

混合砂礫の流送実験の経過

Progress of Recent Experiments on Heterogeneous Sediment Transport in the ERC

池田 宏*

Hiroshi IKEDA

I はじめに

礫床河川における流砂現象は、砂床河川と比較して出水時の観測が困難であることもあって、良く分かっていない。とはいっても、礫床河川の大局的な河床形態である砂礫堆とそれに関連する堆積物については、すでにかなりの研究成果があり（木下, 1961, 1962; Krigstrom, 1962; Williams and Rust, 1969; Church, 1972; 池田, 1973; Smith, 1974; Miall, 1977; Maizels, 1979; Ashmore, 1982, その他、我が国における研究は多数ある）、また、礫床での移動限界とその結果としてのアーマーコートの形成についても、かなりの研究がなされたといえよう（Andrews, 1973, 1974; Parker *et al.*, 1982; Parker and Klingeman, 1982; White and Day, 1982）。さらに、混合砂礫の移動機構に関する理解をふまえての対局的な河川縦断形の成り立ちについても検討されてきた（たとえば、山本, 1978, 1980, 1981, 1986）。

ところが、近年、礫床河川における流砂観測が実施され、とくに、ある地点を通過する砂礫量の時間的な変動が様々な手段（Klingeman and Emmett, 1982; Billi and Tacconi, 1987; Custer *et al.*, 1987など）で観測された結果、新たな問題点、すなわち流砂量が時間的に変動するという事実が発見され

た。砂礫堆のような河床形の移動に伴って流砂量の時間的変動が生ずることは従来から知られていた（木下, 1962; Ikeda, 1983; Hubbell *et al.*, 1985）。しかし、はっきりとした河床形の認められない河川においても、流砂量の時間的な変動が観測されたのである（Emmett, 1975; Leopold and Emmett, 1976; Reid *et al.*, 1985; Reid and Frostick, 1987）。このような現象は一様粒径を対象として得られてきた知見では理解しがたいことであった。同様に、実際河川や浅海底における観測の結果によれば、砂礫の移動限界も従来の予測式とは適合しないことが近年明らかにされてきた（井口, 1988）。

このように実際河川における観測結果が水路実験結果と合わない原因としては次の4つが考えられる。すなわち、1) スケール効果、2) 非定常効果、3) 混合効果、4) 屈曲の効果などの不等流の効果である（池田ほか, 1984）。1979年度から細礫を用いて第1の課題であるスケール効果を、また1981年度から砂を用いて第2の課題である非定常効果を調べてきた経験からみて、上述したような水路実験と実際河川との違いは、第3の課題、すなわち、大小様々な大きさの砂礫が混合することによって生ずる混合効果に起因すると我々は考えた。

そこで、混合効果を明らかにするために、Gilbert (1914) による実験にならって、粒径の異なる

* 筑波大学地球科学系・水理実験センター

2種類の粒子の混合物（二粒径混合砂礫）を用いた流砂実験を1983年度後半から開始した。この報告はそれから今まで5年間の、欧米の研究者との共同実験も含めたいいくつかの実験の経過をやや詳細な記録として記述したものである。そのため、どうかと思われる内容まで含まれている。水理実験センターにおける水路実験の記録ということでお許しいただきたい。

なお、第4の課題とした屈曲の効果については、1985～1987年度に行われた河川蛇行に関する日米共同研究（日本学術振興会・日米協力事業、ミネソタ大のG.Parkerと埼玉大の池田駿介代表）に日本側メンバーとして参加し、日米の蛇行河川を観察するとともに、多くの討議を行った結果、今後の重要な研究課題であることを認識したが、これについては別の機会に報告したい。

II 混合砂礫の流送実験の準備期間 (1978～1983年度)

我々による混合砂礫の流送機構に関する実験は以下のようないくつかの実験の経験に基づいている。

a. 滑面床上での粒子の移動速度に関する実験 (1978年度)

1977年度に大型水路施設がほぼ完成して、砂礫を水と共に流送できるようになった。大型水路では、水と共に水路下流端から流出した砂礫がかき揚げられ、ベルト・コンベヤーで水路上流端へ返送され、水路施設内を循環するように設計されている。これが計画通りにいくかどうかのテストをまずははじめに実施した。トラックで搬入した碎石（径5～13mm）を大型水路に投入して、水と共に流送し、循環させたのである。

