

【建設工学研究所論文報告集第54号〔論文〕2012年11月】

## 現地調査と数値解析による揖保川における カワラハハコ群落成立地の水理学的特性の研究

### Study of Hydraulic Characteristics of Habitat of *Anaphalis margaritacea* subsp. *yedoensis* (Franch. et Savat.) Community in the Ibogawa River by Field Survey and Numerical Simulations

浅見佳世 中山昭彦 川谷健 藤田一郎  
Kayo Asami Akihiko Nakayama Takeshi Kawatani Ichiro Fujita

#### 1. はじめに

河川に成立する植生にとって出水による攪乱は、多大な影響をおよぼす環境要因の一つである。出水による中規模の攪乱は、他群落への遷移を抑制し実生定着の場となる裸地を作るなど、群落の維持に貢献する<sup>1),2)</sup>。一方、長周期に生じる強度の攪乱では、植物体や生育基盤の大半を流し去ってしまう危険性がある。供給源からの散布が制限された場所では、生き残った種子や根茎などの量が、攪乱後の種組成や遷移過程に影響を及ぼす<sup>3),4)</sup>。分布域の減少に伴い分断され孤立化の進んだ生物群集では、個々の分布地の消失が種の絶滅の危険性の増大につながるということが指摘されている<sup>5)</sup>。そのため、大出水時に避難地となるレフュージアの有無や立地条件の解明は、河川の生物多様性を保全する上で重要な課題となる。

この課題に対して著者らは、大出水時にレフュージアとなる立地が存在することを植生調査から明らかにした<sup>6),7)</sup>。さらに流量が増加しても出水時の攪乱(底面せん断応力)が閾値を超えないことを1次元水理解析により示し、その原因として当該地の下流側に狭窄部が存在することや河道幅が広がっているなどの地形条件が影響を及ぼしている可能性を示唆した。

しかし、カワラハハコ群落が成立するのは、蛇行する流路の内湾に形成される砂礫上で、しかも平水時には早瀬になっている湾曲から直線に戻るあたりの内岸にある場合が多く、流路の変化や断面内変化を考慮に入れず流下方向変化のみを解析する1次元計算手法による説明では限界がある。一般的に河川の平面形状や横断面内分布を考慮した計算には、運動方程式を水深方向に平均した浅水方程式を用いる方法が用いられる。また、植生や湾曲の影響など水深方向に変化する要因のある場合いくつかの層に分ける手法があり、平均流速、河床せん断さらにはそれによる河床変動などの計算も可能である。しかしこれらの平均式に必要な乱流モデルや抵抗則、更に静水圧近似などは、多様な状況では適用の困難な要素があり、解析結果の精度・信頼性に問題が出てくる場合が多い。これに対し、近年計算機の発達により近似を極力少なくし、非定常3次元流を数値解析により解く乱流シミュレーションが行われるようになり、実河川流への適用も可能になりつつある。

本研究では、一般的な平面2次元解析、および最新のラージ・エディター・シミュレーション (LES) を行い、これまで行った1次元解析の結果と合わせ、現地調査による水理学的要因について考察する。特に、時間的、空間的に詳細な流れ情報を含む LES 計算結果をもとに、カワラハハコ群落成立地に特有な水理学的特性を明らかにし、予想される地形的条件についても考察する。

## 2. 現地調査

### 2. 1 対象植生「カワラハハコ群落」

本研究では、キク科多年草カワラハハコ (*Anaphalis margaritacea* subsp. *yedoensis*) とその生育により識別される植生「カワラハハコ群落」を対象とする。

カワラハハコ群落は、植物社会学の体系で、河川に特有なヨモギーカワラハハコ群団という植生に位置づけられる<sup>8)</sup>。地理的には北海道から九州まで広く分布するが、乾燥した貧栄養な砂礫地を中心に成立する、砂礫堆を代表する植生である。カワラハハコはこの植生を識別する種であり、構成種として、カワラノギク、カワラナデシコ、カワラヨモギ、カワラマツバ、カワラサイコなどカワラと名の付く植物を有する。またこの植生の成立地は、礫原に固有な動物、カワラバツタ、カワラハンミョウやカワラチドリ（砂礫堆に生息するチドリ類）などの生息空間としても利用される<sup>9)</sup>。しかし、1980年代より同群団の植生は衰退が指摘され<sup>10), 11)</sup>、礫原に固有な動植物の多くが絶滅の恐れのある種に指定され、カワラハハコも14都府県において絶滅の恐れのある種に指定されている<sup>7)</sup>。このような、礫原の環境に対する感受性の良さから、本研究ではカワラハハコを礫原の健全性を示す指標種と位置づけた。

### 2. 2 対象地域

#### 2. 2. 1 概要

本研究は兵庫県の揖保川を対象に行った(図1)。揖保川では河口から10km付近から50km付近にかけて砂礫堆が発達しており、19~27kmの区間でカワラハハコ群落が確認されている。近年の出水後にも同群落が消滅せずに残った区間(25.2~27km)のうち、大出水時のレフュージア<sup>6)</sup>である25.3km右岸の砂礫堆を解析対象とした。河道屈曲部の内湾側に成立するこの砂礫堆は、堰や河道掘削の影響を受けわずかに位置を変えながらも明治時代から存在し、1991年航空写真には礫原上に植生が成立しており、カワラハハコ群落も長期間にわたり出水の影響を受けつつ動的平衡状態で維持されてきたと推察される。なお25.2~7km区間の河床勾配は約1/200~1/400である。

対象地域近傍の山崎第二観測点(29.5km)における過去40年間(1972~2012年、暫定値含む)の平均年最大流量は約750m<sup>3</sup>/sである。近年では、2004年8月31日に既往4番目の出水(1515m<sup>3</sup>/s)が、2009年8月10日には近10ヵ年最高水位を記録した出水(1595m<sup>3</sup>/s)が、2011年9月3日には約1300m<sup>3</sup>/sの出水が発生した(図2)。以下、これら3つの出水を、「2004年出水」、「2009年出水」、

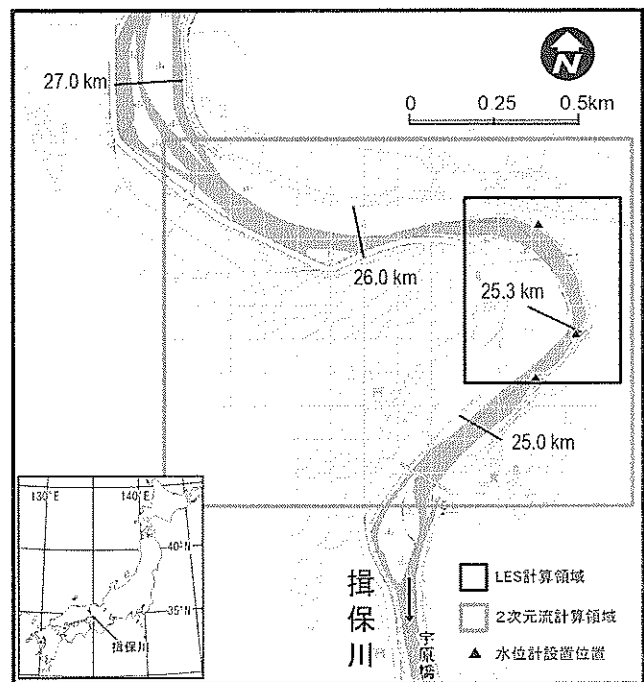


図-1. 調査対象地域

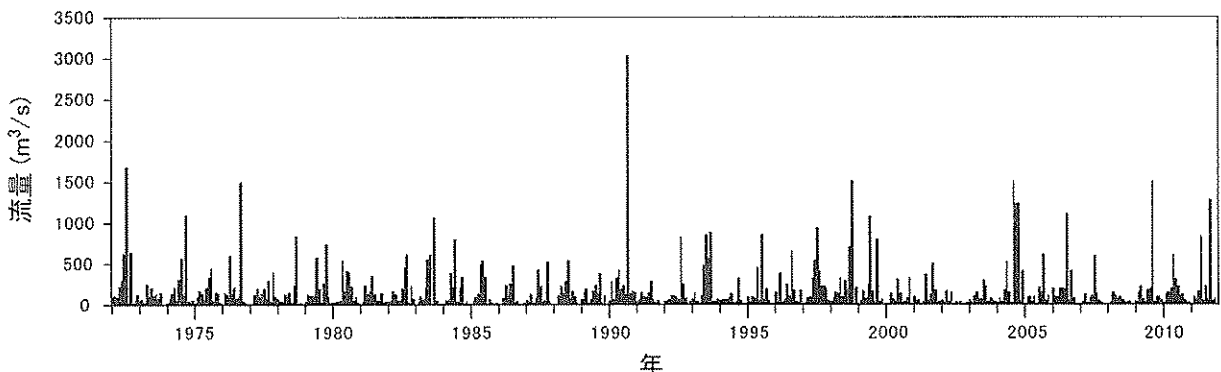


図-2. 山崎第二観測所における月最大流量(1972-2011)

