

交互砂州の発達機構
On the Mechanisms of Alternating Bar Development

京都大学防災研究所 正員 藤 田 裕 一 郎
京都大学防災研究所 正員 村 本 嘉 雄
京 都 市 正員 堀 池 周 二
北 海 道 開 発 局 正員 小 池 剛

1. は し が き

代表的な河床形態の一つである交互砂州は、左右岸に交互の局所洗掘と水流の蛇行を生じて、大規模な流路変動から河川構造物の倒壊、機能障害まで各種の河道災害を引き起こすことが知られている。河道の安全を目的として、このような交互砂州の水理特性を明確にするためにこれまでに理論的、実験的な研究や実河川の調査が重ねられてきて、形成条件や形状特性に関する数多くの知見が得られている。しかしながら、発達機構については、河床変動の線形安定理論による研究において土砂水理学の基礎式によってモデル化されているとはいえ、実証的な研究がほとんど行われていないために未解明の状況にあるといつて過言でなく、現在では発達機構に関する知識の限界が理論的研究の進展を阻む主要因の一つとなっている。発達機構に関する研究を実証的に進めることは、上述の阻害要因を取り除き、交互砂州の形成条件や形状特性を理論的により明確にするだけではなく、非定常流条件下での交互砂州の挙動を予測する場合の基礎と与えるものとも考えられる。

以上の観点から、著者らはこれまで交互砂州の発達過程に関する研究を進めてきているが、本論文では初めに発達過程の特徴を要約し、ついで発達過程における土砂の移動状況を河床変動の詳細な検討によって明らかにし、発達機構の特性を見出す。さらに、発達終了する平衡状態の波高に関する力学的考察によって交互砂州の波高の予測式を誘導し、実験値と比較するとともに実河川における交互砂州の波高との相違について検討する。

2. 交互砂州の発達過程の特徴¹⁾

交互砂州の発達を把握するために交互砂州の形成条件下で水路幅を4種に変化させて実験を行った。実験では初期ほど密な時間間隔で通水と停水を繰返し、水理量および河床変動と河床形態を測定している。平均水理量の流下方向変化および経時変化は無視できる程度であつて、実験条件と主な結果は表-1にまとめられている。

これらの実験について交互砂州の発達過程を基本的な形状特性量である波長 l_B と 波高 Z_B の時間的変化で代表させて検討した結果つぎの点が明らかにされた。すなわち、図-1に模式的に示したように交互砂州の発達に対応して、波長、波高とも通水時間 T とともに増加し、ある時間を経て極大値に到達しその後その極大値の周辺で増減を繰返す。この極大値への

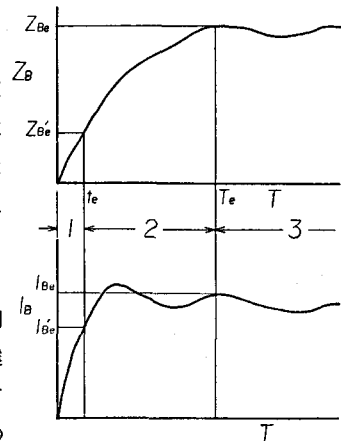


表-1 交互砂州の発達過程に関する実験の条件と結果 図-1 交互砂州の発達過程の模式図

Run No.	Q (l/s)	B (cm)	h (cm)	Fr	$1e \times 10^3$	U_* (cm/s)	d_m (mm)	T (min)	T_e (min)	l_{Be} (cm)	Z_{Be} (cm)	q_B (cm ² /s)	Z_{Be}' (cm)	t_e/T_e
A-1	3.00	55	1.65	0.84	5.78	2.95	0.99	501	354	215	4.32	0.0223	0.73	0.04
B-1	1.39	30	1.50	0.80	6.59	2.96		309	147	140	1.51	0.021	0.65	0.16
B-2	1.43		1.36	0.96	15.08	3.56		136	55	152	2.11	0.0605	0.49	0.20
C-1	3.00	40	1.77	1.09	9.48	3.88		98	44	162	2.45	0.0743	0.99	0.22
C-2	1.95		1.26	1.13	9.35	3.28		162	66	206	2.97	0.054	0.89	0.09
D-1	43.78	200	4.15	0.84	3.51	3.63	0.88	366	270	936	7.35	0.210	1.91	0.47
D-2	43.78		4.32	0.79	2.59	3.16		560	560	1003	5.90	0.130	2.24	0.29

