

# 直線水路における停止砂礫堆の形成

On the Formation of Stationary Bars in a Straight Flume

池田 宏\*・太田 明雄\*\*

Hirohi IKEDA and Akio OHTA

## I はじめに

交互砂礫堆 (alternate bars) は河川に一般的に見られる河床形である。河道形状指数 (勾配×水路幅/水深) の大きな条件下では直線水路内にも交互砂礫堆が形成される (例えば池田, 1973)。直線水路内に形成される交互砂礫堆の最も重要な性質の一つは明瞭な前進性を有することであるとされている。そのため移動砂礫堆 (downstream-migrating bars または migrating bars) と呼ばれる。

移動砂礫堆の前進を止めるには水路を適当に蛇行させれば良いことが知られている (木下・三輪, 1974)。ところが移動砂礫堆が直線水路においても停止する場合がある (池田, 1973)。直線水路であるにもかかわらず停止する移動砂礫堆をここでは停止砂礫堆 (stationary bars) と呼ぶことにする。本報告は水路実験によって停止砂礫堆の形成条件を調べた結果である。

## II 給砂方式による砂礫堆の形成実験

### 1) 給砂方式による実験

池田 (1973) の実験において停止砂礫堆が形成されたのは、いずれも給砂を継続的に行って、水路内にはほぼ平衡状態が生じた場合に限られていた。そこで、今回の実験では第一にこの点に着目し、実験方法を改善して出来るだけ厳密な平衡状態を水路内に作り出すことにした。水路内に平衡状態を作り出す方法としては循環方式と給砂方式があ

る。前者は水路下流端から流出する砂を水路の上流側に返送して水と共に循環させる方法である。この方法には砂礫堆が形成されるような少流量で高流砂濃度の場合には特殊な装置が必要のため、一般的には適当とはいえない。これに対して、給砂装置によって砂を水路起点で定量供給する後者の方式は流量を選ばないという長所がある。そこで実験は給砂方式によって行った。

### 2) 実験装置

実験には幅10cm, 深さ7cm, 長さ8mの木製水路を使用した (第1図)。水路下流端には高さ5cmの固定堰を取り付けた。水路床勾配はジャッキで容易に調節できる。水路下流端から5.8mの地点にロータリー・フィーダー型の給砂装置を据え付けて、水路上方から砂を連続的に供給した。

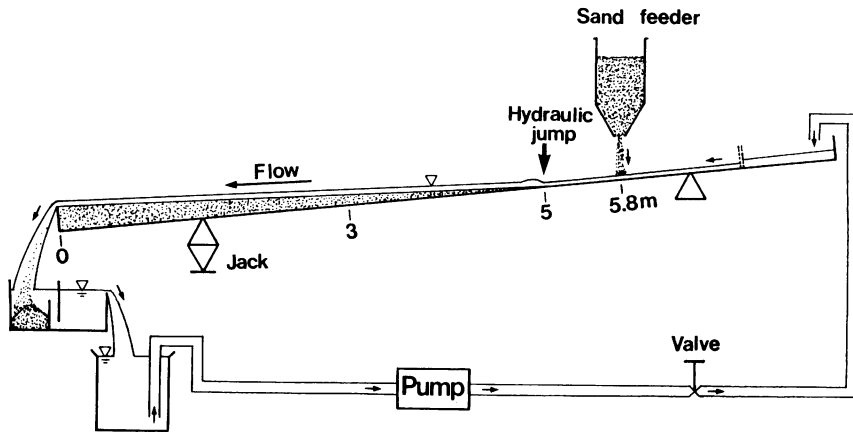
### 3) 実験方法

いずれの実験も、水路を空にして給水と給砂を開始した。水路床勾配は砂床勾配よりやや急に設定して、給砂地点より下流側に跳水地点が位置するようにした。水路上流端からの給水量と給砂量は長時間一定に保った。やがて水路下流端からの流出砂量が給砂量と等しくなり、砂床勾配は一定して動的平衡状態に達した。この時の砂礫堆の形状を観察した。

