な環境が整っているといえる。植生域では、植生が流れの抵抗として働くことにより細砂を捕捉しやすいため裸地域よりも小さい粒径分が堆積しやすいことや植物の根による呼吸により嫌氣的な環境になりやすいことが挙げられる。

水温とpHについては、いずれも水温25-30℃程度、pH6-8という範囲に収まっており、これらの範囲は脱窒が起る必要条件とされているため、河川伏流水ではそ

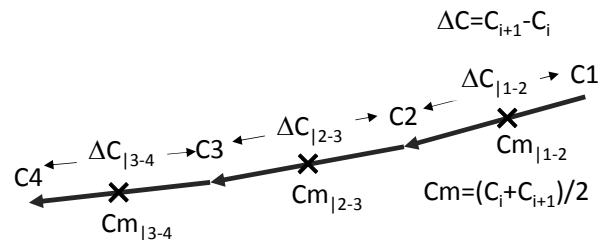


図-6 伏流水流動による窒素濃度変化の捉え方

れを満たしていると考えられる。このようなポテンシャルと脱窒反応の起こりやすさとの関連性については後に詳述する。

3. 伏流水流動による窒素動態解析

伏流水が各景観を通過することによる窒素の濃度変化においては、移流による濃度変化と微生物活動によるその場での反応が支配的であるため、移流項 $U(dC/dx)$ と反応項(この場合脱窒による反応)が定常状態で釣り合うと仮定すると、移流分散方程式は次のように書き換えられる。

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = kC \quad (1)$$

ここで、 U :伏流水流速 (m/s), C :硝酸態窒素濃度 (mg/l) であり、右辺の k を本研究での脱窒ポテンシャルと定義する。図-6に、伏流水流動による窒素濃度変化の捉え方を示す。C1~C4が伏流水採水地点であり、景観(裸地域や植生域)の始点と終点にそれぞれセットした。本研究では、窒素循環過程の中の脱窒を考えている

表-2 観測による硝酸態窒素濃度変化と脱窒ポテンシャル

	平均濃度Cm(mg/l)			ΔC (mg/l)			$R=\Delta C/(L/v)$			$k_{obs}=R/C_m$ (/s)		
	day1	day2	day3	day1	day2	day3	day1	day2	day3	day1	day2	day3
V1	0.92	0.61	0.60	0.44	0.78	0.87	2.8E-06	5.0E-06	5.6E-06	3.0E-06	8.3E-06	9.3E-06
B1	1.22	0.67	0.84	0.16	-0.66	-0.37	5.9E-07	-2.4E-06	-1.4E-06	4.8E-07	-3.7E-06	-1.6E-06
V2	1.95	1.58	1.65	1.30	2.49	1.98	1.2E-06	2.2E-06	1.8E-06	5.9E-07	1.4E-06	1.1E-06

表-1 各景観の伏流水流動特性

	v (m/s)	L (m)	L/v (s)
V1	5.0E-06	0.78	1.6E+05
B1	3.1E-05	8.35	2.7E+05
V2	2.6E-05	2.95	1.1E+06

ため、溶存窒素三態の中でも硝酸態窒素の濃度変化に対象を絞って議論を進める。伏流水が各景観を流下する過程での濃度変化を ΔC 、平均濃度を C_m として表す。

(1) 伏流水流動特性

伏流水流速については、2章で示した地形測量と伏流水位観測の結果を用いて、伏流水の動水勾配を求め、ダルシー則 $v=Ki$ により景観ごとに算出した。透水係数 K については、Hazen式 $K=C(D_{10})^2$ により、粒度分布試験により得た D_{10} 粒径を用いて算出した。各景観での伏流水流速(v)、横断距離(L)、通過時間(L/v)を表-1に示す。

伏流水流速は、裸地域B1で最も速くなっている。動水勾配自体には大きな変化が見られないが、粒径が裸地域と植生域で2倍程度の違いがあることから、裸地域の流速を上げていると考えられる。一方で景観通過時間は、比高の高い植生域V2で遅くなっているものの、V1と流速の大きいB1に顕著な違いが見られないことは、B1での流動距離が長いことに起因する。

(2) 伏流水流動による窒素濃度変化

各景観における硝酸態窒素の濃度変化 ΔC 、平均濃度 C_m 、移流による硝酸態窒素濃度変化 $R(=\Delta C/(L/v))$ および観測値により算出した脱窒ポテンシャル $k_{obs}(=R/C_m)$ の値を表-2に示す。斜字体となっている数値は濃度が増加したポイントであるため、本研究では脱窒を取り扱うことから検討対象外とした。

