

砂漣河床における中規模河床形態の形成過程

Meso Scale River Bed configuration on Ripple-Covered Bed

京都大学防災研究所 藤田 裕一郎 Yuichiro FUJITA
 京都大学防災研究所 村本 嘉雄 Yoshio MURAMOTO
 (株)日本工営 古川 隆司 Takashi FURUKAWA

Formative process of meso scale river bed configuration has not been clarified under high ratio of depth to grain size, hence on ripple covered bed. In the previous study, being based on experiments conducted under this ratios larger than 10^2 , characteristics of the formative process were pointed out and a tentative criterion was proposed for the formative conditions of bars on ripple-covered. Several experiments were added in the present study under various conditions in order to verify the validity of this criterion. This criterion can be used with a slight modification of a parameter, depth to disturbance height. Physical significance of this parameter was discussed from flow resistance.

Keywords: river bed configuration of meso scale, sand bar, bedform, ripple

1. 概 説

中規模河床形態に関する理論の検証や考察の基礎となる実測資料のうちで水深・粒径比が 10^2 を越えるものは大半が河川のものであって、水路実験資料がほとんどないために、砂州形成時の水理条件は明確に把握されてきてはいない。同時に、従来の実験では砂州の基本特性の把握が目的とされていたために砂漣や砂堆の発生の抑制が図られたこと、及び実験規模の制約から平坦河床や反砂堆の形成に対応した比較的大きな勾配が選択されことのために、中規模河床形態と lower regime の河床波との共存や両者の相互作用に関する実測資料もほとんど得られていない。したがって、水深・粒径比が容易に 10^3 を越える河川の砂州の諸特性は、流路変動に関する理論が急速に発展した現段階においても推定困難な状況にあるといえよう。

以上より、著者ら¹⁾は水深・粒径比が 10^2 を越える lower regime の条件で中規模河床形態の形成過程に関する実験を大型水路で行い、砂漣で覆われた河床における砂州の形成過程の特徴を明確にし、小規模河床形態の砂漣が中規模河床形態の形成・発達を支配する場合のあることを指摘するとともに、平坦河床における中規模河床形態の構成要素が砂粒であるのに対し、この場合には砂漣であることに着目して砂粒径を砂漣の形状特性量(波高)に置き換えて形成領域区分図を修正し、その支配パラメータについて考察を加えた。

本研究では、それらの結果を検証するために大小2つの水路で行ってきた追加実験の結果を述べ、修正領域区分図の適用性を示して、支配パラメータについて流水抵抗の面から検討を加え考察する。

2. 砂漣河床における中規模河床形態に関する実験

2.1 実験の概要

実験の設定条件は表-1に示した通りであって、Run G-5, 6は既実験(Run G-1~4)と同じ大型水路¹⁾の43m区間を用い、一方、Run K-1~3は幅50.2cm長さ20.4mの鋼製可変勾配水路²⁾を用いて行った。いずれの実

表-1 実験の設定条件

Run No.	Width (m)	Discharge (l/s)	Initial slope	Duration (hr-min)
G-5	1.3	9.0	1/300	50-00
G-6	1.3	30.0	1/2000	83-30
K-1	0.5	4.0	1/500	32-00
K-2	0.5	1.5	1/200	24-55
K-3	0.5	6.5	1/852	25-16

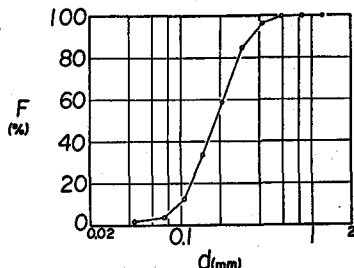


図-1 実験砂の粒度分布

験も図-1のような粒度分布を持つ平均粒径 $d_m=0.206\text{mm}$ (移動限界摩擦速度 $u_*c=1.49\text{cm/s}$)の砂と水路幅に対して、水深・粒径比が 10^2 のオーダーとなり、かつ、lower regime を対象とした著者らの修正領域区分図において各領域を覆うように水深を予め定め、芦田・道上の抵抗算定法によって路床勾配と流量を決定した。Run G-5, 6の実験方法は既実験とほぼ同一であり、Run K-1~3の方法もそれに準じていて、水位・河床高の測定と平面連続写真の撮影を行った。なお、実験の通水時間は最短のRun K-2でも約25時間と平坦河床における同規模の砂州形成実験に比べると非常に長くなっており、準砂州を対象としたRun G-6では交互砂州の非発生を確認するために73時間の通水後上流から9~19mの河床に波高約3cmの交互砂州2個分の人工擾乱を籠手で形作り、さらに10時間30分通水している。

