

II-22

共振深掘れに着目した系統蛇行実験にみられる砂州と強制洗掘の干渉過程

北海道大学 正 員 長谷川和義：学生員 中村健作
 北海道開発局 正 員 清水康行：正 員 渡邊康玄
 正 員 鳥谷部隼人

1. はじめに

沖積蛇行における水流と蛇行形状の特性が、交互砂州の形成作用と流路の湾曲効果の複合によって支配されていることをはじめて指摘したのは木下¹⁾である。彼は、相似な平面形状を有する縮小模型内に同一砂州モードの流れをあたえることにより、原型河川の流況と酷似した流れが再現できることを示した²⁾。また、木下・三輪³⁾は、流路がある蛇行角に近づくとき交互砂州の前進が止まり、深掘れが減少することを見いだした。これらの特性を、土砂水理学の立場から定量的に解明しようとする動きがこれに続いた。長谷川⁴⁾は、任意の河床形状を二重三角多項式によって表現し、移動床流れの方程式系に代入して振幅・位相を解くことにより、平衡状態の河床形状を求めている。河床起伏の前進が起こらない限界条件から、木下・三輪の限界蛇行角に近い関係式を導いた。しかし、線形理論のため、形状を求める際に実験係数を必要とするなど不完全なものとなっている。Blondeaux・Seminara⁵⁾は、直線水路では砂州理論に一致するような移動床流れ方程式系のもとで微小な流路蛇行をあたえ、特定の蛇行波長において流速など諸変量の振幅が急に大きくなることを見だし、これを共振波長と呼んだ。しかし、直線理論における交互砂州の卓越波長は、共振波長から離れたところに現れ、両者は一致しない。Tubino・Seminara⁶⁾は、この問題を非線形性を考慮してより厳密に扱っている。彼らは、流速などの変量を、変量＝一樣流＋自由応答＋強制応答＋相互干渉応答 の形に分解し、3次項までの摂動をあたえて永年項を避ける条件から振幅方程式を導き、これをもとに砂州の前進停止条件を得た。その後、自由砂州と強制砂州の干渉効果が調べられたが、共振条件のもとではこの効果は働かず、共振波長より短い波長域で最大になることが報じられている。Parker⁷⁾は、線形化方程式ながらこの点で非常に明快な説明をおこなっている。彼は、移動床蛇行流れ方程式系を用いて1次近似の強制洗掘解からの摂動方程式を導くと、自由砂州方程式に蛇行効果が非同次項としてつけ加わった式になることを見いだした。これから共振条件を導くと、Blondeauxらの共振波長に一致する。この波長は自由砂州の振幅成長率をゼロ（中立安定）にする。

以上のように、最近までに砂州形成作用と湾曲効果の共存現象に対する理解が大きく前進した。しかし、実現象は複雑であり、平衡河床形状に対してもいまだ完全な予測は困難な状態にある。鳥谷部ら⁸⁾の研究は、体系立てた実験によって平衡河床形状の予測法を再検討しようとするものであり、今日きわめて重要な意義を持っている。本論文は、砂州－湾曲の相互効果に関し体系的に条件を変えて得たこれらの貴重なデータを利用して、共振状態を含む河床形状の特性を主に波数解析の立場から検討しようとするものである。

2. 実験の観察

実験の詳細は鳥谷部らによって報じられているので、ここでは一連の実験全体を見た特徴を述べる。

2-1. 蛇行長/流路幅の違いによる流況、底面形状の変化

一連の実験中、波長のもっとも小さいRUN11は、流水開始直後に外岸部に掘れが生じたが、砂州が流下方向に移動し、安定状態には至らなかった。最終的には内岸部が掘れ、その上を砂州が移動していく形になった。RUN5, 7, 9は、他のケースに比べ、深掘れ量が大きく、最大深掘れ/水深比が0.8～1.0程度になった。このうち、RUN9, 7 ($L/B=10.47, 15.70$)は、典型的な水流蛇行を呈し、外岸水衝部から対岸の水衝部へ向かう流れが認められた。波長の長いRUN5, 3 ($L/B=20.93, 31.4$)では、単一の砂州ができた。ケース5より、ケース3の方がその傾向は顕著に現れた。

