

直線水路における自己形成流路の 形成条件と形成機構

FORMATIVE CONDITION AND MECHANISM OF A SELF-FORMED STREAM CHANNEL IN STRAIGHT RIVER COURSE

竹林 洋史¹・江頭 進治²・中川 博次³
Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA and Hiroji NAKAGAWA

¹学生会員 工修 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

³フェロー会員 工博 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科 (同上)

Formative condition and mechanism of a self-formed stream channel in a straight river course are studied in terms of flume tests and numerical analysis. The results support that a self-formed stream channel in a straight river course is produced in the formative domain of multiple row bars. In developing stage of self-formed stream channel, multiple row bars are produced firstly, and then transformed into alternate bars. Finally, a self-formed stream channel is produced. In addition, the developing of the mode (0,2) for bed configuration promotes the formation of self-formed stream channel. Formation of equilibrium multiple row bars is investigated by means of numerical analysis under a wide range of hydraulic condition. The numerical results realize that any multiple row bar changes into a self-formed stream channel under the studied conditions.

Key words: self-formed stream channel, formative condition, formative mechanism, multiple row bar, alternate bar

1. はじめに

図1は、木津川下流域に形成されている自己形成流路の一例である。ここで、自己形成流路とは、堤外地に自然に形成された低水路状の流路のことである。図のような自己形成流路が形成された河道は、瀬と淵の形成に代表されるように、多様な水辺空間を形成し、動植物が生息しやすい環境を形成する。このような河道特性を知ることは、河床形態などを考慮した河川整備を進めていくための重要な情報となる。一方、自己形成流路が形成されるような河道は、側岸部に水衝部を形成し、局所洗掘を発生させるなど治水上の問題点も併せ持つ。そのため、河道の治水機能を保持し、さらに多様な生態系を保全・創生するような河川整備を行う上で、自己形成流路の動態に関する知見が不可欠である。

従来、図1に示すような1本の流路を有する自己形成流路は、洪水時に交互砂州が形成され、平水時

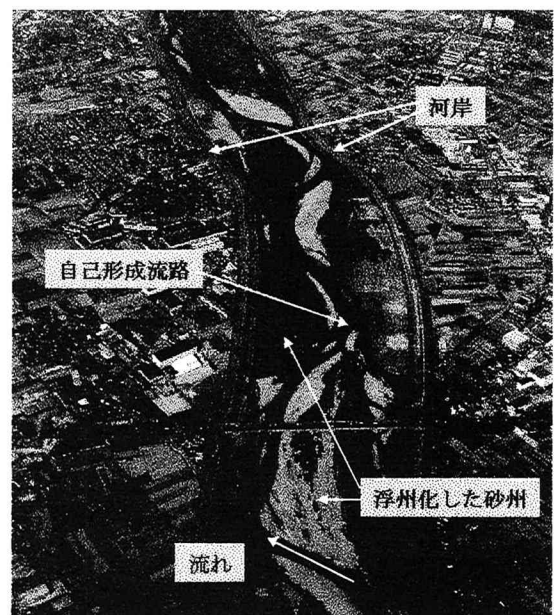


図1 木津川に形成された自己形成流路（淀川との合流点から2～5km 上流）

に河床位の低い場所を水が流れている状態と考えられている^{1), 2)}。しかし、川幅/水深が大きい条件で水路実験を行うと、平坦な初期河床上に時間的に一定の給水と給砂を行っても、浮州が現れ、流路が形成される^{3), 4)}。また、図に示す木津川について、最近 30 年間の年最大時間平均流量を用いて、河床面の不安定性に関する線形解析⁵⁾を行い、それに基づいて河床形態を判定すると、河床形態は複列砂州になる。一方、藤田・赤松・村本³⁾の水路実験によれば、複列砂州の中には形状が不安定なものも含まれており、砂州の発達過程において横断方向のモードが減少し、ついには浮州を形成するものも存在する。これらのことは、「1本の流路を有する自己形成流路=交互砂州」ではなく、自己形成流路は交互砂州とは別の河床形態もしくは河道形態であり、自己形成流路には形成水理条件が存在することを示唆するものである。

