

II-25 複列砂州上の水理

北海道大学工学部	正員	長谷川	和義
同 上	正員	藤田	睦博
同 上	学正員	花田	紀明

1. はじめに

本邦河川には交互砂州が広く分布し、その諸特性は河道の計画、維持管理の面からみても、本質的に重要な課題となっている。このうち単列砂州に関しては、実験を中心に定量的な評価に迫るまでに発展しており、ごく最近には理論的にも発生・発達課程を解明しようようになっていく。しかし複列・網状砂州については現象の複雑さから未解明な部分が多く残っているのが現状であり、特にその流れの水理は殆ど手つかずの状況にある。複列砂州研究の困難性はそれが極めて不安定であって、実験水路においてすらその典型形状を得るのが難しいことにある。同一の水理条件下でも異なるモードの砂州が生じ得るほか、通水課程においても絶えず変形する。一方、複列河道の最も重要な性質は高水時に砂州全体が水没して単一の流れを形成し、低水時には河道が複雑に分岐合流して、異なる淵瀬を形成することであろう。

以上の状況を勘案して本研究では複列砂州を模擬した固定床上の通水実験を行い、その水理学的特性を明らかにすることにした。

2. 複列河川の流路形態

複列砂州の実態を知るために、ここでは札幌内川のK P 3からK P 25における平面変遷図を用いる。図-1のように砂州長($L/2$)、及び流路幅(B)を定義し、明治29年から昭和53年までに行われた5回にわたる測量図に対して総計157個の複列砂州につき測定を行った。図-2はその結果を示すものである。 L/B の値はばらつきがあるものの、ほぼ2.16の値をとり、 L の増加とともにわずかに増加する傾向を示している。 L/B の平均値2.16は、池田¹⁾による単列交互砂州に関する4~17より小さく、木下²⁾により観察された大井川のうろこ状砂州に対する0.5~1.0より大きく、砂田³⁾により釜無川の複列砂州で見られた2.2にほぼ等しい。したがって、複列河道における広狭の繰り返しは、中州を含む最大幅のほぼ2倍ごとに起こっていると考えてよいだろう。

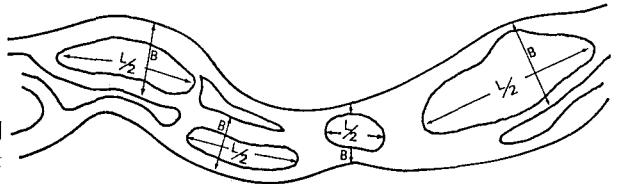


図1 砂州波長の対河幅比を計算する上での札幌内川における記号の定義

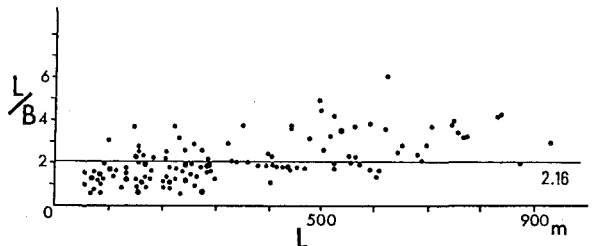


図2 札幌内川における砂州波長 — 河幅比

3. 実験の概要

3-1) 実験装置と方法

上述の札内川のL/Bの値を参考にして、複列砂州河道を模擬した実験水路幅80 cm 長さ15 mの既製鋼製水路を用いて行うことにする。後の解析を考えて河床形状として次式を採用した。

$$\eta = -1.5_{(cm)} \cdot \cos \frac{2\pi}{200_{(cm)}} x \cdot \cos \frac{2\pi}{80_{(cm)}} y \dots\dots (1)$$

