

# 大礫中州と 2 列蛇行の 水理特性に関する考察

A STUDY ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF TWO LANE FLOW  
IN A STEEP CHANNEL COMPOSED OF LARGE BED MATERIAL

須賀 如川<sup>1</sup>・三品 智和<sup>2</sup>・長谷部 正彦<sup>3</sup>・池田 裕一<sup>4</sup>

Nyosen SUGA, Tomokazu MISHINA, Masahiko HASEBE and Hirokazu IKEDA

<sup>1</sup>フェロー員 工博 宇都宮大学名誉教授 河相工学研究堂 代表 (〒276-0023 千葉県八千代市勝田台4-2-4番地)

<sup>2</sup>正会員 工修 宇都宮大学大学院後期課程, 中央技術株式会社 河川チーム (〒310-0902 茨城県水戸市渡里町3082番地)

<sup>3</sup>正会員 工博 宇都宮大学大学院教授 工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 宇都宮大学大学院准教授 工学研究科エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

This paper deals with hydraulic characteristics of two lane flow in a steep channel composed of large bed materials. After the recognition of the regime, field investigation and also numerical experiment were made in the case of kinu-river. As results of the study, the regime of this meandering system was found to be one of the stable condition of meandering system and also discussed about the disturbing factors.

**Key Words:** two lane flow, steep channel, large bed material, 2-D simulation, field investigation

## 1. はじめに

本論文は、2 列蛇行の基本特性に関して、大礫中州(砂礫砂州)の微地形や河床構成材料等の現地観測と水理計算に基づいて、考察を行ったものである。大礫を含む混合粒径の砂礫河川では 2 列蛇行は一般に見られる蛇行形態である。その特徴は、写真-1 の鬼怒川上流の扇状地区間で見られるように、平常時において 2 本のみお(主水路と副水路)と節部からなり、河道幅の尺度の間隔で交互に存在する流路形状にある<sup>1)</sup>。しかしながら、最近では直線的な低水護岸施工および供給土砂の減少等の影響により、場所によっては、河床低下や河岸前面のみおの鮮明化とその延伸等を引起し、2 列蛇行に変形が生じ、みおの単列化が進行している。

2 列蛇行は、自然の蛇行システムの一つであり、防災や環境の面からも本来好ましい蛇行形態である。すなわち、大流量時には、河道中央部が主流速となり、河岸沿い流速は中央部に比して小さい。この場合、みお部の極端な河床低下がない限り、顕著な河岸侵食は生じ難い。中小流量時には、基本的には 2 列の流路形態となり、左右岸流路への流量の分散が生じ、顕著な河岸沿い流速は生じ難い。また、このような適正な 2 列蛇行では、中州でも

適度な冠水頻度があるため、植生繁茂を抑制し、持続的な礫河原環境を可能にしている。従って、礫河原再生事業の検討の際にも、重要な要素が多く含まれており、2 列蛇行の尊重とその反映が必要と考えられる。

既往の研究<sup>1)2)3)4)</sup>では、戦後の大規模な人為作用(計画断面への整備等)により 2m 以上の河床低下があった鬼怒川や渡良瀬川等の実河川を例に、その平面形状に着目し、資料調査(航空写真等)や水理実験による研究が進められてきた。その結果、2 列流路の節部位置の安定性は高く、その位置変化は少ないことがわかっている。これは、発散・収束河道の蛇行システムの基本事項(横筋大礫堆の安定性等)の安定性に起因するものとされている<sup>5)</sup>。

本論文では、なかでも砂礫砂州の基本構造に着目し、2 列蛇行の安定性との関連について、現地観測と 2 次元流況計算による検討を試みた。対象河川は、顕著な砂礫砂州の発達が見られる鬼怒川上流の発散・収束河道<sup>5)6)7)</sup>を取上げた。なお、対象地区の小林橋上流地区(104.5k~107k)は、直轄区間より上流部に位置し、両河岸は自然河岸の状態に残され、典型的な 2 列蛇行を形成しており、基本的知見を得るには適当な場所と判断される。水理計算の検討では、現地地形を反映させうるモデルを選定・改良し、2 列蛇行の水理特性に関する知見を得ることとした。