2.2 実験結果の特徴

まず、各実験における河床形態(写真参照)、水理量(表-2参照)、及び平均河床横断形状(図-2参照)の変化について要約する。

初めに、Run G-5では、通水直後河床全体に砂漣が現われ、1時間後には3次元的な形態となって4時間で完全に発達した。9時間で砂漣の連なりが組紐のようになり、15時間半にはこれから複列砂州状の前縁が形成されていき、26時間で複列砂州と単列砂州の区間が交互に連なった。両者の混在する区間は最終50時間まで継続したが、限られた場所のみになり、ほとんどの区間では単列状の砂州が残って、ここでも、複列砂州の形成過程について指摘した砂州モードの減少傾向が確認された。水理量は、他の実験と同様に、流下方向の変化が認められなかったが、時間的には、表-2に一括表示した流下方向平均水理量のように、実験の初期に砂漣の発達に伴う抵抗の系統的な増加が顕著であって、水深は2.5cmから約4時間で4cm前後に増加した後一定となり、一方、Froude数は0.55から0.3以下に、また、流速係数は10.3から5前後に減少している。また、摩擦速度は砂漣の発達後移動限界の2倍強の3.5cm/sであって、予定していた値に近い。砂州の発達指標である流下方向平均横断形状の変化は、いくつかの停水段階を選んで図-2に示したように、18時間30分までは初期段階と同じであって、河床に認められた砂漣の斜めの連なりは平均横断形状には反映されていない。25時間になると明かに砂州の形成に対応した中央部の高い形状となり、その高さは僅か7時間で急激に発達し、32時間で降ほとんど同一の形状となっている。このように、砂漣の発達後かなりの時間が経過したある時点から砂州の発達が急激になる現象は、Run G-2やG-4でも認められており、砂漣河床における砂州の形成過程の特徴一つと考えられる。

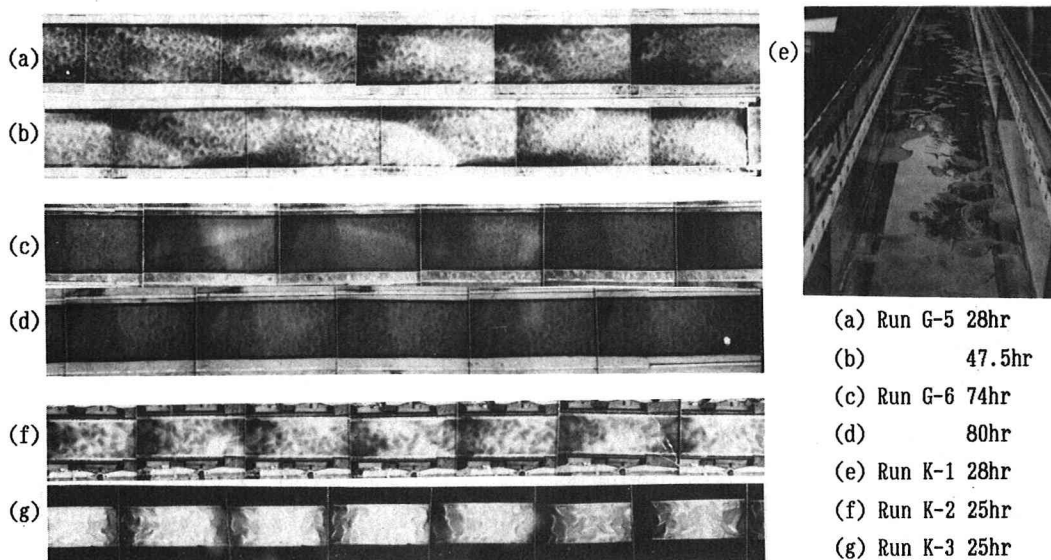


写真 形成された河床形態(流れはいずれも左から右、(c)は人工擾乱を与えた直後)

