

# 報告書概要

<b>技術研究開発課題名</b>	河道整備・管理に関する技術研究開発	
<b>技術研究開発テーマ名</b>	治水と環境の調和した河川管理を支える礫床河川の土砂動態解析の技術研究開発	
<b>研究代表者</b>		
氏名	所属・役職	
内田 龍彦	中央大学研究開発機構・准教授	
<b>共同研究者</b>		
氏名	所属・役職	
長田 健吾	中央大学研究開発機構・准教授	
後藤 岳久	中央大学研究開発機構・助教	
竹村 吉晴	中央大学研究開発機構・助教	
田中 規夫	埼玉大学大学院理工学研究科・教授	
八木澤 順治	埼玉大学大学院理工学研究科・助教	

## 【1】背景・課題

我が国の多くの河川は整備途上であり、樹木化による流下能力の低下や、河床低下による土丹の露出、高水敷と低水路の比高差の増大等の治水、環境上の問題が顕在化している。また、気候変動による降雨特性の変化によって、洪水時に河川流量がこれまで以上に増大し、河道の流下能力不足、河道に及ぶ外力条件の変化が起こっている。このため、河川が本来有している河川環境を保全・創出する多自然川づくりに基づいた河川管理技術が必要となっている。洪水による河道応答を明らかにするために、河道の平面形状、河川構造物、河道内の樹木、河床材料等の様々な条件における洪水時の流れと流砂運動の相互作用を適切に考慮できる実用的な解析法が求められている。

## 【2】技術研究開発の目的

本研究では、河道応答の相互作用の中心となる流れ、①土砂輸送を決定付ける底面流速に着目した河川構造物周り等の洗掘と対策、②礫床河川の土砂動態基礎研究、また河道の治水と環境両面で重要となる樹木に着目した③樹木群を有する河道の土砂動態と樹木倒伏機構の研究を基礎研究課題に据え、現地実験や実河川の治水、環境問題を対象として検討する。そして、これらの基礎研究課題の研究成果や開発した解析技術を応用し、それぞれ河道計画・設計技術への応用を検討している。

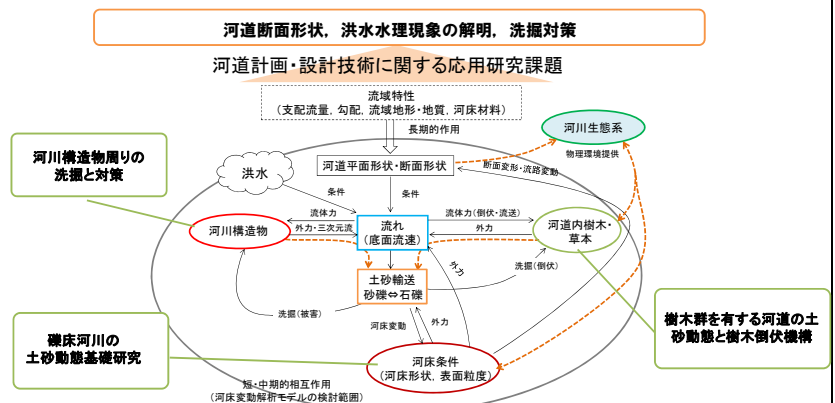


図-1 礫床河川の河道応答に関する相互作用と本研究の基礎研究課題

図-1は、礫床河川における河道応答を明らかにするために考慮すべき流れ、土砂輸送と河道条件の相互作用と関連する本研究の基礎課題の関係を示す。

### [3] 技術研究開発の内容・成果

#### (1) 河川構造物周りの洗掘と対策

河川構造物周りの局所流と洗掘の研究では、広域スケールの流れと構造周辺の局所流れを一体的に解くことができる一般底面流速解析法を開発し、種々の複雑な三次元流れに対して有効であることを示した。現地スケールの三次元流れの計測法を開発し、解析法の妥当性と課題を明らかにした。また、ネスティング手法は、広域スケールの解析を粗い計算格子で計算する一方、対象とする箇所付近では細かい計算格子で計算する。多重スケール解析に必要なネスティング手法に一般底面流速解析法を適用し、検討した。水面形の時間変化を用いて洪水流解析を行うことにより、洪水時の局所現象解明の有力な手段と成り得ることを示した。

#### 1) 広域スケールの流れと局所三次元流れの一体解析法

河川構造物の設置・撤去が上下流の洗掘、堆積などの河道の土砂環境に与える影響を検討するためには、河川構造物周辺の局所的な流れだけでなく、洪水流や砂州などの広域スケールの現象も同時に解析する必要がある。従来の解析方法である平面二次元解法は、湾曲、蛇行、河川構造物周辺の流れの鉛直構造を考慮することが難しく、三次元次元解法は、計算負荷が増大し、洪水流による河床変動計算への適用が難しい。そのため、流れの三次元性が考慮できる新しい準三次元解析法である底面流速解析法を開発し、洪水流、河床変動解析に適用してきた。底面流速解析法では、底面流速を式(1)で表し、

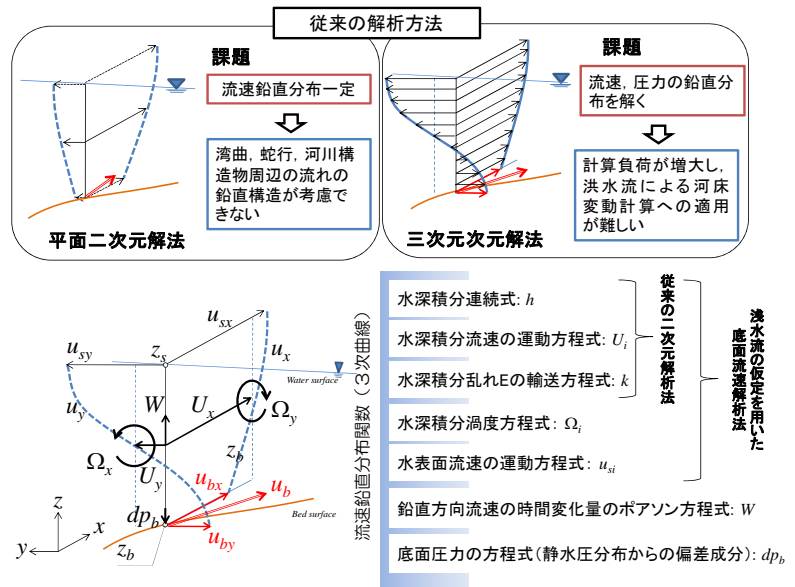


図-2 従来の解析法の問題点と一般底面流速解析法の特徴

これらを解くことによって流速鉛直分布を直接解かず河床変動を引き起こす底面近傍流速や河床の抵抗となる底面圧力を解析する手法である。浅水流の仮定を用いた底面流速解析法では鉛直方向流速の場所的变化を無視していることや圧力に静水圧分布を仮定していたため、河床の凹凸や構造物などの抵抗が適切に評価できない課題があった。本研究で開発する一般底面流速解析法は、浅い流れの仮定を用いた底面流速解析法に鉛直方向の運動方程式と鉛直方向流速方程式を加えることによって、三次元解析で得られる流速や圧力の情報は基本的にはすべて取得できる方法である。底面圧力は式(2)から計算される。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \left( \frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad \text{式-1}$$

$$\frac{\partial h W}{\partial t} + \frac{\partial h W U_k}{\partial x_k} = \frac{dp_b}{\rho} + \frac{\partial h T_{zk}}{\partial x_k} - \tau_{bk} \frac{\partial z_b}{\partial x_k} \quad \text{式-2}$$