硝酸態窒素の平均濃度 C_m を見ると、洪水後1日目において伏流水の流下方向にともない、濃度が減少していることが見てとれる。その時の濃度変化 ΔC は、内陸側植生域V2>水際植生域V1>B1の順に高くなっており、植生域においてより効果が高い。洪水直後3日間における濃度変化は、特に洪水直後1日目での反応が大きいことが見てとれるが、これは流入初期濃度が1日目において最も高いことに起因すると考えられる。脱窒ポテンシャルを見ると、水際植生域V1で高い値を示している。そ

こでの洪水直後1日目と2日目の脱窒ポテンシャルを比較すると、2日目のほうが大きい。平均濃度は1日目のほうが高いが、2日目の裸地域で硝酸態窒素濃度の増加が起こっているため、水際植生域への流入濃度が高くなったことが影響していると推測される。

4. 脱窒ポテンシャルの定量化

脱窒ポテンシャル k は、その場の環境条件に応じて変化することから、その変化は直接的に硝酸態窒素変化量にも影響を与える。脱窒とは、窒素循環の最終段階であり、窒素化合物を分子状窒素として大気中へ放散させる作用である。ここでは簡単のため、伏流水が景観要素を上流から下流へと通過する過程での硝酸態窒素の濃度変化のうち、減少が見られたものを脱窒作用が生起しているとして捉えることとした。以上から、本章では脱窒が起こっているサンプルのみについて検討を行う。

(1) 反応係数の規格化

脱窒ポテンシャルとして抽出したDO、ORP、pH、水温という4項目の中にも、①脱窒反応の促進に影響する因子と②脱窒が起こるために必要な因子、とに分けられ、DOとORPが前者となり、pHと水温が後者となる。2章で示した結果から、pHと水温は景観ごとに大きな違いはなく、いずれも脱窒が起こる必要条件を満たす範囲内に含まれると判断されたため、本章では、脱窒ポテンシャルの反応係数として、①の因子であるDOとORPに対象を絞り、規格化することにした。

a) DOによる反応係数(α)

脱窒反応の起こりやすさとそれぞれのパラメータとの関係について既往文献調査を行った。脱窒反応が生起する過程での重要要素の一つはDOであり、一般的にはDOが低い嫌気的な環境下で脱窒反応が起こりやすいことが報告されている⁷⁾。特に、脱窒能とDO濃度との関連性については多数の報告があり、淡水・海水域ともに約0.5mg/lもしくはそれ以下で最も脱窒能が高く³⁾⁶⁾、濃度が増加するにしたがって指数関数的に減衰し、5mg/l程度まで脱窒が生起するポテンシャルはある⁷⁾とされている。以上のような関係を反応係数(α)として、溶存酸素の半飽和定数 K_{DO} を用いて次式で与える。

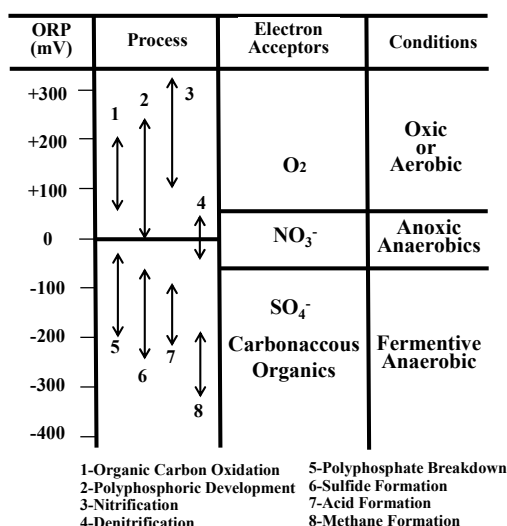


図-7 ORPと窒素循環過程 (Goronszy et al., 1992)

$$\alpha = \frac{K_{DO}}{K_{DO} + DO} \quad (2)$$

b) ORPによる反応係数(β)

次に、脱窒能との関連でよく議論される他のパラメータとしては、特にORPとの相互連関がある。Goronszyら⁸⁾は制御された実験条件下で、ORP値を変化させ、窒素循環のうちの起こりえる反応過程の範囲を抽出した図-7を提案している。

