

中規模河床形態に関する研究

村 本 嘉 雄・藤田裕一郎

STUDY ON MESO-SCALE RIVER BED CONFIGURATION

By *Yoshio MURAMOTO and Yuichiro FUJITA*

Synopsis

The meso-scale river bed configuration, which includes alternating bars, double row bars, braided streams and so on, affects not only large scale river bed variation but also lateral bank erosion. It is, therefore, one of main subjects in river mechanics to clarify the characteristics of its length scale and behaviour.

In this paper, the meso-scale bed configuration and its geometrical characteristics are discussed by the use of previous experiments and ours which was conducted in two prismatic flumes and a gradually expanding flume. As a results of the investigation, it is clarified that both bar height—stream width ratio Z_B/B and its length—width ratio l_B/B depend mainly on Froude number F , and depth—width ratio h/B and nearly independent on bed shear stress—critical shear stress ratio τ/τ_c . On the basis of the geometrical consideration of bars, meso-scale bed configuration is classified into four groups: double row bar (braided stream), alternating bar, semi bar and short diagonal bar, and hydraulic condition of their formation is inspected by means of dimensional consideration. Interesting result is obtained from this inspection that channel slope has no primary effect on their formation under the condition $1 < \tau/\tau_c < 12$ and a new parameter, $h/d/(B/d)^{2/3}$ or $\{h/d/(B/h)^2\}^{1/3}$, is introduced for the criterion of bed configuration. Consequently, domain of formation for each bed configuration is shown on $h/d-B/h$ plane.

1. 緒 言

河道内に形成される種々の河床形態については、小規模河床形態と中規模河床形態とに大別して取扱うことが通例となってきた。これらのうち小規模河床形態に関しては、その分類、形成条件および抵抗特性の水利学的な取扱ひ方法もほぼ確立されており、現在、河床波の発達・崩壊機構と形状特性の研究に主眼がおかれている。これに対して、中規模河床形態は、古くから舟運のための航路維持、農業用取水堰の設置あるいは洪水時の水衝部の問題として注目されており、近年になって、河川蛇行の観点から広汎な実験と現地調査および理論的な研究がなされるようになってきている。また、放水路の開削や低水路の拡張などの河川改修において、流砂理論に基く河道縦断計画と同時に、河道の平面形状の設計指針を確立する必要性が強調されており、とくに、中規模河床形態の形成条件や形状などを適確に予測することが重要な課題となっている。

しかし、中規模河床形態については単列交互砂州（以下交互砂州と呼ぶ）の形成条件に関する若干の考察に限られており、交互砂州の諸特性についても、砂州長が流路幅に比例して増大することおよび移動速度が

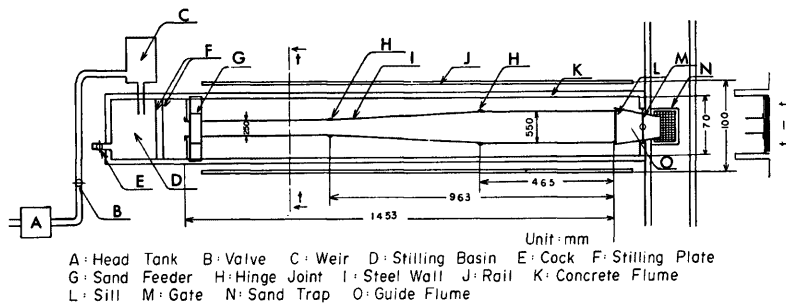


Fig. 1. Experimental flume.

砂州高に反比例し流砂量に比例することが明らかにされているに過ぎない。また、蛇行流路の形成に対しては交互砂州の発生条件と同時に、その形状が十分に発達する水理条件を明らかにする必要があるが、その発達過程に関する知見は得られていない。さらに、砂州では長さが河道幅の10倍程度になり、1砂州長で河道幅や河道こう配が著しく変化する場合もあるが、非一樣水路における砂州の特性に関する検討はなされていない。

本研究では、中規模河床形態に関して、交互砂州を中心にして、

- 1) 定義・分類と形成条件
- 2) 形状特性と水理量との関係
- 3) 河床形態の発生・発達過程
- 4) 河道漸変部の河床形態の特性

の諸点を究明することを目的として実験を行い、これらのうちとくに、1) および 2) について従来の実験結果と併せて検討を行った。すなわち、中規模河床形態の形状特性として砂州高と砂州長をとり、それらと水理量との関係を詳細に検討し、その結果から形状特性に基いた河床形態の分類と形成条件を明らかにして新たな形成領域区分図を提案する。

2. 中規模河床形態に関する実験

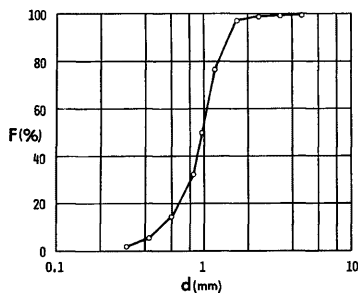


Fig. 2. Grain size accumulation curve of used sand.

2.1 実験装置と実験方法

実験に用いた水路は、宇治川水理実験所内の幅 70cm、深さ 55cm、長さ 18m のコンクリート製水路であって、Fig. 1 に示すように水路内には、2 箇所ヒンジのある仕切壁が設置してあり、0~55cm および 0~23% の範囲で任意の流路幅および拡幅率が得られる。水路下流端のゲートによって堰上げが可能であって、流砂は案内板によってバネ計りに吊り下げられた帰還水路内のトラップに導かれ、水中重量が直接計測される。流入端にはロータリー・フィーダー型の給砂装置が設置され、0~70cm の幅に一樣な給砂が行われる。また、水路に沿うレール上には台車が設置されており、河床の敷均しおよび平面連続写真の撮影ができる。実験砂は平均粒径 $d_m = 0.99\text{mm}$ 、 $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.48$ であって、その粒度分布

を Fig. 2 に示す。

実験は、上流端の河床高を触針式砂面計（計測技研K.K製）でモニターして、その河床高が一定となるように給砂量を調節して行い、適当な時間間隔で停水して測定を行った。すなわち、停水直前に水位を、停水後に河床形状をポイントゲージによって、また下流端流砂量を前記の方法で測定し、さらに10～20分間隔で平面写真を撮影して河床形態の形状変化と移動状況および流況の記録とした。測定の座標系は、水路下流端を0として上流方向に x 軸、水路中央を 50cm として左岸から右岸に y 軸および鉛直上方に z 軸をとっている。

実験条件は、水流幅 55cm および 25cm の一様水路に対しては、こう配を約 1/200、1/100 および 1/50 とし、流量を 1.5, 3, 6 および 12l/s のうちから与えている。一方、中流 $x=9.65\sim4.63$ m 間において水路幅が 25cm から 55cm に漸拡する水路に対しては、こう配を約 1/200 および 1/100 とし、流量を 1.5, 3 および 6l/s のうちから与えている。

2.2 実験結果

(1) 一様水路

一様水路の $x=0\sim9.65$ m 間において最も発達した中規模河床形態の得られた場合の水理条件と河床形態を Table 1 に示す。Table 1 の砂州高 Z_B は砂州前縁をはさむ河床の最大高低差、砂州長 l_B はそれぞれの前縁部の x 軸への正射影長（半蛇行長）で定義している。流入端の河床高を一定に保つ実験条件は各実験ケースにおいてほぼ満たされ、そのため平均水深およびエネルギーこう配の時間的および流下方向変化はほとんど見られなかった。Table 1 に示した各実験条件下で形成される河床形態の特徴について述べ

Table 1. Experimental results in prismatic flume.