ここに、添え字の s,b はそれぞれ水面、底面における値を示している。

#### 2) 既往の実験結果に対する一般底面解析法の妥当性の検証

一般底面流速解析法をこれまで平面二次元解析法の枠組みで解析することが困難であった種々の流れや河床変動に適用し、検証した。狭い流れの鉛直二次元流場では、河川構造物を越流する流れに適用し、解析法は構造物を越流する急変流場の水面形や圧力分布について実験結果を良好に再現できることを示した。また、非平衡土砂輸送モデルを用いた河床変動解析では、水理条件の変化によって砂堆から

平坦河床を経て遡上反砂堆へ河床形態が遷移すること再現し、河床波の形状についても説明した。また、種々の河床形態によって大きく変化する流れの抵抗と流砂量を統一的に説明できた。三次元流れ場については、橋脚前面の馬蹄形渦を伴う三次元流れについて既往の実験結果を再現でき、橋脚周辺の圧力分布を解析できることを示した。複断面蛇行流路の河床変動解析では相対水深の増加に伴う二次流構造と洗掘特性の変化を説明できることを明らかにした。

### 3) 常願寺川現地実験における水衝部の三次元流れの計測と解析

技術的に信頼できる洗掘対策工法を確立するためには、構造物周辺の局所流れ場を明らかにするとともにそれを再現出来る解析法を構築することが重要である。底面流速解析法は上述のようにこれまでに種々の実験室の三次元流れや河床変動に対して解析法の有用性であることを示してきた。しかし、現地スケールの流れに対する本解析法の有用性は明らかでない。

そこで、実スケールの水衝部の ADCP を用いた三次元流れの計測法を開発し、常願寺川現地実験、浅川現地観測において現地スケールの流れの三次元流速データを取得し、解析結果と実測結果を比較し、検証した。

図-3 に常願寺川現地実験水衝部における ADCP 本計測法による底面流速ベクトルを黒実線の矢印、電磁流速計計測結果よえう水面流速ベクトルを赤実線の矢印で示す。図-4 に図-3 中の断面 e における水深平均、水表面流速の縦断方向成分、左右岸水位の比較を示す。解析流速分布は実測の特徴は説明しているが、外岸寄りの速い流速が説明できていない。図-5 は解析結果と観測結果における断面 e の二次流の比較である。断面における流速鉛直分布の解析結果は二次流が実測に比べ小さく、断面 f における底面付近の速い主流速も再現出来ていなかった。本実験は、主流速が水面付近で急激に大きくなっている。この接近流速の主流がもつ非常に大きな横断方向渦度が、護岸に衝突し流れが変わることによって、流下方向渦度へ変換され、強い二次流とそれによる外岸方向への運動量輸送を生じる複雑な流れ場となる。解析では、主流速の鉛直分布における水面付近の局所的な変化を説明出来ていないため、接近流速の持つ渦度が小さく、二次流や運動量の輸送が過小評価されている。この理由は、低水路や高水敷の河床抵抗分布や上流の流入部における河床形状や粗度の評価が不十分であることが考えられる。断面 e において主流速が内岸側で発生しているのは解析の二次流が小さいためである。このように、本解析法は実験室の流れは再現できるものの、現地スケールの流れの解析には課題を残した。

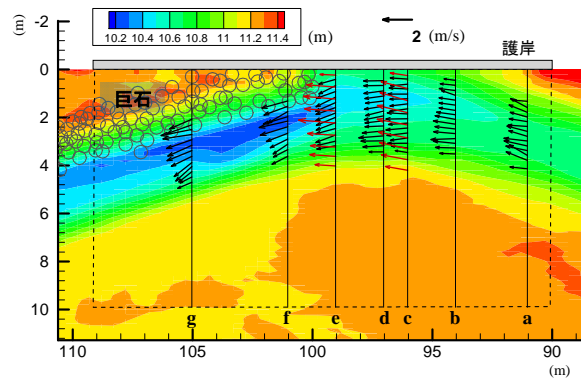


図-3 常願寺川現地実験水衝部の水面流速と底面流速の計測結果

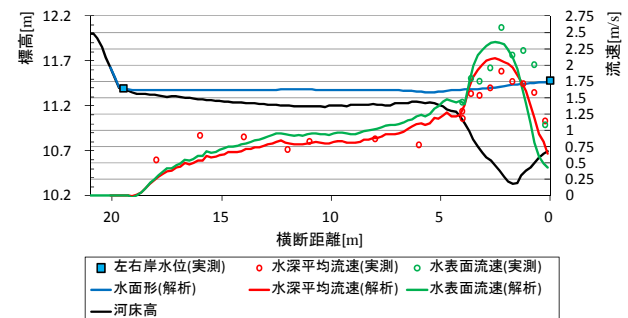


図-4 断面 e における流速分布と水面形の比較

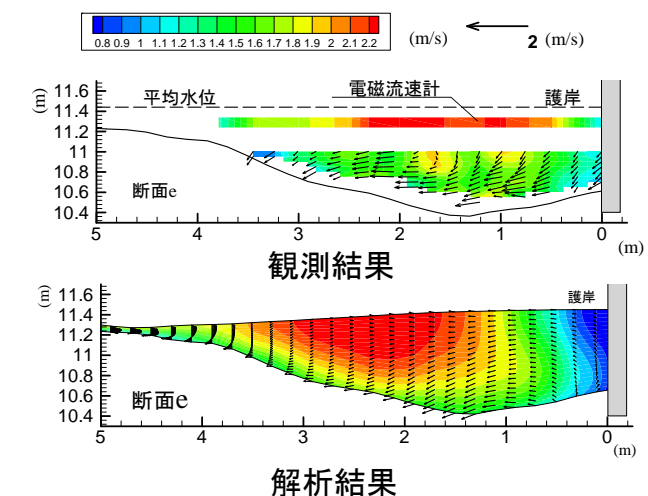


図-5 断面 e における観測結果と解析結果の二次流と主流速分布の比較

#### 4) 河川構造物周辺の局所流・局所洗掘と広域の流れの一体解析法の検討

底面解析法では解析された流れのスケールに応じて解くことができるが、広域スケール流れの解析においては、必ずしもすべての箇所でも局所的な三次元性が重要とはならない。一般に解析の効率化のために、対象とする箇所のみで解像度を上げるネスティング手法が用いられている。河川洪水流に対してはメッシュのダウンスケーリングに伴い流れの三次元性が徐々に重要となってくる。底面流速解析法は、上述のように複数のスケールの流れの方程式が連立されて解かれるため、メッシュの大きさの変化に伴う流れの変化を評価できることから、ネスティング手法に応用可能である。ここでは、ネスティング手法と底面流速解析法を組み合わせた手法について、広域流れと局所流れの一体解析が必要な典型的な問題である、津波による構造物周りの洗掘解析法を検討した。

図-6 に広域の計算領域 (L1) における水位観測結果と解析結果の比較である。水位観測結果は国交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたものである。

解析結果と観測結果の波形には差異が見られるが、詳細計算を行う付近の仙台新港、宮城中部沖ではピーク水位など概ね表現できているといえる。二次元解析結果と BVC 法を比較すると、仙台新港で違いが若干現れているが、他の沖合の観測点では両者の差はほとんど認められない。

