

木津川砂州における伏流水の流動過程と水質特性

FLOW AND WATER QUALITY OF SUBSURFACE WATER IN SANDBAR OF THE KIZU RIVER

原田守博¹・西村智樹²・牧 幸治³・河辺 宏⁴

Morihiro HARADA, Tomoki NISHIMURA, Kohji MAKI and Hiroshi KAWABE

¹ 正会員 工博 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

² 修(工) 矢作建設(株) (〒461-0004 名古屋市東区葵三丁目19-7)

³ 修(工) (株)土屋組 (〒503-0917 岐阜県大垣市神田町2-55)

⁴ 学(工) 国土交通省中部地方整備局 (〒460-8514 名古屋市中区三の丸2-5-1)

Subsurface flow and its water quality in a sandbar are closely related to stream ecological system as elements composing physical environment. The present paper aims to investigate about the flow behavior and the quality change of subsurface water in the sandbar of the Kizu River located in Kyoto, Japan. Soil particle-size and permeability of the sandbar were tested by laboratory experiments for lots of geological samples. A hydraulic model for the subsurface flow was established from observations of subsurface water table and field tracer tests. Numerical results simulated accurately the measured data of water table at many observation wells, and visualized in detail the spatial flow distribution under the sandbar. Based on water quality tests for samples pumped on flow lines of the subsurface water, relationships between change of water quality and existence of vegetation on the sandbar were discussed in connection with rainwater infiltration.

Key Words: subsurface water, sandbar, water quality, the Kizu River

1. はじめに

近年, 自然環境の保全への関心が高まり, 治水施策を進めつつ河川環境の回復を計ることが求められている。この十年余の間には, 環境に配慮した河川改修の方法が“多自然型川づくり”として推進される一方, 1997年には河川行政の基本となる河川法が従来の治水と利水に「河川環境の整備と保全」を加えて大きく改正された。こうした河川管理の転換を進めるためには, 河川という自然環境の仕組みを科学的に理解しておく必要がある。河川における物理的要因と生態系との係わりを明らかにすることをめざして, 「河川生態学術研究会」が国土交通省の支援を受けて発足した。この研究会は水工学の研究者と生態学・陸水学等の研究者が特定の調査区域に相集って共同研究を進めるもので, 現在までに多摩川・千曲川・木津川・北川の4地区で活動が展開されてきた。筆者らはこのうち木津川グループに所属し, 1998年の研究開始当初から調査研究を続けてきた。本論文はその成果の一端を述べたものである。

本研究では河畔に分布する砂州に着目し, 砂州と河川環境との係わりについて検討している。一般に河川中流域に形成される砂州は, 主に砂礫から構成されるため透水性がきわめて高く, 周囲の河川水は砂州内に盛んに浸透し伏流水として流動する。河川から浸透した伏流水は, 砂州の濾過作用などにより水質が浄化され, 清浄な水として河川に戻るとも

に, 砂州上に生育する植生に水分を供給し, それらの形成・維持に大きな役割を果たしていると考えられる。しかしながら, 砂州全体における伏流水の流れや水質特性について調査された例はほとんど無い。本研究では, 淀川支流の木津川砂州を対象として, 多数設置された観測孔を用いて, 伏流水位の測定および数値解析の結果から伏流水の流れを明らかにするとともに, その水質が伏流水の流動過程および砂州の地被状態と如何なる関係にあるかを検討した。

2. 対象砂州の概要と伏流水位の観測

本研究が対象とする砂州は, 木津川中流域の左岸側に位置する寄州で, 長さ約1 km, 幅は最大で0.4 km, 地表勾配約1/1150である。砂州の地形は木津川の主流路に近い部分に微高地, 砂州中央の高水敷との間に低い平坦地がある。微高地の表層には土壌が分布し, ヤナギ類やイネ科植物など様々な植生が繁茂している¹⁾。平坦地の表層は砂礫質で, 一部でツルヨシなどの植生が繁茂しているが, 多くは裸地である。近年, 平坦地に河川水が侵入して二次流路を形成したため, 砂州は「寄州」の形態から本川と二次流路に挟まれた「中州」へと地形が変化した。

