

複断面蛇行河道における洪水流の増水期と減水期の流れ構造

Flood Flow Structure during Rising and Falling Stages in a Compound Meandering Channel

森下祐*・渡邊明英**・内田龍彦***・河原能久***

Yu MORISHITA, Akihide WATANABE, Tatsuhiko UCHIDA and Yoshihisa KAWAHARA

*学生会員 広島大学大学院博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

**正会員 株式会社東京建設コンサルタント (〒171-0014 東京都豊島区池袋 2-43-1)

***正会員 広島大学大学院助手 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

***フェロー 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

Flood flows in meandering compound channels show highly three-dimensional structure due to complex shape, roughness distribution and flow unsteadiness. In this study detailed measurement of velocity and water depth was carried out for unsteady flow in a compound meandering channel to clarify the differences in flow structure and the momentum transfer mechanism between main channel and flood plains during rising and falling stages. It was demonstrated that the convective momentum transfer between main channel and flood plains is more active during rising stage than falling stage.

Key Words: *unsteady flow, compound meandering channel, flow structure, momentum transfer*

1. 序論

我が国の一級河川の中下流部の多くは複断面蛇行河道である。治水面に加えて環境面に対しても配慮されるようになった近年の河川計画において、その両面で有益な点を有する複断面蛇行河道の流れ場の特性を知ることが重要な意義を持つ。複断面蛇行河道を流下する洪水流は、高水敷流れと低水路流れの混合により、単断面の場合とは大きく異なった三次元構造や抵抗特性を有することが知られている^{1), 2), 3)}。

芦田・江頭ら¹⁾は複断面蛇行流れと単断面蛇行流れの相違点に着目し、平坦床、及び平衡河床を有する複断面蛇行水路を用いた定常実験を行い、流れと河床変動の特性について詳細に論じている。

武藤ら²⁾は高水敷と低水路が滑面からなる複断面蛇行水路において定常な流れ場を詳細に計測し、水路の抵抗特性を検討する上で低水路内の二次流、低水路流れと高水敷流れの混合に伴う運動量交換の重要性を指摘している。福岡・渡邊ら^{3), 4)}は実河川のスケールを念頭においた複断面蛇行水路で定常実験を行い、高水敷水深が流れ場に与える影響、すなわち、低水路と高水敷の流れの混合機構、低水路内を流れる流量、二次流分布とその発達・減衰を詳細に調べ、複断面蛇行流れの構造を考察し、その三次元的特性を説明できる数値モデルを開発した。

一方、複断面蛇行水路の非定常流に対して、福岡・渡邊らは^{5), 6)}複断面蛇行河道が持つ貯留効果の重要性を指摘し

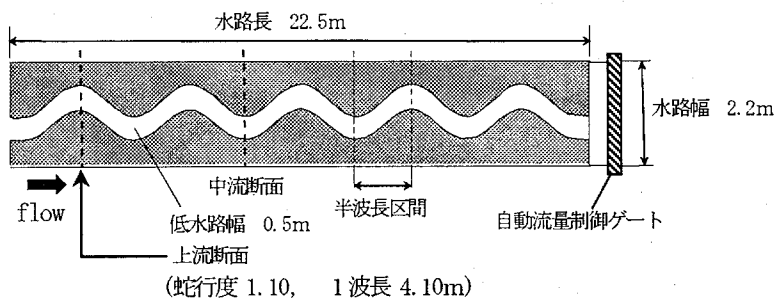
た。彼らは、非定常流実験により洪水流の流下形態や貯留量に及ぼす非定常性、河道の平面形、横断面形、樹木群、下流端の条件の影響を検討した。非定常二次元解析モデルを開発し、複断面蛇行河道における洪水時の水位観測結果を再現することによって洪水流量の高精度推算が可能であることを示した。しかし、非定常流における複断面流れの構造の変化、特に、増水期における低水路から高水敷への流水の氾濫や、減水期における高水敷から低水路への流水の流入といった運動量輸送の時間的変化に関しては十分には理解されていない。

そこで、本研究では、複断面蛇行水路の洪水流を対象として、①一次元的立場(流下方向)に基づいた検討、②二次元的立場(平面)に基づいた検討、③その差異について、鉛直方向、横断方向の運動量輸送を用いた検討、を行うことで、増水期と減水期における流れ場の変化について、より明確にすることを目的として、水深や流速三成分の詳細な測定を行うこととした。

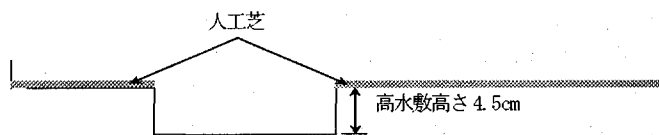
2. 大型水路を用いた非定常流実験

(1) 実験水路

図-1に本研究で用いた実験水路の概要を示す。実験水路は複断面蛇行形状であり、水路長 22.5m、水路幅 2.2m の可変勾配水路であり上流端に自動流量制御装置、下流端には自動制御ゲート(図-1(a)参照)を備えている。また低水路はほぼ滑面の固定床であり、高水敷は木製型枠で作製