図-7 に L7 解析における一般底面流速解析結果 (BVC) と二次元解析結果 (2D) の比較を示す。今回の解析では二次元解析法で計算した場合が一般底面流速解析法 (BVC 法) の場合よりも水位が高く、氾濫到達時間が早くなった。これは底面流速解析法では圧力の非静水圧成分による抵抗の増大や流れの三次元性による運動量交換が考慮されるためと考えられる。このような抵抗の増大は底面粗度係数などに押し込められる。したがって海域の解析結果に比べて、沿岸域から陸域では流れの三次元性の影響が無視できず、この誤差が顕著に表れるということが重要である。本解析条件では、建物群や構造物を考慮していないため、これらの影響を考慮すれば両者の差はさらに大きくなると考えられる。

図-8 に構造物周りの洗掘の様子を示す。底面流速解析法では津波が通過する間に構造物周りで急激な洗掘が発生している。二次元 (2D) 解析法は、速く津波が到達しているがほとんど洗掘が発生していない。このように津波による洗掘計算においても、流れによる洗掘計算と同様に流れの三次元性が重要であり、二次元解析法では不十分である。Case2,3 ではいずれも接近する津波に対して構造物は津波から見て左側の方がやや前に出ている。このため、渦度が急激に伸長し、大きな洗掘を生じさせている。また、津波の向きが時間的に変化し、洗掘形状はそれに合せてやや変化している。このように、盛土構造物周りの洗掘を検討するためには、津波の流速分布や津波の進行方向と構造物の向き、形の影響を考慮することが重要である。流砂量式を用いた局所洗掘解析では局所洗掘深や洗掘速度は実験より小さく計算されることが知られている。このため、津波衝突時に急激に洗掘が進行する本解析では実際の現象よりも洗掘深が小さいと考えられる。このため、本解析法を津波移動床計算ツールとして実用化するためには、ネスティング手法を高度化するとともに、非定常性の強い洗掘現象に対する解析法についてさらに検討する必要がある。

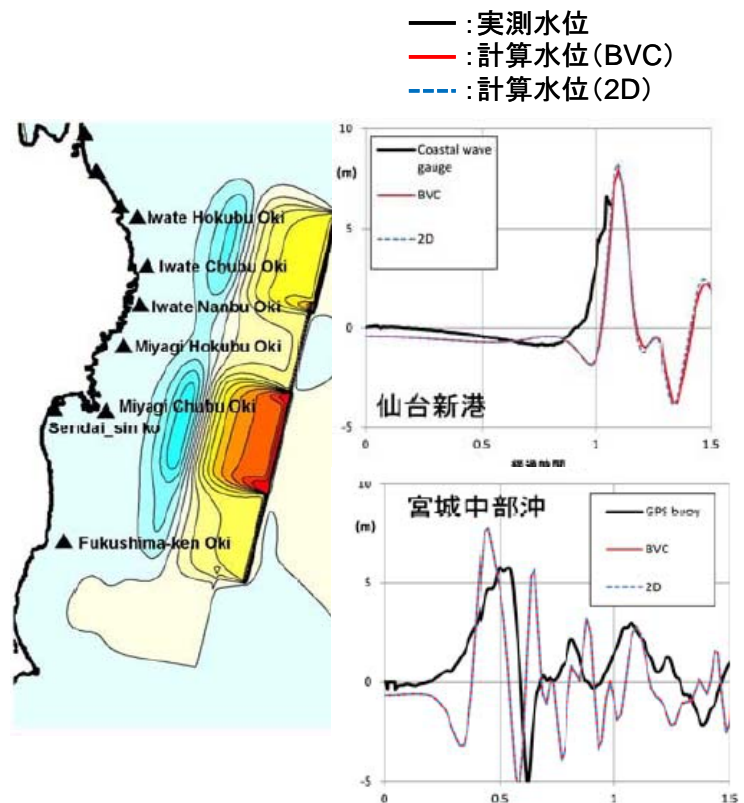


図-6 広域の計算領域 (L1) における水位観測結果と解析結果の比較

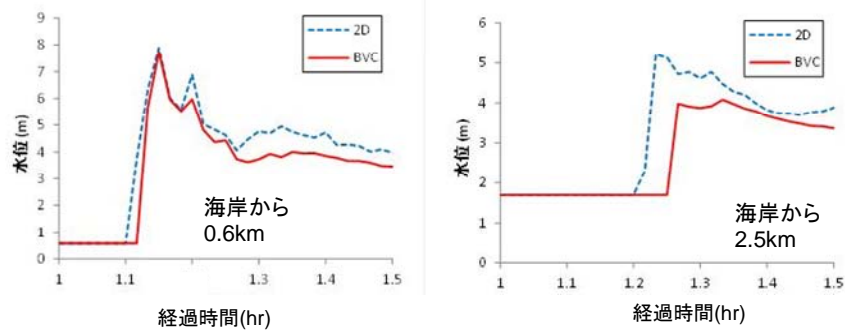


図-7 構造物前面の水位変化 (L7)