ただし、x、yはそれぞれ流路中央に流下方向を正にとった距離軸、及びこれに直交し、左岸向きを正にとった横断軸である。河床波高の3 cmは後述の複列砂州の形成水深を参考に定めている。この形状を3波長(6m)連続させ、上、下流部は(1)式の平均高さに一致するような平坦床にてなめらかに接続させた。これらの河床を珪砂で作成し、表面をセメントで固めて固定床とした。なお測定区間は2波長目であり、図一3にそのコンターを示す。この上に所定の流量を通水し、水面形状と流速を測定した。水位は、ポイントゲージで横断方向に5 cmごと縦断方向に10 cmごとに測定した。流速は回転台座上に設置した3 mm径のプロペラ流速計を用いて、横断方向に5 cm、縦断方向に20 cm、また鉛直方向には 5 mmごとに測定した。ただし水面近傍の流速は水面下1.5 mmとし、河床近傍の流速は河床上2.5 mmとしている。各測定においてはプロペラ流速計を回転させ、最大流速とその流向角度を測定した。

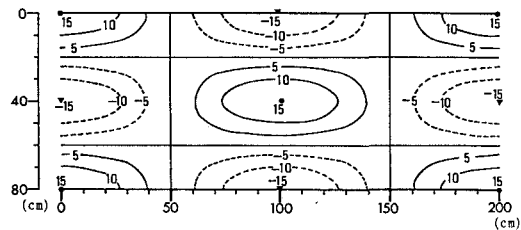


図3 河床コンター図

3-2)実験条件

実験は表1に示す3 ケースにつき行った。これらは図一4の黒木・岸⁴⁾による中規模河床形態の形成領域区分で見ると単列砂州と複列砂州の境界付近にあり、 τ_{*c} の小さな材料を用いた場合には、ぎりぎり複列砂州が発生しうる条件にある。

実験 No	RUN 1	RUN 2	RUN 3
流路幅 (cm)	80	80	80
流量Q (l/s)	1.86	1.47	4.51
勾配I	1/1500	1/300	1/300
平均水深H (cm)	1.87	1.09	2.02
平均流速U (cm/s ²)	12.43	16.86	27.91
摩擦係数f	0.0158	0.0251	0.0169
フルード数Fr	0.29	0.52	0.63

表一1 主な水理量

4 実験結果

4-1)流れの特徴

図5-(a),(b),(c)、図6-(a),(b),(c)、図7-(a),(b),(c)は各RUNのx

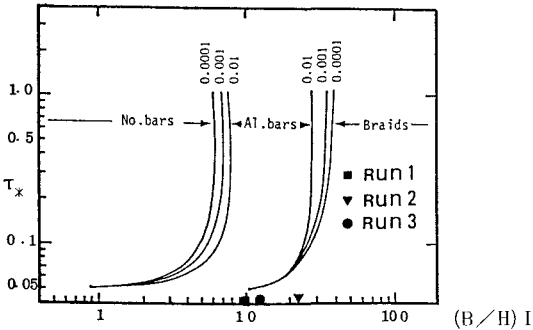
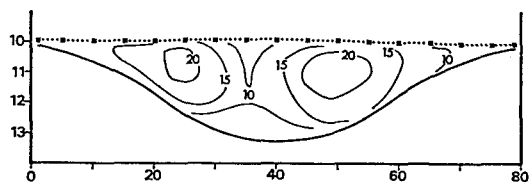


図4 中規模河床形態の形成領域

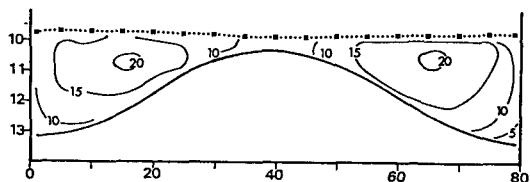
= 0, 100, 160cm地点での横断面における河床形、水面形、及び等流速線を描いたものである。Run 1, Run 2とも完全に常流であるため、各々の水面形は微小ではあるが河床の起伏とは逆位相の形をとる。つまり河床が凸部のところでは水面形は凹となり、河床が凹部のところでは凸となる。Run 3は平均水量による判定では常流であり、Run 1, 2とほぼ同じ傾向を示す。しかし河床凸部が弱い射流となっているため、射流から常流に遷移していく地点、すなわち $x = 50$ 近辺の両側面から $x = 120$ 近辺の水路中央にかけて弱いジャンプが起きている。