砂礫循環装置の試運転の過程で、滑面床上では大きな粒子ほど移動速度が大きなことを観察した。そこで大型水路における最初の実験として、滑面床上での粒子の移動速度を水深や粒径、粒子の形状を様々なに変えて測定した（池田ほか、1979）。滑面床上では、大きな粒子ほど流速の大きな上方へ突出して強い流体力を受けるため移動速度が大きいことをこの実験で確かめた。これはその後、混合砂礫の流

送機構を考える上で、その基礎となった。

b. 透かし礫層の形成機構の実験（1980年度）

礫床河川堆積物中には、マトリックスを欠いた礫層（透かし礫層、open-work gravel layer）があることは三重県の内部川や栃木県の蛇尾川の河床で観察していたし、それが礫と礫の間隙が砂で充填された一般的な砂礫層（充填礫層、matrix-filled gravel layer）と互層することも、大井川の牧ノ原や北海道の札内川上流の段丘堆積物について知っていた。Smith (1974) は Kicking Horse 川上流における河床堆積物中に透かし礫層と充填礫層の互層が生ずる原因を融雪期において流量が日変化するためであろうと説明した。流量の大きな時期には、全ての砂が浮遊するため、礫が堆積する際に礫層中に砂が入り込まないのであろうという。

そこで1980年度に幅30cmの循環式水路で砂とグラニュールの混合物の流送と堆積について調べた。そして、十分な砂が存在する場合には、たとえ高流砂階（upper flow regime）の流れのもとにおいても、底面近傍では流れが弱いため、礫の堆積時に、その間隙は砂で充填されてしまって、透かし礫層は形成されないという結果を得た。すなわち、礫が堆積する際に、そこに砂がやってこないということが透かし礫層の形成条件なのである（池田、1982）。

この実験を進めるにあたって、水路勾配と流量は一定に保って、礫ばかりの河床に砂を次第に加えて、砂礫と水を水路内で循環させた。加えた砂はしばらくは河床近傍を流送されるが、じきにすべて礫と礫の間隙にトラップされてしまって、結果的に砂を加えた影響はほとんど見られなくなった。しかし、砂を次第に加えていくと、ついには礫と礫の間隙がすべて砂で充填され、河床表面に砂が現れる。ストリーム・パワーは一定であるが、流れはその時、一変して、流速が増し、水深が小さくなり、水深と勾配の積としての掃流力は小さくなるにもかかわらず、流砂強度は突然増した。細粒物質が河床材料中にどれだけ存在するかが流砂現象には極めて重要なことを、この実験によって知った。

c. 大型水路における細礫の流送実験

(1979～1980年度)

大型水路を用いた本格的な流砂実験は1979年3月に開始された。最初は砂礫の循環しやすさを考えて、径5~10 mmの細礫を用いた実験を2年間実施した。実験ではスケール効果を検討することを目的として、勾配と給水量の組合せを変えた（池田, 1981; Ikeda, 1983）。

水路内に入れた実験材料は礫ばかりで砂は含まれてはいなかったのであるが、やがて、砂礫かき揚げ装置によって破碎されて生じた少量の砂が礫層中に存在するようになった。その砂は河床に生じている砂堆のトラフの部分のみに集積して、充填礫層を生じた。その時、砂堆の峰は透かし礫層となっていた。礫と共に少量の砂が流送される場合には、砂は礫と礫の間隙を充填しつつ共に流送されるらしいこと、すなわち、砂は浮遊して礫粒子より高速で流送されるといった一般的な考えは、適当ではないらしいことを思わせた。

d. 砂を用いた大型水路実験（1981～1983年度）

細礫を用いた実験に引き続いて、1981年度から1983年度前半にかけて砂を用いた大型水路実験を行った。とくに砂堆の発達と砂堆床上の流砂に関する非定常実験により、実際河川で増水期に浮遊砂濃度が高いことの物理的説明に成功した（Iseya, 1984）。

これらの実験によって砂堆の発達過程と砂堆上の底質移動状況を水路側壁から子細に観察し、混合砂礫の流送機構についての認識をさらに深めることができた。たとえば、砂も礫も共に流送されている状態では、礫の移動速度は砂粒子のそれより明らかに大きいこと。反対に、粒径の小さな重鉱物粒子は、比較して粗粒な軽鉱物とは別の集団を形成しつつゆっくりと流送されることなどである。すなわち、堆積物中に形成される葉理などの堆積構造は流れの強度の時間的な変動によるばかりでなく、粒径による平面的な分級に起因する場合があることを知った。