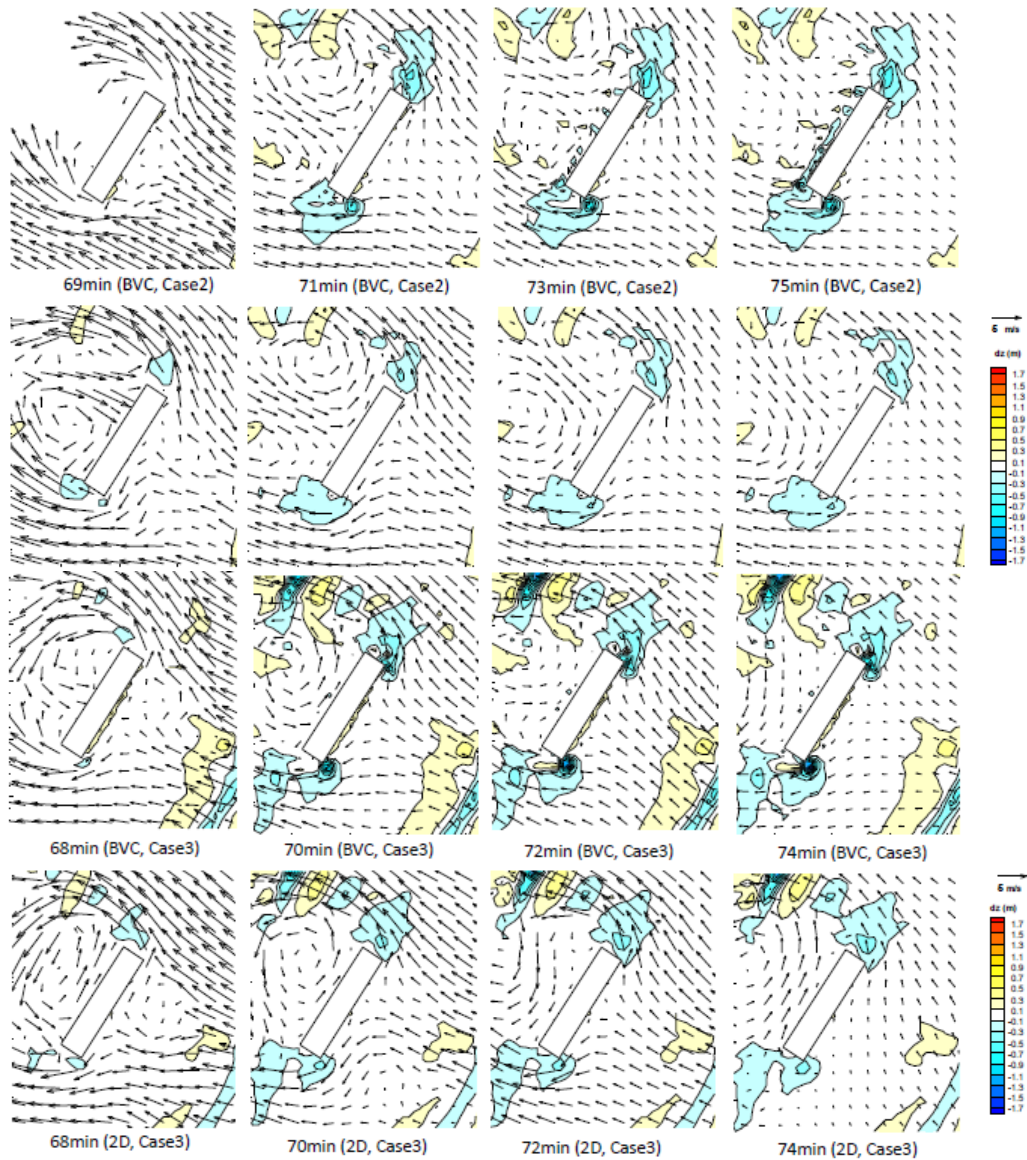


図-8 構造物周りの局所洗掘解析結果の比較

5) 一般底面流速解析法の応用：洪水時の局所現象の解明に向けて

一般底面流速解析法を応用し、水面形の観測結果を用いて、洪水の全体の波形と局所現象を一体的に解析する方法を検討した。H23.7 阿賀野川洪水解析では、大規模洪水時の河口砂州の変形挙動を検討するため、河口砂州近傍の三次元性流れを解析できるように水深以下の細かなメッシュサイズを用いて、一般底面流速解析法により河床変動解析を行った。河口砂州を越流する流れと、河口砂州により流れが曲

げられることによる三次元的な流れによる洗掘により、河口砂州が大きくフラッシュされる様子を説明することができた。H23.7 信濃川下流洪水解析では、実測水面形の時間変化を用い、まず信濃川下流域全体の解析を行った後、その解析結果を用いて信濃川・五十嵐川合流部の詳細解析を行った。信濃川の実測の侵食深と堆積範囲を十分には再現できなかったものの、直角に大きな流量が流入する五十嵐川合流に起因する水衝部付近の三次元流れ構造をかなりの程度表現でき、これに伴う河岸侵食及び剥離域の土砂堆積現象の傾向について捉えることが可能であることを示した。

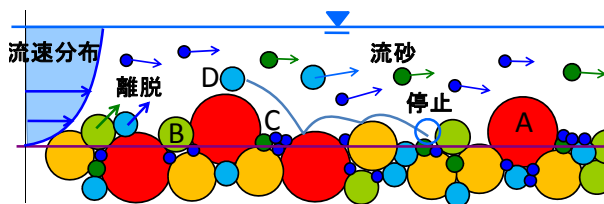
## (2) 礫床河川の土砂動態研究とその応用

礫床河川の土砂動態研究では、礫床河道における河床表層凹凸分布とその凹凸分布の影響を受ける土砂移動機構を明らかにし、この機構を考慮した新しい二次元河床変動解析法を構築した。構築した解析法は、従来の解析法に比べて説明力が高く、礫床河川の土砂動態を説明する実用的なモデルであることを示した。この開発した解析法を河道安定化工法へ応用するとともに、この解析法を用いて安定断面形状について力学的な観点から検討する道筋をつけた。

### 1) 礫床河川の河床表層凹凸分布と土砂移動機構に着目した新しい二次元河床変動解析法

大きな河床材料と広い粒度分布を持つ礫床河川においては、粒径に対する水深が小さく、三次元的な流れよりも、石礫に作用する流体力や河床表面の空隙構造が重要となる。そこで、礫床河川の河床表層凹凸分布と土砂移動機構を考慮した二次元河床変動解析法を構築し、その妥当性を検討した。

図-9は、礫床河川の河床表層凹凸分布と、流れ・土砂移動との関係を示したものである。礫床河川の流れや土砂移動には、大きな石礫が形成する表層凹凸分布が大きく影響することから、河床表層凹凸分布を考慮したモデル化が必要と考えた。本研究では、礫床河川の表層凹凸分布に関する知見を得るため、常願寺川で現地調査を実施し、粒度分布と凹凸分布との関係性を見出した。構築した礫床河川の河床変動解析法では、河床表層凹凸分布の影響を受ける流れと土砂移動過程を表現するため、流れへの抵抗は大きな石礫による形状抵抗を考慮した算定式を構築するとともに、流砂の各過程（離脱・流下・堆積）についてそれぞれ凹凸分布の関係を考慮した算定式を構築した。



初期河床高	通水後河床高(解析)	通水後河床高(実測)
D20(解析)	D60(解析)	D80(解析)
D90(解析)	D20河床(実測)	D60河床(実測)
D80河岸(実測)	D90河床(実測)	D20河岸(実測)
D60河岸(実測)	D80河岸(実測)	D90河岸(実測)
D20高水敷(実測)	D60高水敷(実測)	D80高水敷(実測)
D90高水敷(実測)		

図-9 礫床河川の河床変動解析法の河床、流れと流砂（離脱・流下・堆積）の関係

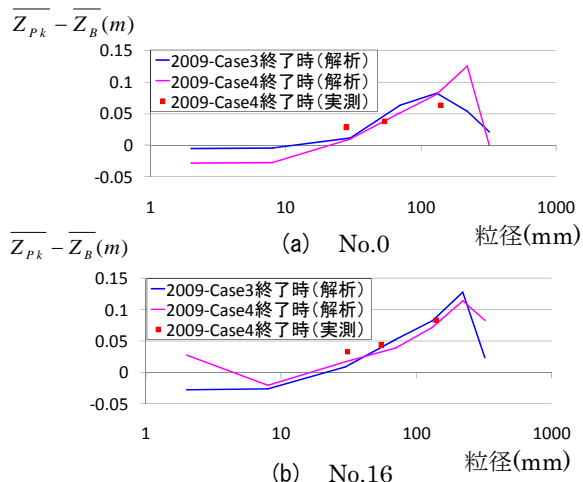


図-10 各粒径の平均高さの実測値と解析値の比

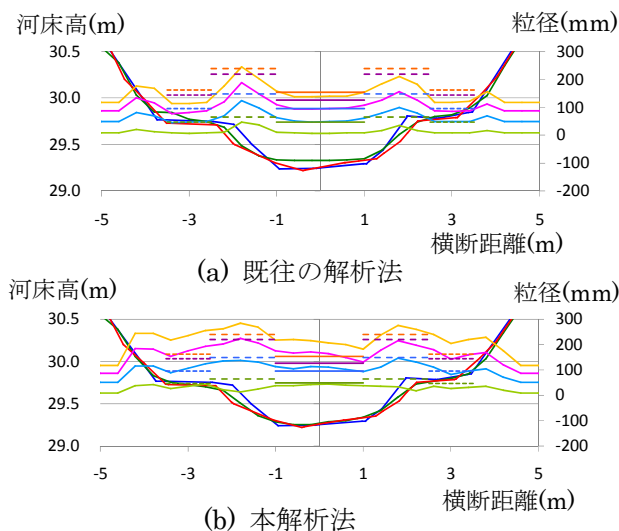


図-11 河床横断形状と粒度分布の実測値と解析値の比較

本解析法を2009年常願寺川現地実験に適用し、その有用性を検討した。図-10は、各粒径の高さ分布の実測値と解析値の比較を示す。解析による各粒径の高さ分布は、実測値を説明していることが分かる。