ついで給砂量を減少させて非平衡状態とし、デグラデーションが生じて平衡状態に達するまで待った。その後、再び給砂量を最初の状態に戻してアグラデーションを起こさせ、再び動的平衡状態

\*筑波大学地球科学系, \*\*筑波大学自然科学類 (現 宮城県立気仙沼高校)

(1986年7月23日受理)



第1図 実験水路

第1表 実験条件と実験結果

Run No.	水温 (°C)	給砂率 (g/s)	水面勾配	砂床勾配	水深 (cm)	表面流速 (cm/s)	停止砂礫堆の長さ (cm)
2	13	3.9	0.036	0.036	0.2	54	158
↓ 1		0.8	0.023	0.025	0.3	41	
1	15	0.9	0.026	0.024	0.3	41	
↓ 2		3.6	0.039	0.039	0.2	58	143
3	15	5.0	0.046	0.046	0.4	53	166
↓ 2		3.2	0.040	0.040	0.2	55	166
2	14	3.5	0.040	0.039	0.2	50	140
↓ 3		4.6	0.045	0.045	0.2	55	144
4	16	11.3	0.067	0.067	0.1	61	173
↓ 3		4.2	0.042	0.041	0.3	48	
3	16	4.2	0.042	0.041	0.4	50	
↓ 4		11.8	0.066	0.065	0.2	67	168

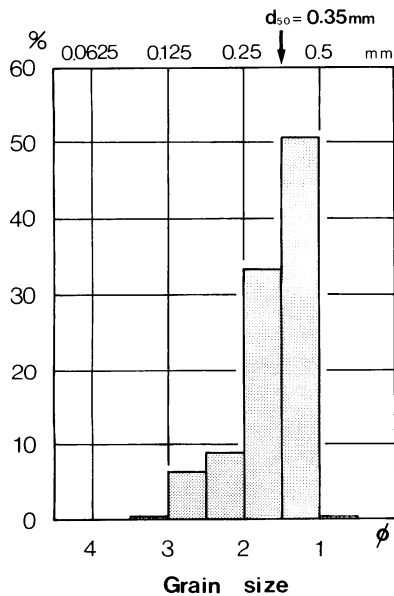
水路幅：10cm，給水量：150cc/s，実験用砂の中央粒径：0.35mm

を作り出した。これらの間、跳水と砂礫堆の位置を少なくとも5分に一回以上調べた。

なお、平衡状態における勾配を持たせて砂を水路内に平滑に敷き均して初期砂床とした無給砂の実験を行った。これは給砂方式による今回の実験結果と従来の方式による実験結果とを比較するためである。

#### 4) 実験条件

実験に使用した砂はフルイを用いた粒度分析によると、径0.25~0.50mmの中砂を主体とするほぼ一様な砂で、その中央粒径は0.35mmである(第2図)。給水量は毎秒150ccとした。予備実験によると交互砂礫堆が形成されやすい条件であった。給砂量は4段階に変えることにし、それらを組み合わせて3ケースの実験を行った。すなわち、給砂量毎秒およそ1gと4g、4gと5g、5gと12gの3ケースである。給砂量は各ケースの始めと終わり、また途中で給砂装置からの砂を一定時間補砂して秤量して求めたため、実験の給砂量は計画値とは多少異なった。実験条件と実験結果を第1表に示す。なお、水深はポイント・ゲージを用いて測定した。

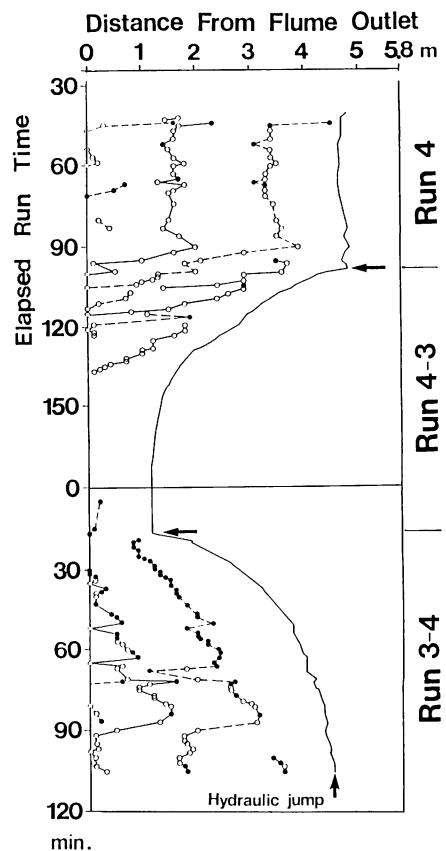


第2図 実験用砂の粒度組成 (フルイによる)

