

## 河川湾曲部の礫河原におけるカワラハハコ群落の レフュージアの水理特性について

### On Hydraulic Characteristics of Refugia of *Anaphalis Margaritacea* Community on a Cobble-Bar in a Bend of River

川 谷 健                      浅 見 佳 世  
Takeshi Kawatani              Kayo Asami

#### 1. はじめに

礫河原は、河川の生物多様性が保たれるために不可欠な場である。十分に発達した礫河原には、「カワラ-」と名のつく固有の動植物が多く生息・生育している。そして、このような礫河原が維持されるためには、表層の細粒土砂や草本類を流出させる規模の出水が適当な頻度で起こる必要がある。中小規模の出水時に細粒土砂が礫原表層に堆積し、その後、草本類が密生することになると、植物体による被陰やリターの堆積による流砂の捕捉なども加わり、細粒土砂の堆積が一層進み、高植被率の植生が広がることで、礫河原が消失することになる。

「カワラ-」と名のつく代表的な植物としてカワラハハコがある。カワラハハコは、乾燥した砂礫堆上に固有なキク科の多年草で、植物社会学では礫河原という特殊な立地に成立する植生の標徴種と位置づけられ<sup>1)</sup>、その生育により識別される植生がヨモギ-カワラハハコ群団（以下、カワラハハコ群落と呼ぶ）である。すなわち、カワラハハコは礫河原特有の環境に対する感受性のよい指標植物である。

出水の攪乱によって礫河原が維持され、カワラハハコ群落が他群落に遷移するのが抑制され、あわせて群落の主要構成種の実生定着の場となる裸地が作られる<sup>2)</sup>ことは、上述のとおりである。しかしその一方で、出水の擾乱が大き過ぎ、礫河原特有の植物が完全に流失してしまうと、当該河原でのそれら植生の回復が危うくなる<sup>3)</sup>だけでなく、種子の供給源が失われることでセグメントスケールでの種の絶滅も起こり得る。そのため、大きな攪乱を受けてもなお、カワラハハコなど群落の主要構成種が残存し得る分布地（レフュージア）を保全することが必要となる<sup>4)</sup>。

揖保川の宍粟市山崎町平見地区にある湾曲区間（河口からの距離  $L=25.2\sim 25.6$  km）の砂礫堆には、カワラハハコ群落の成立する礫河原がある。この砂礫堆は明治時代から存在し、1948 年以降の航空写真により、そこに自然裸地や草本群落の成立が確認されており、出水の攪乱によって裸地化や植生遷移が繰り返されてきたと考えられる。そして、この遷移の繰り返しの中で、カワラハハコ群落も増減してきたと推察される。

ここ 10 年程では、カワラハハコ群落の消長に影響した出水は、2004 年 8 月 31 日の出水 ( $L=29.5$  km にある山崎第二観測点でのピーク流量  $1515$  m<sup>3</sup>/s)、2009 年 8 月 10 日の出水 (同  $1582$  m<sup>3</sup>/s) および 2011 年 9 月 3 日 (同 約  $1300$  m<sup>3</sup>/s) であり、これら出水の前後にはカワラハハコ群落の動態調査が行われている。2004 年の出水では、出水前には礫原全体に広がっていたカワラハハコ群落が礫原中央部に残るだけとなった。その後、2009 年の出水前には、カワラハハコ群落は礫原全体に生育するまでに回復していたが、この出水により分布地の大半が裸地化した<sup>4)</sup>。そして回復途中で 2011 年の出水を受け、カワラハハコは約 10 個体が残存するだけとなったが、2013 年時点で、カワラハハコは再び礫原全体に広がって、植生が分布を回復しつつあることが確かめられている<sup>5)</sup>。これら 3 つの出水では、当該礫河原内にカワラハ

ハコ群落のレフュージアが存在し、出水後の当該礫河原でのカワラハハコ群落の植生回復に大いに寄与した。

本研究では、2009年8月10日の出水をとりあげ、当該湾曲区間の礫河原を含む約1kmの河川区間(L=24.8~26.0 km)を解析対象として、平面2次元流の数値シミュレーションを行い、カワラハハコのレフュージアの水理特性について調べる。湾曲あるいは蛇行する実河川の流れを数値シミュレーションする場合、その目的が例えば砂礫堆の形成や移動の機構・過程を調べることにあれば、流れの3次元構造が把握できる解析手法を採る必要があるが、それら手法は一般に計算容量・時間ともに非常に大きくなり、実河川への適用を困難なものとしがちである。これに対して、本研究は湾曲区間の礫原上の流況把握が主な目的であるので、礫原が冠水しても、冠水深が主流部の水深と比べてかなり小さいため、そこでは流れの3次元性が相対的に小さいことを考慮して、平面2次元流の数値シミュレーションを採ることとした。

## 2. 数値シミュレーション手法

物理平面  $(x, y)$  における浅水流方程式を計算平面  $(\xi, \eta)$  の方程式に変換<sup>6) 7) 8)</sup>すると、連続の式は

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

となる。運動方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[ \frac{\partial(UM)}{\partial \xi} + \frac{\partial(VM)}{\partial \eta} \right] - \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \epsilon J \left( q_{11} \frac{\partial M}{\partial \xi} + q_{12} \frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \epsilon J \left( q_{12} \frac{\partial M}{\partial \xi} + q_{22} \frac{\partial M}{\partial \eta} \right) \right] \right\} \\ + \frac{gh}{J} \left[ y_{\eta} \frac{\partial(h+z_b)}{\partial \xi} - y_{\xi} \frac{\partial(h+z_b)}{\partial \eta} \right] + \frac{\tau_{bx}}{\rho} = 0 \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[ \frac{\partial(UN)}{\partial \xi} + \frac{\partial(VN)}{\partial \eta} \right] - \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \epsilon J \left( q_{11} \frac{\partial N}{\partial \xi} + q_{12} \frac{\partial N}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \epsilon J \left( q_{12} \frac{\partial N}{\partial \xi} + q_{22} \frac{\partial N}{\partial \eta} \right) \right] \right\} \\ + \frac{gh}{J} \left[ -x_{\eta} \frac{\partial(h+z_b)}{\partial \xi} + x_{\xi} \frac{\partial(h+z_b)}{\partial \eta} \right] + \frac{\tau_{by}}{\rho} = 0 \end{aligned}$$

となる。ここに、 $t$  = 時間変数、 $h$  = 水深、 $M = uh$ 、 $N = vh$ 、 $u, v = x, y$  方向の水深平均流速成分、 $\epsilon$  = 渦動粘性係数、そして座標変換に伴う諸量は

$$\begin{aligned} \xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ x_{\xi} = \frac{\partial x}{\partial \xi}, \quad x_{\eta} = \frac{\partial x}{\partial \eta}, \quad y_{\xi} = \frac{\partial y}{\partial \xi}, \quad y_{\eta} = \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{aligned}$$

$$J = x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}, \quad q_{11} = \xi_x^2 + \xi_y^2, \quad q_{12} = \xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y, \quad q_{22} = \eta_x^2 + \eta_y^2$$

