

河川湾曲部の第一種二次流と主流流速分布に及ぼす水理パラメータの効果

Study on Primary and Secondary Flow Profiles at River Bends under Different Hydraulic Conditions

北海道大学工学部 環境社会工学学科国土政策学コース ○学生員 米森一貴 (Kazuki Yonemori)
 北海道大学 工学研究院環境フィールド工学部門 准教授 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
 北海道大学 公共政策大学院 教授 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)
 北海道大学 工学院環境フィールド工学専攻 学生員 島田龍市 (Ryuichi Shimada)

1. はじめに

河川湾曲部は、側岸浸食や、それに伴う河川の蛇行などが生じるため、河川防災や河川環境を考える上で重要なポイントとなる。特に、洪水の発生時において主要な被災箇所となる場合が多い。このように、河川湾曲部の流れ構造に関する研究は河川管理上重要であるため、従来から多くの研究がなされてきた。一般的に開水路湾曲流は、遠心力と圧力の不均衡に起因する第一種二次流の発生に特徴づけられる。しかし、湾曲部の流れは複雑で、地形や水理パラメータに大きく依存するため、未解明な点が多く残されている。

石狩川江別の蛇行部は過去に何度も洪水で被災している。過去の洪水では、流量規模の相違により護岸の被災箇所が異なっている。昭和50年と昭和56年の洪水を例にとってみると、湾曲部あたりの K.P.28.5、K.P.29、K.P.29.5 の断面の水面流速の分布図(図-1)を見てみると昭和56年の方は大きい流速が内岸に寄っているのが見受けられる。すなわち、流量が大きい場合には内岸側護岸が被災し、流量規模が中程度の場合は外岸側が被災していると考えられる。従来から、湾曲部の二次流は最大流速点を外岸側に寄せる効果があるが、流量がある程度以上大きくなるにつれて、流れが直線化し、最大流速点が内岸側に寄るといふ、相反する2つの効果が指摘されている。

近年、島田²⁾らの研究で RANS 型乱流モデルを組み込んだ三次元数値解析は湾曲部の二次流の再現性においての信頼性が十分高いことが示されている。そこで本研究では単純断面開水路蛇行流れを対象に流れ構造を三次元数値解析により検討する。異なる流量、蛇行角で解析を実施し、二次流構造や主流流速分布と流量の関係性の検討を行う。

2 解析の条件

対象とする単純断面水路は図-2 に示した幅 1000m、蛇行長 8000m の Sine-generated curve の水路である。水路の河床は固定床、河床勾配は 0.000141、マンニングの粗度係数は 0.02 とする。本研究では流量 5000 m³/s、最大偏角 35°、周期境界条件のものを基準とし、流量を変化させたもの (case A 群)、最大偏角を変化させたもの (case B 群)、非周期境界条件としたもの (case C 群) について数値解析を実施し、結果を比較する。本研究の計算条件については表-1 に示す。

計算格子数はいずれも主流方向(i方向)、横断方向(j方向)、鉛直方向(k方向)それぞれ 49×51×11 であり、総計算格子数は 27,489 である。横断方向は左岸を j=0、右岸を j=50、主流方向は上流を i=0、下流を i=48、鉛直方向は河床を k=0、水面を k=10 とする。