つぎに、Run G-6では、路床設定勾配が1/2000と小さいために路床全体が砂漣で覆われたのは通水後13時間であって、16時間には各所に砂漣が斜めに直線的に連なっているのが観察されたが、73時間まで砂州として波高が発達していくことはなく、水流の蛇行も認められなかった。そこで、路床に前述の人工擾乱を与えたが、その擾乱は直ちに消滅していき、83時間30分には設定前と差の無い状態となった。砂漣の発達とともに、水深は7cmから16時間で10~11cmとなり、Froude数は0.4から0.22に、流速係数は19から約8になっている。この場合の平均河床横断形状は、途中交互砂州の発達した既実験の初期段階と類似の状況を示したが、結局中央部の上昇を示さないまま73時間に至り、斜め筋しか観察されなかった河床形態と対応している。この時点で与えた人工擾乱の平均横断形状はRun G-5等での急激な砂州の発達開始直前のものと酷似しているが、それ自体が成長したり、下流に伝播することなく消滅したことが写真や最終時点の横断形状から判る。

表-2 水理量の経時変化

Run No.	Time (hr-min)	Depth (cm)	Velocity (cm/s)	Froude Number	Energy Slope (10^{-3})	Shear Velocity (cm/s)	Velocity Coeff.	Manning's Roughness
G-5	0-00	2.56	27.30	0.550	3.20	2.74	10.31	0.0176
	1-00	3.51	19.91	0.342	3.28	3.26	6.23	0.0304
	4-00	4.39	15.81	0.242	3.47	3.72	4.29	0.0444
	7-15	3.77	18.44	0.305	3.45	3.46	5.39	0.0347
	12-30	4.29	16.32	0.254	3.42	3.66	4.57	0.0428
	18-30	3.66	19.00	0.318	3.33	3.33	5.82	0.0322
	25-00	4.04	17.28	0.277	3.36	3.52	4.97	0.0382
	32-00	4.23	16.47	0.257	3.37	3.57	4.76	0.0407
	40-00	3.96	17.62	0.284	3.43	3.51	5.10	0.0374
	50-00	4.40	16.20	0.252	3.39	3.64	4.67	0.0460
G-6	Average after 4-00	4.09	17.14	0.274	3.40	3.55	4.95	0.0396
	0-00	7.04	32.83	0.396	0.59	1.70	19.30	0.0104
	2-00	7.41	31.21	0.367	0.64	1.80	17.36	0.0117
	4-00	9.27	24.96	0.263	0.91	2.58	9.68	0.0218
	10-00	9.99	23.16	0.235	0.92	2.70	8.57	0.0248
	16-00	10.40	22.26	0.221	0.98	2.79	7.99	0.0267
	22-00	10.38	22.28	0.222	0.97	2.85	7.83	0.0275
	28-00	10.33	22.36	0.223	0.99	2.79	8.01	0.0267
	34-00	10.42	22.16	0.220	0.88	2.60	8.52	0.0252
	40-00	10.31	22.39	0.223	0.95	2.71	8.27	0.0258
K-1	46-00	10.09	22.91	0.231	0.86	2.62	8.74	0.0244
	52-00	10.52	21.94	0.216	0.88	2.74	8.02	0.0268
	59-00	10.02	23.04	0.233	0.93	2.73	8.43	0.0252
	66-00	10.25	22.53	0.225	0.91	2.76	8.18	0.0261
	73-00	11.02	20.95	0.202	0.90	2.81	7.46	0.0289
	83-30	10.83	21.34	0.208	1.01	2.88	7.40	0.0292
	Average after 16-00	10.42	22.20	0.220	0.93	2.75	9.08	0.0266
	0-00	2.61	31.26	0.628	2.15	2.07	19.29	0.0113
	1-00	2.97	27.71	0.525	2.77	2.62	11.75	0.0177
	2-20	3.23	25.28	0.457	2.61	2.64	10.11	0.0190
K-2	7-50	4.28	18.84	0.293	2.80	3.07	6.49	0.0302
	12-00	4.31	18.71	0.290	2.81	3.12	6.28	0.0311
	17-00	4.05	19.93	0.319	2.79	3.00	7.01	0.0278
	22-30	4.38	18.43	0.283	2.46	2.94	6.56	0.0298
	28-00	4.41	18.15	0.279	2.48	2.97	6.42	0.0304
	Average after 7-50	4.29	18.83	0.293	2.67	3.02	6.55	0.0299
	0-00	1.86	16.25	0.383	5.1	3.06	5.37	0.0288
	24-55	2.04	15.02	0.342	5.4	3.25	4.76	0.0345
	0-00	4.39	28.76	0.44	1.05	2.04	15.88	0.0121
	25-16	7.65	16.53	0.19	1.39	3.04	6.19	0.0318

