

木津川植生砂州における伏流水輸送と窒素動態

SUBSURFACE WATER TRANSPORT AND NITROGEN BEHAVIOR IN A SANDBAR WITH VEGETATION IN KIZU RIVER

片貝武史¹・亀井丈志²・鷺見哲也³・辻本哲郎⁴

Takeshi KATAKAI, Takeshi KAMEI, Tetsuya SUMI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 修(工) 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) 東海旅客鉄道株式会社 (〒450-6101 名古屋市中村区名駅1-1-4)

³正会員 博(工) 大同工業大学助教授 工学部都市環境デザイン学科
(〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

⁴フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

Recently it is recognized that subsurface water zone under river sandbars has functions of habitat for benthos and microorganism/microbe living in substrate, and that some of those remove materials from the water or change physicochemical characteristics. Sandbar formed in channel is the basis for the subsurface process in which surface flow pass through the bar, and the bar serves as a place to purify water or cycle nutrients in the river environment. In the present research, behavior of nitrogen as a nutrient is studied. The behavior of subsurface flow and changes in water quality are examined with a field investigation. The evaluation of water quality transformation functions in the subsurface process in vegetated sandbar was attempted. Results show that vegetation cover decreases disturbances by vertical solute inflow or effects of dilution, and accelerate denitrification in horizontal subsurface flow.

Key Words : *vegetation sandbar, subsurface flow, subsurface water quality, nitrogen, stable isotope*

1. はじめに

砂河川の河道内には砂州が形成され、その砂州は砂礫地や草地など様々な景観要素によって構成されている。そのような多様な空間には多様な生物が生息できる生息場を提供しているとともに、表流水が砂州に浸透し、伏流するといった水交換作用による水・物質循環機能を有することが近年の研究¹⁾より明らかになりつつある。しかし、河川環境に対し砂州に期待されている機能に関する評価までには至っていないのが現状である。

たとえば、砂州が有する機能の一つに水・物質循環機能による浄化が挙げられ、河川に対して水質改善が期待されている。期待されている機能を担う要素の一つに伏流流動がある。砂州が有する水・物質循環は表流水が砂州に浸透し、伏流した後に表流水に復帰するといった流動メカニズム^{2) 3) 4) 5)}により支えられている。平水時の伏流水は水平流動による輸送だけであるが、降水や出水によるイベント時の伏流水は水平輸送だけでなく、砂州表層からの鉛直浸透による流入を考慮する必要がある。砂州の表層景観の異なりが水質変化の過程に差が生じるこ

とを示唆している⁵⁾。また、窒素などの環境中において変化する生元素物質の動態について、表層景観が裸地(砂礫)砂州の事例⁶⁾がある。しかし、調査時期が秋から冬季の低水期であり、砂州で生じている物質循環機能を把握するという観点ではまだ明らかにされていないのが現状と言える。伏流水による物質輸送特性を把握するためには、水平輸送と鉛直輸送の両プロセスのメカニズムを把握することが必要である。そこで本研究は、そのメカニズムを明らかにするために、降水や出水といったイベントを含む期間における伏流水の流動と溶存している物質について、植生を有する砂州において現地調査を実施し、その結果を報告する。

2. 木津川調査地の概要

本研究は砂河川である淀川水系木津川(流域面積1,596km², 幹川流路延長147km)を調査対象河川とした。調査地は淀川三川合流点(八幡市淀)より約12km上流に位置する植生が繁茂した砂州を対象(図-1)とし、この砂州を含む三川合流点から20kmの区間は単列交互砂