本研究で用いた解析モデルは三次元モデルであり、乱流モデルとして標準型 k-ε モデル、移流項の空間差分スキーム

は三次精度 TVD-MUSCL スキームを用いた。

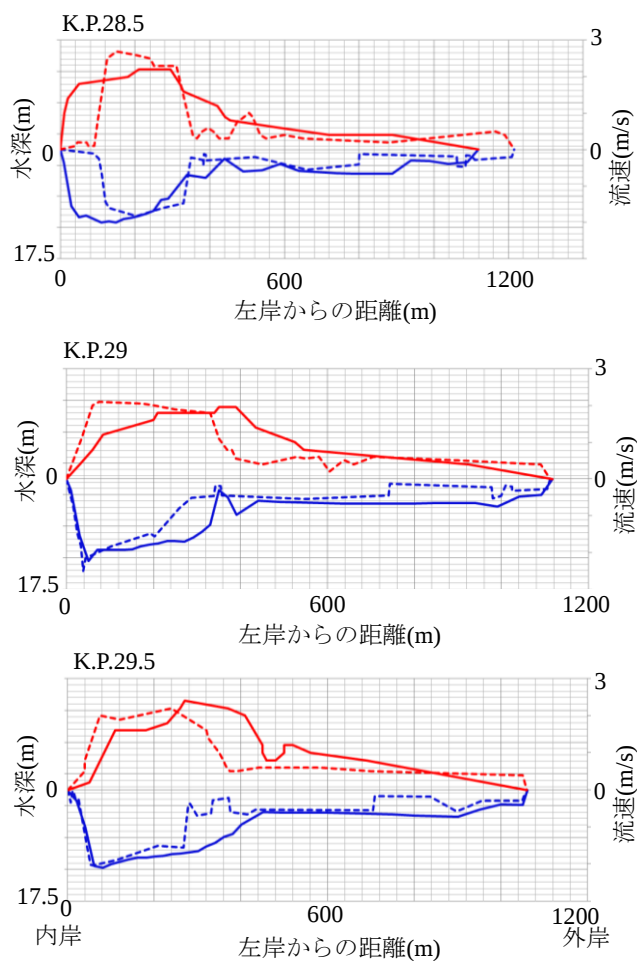


図-1 石狩川水面流速

表-1 計算条件

caseA 最大偏角 35° 周期境界条件

	caseA-1	caseA-2	caseA-3
流量(m ³ /s)	3000	5000	11000

caseB 流量 5000m³/s 周期境界条件

	caseB-1	caseB-2	caseB-3
最大偏角(°)	20	35	60

caseC 流量 5000m³/s 最大偏角 35°

	caseC-1	caseC-2
境界条件	周期境界条件	非周期境界条件

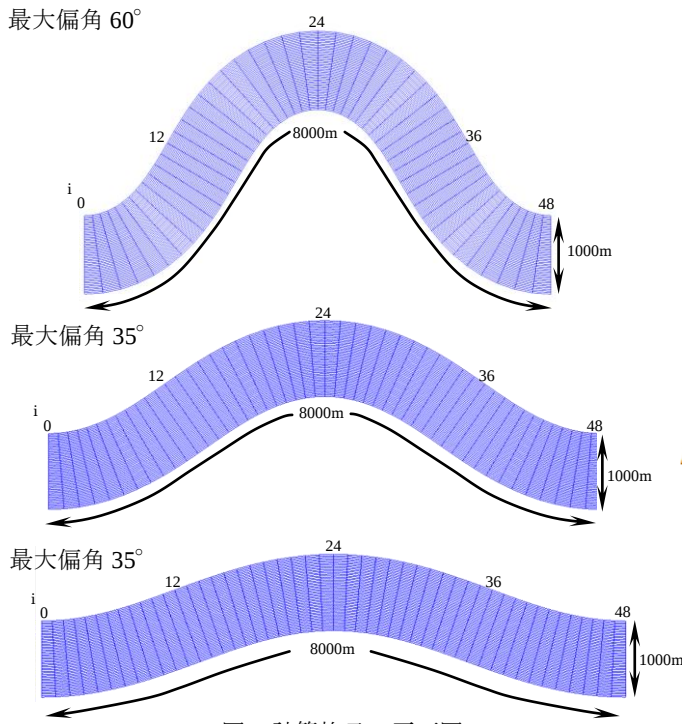


図-2 計算格子の平面図

3. 流量の変化が流れ構造に及ぼす影響(case A)

3.1 二次流の構造

$i=24$ の横断面におけるベクトルを図-3 に示す。図は上流から下流を見たものである。いずれの流量においても内岸で上昇流が、外岸で下降流が生じているのが共通している。また、流量が大きいほどその傾向は顕著となる。左岸から200m から800m 付近では水面から河床にかけて外岸方向から内岸方向へ流れが変化している。しかしその変化の特性は流量によって異なり、流量が小さいほど内岸方向への流れの割合が大きくなる傾向がある。