Run No.	Width B (cm)	Dis-charge Q (l/s)	Flow duration T (min)	Mean depth h (cm)	Mean velocity U (cm/sec)	Energy slope I_s $\times 10^{-3}$	Shear velocity U_{*R} (cm/sec)	Froude number F_r	Bar height Z_B (cm)	Bar length l_B (m)	Type of bed configuration
11	55	3	250	1.65	33.38	5.86	2.98	0.84	4.46	2.74	Alternating bar
12	55	6	237	2.52	43.46	5.74	3.59	0.88	2.73	2.00	"
13	55	3	94	1.49	37.06	10.22	3.75	0.98	4.08	2.30	"
14	55	6	78	2.29	47.68	9.73	4.49	1.01	2.63	2.34	"
15	55	12	14	3.63	60.30	9.69	5.52	1.01	0.90	—	—
16	55	1.5	32	0.69	39.47	19.74	3.60	1.54	2.42	2.29	Braided
17	55	3	54	1.26	46.06	18.92	4.16	1.39	3.25	3.54	Alternating bar
18	55	6	60	1.94	56.64	18.66	5.70	1.33	3.38	3.60	"
19	55	12	20	2.97	72.64	16.18	6.50	1.35	2.19	(3.30)	—
21	25	1.5	131	1.62	33.61	6.42	3.00	0.85	1.32	1.08	Alternating bar
22	25	3	110	2.57	46.70	6.52	3.69	0.93	0.72	0.49	Short diagonal bar
23	25	6	79	4.20	57.16	6.81	4.58	0.89	1.33	0.53	"
24	25	12	21	5.91	81.73	6.62	5.05	1.08	1.81	0.68	"
25	25	1.5	89	1.55	39.20	9.04	3.48	1.02	1.84	1.08	Alternating bar
26	25	3	152	2.31	52.31	9.70	4.27	1.11	0.93	0.66	Short diagonal bar
27	25	6	86	3.82	63.17	9.48	5.06	1.04	0.88	0.56	"
28	25	1.5	77	0.97	51.83	19.80	4.10	1.77	1.98	1.86	Alternating bar
29	25	3	60	2.14	56.23	18.37	5.73	1.23	0.67	0.93	—

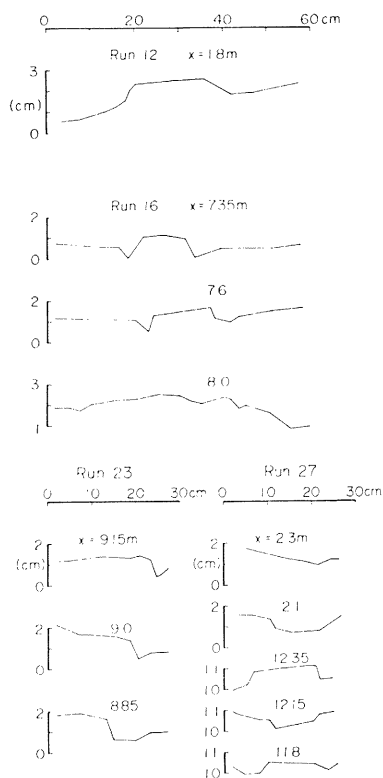


Fig. 3. Several examples of cross sectional shape of meso-scale configuration.

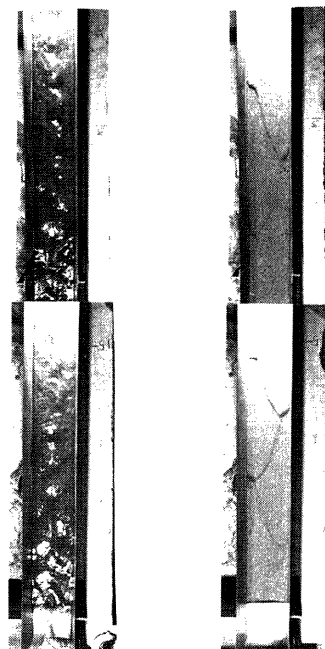


Photo. Short diagonal bar (Run 23; Flow: $T=64\text{min}$, Dry bed: $T=75\text{min}$).

るとつぎのようである。

- 1) Alternating Bar : 前縁部の明瞭な通常の交互砂州で砂州長 l_B は水路幅 B の4倍以上のものがほとんどある。
- 2) Braided : 主流は交互砂州に支配されるが, Fig. 3 の Run16 のように流路が分かれて網状流路の様相を呈する。
- 3) Short Diagonal Bar : Photo に示すように, 通水時には小規模河床形態 (この場合 Standing Wave) と共存する形態であって, Fig. 3 の Run 23 のように交互砂州と同様の横断面形状を示すため, この形態は従来の分類では交互砂州と区別されていないが, 後に検討するように $l_B/B=2\sim3$ であって, 水路幅・水深比 $B/h \leq 10$ の場合に形成され, 形状特性および形成条件が交互砂州と異なるので「短対角州」と呼ぶ。例えば, 芦田・奈良井の実験²⁾にこの形態に含まれるもの (文献 2) の Photo. 2) がみられる。
- 4) Table 1 の河床形態欄が空白のものは, 1)~3) に含ませ難い形態を示し, 多少とも砂州の前縁形状を有するが, 前縁の段差および砂州高は小さい。中には前縁が重なり合って「複列砂州」の形態が観察される場合がある。1) の交互砂州からこの形態へは連続的な砂州高の減少によって移行するようであり, 1) お

よび 3) の形態であっても、砂州高の小さい発達初期過程では、Fig. 3 の Run 12 および 27 のように複列状の砂州が形成されることがある。

なお、以上のほかに、河床形態が形成されない平滑河床の状態が河床材料の移動限界付近および掃流力が限界掃流力よりも十分に大きくなった場合に存在すると考えられるが、本実験では対象としていない。

つぎに、砂州の発達過程を実験に基いて簡単に述べる。観察によれば、砂州はつぎの 2 つの過程を経て形成されるようである。

1) 重複し合うわずかな段差の斜交縞のうちから縞の後端が次の縞の先端と一致するものが残り、交互砂州の前縁として選択されていく過程

2) 前縁を境界とする水理条件の相違によって砂州高が増大するとともに、先端の移動速度差によって砂州長が変化しながら平衡状態に漸近する過程

交互砂州の形成される場合、1) の過程は比較的速かに終了し、2) の過程は掃流力などの平均的な水理条件に対応した速度で進行すると考えられる。このような砂州長 l_B および砂州高 Z_B の発達過程の一例として 55cm 幅水路の下流 $x=0\sim 4.6$ m 区間の測定結果を示すと Fig. 4 のようである。 l_B および Z_B はすべての実験ケースで初期に急激に増大するがその後発達速度は低下して、上述の発達過程の特徴を示す。さらに、こう配の小さい Run 11~13 では l_B の増加が止まった後も Z_B は増大し、こう配の大きい Run 17 および Run 18 とは逆の傾向を示している。しかし、Run 11 を除けば通水時間が短く、 l_B および Z_B の少く

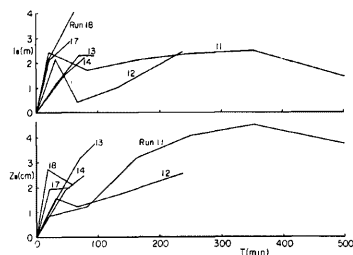


Fig. 4. Development of bar length and height in 55cm width channel.

