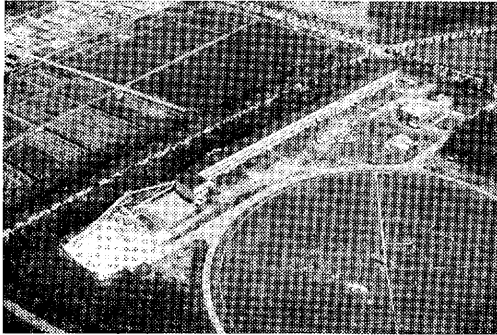


## 大型水路における流砂実験 (1979~1983 年度)

池田 宏\*・伊勢屋ふじこ\*\*・飯島 英夫\*\*



第1図 大型水路全景 (1980年7月撮影)

筑波大学水理実験センターの大型水路(幅4 m, 長さ160 m)は1976年度から1978年度にかけて建設され, 1979年度から水と砂礫を水路に流せるようになった(第1図)。頭初は, 砂礫を粒度別にふるい分けて定量的に水路内へ供給することや, また水路下流端から流出した砂礫をベルトコンベアで水路上流まで運びもとして循環させること

や, 各種水理量の計測方法の開発などにかなり苦勞した。しかし, これらの難しい点は順に克服され, 今日では凍結する冬季を除いて実験が可能となっている。過去5年間に大型水路を用いて行なわれた流砂実験の概要をここに記し, 大型水路実験を進めるにあたっての問題の所在を述べたい。

### 流砂実験の課題

河川の運搬堆積作用を実験水路を用いて調べることは, 19世紀以来, 欧米を中心として地球科学者や水理学者によって行なわれてきた。それらの成果は, 河川地形学・土砂水理学・堆積学のテキストの中で主要な部分を占めるまでになっており, 調べることはもはや無くなったと考える人がいるほどである。ところが近年, 実際河川において流砂や流れの観測が盛んに行なわれ, それらの実態が明らかにされるにつれて, 従来知見がきわめて不十分であることが認められるようになった。

第1表 従来の実験条件と実際河川の特徴の比較からみた検討課題と大型水路による実験

	従来の実験条件	実際河川	検討課題	大型水路実験 年度 実験テーマ
規模	小水深	大水深	1. スケール効果	S. 54~55 掃流砂量 河床形(砂礫堆) 堆積構造
流量	一定	変動	2. 非定常効果	56~58 河床形(砂堆) 浮遊砂量
底質	一様	混合	3. 混合効果	58~ 掃流砂量 縦断勾配
河道の平面形	直線	蛇行(屈曲)	4. 屈曲の効果	59~ 河川蛇行

\* 筑波大学地球科学系(水理実験センター)

\*\* 筑波大学水理実験センター



A 斜め交錯模様 (通水7分後)      B AとCの暫移形(通水32分後)      C 交互砂礫堆 (通水73分後)

第2図 大型水路において細礫(径5~10mm礫)を1/100の勾配で平滑に敷きならして、毎秒0.4m<sup>3</sup>の水を流した時の河床形の発達 (Run 80)

従来の流砂実験は、実験の性格上・解析上の制約から実際河川の流れと比較してきわめて単純な流れを対象としてきた。そのうえ、用いられた水路は小型であった。そのため、従来の実験は実際河川のもつ流れの特徴のほんの一部を取り込んだにすぎなかった。実際河川の流砂現象を理解するためには、第1表に示した4つの課題がいまだ残されている。このうち、大型水路施設はとくに1~3の3つの課題を追究するのに適した機能を持っている。大型水路による流砂実験は、これらの課題を解明するための個別のテーマをかかげて行なわれてきた。

#### 細礫を用いた実験

1979年3月に、水路床に径5~10mmの細礫が1mの厚さで敷きつめられた。そして、スケールの効果——とくに水深・勾配の効果を調べることを目的とした実験が1979年度と1980年度に行なわれた(井口, 1980)。細礫を実験材料に選定した理由はいろいろあるが、従来の実験データが細礫についてはあまりないことと、細礫ならシステム内をうまく循環すると思われたことが主な理由である。