4-2) 流速ベクトルの特徴

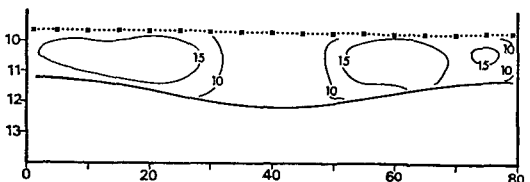
図5-A, 6-A, 7-A, はそれぞれRun 1, 2, 3の水面下1.5mmの流速ベクトルを見たものである。ただしRun 1は流速が小さいためRun 2, 3の3倍の縮尺で表示している。各Runともに中央砂州を避け凹部に流れ込む傾向をみせている。これらは水路中心線によって片側のみを考えれば、単列砂州上の流れに類似しており、実験の妥当性を示している。平均河床勾配の同一なRun 2, 3を比べると、砂州が水面上に浮き出るRUN 2の方が全ての河床が水面下にあるRun 3よりも流線の曲率が大きくなっている。この流れは片側のみを考えれば蛇行流であり、その特徴も備えている。その際、興味深いのは横断面内の2次流であるが事項に述べる。横断方向の流速ベクトル分布に特徴的なことは、No.0からNo.100にかけての分岐課程よりもNo.100以降の合流過程において2つ山の分布が際だっていることである。また、横断分布における極大流速の現れ方を見ると、Run 1, 3では最深点よりも15~30cm離れたところに来るが、Run 2ではほぼ最深点と極大流速点が一致している。



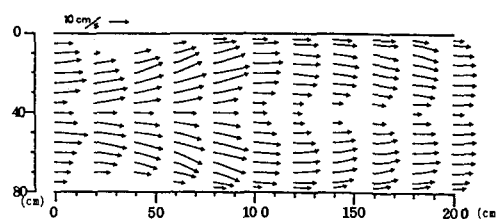
(a) No.0における等流速線図



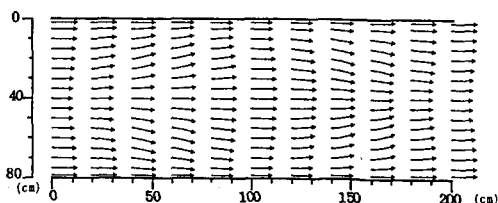
(b) No.100における等流速線図



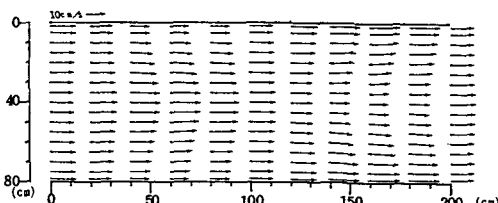
(c) No.160における等流速線図



- A 実測値



- B ポテンシャル解

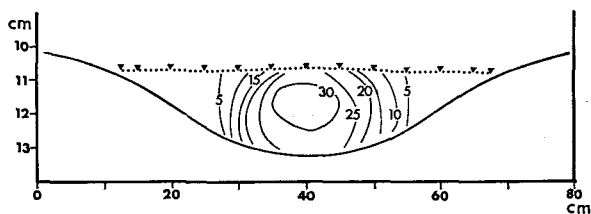


- C 浅水流解

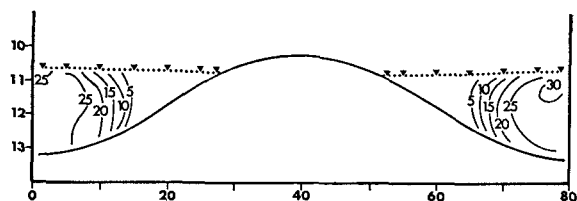
図 - 5 (Run1)