であり、 $U, V$  = 反変速度は次式で与えられる。

$$U = J(\xi_x u + \xi_y v), \quad V = J(\eta_x u + \eta_y v)$$

また、 $\tau_{bx}, \tau_{by} = x, y$  方向の底面せん断応力成分であり、次式で与えられる。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

ここに、 $\rho$  = 水の密度、 $g$  = 重力加速度、 $n$  = 粗度係数である。

流れ場のシミュレーションは、デカルト座標系の計算平面で集中格子を設定し、3重対角行列解法 (TDMA)<sup>9)</sup> を用いて実行する。

### 3. シミュレーションの条件

計算対象区間の計算格子と河道地形を図-1に示す。この河川区間は、河口からの距離(L)がおよそ24.8~26.0 kmである。格子の横断幅は、湾曲部で最大約300 m、それ以外の区間で約125~160 mである。湾曲部の計算格子には左支川の一部が含まれているが、これを除く本川部分の格子の横断幅は最大約210 mである。格子点は、縦断方向に401点、横断方向に59点、計23,659点である。格子点間距離は縦・横断方向ともに最大が約5.3 mである。

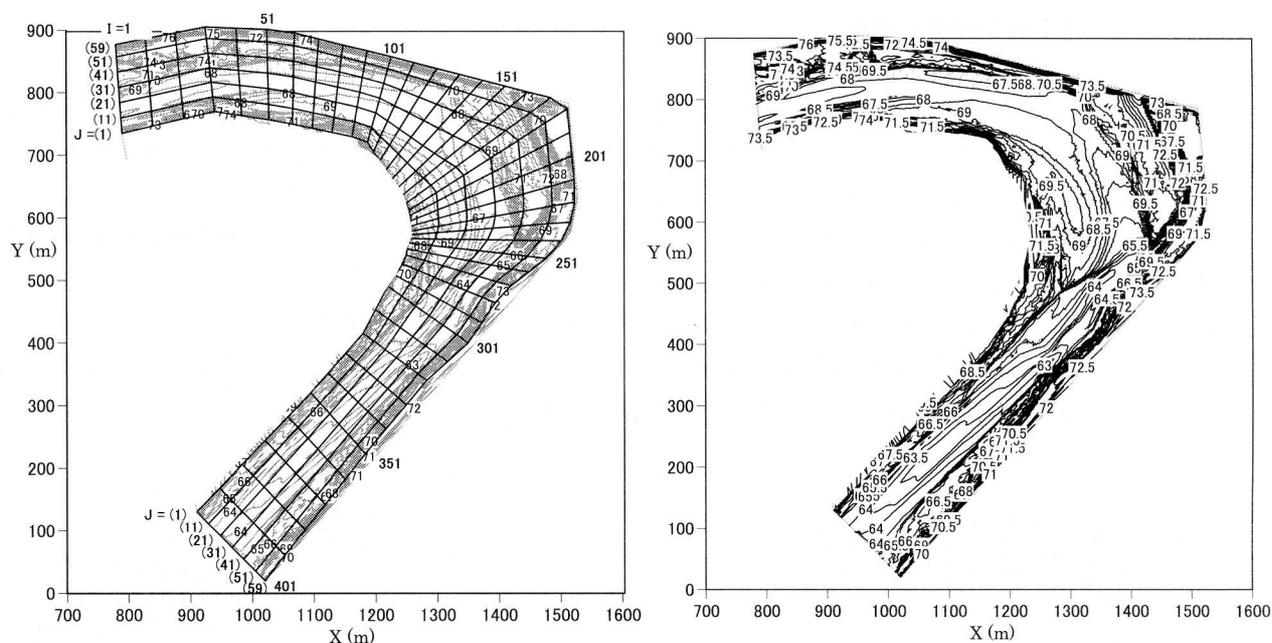


図-1 数値シミュレーション対象河道区間の計算格子と河道地形

砂礫堆は湾曲部の内湾側に広がっており、ここにカワラハハコ群落の流れに沿うように分布している<sup>10)</sup>。本川流路は、砂礫堆左側の平瀬を経て、砂礫堆前縁に近づくと早瀬そして段落ちとなり、その直後にあらためて右に流向を変える。この流向と砂礫堆前縁線はほぼ平行である。砂礫堆の最右岸縁に沿っては、湾曲区間の始点付近から砂礫堆前縁につながる幅の狭いショートカット流路がみとめられる。本川の上・下流端における最深点の比高は約5 mである。

砂礫堆上には、カワラハハコ群落が成立している植被率の低い礫原のほか、ノイバラ群落・オギ群落・ツルヨシ群落などが成立する高植被率の領域がある。また本川流路では、河床勾配や断面形状によって河床材料の構成や分布に違いが見られるほか、支流合流点より下流の左岸寄りには大小数10個の岩が点在する。このため、粗度係数は場所によってかなり大きな違いがあり、その分布も複雑であると考えられる。しかし、本シミュレーションは砂礫堆上の流況を把握し、カワラハハコのレフュージアの水利特性を調べることを主目的としているので、全域で、粗度係数は砂礫床に相当する0.035とした。

シミュレーションに採用する出水ハイドログラフは、山崎第二観測点 (L=29.5 km) での2009年8月9日21時～11日1時の観測値 (図-2) である。ハイドログラフの初期流量は302 m<sup>3</sup>/sであり、その4時間後にピーク流量1582 m<sup>3</sup>/sに達している。このピーク流量は上述の2004年および2011年の出水時より大きく、再現期間は10数年とされている。シミュレーションでは、上流境界の流量としてこのハイドログラフを与え、上流境界の水位は横断方向で一定とし、そこでのH-Q式より算定した。下流境界の水位は、境界直上流の横断面と下流境界の間の水面勾配が前者断面での流量と平均水位から一般断面の不等流計算法<sup>1)</sup>により算定される動水勾配と等しいものとして与えた。

支川からの流入はないものとした。このため、シミュレーションでは、支川区間は本川水位が上がると湛水することになる。

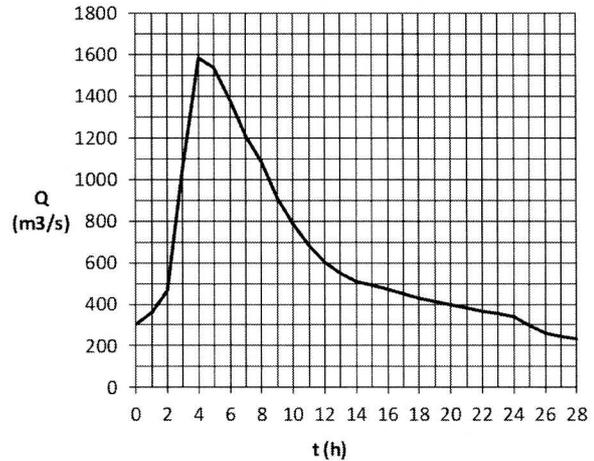


図-2 シミュレーションに用いるハイドログラフ

#### 4. シミュレーション結果と考察

ハイドログラフのピーク流量および波形には、流下過程において有意な変化がみとめられなかった。また上・下流境界における流入流量と流出流量の差は小さく、例えば増水期で、流量500 m<sup>3</sup>/s程度のときに差は約20 m<sup>3</sup>/s、流量1350 m<sup>3</sup>/s程度のときに差は約35 m<sup>3</sup>/sであった。これは、全長が約1200 mの流路でピーク流量時の主流の流速が4～5.5 m/sであり、流下時間が4～5分程と短いのに対し、流量波形が、3時間に約1300 m<sup>3</sup>/sからピーク流量約1600 m<sup>3</sup>/sに増水し再び約1300 m<sup>3</sup>/sに減水する比較的緩やかな変化の波形であるためと考える。