以上の大型水路を用いた水路実験の経過については、かつて取りまとめて報告した（池田ほか, 1984）。

III 二粒径混合砂礫の流送実験

(1983～1986年度)

実際河川の河床は礫と砂という2種類の大きさの異なる粒子の混合物で構成されていて、それらの中間サイズはたいていの河川で少ない。そこで、混合砂礫の流送機構を実験で調べるために当たっては、分級のよい砂と礫を混合させた二粒径混合砂礫を用いた。

二粒径混合砂礫の実験としては、1981年度に大型水路で予察的に行ったものが最初であるが、礫の比率を増しても、砂礫の運ばれやすさが変化しないといった、当時としてはなんとも解釈ができない結果を得たため実験を中断したのであった。しかし、その後の2年間の、砂を用いた実験の過程で、河床堆積物を動的に見ることの大切さに開眼し、1983年度後半から小型水路を用いて、また1984年度には大型水路でも二粒径混合砂礫の流送実験を実施した。これらの実験結果は Ikeda and Iseya (1988) にとりまとめた。

a. 混合効果と混合砂礫の運ばれやすさの急変

大型水路における実験では、給水量と供給砂礫量とを一定に保ち、砂と礫の混合比率だけを段階的に変化させて、結果として生ずる動的平衡勾配を求めるこにより、混合砂礫の運ばれやすさを定量的に評価した。また、幅10cmの小型水路を用いた実験では、大型水路と同様な実験のほか、給水量と礫（砂）の供給量を一定に保ったままで、砂（礫）の供給量を段階的変化させて、その影響を調べた。これらの実験によって、大きさの異なる粒子が混合することによって、各粒子の流送特性が一様粒径の場合と比較して変化する現象、すなわち混合効果（mixing effect）についての理解を深めた。

混合効果としては、遮蔽効果（hiding effect）、すなわち動かない礫の間隙に入り込んだ砂が流体力を受けにくくなる効果が従来から知られてきた（Einstein, 1950）が、礫も砂も共に流送される状態では、それとは異なる効果が生ずることが明らかになった。それらは、礫床に砂が混合することによって河床表面が平滑になり、礫が動きやすくなる効果

(減摩効果, effect of smoothing), 平滑になった河床面上に礫が突出して、より強い流体力を受けるようになる効果(突出効果, effect of exposure), さらに、高速で流送される礫が砂と衝突し、砂を押すことによって、礫の運動量が砂に伝えられる効果(衝突効果, effect of collision)などである(池田, 1984; Ikeda, 1984; 池田・伊勢屋, 1985).

さらに、砂と礫の混合比率が次第に変化する場合でも、混合効果のために、混合物の運ばれやすさが急変することも実験的に確かめられた(伊勢屋・池田, 1986)。このため、沖積河川の縦断形に認められる勾配の急変現象も混合効果によって説明できそうに思われた。これについては小玉芳敬が渡良瀬川について詳細な検討を行い、肯定的な結論を得た(小玉・井口, 1986)。

これらの研究成果を1985年9月にイギリスのマンチェスターで開催された第1回国際地形学会議で発表した(Ikeda and Iseya, 1987)。その直前に、中央大学の徳永英二氏と2人でスウェーデンのウプサラ大学に A. Sundborg 教授を訪ね、Klarälvenへの3日間の巡査と、客員として滞在していたハンガリーの土砂水理学者である L. Rákóczi 教授をも交えた研究発表と討議の機会を与えられた。この際に、礫も砂も共に流送されているということが、我々による実験のユニークさであるという適切な指摘を受けた。

b. bedload sheets の形成と掃流砂礫量

の時間的変動 (bedload pulsation)

礫の間隙が砂で充填され、その混合砂礫が運ばれやすくなつて流送される時、礫の移動速度は砂よりも大きいため、礫と砂は分級されて礫ばかりが下流側へ抜け出し、砂は上流側に置き去りにされる。しかし、抜け出した途端に礫粒子群の多くは、その場に停止してしまう。礫ばかりだと動きにくいためである。停止した礫粒子群が再び一齊に動き出すのは置き去りにされた砂粒子群が追いついてきて、礫粒子群の間隙を充填した時である。