(a) 実験水路平面



(b) 実験水路断面



(c) 実験水路の写真

図-1 実験水路

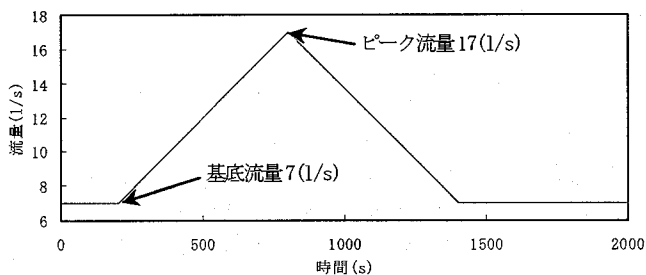


図-2 設定流量ハイドログラフ

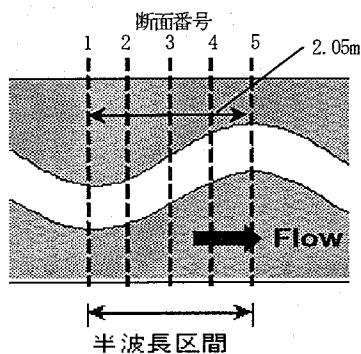


図-3 半波長区間の拡大図

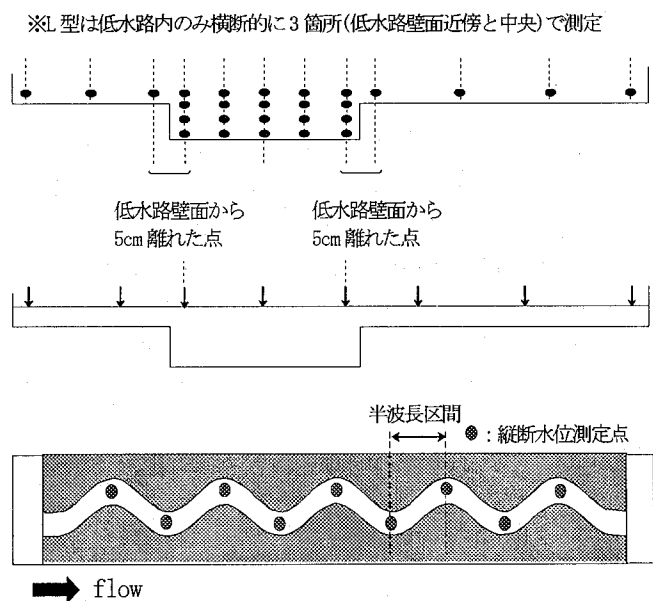


図-4 流速(I型)と水位の測定箇所
(上: 流速, 中: 半波長区間の水位, 下: 縦断水位)

し、上面に人工芝を貼り付けることで低水路よりも大きな粗度となっている。低水路の形状として蛇行度は1.10であり、波長4.1mの蛇行部を5波長連ねた形状となっている。

(2) 実験条件

図-1に示す大型水路に非定常流を流下させ、詳細な測定データを基に、流れの構造の時間的な変化を検討する。

流れの状態を表す水理量として、複断面流れを特徴づける相対水深 Dr を用いる³⁾。相対水深 Dr は高水敷(面)からの水深を低水路(河床)からの水深で除した無次元量として定義される。水路床勾配は洪水波の伝播速度を小さくすることを考慮して、1/1000を採用した。また水路に流下させる非定常流は自動流量制御装置によって制御される。本研究では増水期と減水期の特徴を明確に捉えやすくする

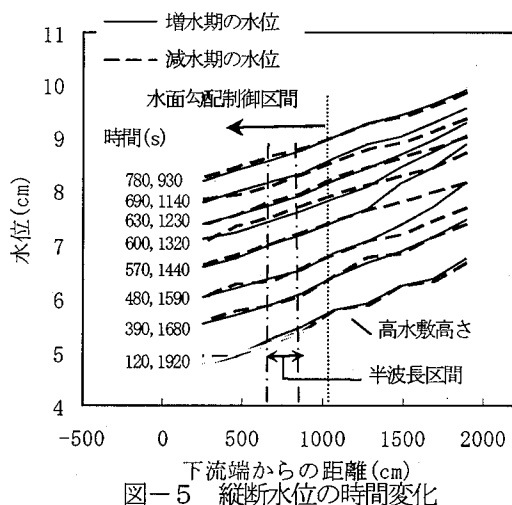


図-5 縦断水位の時間変化

ため、図-2に示すように増水期と減水期の流量の増減割合が等しい二等辺三角形の流量ハイドログラフを採用している。また今回、増水期と減水期の流れ構造の違いに対して、平面形状・横断面形状に起因する高水敷流れと低水路流れの流体混合が与える影響をより明確にするために、下流端の制御ゲートにより、水面勾配制御区間(図-1(a)参照)が洪水期間中を通じて、河床勾配と一致するように自動で調整している。これにより、水面勾配の時間的変化が増水期と減水期の流れ構造の違いに与える影響を小さくしている。

(3) 測定方法

複断面蛇行水路の半波長区間で水位と流速を時間的に連続で、かつ詳細に測定する。半波長区間は複断面蛇行流れが十分に発達し、また下流端の堰の影響が小さい中流区間の一部に選定する(図-1)。選定した半波長区間の拡大図を図-3に示す。

測定は図-3に示すように半波長区間をさらに縦断的に5断面に分割し、各断面に対して行う。水位はサーボ式波高計を用い、図-4に示すように各断面に対し、横断的に8点で測定した。流速はI型電磁流速計(主流方向と横断方向)を用い、図-4に示すように各断面に対し、横断方向に12点(高水敷7点、低水路5点)、鉛直方向に4点(低水路内のみ)で測定している。また低水路内の一部の点(各断面の低水路壁面付近、低水路中央)ではL型電磁流速計(主流方向と鉛直方向)で鉛直方向の流速も測定している。

水路全般にわたる水位の縦断変化についても、図-4に示した測定点において連続的に測定し、測定区間の流量の時間変化の検計に用いた。

なお、流量制御装置によって制御された同一の流量ハイドログラフを多数回繰り返し通水し、測定されたデータから、水位や流速の時間的、空間分布を作成した。

3. 非定常流の流下形態

図-5に縦断水面形を示す。実線が増水期、点線が減水期、図内の数字は時間(s)(左が増水期、右が減水期)を示

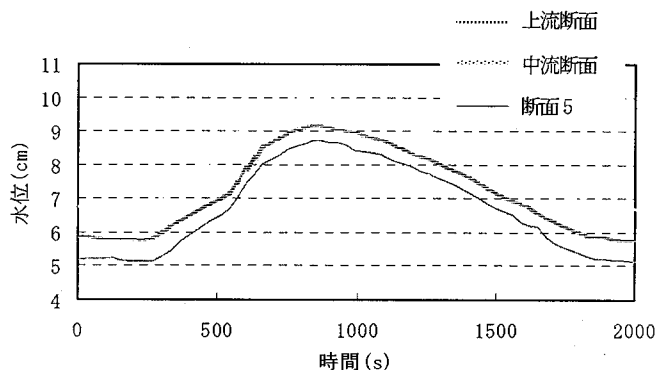


図-6 水位ハイドログラフ

し、増水開始から減水終了までの水面形の変化を見ることができるようにしている。図-5から(選定した)半波長区間を含む水面勾配制御区間において、水面勾配は時間的にほぼ一定に維持できていることが確認される。しかし、水面勾配制御区間より上流は、通常の非定常流と同様に、増水期の水面勾配は大きく、時間的に一定となっていない。

