

砂州物理環境の植物蒸散及び 水分輸送に与える影響

THE EFFECTS OF PHYSICAL ENVIRONMENT OF SANDBAR SUBSTRATE ON EVAPOTRANSPIRATION AND VERTICAL WATER TRANSPORT

鷺見哲也¹・糸澤成希²・辻本哲郎³

Tetsuya SUMI, Masaki KASEZAWA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学工学研究科講師 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) 1-2-2)

²名古屋大学工学研究科博士課程前期課程 社会基盤工学専攻

³正会員 工博 名古屋大学工学研究科教授 社会基盤工学専攻

Water quality of subsurface water in sandbars, which is exchanging with river water, is affected by vertical water transport in vadose zone. River sandbars also play an important role in supplying the living place for the vegetation. Therefore, the investigation on vertical water transport and physical environment in vadose zone is expected. In this study, the relationship between the vertical transportation of water and the controlling physical factors are investigated by means of field survey and the numerical simulation. *Phragmites japonica*, a plant living on subsurface water, is used as an example, and SPAC model is applied in the numerical simulation.

Key Words : *Evapotranspiration, sandbar, vertical water transport, SPAC*

1. はじめに

河道砂州は、平水時には砂州内部での物質除去・変換作用を伴いながら伏流水と表流水と水交換を行い、出水時には懸濁態での有機物や溶存物質を地表に受入れたり放出したりして、何らかの水・物質循環を行っている。それは、水質形成という側面や、生態系の基礎部分を担う側面を持っている。

平水時の状況を考えると、河道砂州内部の水・物質循環を構成する流れには、伏流水流動に伴う水平輸送と、それと鉛直方向に出入りする不飽和層(表層)との交換とがある。それらの量的なバランスについては、木津川12kmの砂州での推定として鷺見ら¹⁾は、日3mmの蒸発散であればそれは、伏流水・表流水間の日交換量の約1/3程度にあたる、という概算を行っている。

伏流水水平流動は、Darcy則に従い、物質輸送もそれに乗るものであるが、溶存態については微生物作用による変質・除去が行われることがある。窒素であれば脱窒や硝化の作用がそれにあたる。しかし、伏流水流下する間にも、表層(不飽和層)内との間で鉛直交換があると考えられる。蒸散活動によって、表層中の水分鉛直輸送

の駆動力となり、伏流水を上向きに輸送する。降雨時には、不飽和堆積層中の土中水や雨水を伏流水に戻す。これらは伏流水の水質に変化をもたらす、最終的には河川水へ戻り、その水際部の水質に影響すると考えられる。原田ら²⁾は、鉛直下向きの輸送の効果について、表層の物質の溶脱が、伏流水中へ影響することについて示している。堆積層中の水質作用を知る前にまず、水の鉛直輸送の特徴を知る必要がある。

鉛直輸送は、降雨等による下向きの輸送だけでなく、蒸発散による上向きの輸送がある。原田ら³⁾はそれを砂州での材料条件を想定して適用を試みている。鷺見ら⁴⁾は砂河川である木津川での現地砂層材料の不飽和土壌特性・透水特性を調べるとともに、そこに生育する植生のパラメータ(葉面積指数や根密度分布等)を用いて、固定した条件での蒸発散による鉛直水・物質輸送の数値シミュレーションを行った。これらの植物体も含めた水輸送の計算モデルは、SPAC(土壌-植物-大気 連続系)モデルと呼ばれ、植物のパラメータ、土壌のパラメータ、気象条件及び土壌の水に関する境界条件を与える事で水輸送とポテンシャルの分布を計算できる。

本研究では、砂州内部の層構成や地表の比高(境界)が、鉛直水輸送に与える影響を見るために、このモデル

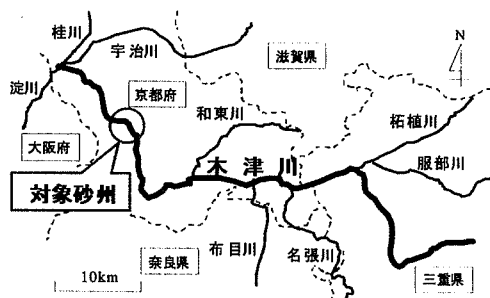


図-1 研究対象位置 (木津川)

