

京都・鴨川の砂州地形及び植生形成の再現解析と イカルチドリの動態との関連に関する研究

要 旨

1. 研究の目的
2. イカルチドリの生息状況と砂州地形の関連に関する調査
3. 砂州地形の再現解析
4. 落差工近傍の流れと中州形成メカニズムに関する検討
 4. 1 基礎水理実験による検討
 4. 2 数値シミュレーションによる検討
5. おわりに

要 旨

本研究は、危機的な状況にある鴨川チドリ（イカルチドリ）を保全するための知見を得ることを目的として、イカルチドリの動態と砂州形態との関連について調査研究を行うことを目的としている。

まず、イカルチドリの生息状況について、観察に基づいて砂州の状況や植生の繁茂状況との関連に注意しながら周年の調査を行い、最近の動態を明らかにする。次に、動態と密接に関連する高野川、賀茂川合流点付近（出町柳地区）から四条大橋付近までの全体的な砂州形態について数値シミュレーションを用いた検討を行い、基本的な特性を明らかにする。

さらに、上記のシミュレーション結果には、イカルチドリの現在の生息場所である落差工直下流の中州が再現されなかったことから、中州の形成過程を詳細に検討するために、落差工部の河川形状を定性的に模擬した水路を製作し基礎水理実験を実施するとともに、落差工付近の河岸平面形状を考慮した詳細な数値シミュレーションを行い、中州形成のメカニズムを解明した。

最後に、本研究で得られた知見を要約して結論としている。

1. 研究の目的

京都市を流れる鴨川において、鴨川チドリ（イカルチドリ：環境省絶滅危惧Ⅱ類）の姿をほとんど見ることができなくなってから久しいと言われている。たとえば、京都市木屋町三条下ルの瑞泉寺には昭和 42 年に図-1 のような千鳥碑が建立されており、裏の碑文には以下のような記述がある。

[瑞泉寺千鳥碑の碑文]

鴨川流域に棲息し清楚な姿と可憐な声は遊子都人に愛され、詩歌に俳諧に、又、画材ともなあって名鳥の聞こえが高かったが、近來都塵に絶えて見ることを得なくなった。

ここ先斗町はその形を紋章とし鴨川をどりのマークに名残りを止めている。今秋鴨川をどり百回記念の事業として先斗町歌舞会に依って由縁のこの地に千鳥の碑を建立し永く鳥の雅名と情緒を伝えることになった。

幸いに鴨涯散歩のせつ一瞥して鴨川千鳥の風流を偲ばれんことを。

昭和四十二年仲秋

林 悌三

碑文に記述の先斗町の紋章を図-2 に示す。この紋章は鴨川の飛び石のデザインとしても用いられている。

後述するように、現在、鴨川千鳥は賀茂大橋から二条橋の間の 2, 3 箇所の中州において数羽確認される程度であり、植生が発達する 7 月から 9 月頃には姿を全く見ることができないこともあり、「鴨の河原に千鳥が騒ぐ」景観は絶滅してから遠く久しいと考えられる。

本研究は、上記のように危機的な状況にあるイカルチドリを保全するための知見を得ることを目的として、イカルチドリの動態と砂州形態との関連について調査研究を行うことを目的としている。

まず、イカルチドリの生息状況について、観察に基づいて砂州の状況や植生の繁茂状況との関連に注意しながら周年の調査を行い、最近の動態を明らかにする。次に、高野川、賀茂川合流点付近（出町柳地区）から四条大橋付近までの全体的な砂州形態について数値シミュレーションを用いた検討を行い、基本的な特性を明らかにする。

さらに、上記のシミュレーション結果には、イカルチドリの現在の生息場所である落差工直下流の中州が再現されていないことから、落差工付近の河岸平面形状を考慮した詳細な数値シミュレーションを行い、中州の再現解析を行った。