このような観点に基づき、本論文では、まず、川幅/水深をパラメータとして、平坦な初期河床上に時間的に一定の給水と給砂を行う条件で形成される自己形成流路の形成水理条件について、水路実験と数値解析により検討する。次に、平衡状態に到達する複列砂州の有無を調べるため、数値シミュレーションによって、複列砂州の安定性を検討するとともに、自己形成流路の形成領域を再考する。最後に、河床のモード形状に着目し、1本の流路を有する自己形成流路の形成機構を検討する。

2. 実験方法と数値解析法

(1) 実験方法

実験に用いた水路は、長さ 14 m の直線矩形水路である。河床および給砂に用いた砂は、粒径がほぼ均一な一様砂である。実験に用いた水理条件を、表 1 に示す。Case 1~Case 11 のうち、水路実験を行ったのは、Case 1~Case 6 である。Case 1~Case 5 は、無次元掃流力を 0.05 程度に維持し、川幅/水深を大きく変化させている。Case 6 は、川幅/水深と水深/

粒径を Case 2 とほぼ等しく、無次元掃流力を若干大きめにしたものである。Case 1~Case 6 の水理条件は、村本・藤田⁶⁾の砂州の形成領域区分図によると、交互砂州から複列砂州の形成水理条件にある。

実験では、まず、10 cm 厚さで砂を敷き詰め、河床表面を敷きならして平坦河床としている。給水は、表 1 に示した流量を一定に与え、給砂は、上流域の河床位を初期河床位に保つように行っている。

通水中は、流況を把握するため、1 時間ごとに水路上方および水路下流端から写真撮影を行っている。このとき、水際線を明確にするため、染料として入浴剤を流水に混ぜている。通水は、自己形成流路が形成されるか、もしくは安定した砂州が形成されるまで行っている。

(2) 数値解析法

流れの計算は、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測し、係数値は Engelund⁷⁾と同様の 7.0 を用いている。流砂量は芦田・道上式により算出し、芦田・江頭・劉⁸⁾と同様に、河床の局所的な勾配が流砂ベクトルに及ぼす影響を考慮している。

計算領域は、水路実験と同様に、固定側岸を有した直線矩形断面水路を想定したものである。初期河床形状は、平坦床であり、上流域右岸側に、高さが水深の 1/3、幅が水路幅の 1/5、長さが 15cm の直方体型の擾乱を与えている。また、上記擾乱を周期的に与えたものや大きさの異なる直方体型の擾乱を計算区間全体にランダムに配置したものなど、他の初期河床擾乱を用いた計算も行っているが、形成される最終河床形態には影響はなかった。上流境界からの給水は、表 1 に示す流量を一定に与える。上流境界における流砂量は、境界における水理量をもとに、芦田・道上式により算出されたものを与えている。

局所的な河床勾配は、永瀬・道上・檜谷⁹⁾の研究を参考に、安息角よりも小さくなるように補正している。自己形成流路が形成されると、計算領域に

表 1 水路実験および数値解析に用いた水理条件

		流量 (l/s)	川幅 (m)	河床勾配	砂の平均粒径 (mm)	川幅/水深	無次元掃流力
Case 1	実験・数値解析	0.43	0.4	1/50	1.095	107	0.047
Case 2	実験・数値解析	0.76	0.4	1/100	1.095	62	0.041
Case 3	実験・数値解析	1.41	0.4	1/141	1.095	38	0.046
Case 4	実験・数値解析	1.50	0.4	1/143	1.095	32	0.050
Case 5	実験・数値解析	2.00	0.3	1/200	1.095	15	0.055
Case 6	実験	1.00	0.4	1/50	1.095	60	0.076
Case 7	数値解析	3.20	0.8	1/50	1.095	84	0.108
Case 8	数値解析	40.00	2.0	1/50	1.095	80	0.284
Case 9	数値解析	70.00	3.5	1/50	1.095	140	0.284
Case 10	数値解析	600.00	10.0	1/70	0.430	180	1.130
Case 11	数値解析	300000.00	100.0	1/70	0.430	177	11.5

