

木津川砂州表層の土壌・被覆条件と 鉛直水輸送の空間分布

THE SOIL AND COVERING CONDITIONS OF THE SURFACE AND THE
SPATIAL DISTRIBUTION OF THE VERTICAL TRANSPORTATION OF WATER
IN A SANDBAR IN THE KIZU RIVER

紘澤成希¹・片貝武史²・鷺見哲也³・辻本哲郎⁴

Masaki KASEZAWA, Takeshi KATAKAI, Tetsuya SUMI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 修(工) 滋賀県 (〒520-8577 大津市京町4-1-1)

²学生会員 修(工) 名古屋大学大学院博士課程後期課程 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1)

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

Horizontal distribution of vertical water transport is quantitatively evaluated throughout the unsaturated zone above the subsurface flow with considering soil material, vegetation covering and relative height of surface. Through field investigations, laboratory test and lysimeter test, soil characteristics, layer composition, topography of a sandbar and function of stomatal conductance of vegetation are obtained. Using them, a numerical simulation using the SPAC model and double-source model was conducted to evaluate the spatial distribution of vertical water transport. Results show that vegetation area with high elevation does not contribute to water uptake from saturated subsurface water.

Key Words : Vertical water transport, sandbar, SPAC model, double-source model, spatial distribution, stomatal conductance

1. はじめに

近年、河道砂州内つまり伏流水をバイパスすることによる河川水質浄化機能が注目されてきており、砂州内の水物質循環機構の解明が待たれるが、その基礎となる砂州内水循環については、飽和した水平伏流流動だけでなく、伏流水面上の不飽和層内での鉛直方向の流れもあり、水平流動の遅い砂州内では、鉛直方向の水輸送が水物質循環全体へ与える影響も無視できない。砂州内の水循環を統合的に議論するには、伏流水から表層までの不飽和土層内の鉛直水輸送を定量的に把握する必要があるが、これまでの研究の多くは、ヨシなど水際で比高の低い植物がほぼ直接的に伏流水を消費する量から概算されたものであるが、砂州のように比較的河川水位より高く、土層構造があり、保水性の乏しい砂州土壌においては不飽和層での挙動が重要であり、例えば植生の有無が水輸送や土壌条件に与える影響をどう評価するかなど、課題が

多い。原田ら¹⁾や鷺見ら(2004)²⁾は土壌-植物-大気の連続系における水分移動を電気回路との対比で表現したSPACモデルを用いて、植生や物理環境の違いが鉛直水輸送に与える影響を数値解析により示しているが、裸地条件や基盤条件の水平分布を考慮しておらず、砂州内全体の水循環を議論するには不十分である。

そこで本研究では、裸地域、植生域双方を考慮し、伏流水から表層までの不飽和層全体での鉛直水輸送を定量的に示し、伏流水上面での鉛直輸送量の平面的な分布を把握し、その特性を議論することを目的として研究を行った。植生域では比高の低い場所に主に生育する²⁾ ツルヨシに注目し、現地観測・および室内実験を通して鉛直水輸送モデルに必要な情報(裸地域・植生域の現地における土壌特性、各土層厚等)を把握した。鉛直一次元モデルを用い、屋外実験により同定した気孔コンダクタンスの関数パラメータを適用して、地点(グリッド)毎に鉛直水輸送の数値計算を行い、砂州内での空間的な分布を解析・整理した。

