土木学会論文報告集
第207号・1972年11月

実験水路における交互砂洲（砂れき堆）の形成条件

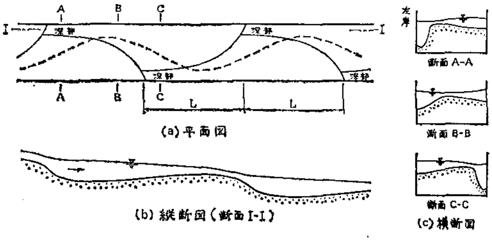
CRITERION FOR ALTERNATE BAR FORMATION IN EXPERIMENTAL FLUMES

鮏　川　登*
By Noboru Sukegawa

1. まえがき

移動床水路においては流水と河床土砂の相互作用により砂れん(ripples)，砂堆(dunes)，平坦河床(flat bed)，反砂堆(antidunes)あるいは交互砂洲(alternate bars)など種々の河床波(sand waves)が形成されることが知られている。これらの河床波は移動床流れの抵抗，流れのパターン，流砂量などと密接に関係し，移動床水路における基本的な問題として河床波の形成機構,領域区分，形状特性などに関する研究が古くから行なわれてきた。しかし，河床波に関する従来の多くの研究は移動床流れの抵抗と関連して行なわれ，砂れん，砂堆，平坦河床および反砂堆を対象としたものが大部分であり，流れのパターンと密接に関係する交互砂洲に関する研究はあまり行なわれていない。実際河川における諸現象を理解するためには河川流のパターンを規定する交互砂洲の特性を明らかにすることが重要であると考えられるので，本研究では交互砂洲を研究の対象としてとりあげた。

交互砂洲は多くの河川で形成される典型的な河床形態であり，その形状は図—1に示すように平面的な拡がりをもつ3次元の形状で，縦断面は上流側がゆるく，下流側がきつい勾配の斜面からなる3角形状をなし，横断面は非対称である。交互砂洲は下流へ向って移動する。



図—1　交互砂洲の形状および交互砂洲上の流れ

* 正会員　工博　早稲田大学助教授　理工学部土木工学科

交互砂洲が形成されている河川では直線区間においても深部が左右岸交互に現われ，流れは深部から深部へと蛇行する。そのために河岸に水衝部が生じ，河岸侵食や堤防欠壊の危険が生ずる。また，ミオ筋に沿う縦断図は階段状をなし，深部と深部の間に浅瀬が存在し，航行の障害になる。さらに，低水時には浅瀬の部分が水面上に出，寄洲となり，流れは寄洲の間を蛇行するようになるので用水の取水口の前面に寄洲がくると取水が困難になる。このように，交互砂洲の形成は河川工学上の諸問題と密接に関係しているために，古くから関心が寄せられてきた。

19世紀後半から20世紀初頭にかけてフランスやドイツで舟運のための河川改修に関連して交互砂洲の形成特性や移動特性に関する研究が行なわれた[1)~7)]。また，1950年以降には河川の蛇行現象など地理学的な関心および河岸侵食，河岸付近の局所洗掘，堤防の欠壊，用水取水口の埋没など河川工学上の諸問題と関連して交互砂洲の形成特性，形状特性，移動特性などに関する研究が行なわれるようになった[8)~15)]。これらの研究は河川調査に基づくものが大部分であり，交互砂洲の特性は定性的にはかなり知られてきたが，量的な知識はあまり得られていない。交互砂洲の形成に関しては，従来の研究により，交互砂洲は多くの河川で形成される典型的な河床形態であり，水深と水路幅の比が小さいときに形成され，また河床が低下する傾向の河道区間では形成されず，堆積傾向の河道区間において形成されること，および交互砂洲は流れが常流の場合にも射流の場合にも形成されることなどが知られている。最近，交互砂洲の形成に関して理論的な解析が試みられているが，交互砂洲の形成条件を与えるまでにはいたっていない[16)~18)]。

本研究では，実験資料に基づいて交互砂洲の形成条件を明らかにすることを試みる。

なお，本論文ではdunesの訳語として“砂堆”を用いたので，まぎらわしさを避けるために本研究で対象と

した河床形態に対しては，従来用いられていた“砂れき堆”の代りに“交互砂洲”を用いた。砂れき堆に相当する用語としてドイツ語では“Wandernde Geschiebebänke（移動する砂れき洲）”あるいは“Schrägbänke（斜めの洲）”，ロシア語では“**перекошенные гряды**（**перекаты**）（斜めの砂堆（洲））あるいは“**побоцень**”，英語では“alternate bars（交互砂洲）”などが用いられている。