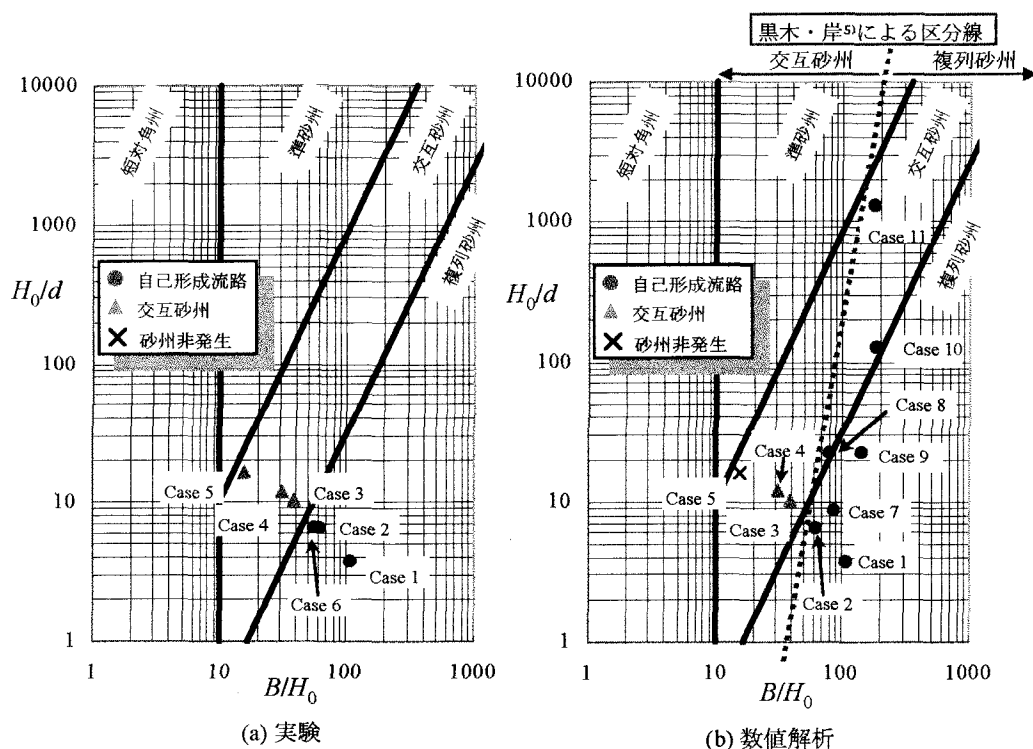


図2 村本・藤田⁹⁾による中規模河床形態の形成領域と自己形成流路の形成領域との関係 (B : 川幅, H_0 : 等流水深, d : 平均粒径)

流水の無い浮州が形成される。浮州においては、流れの支配方程式が成り立たないため、特別な取り扱いが必要である。本解析では、水深が河床材料の平均粒径以下となったとき、浮州が発生したと判定し、流水の計算は行わない。ただし、水位については、浮州近傍の流水地点4点から内挿して仮想水位を求め、仮想水位が河床位と河床材料の平均粒径の和よりも高くなったときに、浮州は消滅したと判定している。

計算条件を表1に示す。Case 7～Case 11は、平衡状態の複列砂州の有無を調べたものである。これらの条件は、川幅/水深と無次元掃流力が比較的大きい領域になっている。この点については、後述する。また、Case 11は砂が浮遊する条件であるが、浮遊砂は考慮していない。Case 7～Case 11の水理条件も、村本・藤田⁹⁾の形成領域区分図によると、交互砂州から複列砂州の形成水理条件にある。