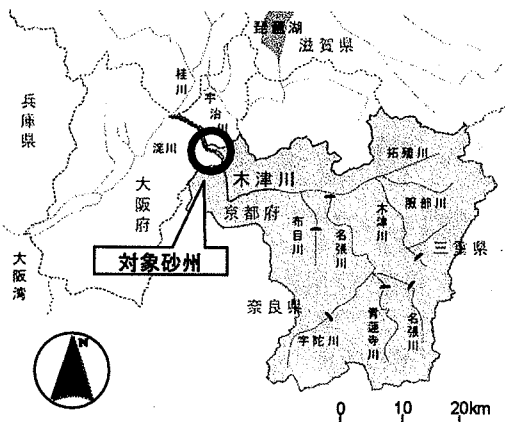


図-1 木津川流域図

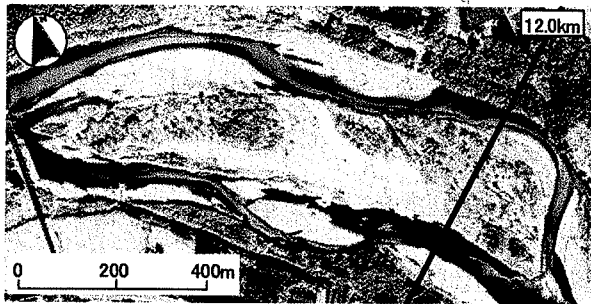


図-2 対象砂州

2. 対象砂州・植生の概要

(1) 対象砂州の概要

砂河川である木津川の淀川三川合流地点から12km上流の左岸砂州を対象とした(図-1, 図-2)。付近の平均河床勾配は1/1150程度で、単列交互砂州が形成されている。

現在では広範囲が植生域であるが、1970年以降植生が定着し始め、横断地形の変遷によれば植生域に砂が堆積して最大3m程度高くなった微高地となっている。また二次流路(図-2中下部)が形成され中州となった。

(2) 研究対象植生の概要

本研究の対象植物となるツルヨシは、多年草イネ科の植物で、日本各地に広く分布している。イネ科植物特有のひげ根を持ち、側根、細根が密に生えている。現地では、地中60cmあたりの深さまで達していた。川岸の砂礫地、流速の遅い部分に育成する。比高が0~0.5mぐらいのところに多いとされるが、本砂州では3m程度の高さまで生息している。

対象砂州においては2005年秋時点では、小・中規模の群落は裸地域に点在するとともに、平坦地と微高地との境界付近で帯状に繁茂していた。また、本川と二次流路分岐点付近では大群落が形成されていた。地盤高が低く、表層土の粒径が粗いところに多く見られる。

3. 鉛直一次元モデルの概要

土壌 (Soil)、植物 (Plant)、大気 (Atmosphere) の連続系 (Continuum) において、土壌中の水は植物根

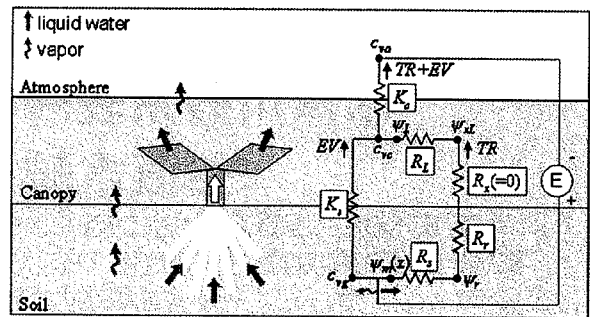


図-3 水連続系の概念図

に吸収され、植物体を上昇移動し、葉面の気孔から大気へ蒸散する(図-3)。この水分移動のプロセスを電気回路とのアナロジーで表現したものにSPACモデルがある。本研究では、Campbell (1974)⁴⁾の示した解法を基礎とし、土中の毛管水・水蒸気・熱輸送についてはそのまま適用した(本稿では説明を省く)。Canopy部の蒸発散量については、Pennman-Montheith式ではなく、Watanabe (1994)⁵⁾の示したdouble source modelを組み合わせ、図-3のように、Canopyの熱収支と水の連続(Canopyの熱容量・水蒸気容量は小さいとして定常仮定)をより厳密に取り扱い、蒸発EVと蒸散TRを算定できるようにした。水・熱の収支には、Canopy放射、蒸発・蒸散に伴う潜熱放出、空気の交換による顕熱と潜熱(水蒸気)の輸送、地中との熱交換を考慮することで、未知数としてのCanopy内の水蒸気濃度 c_w および温度 T_c を得る。このとき、地表付近にCanopy層とは別の薄い地表層を考え、そこでの温度 T_g と水蒸気濃度 c_g を地中の熱・水蒸気輸送の境界とし扱い、熱・水蒸気Canopy層地中の水・熱解析と、c表層とCanopy層との熱・水蒸気交換とを連成して解いた。地表における水蒸気フラックス E_g (蒸発速度EV)に関しては潜熱フラックスとして、

$$lE_g = lK_s [c_{vsat}(T_g) - c_{vg}] \quad (1)$$

と表される。 l : 潜熱、 K_s : 地表面での境界層の伝達係数、 T : 温度(°C)、 c_v : 水蒸気濃度、 $c_{vsat}(T)$: 温度 T における飽和水蒸気濃度であり、添え字の g は地表を表す。