このように、混合砂礫の流送に伴って、その中の礫と砂とがそれぞれ平面的に分級されつつ、砂粒子群が礫粒子群を追うような流送様式が生ずる(池



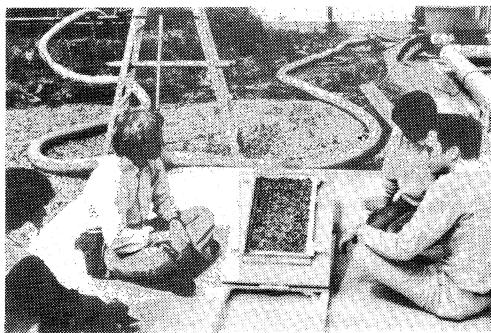
第1図 スウェーデンのウプサラ大学地理学教室におけるスンドボリ教授(Prof. Ake Sundborg) (1985年9月9日撮影) 1987年3月に退官された

田・伊勢屋, 1986: Iseya and Ikeda, 1987). このような縦断的な分級が、混合砂礫河川における掃流砂礫量の時間的な変動を引き起こしている原因の一つであろう。我々の報告に続いて、Kuhnle (1988) が極めて類似した実験結果を報告した。

IV ビル・ディートリックとの共同実験 (1987年5月)

Bill (William E. Dietrich, カリフォルニア大学バークレー校・助教授) と初めて会ったのは、1980年に日本で開かれた第24回国際地理学会議においてであった。本会議の前に京都で開催された実験地形に関するシンポジウムにおいて、トム・ダン(Thomas Dunne, ワシントン大学教授)の院生であった彼は、天塩川下流部における砂堆の分布についての観測結果(Ikeda and Iseya, 1980)を発表した私に対して、河川の上流から下流へのせん断応力の分布について質問した。

次に彼にあったのは、1985年8月で、日本学術振興会の日米協力事業として行われた河川蛇行に関する日米共同研究のために、彼が来日した際であった。その後の1985年9月にマンチェスターで開催された第1回国際地形学会議において彼と共同研究の可能性を語り合った。翌年の1986年9月、河川蛇行に関する研究の日本側メンバーの一員として私が米国を訪ね、彼と混合砂礫の流送特性についてかなり詳細な討議を行った。



第2図 bedload sheets の特性と給砂量の減少に伴う河床表面砂礫の粗粒化について調べたビル・ディートリック (Dr. W.E. Dietrich) (1987年4月) 混合砂礫を接着した傾斜板上における砂礫の移動を測定している

彼らは、実際河川において興味ある現象、すなわち bedload sheets を観察していた (Whiting *et al.*, 1988) が、我々は実験水路でそれを調べていたことが分かった。そこで、共同実験によってこの問題を詳細に検討しようということになった。その手始めとして、Bill は大学院生のジム・カーシュナー (James Kirchner) を伴って1987年5月に来日した。5月11日（月）から31日（日）までの3週間は、それまでに体験したことのないような、激しい毎日であった。ただ、5月23~24日に、院生の恩田裕一君のフィールドだった愛知県の小原村に行った時が唯一の息抜きの時であった。宿舎は筑波大学客員研究員等宿泊施設を利用できた。

共同実験の課題は混合砂礫の供給量を段階的に減少させた場合、河川はそれにどのように応答するかということで、実験には幅 30 cm、長さ 7 m のアクリル製の給砂方式水路を用いた。実験の結果、混合砂礫を用いると、供給砂礫量を減少させても、アーマーコートが生ずるために勾配はほとんど減少せず、ただ河床表面の構成砂礫の粒径が粗粒化することによって、供給砂礫量の減少を吸収してしまうことが明らかになった。また、実験を通じて、gravel sheets が顕著に生じて、実験条件の変化とともにその波長や移動速度が変動した。これらの実験結果は、Bill が1987年度の米国地質学会で (Dietrich *et al.*, 1987), また日本地形学連合秋季大会において伊勢



第3図 大型水路を用いて掃流砂量の時間的変動を調べたバズル・ゴメツ (Dr. Basil Gomez) (1987年6月~8月)

屋が発表した。

なお、Jim はデータ整理のために6月半ばまで小玉芳敬君の家に滞在した。

V バズル・ゴメツとの共同実験 (1987年6月~8月)

Dr. Basil Gomez はイギリスのオックスフォード大学地理学教室の講師で、礫床河川の流送現象について多数の論文を発表していた。彼は、1986年夏にアメリカ合衆国地質調査所 (USGS) の Dr. D. W. Habbell による掃流砂礫量の時間的な変動に関するプロジェクトに参加するため、大型水路における交互砂礫堆の移動にともなう流出砂礫量の時間的変動データを検討させてほしいと、1986年1月初めに希望してきた。我々はいくつかの Run の詳細なデータを提供した。