3. 自己形成流路の形成水理条件

図2に村本・藤田⁹⁾の砂州の形成領域区分図上に、水路実験および数値解析で得られた河床形態を示している。ここで、浮州が形成されていると、自己形成流路が形成されていると判断している。また、形成された自己形成流路の中には、数本の流路を形成しているものもあるが、給水流量の90%以上が主流路を流れている。一方、交互砂州と判断した河床形態は、浮州が無く、さらに波高が平均粒径以

上のものである。

まず、無次元掃流力がほぼ同一のCase 1～Case 5を見る。川幅/水深が大きいCase 1とCase 2は、複列砂州の形成領域にあるが、実験及び数値解析ともに、最終河床形状として複列砂州は形成されず、自己形成流路が形成されている。Case 3～Case 5は、交互砂州の形成領域にあるが、数値解析のCase 5を除いて、交互砂州が形成され、自己形成流路は形成されていない。数値解析のCase 5は、僅かに蛇行した流れは形成されているが、波高が河床材料の平均粒径以下のため、砂州非発生と判定している。

ここで、Case 7～Case 11について考察する前に、複列砂州の形成領域で自己形成流路が形成される原因について検討する。まず、図3に、数値解析において自己形成流路が形成されたCase 2の自己形成流路の形成過程を示す。図中に示されている矢印は、主流を表している。図に示すように、河床に最初に発生する河床形態は、複列砂州である。しかし、複列砂州は、波高の発達とともに横断方向のモードが減少し、単列の交互砂州に変化する。複列砂州から変化した交互砂州は、時間とともに波長および波高を発達させ、ついには浮州が現れ、自己形成流路が形成される。また、Case 1においても同様の河床形態の変化がみられた。

このような、自己形成流路の形成過程は、水路実験においても観察された。図4は、比較的明瞭に河床形態の変化が観察されたCase 6における河床形態の時間変化を示している。通水後わずか5分で明

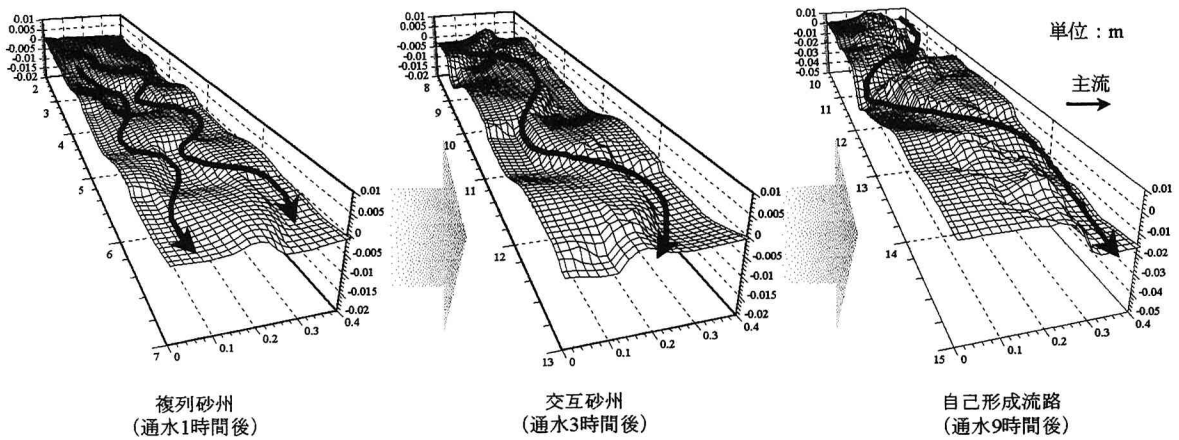


図3 自己形成流路の形成過程における河床形態の時間変化 (Case 2, 数値解析)