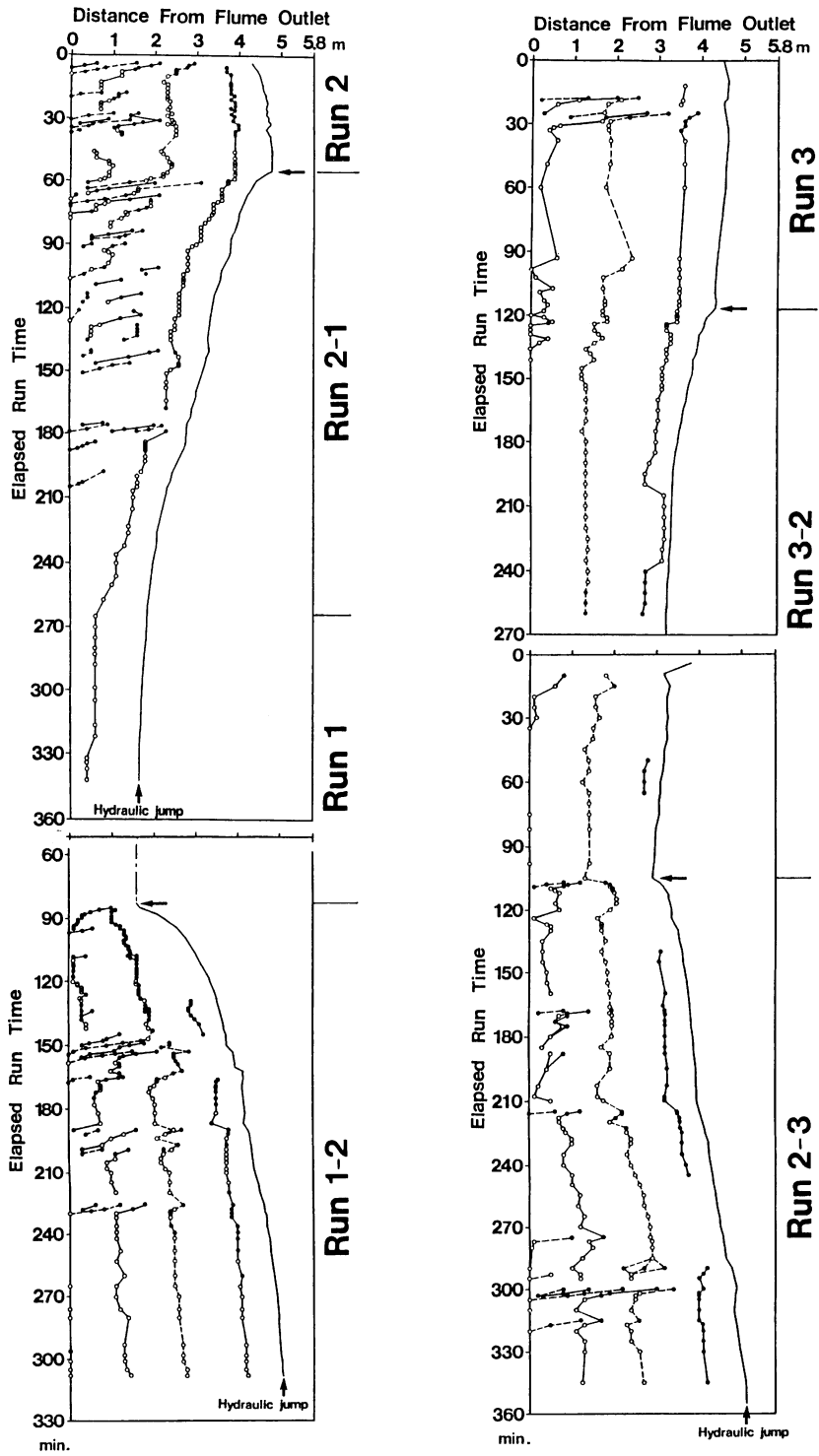
### III 実験結果

#### 1) 停止砂礫堆の形成

実験結果は第3図と第4図に砂礫堆走時曲線にして表わした。これらの図中、右端の実線は跳水位置を示し、その左側の実線と破線はそれぞれ水路右岸寄り、左岸寄りの砂礫堆の先端位置を示し、黒丸は陸地を伴わない砂礫堆を、白丸は陸地を伴うものを示している。ここで陸地というのは水面



第3図 平衡状態 (Run 4) および急激なデグラデーション時 (Run 4-3) とアグラデーション時 (Run 3-4) における砂礫堆走時曲線  
 実線は右岸寄りの砂礫堆先端位置、破線は左岸寄りの砂礫堆先端位置、白丸は陸地 (水面上露出部分) を伴う砂礫堆、黒丸は陸地を伴わない砂礫堆、矢印は給砂量変更時点



第4図 Run 1, 2および3の砂礫堆走時曲線  
凡例は第3図と同じ

上に現れた砂礫堆の高まり部分を指す。

これらの図で跳水位置が時間的に変化しない時が水流が動的平衡状態に達している時、すなわち上流から供給される砂が下流へすみやかに流送され、勾配が一定している状態である。跳水位置が下流方向へ移動するのはデグラデーションが進行していることを示し、反対に遡上する時はアグラデーションが進行していることを示す。

#### (1) 動的平衡状態での移動砂礫堆の変形・移動

平衡状態下ではいずれのRunにおいても砂礫堆は長く伸びて移動しなくなった。すなわち停止砂礫堆が形成された。停止砂礫堆の長さは各Run毎にほぼ一様となった。流砂は砂礫堆の前縁で滞留することなく流送された。