砂州内には図-1のように伏流水位の観測孔53本が設置された。これらの観測孔は, 全層にストレーナをもつ平均水位測定孔(深度3~6m)44本と, 先端のみ開口したピエゾ水頭測定孔(深度3, 6, 9m

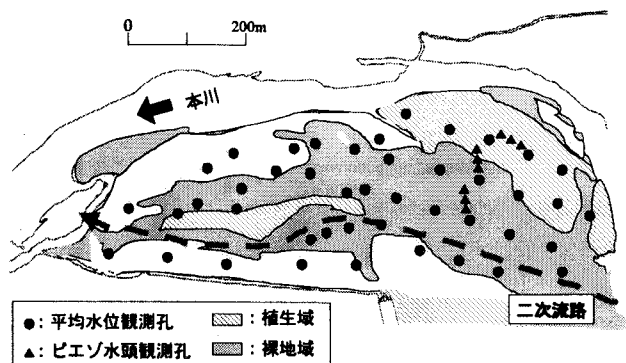


図-1 対象砂州の概要と伏流水位の観測孔

各3組)計9本から成る(一部は大規模な出水時に破損した)。これらの観測孔の設置時に得られた浅層ボーリング試料38本に加えて、深度30mの深層ボーリング3本と既存の深度20mの地質柱状図2本を合わせて、砂州の堆積構造を推定した。図-2はボーリングデータより推定した断面の一例である。これによると、砂州の地下には木津川によって長期間に形成された砂礫層が厚く堆積するが、標高0m付近には粘性土層が層厚2~9mで連続して分布することから、これを浅層の不圧地下水および伏流水の難透水性基盤とみなしてよいと考えられる。

観測孔38本の掘削時のボーリングコア試料を用いて室内透水試験を行い、透水係数の空間分布を検討した。図-3に示す試験結果によると、透水係数の値は空間的に0.005~0.25cm/secのオーダーで変化しており、複雑な堆積過程を反映した不均質な分布

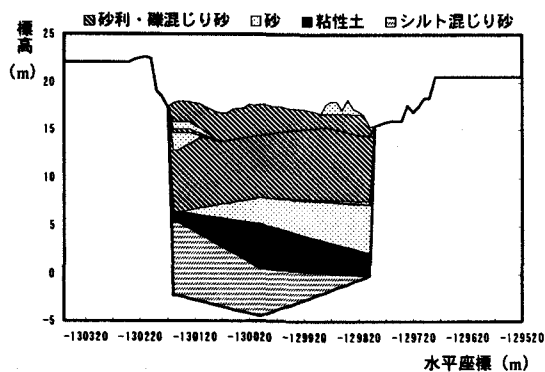


図-2 砂州の堆積構造の一例

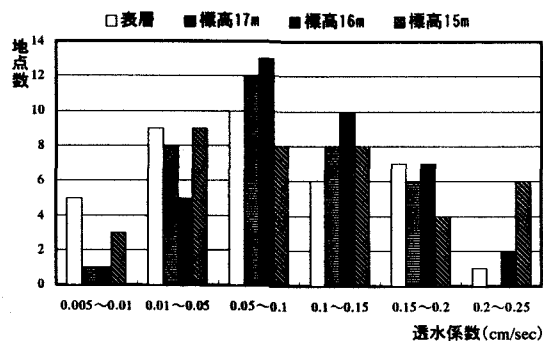


図-3 ボーリングコアによる透水試験の結果

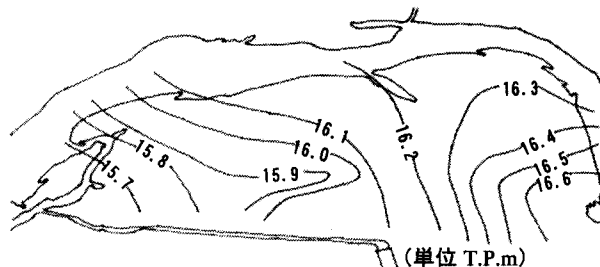


図-4 現地観測による伏流水位の空間分布
(1999年12月3日)