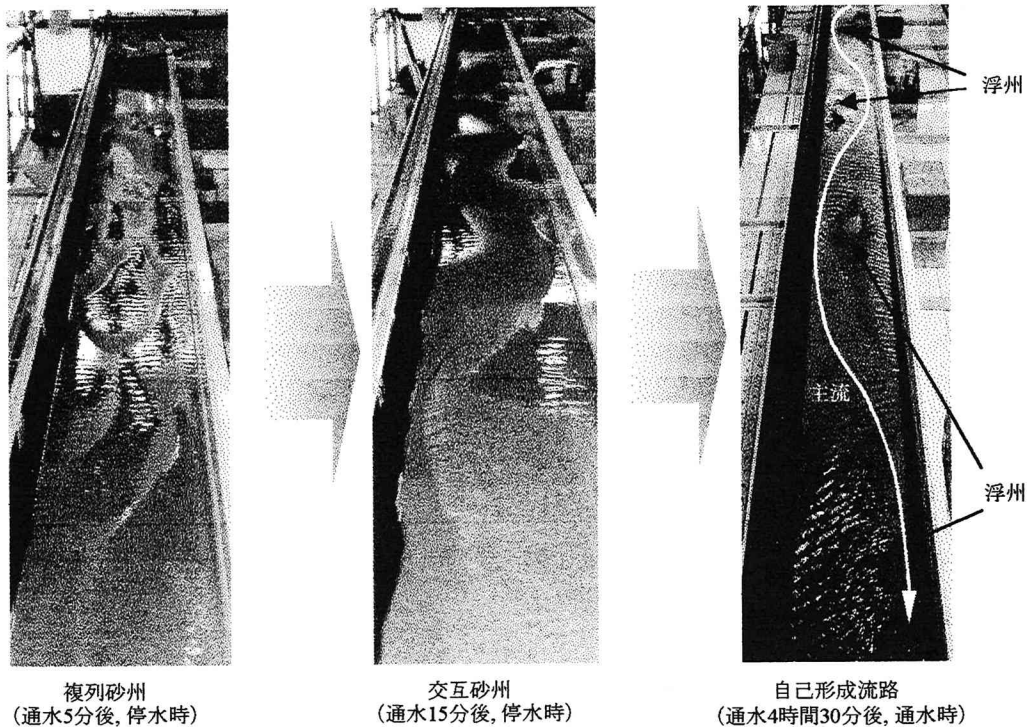


図4 自己形成流路の形成過程における河床形態の時間変化 (Case 6, 水路実験)

瞭な複列砂州が発生した。しかし、そのわずか 10 分後には、複列砂州は交互砂州に変化した。その後、しばらくは、交互砂州の状態を保っていたが、通水後約 1 時間で浮州が発生し、通水後 4 時間 30 分で、図のような自己形成流路が形成された。本条件は、比較的速やかに河床形態の変化が発生しているが、複列砂州から交互砂州への変化に数時間かかるものも存在する。このことは、既存の水路実験において、長時間通水すれば自己形成流路が形成される条件にあったもののうち、複列砂州の状態を通水を停止し、河床形態として複列砂州と判定されているものも多く含まれていることを示唆している。

そこで、平衡状態の複列砂州の有無を調べるために行った数値解析が Case 7～Case 11 である。これらの計算条件は、黒木・石井・板倉¹⁰⁾の砂州の波高に関する解析結果を参考にして決定している。つまり、川幅/水深が大きい領域では、無次元掃流

力が大きくなるにつれ、無次元平衡波高（平衡波高を等流水深で無次元化したもの）が小さくなる。そのため、無次元掃流力の大きい条件であれば、平衡状態の複列砂州が形成されると予想されたためである。しかし、図2の数値解析結果を見ると、Case 7～Case 11の全ての条件で自己形成流路が形成され、平衡状態に到達した複列砂州は再現されていない。また、Case 7～Case 11の全ての条件で、図3および図4に示すような河床形態の変化が見られた。

このような複列砂州の不安定性は、その左右対称な形状特性にあると考えられる。図3に示したように、複列砂州上の主流は、両側岸沿いの流れが水路中央部で合流して1本となり、流下するにつれて、再度分かれて、両側岸へ流れていくという構造を有している。複列砂州の発生初期の波高が低いときには、水路中央への流れの集中は弱く、左右の流れに非対象性が存在しても河床への影響が弱いた

