

間隙動物の生息場所に適した砂洲内環境の実験的研究

竹門 康弘*・田中 武志**・山田 浩之***・池淵 周一*

* 京都大学防災研究所

** 京都大学大学院工学研究科

*** 北海道大学大学院農学研究科

要 旨

モンカゲロウ (*Ephemera strigata*) などのカゲロウ類では砂洲上流端に位置する淵尻の瀬頭 (淵から瀬への移行部) に集中的に産卵する行動が知られている。このような産卵場所選択性は、砂洲内に発達する河床間隙水域の透水性や溶存酸素濃度などの物理化学的特性と関係していると考えられる。本研究は、平水時の砂洲内環境のうち、とくに間隙動物にとって重要な溶存酸素の分布様式や時系列変化に着目し、それらに影響を及ぼす要因について、間隙水の動態と関連付けて検討した。また、モンカゲロウ (*Ephemera strigata*) を対象に、河床間隙水域の物理化学的特性と卵の孵化率・死亡率、孵化した幼虫の生存率との関係を野外実験によって明らかにし、河床間隙水域の生態学的意義を考察した。その結果、卵の孵化率や幼虫の生存率は、砂洲の内陸側よりも瀬水際で高くなった。また、卵の孵化率や幼虫の生存率は間隙水の溶存酸素濃度と強い正の相関が見られた。一方、間隙水の溶存酸素濃度の高い場所は、多くの産卵行動が確認された瀬水際近傍の間隙水流速が大きな場所に限られており、砂洲内の大半で低かった。

キーワード：河床間隙水域、物理化学的特性、モンカゲロウ、産卵場所選択、河床間隙水流速

1. はじめに

河床内や砂洲のような氾濫原堆積物の内部において、河川水が浸透・浸出する場所は、河床間隙水域 (hyporheic zone) と呼ばれている (e.g. Orghidan, 1959; Wondzell and Swanson, 1996)。河床間隙水域は、水生昆虫や間隙動物の生息場所 (e.g. Bulton *et al.*, 1992; Williams, 1993)、あるいは河川生態系における物質の滞留や分解の場 (e.g. Pionke *et al.*, 1988; Valett *et al.*, 1996; Wondzell and Swanson, 1999)、河川水が濾過されることによる水質浄化作用 (e.g. Fiebig and Lock, 1991) などの生態的機能を果たし

ている。ところが、近年各地の河川で生じている砂洲の樹林化やツルヨシの繁茂によって、裸地の砂洲が減少し河床間隙水域の生態的機能が劣化していると懸念されている (竹門, 2003)。

河床間隙水域の機能については、降雨・増水イベントと関連付けて、河川の水質形成に及ぼす影響を調べた事例は多いが (Valett *et al.*, 1996; Wondzell and Swanson, 1996)、その構造や生態的機能を、河川動物の生息場所の視点から、野外において具体的に解明した研究はきわめて少ない (Bulton *et al.*, 1992; 田中ほか, 2003)。そこで、本研究では、平水時の砂洲内環境のうち、とくに間隙動物にとって重要

な溶存酸素の分布様式や時系列変化に着目し、それらに影響を及ぼす要因について、間隙水の動態と関連付けて検討した。また、モンカゲロウ (*Ephemera strigata*) の産卵場所に着目した現地での野外実験を通して、生物相と砂洲構造や砂洲内に発達する河床間隙水域の物理化学的環境との対応関係を解明し、生息場所としての砂洲の機能について考察・評価を行った。また、その結果に基づいて今後の河川管理のあり方について検討を行った。

2. 研究方法

カゲロウ類やカワゲラ目、トンボ目、トビケラ目、ガガンボ科など多くの水生昆虫の産卵場所について、瀬の上流側で産卵する現象が認められる(竹門, 1997)。とくにモンカゲロウなどのカゲロウ類では、砂洲上流端に位置する淵尻の瀬頭(淵から瀬への移行部)に集中的に産卵する行動が知られている(Takemon, 2000; 田中ほか, 2003)。このような産卵行動は、卵や孵化した若齢幼虫が河床間隙水域に入れるように産卵場所を選択していると解釈されている(竹門, 1997)。モンカゲロウは、日没頃に岸際に集まって産卵を行い、産卵を終えるとほとんどの個体は岸際にとどまり死んでしまう(Photo. 1), 翌朝流程に沿って産卵床の分布を比較的容易に調査することが可能である。したがって、本種は生物相と砂洲構造や河床間隙水域の物理化学的環境との対応関係を解明する上で非常に有効な指標種であると考えられる。そこで、本研究では実際にモンカゲロウの産卵行動の多く確認された砂洲(Photo. 2)において、卵を砂洲内の様々な地点に埋設し、砂洲構造や砂洲内に発達する河床間隙水域の物理化学的環境と卵の死亡率や孵化率、若齢幼虫の生存率の対応関係を解析した。

2.1 研究対象砂洲

本研究の調査は、淀川水系一級河川の鴨川の支流である鞍馬川で行った(Fig. 1)。鴨川流域では、昭和初期の大洪水を受けて主に戦後に整備が進み、流域全体を通して堰が数多く作られている。こうした整備に伴い河床が安定し、多くの砂洲で樹林化や植生の繁茂が認められるようになり、これに伴う景観の悪化や砂洲に生息・産卵する水生昆虫などに対する環境の変化が懸念されている。2003年5月3日から5日にかけて産卵床分布調査を実施し、なかでもモンカゲロウ産卵雌個体数が、比較的多く確認された雲ヶ畑川と鞍馬川の合流地点より0.6km上流地点の淵から瀬に移行する場に形成されている、比較的



Photo 1 Left: Swarm of the female mayflies above the oviposition site. Right: Females of *Ephemera strigata* under oviposition on the ground along shore of the bar head.



Photo 2 Picture of study site.

植生が繁茂せず裸地の多い砂洲(約180m²)を研究対象砂洲とした(Photo. 2)。なお、産卵行動は上空や砂洲が植生で覆われていない水際の陸域で確認され、前述の報告と同様に、日没頃に岸際に集まって産卵を行い、産卵を終えるとほとんどの個体は、岸際にとどまったまま死んでいた。砂洲の中央部では、高さ1mほどのツルヨシ(*Phragmites japonica*)が覆っており、その周辺では日陰になっている。砂洲の大半では、表面が粒径5cm~15cmの砂礫で覆われているが、砂洲下流部周辺では、有機物を含んだ砂が堆積している様子が観察された。また、砂洲上流端部には、小さなわんどが見られた。

2.2 砂洲内間隙水域の物理化学環境調査

この砂洲全域において、2003年5月3日から10日にかけて水準測量による地形測量および現地透水試験を行った。さらに、砂洲全域に間隙水位観測孔・採水管を設置し、間隙水の水質・水温ならびに間隙水位標高を計測した。上記の調査を、降雨・出水直後を避けて2003年5月4日、5月24日、6月7日、6月22日、7月9日までの約2週間毎に実施した(Fig. 2)。また、調査最終日には砂洲内の30地点(Fig. 3)において砂洲内間隙材料を採取した。



Fig. 1 Location of the Kamo River and the study site in the Kurama River. Solid circle in the right figure indicates the study site.

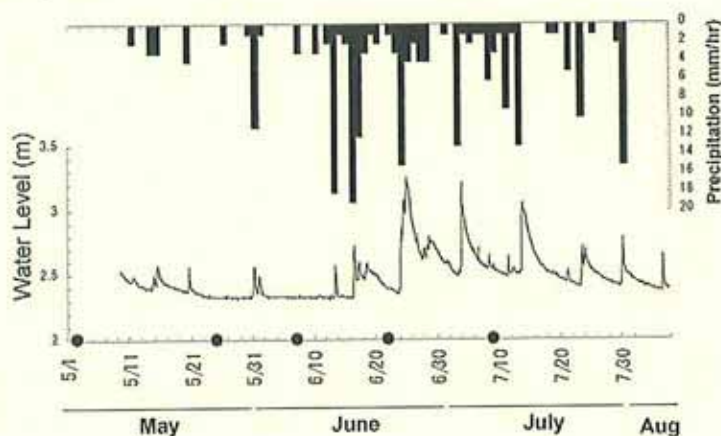


Fig. 2 Fluctuations of water level in the study site with precipitation from May to Aug. 2003. Solid circles indicates sampling dates.

(1) 砂洲内間隙構造の評価手法

主に河川生態学の分野で、生物相と底質環境の関係について論じる際には、底質環境の特徴として、浮石およびはまり石(可児, 1944)や、砂礫の優占する粒径などが用いられてきた(e.g. Wright *et al.*, 1989; Richard and Host, 1994)。しかしながら、砂洲内に発達する河床間隙水域(以後、砂洲内間隙水域と呼ぶ)などの河床内部に生息する生物にとっては、砂洲内間隙水域の透水性や溶存酸素濃度などの物理化学的特性が重要であると考えられ、河床内部材料に着目する必要がある。砂礫の間隙中を流れる浸透流の流速は、ダルシー則を用いて透水係数と動

水勾配の積で求められる。現地での正確な透水係数を求めることによって、河床間隙水の流動特性を把握した。

本研究では、透水係数の分布を求めるために、比較的透水性が良い場合はパッカー法、悪い場合には非定常法であるピエゾメーター法を用いて透水係数(k)を算出した。パッカー法(packer test; Hvorslev, 1951)は、井戸孔内の試験河床に一定水圧(h)を作用させ、定常になった状態での流出流量(Q)を測定して透水係数(k)を求める透水試験法である。また、透水性が良い地盤でも適用可能で、スラッグテストなどの非定常法よりも比較的精度の良い方法である

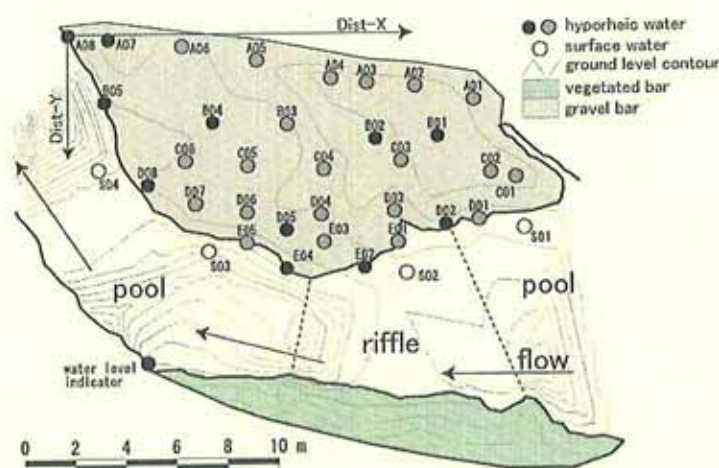


Fig. 3 Location of study site on a bar and sampling point. Contour interval of ground surface level is 0.2 m. Each circles indicate water quality survey points. Specially, gray circles indicate the position of the wells for hyporheic water level survey.