2-2. 流路幅/水深の違いによる流況、底面形状の変化

流路幅(B)/水深(H)比の違いによる底面形状の差異は、有次元量ではこの比が大きくなると外岸深掘れ量が次第に小さくなるが、水深による無次元量（但し、今回の実験の解析には設定条件の値を使用した）では逆に外岸深掘れ量が次第に大きくなり、砂州の影響が大きくなっていく傾向がある。

RUN9, 11の④ ($B/H=40$)では、川の中央に砂州が現れ、run11-4では水みちが2つに分かれる場所が認められた。RUN3, 5, 7の④ ($B/H=40$)では単一の砂州が形成された。

2-3. 共振条件の検討

図-1は、本実験における蛇行長/流路幅の値を、対応する水理量から求めたParkerの共振波長/流路幅の値

- : $B/H \cdot I^{0.2} = 3.17$
- ▲: $B/H \cdot I^{0.2} = 6.83$
- : $B/H \cdot I^{0.2} = 10.50$
- ◆: $B/H \cdot I^{0.2} = 14.69$
- : 直線水路の場合
- : 長谷川の実験
- ◇: Hookeらによる実験

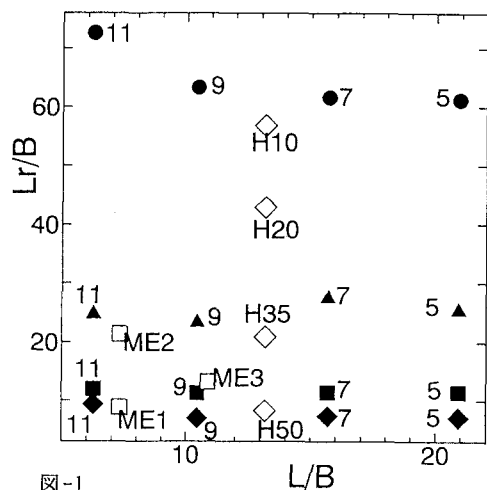


図-1

と比較したものである。ただし、長谷川およびHooke⁹⁾の実験についても載せている。同図から、共振条件にあると推定される実験は、Run5-1、9-2、11-3、4、ME-1、H-35などとなる。しかし、以下に見るようにこれらの実験結果は必ずしも系統的な性質を示さないようである。

3. 底面形状の波数解析に現れる特徴

3-1. 二重三角多項式展開

流路中心線に沿って下流向きにs軸を、これに直交してn軸を取り、平均底面からの底面変位を η （浸食を正）とする。 η を二重多項式にて表すと、

$$\eta = \sum \sum A_{ij} \sin \left(\frac{2\pi i}{2B} n - \frac{\pi}{2} \delta_{ie} \right) \cos \left\{ \frac{2\pi j}{L} (s - \sigma_{ij}) \right\} \quad (1)$$

となる。ただし、 $\eta = \eta/h_0$ 、 h_0 =平均水深、 B =流路幅、 L =流路蛇行長、または平均交互砂州長の2倍、 A =平均水深にて無次元化した成分波の振幅、 σ =位相距離、 i, j =それぞれ、流路幅の2倍、および蛇行長を基本波長とするときの波数、 $\delta_{ie} = (1 + (-1)^i)/2$ である。

長谷川は、交互砂州形状や蛇行流路の底面形状が、 (i, j) につき $(1, 1)$ 、 $(2, 0)$ 、 $(3, 1)$ 、 $(2, 2)$ などの主要波によってよく表現できることを示している。いま、全実験ケースにつき(1)式による展開をおこない、 (i, j) に対する振幅分布を見ると図-2の一連のようになる。これらより、以下の特徴を指摘できる。

各RUNとも(1)($B/H=10$)の場合に $(1, 1)$ の波が大きい振幅値を示す。特にRUN5, 7, 9においてその値が大きい。 B/H が大きくなるにしたがって、この振幅値は次第に小さくなっていく。かわって、相対的に $(2, 0)$ の振幅成分が大きくなると共に高周波成分が増え、全体的に平坦な図になってくる。

