

# 大型水路実験の流れと今後の方向

## Flume Experiments with the Large Flume at the ERC

伊勢屋ふじこ\*

Fujiko ISEYA

### I はじめに

筑波大学水理実験センターの大型水路がいよいよ稼働を開始する時、様々な機能の運転試験を兼ねて初めて行われた実験は、滑面床上を運ばれる粒子の移動速度を測定するものであった(池田ほか, 1979)。当時修士の学生であった私は、アルバイトとして種々の形状と比重を持つテスト粒子の準備をお手伝いした。それ以来、昨年(1990年)11月に所属が変わるまで、地球科学研究科の大学院学生として、さらに水理実験センターの構成員として、大型水路を使ってなされた実験(以下、大型水路実験と略す)のほとんどに関わってきた。従って、大型水路実験で得られた成果を一つ一つレビューすることが、ここで期待されているのかもしれないが、それらはすでに過去2回にわたって概略がまとめられている(池田ほか, 1984; 池田, 1988)。

そこでこの雑文では、大型水路という世界的にみて貴重な財産が、将来の世代にも活用され続けることを願って、特に水路の運用の面から今までの実験を振り返り、今後の研究のあり方について述べたい。水理実験センターの構成員でなくなったのに今後の方向など何が無責任なことを、と言われるかもしれない。しかし、15周年記念号には、レビュー・ペーパーから回想文までおり混ぜて掲載してある。重石がとれた所で、今までに感じてきたことを思いつまままに寄せさせていただこうと思う。

### II がむしゃらに水を流していた前半部

15周年を過ぎるにあたって一連の実験日程を振り返ってみると、前半部は、巨額の投資に見合った成果を性急に求めて、常に水を流すことを半ば義務づけられていた時期であると思う。これは、当時は大学院生であったので、傍観者としての見方かもしれない。私は、1981年~'83年にかけての2年間、博士論文の仕事で実験遂行の当事者として主体的に参画した。その時のことをベースにしながら大型水路実験の前半部をまとめてみる。

昼夜・休日運転は言うに及ばず、トタン屋根で肝心の天井付近には開放できる窓一つ無い建屋の中で、うだるような暑さと湿気に耐えながら夏休み中も毎日水を流していた。小規模な水路(小型水路)は工学関係で多くの大学が所有している。小型水路では得られない成果を出すことが大型水路実験に課せられた使命であったが、工学関係の実験成果との比較を考える余り、あとでパラメータを整理する際に点がまんべんなく分布するように、1)できるだけ実験条件を広範囲に数多く変えること、2)常に平衡状態で論じること、が頭にあった。

大型水路で制御できるのは、流量・砂床勾配・底質の粒径・それに給砂方式を採用する場合には給砂量である。流量の制御はボタン一つで出来るように設計されており、ポンプ本体のトラブルがない限りは簡単であった。砂床勾配の設定は下流端の堰高の調節で行えるように工夫がされている。しかし実際運転にあたっては、勾配を急にする場合には、堰

\*上武大学商学部

を少しずつ下げて水路内に堆積している砂礫を排出して再び上流端に返送させることによって循環させ、逆に勾配を緩くする場合には堰を上げて新しく追加した砂礫を堆積させ、最終的に必要な勾配を水路全体を使って出現させなければならない。勾配を変えるだけで一週間を超える長期間の運転が必要であった。

底質の粒径を変える為には、水路内に堆積している砂礫を搬出し、新たに砂礫を搬入しなければならない。搬出は、水路下流端から水とともに砂礫を流出させて、下流端の低水槽に堆積した砂礫を掻き揚げ装置で回収し、水路システムの外に出すという方式である。搬出時には砂礫の掻き揚げ装置の能力に限度があるために度々トラブルが発生し、時には修理の為に長期間実験が中断したこともあった。

一方、搬入は給砂装置に砂礫を供給するためのベルトコンベヤーまでは人力でやらざるを得ない。炎天下の中でのトラクターショベルの運転は、その震動と重なって疲労困ぱいであったろう。給砂装置が順調に砂礫を切り出してくれることは少なく、切り出し口のコンベヤー周辺にこぼれた砂礫を常に取り除いておかないとトラブルの原因になった。実験で使う大量の砂礫は砂礫置き場に野ざらしの状態で放置してある。雑草や落葉が給砂装置の中で詰まって度々給砂が止まることもあった。