その後、彼は礫床における分級現象に関する実験のために水理実験センター滞在を希望してきた。そして、彼の来日のために、オックスフォード大学から渡航費用が得られることが1986年6月に、ついで王立協会 (Royal Society) などから生活費を得られることが1986年10月に決まった。以後、実験手法の検討を数回にわたって行い、彼を1987年6月5日~8月25日の間、外国人研究員として受け入れた。宿舎は筑波大学客員研究員等宿泊施設を利用した。この間、8月1日~9日、彼は北海道の天塩での地形学野外実験に参加した。

大型水路実験は径 5~10 mm の細礫 (少量の 5~

13 mm の角礫) と 2.5~5 mm 磚および砂の混合物を使用して、交互砂礫堆の移動に伴う流砂量の時間的変動についてのデータを得た。その後、彼はアメリカ合衆国地質調査所の研究者である Donna C. Marron と結婚するために、コロラド州デンバーへ行った。実験結果は Gomez (1988) および Gomez *et al.* (1989) としてまとめられた。Basil は現在 Indiana State University の地理学・地質学教室の助教授である。

VI トム・ライルとの共同実験(1988年4月~5月)

Tom (Thomas E. Lisle, U.S.D.A., Forest Service, Pacific Southwest Experiment Station, Redwood Sciences Laboratory の Research Hydrologist) と奥さんの Lori Dengler (カリフォルニア州の Humboldt State University 教授、地球物理学・地質学) とに最初に会ったのは、1985年9月に、マンチェスターにおける第1回国際地形学会議の Pre-Congress の巡検に参加して、ウェールズを1週間巡検した時であった。Tom は Ikeda による砂礫堆形成領域区分 (池田, 1973) を詳細に理解していて、その Ikeda が私であることを知って喜んだが、反対に彼が私の研究を正確に理解していることに私は驚かされた。彼が私の砂礫堆形成領域区分を詳しく知っていた理由は、彼が Humboldt State University で Joan L. Florsheim の修士論文の指導教官として、私の砂礫堆形成領域区分を急勾配の山地河川について検討したためであったことを後で知った。

Tom とはその後、研究連絡を継続していたが、来日して共同実験をしたいという希望を1986年夏に伝えてきた。なお、1986年12月には伊勢屋ふじこがカリフォルニアを訪ね、AGU (アメリカ合衆国地球物理学連合) の秋季大会に出席すると共に Arcata (Arcata) に Tom を訪ねた。

最初、Tom は1987年秋か1988年春に、Gordon Grantとともに来日したいとのことであった。しかし、1987年夏に Corvallis で環太平洋の急傾斜地域における侵食と堆積のシンポジウム (Erosion and Sedimentation of Pacific Rim Steeplands Symposium in Corvallis) が開かれた際に、建設省土木研究所

砂防研究室の水山高久室長や国立防災センターの大八木、富永両氏らと会って、具体的な話合いを進めた結果、Gordon Grant については土研の水山氏が世話をすることになった。

1987年12月にはアメリカ地球物理学連合の秋季大会が例年通りサンフランシスコで開催された。この会議において砂礫堆 (River bar) に関する特別分科会があり、私と伊勢屋ふじこは Invited speaker として、それぞれ砂礫堆と掃流砂礫量の脈動 (bedload pulsation) に関する研究発表をした。その分科会のオーガナイザーは Tom と K. Prestigaard (Department of Geological Sciences, Univ. of Illinois) であった。この機会に、Tom とさらに実験課題について討議し、共同実験の課題を「河床形に及ぼす障害物の影響」から、「河床表面砂礫の粗粒化現象」に変えた。

Tom の来日のためのファンダードが取れることが分かったのは、1988年3月初めのことでの、来日を予定していた期間の1ヶ月前のことであった。ともかく、



第4図 細砂量の減少に対する河床の応答を調べたトム・ライル (Dr. Thomas E. Lisle) との流砂実験 (1988年4月~5月)

このような経過で、Tomは奥さんのLori Denglerと5才になる男の子と、Loriの姉のNancy Storbackと共に、1988年4月5日来日して、小玉芳敬君の家に滞在した。そして4月6日から大阪で開かれた日本地形学連合春季大会に参加し、また、北陸の礫床河川、とくに黒部川と常願寺川、早月川を富山県立技術短期大学の高橋剛一郎さんの案内で見学した。