(河野・西垣, 1983; Yamada *et al.*, in press).

浸透流が層流と仮定される場合, パッカー法を用いた透水係数は式 (1) によって算出される (Hvorslev, 1951; 西垣, 1986)。

$$k = \frac{Q}{2\pi hl} \sinh^{-1} \left(\frac{l}{2r} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, l は試験区間長 (ストレーナ区間長), r は井戸の内径である。

また, ピエゾメーター法は, 井戸孔内の水位を急上昇させ, その水位の回復を経時的に計測して透水係数 k を測定する非定常の現地河床透水試験法である。ピエゾメーター法を用いた透水係数は式 (2) によって算出される (Hvorslev, 1951; 西垣, 1986)。

$$k = \frac{r^2}{2l(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \sinh^{-1} \left(\frac{l}{2r} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, h_i は時刻 t_i における水位である。

本研究では試験深度は間隙水面より約 30cm とし, 十分に飽和している位置にて試験を行った。試験区間長 l : 50mm, 内径 r : 46mm の井戸を使用し, 水位計は間隙水圧式水位計 (Log 電子 EXL-001B; 精度 1mm) を用いた (Photo. 3)。

一方, パッカー法やピエゾメーター法は, 浸透流を層流 (ダルシー流) と仮定するため, 土の種類によっては, 動水勾配が大きくなると乱流状態に移移する。したがって, 透水性の高い河床の場合には動水勾配と浸透流速が比例する層流範囲を確認しておかなければならない。土質工学会 (1979) によると, 10% 粒径 D_{10} が 9.5mm 以上の礫の場合は, 通常の動水勾配では常に乱流状態であるため, ダルシーの法則は適用不可能である。

そこで, 調査最終日の 2003 年 7 月 9 日に, Fig. 3 中で B03 と C02 を除いた 30 地点において, 間隙水面より深度 15cm~20cm の河床内部材料を 300cc のステンレス製カップを用いて, 約 2 杯分 (400~600cc) の河床材を採取した。試料を乾燥させた後に, ふるい (31.5mm, 16mm, 8mm, 4mm, 2mm, 1mm, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m) を用いてふるい分けをし, 各ふるいに残留した試料を秤量した。これにより得られた粒径加積曲線により, 各ふるいの通過重量百分率, 10% 粒径 D_{10} , 30% 粒径 D_{30} , 50% 粒径 (平均粒径) D_{50} , 60% 粒径 D_{60} を求めた。また, 粒度分布の特性を把握するために, 均等係数 $U_c (U_c = D_{60}/D_{10})$ および曲率係数 $U_c' (U_c' = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}))$ を求めた。

(2) 間隙水位調査

砂洲内の間隙水位分布を把握するため, 砂洲内陸側から水際にかけて 5 本の調査ライン (A~E ライン) を設定し, これらのライン上に塩化ビニール製の間隙水位観測孔 21 地点および河川水位計測地点を設けた (Fig. 3)。その際, 間隙水位観測孔は, 河床間隙水域の間隙水位を十分に観測できる深度 (約 50cm) まで設置した。観測孔は 30mm 径で, 有効区間は地表面から掘削深度までとした。また, 水準測量により観測孔の位置座標・管頭標高を計測した。その際, 位置の原点は A08 地点 (Fig. 3) とし, 標高は淵の最深部を 0m とした。観測孔内で巻尺式水位計を用いて地表面から間隙水面までの深度を計測し, 間隙水位標高に換算した。

(3) 間隙水質および水温調査

砂洲内の 32 地点において (Fig. 3), シリコンチューブ (60cm) の先端にアクリル繊維の綿で栓を



Photo 3 Permeability test in the field.

した採水管を河床間隙水域の間隙水を十分に採水できるように間隙水位より深度 15cm~20cm に埋設した。この採水管設置地点ならびに河川本流の 4 地点 (Fig. 3) で、前述した調査日に河床間隙水ならびに河川表流水の溶存酸素濃度 (DO), 電気伝導度 (EC), pH, 水温を測定した。なお、水温・溶存酸素濃度はポータブル溶存酸素計 (YSI/Nanotech Inc., YSI Model 95), 電気伝導度はポータブル電気伝導度計 (YSI/Nanotech Inc., YSI Model 30), pH はポータブル pH 計 (HORIBA Ltd., B-212) を用いて現地にて測定した。

2.3 モンカゲロウの卵を用いた野外孵化実験

2003 年 5 月 2 日の夕方に、砂洲の瀬水際付近に集まった産卵前の雌個体をネットにより捕獲し、それらより卵の採取を行った。モンカゲロウ雌個体は 1 個体につき、約 7500 個の卵を持つ (岡崎, 1984)。採取した卵を河川水によって攪拌して、3 個体分の卵を 65 μ m メッシュのプランクトンネットを用いて作成した孵化実験用ケース (Fig. 4) に注入し、それらを 2003 年 5 月 2 日に Fig. 3 中で B03 と C02 を除いた 30 地点に 4 ケースずつ、計 120 ケースを埋設した。モンカゲロウの卵は野外条件下では約 3 週間で 30% 程度孵化する (田中ほか, 2003) ことから、埋設した実験卵を降雨・出水直後を避けて、2002 年 5 月 24 日 (22 日目), 6 月 7 日 (36 日目), 6 月 22 日 (51 日目), 7 月 9 日 (66 日目) の約 2 週間毎に各地点から 1 ケースずつ回収し、現地にて 5% ホルマリン溶液で保存した。

回収したサンプルをシャーレに移し、カメラ付き実体顕微鏡により撮影を行い、WinROOF ver5.03 (MITANI Corporation, 2003) を用いて画像処理をした後、生存卵数、死亡卵数、孵化殻数、生存幼虫数、死亡幼虫数を数えた。その際、卵状態の

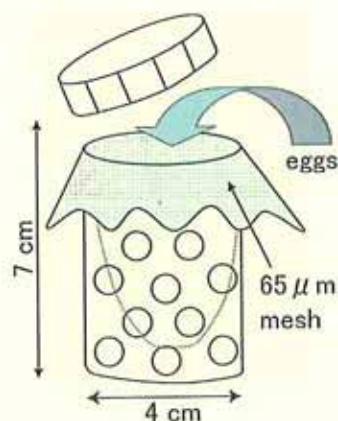


Fig. 4 experimental case for rearing eggs of the mayfly *E. strigata* in the field, made with 65 μ m mesh net.

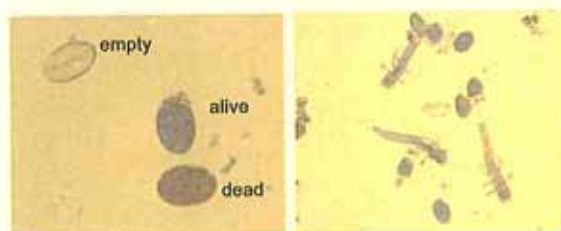


Photo 4 Left: Standard for judging the state of eggs of *Ephemera strigata*. Right: Embryos at 36 days after settling eggs in the field.

判断基準は、黒く変色した卵を死亡卵、中身が空になっているものを孵化殻、その他を生存卵 (Photo. 4) とした。また、幼虫の生死の判断基準は、肢や尾、触角がしっかりしており、消化管内容物が確認できるものを生存幼虫 (Photo. 4) とし、腐ったりしているその他のものを死亡幼虫とした。

得られたデータを基に、全卵数 (= 死亡卵数 + 生存卵数 + 孵化殻数) および全幼虫数 (生存幼虫数 + 死亡幼虫数) を求め、卵死亡率 (= 死亡卵数 / 全卵数), 卵孵化率 (= 孵化殻数 / 全卵数), および孵化数に対する幼虫生存率 (= 生存幼虫数 / 全幼虫数) を算出した。孵化数に対する幼虫生存率とは、孵化した幼虫の生存率を表す変数であり、幼虫にとって、生息しやすい環境であるかを示す指標である。さらに、孵化率と孵化数に対する幼虫生存率の積をとることで、全卵に対する幼虫生存率 (孵化率 $\times$ 孵化数に対する幼虫生存率) を算出した。全卵に対する幼虫生存率は、全卵のうち、孵化に成功し、かつ孵化した幼虫が生存し続けている割合を示したものである。なお、生存幼虫数 / 全卵数ではなく、孵化率と孵化数に対する幼虫生存率との積をとるのは、必ずしも孵化殻数と生存幼虫数 + 死亡幼虫数が等しいわけではないためである。

2.4 資料解析方法

各調査時に得られた間隙水位データを TIN によって線形内挿し、各調査地点における動水勾配 (i) を求めた。また、ボロノイ分割法により透水試験位置を中心として砂洲を分割し、各領域内に透水係数を与えた。その際に、透水係数を与える範囲は、現地透水試験の影響範囲を考慮し、透水試験位置より最大でも半径 2m 以内までとした。これより得られる動水勾配 (i) と透水係数 (k) より、次式のダルシー式を用いて、みかけの間隙水流速の大きさ ($|v|$) を算定した。

$$v_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad \dots\dots (3)$$

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \dots\dots (4)$$

また、各調査時における各水質項目についても、TIN(Triangulate Irregular Network) によって補完を行い、それぞれの分布を推定した。さらに、調査期間中の砂洲内間隙水域の物理化学的環境の平均的な分布、変化のしやすさを把握するために、各地点の間隙水位や動水勾配、間隙水流速、水質の平均値・標準偏差を求めた。各調査時の砂洲内間隙水域の水質濃度および、それらの平均値・標準偏差を、TIN によって線形内挿を行い、それぞれの分布を推定した。また、これらの分布と砂洲の位置の関係を把握するために、A08 地点を位置座標原点とし、砂洲下流端からの距離を示す X 方向の距離 (Dist-X; Fig. 3), ならびに水際線からの距離 (Dist-R) を求めた。なお、これらの解析には、ArcView GIS Ver. 3.2a (Environmental Systems Research Institute Inc., 1996) を用いた。