また、中州の形成過程を詳細に検討するために、落差工部の河川形状を定性的に模擬した水路を作成して基礎水理実験を実施した。

最後に、以上の成果をまとめて結論としている。



図-1 瑞泉寺（木屋町三条下ル）の千鳥碑



図-2 先斗町の紋章

2. イカルチドリの生息状況と砂州地形の関連に関する調査

本研究助成以前からの観察結果も含めて、イカルチドリの生息状況について記述する。

図-3 に 2007 年 5 月に丸太町橋下流の砂州で観察されたイカルチドリの写真を示した。砂州の様子を図-4 に示す。よく知られているように、イカルチドリはこのような植生の少ない砂礫の中州を好んで生息している。6 月も同様である。

図-5 は同年 7 月上旬の状況である。羽を広げる親鳥の背後に幼鳥が観察される。その後、イカルチドリはこの砂州では観察されなくなり、7 月下旬には賀茂大橋下流の中州で一羽だけ観察されるようになった。その後、2008 年 1 月上旬まで、この砂州で継続して一羽だけ観察されている。

2007 年 12 月頃から、図-6 に示すように、白川放水路の放水口の工事が始まり、河道内に土砂が盛土された。この盛土部分にイカルチドリが時々出現するようになった。

2008 年 1 月中旬になると、賀茂大橋下流の砂州では 2 羽番で観察されるようになった。その後、白川放水路放水口の工事終了後に造成された中州に移動し、6 月上旬まで生息していた。

一方、丸太町橋下流の中州には、2008 年 5 月ごろ別の一羽が出現し、6 月下旬まで確認された。しかし、砂州が前面植生に被覆される 7 月以降、9 月下旬まで上記の区間では一羽も確認することができなくなった。（北山橋から七条大橋までの区間でも同様。）

2008 年 10 月になると、その年の小出水によって落差工直下流に形成された小規模な砂州や従前の砂州の上流側に新たに堆積した砂礫上で再び確認されるようになった。（対象区間内 2 箇所程度。）

図-7 は 2008 年 11 月に荒神橋上流の小規模な中州上で観察されたイカルチドリである。砂州全体の状況を図-8 に示す。その年の小規模な出水時に堆積した中州である。周辺にはイソシギも観察された（図-9）。

図-10 は従前の砂州の上流側に新たに堆積した砂礫の状況である（丸太町端下流、2009 年 4 月）。このような新たに堆積した砂礫上でもイカルチドリが確認された（図-11）。

その後、砂州が全面を植生で覆われる 6 月下旬からイカルチドリを確認することができなくなったが、9 月に入ると再び砂州の上流側に新たに堆積した砂礫上に出現した（図-12、図-13）。

上述のように、

- ・鴨川ではイカルチドリは賀茂大橋から二条橋の区間内 2、3 箇所の砂礫で構成される中州を生活場所として利用していること、特に中州の上流側に新たに堆積した砂礫地を利用することが多いこと、

- ・2 月頃から 6 月頃まで営巣すること、

- ・その後砂州上の植生の繁茂状態によっては鴨川から一時期（砂州が前面植生に覆われる 7 月頃から 9 月頃の間）いなくなる場合があること、

- ・河川工事により一時的に出現した生活に適した人工的盛土部分を生息場所として利用する場合があること

が分かった。

生活の場として利用している砂州は、河川工事により一時的に出現した砂礫地を除けば、例外なく落差工直下流部において川幅急拡や水脈の自由落下のような流れの特性に応じて形成された

中州である。すなわち、人工構造物によって形成された砂州地形がイカルチドリの数少ない狭小な生息場となっているのが現状と考えられる。



図-3 イカルチドリが生息する中州



図-4 イカルチドリが生息する中州の全体写真



図-5 親鳥と幼鳥 (2007年5月)



図-6 白川放水路の放水口関連工事時の状況 (2007年12月)



図-7 2008年11月荒神橋上流の砂州で確認されたイカルチドリ



図-8 図-7の砂州全体の様子（その年の小出水で形成された砂州）



図-9 図-8の砂州周辺で観察されたイソシギ



図-10 砂州（丸太町橋下流）の上流部での砂礫の新たな堆積状況（2009年4月）



図-11 図-10の砂州上流部で確認されたイカルチドリ



図-12 2009年9月に鴨川に戻ってきたイカルチドリ（荒神橋下流）



図-13 図-12 の砂州全景

3. 砂州地形の再現解析

図-14 に賀茂川と高野川の合流点付近（出町柳地点）から丸太町橋付近までの砂州地形の写真を示す。賀茂川、高野川合流点付近（賀茂大橋付近）では、合流する両河川の左右岸が合流のため湾曲しており、左右の内岸に固定砂州が形成されている。さらに、兩岸の固定砂州の下流から左右交互に砂州が形成される。ただし、この交互の後述の数値シミュレーション結果から、交互砂州ではなく固定砂州の影響を受けた空間変動であると考えられた。

