

流砂捕捉ポンプの開発と性能評価

DEVELOPMENT OF PUMPING SAMPLER FOR SUSPENDED SAND

末次忠司¹・藤田光一²・諏訪義雄³・横山勝英⁴・鈴木 隆⁵・西村武幸⁶

Tadashi SUETSUGI, Koh-ichi FUJITA, Yoshio SUWA, Katsuhide YOKOYAMA,

Takashi SUZUKI and Takeyuki NISHIMURA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室 室長 (〒305-0804茨城県つくば市大字旭一番地)

²正会員 工博 国土交通省三重工事事務所 所長 (〒514-8502 三重県津市広明町297)

³正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究室 主任研究官 (〒305-0804茨城県つくば市大字旭一番地)

⁴正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室 研究官 (同上)

⁵T C M株式会社 常勤顧問 (〒105-0003 港区西新橋1-15-5)

⁶(株) 鶴見製作所 東京本社システムエンジニアリンググループ 課長 (〒110-0016 台東区台東1-33-8)

A new pumping sampler was developed for collecting relatively large sand suspended near the river bed. This lift pump is composed of vacume pump, compressor for airlift, air-liquid separator and screen. The laboratory experiments showed that a particle the size of 5mm is lifted up to 20m high and is transported up to a distance of 120m. The size distribution will change at the intake, however it is possible to calibrate the measurement distribution by using experimental relationship between concentration change, particle size and transport distance. The field experiments showed that the suspended sand concentration increase near the bed and the vertical distribution are in approximate agreement with theoretical curve.

Key Words: lift pump for suspended sand, laboratory and field experiment, Rouse distribution

1. はじめに

平成10年7月に河川審議会総合土砂管理小委員会から「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の報告が出され、水系の総合的な土砂管理に向けた取り組みが本格的に始められることになった。

水系一貫土砂管理とひとことで言っても、実際の河川で移動している土砂の粒径や量、生産及び移動のメカニズムなどについては今なお不明な点が多い。そのため、土砂管理を実践してゆくにあたって、まず水系における土砂動態を監視する体制を構築し、さらにその情報を計画及び管理に役立てる仕組みが必要である。

そこで本研究では、河道における土砂移動状況のモニタリング技術を確立することを目指し、河床近傍を移動する比較的粗い粒径の浮遊砂を採取する装置を開発することとした。従来の観測技術では、ウォッシュロードは精度良く把握できるが、浮遊砂や掃流砂については把握が困難であり、普及している技術は無いに等しい。

本研究では、従来の土砂観測技術について簡単に

整理して浮遊砂観測装置に必要な性能を明らかにし、新たに開発した「流砂捕捉ポンプ」がその性能を満たしていることを実験によって確認した。さらに、いくつかの現地河川に流砂捕捉ポンプを設置して洪水観測を実施し、観測技術の有効性を示した。

2. 土砂観測装置に必要な性能

(1) 従来の観測装置の評価

流域で生産された様々な粒径の土砂は、河道の水理量に応じてウォッシュロード的運動形態、浮遊砂的運動形態、掃流砂的運動形態で流下し、沈降速度の大きな粒子から順に分級堆積してゆき、各セグメントの河床材料を形成する。

あるセグメントにおいて、ウォッシュロードを構成する粒径集団は相対的に沈降速度が十分に小さいので、水深方向の濃度分布が一様であると考えられるが、浮遊砂を構成する粒径集団はより沈降速度が大きいので、水深の増大とともに濃度が上昇すると考えられている。