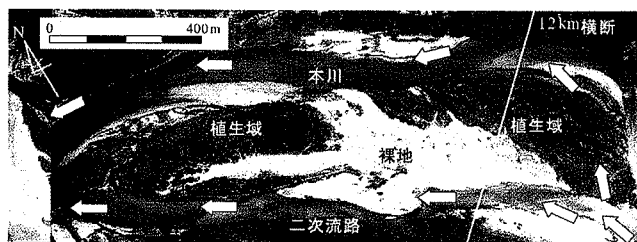


図-2 研究対象砂州 (木津川12.0km付近)

を用いて検討した。また、蒸散を行えない条件では、潜熱の放出による温度制御を行えないことを意味し、生育できないと考え、生育可能な条件かどうかという見方でもその結果を見てみることにする。

2. 調査対象砂州の概要

(1) 木津川と砂州の概要

代表的な砂河川である木津川の、淀川三川合流地点から12km上流の砂州を対象とした (図-1, 図-2)。1970年代以降植生域化・高水敷化した砂州が増えた。主な植生は、ツルヨシ、セイタカアワダチソウ、シナダレスズメガヤ、ヤナギである。

12km横断での地形を図-3に、図中15箇所で行った簡易コアサンプリングによる土層構造図を図-4に示す。図中の「高さ」150cm以下での「データ無し」は礫層であることを示しており、ほぼ同じ高さになる。その上部は0.5mm以下の砂かシルトの層から成る。この砂・シルトのマウンド部は、植生が侵入してから形成されたことが過去の航空写真と横断形状の変遷から判明しており、主に浮遊砂の堆積によって出来た事を示している。この層はシルトとの互層であり、何回かの大きな出水によるものである。

通常、ツルヨシは砂礫の、水面 (伏流水面) からの比高の低い所に生育するが、この砂州では2m程度のところでも生育している (鷺見ら⁵⁾)。セイタカアワダチソウはそれ以上の部分を占有している。

鷺見らの計測では、比高の高い部分での降雨・蒸散による伏流水と不飽和層との間の鉛直水輸送は殆ど見られないことから、セイタカアワダチソウは対象からはずし、

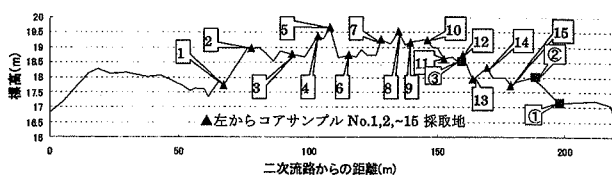


図-3 12km横断地形

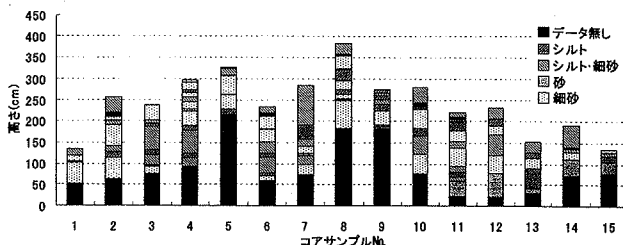


図-4 コアサンプリングによる土層構造図

(縦軸：平均河川水位からの高さ)

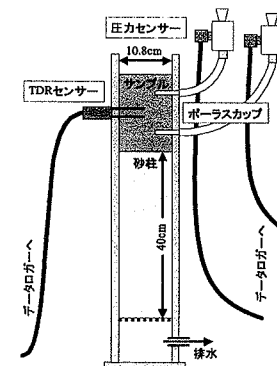


図-5 土壌水分特性計測方法

ツルヨシのみを本研究の対象とすることとした。

(2) 土層の土壌特性

ツルヨシ生育域において3箇所での表層の土壌を採土し、その土壌水分特性および透水係数を計測した。採土は内径10.8cm、長さ10cmの塩ビパイプへの押し込みで行った。

土はいずれの地点でも、表層のシルト混じり砂と、30cm以深にあった砂層とを分けて採土した。これらについて、図-3において①の表層と下層をそれぞれ1H, 1L, ②の表層と下層をそれぞれ2H, 2L, ③の表層と下層をそれぞれ3H, 3Lと表記する。