3-2. 主要波振幅の特徴

図Aは横軸に（蛇行長 L /幅 B ）を、縦軸に水深によって無次元化した主要振幅成分 $A_{I, J}$ を取り、実験結果を示したものである。図Bは横軸に（幅 B /水深 h_0 に勾配 $I^{0.2}$ ）を、縦軸に $A_{I, J}$ をとったものである。図中のデータを結んだ線は同一の B/H に対するものである。

図A 11、図B 11によると、 $(1, 1)$ の波は $L/B=7 \sim 20$ の範囲で砂州、非砂州状態に関わらず、 $0.8 \sim 1.0$ の値を示している。しかし、 L/B がこの領域からはずれたり、直線水路の場合には低い値を示す。また、 B/H が小さくなるほど大きな値を示していることがわかる。

図A 20, 31、図B 20, 31から $(2, 0)$ 、 $(3, 1)$ の波がそれ以下の性質を示すことがわかる。直線水路では B/H の増加と共に急激に大きくなるが、蛇行水路においては B/H が大きくなってもこれらの波の振幅の値は増加しない。また、非砂州条件下の値は小さくなっている。

図A 22、図B 22は $(2, 2)$ の波について見たものである。この波の振幅は直線砂州の場合にも、非砂州蛇行の場合にも小さな値をとる。蛇行水路でしかも砂州条件の時に大きな値をとっている。 L/B が $10 \sim 20$ の範囲で大きな値をとる。

4. 湾曲効果の分離

4-1. 非砂州湾曲流路における底面形状

この問題に対する研究は非常に多い。流路湾曲によってもたらされる横断面内の2次流の評価の違い、使用

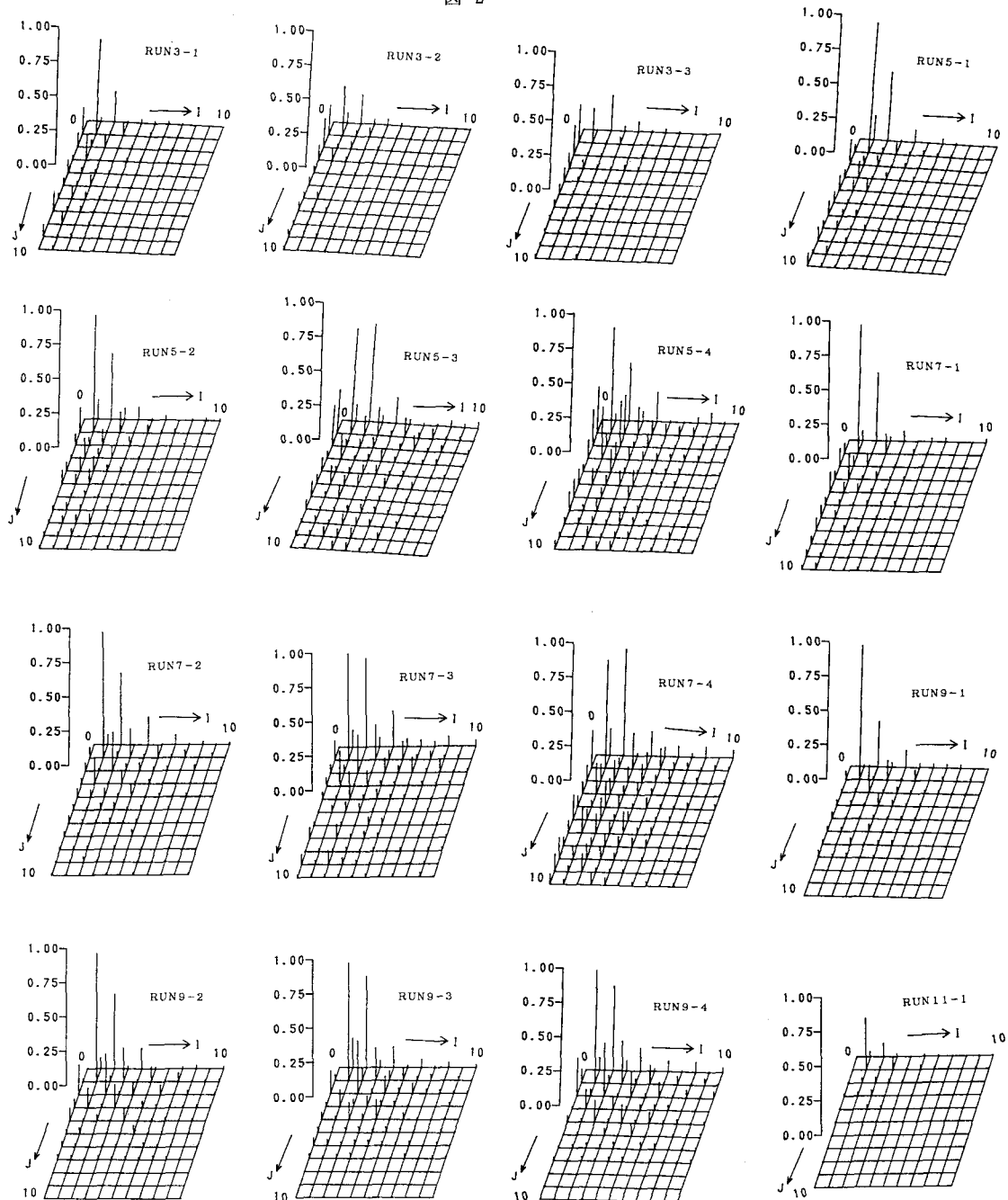
$$\frac{\eta}{h_0} = \left(1 + \frac{n}{r_0}\right)^T - 1 \approx T \frac{n}{r_0} ; \quad T = N_* \left(\frac{\mu_s \mu_k \tau_{*0}}{\tau_{*c}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

