

多列砂州の形成・変化過程と細砂河床の影響

Formation and Changes of Multiple Sand Bars

and

Influence of Fine Sand Bed

藤田 裕一郎*・永田 順宏**・村本 嘉雄***

by Yuichiro FUJITA Nobuhiro NAGATA and Yoshio MURAMOTO

Decreasing process of bar modes, which was found in basic experiments on plain bed and is regarded as a fundamental characteristic in formative process of multiple bars, is discussed with initial bar amplification of various modes evaluated by an existing linear stability theory. Specific features of multiple bar formation with micro scale bedforms are summarized from experiments carried out on a fine sand bed, where the mode decreasing process was also observed. Validity of the existing stability theory is examined to apply to prediction of changes in multiple bar modes on ripple-covered fine sand beds.

keywords: sand bar, multiple bars, stability theory, fine sand bed

1. まえがき

直線河道における中規模河床形態の形成・発達過程を理解する上で、多列の砂州は、形成される形態の自由度が高いという点で、移動床水理の最も基礎的かつ一般的な特性を示す現象の一つと考えることができる。同時に、その上の流れも大きな自由度を持ち得るために、しばしば局所的に集中して河床・河岸に過度の洗掘を引き起こしている。このため、多列砂州の水理特性を明確にしておくことは河道災害の防止・軽減の面でも重要である。このような観点から、直線河道における多列砂州の形成過程について、これまで基礎的な研究を進め、従来の交互砂州に関する研究成果を拡張して、その水理特性を明らかにしてきているが、その形成過程の大きな特徴として、平坦河床に形成される多列砂州が、時間経過及び流下距離とともにモードを減少させながら低モードのより大きな砂州に発達していくことを見出している。

この砂州モードの変化過程については、既に、個々のモードの砂州に対して交互砂州の平衡波高と発達時間に適用した大まかな予測法を示している^{1,2)}が、本論文では、最初に、モードの減少について、砂州の初期増幅率に基づいた簡単な考察から説明を試みる。ついで、細砂河床で行った多列砂州の形成実験とその結

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

** 工修 日本道路公団豊科工事事務所

(〒399-82 長野県南安曇郡豊科町大字豊科4278の1)

*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

果を概述し、実験で観察された多列砂州の形成とその変化について、既往の線形安定論³⁾から求めた各モードの増幅率との対応を検討し、それらの形成・変化に対する細砂河床の影響について考察する。

2. 多列砂州モードの変化過程

河道に形成される多列砂州の状況やその挙動を予測するためには、少なくとも基礎実験で観察される基本的な現象である砂州モードの減少過程を把握しておく必要がある。この過程を予測するには、第一に各モードの発達速度を的確に見積らねばならない。さらに精度を上げるためには、各種モードの砂州相互の非線形的な干渉作用の解明が重要になってくると思われる。しかしながら、ここでは、単純に各モードの砂州は相互に干渉することなく、平衡波高にごく近い値まで線形解析で得られる増幅過程を持続させると考えて低モードへの移行時点の説明を試みる。すなわち、図-1のように、モード m の個々の砂州は、平衡値 $Z_{s,m}$ ($m=1, 2, \dots$) に向かってそれぞれの増幅率に従って発達していき、平衡値に近づくにつれて非線形効果が現れて、点線で示されるように発達速度を減少させると考えられるが、ここでは簡単のために、 $Z_{s,m}$ まで初期値 η_0 の振幅 η の擾乱が線形解 $\eta = \eta_0 \exp(k C_i t)$ に従って増幅すると仮定する。ここに、 k は無次元波数、 C_i は増幅係数、 t は無次元時間である。いま、初期擾乱を平均粒径 d_m 程度とみなして、 $\eta_0 = d_m$ とすれば、 η が $Z_{s,m}$ に達する発達時刻 $T_{s,m}'$ は