図-3に、流入流量がQ=700 m<sup>3</sup>/sおよびピーク流量 (図中、Q=1600 m<sup>3</sup>/sと表示) のときの流速分布を示す。図中、左右岸に記す「301」は計算格子の横断面番号 (上流境界が1、下流境界が401) であり、またW(301)maxは301横断面 (以下、Sec. 301と表記。他の横断面も同様) における流速の最大値を表す。

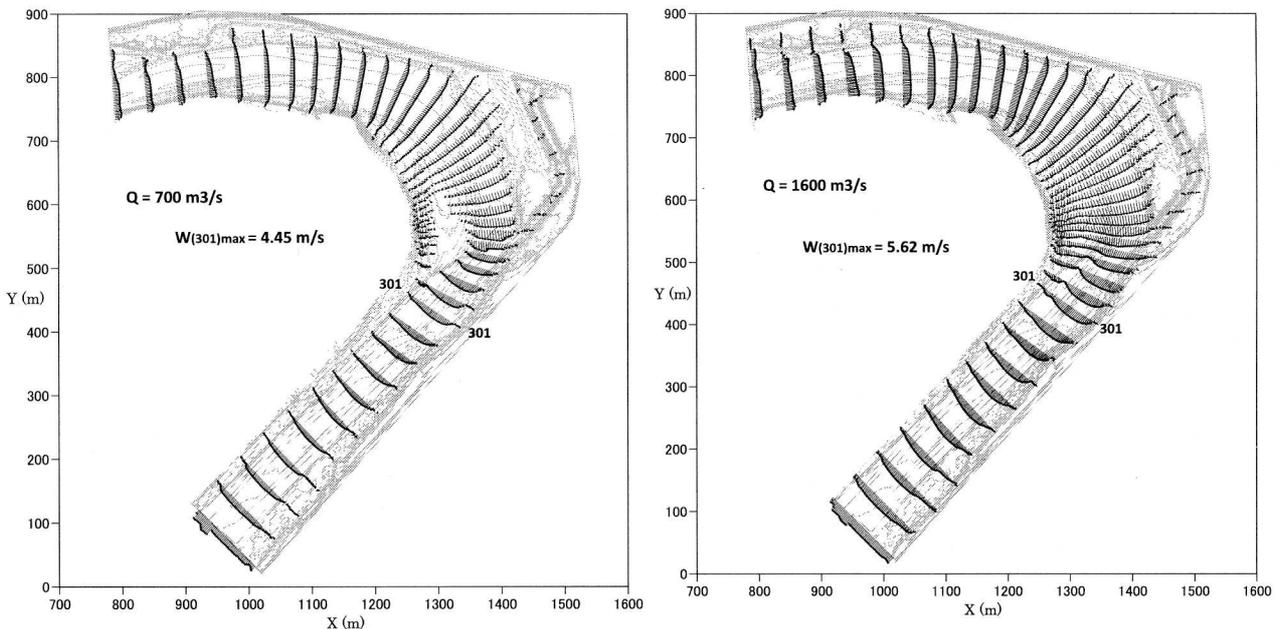


図-3 流量Q=700 m<sup>3</sup>/sおよび1600 m<sup>3</sup>/s (ピーク流量の概略値) のときの流速分布

Q=700 m<sup>3</sup>/s のとき、砂礫堆右縁のショートカット流路にも流れがあるが、砂礫堆のうち下流側の中央部は冠水していない。流れは、上流区間で河道全幅に広がり砂礫堆上を流れたのち、主流とショートカットの流れに分かれる。このため、冠水していない砂礫堆に沿う流路区間では流れの集中がみられ、横断方向の速度変化が大きい。ピーク流量時には砂礫堆全体が冠水しており、主流の横断方向の速度変化は Q=700 m<sup>3</sup>/s のときに比べて緩やかである。

2009 年の出水前にカワラハハコ群落が生育していた分布域は、図-4 の破線で囲まれた領域である。一方 2009 年の出水後、カワラハハコの個体が残存していた地点を図-5 に示す。地点ごとの残存個体数にばらつきがあるが、ほとんどの地点で 1~4 個体、最大 9 個体であり、全数は 107 個体である。残存個体数が多い地点はほとんど図-4 の分布域に含まれる。

流量が約 1000 m<sup>3</sup>/s のとき、砂礫堆全域の冠水が起こる。流量 Q=1000 m<sup>3</sup>/s、1200 m<sup>3</sup>/s および 1600 m<sup>3</sup>/s (ピーク流量) のときのカワラハハコ群落分布域付近の流速分布を図-6、図-7 および図-8 に示す。図中、201、211 … 301 の数字は計算格子の横断面番号である。また W(291)max は、Sec. 291 における流速の最大値を表す。

砂礫堆上の流れは、いずれの流量においても、流下するにしたがって砂礫堆の尾根筋の左右に分かれ、左の流れは主流に加わり、右の流れはショートカットの流れに加わる。このため、砂礫堆前縁線に沿って、主流の流速と砂礫堆上の流速に大きな差が生じている。この大きな流量差は、流量が小さいほど、より上流側で見られるようになる。

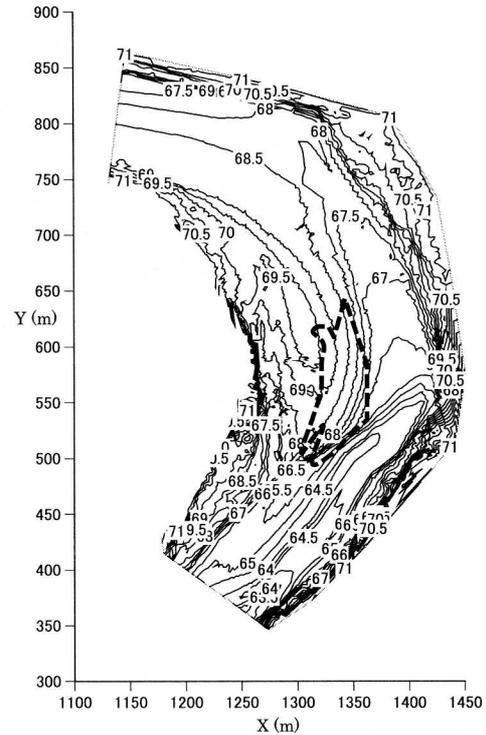


図-4 カワラハハコ群落の分布域 (破線で囲む領域) (2009 年の出水前)