図-6、図-7、図-8に図-1の上流断面と中流断面と図-3の断面5における水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフ、流量と低水路中央水深の関係について示す。また図-9に上流から中流断面の区間と中流断面から断面5の区間の貯留量の時間変化について示す。貯留量は単位時間における指定した区間の上流側断面の流入流量と下流側断面の流出流量の差で定義される。流量に関して、図-1に示される上流断面の流量は自動流量制御装置に含まれる電磁流量計の値を用いており、また中流断面と断面5の流量は、実験水路の全水路区間に対し、縦断的に測定した水位の時間変化から、単位時間あたりの各区間の貯留量を算出し、それを下流方向に追跡計算することで求めている⁴⁾。

図-6から、増水期に上昇した水位は、減水期で緩やかに時間をかけて下降しているのがわかる。

図-7から流量ハイドログラフは一般的に知られているように流下に伴い変形し、ピーク流量の低減や時間的な遅れが生じ、減水期には上流断面よりも、やや緩やかに減少した後、基底流量7(ℓ/s)まで下がらず、それよりも大きい流量8(ℓ/s)でしばらく定常状態が続く。これは本実験条件では、下流端の堰により、水面勾配を調整するため、貯留された水が抜けにくくなるためと考えられる。

図-8から流量と水深の関係は各断面とも非定常特有のループ曲線を描いており、同水深に対し、増水期と減水期で2つの流量を有しているのがわかる。ここで増水期と減水期の相違点に着目し、図-7を見ると中流断面、断面5の流量は増水期において、上流断面の流量に比べて、水位上昇に伴い低減が生じており、500~600秒付近でその低減量が大きくなっている。一方、減水期では流量の増加が生じており、1400~1800秒付近で大きくなっている。これらに関しては、図-9に示した貯留量の時間変化から

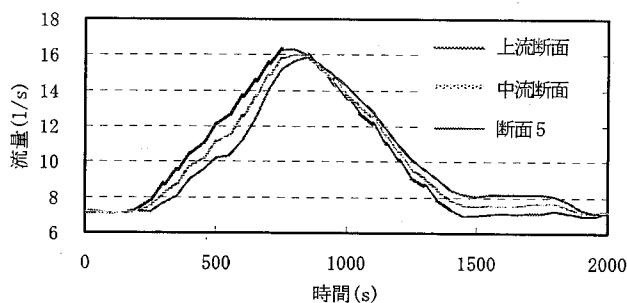


図-7 流量ハイドログラフ

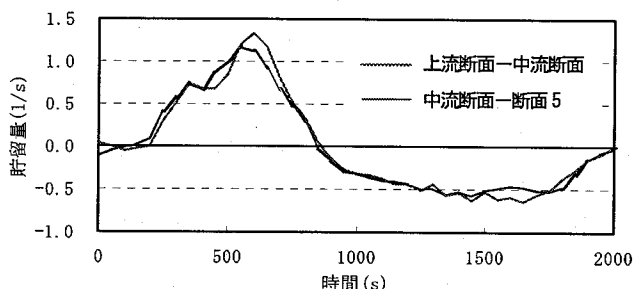


図-9 貯留量の時間変化

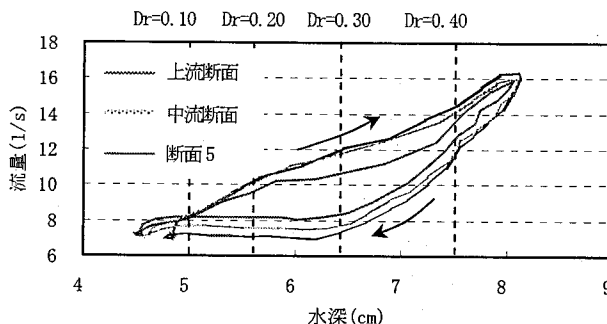


図-8 流量と低水路中央水深との関係

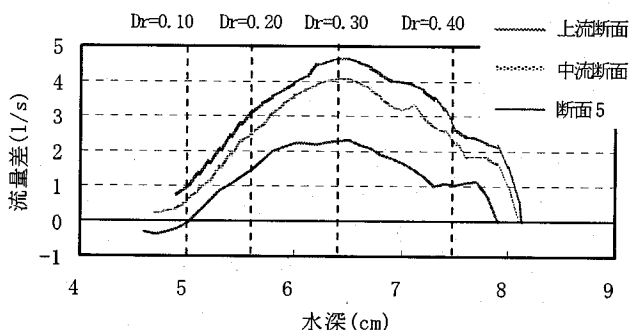


図-10 増水期と減水期の流量差と低水路中央水深の関

もその特徴がよく示されている。即ち、前述した時間帯は貯留のピークと貯留された水の放出のピークを示しており、また減水期には時間をかけて水を放出しているのがわかる。

ここで増水期と減水期の違いをより明確に示す図として、図-10に各断面における同水深時の増水期と減水期の流量差(増水期-減水期)を示す。流量差は各断面でその大きさに違いが生じているが、どの断面も水深の上昇に伴い大きくなり、水深6.4cm付近($Dr=0.30$ 付近)でピークを示し、その後ピーク水深で流量差が0になるように減少していく。福岡³⁾によれば、高水敷上に水が流れていても相対水深が小さい場合は単断面的な流れの影響が強く、相対水深が $Dr=0.30$ 程度にまで上昇すると、複断面的な流れが発達する。このことから、増水期と減水期の違いは $Dr=0.00$ から $Dr=0.30$ 付近までの、単断面的蛇行流れから複断面的蛇行流れに流れ場が遷移する、即ち断面の流れ構造、抵抗特性が変化する過程で生じていると思われる。

以上から、非定常性や水路の平面形状、横断面形状の影響に起因して、貯留が(本実験の条件では)、相対水深の上昇と共に $Dr=0.30$ 付近まで生じ、この水深付近で貯留量が最大となる。そのため、 $Dr=0.30$ 付近で複断面蛇行流れの増水期と減水期の流れ構造の違いが最も強まるということが考えられる。