こうやって実験条件一つを変えるために、本番の通水実験をはるかに上回る準備期間がとられた。

いよいよ実験にとりかかるわけであるが、常に平衡状態を追求する余り、条件によっては1ヶ月を超えても平衡状態となかなか認定できない実験があった。今考えれば、それこそが周期的な変動特性を持った固有の現象を発見していたのかもしれないと思えるが、当時はある平衡形に対して漸近することばかりを追っていたために、時間ばかりがかかった。モデルのスケールが大きくなればなるほど時間もかかるというのはフルードの相似則が教える所である。

さてこういう苦労を経てとったデータである。いったいどんな素晴らしい成果を上げることができたのだろうか。移動限界と掃流砂量式(池田, 1981)や砂礫堆相似(池田, 1982a)に関しては、確かに従

来の小型水路で得られたデータと実際河川との間で欠測していた部分を埋める貴重なデータを提供した。これらのデータは欧文雑誌の論文にも引用され、逆に欧米研究者の徹底した文献レビューということを勉強した。小型の水路ではあつという間に進行して細かくは追跡できない現象が、大型水路ではゆったりと進行する為に追跡できた現象もあった(池田, 1983; ISEYA, 1984)。

データの点一つを取る為に如何に苦労したか、それを訴えてみた所で、それは言い訳にすぎない。苦労するのは当り前のことである。大型水路実験という肉体労働に疲労困ぱいする余り、そして一つの実験条件が終ればすぐ次の実験条件にという毎日の繰り返しを余儀なくされている、という脅迫観念を持っていた当時は、肝心の成果の取りまとめには十分な時間が回らなかった。後になれば発表された論文の数でしか、評価はされない。そういう点では、投資に見合った成果が十分あがっていないというのが、大方の評価かもしれない。

大型水路では流速分布一つを測ることすら容易な話ではない。水路本体が鋼鉄性であること、測定台車の駆動用に強力なモータを使っていることのために、電磁流速計がうまく作動しない。学界がより分析的データを求め、小型水路では例えば三次元流速分布の測定を始めていた時に、大型水路では平均流速しか出せないわけである。10年も20年も前に終わった仕事を、巨費と時間とをかけてやっている、ご苦労さんと言われていたのかもかもしれない。

水理講演会などを通じて土木工学関係の研究者との交流が増えるに連れて、近接する建設省土木研究所を訪問した機会に、大型水路を見学を訪れる研究者が徐々に増えていった。

### III 混合砂礫の流送実験で視野を広げた後半部

従来の水路実験はほとんど均一粒径でなされてきた。大型水路実験でも、当初は砂を、続いて礫(5~10mm)を使った。大型水路には大量の砂礫が必要である。そのため古鬼怒川の河床から掘り出した材料を購入して使っていた。一応ふるい分けてあるので粒径が揃っているとはいえ、一様とは言い難い材

料である。大型水路の側壁は一部透明で、粒子個々の動きが横から観察できるようになっている。1982年の、秋の日はつるべ落としと言われる時期も過ぎて暮れも押し迫った頃、博士論文のための実験が遅ればせながらもいよいよ追い込みにかかって、毎日砂堆 (dune) の動きとそれに伴う堆積構造の残り方を追跡していた。これは仕事納めの日の夕方まで続いた。材料 (砂) の中にわずかに含まれている重鉱物の集団が見事に分離されて最低層を動いていること、礫粒子が砂粒子よりもはるかに速く移動していることをきわめて興味深く眺めていた。砂堆を水路実験で創ること自体が大型水路の規模で初めて出来ることであったが、それ以上に、個々の粒子の動きをつぶさに観察していたことが、それ以降野外に出て地層を解釈する時の大きな財産となった。

引き続いて、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極めて重要なことを透かし礫層の形成実験で認識して以来 (池田, 1982b), 大型水路実験のテーマは、積極的に砂と礫とを混合させるという方向に移った。