「2011年出水」と呼ぶ。それぞれの出水の生起確率は、2004年出水と2009年出水が10数年に1度、2011年出水は10年に1度に相当する。生起確率は、年最大流量を用いてワイブル公式により対数正規分布から求めた。

## 2. 2. 2 対象範囲

本対象地域では2004年出水後から追跡調査を行っており、カワラハハコ群落の成立地は2009年出水前に礫原全体に広がった<sup>6)</sup>が、2009年出水により群落の大半が消失した。その後は、続けて2011年出水が生じたこともあり、分布は礫原全体には回復していない。出水直後に生存を確認したカワラハハコ残存個体は、2009年出水前の群落の成立地内およびその周辺で見つっているが、残存個体が集中した位置は両出水で異なり、前者が礫原中央部にツルヨシがわずかに混じる状態で残ったのに対して、後者は内湾側に成立する高植被率の植生（ノイバラ群落）に接する箇所であった<sup>6)</sup>。以上から、カワラハハコ群落が成立している領域はすべて同等にレフュージアとなる可能性を有すると考えられる。そこで本論では、最も広くカワラハハコ群落を確認した2009年出水前の立地を、潜在的にカワラハハコ群落が成立可能な立地（以後、カワラハハコ群落成立地とする）と位置づけて、数値計算結果を解析する際には、カワラハハコ群落成立地とカワラハハコ残存個体が集中した箇所に着目した。カワラハハコ群落成立地および各出水後に確認したカワラハハコ残存個体の位置を図3に示す。

なお、カワラハハコ群落成立地周辺に見られた植生配列は、砂礫堆の河畔部の水際にヤナギタデ群落やツルヨシ群落、河道から離れた中位にカワラハハコ群落、高位に高茎多年草の密生群落や低木群落、本流から離れた所には増水時に河道となる凹地がありツルヨシ群落が成立するなどの点で、他の地域にも見られる<sup>12-14)</sup> 砂礫堆の形状に応じた一般的な配列とみなせる。

## 2. 3 調査方法

### 2. 3. 1 流況観測

現地では、出水時の流況の変化を把握するために、水位観測、定点撮影、航空写真撮影、動画撮影を行った（図1）。これらの内容について以下に説明する。ただし、動画撮影を利用した解析結果は別途報告する予定であり、ここでは前3つについて説明する。

水位観測はデータロガー（Onset社 ホボ水位ロガーU20-001-01）を用いて行った。設置箇所は、後述するLES計算の計算領域の上流端、下流端、およびカワラハハコ群落成立地の主要部付近の3箇所、2009年6月よりデータの取得を開始した。得られたデータに対しては、山崎第二観測所（29.5km）の流量を同時刻の水位計測時の流量として与え、出水ごとにH-Q式を作成した。

定点撮影はインターバルカメラ（Brinno社 Garden Watch Cam）を用いて行った。出水時の水面の広がりや水位上昇を観察するために、25.3km左岸の流れを俯瞰できる位置に機材を設置し、昼間のみ10分間隔の自動撮影で2011年から開始した。撮影範囲内の出水時にも冠水しない樹木や岩については測量を行い位置座標を取得した。航空写真撮影は、2008年10月6日、2009年8月2日、同年8月10日に行った。撮影時の流量は、それぞれ、約25、140、430m<sup>3</sup>/sである。得られた画像は幾何補正を行った。これらの作業により、画像に映る陸域への浸水状況を数値計算結果と照合できるようにした。

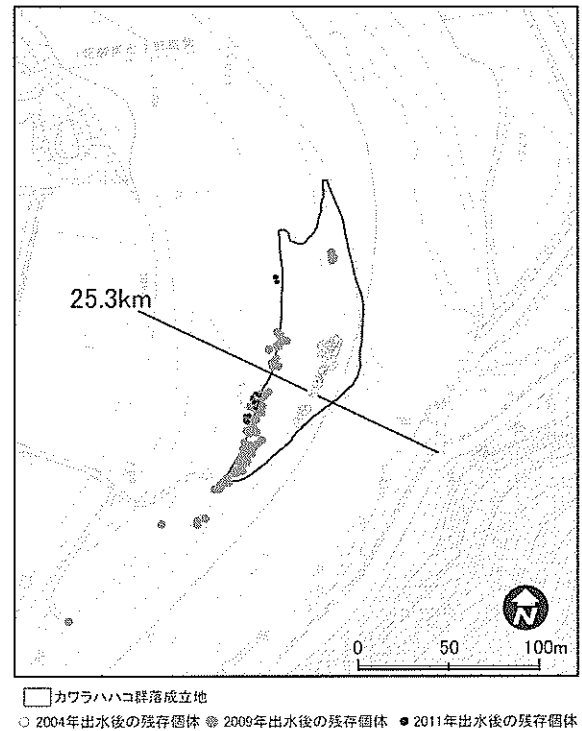


図-3. カワラハハコの分布状況

### 2. 3. 2 河床堆積物

本研究では、出水時の攪乱強度の指標として底面せん断応力に着目し、礫径ごとと限界掃流力を求めるための粒度分布調査と、実際の出水時の移動状況を知るための個別礫調査を行った(図4)。

粒度分布調査は、カワラハハコ群落成立地(図4のNo.1~3)と水際のヤナギタデ群落(図4のNo.4)の立地を対象に、線格子法<sup>15)</sup>に基づき行った。立地や植生の違いに応じて流心に平行な測線を4本設け、それぞれ側線に沿って100個の礫を採取し、長径、中径、短径を測定した。長径が1mm未満の砂については計測は行わず、1mm未満として記録した。調査は、2009年出水前後の6月6日と12月12日に行った。得られたデータは、長径、中径、短径の積の3乗根を各礫の粒径として、次式により礫ごとの限界掃流力<sup>16)</sup>を求めた。1mm未満の砂は0.5mmの粒径として扱った。

$$\tau_{ci} = \frac{d_i}{d_m} \left( \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_i / d_m)} \right)^2 \tau_{cm} \quad (d_i / d_m \geq 0.4) \quad (1)$$

ここで、 $d_i$ : 粒径,  $d_m$ : 調査地点の平均粒径,  $\tau_{ci}$ : 粒径 $d_i$ の礫の限界掃流力,  $\tau_{cm}$ : 調査地点の平均粒径の礫の限界掃流力である。 $\tau_{cm}$ は岩垣の式により求めた<sup>17)</sup>。

個別礫調査では、別途行っている植生調査の結果とも対応できるように、横断方向に設けた2本の調査ラインに沿って5m間隔で調査を行った(図4)。2本のラインはそれぞれ、個別礫調査ライン(±0m)、同(+30m)と呼ぶ。2本のラインのうち、個別礫調査ライン(±0m)は25.3km横断線と一致する。現地では、調査準備として、1m×1m枠内に表出している礫の中から長径降順の5つを選び、長径、中径、短径を測定した。測定後の礫には、マジックで礫に調査地区番号と礫番号を書き、元の位置に戻して写真を撮影した。得られたデータは、上述の粒度分布調査結果を参照することにより、限界掃流力に換算した。準備作業は2009年6月に行い、その後生じた3回の出水(同年6月22日:ピーク流量約180m<sup>3</sup>/s, 同年8月2日:約260m<sup>3</sup>/s, 同年8月10日:1595m<sup>3</sup>/s)後に、礫の移動や消失の状況を記録した。

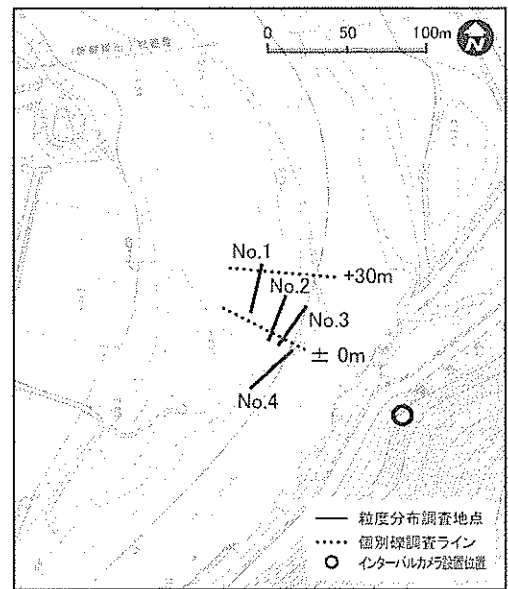


図4. 河床堆積物の調査地点

## 3. 数値解析

### 3. 1 数値計算手法

前節で説明したようにカワラハハコ群落の成立する河川の出水時の水理学的特性を以下のような数値流体計算方法を用いて計算する。手法は、静水圧分布を仮定した水深平均流方程式に基づく平面2次元解析および3次元非定常運動方程式を空間フィルタ平均したものを数値解析により解くLES法の2種である。