透水係数は、変水位法で行った。土壌水分特性は、緩やかな排水過程で、TDRセンサとテンシオメータの同時計測によって得た (図-5)。

図-6はその結果であり、カーブは次式、

$$\psi_s = \psi_e (\theta / \theta_s)^{-b} \quad (1)$$

で合わせたものである。ここに θ_s は飽和体積含水率、 ψ_s は空気侵入ポテンシャルである。これらの方法による土

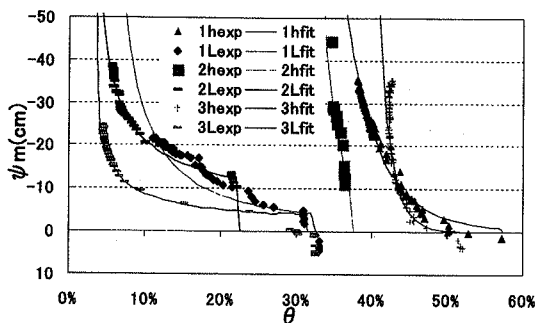


図-6 土壌水分特性

表-1 土壌パラメータ

No. of Material	1H	1L	2H	2L	3H	3L
θ_s	0.57	0.31	0.38	0.21	0.52	0.33
ψ_e (cm)	-1.02	-5.05	-9.22	-12.76	-0.12	-7.54
b	8.21	1.32	14.25	0.54	23.42	0.59
k_s (cm/s)	0.0065	0.0580	0.0022	0.0477	0.0248	0.0662
ρ_d (g/cm ³)	1.14	1.83	1.66	2.09	1.27	1.78

壤パラメータは表-1次のとおりである。また不飽和透水係数はCambell⁶⁾により、次式で $m=2b+3$ を与える事とする。

$$k = k_s (\theta / \theta_s)^m \quad (2)$$

これらを用いて、層構造および比高（伏流水面から地面高さ）の違いによる、水分輸送挙動の違いを見ることとする。計算では、3地点のうち、比高での中間的な位置にある地点②における、2H（シルト混じり砂）および2L（砂）のパラメータを用いる事とする。2Hは典型的なシルト質にみられる緩やかな土壌水分特性を表し、透水係数は最も小さい。2Lは、約10cmの毛管上昇高のある均一な細砂の土壌水分特性を表す。

3. SPACの計算

(1) SPACの概要

本研究ではSPACの計算手法は、Cambell⁷⁾の方法を基礎としている。詳細は原著に譲る。概要としては次の様に解く。①蒸発散量 E はPenmann-Montheith法により、気象条件と葉ポテンシャル ψ_L により支配される。②植物体内での土と葉のポテンシャル差（ $\psi_s(z) - \psi_L$ ）と揚水量 E との関係は電気回路アナロジーの式で表し、その抵抗 R を水輸送抵抗とする。根部分での抵抗は根密度と透水係数の関数となり、葉部分では一定値とする。葉部分では、蒸発散量の評価部分で、葉ポテンシャル ψ_L の関数となり制約がかかるようになっている。③土壌中のポテンシャル分布 $\psi_s(z)$ は、根による吸出しの分布（その積分値が E ）と、下端境界条件により、鉛直1次元のRichards式（土中の連続式と一般化Darcy則）を離散化して解くことによって得る。Cambellの方法と異なるのは、この部

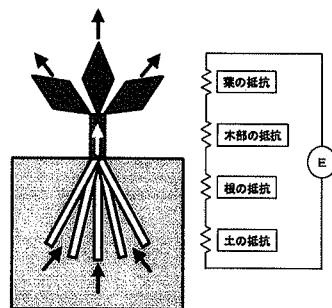


図-7 SPACのアナロジー

表-2 ツルヨシパラメータ

葉面積指数	6.53
根密度 (cm/cm ³)	
0-10cm	7.18
10-20cm	3.73
20-30cm	2.93
30-40cm	0.18
40-50cm	0.14
50-60cm	0.06

表-3 気象条件

	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
風速(m/s)	1.1	1.1
降水量(mm/day)	0.0	10.0

分の土壌水分特性に飽和領域も解く事ができるようにしている点である。④上記3つの条件から3種の未知変数（ E , $\psi_s(z)$, ψ_L ）を逐次に得る事ができる。