になっているものと推察される。

これらの観測孔を用いて測定された伏流水位の空間分布の一例を図-4に示す。砂州の上流部(右側)では、二次流路からの浸透水が放射状に流動している様子が認められる。また、下流部(左側)では本川河道からの流入水が砂州を横断して二次流路へ流出することが推察される。このように現地観測によっておおまかな伏流水の流れを把握できるが、詳細に伏流水の流動を明らかにするために、流れの支配方程式を詳しく数値解析することを試みた。

3. 水理モデルによる伏流水の流動解析

(1) 寄州における伏流水の流動

砂州内の伏流水の流れを平面2次元定常流とみなし、地下水流の支配方程式を差分解析パッケージMODFLOW²⁾によって解析した。解析領域である対象砂州を10m角の差格子に分割し、砂州の地層は観測孔のボーリング試料より等方均質の砂礫層と仮定した。また境界条件として、本川側については河川水位を、高水敷側については境界付近の観測孔水位および二次流路の水位を補間して与えた。水理定数については、砂礫質地盤であることから透水係数0.5cm/sec、層厚15mと設定して解析を行った。解析により得られた伏流水位と流向の空間分布を図-5に示す。これによると、伏流水の流向については、図-4の観測結果と同様に、砂州の上流端から下流に(右から左へ)向かう流れが認められる。

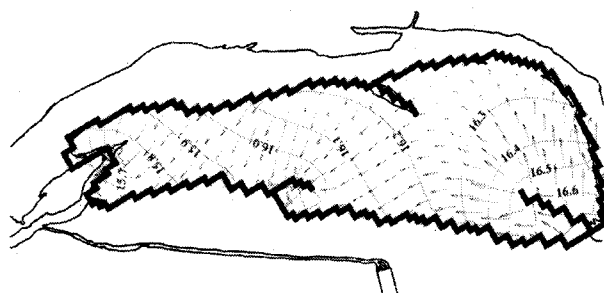


図-5 寄州における伏流水位の解析結果
(1999年12月3日)

(2) 砂州の地形変化と伏流水の流動

木津川流域の上流部には、高山ダムなどの貯水池が存在するものの、雨水の流出特性は自然状態に近く、人為的な制御の影響は比較的小さい。したがって、降雨に対する河道流量の応答は明確で、たびたび大規模な出水が発生して河道の地形が変化している。2000年9月の洪水により、砂州中央部の土砂が洗掘され、河川水が砂州の平坦地に浸水し易くなり、やがて二次流路が形成されるようになった。このような出水の繰り返しにより、対象砂州はここ数十年にわたり左岸の高水敷に接合した「寄州」であったものが、二次流路の発達によって、高水敷とは切り離された「中州」となったのである。

寄州の場合、伏流水の流動に影響する河川水は砂州の一方を流れるが、中州となると砂州は本川と二次流路という二つの河川に囲まれることになり、伏流水の流れにも大きな変化が生じると予想される。そこで、前述の解析手法を再度用いて中州における伏流水の数値解析を行った。中州における伏流水位の空間分布を図-6に示す。寄州の場合(図-5)と比較すると、砂州の上流部の流れは類似しているが、下流部では河道と平行な流れとなり、全体的に動水勾配もかなり小さくなっていることが分かる。図-7は中州の観測孔13本における測定水位とその地点の計算水位を比較したものである。観測値と計算値の平均誤差は0.026mであり、解析モデルは伏流水位の分布を高い精度で再現しているといえる。

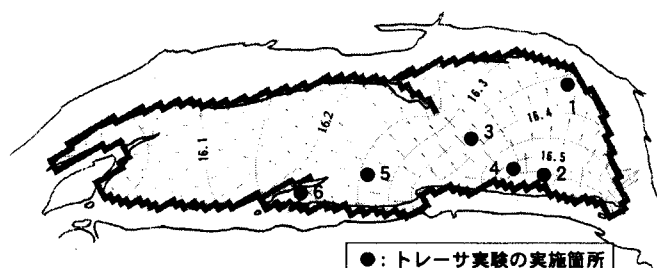


図-6 中州における伏流水位の解析結果
(2001年7月4日)

