

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

SUBSURFACE FLOW MONITORING USING CONSERVATIVE ION IN SANDBARS WITH AND WITHOUT VEGETATION

片貝武史¹・亀井丈史²・鷲見哲也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学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

³正会員 博(工) 名古屋大学大学院講師 工学研究科社会基盤工学専攻

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

Riparian sandbar serves as a habitat for some organisms, which is supported by material transport. Sandbars have vegetated area and bare area, each of which support different material cycles based on subsurface water flow. Understanding the importance of water flow, we focused on subsurface water and solute transport processes through sandbars, and monitoring was conducted through measurement of water level of surface and subsurface water and concentration conservative ions. Particularly Cl^- gives us time information using its dilution ratio in bare and vegetated sandbar. Additionally by using their ion concentration and flow patterns and retention time for each monitoring well, and the results of 2-D flow analysis of unconfined groundwater, the effects of precipitation and flood are discussed.

Key Words : sandbar, subsurface flow, Cl^- tracer, precipitation, dilution, flowing period

1. はじめに

河道内に形成された砂州は、河川生態系を形成する場としての機能や、溶存・懸濁物質を輸送している表流水が砂州に浸透し、伏流水が表流水に復帰するメカニズム、つまり、水・物質を交換する機能を有することが明らかになりつつある¹⁾。そのような砂州機能を定量的に評価し、砂州景観保全の意義²⁾を明らかにすることは河川整備における環境保全、環境整備に関わる指針の一つになると考える。この観点から著者らは、砂州が有する機能の一つである、表流水と伏流水の物質交換機能が河川環境に与える影響について評価を試みるための一考察として、伏流水の流動特性を把握するために、京都府を流れる淀川水系木津川の砂州を対象として調査研究を行っている。

砂州内部を流れる伏流水の流動メカニズムについては、原田³⁾、鷲見ら⁴⁾により平水時の伏流水の流動メカニ

ズム(表流水が砂州内部に浸透し、伏流して表流水に復帰する流れ)について研究が進められ、そこでは、砂州内部の伏流水は、表流水とは異なる環境の中を流れることから伏流水質と表流水質は異なる変化過程を有することなどが指摘されている。実際の砂州は、降雨や出水によるインパクトを受け、砂州内部を流動する伏流水もその影響を受けると考える。しかし、それを考慮した水・物質の流動特性に関する研究についてはあまり多くなく、明らかにされていない点が多い。

本論文では、砂州内部を流れる伏流水の流動特性について、木津川の代表的な砂州景観である裸地砂州と植生砂州において、平水時と降雨・出水後のイベントが生じた時の水位分布と保存性の溶存物質濃度の空間分布について現地調査し、伏流流動特性のシナリオを示唆するとともに、数値解析を援用して算出した流動時間を把握することによって、降雨・出水のイベントによって伏流水に与える影響について示唆することを目的とする。