表-1 従来の採水方法一覧

種類	開放容器	定置容器	開閉容器	積分型容器	ポンプ採水器	
製品・方式	バケツ等	東工大方式 ¹⁾	バンドン採水器 東北大方式 ²⁾	USGS式採水器 土研式採水器	水中ポンプ	自動採水器
操作方法	橋梁から投げ込む	橋脚・護岸に事前に設置しておく	橋梁から吊り下げる	橋梁から吊り下げる	橋梁から吊り下げる、橋脚に固定	本体は陸上、ノズルは水中
採取方法	表面	水位上昇時のみ表面水を採取	任意の水深で蓋を開閉し、瞬間的に採取	任意の水深でバルブを開閉し、時間積分的に採取	任意の水深でポンプを動かして時間積分的に採取	一定時間間隔で自動的に採取
採取量	10L程度	0.5～1L程度	1～3L	0.5～2L	任意	1L
実用揚程	15m程度	なし	10m程度	10m程度	懸下型:10m程度 設置型:20m以上	8m以下
作業性	簡易	簡易	クレーン車が必要	クレーン車が必要	懸下型はクレーン車が必要	初期設定のみ
安全性	やや危険	安全	危険、高流速(1m以上)では装置を深く潜らせるのが困難	実績は多数	懸下型は開閉容器と同じ、設置型は装置が損壊する恐れあり	安全
評価	ウォッシュロードのみ	ウォッシュロードのみ	河床付近の採取が実際上かなり困難	採取量が少なく、ノズルが細いので浮遊砂を捕捉できるかどうか疑問	ポンプ保護のために取り付けられたストレーナーにより粗砂は採取できない、吸引により粒径が変化する	揚程が低いので設置地点が上流に限定される、吸引により粒径が変化する

また同様の理由で、ウォッシュロードを構成する粒径集団は河川水に十分に懸濁しているので、洪水流の乱れの時間変動による濃度変化は少ないが、浮遊砂は辛うじて浮遊しているため瞬間的な濃度変化が大きいと考えられる。

そのため、ウォッシュロードを観測する場合は横断面内において一点で短時間の計測を行えばよいが、浮遊砂の場合は濃度の鉛直分布を計測できて、かつ乱れの時間スケールよりも十分に長い時間で連続的に計測できる方法が必要となる。

さらに観測作業では、作業員の安全性の確保や観測装置の安定性や耐久性なども重要な要素である。

このような観点から、従来の観測機器の性能を整理し、浮遊砂観測に適しているかどうか判断した(表-1)。もっとも簡便な開放容器や定置容器による方法では表面採取に限定されるので、浮遊砂観測には不向きである。

開閉容器による方法では、時間積分的な採取が出来ないことと、実際の観測作業がかなり危険を伴うといった問題点がある。

積分型容器は河床近傍まで安定して潜水させるために内容積を小さくして装置の比重を大きくしている。逆に言えば、採取量が少ないので浮遊砂を安定的に採取できるかどうか疑問がある。

水中ポンプは構造的な問題として吸引口にゴミよ

けのストレーナーを取り付けているため、吸引口での流速が低下して粒度分布が変化し、さらに粗砂を取り込むことができない。また、橋脚に設置しておくと、流木によって損壊するおそれがある。

自動採水器は無人で安全に、かつ時間積分的に採取できるが、揚程が8mであるために、大河川には設置が難しい。また、吸引の過程で管内流速と粒子の沈降速度の関係によって分級が生ずると考えられる。

(2) 新たな観測装置の開発目標

本研究では前述のような実状を考慮し、浮遊砂の採取装置を開発することとした。現地で求められることは、河川水中をかるうじて浮遊している大粒径土砂を、陸上から安全に、精度向上のために大量に、流木やゴミ等の影響を受けずに、水深方向に数点から採取することである。これらの条件を整理すると次のようになる。

- ・対象粒径: 5mm (砂礫) まで
- ・実揚程 : 20m 程度もしくはそれ以上
- ・回収水量: 100 リットル以上
- ・吸引特性: 河川水中の土砂を濃度及び粒度分布を変化させずに回収できること
- ・ゴミ対策: 吸引口に引っかかった木片やビニール袋等のゴミを排除できること
- ・設営方法: 可搬式であること