図-11 は、河床横断形状と粒度分布（D20, D60, D80, D90）の既往の解析法と本解析法による解析結果の比較を示す。既往の解析法では、礫床河川の土砂移動を十分に評価できないことから河床表層の粒度分布が表現できない。一方、本解析法では、河床横断形状および粒度分布ともに実測値を再現できている。以上の結果から、本解析法は、礫床河川の流れと土砂移動・河床変動量を説明できる有用な解析法であることが明らかとなった。

2) 礫床河川における巨石付き砂州を用いた治水と環境の調和した河道計画

常願寺川では、護岸工沿いの深掘れ流路の延伸が課題となっている。本研究では、これまでの護岸工・水制工を用いた河岸防護工に替わる砂州を活かした治水と環境の調和した河道計画を確立するために、構築した礫床河川の河床変動解析法を用い、水衝部対策が必要な箇所を選定と、その箇所に対してどのような構造で巨石付き盛土砂州を施工するのが適切かについて検討を行った。

現状河道と H3 年河道に H10 年波形（ピーク流量 1600m<sup>3</sup>/s 程度）を流下させた場合の、洪水時の流れ方や河床変動について検討し、水衝部対策が必要な箇所の抽出を行った。図-12 に、現状河道を対象とした解析結果のうち、11k~14k 区間の流速分布と河床変動量を示す。この結果より、現状河道の 12k や 13.5k 付近の右岸側で、河岸際に高流速域が生じ、縦断的に河岸際の洗掘が生じていることが分かる。この 2 箇所を水衝部対策が必要な箇所を選定し、巨石付き盛土砂州を用いた河岸侵食防護工による水衝部対策とその効果について検討した。

滑らかな流路線形を有していた H3 年の砂州形状を参考に、巨石付き盛土砂州の設置位置と平面形状を決定した。その上で、巨石付き盛土砂州の大きさの違いにより、水衝部および固定砂州にどのような影響が現れるかについて検討するため、大きさの違う 3 つの案（砂州延長 100m, 150m, 300m）を設定した。図-13 に巨石付き盛土砂州の縦横断形状の 1 例を示す。巨石付き盛土砂州は、既存の自然砂州に滑らかに繋がるように設定した。また、侵食されやすい根元部分に侵食防止のための根石を配置した。図-14 に洪水流量ピーク時の流速分布を、図-15 に河床変動量の比較を示す。12.0k や 13.5k に生じていた河岸際の高流速域は、砂州により河道中央部へはねられていることが分かる。300m 案は、安定して河道中央部へ流量を導いているが、他の 100m, 150m 案も、十分な水はね

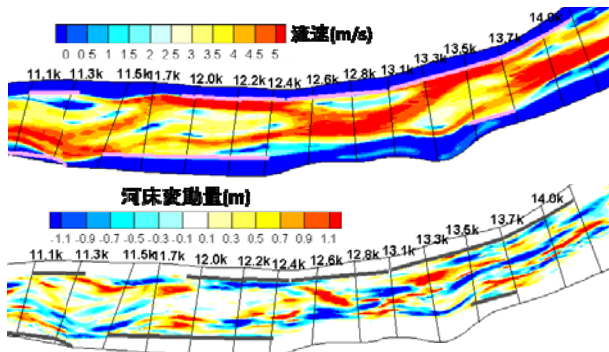


図-12 水衝部対策が必要な箇所の抽出

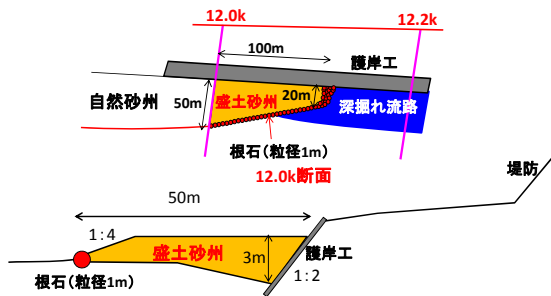


図-13 巨石付き盛土砂州の縦横断形状

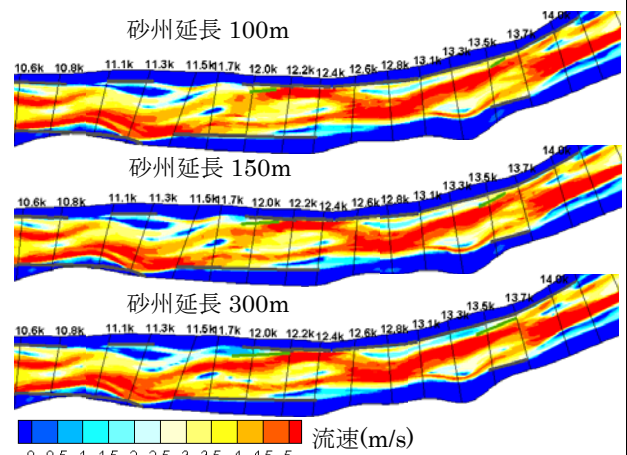


図-14 巨石付き盛土砂州を設置した場合の流速分布

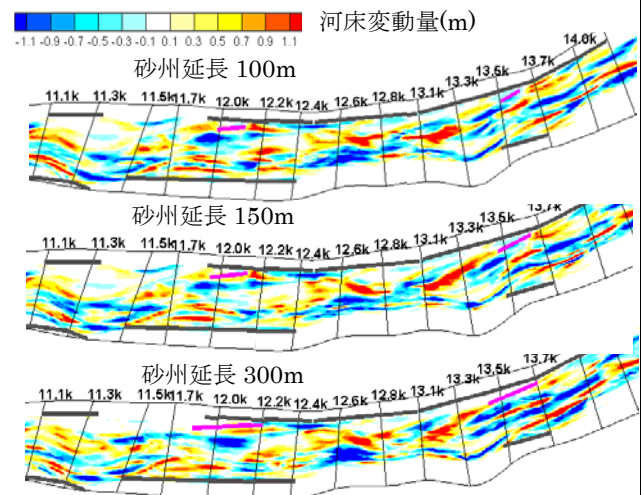


図-15 巨石付き盛土砂州を設置した場合の河床変動

効果が見られる。巨石付き盛土砂州の周辺では、砂州の先端部に堆積が生じ、100m、150m 案では、背後への堆積も見られ、深掘れ流路の延伸要因となる下流側の洗掘はほとんど生じていない。同様の検討を、S39 年洪水波形（ピーク流量 2500m<sup>3</sup>/s）である大規模な流量においても、水はね効果や河岸際深掘れ流路の発達抑制効果が得られることが明らかとなった。このような結果から、提案した巨石付き盛土砂州は、河岸防護工として十分な機能を有することが分かった。

### 3) 礫床河川の治水と環境の調和した安定な河道縦・横断面形状の決定法

著者らの河床変動解析法および福岡の式を用いた治水と環境の調和した安定な河道縦・横断面形状の決め方について、礫床河道札内川を対象として、図-16 に示す手順で検討を行った。