めに、複列砂州はその左右対称な形状を保つ。しかし、波高が発達し、水路中央における流れの集中が強くなると、左右対称な形状は不安定になり、左右どちらかの流れが卓越する。これに対して、交互砂州や1本の流路を有する自己形成流路は、側岸から対岸に向かう蛇行流であり、水衝部が固定側岸であるため、比較的安定している。

多列砂州の横断方向のモードが時間的に減少することが報告されているが³⁾、これも上述のような不安定性によるものと考えられる。また、多くの実河川においても横断方向のモードの減少が確認されているが¹¹⁾、供給土砂量の減少による低水路内の河床低下は、波高の増大を意味しており、これも上述のような不安定性によるものと解釈できる。

一方、河床擾乱の平衡振幅と線形解析による振幅の増幅率に着目して、モードの減少について検討が行われているが¹¹⁾、モード間の相互干渉に関する情報が無いため、理論の適用範囲が不明確である。そのため、上記のような複列砂州の不安定性については、モード間の相互干渉を再現できる非線形解析を用いた更なる検討が必要である。

以上のように、自己形成流路の形成過程において、最初に複列砂州が発生することを考慮すると、複列砂州の発生水理条件が自己形成流路の形成水理条件となることが予想される。そこで、河床擾乱の振幅の初期発達速度により、河床形態の領域区分を行っている、黒木・岸⁵⁾の交互砂州・複列砂州の領域区分線を村本・藤田⁶⁾の形成領域区分図上に示すと、図2のようになる。これによると、本解析で得られた全ての自己形成流路の形成水理条件は、黒木・岸⁵⁾による複列砂州の発生水理条件となっていることがわかる。

4. 1本の流路を有する自己形成流路の形成機構

1本の流路を有する自己形成流路の形成過程を考えると、浮州の形成は、交互砂州としての波高の発達によるものと考えることができる。これは、自己形成流路の形成過程では、複列砂州が交互砂州に変化し、交互砂州はその河床形態を保ちながら発達し、砂州の河床位の高い領域が浮州として形成されるからである。そこで、黒木・石井・板倉¹⁰⁾と同様の方法で、交互砂州の平衡波高を解析的に求め、浮州形成までの機構を検討する。

図5は、黒木・岸⁵⁾の砂州の発生領域区分図上における無次元平衡波高の分布を示している。ここで、浮州形成時の河床形態は交互砂州状であるとして、複列砂州の発生領域における波高も河床形状を交互砂州と仮定して求めている。図によると、

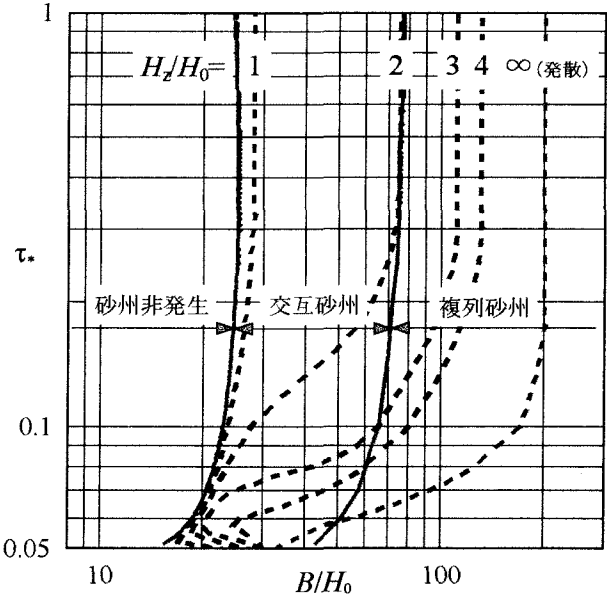


図5 黒木・岸⁵⁾の砂州の発生領域区分図上における無次元平衡波高 (H_2/H_0) の分布 (H_2 : 波高, $I=1/50$)