2. 解析方法

Gilbert[20] および Guy•Simons•Richardson[21] の河床波の形成に関する実験資料によると，掃流力 $\tau=\rho u_*^2=\rho gRI$（ここで，ρ は流水の密度，u_* は摩擦速度，g は重力の加速度，R は径深，I は勾配である）が大きくなるにつれて河床形態は砂堆→平坦河床→反砂堆と変化すること，および掃流力が同一の場合でも径深と勾配の組合せ方によって異なる河床波が形成されることがあることが認められる。したがって，河床波の形成条件には掃流力と勾配（あるいは径深）が重要な影響を与えるものと考えられる。交互砂洲の場合には，さらに水深と水路幅の比あるいは径深と水路幅の比が重要な影響を与えることが知られている。そこで，これらの量に関する2つの無次元量を導き，それらにより河床波の形成に関する実験資料を整理し，交互砂洲の形成条件を明らかにすることを試みる。

同一の河床形態をもつ規模の異なる2つの移動床水路の対応関係を考える場合には，2つの移動床水路は原型とひずみ模型の関係にあると考えるのが一般的である。ひずみ模型の場合には勾配は無次元量ではなくなるので，このように考える場合の勾配に関する無次元量を求めることが必要になる。移動床水路のひずみ模型の相似則のひとつとして掃流力 τ と河床土砂の移動限界掃流力 τ_c との比 $\tau/\tau_c=u_*^2/u_{*c}^2$ の値を模型と原型とで等しくすることが考えられる。すなわち，

$$\frac{(u_*^2/u_{*c}^2)_m}{(u_*^2/u_{*c}^2)_p}=\frac{g_m}{g_p}\frac{R_m}{R_p}\frac{I_m}{I_p}\frac{u_{*cp}^2}{u_{*cm}^2} \doteqdot \frac{g_m}{g_p}\frac{h_m}{h_p}\frac{I_m}{I_p}\frac{u_{*cp}^2}{u_{*cm}^2}=1 \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで，u_{*c} は河床土砂の移動限界摩擦速度，h は水深であり，添字 m および p はそれぞれ模型および原型における量を表わす。いま，流れ方向の水平縮尺を λ_x，鉛直縮尺を λ_z とすると，$h_m/h_p=\lambda_z$，$I_m/I_p=\lambda_z/\lambda_x$ となるから，式 (1) は

$$\frac{g_m}{g_p}\frac{\lambda_z^2}{\lambda_x}\frac{u_{*cp}^2}{u_{*cm}^2}=1$$

となる。ゆえに，

$$\lambda_z=\left(\frac{g_p}{g_m}\right)^{1/2}\frac{u_{*cm}}{u_{*cp}}\lambda_x^{1/2} \quad \cdots\cdots(2)$$

したがって，勾配の縮尺は

$$\frac{I_m}{I_p}=\frac{\lambda_z}{\lambda_x}=\left(\frac{g_p}{g_m}\right)^{1/2}\frac{u_{*cm}}{u_{*cp}}\lambda_x^{-1/2} \quad \cdots\cdots(3)$$

となる。流れ方向の水平長の基準長としては砂洲の長さ L（図—1参照）が考えられる。砂洲の長さは水路幅 B にほぼ比例するものと考えられる。すなわち，

$$L=kB \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，比例係数 k は水理量や河床土砂の特性量の関数であると考えられる。しかし，その関数形はまだ知られていない。ここでは，2つの水路が原型と模型の関係にあるときには，対応する条件のもとでは2つの水路における k の値はそれほど異ならないものと考えて，

$$\lambda_x=\frac{L_m}{L_p}\doteqdot\frac{B_m}{B_p} \quad \cdots\cdots(5)$$

とする。すなわち，流れ方向の水平縮尺と水路幅方向の水平縮尺が等しいと仮定する。そうすると，式 (3) は

$$\frac{I_m}{I_p}=\left(\frac{g_p}{g_m}\right)^{1/2}\frac{u_{*cm}}{u_{*cp}}\left(\frac{B_m}{B_p}\right)^{-1/2} \quad \cdots\cdots(6)$$