15周年を区切りとして振り返った時、混合砂礫の流送機構の解明に移ってからが大型水路実験の後半部といえる。大型水路ばかりにとらわれず、小型水路の設備も順に充実させていった。混合砂礫を使ったことによって、日本よりもむしろ欧米研究者から実験成果が目玉された。彼らとの研究交流を通じて、実験に対する視野が広がった時代である。欧文雑誌に論文が掲載されたが (Iseya and Ikeda, 1987), この掲載があと数ヶ月遅れたら、あるいは、たとえ英文で書いたとしても日本の雑誌に掲載されていたとしたら、後になって度々引用されるというプライオリティは他の研究者に持っていかれる所であった。世間の耳目を集める先端的な分野ではないが、混合砂礫の運搬は当時着目し始めた研究者が結構いた分野であった。

大型水路が世界的に認知されてきたと感じたのは、1985年の第1回国際地形学会議で成果を発表した時であった (Ikeda and Iseya, 1987)。砂礫がともに運ばれる条件での砂礫の混合効果を小型水路実験で気づき、さらにそれを大型水路の実験データで確実に

したものであった。ある混合比率を境に砂礫の運ばれ易さが急変することを証明するデータは、大型水路の規模があつて初めて取得可能であるということも多くが認められた。

日本が豊かになり、外国人研究者を招くゆとりが出来てきたのが1980年代であろう。そういう恵まれた時代にあつて、日本学術振興会や北海道開発庁等の招きで来日した研究者が、水理実験センターを訪問先に指定し、施設見学ばかりでなく、滞在して我々の語学力が十分でないにも拘わらず、混合砂礫の流送について議論するようになった。

そういう中で1987年に行なつたカリフォルニア大学パークレー校の Prof. Bill Dietrich との共同実験受け入れが契機となつて、USDA の Dr. Tom Lisle や USGS の Dr. David Rubin を始めとする数人の欧米研究者と共同実験が進んだ。

彼らとの共同実験を通じて学んだことは、工学の手法とは別の実験手法があつてしかるべきではないかということである。地形を研究対象とする立場として、現実の地形の成因やその地形の変化機構などを解明するための実験 (地形実験) があつてしかるべきではないかと考えるようになった。工学の実験がせいぜい100年までの時間をみているならば、地形の実験は数千年、そして数万年を見通した実験である。そのためには、野外で現象をよく観ることによって、変化を支配する要因を見極め、実験にその支配要因を適切に取り込まなければならない。

そういう認識のもとで、混合効果に起因する地形変化が最も顕著に現れる場所として山間地の溪流に注目し、1987年以降、大井川上流にある筑波大学井川演習林に度々調査に出かけている。土砂の生産源と近接しているため地形変化が急激に進行すること、何よりも演習林スタッフの貴重な経験が蓄積されていることが、フィールドに選定した最大の理由である。

#### IV 今後の方向

日常茶飯事のように外国人研究者を迎え入れていく機関の研究者からみれば、何を今更、外国人と仕事をすることをそんなにはしゃいで、と冷やかに見

られるかもしれない。しかし既存の機関では、体制が整うまでの準備機関と長年の蓄積を経て今日がある。筑波大学というきわめて恵まれた研究環境に置かれていたとはいえ、水理実験センターそれ自体はほとんどゼロからの出発であった。しかも工学という日本で広い裾野を持った、従って厚い研究者層に支えられた分野ではなく、理学の分野で計画した施設であった。理学関係で水路実験の経験があるという研究者は日本ではほんの少数である。それが外国人研究者を視野の範囲に入れることによって、裾野が飛躍的に広がった。1990年にイタリアで開かれた礫床河川に関する国際シンポで論文を発表した時には、文献交換を通じてかなりの研究者を知っていた。この研究者は次にどんな仕事を出してくるかという興奮のもとに出席した。