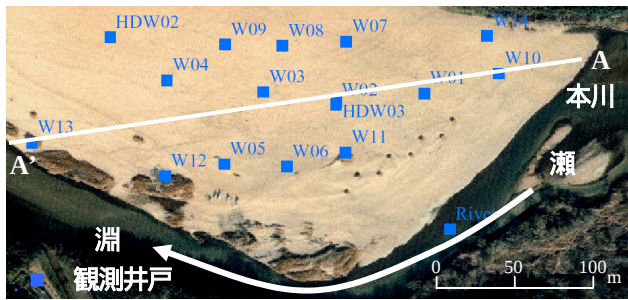


図-1 裸地砂州景観と観測井戸位置図（木津川11km付近）

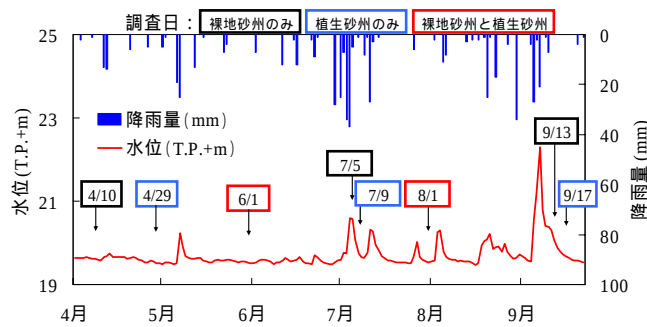


図-3 調査対象期間の水位と降雨量

2. 現地調査の概要

(1) 調査地概要

調査地は、京都府を流れる淀川水系木津川の三川合流点（八幡市淀）から10kmから12kmの間にある1組の交互砂州とし、三川合流点より20kmまでの平均河床勾配は約1/1,150、河床材料は砂が卓越した砂河床の様相を持つ区間に位置している。調査地の特徴は、11km付近に位置する砂州（以後、裸地砂州、図-1）は砂礫が卓越した表層景観を有し、出水による攪乱を受けやすい。また、上流側の12km付近の砂州（以後、植生砂州、図-2）は植生に被覆された表層景観を有し、陸上植物が生育できる物理環境があり、裸地砂州と比べ小中規模程度の出水による攪乱は受けにくい状況である。これは、植生の発達とともに砂州の比高差が増大したため、恒常的に水が流れる流路（二次流路）が発達し、中州地形の様相になっている。各砂州とも、本川は砂州上流端より流れこみ、湾曲部を挟む形で瀬と淵が形成されている区間内に広がる砂州域（横断方向：約300m、縦断方向：約600m）を対象範囲とする。

(2) 調査方法の概要

裸地砂州及び植生砂州の伏流水流動の特性を把握することを目的に、図-3に示すような降雨や水位変動のある2005年4月から9月にかけて調査を行った。調査内容として、表流水及び伏流水の水位計測と採水を行い、その水に溶存している主要なイオン（ Cl^- 、 Na^+ 等）についてイオン分析計（東亜DKK IA-200）を用いて分析した。

伏流水の水位計測と採水には、図-1、2に示すように



図-2 植生砂州景観と観測井戸位置図（木津川12km付近）

対象砂州域に設置した簡易井戸（塩化ビニル製、多孔ストレーナ式、平水時伏流水面から約50cmの深さまで埋設）と国土交通省淀川河川事務所設置井戸（鋼管製、ストレーナ式、深度約3～5m）を併用した。また、伏流水調査の同一日に水際地形の測量と表流水の採水も行い、調査期間における河川水位の変動履歴と降雨履歴を把握するため、調査地より約4、5km上流の飯岡水位観測所の水位情報（国土交通省 <http://www1.river.go.jp/>）及び京田辺観測所の降雨情報（気象庁 <http://www.data.kishou.go.jp/>）を用いて図-3に整理した。

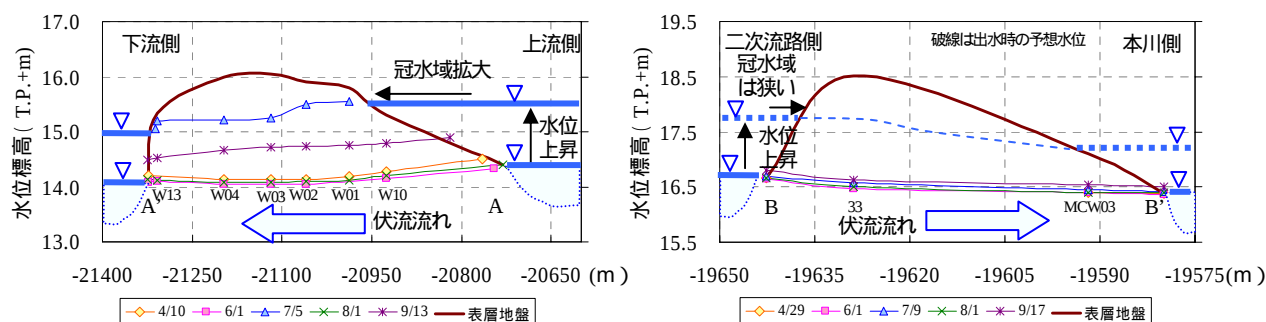
3. 現地調査から得た伏流水の流動特性

(1) 伏流水の水位空間分布

a) 裸地砂州の水位分布

裸地砂州では表流水位が変動すると水際水位（水際線）と伏流水位も連動して変動する（図-4(a)）特性がある。特に、出水直後の7月5日及び9月13日の水位縦断と伏流水位縦断（図-4(a)）から、表流水水際より伏流水の水位が高い、つまり、伏流水より表流水の水位低減速度が速いことを示している。