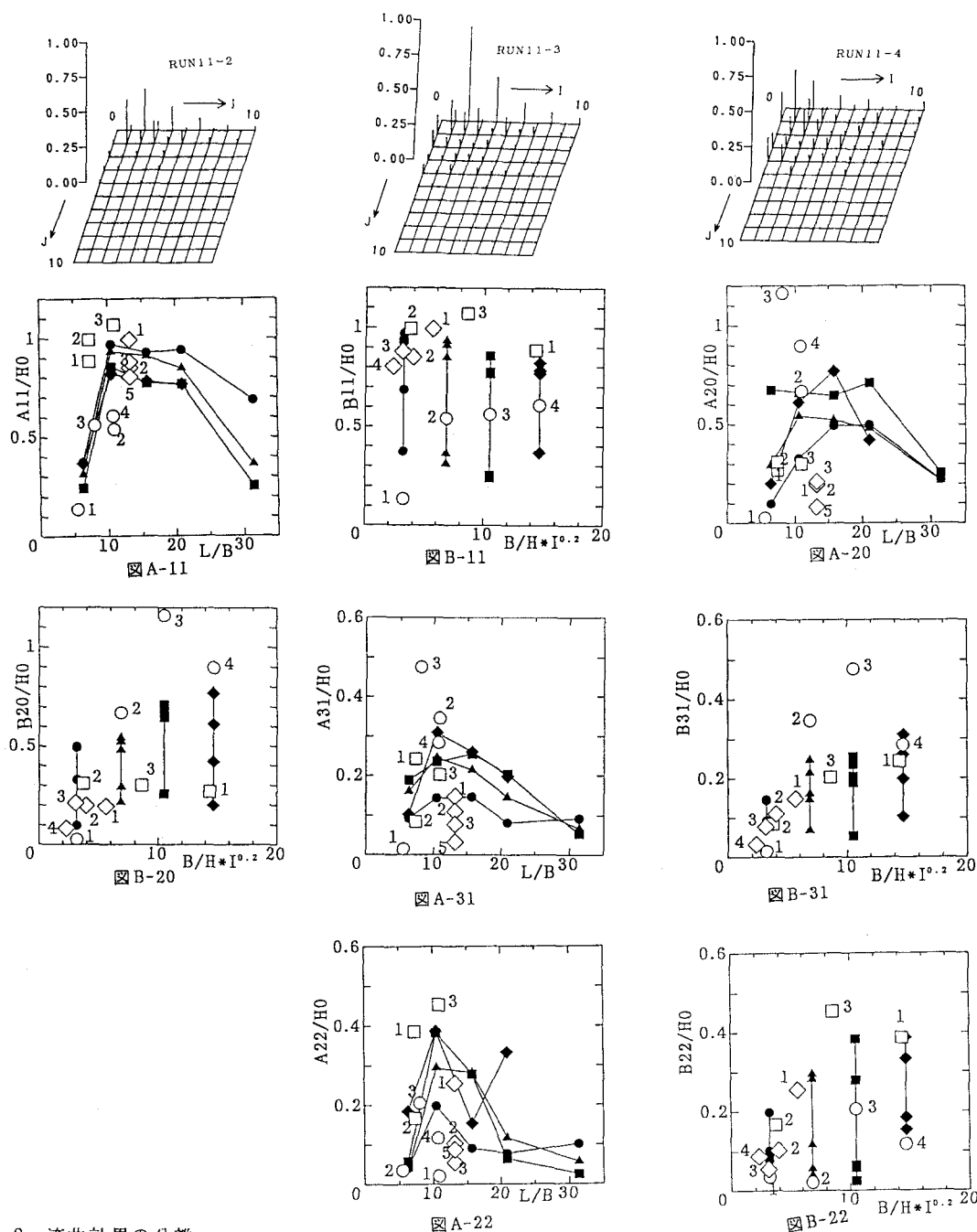
ただし、 h_0 =平均水深、 n =横断方向軸、 r_0 =流路中心の曲率半径、 N_* =底面2次流強度に関する係数、 τ_{*c} =限界 Shields数、 τ_{*0} =無次元掃流力などである。蛇行流路においても基本的にこの関係が成立するものとする、平均水深のみが異なり他がすべて同一の条件にある二つの実験1、2における η_1 、 η_2 の比率は、式(1)より、