4. 非定常複断面蛇行流れの増水期と減水期の流れ構造

本研究では複断面蛇行水路の形状は1ケースのみで行っているため、流れの変化を規定する水理量として水深を用いている。そのため増水期と減水期の比較には前述した

ように、その違いが大きく現れている水深6.5cm($Dr=0.31$)の時について比較検討を行う。

図-11(a), (b)に増水期と減水期の水位コンター図を示す。増水期と減水期の水位分布は全体的には同様の分布を示しているものの、局所的には以下のように、異なる。蛇行変曲部の低水路右岸壁面付近の分布(領域A)では、増水期の方が減水期に比べて水面勾配が大きくなっているのがわかる。また半波長区間の上流断面の低水路左岸壁面付近(領域B)でも同様に水面勾配が大きくなっている。このため増水期は減水期に比べ、低水路から高水敷への水の流出傾向が強いと考えられる。

図-12(a), (b)に増水期と減水期の低水路内における平面流速ベクトル分布について示す。流速は水深方向に平均した水深平均流速である。流速は増水期、減水期共に蛇行部の内岸から内岸に沿う最短経路上で速くなっているのがわかる。これは、高水敷幅が流下方向に変化する複断面蛇行水路では、低水路を横断する遅い運動量を持った高水敷流れによる輸送効果のため、最大流速が内岸側に発生するためである²⁾。また流向は増水期と減水期で大きな違いは見られないが、流速の大きさは、図-5に示したように、水面勾配が時間的にほとんど変化していないにも関わらず、増水期の方が減水期に比べて大きくなっている。

図-13(a), (b)に断面3と断面5における低水路内の左岸(外岸)、中央、右岸(内岸)での水深平均流速とその地点での水深の関係を示す。左岸、右岸とは図-4に示すように低水路壁面から5cm離れた地点である。また断面3は蛇行変曲部であり、断面5は蛇行頂部を示している。各地点とも基底流量からの水深の上昇に伴い、増水期と減水期における流速差が大きくなり、さらに水深が大きくなると

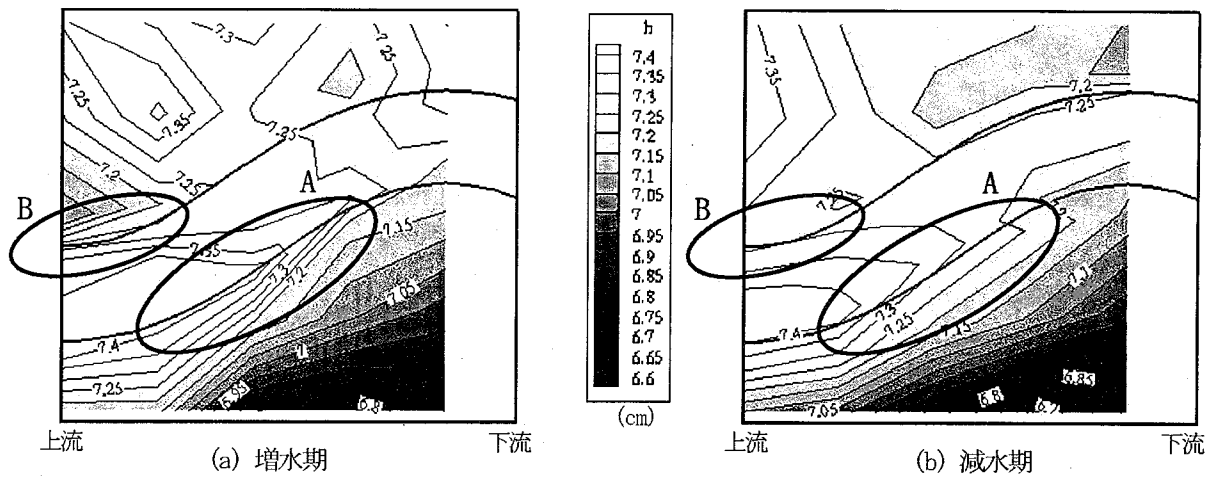


図-1 1 水位コンター図(相対水深 $Dr=0.31$)

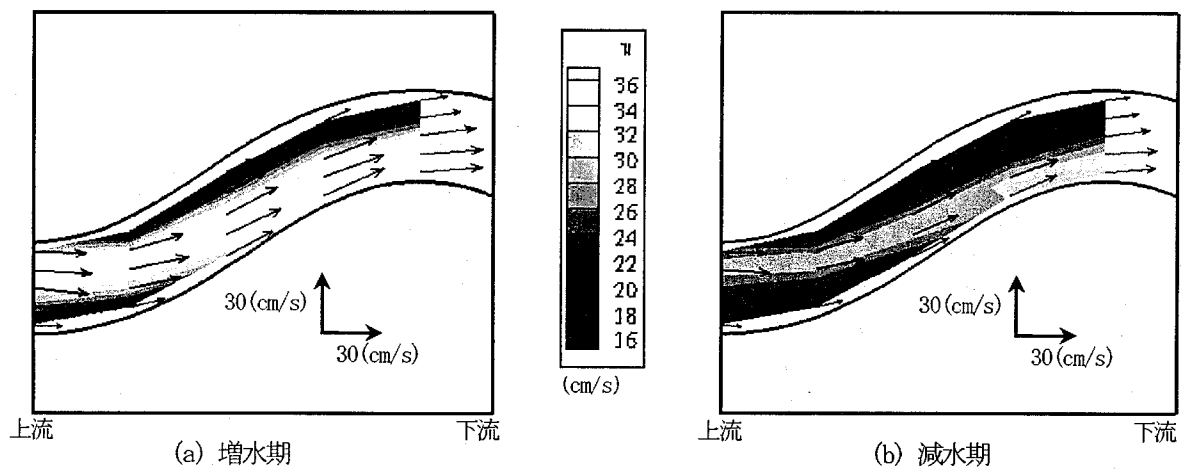


図-1 2 低水路内の平面流速ベクトル分布(相対水深 $Dr=0.31$)