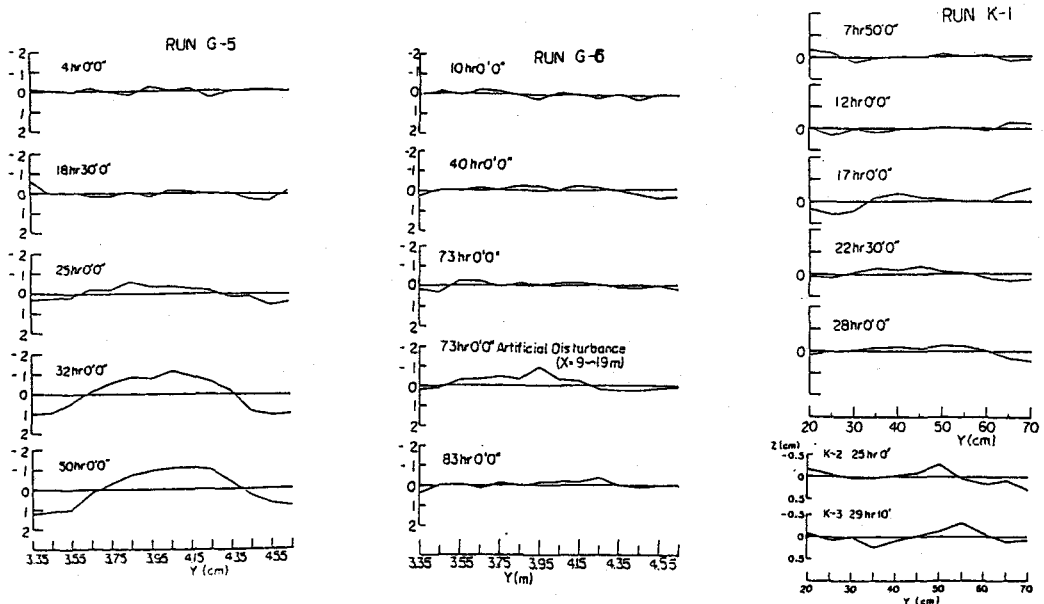


図-2 流下方向に平均された河床横断形状の時間的变化

水路幅の小さいRun K-1では、最初2次元的であった砂漣が通水後4時間には全面で3次元的となり、11時間には中・下流区間で砂漣が交互に斜めにつながっているのが観察された。それらは17時間には明確な交互砂州の前縁として確認でき、20時間以後28時間の停水時まで波長約1.5mの交互砂州が数個持続していた。ここでも水深は2.6cmから4.4cmに、Froude数は0.6以上から0.3以下に、流速係数は19から7以下に変わっている。平均横断形状は、17時間から中央部が上昇し、22時間30分では交互砂州に対応した比較的左右対称な状態となるが、その後の波高は発達していない。

Run K-2では、水路全体が通水直後から2次元的な砂漣で覆われ、それらは3時間で3次元的な形態に変化する。22～25時間には、砂漣のスケールが水路幅に比して大きいためにあまり明確ではないが、路床全体に複列砂州状に配置された深掘れ部が生じ、Run G-5と同様の砂州モードの減少傾向も認められた。砂漣の発達が速やかであったために、水量の変化は1割程度と少なく、水深は約2cm、Froude数は0.4以下、流速係数は5前後であって、流水抵抗が非常に大きくなっている。平均横断形状に明確な傾向は指摘できないが、左端を含めた3つのピークに複列砂州河床の特徴が認められよう。