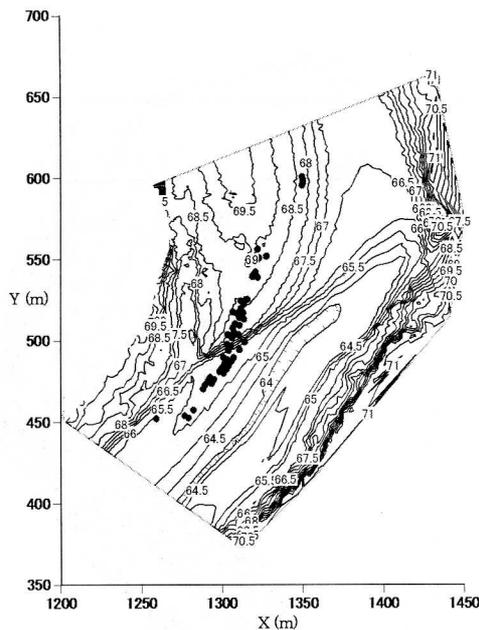


図-5 カワラハハコの個体残存地点 (2009 年の出水後)

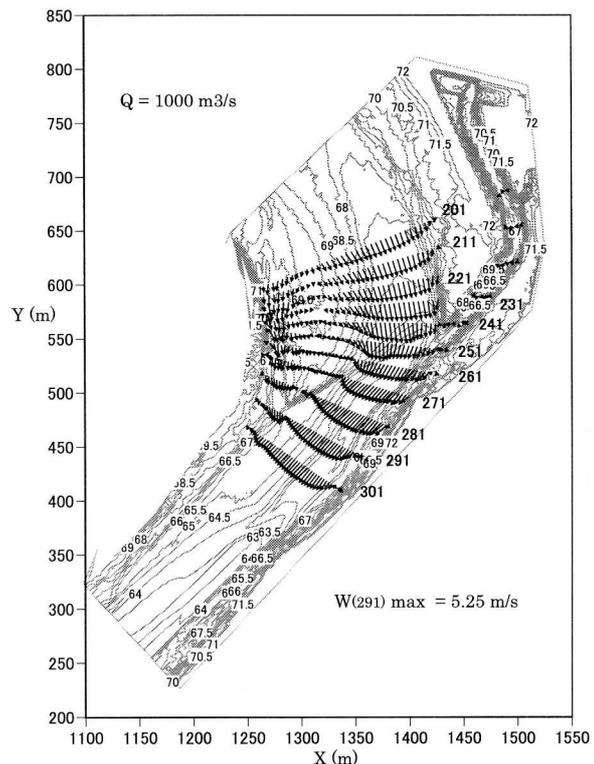


図-6 カワラハハコ群落分布域付近の流速分布 (Q=1000 m<sup>3</sup>/s のとき)

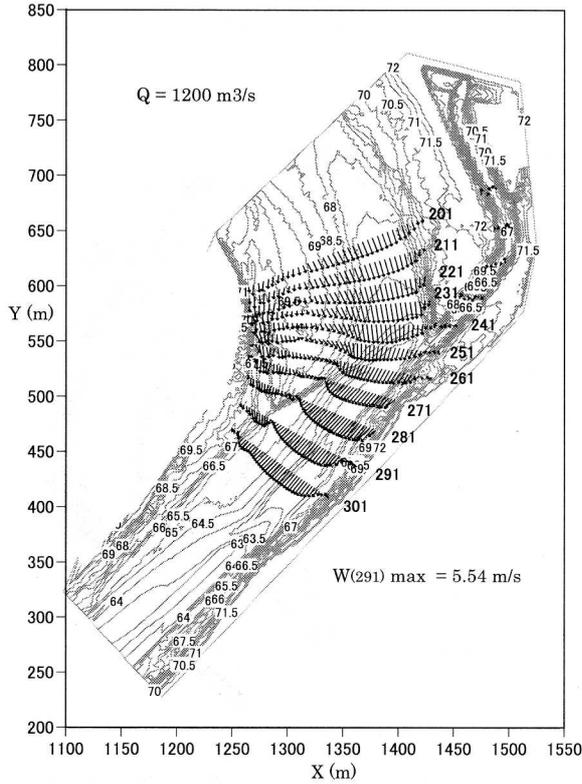


図-7 カワラハハコ群落分布域付近の流速分布 (Q=1200 m³/s のとき)

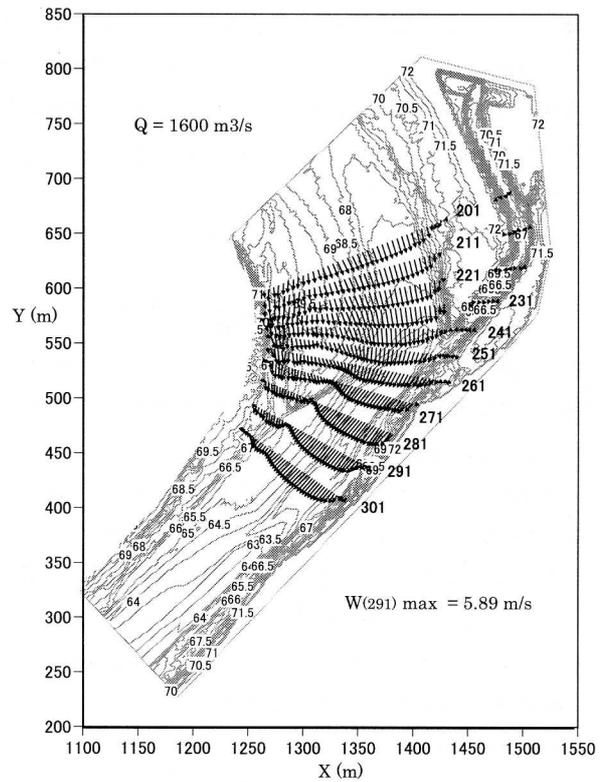


図-8 カワラハハコ群落分布域付近の流速分布 (Q=1600 m³/s のとき)

図-9、図-10 および図-11 に、砂礫堆上および主流での浮子の流跡 (5 秒間隔での浮子の位置) を、流量  $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  および  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  のときについて示す。浮子は、Sec. 81 と Sec. 82 の間にある各計算格子内に横断方向に等間隔で 4 個を配置し、そこから同時に流下し始めるものとした。浮子の全数は、流れの無い所に配置したものも含め、232 個である。図中、凡例の F35、F48 などは浮子の番号を表し、連続する番号の浮子は横断方向に隣り合う浮子である。

流量  $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$  で、砂礫堆の冠水が始まったばかりのときには、隣り合う浮子 F48 と F49 が砂礫堆の尾根筋で左右に分かれ、F49 は主流に入り、一方 F48 は F35 が流下してきたショートカット流路に合流する。

流量  $Q=1200 \text{ m}^3/\text{s}$  に増えると、F49 も砂礫堆前縁付近でショートカット流路に合流するようになるが、その隣の F50 や F51 は尾根筋の右側を流下するもののショートカット流路に入らず主流に合流する。

