

交互砂州の波長の発達機構

The Mechanism of Wave Length Development of Alternate Bars

京都大学防災研究所 正員 藤田 裕一郎
建設省河川局開発課 正員 小池 剛
京都大学防災研究所 正員 村本 嘉雄

1 まえがき

中規模河床形態は河川の有する主要な特徴の一つであって、その水理特性を明らかにすることは治水・利水の両面にとって重要であるために精力的な研究が行われてきており、現象の解明が急速に進みつつある。とくに、基本的な形態である交互砂州については、実測資料の詳細な検討や実験的・理論的研究によって形成条件、形状特性、流況特性などがかなり明確にされてきている。その形状特性のうちの波長に関する理論的な取扱いは、最近では平面2次元の浅水流モデルによる河床変動の線形安定解析が一般的となっている。しかしながら、実験事実からは、交互砂州の波長は初期のものから時間的に増加して平衡的な値に至る発達過程を辿ることが指摘されている。本研究では、このような安定理論の前提とは異なった実験事実に着目して行った交互砂州の形成過程に関する実験とその初期過程における河床形態の変化について述べ、規模の異なる他実験の結果も参照して波長の発達過程の特徴を明らかにする。ついで、この特徴に交互砂州上の流況特性及び発達過程における土砂移動特性に関するこれまでの実験的知見を導入して、交互砂州の波長の発達機構について単純な考察を進め、発達した交互砂州の波長の予測を試みる。

2 交互砂州の形成過程と波長の発達

2.1 交互砂州の形成過程に関する実験

実験は、幅 50.2cm、長さ 20.5m、深さ 55cmの鋼製可変勾配循環式水路の下流から 18.4m 区間に平均粒径 0.99mm、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.48$ のほぼ一様な砂を厚さ 8cmで敷いて行った。この水路の中央 15m区間は両面ガラス張りであり、水路側壁上を測定、写真撮影及び数均しに用いられる台車が走行するようになっている。流量は通水時もノズル流量計で検定して、所定の値を保つようにバルブを調整した。移動床の上流端にはロータリーフィーダー型の給砂装置を設置して、初期河床高が保たれるように横断方向に一様に砂を補給した。一方、下流端では水槽内の金網の箱にトラップした流砂量を計測した。

座標軸として、移動床の上流端を $x=2m$ として流下方向に x 軸を、水路中心軸を $y=45cm$ として右から左方向に y 軸を、及びレールから垂直下方に z 軸をとっている。河床高は触針式砂面計で、水位はサーボ式水位計で測定して、平均水理量を算定した。また、砂州の位置と波長は台車から撮った河床の平面連続写真とスケッチから読取り、波高は前

表 実験条件と平均水理量

実験 番号	流量 (l/s)	水路 勾配	水深 (cm)	Froude 数	Energy 勾配 ($\times 10^{-3}$)	摩擦 速度 (cm/s)	無次元 掃流力	通水 時間 (min)
H-1	1.90	1/200	1.36	0.77	5.43	2.62	0.0429	61.5
H-2-1	4.02	1/200	2.11	0.84	5.57	3.62	0.0664	330
H-2-2	4.02	1/200						26.5
H-2-3	4.02	1/200						62.3
H-3-1	5.6	1/100	2.06	1.23	9.62	4.24	0.112	73
H-3-1	5.6	1/100						15
H-4-1	4.02	1/200	2.31	0.73	5.0	3.22	0.0648	11.67
H-4-2	4.02	1/200	2.30	0.74	5.0	3.21	0.0645	12
H-5	4.02	1/200						
H-6	4.02	1/200	2.11	0.84	5.0	3.09	0.0596	13

実験条件は表-1に示したとおりであって、Run H-1、H-2-1 及び H-3-1 では砂州が平衡状態に至るまでの過

程を対象として通水と停水を数回繰返し、とくに Run H-1 及び H-2-1 では河床形状を詳しく測定した。一方、Run H-2-2, H-2-3 及び H-3-2 は、砂州の形成初期過程を対象として、河床面に人工擾乱を与えた実験であり、Run H-4-1, 2, H-5 及び H-6 は通水開始直後に現われる河床の斜め縞の挙動を把握しようとした実験である。この実験条件からわかるように Run H-2-1 が基準実験であって、Run H-1 及び H-3-1, 2 を除いて設定条件は同一であり、いずれも形成領域区分図¹⁾で交互砂州の発生領域の中央付近になるように水深 h が $h = 2\text{cm}$ 前後になるようにした。