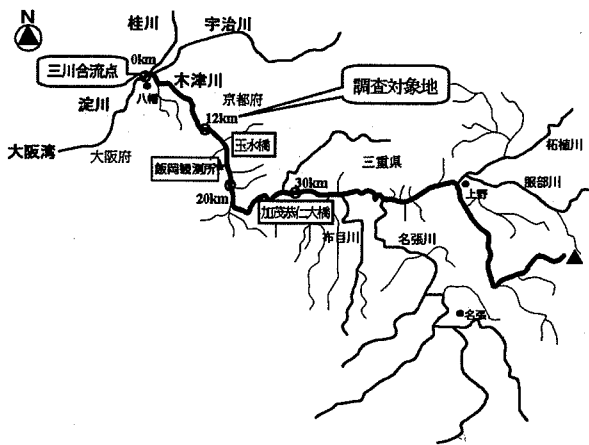


図-1 木津川流域図

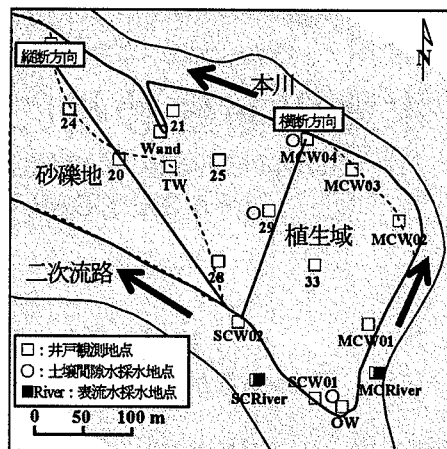


図-2 調査対象砂州に設置した井戸及び観測地点

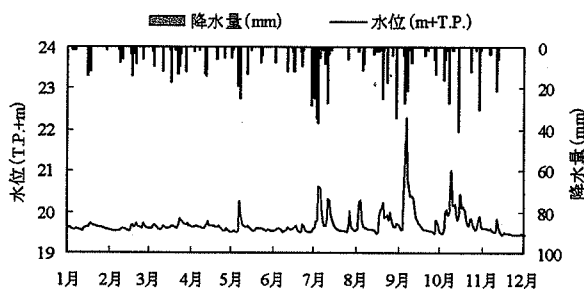


図-3 調査対象期間の水位と降水量
(水位：飯岡水位観測所，降水量：京田辺観測所)

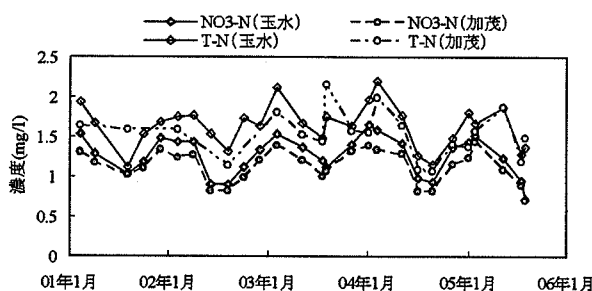


図-4 木津川の窒素濃度の経年変化
(加茂：加茂恭仁大橋，玉水：玉水橋)

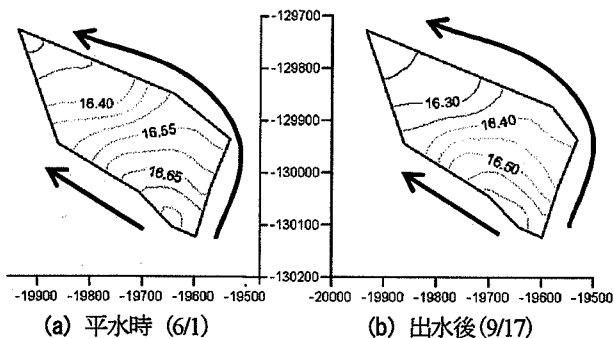


図-5 伏流水位の空間分布

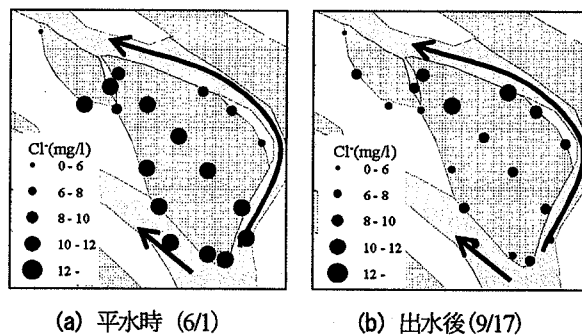


図-6 伏流水のCl濃度空間分布

州の様相を呈するセグメント内にある。この砂州の特徴は図-2に示すように中州の形態をしている砂州であり、上流から流れてくる本川は中州を分岐する形で直進する流れ（二次流路）と砂州を回りこむ流れ（本川）がある。また、砂州上流部は植生に被覆され、年最大規模の出水で砂州全域が冠するような地形特性を有している。植生域の物理環境（比高、土壌粒径など）は裸地砂州⁶⁾とは異なる景観である。