流量  $Q=1600 \text{ m}^3/\text{s}$  のとき、砂礫堆上でも流速が増して流れの直進性が増すため、F52 は尾根筋の右側を流下するがショートカット流路に向かわず主流に入り、また F52 より左側で砂礫堆上を流れる浮子はやや主流に向かいつつも砂礫堆前縁にまで達している。

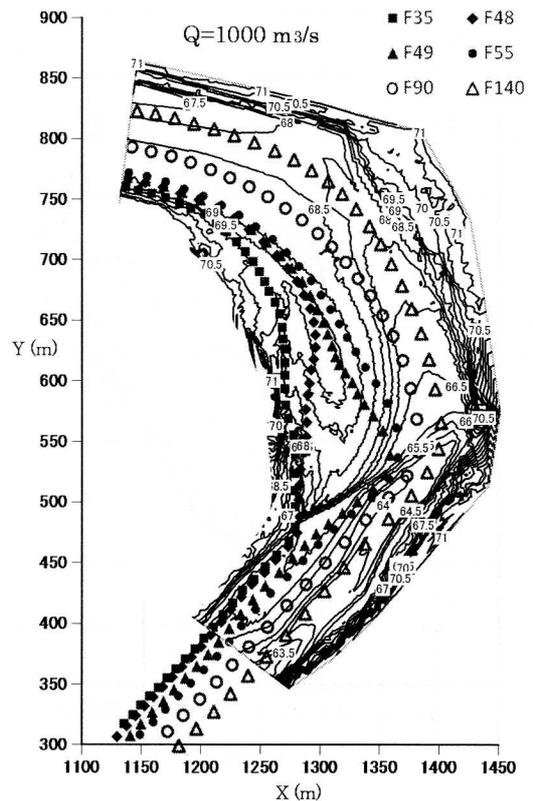


図-9 浮子の流跡 (Q=1000 m³/s のとき)



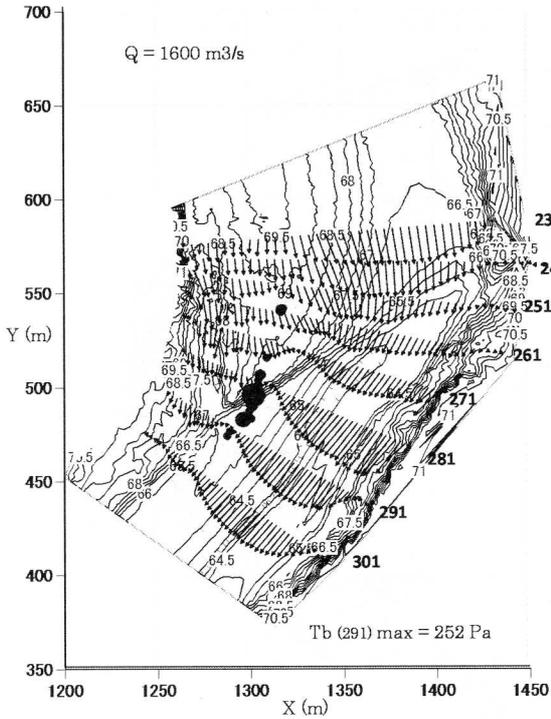


図-13 カワラハコ個体の残存地点付近の  
底面せん断力分布 (Q=1600 m³/s のとき)

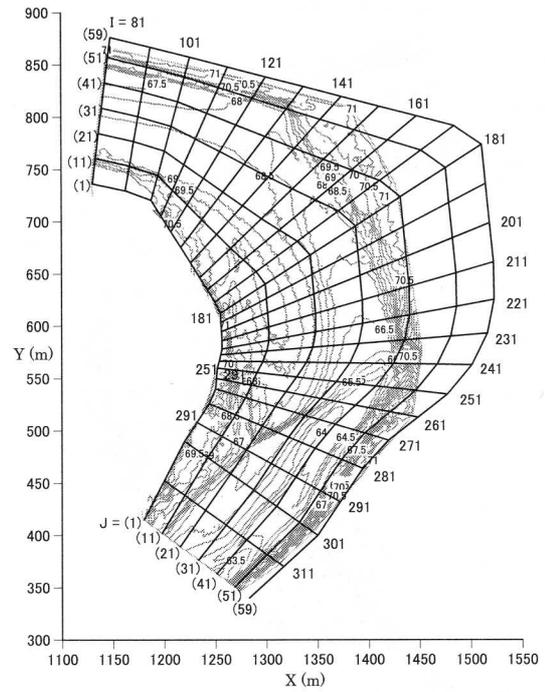


図-14 湾曲区間の計算格子および格子点番号

Sec. 231 では、砂礫堆尾根筋の左側領域のほとんどで、せん断力が 150 Pa 以上が続いている。Sec. 251 では、せん断力の小さな領域が尾根筋付近にあり、その両側で主流あるいはショートカット流れに近づくにつれてせん断力が大きく、長く続くようになる。Sec. 261 では、尾根筋から主流と接する砂礫堆前縁付近までの広い領域で、せん断力は 150 Pa 以下であり、150 Pa が続く時間はほぼ 2.5 時間、50 Pa~100 Pa が続く時間が約 4.5 時間である。カワラハコの実存数が多い Sec. 271、Sec. 281 および Sec. 291 の J=22~27 の領域では、せん断力は 50 Pa 以下であり、これを超える場合でも 100 Pa 以下である。