## 2. 鬼怒川小林地区の2列蛇行

### (1) 砂礫砂州の発達と2列蛇行の形成

鬼怒川小林地区(104.5k~107k)には2基の砂礫砂州を挟むように2列蛇行の形成が見られる(写真-1参照)。この砂礫砂州の地形と大礫分布について、現地観測により模式的に表現したのが図-1である。砂礫砂州の基本形態は、その多くがときに下流ほど標高の高い逆勾配を示した後、その頂点から下流では急な順勾配の縦断形状を呈している。そして、上流側の逆勾配付近には大礫が集積している。また、その横断形状は、カマボコ型を基本としている。2m以上におよぶ河床低下後は、縦筋大礫堆の形状と河床材料に若干の乱れが生じているが、上述の基本形態は維持されている。2列蛇行の形成には、この砂礫砂州の存在が直接関与している。河道内において砂礫砂州は、相対的に高く、築堤後には堤防前面の相対的に低い場所が平水・低水の流路となり2列流路が形成される。すなわち、2列蛇行の安定性は、砂礫砂州の構造に依存していると言える。

なお、2列蛇行の形成は、自然条件以外に人為条件下でも存在している。写真-2には鬼怒川支川の大谷川を示し、それを模式的に示したのが図-2である。当該区間では、直線的な流路工と落差工による人口流路を呈しており、落差工を節部とした2列蛇行を形成している。落差工の上流側では、勾配が緩く土砂堆積傾向にあり、落差工の下流側では流れが収束し、局所洗掘が生じ、その直下流から砂州が形成されている。自然条件の2列蛇行と比較した場合、流路工幅や落差工間隔等の制約条件があり、砂州自体の規模や洪水流に対する安定性に違いはあるものの、その基本形状は対応するところがある。

### (2) 鬼怒川小林地区の2列蛇行の現地観測

以上に述べた砂礫砂州の基本形態を、鬼怒川の現地観測結果と関連付けて考察を行う。調査地区は、写真-1に示す小林橋より上流側、104.7m~105.3km(延長約600m)の砂礫砂州である。当該地区は、左右岸共に自然河岸の状態に残されており、人為作用の影響は少ない地区である。図-3は当該区間の横断形状を示したのものである。

まず a)地点は収束部に位置し、安定した溝型(凹型)の横断形状を呈している。この地区は大谷川合流点を要とする鬼怒川扇状地において、最上流部の収束部であり、

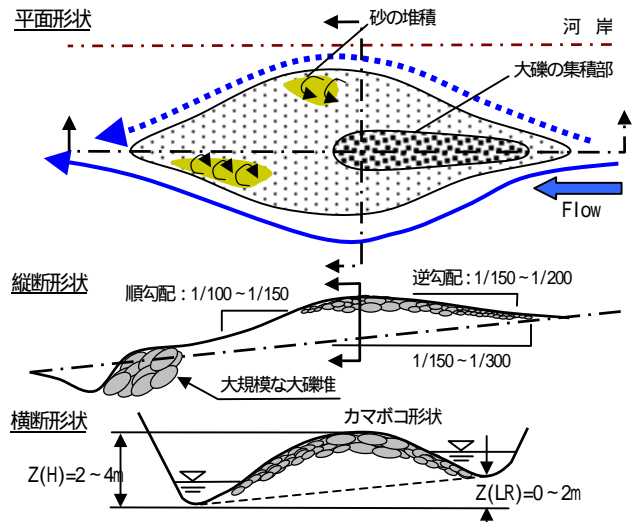


図-1 砂礫砂州の基本構造の模式図



写真-2 大谷川の流路工(鬼怒川合流点付近)

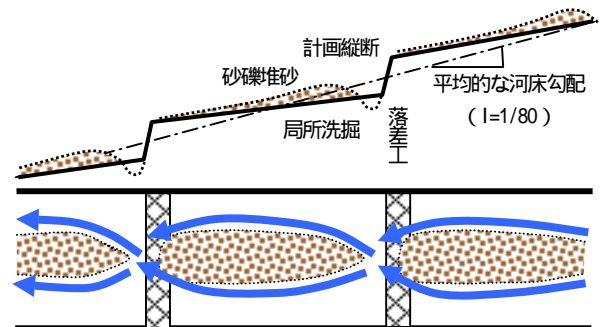


図-2 流路工施工に伴う流路変化の模式図

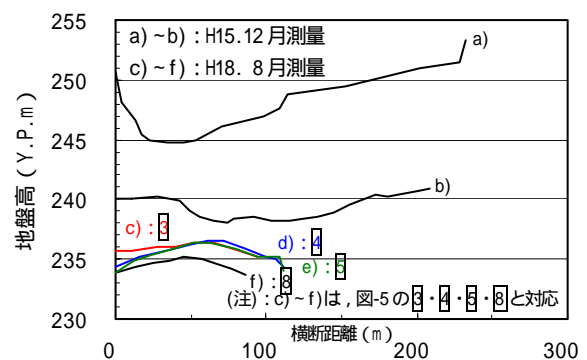


図-3 横断形状(小林橋上流地区(104.5k~107k))



写真-1 砂礫砂州と2列蛇行の形成 [小林橋上流地区(104.5k~107k)]