2. 2 実験結果の概要

実験結果のうち、基本実験の Run H-1, H-2-1 及び H-3-1 で現われた河床形態の特徴について述べ、砂州の発生過程については既発表分²⁾とまとめて別の機会に報告したい。

Run H-1 では、砂州の形成速度をできるだけ緩慢にして形成初期に生じている現象を把握しようと考えて、流量を小さく設定した。このために掃流力が低くなり、河床砂粒の動きはまばらとなって、砂州の発生は極めて遅れ僅かに最上流部に前縁が形成されたにとどまって、下流区間では縦筋のみ形成された。このように現象の進行が余りにも遅いようであったので、通水を76分で打ち切った。上流部のみで砂州前縁が形成された原因としては給砂や流入水の僅かの偏りや上流端の整型の垂みの影響などが考えられよう。しかしながら、発生過程に関する固定床実験の結果²⁾では、ほぼ同一の水利条件でも砂粒運動の活発な場合には斜め縞の、不活発な場合には縦筋の発生することが観察されているので、これは水路上方から落下させた給砂のために水流や砂面が乱されて局所的に砂粒移動が活発になったためと判断される。

つぎに、Run H-2-1 では、通水を始めると直ちに水路全体にわたって斜めの縞模様が生じ、図-1のように、1回目の停水($t = 9'$)ではやや明確になった砂州が水路の最上流部や最下流部に見られる。しかし、全般に各砂州の前縁は交錯し、明確なのは1つの砂州のみで前後に交互砂州状の接続関係は確立しておらず、水路全体で1つの波長が定義できるという段階には至っていない。 $t = 45'53''$ になると、上流部から中流部まで砂州が規則正しく並び、一連の前縁が明瞭になって波長が明確に定義できるようになる。その後、 $t = 200'$ までは明確になったこれらの砂州が波高を増加させながら流下している。これらの最上流の砂州よりも上流の区間では、新たに生じた低い波高の砂州が速かに流下してくるために砂州の位相が合わず、波長、波高が増減を繰返す傾向が認められる。

Run H-3-1 では、通水に伴って水面全体を standing waves が覆い、 $t = 9'$ では河床面に多くの斜め縞が発生していて、その分布密度は Run H-2-1 に比べ

とかなり高く、 $t = 23' \sim 73'$ の間でも明確な発達途上の砂州の上に比較的密に斜め縞が載っている。この斜め縞は、載っている砂州の前縁の方向に大体平行しているがやや短い、低い段差のものであって、通水時の standing waves の痕跡である可能性が高い。

以上の Run H-2-1 及び H-3-1 について、波長と波高の時間的変化をその発達過程のデータ³⁾と比較した結果、砂州の発達は両者ともこれまでの場合と同様の経過を辿っていることが認められた。また、検討した平均横断河床形状は時間的に高さの増加する蒲鉾型を示し、この平均横断河床形状から算定した横方向流砂量強度は従来の値と良く一致していた。さらに、この横方向流砂量強度は明かに1つのピークを持った時間的変化をしていて、発達機構から定性的に推定される土砂移動状況の変化とも合致していた。発達時間 T_E も波長、波高及び流砂量

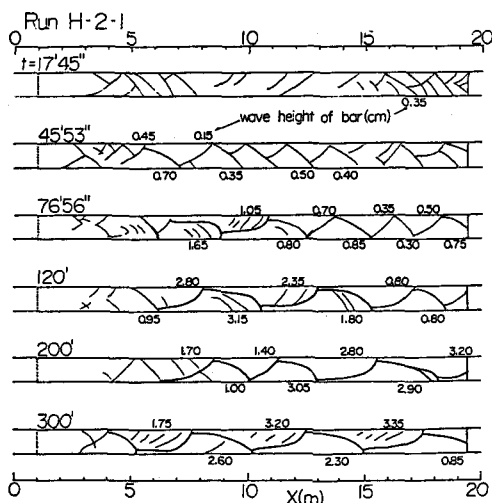


図-1 交互砂州の形成過程

による予測式³⁾の値とはほぼ一致しており、予測式の妥当性も確認できた。

2. 3 初期過程における河床形態の時間的変化

図-1の形成初期段階の見取り図では、前縁の配列に左右交互の規則性は低く、一見複列砂州のようにみえる交錯した準砂州状の河床形態が大半を占める。しかし、 $t = 45'53''$ のように比較的明瞭になった前縁の先端の下流側には斜め縞の形態が交互に規則的に連なっている。また、 $t = 76'56''$ では、一連の砂州の前縁の下流に接続している斜め縞の段差は上流側のものよりも大きくて発達早いことが指摘できる。同時に、その段差は砂州の波高の流下方向への減少傾向に対応して下流側ほど小さくなっており、このような減少傾向は $t = 120'$ でも継続している。