調査対象期間は、降水や出水などの水位変動を含む2005年4月から11月を対象とした（図-3 水位：国土交通省 <http://www1.river.go.jp/>，降水：気象庁 <http://www.data.kishou.go.jp>）。また、木津川本川の窒素濃度（T-N，NO₃-N）は図-4（国土交通省 <http://www1.river.go.jp/>）に示すように、溶存している窒素の大半が硝酸態窒素の形

態で存在していることが確認できる。

調査は図-2に示すように砂州に設置した井戸を用いて伏流水位計測及び採水を実施した。また、土壌間隙水及び雨水も採水し、採水した試料をイオンクロマトグラフィー（TOADKK IA-200）を用いたイオン分析と窒素の安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）の分析はヘリウムフロー導入方式の質量分析計（ANCA20-20）を用いて分析した。

3. 植生砂州における伏流水の流動特性

伏流流動を把握するために驚見ら⁴⁾の方法による水位計測と片貝ら⁵⁾の方法による塩化物イオン（Cl⁻）を用いた計測を併用し調査した。図-5に平水時と出水後にお

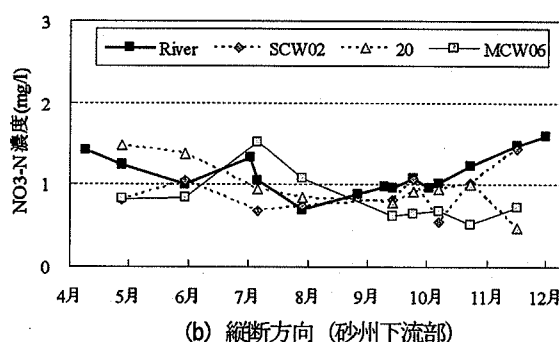
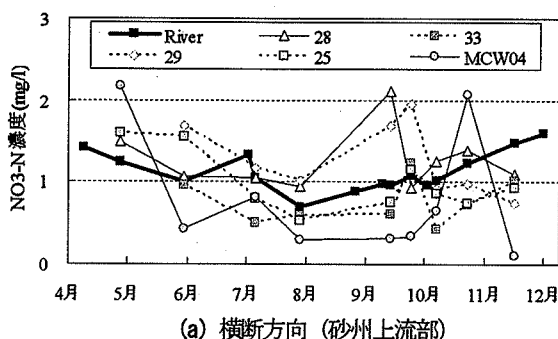


図-7 NO₃-N濃度の経時変化

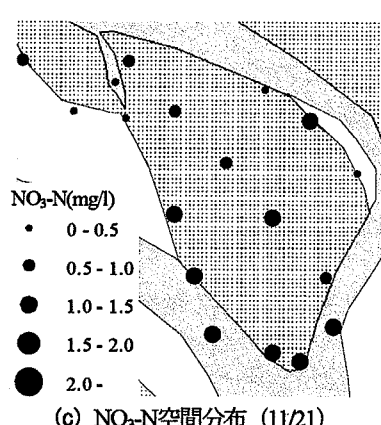
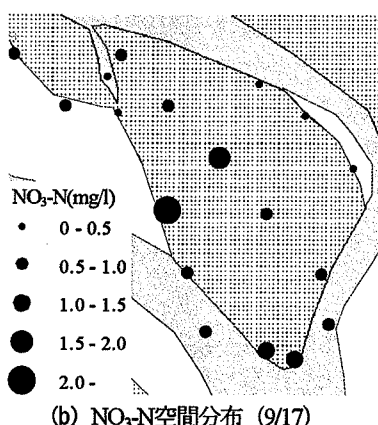
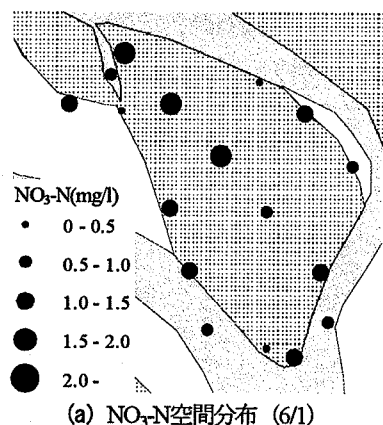