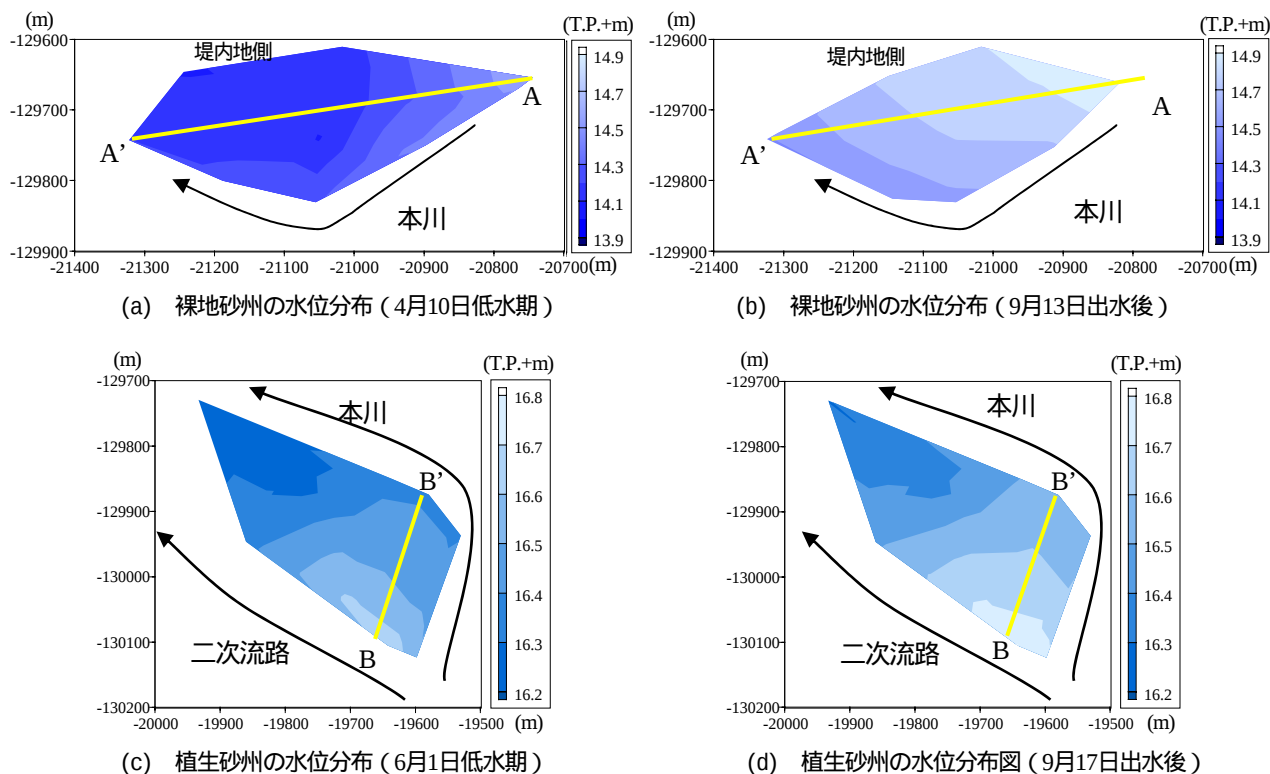
伏流水位の空間分布について、攪乱の少ない4月（図-5(a)）は砂州の水際から表流水が浸透し、砂州中央部に水位低下する分布と、湾曲部より下流側からも砂州中央部に向けて水位低下していることが示されている。つまり調査範囲内において、表流水と伏流水の水交換が乏しい水位分布になっていることが示された。また、9月の出水は砂州全体が冠水する規模であり、図-5(b)は、砂州上流から浸透した伏流水が調査範囲下流部付近で表流