つぎに、Run H-2-3 で計測した形成初期の砂州前縁や斜め縞の移動速度 v_B の時間的変化を示せば図-2のようになる。図中の丸で囲んだ数字は測定した個々の砂州を表しているが、いずれも時間的に移動速度は減少している。この減少は波高の発達によると考えられるので、移動速度と流量及び波高との関係について検討する。図の最終時点におけるこれらの砂州の平均波高は $Z_B = 0.3\text{cm}$ であり、この間の単位幅当りの流量 q_B は $q_B = 0.0209\text{cm}^2/\text{sec}$ である。これより、空隙率を50%として移動速度を求めれば $v_B = 0.14\text{cm}/\text{sec}$ となつて、実測の平均値 $v_B = 0.14\text{cm}/\text{sec}$ と一致する。この結果から、形成初期であっても上流からの流砂が前縁に堆積して砂州が前進すると推察され、しかも、本実験のように掃流力が余り大きくない場合には全流砂量が移動に寄与していることがわかる。

2. 4 交互砂州の波長の発達過程

上述の初期過程における河床形態の時間的変化に基づけば、一定波長の初期擾乱がある規模の高さから一様に増幅して明確な交互砂州になるという河床変動の線形安定理論で前提としている過程は、実際の場合非常に現われにくいと判断できる。すなわち、砂州は河床の全区間である程度一様に生じてくるのではなくて、一部区間に何等かの原因で速かに形成された砂州の影響がその下流の全区間に伝わってゆき、連鎖反応的に新たな砂州の前縁が順次下流側に形造られていくという過程を進む。しかも、このようにして形造られた前縁の初期長は水路幅の2倍以下であつて、波長は時間の経過とともに伸長していく。

以上のような砂州の形成過程は、勾配が1/14と急な実験の場合⁴⁾でも観察され、通水直後に最上流部に生じた砂州から非常に速かに交互砂州の形成が下流に伝播していった。また、長区間の側岸侵食性流路における実験⁵⁾の記録写真の検討結果では、中流区間に発生した一連の交互砂州の下流側には、いずれの時点においても直線的な前縁を持った小波高の砂州の存在が確認され、そこでは常に新たな砂州が形成されていたものと判断された。同様に、複列砂州の場合¹⁾でも、図-3に示したように、上流部に現われた砂州の直下流に順次前縁が形成されていった。生じた前縁は最初は短かつ発生時刻が異なるため、に左右非対称であるが、流下しながら伸長するにつ

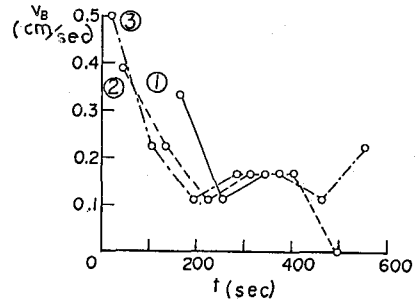


図-2 形成初期の砂州の移動速度

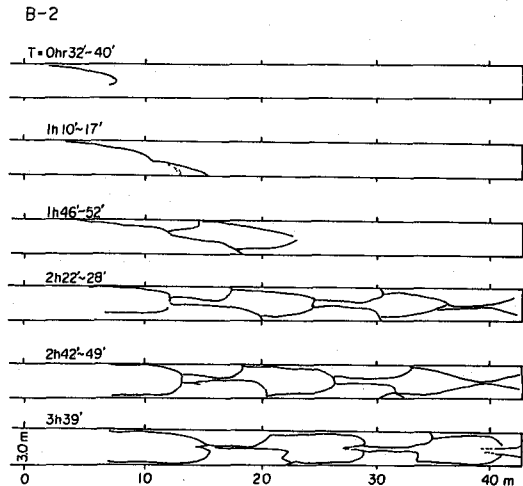


図-3 複列砂州の形成過程

れて規則的な対称形となっていく、同時にその下流に新しい砂州の前縁を発生させている。このような最初に発達した砂州の下流側に展開する砂州の伸長と波高の発達の状況を Run H-2-1 について、最初の砂州の