植生からの蒸散・地表からの蒸発によって生じた水蒸気は、Canopyを経由して大気へと放出される。

$$lE_c = lK_c [c_{vc}(T_c) - c_a] \quad (2)$$

ここで添え字の c はキャノピー上端を表し、定常仮定の下では $E_c = TR + E_g (= TR + EV)$ である。伝達係数については、 K_s はCampbell⁴⁾を、 K_c については、Norman et al.⁶⁾の方法を用いた。

4. 植生蒸散モデルの検討

本章では、ツルヨシの屋外ライシメータ実験を行い、蒸散に関するモデルの気孔パラメータを同定する。

(1) 気孔コンダクタンスモデル

ツルヨシの蒸散量の環境に対する応答は不明である。葉面積当りの蒸散速度 TR_0 は一般に気孔コンダクタンス g_s を用いて次式のように表す。

$$TR_0 = g_s \cdot (c_{sat}(T_c) - c_{vc}) \quad (3)$$

括弧内は、水蒸気圧で表す事が多いが、本研究では次元の変換が容易となる様に、水蒸気濃度を用いる。気孔コンダクタンスは、植生の蒸散による気孔開閉の度合いを表し、図-3の回路において、 R_L に逆比例し電導性を示すが、これは様々な物理環境により変化するとされる。

気孔コンダクタンス g_s は従来からポロメータなどによって計測が実施され、気象要素などの環境因子を関数とした様々なモデルで表現されてきた。ここでは代表的なJarvis (1976) ⁷⁾ によるモデルを採用する。 g_s を日射、温度、飽差、葉内水ポテンシャル、大気 CO_2 濃度のそれぞれ独立した関数として経験式で表現しかけ合わせたもので、現在最も広く使用されている。本研究では、 CO_2 濃度を除外したSirisampanら⁸⁾が使用した、光合成光量子束密度、気温、飽差、土壤水分ポテンシャルで表現したモデルを参考とし、以下で説明するモデルを使用することとした。

g_s ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$) は以下の次式で表現できるものとする。

$$g_s = g_{s\max} f(Q) f(T) f(D) f(\psi_{xr}) \quad (4)$$

ここで $g_{s\max}$: 最大気孔コンダクタンス ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$) Q : 日射強度 (W/m^2) , T : 気温 ($^{\circ}C$) , D : 飽差 (hPa) , ψ_{xr} : 植生体内の水分ポテンシャル (J/kg) である。Jarvisは T に対して葉温を用いているが、ここではS. Sirisampanらに倣い、葉近傍の気温とした。

$f(Q)$ は日射強度の関数で、放射量の大小によって g_s からの減少を表現する。

$$f(Q) = \frac{Q}{Q + (g_{s\max} / a)} \quad (5)$$

a : 光によって気孔が開く反応の効率 (曲率, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$) である。 $f(T)$, $f(D)$, $f(\psi)$ はそれぞれ全ストレスであり、0~1の値をとる。

気温に関するストレスは、

$$f(T) = \left(\frac{T - T_n}{T_o - T_n} \right) \left(\frac{T_x - T}{T_x - T_o} \right)^{\frac{T_x - T_o}{T_o - T_n}} \quad (6)$$

で表現する。 T_n : 気孔コンダクタンスを表現する際の最低限界温度 ($^{\circ}C$) , T_o : 最適気温 ($^{\circ}C$) , T_x : 最高限界温度 ($^{\circ}C$) である。

飽差に関するストレス関数は、

$$f(D) = \frac{1}{1 + (D/b_1)^{b_2}} \quad (7)$$

とする。 b_1 : 気孔コンダクタンスが半分になる飽差の値

(hPa) , b_2 : 曲率であり、この式は飽差によるストレスをS型の減衰曲線で表現できる。

水分ポテンシャルに関するストレス関数は、

$$f(\psi) = 1 - \frac{\psi_{\max} - \psi_{xr}}{\psi_{\max} - c} \quad (8)$$

と表現される。ここで $\psi_{\max}$: 土壤含水量時の植物体内のポテンシャル (J/kg) , c : 気孔が閉じるときのポテンシャル (the wilting point water potential) である。ここで、 ψ_{xr} は葉内部でのポテンシャルであるが、図-3の回路の考え方から、土壤水ポテンシャル ψ_m と蒸散速度から回帰的に $\psi_{xr} = \psi_m (R + R_s) E_g$ から得られる (単位面積当りの蒸散速度 TR は葉面積密度 (LAI)と葉面積当りの蒸散速度の積)。つまり、土壤水ポテンシャルが低く、蒸散速度が大きい場合にはよりコンダクタンスが小さくなる様に応答する。