となる。式 (6) は書き換えると，次のようになる。

$$\frac{\sqrt{g_m B_m}}{u_{*cm}}I_m=\frac{\sqrt{g_p B_p}}{u_{*cp}}I_p \quad \cdots\cdots(7)$$

すなわち，この場合の勾配に関する無次元量 I_* は次式で与えられる。

$$I_*=\frac{\sqrt{gB}}{u_{*c}}I=\frac{u_*}{u_{*c}}\left(\frac{B}{R}I\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots(9)$$

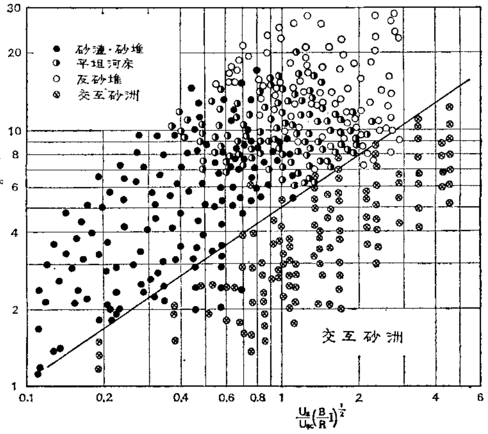
式 (9) によると，I_* には勾配 I のほかに径深と水路幅の比 R/B も含まれているので，I_* は交互砂洲の形成条件を規定するパラメーターとして適しているものと考えられる。そこで，掃流力に関する無次元量 u_*^2/u_{*c}^2 と勾配に関する無次元量 I_* を用いて河床波の形成に関する実験資料を整理し，交互砂洲の形成条件を明らかにすることを試みる。

3. 交互砂洲の形成条件

実験水路に砂を平坦に敷き，その上に水を流すと，流水と砂の相互作用により河床面に種々の河床波が形成される。他の条件を一定に保ち，水深だけを増加させていった実験によると，水深が小さいうちは交互砂洲が形成されたが，水深がある限界値以上になると交互砂洲は形成されなくなり，そのときの水理条件と砂の条件に応じて砂堆，平坦河床あるいは反砂堆が形成されることが観測された。したがって，交互砂洲の形成条件は砂堆，平坦河床および反砂堆の形成条件と関連して決定されると考えられる。そこで，前節で導かれた2つのパラメーター u_*^2/u_{*c}^2 と I_* の関係によって砂堆，平坦河床，反砂

堆および交互砂洲の形成に関する実験資料を整理し，交互砂洲の形成領域を明らかにすることを試みた。その結果を 図—2 に示す。図—2 を作成するために Gilbert[20]，Guy・Simons・Richardson[21]，木下[12]および井口・鮭川・吉野[22]の実験資料を使用したが，これらの実験条件の概要を 表—1 に示す。なお，これらの実験資料を 図—2 にプロットするときに河床土砂の移動限界摩擦速度 u_{*c} としては岩垣公式[23]により算定した値を用いた。図—2 により交互砂洲の形成領域はかなりよく区分されている。

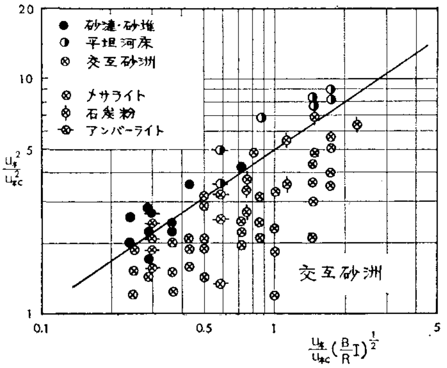
交互砂洲は流れが常流の場合にも射流の場合にも形成されるが，図—2 を作成するために使用した交互砂洲の形成に関する実験資料は河床材料として砂を使用して行なわれた実験により得られたもので，表—1 に示されているように大部分は射流状態の実験によって得られたものである。交互砂洲は水深と水路幅の比が小さい場合に形成されるために，通常の大きさの実験水路で砂を用いて交互砂洲を形成させるためには勾配を大きくすることが必要になり，その結果，多くの場合実験は射流状態で行なわれるようになる。そこで，常流状態における交互砂洲の形成条件を検討するために，砂より比重の軽い河床材料を使用して行なわれた木下[12]，風間[24]および著者の実験の資料を用いて 図—2 に示された交互砂洲の形成領域の区分線の妥当性を検討すると，図—3 のようになる。木下の実験では河床材料として石炭粉（比重 1.45）が用いられ，風間の実験ではメサライト（比重 1.76～1.88），著者の実験ではアンバーライト（比重 1.51）が使用されている。これらの実験の条件を 表—2 に示す。図—3 によると，図—2 に示された交互砂洲の形成領域の区分線は砂より比重の軽い河床材料を使用した実験の資料に対しても適用でき，常流状態における交互砂洲の形成領域は射流状態における交互砂洲の形成領域と一致することがわかる。