洪水時には河床および浮遊する砂礫の移動は重要ではあるが、河床形状の変化は流れのスケールに比べ遅い状況を対象にし、何れの方法とも河床は固定された形状であるとした計算である。河床を固定した計算としたのは、河床移動限界の条件を検討するため、いったん移動し始めた後の状況を解析することは対象としないためである。従って、河床と植生の移動後の状況については本シミュレーションからは判断できない。河床移動を考慮する計算では、流れと河床移動計算が相互に誤差を増幅する恐れがあり、本計算ではそれをさけるため、河床移動前の流況の予測に限っている。

#### 3. 1. 1 平面2次元水深平均法

計算法としてまず既往の静水圧近似を仮定し水深方向に積分した浅水流方程式を解く方法を適用する。基礎式、モデルは参考文献<sup>18)</sup>にあるような標準的なもので、水平方向レイノルズ応力に2次元渦粘性モデル、底面抵抗はマニング則

を用いる。この方法による計算領域は図1に示す領域とし、計算初期として適当な水面勾配、流速分布を、境界条件は上流端と下流端の水位を与え、非定常計算を行い、定常状態に達した状態の流速、流量、底面せん断分布を解とする。

### 3. 1. 2 LES 計算手法

本計算に用いる LES 法は運動方程式の移流項の差分には散逸性の風上差分を用いるが、フィルタ平均により発生するサブグリッド項も Smagorinsky モデルで考慮し、壁面あるいは粗面境界は壁面応力モデルをいわゆる wall model として用いるもので、ILES<sup>19)</sup>、や Hybrid LES 等とやや異なる手法である<sup>20)</sup>。計算手法は、空間フィルタ平均量についての運動方程式と連続の式を直交座標で定式化したものを基に、差分法で解く方法で、離散化には固定直交格子を用い、速度成分は格子セル表面の中央、圧力はセル中心で定義する食違変数配置とする。水面より上の空気の運動は無視し液体のみの運動を解き、水面は水平位置の一価関数で表されると仮定し、格子セルを鉛直方向に投影した面の中央位置で水位を定義することにより表現する。

数値解法は、運動方程式を陽的に時間進行させ、その後連続式を満足させるよう圧力と流速を修正する HSMAC 法を基にしたもので、水面の移動は連続式を満足させる段階で水面での圧力境界を満たすよう移動させる。基本的には Nakayama<sup>21)</sup> に述べてある方法であるので詳細は省略するが、河川湾曲部流れを対象とする本計算に特に重要な要素を、計算領域上下流での条件、河床地形、水際の移動、さらに計算格子で解像可能な大きさの岩などの障害物、形状は解像出来ないが、力学的効果を及ぼす水面下の植生の影響などのモデル化について以下に記述する。

河床形状は使用する直交格子で近似するが、計算では固体境界法線方向速度成分を実際の河床境界面に最も近い速度定義位置でゼロになるよう設定する。境界面接線方向速度成分は指定せず、境界から最も近い定義点での速度とその境界面までの距離より壁面せん断応力を推定し、これを境界条件とする、壁面応力境界条件を適用する。底面せん断応力はこの結果より得られる。

計算対象領域は前章に説明しているように東西・南北それぞれ約 500m で閉まれる領域で、ほぼ西から流入し 130 度ほど湾曲し、南西方向に流れ出る流れの詳細をシミュレーションする。少なくとも上流端と下流端は常流であると想定し、流入面では流量を時々指定し、下流端では水位を固定あるいは流量により変化させる境界条件を与える。流入面での水位は流れと水面の計算の結果として決まる。各時間ステップで流入面での流速を積分することにより流量を計算し、指定流量とに差があれば流速に一定係数を掛けることにより調節する。出来る限り十分発達した乱流を流入させるよう実際の流入面の upstream に約 40 格子分の断面形状一定の接近部を設けこの区間では上流端と下流端の流速は同一とする周期条件を与える。計算の初期は一般的な粗面対数則を仮定するが、ある程度時間が経てば自然な流速分布と発達した変動成分が得られる。

下流端ではまず流出流速を積分し流出量を計算し、この値により仮定した水位一流量曲線を用い水位を算定する。水面の高さは計算格子セルを鉛直方向に投影した面の中央で定義するので、鉛直面である流出面では水深は定義されない。そこで下流端の直ぐ外に格子を仮定しその中心での値を与える。流出面の流速は運動方程式により計算されるがそれに必要な下流端直ぐ外の圧力は、水位の修正分が静水圧と仮定して算定する。これにより下流端の流速と水位が決定される。境界条件などの設定の概要を図5に示す。

流量の増減あるいは流れの変動により移動する水際の計算は Nakayama<sup>21)</sup> に説明されているように水面移動の計算過程で算定する。水の占める領域が水平位置の一価関数で定められる水面の下に存在するという仮定で水面移動を計算する場合、流速の如何に関わらず、水際先端位置は水平な滑面境界に静止できず、

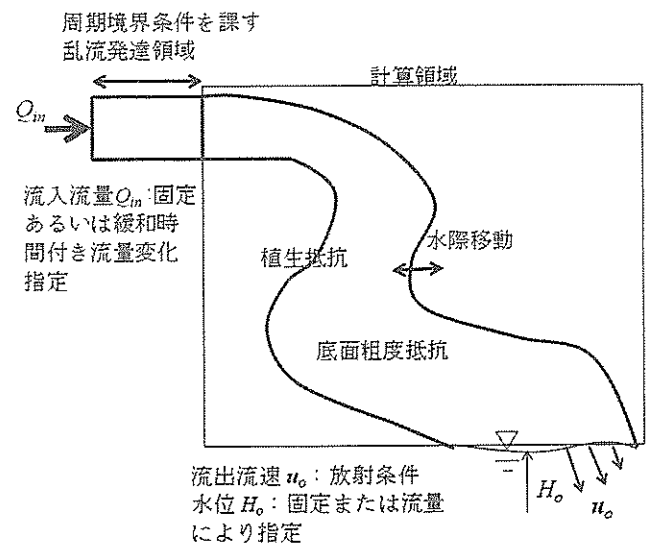


図-5. LES 計算の境界条件などの概要

時間ステップに1格子ずつ進んでしまう。河川氾濫流の場合、水際先端は河床、河岸は粗度となる砂礫や植生に部分的に遮られるので、有限の厚さをもったような挙動をする。本計算では水が一つのセルから隣のセルに移動するには粗度高さの1/2が浸水してから初めて次のセルに移動するという条件を課している。これにより実際に近い水際線の移動を再現することが可能になる。

本計算対象域では流路に直径数メートル以上もある岩が多数あるが、これらのうち計算格子高さより大きいものは河床形状として反映し、格子高さ以下のものは粗度として扱う。従って粗度高さは一律に計算格子高さ（今回の計算では15cm）の1/3の5cmとしている。岩の影響を調べるため、岩を取り除いた河床でも計算する。

次に河岸の植生、とくに出水時に浸水する河原とその近傍の樹木の影響であるがこれには、レイノルズ平均や水深平均法などに用いられる植生モデル<sup>22)</sup>をLESに拡張し、圧力を受ける樹木の幹や枝・葉の密度で次の式で定義される抵抗力 $f_v$ を流体内に分布させることによりその影響を反映する。

$$f_v = -C_D \Lambda |u| u \quad (2)$$

ここで $C_D$ は樹木要素の抵抗係数、 $\Lambda$ は樹木要素の流体力を受け面積の密度、 $u$ は局所の流速ベクトルである。今回の計算では $C_D=1$ 、 $\Lambda$ は底面で0.2、樹木の頂点でゼロとする。樹木領域にも底面粗度はあるのでその他の領域同様、格子高さの1/3としている。

### 3. 2 河床地形の作成

#### 3. 2. 1 LES計算の河床地形

LES計算を実行するためには、計算格子サイズに応じた面的に密な河床高の分布情報を取得する必要がある。本研究では、航空レーザー測量と定期横断測量および深淺測量の結果を用いて、以下の手順により河床地形を再現した。