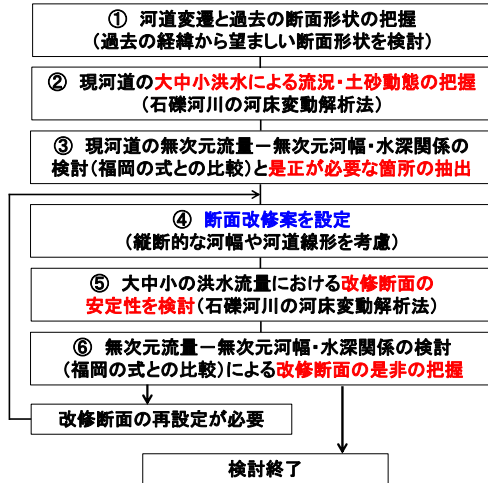


図-16 治水と環境の調和した安定な河道縦・横断面形状の検討手順

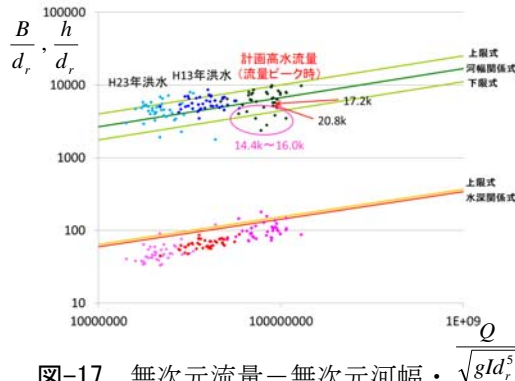


図-17 無次元流量-無次元河幅・水深関係の比較

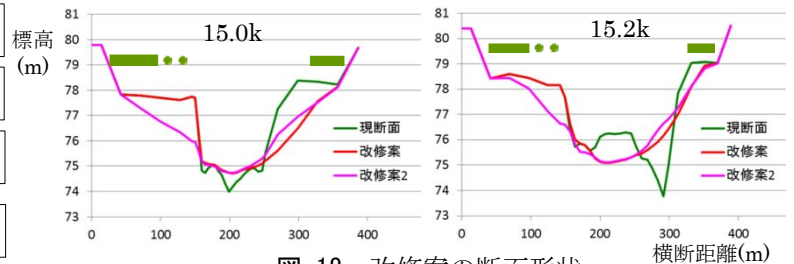


図-18 改修案の断面形状

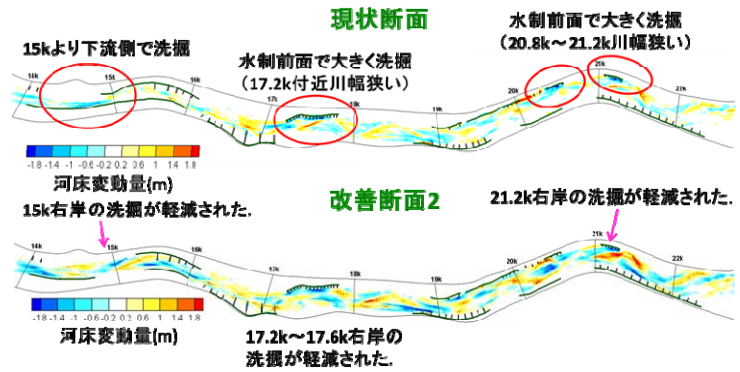


図-19 河床変動量の現断面と改修案の比較

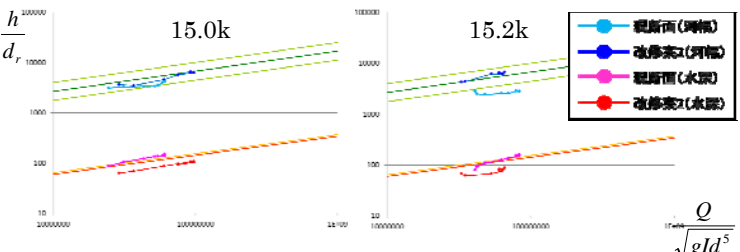


図-20 無次元流量-無次元河幅・水深関係の時間変化

まず、現状河道に大規模出水が生じた場合の河床変動解析を実施し、流れ・河床変動について分析した。また、図-17 に示すように、福岡の無次元関係式と解析結果との比較を行った。この結果、14.6k～15.4k、17.2k～17.8k、20.4k～21.2k の3区間で、川幅が狭く洪水流量が集中する断面形状であることが分かり、これらの区間で局所的な洗掘が進行することが分かった。これらの区間を断面形状の是正が必要な区間として選定し、滞筋が河道中央に移行するように、河幅・流路線形の改修案について検討した。断面形状の改修案は、上下流の断面形状・流路線形を見ながら河幅が縦断的に見て同程度になるように、また滞筋線形が滑らかになるように設定した。図-18 は、15.0k と 15.2k の断面改修案を示す。改修案 1 に対し河床変動解析および福岡の式による安定性の検討を行った結果、十分な改修効果が得られなかった。この改修案 1 の流れ・河床変動の特徴を踏まえ、再度、改修案 2 を設定した。図-19 は、河床変動量の比較を示す。改修が必要な区間で生じていた護岸工・水制工前面の洗掘は、改修案 2 では改善された。図-20 は、無次元流量-無次元河幅・水深関係の時間変化を示す。時間変化で検討することにより、大中小の各洪水規模での安定性を確認することができ、提案した断面形状は、各流量規模での安定性が増していることが分かる。高水敷の段階的な切り下げや、流路を河道中央部に寄せるなどした改修案の断面形状は、結果的に船底型に近い形状となり、船底型断面形状への改修の有効性を明らか



にした。

以上より、福岡の式と河床変動解析法を用いて治水と環境の調和した安定な河道縦・横断面形状を決められることを示した。また、縦断的に安定な断面形状を決定するなかで、流量ハイドログラフの検討による無次元流量—無次元河幅・水深関係の整理が大きな意味を持つことを示した。無次元流量—無次元河幅・水深関係の時間変化を縦断的に比較・検討することで、多くの情報を得ることができ、この情報を有効に用いることで効率的に安定な断面形状を決定できることを明らかにした。

### (3) 樹木群を有する河道の土砂動態と樹木倒伏機構

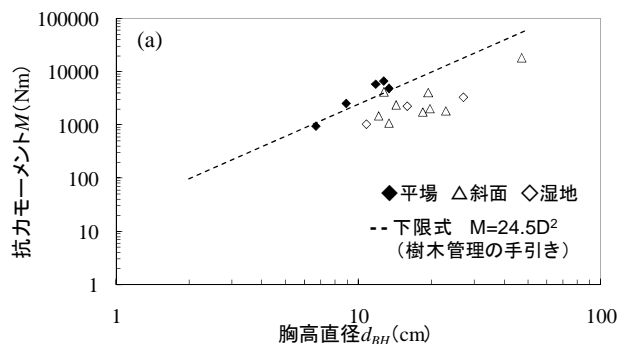
船底形の安定断面形状が力学的に望ましいことについて、河床変動解析法からも説明できた。同断面形状は、水際線が連続することから河川生態系にとっても望ましいと考えられるが、定量的評価法を提案するまでには至っていない。この点について、樹木群を有する河道の土砂動態と樹木倒伏機構の研究では、樹木の破壊形態に応じた樹木抵抗法を検討し、樹木を有する流れと河床変動解析法を開発するとともに、それを活用して、洪水攪乱と砂礫州上の植生面積の多様度の関係について検討した。