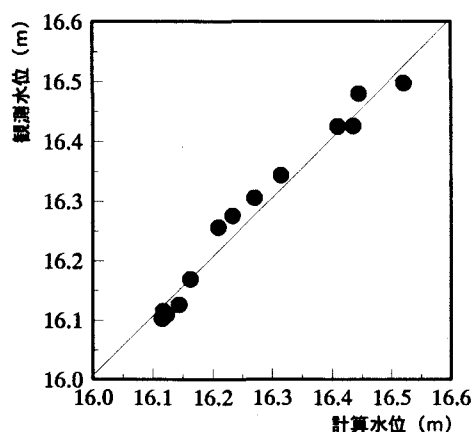


図-7 観測水位と計算水位の比較

4. 塩水トレーサ実験による解析結果の検証

前述したように伏流水位の解析結果は観測水位をよく再現し、水位分布について解析モデルの有効性が検証された。しかしながら、伏流水の流速については観測値が無いために、モデルは検証できていない。そこで、現地において塩水トレーサ実験を実施し、伏流水の流動速度を求め解析値と比較することを試みた。ここでいう塩水トレーサ実験とは、砂州上にピットホールを掘削したのち、ホール内に浸出する伏流水に塩水を投入し、ホールを通過する流れにより塩分濃度が希釈される過程を導電率の変化によって測定しようとするものである³⁾。

塩水トレーサ実験は図-6に示した砂州上の6地点において行った。図-8は各ピットホールで測定された塩分量の時間的変化を示したものである。これによると、ホール内の塩分量は浸出する伏流水によって指数関数的に低減することがわかる。このデータをもとに、伏流水の連続式から各地点のダルシー流速を計算し、解析結果と比較したのが図-9

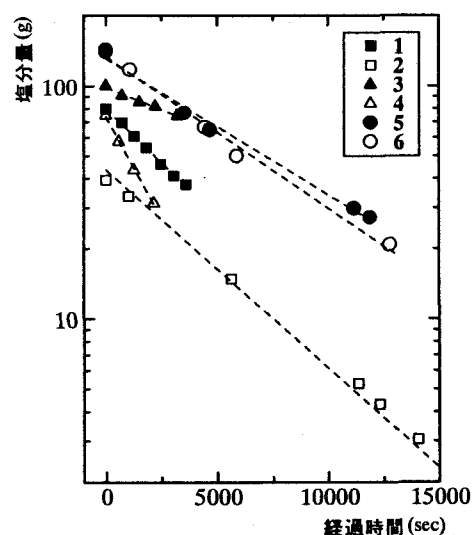


図-8 ピットホールにおける塩分量の希釈過程

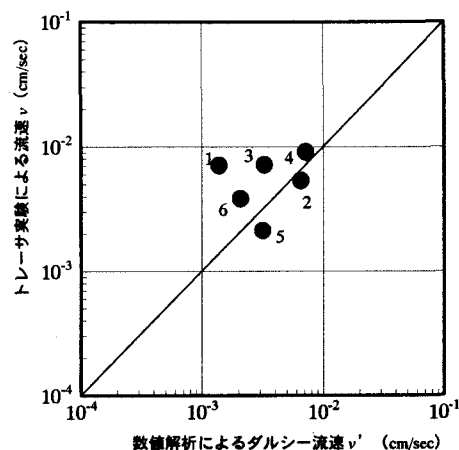


図-9 流速の観測値と計算値の比較

である。一般に伏流水など浸透現象の流速は、地盤の透水性によってオーダーすら変化することが知られているが、図中のプロットは解析結果とオーダー的に良い対応を示している。したがって、流速についても解析モデルの有効性が示されたといえる。

5. 砂州における伏流水の平均滞留時間

伏流水の水質形成には、河川から浸入した水が砂州をどのくらいの時間をかけて流動するかが関連しているであろう。ここでは水理モデルによる解析の結果から、伏流水が砂州内を流動するのに要する時間、すなわち伏流水の滞留時間について概算を試みる。透水係数を0.5cm/secとおいた前述の解析によると、河川など周辺から砂州へ流入する水量は水収支から $Q=10050 \text{ m}^3/\text{day}$ (=116 liter/sec) と計算される。砂州内の間隙体積は、砂州の面積 263600 m^2 、層厚15m、間隙率0.2と仮定すると $V=790800 \text{ m}^3$ となるから、砂州全体における伏流水の平均的な滞留時間は V を Q で除することにより約79日という値が求められる。さらに、年間降水量1600mmのうち蒸発を除いた2/3が浸透して伏流水に供給されたとすると、平均滞留時間は約73日と計算される。