平水時の陸域については、2006年に取得された航空レーザー測量の点群データを用いた。航空レーザー測量時に水面下であった領域については、水面下のデータを取得できないため、2007年冬期に行われた横断測量結果を用いて、横断方向に50、縦断方向に200に分割する直線補完により河床地形を再現した。その際、横断線間を複数の区間に細分する分割線を通すように設定し、湾曲に沿った情報を得られるようにした。また、25.3km付近に見られる落差の大きい早瀬についても地形を再現できるよう、深淺測量を実施し直線補完の際の測量データとして利用した。この測量は、他の測量データ取得時期よりも遅い、2010年に行った。これは、早瀬からつらなる砂州前縁線が2009年出水後に明瞭になり、早瀬の形状が計算結果に影響を及ぼすことが予想されたためである。空中写真によると過去10年以上にわたり定位置に早瀬が見られることから、測量時期の遅れが地形の再現に影響を与えることはほとんどないと考える。

これらの作業により陸域および水域の河床データを整理し、ArcGIS (ESRI社)により1m間隔の格子点の位置座標を取得した。作成した河床地形は、現地において観察される特徴、例えば左岸砂礫堆の横断方向に凸型の形状、砂礫堆の内湾側に見られる増水時には河道になる帯状の凹地、砂礫堆上半部の緩やかな水際、落差約1.5mの早瀬、25.3km付近でほぼ直角に曲がる流路、砂礫堆下部の前縁線などが再現されている(図6)。

なお、本報では、高山<sup>23)</sup>に準拠し水流の蛇行を促進する「砂礫堆」という用語を、蛇行部内湾側に形

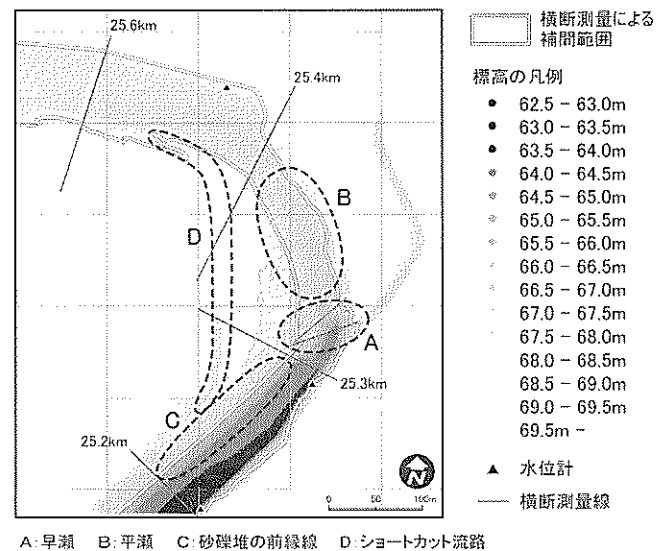


図-6. 河床地形の再現

成された陸域全域を指す時に用いる。これに対して、カララハハコ群落成立地のように、植被率が低く砂礫が表出する砂礫堆内の一面は「礫原」と呼ぶことにする。このほか崎谷ほか<sup>24)</sup>を参考に、河床が平坦な「平瀬」、河床勾配の急な「早瀬」、砂礫堆の淵の部分に相当する「前縁線」という用語を図6の位置に対して用いる。

### 3. 2. 2 平面2次元水深平均法の河床地形

平面2次元水深平均計算では静水圧近似が可能な緩やかな地形形状を仮定して運動方程式を水深方向に平均したものを対象にするため、LES計算の河床地形をそのまま用いると計算が不安定になる可能性がある。そこで同計算法には、定期横断線のデータだけを用いて、上述の直線補完により作成した河床地形を用いた。

### 3. 3 計算ケース

計算は以下のように、平面2次元計算では流量がほぼ300, 600, 900, 1300, 1600 $\text{m}^3/\text{s}$ に落ち着くような条件の5ケースについて何れも定常状態の計算を行った(表1)。

LES計算は水平方向格子間隔を2m、鉛直方向格子高さを0.15mとする直交格子を用い、まず、平時よりやや流量の多い100 $\text{m}^3/\text{s}$ を流入流量として計算を進め水面形状、下流流量が一定になる状態を求める、次にこれを初期条件とし、時間ステップ0.002秒で計算を進め、60秒で50 $\text{m}^3/\text{s}$ 増水させ、計算条件として固定する流量まで直線的に増水させる。これにより出水により広がった水面形状をシミュレーションすることが可能である。基本ケースとして、河床の岩は河床地形として入れているが、植生の影響を考慮しない条件で流量300, 600, 900, 1300 $\text{m}^3/\text{s}$ に固定した時の計算を行い、そのうち流量900 $\text{m}^3/\text{s}$ のケースについては河床の岩の有無、植生抵抗の有無、また下流境界条件の影響を検証するケースとする。各ケースの設定は以下の手順で行った。

各流量の設定理由は次のとおりである。300 $\text{m}^3/\text{s}$ は増水期に砂礫堆前縁線の肩に達する流量であり、この流量で冠水する立地は出水のたびに長時間にわたり流水に晒される。およそ1,2年確率流量に相当する600 $\text{m}^3/\text{s}$ は、ノイバラ群落との境界付近20mほどを残してカララハハコ群落成立地の大部分が冠水する流量であり、季節によっては実生の流失が予想される。2年確率流量に相当する900 $\text{m}^3/\text{s}$ は、砂礫堆全域が冠水した直後と予想される流量で、数値計算結果の確認を目的として設けた。3,4年確率流量程度で、平均年最大流量(約750 $\text{m}^3/\text{s}$ )より多い。1300 $\text{m}^3/\text{s}$ と1600 $\text{m}^3/\text{s}$ は、それぞれ2011年出水、2009年出水のピーク流量であり、現地調査の結果との整合性を見るために設けた。

計算領域内の早瀬直下から計算領域の下流端にかけては

表-1 計算ケース

ケース	流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	下流境界条件	岩	植生抵抗
ケース1	300	H-Q式	あり	なし
ケース2	600	固定 H=67.5m	あり	なし
ケース3	900	H-Q式	あり	なし
ケース4	900	固定 H=68.0m	あり	なし
ケース5	900	H-Q式	なし	なし
ケース6	900	固定 H=68.0m	あり	あり
ケース7	1300	固定 H=69.0m	あり	なし