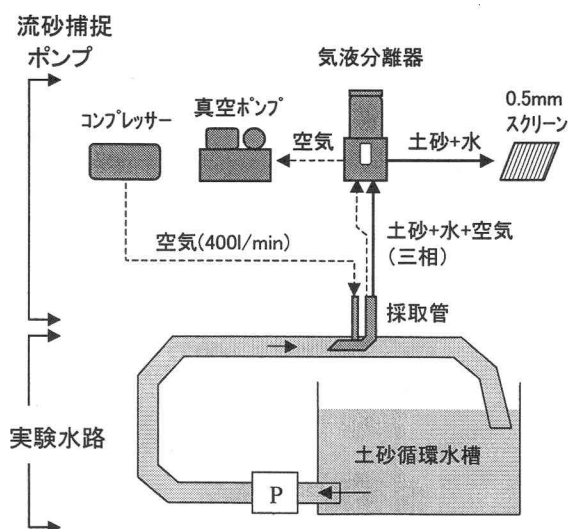


図-1 流砂捕捉ポンプの構成と実験水路

3. 流砂捕捉ポンプの性能評価実験

(1) 装置の構成

前章で述べた要求を満たす装置は、陸上の土砂吸引装置と護岸や橋梁への複数配管の組み合わせが望ましいと考えられるため、任意の水深から大量の濁水及び粗粒分を回収する「流砂捕捉ポンプ」を考案した。図-1に流砂捕捉ポンプの装置構成を示す。

河川水中の浮遊砂を自然な状態で吸引するには、真空ポンプが良い。水中ポンプは構造上、流線を乱すからである。しかし、真空吸引では揚程は8m程度が限界であるために、本装置では回収水に空気を混入させてエアリフト効果を加味し、揚程と搬送距離を増大させることとした。

エアリフトは港湾での浚渫に古くより用いられている工法であり³⁾、管の採取口付近に空気を注入することで、空気の浮力によって管内に上昇流が発生し、これによって水と土粒子が押し上げられる。

流砂捕捉ポンプの浮遊砂回収の流れは次の通りである。真空ポンプにより採取管内に負圧が生ずると、河川中から土砂を含んだ濁水が吸引され、管路の途中でコンプレッサーにより気泡が注入されて、エアリフト効果が生ずる。真空吸引とエアリフトの2つの効果で高揚程をクリアした濁水は気液分離装置に入り、空気と濁水に分離される。空気は真空ポンプに吸われ、濁水はメッシュスクリーンに排出されて0.5mm以上の砂礫を分離回収する。

本装置のもう一つの特徴は、スクリーンと水量計の組み合わせである。粗砂は水中での存在量が少ないと推定されるので、できるだけ大量の濁水を吸引する必要がある。そこで、スクリーンで0.5mm以上の粒径を分離して、水は水量計を通過させた後に排

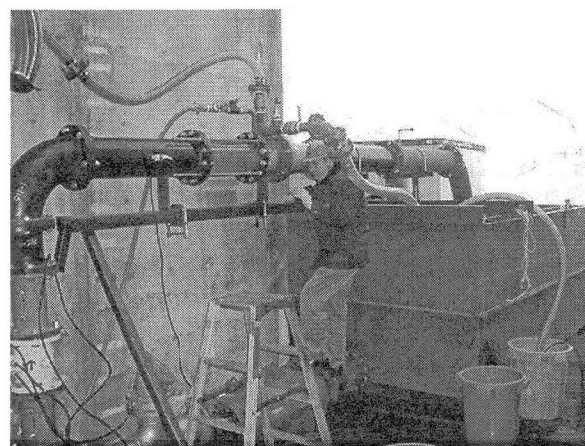


写真-1 実験水路

出することで、必要な量の砂を回収するまで、いくらでも濁水を吸引することができる。

さらに、この方式では高压空気の逆噴射ができるために、吸引口のゴミを排除することも可能である。

(2) 実験方法

考案した流砂捕捉ポンプの吸引水量（速度）、揚程及び搬送距離、捕捉による粒度組成の変化などの性能を水槽実験により評価する。

実験設備の概要を図-1、写真-1に示す。実験水路には容量6m³の水槽及び直径200mmの循環管路を用意し、ここに0.35～6.7mmの土砂を投入して流速3m/sで循環させた。なお、粒径区分は0.35mm, 0.71mm, 1.4mm, 3.35mm, 6.7mmであり、各ふるい間隔の代表粒径を0.5mm, 1mm, 2mm, 5mmとして扱う。この循環管路に直径50mmの採取管を流線と平行に取り付け、ポンプ装置を10～20mの高さに設置した。

ここで、実験水路の土砂濃度の安定性を確認するために、連続循環させながら採取管より濁水を一定間隔で取り出して、濃度変化を調べた。

次に、現地での配管を想定して管路を設置し、ポンプ吸引による土砂の濃度変化率を調べた。配管経路は鉛直（橋脚を想定）、傾斜（護岸を想定）、鉛直及び横引き（複合型）の3種類を設定し、管路長を10m～120mまで変化させた。実験ケース数は、鉛直が3、傾斜が7、複合が12で、合計22通りである。