第2図Aに示す斜め交錯模様は、細礫を1/100勾配で平滑に敷きならして、毎秒0.4m<sup>3</sup>(水深11cm)の水を7分間流した時に生じた河床形である。このような急勾配・小水深の条件下では、通水直後には水深のほぼ2倍の間隔を持つタテスジと、流速の2乗に比例した波長を持つヨコスジ(反砂堆)とが生じ、時に両者は併存して格子模様を呈する。さらに水を流し続けると、それらにかかわって斜め交錯模様が生ずる。その斜めの小段の方向が、格子模様の対角線の向きに一致することからみて、斜め交錯模様は、タテスジとヨコスジを形成する流れの共働によって形成されるものと考えられた(池田, 1983)。小型水路ではきわめて短時間で進行してしまう過渡的な現象を、このように比較的ゆっくりと観察することができるのは、大型水路の利点のひとつである。

勾配1/100、給水量毎秒0.4m<sup>3</sup>の実験条件では、水を流し続けると、斜め交錯模様をなしていた菱形砂州は合体して、交互砂礫堆となる(第2図B, C)。交互砂礫堆上の水と土砂の流れは、第3図に一例を示すようにきわめて三次元性が強い。砂礫堆は砂床河川にごくふつうに生ずる河床形態である。砂礫堆について理解を深めることは、礫

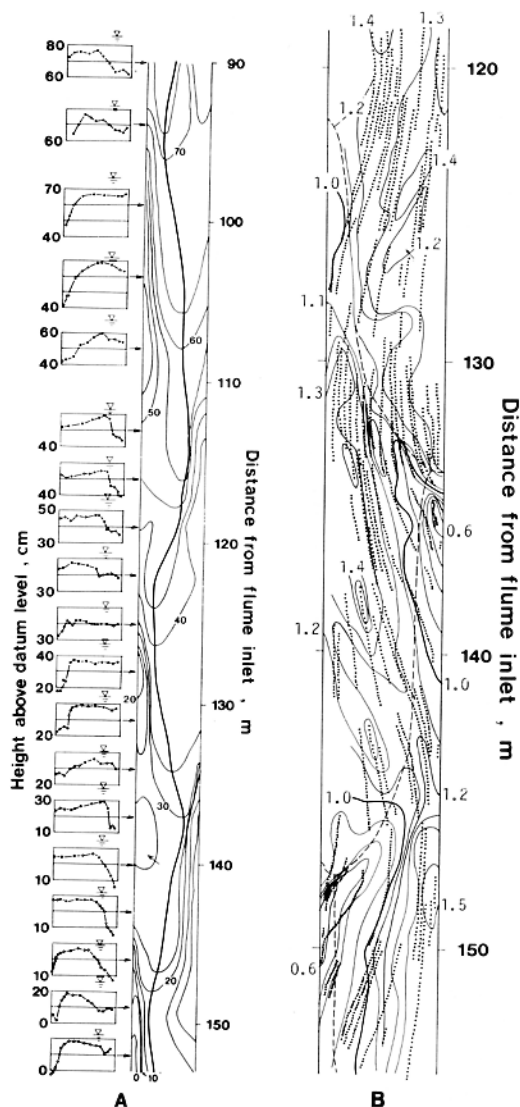
床河川における流砂現象を理解するうえで、きわめて重要とされている。

砂礫堆の形成条件は、流れ強度 ( $U_*/U_{*c}$ ) と

河道形状示数 ( $S \cdot W/D$ ) によって表わされている (池田, 1973)。大型水路を原型とみためて、その1/20の小型の水路で模型実験を行なった結果、 $U_*/U_{*c}$  と  $S \cdot W/D$  値を原型 (大型水路) と合わせれば、大型水路上に生じたと酷似した砂礫堆を、小型の水路上にも生じさせることが確かめられた (池田, 1982a)。この結果、実際の礫床河川の河床形態のふるまいの一端を小型の水路の中で調べることが可能であることが示された。