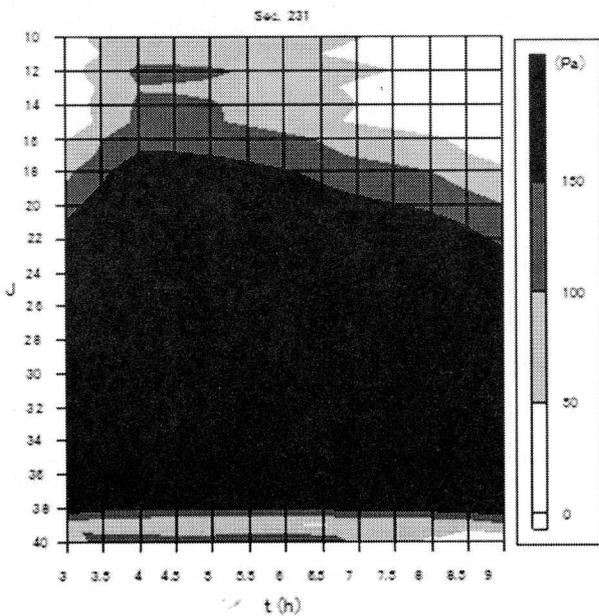


図-15 Sec. 231 (J=10~40) のせん断力の経時変化

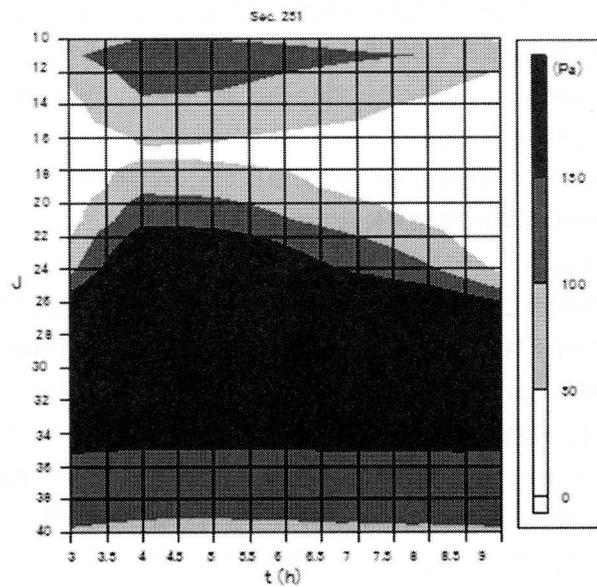


図-16 Sec. 251 (J=10~40) のせん断力の経時変化

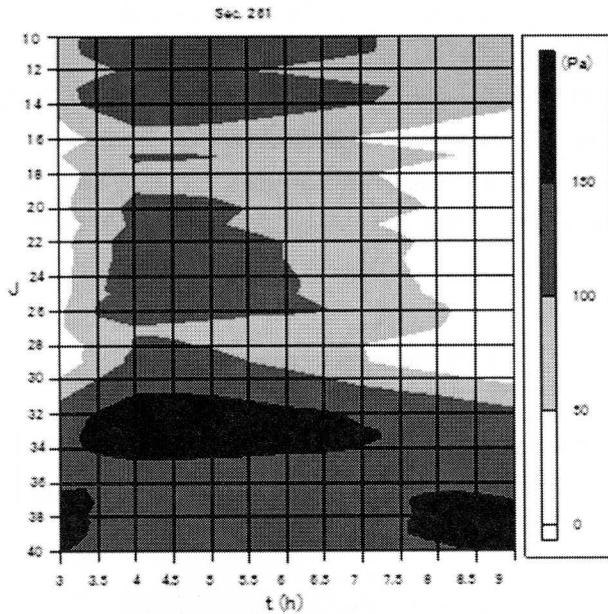


図-17 Sec. 261 (J=10~40)のせん断力の経時変化

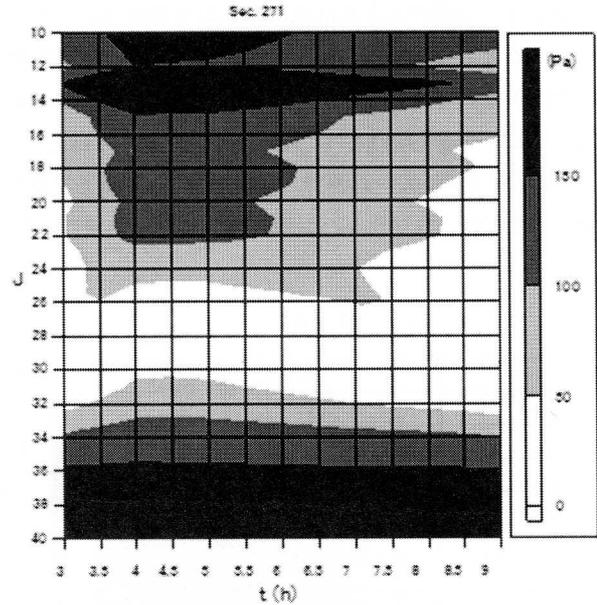


図-18 Sec. 271 (J=10~40)のせん断力の経時変化

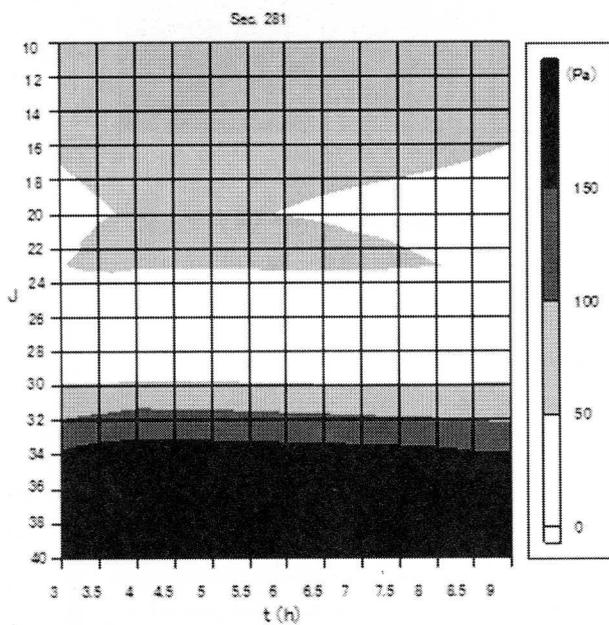


図-19 Sec. 281 (J=10~40)のせん断力の経時変化

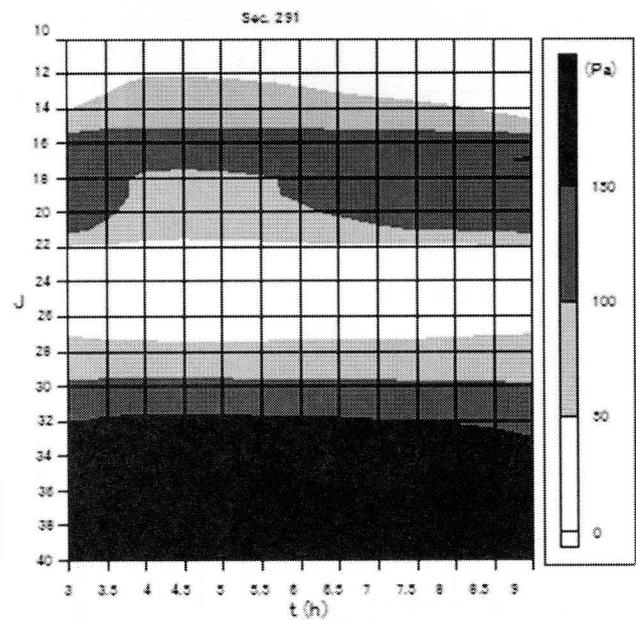


図-20 Sec. 291 (J=10~40)のせん断力の経時変化

ひとつの洪水イベント中、一定地点における底面せん断力は時々刻々変わり、またせん断力が作用する時間の長さは冠水の有無も含めて地点ごとに異なる。以下では、一定地点において砂礫堆あるいは植生が流れから受ける作用力を評価するために、せん断力の大きさと作用時間の長さの積分値、すなわちせん断力の力積を求める。

時刻  $t=t_1$  から  $t=t_2$  までの力積  $I$  は

$$I = \int_{t_1}^{t_2} T_b(t) dt$$

により算定する。ここに、 $T_b(t)$  は時刻  $t$  のときのせん断力である。

図-21~図-26に、出水開始後の時刻  $t=0.5$  hからの力積 (単位: Pa・h) を、Sec. 231より下流の幾つかの横断面で示す。これらの図中、縦軸Jは計算格子 (図-14参照) の横断方向の格子点番号、横軸は出水の始まりからの経過時