その後、5月12日に離日するまで、Billたちとの実験に用いたのと同じ水路で、混合砂礫の供給量を段階的に減少させて、それに対する応答を調べる実験を行った。Billたちとは水深が比較的大きく、勾配の小さな条件下で実験を行ったが、Tomとの実験では砂礫堆の形成されるような、急勾配で浅い流れを対象とした。その結果、供給砂礫量の減少に対する河川の応答性が明らかになったばかりでなく、混合粒径砂礫の流送による砂礫堆の形成過程を新たに知った。

VII 今後の課題

1988年7月20~23日、京都で国際水理学会議のアジアー太平洋会議（ADP-IAHR）が開かれた。この会議に米国からミネソタ大学のG.Parkerとともに参加したクーンリ（Roger A. Kuhnle）とディプラス（Panos Diplas）が会議の後、水理実験センターを訪ねてきた。KuhnleはMITのSouthard教授のもとで学位を取った若手研究者で、現在USDA, Agricultural Research Service, National Sedimentation Laboratory (Oxford, MS) で農業活動の行われている流域からの流出土砂礫量の観測をしている。ディプラスはギリシャ出身で、ミネソタ大学でG.Parkerのもとで礫床河川の研究をして学位を取り、ニュージーランドで1年間、Postdoctoral Fellowとして、そして、昨年からIowa State UniversityでKennedy教授のもとで仕事をしてきた若手研究者で、帰国後はVirginiaのBlacksburgにあるVirginia Polytechnic Institute and State Universityの教授になる。

共通した研究課題を持っている研究者が集まって、2日間、朝から晩まで、熱のこもった討議をし

た。Kuhnleは現在行っている観測のシステムや観測結果について、Diplasはバラフィンを用いた河床表面砂礫のサンプリング方法について、そして、我々もTomとの実験結果など最新の研究成果について討議した。彼らは、伊勢屋による砂堆上の浮遊流砂に関する実験結果（Iseya, 1984）を聞いて、増水期に浮遊砂濃度が高いことの物理的な説明を初めて聞いたといって感激した。途中からは、真板秀二さん（農林工学系）も加わって、大井川上流の井川演習林がある東河内沢での河床変動観測の成果（真板, 1988）を発表した。聞きたいことをとことんまで聞ける、このような密度の濃い、少人数によるシンポジウムを将来、水理実験センターで開催したいと痛感した。

ところで、河川地形学の立場から混合砂礫の流送実験を進めてきた者として、地形の成り立ちを理解するために、当面、以下の二つのことが重要であるという考えを最近ますます強めている（池田, 1988）。

a. 河床砂礫の粒度組成の由来の解明

混合砂礫の流送現象には水理条件とともに、流送される砂礫の混合特性が決定的に重要な役割を演ずる。したがって、実際河川における河床材料の粒度特性とその上流から下流への変化機構を解明することが重要である。ところが、これについては昔から沢山の研究がなされてきたにもかかわらず、いまだに明らかにされているとはいがたい（池田, 1985）。河床材料がしばしば二峰性分布を示すが、その理由もよく判っていない。下流へ粒度特性が変化する理由も明らかではない。河床材料特性の由来の研究が、実際河川の成立ちを理解するために、今、必要である。

b. 地形実験手法の確立

混合砂礫の流送特性を水路実験で調べてきた結果、実際河川に見られる地形変化機構の新たな説明を可能にすると思われる現象がいくつか観察された。例えば、前述したように、混合砂礫の運ばれやすさが、ある混合比率を境として急変することが明らかになったことから、沖積河川の縦断形に見られる勾配の急変現象について新たな説明が可能になった（伊勢屋・池田, 1986；小玉・井口, 1986）。また、

山間地溪流で認められる洗掘・堆積の交互発生についても、あるいは、扇頂溝の形成（小玉・伊勢屋、1987）といった地形現象も、混合砂礫の流送に伴う縦断的な分級現象によって説明できるかもしれない。

これらのことは、混合砂礫の流送特性の理解をふまえて、地形変化過程を検討しなおす必要があることを示しているように思う。水理実験や土質実験は従来からなされてきたが、地形の成り立ちを探るものとしての地形実験は十分に検討がなされてきたとはいえないからである。そこで、地球科学系の吉野正敏教授（前・水理実験センター長、日本地理学会常任委員長）や河村 武教授（水理実験センター長）の勧めによって日本地理学会の研究グループとして「地形実験手法研究グループ」を1988年度から発足させることにした。具体的な課題を対象として地形実験手法を検討し、地形実験の有効性と限界を明らかにする場として、水理実験センターが活用されることを期待したい。