図-6に示した伏流水の流れの状況からもわかるように、伏流水は砂州内を長い距離を流れるものもあるれば、比較的早く河川に戻るものもあるため、上記の値はあくまで砂州全体を平均的に見たものである。砂州は砂礫から構成されることから、伏流水の流れは当初かなり速いものと予想されたが、実際には伏流水は長時間かけて循環していることになる。しかし、今回の水理解析は、砂州内の側方流れについて定常的に取り扱ったものであり、実際には年に数回程度は出水によって砂州が冠水することを考慮すれば、砂州内の伏流水の循環速度はさらに速いものと推察される。いずれにしても、比較的遅い側方流動と、降雨や冠水による間歇的な鉛直浸透が伏流水の水質変化にどのような影響を与えているかは、砂州の水環境を考えるうえで重要な課題である。次節では、現地において観測孔から採水した伏流水の水質調査結果について述べる。

6. 伏流水の流動にともなう水質の変化

伏流水位の観測および数値解析から明らかになった流れの状況を踏まえて、図-10に示すように観測孔No.1~3とNo.4~6を通る2つの流線を想定し、伏流水の水質調査を行って、流下に伴い水質がどのように変化するかを検討した。水質調査は、観測孔において、エンジン式ポンプを用いて伏流水を揚水し、水温、pH、導電率(EC)、溶存酸素濃度(DO)については現地で測定を行った。また、実験室において、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)の4項目について分析を行った。図-11は

観測孔No.1~3とNo.4~6の地質断面図である。図からわかるように、裸地域の地下には砂利・礫混じり砂が数m堆積している。一方、植生域では表層にシルト混じり砂などの細砂が堆積し、その下に砂利・礫混じり砂が堆積している構造となっている。

(1) 水温・pH・DO・ECの現地測定

水温・pH・DO・ECの測定結果を伏流水の流下方

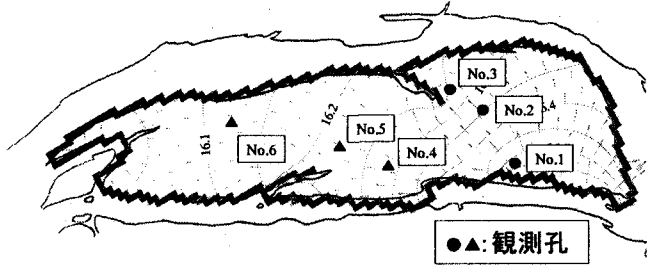
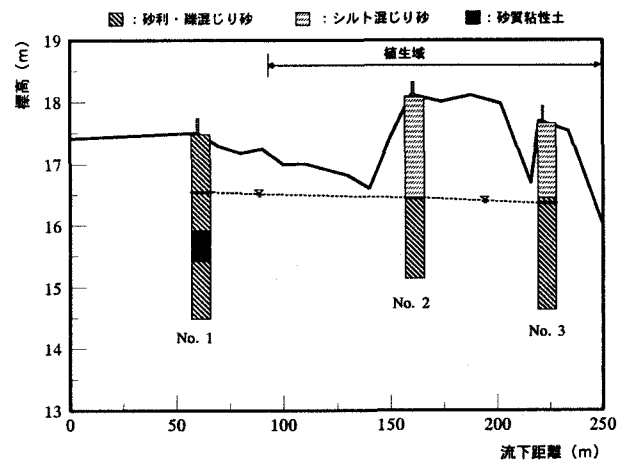
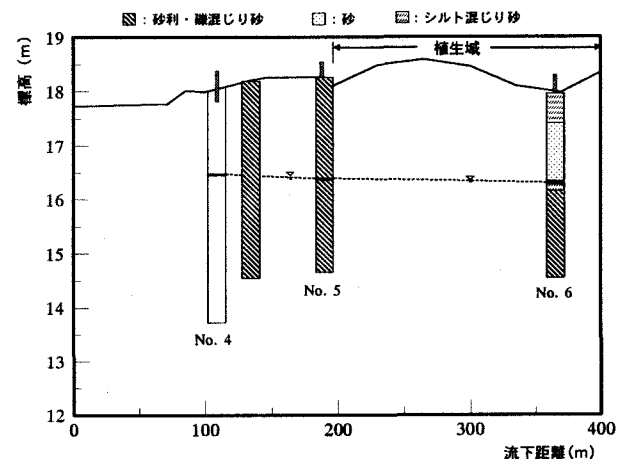