間である。力積の大きさは凡例のとおり濃淡で示されているが、いったん力積が  $200 \text{ Pa} \cdot \text{h}$  以上となった後に白色となっているところは、その時刻にその地点の冠水が無くなったことを示している。

上述のとおり、カワラハハコの残存数が多いのは Sec. 271~291 の間の  $J=22\sim27$  の領域である。この領域の力積は、Sec. 231 では増え続けて 12 時間で  $1400 \text{ Pa} \cdot \text{h}$  以上となり、Sec. 251 でも領域の大部分で増え続けている。Sec. 261 では、 $J=18\sim28$  の広い範囲で力積は  $600 \text{ Pa} \cdot \text{h}$  以下であり、 $400\sim600 \text{ Pa} \cdot \text{h}$  の時間帯は約 2.5 時間にとどまる。Sec. 271、281、291 では、カワラハハコ残存地点付近の力積は  $200 \text{ Pa} \cdot \text{h}$  以下であり、例えこれを超えても  $400 \text{ Pa} \cdot \text{h}$  以下である。

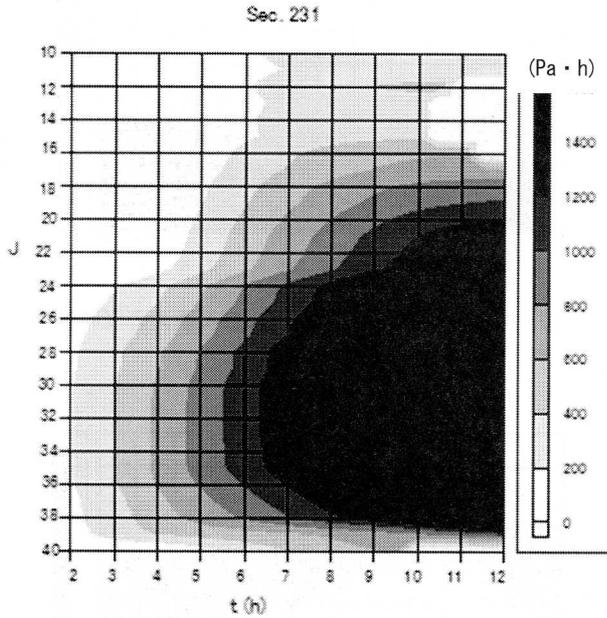


図-21 Sec. 231 ( $J=10\sim40$ ) のせん断力の力積(単位:  $\text{Pa} \cdot \text{h}$ )

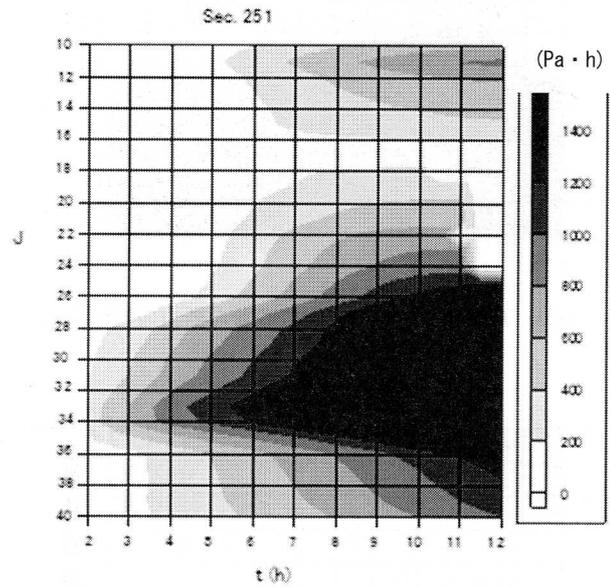


図-22 Sec. 251 ( $J=10\sim40$ ) のせん断力の力積(単位:  $\text{Pa} \cdot \text{h}$ )

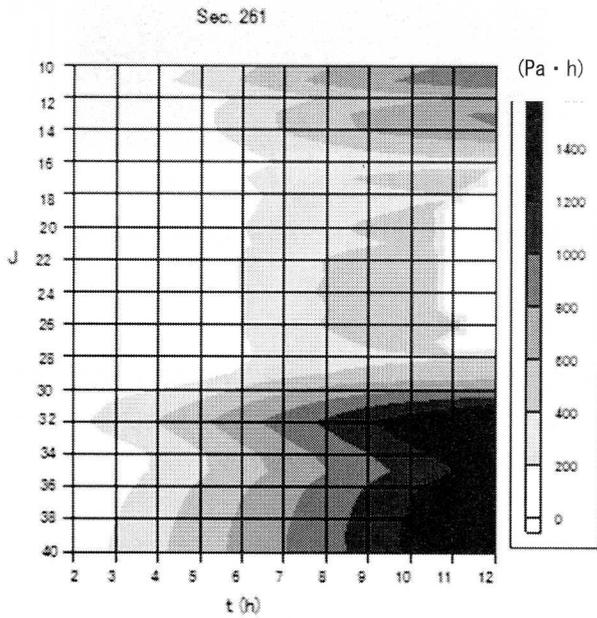


図-23 Sec. 261 ( $J=10\sim40$ ) のせん断力の力積(単位:  $\text{Pa} \cdot \text{h}$ )

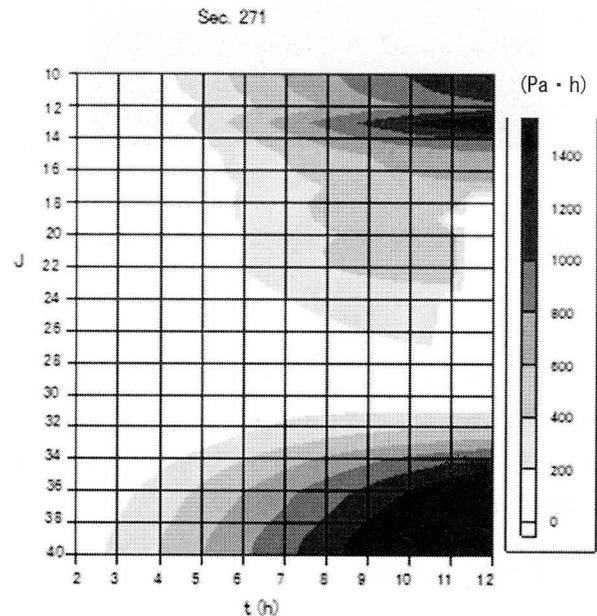


図-24 Sec. 271 ( $J=10\sim40$ ) のせん断力の力積(単位:  $\text{Pa} \cdot \text{h}$ )