(2) ライシメータ実験によるパラメータの同定

ツルヨシの気孔コンダクタンス g_s の挙動を調べるために、ツルヨシをライシメータ内に生植させ、実験を行った。このライシメータ内には常に飽和層があるように水を補給し、水を補給するときには土壌を介さず、直接飽和層内に水を注入できるようになっている。

その飽和水位と不飽和土層の水分状態も測定することで、ライシメータ内から無くなった水量を求め、ここからツルヨシの蒸散速度 E が求められる。ここで土壌からの蒸発は、蒸散量に比べて蒸発量はとても小さいため、無視した。

また、大気温度、湿度、ライシメータ内の水位、土壤水分、ツルヨシの葉面積指数を計測すれば、気孔コンダクタンスが求められる。同時に日射などの環境要素も観測することで、植生パラメータの同定が可能となる。

2005年8月6日に、木津川でツルヨシを採取し、名古屋大学構内の日当たりの良い場所に設置したライシメータ内に生植させた。ツルヨシを採取する際には、根や根近傍の土壌も乱さないよう注意しつつ、一体として株ごと採取した。観測後、ツルヨシの葉面積指数と各深度ごとの根密度、土壌の比算出率 (有効間隙率) を測定した。葉面積指数は3.90、土層の比算出率は0.275であった。根密度の測定結果は表-1に示す。

観測値からツルヨシの蒸散速度 E を求めた。飽和水位の低下速度と比算出率より、土壌の飽和層からの水分の減少速度を求め、土壌含水率の変化から求めた不飽和層での水分の減少速度を加えて、蒸散速度とした。結果を図-4に示す。比高の小さいところに飽和水面があり、ツルヨシが水を豊富に使えるため、かなり大きな値が出ている。

前述のモデルのフィッティングパラメータは $g_{s\max}$, a , T_n , T_o , T_x , b_1 , b_2 , $\psi_{\max}$, c の9つである。以上を、ライシメータ実験時の観測値を用い、ライシメータ実験で得

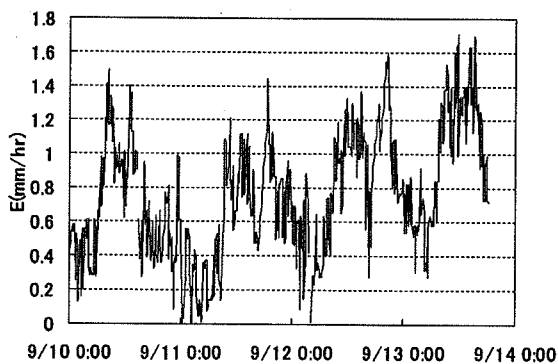


図-4 蒸散速度

表-1 ライシメータ内の根密度

深さ(cm)	根密度(m/m³)
0-10	35042
10-20	37950
20-30	43451
30-40	9658
40-	4922

表-2 パラメータの決定値

g_{max} (kg m ⁻² s ⁻¹)	0.0167
a	1.91
T_a (°C)	25.9
T_n (°C)	0
T_x (°C)	50
b_1 (hPa)	16.2
b_2	1.50
ψ_{max} (J/kg)	-382
c (J/kg)	-1.0E+10

た気孔コンダクタンス g_s と比較・同定した。フィッティングパラメータの数が多いため、 $T_n \cdot T_x \cdot \psi_{max}$ はSirisampanら (2003) ⁸⁾ を参考にして固定した。また g_{max} はストレスが小さい、日没後で土壤水分が豊富にある際(ライシメータに水を補給した後)の値を平均して得た。 c については、ライシメータでの比高が低かったことで、土壤水分ポテンシャルの制約がかからず、同定できなかったことから、実質 $f(\psi)$ が1の値を維持するように、 -1.0×10^{10} (J/kg) という負の大きな値を仮に与えた。その他のパラメータについては、最小二乗法を用いて同定した。同定したパラメータを表-2に示し、それらの値を用いて得られるライシメータ法実験時の気孔コンダクタンスの再現値と、観測値より算出した気孔コンダクタンスの値とを比較した図を図-5に示す。蒸散速度の見かけの観測値は計測時間間隔が10分と短く、地下水位の値の感度が悪い、大きく変動しているように見えるが、そのおよその挙動を見れば、概ね気孔コンダクタンスの挙動を再現できた。