山地景勝地の佐貫観音地先に位置する。河道内には一面岩が露出しており、流送土砂の大半はこの地点を通過する。b)地点は発散面への開始付近であり、カマボコ断面(凸型)への移行過程に位置する。c)～f)地点は発達したカマボコ断面である。

砂礫砂州の縦断形状と河床材料を図-4に示す。なお、同図には、天端部とみお部の比高差の目安として、左岸沿いみお高と右岸沿い水際高を示している。右岸沿いみお高は、水中につき、水深からの想定範囲を示している。図-5には、図-4のc)③・d)④・e)⑤・f)⑧の横断方向の河床材料構成率を示した。

縦断特性としては、小林橋上流区間(104.5～107k)の平均的な河床勾配は1/200程度であるが、カマボコ断面の背を連ねる勾配は小さい。時として、図-4(上図)のように下流側に標高の高い逆勾配(-1/200程度)の縦断形状を呈することもある。この場合、大礫(巨石・玉石)の構成比率は、砂礫砂州上流部(①～④)の逆勾配付近において高い傾向にある。逆勾配ピーク地点から下流の順勾配範囲(1/150程度)では、逆勾配区間に比して大礫構成率は小さく、砂・砂利の構成比率が増大する。特に縦筋大礫堆の下流部では、図-3のf)⑧のようにカマボコ形状が偏平的であり、洪水減水期に渦が発生し易く、均一砂の堆積が生じることがある。横断特性として、砂州頂点上流では、図-5の③のように砂州中央において、大礫(巨石・玉石)の支配率が高い傾向にある。砂州頂点の④においても若干ではあるが高いようである。砂州頂点下流では、⑤で右端の大礫支配率が高い。⑧においては、大礫支配率は中央で高いが、礫以上で見ると右端で高い。これから判断すると、洪水主流は砂州頂点上流では河道中央で発生しており、砂州頂点下流では砂州中央から右岸方向に寄っていると推察される。

### 3. 2列蛇行流の流況計算

ここでは、砂礫砂州の現地観測結果を踏まえて、2次元流況計算を行い、水理特性の検討を試みる。流況解析には、既存の水理解析プログラム<sup>8)9)</sup>を用いることとした。この解析プログラムの適用性については、これまで水路実験を通して、検証を行っている<sup>10)11)</sup>。対象地区は、前章と同様に小林橋上流地区とし、104.5k～105.5k(延長1000m)の砂礫砂州について、流況解析を行った。

地形データ(x,y,z)については、平面地形は航空写真(H14)を基本とし、縦・横断地形は現地測量等を用いて、砂礫砂州を模式的に表現し、プログラムに取込むこととした。なお、左右岸のみおの比高差については、図-4(上図)に示したように、平成18年8月現在、右岸側みおの方が左岸側みおと比べ1.5m程度低いようである。当該地区は、直轄区間外のため、過去の横断データは存在して

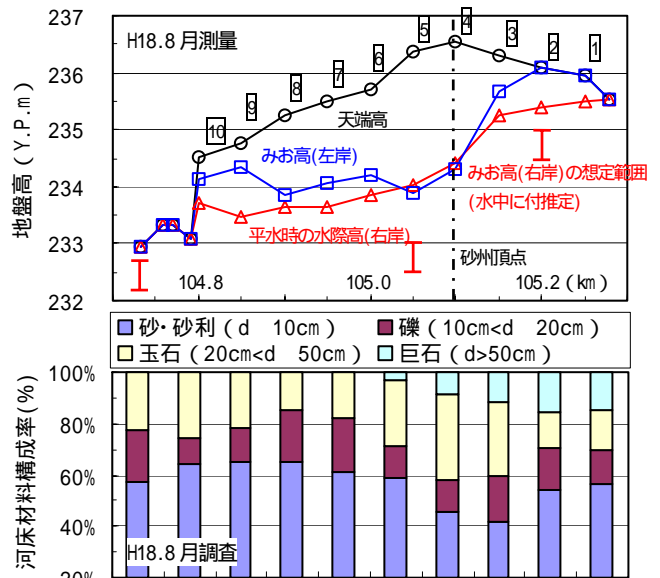


図-4 砂礫砂州の縦断形状と河床材料

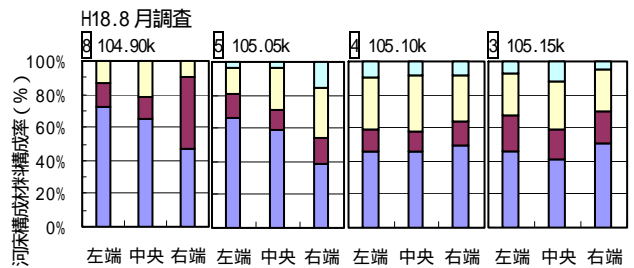


図-5 砂礫砂州の横断方向の河床材料(③・④・⑤・⑧)