#### 1) 河道内樹木の洪水時における抵抗特性の高精度評価

河道内に繁茂した樹木群は、生物多様性の向上や堤防および河岸の侵食を防ぐなど、環境・治水に効果があることが知られている。その一方で、樹林群の規模、密度、河道に占める繁茂面積の割合などによっては、洪水時の流下能力に影響を及ぼす場合がある。このため、河道計画において、樹木群による抵抗を高精度に評価することは重要である。従来、樹木の抗力を評価する際、樹幹部分の抗力係数は滑面円柱の抗力係数( $CD = 1.2$ )が用いられている場合が多い(重枝ら(2006)、重枝ら(2007))が、実際は複雑でありその妥当性を検証する必要がある。樹木の主幹抵抗を正確に評価するためには、様々な形状の樹皮を有する樹木に対する抗力特性の知見を得る必要がある(Takenaka et al. (2010))。また、樹冠域では葉の量によって抵抗が異なることや枝葉の重なりによる遮蔽効果(Tanaka and Yagisawa(2010))が考えられる。葉層による付加抵抗  $\beta$ : 葉による抵抗係数の付加を表す無次元量 (=葉のついた状態での抗力係数/葉を取り去った状態での抗力係数) は福岡ら(1987)により 1.2~1.3、Armanini ら(2005)より実物大のヤナギでは 1.4 などの知見が得られているが、様々な樹木に対して十分な知見が得られているとは言えず、これらより詳細な検討が必要である。また、樹木が密に生育しているような樹木群の場合、上流側の樹木による遮蔽効果が樹木群の抵抗特性に影響を与えると考えられる。

以上を踏まえ、本研究は、樹木鉛直構造(樹幹・枝の投影面積、葉面積/枝面積の分布)を考慮した抗力計算法に必要な基本要素の詳細について、風洞実験による特性の把握、抗力モーメントにより転倒した風倒木の事例と倒伏モーメント限界値(実験式)の比較により、算出方法の精度を現地スケールで検証した。

倒伏した樹木について、抗力モーメント計算値  $M$  と胸高直径  $dBH$  の関係を、**図-21** に整理した。下限式は樹木管理の手引き((財)リバーフロント整備センター(1994))によるものを示す。台風 18 号強風で、平地で倒れたものは概ね下限値を超えたところで発生している。また、斜面(限界は半分程度と推定される)や根張りの悪いもの(根の深さが通常半分以下)の風倒木の推定値が下限式を下回った位置にあるのは、その強度から考えておおむね妥当であると考えられる。



**図-21** 樹木の鉛直構造を考慮した抗力モーメントの妥当性の検討 (算出した抗力モーメント計算値  $M$  と胸高直径  $dBH$  の関係)

2) 砂礫州に導入すべき洪水攪乱に関する解析手法の構築

(植生面積多様度と相関性の高い洪水攪乱指標の導出)

図-22において、解析対象とした洪水確率年の範囲である  $T=1/2$  から  $1/40$  までの範囲について、各 Region の面積比を積分することにより、洪水攪乱指標  $I_i$  を算出した。樹木と草本に関する破壊形態を図-21に示し、各領域の定義を表-2に示す。

図-22は多摩川と荒川の対象砂礫州で得られた洪水攪乱指標 ( $I_i$ ) と植生面積多様度指標 ( $BI$ ) の関係を示している。この図より、領域 B と領域 C については、 $I_i$  の値が小さかった。これは、Region B, Region C に該当する状況が砂礫州上で生じづらいためである。 $I_b$  や  $I_c$  の増加に対する  $BI$  の減少傾向も KL (熊谷大橋左岸側砂礫州)のみで出ているものである。そこで、以下は広い領域をもつ領域 A, D, E について、 $BI$  との関係を確認することとした。

植物が流失されず、樹木も破壊されない領域 A (図 22 (a)) についてみると、荒川の砂礫州では  $I_a$  の上昇とともに  $BI$  も上昇し、多摩川の砂礫州では  $I_a$  の増加とともに  $BI$  が減少するという傾向ことがうかがえる。一方、植物が流失される領域 E について  $I_e$  と  $BI$  の関係をみると領域 A とは逆の傾向が見られた。すなわち、荒川の砂礫州では  $I_e$  の上昇とともに  $BI$  が減少し、多摩川の砂礫州では  $I_e$  の増加とともに  $BI$  が増加している傾向であった。今後、他の河川で本手法の適用性を確認する必要があるものの、今回荒川と多摩川で得られた洪水攪乱指標  $I_i$  と植生面積多様度指標  $BI$  との関係は、図-23 のようにまとめることができる。定義に従えば、洪水攪乱の可能性が大きくなれば  $I_e$  は増加する。逆に、洪水攪乱の可能性が小さくなれば  $I_a$  は減少する。洪水規模と洪水頻度を組み合わせた効果は、上記のことと同様の効果を意味するため、 $I_a$  と  $I_e$  を中規模攪乱洪水を表す指標として定義することは合理的であると考えられる。

本研究の結果では、領域 A, E とともに洪水攪乱指標  $I_i$  がおおよそ 0.2 で  $BI$  がピークになることが確認できる。一方、領域 D (一年生草本は流失、多年生草本・樹木は残存、樹木破壊は生じる領域) では、どの程度の  $I_d$  が  $BI$  を最大にするかについては傾向が読み取れなかったものの、どちらの河川においても  $I_d$  の増加に伴って  $BI$  が増加する傾向が見られた。 $I_d$  と  $BI$  に正の相関が見られた理由は以下のように考える。Region D では一年生草本は流失、樹木は破断・倒伏が生じるが、多年生草本は残存する領域であり、そのような攪乱が生じやすい砂礫州では様々な種の植生が繁茂できる可能性が高くなると思われる。また、 $I_a$  に関しては、最も攪乱を受けづらい領域である Region A が多いため、遷移の過程で優先種が場を占有することで多様度は低下する(負の相関が見られる)と予想された。しかし、予想に反して荒川では  $BI$  との間に正の相関が見られた。今回検討を実施した荒川の 3 砂礫州の Region A に該当する箇所(主に砂礫州の頂部)で樹木が侵入し始めたのは、1999 年(1/40 確率洪水)あるいは 2001 年(1/25 確率洪水)以降であることを当該地点における航空写真から確認している。また、本研究で  $BI$  の算出に用いた植物の分布状況を示す資料は 2006 年時点に取得されたものである。このように樹木が侵入してから、わずか 5, 6 年では遷移が途中段階にあつたため、Region A に該当する箇所であっても、植生面積の多様度が維持された状態であつたと考えられる。

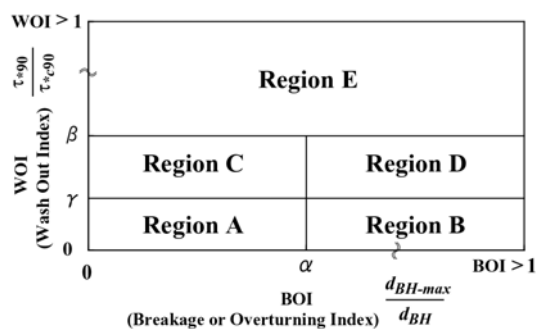


図-21 提案する植物破壊形態分類図

表-2 植物破壊形態分類図の各領域の定義

Region	BOI	WOI	定義
A	$< \alpha$	$< \gamma$	樹木、一年生・多年生草本ともに破壊が生じない領域
B	$\geq \alpha$	$< \gamma$	樹木 : 破断・倒伏は生じるが、流失は生じない領域 一年生草本 : 流失が生じない領域 多年生草本 : 流失が生じない領域
C	$< \alpha$	$\geq \gamma, < \beta$	樹木 : 破断・倒伏、流失も生じない領域 一年生草本 : 流失が生じる領域 多年生草本 : 流失が生じない領域
D	$\geq \alpha$	$\geq \gamma, < \beta$	樹木 : 破断・倒伏は生じるが、流失は生じない領域 一年生草本 : 流失が生じる領域 多年生草本 : 流失が生じない領域
E	-	$\geq \beta$	樹木、一年生・多年生草本ともに流失が生じる領域