5. 鉛直水輸送の空間分布の解析

本章では、前述のモデルを用いて、現地における鉛直水輸送の挙動を把握するために、現地の地形・土層・土壤特性の諸データを用いて現地砂州全域における計算を行い、砂州内での空間的な鉛直水輸送の分布を解析・整理した。

(1) 対象領域と計算条件

鉛直水輸送を空間的に解析・把握するために、GISに (Geographic Information System) を使用した。GIS上において正方10mグリッドで空間を区切り、グリッドごと

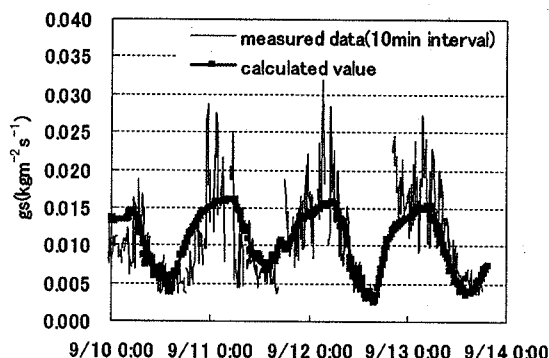


図-5 気孔コンダクタンスの再現

に地形・標高データ、伏流水位データ、土壤データなどを管理し、各グリッドで鉛直1次元解析を行った。

砂州の地形・標高データ (図-6) は2004年9月と2000年11月のデータ (ともに淀川河川事務所) を基にした。また、航空写真から植生域を判別した (図-7)。

解析の気象条件は、気象庁がホームページ上で公開している観測資料を参考にして、数値解析に必要な値を求めた。水の挙動が見やすくなるよう、1年のうち蒸発散が最も活発な8月のデータを参照した。降雨を考えない場合は晴天のパラメータのみを7日間分計算し、降雨を考慮の場合は1日目に降雨を12時間での三角形の降雨波形で与え、その後3日間晴天が続くというパターンを1周期として3周期計算した。各砂州において、晴天のみが続く場合と、雨天を含む場合との2パターン計算した。用いた気候パラメータは表-3に示す。気温および湿度は三角関数で時間変化を与えた。

土壤パラメータは、現地において、解析に使用するシルト混じり砂、細砂、砂礫に対応する土壤を採取し、各パラメータ (表-4) を得た。各計算では土層の解析領域は地表面から伏流水面以下10cmまでとし、地盤を鉛直方向に層分けして、第1層が厚さ1cm、第2層が4cm、第3層からは全て5cmとした。土壤の層構造については、裸地域は表層10cmを細砂が覆い、その下層は砂礫層とする2層構造とし、植生域は表層をシルト混じり砂層、下層に砂礫層、その間には細砂層が分布する3層構造とした。鷲見ら (2003) ²⁾ の土層構造データと、裸地域と植生域の境界部での高さをもとにして、砂礫層上面高のコンターを設定した。一方、植生域ではシルト混じり砂層の表層が地表から80cm堆積しているとした。細砂層はそれらの間を埋める形で層の厚さを決定し、表層から砂礫層までの距離が80cm未満のところは、その距離の分だけシルト混じり層が覆っているものとした。土中の水・水蒸気・熱の輸送はCambell⁴⁾の浸透解析および熱・水蒸気輸送解析の方法に沿って解き、熱、水蒸気については、前章で示した地表層での値を地表境界とした。浸透流においては根の部分からCambell⁴⁾の方法に従い、前章で得た蒸散パラメータを用いた蒸散モデルによって吸出し (蒸散) が行われる。土層上端には降雨強度 (下向き) と熱収支解析から得られる蒸発強度 (上向き) を与えた。伏

表-3 気候パラメータ

	晴天	降雨
最高気温(°C)	35.0	33.0
最低気温(°C)	25.0	24.5
相対湿度(%)	55.0	75.0
平均風速(m/s)	1.1	1.1
降水量(mm/day)	0.0	10.0