さらに、砂洲内間隙水域の物理化学的環境要因の相互関係およびモンカゲロウの卵孵化率・死亡率や幼虫の生存率との関係を検討するため、砂洲内のデータのみを用いて、調査時ごとに単相関分析を行った。以上の統計解析では、パラメトリックな解析を行うため、正規性を示さなかった間隙水流速は $\log(x+1)$ 、透水係数は $\log(x)$ に変数変換した (Sokal and Rohlf, 1997)。なお、統計解析には、SPSS for Windows Ver.10.1.3J (SPSS Inc. 2001) を用いた。

3. 結果および考察

3.1 砂洲内間隙水域の物理化学的特性

(1) 透水性の平面分布

現地河床透水試験の結果、この砂洲の透水係数は、 $0.1 \times 10^{-5} \sim 1.87 \text{ cm/sec}$ の範囲にあった。これらの

値は、地盤工学会 (2001) によれば、通常の河川の河床材で得られる値の範囲であった。また、砂洲の上流部側では、下流部や内陸側と比較しても、透水係数が 1 ケタほど高くなる傾向があった (Fig. 5)。これは、瀬頭に位置する砂洲上流部で河床が攪乱されやすく比較的大きな砂礫が堆積しやすいためと考えられた。

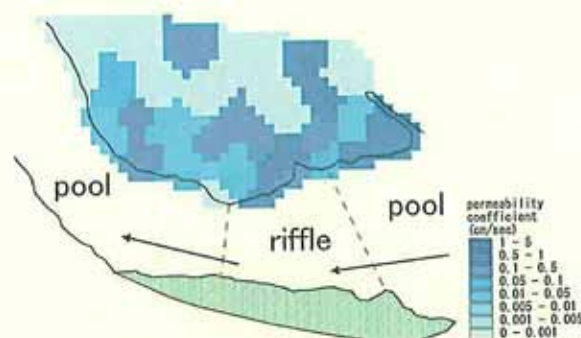


Fig. 5 Spatial distribution of permeability coefficient.

(2) 砂洲内材料の粒度分布

土の種類によっては、動水勾配が大きくなると乱流状態に遷移する。土質工学会 (1979) によると、10% 粒径 D_{10} が 9.5mm 以上の礫の場合は、通常の動水勾配では常に乱流状態であるため、ダルシーの法則は適用不可能である。しかしながら、本研究対象砂洲においては、全域において 10% 粒径 D_{10} は 9.5mm 以下であり (Fig. 6(a)), 平均が 1.1mm であった。したがって、動水勾配が 0.2~0.3 以下であれば、ダルシー則は十分適用可能であると考えられた。また、各%粒径の分布に着目すると、いずれも砂洲上流端の瀬水際において、大きくなる傾向を示した (Fig. 6(a)-(d))。均等係数 U_c は、砂洲上流端において周囲と比較して、やや小さいものの、曲率係数 U_c' も砂洲全域において、大きな値を示していた (Fig. 6(e),(f))。したがって、砂洲内間隙材料は全体的に粒径幅が広く、砂洲は様々な粒度のものよりバランスよく構成されていると考えられた。一方、砂洲上流端水際においては、周囲よりも均等係数がやや小さく、若干ながら大きな粒径に偏りがあると考えられた。

また、各粒径間の質量百分率を見ると、粒径が 16~31.5mm のような粗礫分では、砂洲上流端で大きくなり、透水性の分布とよく一致していた (Fig. 7(b))。また、4-8mm 間質量百分率といった中礫分になると、砂洲全域において分布にほとんど偏りが見られず (Fig. 7(d)), 2-4mm, 1-2mm, 0.5-1mm 間質量百分率といった細礫分や粗砂分となると、粗礫分とは反対に、砂洲下流端側や内陸側で大きくな

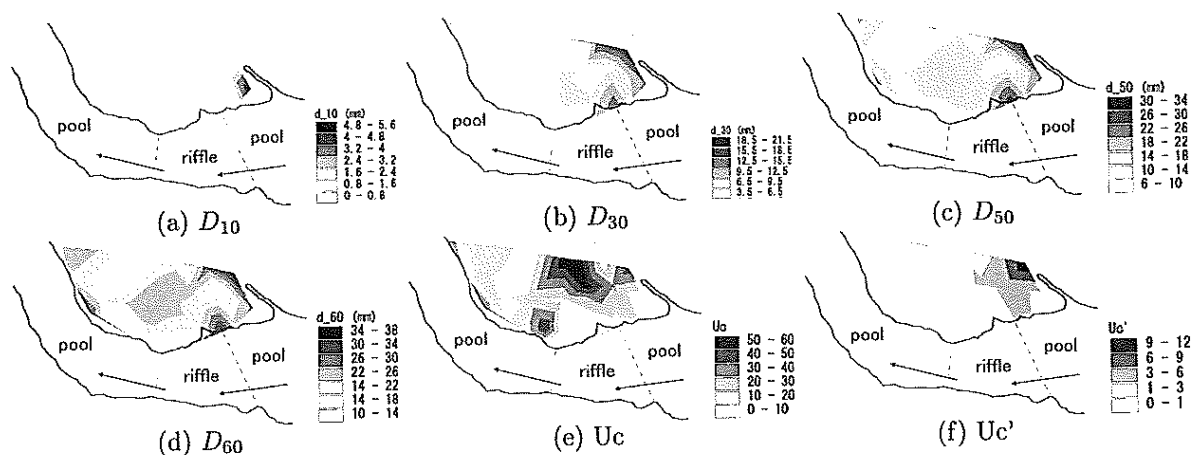


Fig. 6 Spatial distributions of D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , U_c , U_c' .

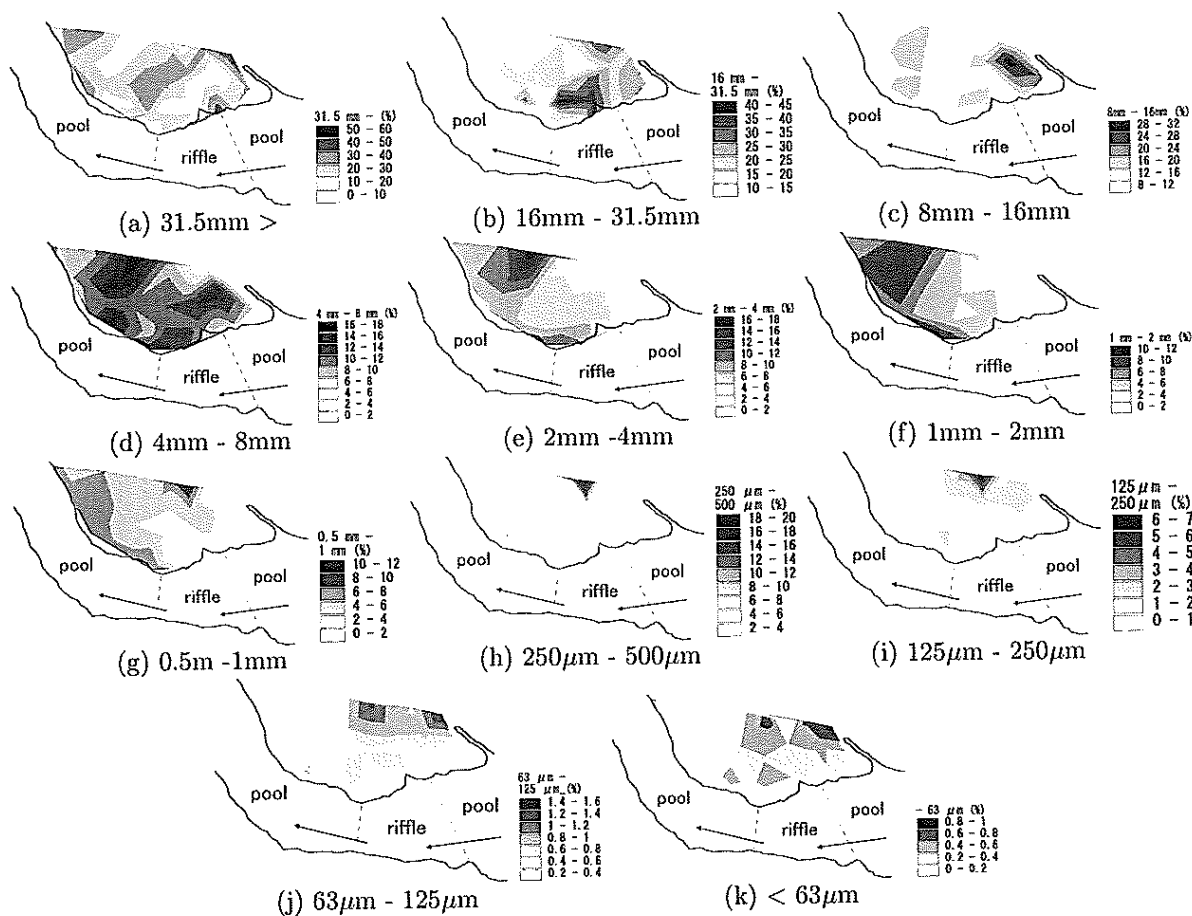


Fig. 7 Spatial distributions of weight percentages of classified grain size.