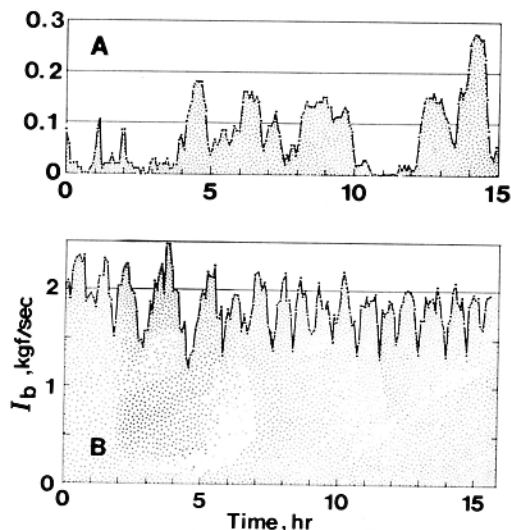
水路下流端から流出する砂礫の量は、河床形態が生ずると、その流下・前進にともなって時間的に変動する (第4図)。そのため、流砂量を正確に測定するには長時間の連続的の捕砂が必要であり、流出砂量が小さい場合はとくに注意を要する。大型水路施設には、砂礫返送コンベアーの途中に計量装置 (ウェィング・コンベアー) が組み込まれており、水路からの流出砂礫量が連続的に測定できるよう設計されている。掃流砂量の測定には大変好都合である。

いったん河床形態が生じると、その後は、河床の凹凸に応じて水流が集中する。それゆえ、平滑な河床上では底質移動が生じないような小流量でも、場所によっては流砂が生じる。そのような状



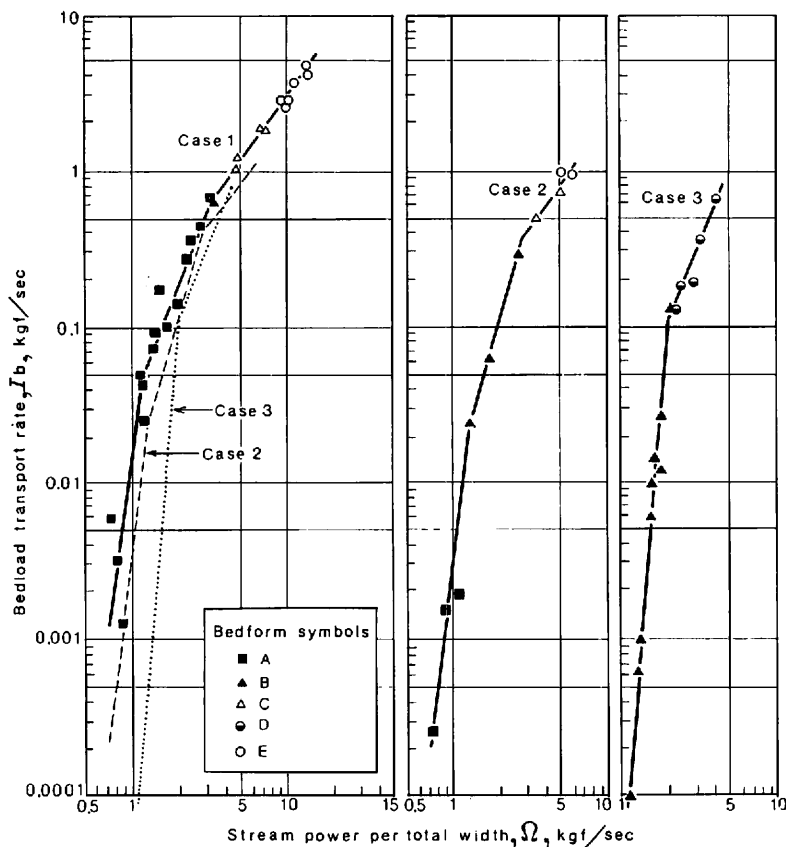
第3図 大型水路における交互砂礫堆の形状 (実験条件は第2図と同じ)