各配管では、ポンプ吸引及びその前後に源水を採取する作業を1セットとして、これを3回実施し、粒径別の濃度変化率の平均値を求めた。

(3) 実験結果

図-2に実験水路の土砂濃度時間変化を示す。水槽には1mm, 2mm, 5mmの土砂を各3,300mg/Lとなるように投入し、採取管から濁水を5秒ずつ12回、連続的に取り出した。なお、水槽中の濁水は60秒で全部が循環する計算である。

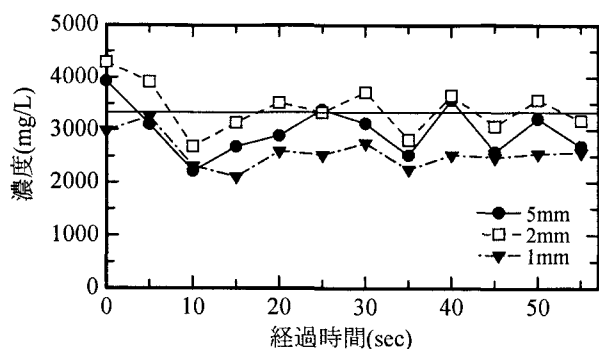


図-2 実験水路の土砂濃度時間変化

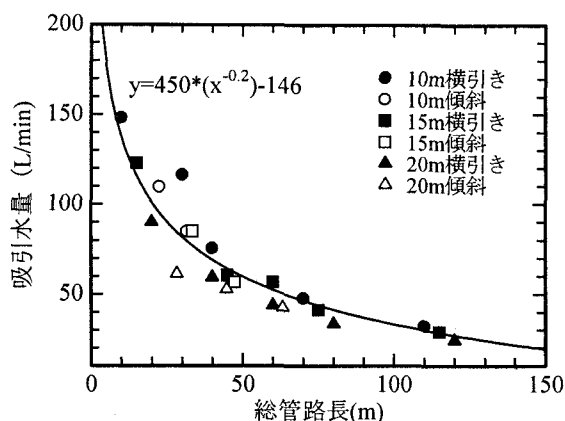


図-3 管路延長と吸引水量の関係

これより、採取された土砂濃度は原水濃度よりも少し低めであるが、安定性は良いことが分かる。特に5mmの礫もまんべんなく循環しており、水槽の安定性は十分であると判断した。

図-3に吸引水量と管路延長の関係を示す。ここで、管路延長とは採取口から吸引ポンプまでの間の距離である。吸引水量は管路延長が長くなるにつれて減少することが分かり、鉛直、傾斜、横引きといった配管の経路には依存していない。したがって、現地では配管経路を自由に設計できるので大変容易である。ただし、エアリフトを使用している関係上、管路勾配は水平かプラスであることが必要である。

図-4にポンプ吸引による原水濃度の変化率を整理した例を示す。図は鉛直に10m引き上げた後に水平に0～100m搬送した場合の粒径別濃度変化率である。これより、粒径が大きくなるほど、また管路延長が長くなるほど、濃度が原水よりも濃くなることが分かる。通常のポンプ吸引では粒子の沈降速度と管内流速の関係で、粒径が大きくなるほど濃度が薄くなると考えられるが、本装置では逆の結果が得られた。

この原因としては図-5のようなメカニズムが考えられる。流砂捕捉ポンプでは採取管より空気を混入させるが、その混入率は90%程度と圧倒的に空気の方が多く、気液固三相の不連続流（ピストンの流れ）となっている。

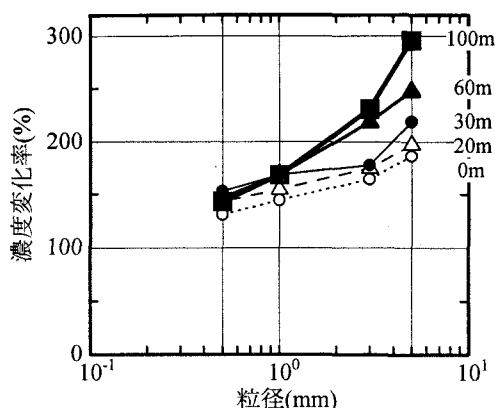


図-4 粒径と濃度変化率の関係
(鉛直10m+横引き0～100mの場合)