る傾向が得られた (Fig. 7(e),(a),(b))。しかしながら、 $250\mu\text{m}$ 以下の細砂分やシルト分においては、砂洲下流の水際と比較すると、内陸側および砂洲上流側において、大きな値を示す傾向があった (Fig. 7(d),(e),(f))。

(3) 砂洲内間隙水の流動特性

調査時によって砂洲内間隙水位に多少違いはあったが、砂洲内の間隙水位の分布パターンは、どの調査時においても砂洲上流から砂洲下流に低下する

傾向があり、調査期間を通して河川水が砂洲上流から浸透し、下流に流下していると推測された (Fig. 8)。一方、砂洲内間隙水位の標準偏差は、透水係数の高い部分で高くなる傾向が得られ (Fig. 5, Fig. 8(g))、こうした透水係数の高いエリアでは比較的河川水と間隙水の交換が行われやすいと考えられた。

砂洲内の動水勾配の分布については、水位変動による多少の違いはあるものの、調査期間を通して、砂洲上流端の河川水の浸透する瀬水際、および浸出

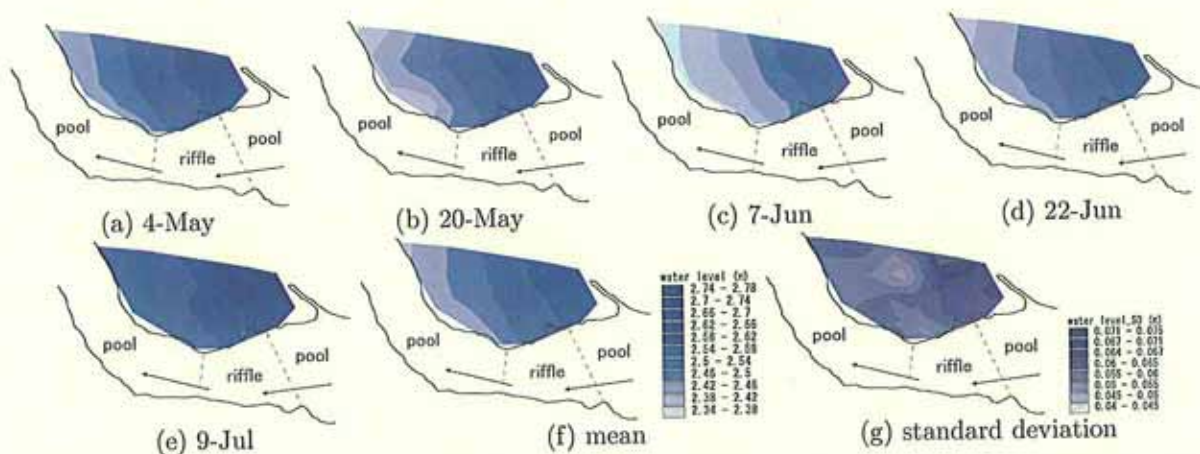


Fig. 8 Spatial distributions of hyporheic water level at each sampling dates, mean value and standard deviation of hyporheic water level. Arrows indicate current direction.

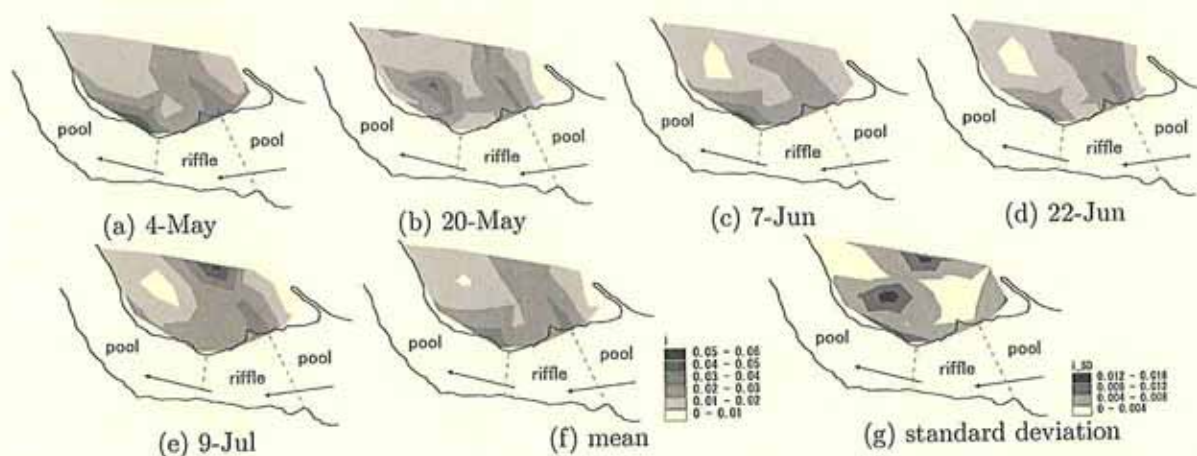


Fig. 9 Spatial distributions of hydraulic gradient at each sampling dates, mean value and standard deviation of hydraulic gradient. Arrows indicate current direction.

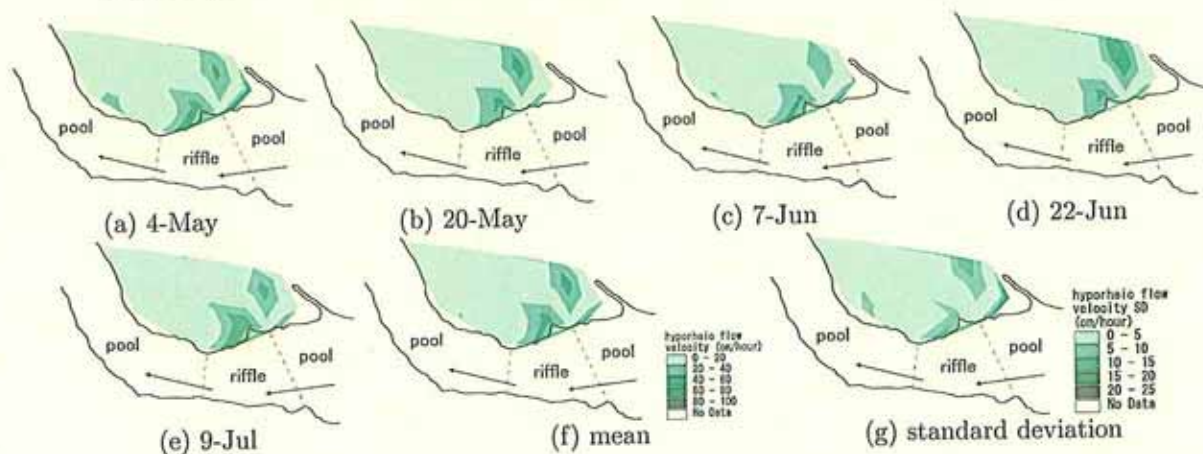


Fig. 10 Seasonal changes in spatial distributions of hyporheic flow velocity in the bar (a)-(e). The mean value (f) and standard deviation (g) of hyporheic flow velocity through the study period. Arrows indicate flow direction in the stream channel.

する下流側の水際において大きくなる傾向が得られた (Fig. 9)。これは、上流端においては、河川本流の瀬の影響を受けて大きくなっており、下流側に関しては、透水性が低いために、動水勾配が大き

くなっていると考えられた。動水勾配の標準偏差分布を見ると、砂洲上流端および下流側において小さくなる傾向が得られた。上流端では瀬によって高く維持されており、下流側においては瀬の影響によ

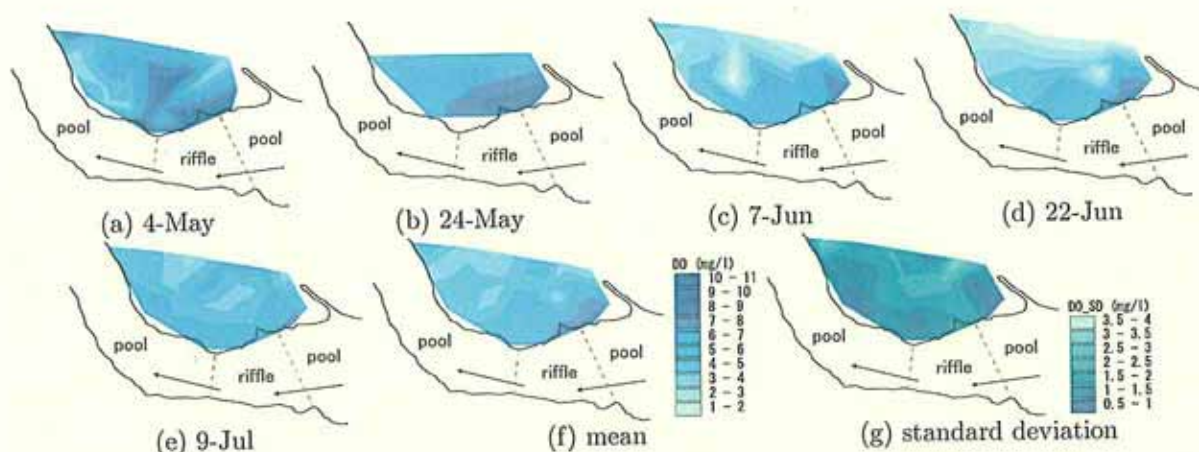


Fig. 11 Seasonal changes in spacial distributions of dissolved oxygen concentration of the hyporheic water in the bar (a)-(e). The mean value (f) and standard deviation (g) of dissolved oxygen concentration through the study period. Arrows indicate flow direction in the stream channel.

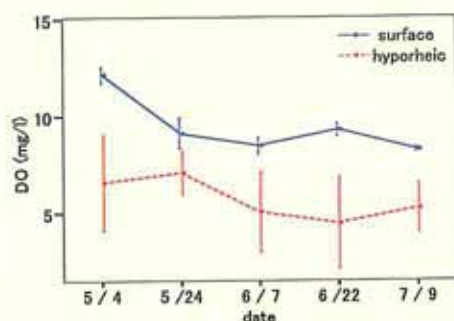


Fig. 12 Seasonal changes in dissolved oxygen concentration of the surface water in the channel and hyporheic water in the bar through the study period.