Table 2. Experimental condition of expanding flume at final stage.

Run No.	Stream reach	Discharge Q (l/s)	Flow duration T (min)	Mean depth h (cm)	Mean velocity U (cm/sec)	Energy slope $I_e \times 10^{-3}$	Shear velocity U_{*R} (cm/sec)	Froude number F_r	Type of bed configuration
31	U	3	369	2.72	44.12	5.50	3.46	0.86	—
	M			1.88	38.88	6.56	3.31	0.91	—
	D			1.58	34.60	7.18	3.24	0.88	Alternating bar
32	U	6	251	4.42	54.93	5.73	4.22	0.84	Short diagonal bar
	M			2.99	48.91	5.94	3.88	0.91	—
	D			2.36	46.26	7.26	3.93	0.96	—
33	U	1.5	436	1.56	38.89	10.05	3.68	1.00	—
	M			1.06	34.65	11.13	3.30	1.08	Alternating bar
	D			0.87	32.27	11.21	3.01	1.13	—
34	U	3	197	2.34	51.35	9.97	4.38	1.07	—
	M			1.68	43.53	10.01	3.89	1.07	—
	D			1.47	37.18	10.90	3.86	0.98	Alternating bar
35	U	6	120	3.76	64.25	10.64	5.47	1.06	—
	M			2.71	54.06	10.37	4.91	1.06	—
	D			2.27	48.19	11.41	4.84	1.02	—

Notation: U : Upstream reach $x=9.6\sim 13$ m, $B=25$ cm

M : Middle stream reach $x=4.6\sim 9.6$ m, $B=\{25-6\times(x-9.6)\}$ cm $\bar{B}=40$ cm

D : Downstream reach $x=0\sim 4.6$ m, $B=55$ cm

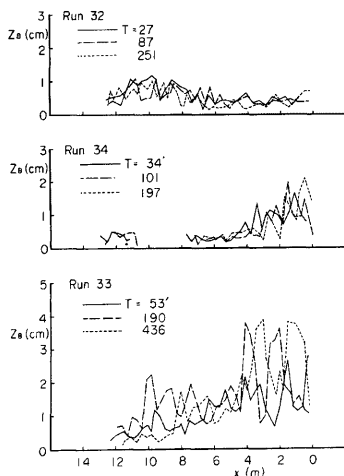


Fig. 5. Variation of bar height (Z_B) in run 32-34.

以上のように、漸拡区間を持つような水路であっても中規模河床形態は一樣区間の水理条件から推定が可能であって、この場合も一樣水路において形成される中規模河床形態の適確な予測が基本的な課題となる。

3. 中規模河床形態の形状特性と形成条件

3.1 中規模河床形態に関係する無次元量

中規模河床形態を支配する物理量としては、つぎの8つがあげられる。

$$\sigma, \rho, \nu, g, d, h, I \text{ および } B \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに σ および d はそれぞれ河床材料の密度および代表粒径、 ρ および ν はそれぞれ水の密度および動粘性係数、 g は重力加速度、 h は水深、 I は河床こう配および B は水路幅である。 I の代わりに摩擦速度 $U_* = \sqrt{ghI}$ を用いると次元解析によって上の8つの物理量からつぎの5つの無次元量が導かれる。

$$\sigma/\rho, R_{*h} = U_* d/\nu, \tau_* = U_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd, h/d, \text{ および } h/B \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

いま対象としている現象では砂粒の加速度運動は主たる影響は持たないので σ/ρ は無視できる。つぎに、従来の中規模河床形態の実験条件 ($d_m > 0.29\text{mm}$) では $R_{*h} > 4.6$ であって、流体抵抗に与える R_{*h} の影響は、流速係数 U/U_* に対して1程度であって、 h/d の影響に比してほぼ無視できる。また、限界掃流力 τ_c に対する R_{*h} の影響を岩垣式で推算すると、 $R_{*h} > 4.6$ に対して $\tau_{*c} = \tau_c/(\sigma/\rho - 1)gd = 0.034 \sim 0.053$ の範囲である。したがって、 R_{*h} の効果を限界掃流力の評価に考慮すれば、(3.2) 式の無次元量のうち

$$\tau_*, h/d \text{ および } h/B \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

が中規模河床形態に関係する無次元量となる。

以上の考察を前提として、次節以下で Table 3 に示した実験値²⁻⁸⁾を用いて、中規模河床形態の形状特性ならびに形成条件に関する検討を行う。砂州の形状特性については、砂州高 Z_B および砂州長 l_B と水路幅 B との間にそれぞれ明瞭な正の相関関係が従来から指摘されているので、 Z_B および l_B をそれぞれ B で無次元化して水理諸量による変化を検討する。水理諸量の無次元量としては、流砂および流れの影響を分けて検討するために、 τ_* と h/d の代わりに τ/τ_c と $F_r (= U/\sqrt{gh})$ を用いる。一方、中規模河床形態の

とも一方は平衡状態に達しているとは思われず、今後さらに長時間にわたる実験が必要である。

(2) 漸拡水路

漸拡水路における実験最終段階の水理条件と河床形態を Table 2 に示す。Table 2 の上、下流一樣区間の河床形態は、区間長が短いために砂州高および砂州長の発達是不十分であるが、一樣水路での実験結果に対応したものが形成された。一方、漸拡区間では上、下流の一樣区間の遷移状態が観察された。このような例として、Run 32~34 における砂州高 Z_B の流下方向および時間的変化を示すと Fig. 5 のようである。Run 32 では上流区間で発達した短対角州が漸拡区間の中程で消滅しており、逆に Run 34 では漸拡区間の中程から下流区間にかけて交互砂州が形成されている。一方、Run 33 では全区間で交互砂州が形成され、流路幅に比例して Z_B が増大している。しかし、漸拡水路では水理条件の流下方向変化が大きいために個々の砂州の移動速度に差が生じて、砂州の吸収、消滅などが見られ、とくに漸拡区間と一樣区間の接続部付近ではこの現象が頻繁に起こり、複雑な河床形態となることが多い。

Table 3. List of experimental data used.