表-4 土壌パラメータ

	シルト混じり砂	細砂	砂礫
θ_s	0.370	0.347	0.396
θ_r	0.033	0.03	0.02
ψ_e (J/kg)	-1.98	-0.47	-0.03
b	1.023	0.448	1.206
k_s (kg s/m ³)	0.0145	0.2351	1.0759
ρ_d (g/cm ³)	1.239	1.563	1.535

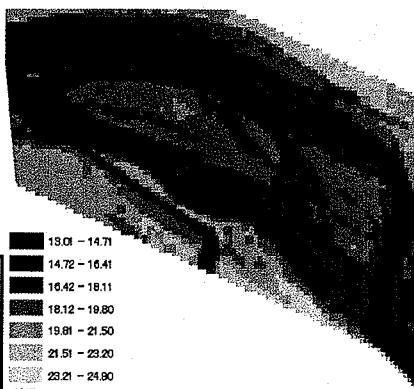


図-6 地形データ

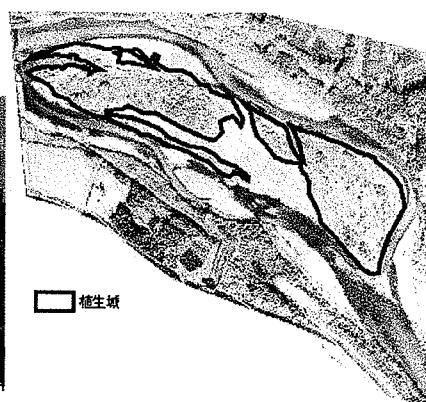


図-7 植生域の区分け

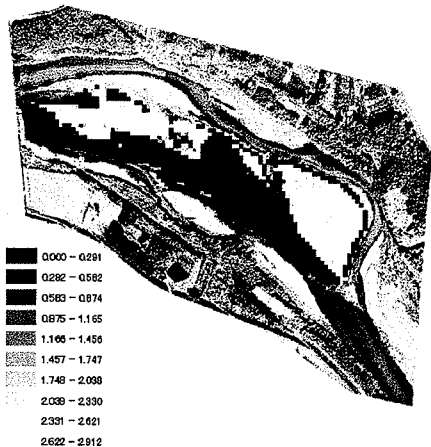


図-8 日蒸散量の空間分布

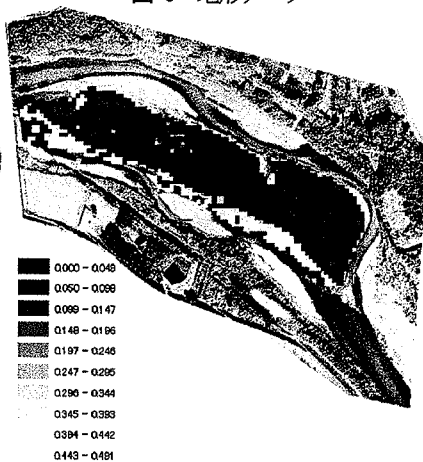


図-9 日蒸発量の空間分布

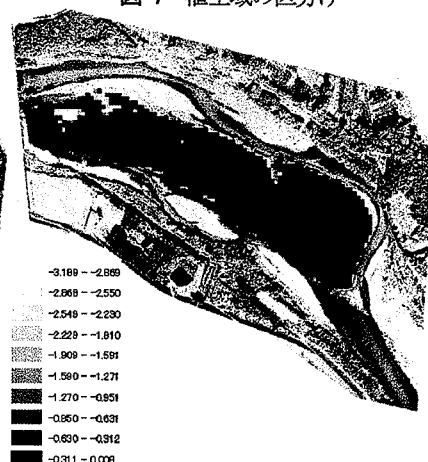


図-10 D.R.の空間分布

流水面高さについては、現地観測（表流水面、伏流水井戸水面）から内挿によってその分布を得、その水面を鉛直浸透を解く領域の下端とし、計算中はその水位は固定とした。解析においては、この下端での水フラックスを排水強度D.R. (Drain Rate) としてモニタし、負値が蒸発散による伏流水からの吸い上げを、正値が降雨後の土層から伏流水への排水を表すものとして、伏流水への影響を評価した。