図-8 NO₃-N濃度の空間分布

る代表的な伏流水位の空間分布、図-6に同時期のCl濃度の空間分布を示す。水位計測結果から、この砂州の伏流流動は対象域の上流部と下流部で傾向が異なっていることがわかる。上流部の流動は二次流路側から砂州を横断し本川に復帰する流れを有し、下流部は本川の流れと平行に砂州を縦断し、本川に復帰する流れを有することが確認できた。

一方、Cl濃度の計測結果から、平水時と出水時で濃度分布が異なっていることがわかる。平水時の伏流水濃度は平水時に計測した表流水濃度と同じような濃度幅で分布しているが、出水後の伏流水濃度は低い濃度幅の分布に変化したことを示している。つまり、出水時のCl濃度の低い表流水が冠水域から浸透し、伏流水に流入したことを示し、浸透された履歴が濃度の低いCl濃度によって示されている。しかし、濃度は空間的に分布していることから、植生を有することにより土壌や地形などの物理環境が不均質になることを示している。そのため、植生砂州は冠水域からの浸透特性に差が生じ、その差が伏流水の水質形成にも寄与しているものと考えられる。

この調査地における伏流流動の特性は、水位の空間分布より二次流路水際部から浸透し、水平移動するような流動特性があり、平水時の伏流水はこのプロセスが水質形成に寄与していることが示唆された。一方、出水時は冠水した箇所から表流水が浸透するため、水平輸送と鉛直輸送の両プロセスによる影響を受け、水質が形成されることが示唆された。この水の流動特性が物質循環を支

える駆動力となっているといえる。

4. 植生砂州における窒素動態

(1) 硝酸態窒素濃度の経時変化

図-7に伏流水流動に対して横断方向（砂州上流部）と縦断方向（砂州下流部）の主な採水地点のNO₃-N濃度の経時変化を示し、図-8はその代表的な空間分布を示す。

表流水（river）のNO₃-N濃度のトレンドは夏季（出水期）において濃度が下がる傾向を示している。それに対し、伏流水のNO₃-N濃度は表流水濃度より低い傾向である。しかし、砂州上流部の地点28、29において濃度が急上昇している。これは9月に生じた砂州全域が冠水する規模であり、冠水域から浸透したときに生じている。生元素物質である窒素は環境中において硝化や脱窒などの反応過程により変化する特性を有する。地点28、29で見られる窒素濃度の上昇は硝化や高い濃度を有する水の流入が考えられる。しかし、硝化反応による濃度上昇にはアンモニア態窒素や亜硝酸態窒素が必要であるが、今回の調査では検出されていないことや局所的な濃度上昇であることから、硝化によるものとは考えにくく、不飽和土壌中からの窒素成分の溶脱によるものが考えられる。一方、その他の地点で見られるような伏流水の窒素濃度が減少する要因としては、降水・出水（冠水）による希釈や生物活動による吸収・同化または脱窒などが考えら