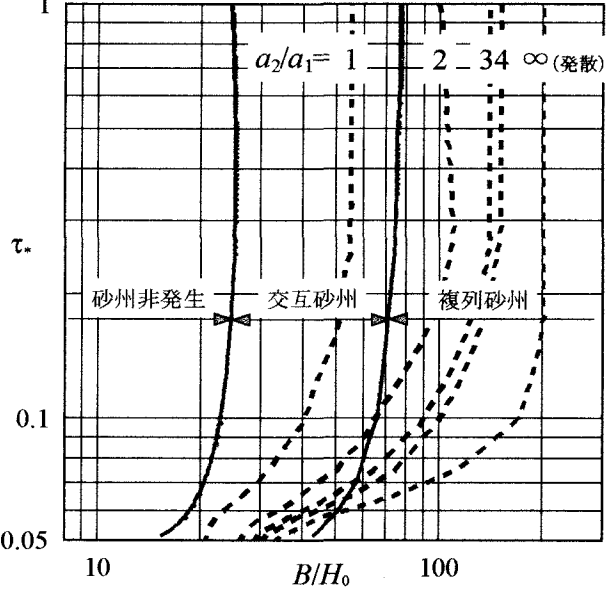


図6 各河床擾乱の振幅比 a_2/a_1 の黒木・岸⁵⁾の砂州の発生領域区分図上における分布 ($I=1/50$)

川幅/水深が大きく、無次元掃流力が小さくなるにつれて無次元平衡波高は高くなり、ついには複列砂州の発生領域で発散している。このような無次元平衡波高の分布には、以下の式(1)の右辺第2項のモード(0,2)の河床形状の発達が重要な役割を果たしている。

$$z_b = a_1 \cos(kx) \cos(l y) - a_2 \cos(2ly) \quad (1)$$

ここに、 z_b は河床位、 a_1 と a_2 はそれぞれのモードの振幅、 k と l は縦断及び横断方向の波数である。これら二つのモードは、交互砂州の主要なモードである。図6は、黒木・岸⁵⁾による砂州の発生領域区分図上における、式(1)の各河床擾乱の平衡振幅比 a_2/a_1 の分布を示している。無次元平衡波高と同様

5. 結論

初期河床形状を平坦河床とし、定常的に給水と給砂を行う条件で形成される自己形成流路の形成条件と形成機構について検討してきた。本研究で得られた結果をまとめると以下になる。

- (1) 自己形成流路の形成水理条件は、川幅/水深が大きい条件であり、線形解析で得られる複列砂州の発生水理条件とほぼ一致する。
- (2) 1本の流路を有する自己形成流路の形成過程においては、まず、複列砂州が発生し、時間とともに交互砂州に変化し、ついには浮州が発生して自己形成流路が形成される。
- (3) モード(0,2)の河床形状の発達、1本の流路を有する自己形成流路の形成に重要な役割を果たしている。

謝辞：本研究は、一部、文部省学術フロンティア事業費の補助を受けていることを記し、ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 内島邦秀，早川博：流量が減少した場合の交互砂州の変形特性，第31回水理講演会論文集，pp.683-688，1987。
- 2) 石井千万太郎，岸力，黒木幹男，沓沢辰美：砂州河道における河岸浸食と低水流路，第33回水理講演会論文集，pp.379-384，1989。
- 3) 藤田裕一郎，赤松英樹，村本嘉雄：網状流路の形成過程，水工学論文集，第31巻，pp.695-700，1987。
- 4) 芦田和男，江頭進治，里深好文：網状流路における流砂量，水工学論文集，第35巻，pp.391-396，1991。
- 5) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，第342号，pp.87-96，1984。
- 6) 村本嘉雄，藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件，第22回水理講演会論文集，pp.275-282，1978。
- 7) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974。
- 8) 芦田和男，江頭進治，劉炳義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析，水工学論文集，第35巻，pp.383-390，1991。
- 9) 永瀬恭一，道上正規，檜谷治：狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算，水工学論文集，第40巻，pp.887-892，1996。
- 10) 黒木幹男，石井千万太郎，板倉忠興：砂州波高に関する理論的研究，水工学論文集 第36巻，pp.1-6，1992。
- 11) 須賀堯三：河川における蛇行のモード変化，第37回土木学会年次学術講演会講演概要集，II-292，pp.583-584，1982。
- 12) 福岡捷二，山坂昌成：河床形状・流れ・流砂量の非線形関係を考慮した交互砂州の平衡波高の理論，土木学会論文集，第357号，pp.45-54，1985。