先端とともに移動する座標系で示せば図-4のようである。また、同図の砂州①～③の波長と波高の時間的変化を、同様に上流から砂州の形成されていった規模の大きい実験 Run D-2 の場合⁶⁾とともに図-5に示す。図-5の Z_B の変化は、測定時刻の関係で折線で表されていることを考慮すれば、各砂州ともほぼ同じであって、一定の時間間隔ごとに平行にずれていると判断して差支えない。一方、 I_B は、上流側の砂州と下流側の砂

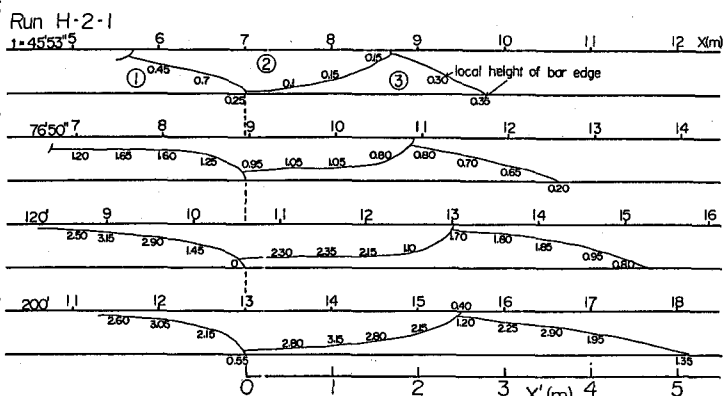


図-4 移動座標系でみた交互砂州の波長の発達過程

の Z_B の差が相対的に大きい形成初期段階で急速発達しており、その差が小さくなるとはほぼ一定の平衡的な値に落着いている。

したがって、波長は、上流ほど早い砂州の発生時刻の差のために波高の発達に時間的なズレが生じ、上流の砂州ほどの移動速度が低くなって伸長するものと考えられる。以下では、このような発達過程の特徴の基いてその機構について単純な考察を加える。

3 交互砂州の波長の発達機構

いま、最上流の砂州を添字(0)で表し、(砂州)₀の影響によって連鎖反動的に形成される砂州を上流から下流に向って順に添字(1, 2, ...)で示すことにする。

はじめに、初期における波高の発達を著者ら⁶⁾のこれまでの考察と類似してつぎのように考える。すなわち、砂州の発達は、横断方向成分を持つ流砂量フラックスが、それと交わる方向に斜めに走る砂州の前縁にトラップされて堆積することによって生じると考えられる。この横断方向成分は、砂州上の流況特性⁷⁾によれば、(砂州)₀上ではそれによる流量集中から生じ、その下流では集中した水流の逆方向の発散に付随してもたらされると推察される。単純に、砂州の形成初期では、砂州の発達による横断方向勾配の影響は殆ど無いとして、平均的には土砂粒子の移動方向 $\tan \gamma$ と流向 $\tan \beta$ に差が無いものと考え、この平均的な土砂の横断方向の移動強度 q_{BY} は流下方向の流砂量 q_{BX} が平均の流砂量 q_B に等しいとして、