(河床材料の記号については図-4参照)

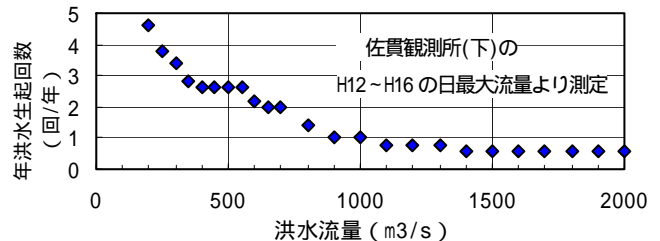


図-6 年間の洪水発生回数(佐貫観測所(下))

ないが、約4年に亘り現地視察を行ったところ、右岸側水路の河床低下は、1m程度進行していると推測される。これに関連する事項として、直轄区間において、蛇行形状の経年変化を調べたところ、最近10年間、河岸前面のみおの鮮明化とその延伸が顕在化し、みおの単列化が進行していることが認められている<sup>12)</sup>。この原因には、戦後の大規模な河川改修(計画断面への改修等)が関与しており、なかでも直線的な護岸施工によるみおの呼び込みが大きい。当該地区についても、護岸施工の影響は少ないにしても、河床低下は進行していると考えられる。以上のことから、各ケースの地形については、CASE1-1( $Z(LR)=0m$ )およびCASE2-1( $Z(LR)=1m$ )は平成14年以前の河道形状、CASE2-2( $Z(LR)=2m$ )は平成18年頃の河道形状に相当する。また、CASE2-3( $Z(LR)=4m$ )は、今後も河床低下が進行した時の地形に相当する。

流況計算の初期条件としては、空間座標は、直交座標

で総メッシュ数を 1900(X 方向 100, Y 方向 19)にし, 1メッシュを 10m×10mとした. 下流端の初期水位は, 等流水位を与え, 最大計算ステップ数を 10000 とした. 計算ステップ数については, 予備解析を行った結果, 10000 程度で水位の安定が見られており, 今回の河道条件下では妥当な値と考えている. その他の係数については, 粗度係数 0.035 基本河床勾配 1/200 渦動粘性係数 0.3 とした. 対象流量は, 250・500・1000・2000 m<sup>3</sup>/s とした. それぞれの流量の年間洪水生起回数は 図-6 に示した通りである.

各ケースにおける河床コンター及び縦断形状(砂州天端・みお筋)をそれぞれ, 図-7・図-8 に示した. 左右岸みおの比高差は, 砂州頂点付近(X=400)で Z(LR)=0~4m の比高差を設定している. また, 砂礫砂州の基本形態として, カマボコ型の横断形状と上流端の逆勾配地形(I=-1/150)をそれぞれ再現している.

平面流速分布について, CASE1-1( Z(LR)=0m)及びCASE2-2( Z(LR)=2m)の計算結果を次頁の図-11 及び図-12 に示した. CASE1-1 において, 主流速線の流況を見ると, Q=250・500m<sup>3</sup>/s 時には X=360 付近で左右岸に分流していたが, Q=1000 m<sup>3</sup>/s には下流側に移行している. Q=2000 m<sup>3</sup>/s には分流することなく, 全区間を通して, 主流速部は河道中央部に存在している. CASE2-2 において, 右岸みおの河床低下(2m)が進行したことで, X=400~500 付近で Q=250・500 m<sup>3</sup>/s 時に死水域が生じている. また, 両ケースの主流速線から判断すると, Q=1000 m<sup>3</sup>/s 以上の流量時では, どちらのケースも主流速は河道中央付近に存在しており, 河床低下(2m 程度)の影響は少ないようである.

河道中央部とみお部の縦断流速分布(CASE1-1)を図-9 に示した. 区間最大流速は, 流量に依存することなく, 砂州上流端付近でピーク値を示している. また, Q=500 m<sup>3</sup>/s 時には砂州頂点下流側(X=400 より下流)において, 河道中央部とみお部の流速が逆転しており, 河道中央部に比して, みお部の流速が大きい傾向を示している. この結果に関連して, X=300(砂州頂点の上流側)・X=400(砂州頂点)・X=500(砂州頂点の下流側)地点における流量と流速の関係を図-10 に示し, それぞれの地点の Q=1000 m<sup>3</sup>/s の横断流速分布を次頁の図-13 に示した. 砂州頂点の上流側(X=300)では, 河道中央・みお部共に流量の増大に比例して, 流速の増大が見られる. その横断流速分布は, 河床低下に依存することなく, 河道中央付近で最大流速が生じている. 砂州頂点(X=400)から砂州頂点下流側(X=500)では, 流量と河床低下の増大に関係無く, みお部の流速は 2m/s 程度で一定である. 横断流速分布の最大は, 河道中央より右岸側で生じている. 次頁の図-14 には, CASE1-1 と CASE2-2 における流量別(Q=500・1000・2000 m<sup>3</sup>/s)の河道中央部とみお部の縦断流速分布を示した. この図から判断すると 2m 程度の河床低下が生じることで, Q=500 m<sup>3</sup>/s 程度の流量時には砂州頂点下流側 Q=2000 m<sup>3</sup>/s