$$T_{s,m}' = H_0 \ln(Z_{s,m}/2d_m) / (U_0 k C_i) \quad (1)$$

となる。ここに、 H_0 : 平均水深、 U_0 : 平均流速、 η は砂州の波高 Z_s と $\eta = Z_s/2$ の関係にあるとしている。平衡波高以下の同一の波高に到達する時刻は、当然最大増幅率を示すモードの砂州が最も早い(図-1の場合 $m=3$)。しかし、そのモードが高い場合 $Z_{s,m}$ は通常あまり大きくないので、 $Z_{s,m}$ の大きい低モードの砂州はそれよりも遅れたある時点でその波高に達する。この砂州はさらに発達していくので、この追いついた時点は砂州モードの移行点の指標と考えられる。表-1は後述のRun D-5の平均的な水理条件について、黒木の線形解³⁾と砂州の波高予測式^{1,2)}を用いて $T_{s,m}'$ を計算した結果であって、 $m=3$ の砂州の発達時間 $T_{s,m}'=26.0$ 分が最も短い、その平衡波高 $Z_{s,m}=2.23$ cmに $m=2$ の砂州が到達するのは $T_{s,m}'=29.3$ 分、また、そのまま発達が続けば平衡波高 $Z_{s,m}$ に到達する時刻 $T_{s,m}'$ も $T_{s,m}'=34.3$ 分と見積もられているので、河床は速やかに $m=2$ の砂州が卓越する形態へ移行すると予測される。

なお、平坦河床での多列砂州形成の既実験について試算した増幅率²⁾は、最大増幅モード近傍のモード間では、増幅率の値が10%以上の相違する場合は少なく、とくに、高次の砂州形成の場合、後述のRun D-8, 9の場合と同様に、 m の広い範囲にわたって増幅率の差は数%以内であった。これは、交互砂州の発達時間の予測式が多列砂州の場合にある程度単純に適用できることを示しており、これまでのそのような検討^{1,2)}で妥当な結果が得られたことと一致している。こうした予測法は、線形理論で近似できる限界が不明であるので不十分であるが、このような具体的な適用を通じて線形理論の限界を追究しておくことも重要である。

なお、平坦河床での多列砂州形成の既実験について試算した増幅率²⁾は、最大増幅モード近傍のモード間では、増幅率の値が10%以上の相違する場合は少なく、とくに、高次の砂州形成の場合、後述のRun D-8, 9の場合と同様に、 m の広い範囲にわたって増幅率の差は数%以内であった。これは、交互砂州の発達時間の予測式が多列砂州の場合にある程度単純に適用できることを示しており、これまでのそのような検討^{1,2)}で妥当な結果が得られたことと一致している。こうした予測法は、線形理論で近似できる限界が不明であるので不十分であるが、このような具体的な適用を通じて線形理論の限界を追究しておくことも重要である。

3. 細砂河床における多列砂州の形成過程

細砂河床における中規模河床形態の形成過程では、相対的に掃流力の低い状態で現れる砂漣と高い状態で

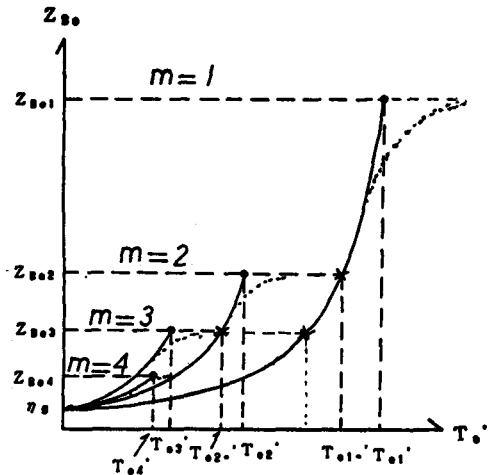


図-1 砂州モードの移行過程に関する模式図

表-1 各モードの平衡波高到達時間

mode	1	2	3	4
$k C_{imax}$ ($\times 10000$)	0.403	0.830	0.935	0.872
$Z_{s,m}$ (cm)	13.93	4.39	2.23	1.38
$T_{s,m}'$ (min)	88.2	34.3	26.0	24.6
$T_{s,m}'$ (min)	70.7	29.3	—	—

$$H_0 = 1.49 \text{ cm}, U_0 = 40.7 \text{ cm}$$

生じ易い浮流砂が現象を特徴付けられる。両者の発生を対象として、多列砂州と網状流路に関する基礎実験を行っているが、実験装置の限界のために水深が小さくなり、浮流砂の影響については明確な特徴を見出すことはできなかった。実験とその経過の詳細は報告⁴⁾しているので、以下にはその概要を説明する。