図-10 伏流水の水質調査箇所



(a) 観測孔No.1~3



(b) 観測孔No.4~6

図-11 採水した観測孔の地質断面図

向にみたものを図-12, 13, 14, 15に示す。

水温・pH・DOの測定結果はいずれも裸地域に比べ植生域で低い値を示している。観測孔No.4~6についても同様に植生域で低い値を示し、明確な差異が認められた。ECはイオンの溶存量に影響されるが、図-13に示すように、観測値は植生域において値が上昇し裸地域よりも値が大きくなっている。

(2) 窒素とリンの分析結果

一般に窒素は酸化によって、アンモニア態窒素から亜硝酸態窒素、硝酸態窒素へと変化する⁴⁾。アンモニア態窒素と硝酸態窒素の分析結果を図-16, 17に示す。図より、裸地域に比べ植生域においてアンモニア態窒素の値が高めで、硝酸態窒素の値が低くなっていることが分かる。なお、酸化の過程で生成される亜硝酸態窒素の分析結果は、得られた数値は小さいものの植生域で高くなる傾向がみられた。

リン酸態リンの結果を図-18に示す。この項目では、一部のプロットを除けば、裸地域に比べ植生域の方がやや低めになっていることが分かる。

ここでは、紙面の都合から観測孔No.1~3についての結果を示したが、No.4~6についても同様な結果であった。このように、伏流水の水質は植生域と裸地域で違いがみられ、雨水の鉛直浸透による影響が強いと考えられる。そこで窒素とリン酸態リンについて、降雨後の水質変化をみていくことにする。