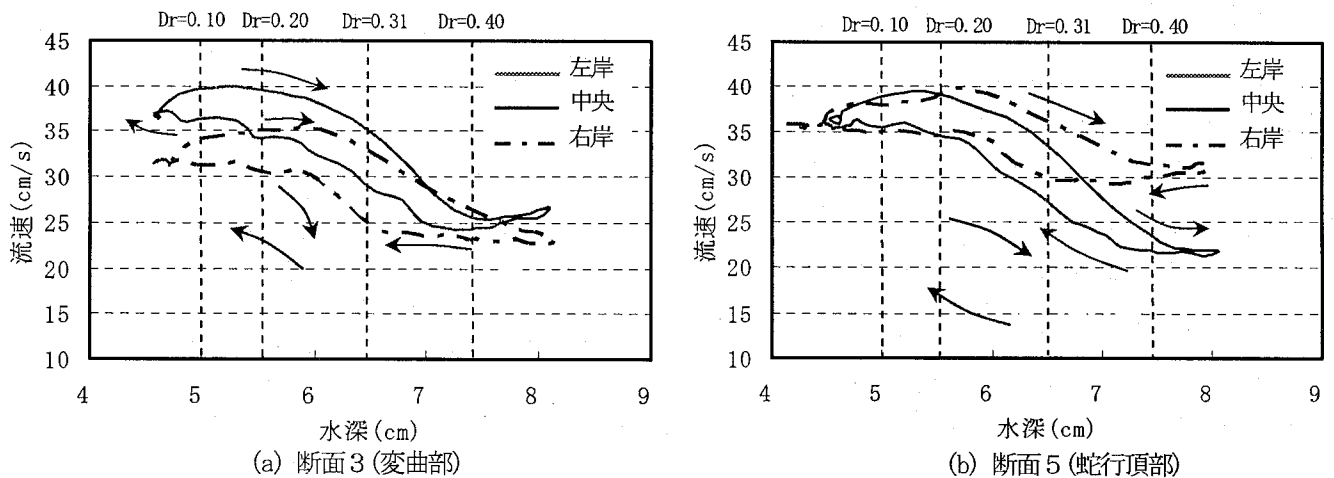


図-1 3 水深平均流速と水深の関係

この差は小さくなる。しかし、断面3の左岸では、水深6cm($Dr=0.25$)の前で流速が急激に減少し、ループがつぶれている。そしてそれ以降は水深の上昇と共に流速は上昇し、ピーク水深付近で再び流速のピークを向かえている。これは断面3の左岸が、高水敷流れの輸送効果の影響が大きい地点であるため、比較的水深が低い段階で、高水敷流れと低水路流れの流体混合により、流速が減少し、高水敷流れ

の影響を受けて、複断面の流れへと移行するためであると考えられる。断面5の左岸も断面3の左岸と同様のループ特性を示しているが、ループがつぶれる時の水深が6.5cm($Dr=0.31$)付近で、断面3の左岸よりも少し高くなっている。一方中央、右岸では基底流量時の水深とピーク水深付近を除いて、両断面とも大きなループを描き、同水深における増水期と減水期の流速差が長期に亘って維持さ

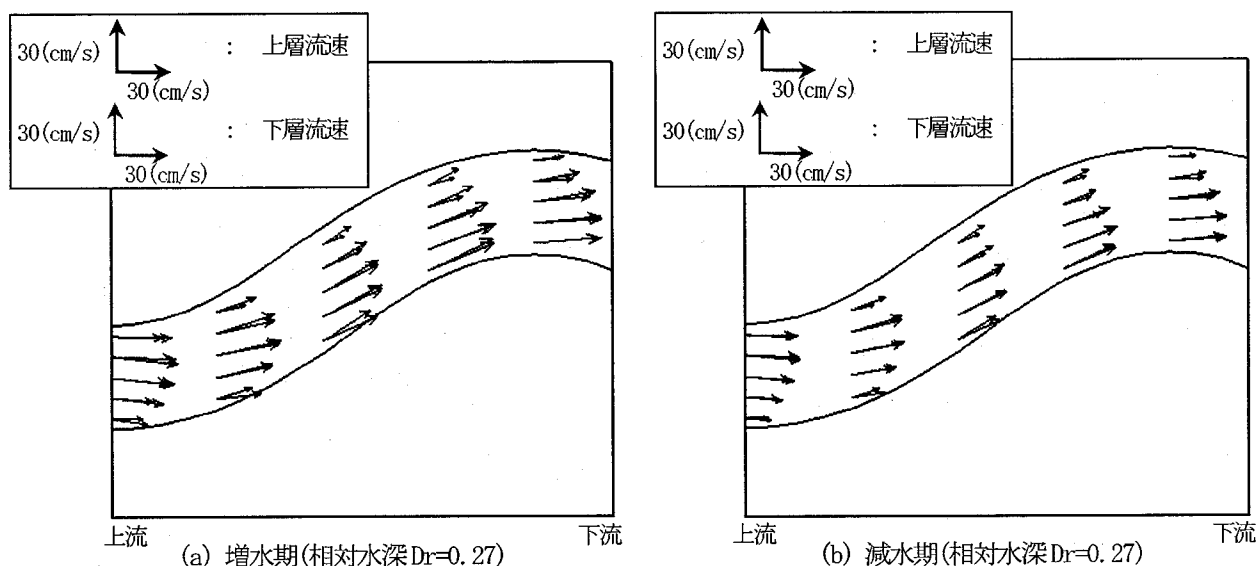


図-1 4 高水敷高さを境界とした上層流速と下層流速の平面ベクトル分布

れている。また中央では水深変化に伴う流速の変動が大きくなっている。このことから、高水敷流れの影響は水深の上昇に伴い、徐々に断面3の左岸付近から広がり、流れ場の変化をもたらすが、対岸側では、その影響は弱く、複断面の流れ場へ遷移する水深が大きくなると考えられる。

以上のことから、増水期と減水期の流速差は、低水路内を全体的に見た場合、水深 6.5cm ($Dr=0.31$) 付近で最も大きくなるが、低水路内の地点ごとでは異なる。これは水路の平面形状・横断面形状に起因して、高水敷流れの影響が低水路内の位置によって異なるためである。

5. 非定常複断面蛇行流れにおける運動量輸送特性

複断面蛇行流れは低水路内流れと高水敷上流れの運動量輸送により、低水路内の高水敷高さ面において大きなせん断力が発生する。この断面で流速が大きく変化することから、複断面蛇行流れは、高水敷高さを境界面として上層と下層に分割して考えることが可能である^{2) 3)}。

図-1 4 (a), (b) に相対水深 $Dr=0.31$ の時の増水期と減水期の上層・下層の層平均流速を重ね合わせ、平面分布として示す。いずれも上層流速は比較的堤防方向、下層流速は低水路形状に沿う方向の流れとなる。この結果、低水路壁面付近では流れでは、上層と下層の間で流速の大きさや方向が大きく異なり、高水敷高さ面に大きなせん断力が作用する²⁾。