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \left(\frac{\tau_{*2}}{\tau_{*1}} \right)^{0.5} \frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{3/2} \quad (3)$$

となる。

図-2





4-2. 湾曲効果の分離

上述のように、Run・1は非砂州実験に近く、得られた形状は流路湾曲のみの効果を受けて形成されたものと考えられる。他のシリーズは、砂州・湾曲両者の影響によって形成されていると見ることができるので、これから湾曲の影響を差し引くことを考える。Run・1と他の実験の水深が異なるので、式(3)を適用し、Run・2以降の底面形状から変換したRun・1の形状を引き算する。ただし、最大深掘れの位置が一致するようにs軸方向にずらすものとする。このようにして得た残余の形状は、曲がりによって変形を受けた砂州形状と考えることができる。図-3の一連は、これらの形状の振幅分布を見たものである。これらにより、次のことがわかる。この曲がりを受けた砂州形状の振幅成分は非常に小さい値になり、すべて水深の0.1倍に納まる。RUN5-12S, 7-12S, 7-13S, 11-14Sは他の振幅成分に比べ(1,1)の波が大きく残り、RUN7-14S, 11-12S, 11-13Sは(1,1)と(2,0)の波が大きく残り、RUN9-13Sは(2,0)の波が大きく残っている。

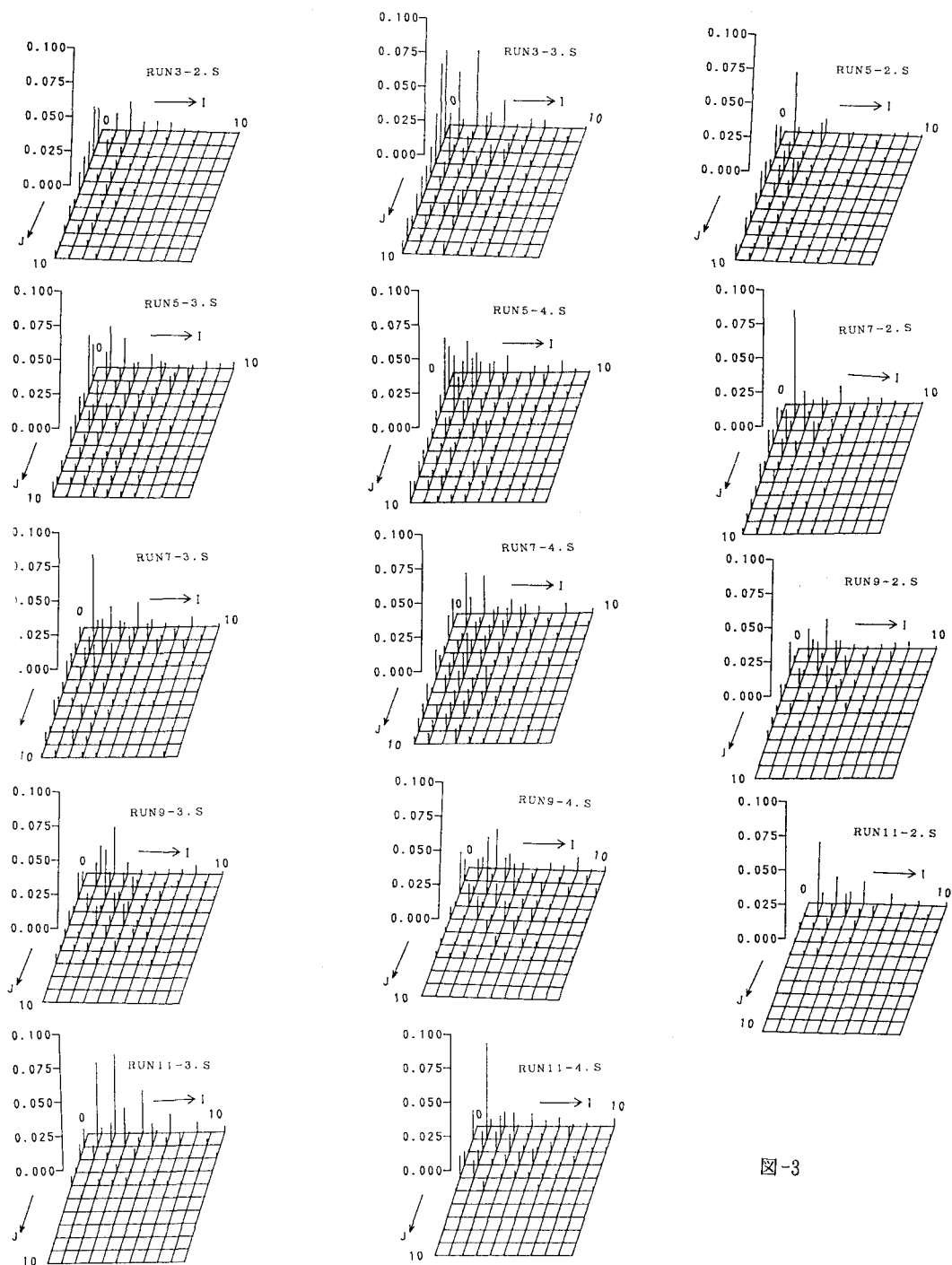


図-3

4-3. 湾曲による非線形効果の検討

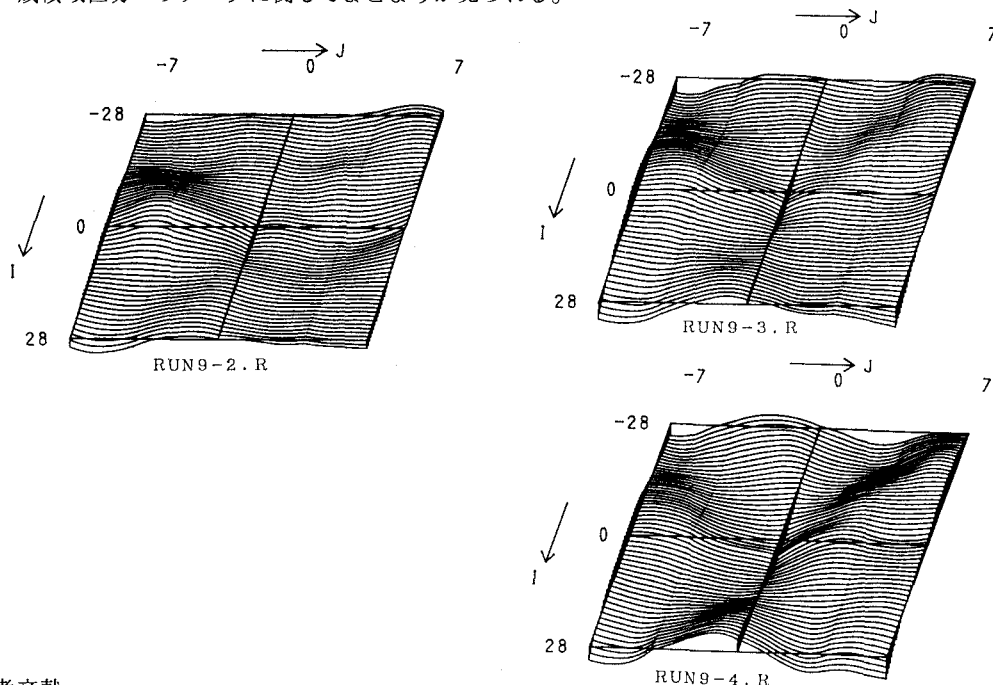