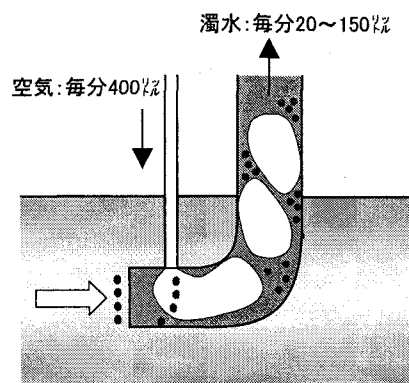


図-5 採取口での濃縮メカニズム

吸引水量は、満管状態で水路流速と同速度で吸引した場合は毎分約350Lであるが、実際には毎分150L（管路長10m）から20L（管路長120m）である。これは採取管の先端で空気を毎分400L注入しているため、管内は満管ではなく大部分が空気に支配されていることによる。単純に考えて、水は管断面の1/3～1/20程度しか存在していないことになる。

一方、土砂粒子の慣性力は粒径に比例して大きくなるから、大きな粒子は採取管に入る際に水流から離れて気泡中に突入するような動きを示す。このようにして、粒径が大きくなるほど濃縮作用が働くものと推測される。

他の配管経路についても同様の整理を行った結果、管路延長と粒径別濃度変化率の関係について次式が得られた。

$$A = 100 + 22 \times (L^\alpha) \quad \dots (1)$$

$$\alpha = 0.224 + 0.335 \times \log(D) \quad \dots (2)$$

ただし、 A ：濃縮率(%), L ：管路延長(m), α ：係数, D ：粒径(mm)。したがって、原水濃度は次式で求まる。

$$B = B' \times \frac{100}{A} \quad \dots (3)$$

ただし、 B ：原水濃度, B' ：回収水の濃度。

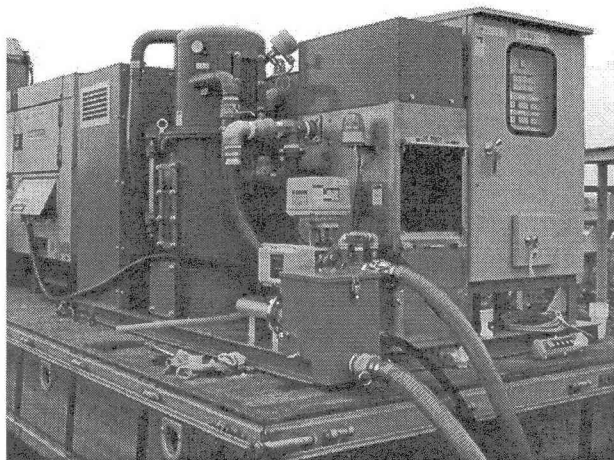


写真-2 流砂捕捉ポンプの外観

以上より、現地で流砂捕捉ポンプを使用する際には、敷設されている管路の延長距離 L から粒径 D ごとに濃度変化率 A を予め求めておき、採取土砂濃度を濃度変化率で除して原水濃度を算出すればよい。

4. 現地での適用結果

(1) 設置事例と問題点

流砂捕捉ポンプは全国の9河川に設置した。

流砂捕捉ポンプの外観を写真-2に示す。流砂捕捉ポンプは4tトラックに発動発電機と共に搭載して用いている。採取管は予め現地に施工しておき、洪水発生時にはポンプ車で観測地点に駆けつけてポンプと採取管を接合し、濁水を所定の水量(100L以上)もしくは設定時間(10分以下)に達するまで吸引して土砂を採取した。なお、0.5mm以下の細粒分はスクリーンを通過した後の排水を20Lだけポリタンクに回収して、濃度及び粒度の分析にかけた。

配管は全ての地点で河岸に敷設した。河道内では鉛直方向のみならず、横断方向にも土砂濃度が変化していると予想される。そのため、橋脚に配管して土砂濃度の横断分布も計測することが望ましい。しかし、橋脚周りは特殊な流れとなっており濃度の代表性に疑問があること、配管によって橋脚を傷つける恐れがあるなどの点から、今回は設置を見送った。