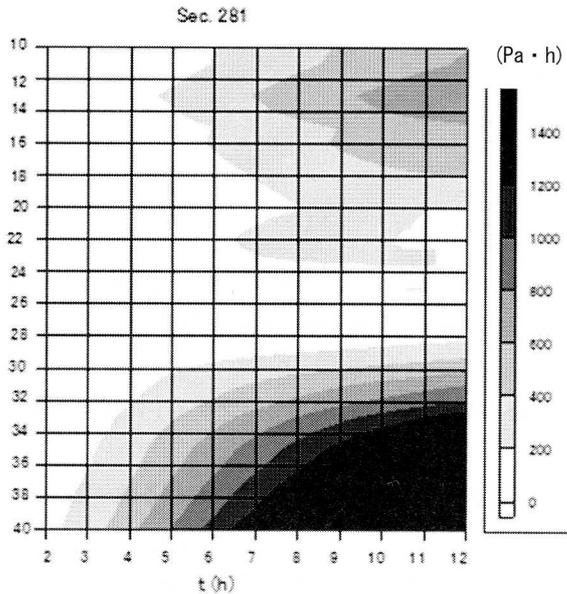


図-25 Sec. 281 (J=10~40)のせん断力の  
力積(単位: Pa・h)

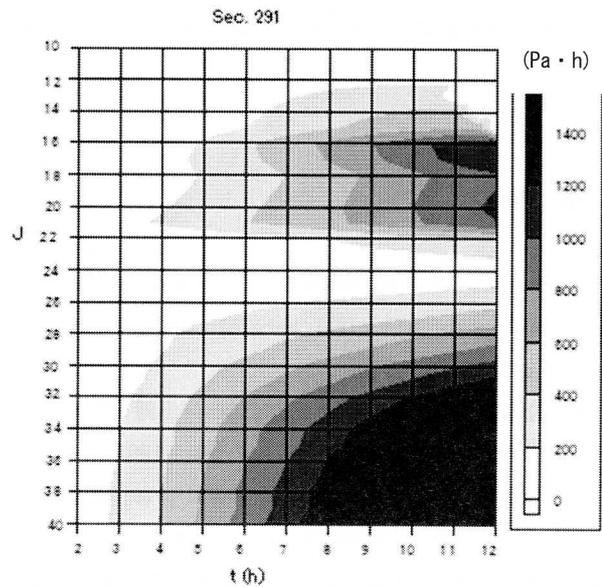


図-26 Sec. 291 (J=10~40)のせん断力の  
力積(単位: Pa・h)

## 5. 結論

礫河原を指標する代表的な植生であるカワラハハコのレフュージアの水利特性を把握するため、揖保川の湾曲区間内湾側に形成された砂礫堆での洪水流を対象に、平面2次元流の数値シミュレーションを行った。その結果、以下の知見が得られた。

砂礫堆には河道の湾曲とほぼ同様に湾曲する尾根筋があり、砂礫堆上の流れは流下するにつれて尾根筋の左右に分かれ、左に向かう流れは緩やかな斜面を下って主流に入り、右への流れは砂礫堆の右岸縁にあるショートカット流路に入る。このため、砂礫堆上の流れは下流に向かうほど流量が減り、流速も小さくなる。とくに尾根頂上より下流の尾根筋はあらためて右に曲がるため、右側のショートカット流路への流入割合が増える一方、緩やかな左側斜面上を広がって主流に向かう流れの流速はさらに小さくなり、砂礫堆前縁の先端付近にまで達する流れの流速は非常に小さくなる。この結果、尾根頂上より下流の左側斜面、とくに砂礫堆前縁の先端付近では、底面せん断力が他の領域よりかなり小さくなり、これが2009年の出水後、カワラハハコの個体がこの付近で最も多かった大きな理由と考えられる。

砂礫堆はもともと出水規模によって冠水の程度(水深、継続時間など)や頻度が異なるけれども、冠水時の流れの様相は地形によっても違うことが分かった。ひとつの洪水期間中、砂礫堆上の各地点の冠水時間や水深、流速が地形によって異なるため、砂礫堆の構成材料や植生に作用する力の大きさや継続時間も場所によって異なり、その結果、色々な植生にとってレフュージアとしての水利的条件を備えた場が存在し得ることになる。

近年、樹林化が進む河原の礫原再生事業が計画、実施されており、その方法は河原地盤高の切り下げが主体である。しかし、単一的な地盤の切り下げは、出水時に河原上に多様な流況が出現する可能性と頻度を少なくすると考えられる。したがって切り下げを行う際、その起伏や形状は現地の河道状況などを踏まえて別途決定するとしても、地形的な配慮が重要であると考えられる。

本研究では、カワラハハコの残存域は、底面せん断力やその力積が他領域と比べてかなり小さい領域であることを示し、レフュージアとしての水利的条件が備わっている場と判断する理由を示した。しかしこの残存域で、カワラハハコ以外の草本類や細粒土砂が流失する可能性についての考察には至っていない。今後、この考察は、カワラハハコ群落の生育の場である礫原の成立・維持機構を理解するためにぜひ必要と考える。そして、それには、2次元流だけでなく、3次元流の数値シミュレーションが必要であると考えられる。本研究の砂礫堆についても、その前縁付近の斜面は急勾配で、

砂礫堆の下流で水深が急に大きくなる。したがって、洪水中に砂礫堆前縁付近の河床材料の移動機構を理解するためには3次元流の数値シミュレーションが重要になると考える。

## 参 考 文 献

- 1) Miyawaki A. und Okuda S. : Pflanzensoziologische Untersuchungen über die Auenvegetation des Flusses Tama bei Tokyo, mit einer vergleichenden Betrachtung über die Vegetation des Flusses Tone., *Vegetatio* 24, pp. 229-311, 1972
- 2) 倉本宣・加賀屋美津子・可知直毅・井上健: カワラノギクの個体群構造と実生定着のセーフサイトに関する研究, ランドスケープ研究 60, pp. 557-560, 1997
- 3) 倉本宣・鷺谷いづみ・井上健: 多摩川におけるカワラノギクの個体群の分断化とその保全における種子散布の役割, ランドスケープ研究 58, pp. 113-116, 1995
- 4) Asami, K., Akamatsu, H., Fukui, S. and Tamura, K. : Morphological characteristics of flood refugia of cobble-bed vegetation., *Journal of Hydro-environment Research* 6 (2), pp. 127-136, 2012
- 5) Asami, K., Nakayama, A., Kawatani, T. and Fujita, I. Conditions of Flood Disturbances and Refugia for Conservation of Cobble-Bar Vegetation., *Proc. 10<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics*, Trondheim, Norway, 2014
- 6) 荒川忠一: 数値流体工学 (第6刷), 東京大学出版会, pp. 123-153, 2003
- 7) 越塚誠一: 数値流体力学 (第6刷), 培風館, pp. 53-92, 2006
- 8) 藤井孝蔵: 流体力学の数値計算法 (第6刷), 東京大学出版会, pp. 155-208, 2007
- 9) 荒川忠一: 数値流体工学 (第6刷), 東京大学出版会, pp. 17-23, 2003
- 10) 浅見佳世・中山昭彦・川谷健・藤田一郎: 揖保川中流カワラハハコ群落成立地の植生的および水理的考察, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 69, No. 4, I\_1339-I\_1344, 2013
- 11) 中津川誠・清水康行: 現場のための水理学(2) —一般断面における不等流計算—, 現場のための水理学, 北海道開発局土木試験所河川研究室, pp. 23-33, 1988

## 著 者

川谷 健 所員, Ph.D., 水工学  
浅見佳世 (株) 里と水辺研究所, 博士 (理学), 植生学・保全生態学