各断面の二次流の強度を表すために、各断面において横断方向流速と鉛直方向流速の二乗和の平方根を格子ごとに算出し、その最大値を断面の二次流強度(P)とし図-4 に示す。流量が大きいほどピーク位置が上流へシフトしている。各流量において主流平均流速をバルク平均流速(U)として算出し、 $i=24$ 断面の二次流強度与えた点の横断方向流速(v_m)をバルク平均流速で除して無次元化したもの(v_m/U)を表-2 に示す。表から流量が大きいほど外岸方向への流れの相対的割合が大きくなることわかる。

3.2 主流流速の構造

$i=24$ の断面における流速コンターを図-5 に、水面流速コンターを図-6 に示す。断面図は上流から下流を見たものである。流量が大きいほど水面における内岸と外岸での流速の差が大きく、流れが内岸に集中する傾向が強くなることわかる。表から流量が大きい場合は外岸に向かう流れが大きく出ている傾向があったが、大きい流速が外岸に寄る傾向は見られない。このことから、小さい流量の場合ほど二次流の影響を相対的に受けやすいものと考えられる。水面流速コンターから流量が大きいほど大きい流速分布が上流に生じている。これは図-4 の周期のずれと対応しており、二次流発達の水路曲率変化に対する遅れが、流量が小さいほど大きくものと考えられる。