鉛直方向の設置位置は、年2回確率の洪水のピーク水位に対して概ね5割、2割、1割水深の三ヶ所である。

実際の観測作業を通じて問題となった点は、採取口が河床や河岸に近すぎて(10cm程度)、採取した粒径や濃度から見て明らかに河床材料を吸い上げていると思われるデータがあったことである。さらには、河岸堆積が著しい場所に設置したために、採取管が埋没してしまった例も1箇所あった。

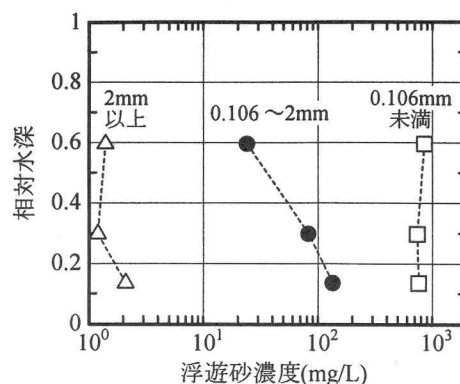


図-6 粒径別の土砂濃度鉛直分布図
(利根川, 2000/09/12 18:00)

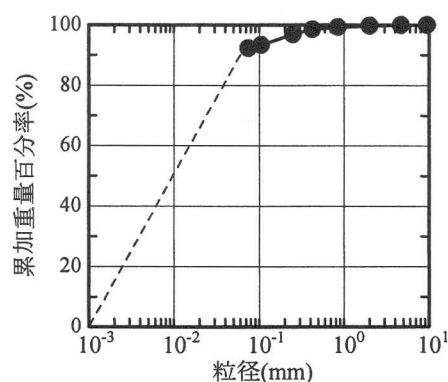


図-7 浮遊砂の粒度分布(利根川, 2000/09/12 18:00)

逆に最低位の採取口が河床から離れすぎていて(洪水水位が低く、採取口が2割水深以上になった)、濃度の鉛直分布がほとんど見られない例もあった。

このように、実際の河川は形状が複雑で水位変化が著しいために、配管場所の選び方や、設置方法によって結果が大きく異なることがあらためて確認できた。したがって、河岸侵食や堆積が活発な場所は避ける、採取口を河床や河岸から30~50cm程度離す、といったことに配慮しつつ、トライ・アンド・エラーを繰り返す必要がある。

(2) 観測結果

現地河川での観測結果の例として、利根川180km地点(セグメント2-1)での土砂濃度の粒径別鉛直分布を図-6に、粒度分布図を図-7に示す。ここでは0.1mm以下をウォッシュロード成分、0.1~2mmを浮遊砂成分、2mm以上を掃流砂成分として区分した。これより、ウォッシュロード成分は水深方向に濃度分布を持たず、浮遊砂成分は河床に近くなるほど濃度が上昇することが分かり、既往の理論的な検討による知見と同様の傾向を示した。

また、各粒径成分の濃度を比較すると、ウォッシュロードが9割程度、浮遊砂が1割程度であり、ウォッシュロードの占める割合が非常に高いことが分かった。この河川では、観測地点よりも下手に位置する

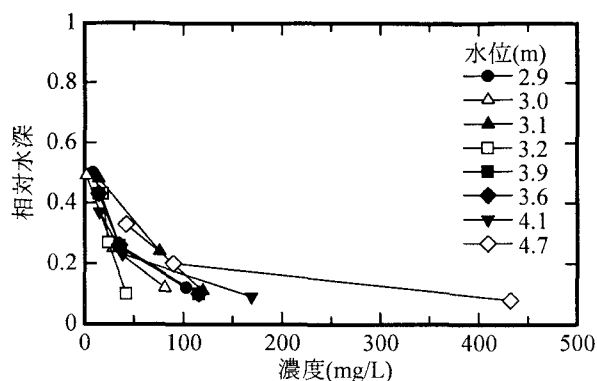


図-8 浮遊砂濃度の鉛直分布 (木津川)

粒径集団 : 0.25 ~ 2mm

中流域の主材料が0.1～2mmの砂、河口感潮域の主材料が0.2mm以下の粘土～砂であるため、下流の河床を構成する材料が観測地点を浮遊した状態で通過していることが確認できた。

なお、全浮遊土砂に占めるウォッシュロードの割合は、全国9河川で概ね5～10割であった。浮遊砂が全く観測されなかった河川も半分程度あったが、これは観測した流量規模が小さいことや、低位採水管の位置が高めであることなどが原因と考えられた。