図-1 4 (a) と (b) を比較すると、低水路壁面付近の上層と下層の流速差は、増水期の方が大きくなっている。

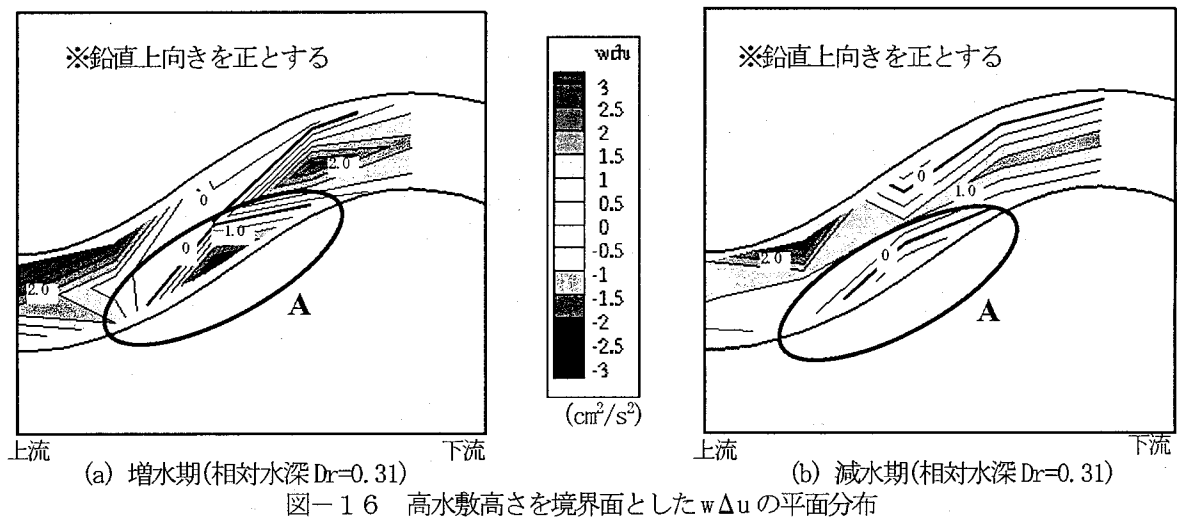
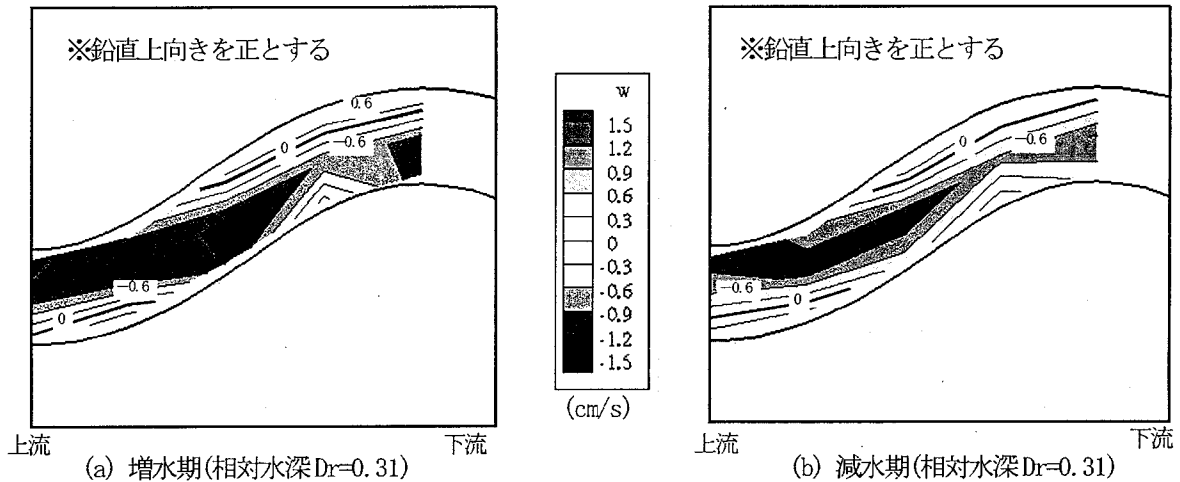
ここで、低水路内における高水敷高さを境界面とした上層・下層間の運動量輸送を検討する。図-1 5 (a), (b) に高水敷高さでの w の増水期と減水期(相対水深 $Dr=0.31$) における平面分布を、図-1 6 (a), (b) に高水敷高さでの運動量輸送 $w\Delta u$ の増水期と減水期における平面分布を示す。なお鉛直流速は上向きを正方向としており、 Δu は(上

層平均主流速)-(下層平均主流速)で求めている。

図-1 5 (a), (b) より鉛直流速 w は低水路壁面付近の一部の点で正になっている以外は、低水路内の大部分で負となっている。これは、福岡・渡邊ら³⁾の計算結果と比較すると、非定常であることと、相対水深の条件で違いはあるものの、その傾向は類似している。図-1 5 より、全体的に下降流の領域が多くなっているが、強い上昇流が低水路壁面の極近傍で生じていると考えられる。また増水期と減水期を比較した場合、全体的に、増水期の方が減水期に比べ、やや大きくなっており、低水路内流速の大きさに反映された形となっている。

図-1 6 (a), (b) より運動量輸送は断面3の低水路壁面付近を除いて、多くの部分で正の値を示している。ここで図-1 5 と併用して検討すると、 w が多くの部分で負を示していることから、鉛直方向の運動量輸送により、下層の速い流体を減速させることを意味している。一方で、領域 A では、 $w\Delta u$ が負、 w が負を示していることから、鉛直方向の運動量輸送により、下層の遅い流体を加速させることを意味し、ここでは高水敷流れの影響が弱いと考えられるため、下層より上層の流速が速くなっている。また全体的に増水期の方が減水期に比べて、 $w\Delta u$ の絶対値が大きく、その分布も密になっていることから、相対水深 $Dr=0.31$ においては、鉛直方向の運動量輸送量は、増水期の方が減水期より相対的に大きく活発になっていることがわかる。

図-1 7 (a), (b) に断面3と断面5における低水路左岸、中央、低水路右岸での高水敷高さにおける w とその地点での水深の関係について示す。また図-1 8 (a), (b) に同様の地点での $w\Delta u$ と水深の関係について示す。図-1 7 (a), (b) から水深変化に伴う w の変化が断面5と比較して、断面3の方が大きくなっており、特に断面3の右岸では水深の上昇に伴い、鉛直流速が下向きから上向きに変化している。図-1 8 (a), (b) から、断面3では、 $w\Delta u$ は低水路壁面(左岸、右岸)、特に右岸では水深変化に伴う変動量が