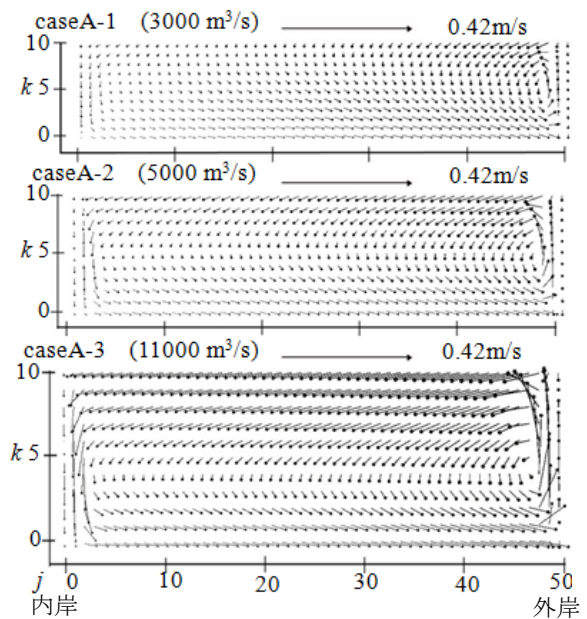


図-3 $i=24$ 断面流速ベクトル

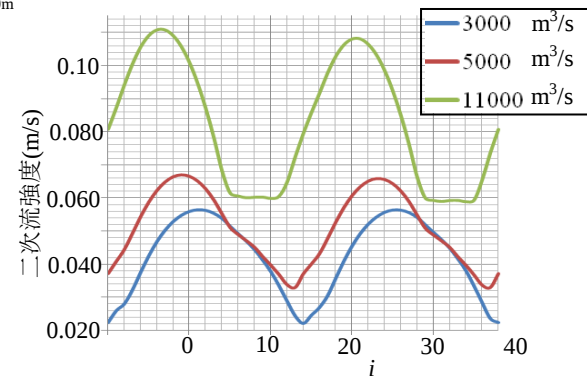


図-4 二次流強度

表-2 $i=24$ 横断方向流速の無次元量

	caseA-1	caseA-2	caseA-3
v_m/U	0.01937	0.02665	0.04180

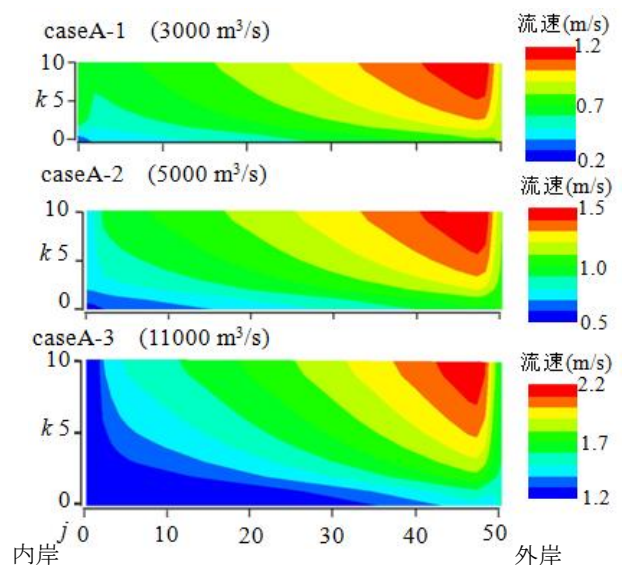


図-5 $i=24$ 断面流速

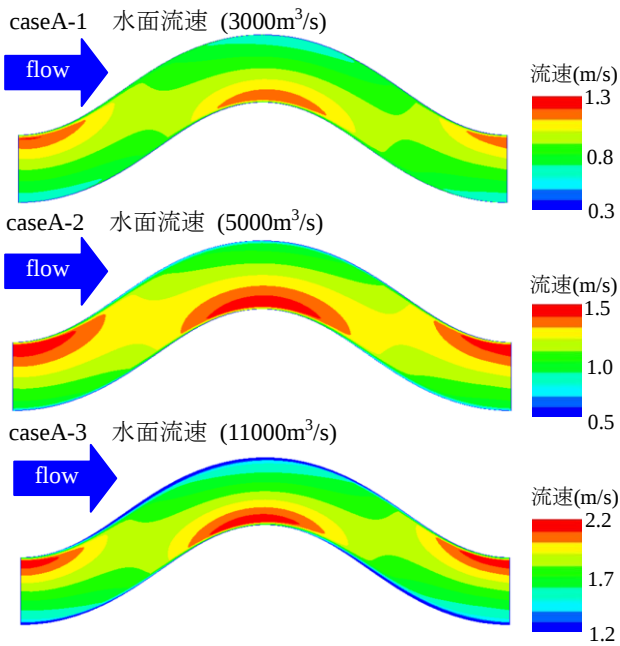


図-6 水面流速

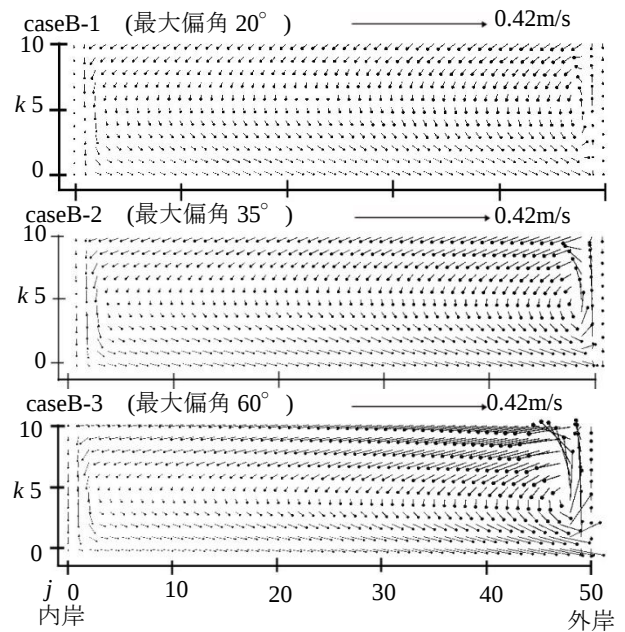


図-8 $i=24$ 断面流速ベクトル

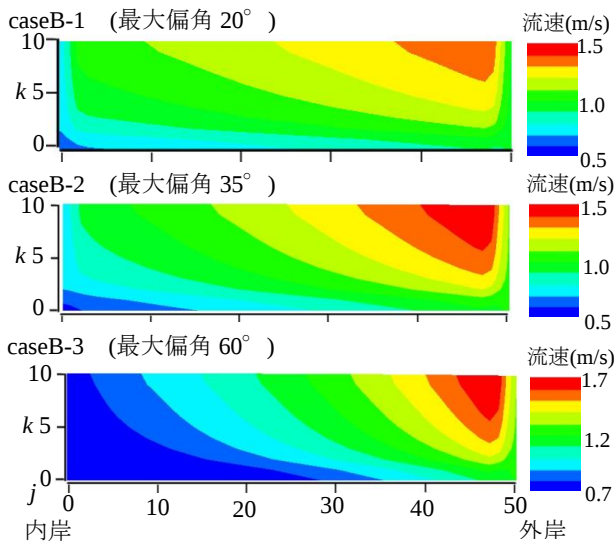


図-7 $i=24$ 断面流速

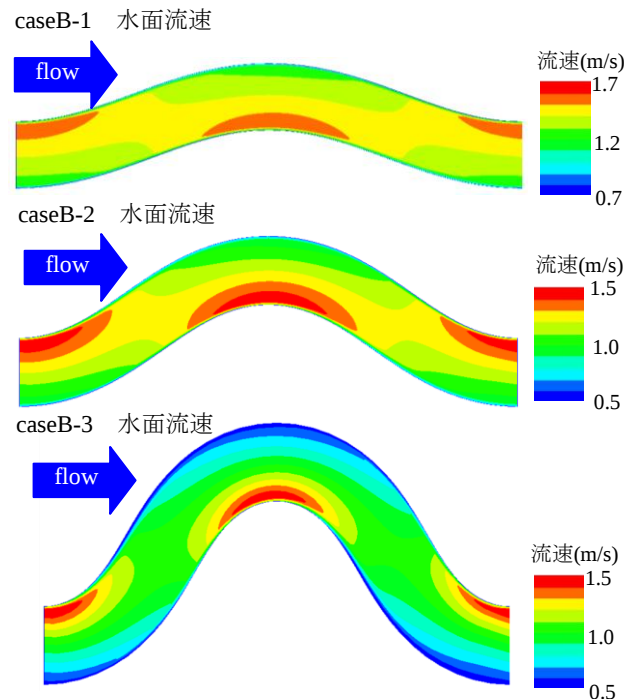


図-9 水面流速

4. 蛇行角が流れ構造に及ぼす影響 (case B)