Investigator	Symbol	Flume width (cm)	Bed slope	Bed material	Diameter (mm)
Kinoshita ⁴⁾	○	3.5~120 mainly 13.2	0.002~0.133	Sand	0.38~5.0
Ashida-Shiomi ⁵⁾	○	50	0.01, 0.0125, 0.0143, 0.02	"	1.00
Ashida-Narai ⁶⁾	○	20, 60	0.002, 0.00333, 0.005	"	0.71
Sukegawa ⁷⁾	○	15, 30, 31	0.005, 0.01, 0.02	"	0.45, 2.3, 3.55
Kazama ⁸⁾	○	30	0.00333, 0.005, 0.01, 0.02	Mesalite $\sigma=1.8$	0.762, 1.20, 1.73
Ikeda ⁹⁾	○	17	0.0031~0.0316	Sand	0.29, 0.55, 0.33
Chang et al. ¹⁰⁾	○	91.44	0.00148~0.00400	"	0.85*
"	○	"	0.00044~0.00352	Plastic pellet $\sigma=1.05$	3.18
"	○	"	0.00080~0.00638	Expanded clay aggregate $\sigma=1.81$	1.09*
Authors	○	25, 55	0.00574~0.0198	Sand	0.99

* estimated from mean fall diameter

形成条件の検討では、流路形状に関する水理量 h と B が重複しない単純な無次元量を用い、河床形態の基本的な特性を把握したのちそれらを組合せる方法をとる。すなわち $\tau_* = hI/(\sigma\rho - 1)d$ であることを考慮して (3.3) 式の無次元量の代りに $I/(\sigma\rho - 1)$, h/d および B/d を用いて、砂州の形状特性から区分される河床形態の形成領域を明らかにする。

3.2 中規模河床形態の形状特性

(1) 砂州高の変化

Fig. 6 は、 Z_B/B と F_r との関係を h/B をパラメーターにして示したものである。 Z_B/B の変化範囲は全体で 0.018~0.14 の約 8 倍であるが、一定の F_r に対する Z_B/B は約 4 倍の変化幅で波状変化を示し、 $F_r \div 1.2$ で極大、 $F_r \div 1.5$ で極小となる傾向がみられる。この傾向は h/B によって異なり、 $h/B < 0.04$ の場合は、 $Z_B/B = 0.05 \sim 0.1$ の比較的狭い範囲にあって、 F_r による変化は顕著でない。これに対して $h/B > 0.1$ の Z_B/B は F_r による変化が大きく、この河床形態の波高は $F_r < 1.2$ で発達、 $F_r > 1.2$ で崩壊する特性が認められる。中規模河床形態では局所的 F_r の差が大きいため小規模河床形態との比較は難しいが、 h/B が大きくなると砂推と類似の特性を示すと考えられる。

このように、幅の広い流路 ($B/h > 25$) では河床形態の高さに及ぼす F_r の影響はほとんどみられず、一方側壁の影響が無視しえなくなるような流路 ($B/h < 10$) では河床形態の高さは F_r に大きく支配されることがわかる。

つぎに、 Z_B/B に対する h/B の影響について、 F_r で 4 段階に分け、さらに τ/τ_c をパラメーターにして検討すると Fig. 7 のようである。 Z_B/B は h/B に対して波状変化を示すようで、 F_r によってやや変化がみられるが、 $h/B \div 0.04$ で極大、 $h/B \div 0.1$ で極小となっている。 $h/B < 0.04$ において Z_B/B が減少するのは、河床形態が複列砂州あるいは網状流路に漸近し、 B の増大に対して Z_B の増加が伴わないためであり、一方、 $h/B > 0.1$ ($F_r < 1.2$) において Z_B/B が再び増大するのは、2.2 で述べた短対角州が形成され、短対角州の高さが水深に対応して増大する特性を持つためと考えられる。

Fig. 7 では、 Z_B/B に対する τ/τ_c の影響は顕著にみとめられないが、さらにこの点を検討するために、 h/B をパラメーターにとって Z_B/B と τ/τ_c との関係を調べると Fig. 8 のようになる。同一実験者のデ

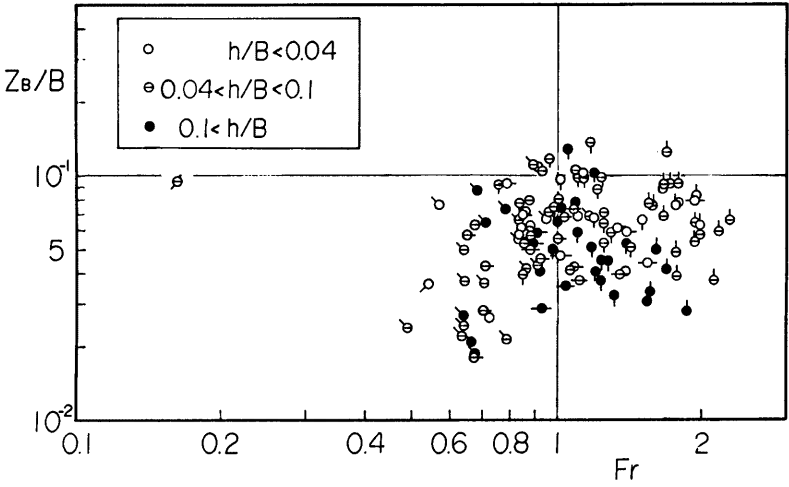


Fig. 6. Relation between Z_B/B and Fr .

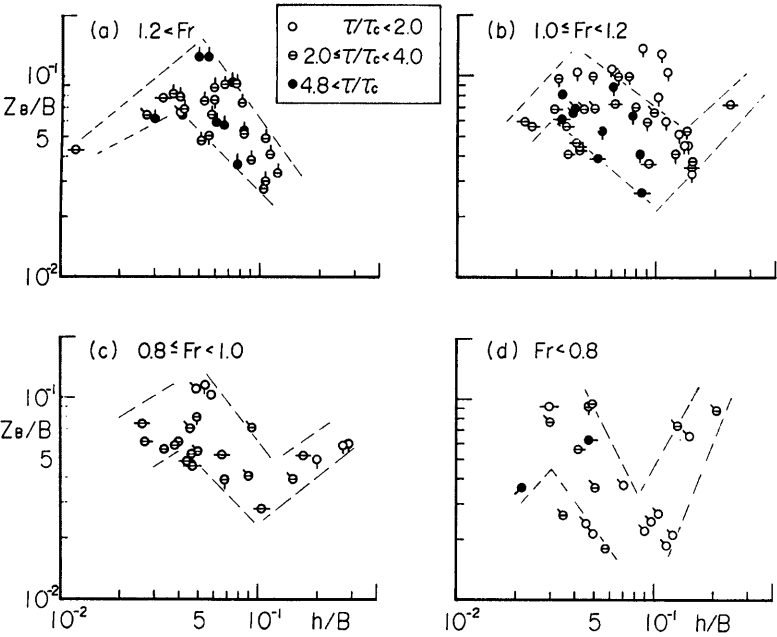


Fig. 7. Relation between Z_B/B and h/B .