図—2　交互砂洲の形成領域

表—1　図—2 を作成するために使用した実験資料

実験者	砂の平均粒径 (mm)	水路幅 (cm)	フルード数	河床形態
Gilbert[20]	0.305	20.1,30.5,40.3,59.8	0.43～1.88	砂堆，平坦河床，反砂堆
	0.375	7.0, 13.4, 20.1, 30.5,40.3,59.8	0.45～3.54	
	0.507	13.4,20.1,30.5, 40.3,59.8	0.35～3.17	
	0.787	20.1,30.5,40.3	0.42～2.09	砂堆，平坦
	1.71	20.1,30.5,40.3	0.54～1.22	河床砂堆
Guy, Simons, Richardson[21]	0.19	244	0.14～1.10	砂漣，砂堆平坦河床，反砂堆
	0.27	244	0.16～1.17	
	0.28	244	0.17～1.21	
	0.32	61	0.30～1.29	
	0.33	61	0.25～1.45	
	0.45	244	0.14～1.70	
	0.54	61	0.22～1.36	
	0.93	244	0.29～1.63	砂堆
木下良作[12]	0.38	13.2	0.64～2.49	砂れん，交互砂洲
	0.765	9, 19.5, 30	1.04～1.85	交互砂洲
	1.24	9,13.2,19.5,30	0.93～2.89	
	1.70	13.2, 19.5, 30	0.95～3.00	
	2.20	30	1.14～1.55	
井口昌平	0.45	15, 31	0.75～1.62	交互砂洲，平坦河床
鮭川　登	2.30	15, 31	0.96～1.36	
吉野文雄[22]	3.55	30	0.87～1.39	



図—3　砂より比重の軽い河床材料を用いた実験の資料による交互砂洲の形成領域区分図の検討

表—2　図—3 を作成するために使用した実験資料

実験者	河床材料	粒径 (mm)	比重	水路幅 (cm)	フルード数	河床形態
木下良作[12]	石　炭	1.70	1.45	1.95	0.63～0.99	交互砂洲
風間輝雄[24]	メサライト	0.762	1.88	30	0.49～0.72	砂れん，平坦河床，交互砂洲
		1.20	1.79	30	0.52～0.95	
		1.73	1.76	30	0.64～1.00	
鮭川　登	アンバーライト	0.67	1.51	10	0.58～0.83	交互砂洲 平坦河床

図—2 によると，交互砂洲は掃流力が小さいときに形成されることがわかる。図—2 に示された交互砂洲の形成領域は次のように表わされる。

$$\frac{R}{B} \leqq 5\left(\frac{u_{*c}^2}{gB}\right)^{2/3} I^{-1/3} \quad \cdots\cdots(10)$$

あるいは

$$\frac{R}{B} \leqq 125\left(\frac{u_{*c}}{u_*}\right)^4 I \quad \cdots\cdots(11)$$

式（10）あるいは式（11）が交互砂洲の形成条件を与える。従来の研究によると，交互砂洲は水深と水路幅の比が小さいときに形成されることが知られていたが，式（10）あるいは式（11）によると交互砂洲の形成限界を与える水深と水路幅の比の値は水理量および河床材料の特性量によって変化することがわかる。

4. 結　　論

本論文では，河川流のパターンを規定し，河岸侵食，堤防欠壊や用水取水口の埋没など河川工学上の諸問題と密接な関係をもつ典型的な河床形態である交互砂洲の形成条件について考察した。次元解析により実験資料を整理した結果，交互砂洲の形成領域は図—2のように示され，形成条件は式（10）あるいは式（11）によって与えられることが示された。図—2により交互砂洲は掃流力が小さいときに形成されることが明らかにされ，式(10)あるいは式（11）により交互砂洲は径深あるいは水深と水路幅の比が小さいときに形成されるが，形成限界を与える径深あるいは水深と水路幅の比の値は水理条件および河床土砂の条件によって変化することが明らかにされた。