工学の実験手法を追従しても、所詮それは模倣であった。しかも、測定技術のどれをとっても、工学は100年以上にのぼる経験の蓄積の中から生まれたものである。工学で期待される精度のデータを提供することは、たとえ小型水路であっても悲しいかな伝統の浅い我々には出来ない。京都大学の宇治川水理実験所や北海道大学の土木分野の実験室を訪問する度に、その差をまざまざと見せつけられて暗胆たる思いを何度も噛みしめた。大きいことは良いことだ、という高度経済成長時代を背景に計画され、さて出来上がった時には、大きなことがかえってお荷物と感ぜられるような時代になっていた大型水路で、工学の実験とたちうちできるはずがない。

しかし、これは工学と同じ土俵で戦おうとした時のことである。工学の人が、我々に工学的な実験を期待するであろうか。大型水路は100有余年にわたる日本の地形学の伝統を背景にしているわけである。土木工事（ハード）を施して河川を管理していた時代が終わり、人々の親水空間として如何に河川環境を保全するかというソフトが求められるようになってきた。河川地形学が今こそ求められる時代になってきたと感じている。お互いの立場を尊重することによって、理学・工学の枠を超えた交流の時代を迎えている。

そういう中で当面の方向は、やはりIIIで述べた地

形実験であると考えている。しかし地形実験は、言葉を換えて言えば、きわめて定性的・経験的な実験にならざるをえない。理論の無い、単に解釈学であるという評価を受けるかもしれない。物事の本質的理解が一つ深まればそれでいいのではなからうか。水遊びか水路実験かという議論が常につきまとうだろうが、野外調査と実験との不即不離の関係がそれを解決すると信じている。

地形実験で最終的に我々が明らかにしたいものは、土砂の生産源から、礫床河川、砂床河川を経て海に至る、流域全体での物質循環（土砂収支）である。礫の大きさが下流に小さくなるのはなぜかといった、基本的な問題さえ、対立する意見があつて解決できないのが現状である。河川による運搬・侵食・堆積作用の3者が連動して河岸段丘ができると簡単にいうが、いったいどれだけの人が具体的な土砂収支のイメージを持って、段丘化の機構を論じているだろうか。

大型水路は、実験水路と考えると規模が大きいだけに厄介である。IIで述べたように勾配や底質の条件一つ変えるのすら容易なことではない。しかし流量は容易に、従って洪水頻度までも制御できる。侵食基準面も堰の上下によって変えられる。砂礫の供給量や供給される砂礫の質（粒径分布）も比較的容易に変えることが出来る。大型水路そのものが現実の河川の一つである。事実、USGSという大きな組織を除いて、個人研究者のレベルで流砂観測をしている河川の規模は、大型水路とたいして変わらない。河川の一つと考えれば、今までデメリットであったことが、ほとんどメリットに変わる。いつでも洪水観測が出来る、実際河川ではきわめて難しい洪水時の水理量の測定が容易に出来る、流砂量が連続的に測れる、洪水を挟んだ前後の地形変化の測量がいつも簡単に出来る、等々数限りなくある。大型水路では丸一日測定してやっと河床縦断形一本が描けたことに、大きなストレスを感じていたが、逆にわずか一日で縦断形が描けるというわけである。

大型水路では現在、多数の礫の移動速度を測定する試みが、イスラエルからの大学院生を迎えて進行中である。砂漠の河川で年に一度しかない出水を待

ってトレーサー粒子を追跡していた彼からみれば、大型水路は素晴らしい河川であるに違いない。

大型水路が現実の河川とした時、欠点は大粒子が流せないことである。過去の経験では16mmを超えると、砂礫の掻き揚げ装置に支障が出た。4～5 cmの礫が使えるように改良された時、利用価値は飛躍的に高まるであろう。

水理実験センターは、理学の分野では唯一の大型の施設を持った実験場である。日本はいうに及ばず、世界的にみてこれだけ充実した施設を有する機関はまれである。世界の研究者を裾野に持って、といっても限られた人数しかいない狭い世界ではあるが、水理実験センターの実験設備を位置づけ活用される方向がないであろうか。今までの活動を通じて、その素地は十分養われてきた。かつてスウェーデンのウプサラ大学が、多くの研究者を迎えて成果を輩出した時代があった。世界の河川地形学の実験場という賞賛を集めた実験施設は、指導した Sundborg 教授の退官とともになくなった。コロラド大学の Schumm 教授の所が、我々の目指している地形実験という意味では先輩格であるが、Schumm 教授もやはり退官になり、その後実験施設がどう運営されているかは知らない。