一タ（河床材料一定）については τ/τ_c の増加とともに Z_B/B がやや減少する傾向がみられる。なお、 $\tau/\tau_c > 12$ において実験値が存在しないのは、砂州の波高が減少して平滑河床になるためと考えられる。

以上のように、 Z_B/B の特性は $h/B=0.1$ を境にして変化し、 $h/B > 0.1$ の場合、 F_r によって Z_B/B は大きな影響を受けるが、 $h/B < 0.1$ とくに $h/B < 0.04$ において F_r の影響はほぼ無視できる。

(2) 砂州長の変化

Fig. 9 は l_B/B と F_r との関係を h/B をパラメーターにとって検討したものである。 $l_B/B=1.6\sim 1.3$ であって Fig. 8. Relation between Z_B/B and τ/τ_c . Z_B/B と同様に約 8 倍の変化幅がみられる。Fig. 9 には、Chang ら⁸⁾による比重 1.05 の Plastic pellet と比重 1.8 の Expanded clay aggregate の実験値および風間⁹⁾による比重 1.8 前後のメサライトの実験値も示してあって (Table 3 参照)、比重の小さいものほど F_r の小さい実験条件になっている。砂を用いた実験値を含めていずれの河床材料条件でも l_B/B は極小値 $l_B/B \div 2$ を持つ変化を示している。また l_B/B が極小となる F_r は Plastic pellet では $F_r \div 0.25$ 、Expanded clay aggregate およびメサライトでは $F_r \div 0.7$ 、砂では $F_r \div 0.9$ であって、河床材料の比重による差がみとめられる。しかし、砂以外の実験値では h/B の変化範囲が狭いので以下では砂を用いた実験値について考察する。

Fig. 6 と Fig. 9 の比較から明らかなように、 l_B/B の F_r による変化は Z_B/B のそれとは逆傾向であって、 h/B が小さいほど F_r による l_B/B の変化は大きい。すなわち、 $h/B < 0.04$ の場合、 $F_r=1.0$ 付近で $l_B/B=6\sim 12$ から $l_B/B=3\sim 4$ へ急減する状態が認められ、一方、 $h/B \geq 0.1$ の場合、 $F_r < 0.9$ では $l_B/B=2\sim 3$ とほぼ一定で、 $F_r \geq 0.9$ では l_B/B は 2 から 4 に微増する程度となっている。しかし、 $F_r=1.1$ 付近では h/B の増加に伴う l_B/B の減少傾向は明確でなく、上述の $F_r=1.0$ 付近で l_B/B が急減する現象と合せて $F_r=1$ 付近の l_B/B の変化についてさらに検討する必要がある。

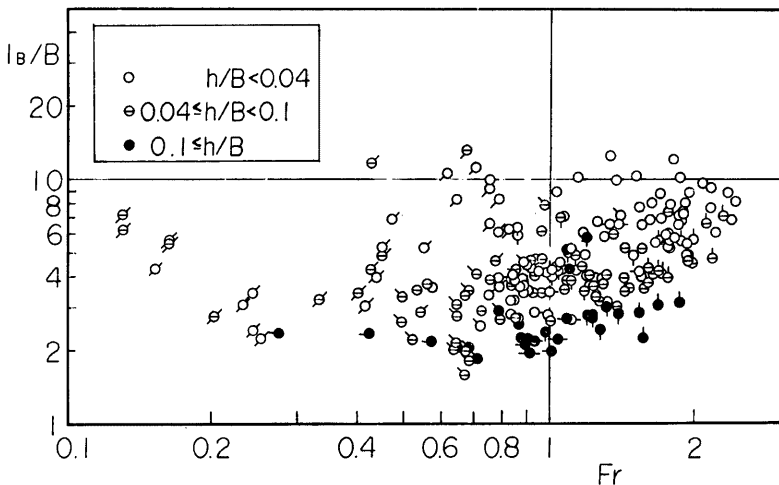
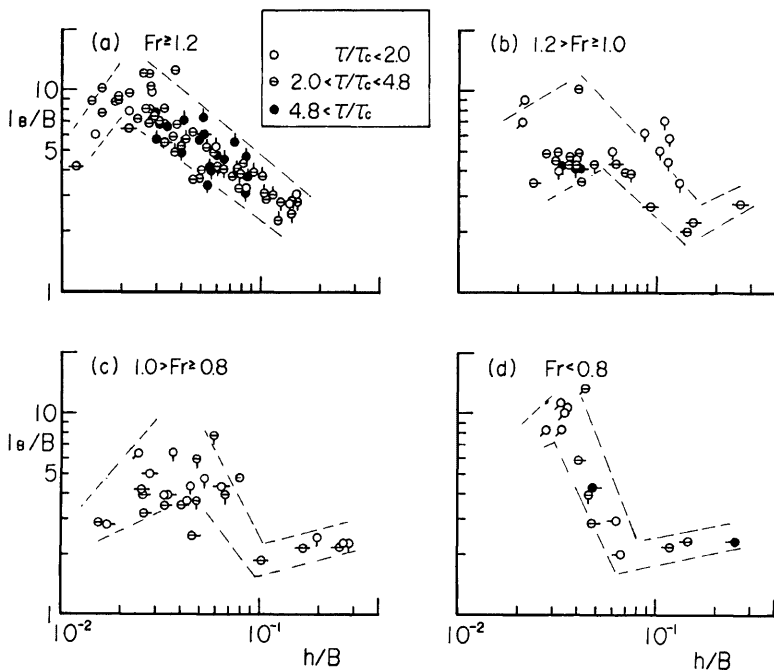


Fig. 9. Relation between l_B/B and F_r .

Fig. 10. Relation between l_B/B and h/B .

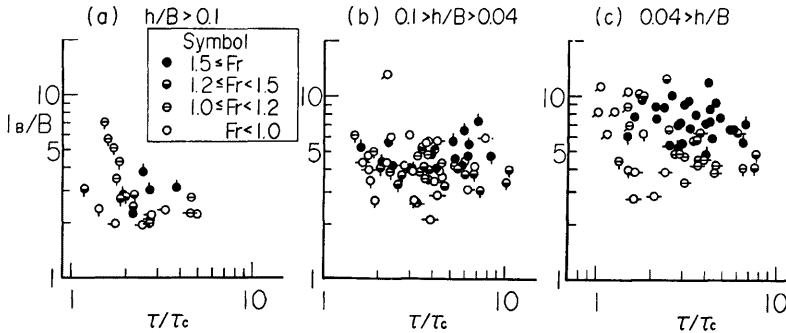
つぎに、 l_B/B と h/B との関係について Fig. 7 と同様の表示をすれば Fig. 10 のようであって、極大値の位置はやや異なるが Z_B/B と類似した波状変化を示す。 l_B/B の極大値はいずれの Fr についても $h/B=0.03$ で生じ、一方、極小値を与える h/B は Fr の増加に伴って 0.08 から 0.13 程度の変化をする。しかし、 $h/B>0.13$ であっても l_B/B の増加率は極めて小さく、 Z_B/B の傾向とは異っている。 h/B に対する l_B/B のこのような変化も、 Z_B/B の変化と同様に、 h/B の増加に伴って複列砂州から交互砂州、さらに短対角州へと河床形態が変化することによると考えられる。

Fig. 10 では l_B/B の変化に与える τ/τ_c の影響は明確でないが、この関係を検討すれば Fig. 11 のようである。いずれの図においても明確な対応関係はみとめられず、 τ/τ_c は l_B/B に影響しないと考えられる。

以上のように、 l_B/B の特性も $h/B \div 0.1$ を境にして変化し、 $h/B>0.1$ では $Fr=1.0 \sim 1.2$ の範囲を除いて Fr に関係なく $l_B/B=2 \sim 4$ である。一方、 $h/B<0.1$ では Fr によって $l_B/B=3 \sim 12$ の範囲で変化し、とくに $h/B<0.04$ では $Fr \div 1.0$ で極小値を持つ。

3.3 中規模河床形態の分類

2.2 で述べた実験結果および前節の検討結果に基づいて、中規模河床形態に関する定義と分類を明らかにする。Fig. 7 および Fig. 10 からわかるように、交互砂州の形状は $Fr=1.2$ および $h/B \div 0.04$ で最も発達し、このような水理条件から離れるにつれて徐々に不明瞭となり、網状形態、あるいは前縁の重なり合

Fig. 11. Relation between l_B/B and τ/τ_c .