(a) 裸地砂州の縦断面図（上流→下流方向）

(b) 植生砂州の横断面図（二次流路→本川方向）

図-4 砂州断面における表層地盤地形と水際表流水位と伏流水位縦断



(a) 裸地砂州の水位分布（4月10日低水期）

(b) 裸地砂州の水位分布（9月13日出水後）

(c) 植生砂州の水位分布（6月1日低水期）

(d) 植生砂州の水位分布図（9月17日出水後）

図-5 裸地砂州と植生砂州の伏流水水位の空間分布図

水に復帰する流れになることを示している。

この結果より、調査期間内の伏流流動の特性は、表流水位が境界となり、瀬淵ユニットの区間で表流水に復帰する流れとしない流れがあることが示された。特に、瀬淵ユニットの区間で表流水に復帰しない流れがあるのは、堤内地側の地下水位が低いことが要因であると推測できる。

驚見ら⁵⁾は水位が高い砂州上流水際から浸透し下流に浸出する流れが瀬淵ユニット間で生じていることを報告している。しかし、今回の結果から、調査地は沿川周辺の地下水位が河川水位より低くなると、その影響が河道内の伏流水流動にも及ぶことが示唆された。また、水供給の観点から、砂州下流部及び堤内地側に流れる水量が砂州上流端から流入する量よりも多い時、下流部水際から表流水が浸透するような水位分布が形成され则认为る。しかし、砂州が冠水する規模の出水があると、表流

水は不飽和層に浸透し、表流水水位の低下とともに、浸透していた水が流出し易い表流水側に流れていることが示されている。

b) 植生砂州の水位分布

植生砂州の水位分布は、図-5 (c), (d) に示している。どちらも、砂州上流域は二次流路から横断方向に水位低下し本川に復帰する水位分布と縦断方向に水位低下し本川に復帰する水位分布があることを示している。これは、砂州上流端で流路が分岐し、上流から直進する流れの二次流路と分岐後に曲がって流れ込む本川がある点と、特に図-4(b)に示すように、表流水水位が二次流路よりも本川が低く、特に本川では分岐後すぐに水面勾配のある瀬があるため、上流付近の伏流水面の勾配は下に凸となり、横断方向に水位低下する流れを有する点が要因と考える。一方、砂州を縦断的に流下する伏流水面勾配は二次流路側の勾配が緩いため、本川の流下方向と平行な