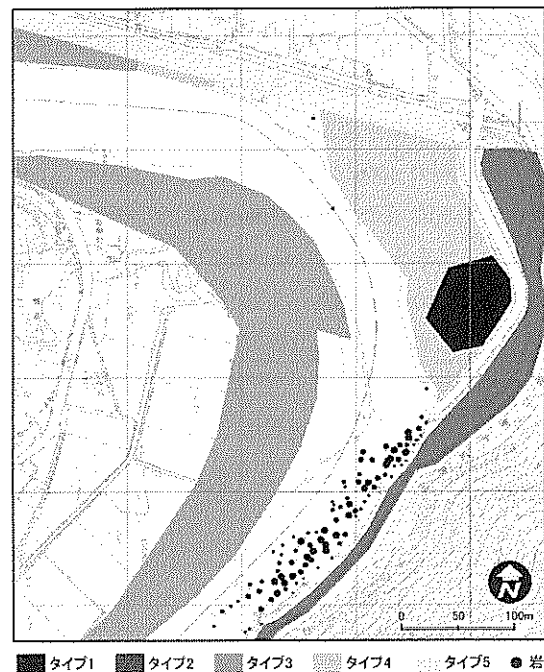


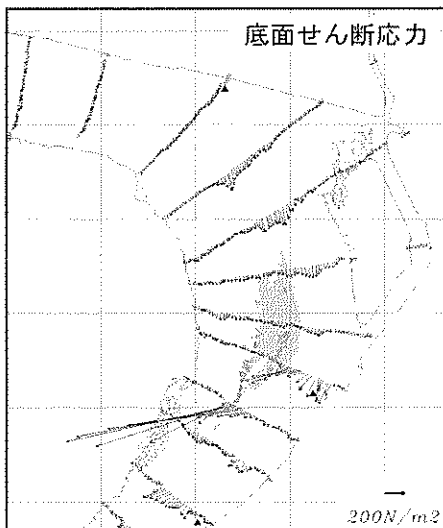
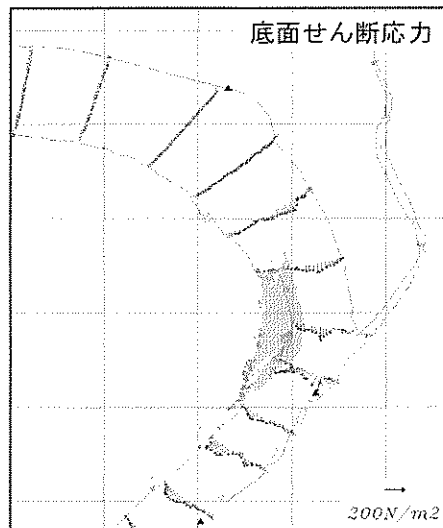
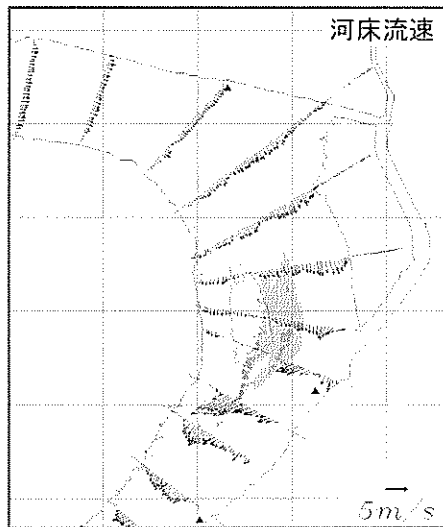
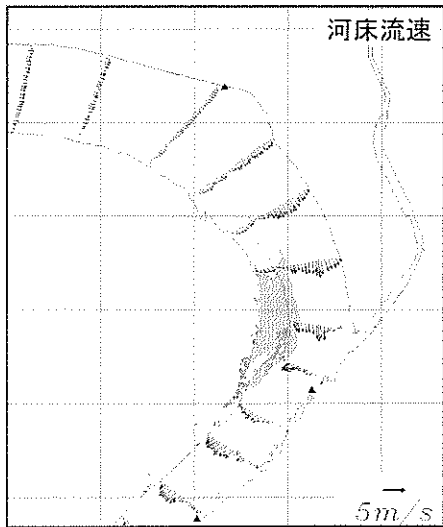
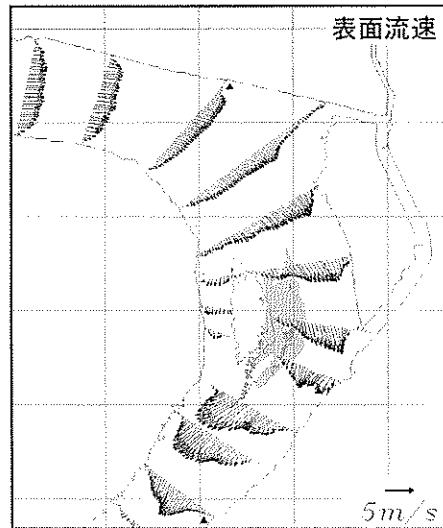
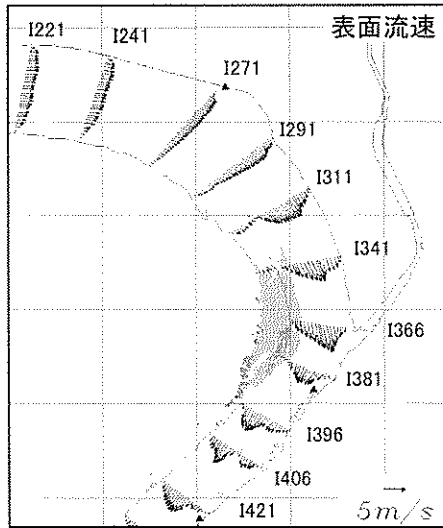
図-7. 植生抵抗の設定領域および岩の配置

表-2. 植生抵抗のタイプ

凡例	植生	優占種の 高さ(m)
タイプ1	モウソウチク群落	10.0
タイプ2	メダケ群落, ネザサ群落	3.0
タイプ3	ノイバラ群落, オギ群落, ツルヨシ群落(密生)	1.8
タイプ4	ツルヨシ群落(疎ら)	1.5
タイプ5	チガヤ群落	0.5

(a) Case 1

(b) Case 2



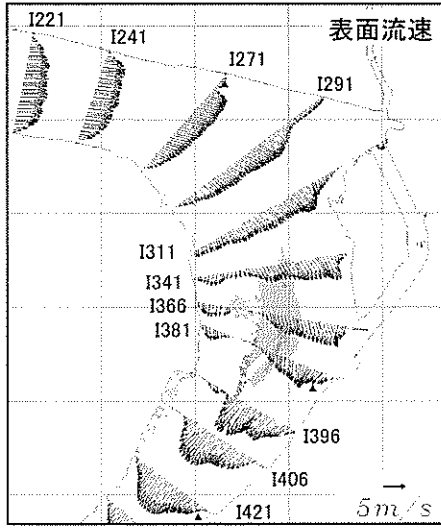
∴ 出水後のカワラハハコ残存個体    ■ カワラハハコ群落成立地

図-9 (その1). LES 計算結果

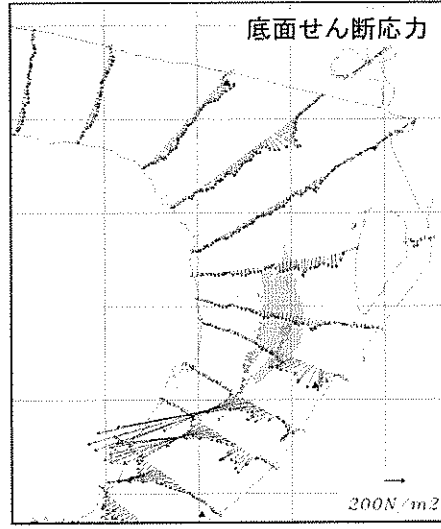
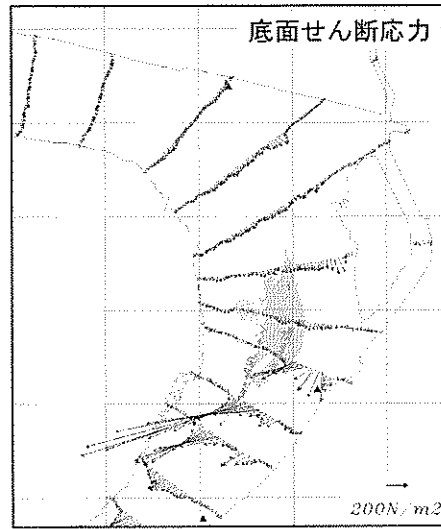
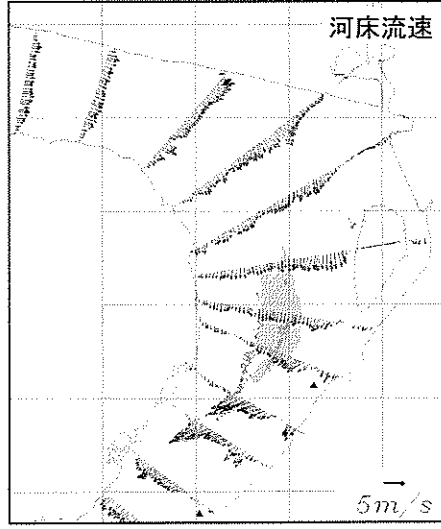
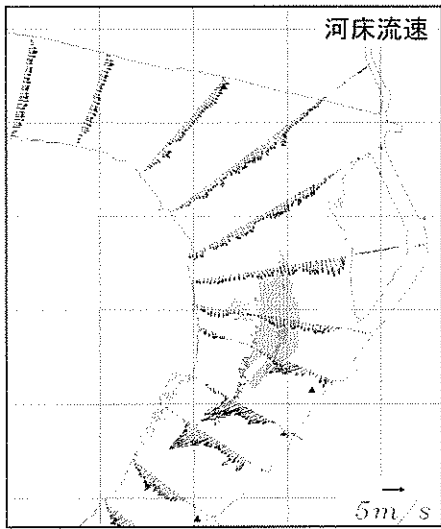
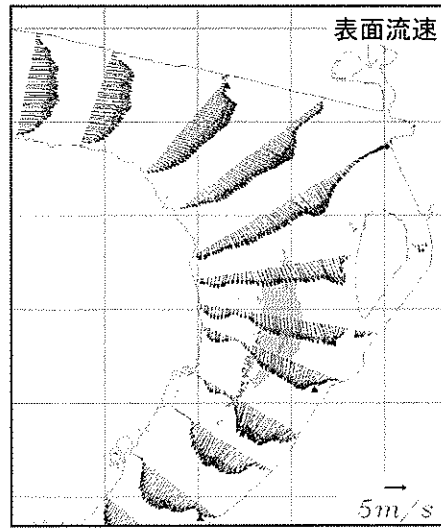
Case 1 (a : 300m<sup>3</sup>/s) と Case 2 (b : 600m<sup>3</sup>/s) における表面流速、河床流速、底面せん断応力