ここではケース9について考えてみる事にする。RUN9-1とRUN9-2.Sとの2つのデータを横断方向にI、縦断方向にJずらして重ね合わせて、その積の和をグラフにしたのがRUN9-2.Rである。つまり、砂州の効果に曲がりの効果を重ね合わせることによって、どのような波が含まれているのかを調べているのである。同様にRUN9-1とRUN9-3.Sを使って計算されたのがRUN9-3.Rであり、RUN9-1とRUN9-4.Sを使って計算されたのがRUN9-4.Rである。これらの3つのグラフは明らかに(2,2)の波を表している。

したがって、RUN9-2, 9-3, 9-4において曲がりの影響を受けた砂州は(2, 2)の振幅成分を大きく含んでいると考えられる。RUN9は蛇行水路で砂州が発生する条件である。このようなときに(2, 2)の波が卓越するという3-2の結果を裏づける結果が得られた。しかし、RUN9-2. S, RUN9-3. S, RUN9-4. Sを見ても(2, 2)の振幅成分は水深比0.01~0.03の範囲にあり、ごく小さい値となっている。ということは、ここで言う(2, 2)の振幅成分は曲がりによるものと砂州によるものと非線形効果であると考えられる。

5. まとめ

本実験結果と解析により以下のような事が分かった。

- ① (1, 1)の波は、砂州、非砂州に関わらず $L/B=7\sim 20$ の範囲で0.8~1.0の値を示す。それ以外では小さな値を示す。
- ② (2, 0), (3, 1)の波は砂州本来の性質であり直線水路では B/H が大きくなるにしたがって大きな値をとるが曲がりを受けると値は小さくなる。
- ③ (2, 2)の波は蛇行水路でしかも砂州が形成されている場合にのみ、 $B/H \times I \times 0.2$ の増加とともに増加する。またこの波は相互相関をとることによって曲がりと砂州の非線形な干渉を受けて現れることがわかった。
- ④ Parkerらの共振波長に近い蛇行長をもつ実験の結果は必ずしも系統的な性質を示さず、むしろ砂州の形成領域区分パラメータに関してまとまりが見られる。



参考文献

- 1) 木下良作：石狩川河道変遷調査、科学技術庁資源局資料第36号、1961
- 2) 木下良作：河道の改修と流路形態の変動—大井川を例として—、地形 Vol. 3 No. 2, J. G. U. 1982.
- 3) 木下・三輪：砂礫堆の位置が安定化する流路形状、新砂防 94, 1974.
- 4) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究、北海道大学博士論文、1983.
- 5) Blondeaux, P. and G. Seminara: A unified bar-bend theory of river meanders, J. F. M. Vol. 157, 1985.
- 6) Tubino, M. and G. Seminara: Free-forced interaction in developing meanders and suppression of free bars, J. F. M. Vol. 214, 1990.
- 7) Parker, G. and H. Johansson: Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels, AGU WATER RESOURCES MONOGRAPH 12, River Meandering, 1989.
- 8) 鳥谷部・渡邊・清水・長谷川・中村：共振深掘れの発生条件に関する移動床蛇行水路実験、土木学会北海道支部論文報告集、第49号、1993.
- 9) Fooke, R. L.: Shear-stress and sediment distribution in a meander bend, Ung. Rapport 30, Univ. of Uppsala, 1974.