この時、砂礫堆の高まりの部分は水面上に現れ、陸地となった。Run 4 (第3図)の90分過ぎに見られるように、停止していた砂礫堆がときおり急速に流下した。その際には陸地の全てが水没した。しかしこれは一時的な現象であり、砂礫堆はやがて再び元の位置に復帰して停止した。その際に、砂礫堆の配置が逆転する場合が多かった。

#### (2) デグラデーションに伴う砂礫堆の変形・移動

給砂量を急に減少させてデグラデーションを起こさせた。堆積域上流端の跳水位置は下流へ移動し始めた。デグラデーションの進行に伴う移動砂礫堆の変形・移動はデグラデーションの進行する程度によって異なった。すなわち、第3図のRun 4-3や第4図のRun 2-1のように、デグラデーションが急速に進む場合には、停止していた砂礫堆は跳水位置の流下よりはるかに急速に前進し始めた。急速に下流方向へ移動するこの砂礫堆はいうまでもなく移動砂礫堆である。上流端では急激な河床低下によって陸地の一部が削り残された。

一方、第4図のRun 3-2のようにデグラデーションが緩慢だと跳水位置の下流方向への移動につれて停止砂礫堆は下流にシフトするものの、移動砂礫堆は生じなかった。

#### (3) アグラデーションに伴う砂礫堆の変形・移動

アグラデーションに伴う砂礫堆の変形・移動はデグラデーションの場合とは異なり、いずれのRunの場合にも停止砂礫堆が形成された。また、移動砂礫堆が時折生じて急速に前進した。しかし、直後に元の位置に停止砂礫堆が形成され、全体としての停止砂礫堆の配列は保存され、跳水位置の遡上につれて徐々に上流へ移動した。