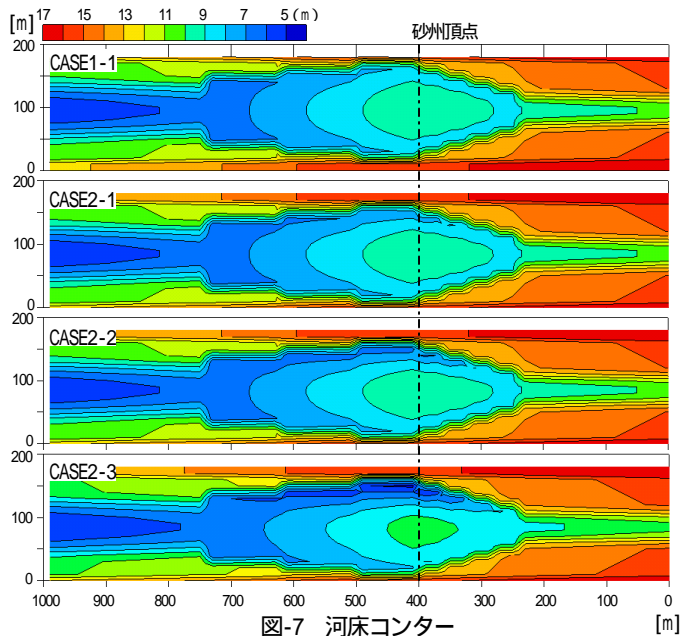


図-7 河床コンター

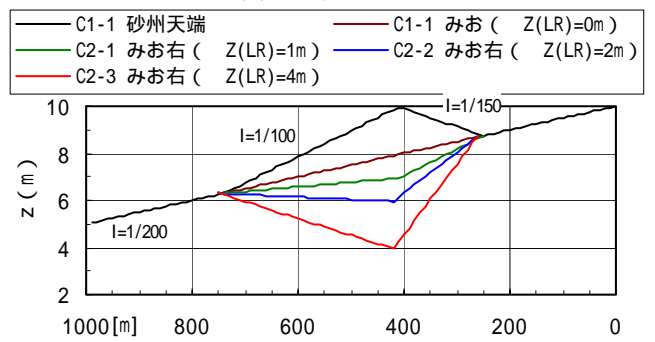


図-8 砂州天端とみお筋の縦断形状

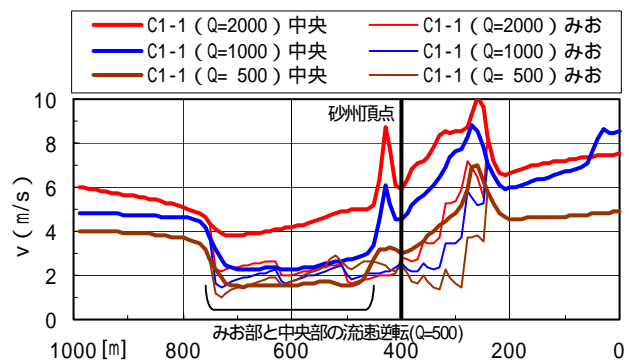


図-9 CASE1-1 における河道中央・みお筋の縦断流速分布

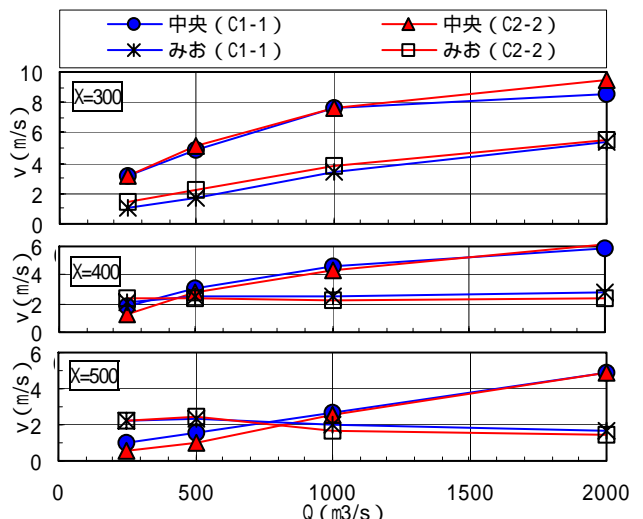


図-10 CASE1-1 と CASE2-2 における流量と流速の関係

時には砂州頂点上流側において、それぞれ流速に乱れが生じる傾向が見て取れる。

#### 4. 2列蛇行の安定性に関する考察

ここでは、現地観測と水理解析を通して、砂礫砂州の基本構造と2列蛇行の安定性に関して、総合的に考察を行う。対象とした砂礫砂州は、観測結果の図-4に示したように、頂点(逆勾配と順勾配の変化点)の上流側には巨