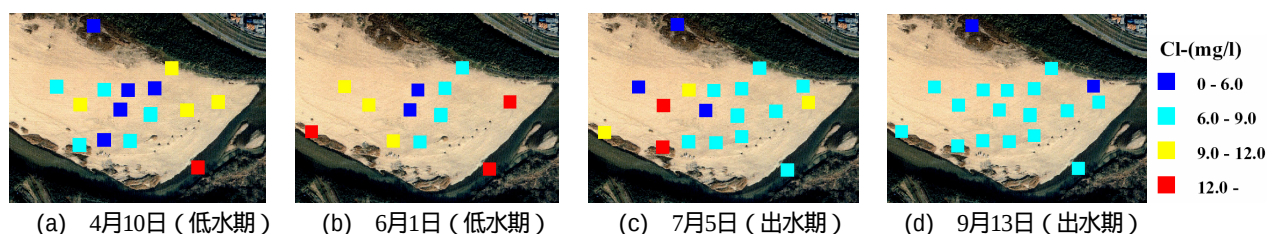


図-6 裸地砂州における伏流水に溶存している塩化物イオン濃度の空間分布

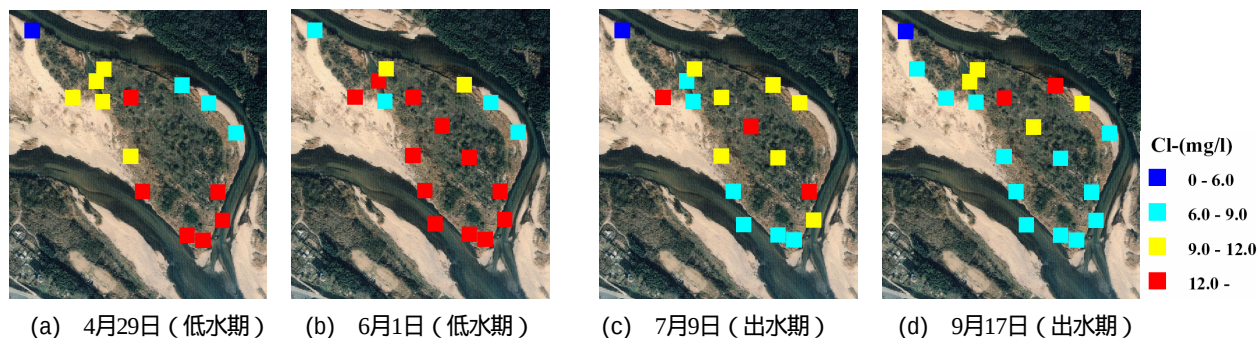


図-7 植生砂州における伏流水に溶存している塩化物イオン濃度の空間分布

流れで水位低下していることがわかる。

(2) 伏流水に溶存している保存性物質の空間分布

伏流流動を追跡するため、環境中において保存性のある塩化物イオン (Cl^-) を物質トレーサーとして扱い、濃度の空間分布を図-6, 7に示す。

a) 伏流水の溶存物質濃度を規定する表流水・降水の概要

伏流水は表流水が流入して形成され、降水があると砂州に浸透し伏流水に流入する可能性がある。この点から伏流水の供給源である表流水及び降水に溶存している Cl^- を図-8に整理した。御幸橋は三川合流地点より1.2km上流付近の観測値（国土交通省 <http://www1.river.go.jp/>），調査地は裸地及び植生砂州の本川上流部の水際での値、そして、降水は調査地付近の堤防上で採水した値である。

調査期間の表流水濃度の特徴は、7月までの低水期の表流水 Cl^- 濃度は約13～15mg/lの間で推移し、夏季の出水期の7月から9月は7～12mg/lで、特に出水直後の濃度は低水期と比べ低濃度を示している。一方、降水中に含まれている濃度は0.2～0.7mg/lであり、表流水の濃度と比較すると十分に低濃度な水であることがわかる。

b) 裸地砂州の空間分布

調査結果を図-6に示す。7月までの低水期の Cl^- 濃度空間分布（図-6(a), (b)）を見ると、本川近くの砂州上流及び下流付近では河川水の濃度と近い値となることから、表流水が砂州水際から浸透し、伏流輸送されていることがわかり、これは図-4で示した伏流水流動の傾向に対応している。しかし、環境中で保存性の物質である Cl^- 濃度が伏流輸送過程において濃度低下している。輸送過程において保存性物質が濃度低下するためには、低濃度の水が伏流水に流入し希釈される必要がある。しかし、河道内に形成された砂州の伏流水に低濃度水塊をもつような水（例えば、堤内地下水の流入や湧水など）が流入し

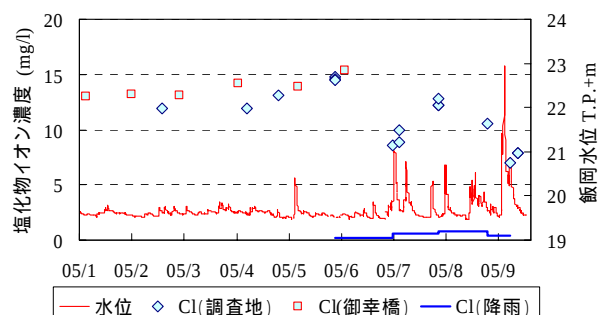


図-8 表流水・降雨中の Cl^- 濃度の変動

ている様子は図-4の水位コンター図からは読み取れない。つまり、環境中に存在する低濃度の水が伏流水に流入できるのは図-8の濃度から降水と出水中の表流水による影響であると推測できる。