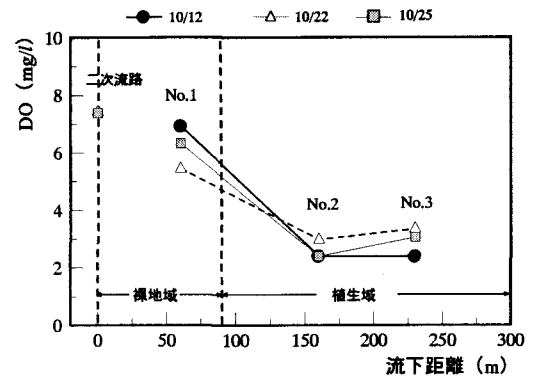


図-14 DOの測定結果

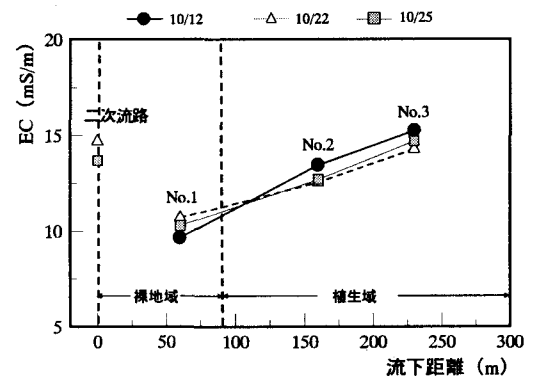


図-15 ECの測定結果

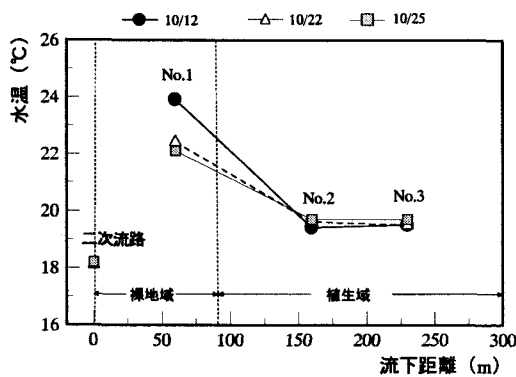


図-12 水温の測定結果

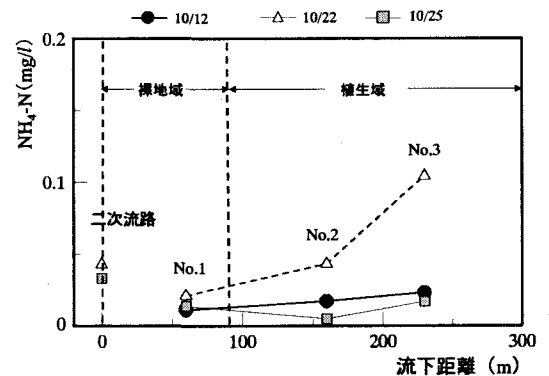


図-16 アンモニア態窒素の分析結果

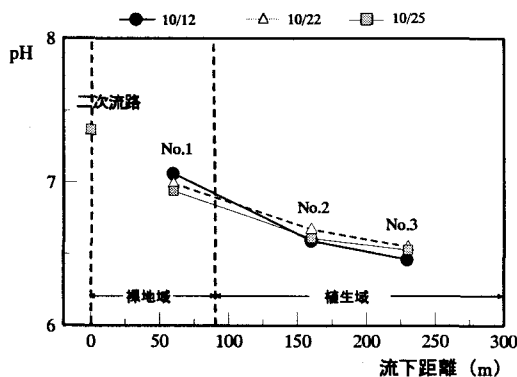


図-13 pHの測定結果

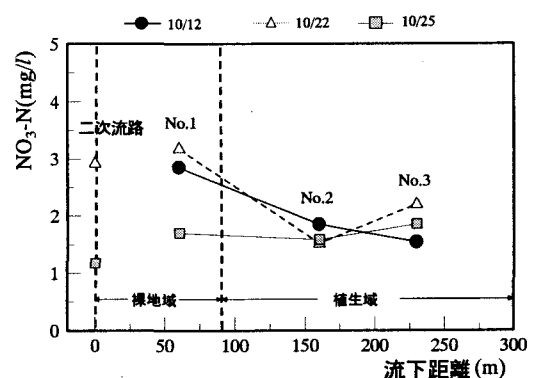


図-17 硝酸態窒素の分析結果

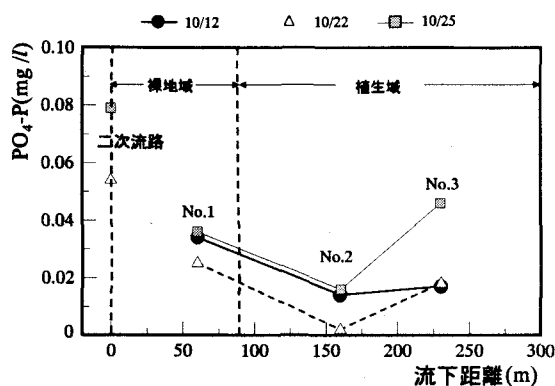


図-18 リン酸態リンの分析結果

(3) 降雨浸透の水質への影響

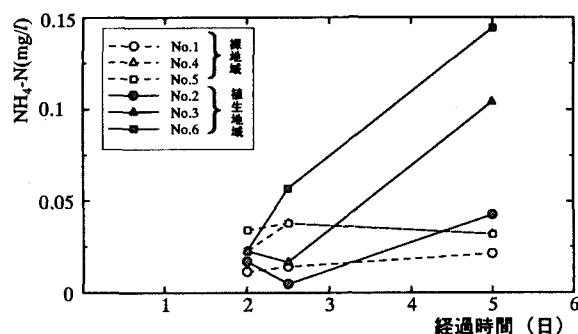
図-19は、3回の現地観測日における降雨終了後の経過時間を横軸にとり、アンモニア態窒素・硝酸態窒素およびリン酸態リンの値を連ねたものである。図によると、裸地域の観測地点○△□では降雨後も一定の値で推移しているのに対し、植生域の観測地点●▲■では経過時間に伴い値が場所的に大きく変動していることが分かる。これは裸地域と植生域という異なった地被状態の場所に雨水浸透が生じたためと考えられる。すなわち、砂礫から成る裸地域と、土壌層の厚さや植物種が場所的に異なる植生域とでは、鉛直浸透によって伏流水に供給される有機質の量が異なるため、結果として降雨後の伏流水質に影響を与えたものと推察される。今後、雨水浸透に対する詳しい調査を行い、検証を進めていきたい。

7. まとめ

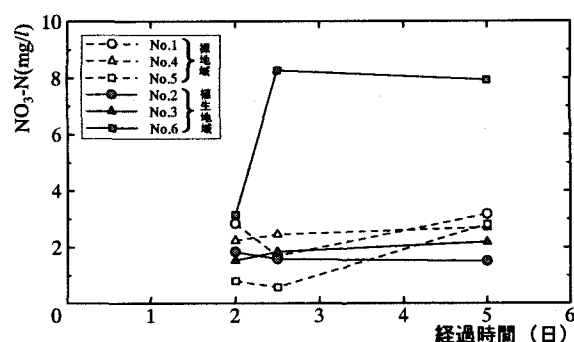