石・玉石等の大礫が集積している。この結果と図-15に示した観測時に近いCASE2-2( $Z(LR)=2m$ )の河道中央と左岸みおの縦断流速分布を比較すると、頂点上流側で流速が大きい傾向にあり、大礫分布との相関性は高いようである。また、頂点上流側では、カマボコ型の横断形状を呈しており、その天端(中央)付近では図-5の③・④に見られるように、大礫の支配率が高い傾向にある。これについても、横断流速分布の図-13の $X=300 \cdot X=400$ との相関性は高い。このように対象地区の砂礫砂州は、洪水流の

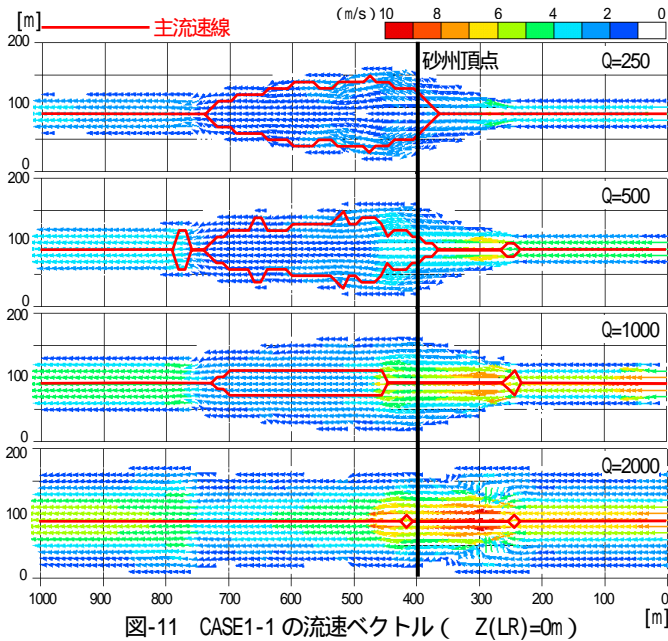


図-11 CASE1-1の流速ベクトル ( $Z(LR)=0m$ )

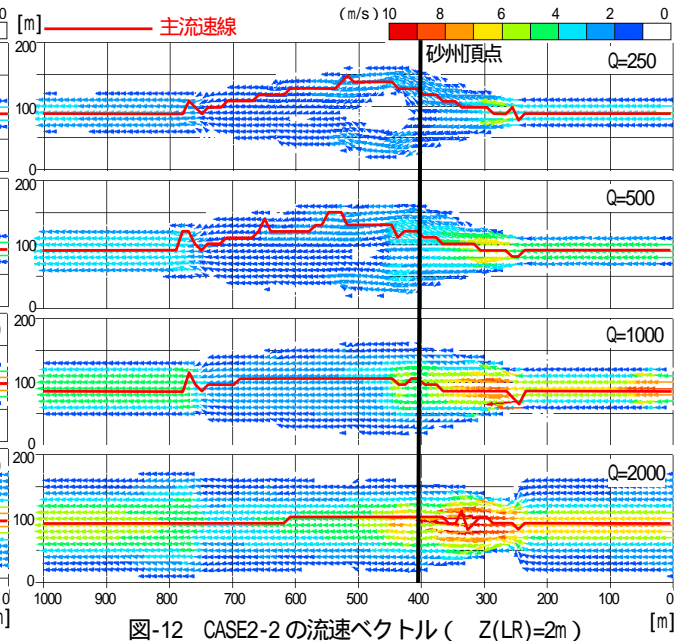


図-12 CASE2-2の流速ベクトル ( $Z(LR)=2m$ )