3・1 細砂河床における多列砂州の形成実験

実験は、幅180cm、長さ15mの鋼製可変勾配水路に平均粒径 $d_m=0.206\text{mm}$ (移動限界摩擦速度 $u_{*c}=1.49\text{cm/s}$; 岩垣式、沈降速度 $w_0=2.25\text{cm/s}$; Rubey式) の鑄物用6号砂を敷均して行った。実験条件は、芦田・道上の抵抗算出法によって流量を予測し、Upper regime (Run D-1, 2, 7~10), Transition に近いUpper regime (Run D-3~6) 及び Lower regime (Run D-11) に対応した3種類の勾配について表-2のように設定した。なお、Run D-9, 10はそれぞれRun D-8, 7の初期過程に相当させている。通水中には水位を測定台車上をトラバースするサーボ式波高計で測定し、停水時に河床高を連続式砂面計で測定して水理量を算定した。また、下流端での採水濃度から全流砂量を計測し、河床の変化を下流端上方から写真撮影した。表-2に、測定水理量、実測全流砂量 q_T 、芦田・道上式による算定掃流砂量 q_s' 、浮流砂量 q_s 及びその比を示している。

実験結果は、河床形態の変化過程から表-2に示したような次の3グループ①~③に大別できる。

① Upper regime の実験：初期段階で河床に $m=6\sim7$ の複列砂州が確認できたRun D-8, 9と通水直後の水面の波だちから $m=3\sim4$ の砂州と判断されたRun D-1, 2, 7, 10の場合がある。ともに早い段階で反砂堆が生じると同時に部分的に水流が集中し始め、chute & poolが形成される。ついで、現れた浮州上に反砂堆の残る $m=2$ 程度の網状流路となる。フルード数は約1.5~2.7であるが、流速係数は複雑な河床を反映してやや小さい。また、浮遊砂量も摩擦速度が浮遊限界を十分に回っているにもかかわらず、かなり小さくなっている。これは水深が1cm以下と非常に小さいために、流れの中に浮遊砂が含まれにくいことによると考えられる。

② Transition の実験：初期に砂漣が形成され、同時に $m=3\sim4$ の砂州の発達も顕著になる。砂州の発達とともに砂州上に形成されていた砂漣は消滅する。砂州の低モード化につれて主流部の砂漣もflushされ、残存するのは主流路以外の水みちと、Run D-3のように早い段階で浮州化した砂州上のみとなる。流速係数には時間的な抵抗増加がみられず、時間とともに砂漣が消滅していったことと対応している。

③ Lower regime の実験：河床全面で砂漣が発達し、砂州はその砂漣の斜め連なりとして現れ、砂漣に覆われたままで発達していく。砂州の発達後も砂州上の砂漣は消滅せず、浮州化した場合でも上には大きくか