また、図-10 に示したように、段落部直下流には中央に中州が形成されるとともに、その兩岸に沿って砂礫の堆積が見られる。

参考のため、図-15 に 1947 年次の鴨川の航空写真を示す。砂州上の植生が疎らであると共に、交互に形成されている砂州が明瞭であるが、基本的な河床形状に関して現在と大きな違いはないように思われる。



図-14 賀茂川と高野川の合流点付近から丸太町橋付近までの砂州地形



図-15 1947 時の鴨川の航空写真

賀茂川と高野川の合流点付近（出町柳地点）から四条大橋付近までの、全体的な砂州地形の形成過程を検討するために、流れと河床変動の平面2次元解析を行なった。本解析では河岸満杯流量以下を考へて、低水路部分のみを河道として取り扱った。また、河床標高は、落差工部分を考慮せず、初期条件として落差工建設後の河床勾配を与えた。さらに、試みに賀茂川と高野川にそれぞれ160(m³/sec)、120(m³/sec)の流量を与えて流れと河床変動のシミュレーションを行った。河床材料の粒径は簡単のため5(cm)の一樣粒径とした。

シミュレーションに用いた一般曲線座標系での平面2次元水深積分モデルの基礎式系は以下のとおりである。

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動量式]

(ξ -direction)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v^2}h) \\ & + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v^2}h) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) \end{aligned} \quad (2)$$

(η -direction)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u^2}h) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v^2}h) \\ & + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v^2}h) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 t : 時間、 (ξ, η) : 一般曲線座標、 (x, y) : デカルト座標、 h : 流れの水深、 z_s : 水位、 (M, N) : 流量フラックスベクトルの (x, y) 座標成分、 (U, V) : 流速ベクトルの反変成分、 (Q^ξ, Q^η) : 流量フラックスベクトルの反変成分、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 $-\overline{u^2}, -\overline{u'v}, -\overline{v^2}$: 水深平均レイノルズ応力テンソルの直角座標成分、 J : 座標変換のヤコビアン ($J = 1/(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi)$)、 $(\tau_b^\xi, \tau_b^\eta)$: 底面せん断応力ベクトルの反変成分。

土砂輸送モデル以下のとおりである。掃流砂のみを考慮し、流線方向の流砂量公式として Meyer-Peter Mullar 式を、流線に直交する方向の流砂量公式として長谷川式を用いた。

$$q_{bs} = 8\tau_*^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4a)$$

$$q_{bn} = q_{bs} \left(\frac{u_{nb}}{u_{sb}} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_n \tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (4b)$$

ここに、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 (u_{sb}, u_{nb}) : 路床近傍の流線 (s) 方向とそれに直交する横断 (n) 方向の流速成分、 μ_s 及び μ_n : それぞれ粒子の動摩擦定数と静摩擦係数。

u_{nb} は u_{sb} と h を用いて次式で評価する。

$$u_{nb} = -N_* \frac{h}{r} u_{sb} \quad (5)$$

ここに、 r : 流線の曲率半径、 N_* : 定数。

河床標高の時間変化は式(6)を用いて計算することができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\delta} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_b^{\xi}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_b^{\eta}}{J} \right) \right\} = 0 \quad (6)$$

ここに δ : 空隙率。

図-16 に河床形状の時間変化を示した。図-17 は図-16 の賀茂大橋から下流部を拡大した図である。賀茂川、高野川合流点付近（賀茂大橋付近）では、河岸の湾曲によって左右の内岸に固定砂州が形成されている。さらに、兩岸の固定砂州の下流から左右交互に砂州が形成される。ただし、この交互の砂州は時間的に移動しないことから、交互砂州ではなく固定砂州の影響を受けた空間変動であると考えられる。