#### 2) 停止砂礫堆の変形・移動

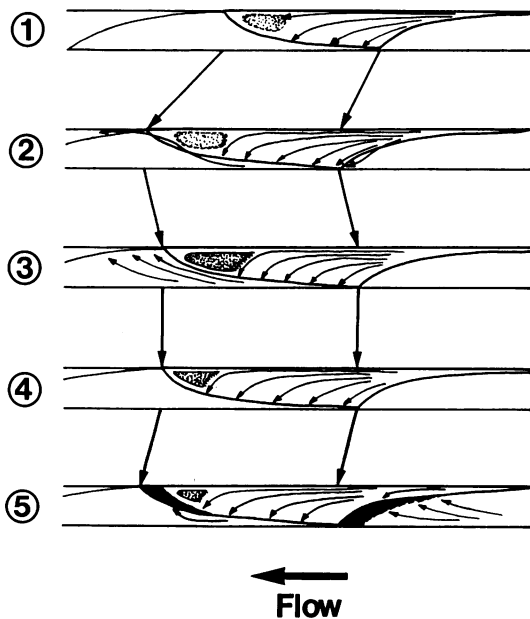
停止砂礫堆はアグラデーションに伴って遡上し、また緩慢なデグラデーション時にはその進行につれて前進する。同一条件下では停止し続ける停止砂礫堆も条件が変化すれば当然それに対応して遡上あるいは前進するのである。ただし停止砂礫堆の変形は第5図の模式図によって以下に説明するように移動砂礫堆の前進とは異なる様式で生ずる。

①-② 移動砂礫堆の長さが伸び、前進速度が減少する。この時流れの集中が強まり、河床横断方向の起伏が増す。砂礫堆の背の部分には砂が堆積して高まり、水面近くにまで達する。時には陸地化し、水流はそこを迂回するようになる。こうして砂礫堆は前進しなくなる。砂は砂礫堆の前縁で滞留せずに通過する。

②-③ アグラデーションが生ずる時には、砂礫堆の高まり部分の上流側に砂が堆積し、反対に砂礫堆の先端部分是对岸側から回り込むような流れによって砂が運び去られ、砂礫堆は全体として徐々に上流へ遡上する。

③-④ 平衡状態では砂礫堆の背の高まり部分は水面すれすれか陸地化した。停止砂礫堆が急速に移動するのはこの高まり部分が水没した場合である。

④-⑤ 緩慢なデグラデーションが生ずるときには、停止砂礫堆の先端に砂が回り込んで堆積し、砂礫堆は全体として次第に前進する。



第5図 遡上・前進する停止砂礫堆の説明図  
 ①-② 移動砂礫堆から停止砂礫堆へ、  
 ②-③ アグラデーションに伴う停止砂礫堆の遡上、③-④ 動的平衡状態における停止砂礫堆、④-⑤ 緩やかなアグラデーションに伴う停止砂礫堆の前進  
 ドットの範囲は水面上に露出した部分（陸地）、⑤中の黒色部分は側方堆積による砂の付着域、矢印は砂の移動方向

## IV 考 察

### 1) 停止砂礫堆の長さ

直線水路において形成される交互砂礫堆の長さは同一の実験条件下でもばらつきが大きい。その前進速度は、同一条件下で形成される交互砂礫堆についてみれば短いものほど速く、長い砂礫堆はそれより遅い。木下 (1961, p.95-97; 1962, p.131-138) は砂礫堆の長さとの前進速度との関係を調べて、それぞれの水理条件毎に指数曲線によくのすることを示した。

池田 (1973) は同様に交互砂礫堆の長さが前進速度と密接な関係を有することを認め、その関係が流れの条件によって著しく変わることを確かめたが、同時に、砂礫堆の長さが伸びて、ついには

直線水路内でありながらも停止してしまう場合のあることを見いだした。したがって、砂礫堆の長さとの前進速度との関係は指数曲線にのるというより、ほぼ直線関係にあるとした。