- A 河床横断形と等高線 (単位cm)  
等高線図中の太実線は河床横断面内の最高点を連ねた線
- B 表面流向・流速分布 (単位 m/s)  
発泡ポリスチロール片をトレーサーとしたマルチ・ストロボ撮影結果 (図中のドット) から描いた。



第4図 大型水路下流端流出砂礫量の変動

- A 細礫, 流量  $0.145 \text{ m}^3/\text{s}$ , 勾配1/100
- B 細礫, 流量  $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$ , 勾配1/100



第5図 ストリーム・パワー ( $\Omega$ ) と掃流砂量 ( $I_b$ ) との関係 (大型水路, 径 5~10mm)  
 Case 1: 勾配 1/100, Case 2: 勾配 1/200, Case 3: 勾配 1/400  
 A: 複列砂礫堆, B: 交互砂礫堆, C: 線状跳水をともなう交互砂礫堆, D: 低起伏の砂堆, E: 反砂堆

態下では、ストリーム・パワー (=水の単位重量×流量×勾配) の等しい水流を比較すると、勾配が急な水流ほど掃流砂量は大きい(第5図)。勾配が急なほどより小さなストリーム・パワーで流砂が生ずるのである(池田, 1981)。従来は平滑床での底質の移動限界条件のみが調べられてきたが、礫床河川における掃流砂量の算定のためには、起伏をもった河床上での底質の移動限界条件を解明することが必要であることが明らかにされた。この成果は、1980年9月に東京で開催された第24回国際地理学会議で発表された(Ikeda, 1980)。

堆積構造から、その堆積物の堆積環境を復元する試みが近年盛んに行なわれている。しかし堆積

構造の成因は十分判っているわけではない。細礫の流送実験の過程で、堆積構造についても新発見が得られた。すなわち、河床形態の形成に伴う底質の水平的(平面的)な分級が、堆積物中の垂直的な粒度変化を生み出すというのである(池田, 1982b)。混合砂礫の分級に関する研究の必要性が痛感された。

礫のみを用いた実験の重要性はますます高まってはきたが、2年間を一応の区切りとして、1981年5月には水路内から礫を搬出した。なお、以上に述べた実験成果は Ikeda (1983) にまとめられている。

### 砂を用いた実験

1981年度から1983年度前半にかけては、中砂～粗砂を主体とする、分級の悪い砂を用いた実験が行なわれた。この実験に先だって、北海道の天塩川をはじめとするいくつかの砂床河川で種々の観測が行なわれた（伊勢屋, 1979, 1982 a, 1982 b, 池田・伊勢屋, 1980 a, 1980 b, Ikeda & Iseya, 1982）。

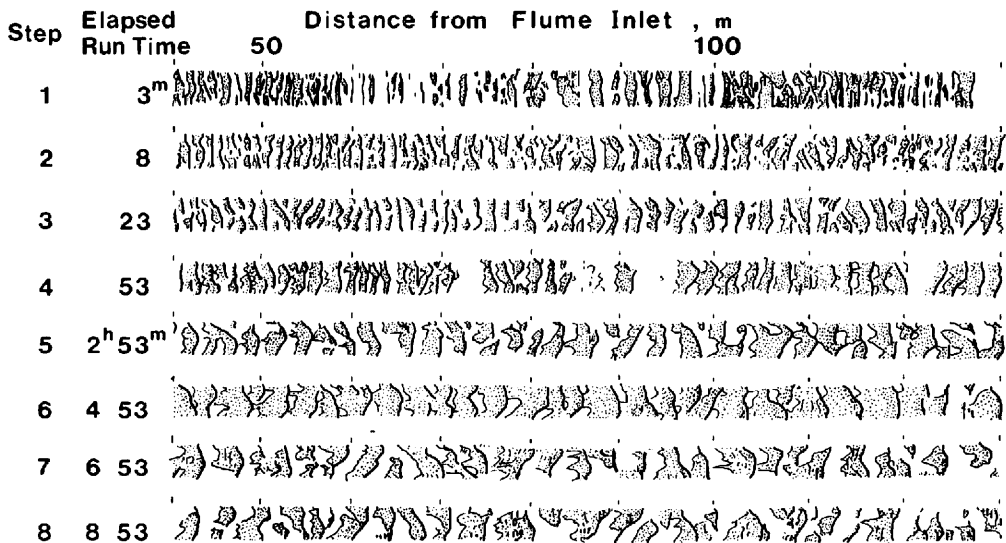
砂を用いた場合には、予想通り、細礫を用いた場合よりもはるかに実験技術的に難しいことがたくさんあった。そのため1981年度は、砂を定量的に水路内に供給し、循環させるための種々のテストと予備実験が行なわれたにとどまった。苦労した年であった。本格的な実験は1982年4月以降に開始されたが、5月に堰上流の河床低下現象、すなわち下流端の砂止め堰の天端と砂床表面の高さが一致しないで河床高が定常になることに気づいたあたりから、実験結果についても解釈がつくようになった。