シミュレーション結果は、図-14 に示す鴨川のグローバルな砂州地形をおおよそ再現していると考えられる。ただし、2. で述べたイカルチドリが生息場所として利用している落差工直下流の中州は再現されていないので、この点について次に考察する。

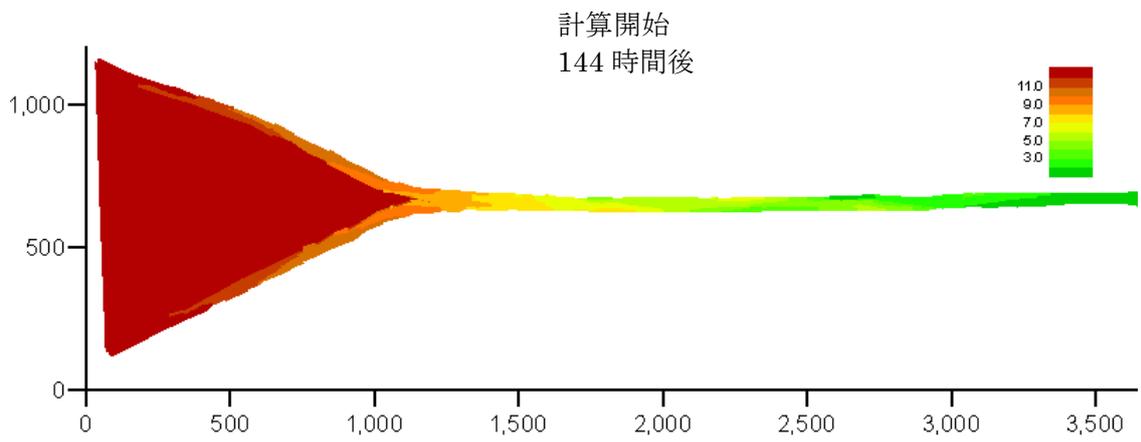
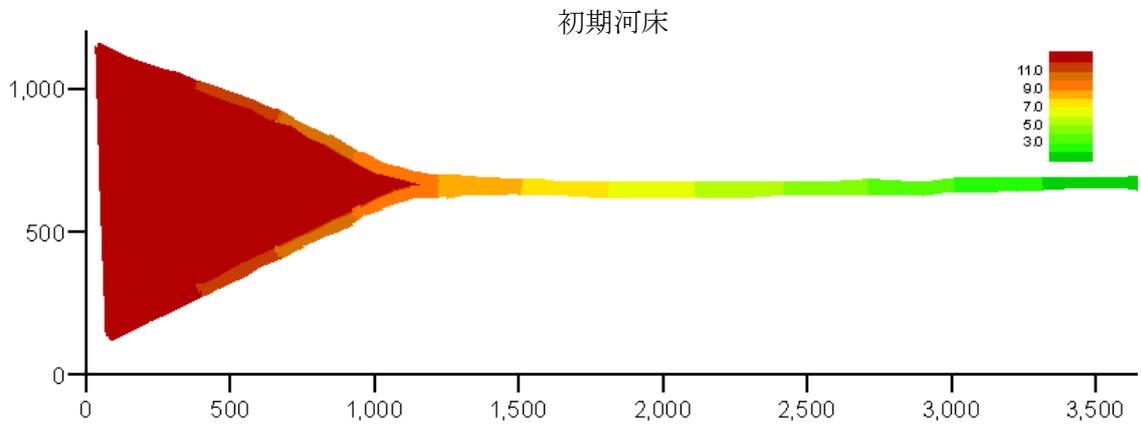
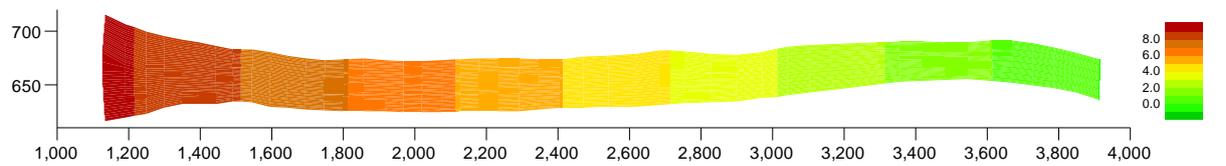
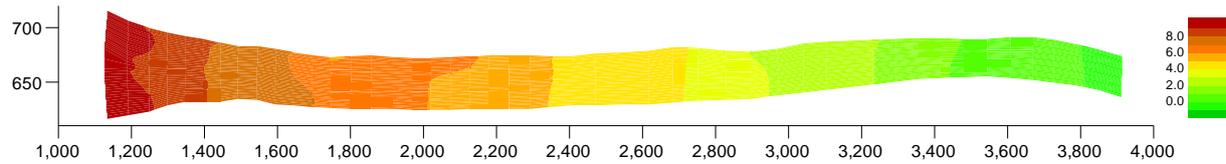