(2) 鉛直水輸送の空間分布

a) 晴天時の解析

計算開始7日目について、日蒸散量分布を図-8に、日蒸発量の分布を図-9に、伏流水とへの水交換速度(D.R.)の分布を図-10に示す。ここで植生域の比高の低い地点は計算できなかったため、表示していない。

砂州（中州）全体（グリッド総面積：162,500 (m²)）で合計すると、それぞれ蒸散量が178.3 (m³)、蒸発量が15.7 (m³)、D.R.が22.1 (m³)となった。蒸散量が卓越していることがわかる。蒸散量とD.R.の分布を見ると、蒸散が卓越しているところでは伏流水からの水の吸い上げがないことがわかる。これは伏流水からの吸い上げがなくとも、植生が土壌中に保持されている水を使用して十分な蒸散量を維持していることを示しており、現地において表層付近のみでの水循環系が存在していることを示唆している。蒸発量とD.R.の分布を見ると、比

高の小さい水際部付近で量が大きくなっており、比高の大きいところでは量が小さくなっている。これは比高が小さく、伏流水からの水の吸い上げが期待できる地点でしか蒸発が期待できないことを示している。植生域の比高が小さいところでも、蒸散量は大きくなるとわれ、比高が小さいところでは鉛直上向きの水輸送が活発であるといえる。

b) 雨天を含む解析

それぞれ、3周期目の1日目と3日目のデータを示す。砂州の日蒸散量の分布を図-11に、日蒸発量の分布を図-12に、D.R.の分布を図-13に示す。

それぞれの結果に波のような斑が見えるが、裸地域での計算には計算不安定性があり、以後の課題となる。特に目立つのが裸地での蒸発量の分布であるが、蒸散に比べて絶対値は小さいものとして、以後の議論を続ける。

蒸散量の分布を見ると、1日目には全域で蒸散量が大きくなったが、3日目になると、ほぼ全域で蒸散量が大幅に減った。これは1日目に降雨により土壌に水が供給され、蒸散量が増大したが、3日目には土壌中に水が少なくなり、蒸散量が減ったものと思われる。D.R.の分布を見ると、植生域と裸地域とではっきりと量に違いが出ている。これは土壌の水分保持特性によると見られ、3日目のデータを見ても、植生域の比高が大ききところでは、日10mm程度の雨では、降雨起源の水はほとんどが土壌にトラップされ、伏流水面に到達しないことが示され