表-2 実験条件及び測定された水理諸量

Run No.	Time	Q l/s	h cm	Fr	I_e $\times 1000$	U (cm/s)	V/U	Re	q_T (cm^3/s)	q_s' (cm^3/s)	q_s (cm^3/s)	q_s/q_s'
D-1-1	10'	8.0	0.65	2.71	30.1	4.36	15.7	7.0	—	0.559	0.0220	0.039
-2	27'	8.0	0.76	2.14	27.8	4.53	12.9	7.1	—	0.559	0.0220	0.039
D-2-1	10'	6.1	0.63	2.16	30.1	4.30	12.5	6.8	0.939	0.479	0.0138	0.029
D-7-1	8'	19.8	1.43	2.05	36.4	7.09	10.9	10.4	5.52	2.82	0.284	0.101
D-10-1	1'40"	19.4	1.62	1.67	29.9	6.83	9.74	10.3	7.18	2.49	0.230	0.092
D-8-1	1'30"	3.5	0.50	1.76	34.5	4.13	9.42	5.9	0.527	0.405	0.0078	0.019
-3	22'	3.8	0.60	1.45	34.5	4.52	7.79	6.0	0.635	0.405	0.0078	0.019
D-9-1	2'	3.4	0.49	1.76	35.5	4.12	9.36	5.7	0.457	0.407	0.0108	0.027
D-3-2	30'	7.8	1.05	1.29	9.85	3.17	13.0	5.7	—	0.115	0.0022	0.019
-4	1hr40'	8.1	1.02	1.40	9.81	3.11	14.2	5.5	0.205	0.115	0.0022	0.019
D-5-1	22'	11.0	1.70	0.88	9.42	3.92	9.2	5.9	0.391	0.282	0.0107	0.038
-4	1hr26'	11.0	1.40	1.18	9.97	3.67	11.9	5.5	0.425	0.282	0.0107	0.038
D-6-2	20'	19.9	1.99	1.28	7.94	3.86	14.6	6.2	—	0.382	0.0402	0.105
-4	1hr16'	19.9	1.94	1.36	9.33	4.27	13.8	6.9	0.731	0.382	0.0402	0.105
D-4-1	35'	5.2	1.04	0.92	9.7	3.06	9.43	4.8	0.093	0.012	—	—
-2	1hr45'	4.8	1.41	0.51	10.1	3.70	5.15	5.9	—	0.012	—	—
-5	5hr40'	5.1	1.45	0.55	10.0	3.67	5.52	5.8	0.053	0.012	—	—
D-11-1	22'	9.1	1.68	0.75	2.99	2.15	14.9	3.4	0.063	0.0045	—	—
-2	1hr45'	9.1	2.95	0.31	3.18	3.01	5.6	4.7	0.051	0.0045	—	—
-5	16hr00'	9.1	3.09	0.30	3.72	3.31	4.9	5.2	0.021	0.0045	—	—

つ扁平になった砂漣が残存する。勾配の大きいRun D-4では、モードが $m=5$ から1まで減少するにつれて主流部に流量が集中し、そこでは砂漣が消滅して平坦河床となる。しかし、流速係数は通水初期を除いてほぼ5であり、完全なLower regimeにあると判断される。

3・2 河床形態の形成条件に関する検討

小規模河床形態の形成について、図-2に芦田・道上の領域区分図による検討結果を示している。前節の①の全実験及び③のRun D-11は形成領域と一致しているが、②の全実験及び③のRun D-4は一致していない。本実験の大半は砂粒レイノルズ数 R_{*} が $R_{*}=5\sim7$ の範囲であってかなり小さく、このように砂粒レイノルズ数の非常に小さい場合、砂漣の形成領域は従来の場合よりも無次元掃流力 τ_{*} の大きい方に延びるような傾向が窺われる。

つぎに、多列砂州について、モードの実測値を藤田ら^{1,2)}の領域区分図に示せば図-3のようになる。多列砂州形成領域の下限線よりも下部の領域では網状化した実験値のみがプロットされており、砂漣の発達したRun D-11を除いて、多列砂州の実験値は形成領域の範囲に一致している。しかし、下限線の上方にも網状化した実験値がかなり混じっており、細砂河床の特徴として、高モードの段階でも網状化していくことが指摘できる。これは比較的高次の砂州の発達による流量集中であっても河床が容易に深掘れし、浮州が生じるためと思われる。また、同図に示しているように、Run D-11では砂州発生に関わる擾乱のパラメータ Δ として、粒径 d の代わりに $\Delta = Z_r/4$ (Z_r : 実測の砂漣波高)を用いるとこれまでの区分線とよく合致する。同様に、Run D-4についても同じパラメータを用いれば、さらに従来の区分線と良く一致するようになる。