7月から8月にかけて水際から上流域が冠水する規模（中規模）の出水が生じている。例えば、7月5日の濃度分布（図-6(c)）を見ると、出水で砂州上流部が冠水したため、上流側は低濃度であるが、下流側は高濃度の水が残っている。つまり、出水中の低濃度表流水が冠水し、砂州内に浸透すると、冠水する前に形成していた伏流水は押出される形で流動していくことを示している。また、9月13日の濃度分布（図-6(d)）より、砂州全体が冠水する大規模の出水があると、伏流水は冠水したときの表流水の濃度に一掃されていることがわかる。

c) 植生砂州の空間分布

調査結果を図-7に示す。図-7(a), (b)から裸地砂州と同様に7月までは表流水濃度と二次流路付近の伏流水濃度はほぼ同様で、特に6月は砂州中央部まで表流水と同じような濃度の水が存在していることがわかる。また、4月、6月と本川側の伏流水濃度は表流水濃度と比較すると低濃度値となっている。これは、横断方向の本川

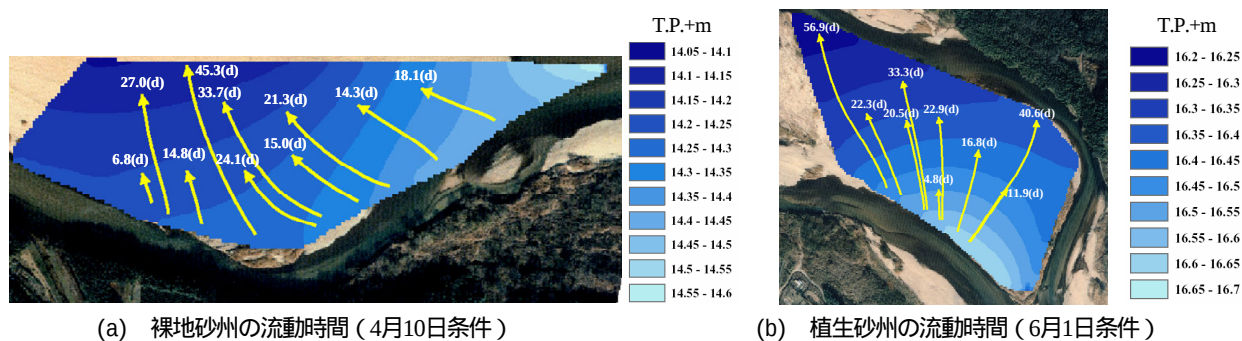


図-9 数値解析による伏流水位分布と各井戸までの伏流水の到達時間

側（流出側）の伏流水面勾配が緩く（図-5(b)）、植生砂州の本川水際にはツルヨシ群落の影響などより、滞留しやすい環境が形成されていることが要因と考えられる。7月の出水後（図-7(c)）の二次流路水際は表流水濃度と同じ低濃度を有しているのに対し、砂州の中ほどは、表流水と比べ高い濃度を有している。一方で、植生砂州の地形的特性（比高差が大きい）により、7月のような中規模程度の出水では砂州上流側の植生帯は冠水しない。つまり、出水による表流水位が上昇しても水際線は変わらないため、水位が上昇した分、水際から押し出し的に浸透していく。そのため、植生砂州内部の水は出水前に形成されていた低水期の表流水レベルの濃度が、出水による浸透で押し出されているため、本川水際の濃度が高くなっていることが示されている。こうして、伏流水の流動特性は押し出し流れであることが明らかとなった。9月の大規模出水（図-7(d)）は植生砂州も冠水するような規模であったため、伏流水は低濃度に変化した。下流側の伏流水の一部に高い濃度が残されている。これは、植生砂州が有する地形や水際植生による土壌物理環境によるものと、出水時は表流水（二次流路と本川）の水位上昇は早い、伏流水の上昇速度は表流水と比べると遅いことが予想される。このことから、平水時は二次流路から浸透し、本川側へ流れていたが、本川水位が伏流水位より高くなると本川側から押し出し的に浸透する流れが生じると推測できる。また、砂州土壌の不均質性により水が取り残されている可能性がある。と推測できる。