て低く維持されていると考えられた (Fig. 9(g)). また、この砂洲内では、最大動水勾配が 0.054 であり、動水勾配が 0.2~0.3 以下であるため、ダルシー則は十分適用可能であると考えられた (土質工学会, 1979)。また、砂洲内間隙水流速についても、水位変動による多少の違いはあるものの、調査期間を通して、砂洲上流端の河川水の浸透する瀬水際において、大きくなる傾向が得られた (Fig. 10)。間隙水流速の標準偏差分布を見ると、間隙水流速分布パターンとほぼ同様であり、動水勾配や透水性の小さな下流側や内陸側においては、ほとんど水位変動の影響を受けないが、瀬の発達する上流端では、水位変動も大きいので、変動が大きくなると考えられた (Fig. 10(g))。しかしながら、標準偏差は大きいものの、間隙水流速の絶対値に関しては他の場所よりも常に高いので、この砂洲は上流端において非常に水交換性が高いと考えられた。

(4) 砂洲内間隙水域の溶存酸素濃度分布

溶存酸素 (DO : Dissolved Oxygen) は水生動物が生息する上で、重要な環境要因の一つであり、水が停滞しやすい河床間隙水域に生息する河床間隙生物にとっては特に重要である (Baker *et al.*, 2000)。溶存酸素量は、一般に重量濃度 (mg/l) や飽和度 (%) で表示し、大気と水が十分に混合され、大気中の酸素濃度と水中の酸素濃度が平行状態にあるときの水中の溶存酸素量を 100% とし、それを超えるときには過飽和、それに足りないときには不飽和という。一般に、純水の溶存酸素飽和量は、水温が高くなるほど低下する。

調査時の河川本流の溶存酸素濃度および飽和度は、 $12.2 \pm 0.4 \sim 8.2 \pm 0.1 \text{ mg/l}$, $122.8 \pm 4.0 \sim 98.7 \pm 13.7\%$ の範囲であり (Fig. 12), 調査期間中を通して、常に過飽和に近い値を維持していた。これは、瀬近傍の河川水は過飽和状態であるためと考えられた。また、5月4日の溶存酸素濃度および飽和度は、5月24日、6月7日、7月9日より有意に高く ($p < 0.01$, Scheffe's test), その他の調査日間では有意差は認められなかった (n.s., Scheffe's test)。したがって、河川本流においては、調査期間中を通して、十分な溶存酸素濃度が維持されていたと考えられる。一方、本研究対象砂洲における溶存酸素濃度の分布は、調査期間を通し、砂洲上流に位置する瀬水際付近において高くなる傾向があり (Fig. 11), 標準偏差も小さいことがわかった (Fig. 11(g))。これは、内陸側や砂洲の下流側と比較して、砂洲上流端の瀬水際付近に溶存酸素濃度がより安定して供給されるためと考えられた。一方、季節とともに全体的に溶存酸素濃度が低下していき、砂洲内陸側では、 5 mg/l を下回る場所も存在した (Fig. 11)。

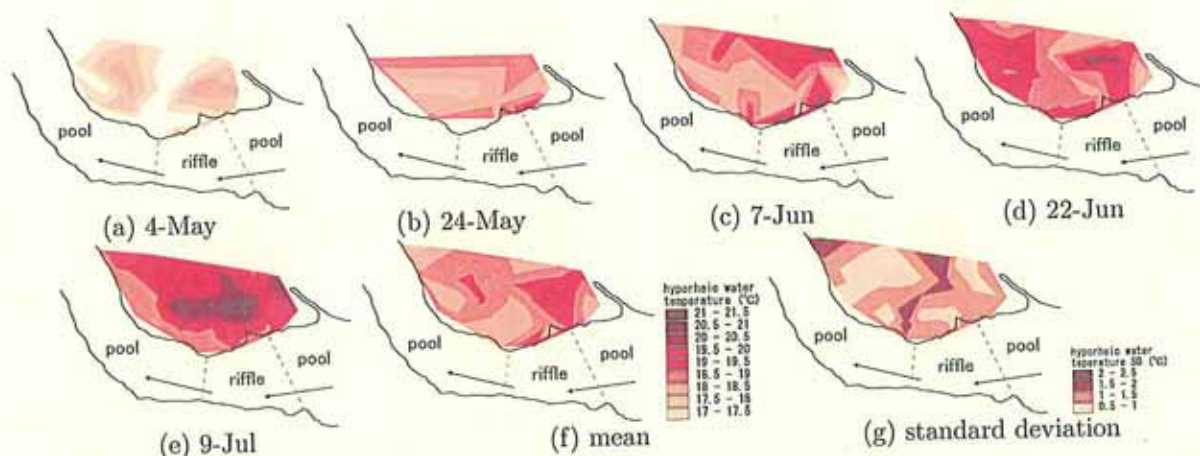


Fig. 13 Spatial distributions of hyporheic water temperature at each sampling dates, mean value and standard deviation of hyporheic water temperature. Arrows indicate current direction.

3.2 砂洲内間隙水域の水温分布

太陽からの日射量の地域的、季節的な変化は、砂洲構造や河川における光条件を変化させるばかりでなく、砂洲内間隙水温の変化を生じさせ、そこに生活する生物に大きな影響を与えられとされる。一つは、水温の生物活動への直接の影響である。極端な低温または高温の場合は別として、一般に温度が10℃上がると、生物の活性がおおよそ2倍になることが知られている(西條・三田村, 1995)。もう一つは、水温の季節変化による溶存酸素濃度やpHといった水質環境変化を介した生物への影響である。

調査時における河川水温は、6月7日と6月22日、6月22日と7月9日との間では有意差が認められず(Scheffe test, n.s.), 残りの調査日間では有意な差が認められ、季節とともに単調に増加する傾向が認められた(Scheffe's test, $p < 0.01$, Fig. 14)。一方、砂洲内間隙水温も同様に、季節とともに単調増加する傾向が認められた(Fig. 13)。また、調査期間中においては、全体的に河川水温と比較して、砂洲内間隙水温の方が1℃程度高い傾向が認められた(Fig. 14)。これは、砂洲では地表面が裸地であるため、日射の影響を強く受けるためと考えられた。平面分布に関しては、とくに砂洲上流端の内陸側および瀬水際において、間隙水温が高くなる傾向が認められた(Fig. 13)。したがって、間隙水温環境に関しては、砂洲上流端の方がより影響を受けやすいと考えられた。

3.3 砂洲内間隙水域における物理化学的環境要因の相互関係

砂洲内間隙水域の透水性に及ぼす要因を明確にするために、砂洲下流端からの距離を示すX方向の距離(Dist-X)、水際線からの距離(Dist-R)、お

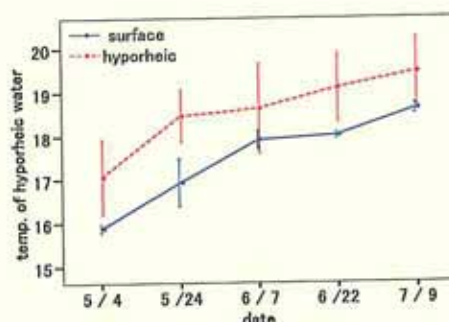


Fig. 14 Chronological changes of the river water temperature and hyporheic water temperature from 4-May to 7-Jul.

よび砂洲内間隙材料の分布諸特性との相関関係を求めた。その結果、Dist-X($r=0.50$, $p < 0.01$), および D_{10} ($r=0.38$, $p < 0.05$), 8-16mm 間質量百分率($r=-0.45$, $p < 0.05$)とは有意な正の相関、均等係数 U_c , 0.5-1mm($r=-0.60$, $p < 0.01$), 250-500 μ m($r=-0.48$, $p < 0.05$), 125-250 μ m 間質量百分率($r=-0.37$, $p < 0.05$)とは有意な負の相関がみられた(Table. 1)。したがって、透水性の分布は、河川本流水際からの距離よりも、河川に沿った砂洲の縦断方向に依存していることがわかった。また、これは砂洲上流端にいくほど、大きな粒径の材料に偏るためだと考えられた。

間隙水の溶存酸素濃度と間隙水の他の水質濃度、物理的要因との対応関係を明確にするため、全ての変量間で、調査時期ごとに相関分析を行った。その結果、溶存酸素濃度は大半の調査時で、砂洲下流端からの距離(Dist-X), pH, 透水係数(k), 砂洲内間隙水流速(v)との間に正の相関、水際線からの距離(Dist-R), 電気伝導度(EC), 砂洲内間隙水温(HWtemp)との間に負の相関が認められた(Table. 2)。なかでも、間隙水流速や間隙水温, pH との相

Table 1 Correlation coefficients between permeability coefficient (k) and other variables. k was transformed to $\log(k)$. * and ** indicate significant levels at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. r: correlation coefficient, p: significance probability, n: number.

variables	r	p	n	variables	r	p	n
Dist-X	0.50	**	32	8 - 16mm	0.45	*	30
Dist-R	-0.08		32	4 - 8mm	0.23		30
D_{10}	0.38	*	30	2 - 4mm	-0.03		30
D_{30}	0.33		30	1 - 2mm	-0.22		30
D_{50}	0.18		30	0.5 - 1mm	-0.60	**	30
D_{60}	0.07		30	250 - 500 μ m	-0.48	*	30
Uc	-0.47	*	30	125 - 250 μ m	-0.37	*	30
Uc'	0.14		30	63 - 125 μ m	-0.07		30
- 31.5mm	-0.01		30	- 63 μ m	0.18		30
16 - 31.5mm	0.20		30				

Table 2 Correlation coefficients between dissolved oxygen concentration (DO) and other variables on the each sampling dates. * and ** indicate significant levels at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. Variables with † and †† were transformed to $\log(x)$ and $\log(x+1)$. r: correlation coefficient, p: significance probability, n: number.

variables	DO														
	4-May			24-May			7-Jun			22-Jun			9-Jul		
	r	p	n	r	p	n	r	p	n	r	p	n	r	p	n
Dist-X	0.32		26	0.68	*	13	0.46	*	26	0.36		28	0.35	*	32
Dist-R	-0.24		26	-0.12		13	-0.39	*	26	-0.61	**	28	-0.41	*	32
$k^\dagger$	0.26		26	0.82	**	13	0.47	**	26	0.39	*	28	0.26		32
i	0.37		26	-0.07		13	0.28		26	0.08		28	0.23		32
$v^{\dagger\dagger}$	0.38		26	0.59	*	13	0.62	**	26	0.37		28	0.33		32
pH	0.69	**	30	0.75	**	17	0.76	**	30	0.76	**	32	0.49	**	36
EC	-0.56	**	30	-0.46	*	17	-0.37	*	30	-0.42	*	31	-0.75	**	36
HWtemp.	-0.47	**	30	-0.48	*	17	-0.43	*	30	-0.32		32	-0.52	**	36

Dist-X: distance from down edge of the bar, Dist-R: distance from river's edge, i : hydraulic gradient, k : permeability coefficient, v : hyporheic flow velocity, EC: Electric Conductivity, HWtemp: hyporheic water temperature.