(d) Case 4



(e) Case 7



∴ 出水後のカワラハハコ残存個体    ■ カワラハハコ群落成立地

図-9 (その2). LES 計算結果

Case 4 (a : 900m³/s) と Case 7 (b : 1300m³/s) における表面流速、河床流速、底面せん断応力

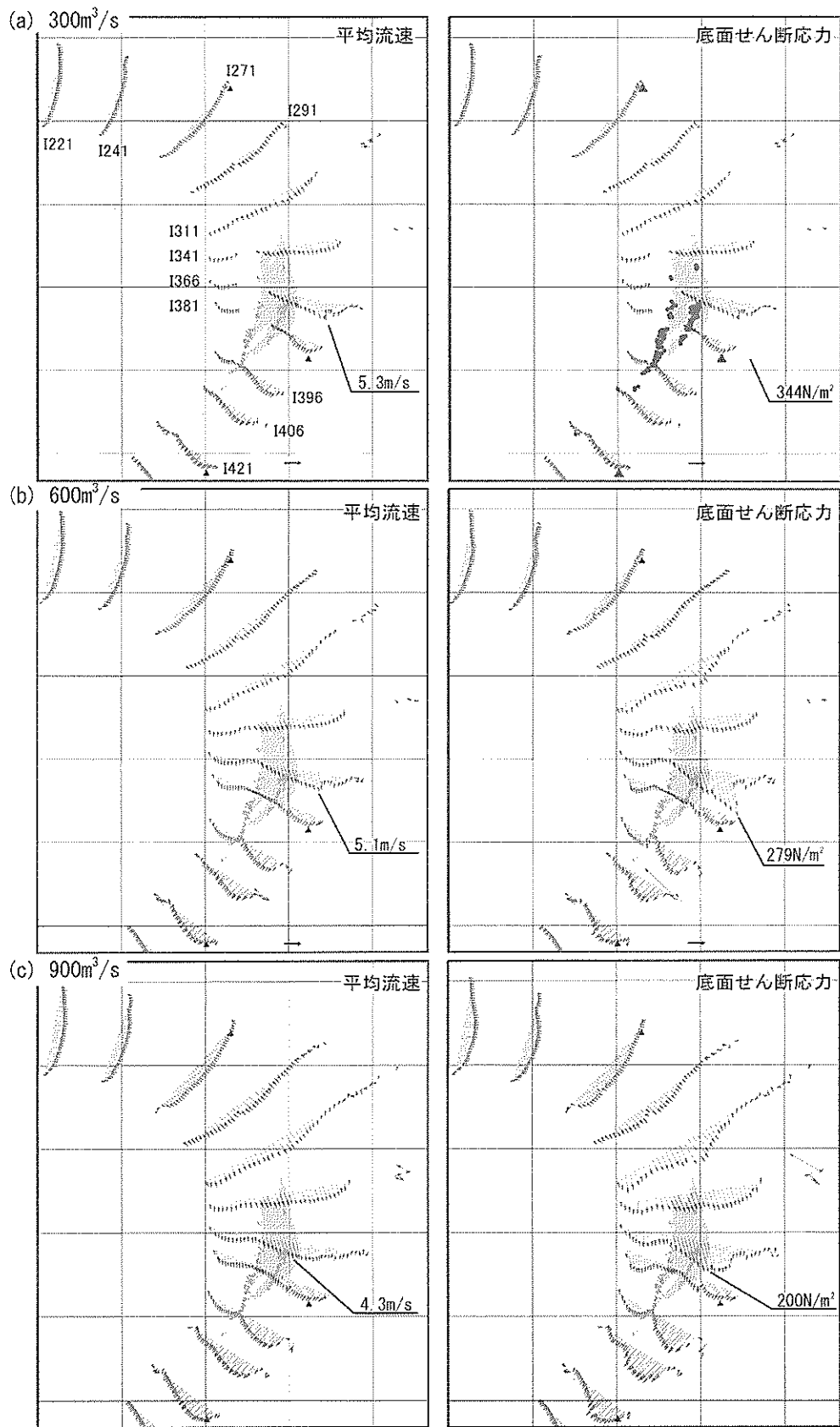
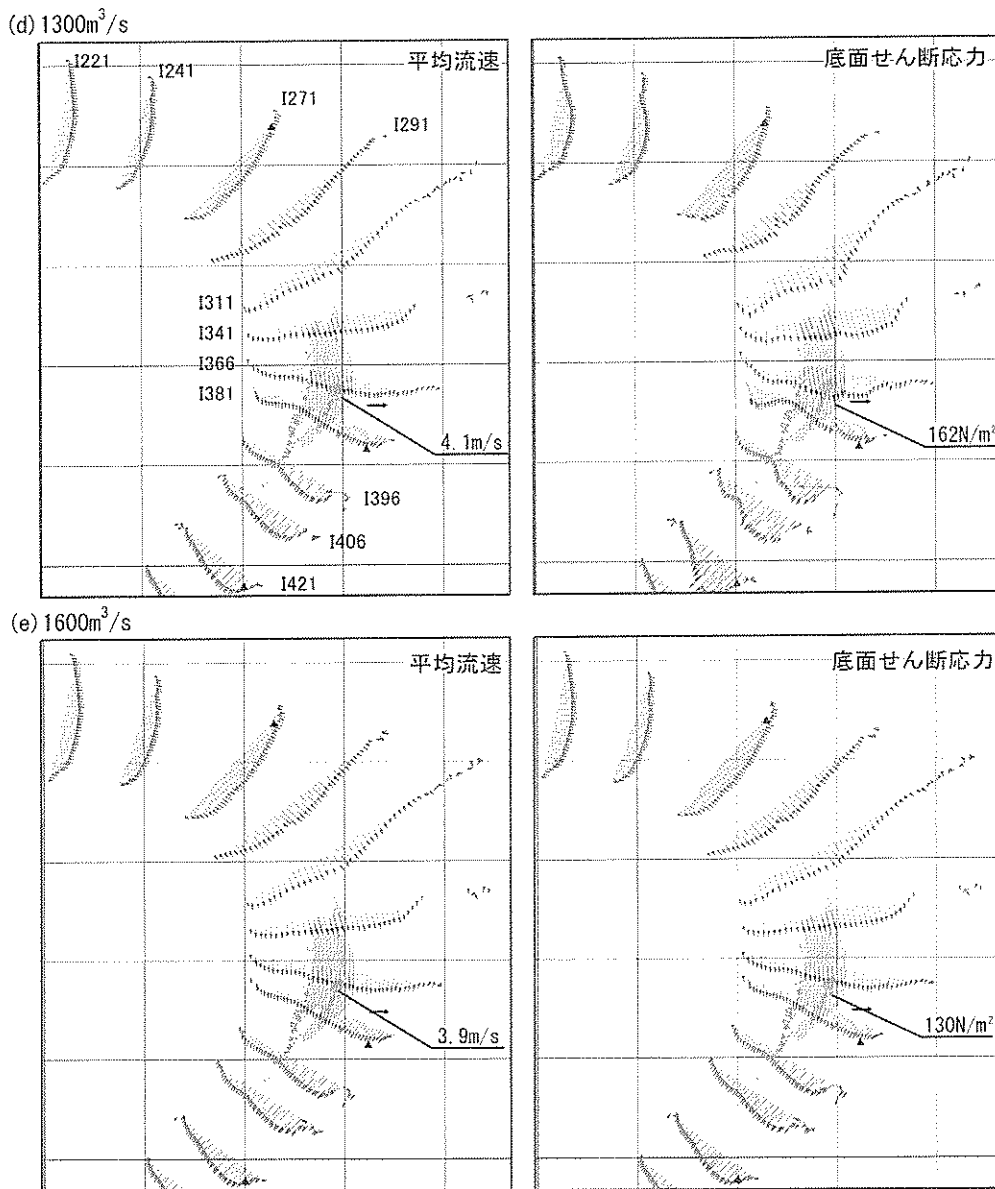


図-10 (その1). 平面2次元計算結果  
 300m<sup>3</sup>/s (a)、600m<sup>3</sup>/s (b)、900m<sup>3</sup>/s (c) における平均流速と底面せん断応力