$i=24$ の断面流速を図-7、断面流速ベクトルを図-8に示し、水面流速を図-9に示す。二次流強度と横断方向流速を case A と同様に計算したものを図-10、表-3に示す。断面のベクトルを見ると最大偏角が大きいほど水面付近で内岸から外岸方向への流れと、内岸の上昇流が大きくなっている。また、流量が同じであっても最大偏角が大きくなるほど内岸の最大流速は大きくなる傾向がある。また、最大偏角が大きいほど大きい流速は内岸に寄っているのが見受けられるが、表-3より外岸方向の流れも大きくなっていることから、流速が大きいほど二次流の影響は相対的に小さくなり、最大流速点は外岸へ移動しにくいものと考えられる。また、最大偏角が小さいほど内岸と外岸の水面流速の差も小さくなる傾向がある。これは水路形状が直線に近づくにつれ流速分布も一様化することと対応している。また、case B-3では、水面流速コンターから湾曲部内岸の大きい流速の分布が case B-1,2 に比べて若干上流に生じている。これは図-10の周期のずれと対応している。

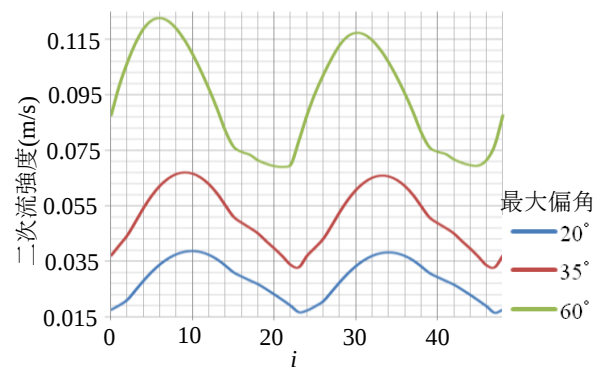
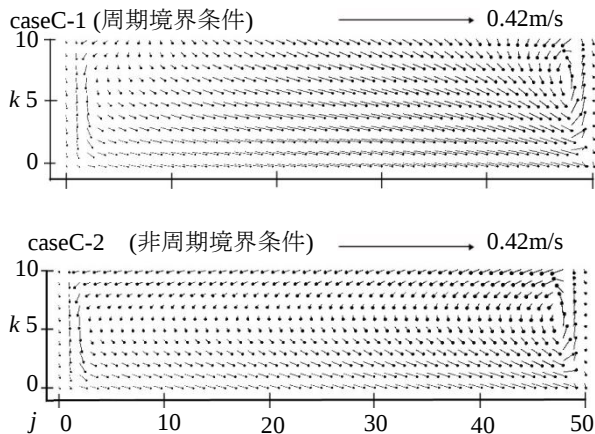