脱窒反応に関しては、-100mV以上+100mV以内の範囲において最も至適性が高いとされている。この範囲の中でもより還元的な環境下で脱窒作用が促進され、ORPが増加するとともにDOと同じく指数関数的に減衰することが確認されている⁸⁾。以上のような関係を、水温による影響とORPによる影響を取り込み、反応係数(β)として次式によって表される。河川水を対象とした反応係数であるため、観測されたORP値を範囲として制限した。

$$\beta = \theta^{(T-20)} \left(\frac{55}{ORP + 150} \right) \quad (3)$$

(-150mV < ORP < 250mV)

以上から、脱窒を制限する環境条件としては、4項目が挙げられるが特にその中でも影響度の高いDOとORPに関して上述の脱窒作用との関連性を用いて2変数の規格化を行った。2変数の最大値はいずれも1である。

(2) 脱窒ポテンシャルの定量化

脱窒ポテンシャルを定量化するにあたり、前節で規格化した2種類の反応係数の脱窒への影響度を調べる。3章にて、場所ごとの実測値(伏流水流速や硝酸態窒素濃度)により脱窒ポテンシャル値(k_{obs})は明らかになっているので、各々のDOとORPの反応係数に対して

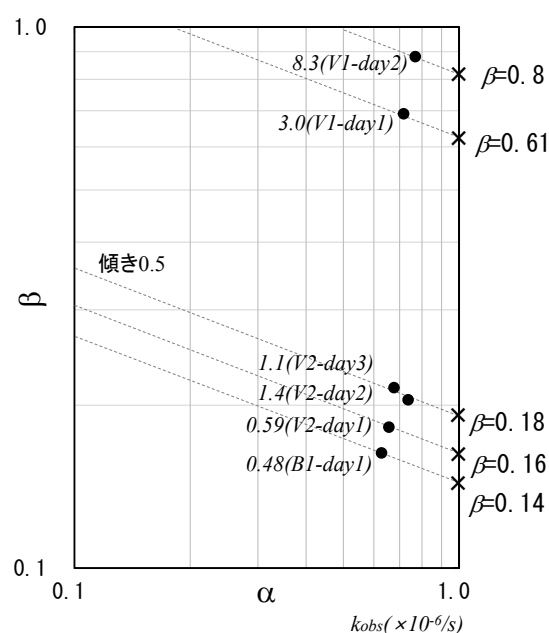


図-8 反応係数と観測による脱窒ポテンシャル値 (k_{obs})

脱窒ポテンシャルがどのように分布しているのかを両対数グラフである図-8により確認した。グラフ中の斜字が脱窒ポテンシャル値を表し、括弧内が場所を表している。図から、反応係数が最大値である1に近づくほど、ポテンシャル値も高いことが確認された。そのうちの2点V2-day3とV2-day2がほぼ同程度のポテンシャル値であったため、その2点を用いて傾き0.5のポテンシャルラインを求めたことにより、次のような脱窒ポテンシャルに関する実験式を得た。

$$k = k_{\max} \cdot \alpha^2 \cdot \beta \quad (4)$$

上記より、脱窒ポテンシャルには、DOによる影響度の方が高いことが確認される。

(3) 反応係数を用いた脱窒ポテンシャルに関する実験式の検証

本節では、作成した実験式(4)により推定される脱窒ポテンシャル(k)と実測値を用いて得られる(k_{obs})との比較を行い、その妥当性を検証する。

式(4)の未知数であるk_{max}の算定については、次のような方法を用いた。図-8を用いてまず各々の点を通る傾き0.5のポテンシャルラインとα=1の時の交点から、各々のαが1の時のβの値を読み取った。この時のβ|_{α=1}と脱窒ポテンシャル(k_{obs})との関係を図-9にプロットしたことにより、傾き1の近似直線がひけるので、その時の最大値をk_{max|α=1,β=1}とした。

実験式および実測値による脱窒ポテンシャルの関係を図-10に示す。双方の値はほとんど一致していることから、ここで提案した実験式は妥当であるといえ、観測値を用いることによる合理的な式の作成に成功したといえる。