到達時間は通常波長の方が短く、かつ極大値に対する初期の増加率も大きい。したがって、砂州の発達時間を T_e とすると T_e は波高が最初の極大値に達するまでの時間とするのが妥当であって、 $T = T_e$ において交互砂州が一種の平衡形状になると考えられる。そのときの波長、波高をそれぞれ l_{Be} 、 Z_{Be} とし、これらで無次元化して波長、波高の発達状況を対比して示せば図-2 のようであって、全体に $l_B/l_{Be} > 0.7$ において Z_B/Z_{Be} の増加が著しくなっていて、いま $l_B/l_{Be} = 0.6$ を基準にとればその後の Z_B/Z_{Be} の増加量はいずれも 0.6 以上である。

実験の経過と写真記録によると、 $l_B/l_{Be} = 0.6$ となる時点において交互砂州は規則的な前縁が明確になって、連続した走時曲線を描きうる状態に達している。この時刻を t_e とすると先述の T_e とともに交互砂州の発達過程は図-1 に示されたつぎの3段階に分けることができる。

- ① 第1段階：通水開始後、波長、波高がともに増大し、前縁が明確になって波長の増加率が低下するまでの段階 ($T < t_e$)
- ② 第2段階：波長は緩かに増加し一定値の周辺を波状変化するようになるが、波高は増大を続けそれが最初の極大値をとるまでの段階 ($t_e < T < T_e$)
- ③ 第3段階：交互砂州の発達が平衡状態に達して波長、波高がともに一定値の周辺を波状変化する ($T_e < T$) 段階

t_e/T_e および $T = t_e$ における波高 Z_{Be} も表-1 に示しているが、Run D-1 を除いて $t_e/T_e < 0.3$ であって、砂州の発達時間の大半は前縁が明確になった後の波高の増大する第2段階で占められていることがわかる。

この第2段階以降の波長の変化は主として波高に支配される移動速度の相違によるものであり、一方交互砂州による蛇行流や局所洗掘も波高に最も関係している。したがって、交互砂州の発達機構を波高の発達機構とみなすことは妥当であって、それを明らかにすることの重要性も高い。

3. 交互砂州の発達機構¹⁾

3.1 交互砂州の発達に伴う河床変動と土砂移動

交互砂州の発達過程における河床変動の状況を前述の発達過程の3段階が典型的に現われた Run C-2 を例にして以下に述べる。

図-3 は、各停水毎に、断面平均河床高の流下方向の回帰直線で表される仮想平均河床高と実際の河床高との差を水路中心線および両側壁近傍の3測線について示したものであり、一方図-4 はその平面分布である。図-3 では、 $T = 6'$ においてすでに両側壁近傍に交互の洗掘と堆積が生じており、中心線に沿う河床高は両側壁の堆積部を連ねた形状をしている。両側壁の交互の洗掘部は、時間的に深さと長さを増大するとともに縦断形状を扁平なV字状からU字状に変えてその面積を $T = 66'$ ($= T_e$) に最大としている。一方、堆積部の高さはわずかに増加するのみであって、側壁近傍の河床高は交互砂州の発達に伴って平均的に著しく低下することがわかる。これに対して、中心の河床高は両側壁の堆積部を連ねた形状から $T = 66'$ には堆積部の峰を結ぶ直線に近くなっていて平均的に上昇しているが、その上昇量は両側壁近傍の低下