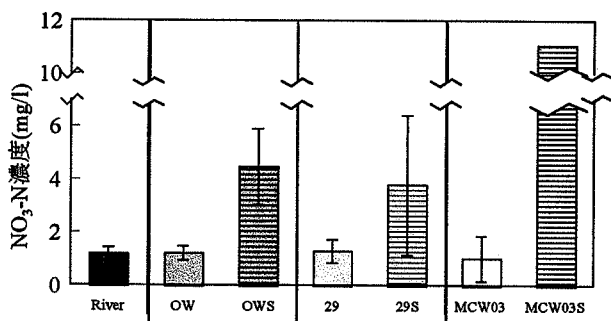


図-9 不飽和土壌水のNO₃-N濃度
(添え字Sは不飽和土壌水を示す)

れる。この砂州における濃度変化は、伏流水の流下方向に向けて濃度が減少する傾向があり、地点MCW04などの伏流水の出口部の本川側の濃度は表流水や流入部の濃度と比べ減少する傾向からも脱窒反応が生じている可能性が考えられる。

(2) 不飽和土壌水の硝酸態窒素濃度

伏流水中のNO₃-N濃度の上昇は降雨・出水の浸透により不飽和土壌中からの溶脱による影響が考えられることから、不飽和土壌中に存在する土壌水の採水を試みた。不飽和土壌水の採水にはポーラスカップ（大起理化製 DIK-8392）を用いた。設置箇所は、地点OW、29、MCW03の近傍に、平水時の伏流水面より約50cm上方付近の不飽和土壌水が採水できるように埋設した。採水時期は、10月から11月にかけて採水し、分析した結果を図-9に整理した。

表流水及び採水地点の伏流水に溶存しているNO₃-N濃度は2mg/l以下である。それに対し、不飽和土壌中の濃度は伏流水と比べ数倍の濃度を有していることがわかる。地点OW、29は比高差があり、セイタカアワダチソウが生育している物理環境である。それに対し、地点MCW03はツルヨシが生育し、先の2地点と比べ冠水しやすい物理環境である。そのような差が濃度にも影響を及ぼしているものと考えられるが、植生域の不飽和土壌は、伏流水中にNO₃-Nを供給できるだけのポテンシャルを有することが示唆された。

(3) 塩化物イオン濃度と硝酸態窒素濃度の関係

伏流水中のNO₃-N濃度が表流水濃度よりも低い要因の一つに降雨や出水による希釈による可能性があると先に示唆した。そこで、Cl⁻の保存性の性質を利用して降雨や出水による希釈作用の推定に利用できる⁹⁾ことから、表流水及び伏流水に溶存しているCl濃度とNO₃-N濃度の関係について整理したものを図-10に示す。

表流水 (river) の濃度の関係について、平水時 (Cl濃度が10mg/l以上) はNO₃-N濃度にばらつきがあるが、出水時 (Cl濃度が10mg/l以下) はCl濃度が減少するとNO₃-N濃度も減少する傾向が見てとれる。しかし、伏流