った複雑な形態、さらに短対角州に移行すると考えられる。すなわち、 F_r が一定の場合、交互砂州が形成される B/h を基準として、それより B/h が増加すれば複列砂州あるいは網状形態、やや減少すれば砂州高および砂州長がともに減少して前縁の錯綜する河床形態、さらに減少すれば交互砂州とは形状特性の異った短対角州が形成される。上述の前縁の錯綜する河床形態は交互砂州の形状特性の延長上にあるので「準砂州」と呼ぶ。木下³⁾の定義による準砂礫堆はこれに相当すると考えられる。また、前節の考察から、 F_r は各河床形態の波長・波高の増減に影響し、 τ/τ_c は中規模河床形態の存在領域の上下限 ($1 < \tau/\tau_c < 12$) を与えるだけであって、 F_r および τ/τ_c のいずれも中規模河床形態の形成条件に一次的な影響を与えないと考えられる。なお、この点については次節で明らかにする。

以上より、中規模河床形態は、1) 複列砂州 (Double row bar) あるいは網状流路 (Braided stream)、2) 交互砂州 (Alternating bar)、3) 準砂州 (Semi bar) および 4) 短対角州 (Short diagonal bar) の4つとなる。しかし、これまで明らかにしてきたように、砂州の形状は連続的な変化をするので、上の分類について何らかの客観的な基準を与えなければならない。ここでは、実験結果ならびに砂州の形状特性に関する考察結果から中規模河床形態をつぎの基準にしたがって分類する。

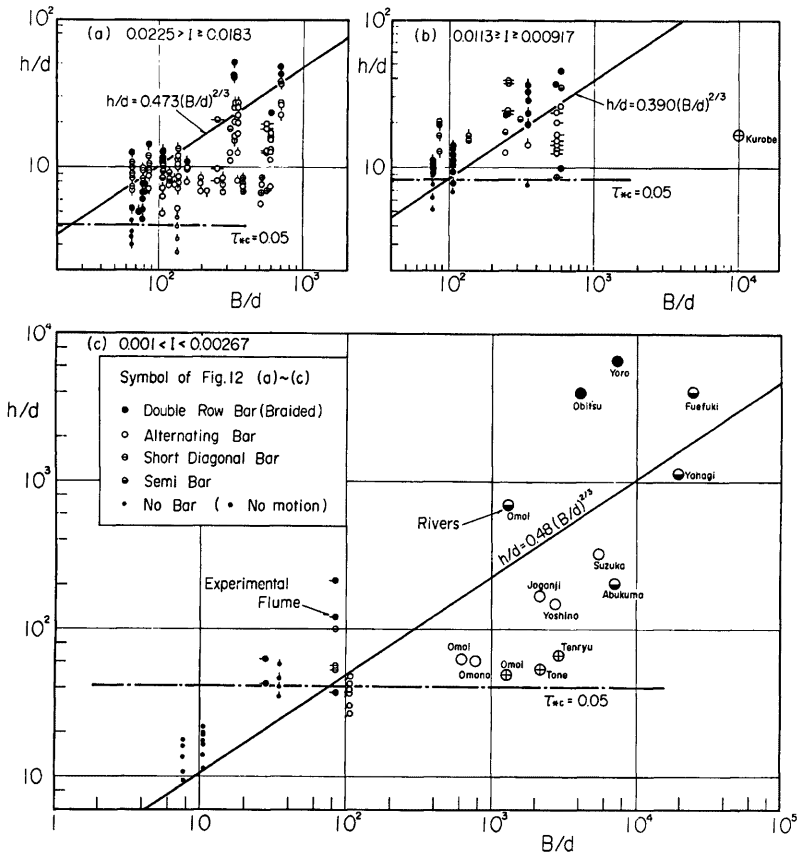
- 1) 複列砂州 (網状流路) : $l_B/B \leq 4$, $Z_B/B \leq 0.04$ 前縁が乱れている場合が多い。
- 2) 交互砂州 : $l_B/B > 4$, $Z_B/B > 0.04$
- 3) 準砂州 : $Z_B/B \leq 0.04$, 前縁は直線的であって錯綜している場合が多い。
- 4) 短対角州 : $l_B/B \leq 4$, $Z_B/B > 0.04$

なお、2.2でも述べたように、準砂州の中には複列砂州と類似した形態を示すものがあるが、上記のように前縁の形状が直線的であるので判別は可能と思われる。

3.4 交互砂州の形成条件

前節で述べたように、各々の中規模河床形態の形成条件は、交互砂州の形成条件との相対的關係によって明確に把握することができる。ここでは、交互砂州の形成条件を 3.1 で述べた無次元量 $I(\sigma/\rho-1)$, h/d および B/d を用いて検討する。実測値としては、Table 3 のうち砂を使用した実験値と池田⁹⁾によってまとめられた実河川のデータを用いた。砂州形状の明示されている実測値は前述の基準によって河床形態を分類し、また、木下³⁾の砂礫堆および池田⁷⁾のタイプ 2 一単列強蛇行は交互砂州とし、準砂礫堆 (木下) およびタイプ 3 一単列弱蛇行 (池田) は準砂州とみなしている。

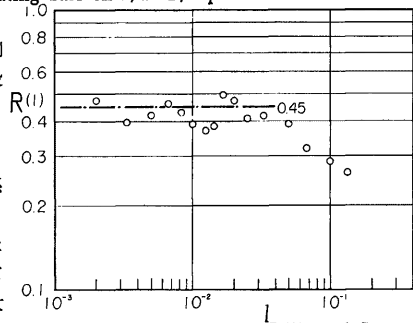
河床材料の比重が一定であるので、河床こう配 I を 0.001~0.133 の範囲で16段階に分け、 $h/d-B/d$ 平面上で交互砂州と準砂州および短対角州との形成限界線を求めた。Fig. 12 は、河床こう配 I がおよそ