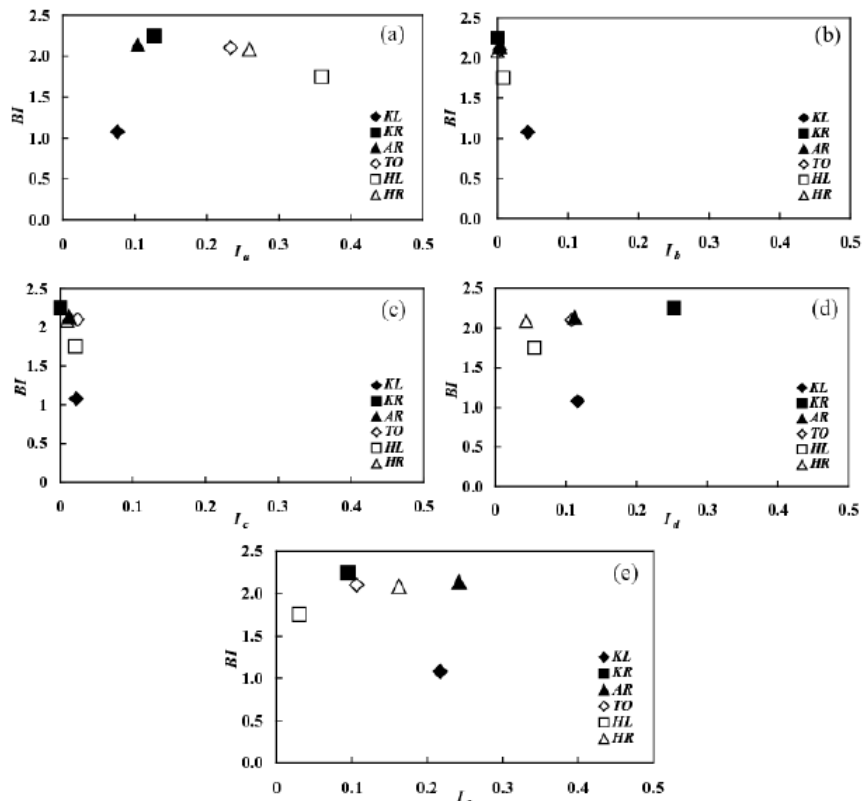


図-22 各破壊領域A-E における洪水攪乱指標  $I_i$  と植生面積多様度指標BI の関係  
 (a) A 領域, (b) B 領域, (c) C 領域, (d) D 領域, (e) E 領域

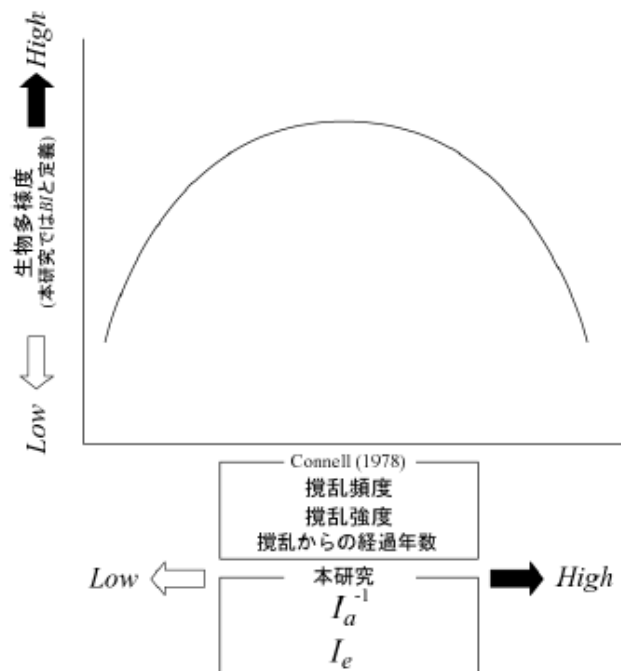


図-23 本研究で得られた植生面積多様度を高める要因と中規模攪乱の概念図

3) 洪水中の樹木破壊・流失と河床変動を考慮した流れの準三次元解析手法の適用性に関する検討

準三次元解析に、樹木の破壊、流失を取り入れることで砂礫州上の河床変動結果が実測に近づく箇所が見られたが、砂礫州頂部や後方など実現象を表現できていない部分があった。本年度は、それらの問題に対して、樹木周りの流れをより詳細に表現出来るように樹木を1つの株の様な樹木群として考え、群全体の抵抗と空隙を考慮すること、また、過度の樹木による変形効果を表現することでモデルを改良した。その結果、①砂礫州の前面部において樹木破壊のタイミングのずれにより、先に破壊された箇所

に流れが集中して生じる洗掘と堆積（計算では堆積しか表現できない）、②砂礫州上の樹木が破壊、流失に至らず残存する箇所とその後方における河床変動（実際は上昇傾向にある箇所が計算では河床低下）、という課題が改善された。特に、①については、渦度の変形効果を樹木前面における渦度の吸い込みと周辺への湧き出しというモデル化により、実測の河床変動傾向に近づく箇所が見られた。本節の検討により、洪水時の樹木の破壊・流失の有無やタイミングを組み込むこと、樹木周辺の馬蹄形渦などの局所流影響を組み込むことが、河床変動量算定の精度向上に多大に寄与することが示唆された。

#### 【4】今後の課題・展望

広域スケールの流れと構造周辺の局所流れを一体的に解くことができる一般底面流速解析法を開発し、種々の複雑な三次元流れに対して有効であることを示した。現地スケールの三次元流れの計測法を開発し、解析法の妥当性と課題を明らかにした。また、多重スケール解析に必要なネスティング手法に一般底面流速解析法を適用し、検討した。本解析法を観測水面形の時間変化を用いて洪水流・河床変動解析を行うことにより、洪水時の局所現象解明の有力な手段と成り得ることを示した。本解析法は浅水流の仮定を用いず底面流速を評価できることから、水制等の構造物が創り出す多様な河道内地形や河岸斜面上の変動を伴う安定河道断面形の評価が可能となり得ることを示しているが、そのために必要な観測法の整備と解析法の改良は今後の課題である。

石礫河川の土砂動態研究では、ほぼ実用的なモデルとして石礫河川の河床変動解析法を確立することができ、河道安定化工法への応用や安定断面形状について力学的な観点から検討する道筋をつけた。その結果、最終的に安定する河道断面形は船底形の河道断面形であることを示した。今後は、河道計画・設計において、構造物近傍などの三次元的な流れを考慮したより詳細な検討や河道樹木管理、河川生態系評価などに解析法をどのように活用するかが課題である。

船底形断面形状は、水際線が連続することから河川生態系にとっても望ましいものと考えられるが、その多様性や環境的機能の定量的評価法を提案するまでには至っていない。この点について、樹木群を有する河道の土砂動態と樹木倒伏機構の研究では、樹木の破壊形態に応じた樹木抵抗法を検討し、樹木を有する流れと河床変動解析法を開発するとともに、それを活用して、洪水攪乱と砂礫州上の植生面積多様度の関係について検討した。今後は、砂州の議論を河道断面に応用することによって河道断面の環境的機能を定量的に評価することが可能と考えられる。