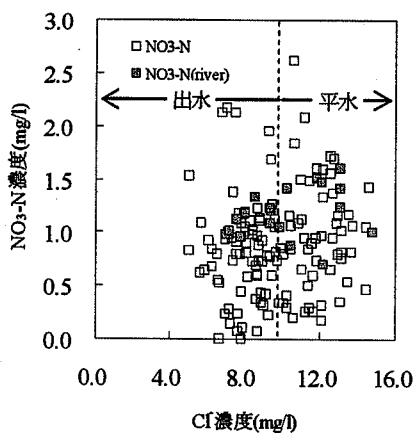


図-10 ClとNO₃-N濃度の関係

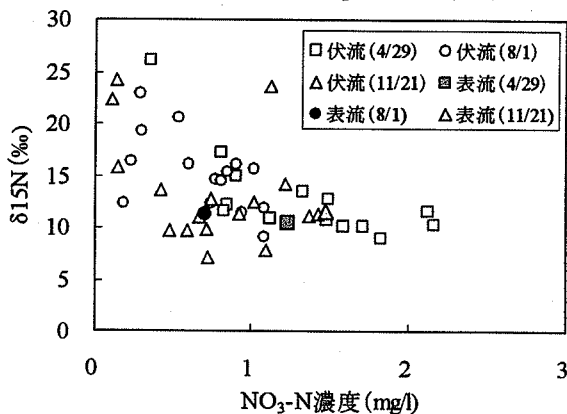


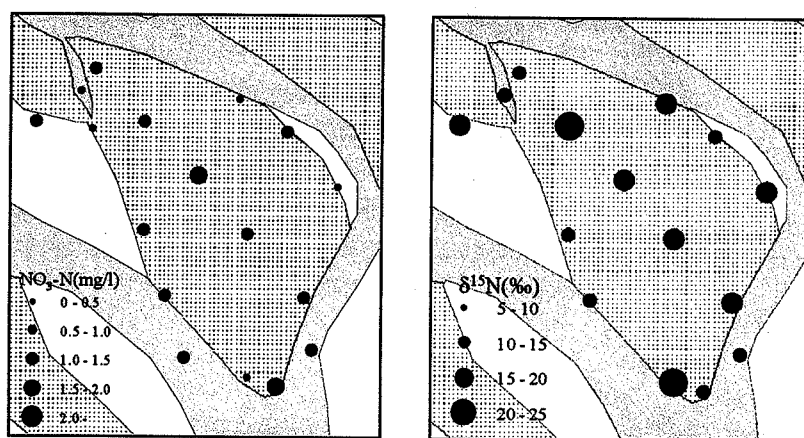
図-11 NO₃-N濃度とδ¹⁵Nの関係

水濃度にはそのような傾向は見られない。伏流水のNO₃-N濃度について、平水時は表流水濃度よりも低い値であるが、出水時は表流水濃度よりも高い濃度や低い濃度と分布している。この結果は、平水時に低い濃度になっていることから希釈作用による要因ではないことを示している。また、出水時において、高い濃度になっている要因は不飽和土壌からの溶脱によることを示すが、低い濃度は希釈による要因も考えられるが、表流水が有するNO₃-N濃度 (1mg/l前後) よりも極端に低いので、希釈だけの要因とは考えにくいことが推察される。つまり、植生砂州において、NO₃-N濃度が表流水の濃度より低くなっている要因は希釈作用よりも脱窒などの他の要因によるものと考えられる。

(4) 安定同位体比とイオン濃度から見た窒素動態

脱窒の有無などを調べる方法の一つに窒素の安定同位体比を用いて推定⁹⁾ことができる。この方法を利用して平水期 (4月)、出水期 (8月)、攪乱後の平水期 (11月) におけるNO₃-N濃度とδ¹⁵Nの関係を図-11に示す。ここで、δ¹⁵Nは窒素の安定同位体比とし、次式のように定義する。

$$\delta^{15}N = \left\{ \frac{\left(\frac{^{15}N}{^{14}N} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{15}N}{^{14}N} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right\} \times 1000 \quad (1)$$



(a) $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (b) $\delta^{15}\text{N}$
図-12 出水期 (8/1) における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ の空間分布