∴ 出水後のカワラハハコ残存個体 カワラハハコ群落成立地 ▲ 水位計設置位置

図一 10 (その 2). 平面 2 次元計算結果

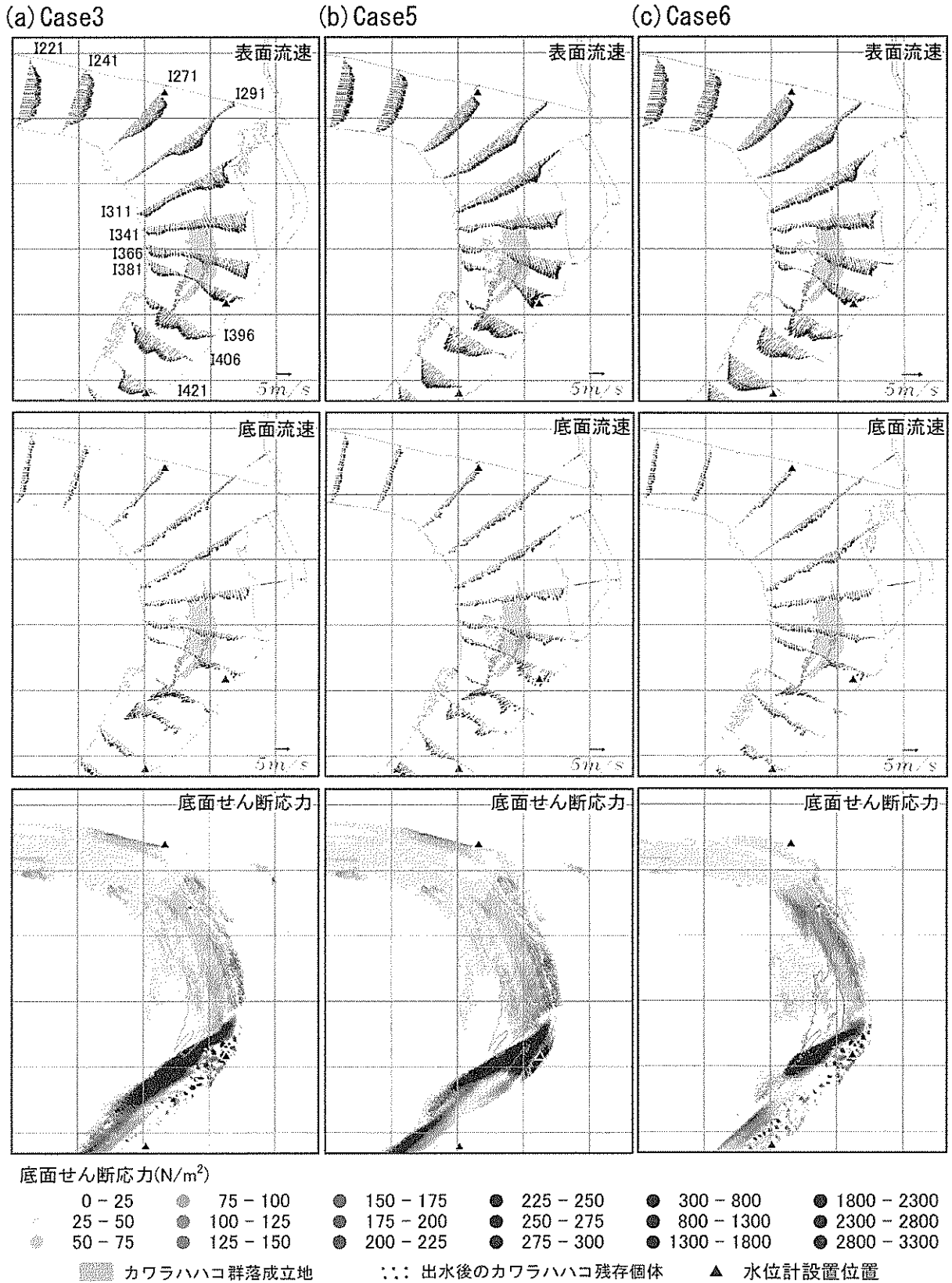
$1300\text{m}^3/\text{s}$  (a)、 $1500\text{m}^3/\text{s}$  (b) における平均流速と底面せん断応力

均値の特性に注目しカワラハハコ群落成立条件との関連を調べる。

平面的分布とともに、流量が増加することにより横断面内での分布と値の変化を見る為、図 11 (その 1 から (その 5) にカワラハハコ群落成立地周辺にとった 5 か所の横断面での水位と底面せん断応力の分布を示す。LES および平面 2 次元計算結果を対比させるため並べて示してある。

#### 4. 2. 1 カワラハハコ群落成立地近傍の浸水状況

現地調査による出水時の浸水状況は 4. 1. 1 節で説明してあるが、それに対する数値解析の結果を図 8 の写真および図 9 を参考にまとめる。Case1 の流量  $300\text{m}^3/\text{s}$  時、ショートカット流路は通水はしていない状態で水際線の水域側に樹木がみられることから、砂礫堆上部の浸水状況については、2012 年 6 月 19 日の様子を再現しているといえる。Case2 の流量  $600\text{m}^3/\text{s}$  時、計算結果は、中州の一部が浸水せずに残り水際線に樹木 (図 8 の樹木 1) が位置する点で、2011 年 9 月 21



図一 12. 岩および植生抵抗の有無の比較

Case 3 : 岩あり・植生抵抗なし (a), Case 5 : 岩なし・植生抵抗なし (b), Case 6 : 岩あり・植生抵抗あり (c)

度に応じた抵抗を3次元流れ内に導入している。植生抵抗のある部分ではこの抵抗のため減速し、流速分布は一様化し、流れの方向は植生のない外湾方向に向けられている。しかし、底面近傍流速と底面せん断には大きな影響は見られない。ただし、植生による堰止め効果により植生帯のなくなる砂礫堆の下流端近傍では水面勾配がやや大きくなったためか、流速も少しであるが増加している。このため砂礫堆下部の前縁線に沿った強い底面せん断応力が植生抵抗を入れた右岸側で抑制される傾向は見られる。一方、礫原と同等と見なして植生抵抗を入れなかったカワラハハコ群落成立地に対しては、底面せん断応力の変化はほとんど認められなかった。

## 5. 考察

本研究では数年にわたる現地調査とまた数年にわたる数値シミュレーション結果をまとめそれらのカワラハハコ群落成立の条件について検討した。

これまでに、カワラハハコ群落成立地と出水時の攪乱との関係性については、カワラハハコ群落の構成種「カワラノギク」を対象に、同種の維持には、地表面の砂を洗い流してしまうような大規模な増水が必要ながに示され<sup>25)</sup>、このような攪乱が数年に1回程度の再現期間で発生することが必要なことが示唆されている<sup>26)</sup>。本研究ではこの点に関連して、カワラハハコ群落成立地が受ける出水時の攪乱強度や頻度に関する下記のような定量的な情報を導き出した。

まず、生起確率が年1回以上ある出水(300, 600m<sup>3</sup>/s)の場合、現地観測からは、カワラハハコ群落成立地の半分ほどしか冠水せず、出水の影響をほとんど受けないことがわかった。数値解析の結果からは、この流量時の底面せん断応力は約25N/m<sup>2</sup>以下しかなく、限界掃流力と比較すると礫の移動は起こらないことを意味し、現地の状況と一致する。

生起確率が3~4年に1回の出水(900m<sup>3</sup>/s)の場合、カワラハハコ群落成立地を含む中州全体が冠水する。現地では、1100m<sup>3</sup>/s出水後に植物体が倒伏しながらも流失していない状況を観察しており、平均年最大流量では、生育基盤となる礫や植物体が流失する状態ではないと推察される。LES計算の結果からは、900m<sup>3</sup>/s時の底面せん断応力は、約80N/m<sup>2</sup>以下であることが示された。限界掃流力と比較すると、 $d_{90}$ 以上の礫が移動せずに残るくらいの攪乱であることを示す。この結果も現地の状況とよく一致する。

生起確率が10年に1回の出水(1300m<sup>3</sup>/s)や10数年に1回の出水(1500-1600m<sup>3</sup>/s)の場合、現地観測からカワラハハコ群落成立地全体にわたって礫が移動し全面的に裸地となるが、カワラハハコ個体は局所的に残存することが明らかとなった。数値計算結果によると、1300m<sup>3</sup>/sの時の底面せん断応力は100N/m<sup>2</sup>以下、1600m<sup>3</sup>/sのLES計算はまだ行っていないが、平面2次元計算では1300m<sup>3</sup>/sとほぼ同様の値をとることが示された。このせん断応力は、 $d_{100}$ の礫が移動を始めるよりもわずかに小さい。

礫原に生育し太い地下茎を持つツルヨシでは、完全に流失させるには $d_{90}$ の礫が流掃される必要があることが示唆されている<sup>27)</sup>。一方、本研究の個別礫調査からは、根がツルヨシよりも細いカワラハハコであっても、 $d_{100}$ の礫が移動したりしなかったりする程度では、植生に対する出水の影響はあまりないことが示された。この結果は、カワラハハコの消失には、 $d_{100}$ が確実に流される程度の攪乱強度が必要なことを意味している。一方、LES計算結果からは、1300m<sup>3</sup>/s以上の出水時の底面せん断応力が $d_{100}$ の礫の限界掃流力よりも小さく、植生の大半が消失したという現地の状況を現していないことが明らかとなった。実際は瞬間的に大きくなる力により流出している可能性があり、今後瞬時量、あるいは変動の大きさを検証する必要もある。