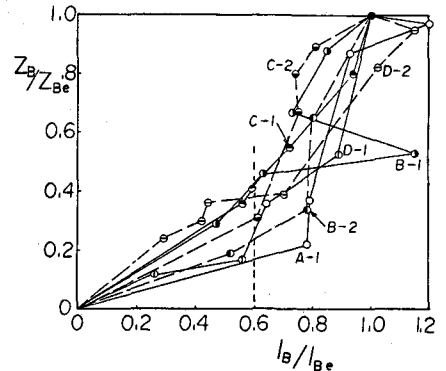


図-2 波長と波高の発達状況の比較

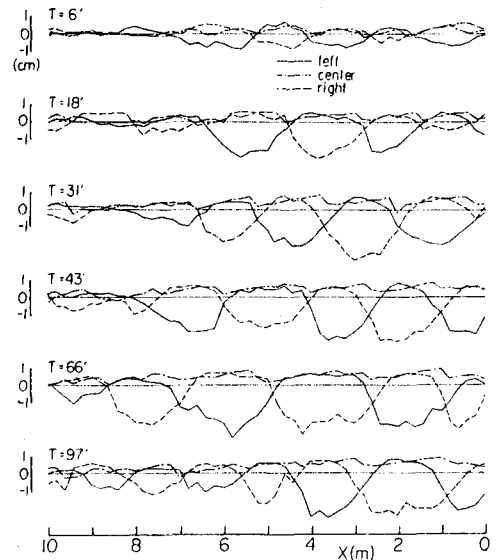


図-3 水路中心および両側壁における河床変動量

量に比較すると極めてわず
かである。このような河床変
動の状況は図-4にも明確に
現われていて、 $T = 18'$ まで
は水路中央部にも両側壁近
傍からの洗掘域が達してい
るが、 $T = 43'$ には水路中央
部がほぼ全域で 0.5 cm 以上の
堆積を示し、洗掘域の幅も狭
められている。この状況は
 $T = 66'$ の河床に最も顕著で
あって、交互砂州の発達に伴
って両側壁近傍から交互に

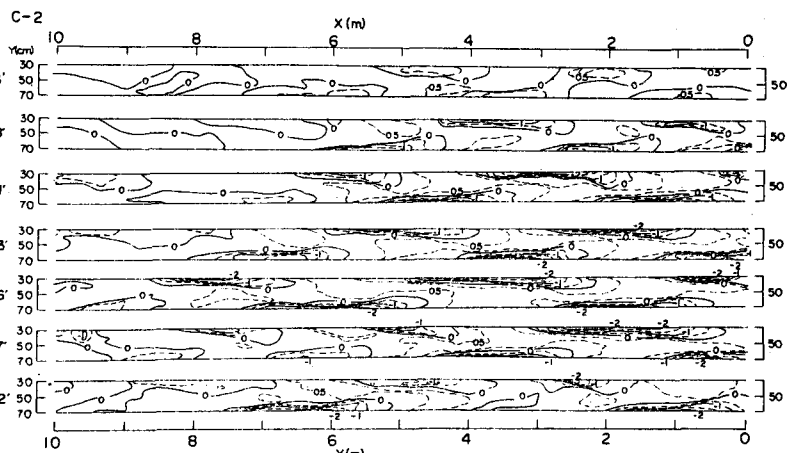


図-4 河床変動量の平面分布

洗掘された土砂が広く水路中央部全体に堆積することを示している。

以上から、交互砂州の発達に伴う土砂移動は図-5に模式的に示したような状況になることが推定される。すなわち、砂州による蛇行流の集中・発散に対応して、砂州先端の対岸付近を中心に洗掘され放射状に流送された土砂の大部分が下流側の洗掘部の埋戻しや砂州の前進に寄与し、残りの部分が前縁の横方向への張出しに用いられて河床中央部にとどまる、後者の堆積量に見合うだけ両側壁付近の洗掘が進行し、その深さだけ砂州の波高が増大する。したがって、同程度の発達段階にある砂州を偶数個含む区間について図-4の河床形状を縦断方向に平均し、その横断分布を示せば図-6のように蒲鉾型となる。この横断形状の高さ Z_k は Z_B と同様に $T = T_e$ まで増加した後やや減少するが、 Z_{Be} に対する割合は $Z_k/Z_{Be} = 0.5 \sim 0.7$ である。 $T = T_e$ 以降に Z_k が減少傾向に移行するのは横断方向に輸送されて中央部に堆積する土砂が無くなるためと推定される。