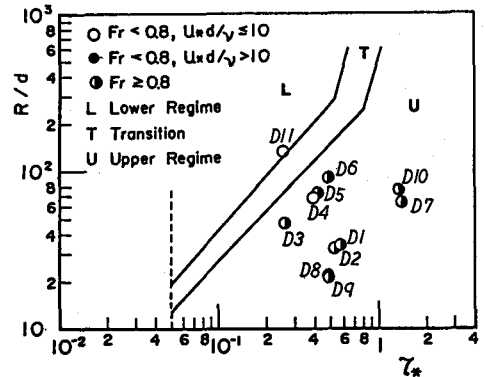


図-2 小規模河床形態の形成に関する検討

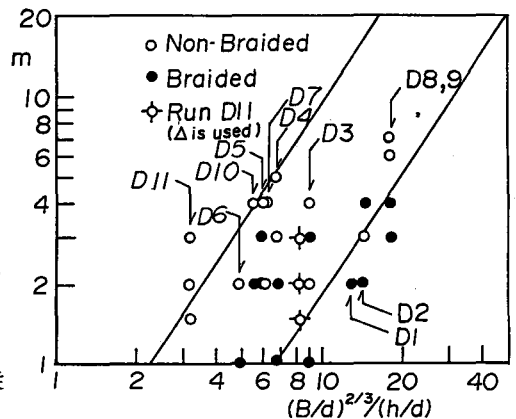


図-3 多列砂州の形成と網状化に関する検討

4. 多列砂州の形成と増幅率に関する検討

4・1 Upper regime 及び transition における多列砂州の形成と増幅率

はじめに、前章の Upper regime 及び transition における①、②の実験のうちから、初期に高モードの砂州の形成が確認されたRun D-8, 9の測定水理量を用いて、黒木・岸³⁾の線形解から各モード毎に計算した無次元最大増幅率 $K C_{i, \max} \times 10^3$ の値を示すと図-4のようである。 $m=1\sim 25$, 26の砂州について $K C_{i, \max} > 0$ であり、このうちの最大増幅率は $m=12\sim 13$ の砂州となっているが、 $m=10\sim 16$ の増幅率の変動は最大値の約10%以内であって、既述のように、広い範囲の砂州の共存の可能性が示されている。しかし、通水直後に停水したRun D-9の1分30秒で確認されたモードは高々6でしかなく、 $m=6$ の増幅率は最大値の約60%にすぎない。最大増幅率の砂州の平面形状は、砂州幅14~15cm、波長60~70cmと予測されるので、通水直後に水面に走る斜め筋の方向とも一致しないが、こうした初期形態の検討も今後の課題である。また、表-2のように、これらの実験では upper regime でも流水抵抗が大きかったため、Meyer-Peter・Muller式に従って有効掃流力を簡単に考慮した検討も行ったが、結果は主として無次元増幅率が流砂量に対応して全体的に減少するだけであった。このような傾向は、transition や lower regime の実験の検討でも同じように認められたが、lower regime の場合、有効掃流力が限界掃流力以下になる場合もかなり生じた。

②の Transition のRun D-3, 5及び6の計算結果は図-5に示したようである。Run D-3では、正の増幅率の範囲が初期の $m=1\sim 11$ からその後 $m=1\sim 8$ と狭まり、最大増幅率のモードも $m=5$ から3に減少しているが、このような減少の理由は現在不明確である。一方、Run D-5, 6では、それぞれ正の範囲が $m=1\sim 7$, $1\sim 4$, 及び最大増幅率が $m=3$, 2であって時間的には変化していない。いずれの場合も線形理論による予測値は、実験の観察結果と大体一致しているが、比較的高い増幅率を有する $m=1$ の砂州への移行は流量が小さく、かつ、水路長が限られていたために観察されなかった。

4・2 Lower regime における多列砂州の形成と増幅率

平坦河床を前提とした抵抗則を用いている黒木・岸の理論は、そのままでは砂漣の発達したRun D-11のような場合には適用できない。しかしながら、砂漣の形状は水深に代表されるような流れの幾何形状の影響をあまり受けないので、その発達は、河床材料が大粒径になった場合と同様、単に河床の粗度を増加させ、流砂量を減少させる効果を持つものと考えることができる。したがって、流砂量に対して