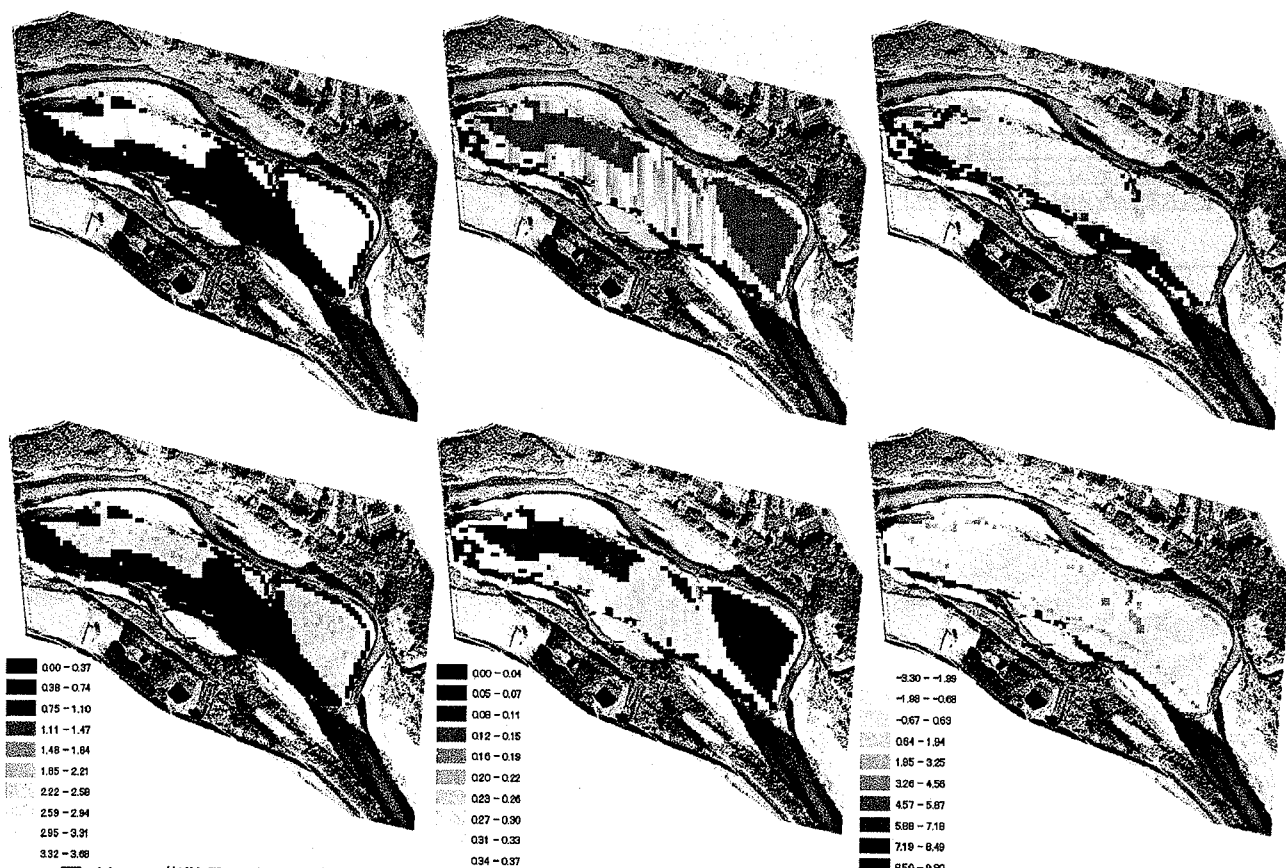


図-11 日蒸散量の空間分布

(上:1日目, 下:3日目)

図-12 日蒸発量の空間分布

(上:1日目, 下:3日目)

図-13 D.R.の空間分布

(上:1日目, 下:3日目)

た。これは先ほど述べた、表層付近のみで水が循環しているということを示している。また、比高の低い水際付近では鉛直交換が活発となるため、砂州を横断するような飽和伏流水の水質形成においては、浸透流入部・出口付近での鉛直輸送が量的には重要であり、比高の高い植生部は、伏流水に対する役割は小さいことを示す。

6. まとめ

本研究では、木津川下流域の裸地砂州、植生砂州を対象として、裸地域・植生域双方を含めた統一的な視点で、伏流水上面での鉛直輸送量の平面的な分布を把握し、議論した。現地データを伴った議論であり、伏流水から表層までの不飽和層全体での鉛直水輸送を定量的に示した。

砂州内の空間的な鉛直水輸送の分布を示せたことにより、水平流動との議論の接合、つまり飽和伏流水平面流動と組み合わせての定量的な議論も可能となった。それによって今後、砂州内の水循環の構造を定量的に捉えることを基礎として、これを砂州内での水質形成の把握や、植生の管理への応用といった、最終的な目的へ適用につながっていくことが望まれる。

謝辞：本研究は河川生態学術研究会（木津川研究グループ）および、科学研究費補助金（課題番号16656148）の一部として実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 原田守博, 恒川明伸, 西村智樹：土壌特性が河畔植物の生育に及ぼす影響, 土木学会中部研究発表会, pp.225-226, 2001.
- 2) 鷺見哲也, かせ澤成希, 辻本哲郎：砂州物理環境の植物蒸散及び水分輸送に与える影響, 河川技術論文集, Vol. 10, pp. 387-392, 2004.
- 3) 鷺見哲也, 恒川明伸, 辻本哲郎：木津川砂州における植物生育場の表層物理環境と物質輸送に関する研究, 河川技術論文集, Vol. 9, pp. 389-394, 2003.
- 4) Gaylon S. Campbell (中野正詩, 東山勇訳)：パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版社, 192p, 1987.
- 5) Watanabe, T. : Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow, Boundary-Layer Meteorology, Vol.70, Numbers 1-2, pp. 13 - 35, 1994.
- 6) Norman, J. M. et al.: Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature, Agr. Forest. Meteorol., Vol.77, pp.263-293, 1995.
- 7) Jarvis, P. G. : The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol.273, No. 927, pp. 593 - 610, 1976.
- 8) Satirapornら：落葉・常緑広葉樹から構成される二次林の気孔コンダクタンスの日変化と季節変化, 水文・水資源学会誌第16巻2号, pp. 113-130, 2003.

(2006. 4. 6 受付)