以上のように蒲鉾型横断形状が交互砂州の発達に寄与する河床変動の履歴を忠実に表している点に着目して、著者らはこの形状をもたらし横断方向の流砂の強度を検討し、それが実験規模によらずほぼ一定となることを見出して発達時間が次式で推定されることを示した。

$$T_e = 0.6 l_{Be} Z_{Be} / q_B \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、これまで述べてきた点に基いて交互砂州の発達機構の特性を次節に述べる。

3. 2 交互砂州の発達機構

第1段階の終了後の交互砂州を発達させる土砂の移動機構は、前述の知見に交互砂州上の流況特性に関する研究結果²⁾を導入して要約するとつぎのようになる。

① 明確になった前縁の段差によって水流の集中と発散を伴う蛇行流が形成され、前縁下流の側壁近くで洗掘が生じ、洗掘砂の一部は発散する流れに従って水路中央部に輸送され、下流側の前縁の周辺に堆積する。

② 上の土砂流送によって波高が増加すると水流の蛇行がより顕著になって波高の発達が加速され、平均的には蒲鉾型横断形状の発達速度が極大となる。

③ しかし、波高は極大値をとるので、波高の増加に伴って発達を抑制する要素が生じていくと考えられ、これを横断方向の河床こう配の増大に伴って側壁から中央に向う

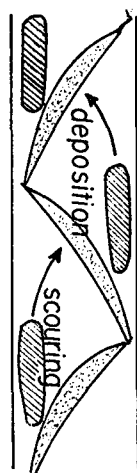


図-5 土砂の移動状況の模式図

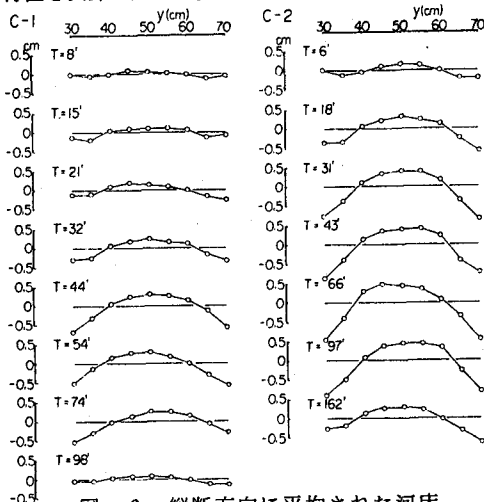


図-6 縦断方向に平均された河床変動量(蒲鉾型横断形状)

土砂移動を妨げるように働く重力の横断方向成分であると推定するのは妥当であろう。

④ この重力作用によって波高の発達に寄与する土砂移動量が減少し、発達が抑制されるさらに横断方向の流体力と斜面こう配による重力とが均衡した時点で発達完了する。

実験ではこの時点の前後で図-7に示したように水路中央部の前縁が不明確になるとともに、側壁近傍で砂州の先端が下流側の洗掘部に引込まれるように低下して河床が明らかに蒲鉾型になり、水流がほぼ二分されてしまう状態がしばしば観察される。この場合には重力作用によって河床の平坦化が進んだ後に再び交互砂州が発達するものと推定される。また、このように水流が完全に二分されなくとも蒲鉾型横断形状がある段階まで発達すれば水流の蛇行特性の弱まることも考えられ、この場合砂州の波高は蒲鉾型形状の減衰に伴ってやや減少した後再び増加することを繰返す可能性がある。いずれにしても定常流量下でも交互砂州の波高は時間的に増減を繰返す可能性が高い。