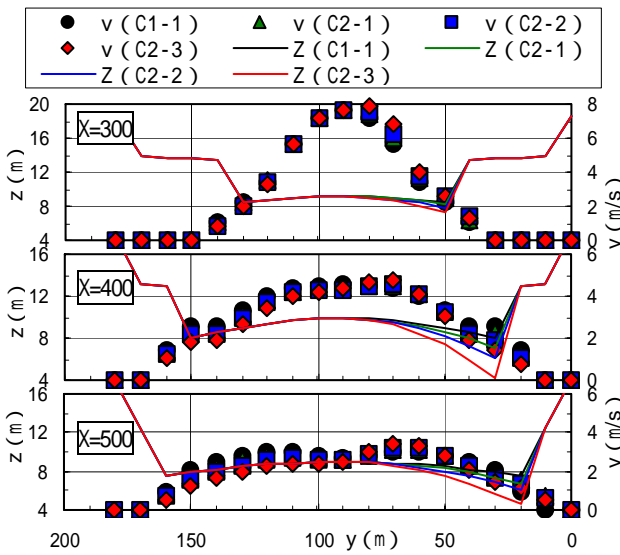


図-13  $Q=1000m^3/s$ におけるCASE別の横断流速分布

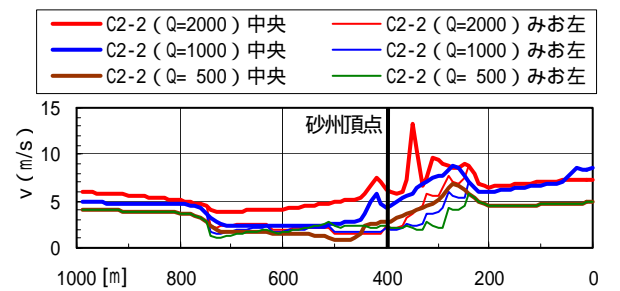


図-15 CASE2-2における河道中央・みお(左)の縦断流速分布

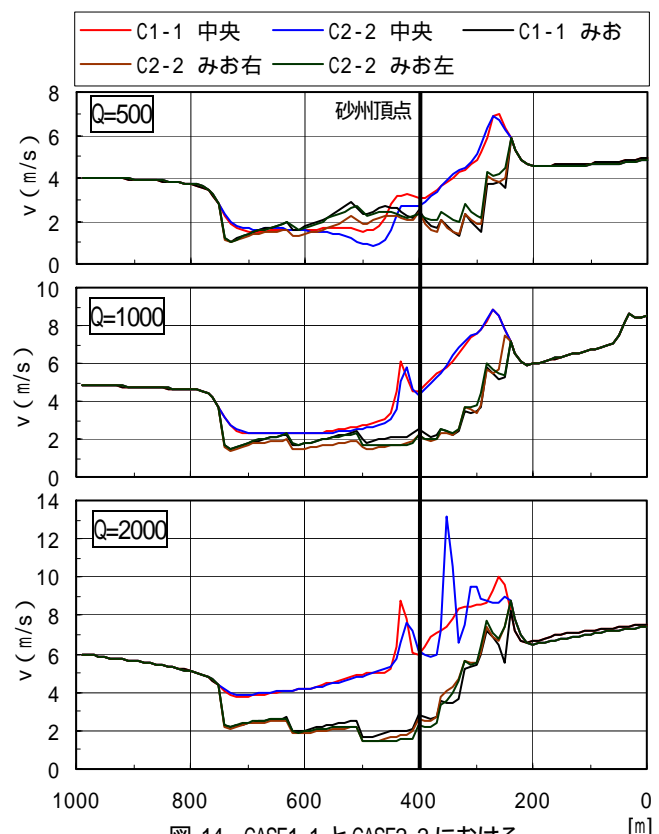


図-14 CASE1-1とCASE2-2における流量別の河道中央・みお筋の縦断流速分布

主流に対応した大礫分布が形成されていることが認められた。すなわち、砂礫砂州の構造から推察すると、既往の研究<sup>3)4)</sup>において、節部位置の安定性が高い理由として、砂州上流端での大礫集積と地形(カマボコ形状・逆勾配等)があり、洪水流に耐えうる構造と言える。

このことを計算結果に基づいて考察を行う。左右岸みお高に極端な比高差の生じない適正な2列蛇行を有する河道(例えばCASE1-1 Z(LR)=0)では、図-11に示したように1000m<sup>3</sup>/s(年1回程度の洪水確率)以上の流量時には、区間全体を通して、河道中央付近で主流速となっており、500m<sup>3</sup>/s以下の流量時には、頂点下流において、主流速が河岸沿いみおに移行している。着目すべきは、河岸沿いみおの流速は、頂点上流側(図-10のX=300)では流量に比例して増大しているが、頂点下流側(図-10のX=500)では流量の増大に関係無く、ほぼ一定流速(2m/s程度)を維持していることである。