4-3)等流速線の特徴

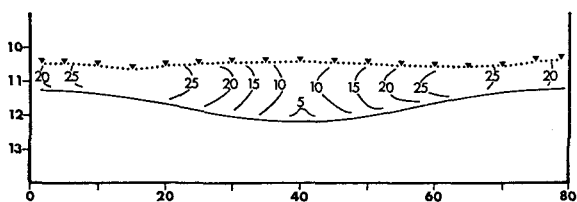
図5. 6. 7-(a).(b).(c)はそれぞれRun 1から3までのNo.0, No.100, No.160断面における等流速線図を示したものである。これらにおいて、興味深い次の事柄を指摘できる。第一はどの断面においても流速分布の最大点が水面下に現れている事である。第二は、Run 1、3のNo.0断面において2つの流速中心が残っており、横断面内渦の生成が预期されることである。第三は、Run 2のNo.100の主流部が著しく壁に寄っている一方、No.0すなわちNo.200の流速中心が一つになっていることである。以上の特徴は中心から半断面を蛇行流路と考え、その中心に2次的螺旋流が生じたものとみなせば全て解釈が可能となる。ところが、実測横断方向流速の水深分布には全ての実験の全ての断面においてこうした螺旋流が現れていない。すなわち、水深によって大きさが異なるものの向きは全て同一である。このような横断方向流れの特徴は単列交互砂州でも観測されている⁵⁾。流路中心線を境にして、互いに反対向きの横断流が任意のyを横切って生じ続けるためにはその横断幅におけるx方向流量フラックスが減じ続けなければならない。このことは中央砂州の高まりによって実現するが、水平渦の生成を伴うものと考えられる。平均流にのって向きが逆の2対の渦が発生し、カルマン渦を形成するものと思われる。前述の指摘事項の多くはこれらの解釈によって説明できる。また、分岐過程でU成分分布が2つ山になる傾向が弱く、分流過程で明瞭になる理由が明らかになる。



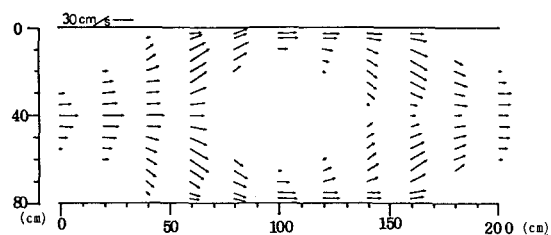
(a) No.0における等流速線図



(b) No.100における等流速線図



(c) No.160における等流速線図



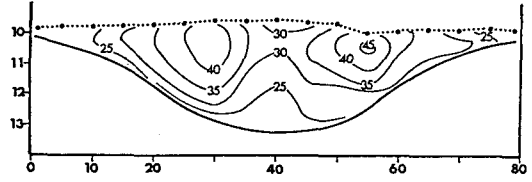
- A 実測値

図 - 6 (Run2)

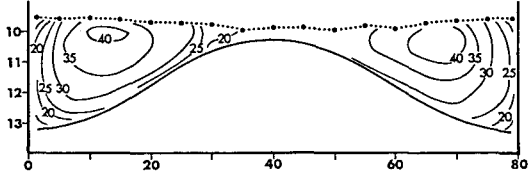
5.ポテンシャルモデル、浅水流モデルとの比較

5-1) 図5-B, 7-BはRun 1, Run 3に対する林⁵⁾のポテンシャル解を示したものであり表面速度ベクトルを描いたものである。各解は横断方向、縦断方向ともに変化が小さく、水深の深いところで遅く、浅いところで速い傾向を示しているものの中央砂州を避ける流線が明瞭に現れている。実測図と比較すると水深の深い所、浅い所、側壁付近でかなりの違いが見られる。これはモデルが渦なしを仮定すると共に摩擦を無視しているためである。さらには、線形化によって表面ベルヌイ条件が満たされていない事による。ポテンシャル流れが中央砂州のような突起を回避する際には、流速を増しその上を乗り越す形をとる。現実のせん断・渦流れにおいては、より抵抗の小さな大水深部へ流れを寄せ、回転性を強めることによって回避をはかる。