本研究では、下端を一定水位とし、上端の位置を高くして比高による応答の変化を見ることとした。また初期条件は、静水圧分布とした。

(3) 植生の体形パラメータ

SPACでの計算では、植物の情報は、蒸散に関する気孔パラメータと、体形に関するパラメータを用いる。体形のパラメータは、LAI（葉面積指数）と、根密度を要する。現地のツルヨシを採取し、LAIおよび根密度を計測した結果を表-2に示す。これと、葉での水輸送抵抗 $R_L=2.03 \times 10^{-4} \text{ m}^4 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ および、気孔コンダクタンスに関するパラメータ（限界葉ポテンシャル $\psi_e=-1000 \text{ J/kg}$, 気孔最小抵抗 $r_{ws}^{-1}=15 \text{ s/m}$ ）とし、以降のシミュレーションを評価した。このパラメータの正確な同定には、別の試験を待つ必要がある。

(4) 気象条件

本検討では、夏季を想定し、表-3のような条件を設定した。降雨のあるケースについても検討した。その場合については、京田辺市付近の8月の気象観測資料を元に、4日に一度、10mmの降雨があるとし、その時間分布は12時間での三角形降雨波形とした。

4. 結果と考察

(1) 無降雨条件での検討

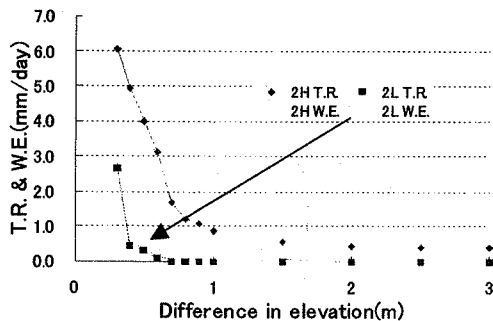


図-8 比高と日蒸散量・日伏流水交換量

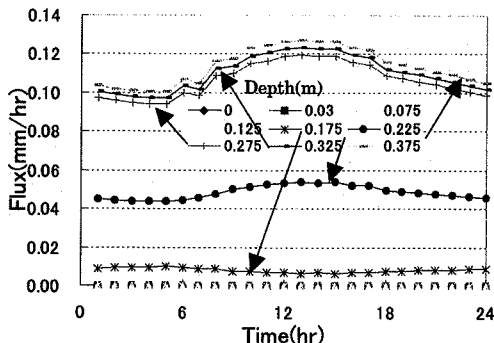


図-9 一日の鉛直水フラックスの変動 (2L, 比高30cm)

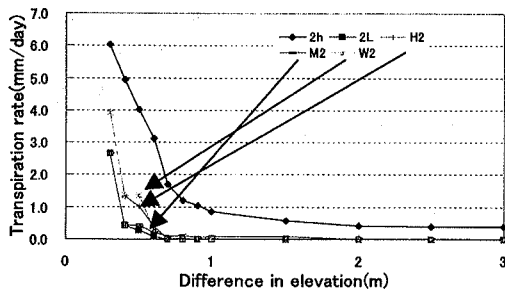


図-10 互層の場合の日蒸散量

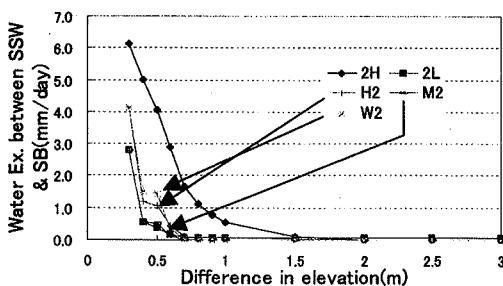


図-11 互層の場合の伏流水交換量

比高を変えていった場合の応答について、蒸散量 (TR) と伏流水面 (下端境界) との水交換量 (WE) とを 見ることと議論してゆく。図-8は砂層 (2L) とシルト混 じり砂層 (2H) におけるそれぞれの30日後の値を、地表 の比高を変えたケースを整理して見たものである。砂層 では無降雨では比高0.6m程度まで連続して蒸散可能な 範囲であり、砂だけでは鉛直輸送する事ができず、根が伏 流水面に届く高さまでしか蒸散できない。シルト混じり 砂の場合は比高が1mでもある程度吸上げが可能である。

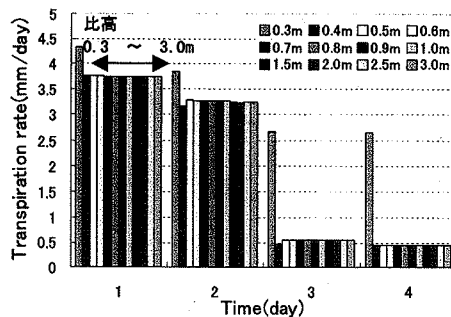


図-12 日蒸散量 (降雨あり, 砂層のみ)