関係数が高くなる傾向があった (Table. 2)。これは、間隙水流速の増加に伴う水交換性の増加、間隙水温上昇による砂洲内間隙水域の溶存酸素飽和量の低下が要因であると考えられた。また、生物の呼吸による溶存酸素の消費・炭酸ガスの排出によって pH の低下がおきていると考えられた。

一方、季節変化に着目すると、砂洲内間隙水温は季節にともなって単調に増加し (cf Fig. 14), それに対応して、溶存酸素濃度は低下した (Fig. 12)。また、5月24日や6月7日においては、透水性や砂洲内間隙水流速といった、おもに砂洲内間隙水域の流動特性との正の相関が強く (Table. 2, Fig. 15, Fig. 16), 7月9日では、とくに砂洲内間隙水温との間に、強い負の相関が見られた (Fig. 2)。そこで、全期間を通して、溶存酸素濃度と砂洲内間隙水温、さらに各調査時において相関の高かった砂洲内間隙水流速との関係を解析した。その結果、溶存酸素濃度が高い場所は、間隙水流速の大きなところに対応していた (Fig. 17)。また、長期的にみると季節にともなう間隙水温の上昇によって、砂洲内全体で

溶存酸素濃度が低下していくと考えられた。一方、6月22日や7月9日になると、砂洲内全域において溶存酸素濃度をとる範囲が狭くなる傾向が見られた。したがって、6月半ばを過ぎると、同一日においても間隙水温の方が、砂洲内間隙水流速よりも、溶存酸素濃度に与える影響が大きくなると考えられた。これは、間隙水温上昇による砂洲内間隙水域の溶存酸素飽和量の低下に、生物活性の増加による溶存酸素の大量消費が重なることで、より強く溶存酸素濃度に影響するためと考えられた。

3.4 モンカゲロウの卵・幼虫にとって好適な砂洲構造

(1) 卵死亡率

卵死亡率の分布を見たところ、実験最終日の7月9日においても、もっとも大きな場所で2割ほどであり、砂洲全域において、低い値を維持していた (Fig. 18)。したがって、調査期間の対象砂洲での環境条件であれば、モンカゲロウの卵は溶存酸素濃度が5mg/lを下回る嫌気的環境に対しても耐性を持って

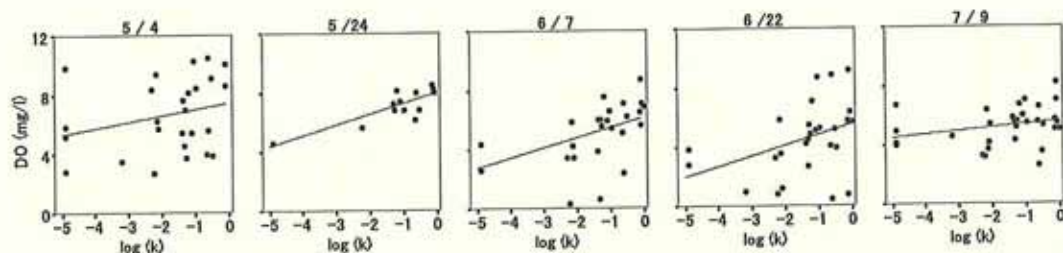


Fig. 15 Relationships between dissolved oxygen in the hyporheic zone (DO) and permeability coefficient (k) on the each sampling dates. k was transformed to $\log(k)$. Solid lines indicate regression lines.

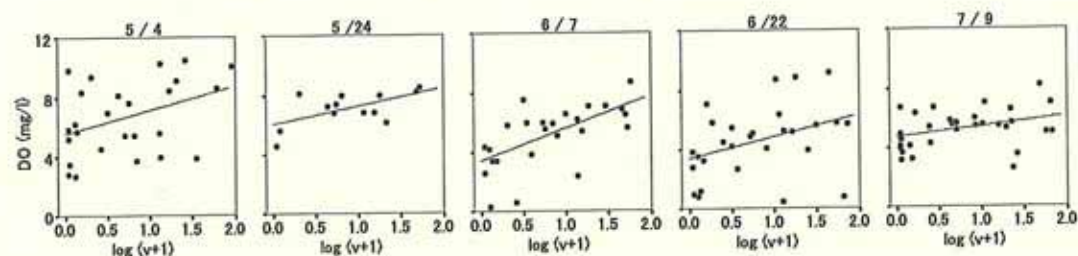


Fig. 16 Relationships between dissolved oxygen in the hyporheic zone (DO) and hyporheic flow velocity (v) on the each sampling dates. v was transformed to $\log(v+1)$. Solid lines indicate regression lines.

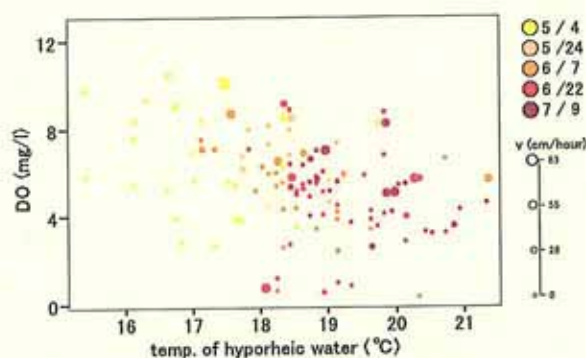


Fig. 17 Relationships between dissolved oxygen concentration in the hyporheic zone, hyporheic water temperature and hyporheic flow velocity.

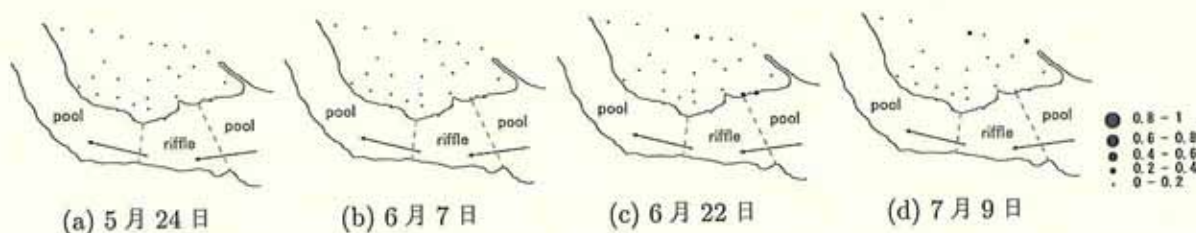


Fig. 18 Spacial distribution of dead ratio of eggs.

いると考えられた。また、モンカゲロウの産卵雌個体は、卵の生存率が高くなるであろう場所を選好しているわけではないことが確認された。

それぞれの調査時において、卵死亡率と砂洲内間隙水域の水質や物理変数との間で相関分析を行ったところ、ほとんど有意な相関は認められなかった。モンカゲロウの産卵雌個体数が多く確認された砂洲

上流端の水際において、一部卵死亡率が高くなる場所も見られたが (Fig. 18(c))、このような場所で見られた死亡卵は、卵の発生が進んでいるものが多かった。一方、発生が進んでいない卵に関しては、溶存酸素の大小にかかわらず耐性は非常に高いと考えられた。

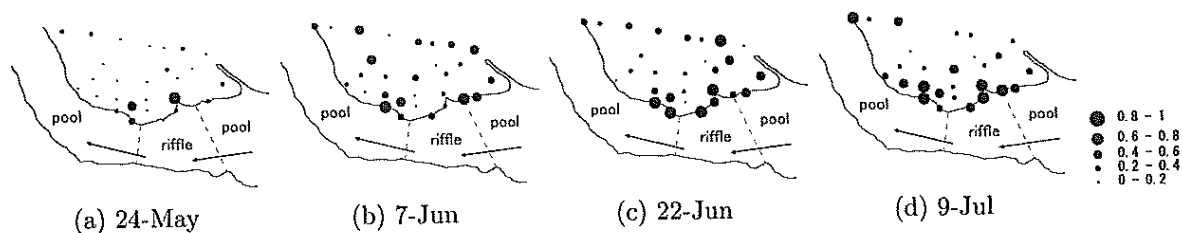


Fig. 19 Spatial distribution of hatching ratio.

Table 3 Relationships between hatching ratio and dissolved oxygen concentration (DO). * and ** indicate significant levels at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. r: correlation coefficient, p: significance probability, n: number.