砂を用いた場合にも、細礫の場合と同様に、様々な実験条件下で流砂現象を観察した。なかでも砂堆の発達と砂堆床上的浮遊流砂についてはすで

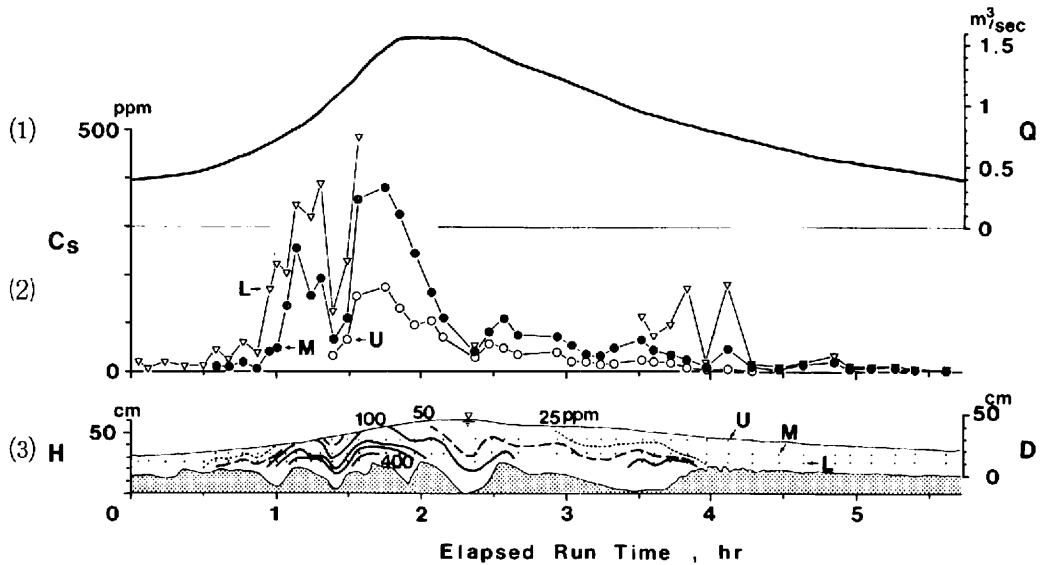
に Iseya (1984) にまとめた。

砂堆は砂床河川に生ずる最も一般的な河床形である。砂堆が形成される水理条件下では、砂を平滑に敷きならして水を流すと、はじめは流速が大きく反砂堆が生ずる。その後、河床の起伏が増すにつれて流速は減少し、河床波の迫いつき・合体が進んで砂堆の波長・波高が次第に大きくなり、長時間通水すると定常形になる。勾配 1/400, 給水量毎秒 1.5 m<sup>3</sup> の場合を第 6 図に示す。定常になるまでに要する時間は、従来の一般的な認識とは逆に、流量が大きいほど長いことが明らかになった。これは、流量が増すほど安定期の砂堆の形状が大きくなるためである。この結果、急激な出水の増水期は、常に砂堆の発達期にあたることが示された。