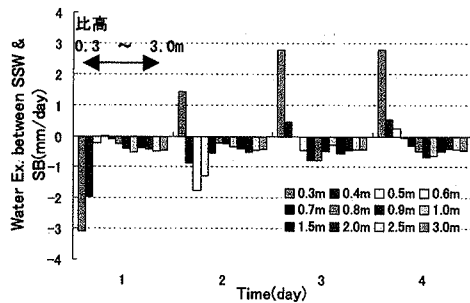


図-13 伏流水日交換量 (降雨あり, 砂層のみ)

(0.7m以上では、30日では定常にはならない。) 図-9 は深度毎の鉛直フラックス (上向き正) の時間変化であり、風がある影響で夜間もかなりの蒸散を示している。地表付近でのフラックスがないことから、殆どが根からの 吸出しで持ち出されている。蒸発については、地表での 日射が少ない等の条件から0.1mm/day以下と非常に少ない ので、考察の対象からははずす。

次に、層構造がある場合について検討した。層構造は、 砂層 (2L) を標準として、地表から10cmにシルト混じり 砂2Hを配置した場合 (Case-H2), 深度30cm~40cmの 10cmにこれを配置した場合 (Case-M2), 両方に配置し た場合 (Case-W2) について、計算した。図-10, 11はそ れぞれ、これらの30日後の日蒸散量と伏流水日交換量 (上向き正) の比高による違いである。この場合でも、 砂は毛管水が切れてしてしまうために、高い比高での蒸 散は継続できない。50cmより低い部分では、飽和度上昇 によってフラックスが大きく評価されている。

ここには表示しないが、材料の透水係数だけを大きく した仮想のケースについても検討したが、吸上げ可能な 比高について大きな変化はなかった。

(2) 降雨条件での検討

降雨は4日周期で与えている。以後、30周期計算した 最終周期の日データを示す。

図-12, 13は、砂層 (2L) の単層の場合の比高毎の日蒸 散量と伏流水日交換量 (上向き正) を表している。比高 30cmでは直接伏流水を利用できるため、高い蒸散量を維 持するが、その他の蒸散量は3, 4日目で低くなる。図-14 は比高1mの時の飽和度の鉛直分布の時間変化であるが、

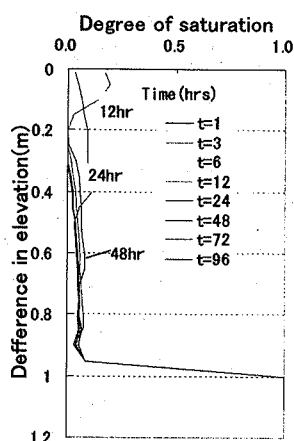


図-14 飽和度鉛直分布の時間変化（降雨あり、砂層のみ）

降雨は下方に輸送され、蒸散と合わせてすぐに表層付近の飽和度は小さくなることから、蒸散を維持できないことがわかる。下方への輸送が続く事は、図-13において下向きフラックスが続いていることから分かる。

図-15は、互層の場合を含んだ、4日間のそれぞれの日蒸散量の比高による違いを示している。HR, MR, WRはそれぞれシルト混じり砂（2H）が深さ10cmまで、30～40cmおよびそれら両方に配置された場合を表している。図-16は伏流水との日交換量を表している。

シルト層のみのRHの場合は、上向き輸送が卓越し、地表にある場合（HR, WR）は、その層での貯留が効いて伏流水への輸送が小さく、表層が砂の場合は、降雨直後の下方への輸送が効いて伏流水への下向きの供給が出てくることを示している。このように、層の配置によって、伏流水との交換の様子が大きく異なる事は、水質形成にとって重要である。

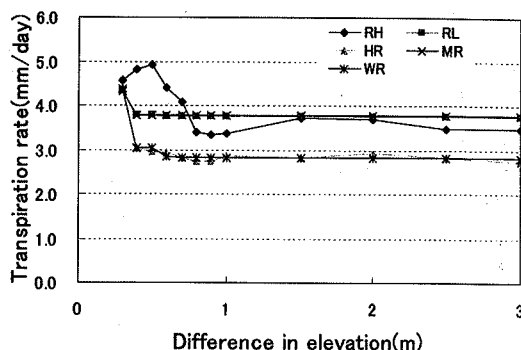
5. まとめ

本研究で得られた知見を、1) 植生（ツルヨシ）が生存するために有利な条件という視点と、2) 伏流水の交換（吸い上げ）が活発になるために有利な条件という視点でまとめると、以下のようになる。