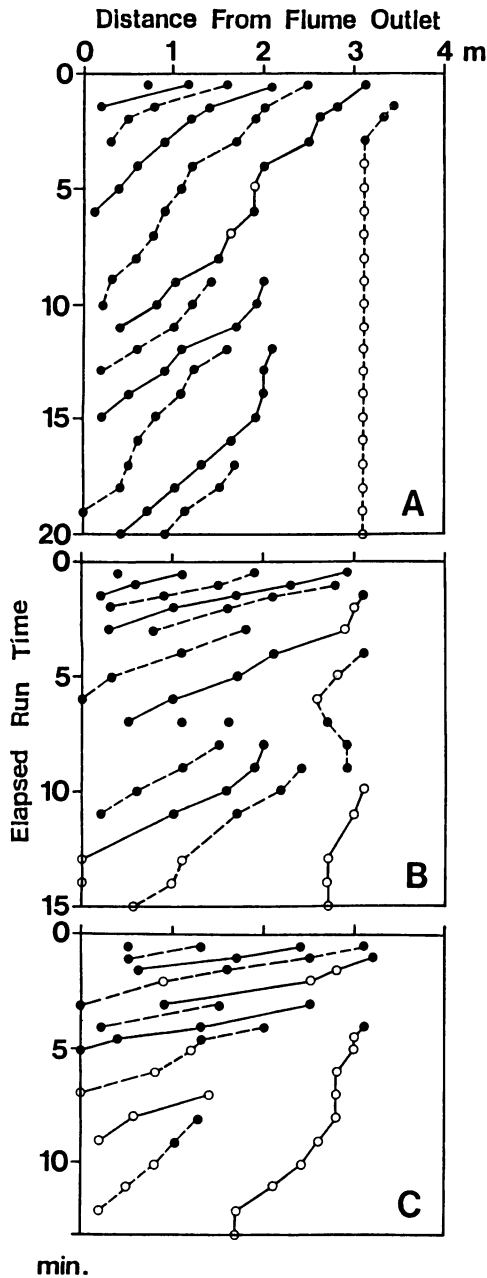
停止砂礫堆の長さは木下 (1962) や池田 (1983) などによって指摘されている移動砂礫堆の長さと比較して長いばかりでなく一様である。すなわち第1表に示すように、停止砂礫堆の長さは実験条件によって水路幅の14倍から17倍であったが、同一条件下では20%以上の差はなかった。移動砂礫堆の長さが同一条件下でも数倍の範囲にばらつくことと比較すると、長さが揃っているということが停止砂礫堆の特徴といえよう。

池田 (1973) による実験では停止砂礫堆の長さは水路幅の12-13倍であった。またIkeda (1983, p.44) に示される大型水路で形成された停止砂礫堆の長さは水路幅の7倍であった。実験数が少なく確かなことは判らないが、停止砂礫堆は勾配が大きいほど長くなるようである。

### 2) 停止砂礫堆の形成に必要な二つの条件

実験の結果、上述したように直線水路において移動砂礫堆が停止して停止砂礫堆となるのは動的平衡時やアグラデーション時、あるいはデグラデーション時でもその進行が極めて緩慢である場合に限られ、デグラデーションが急激に進行する時や何かの原因で流れに攪乱が加えられる時には移動砂礫堆は直線水路内では停止しないことが明らかとなった。

水路床に砂を平滑に敷き均しておいて無給砂で通水するという従来の実験は今回の実験で急激なデグラデーションを起こした場合に相当する。給砂方式による実験に用いたと同じ水路に同じ砂を3cmの厚さで水路下流端から4mの区間に平滑に敷き均し、毎秒150ccという同量の水を整流網を通して流した。初期砂床勾配は給砂方式の場合の動的平衡勾配の範囲をカバーする大きさの3.5%, 5.4%, 7.1%の3種類とした。第6図に実験結果を走時曲線として示す。砂礫堆の長さは水路幅の6~10倍で停止砂礫堆と比較して短く、しかも同一条件内でのばらつきが大きい。そして明ら



第6図 水路に砂を所定の勾配に敷き均して、無給砂で通水した場合の砂礫堆走時曲線  
 初期河床勾配 A. 3.5%, B. 5.4%, C. 7.1%, 給水量毎秒150cc., 水路幅10cm, 実験用砂の中央粒径0.35mm  
 凡例は第3図と同じ

