特殊流れの測定 *

(流砂現象の計測)

Examples of Measurements in Solid-Liquid Phase Flow (Measurements in Sediment Laden Flows)

宮 本 邦 明 **
MIYAMOTO Kuniaki

1. はじめに

近年、火山噴火や地震、豪雨などにもなう火砕流や山腹崩壊、地すべり、土石流などによる土砂災害が頻発している。また、これらによって河道へ供給された土砂は、河川の流水により下流へと輸送されてゆく。この土砂の輸送量（流砂量）は流量や輸送される土砂の物理的性質（主に粒径）のみならず、勾配、川幅などの地形的な特性により変化する。流砂量の縦断的な非平衡は、河床の上昇（堆積）や低下（侵食）を生じる。また、時には河岸の侵食を生じ、河床のみならず河道そのものの形状変化が生じることがある。このような河床・河道の変動は洪水氾濫などの災害の原因となる。

このような災害を予測し防災対策に資するため、流砂のメカニズムに関する研究が精力的に行われてきた。流砂機構の理解のため、あるいは理論の検証のため、必要に応じ実験が行われ計測が行われてきた。また、その一方で、土砂動態の実態に関する現地観測が重要な課題となってきた。流砂の現地計測手法に関する研究がなされてきている。

本論では、まず、流砂現象と流砂メカニズムに

Fig.1 Classification of Sediment Transportation

ついて、土石流を中心に筆者らが行ってきた研究をもとに述べ、実験での評価項目とその計測手法について紹介する。次いで、流砂量の現地計測手法の現状について紹介する。

2. 流砂現象とそのメカニズム

2.1 流砂現象の分類

流砂現象は、一般にFig. 1のように分類されている。すなわち、流砂が流れの中に高濃度に含まれ流れの表面にまで存在し水と一体となって、ひとつの流体のように流れるような輸送形態を集合流動といい、粒子濃度が低く流砂の個々の粒子が流

* 2000.8.8 受付

** 筑波大学農林工学系 〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1 TEL,FAX(0298)53-7238

E-mail : kmiya@bres.tsukuba.ac.jp

れによって個別に運搬されているような輸送形態を各個運搬という。土砂を輸送している駆動力は、集合流動の場合は主に重力であり、各個運搬の場合は流れが持つ抗力、浮力などの流体力（掃流力）である。

集合流動形態の流れを一般に土石流と呼んでいるが、そのなかでも土砂が主に粗い石礫から構成される場合を狭義の土石流、主にシルトや粘土粒子など微細な土砂から構成される場合を泥流と呼ぶことがある。また各個運搬も、粒子が主に平均流としての流れの抗力により運搬され、河床近傍にのみ存在し滑動、転道、小跳躍しながら輸送される掃流と、流れの乱れにより流れに取り込まれて浮遊しながら運搬される浮遊に分類される。

この分類は典型的な現象に対するものであり、その中間的な形態や複数以上の現象が同時に生起していると考えられるような場合があることはいうまでもない。たとえば、土石流と掃流の中間的な流れとして集合流動の性質を持つ下層とほぼ液相のみからなる上層とから構成される2層流の流れの形態が存在し掃流状集合流動（土砂流）と呼ばれる。また、各個運搬においても浮遊砂が存在するような流れでは一般的には掃流砂も共に存在している。

2.2 流砂を含む流れのメカニズム

流砂を含む流れは固相としての土砂と液相としての水からなる固液混相流としてとらえることができる。著者らはこれまでこの観点から、土石流や泥流の流動機構を中心に、流砂を含む流れのメカニズムについて研究してきた。ここではその成果について概略を紹介する。

流砂の力学を考える際もっとも重要な点は、流砂と同じ材料が河床を構成しているということである。まさしくここに流砂の力学の重要な本質のひとつがあらわれている。すなわち、同じ材料が上層では運動しており下層では運動していない。しかも、両者の境界（停止堆積層の表面）はある勾配を有している。さらに、ある条件が満たされると（たとえば流量がある値以下に減少すると）運動していた粒子は停止し流砂が存在しなくなる。このような流れ場を移動床流れと呼んでいるが、著者らによると、これらは砂礫粒子と水とからなる固液混相流に特徴的な応力構造によるものであり[1], [2], [3]、せん断降伏応力の存在がこれらの現象を支配している。