文 献

- 池田 宏 (1973) : 実験水路における砂礫堆とその形成条件. 地理学評論, **46**, 435-451.
- 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**, 7-15.
- 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**, 35-49.
- 池田 宏 (1982) : 透礫層の成因に関する水路実験. 地形, **3**, 57-65.
- 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**, 1-15.
- 池田 宏 (1985) : 河床材料と河道の縦断形. 土木学会水工学シリーズ 85-A-3, 1-13.
- 池田 宏 (1988) : 河川地形に関する水路実験の現状と課題. 地形, **9** (印刷中).
- 池田 宏・伊勢屋ふじこ・飯島英夫 (1984) : 大型水路における流砂実験 (1979~1983年度). 筑波大学水理実験センター報告, **8**, 163-170.
- 池田 宏・伊勢屋ふじこ (1985) : 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響. 筑波大学水理実験セン

ター報告, **9**, 43-47.

池田 宏・伊勢屋ふじこ (1986) : 混合砂礫の流送に伴う縦断的分級. 水理講演会論文集, **30**, 217-222.

伊勢屋ふじこ・池田 宏 (1986) : 混合砂礫を用いた大型水路実験-混合効果による勾配の急変と堆積構造の違い. 筑波大学水理実験センター報告, **10**, 125-134.

井口正男 (1988) : 流砂現象における threshold についての研究概観. 堆積学研究会会報, **28**, 1-8.

木下良作 (1961) : 石狩川河道変遷調査. 科学技術庁資源局資料, **36**, 138p.

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, **36**, 174p.

小玉芳敬・井口正男 (1986) : 渡良瀬川下流部の河床勾配急変点付近における河床砂礫の堆積状況. 筑波大学水理実験センター報告, **10**, 67-79.

小玉芳敬・伊勢屋ふじこ (1987) : 混合砂礫を用いた扇頂溝形成に関する水路実験. 筑波大学水理実験センター報告, **11**, 1-11.

真板秀二 (1988) : 破碎帯流域における荒廃渓流の動態に関する砂防学的研究. 筑波大学農林技術センター演習林報告, **4**, 21-127.

山本晃一 (1978) : 河川における土砂の移動機構に関する研究ノート-混合粒径河床材料の移動特性, 中規模河床波と小規模河床波の共存-. 土木研究所資料, No. 1416, 226p.

山本晃一 (1980) : 河川における土砂の移動機構に関する研究ノート (II). 土木研究所資料, No. 1543, 171p.

山本晃一 (1981) : 河道特性論ノート (I) -護岸論のために-. 土木研究所資料, No. 1625, 301p.

山本晃一 (1986) : 沖積地河川の河道特性に関する研究. 土木研究所報告, No. 168, 66p.

Andrews, E.D. (1983) : Entrainment of gravel from naturally sorted river bed materials. *Bulletin of the Geological Society of America*, **94**, 1225-1231.

Andrews, E.D. (1984) : Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado. *Bulletin of the Geological Society of America*, **95**, 371-378.

Ashmore, P.E. (1982) : Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, **7**, 201-225.