交互砂州の発達過程は上述の機構を定式化すれば予測できるが、式の複雑さに比して精度が期待できないので、ここでは④の均衡に着目して波高の予測式を誘導する。

4. 交互砂州の波高

4.1 平衡波高の決定機構³⁾

図-8のように、簡単のために水路中心線上の河床高の上昇量がわずかであったことからこの点の高さを一定とし、 $T = t_e$ の蒲鉾型横断形状を三角形で、その後の形状を台形で近似する。この近似化によれば図-5の土砂移動は斜面部Aで洗掘された土砂が斜線部Bに流送され堆積するように考えられる。

いま $T = t_e$ の三角形の高さを Z'_k 、 $T = T_e$ の台形の高さを Z_k とすると、それらと波高との関係はつぎようになる。

$$Z_{Be}' = \alpha'_k Z'_k \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Z_{Be} = \alpha_k Z_k \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 α'_k は約3、 α_k は約2の値をとる実験定数である。

また、横断方向土砂移動を抑制する斜面こう配は、平均的にみて蒲鉾型形状の斜面こう配 $\tan \theta$ に等しいと考えられるので、図中の記号と土砂の連続関係 $Z_k B_t = Z'_k B/2$ および(2)、(3)式を用いて次式で示される。

$$\tan \theta = (2\alpha'_k / \alpha_k^2) Z_{Be}^2 / Z_{Be}' B \quad \dots\dots\dots (4)$$

つぎに、前縁が明確になるのは波高が粒径の何倍になるとする時点であり、その倍数は流路幅とともに増加すると考えて、 Z_{Be} と水理量との関係を表-1の値を用いて検討し図-9に示すように次式を得た。¹⁾

$$Z_{Be} / d = \beta_d (B/d)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 β_d は $\beta_d = 0.15$ の実験定数である。

一方、横断方向の流向の代表量 $\tan \beta$ は、交互砂州上の平均流向に関する検討結果²⁾ に他の測定資料^{4, 5)} も追加し再整理した図-10によってつぎのように与える。ただし、 D は斜め段落ち高であって $D = Z_{Be} / 2$ としている。

$$\tan \beta = \alpha_v (l_B / B)^p (Z_B / h) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 B は流路幅、 h は水深、 α_v 、 p は $\alpha_v = 0.17$ 、

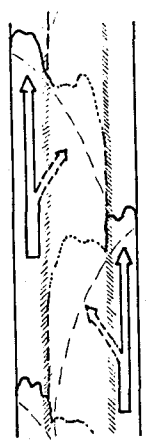


図-7 平衡後の砂州の平面形状の模式図

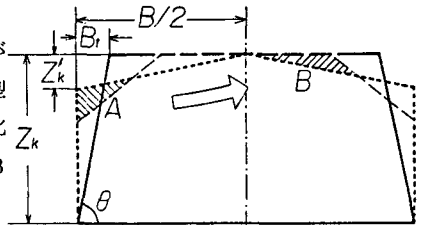


図-8 台形近似された蒲鉾型横断形状

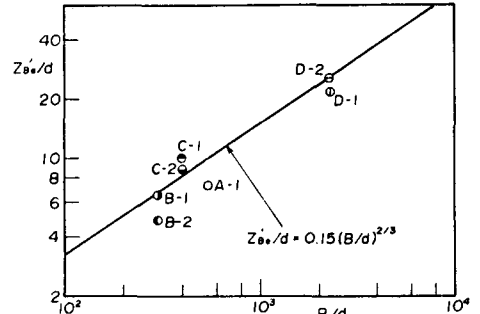


図-9 第1段階の終了時の波高の検討

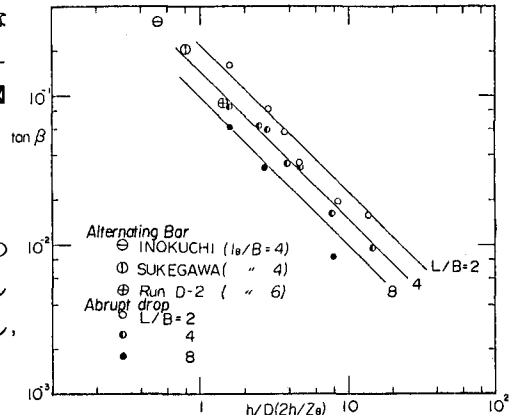


図-10 波高と平均流向との関係 ($D = Z_B / 2$)