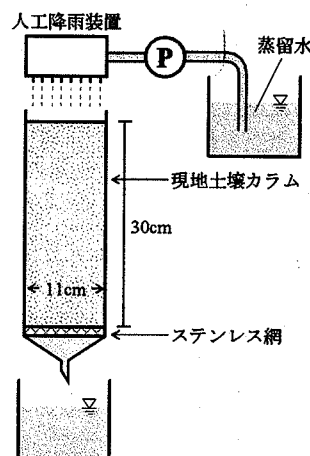


図-13 溶脱試験装置

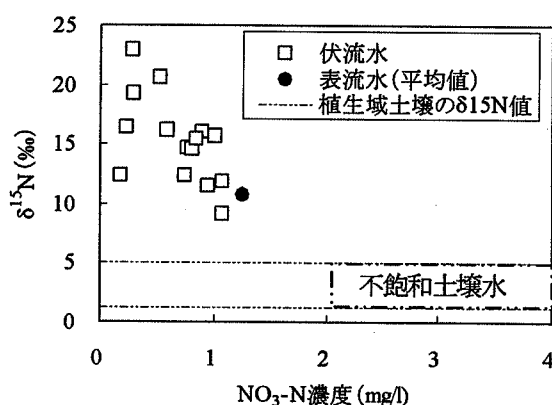


図-14 伏流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

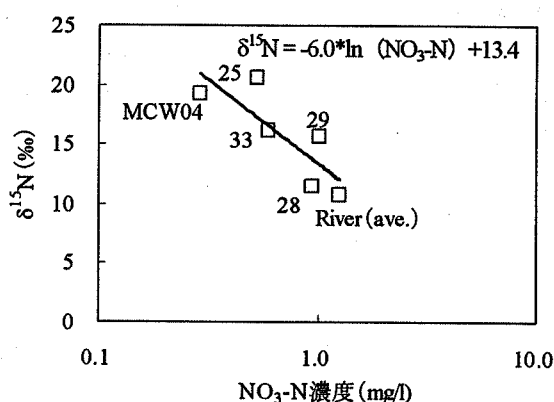


図-15 植生砂州における伏流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (対数表示) と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

平水期 (4月) の $\delta^{15}\text{N}$ は表流水と伏流水で大きな差は見られないが、冠水の影響を受けていない出水期 (8月) と出水による冠水の影響を受けた後 (11月) の伏流水の $\delta^{15}\text{N}$ は表流水の $\delta^{15}\text{N}$ に対し分布していることがわかる。特に、 $\delta^{15}\text{N}$ が増加しているときは $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少している傾向がある。ここで、図-5にて示した伏流水の流動特性とあわせてみるために、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ の空間分布に整理し、出水期 (8月) における状況を図-12(a), (b)に示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の空間分布は、本川に近い地点の濃度が低くなり、 $\delta^{15}\text{N}$ の空間分布は、植生域の中央及び本川に近い地点で値が大きくなっている。つまり、伏流水の流下方向に対し濃度減少と $\delta^{15}\text{N}$ 値の増加していることがわかる。ここで、溶脱による影響を調べるために不飽和土壤中に含まれる窒素成分の $\delta^{15}\text{N}$ 値を調べる。しかし、不飽和土壤中に残留している水は微量であるため、今回実施した分析手法では分析ができないため、攪乱しないように不飽和土壌をカラム (φ11cm, 高さ30cm) に充填し採取した。そのカラムを用いて蒸留水を用いた人工降雨 (降雨強度23mm/h) による溶脱試験 (図-13) を実施し、その浸出水を分析した。図-14に出

水期 (8月) における伏流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を示す。

溶脱試験による不飽和土壤水が有する $\delta^{15}\text{N}$ 値は1.3～5.0‰であり、伏流水の値と比べてかなり低い値を有することがわかった。つまり、不飽和土壤に存在している窒素が溶脱し、その水が伏流水に供給され、伏流水中の $\delta^{15}\text{N}$ が上昇することは生じにくいと考えられる。

これらの結果より、流下方向に対し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度低下と共に $\delta^{15}\text{N}$ 値の増加の要因は溶脱や希釈による作用ではなく脱窒によるものと推測することができる。

ここで、脱窒によって $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少する場合、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は式 (2) に示すレイリーの式で表される。

$$\delta^{15}\text{N} = \text{const.} + \varepsilon \ln C \quad (2)$$

ここで、 $\delta^{15}\text{N}$: $\text{NO}_3\text{-N}$ の同位体比, const. : 定数, ε : 同位体濃縮係数, C : $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度である。

ε は脱窒の反応速度によって変化し反応速度が高い場合には ε が小さくなり、この関係は複雑な反応を経た土壤中や地下水中でもよくあてはまることを見出している⁸⁾。そこで、この砂州において脱窒作用の有無を確認す

表-1 脱窒による同位体濃縮係数 (ϵ)

文献	ϵ (‰)	試料
Smith et al. (1991)	-13.9	地下水
Fustec et al. (1991)	-4.0~-4.7	
Mariotti et al. (1988)	-4.0~-5.0	
Tsushima et al. (2002)	-17.9	