河床物質中から舞い上がって、流水中を浮遊して運搬されている狭義の浮遊砂の濃度は、出水の増水期にとくに高いことが、野外の砂床河川における洪水観測によって明らかにされていたが（伊勢屋, 1979, 1982 b), 実験水路においても同様の現象が生じた（第 7 図）。この原因は、砂堆床上的の浮遊砂濃度が、勾配や流量が一定な条件下にあっても、砂堆の波長・波高が増大する発達期には



第 6 図 砂堆の発達にともなう砂堆の平面形の時間的变化（流量 1.5 m<sup>3</sup>/sec, 勾配 1/400）



第7図 流量変化を与えた場合の浮遊砂濃度の変化

- (1) ハイドログラフ
  - (2) 採水高度別の浮遊砂濃度の変化
  - (3) 採水地点における砂床高の変化と浮遊砂濃度のアイソプレス
- Cs: 浮遊砂濃度, D: 平均水深, H: 高さ, Q: 流量, L, M, U: 下位, 中位, 上位の採水口

きわめて高いのに対して、砂堆の安定期（定常になった時）には、減少するためであると説明された。すなわち、砂堆の発達期には水流の乱れが相対的に強いのに対し、安定期にはきわめて静穏になることが判明した。

そのメカニズムの解明は今後に残されているが、これらの成果は、砂床河川の流砂現象を対象とした今後の研究に強い影響を与えることと思われる。このほか、砂堆の変形や堆積構造の成因などについての知見は多い。これらの結果は、近々まとめられる予定である。

### これからの課題

当面の実験の課題としては、第1表の第3、第4の課題、すなわち混合効果と河道の屈曲の効果とがある。

一様粒径（均一粒径）砂礫の場合には、粒径が大きいほど動かされにくい。これは、移動粒子と河床面との摩擦抵抗力が大きくなるためである。

ところが、滑面床を水流によって移動させられる場合には、粒径の大きいものほど水路床の高い位置に突出するため、より強い流体力を受け、その結果移動速度はかえって速くなる（池田ら、1979）。このことは、粒子の動かされやすさが、周囲の粒子との関係によって変化することを示している。すなわち、大小様々の砂礫が混合すると、一様粒径砂礫の場合とは違ったこと——混合効果が生ずるのである。

実際河川の流送物質は混合砂礫である。実際河川の流砂現象を理解するためには、この混合効果を明らかにすることが不可欠である。大型水路施設では、砂礫を粒径別にふるい分けて、それらを別々に水路内に定量供給できるので、水路内を流れる砂礫の粒度組成を変えて、混合効果を調べることができる。しかも、実際河川で生じているような、河床波の形成に伴う垂直的な分級現象をも再現できる。この特徴を生かした実験が1984年度以降に計画されている。すでに1983年度後半に

は、混合効果に関する予備実験が小型水路を用いて行なわれた(池田, 1984)。

一方、河道の屈曲の効果については、計画中の平面水路が建設されてから本格的に取り組まれることになろう。しかし、河道の屈曲の効果は、蛇行河道における流砂現象を中心として近年世界的に注目されている課題である。この課題に取り組むために、実際の蛇行河川の調査(伊勢屋, 1980, 池田・伊勢屋・手塚, 1984)と、模型水路を用いた予備実験(池田, 1977, 小玉・池田, 1984)が行なわれた。また大型水路においても、その長さを生かして、予察的な実験が行なわれた(仲井・池田, 1984)。

以上述べた今後の実験課題のほか、実験遂行上の課題がある。大型水路は、国の内外に類例をみないような大型の流砂用実験施設である。その諸機能を生かした実験を行なうたびに新しい実験事実が発見されている。これらの結果を学会に発表し、研究成果をあげることが実験遂行上の最大の課題である。多額の国費を使った責任は、いうまでもなく、この成果いかんによってのみ果たされる。