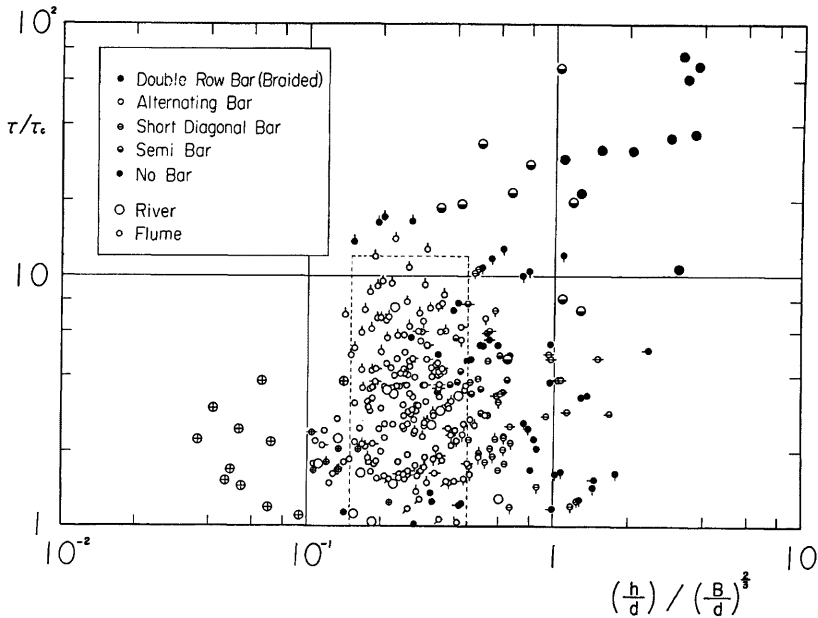
Fig. 12. Criteria for formation of alternating bars on $h/d-B/d$ plane.

1/50, 1/100 および 1/500 の場合についての検討結果を例示したものであるが、同図にみられるようにすべての I の段階に対して交互砂州の形成限界線は、

$$\frac{h}{d} = R(I) \left(\frac{B}{d} \right)^{2/3} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

の関係で近似に表されることが明らかになった。上式の係数 $R(I)$ と I との関係を図示すれば Fig. 13 のようになって、 $I \leq 1/20$ の範囲で $R(I) \approx 0.45$ となり、 $R(I)$ は I にほとんど関係しないことがわかる。また、 $I > 1/20$ において $R(I)$ が I の増加とともに減少する理由は、このように大きな河床こう配では $h/d \geq 20$ で $\tau/\tau_c \geq 12$ となり、(3.4)

Fig. 13. Relation between $R(I)$ and I .


 Fig. 14. Formation of meso-scale bed configuration on $(h/d)/(B/d)^{2/3}-\tau/\tau_c$ plane.

式の形成限界に達するまでに中規模河床形態が平滑化する条件に達するためと考えられる。したがって、この τ/τ_c で与えられる限界内では、交互砂州の形成限界は河床こう配にほぼ関係せず、 h/d と $(B/d)^{2/3}$ の比のみが支配パラメーターになる。すなわち、河床材料と流路の横断形状要素のみが交互砂州の形成を支配することになる。

以上より、横軸に $(h/d)/(B/d)^{2/3}$ 、縦軸に τ/τ_c をとって、 I のすべての段階の実測値を図示すれば Fig. 14 のようになる。交互砂州の形成領域を極く単純化して示せば図中の点線の範囲

$$1 < \tau/\tau_c < 12 \quad \text{かつ} \quad 0.15 \leq \left(\frac{h}{d} \right) / \left(\frac{B}{d} \right)^{2/3} \leq 0.45 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

になることがわかる。また、複列砂州（網状流路）の形成領域は $(h/d)/(B/d)^{2/3} < 0.15$ 、準砂州および短対角州の実測値は $(h/d)/(B/d)^{2/3} > 0.45$ の領域で非発生の実測値と混在するが、準砂州は $(h/d)/(B/d)^{2/3} > 0.65$ ではみられない。一方、 $\tau/\tau_c > 12$ では、非定常流量の影響を受ける実河川の資料を除けば、準砂州および短対角州も形成されていない。Fig. 14 に示した交互砂州の形成領域は従来の形成領域よりかなり明確であるが、(3.5) 式の境界線

$$\left(\frac{h}{d} \right) / \left(\frac{B}{d} \right)^{2/3} = \begin{cases} 0.15 \\ 0.45 \end{cases} \quad \text{および} \quad \frac{\tau}{\tau_c} = 12$$

については今後理論的に究明する必要がある。とくに、 $(h/d)/(B/d)^{2/3} = 0.45$ の境界線は前述のように $I > 1/20$ では I の影響を受けて変化するのでさらに詳細な検討を必要とするが、以下では交互砂州の形成領域として (3.5) 式を前提として、各中規模河床形態の区分図を示す。

3.5 中規模河床形態の形成領域

前節の結果から、 $1 < \tau/\tau_c < 12$ の範囲であれば、河床こう配は中規模河床形態の形成領域に主要な影響を与えないことが明らかになった。これは、河床こう配が 10^{-4} オーダーの大河川から 10^{-1} オーダーの実験水路まで広範囲にわたって交互砂州が形成されるという経験的事実の説明となる。一般に、中規模河床形態は、流砂量の平面的な不均衡によって発生し、それが維持されて発達すると考えられる。したがって、上述の結果は、河床こう配が流砂量の平均値には関係するが、平面的な分布状態には影響しないことを示唆している。

さて、Fig. 14 の横軸のパラメーターは

$$\left(\frac{h}{d}\right) / \left(\frac{B}{d}\right)^{2/3} = \left[\left(\frac{h}{d}\right) / \left(\frac{B}{h}\right)^{2/3}\right]^{1/3}$$

であるので、 $1 < \tau/\tau_c < 12$ の条件が満たされていれば、(3.5) 式の交互砂州の形成領域は

$$0.0034 \left(\frac{B}{h}\right)^2 < \frac{h}{d} < 0.091 \left(\frac{B}{h}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

となる。また、3.2 の考察から $B/h=10$ によって短対角州と準砂州の形成領域を区分し、(3.6) 式の関係を用いて 3.3 で分類した 4 つの河床形態の形成領域を図示すると Fig. 15 のようになる。ここで、 B/h は横断方向の流れの自由度あるいはそれに依存する大規模乱れのスケールを表し、 h/d は粒径オーダーの河床擾乱の流れに対する影響を表していると考え、Fig. 15 の形成領域区分はつぎのようにいえる。すなわち、準砂州領域は、 h/d に比して B/h が小さく、粒径オーダーの河床擾乱の影響よりも幅の拘束が強いため平均的な流れがほとんど変化せず、したがって河床の擾乱がほとんど発達しない条件に対応し、また、複列砂州領域は、 B/h が大きいために横断方向のいくつかの擾乱が同時に発達しうような条件に対応しているものと考えられる。今後、こうした河床形態の発生・発達機構を検討し、Fig. 15 の区分をさらに明確にする必要がある。

最後に、中規模河床形態の形成領域区分として従来用いられる $U_* / U_{*c} - BI/R$ 平面による区分法と(3.6) 式との対応を述べるとつぎのようである。この領域区分図で実測値に基いて示されている各河床形態の境界線はつぎの関係で表されている。

$$\frac{U_*}{U_{*c}} = a \left(\frac{BI}{R}\right)^n \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

