

河床内トラップ型簡易掃流砂計の試作

A SIMPLIFIED MONITORING METHOD WITH A BED-SLOT SAMPLER FOR BED-LOAD DISCHARGE

二瓶泰雄¹・塗師隆生²

Yasuo Nihei and Ryusei Nushi

¹正会員 博(工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²非会員 学(工) ㈱トヨタテクノサービス

Previous devices used in measuring bed-load transport in rivers are too large and expensive, and hence there exists no general way for monitoring bed-load discharge. In this study, we attempt to present a simplified monitoring method with a bed-slot sampler for bed-load discharge, which may be easily set up at a low price. The present method measures the bed-load discharge deposited in the bed slot with a tipping bucket which is generally adopted in a rain gauge. We check the fundamental performance of the present monitoring method through laboratory experiments and the field measurement done in an urban river. We compare the observed results and a well-known formula for the bed-load discharge.

Key Words : bed load, bed-slot sampler, monitoring method, tipping bucket, urban river

1. はじめに

水系に対する様々な人為的環境負荷に伴い、流域における土砂動態は大きく変貌している。それに対処するには、河川の源流から河口、海域にわたる土砂動態を総合的に管理する、という「水系一貫土砂管理」の必要性が指摘されている¹⁾。その際には、土砂管理のベースとなる河道部での土砂動態モニタリングを広範かつ精度良く行うことは必須である。

土砂動態調査の現状として、まず、浮遊砂量やウォッシュロードの計測には、土砂を含む水を採取する直接法と、光や超音波等の特性を利用する間接法が用いられる^{2), 3)}。直接法では、バケツやポンプ等により河川水を採取し、最近では、ポンプを用いた自動採水器が市販され出水調査に適用されている⁴⁾。一方、間接法で使用する測定器は、光の透過率や散乱強度に基づく光学式濁度計^{3), 5)}や、超音波の反射強度と土砂濃度の相関性を利用する超音波流速計^{6), 7)}が挙げられる。浮遊砂やウォッシュロードに関しては、これらの手法やその組み合わせにより、長期間にわたる自動・連続計測が可能である。

一方、掃流砂量に関する計測法は、土砂の体積や重量を測定する直接法と音響等を利用する間接法に分けられる²⁾。このうち直接法では、掃流砂の採取方法として、河床面トラップ型や河床内トラップ型

等に分類される²⁾。このとき採取される土砂の質量を荷重計等を用いて測定することにより、掃流砂量を自動・連続計測する^{8), 9)}。また、間接法の中で代表例として挙げられる音響法(ハイドロフォン)では、河床に設置された鉄板または鉄パイプに衝突する砂礫の音や振動を計測するものである¹⁰⁾。しかしながら、これらの直接法や間接法における計測装置は、浮遊砂量やウォッシュロードの観測手法と比べると大掛かりで高価なものが多いため、一般的に確立された掃流砂量計測法は存在しない²⁾。

本研究では、極めて安価でかつ製作が簡単な掃流砂計の開発を目的として、河床内トラップ型の簡易掃流砂計を試作した。ここでは、河床変動や掃流砂量が小さい河川における掃流砂観測を対象として、図-1に示すように、河床内に設置された堆砂箱に堆積する土砂の質量を、荷重計を採用せずに、雨量計で一般に用いられる転倒マス²⁾により計測を行う。また、試作された掃流砂計のテストとして、現地都市河川における掃流砂調査を実施し、同時計測された水理量と掃流砂量の関係を検討する。

2. 簡易掃流砂計

(1) 概要

河床変動や掃流砂量が小さい河川を対象とする掃

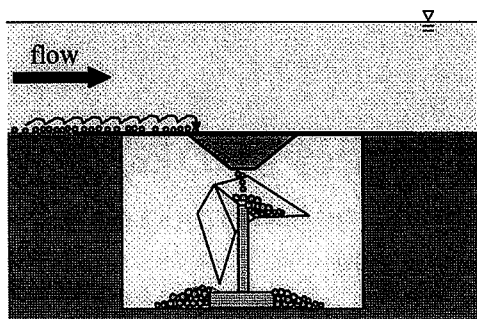


図-1 本装置の概念図

流砂計を自ら制作する際に、次の4点に留意した。

- ① 制作費が安価（数万円程度）である。
- ② 製作するときに特別な技術を必要としない。
- ③ 自動・連続計測が可能である。
- ④ 装置が小型で、河川での設置作業が容易である。