一方、供給土砂量の減少段階で河岸沿いみおの河床低下が生じた河道では、縦横断の流速分布に乱れが生じている。縦断的には、図-14に示したように頂点上流側では2000m<sup>3</sup>/s、頂点下流側では500m<sup>3</sup>/sにそれぞれ流速に乱れが生じている。横断的には、頂点上流側(図-13のX=300)では河床低下の増大に関係無く、河道中央付近で主流速を呈しているが、頂点下流側(図-13のX=500)では主流速が中央部から右岸方向に移行している。これについて、観測結果と比較すると、頂点下流の礫以上の分布(図-5の⑤・⑧)は右端に寄っており、横断流速分布と対応していることがわかる。すなわち、対象地区の砂礫砂州は、頂点下流側において、若干乱れており、その要因は河床低下に伴い天端部とみお部の比高差の増大が生じたことが支配的と考えられる。

一般に実河川の広い河道部(発散部)には、安定性の異なる複数の砂礫砂州が存在している。この安定性の相違は、河道の不安定化の一因となっている。なかでも、今回対象とした砂礫砂州は、比較的安定性の高いものと考えられるが、それには他の砂礫砂州との比較調査が必要である。この場合、砂礫砂州の安定性を見極めには、大礫分布状況と砂礫砂州の形状(カマボコ形状・上流端の逆勾配・砂州天端高とみおの比高差等)から判断することが適当と考えられる。

## 5. 結論

本論文では、鬼怒川小林地区を対象にして、2列蛇行の基本特性について、砂礫砂州の実態調査と水理計算に基づく検討を試みた。以下に主要な結果を示す。

1) 2列蛇行の安定性は、砂礫砂州の構造に依存している。砂礫砂州の基本構造は、砂州上流端での大礫の集積とときに逆勾配ともなる縦断地形、カマボコ型の横断形状等

であり、これらが安定性の判断材料となる。

2) 適正な2列蛇行を有する河道では、河岸付近のみおの流速は、大流量時でも中央部に比して小さい。自然の河岸が長期間維持されてきたこと、およびその水理条件から、河岸前面みおの河床低下の進行がない限り、河岸侵食は顕著ではないことがわかった。2列蛇行の基本特性を考えると、当時の築堤位置は、試行錯誤の結果、重量のある低水護岸を必要としない河道づくりであったと評価される。

3) 最近では、砂礫砂州の基本形態に変形が見られる。その原因は、みお部の河床低下に伴う、砂礫砂州天端とみお部との比高差の増大である。特に砂礫砂州の頂点下流側では、その傾向が顕著に現れており、大礫の横断分布が乱れている。今後の洪水流によっては、洪水時の主流速が中央から河岸へ移行し、河岸沿い流速の増大が予測される。

## 参考文献

- 1) 須賀堯三：河道内2列蛇行の縦断特性，第43回土木学会年次講演会講演概要集，pp. 258～259，1988。
- 2) 須賀堯三：河道内2列蛇行の安定条件，水理講演会論文集，Vol.33，pp.397～402，1989。
- 3) 河森克至，須賀堯三，池田裕一：洪水時の2列蛇行の安定性，第45回土木学会年次講演会講演概要集，pp. 376～377，1990。
- 4) 木下良作，三輪 弌：砂レキ堆が安定する河道の平面形状，第29回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp. 266～268，1974。
- 5) 須賀如川：大礫を含む混合粒径河川における河道システムの本質に関する考察，河川技術論文集，Vol.10，pp.95～100，2004.6。
- 6) 三品智和，須賀如川，古川保明：発散・収束河道の大礫堆に関する堤内地を含めた総合的現地観測とその考察，河川技術論文集，Vol.11，pp.375～380，2005.6。
- 7) 須賀如川，三品智和，唐沢潔，竹内清文，古川保明：発散・収束河道のクランクフローに関する現地調査とその考察，水工学論文集(CD-ROM)，pp.979～984，Vol.50，2006.2。
- 8) 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解析，水工学における計算機利用の講習会，土木学会水理委員会基礎水理部会，1999.8。
- 9) 水理公式集例題プログラム集：平成13年版。
- 10) 古川保明，須賀如川，池田裕一，岩崎太志：砂州前縁部における常流射流混在流れの構造に関する基礎的研究，水工学論文集，Vol.49，pp.523～528，2005.2。
- 11) 古川保明，池田裕一，岩崎太志，須賀如川：常流射流混在流れの構造に砂州前縁部地形と側壁粗度が与える影響，水工学論文集(CD-R)，Vol.50，pp.643～648，2006.2。
- 12) 三品智和，須賀如川，唐沢潔，古川保明：鬼怒川河道における発散・収束現象と戦後の護岸施工との相互関係に関する考察，河川技術論文集，Vol.12，pp.211～216，2006.6。

(2007.9.30 受付)