ここに、 U_{*c} は、限界摩擦速度、 R は径深および a, n は定数である。 $U_* = \sqrt{gRI}$ 、 $U_{*c} = 0.05(\sigma/\rho - 1)gd$ を用いて上式を変形すると

$$\frac{R}{d} I = 0.05a^2 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \left(\frac{BI}{R}\right)^{2n} \quad \dots\dots\dots (3.7')$$

となる。(3.7) 式の指数として鮭川⁵⁾は $n=1/4$ 、池田⁷⁾は $n=1/3$ 、岸ら¹⁰⁾は $n=1/2$ を与えているが、 $n=1/2$ の場合に(3.7') 式は I に無関係となり、 $h \equiv R$ とすると(3.6) 式と同様の無次元量の関係式に帰着する。しかし、(3.7') 式では $h/d \sim B/h$ であり、(3.6) 式では $h/d \sim (B/h)^2$ であって、境界線のこう配が異なり、河床形態の定義も異なるので両者の比較は困難である。

以上のように、従来の領域区分法では無次元パラメーターの誘導^{5,7)}にあたっては河床こう配が主要素になっているが、実測値に対しては主要な影響を持たないことを示していると考えられる。さらに、(3.6) 式の場合、3.1 の考察からわかるように、 $I/(\sigma/\rho - 1)$ に無関係であるが、(3.7') 式で

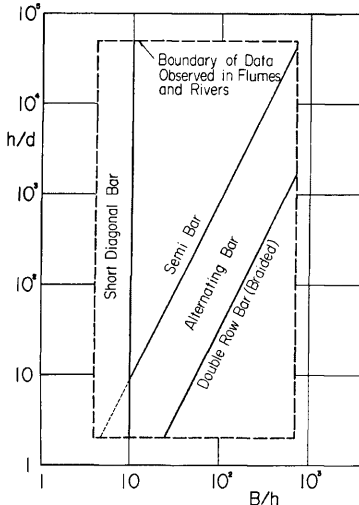


Fig. 15. Formation of meso-scale bed configuration on $B/h-h/d$ plane.

$n=1/2$ の場合に両辺から I が消去されても水中比重 $\sigma/\rho-1$ の影響が残るので、(3.6) 式と (3.7) 式とでは基本的な相違がある。この点で従来の領域区分図では比重の異なる実験結果は同一の関係で表し得ないと考えられる。一方、(3.5) 式の領域に対して、比重 1.05 の Plastic pellet を用いた Chang ら⁸⁾ の実験結果は $(h/d)/(B/d)^{2/3}=0.142\sim0.549$ で大半は $0.15\sim0.45$ の範囲にあってほぼ同一の表示が可能である。

4. 結 論

以上、本論文では、中規模河床形態に関して、従来不明確であった形状特性と水理量との関係を検討し、その結果に基いて河床形態の分類と形成条件について考察を行い、新たな領域区分図を提案した。本研究によって得られた主な結果を要約するとつぎのようである。

- 1) 砂川高・流路幅比 Z_B/B の特性は、 $h/B \div 0.1$ を境にして変化し、 $h/B > 0.1$ の場合 F_r による影響は大きい、 $h/B < 0.1$ 、とくに $h/B < 0.04$ においては F_r の影響はほぼ無視できる。
- 2) 砂州長・流路幅比 l_B/B の特性は、 $h/B \div 0.1$ を境にして変化し、 $h/B > 0.1$ では $F_r=1.0\sim1.2$ の範囲を除いて F_r にほぼ無関係に $l_B/B=2\sim4$ である。一方、 $h/B < 0.1$ では F_r によって $l_B/B=3\sim12$ の範囲で変化し、とくに $h/B < 0.04$ では $F_r \div 1.0$ で極小値を示す。
- 3) Z_B/B および l_B/B に対する掃流力・限界掃流力比 τ/τ_c の影響は、実験値の存在範囲では小さい。
- 4) 中規模河床形態は、複列砂州（網状流路）、交互砂州、準砂州および短対角州の4つに分類される。
- 5) 複列砂州は、 h/B の減少によって交互砂州が Z_B/B 、 l_B/B をともに減じ、 $l_B/B \leq 4$ 、 $Z_B/B \leq 0.04$ となる場合のものである。準砂州は、 h/B の増加によって Z_B/B が減少し、 $Z_B/B \leq 0.04$ となる場合のものであって、木下による準砂礫堆、池田によるタイプ3に相当すると考えられる。
- 6) 短対角州は、 $h/B > 0.1$ の条件で形成される $l_B/B \leq 4$ の波長の短い砂州であって、 h/B の増加とともに波高と波長が増大し、交互砂州とは異なった形状特性を示すので、本研究で、新たに定義した河床形態である。
- 7) 中規模河床形態の形成領域は、 $1 < \tau/\tau_c < 12$ の範囲に限られ、この条件下では形成条件に河床こう配 I あるいは I と水中比重の比 $I/(\sigma/\rho-1)$ はほぼ無関係となつて、支配パラメーターは河床材料と流路の横断形状要素のみで構成される $(h/d)/(B/d)^{2/3}$ となる。
- 8) $(h/d)/(B/d)^{2/3}-\tau/\tau_c$ 図によって、実測値を検討した結果、従来の形成領域区分図より河床形態の区分が明確であつて、交互砂州の形成領域を単純化すると、

$$1 < \tau/\tau_c < 12, \text{ かつ } 0.15 < (h/d)/(B/d)^{2/3} < 0.45$$

で与えられる。この条件を用いて、 $h/d-B/h$ 平面上で上述の4種の河床形態の形成領域を示した。

以上の結果は、主に従来行われた実測値の検討から導かれたものであつて、今後、中規模河床形態の発生・発達過程を把握し、砂州の形状特性と形成条件についてさらに検討したいと考えている。

最後に、本研究をまとめるにあたって、図面の整理に協力して戴いた河川災害部門の中村行雄氏と実験ならびに資料整理に尽力してくれた本学大学院生の堀池周二君に感謝します。また、本研究の遂行にあたって昭和51年度科学研究費奨励研究(A)の補助を受けた。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 村本嘉雄，藤田裕一郎：蛇行流路の形成過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第19号B-2，1976。
- 2) 芦田和男，奈良井修二：河床形態の変動特性に関する研究——その統計的構造について——，京都大学防災研究所年報，第12号B，1969。
- 3) 木下良作：石狩川河道変遷調査—参考編一，科学技術庁資源局資料第36号，1962。
- 4) 芦田和男，塩見靖国：水路における砂礫堆の水理特性について，京都大学防災研究所年報，第9号，

1966.

- 5) 鮎川登：直線河道における流れの蛇行現象に関する水理学的研究，科学技術庁資源調査所，1971.
- 6) 前出の 5) に引用されている。
- 7) 池田宏：実験水路における砂礫堆とその形成条件，地理学評論，46-7，1973.
- 8) Chang, Hai-Yain, D.B. Simons & D.A. Woolhiser: Flume Experiments on Alternate Bar Formation, proc. of ASCE, Jour. of WW div., ww1, 1971.
- 9) 池田宏：砂礫堆からみた河床形態のタイプと形成条件，地理学評論，48-10，1975.
- 10) 岸力，黒木幹男，今泉正次：拘束蛇行流に関する実験的研究，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，1975.