これらの事項は、既存の掃流砂計の問題点を踏まえつつ、特別なスキルを持たない研究者や学生にも自作可能であり、かつ、複数の装置を製作することを念頭に置いている。これらに基づいて試作された掃流砂計は図-1に示すとおりである。これは、河床に穴を掘り、その穴に堆積する土砂量を計測する、という河床内トラップ型である。

この堆砂箱内に落下した土砂量を測定するために、ここでは転倒マスを用いる。転倒マスの動作状況としては、図-2のように、ある一定量の土砂がマスに貯まると、マスは転倒し下方へ排砂する。そして、もう片方のマスに再び落下してきた土砂が貯まる。マスが転倒すると発生する電気パルスをデータロガーにて記録して、掃流砂量の自動・連続記録を可能としている。これらの一連の動作は、雨量計において使用される転倒マスの動作と同じである。

本掃流砂計を作成する際には、転倒マス自体や、そのマスと上部の漏斗を固定するための枠組みを作ることが主であるので、通常の雨量計の作成にかかる手間と同程度である。また、転倒マス等のための材料費はわずかで、必要な費用の大部分はデータロガー代であることから、制作費は数万円程度と極めて安い。このように、本掃流砂計は、極めて安価で、かつ、簡単に自作することが可能である。

(2) 作成方法

図-3に示すように、本装置は取込口付上蓋、メインフレーム、堆砂箱、転倒マス、データロガーから構成される。以下には、各パーツの作成方法やそれに用いる材料等について記述する。

① 取込口付上蓋

図-3に示すように、堆砂箱を覆う上蓋(塩ビ板、流下方向 65cm、横断方向 55cm)の中央部に掃流砂

掃流砂

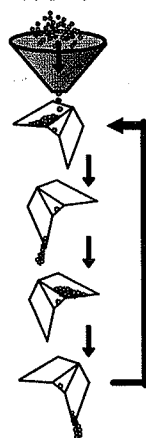
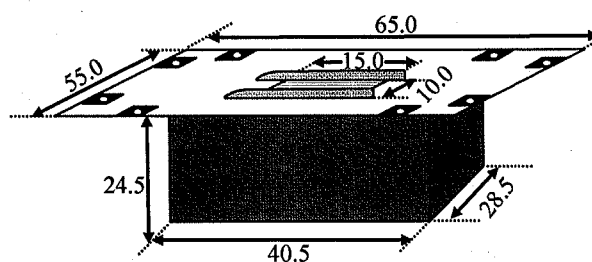
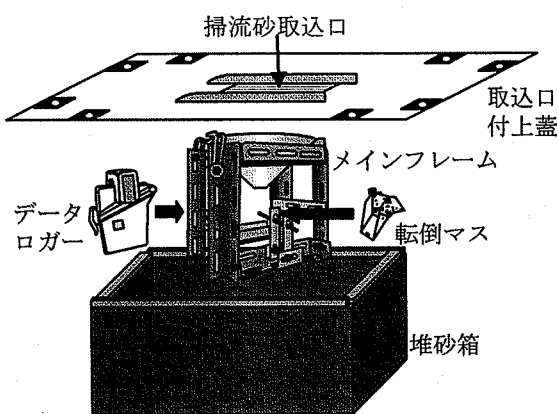


図-2 転倒マスの動作状況



(a) 外観図 (単位: cm)