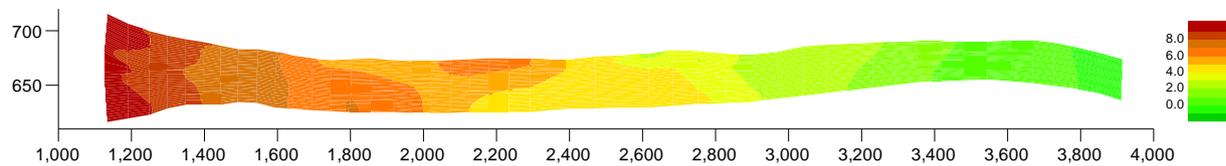
図-16 鴨川の砂州地形シミュレーション結果



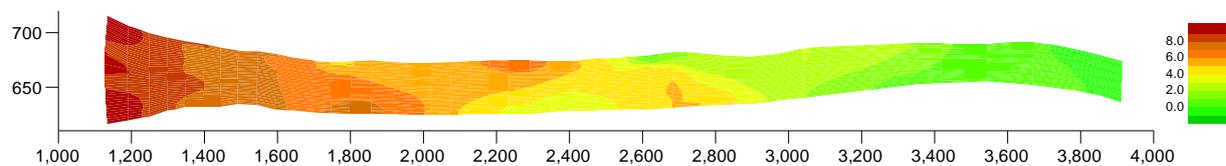
(a) $t = 0$ hr



(b) $t = 48$ hr



(c) $t = 96$ hr



(d) $t = 144$ hr

図-17 合流点下流の砂州地形の拡大図

4. 落差工近傍の流れと中州形成メカニズムに関する検討

図-10 に示したように、落差工直下流には出水時の流れの構造に起因すると考えられる中州が形成されている。また、左右両岸沿いにも砂礫が堆積している。

図-18 に示した小出水時における落差工周辺の流れを見ると、自由落下水脈の下流で流れは射流になり、中央で跳水が発生しているだけでなく、落差工部の少しの急拡部付近から斜め衝撃波が左右岸から中央の跳水方向に向かって射出していることが分かる。

中央の跳水部下流が中州が形成される位置に対応しており、急拡部直下流の逆流が生じていると考えられる領域が左右両岸沿いの砂礫の堆積部に対応している。

このように、現在イカルチドリが生息場所として利用している落差工部下流の中州は、治水のための河川改修によって施工された落差工によって創出されていると考えられる。

4. 1 基礎水理実験による検討

このことを確認するために落差工部を有する実験水路を作成し、落差工部の上流側に砂を置いて通水することで、その後の砂の堆積状況を観察した。

図-19 に実験水路落差工部の平面形状を示した。また、実験の水理諸量を表-1 に示した。

落差工部上流に図-20 のように中央粒径 0.53mm の砂を置土し通水した後の堆積状況が図-21、及び図-22 である。落差工下流部の流れに応じて、中央の跳水部下流部において中州の形成が確認されるとともに、左右岸の逆流域に細長い砂礫の堆積部が存在していることが分かる。

4. 2 数値シミュレーションによる検討

同様に、鴨川のスケールの落差工を含む河道を設定して数値シミュレーションを実施した。シミュレーションの結果を図-23 に示す。水理実験ほど明確ではないが、河道中央部に中州が形成されると伴に、左右岸沿って細長い砂州が形成されていることを確認することができる。