5. あとがき

本研究では，交互砂洲の形成領域は砂れん・砂堆・平坦河床・反砂堆の形成領域と明確に区分できるということを前提にして交互砂洲の形成条件について考察した。しかし，最近，これらの河床形態は共存しうるのではないかという見解が出されているので，今後この点に関して検討を加えることが必要である。

また，本研究で求められた交互砂洲の形成条件はほぼ均一な粒径の砂を用いた定常流による直線水路における実験の資料に基づいたものである。実際の河川における流れ，特に洪水時の流れは非定常であり，河床は種々の粒径の砂れきで構成されている。したがって，実際河川における交互砂洲の形成条件を明らかにするためには，今後，流れが非定常であること，および河床が混合砂れきで形成されていることが河床形態の形成にどのような影響を与えるかについて考察することが必要である。さらに，実際河川の平面形状は多くの場合湾曲しているので，河床形態の形成におよぼす河道の平面形状の影響についても考察することが必要である。

なお，本研究の一部は文部省科学研究費（昭和 46 年度の奨励研究（A））の援助を受けたことを付記する。

参　考　文　献

1) Grebenau, H. : Der Rhein vor und nach seiner Regulierung auf der Strecke von der elsässisch-bayerischen Grenze bis Germersheim, Durkheim, 1870.
2) Girardon : III[d] Congress of Inland Navigation, Frankfort-on-the-Mein, 1888.
3) Faber, E. : Studien über die Verbesserung der Schiffbarkeit der Donau von Kelheim bis Ulm, Berlin-Grunewald, 1903.
4) Engels, H. : Untersuchung über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flußstrecken mit beweglicher Sohle, Zeitschrift für Bauwesen, 1905.
5) Fargue, L. : La forme du lit des rivières à fond mobile, Gauthier-Villars, Paris, 1908.
6) Blasius, H. : Über die Abhängigkeit der Formen der Riffeln und Geschiebebänke vom Gefälle, Zeitschrift für Bauwesen, 1910.
7) Jasmund, R. : Handbuch der Ingenierwissenschaften, Dritter Teil, Der Wasserbau, Erster Band, Die Gewässerkunde, Leipzig, Verlag von Wilhelm Engelmann, 1911.
8) 木下良作：河床における砂礫堆の形成について —蛇行の実態の一観察—，土木学会論文集，第 42 号，1957.
9) Leopold, L. B. and Wolman, M. G. : River channel patterns : braided, meandering and straight, U.S. Geological Survey, Professional Paper 282-G, 1957.
10) Wolman, M.G. and Brush, L.M. : Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands, U. S. Geological Survey, Professional Paper 282-G, 1961.
11) 木下良作：石狩川河道変遷調査，科学技術庁資源局資料第 36 号，1961.
12) 木下良作：石狩川河道変遷調査 —参考編—，科学技術庁資源局資料第 36 号，1962.
13) Rossinsky, K. I. and Kuzmin, I. A. : Regularities of river channels formation composed by astatic ground, Bulletin de l'Association internationale d'hydrologie scientifique, VII[e] Anee, No. 4, 1962.
14) 井口昌平：砂礫堆の形成に関する水理学的考察，東京大学生産技術研究所報告，第 14 巻，第5号，1965.
15) Popov, I. V. : Hydromorphological Principles of the theory of channel processes and their use in hydrotechnical planning, Soviet Hydrology, No. 2, 1965.
16) Callander, R.A. : Instability and river channel, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 36, Part 3, 1969.
17) 林　泰造：河川蛇行の成因についての研究，土木学会論文報告集，第 180 号，1970.
18) 椿東一郎・渡辺訓甫・定村寛文：砂礫堆の形成について，土木学会第 26 回年次学術講演会講演集，1971.
19) Sukegawa, N. : On the formation of alternate bars in straight alluvial channels, Trans. JSCE, Vol. 2, Part 2, 1970.
20) Gilbert, G. K. : The transportation of debris by running water, U. S. Geological Survey, Professional Paper 86, 1914.
21) Guy, H.P., Simons, D. B. and Richardson, E. V. : Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61, U.S. Geological Survey, Professional Paper 462-I, 1966.
22) 鮭川　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.
23) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第 41 号，1956.
24) 風間輝雄：河床形態に関する水理学的研究，東京大学工学部土木工学科卒業論文，1968.

（1972.5.18・受付）