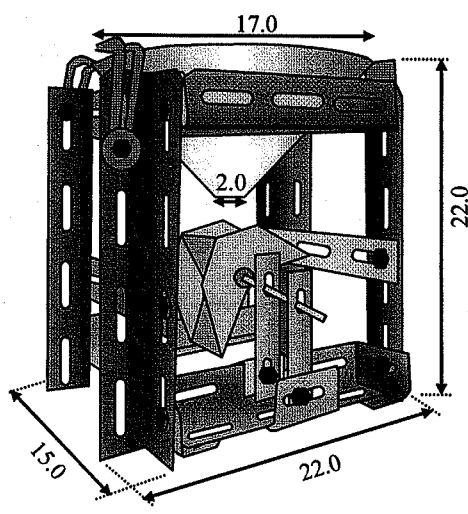
(b) 基本構成

図-3 本装置の (a) 外観図と (b) 基本構成

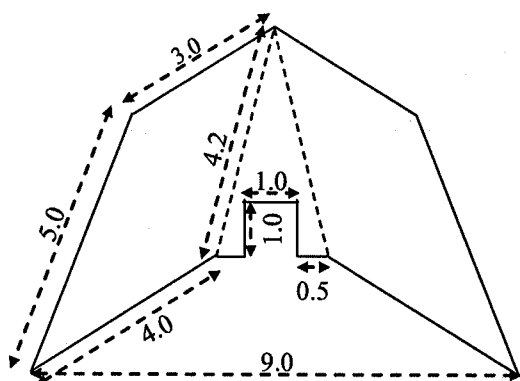
を取り込むための穴（流下方向 15cm、横断方向 10cm）を空ける。ゴミ等が堆砂箱に入らないようにするために、通常の雨量計と同様に、掃流砂取込口にネットを付ける。なお、ネットの網目の大きさは 3mm 四方である。

② メインフレーム

掃流砂を受ける漏斗や転倒マス、データロガーを固定するためのメインフレームを作成する。このフレームの概観やサイズは図-4 (a) に示すとおりである。フレームは、主として L 型鋼材(アングル)を用いて組み立てられている。



(a) メインフレーム



(b) 転倒マス

図-4 各パーツの概観及び寸法 (単位: cm)

③ 堆砂箱

メインフレームや上蓋より取り込まれた掃流砂を収納するための堆砂箱として、図-3に示すような四角い容器を用いる。転倒マスより落下する土砂は、マスの下側に堆積するため、容器自体の体積や容器底部の形状により、本装置において計測可能な掃流砂量の総量が規定される。ただし、容器のサイズを大きくすると、設置作業が大変になるため、ここでは、図-3 (a) に示すサイズを選定している。

④ 転倒マス

転倒マスの形状や大きさは、図-4 (b) のとおりであり、雨量計において一般に用いられる三角柱とは異なる。これは、三角柱のマスを作成して予備試験を行ったところ、マスが転倒したときにマス内の土砂が完全に排砂されないことを確認したためである。この転倒マスの材料はアクリル板である。また、マスが転倒する時刻をデータロガーで記録するために、ここでは、雨量計と同様に、マス転倒時に電気パルスを発生させる方式を採用する。そのために、リードスイッチとそれを閉じるための磁石が必要となるが、その磁石をマスの頂部に取り付ける。

⑤ データロガー

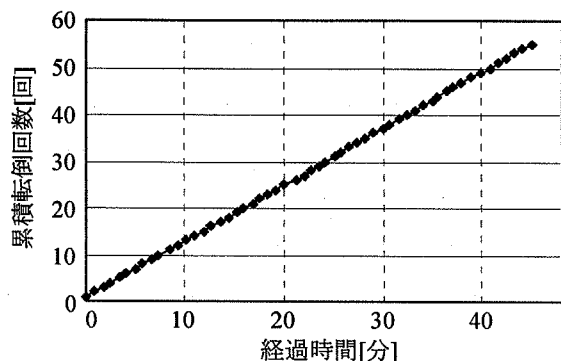


図-5 本装置のキャリブレーション結果
(豊浦標準砂を使用)

パルス信号が流れる時刻を記録可能なデータロガー (ホボイイベント, Onset 社製) を用いる。また、前述したリードスイッチをデータロガーに固定する。なお、このデータロガーとリードスイッチは防水加工がなされていないので、これらをビニール製の簡易防水ケースに入れてメインフレームに固定する。

(3) 設置作業

現地河川での本装置の設置作業は次の手順である。

- ① 本装置の設置予定箇所を囲むように、4枚の鉄板を打ち込む。
- ② 鉄板で囲まれた部分の河床部を掘る。
- ③ 掘削された場所に、メインフレームが固定された堆砂箱を埋める。
- ④ 堆砂箱の中に空気が入らないようにして取入口付上蓋を堆砂箱に固定し、さらに杭を打ち込んで本装置を河床部に固定する。