3) 裸地砂州と植生砂州の伏流水形成過程の違い

砂州表層景観が裸地と植生で大きく異なる点は、植生繁茂（比高増大）によって二次流路が発達した。その地形的特長の差が表流水、特に出水時の冠水のメカニズムが異なっていることは、図-5の表層地盤高の形状から推測でき、裸地砂州上流域が冠水する規模（7月出水）の洪水では植生域は冠水しないことが示された。裸地砂州はなだらかな水際地形であるため、冠水しやすくなっている。この冠水特性から、砂州中央部まで到達するのに平水時の伏流動では時間を要するが、出水により冠水した場合は、冠水した箇所から表流水が浸透するため、水の入替わりが早くなる。一方、植生砂州は二次流路水際の比高が高いため、水位上昇

による水際移動による冠水は乏しく、7月程度の出水では二次流路水際から浸透するが、表流水の水位上昇速度が速いため、伏流水位の応答遅れによる非定常性が裸地砂州より顕著に出ていることが予想される。つまり、砂州景観の違いが地形等の物理環境の差となり、出水等の影響の差が空間的に伏流水を構成している水の溶存物質の差になったと考えられる。

4. 伏流水の流動時間と降雨・出水の関係

現地調査の結果をもとに数値計算を援用して伏流動とその時の流動時間を算出し、流動時間と降雨などのイベントに対する影響について議論する。

(1) 流動時間の算出

a) 解析手法と条件

対象砂州の0m+T.P.付近に不透水層（コアボーリング調査結果）があり、約14mの帯水層を有する水平流動であることから、平面2次元不圧地下水流動解析を以下の条件⁵⁾⁶⁾で行った。

Dupuit-Forchheimerの仮定（下端は水平難透水層の上にあり、等方均質な帯水層内を浸透する）と定常であると仮定した。その支配方程式は以下に従う。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\lambda} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\lambda} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) + \frac{N}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

ここに、 h ：不透水面（0m+T.P.）からの伏流水位、 k ：透水係数、 N ：浸透涵養率、 λ ：比産出率とし、透水係数は原田³⁾や鷲見⁵⁾の結果から透水係数 $k=1.0\text{cm/s}$ 、無降雨条件から $N=0$ 、比産出率 $\lambda=0.2$ として計算した。この支配方程式を差分法で数値的に解くために、アメリカ地質調査所（USGS）が開発した地下水流動解析MODFLOWプログラム群を用いた。解析領域を1グリット $5\text{m} \times 5\text{m}$ 、境界条件は観測時における水際及び井戸の実測水位を内挿して与える。実測水位は、定常状態における伏流水の流動解析を行うことから低水期に観測した水位データ（裸地砂州：4/10、植生砂州：6/1）を用いた。