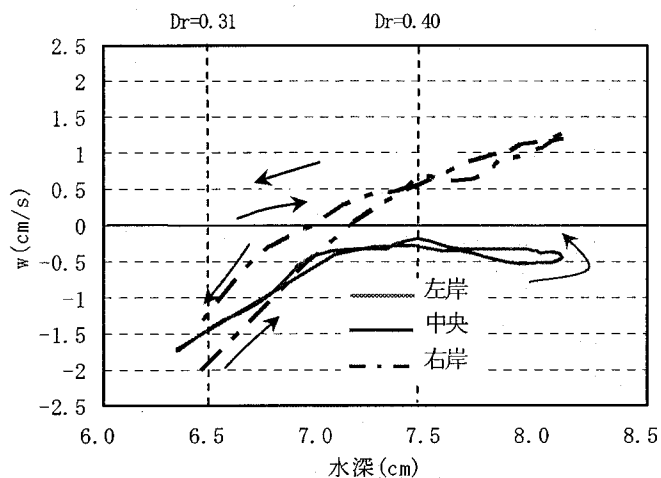


きく、ピーク水深付近で $w\Delta u$ の大きさは大きくなっている。図-17 (a) から、この変動量は Δu の影響よりむしろ、 w の変動量に起因していることがわかる。一般的に相対水深が大きければ大きい程、複断面蛇行流れは堤防に沿う直進性の強い流れとなる³⁾ことから、このピーク水深付近での上層・下層間の活発な運動量輸送が、図-14に見られるような上層と下層の流向の差異を小さくし、直進性の強い流れに変えると考えられる。一方で、断面5では、水深変化に伴う変動やその大きさ自体も小さい。これは断面5では上層と下層で流向の違いが小さいためである。

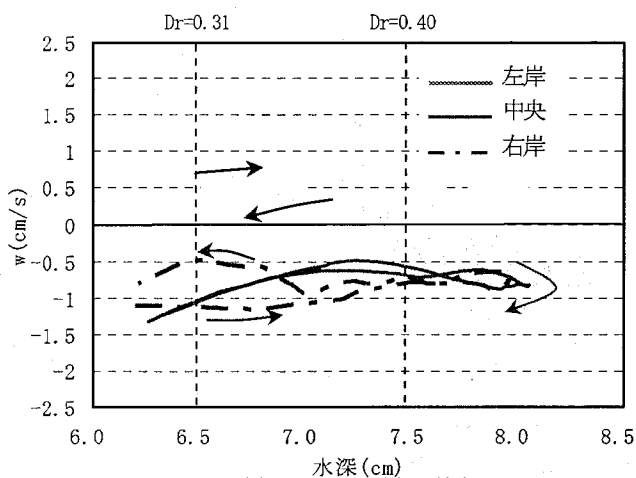
$w\Delta u$ の同水深における増水期と減水期の違いに関しては、流速の場合と同様に各地点によって異なっており、断面3の中央、右岸では、小さいながらもループが見られる。しかし、時間変化に比べて、増水期と減水期の違いは小さいことから $w\Delta u$ が増水期と減水期の流れの構造の違いに及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-19に断面5(蛇行頂部)の高水敷高さ付近における低水路壁面部の横断流速 v と水深の関係について示す。また、図-20に断面5の高水敷高さ付近における低水路壁面を境界とした高水敷と低水路間の運動量輸送を $v\Delta u$ の形で表した値と水深の関係について示す。なお横断流速

は左岸(外岸)方向を正とし、低水路壁面境界の横断流速 v は境界近傍の上層横断流速の平均から算出しており、 Δu は低水路壁面に隣接する点の高水敷流れと低水路流れの上層平均主流速の差で求めている。図-19から、横断流速は左岸の方が右岸に比べて小さく、より直進性の強い流れとなっている。またどちらも正方向、即ち右岸では低水路方向、左岸では高水敷方向となっている。また増水期と減水期の同水深に対する横断流速差に関しては、両地点とも大きな違いは見られず、ループは小さい。ただし、流速の計測の都合上、ピーク水深付近でしか示せなかったため、相対水深が小さい時の増水期と減水期の $v\Delta u$ に関しては、今後数値計算等を用いて検討する必要がある。図-20から $v\Delta u$ は右岸と左岸で大きく異なっている。具体的に、 $v\Delta u$ によって右岸では、速い低水路上層流速を減速させ、左岸では速い高水敷流速を加速させている。 $v\Delta u$ は図-19から、 v に比べ、 Δu の影響の方が強いことがわかる。これは、高水敷流れの輸送効果の影響と相対水深の上昇に伴う高水敷流れの発達の影響が考えられる。即ち左岸では、先に述べたように高水敷流れの輸送の影響が強く、水深が低い段階で複断面の影響を強く受けるため、増水期と減水期の違いは小さくなる。また水深の上昇に伴い、高水敷流れが

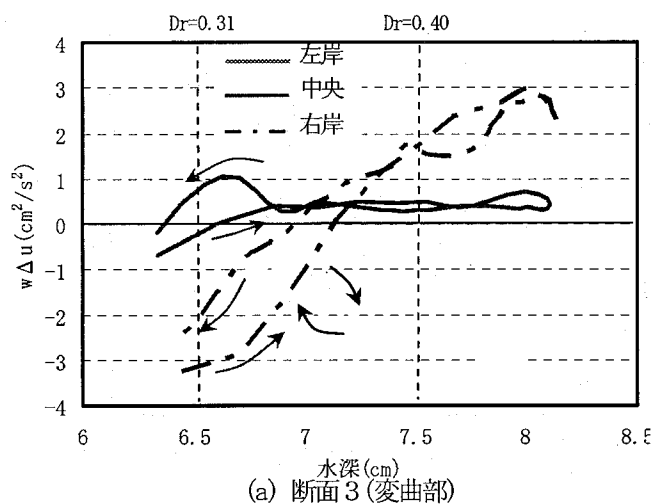


(a) 断面3 (変曲部)