DO	hatching ratio											
	24-May			7-Jun			22-Jun			9-Jul		
	r	p	n	r	p	n	r	p	n	r	p	n
4-May	0.62	**	24	0.34		25	0.54	**	24	0.37		24
24-May	0.66	*	12	0.13		12	0.71	**	12	0.67	*	12
7-Jun				0.25		25	0.59	**	24	0.52	**	24
22-Jun							0.38		25	0.51	*	24
9-Jul										0.42	**	24

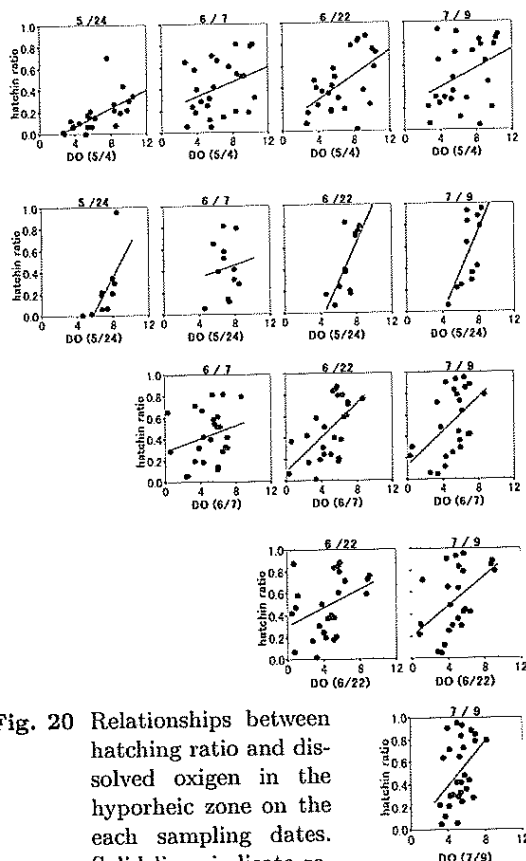


Fig. 20 Relationships between hatching ratio and dissolved oxygen in the hyporheic zone on the each sampling dates. Solid lines indicate regression lines.

(2) 卵孵化率

卵孵化率は、5月24日では瀬水際付近でのみ高かったが、季節とともに水際全域で高くなった (Fig. 19)。また、砂洲内陸側でも孵化は可能であるが、水

際付近と比較して、孵化率が低かった (Fig. 19)。孵化率と各種物理化学変量との間で、測定日ごとに相関分析を行った結果 (Table. 3), 溶存酸素濃度と卵の孵化率との間に相関が見られた。とくに、5月24日の溶存酸素濃度と各調査日の孵化率との間に強い相関がみられた (Table. 3, Table. 20)。また、5月24日から6月7日にかけて、多くの孵化がみられたため (Fig. 19, Fig. 20), 卵の发育には5月24日頃の溶存酸素濃度が大きく影響すると考えられた。

また、種によって異なるが、一般的に積算温量がある値に達すると孵化するということが知られている (Benard, 1984)。Fig. 13 および Fig. 11 より、5月～6月にかけて砂洲上流端の瀬水際では、水温が高くかつ溶存酸素が豊富であるため、卵が早く孵化するのに有利な場所であると考えられた。一方、下流側で孵化が遅れたのは、積算温量が足りなかったためと考えられた。

(3) 孵化数に対する幼虫生存率

孵化数に対する幼虫生存率は、5月24日には、いずれの場所でも高かったが、季節とともに水際付近でのみ生存が可能となり、7月9日には実際に産卵の行われていた位置よりも、やや下流の瀬中央から淵頭の水際部分で生存率が高まった (Fig. 21)。逆に砂洲内陸側では、生存率が0近くになる場所もあった (Fig. 21)。また、孵化数に対する幼虫生存率と各種物理化学変量との間で、測定日ごとに相関分析を行った結果、7月9日の幼虫生存率と間隙水温との間に有意な負の相関が見られた ($r = -0.65$, $p < 0.01$),

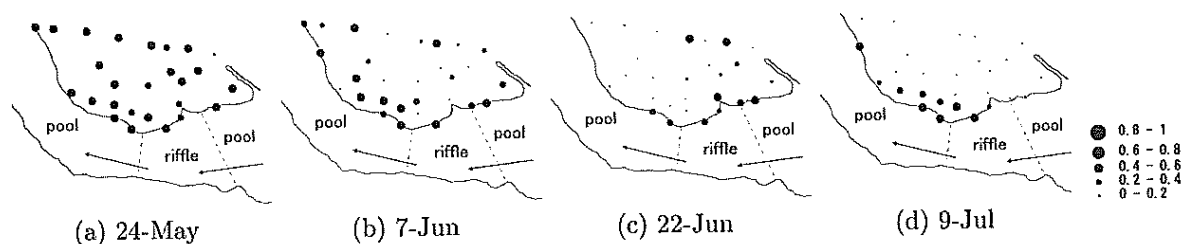


Fig. 21 Spatial distribution of alive nymphs ratio against hatching ratio.

Table 4 Relationships between alive nymphs ratio against hatching ratio, dissolved oxygen concentration (DO) and hyporheic water temperature (HWtemp). * and ** indicate significant levels at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. r: correlation coefficient, p: significance probability, n: number.

variables	alive nymphs ratio against hatching ratio											
	24-May			7-Jun			22-Jun			9-Jul		
	r	p	n	r	p	n	r	p	n	r	p	n
DO	0.81	**	10	0.21		25	0.43	*	25	0.39	*	28
HWtemp	-0.25		10	0.07		25	-0.21		25	-0.65	**	28

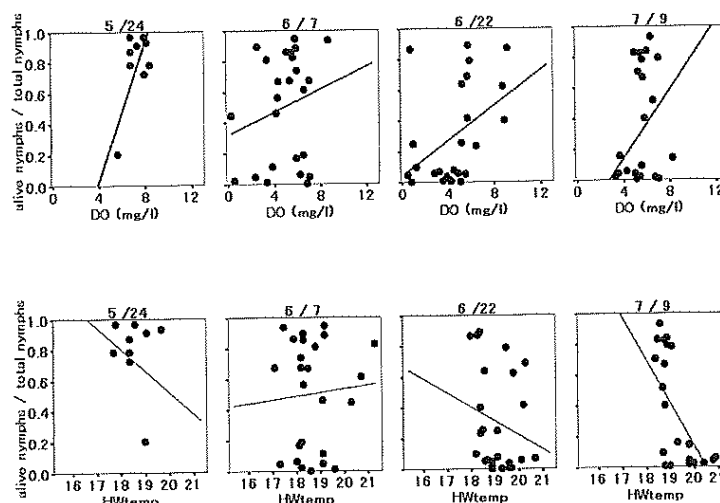


Fig. 22 Relationships between alive nymphs ratio against hatching ratio, dissolved oxygen concentration (DO) and hyporheic water temperature (HWtemp) on the each sampling dates. Solid lines indicate regression lines.

Table. 4, Fig. 22)。これは、前節で述べたように、季節変化に伴う砂洲内間隙水温の上昇・溶存酸素濃度の低下により、幼虫は水温の低い瀬下流側の水際でのみ生存可能であるためと考えられる。その結果、孵化した幼虫は、7月には河川本流、もしくは砂洲の下流側に移動すると推測された。

(4) 全卵数に対する幼虫生存率

5月24日、6月7日には、瀬水際で全卵数に対する幼虫生存率が高くなる傾向が得られた (Fig. 23)。幼虫そのものの生存率を表す孵化数にたいする幼虫生存率は、同時期において砂洲全域で高かったが (Fig. 23)、その孵化量までを考慮すると、砂洲上

流端に位置する瀬水際は、卵の孵化にも、幼虫の生息にも好適な環境であると考えられた。しかしながら、7月9日には、実際に産卵の行われていた位置よりもやや下流の瀬中央から淵頭の水際部分においてのみ、全卵数に対する幼虫生存率が大きくなる傾向が得られた (Fig. 23)。

そこで、全卵数に対する幼虫生存率と各種物理化学変量との間で、測定日ごとに相関分析を行った結果、5月24日の幼虫生存率は溶存酸素濃度と有意な正の相関 ($r=0.68$, $p<0.05$), 7月9日の幼虫生存率は溶存酸素濃度 ($r=0.42$, $p<0.05$), および砂洲内間隙水温 ($r=-0.53$, $p<0.01$) と有意な相関が認められ

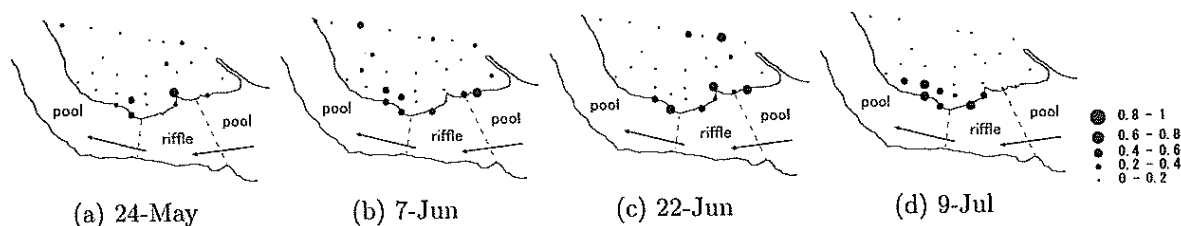


Fig. 23 Spatial distribution of alive nymphs ratio against total eggs.

Table 5 Relationships between alive nymphs ratio against total eggs, dissolved oxygen concentration (DO) and hyporheic water temperature (HWtemp). * and ** indicate significant levels at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively. r: correlation coefficient, p: significance probability, n: number.

variables	alive nymphs ratio against total eggs											
	24-Jun			7-Jun			22-Jun			9-Jul		
	r	p	n	r	p	n	r	p	n	r	p	n
DO	0.68	*	12	0.30		25	0.37		25	0.42	*	28
HWtemp	0.03		12	0.19		25	-0.23		25	-0.53	**	28

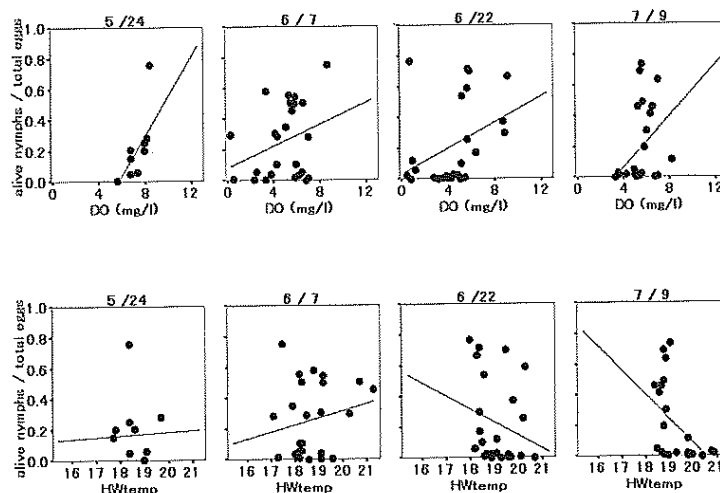


Fig. 24 Relationships between alive nymphs ratio against total eggs, dissolved oxygen concentration (DO) and hyporheic water temperature (HWtemp) on the each sampling dates. Solid lines indicate regression lines.