$P = 0.585$ の実験定数である。

最後に、斜面上で定常運動を行う砂粒運動の基礎式は図-11を参照し、流下方向こう配 i を無視するとつぎようになる。(文献 6) 参照)

$$\left. \begin{aligned} D \cos \delta - F \cos \gamma &= 0 \\ D \sin \delta - F \sin \gamma + (W - J) \sin \theta &= 0 \\ \tan \delta &= (v_d - v_g) / (u_d - u_g) \\ \tan \gamma &= v_g / u_g \\ D &= (\epsilon C_D / 2) \rho \{ (u_d - u_g)^2 + (v_d - v_g)^2 \} \alpha_1 \pi d^2 \\ F &= \mu_k (W - J) \cos \theta \\ W &= \sigma g \alpha_2 \pi d^3, \quad J = \rho g \alpha_2 \pi d^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} D &= (\epsilon C_D / 2) \rho \{ (u_d - u_g)^2 + (v_d - v_g)^2 \} \alpha_1 \pi d^2 \\ F &= \mu_k (W - J) \cos \theta \\ W &= \sigma g \alpha_2 \pi d^3, \quad J = \rho g \alpha_2 \pi d^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

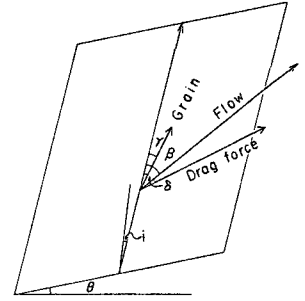


図-11 斜面上で定常運動する砂粒に働く力

ここに、 u_g と v_g は砂粒の流下方向と横断方向の移動速度、 u_d と v_d は流下方向と横断方向の流速、 σ と ρ は砂粒と水の密度、 g は重力の加速度、 μ_k は砂粒の動摩擦係数、 C_D は抗力係数、 ϵ は遮蔽係数、 α_1 と α_2 は砂粒の面積と体積の係数である。

さて、平衡波高の条件は砂粒が横断方向に移動しなくなる条件にはほぼ等しいとみなせるので、(7) 式に $v_g = 0$ あるいは $\tan \gamma = 0$ を代入し、無次元化して整理すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} T_* \{ (1 - u_g'^2 + v_d'^2) \cos \delta &= \mu_k \cos \theta \\ T_* \{ (1 - u_g'^2 + v_d'^2) \tan \delta &= \sin \theta \\ \tan \delta &= v_d' / (1 - u_g') \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

$$u_g' = u_g / u_d, \quad v_d' = v_d / u_d = \tan \beta \dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} T_* &= \{ \tan \phi (\epsilon_k / \epsilon_c) / (1 + \tan \phi) \} (\tau_* / \tau_{*c}) \\ &= 0.671 (\tau_* / \tau_{*c})^6 \dots\dots (11) \end{aligned}$$

(9)式によって

$$v_d' / (1 - u_g') = \tan \theta / \mu_k \dots\dots (12)$$

(12)式に(4)～(6)式を代入整理すると

$$\frac{Z_B}{B} = \frac{\alpha_k^2 \alpha_v \beta_d}{2 \alpha_k'} \left(\frac{l_B}{B} \right)^{-p} \mu_k \left(\frac{B}{h} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{h}{d} \right)^{-\frac{1}{3}} \dots\dots (13)$$