図-18 小出水時の落差工近傍の流れの様子（丸太町橋下流）

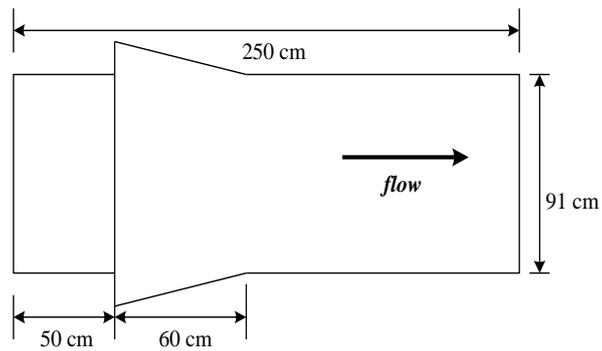


図-19 実験水路落差工部の平面形状

Table 1 Hydraulic parameters in the laboratory test

L (cm)	B (cm)	Q (cm ³ /s)	WL_u (cm)	WL_d (cm)	T (°C)
250	91	4051	13.4	1.80	16.5

where L = length of flow domain; B = channel width; Q = discharge; WL_u = upstream water level; WL_d = downstream water level; and T = water temperature.

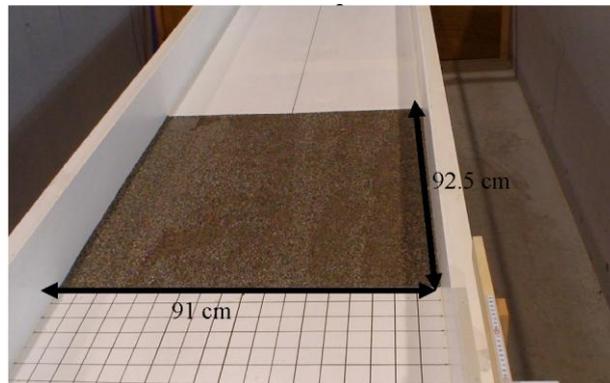


図-20 落差工上流部での砂の設置状況



図-21 通水後の落差工下流部での砂の堆積状況

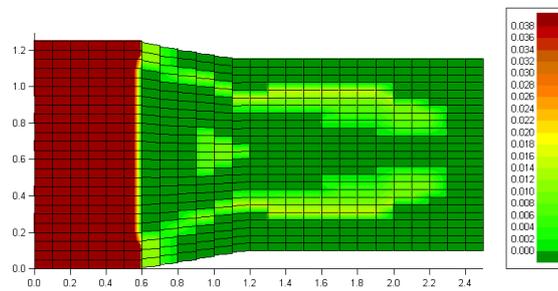
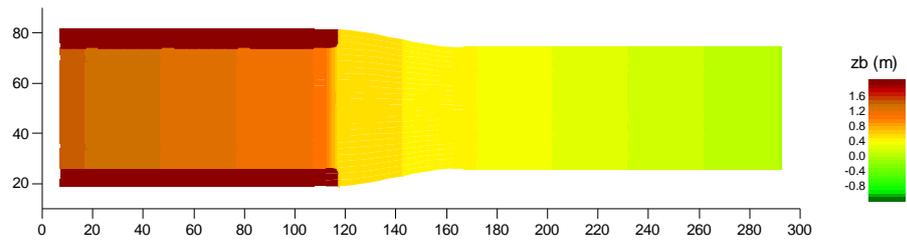
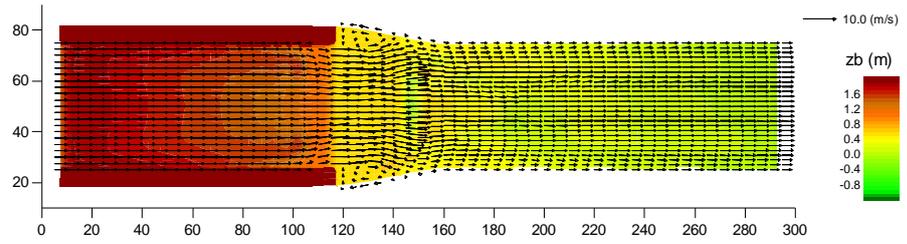