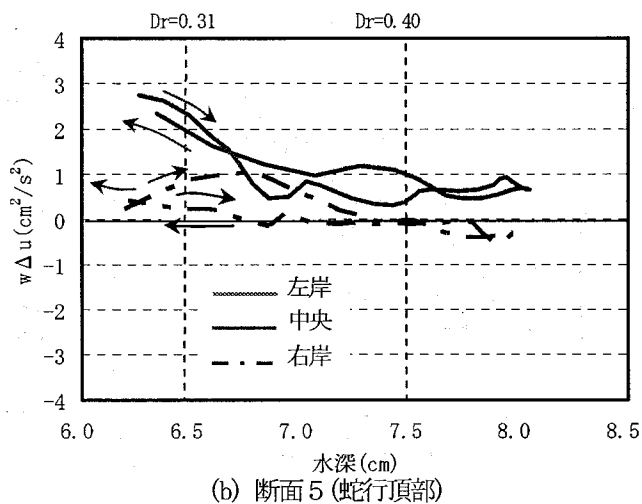


(b) 断面5 (蛇行頂部)

図-17 高水敷高さを境界面とした w と水深の関係



(a) 断面3 (変曲部)



(b) 断面5 (蛇行頂部)

図-18 高水敷高さを境界面とした $w\Delta u$ と水深の関係

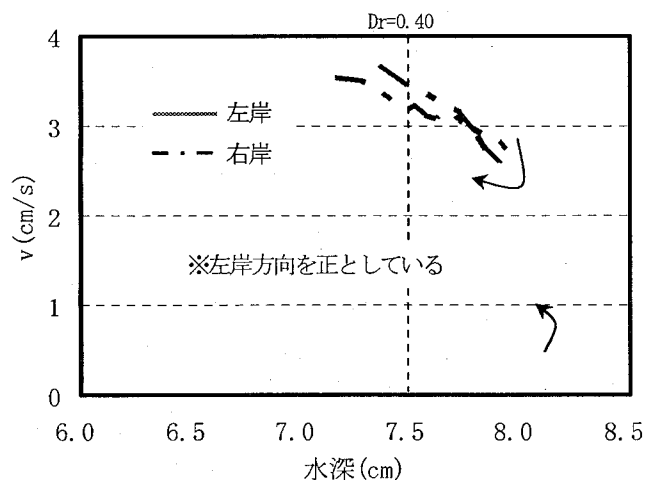


図-19 高水敷高さにおける v と水深の関係

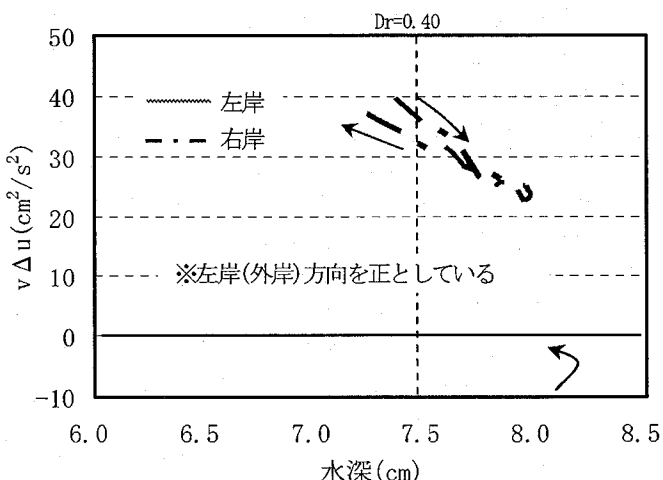


図-20 高水敷高さにおける $v\Delta u$ と水深の関係

発達するため、 Δu は小さくなり、横断方向の流体混合は小さくなる。一方で、右岸では最大流速線上にあたるため、 Δu が大きく、横断方向に大きな運動量輸送が生じる。またピーク水深付近まで断面形状変化の影響が続くため、同

水深での増水期と減水期の $v\Delta u$ に差が生じると考えられる。

$v\Delta u$ の絶対値は、図-17 (b) の $w\Delta u$ の絶対値に比べて、非常に大きく、水平方向の運動量輸送が鉛直方向の運動量

輸送に比べて、複断面蛇行流れにおける非定常流れの構造に与える影響は大きいと考えられる。

6. 結論

複断面蛇行河道を流下する非定常流において、非定常実験を行い、水位・流速の測定結果を基にその流下形態、増水期と減水期の流れ構造、運動量輸送に着目し検討を行った。以下に得られた知見を示す。

1) 増水期と減水期の同水深に対する流量の違いは、単断面的な流れから複断面的な流れに遷移すると言われている相対水深0.3付近で最も大きくなる。

2) 増水期と減水期の違いは低水路内の水深平均流速と低水路壁面付近の水面形に表れており、増水期は、低水路内の流速が大きくなっている。

3) 単断面の流れから複断面の流れへ遷移過程は、水路を全体的に見た場合、相対水深0.3付近であるが、局所的に水深と流速の関係を見ると、高水敷流れの輸送効果の影響により、低水路内の位置によって、そのループ特性は大きく異なる。

4) 低水路内における高水敷高さを境界面とした上層・下層間の運動量輸送量は相対水深0.31付近で、増水期の方が減水期に比べ、相対的に大きく活発である。しかし、この違いは時間変化に比べて小さく、また運動量輸送量自体のオーダーが高水敷・低水路間に比べて、上層・下層間の方が小さい。このことから、鉛直方向の運動量輸送量が非定常複断面蛇行流れにおける増水期と減水期の流れ構造の違いに及ぼす影響は小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 滝口将志: 蛇行低水路を有する複断面水路における流れの特性と河床変動機構, 京都大学防災研究所年報第32号B-2, pp. 527-551, 1989
- 2) 武藤裕則, 塩野耕二, 今本博健, 石垣泰輔: 複断面蛇行開水路流れの3次元構造について, 水工学論文集第40巻, pp. 711-716, 1996.
- 3) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行水路における洪水流の水利, 土木学会論文集, No. 579/II-41, 83-92, 1997.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, No. 586/II-42, 39-50, 1998.
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 関浩太郎, 栗栖大輔, 時岡利和: 河道における洪水流の貯留機能とその評価, 土木学会論文集, No. 740/II-64, pp. 31-44, 2003.
- 6) 渡邊明英, 福岡捷二, A. G. Mutasingwa', 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常2次元解析, 水工学論文集, 第46巻, pp. 427-433, 2002.

(2006年4月13日 受付)