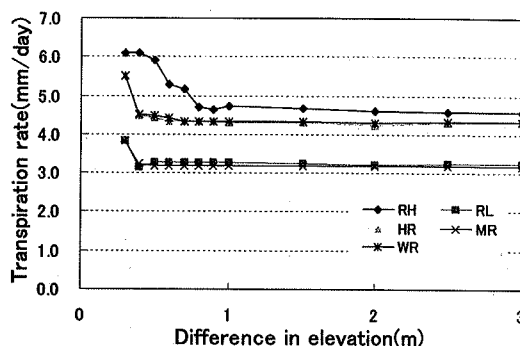
比高が低い場合には、蒸散においてはほぼ直接的に伏流水を吸上げ、物質を根の周辺に集約する。降雨の時には、表層の水・物質が速やかに伏流水に押し出される。

比高が高い場合は、砂の単層である場合には、降雨が頻繁にないと蒸散できず熱を処理できない。また速やかに深部まで水分拡散するので、効率が悪い。伏流水からみても、不飽和層全体への貯留に使われるので、水のやり取りは少ない。

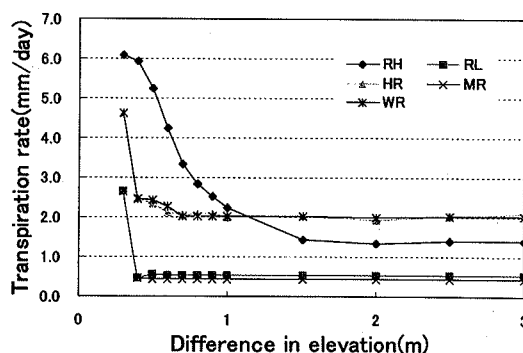
保水性のあるシルト混じり砂の単層の場合には、圧力伝播で水・物質を伏流水へ出入りしやすくなるが、このような層構造は想定しにくい。