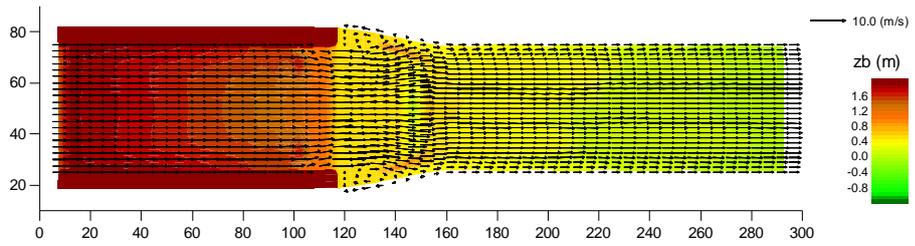
図-22 砂の堆積厚の計測結果



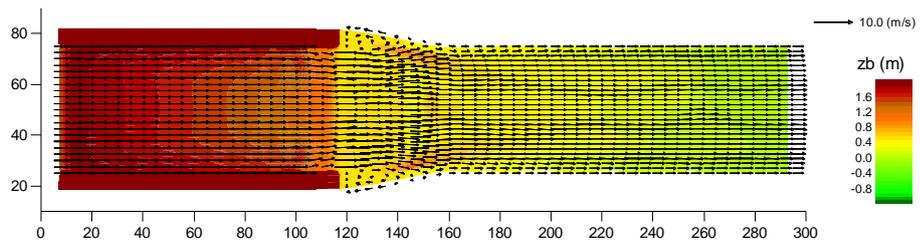
(a) $t = 0$ hr



(b) $t = 2.5$ hr



(c) $t = 3.0$ hr



(d) $t = 3.5$ h

5. おわりに

本研究では、鴨川に生息するイカルチドリの動態と砂州の関係について、周年の観察により明らかにすると共に、イカルチドリが現在生息場として利用している砂州の形成メカニズムを明らかにした。

イカルチドリの動態についてまとめれば以下のようなになる。

- ・鴨川ではイカルチドリは賀茂大橋から二条橋の区間内2，3箇所の砂礫で構成される中州を生活場所として利用していること，特に中州の上流側に新たに堆積した砂礫地を利用することが多いこと，
 - ・2月頃から6月頃まで営巣すること，
 - ・その後砂州上の植生の繁茂状態によっては鴨川から一時期（砂州が前面植生に覆われる7月頃から9月頃の間）いなくなる場合があること，
 - ・河川工事により一時的に出現した生活に適した人工的盛土部分を生息場所として利用する場合があること
- が分かった。

また、現在の主な生息場である落差工直下流部の中州の形成に関して、鴨川全体の砂州地形の再現解析、落差工周辺の流れと砂州形成に関する水理実験、及びシミュレーションを行い、メカニズムを解明した。

すなわち、落差工周辺の流れを見ると、自由落下水脈の下流で流れは射流になり、中央で跳水が発生しているだけでなく、落差工部の少しの急拡部付近から斜め衝撃波が左右岸から中央の跳水方向に向かって射出していること、中央の跳水部下流が中州が形成される位置に対応しており、急拡部直下流の逆流が生じていると考えられる領域が左右両岸沿いの砂礫の堆積部に対応していること、よって、現在イカルチドリが生息場所として利用している落差工部下流の中州は、治水のための河川改修によって施工された落差工によって創出されていると考えられることを明らかにした。

このような本研究で得られた知見から、今後のイカルチドリの保全を考える場合、

- ・短期的には現在イカルチドリが利用することの多い二，三の砂州について、注意深く砂州上の植生の除草を行った場合のイカルチドリの動態を観察すること，
 - ・長期的には、数か所の落差工を系統的に撤去するか、落差を減少させることで河床勾配を増大させるとともに、河川の土砂輸送能力を増加させ、砂州や植生の破壊と再生が自然に持続するように、河道改修を行うこと。すなわち、河道の動的平衡が自然に持続するように河道改修を行うこと，
- が考えられる。

落差工の撤去や改修については、下流への影響など治水上の制約が多く存在するため、数値シミュレーションや水理実験を用いた慎重な検討が必要になり、鴨川チドリを保全することの意義に関する住民意識調査なども併せて実施することも必要と考えられる。