路床勾配が1/852と小さいRun K-3では、路床が砂漣で覆われるまで約2時間を要し、3次元的な形態に変化して発達を終えるのに11時間30分までかかったが、砂州に対応するような形態はその後にも全く現われなかった。この間、水深は4.4cmから7.7cmに増加し、Froude数は0.44から0.2以下に、流速係数は16から6に減少している。平均横断形状に砂州の形成に関連したような特徴は無いと判断される。

2.3 河床形態の特性と形成条件の検討

表-3に本実験で形成された河床形態の形状特性量を一括表示している。砂漣及び砂州の波長は平面写真から読み取り、波高はRun G-5、6では横断方向の連続記録から、Run K-1～3では河床から直接測定した。砂漣の波長 l_r 、波高 Z_r はそれぞれ大体17cm、2cmで従来からいわれているように粒径の850、100倍となっている。砂州の波長 l_b 、波高 Z_b は、Run G-5ではそれぞれ幅の3.5、0.047倍となっていて、この形状特性からも交互砂州と複列砂州の境界付近の形態と判断され、斜め筋のみのRun G-6では測定不可能で準砂州もしくは非発生となる。一方、Run

表-3 河床形態の形状特性量と砂州の分類

Run No.	B/h	h/d	l_r (cm)	Z_r (cm)	l_b (m)	Z_b (cm)	l_b/B	Z_b/B	Classification of bedform
G-5	31.8	199.0	17.9	1.96	4.56	6.10	3.50	0.0469	Alternate and Double row bars
G-6	12.48	505.8	17.5	2.23					Semi bars
K-1	11.7	208			1.10		2.20		Alternate bars
K-2	24.5	99.0	13.5	2.24	1.17		2.34		Double row bars
K-3	6.54	371.0	15.9	3.19					No bar

K-1、K-2では、波長のみ測定可能であるが、ともに幅の2倍強とかなり短い砂州となっていて形状特性からはいずれも準砂州と分類される。しかし、路床が幅に比して大きな砂漣で覆われていたことを考慮して、ここでは、観察された路床の状態からRun K-1は交互砂州、K-2は複列砂州、Run K-3は非発生と分類した。

こうして分類された砂州形態の形成条件を、村本・藤田³⁾の水深・粒径比 h/d —幅・水深比 B/h 平面的形成領域区分図の粒径 d を小規模河床形態の波高 Δ で置き換えた著者ら¹⁾の修正領域区分図上で既実験の結果とともに検討すれば図-2のようなになる。ここでは Δ として砂漣の実測波高値を用いている。Run K-1、K-2はそれぞれ交互砂州、複列砂州の領域に入って区分図と一致しているが、交互砂州と複列砂州の境界線付近にあるべきRun G-5や、準砂州領域に入るべきRun G-6は全く一致していない。これらを平坦河床で $\Delta = d$ としたときの区分線と一致させるためには、既に

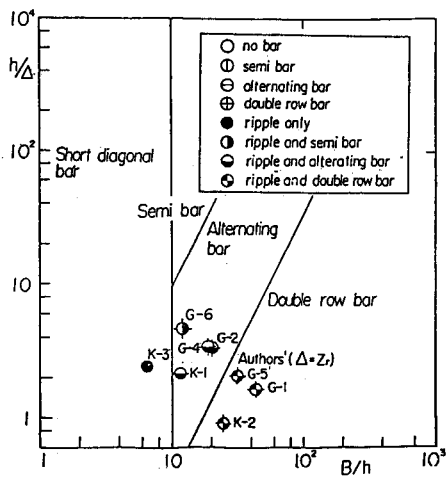


図-3 修正区分図による形成条件の検討

指摘¹⁾しているように、 Δ を $\Delta = Zr$ ではなくて $\Delta = Zr/5$ のように置く必要がある。砂粒Reynolds数から砂漣の発達が予想される場合、砂漣の波高は粒径から容易に推定できるので、上述の Δ の見積りから実用的には砂州の形成を予測することができよう。