(3) 評価

流砂捕捉ポンプの性能を評価するために、各河川の浮遊砂濃度の鉛直分布を整理した。図-8に木津川の場合を示す。浮遊砂の判定はRouse分布から行った。

$$Z = \frac{w_0}{\kappa u_*} \quad \dots (4)$$

ここで、 w_0 ：沈降速度、 κ ：カルマン常数 (= 0.4)、 u_* ：摩擦速度である。Z > 1/2であれば浮遊砂と見なすこととする。今回の観測地点では u_* が概ね20～25であり、Z=1/2の区切りは0.25mmとなった。よって0.25mm以上を浮遊砂として整理した。

これより、河床に近づくほど浮遊砂濃度が增大することが確認された。現地河川で、浮遊砂に関してこのように明瞭な分布が得られた例はきわめて少なく、本装置の有効性が示された。

次に、観測結果をRouse分布上にプロットする。図-9はZ=1/2程度となる0.25～0.425mmの粒径集団を整理した結果である。ここで、基準面濃度は便宜的にLane-Kalinske式より算出して、観測濃度を相対濃度に変換した。また、 u_* は観測地点・時刻ごとに变化するので、図中にはRouse分布の幅を示している。

この結果は、ばらつきは認められるものの概ね理論値付近に分布していると言える。ただし、観測値が理論値からずれる原因としては、式そのものの精度の問題や、河床や河岸地形の凸凹が粒子の浮遊状態に影響を及ぼしていることなどが可能性として考

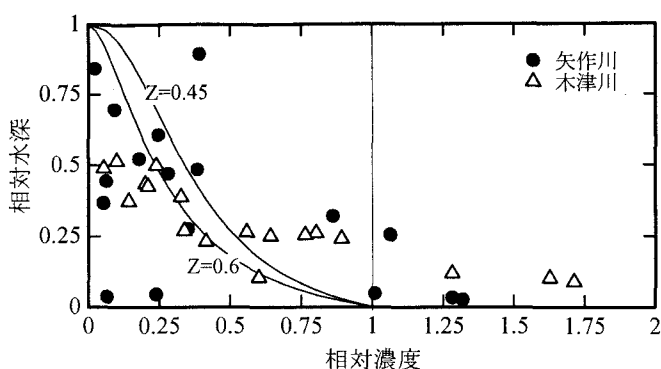


図-9 浮遊砂濃度分布の理論値と観測値の比較

えられる。特に後者は、河岸近傍に採取管を設置したことで、その影響を受けている可能性がある。この点については配管の見直しによって対処が可能であるので、今後検討する必要がある。

以上の結果から、本研究で開発した流砂捕捉ポンプは、採取管の設置方法を含めてまだ改善すべき点もあるものの、基本的には実用に供しうる性能を有しているものと考えられる。

5. 結論

本研究では河道における土砂輸送量を正確に把握する目的で、河道内の複数の水深から浮遊砂・ウォッシュロードを大量に採取する「流砂捕捉ポンプ」を開発した。水路実験及び現地観測の結果、底面近傍まで粒径別の土砂濃度鉛直分布を計測できることが示された。今後はさらに精度を高めるために、配管方法を再検討すると共にデータを積み重ねて検証を実施する予定である。

追記：本論文は建設省直轄技術研究会の指定課題「水系一貫土砂管理に向けた河川における土砂観測、土砂動態マップの作成及びモニター体制構築に関する研究」として平成11年度から13年度にわたって実施された研究の成果の一部をとりまとめたものである。研究は、著者らと本省治水課及び北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、四国、中国、九州の各地方整備局河川計画課、ならびに河川工事事務所が一丸となって進められ、本成果を挙げるに至った。

参考文献

- 1) 入江光輝・若岡圭子・小澤啓明・石川忠晴：洪水採水用簡易採水装置の試作とテスト，水工学論文集，第40巻，pp.1149-1152，1996.2
- 2) 真野明・杉本基泰：洪水用浮遊砂採水器の試作と現場試験，水工学論文集，第39巻，pp.887-890，1995.2
- 3) 岡山義邦・八木得次：エアリフト工法について，昭和52年度港湾技術研究所講演会講演集，pp.205-235，1977.12

(2002. 4. 15 受付)