(4) キャリブレーション結果

本掃流砂計の基本性能を確認すると共に、マスが転倒するのに要する砂の体積を検定するために、キャリブレーション実験を行う。ここでは、掃流砂計を水中に沈めて水平面上に置き、その掃流砂計直上より豊浦標準砂を一定の割合で投下し、砂の投下量とマスの転倒状況を比較する、という実験を実施する。なお、単位時間当たりの土砂投下量が一定となることを事前に確認している。図-5は、土砂投下開始からの経過時間に対するマスの累積転倒回数の変化を示している。この図を見ると、累積マス転倒回数は経過時間とともに直線的に増加している。これより、単位時間当たりにマスが転倒する回数は概ね一定となっていることが分かる。

このときの詳細なマスの転倒状況を表-1に示す。図-4 (b) に示されるように、転倒マスは二つのマスから構成されているので、ここでは便宜的にそれらをマス①、②と呼ぶ。この表より、転倒1回に要

表-1 キャリブレーション実験におけるマスの転倒状況（豊浦標準砂を使用）

	マス①	マス②
転倒 1 回に要する時間 T [s]	53.8	45.9
捕捉した砂の質量 W [g]	20.5	17.5
転倒速度 W/T [g/s]	0.381	0.381

する時間はマス①、②では、それぞれ約 54 秒、46 秒と同一とはなっていない。また、その時に捕捉された砂の質量は、マス①では 20.5g であるのに対して、マス②では 17.5g となっている。しかしながら、計測上最も重要となるマスの転倒速度（＝1 回当たりマスに貯まる土砂体積（もしくは質量）／転倒時間間隔）に関しては、ほぼ完全に一致している。これより、一定の土砂量が投下される条件下では、本装置のマスは一定の時間間隔で転倒しており、本掃流砂計の基本性能が検証されたといえる。

なお、転倒に要する時間や砂の質量がマス毎に異なるのは、転倒マスの工作精度等に問題があり、今後の課題である。また、本装置を現地調査に用いる際には、設置時における掃流砂計の傾斜や河床底質によりマスの転倒速度は変化することが予想される。そこで、掃流砂量を求めるには、現地河川の状況を想定した検定試験をその都度行う必要がある。

3. 本掃流砂計の現地都市河川調査への適用

(1) 観測概要

本装置を用いて、現地都市河川における掃流砂観測を行う。観測サイトは、富栄養化湖沼として有名な千葉県手賀沼へ流入する主要都市河川である大堀川の上流部（駒木橋）とし、その場所は図-6に示すとおりである。観測期間は2004年11月9日～22日であり、後述するように、この期間中3回の洪水イベントが生じた。本掃流砂計と同時に、自記式水位計（Diver, Eijkelkamp 社製）と超音波ドップラー流速分布計（ADCP 1200kHz, RD 社製）を設置し、掃流砂量と水理量（水深、流速、底面せん断力）を比較する。ここで ADCP データから底面せん断力 τ を算出する方法を述べる。佐藤ら¹¹⁾と同様に、主流方向流速の鉛直分布 $u(z)$ が対数則となることを確認し、近似直線（ $u(z) = A \ln z + B$, z : 底面からの高さ, A , B : 定数）を作成し、この結果とカルマン定数 κ （ $=0.40$ ）より摩擦速度 U_* （ $=A\kappa$ ）や τ （ $=\rho U_*^2$, ρ : 水の密度）を求める。なお、2回目と3回目の洪水イベントの間（11月16～17日）に、掃流砂計