$$q_{BY} = \tan \gamma \cdot q_{BX} = \tan \beta \cdot q_B$$

このような土砂の動きによって、図-6のように、(砂州)₀の1/2区間と(砂州)₁の全区間における q_{BY} の流

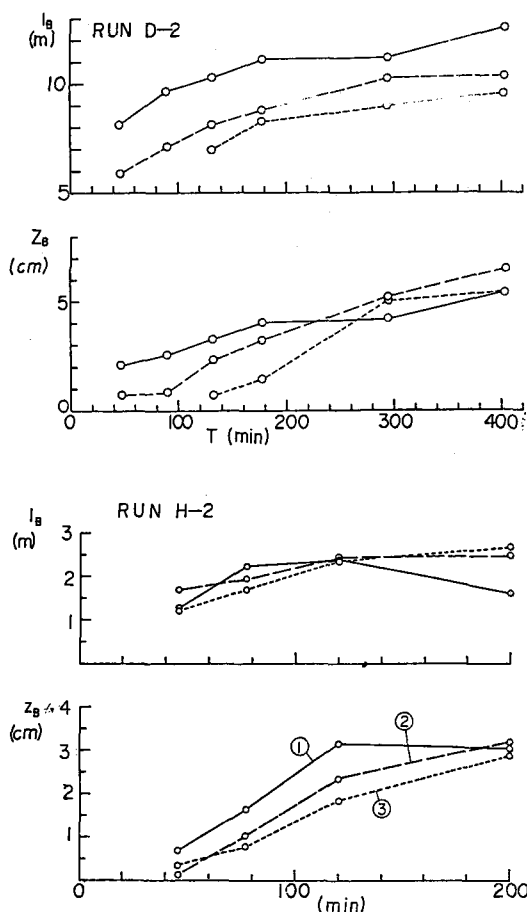


図-5 交互砂州の波長と波高の変化

入によって、(砂州)₁の斜線で示した部分に(砂州)₀の先端で Z_{B1} となるような三角錐状の堆積が生じると考える。いま、 Δt 間における Z_B の変化量を ΔZ_B とすれば、砂の空隙率を λ として、

$$(1-\lambda)B\Delta Z_B = 9q_{BY}\Delta t \quad (1)$$

(砂州)₀の発達に関わる土砂の移動方向 $\tan\gamma_0$ には、(砂州)₀によって変化する流向のみを考えて、交互砂州上の流況特性に関する研究結果⁷⁾から、 $\tan\gamma_0 = K_0(Z_{B0}/h)$ と表す。また、(砂州)₁の場合には、上流側の砂州によって集中した流量の発散に伴う流向変化⁷⁾がそれ自体のものに重なるので、次式で表す。

$$\tan\gamma_1 = \alpha \tan\gamma_0 + K_0(Z_{B1}/h)$$

さらに、砂州の伸長に伴って上流側の砂州の影響は減少していくと思われるので、 $\alpha = \alpha_0 e^{-Rt}$ とする。これより、(1)式を微分形に書改めて、

$$dZ_{B0}/dt = KZ_{B0}, \quad K = 9K_0q_B/\{(1-\lambda)Bh\} \quad (2)$$

$$dZ_{B1}/dt = \alpha K(Z_{B0} + Z_{B1}) \quad (3)$$

上の2式を(砂州)₀の高さが粒径 d の n 倍に達した時点でその下流に(砂州)₁が md の高さから発達し始めると考え、その時点をと $t=0$ とするという初期条件の下で解くと、

$$Z_{B0} = nd \cdot e^{Kt} \quad (4)$$

$$Z_{B1} = M(t)d \cdot e^{Kt}, \quad M(t) = m + K\alpha_0 n(1 - e^{-Rt})/r \quad (5)$$

初期の波高が指数関数で発達していく上の結果は従来の線形安定理論の解と定性的に一致している。つぎに、(5)式から、(砂州)₁が nd の高さに発達して、その下流に高さ md の(砂州)₂ができてくる時間 t_s を、その時点では $1 \gg e^{-Rt}$ となっているとして求めれば、

$$t_s = (1/K) \ln \{Rn / (Rm + \alpha_0 Kn)\} \quad (6)$$

また、(砂州)₀も高さ md から発達してきたものとする、それが nd になるまでにかかった時間 t_{s0} は、

$$t_{s0} = (1/K) \ln(n/m) \quad (7)$$

したがって、 $t_s < t_{s0}$ となって、このような単純な考察にもかかわらず、ある明確な1つの砂州の下流に生じた砂州は速かに発達するという形成過程の基本的な特徴がよく表わされている。

一方、(砂州)₀の移動速度と(砂州)₁のそれとの差によって(砂州)₁の波長は増加するので、その初期値を l_{B11} とすると、

$$dl_{B1}/dt = V_{B1} - V_{B0} = \{ (1/Z_{B1}) - (1/Z_{B0}) \} q_B / (1-\lambda) \quad (8)$$

$$\therefore l_{B1} = l_{B11} + \left[\int_0^t \{ M(t')d \}^{-1} e^{-Kt'} dt' + (1 - e^{-Kt}) / Knd \right] \cdot q_B / (1-\lambda) \quad (9)$$

(9)式中の積分は困難であるので、 $M(t)$ をその積分時間の平均値 m' で置換えて積分し、整理すると、

$$l_{B1}/B = l_{B11}/B + (n - m')h(1 - e^{-Kt}) / (9Kum'nd) \quad (10)$$

(10)式の t に(6)式の t_s を代入して、つぎの砂州が発生する時点の砂州の波長を示めせば、

$$l_{B1s}/B = l_{B11}/B + (n - m's)h \left\{ 1 - (Rm + \alpha_0 Kn) / (Rn) \right\} / (9Kum'snd) \quad (11)$$