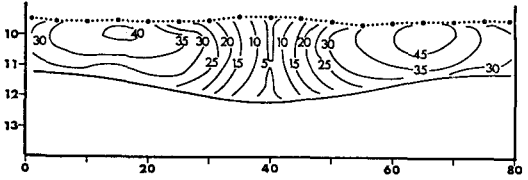
5-2) 図5-C, 7-CはRun 1, 3に対する長谷川⁷⁾の2次元浅水流解の流速分布をベクトル図で表現したものである。各解は、河床起伏に対して1/4波長下流へずれた分布形を示している。すなわち中央が最深部あるいは最高部となる断面No.0, 100, 200においてほぼ一様な分布を示し、その中間点で中央山形、あるいは谷型の分布を呈する。実測値と比較すると、x方向流速Uに関しては側壁近傍を除いて両者の対応は良好であり、また最大値も近い値をとる。しかしy方向流速Vに関しては解の値が非常に小さく、結果として中央砂州を避けるような流線が得られていない。これはモデルにおいて移流項の一部が省略され、かつ方程式系が線形化されているために生じたもので、回転性が現れないことを意味している。



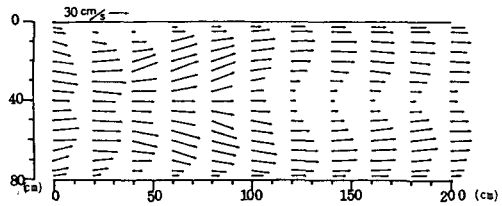
(a) No.0における等流速線図



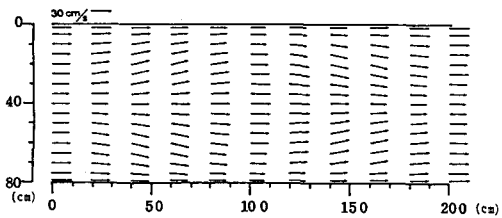
(b) No.100における等流速線図



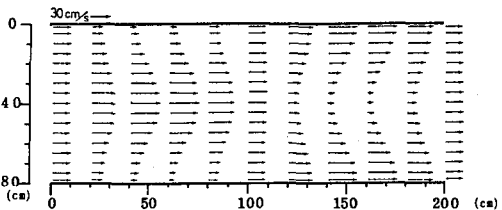
(c) No.160における等流速線図



-A 実測値



-B ポテンシャル解



-C 浅水流解

図 - 7 (Run3)

6. まとめ

複列砂州を模擬した固定床の実験を行い、次の知見を得た。

- 1) 流れの局所的な常射流状態に応じてその場の水面形は河床形状に対して逆または同位相の形態をとる。
- 2) 流れは凸部を避け水深の大きい部分に集中する傾向を示し、水路中央から半分を考えれば単列砂州上の流れに類似している。
- 3) 横断面内に螺旋流の成長は見られず、むしろ水平渦対の成長が生じている。
- 4) 渦なし、摩擦なしを前提とした流速のポテンシャル解は水深の極めて浅い本実験に対してははずれており、実測結果と不一致が大きい。
- 5) 摩擦課程を取り入れた2次元浅水流解は、x方向流速において実測に近いものとなるが、一部移流項の無視、線形化によって横断方向流速に大きなずれが生じ、実測流線を再現しない。

【 謝 辞 】

本研究の一部は文部省科学研究費補助金、重点領域(1) (代表 藤田 睦博)の援助を受けた。
記して謝意を表す。

【 参考文献 】

- 1) 池田 駿介 : 単列交互砂州の波長と波高、第27回水理講演会論文集、1983年2月
- 2) 木下 良介 : 大井川牛尾狭部窄開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験、建設省中部地建静岡河川工事事務所資料 1980年8月
- 3) 砂田 憲吾 : 釜無川における一洪水による河床変動土木学会論文集1985年11月
- 4) 黒木 幹男・岸 力 : 沖積河道の流路形態の領域区分に関する研究 第26回水理講演会論文集 1982年2月
- 5) 長谷川 和義 : 沖積蛇行の平面および河床形状に関する水理学的研究、北海道大学学位論文、1983年
- 6) 林 泰造 : 河川蛇行の成因についての研究、土木学会論文集、第180号、1970年8月
- 7) 長谷川 和義 : 蛇曲流路における流れと平衡底面形状に関する研究土木学会論文集、No 338, 1983年10月