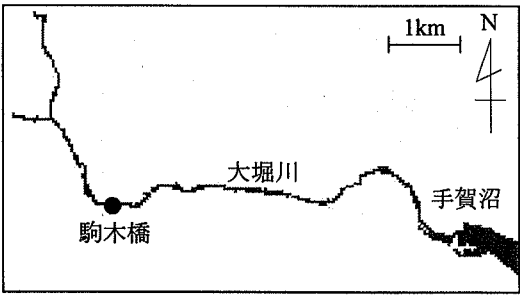


図-6 観測地点

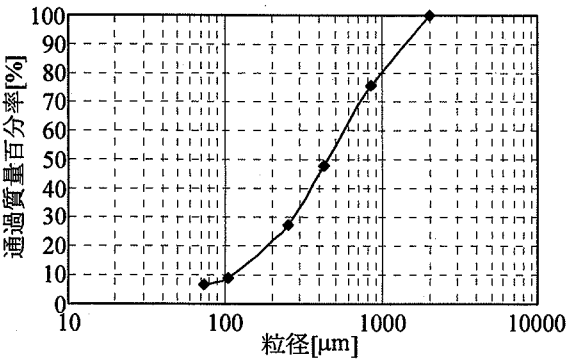


図-7 掃流砂の粒径分布

や他の測定器を撤収し、観測データをデータロガーより吸い出し、再度同じ場所に設置している。

堆砂箱に取り込まれた掃流砂の粒径分布を図-7に示す。これより、掃流砂の中央粒径 D_{50} は 450 μm 、均等係数は 5.1 である。また砂粒子の密度 ρ_s は 2.67 g/cm^3 である。ここで取得された土砂を用いて、2.4で記述した検定試験を行い、マスが転倒一回当たり捕捉する砂の体積を算出している。

(2) 観測期間中におけるマスの転倒状況

まず、観測期間中の洪水概況とマスの転倒状況を見るために、水深及びマスの累積転倒回数の時間変化を図-8に示す。前述したように、11月16日から17日の間では測定器を回収しているので、観測データはなく、また、掃流砂計が再設置された11月17日では、マスの累積転倒回数を0にリセットしている。これを見ると、この観測期間中では3回の洪水イベントが見られ、以下では、図中に示されているように、これらを洪水イベント①、②、③と呼ぶ。洪水イベント中の累積転倒回数は、その前後の平常時と比べて大きく増加している、ということが全ての洪水イベントに共通して生じている。これより、本装置は、出水に伴って掃流砂量がダイナミックに変化している様子を捉えていることが分かる。

同図を詳細に見ると、洪水イベント②では、水深が大きいかにも関わらず掃流砂計のマスは転倒しておらず、また、イベント②の後に掃流砂計を回収したときに転倒マスがマスから排出された砂に引っかか

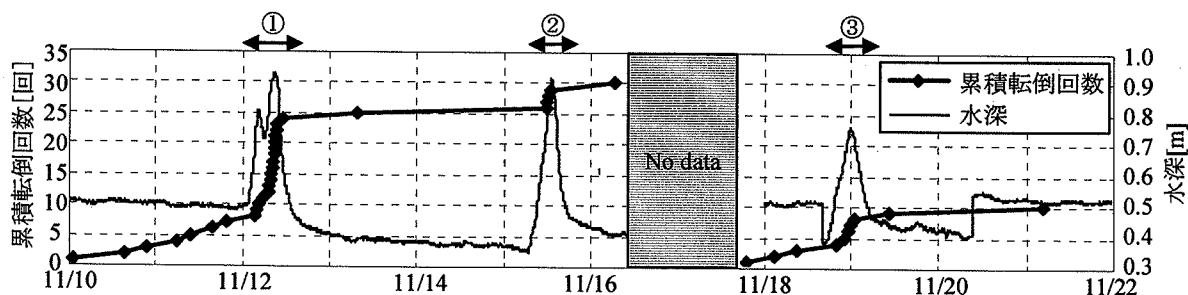


図-8 マスの累積転倒回数と水深の時間変化

っていることが確認された。これより、本装置における計測可能な総転倒回数は約 30 回、掃流砂量の総和は約 427g (約 160cm³) である。これらの結果と図-7 の粒径分布より、大堀川のような都市河川における本装置の計測範囲としては、現段階では、粒径は最大で 1~2mm であり、一つの小規模洪水イベント程度ならば連続計測は可能である。

(3) 洪水イベント中の掃流砂量の時間変化

洪水イベント中における掃流砂量の時間変動特性を見るために、洪水イベント①における水深、水深平均流速、単位幅掃流砂量 q_B の時間変化を図-9 に示す。ここでは、掃流砂量 q_B の算出に際しては、キャリブレーション結果から得られる転倒 1 回当たりマスに貯まる土砂体積及びデータロガーにより記録されたマスの転倒時間間隔からマスの転倒速度を求め、それを本装置の開口部幅 (10cm) で除している。これを見ると、この洪水イベント時では、2 度の水位ピークが見られており、その 2 つのピーク時では水深や平均流速に大きな違いが生じていない。それに対して、掃流砂量 q_B に関しては、1 度目よりも 2 度目の水位ピーク時の方が大きくなっている。底面せん断力 τ は水深や平均流速と概ね良好な相関性を持つことが確認されているので、同じ τ が作用しても掃流砂量が異なるものと推察される。より詳細に調べるために、同期間における無次元化された掃流力 τ^* と単位幅掃流砂量 q_{B^*} のヒステリシスを図-10 に示す。ここで τ^* と q_{B^*} は次のように表される。