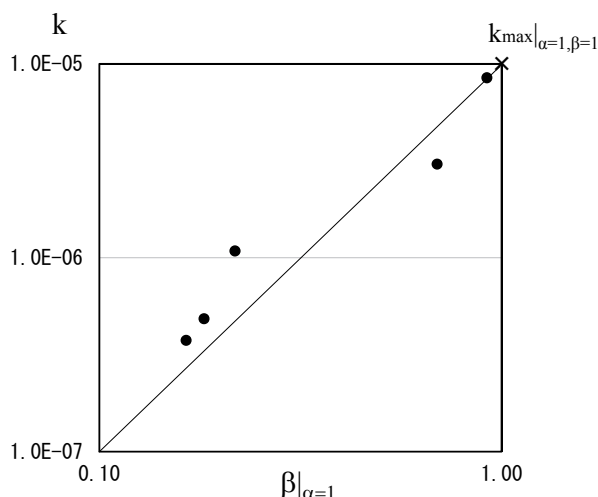


図-9 脱窒ポテンシャル k と反応係数 β との関係

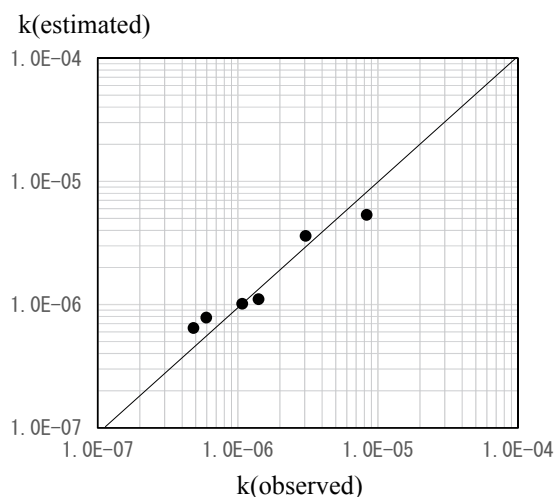


図-10 実験式により算出した脱窒ポテンシャルの検証

5. あとがき

本研究では、河川が有する生態系機能の定量化を目的として、河道内砂州の水質浄化機能として注目されている砂州伏流水による脱窒作用に着目した。伏流水が駆動する脱窒は、主に、場に依存する土壌環境条件（ポテンシャル）による反応とその場を通過する伏流水による移流の効果が支配的であると捉え、場の特性に応じた脱窒機能が評価可能な平面2次元解析の仕組みの構築に向けて、ここでは、洪水の低減期に砂州内横断方向へ伏流水が駆動する現象に着目し、洪水前後での窒素濃度変化を連続的に現地計測した結果から、特に場に依存する脱窒ポテンシャルを抽出・定量する手法を提案した。

これにより現地で計測可能な水質項目を用いて脱窒ポテンシャルの定量が可能になったといえる。脱窒量とし

ての洪水後の濃度変化は、洪水直後1日目の特に水際部分の植生域で大きな値を示し、またポテンシャル値も高かったことから、洪水直後の水際植生域での脱窒機能が高いことが示された。

今回の検討では、砂州の一横断面での調査を対象を絞ったことからサンプル数が少ないなかでの手法の提案となったため、今後そのモデルの精緻化が課題として挙げられる。場所のスケールを砂州全域に拡張し、脱窒ポテンシャルの影響関数を増やすことによって、河川砂州で起こりうる窒素動態変化の理解の向上に努めたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所には、研究に関わる様々なデータを提供頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 楠田哲也：自然の浄化機構の強化と制御、技報堂出版、p.235, 1994.
- 2) 尾花まき子、戸田祐嗣、辻本哲郎、野尻晃平：砂州植生の分布形状を考慮した伏流流動に伴う脱窒特性、水工学論文集、第55巻、pp.1363-1368, 2011.
- 3) Tesoriero, A.J. and Puckett, L.J.: O₂ reduction and denitrification rates in shallow aquifers, *Water Resources Research*, Vol.47, W12522, issue 12, 2011.
- 4) Beer, D.d., Wenzhöfer, F., Ferdelman, T.G. et al: Transport and mineralization rates in North Sea sandy intertidal sediments, Sylt-Rømø Basin, Wadden Sea, *Limnol. Oceanogr.*, 50(1)127, 113, 2005.
- 5) Klaas R., Timmermans, Bas van der Wagt.: Growth rates, half-saturation constants, and silicate, nitrate, and phosphate depletion in relation to iron availability of four large, open-ocean diatoms from the Southern Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.49, pp.2141-2151, 2004.
- 6) Nakasone, H., Abbas, M.A., Kuroda, H.: Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields, *Paddy Water Environment*, vol. 2, pages 115-124, 2004.
- 7) Cavari, B.Z. and Phelps, K.G: Denitrification in Lake Kinneret in the presence of oxygen, *Freshwater biology*, 7, pp.385-391, 1977.
- 8) Goronszy, M.C., Bian, Y., Konicki, D., Jogan, M. and Engle, R.: Oxidation Reduction Potential for nitrogen and phosphorus removal in a fed batch reactor, *Proc. Water Environment Federation Conference*, New Orleans, Louisiana, 1992.

(2015. 4. 3受付)