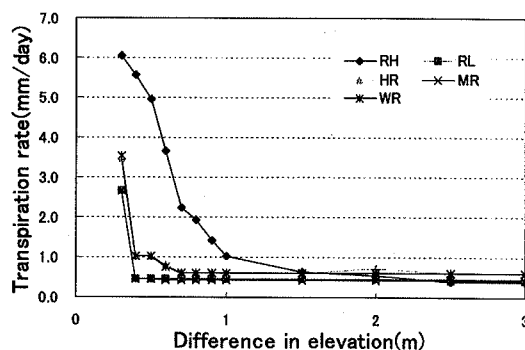
(a) 1日目



(b) 2日目



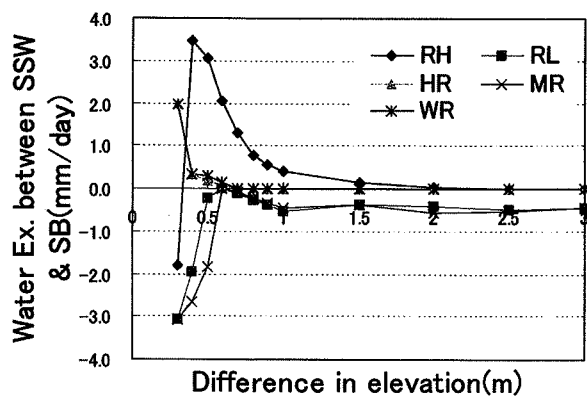
(c) 3日目



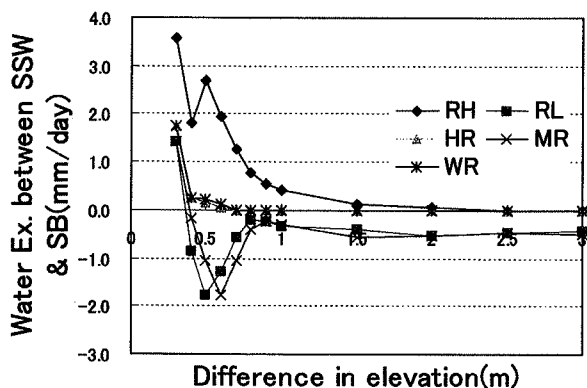
(d) 4日目

図-15 日蒸散量（降雨あり、互層あり）

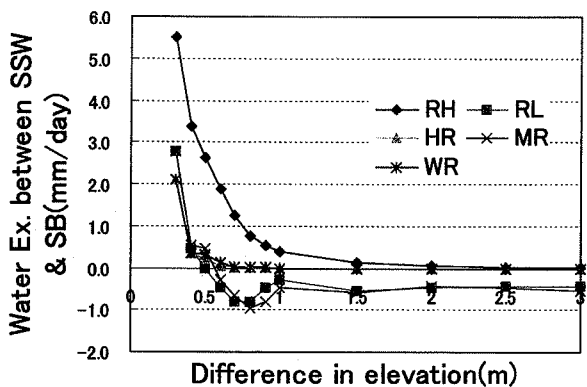
高い比高において、根系の範囲にシルト混じり砂がある場合には、雨水はそこに保水されるので有効に蒸散に使う事ができるが、伏流水との交換への寄与は期待できず、地表付近で水循環が閉じる。



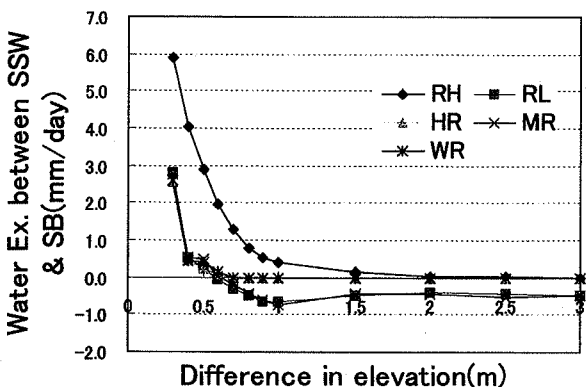
(a) 1日目



(b) 2日目



(c) 3日目



(d) 4日目

図-16 伏流水日交換量 (降雨あり, 互層あり, 上向き正)

降雨は一旦表層に貯留されて、なかなか伏流水まで到達できない。木津川砂州植生域ツルヨシの大半がこのような状況にあると考えられる。

中間にシルト混じり砂があると、水を貯留し、地表と伏流水とをつなぐ中継部分となる可能性がある。図-4のように互層を形成する状況も多く見られることから、木津川の砂州では重要な位置をしめる可能性がある。

今後は、植物の蒸散パラメータの精緻化を現地データを用いて行うとともに、定性的には現地との状況と対応する本検討で得られた内容が、量としての実データでも言えるのかどうかを検証する必要がある。

本検討での内容は、植生の蒸散を熱処理の可否という点で生育に結び付けて見ているが、その点の確認も必要である。伏流水水質形成の側面からは、比高と堆積層の内容、そして植物の種類により、鉛直輸送の様子とそれに乗って物質の伏流水への供給、または吸出しがどのように寄与するのか、砂州全体での役割に結びつく形での面的な検討も今後必要だろう。

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。また、本研究の一部は科学研究費補助金、基盤研究 (B) (1) (課題番号14350264, 研究代表者 辻本哲郎) の補助を得て行われた。

参考文献

- 1) 鷺見哲也・河戸則和・辻本哲郎 (2001) : 木津川砂州域における伏流水挙動に関する研究, 第56回年次学術講演会講演概要集, pp. 364~365.
- 2) 原田守博・三岡道治・小笠原孝行・矢澤真秀・青野求: 河畔砂州における伏流水質の支配要因に関する現地実験, 土木学会中部支部研究発表会概要集, pp. 143-144, 2004. 原田守博・(2004) :, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, II-46, pp. 225~226.
- 3) 原田守博・恒川明伸・西村智樹 (2001) : 土壌特性が河畔植物の生育に及ぼす影響, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, II-46, pp. 225~226.
- 4) 鷺見哲也・恒川明伸・辻本哲郎 (2003) : 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.
- 5) 鷺見哲也・荻島晃・片貝武史・辻本哲郎 (2000) : 砂州植生域の発達過程と植生の物理環境に関する研究, 河川技術に関する論文集 Vol. 6, pp. 65~70.
- 6) Cambell, G. S.: A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Sci., 117, pp. 311-314, 1974.
- 7) Campbell, G. S. (中野政詩・東山勇 訳) : パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版社, 192p. 1987.

(2004. 4. 7受付)