b) 解析結果

解析結果を図-9に示す。裸地砂州の伏流水位の実測値（図-5(a)）と計算値（図-9(a)）を比較すると、計測値

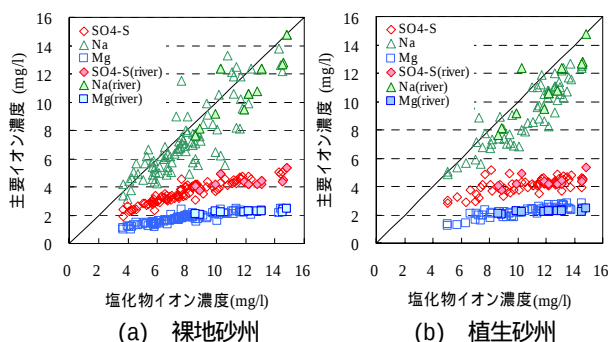


図-10 Cl⁻と主要イオン濃度の関係

は、調査対象域の砂州水際から、砂州中央部にかけて流れる水位勾配がある。計算値はこの水位勾配が再現されていることが確認できた。一方、植生砂州の伏流水位の実測値（図-5(c)）と計算値（図-9(b)）を比較すると、二次流路側から本川側へ横断的な水位勾配を示す流れと本川下流方向に水位勾配を示す流れがあることから、解析による流動は再現されていることが示された。そして、この解析条件から伏流水の流動時間を求めた。解析結果から、裸地砂州の流動時間は、河川表流水が砂州に浸透し、伏流動距離が短い井戸で約2週間、長い流動距離を要する井戸（砂州中央部）までに約50日程度要している。同様に植生砂州の流動時間は、横断方向流れにおいて、砂州中央部で約2週間、本川側に到達するのに約40日要し、縦断方向流れにおいて、砂州中央部で約20日間、本川側に到達するまでに約2ヶ月程度かかると試算された。

この結果より、定常状態の条件で、表流水が砂州に浸透した伏流水の水交換は裸地砂州で約2ヶ月、植生砂州で約1、2ヶ月要することが示された。

(2) 伏流水の流動時間と希釈

Cl⁻濃度が流下方向に輸送されている間に濃度低減つまり、希釈されていることが現地調査から明らかになった。伏流水は、洪水等のイベントが生じなければ水際から浸透した水はそのまま流動するが、流動時間が長い場合、洪水等のイベントによる影響を受けながら流動する。今回の調査で得られた保存性のCl⁻と主要イオン（SO₄-S、Na⁺、Mg²⁺）濃度との関係を図-10に示した。この図から、保存性物質であるCl⁻濃度が減少することは、低濃度水による希釈であるとことは先に述べた通りであり、その他のイオン濃度も一定割合で減少しており、低濃度水による希釈効果があると判断できる。特に、今回の調査において、出水期の表流水濃度は低水期と比べ低濃度であったことから出水の効果によると推測される。また、裸地砂州と植生砂州の濃度低下の分布の特長として、裸地ではグラフ左下に多く分布し、植生では右上に多く分布していることがわかる。裸地砂州は出水による冠水と降水による影響を受けやすいことから、出水期の低濃度水の流入による希釈が卓越していると考えられる。

5. おわりに

本論文において示された伏流動特性について、以下のことが示された。

- 1) 低水期の伏流動は、沿川地下水位の影響を受け、表流水に復帰する流れ（水交換）が乏しくなる。
- 2) 表層景観（裸地と植生）の違いは、出水による冠水域の差を生じさせ、その差が水交換機能の差となっている。
- 3) 伏流水を構成する溶存物質は、表流水が供給源であり、その濃度に影響される。特に冠水する規模の出水により、伏流水の濃度分布は一様になる。
- 4) 定常状態における対象砂州の水交換のタイムスケールは、流向によって流動時間に幅があるが、概ね裸地砂州で約2ヶ月、植生砂州で約1、2ヶ月程度で交換する。
- 5) 伏流水は降雨や出水による低濃度水で希釈され、流動時間が長いほどその影響を受けやすい。

今回の調査では、伏流水の流動特性について、水位分布と保存性物質をトレーサーとして用いた調査を行い、伏流水が表流水の影響を受けながら伏流水が形成されている過程についての知見を得た。これを基に、砂州内で生じている生元素輸送における物質交換機能の解明への足掛かりとなるものであると期待する。

謝辞：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。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：木津川砂州をフィールドとした河川生態に関する生態学・河川水理学共同研究，河川技術論文集，Vol.8，pp.7-12，2002。
- 2) 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，pp.43-48，2004。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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，pp.185-190，2002。
- 6) 佐藤邦明・岩佐義朗：地下水理学，丸善株式会社，pp.22-69，2002。
- 7) 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，pp.381-386，2004。

（2005.9.30受付）