となる。なお波高の添字 e は上式以降省略する。 $l_B / B \approx 4$ とし、各定数にこれまでの値を代入するとつぎの近似式が得られる。

$$Z_B / B = \{ 0.0051 / (1 - u_g') \} (B/h)^{\frac{2}{3}} (h/d)^{-\frac{1}{3}} \dots\dots (14)$$

上式は、 Z_B / B が B/h の増加に伴って増加し、 h/d の増加に対してやや減少することを示している。また、 $(B/h)^{\frac{2}{3}} (h/d)^{-\frac{1}{3}}$ が中規模河床形態の形成条件を表すパラメーター⁷⁾の逆数に一致している点に着目すれば、(14)式は準砂州から交互砂州に向かう無次元波高の増加を表していると理解することができる。図-12は(14)式を実験値によって検討したものであって $2.2 < (B/h)^{\frac{2}{3}} (h/d)^{-\frac{1}{3}} < 6.7$ が交互砂州の形成領域である。 u_g が0でないことを考慮すれば実験値は(14)式に沿って上述のように準砂州から交互砂州に向かって増加しており、(14)式がほぼ妥当であることが認められる。複列砂州の Z_B / B の減少は蛇行モードの変化のためと考えられ、一方、短対角州の形状特性が交互砂州と異なっていることも同図から確認される。

つぎに、(13)式から砂粒の移動速度を消去して掃流力の影響について検討する。この場合には(9)式から u_g' を消去し、さらに v_d' や Z_B も(4)～(6)式によって消去した $\tan \theta$ のみの次式を収束計算する必要がある。

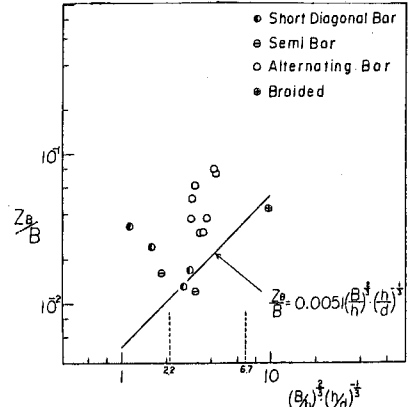


図-12 波高の予測式と実験値の比較

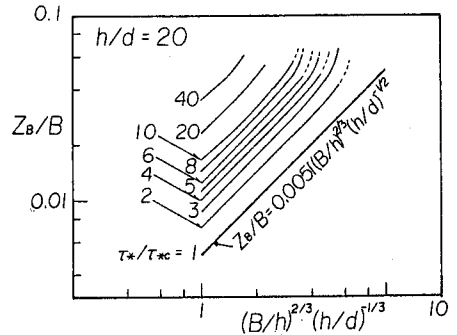


図-13 波高の予測値の掃流力による変化の計算例

$$\tan^2 \theta + (1 + 3 \mu_k^2) \tan^4 \theta + 3 \mu_k^2 (1 + \mu_k^2) \tan^6 \theta + \mu_k^4 \left[3 + \mu_k^2 - \left\{ \frac{2 \alpha'_k}{\alpha_k \beta_d^2} \left(\frac{B}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} / T_*^2 \alpha_v^2 (L_B/B)^p \right] \tan^2 \theta + \mu_k^6 = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

図-18は計算結果の一例であって、 τ_*/τ_{*c} の増加とともに波高が増加することが示されている。 $\tau_*/\tau_{*c} > 20$ になるとここで前提にしているような流砂形態が変化し、浮流砂も増加して砂州はフラッシュされていくので、掃流力による変化幅は3～4倍程度と思われ、図-12の実験値はほぼその範囲に収まっている。しかしながら、(15)式では第4項〔 〕内の負号の項の絶対値が小さくなると、交互砂州の形成条件内でも実根が存在しなくなり、 τ_*/τ_{*c} が大きい場合には平衡状態の存在範囲は狭いようである。

以上のように、交互砂州の波高の極大値の決定機構について単純な考察を加え波高の予測式を得たがその妥当性はかなり高く、砂州の波高の予測はある程度可能と思われる。次節では実河川に形成される交互砂州の波高に対する予測式の適用性を検討する。