3. 砂漣河床における中規模河床形態の形成過程に関する検討

3.1 中規模河床形態の形成条件と流水抵抗に関する検討

実験値の数は少ないが、前節の検討から砂漣の波高を用いることで容易に砂州の形成条件を予測できる可能性が示された。平坦河床における h/d を流水抵抗のパラメータとすると、 h/d に替えて h/k が有効である理由としては、それがlower regimeの抵抗則を表すパラメータとなっていることが考えられる。この点について、対数抵抗則を仮定して、まず実測データの多い平坦河床の場合について検討する。すなわち、実測値から相対粗度 h/k を算定し、 h/d に替えて h/k - B/h 平面上で各形態ごとの領域を示せば図-3のようである。図示したデータはこれまで著者が用いてきた資料³⁾とGuy-Simons-Richardson⁴⁾のものである。

一般的に、 $h/k \sim h/d$ の関係にあるので、形成領域は比較的良好に区分されているようである。しかしながら、非発生・準砂州領域と交互砂州領域とは重複部分がかなりあり、さらに、いずれの領域でも図示された点は縦に細長く並ぶ傾向にあって、 h/k が中規模河床形態の形成条件に支配的な影響を及ぼさないことを示唆しているようである。つぎに、砂漣河床について同様の検討を行えば、図-4のようであって、 $\Delta = Zr$ とした図-2の場合と大差の無いことが判り、相対粗度を領域区分のパラメータとして用いても平坦河床と砂漣河床に形成される中規模河床形態を同一の図では区分できない。

砂漣河床での有効掃流力は形状抵抗のために減少するが、全面で均等に発達した砂漣河床の場合、それによって砂州の形成に関与する流砂量分布の掃流力分布に対する位相差が平坦河床に比して著しく大きくなるとは考え難い。そこで、 h/d あ

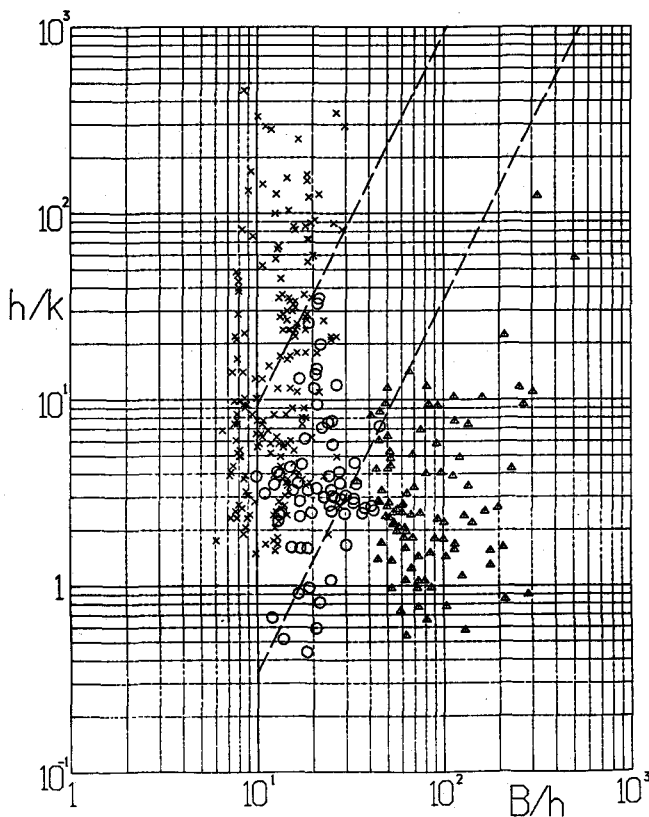


図-4 相対粗度による領域区分(×非発生;○単列;△複列)