かに移動速度が大きい。その平均前進速度は毎秒0.6~2cmであり、第3図と第4図中に見られる移動砂礫堆の前進速度(毎秒0.5~1cm)とほぼ等しい。このように水路床に砂を平滑に敷き均しておいて無給砂で通水するという従来の実験方法で形成される前進する砂礫堆、すなわち、木下(1961)、井口(1966)、Chang *et al.* (1971)、池田(1973)、西谷ほか(1973)、黒木ほか(1975)、藤田(1980)、福岡ほか(1983)等によって形状測定の結果が報告され、また村本・藤田(1978)、藤田ほか(1982)や池田(1983)が波長や波高の解析を進めてきた単列交互砂礫堆は移動砂礫堆にはかならない。人手によって砂を水路起点で補給しても、流れに攪乱を与えるため、やはり移動砂礫堆が生じてしまうことになる。

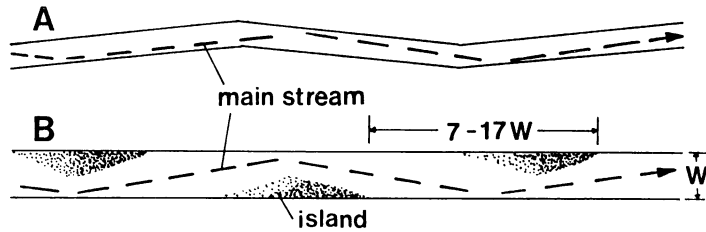
以上の結果から、停止砂礫堆の形成されるための第一条件：変動や攪乱の小さい安定した流れであること、が結論される。実験では動的平衡状態かそれと近い状態でのみ移動砂礫堆は直線水路内で停止した。

変動や攪乱の小さい動的平衡状態なら常に停止砂礫堆が形成されるというわけではない。Chang *et al.* (1971) は幅3フィートの循環式水路を用いて交互砂礫堆の形状を調べたが、停止砂礫堆は生じていない。初期の砂床高を維持するために給砂装置を用いてなされた藤田・村本(1985)の実験でも停止砂礫堆は形成されなかった。これらの実験では水深が大きく、島が生じなかった。今回の実験と同様な停止砂礫堆が形成された従来の実験を見ると、給砂方式(池田, 1973)でも循環方式(Ikeda, 1983)でも、今回の実験と同様、砂礫堆の一部が水面上に露出して島となるか浅瀬となっていることが共通している。

これらのことから移動砂礫堆が直線水路内で停止するための第二の条件：島や浅瀬を生ぜしめるような浅い流れ、すなわち河道形状指数の大きい流れであること、が考えられる。

### 3) 直線水路における交互砂礫堆の停止機構

移動砂礫堆は蛇行水路の中では水路の屈曲度がある限界以上になると停止することが木下・三輪



第7図 蛇行水路における固定砂礫堆(fixed bars)  
(A)と直線水路における停止砂礫堆(B)  
の比較

(1974)によって明らかにされている。移動砂礫堆が直線水路内で停止するのは、その長さが伸びてその一部が水面上に露出して島や浅瀬となった時である。島は水流によって形成されたものではない、島は直線水路の中で左右岸交互に配列することによって、蛇行水路において屈曲が水の流れや流砂のパターンに対して影響すると同様の役割を直線水路の中で果たす。

移動砂礫堆が蛇行水路の中で停止するための限界屈曲度は砂礫堆の長さが増すほど小さくなることが明らかにされている(木下・三輪, 1974)。直線水路における停止砂礫堆の長さは水路幅の10倍前後(7~17倍)と長く、このように長い場合については具体的な限界屈曲度は与えられていないが、外挿すると4~5°程度と推定される。島が水路幅の半分程度の幅を持つことから、第7図のようにみなすと、直線水路における主流線の配列は島によって曲げられ、屈曲度が数度程度の蛇行水路における主流線の配列と同様な形態を持つことになる。したがって蛇行水路において屈曲によって停止させられている砂礫堆と直線水路において島のために停止させられている砂礫堆とは結局のところ極めて類似した状況に置かれているとみなすことができる。