- Church, M. (1972) : Baffin Islands sandurs: A study of arctic fluvial processes. *Bulletin of the Geological Society of Canada*, **216**, 208p.
- Billi, P. and Tacconi, P. (1987) : Bedload transport processes monitored at Virginio Creek measuring station, Italy. In: Gardiner, V. (ed.), *International Geomorphology* 1986, part 1, John Wiley and Sons, Chichester, 549-559.
- Custer, S.G., Bugosh, N., Ergenzinger, P.E. and Anderson, B. C. (1987) : Electromagnetic detection of pebbles transport in streams: A method for measurement of sediment-transport waves. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M. and Harvey, M.D. (eds.), *Recent developments in fluvial sedimentology - Contributions from 3rd International Fluvial Sedimentology Conference*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication No. 29, 389p., 21-26.
- Dietrich, W.E., Kirchner, J., Ikeda, H. and Iseyama, F. (1987) : The origin of the coarse surface layer in gravel-bedded streams: The role of sediment supply. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **19**, 642.
- Einstein, H.A. (1950) : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *United States Department of Agriculture Technical Bulletin*, **1026**, 71p.
- Emmett, W.W. (1975) : The channels and waters of the "upper" Salmon River area, Idaho. *United States Geological Survey Professional Paper*, **870A**, 116p.
- Hubbell, D.W., Stevens, H.H.Jr., Skinner, J.V. and Beverage, J.P. (1985) : New approach to calibrating bed load samplers. *Journal of Hydraulic Engineering*, **111**, 677-694.
- Gilbert, G.K. (1914) : The transportation of debris by running water. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **86**, 263 p.
- Gomez, B. (1988) : Two data sets describing channel-wide temporal variations in bedload-transport rates. *United States Geological Survey, Open-file Report*, **88-88**, 26p.
- Gomez, B., Naff, R.L. & Hubbell, D.W. (1989) : Temporal rates associated with the migration of bedforms. (in press).
- Ikeda, H. and Iseyama, F. (1980) : On the length of dunes in the lower Teshio River. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **2**, 231-238.
- 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*, University of Tsukuba, No. 2, 78p.
- Ikeda, H. (1984) : Flume experiments on the causes of superior mobility of sediment mixtures. *Annual Report of the Institute of Geoscience*, University of Tsukuba, **10**, 53-56.
- Ikeda, H. and Iseyama, F. (1987) : Thresholds in the mobility of sediment mixtures. In : Gardiner, V. (ed.), *International Geomorphology* 1986, part 1, John Wiley & Sons, Chichester, 561-570.
- Ikeda, H. and Iseyama, F. (1988) : Experimental study of heterogeneous sediment transport. *Environmental Research Center Papers*, University of Tsukuba, No. 12, 50p.
- Iseyama, F. (1984) : An experimental study of dune development and its effect on sediment suspension. *Environmental Research Center Papers*, University of Tsukuba, No. 5, 56p.
- Iseyama, F. and Ikeda, H. (1987) : Pulsations in bedload transport rates induced by a longitudinal sediment sorting: a flume study using sand and gravel mixtures. *Geografiska Annaler*, **69A**, 15-27.
- Klingeman, P.C. and Emmett, W.W. (1982) : Gravel bed-load transport processes. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C. and Thorne, C.R. (eds.), *Gravel-bed rivers*, John Wiley & Sons, New York, 141-179.
- Krigstrom, A. (1962) : Geomorphological study of sandur plains and their braided rivers in Iceland. *Geografiska Annaler*, **44**, 328-346.
- Kuhnle, R.A. and Southard, J.B. (1988) : Bed load transport fluctuations in a gravel bed laboratory channel. *Water Resources Research*, **24**, 247-260.
- Leopold, L.B. and Emmett, W.W. (1976) : Bedload measurements, East Fork River, Wyoming. *Proceedings of the National Academy of Science*, **73**, 1000-1004.
- Maizels, J.K. (1979) : Proglacial aggradation and changes in braided channel patterns during a

- period of glacial advance: An alpine example. *Geografiska Annaler*, **61**, 87-101.
- Miall, A.D. (1977) : A review of the braidedriver depositional environment. *Earth Science Reviews*, **13**, 1-62.
- Parker, G., Dhamotharan, S. and Stefan, H. (1982) : Model experiments on mobile, paved gravel bed streams. *Water Resources Research*, **18**, 1395-1408.
- Parker, G. and Klingeman, P.C. (1982) : On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research*, **18**, 1409-1423.
- Reid, I., Frostick, L.E. and Layman, J. (1985) : The incidence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 33-44.
- Reid, I. and Frostick, L.E. (1987) : Toward a better understanding of bedload transport. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M. and Harvey, M.D. (eds.), *Recent developments in fluvial sedimentology—Contributions from 3rd International Fluvial Sedimentology Conference*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication No. 29, 389p., 13-19.
- Smith, N.D. (1974) : Sedimentology and bar formation in the upper Kicking Horse River, a braided outwash stream. *Journal of Geology*, **82**, 205-223.
- White, W.R. and Day, T.J. (1982) : Transport of graded gravel bed material. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C. and Thorne, C.R. (eds.), *Gravel-bed rivers*, John Wiley & Sons, New York, 181-223.
- Whiting, P.J., Dietrich, W.E., Leopold, L.B., Drake, T.G. and Shreve, R.L. (1988) : Bedload sheets in heterogeneous sediments. *Geology*, **16**, 105-108.
- Williams, P.F. and Rust, B.R. (1969) : The Sedimentology of a braided river. *Journal of Sedimentary Petrology*, **39**, 649-679.