一方、国内・国外の他研究者との協力が推進されるように努めたい。今でも外国からの施設見学者は多いが、このような専門家と研究面での交流を深め、場合によっては研修会を持ち、また国際シンポジウムの開催なども考える必要がある。大型水路は、共同研究のために必要な優れた機能を十分に備えている。

それにしても、大型水路実験を支えるために必要な関連設備が水理実験センターにはまだ備えられていない。計画中の実験棟とその中の各種設備が実現されれば、これらを用いて大型水路実験によって明らかにされた新事実のメカニズムを追究することができ、また大型水路をより効果的に活用することができるようになり、さらに成果はあがるであろう。

## 文 献

池田 宏(1973): 実験水路における砂礫堆とその形

成条件. 地理評, 46(7), 435~451.

池田 宏(1977): 蛇行河道における砂礫堆の成因.

筑波大学水理実験センター報告, 1号, 17~31.

池田 宏(1981): 大型水路による細礫の流送実験(1) —掃流砂量に及ぼす限界ストリーム・パワーの影響—, 筑波大学水理実験センター報告, 5号, 35-49.

池田 宏(1982a): 砂礫堆の相似条件に関する実験的研究. 筑波大学水理実験センター報告, 6号, 3-14.

池田 宏(1982b): 透礫層の成因に関する水路実験. 地形, 3, 57-65.

池田 宏(1983): 水路における斜め交錯模様と斜交砂川の形成. 第27回水理講演会論文集, 709-714.

池田 宏(1984): 二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験. 筑波大学水理実験センター報告, 8号, 1-15.

池田 宏・伊勢屋ふじこ(1980a): 天塩川下流部における河床形と流砂の観測. 筑波大学北方科学調査報告, 1, 27~44.

池田 宏・伊勢屋ふじこ(1980b): 天塩川下流部における河床形の観測. 地形, 1, 57-72.

池田 宏・伊勢屋ふじこ・手塚清子(1984): 天塩川下流部における汜らん原構成物質の堆積相. 筑波大学北方科学調査報告, 5, 13-29.

池田 宏・小野有五・泉 耕二・川又良一(1979): 水路床上を転動する固体粒子の移動速度. 筑波大学水理実験センター報告, 3号, 7-15.

伊勢屋ふじこ(1979): 茨城県桜川における浮遊土砂と河畔堆積現象. 第23回水理講演会論文集, 145-150.

伊勢屋ふじこ(1980): 砂床河川における自然堤防の形成——江戸川における河畔堆積現象について—— 地理学水文学特別研究(筑波大学地球科学研究科), 99p.

伊勢屋ふじこ(1982a): 茨城県, 桜川における逆グレーディングをした洪水堆積物の成因. 地理評, 55, 597-613.

伊勢屋ふじこ(1982b): 二神川における流砂観測. 筑波大学水理実験センター報告, 6号, 15-24. 56p.

井口正男(1980): 大型水路による細礫の流送実験. 昭和53・54年度文部省科学研究費報告書, 63p.

小玉芳敏・池田 宏(1984): 自由蛇行河道の模擬実

験. 筑波大学水理実験センター報告, 8号, 29-36.  
仲井敬司・池田 宏 (1984) : 安定河道形状に関する  
実験的研究. 筑波大学水理実験センター報告, 8  
号, 37~44.  
Ikeda, H. (1980) : Experiments on the transport of  
fine gravel in 4-meter-wide flume. 24th Intern.  
Geographical Congress, Abstracts 1, 24-25.  
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*, No. 2, 78 p.  
Ikeda, H. & Iseya, F. (1982) : On the length of  
dunes in the lower Teshio River. *Trans. Japanese  
Geomor. Union*, 2, 231-238.  
Iseya, F. (1984) : An experimental study of dune  
development and its effect on sediment suspension.  
*Environmental Research Center Papers*, No. 5,  
56p.