4. 2 実河川における交互砂州の波高

実河川における砂州の形状特性は把握すること自体困難であるが、すでに報告⁷⁾しているように無次元波長 L_B/B は実験水路のものと同程度かやや低い値であるのに対して、無次元波高 Z_B/B は1オーダー近く低くなる傾向にあって(14)式は実際の波高に比して過大な予測値を与えると思われる。ここでは、直線的な河道に交互砂州が形成されている阿賀野川および那賀川の下流区間の例を取り上げてみる。両河川の低水路の諸元と交互砂州の形状の平均値は表-2のとおりであり、同表には(14)式で $u_g' \approx 0$ とした場合の波高の予測値も示されている。予測値と実測値との差は2～4倍であって、規則的な交互砂州が形成されている場合には(14)式で波高の概略値を知ることができるが、實際上この相違は極めて大きい。この相違の理由としては多くのものが考えられるが、わが国の河川の場合、第一に洪水継続時間に比較して砂州の発達時間が非常に長いことが挙げられよう。実際、芦田・道上⁶⁾の抵抗算定法と流砂量式によって低水路満杯時の流量および単位幅流砂量を求め、(1)式を用いて現在の波高に達する時間を見積れば、表-2最後欄のように、阿賀野川の場合1500 m³/secの流量が9年近く、一方那賀川の場合3700 m³/sec 出水が50日以上継続する必要がある。低水路満杯

表-2 低水路の諸元、砂州形状の実測値と予測値および発達時間

River	B (m)	h (m)	I	d _m (mm)	Z _{Bobs.} (m)	l _B (km)	Z _{Bcal.} (m)	Q (m ³ /s)	q _B (m ² /h)	T _{cal.} (days)
Agano	730	3.1	1/5000	1.4	3	2.05	11.1	1500	0.049	3170
Naka	350	3.8	1/750	27.	4.8	1.07	7.5	3700	2.44	52

流量を平均年最大洪水流量とみなしその継続時間を10時間程度と考えれば、那賀川の場合でも現在の砂州の形成に100年程度の年月がかかることになる。このような長期間砂州が外部から乱されずに発達し続けるとは考えにくく、実河川では(14)式による予測値やあるいは実験水路での値よりも無次元波高が小さくなるものと思われる。

5. あとがき

本論文では、最初に交互砂州の発達過程の特徴を要約し、前縁が明確になって波長がほぼ決定された後に波高の増大が顕著になることを指摘して、交互砂州の発達機構を波高の発達機構とみなすことの妥当性と重要性を明らかにした。ついで、発達過程の河床変動を詳しく検討するとともに交互砂州上の流況特性を考慮に入れて交互砂州の発達に寄与する土砂の移動状況を見出し、発達機構の特性を明らかにした。さらに、この発達機構に関する知見にこれまでの研究成果を導入して平衡波高の支配条件を定式化し、交互砂州の波高の予測式を誘導した。最後に、この予測式の妥当性が実験水路資料には高いことを示すとともに、実河川資料と相違する理由について発達時間の推定に基づく考察を行った。

今後は、ここでは言及することのできなかつた交互砂州の発達過程の第一段階、すなわち砂州前縁が明確になって波長がほぼ決定されるまでの過程についての研究⁸⁾を進め、交互砂州の発達機構の全体を明確にしていくつもりである。

参 考 文 献

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| 1) 藤田・村本・堀池：京大防災研年報，第24号B-2, 1981. | 5) 鮎川：資源調査所資料，1972. |
| 2) 藤田：第24回水理講演会論文集，1980. | 6) 藤田：京大防災研年報，第22号B-2，1979. |
| 3) 藤田・村本・小池：土木学会第36回年講概要集，1981. | 7) 村本・藤田：第22回水理講演会論文集，1978. |
| 4) 井口：東大生産研報告，Vol. 14，1965. | 8) 村本・藤田・小池：昭和56年度関西支部年講. |