$$\tau^* = \frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd} \quad (1)$$

$$q_{B^*} = \frac{q_B}{\sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd^3}} \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度であり、また、 d は土砂粒径であり、図-10 の結果には中央粒径 D_{50} を用いる。これより、同一掃流力では、増水期より減水期の掃流砂量の方が大きく、大堀川では掃流砂量が単に掃流力のみ関数とならない可能性が示唆された。

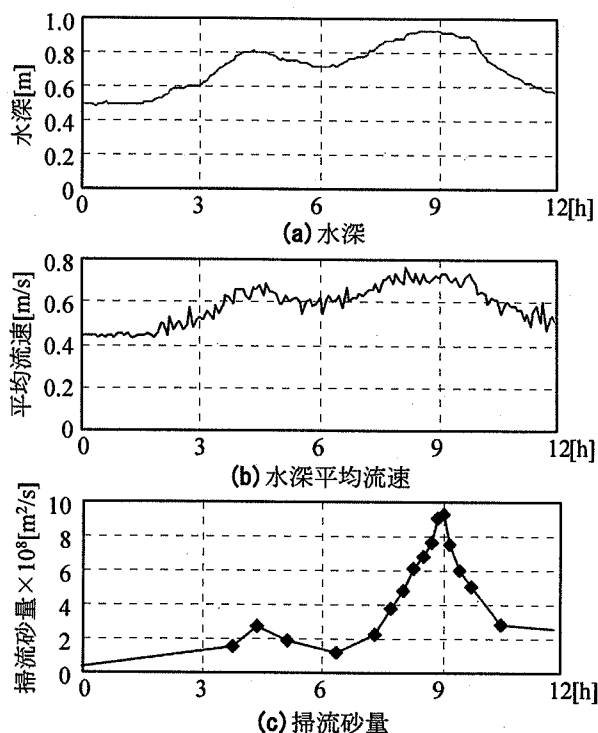


図-9 洪水イベント①における水理量と掃流砂量の時間変化 (2004 年 11 月 12 日)

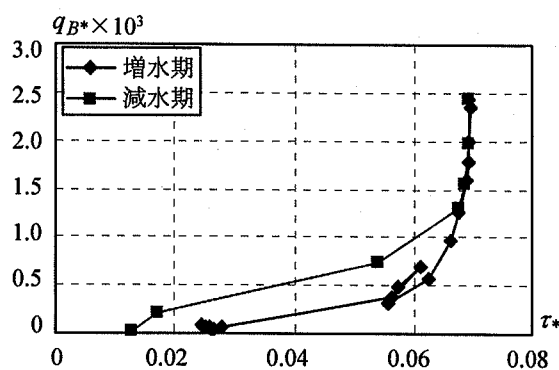


図-10 掃流砂量のヒステリシス

(4) 既存の掃流砂量式と観測結果の比較

既存の掃流砂量式と本観測結果を比較するために、掃流砂量 q_B と底面せん断力 τ の相関図を図-11 に示す。ここでの観測値は、洪水時と平常時の結果に分けて示されている。また、既存の掃流砂量式と

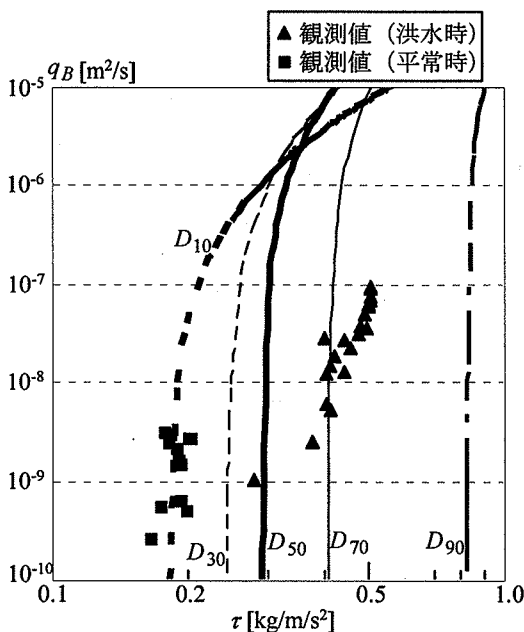


図-1 1 既存の掃流砂量式¹¹⁾と観測結果の比較
(線：既存の掃流砂量式の結果)