(1999. 9. 30 受付)

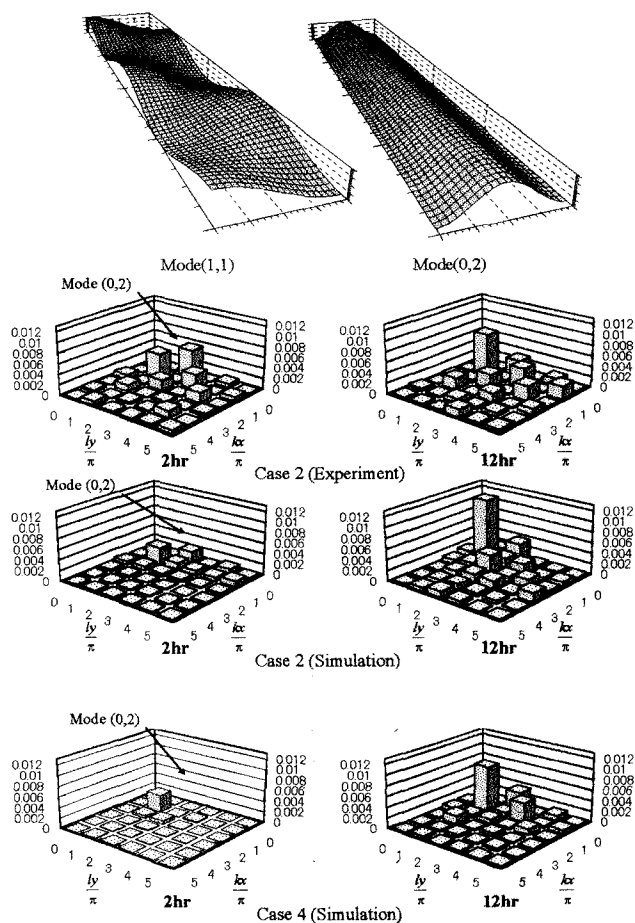


図7 二重フーリエ級数展開により得られた河床形状の各モードの振幅

に、川幅/水深が大きく、無次元掃流力が小さくなるにつれ、平衡振幅比 a_2/a_1 は大きくなっている。

このようなモード(0,2)の発達は、水路実験および数値解析においてもみられる。図7は、水路実験および数値解析により得られた河床形状を2重フーリエ級数で展開したときの各モードが有している振幅を示している。Case 2は、水路実験および数値解析において自己形成流路が形成されたものであり、Case 4は、数値解析において典型的な交互砂州が形成されたものである。なお、Case 2において、2時間後では、まだ浮州は形成されていない。

2時間後の結果を見ると、自己形成流路が形成されるCase 2は、交互砂州が形成されるCase 4よりもモード(0,2)の河床形状が発達していることがわかる。図7に示すように、モード(0,2)の河床形状は水路中央が盛り上がった形状である。水路実験及び数値解析において、最初に浮州が発生する領域は、水路中央付近であり、図5～図7の結果と考え合わせると、モード(0,2)の河床形状の発達が浮州の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。

一方、浮州形成後は、モード(0,2)の発達は止まり、モード(1,1)が発達するため、12時間後の自己形成流路のモード構成は、交互砂州のそれと似たものとなる。