本研究では、木津川中流域の砂州を対象として伏流水の流れを把握するとともに、その水質が伏流水の流動過程および砂州の地被状態と如何なる関係にあるかを検討した。水理モデルによる伏流水位の解析は、観測水位を十分な精度で再現しており、砂州の地形が寄州から中州になったことによる伏流水の流れの変化を明らかにした。塩水トレーサ実験によって、流速分布の解析結果の検証を試みた結果、実験値と計算値はオーダー的に良い対応を示した。

流線に沿った観測孔において伏流水の水質調査を行ったところ、伏流水の水質特性を決定づける要因として地被状態が大きく関わっていることが判明した。裸地域と植生域とで水質特性に明らかに違いが見られることは、伏流水の側方流動に加えて、鉛直方向の雨水浸透が土壌層から有機物やイオンの供給を促して水質を支配していると考えられる。今後、降雨浸透や土壌層で鉛直水分移動による水質変化について、詳細な現地観測を行う予定である。

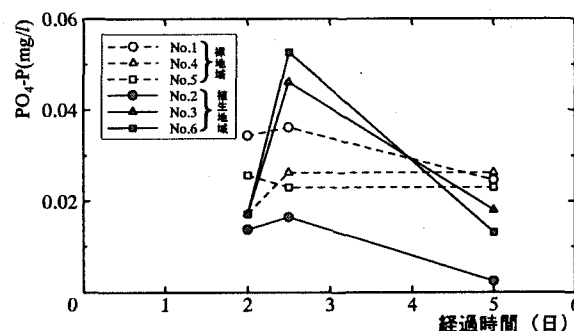
謝辞：本研究を遂行するに当たり、河川生態学術研究会、国土交通省淀川工事事務所ならびに(財)リバーフロント整備センターに多大の援助を賜った。ここに記して感謝申し上げます。



(a) アンモニア態窒素



(b) 硝酸態窒素



(c) リン酸態リン

図-19 降雨浸透による水質への影響

参考文献

- 1) 原田守博・西村智樹・牧 幸治：木津川砂州における伏流水の挙動と植生分布との係わり，土木学会第55回年次講演会概要集，Ⅱ-314，2000。
- 2) 藤縄克之ほか：『地下水モデル—実践的シミュレーションの基礎—』，共立出版，1994。
- 3) 原田守博・西村智樹・武井 剛・太刀川恭子：砂州における溜まりや植生の立地環境特性と伏流水との係わり，河川技術に関する論文集，第5巻，土木学会，pp.87-92，1999。
- 4) 建設省近畿地方建設局・近畿技術事務所：水質調査の基礎知識，pp.30，51～53，1996。

(2002. 4. 15 受付)