図-10 二次流強度

表-3 $i=24$ 横断方向流速の無次元量

	caseB-1	caseB-2	caseB-3
v_m/U	0.01517	0.02665	0.07711


 図-11 $i=20$ 断面流速ベクトル

5. 単蛇行と連続蛇行の比較 (case C)

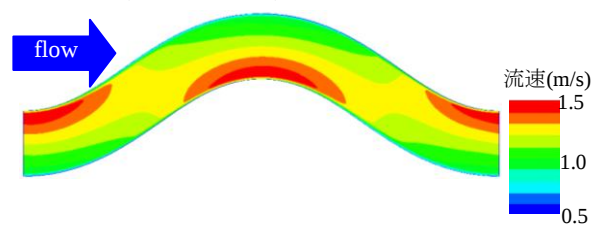
case C-1,2 の $i=20$ の断面ベクトルを図-11 に、水面流速コンターを図-12 にそれぞれ示す。図-11 を見ると水面付近は case C-2 の場合は外岸方向の流れで、case C-1 の場合は内岸方向の流れになっている。二次流に着目すると case C-2 の方は断面全体にまたがって大きな渦状の流がみられるのに対し、case C-1 は小さく内岸で渦を生じており、二次流構造に大きな相違がみられる。さらに、水面の流速コンターをみると、湾曲部において case C-2 の方は大きい流速が上流側に寄っており、case C-1 についてはほぼ左右対称になっている。この大きい流速が上流に寄る現象は case B-3 の場合にも現れた。この結果から、湾曲部に進入する流速分布が一様に近い場合、最大流速点が湾曲部頂点の上流側にシフトすることが推測される。また、case B-3 でこのようなシフトが発生した原因は、湾曲部直前の水面流速が一様に分布する領域が他の case と比べて長くなっているためと考えられる。

6. 結論

本研究では単純矩形断面の開水路湾曲の二次流と主流流速分布に及ぼす種々の水理パラメータの効果について三次元数値解析により比較検討したものである。本研究で得られた主な成果を次にまとめる。

(1)湾曲部において、内岸では上昇する流れが生じ、外岸では下降する流れが生じていた。その大きさは流量、蛇行角

caseC-1 (周期境界条件)



caseC-2 (非周期境界条件)

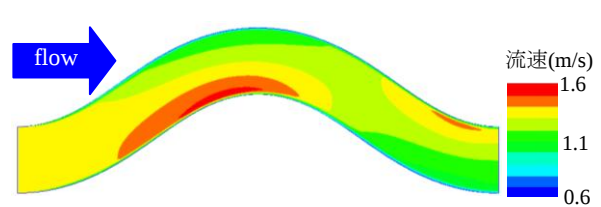


図-12 水面流速

がともに大きいほど大きくなる傾向がある。

(2)水面付近では内岸における流速は外岸と比較して大きく、流量が大きくなるほどその流速差は大きくなる。

(3)同じ流量の下では蛇行角が大きいほど内岸付近の流速は大きくなり外岸付近の流速は小さくなる。

(4)単蛇行の場合は連続蛇行に比べて湾曲部の最大流速発生断面が上流側にシフトする。連続蛇行の場合でも蛇行角が大きい場合と同様な傾向がみられる。

以上種々の条件の下での単純断面開水路湾曲部流れの流れ構造を検討し、その特性を考察した。今後は複断面河道など、他の条件の影響についても検討を進めたい。

謝辞

本研究を進めるにあたって、北海道大学の川村里実準教授および国土交通省 北海道開発局の工藤拓也氏、池田共実氏には実測値データの提供を受けるとともに数々のご助言をいただいた。ここに記して、深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 岡田将治、福岡捷二、貞宗早織：複断面蛇行河道の平面形状特性と蛇行度、相対水深を用いた洪水流の領域区分、水工学論文集、第46巻、pp.761-766、2002
- 島田龍市、木村一郎、清水康行：移動床湾曲水路における3次元流れ構造と河床変動に関する研究、応用力学論文集、vol.14、I_703、2011