して水深に依存するような非線形の有効掃流力の評価は必要ないので、河床せん断力の振動部分の式形は変わらず、平均流場の水理量に実測値を与えてやれば、河床変動の安定性は基本的に平坦河床と同一の式で評価できる。図-6には、そのようにして、Run D-4, 11の実測水理量を与えて計算を行った結果を示している。いずれの実験でも、正の増幅率の範囲は時間的に広がる傾向にあって、それとともに、最大増幅率のモードは、Run D-4では $m=5$ から7へ、一方、Run D-11では $m=2$ から3へと高くなり、増幅率の値も、Run D-4の最終時点を除いて上昇している。これは細砂河床では、砂漣の発達に伴って形成される砂州形態が時間的により高モードの方向へシフトしていくことを表しており、平坦河床での時間的減少とは一致しない傾向である。

以上から、逆に、砂漣が未発達の状態にあったRun D-11の通水後20分の段階で、その時点の水理量に対応した最大増幅率を持つ $m=2$ の砂州が、その後砂漣よりも早く発達していれば、砂漣が覆い得た河床領域は砂州によって局所的に制限され、観察されたものとは異なった砂州形態が生じたと思われる。このように、細砂河床では、砂州と砂漣の発達速度の関係が現象の支配要因として重要になる場合がある。実際には、Run D-11では、河床全体が砂漣で覆われた後の実験中期に砂漣の連なりを前縁とする $m=3$ の砂州が形成されており、この場合は、実測の水理量を用いた線形理論の予測結果は観察と一致する。一方、Run D-4の場合では、

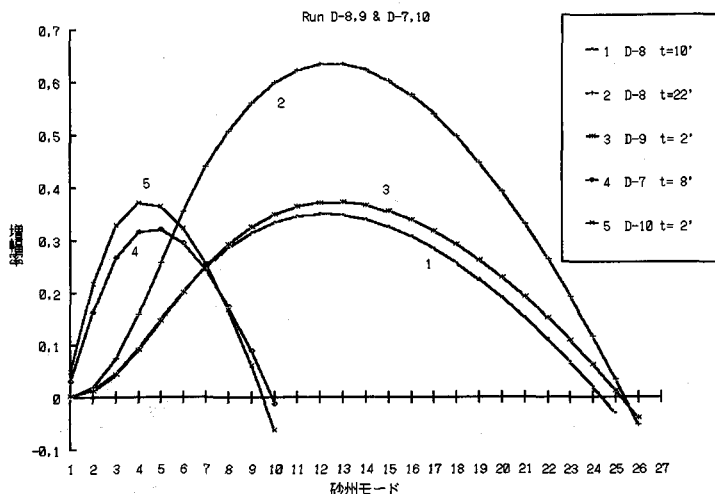


図-4 upper regime 実験の多列砂州の無次元増幅率

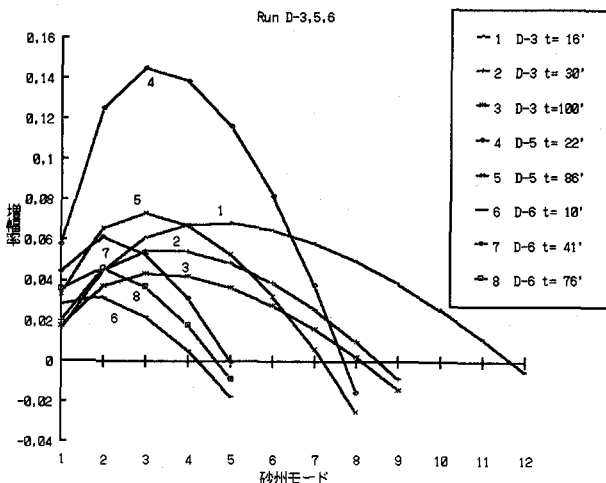


図-5 transition 実験の多列砂州の無次元増幅率

砂州の発達とともに主流路の砂漣が消え、①、②の実験と同様に、砂州モードも順次低下していったので、線形解のみでは砂州の形成・変化過程を予測できないようである。

同様の検討は砂漣の発達した水深・粒径比の大きいこれまでの実験についても行っている。図-7は砂漣の発達だけでも数10時間以上を要したRun G-1⁶⁾の増幅率の時間的変化であるが、時間の経過とともに、2列の砂州の増幅率が単列のものを逆転し、その後差を開いていっていることが判る。これは実験の最終段階で複列砂州が多く個所で認められたことと一致している。