本研究で行われた数値解析は、カワラハハコ群落成立条件を、出水の頻度と出水規模により冠水する礫原にかかるせん断応力の強度、および礫原を構成する砂礫の粒径により、定量的に説明できることを示している。さらに出水規模により異なる流れのどのような特性がこの攪乱の強さを決める底面せん断応力に影響しているかについてのヒントが得られた。

Asami et al.<sup>6)</sup>は、カワラハハコ群落成立地のうち大出水時のレフュージアとなる立地では、流量が増大しても底面せん断応力が閾値を超えないことを1次元不等流計算から示し、そのような流れ場を作り出す条件として、砂礫堆下流の狭窄部の存在や成立地一帯の河道幅の広さなどの地形条件をあげた。しかし、主流が卓越する流れしか想定していない1次元計算では、多様に変化する河道条件の影響を考慮できない。さらに水理パラメータの流下方向変化の解析を行うのが目的なので、横断面内の変化は予測できない。従って湾曲部内岸のカワラハハコ群落位置のせん断応力と同じ断

面内の流れの早い主流部との区別ができず、断面平均的値を予測するため、本研究で明らかにしたような横断また鉛直方向に大きく変化する流れに適用するのは無理がある。

本研究では主に比較のために、一般的に行われる平面2次元解析も行った。この手法では横断面内変化を表現することが可能で、本計算結果にも見られたように、湾曲部内岸の砂礫堆上の水深の浅い流れと外湾側の高速流との区別が可能で、鉛直方向の変化は充分に表せないが、砂礫堆上せん断力がカワラハハコ群落存続条件に関係することを明らかにしている。これらに対して、LES シミュレーションでは、空間平均されているとはいえ3次元的乱流運動とそれによる流れの瞬時3次元構造が再現され、カワラハハコのレフュージアとしての水理学的特性の詳細を検討することができた。それにより、平面的変化に見える流れのパラメータも、鉛直構造に大きく依存しておりこの3次元構造がカワラハハコ群落のレフュージアとしての水理学的特性であることが分かったといえる。Asami et al.<sup>6)</sup>の1次元不等流計算より得られた結果は湾曲と内岸の砂礫堆があつて初めて起こりえたといえる。湾曲による2次流により、流量を決める水面近傍の流れと、底面せん断を支配する底面流れは大きくずれることも意味し、2次流を適切に単に出水の攪乱強度でなく、底面せん断を支配する底面流れが群落成立に重要に直角に曲がっており、2次流の影響は無視できないと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、カワラハハコ群落成立に必要なレフュージアが存在する条件を現地調査と2種類の流れ数値解析により検討した。出水頻度と規模に対応する底面せん断応力の大きさが決定的条件であることはこれまでの研究を支持するものである。しかし今回の現地状況の調査と数値解析により、何故大規模出水時に内岸の砂礫堆では大きなせん断力が発生しないか、またどういった条件で湾曲下流端にレフュージアになりえる砂礫堆が形成されるかの水理学的条件のヒントが得られた。基本的条件として、適度な河床勾配と蛇行河川が作り出す河床地形が大きな要因になっていることが示唆された。具体的には湾曲部下流端近傍では強い2次流を含む流れにより非常に強い底面せん断が発生し、これが内岸を洗屈することにより特徴的砂礫堆を形成する。この砂礫堆が形成されることにより、湾曲流れの横断方向に大きい速度勾配が形成される。このため流量のほとんどは外湾近傍の高速流に流され、砂礫堆上流れは水深が浅く流速も緩慢で強い主流のある場合でも逆流するほどで、底面せん断も強くない。この部分がレフュージアの条件を作り出している可能性が確認された。2次的要因として外湾近傍の巨石群と砂礫堆上流部の樹木群であるが、おそらくこれは必要条件ではなく、外湾に高速流を集め、砂礫堆上流れを緩和する要素になっている可能性が強い。

ただし、1次元解析で示唆された下流に堰止め効果の出る狭窄部が必要である条件は今回の調査、シミュレーションでは確認されず今後の課題である。本手法を類似する群落成立地にも適用し、共通する条件の検証ができれば、生息場所の評価や保全効果の高い場所の抽出が可能になる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所から測量成果および水位・流量データを提供いただいた。株式会社里と水辺研究所の赤松弘治氏、田村和也氏、一般財団法人日本気象協会の福井聡氏には、野外調査および解析に協力していただいた。ここに深謝を表す。なお、本研究の一部は、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業、公益信託エスベック地球環境研究・技術基金(エスベック環境研究奨励賞)、JSPS 科研費 23510298 の助成により実施されたものであることを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) Menges E. S. : Population viability analysis for an endangered plant, *Conservation Biology* 4, pp. 52-62, 1990.
- 2) 倉本宣: 多摩川におけるカワラノギクの保全生物学的研究, 緑地学研究 15, p1-120, 1995.

- 3) Green D.G. : Simulated effects of fire, dispersal and spatial pattern on competition within forest mosaics. , *Vegetatio* 82, pp.139-153, 1989.
- 4) Turner M.G., Baker W.L., Peterson C. & Peet R.K. : Factors influencing succession: lessons from large, infrequent natural disturbances. , *Ecosystems* 1, pp.511-523, 1998.
- 5) 富松裕: 生育場所の分断化は植物個体群にどのような影響を与えるか?, 保全生態学研究 10, p163-171, 2005.
- 6) 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.
- 7) 浅見佳世・赤松弘治・菅村定昌: 円山川におけるカワラハハコ群落の19年間の動態, 人と自然 22, pp.33-41, 2011.
- 8) 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.
- 9) 倉本宣・篠木秀紀・増淵和夫: 多摩川における丸石河原の変遷に関する研究, 明治大学農学部研究報告 118, pp.17-27, 1999.
- 10) 奥田重俊: 日本植生誌中部(宮脇昭編), pp.159-163, 至文堂, 1985a.
- 11) 奥田重俊: 日本植生誌関東(宮脇昭編), pp.192-197, 至文堂, 1985b.
- 12) 石川慎吾: 揖斐川の河辺植生 II. 扇状地域の砂礫堆上の植生動態, 日本生態学会誌 41, pp.31-43, 1991.
- 13) 石川慎吾・石田明儀: 仁淀川下流域の砂礫堆にみられる植物群落, 高知大学学術研究報告 34, pp.265-276, 1985.
- 14) 太田道人: 富山県 5 大河川の水辺の植生 (黒部川・常願寺川・神通川・庄川・小矢部川), pp.52-62, 富山県河川植生研究会, 1997.
- 15) 山本晃一: 礫河床のサンプリングと統計的処理, 土木技術資料 13, pp.354-358, 1971.
- 16) Egiazaroff, I. V. : Calculation of non-uniform sediment concentration, *J. of Hyd. Div ASCE*. 91, pp.225-247, 1965.
- 17) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集 41, pp.1-21, 1956.
- 18) 長田信寿: 一般座標系を用いた平面 2 次元非定常流れの数値計算, 水理公式集例題プログラム集平成 13 年度版例題 2-8, 2001.
- 19) Grinstein, F. F., Margolin, L. G. and Rider, W. J. : Implicit Large Eddy Simulation, *Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne*, 2007.
- 20) Sagaut, P. : Large Eddy Simulation for Incompressible Flows, *3rd ed., Springer, Berlin, Heidelberg, New York* , 2006.
- 21) Nakayama, A. : Large-Eddy simulation method for flows in rivers and coasts constructed on a Cartesian grid system, 建設工学研究所論文報告集第 54 号, 投稿中, 2012.
- 22) Shaw, R. and Schumann, U. : Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.61, pp.47-64, 1992.
- 23) 高山茂美: 河川地形, pp.239-253, 共立出版, 1974.
- 24) 崎谷浩一郎・中井祐・篠原修 : 曲線斜め堰の設計原理, 土木史研究 22, pp.225-234, 2002.
- 25) 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.
- 26) 倉本宣: 川の生態系保全の留意点ーカワラノギクの保全生物学的研究を中心に, 日本緑化工学会誌 23, p203-210, 1998.
- 27) 瀬崎智之・服部敦・近藤和仁・徳田真・藤田光一・吉田昌樹: 礫上草本植生の流失機構に関する現地観測と考察, 水工学論文集 44, pp.825-830, 2000.

## 著者

浅見 佳世	(株)里と水辺研究所, 理学博士, 植生学
中山 昭彦	所員, Ph.D., 流体工学, 水理学
川谷 健	所員, Ph.D., 河川工学, 水文学
藤田 一郎	所員, 学術博士, 河川工学, 水理学