さて、指数的に波高が発散していく(4)、(5)式は、平衡的な状態に達するまでの砂州の波高の増加過程には適用できない。しかし、波長の平衡状態は2つの砂州の移動速度に事実上の差が無くなった時点で現われ、その状態への移行は(10)式の指数関数で示されているとみなされる。したがって、その平衡波長 l_{B1E} は(10)式の極限として求められて、

$$l_{B1E}/B = l_{B11}/B + (n - m'E)h / (9Kum'E nd) \quad (12)$$

最後に、これらの式の定数に実験から妥当と思われる数値を代入して予測される波長を求め、予測式の適

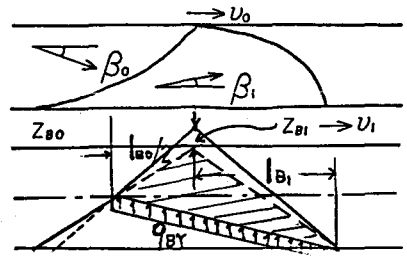


図-6 波長の発達の模式図

合性について簡単に検討する。Run H-2-1 を対象にすると、 $B=50\text{cm}$ 、 $h=2.1\text{cm}$ 、 $d=0.099\text{cm}$ 、 $q_B=0.02\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $\lambda=0.5$ であり、交互砂州上の流況実験⁷⁾ から $K_U=0.1$ 、 $\alpha_a=0.8$ と与える。一方、 m 及び n は、実験の観察から最初に明確になる砂州の前縁の段差は砂粒径の6~8倍、その下流にあらわれた斜め縞の高さは砂粒径の1~3倍であったので、それぞれ $n=7$ 及び $m=2$ とする。また、上流砂州の影響は2,30分で1オーダー程度小さくなるとして、 $R=0.001\text{sec}^{-1}$ と仮定する。これより、 K は $K=0.000343\text{sec}^{-1}$ となり、 $t_E=1690\text{sec}$ が得られる。

つぎに、 $m's$ は、 $t=0\sim t_s$ における $(1-e^{-kt})$ の平均値を0.2とすると、 $m's=2.4$ となり、 $m'e$ ではそれを0.5として、 $m'e=3.0$ となる。これらの値を用い、初期値を $l_{B11}=B$ とするとつぎの結果が得られる。

$$l_{B1s}/B=3.84, \quad l_{B1E}/B=5.49 \quad (13)$$

この結果は実験値に良く一致しているといえ、ここに述べたような単純なモデルによって交互砂州の波長の発達機構がかなり説明できることがわかる。しかしながら、いずれの予測波長も一部の実験定数に対しては比較的敏感に変化するので、これらの定数の影響やその物理的意味について今後も詳しく検討する必要がある。

4 あとがき

交互砂州の波長の発達機構について、はじめに、交互砂州の形成と波長の発達の過程に関する実験と結果の概要について述べ、ついで、波長の発達過程の特徴として、砂州は全区間で一様に形成されるのではなく、何等らかの原因で速かに発達した砂州の影響が下流の全区間に順次及んでいき、その時間的な発達の遅れに起因する移動速度の差によって波長が伸びていくことを明かにした。最後に、このような波長の発達機構に、これまでの研究成果に基いた単純な考察を加え、その発達を記述する式を誘導するとともに2種の波長の予測を試みた。その結果は実験値に良く一致していて、考察が妥当なものであったことを示していた。

今後、本文でも指摘したように、発達機構の考察における各実験定数について検討するとともに、平衡状態に接続していけるように考察を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 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、土木学会水理委員会、1978、pp.275-282.
- 2) 藤田裕一郎・村本嘉雄・古川隆司：中規模河床形態の発生過程について、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、II-192、1984、pp.383-384.
- 3) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二：交互砂州の発達過程に関する研究、京都大学防災研究所年報、第24号B-2、1981、pp.411-431.
- 4) 村本嘉雄・藤田裕一郎・小池 剛・古川隆司：中規模河床形態の形成条件に関する実験、昭和56年度関西支部年次学術講演会講演概要、土木学会関西支部、II-50、1981.
- 5) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二・塩入淑史：河道の変動に関する研究(1)一流路の変動過程に関する実験一、京都大学防災研究所年報、第13号B-2、1970、pp.243-260.
- 6) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二・小池 剛：交互砂州の発達機構、第26回水理講演会論文集、土木学会水理委員会、1982、pp.25-30.
- 7) 藤田裕一郎：交互砂州上の流況特性に関する実験的研究、第24回水理講演会論文集、土木学会水理委員会、1980、pp.329-337.