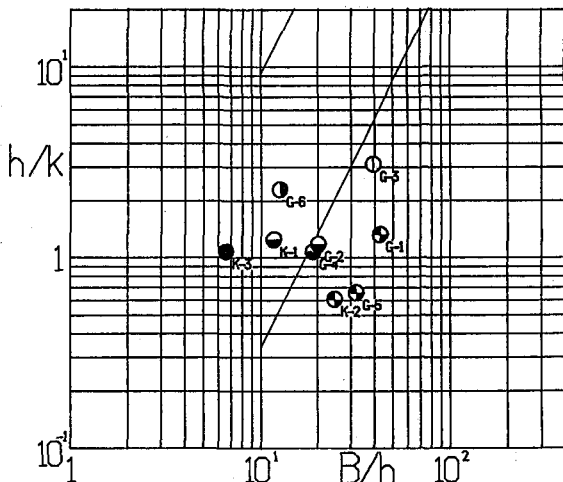


図-5 砂漣河床の相対粗度を用いた検討(図-2と同記号)

るいは h/k が抵抗のパラメータであるなら、相対粗度を用いれば同一の図で区分可能と予測したが、否定的な結果となった。これはこのパラメータが流水抵抗のみを表すものではないことを示唆していると思われる。

3.2 砂漣河床における砂州の形成過程に関する考察

粒径の意義について、当初交互砂州の形成条件が $h/d/(B/d)^{2/3}=0.45$ で区分でき、 B/d が路床横断方向の構成要素の数であることを考慮すれば、砂漣河床上の形成条件には $h/Zr/(B/Br)^{2/3}$ (Br : 砂漣の幅)が重要なパラメータであることになる。しかし、この場合のパラメータを B/h でくくって変形すると、 $\Delta=(Zr/Br)^2 Zr$ となって、 Br は砂漣の3次元性に依存するが大体波長のオーダーであるので、実験値から評価された $\Delta=Zr/5$ とは一致しない。砂漣の形状からみて、砂州の形成過程が砂粒の場合と完全な相似になっているとは思われないので当然の結果であろう。

一方、砂州の形成過程に関しては、近年、線形あるいは弱非線形の河床変動安定理論が成功を納めてきている。しかしながら、これらの理論的な解析では、 h/d は流水抵抗のパラメータとしてのみ位置づけられており、個々の砂粒あるいは砂漣が集合して初期の河床擾乱を形成し、砂州へ発達していくという過程が解析に反映されているか否かは明確でない。すなわち、平坦河床では砂州形成の初期段階から明確な段差を持った前縁が形成され、一方、砂漣河床での前縁はまず斜めに連なった砂漣の列として認識される、こうした初期過程とその後の発達過程を結合するためには、初期擾乱のパラメータを残したような理論展開が必要であるように考えられる。

4. 結 論

砂漣河床に生じる中規模河床形態について、形成条件の修正領域区分図の適用性を検討するために大小2種の水路で5実験を追加した。その結果、形成過程の特徴として、形成条件が満足されていても明確な砂州前縁の出現には砂漣の発達後長時間を要するが、その後の砂州の発達は速やかであり、一方、満たされていない場合は砂漣の連なりは認められても明確な前縁とはならず、交互砂州状の人工擾乱を与えても速やかに減衰することを明らかにした。また、砂漣河床における砂州の形成に対して、著者らの領域区分図が若干の修正で適用可能であることを指摘して、支配パラメータ h/Δ の意味について流水抵抗の観点から検討を加え、それが流水抵抗のみを表すパラメータではない可能性を示し、さらに、砂漣河床上の砂州の形成過程について河床安定理論による取扱と実験事実との対応に言及した。

実験上の制約は大きいですが、今後、砂漣河床のみならず砂堆河床条件における砂州の形成過程についても検討を加えていき、同時に、初期擾乱に着目した理論的な検討も試みたい。

最後に、実験の遂行には宮坂裕文(南海電鉄KK)、田村多佳志(三井建設KK)両君に協力を仰ぎ、図面の整理には中村行雄技官、永田順宏君(大学院学生)の手を煩わした。また、実験資料の整理には京大防災研防災科学資料センターの計算機を使用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田・村本・古川: 京大防災研年報, 第25号B-2, 1982, pp.429-449.
- 2) 藤田・小池・古川・村本: 京大防災研年報, 第28号B-2, 1985, pp.379-398.
- 3) 村本・藤田: 京大防災研年報, 第20号B-2, 1977, pp.243-258.
- 4) Gey・Simons・Richardson: U. S. Geol. Survey, Prof. Paper, 462-I, 1966.