5. あとがき

本論文では、最初に、基礎実験でみられる多列砂州のモード減少過程について砂州の初期増幅率に基づいた簡単な考察から予測を試み、ついで、主に、細砂河床で行った多列砂州の形成実験に関して、実験で観察された多列砂州の形成とその変化について、既往の線形安定論から砂州の増幅率を求めて実測値との対応を検討し、多列砂州の形成・変化に及ぼす細砂河床の影響について考察を加えた。

現在、河床砂州の形成に関しては、非線形安定解析及び数値解析が主流となってきているが、多列砂州の形成・変化過程まで、一気に理論解析・数値解析を適用するまでには至っていないように思われる。こうした複雑な現象に関しては、できるだけ単純な理論と実験事実との比較検討を行って、その適用限界をつかみ、そこから新しい理論の構築を進めていく必要性も高いと思われる。今後もこうした観点から、さらに考察を進めていくつもりである。

【参考文献】

- 1) 藤田裕一郎・赤松英樹・村本嘉雄：網状流路の形成過程，第31回水理講演会論文集，pp.695-700，1987.
- 2) Fujita, Y.: Bars and channel formation in braided streams, River Meandering, AGU Water Resources Monograph 12, pp.417-462, 1989.
- 3) 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，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984.
- 4) 藤田裕一郎・永田順宏・村本嘉雄：細砂河床における網状流路の形成実験，京大防災研年報，第32号B-2，pp.595-618，1989.
- 5) 藤田裕一郎・村本嘉雄・古川隆司：中規模河床形態の形成条件，京大防災研年報，第25号B-2，pp.429-449，1982.

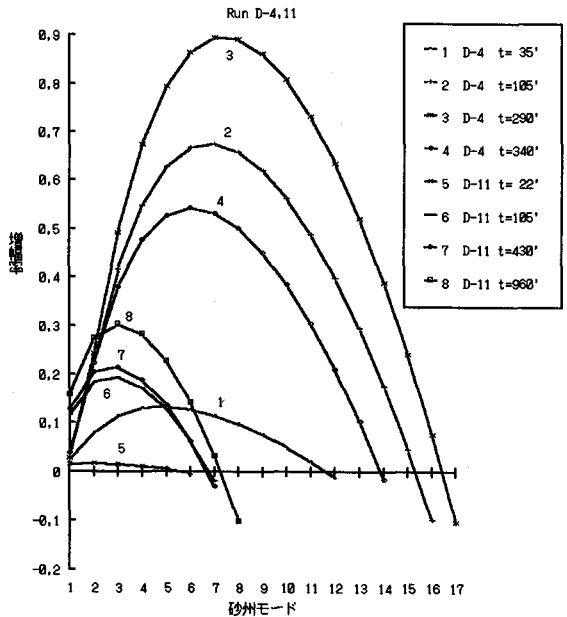


図-6 lower regime実験の多列砂州の無次元増幅率

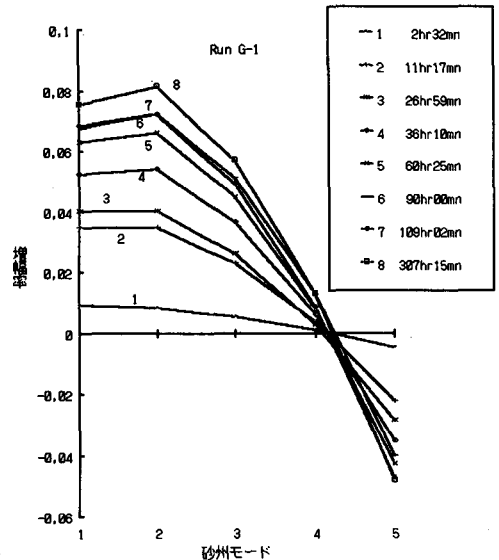


図-7 砂漣河床上の砂州の無次元増幅率