マサチューセッツ工科大学(MIT)の Southard 教授の所では、我々の実験と合い前後して、精力的に混合砂礫の流送実験をやってきた。その Southard 教授とは、閉管路を使った混合砂礫の流送実験の計画が現在進行中であり、科研費による研究補助金を受けて、そのための閉管路が水理実験センターにほぼ完成した所である。もちろんほとんど手作りである。MITこそ充実した実験設備が整っているのに、何でわざわざ水理実験センターで、といわれるかもしれない。MITには恒久的な水路を造る場所がないというわけである。一人の教授が使えるスペースは限られており、実験テーマが変わる度毎に水路を壊して新しい水路を造っているのが現状という。センターは場所があるだけで大きな魅力なのである。しかも大型水路という財産を持っているため、その周辺に応用可能な種々の設備を備えている。学生の卒論などで数ヶ月の利用に耐える小型水路を製作する場合

でも、何なくすぐに水が流せる状態のものができる。

## V おわりに

水理実験センターは、定員削減という社会情勢があつて、あれだけの素晴らしい設備を有していながら、限られた人数で運営しなければならない。設備や機器のメンテナンスに割かれる時間が、予想以上にかかる。研究者がこんなことをと思われる仕事まで分担してやらなければたちいかない。個人の業績が即組織の業績という、一人一人の重みがきわめて大きい組織であり、その分一人一人が頑張っている所でもある。

ないものねだりではあるが、もう少し人数が多ければと常に思っていた。枯木も山の賑わいではないが、数がいるというだけで活気が感じられる。今は誰かが休んだり、講義で外出すれば、一人か二人しかいないという状況が頻繁にできる。学生の利用者をうまく取り込んで、活気あるセンターでいつまでもいて欲しいと願う。

紙と鉛筆だけの環境に私は現在あるが、今まで大型水路他で得た膨大なデータが眠ったままになっている。そのとりまとめを段々やっていこうと思っている。実験に携わっている時は考える時間がないという文句ばかりを言っていたが、さて考える時間ばかりになってしまった今、何か新しいことが生まれるであろうか。実験中に認識しなければ、あとからプロットしたら何か出てくるだろうという気では、実験は絶対にうまくいかないよ、とは卒論生に私がことある度に言ってきたことである。

## 謝 辞

自然学類の一期生として入学以来約17年間の筑波での年月の大半を、水理実験センターという恵まれた研究環境の中で過ごすことができた。素晴らしい環境を築いて下さった先輩の皆様方に、心より深く感謝いたします。

## 文 献

池田 宏(1981)：大型水路における細礫の流送実験(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 a) : 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, 3-14.
- 池田 宏 (1982 b) : 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行砂州  
の形成. 第27回水理講演会論文集, 709-714.
- 池田 宏 (1988) : 混合砂礫の流送実験の経過. 筑波大学  
水理実験センター報告, 12, 21-30.
- 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・伊勢屋ふじこ・飯島英夫 (1984) : 大型水路に  
おける流砂実験 (1979~1984). 筑波大学水理実験セ  
ンター報告, 8, 163-170.
- Ikeda, H. and Iseya, F. (1987) : Thresholds in the  
mobility of sediment mixtures. In Gardiner, V.  
*ed.*, *International Geomorphology 1986, part 1*.  
John Wiley & Sons, Chichester, 561-570.
- Iseya, F. (1984) : An experimental study of dune  
development and its effect on sediment suspen-  
sion. *Environmental Research Center Papers*,  
Univ. Tsukuba, No.5, 56p.
- Iseya, F. and Ikeda, H. (1987) : Pulsations in bed-  
load transport rates induced by a longitudinal  
sediment sorting : a flume study using sand and  
gravel mixtures. *Geografiska Annaler*, 69A, 15-  
27.