た (Table. 5, Fig. 24)。5月24日は、前説の通り、幼虫の生存率というよりは、卵の孵化の時に溶存酸素濃度が重要となると考えられる。また、6月7日や6月22日においては、溶存酸素濃度の低下が見られたものの、幼虫にとっては、まだ耐えることができたと考えられた。しかしながら、7月9日に幼虫生存率が溶存酸素濃度および砂洲内間隙水温と相関が高いのは、この時期になると、砂洲間隙水温の上昇により、溶存酸素濃度が致死閾値に達し、幼虫は生存不可能となったためと考えられた。

したがって、孵化期においては、実際に産卵雌個体数の多かった砂洲上流端の瀬水際に、卵の孵化に

も幼虫の生存に適しているが、季節変化に伴う砂洲内間隙水温の上昇・溶存酸素濃度の低下のため、幼虫は7月には河川本流、もしくは砂洲内の瀬下流側の水温の低い場所に移動すると推測された。

4. おわりに

日本の山地溪流の砂礫堆では、多くの間隙動物が確認されており (e.g. Takemon et al, 1999, 竹門ほか, 2003a, 2003b), それらの生物相は、透水性の大きさ、溶存酸素濃度の高さ、堆積有機物の少なさに対応していると考えられている。また、カゲロ

ウ類やカワゲラ目、トンボ目、ドビケラ目、ガガンボ科など多くの水生昆虫の産卵場所について、瀬の上流側で産卵する現象が認められる(竹門, 1997)。本結果では、モンカゲロウ産卵雌個体は砂礫堆瀬水際の動水勾配の大きな場所を産卵場所と選択しており、そのような場では、間隙材料の粒径が大きく、透水性も高く、水位落差の大きな瀬によって動水勾配が高く維持されるため、瀬水際近傍では間隙水流速が大きくなることがわかった。また、豊富な溶存酸素を含んだ河川水が砂礫堆内間隙水域に浸透するため、こうした場では水生昆虫などの生息場として十分機能すると考えられた。

また、間隙流速が大きく豊富な溶存酸素が供給される瀬水際で孵化した幼虫が、季節による砂礫堆内環境変化に対応して、砂礫堆内を下流に移動する可能性が示唆されたが、これは多くの水生昆虫にもあてはまると考えられる。一方、砂礫堆上流端は、平水時は堆積の卓越する場所であるため、出水による攪乱が生じないと、砂礫堆内間隙水域は、細砂分やシルト分が詰まり、透水性が減少し、次第に砂礫堆の生息場所機能は低下していくと考えられた。本研究の結果から、河川の砂礫堆内環境は極めて異質性が高く、間隙動物にとって好適な溶存酸素濃度が高い場所は、間隙流速が大きな場所に限られることがわかったが、このような環境を維持するためには、多様な生息場所の時空間構造が必要であり、砂礫堆の透水性や動水勾配を高く保つ河川管理が必要と考えられた。

参考文献

- 可児藤吉 (1944): 溪流棲昆虫の生態。昆虫上, pp.117-317, 研究社。
- 河野伊一朗・西垣誠 (1983): 原位置透水試験法の解析手法に関する研究。土質工学会論文報告集, 23, 4, pp.157-170。
- 西條八束・三田村緒佐武 (1995): 新編 湖沼調査法。講談社。
- 社団法人地盤工学会 (2001): 土質試験—基本と手引き— (第一回改訂版)。地盤工学会 土の試験実習書 (第一回改訂版) 編集委員会, 社団法人地盤工学会。
- 社団法人土質工学会 (1979): 土質試験法 (第2回改訂版)。土質試験法改定編集委員会, 社団法人土質工学会。
- 竹門康弘 (1997): 溪流における水生昆虫のすみ場所保全。砂防学会誌, 50(1), pp.52-60。
- 竹門康弘 (2003): カゲロウと川の環境。エコソフィア, 11, pp.30-35。
- 竹門康弘・竹門縁・谷田一三・中島拓男・三田村緒佐武 (2003a): 凍結コア法による河床間隙動物の定量調査結果。木津川の総合研究—京田辺地区を中心として—。河川生態学術研究会木津川研究グループ報告書, pp.235-241。
- 竹門康弘・土井秀幸・谷田一三 (2003b): 木津川砂州における河川水流入部の水質環境と間隙動物の分布様式。木津川の総合研究—京田辺地区を中心として—。河川生態学術研究会木津川研究グループ報告書, pp.263-270。
- 田中武志・竹門康弘・山田浩之・池淵周一 (2003): 河床間隙水域の物理化学的特性とモンカゲロウの産卵場所選択。京都大学防災研究年報, 46B, pp.867-873。
- 西垣誠 (1986): 単孔式現位置透水試験法の整理 (その2)。地下水と井戸とポンプ, 28, 3, pp.15-24。
- Bulton, A. J., Vallet H. M. and Fisher S. G. (1992): Spatial distribution and taxonomic composition of the hyporheos of several Sonoran Desert streams, *Archiv fur Hydrobiologie*, 125, pp.37-61。
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (1996): ArcView GIS Ver. 3.2a. Environmental Systems Research Institute, Inc., California, USA。
- Fiebig, D. M. and Lock, M. A. (1991): Immobilization of dissolved organic matter from ground water discharging through the stream bed. *Freshwater Biology*, 26, pp.45-55。
- Hvorslev, M. J. (1951): Time lag and soil permeability in ground-water observations. *Bull.36*, 50pp., U.S. Corps of Engs., Waterways Exp. Sta., Vicksburg, Miss.
- Mitani Corporation (2003): WinROOF ver. 5.03. Mitani Corporation, Fukui, Japan。
- Orghidan, T. (1959): Ein neuer Lebensraum des unterirdischen Wassers, der hyporheische Biotop, *Archiv fur Hydrobiologie*, 55, pp.392-414。
- Pionke, H. B., Hoover, J. R., Schnabel, R. R., Gburek, W. J., Urban, J. B. and Rogowski, A. S. (1988): Chemical-hydrologic interactions in the near-stream zone, *Water Resource Research*, 24, pp.101-110。
- Richard, C. and G. Host (1994): Examining land use influence on stream habitats and macroinvertebrates: A GIS approach. *Water Resource in Bulletin*, 30, 4, pp.729-737。

- SPSS Inc. (2001) : SPSS for Windows Ver.11.0J.
SPSS Inc., Chicago, USA.
- Takemon, Y., Yoko Hirayama, and Kazumi Tanida
(1999) : Species composition of hyporheos in a
bar-island of a Japanese mountain stream, *Jpn.
J. Limnol.*, 60 (3), pp.413-416.
- Takemon, Y., (2000) : Reproductive behavior and
morphology of *Paraleptophlebia
spinosa* (Ephemeroptera: Leptophlebiidae): im-
plications of variation in copula duration, *Lim-
nology*, 1, pp.47-56.
- Valett, H. M., Morrice, J. A. Dahm, C. N.
and Campana, M. E. (1996) Parent lithol-
ogy, surface-groundwater exchange, and ni-
trate retention in headwater streams, *Limnol.
Oceanogr.*, 41, pp. 333-345.
- Williams, D. D. (1993) : Nutrient and flow vec-
tor dynamics at the hyporheic/groundwater
interface and their effects on the interstitial
fauna, *Hydrobiologia*, 251, pp.185-198.
- Wondzell, S. M. and Swanson, F. J. (1996) : Sea-
sonal and storm dynamics of the hyporheic
zone of a 4th-order mountain stream. I: Hy-

drologic processes, *J. North Am. Bent. Sco.*,
15: pp.3-19.

Wondzell, S. M. and Swanson, F. J. (1999) : Floods,
channel change, and the hyporheic zone, *Water
Resources Research*, 35 (2), pp.555-567.

Wright, J. E., P. D. Armitage, M. T. Furce and D.
Moss (1989) : Prediction of invertebrate commu-
nities using stream measurements. *Regulated
Rivers: Reserch and Management*, 4, pp.147-
155.

Yamada H., F. Nakamura, Y. Watanabe, M. Mu-
rakami and T. Nogami (in press) : Measuring hy-
draulic permeability in a streambed using the
packer test, *Hydrological processes*, in press.

**An experimental study on hyporheic environmental conditions required for mayfly
reproduction in a mountain stream.**

Yasuhiro TAKEMON*, Takeshi TANAKA**, Hiroyuki YAMADA* and Shuichi IKEBUCHI*

* Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

It has been reported that the oviposition sites of some aquatic insects such as a mayfly *Ephemera strigata* are restricted to the shore of the pool tail and riffle head. Ecological implications of the preference of oviposition sites have been attempted in relation to physicochemical environmental conditions of the hyporheic zone. However, few empirical studies have proved the causal relationship between such habitat selection of stream inhabitants and the ecological functions of the hyporheic zone. The present study focused on the horizontal distribution and seasonal changes in DO concentration in the hyporheic zone of a gravel bar in the Kamo River, in Kyoto city, Japan. Field experiments for rearing eggs of the mayfly *E. strigata* at various sites of the bar were carried out to examine relations of survival ratio of the eggs and nymphs to the physicochemical conditions in the hyporheic zone. Distribution patterns of the water quality parameters showed that the reduction in DO concentration was strongly related to the hyporheic water temperature as well as the liquidity of hyporheic flow. The egg rearing experiment resulted in higher hatching rate of eggs and higher survivability of nymphs along the riffle shore than inland area of the bar. The egg hatching rate and nymphal survivability showed high correlation with DO concentration of hyporheic waters. The hyporheic flow velocity was also high near the water's edge in the riffle, where *E. strigata* selected as oviposition sites, suggesting that their habitat selection functions to raise survival ratio of their offspring in the egg and early nymphal stages.

Keywords : hyporheic zone, physicochemical environment, *Ephemera strigata*, habitat selection for oviposition site, current velocity of hyporheic zone