して、以下に示される芦田・道上式¹²⁾を用いる。

$$q_{B*} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (3)$$

ここで、 τ_{*c} は無次元限界掃流力であり、岩垣¹³⁾に基づいて与える。また、上式中の土砂粒径として、図-7から得られる5種類の粒径(D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{70} , D_{90})を代入して、掃流砂量式の結果を表示している。まず、観測値としては、平常時と洪水時では大きく異なる傾向が見られる。このような観測値と、通常、掃流砂量式に用いられる中央粒径 D_{50} の結果を比べると、平常時と洪水時の観測結果ともに良好な一致は見られない。しかしながら、幅広く粒径条件を変化させたとき、掃流砂量式の結果の範疇には観測値は含まれる。特に、平常時の観測結果は D_{10} を用いた場合、洪水時の観測値は D_{70} を用いた場合の掃流砂量式にそれぞれ近い結果となっている。元々、今回の調査で得られた掃流砂の均等係数が5.1と大きいことを考慮すると、都市河川の掃流砂輸送現象を考える際には、掃流砂量を粒径別に取り扱うことやそれと対応した調査方法の確立が必要であることが示唆された。

4. おわりに

極めて安価で製作が簡単な河床内トラップ型掃流砂計を試作し、キャリブレーション実験を通して本装置の計測精度を検証するとともに、大堀川における掃流砂調査を実施することに成功した。河床内ト

ラップ型であり転倒マスを利用する本装置は、河床変動や掃流砂量が小さい河川における掃流砂観測に適用可能であり、土砂粒径は最大1~2mm、一つの小規模出水程度ならば連続計測が可能であることが示された。今後、より詳細な検証実験・観測を実施し、本装置の計測精度をさらに検証する予定である。

謝辞：本研究における現地調査を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室酒井雄弘氏を始めとする学生諸氏に多大なる御助力を頂いた。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(研究代表者：二瓶泰雄)によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 藤田光一：流砂系管理に向けての学術・技術の展開の方向, 河川技術論文集, Vol.10, pp.13-18, 2004.
- 2) 澤井健二：流砂計測技術の現状と展望, 砂防学会誌, Vol.54, No.2, pp.75-84, 2001.
- 3) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.93-98, 2002.
- 4) 脇岡靖明, 古米弘明：自動採水・測定装置を用いた分流水下水道排水区における長期連続雨天時都市ノンポイント負荷流出調査, 水環境学会誌, Vol.26, No.4, pp.237-242, 2003.
- 5) 横山勝英, 諏訪義雄, 二村貴幸, 谷口丞, 末次忠司：濁沼川下流域における土砂・栄養塩動態の特性, 水工学論文集, Vol.46, pp.659-664, 2002.
- 6) 川西澄, 山本洋久, 余越正一郎：超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度, 粒径, フラックスの測定, 水工学論文集, Vol.42, pp.559-564, 1998.
- 7) 横山勝英, 藤田光一：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, Vol.45, pp.937-942, 2001.
- 8) Laronne, J. B. and Reid, I.: Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers, *Nature*, Vol.366, pp.148-150, 1993.
- 9) 二村貴幸, 山本浩一, 坂野章, 小川和彦, 日下部隆昭, 末次忠司：荷重計を用いた新しい掃流砂量観測手法の開発, 河川技術論文集, Vol.10, pp.291-296, 2004.
- 10) 水山高久, 野中理伸, 野中伸久：音響法(ハイドロフォン)による流砂量の連続計測, 砂防学会誌, Vol.49, No.4, pp.34-37, 1996.
- 11) 佐藤慶太, 二瓶泰雄, 木水啓, 飯田裕介：洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用～江戸川を例にして～, 水工学論文集, Vol.48, pp.763-768, 2004.
- 12) 芦田和男, 道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.206, pp.59-69, 1972.
- 13) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, No.41, pp.1-21, 1956.

(2005. 4. 7 受付)