## V おわりに

直線水路に形成される交互砂礫堆(移動砂礫堆)の前進を止めるためには水路に屈曲を与え、しかもその屈曲の程度をある限界以上に大きくしなければならぬとされてきた(木下・三輪, 1974)。

しかし、給砂方式による実験を行った結果、移動砂礫堆が直線水路においても停止する場合のあることが確かめられた。

すなわち移動砂礫堆は攪乱の小さな動的平衡状態下では次第に長さが伸びる。その時、砂礫堆の一部が島として水面上に露出するか浅瀬になると砂礫堆は前進しなくなる。このことから停止砂礫堆の形成条件は、(1)変動や攪乱の小さい動的平衡状態下であること、(2)砂礫堆の背の一部が水面上に露出して島となるか浅瀬となるような河道形状指数(勾配×水路幅/水深)の大きな浅い流れであること、水路に砂を敷き均して無給砂で通水するという従来的一般的な実験方法では(1)の条件が満たされず、またたとえ循環式水路や給砂水路を用いても(2)の条件が満たされない場合には移動砂礫堆の前進は止まらない。

島や浅瀬は水流によって形成されたものがあるが、それらが左右岸交互に生じた直線水路は蛇行水路と同様な性格を持つことになる。すなわち停止砂礫堆は蛇行水路において屈曲によって停止させられている固定砂礫堆と同様な状況下で停止しているとみなすことができる。流れに攪乱が与えられて島が水没すると停止砂礫堆は前進を始める。

## 謝 辞

本実験は著者の一人である太田明雄の筑波大学第一学群自然学類の昭和60年度卒業研究として行われたものである。筑波大学地球科学系の井口正男教授をはじめとする地形分野の諸先生方には貴重なご助言をいた



だいた。実験を進める際には水理実験センター技官の伊勢屋ふじこさん、地球科学研究科の小玉芳敬さん、自然学類の高島順子さん、宮本幸治君のご助力を得た。ここに記して、皆様にお礼申し上げます。

## 引用文献

- 池田駿介 (1983) : 単列交互砂州の波長と波高. 第27回水理講演会論文集, 土木学会, 689~695.
- 池田 宏 (1973) : 実験水路における砂礫堆とその形成条件. 地理学評論, **46**, 435~451.
- 井口昌平 (1965) : 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, 260~323.
- 木下良作 (1961) : 石狩川河道変遷調査. 科学技術庁資源局資料, 第36号, 137 p.
- 木下良作 (1962) : 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, 174 p.
- 黒木幹男・岸 力・板倉忠興 (1975) : 交互砂州の水理特性. 沖積地河川における河床形態と流体抵抗の研究, 文部省科学研究費 (総合研究A, 代表者岸 力) 報告書 101 p., 80~88.
- 西谷隆亘・吉野文雄・牧野立平 (1973) : 洪水による河床変動についての実験的研究. 法政大学工学部研究集報, No. 9, 29~51.
- 長谷川和義 (1984) : 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究. 北海道大学学位論文, 184 p.
- 福岡捷二・内島邦秀・山坂昌成・早川 博 (1983) : 交互砂州上の流砂量分布. 第27回水理講演会論文集, 土木学会, 697~702.
- 藤田裕一郎 (1980) : 沖積河川の流路変動に関する基礎的研究. 京都大学学位論文, 210 p.
- 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二・小池 剛 (1982) : 交互砂州の発達機構. 第26回水理講演会論文集, 土木学会, 25~30.
- 村本嘉雄・藤田裕一郎 (1978) : 中規模河床形態の分類と形成条件. 第22回水理講演会論文集, 土木学会, 275~282.
- Chang, H.Y., Simons, D.B. and Woolhiser, D.A. (1971): Flume experiments on alternating bar formation, *Proc. ASCE*, **97** (WW1), 155~165.
- Ikeda, H. (1983) : Experiments on bedload transport, bed forms, and sedimentary structures using fine gravel in the 4-meter-wide flume. *Environmental Research Center Papers*. Univ. of Tsukuba, No.2, 78p.