るために同位体濃縮係数 ϵ を見積もり、既往の研究から得られた ϵ と比較し、その妥当性について検討する。

図-15に上流部における伏流水の流下方向の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度(対数表示)と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度(対数表示)と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係から ϵ が-6.0の時、レイリー式が適応され、図-15に示す式で表すことができる。また、表-1に示した文献値⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾から地下水における ϵ は4.0~-17.9の範囲内にあることから妥当な値であるといえる。

つまり、対象とした植生砂州において、伏流水が流下するに従い、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少する現象は脱窒による作用を受けていることが示された。

5. まとめ

本研究では、木津川の植生砂州が有する伏流流動に伴う水・物質循環の特性について、窒素を中心にその動態を調査した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 植生を有する不飽和土壤中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は伏流水と比べ高く、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は伏流水と比べ低いことがわかった。
- 2) 植生で被覆された砂州は、降水や出水による表層からの鉛直浸透による伏流水への流入は乏しく、影響を及ぼしにくいことが示唆された。
- 3) 砂州内部を伏流する過程において $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が減少する傾向が確認できた。
- 4) 植生砂州における伏流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係から、伏流過程における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の減少は脱窒作用によるものであることが明らかとなった。

本研究の結果として、植生が生育している砂州の土壌内部に流れている伏流水によって脱窒作用による $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の減少が確認できたことから、河川に対し砂州による水質浄化が期待される。今後、この問題については量的な議論を明らかにするために現象のモデル化を目指し、砂州景観で生じている水・物質循環機能を評価すること

で今後の河川整備に関わる指針の一つなると考える。

謝辞：窒素安定同位体分析にあたり、山梨大学医学工学総合教育部の坂本康氏、藤田昌史氏、中村高志氏には多大なご協力を頂いた。深く謝意を表す。本研究は木津川における河川生態学術研究会の総合的な調査研究の一環として実施されたものである。また、本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号16656148)の一部として実施した。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：砂州景観保全を河川生態工学からどう意義づけるか、河川技術論文集, Vol.10, pp43-48, 2004.
- 2) 原田守博・板橋一雄・牧幸治：木津川砂州における伏流水の流動過程, 土木学会中部支部研究会概要集, pp.139-140, 2001.
- 3) 鷺見哲也・河戸則和・辻本哲郎：木津川砂州域における伏流水挙動に関する研究, 第56回年次講演会講演概要集, pp.364-365, 2001.
- 4) 鷺見哲也・片貝武史・辻本哲郎：木津川の伏流環境と関連した水質特性, 河川技術論文集, Vol.8, pp185-190, 2002.
- 5) 片貝武史・亀井丈史・鷺見哲也・辻本哲郎：裸地景観と植生景観を有する砂州における保存性イオンを利用した伏流水の流動特性, 水工学論文集, 第50巻, pp1123-1128, 2006.
- 6) 中島治美・鷺見哲也・辻本哲郎：木津川裸地砂州における伏流水の水質特性, 河川技術論文集, Vol.10, pp381-386, 2004.
- 7) 新井秀子・田瀬則雄：安定同位体を利用した河川浄化機能の評価, 環境科学学会誌, 5 (4), pp249-258, 1992.
- 8) Mariotti, A., Landreau, A. and Simon, B. : ^{15}N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, pp.1869-1878, 1988.
- 9) Smith, R. L., Howes, B. L. and Duff, J. H. : Denitrification in nitrate-contaminated groundwater: occurrence in steep vertical geochemical gradients, *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, pp.1815-1825, 1991.
- 10) Fustec, E., Mariotti, A., Grillo, X. and Sajus, J. : Nitrate removal b denitrification in alluvial ground water : role lf a fomer channel, *J.Hydrol.* 123, pp.337-354, 1991.
- 11) Tsushima, K., Ueda, S., and Ogura, N. : Nitrate loss for denitrification during high frequency research in floodplain groundwater of the TAMA river, *Water, Air, and Soil Pollution*, 137, pp.167-178, 2002.

(2006. 4. 6 受付)