移動床の河床は、固相に働く駆動力とせん断降伏応力が釣り合う条件を満たす位置であり、それより深いところ（下層）ではせん断降伏応力が駆動力を上回っていて固相粒子は相対的に運動を生じず、それより浅いところ（上層）では駆動力がせん断降伏応力を上回っており固相は流動を生じ流砂となる。筆者らの研究によると、砂礫粒子と水からなる固液混相流では、流れの応力は、各層とその境界で消費されるエネルギーが外力のなす仕事に等しいという関係から、各層の運動学的な考察をもとに以下のように定められる。粒子は流れの中で互いに衝突しながらも、平均的には接触を保ちながら流動している。従って応力は、(1)粒子相互の接触に起因する静的な応力（粒子表面）、(2)粒子相互の衝突に起因する粒子の非弾性的性質による応力（粒子内部）、および(3)粒子間隙を充填している流体の応力（液相内部）からなり、また、それぞれの空間が独立であることからそれらの和で表現される。さらに、それぞれの応力は、エネルギー損失力としてのせん断応力とエネルギー保存力としての圧力から構成される。粒子の接触に起因する静的なせん断応力（粒子間固体摩擦による）がせん断降伏応力に相当する。

このように、土石流、泥流を中心とする流砂を含む流れを理解するには、流れ場を決定している応力構造を明らかにすることが重要な鍵となっている。

3. 流砂を含む流れの計測

流砂を含む流れの計測は、主に流れ場について行われており、それも、流速分布、濃度分布がほとんどである。流砂の力学を理解するためには応力場と流れ場の同時計測がなされなければならないが、応力場の直接計測は若干試みられている程度である。

3.1 流速分布の計測

流砂を含む流れ場の計測は、掃流状集合流動（2層流）の上層の流れや浮遊砂を含む程度の濃度の流れ場ではレーザードップラーをはじめ通常用いられている種々の計測手法が使えるが、集合流動のように固相の濃度が高くなるとこれらの手法は使えなくなる。

集合流動あるいは集合流動層の流れ場の計測は、深さ方向の流速分布について主になされており、一部乱れ速度の計測もなされている。

速度場の測定は、一般に、流れに含まれる粒子の一部をトレーサーとして用い、流れの側面（水路側壁）から高速度ビデオなどを用いて撮影して粒子運動を追跡することにより行われている[4]。従って、得られた結果は壁面近傍の流れ場についてのアンサンブル平均化された流速分布ということになる。

泥流のように固相の粒径が小さい集合流動の場合は粒子をトレーサーとして用いることが難しい。そこで、応用ピトー管法などの手法が用いられる[5]。応用ピトー管法などの手法が粒径の大きい流れに適用が難しいのは計器への粒子衝突の影響が大きいためである。

集合流動の流速場の計測は現在のところ限られた項目、条件、範囲においてのみ可能で、流れ場の諸特性を自由に計測できるような計測技術がない状況にある。

Fig. 2、Fig. 3に粒子をトレーサーとした計測結果と応用ピトー管による計測結果の一例を示す。Fig. 2(a)、(b)にはそれぞれ移動床上、固定床上の土石流の特徴ある流速分布形が示されている。移動床では河床近傍に上に凸の領域が存在するが固定床では存在しない。Fig. 3からは流れの表面近くにプラグが形成されていて泥流のビンガム流動としての特性が現れているのが分かる。

近年、粒子流を対象として流れ場の非接触3次元計測を核磁気共鳴(NMR)を用いて行なう方法が提案されている[6]。この手法を用いることにより、速度ベクトル場や粒子濃度分布、乱れ速度分布の計測が可能となっている。

ただし、この手法は陽子に対して効率よく機能するため、流れの材料にも水を含む物質が用いられる必要がある。実際、粒子流の材料として様々なものが試みられ、その結果としてカラシの種子が選ばれている。また、NMRによる計測は大きな勾配を持った磁場を作用させて行うため計測空間を強力な磁石で覆う必要がある。そのため、現段階では大きな計測空間が確保できず、また、装置も大きく重くなるため、ほぼ水平の空間しか確保できない。さらに、磁界の制御と3次元的なデータ処理といった観点からもシステム全体が大規模なものとなり、大きな空間にわたる計測は現状では難しい。こういった点から、円筒を水平に設置し内部に粒状体を半分程度充填して円筒を回転させることにより流動を生じさせることが行われている。

(a) Velocity profile of the debris flow over the movable bed

(b) Velocity profile of the debris flow over the fixed bed

Fig.2 Velocity profiles measured by PIV

Fig.3 Velocity profile measured by Pitot tube

(a) Concentration distribution

(b) Velocity distribution parallel to the free surface

Fig.4 NMR Images

る。最近では振動などによる粒度偏析などの動的な実験も計画実施されている。いずれにしても、現在の段階ではNMRを用いて流砂を含む開水路流れの流れ場の計測を行うことは難しいが、近い将来には、もっとも有望な計測手法のひとつになると考えられる。

Fig. 4には実験から得られたNMRイメージの一例が示されている[7]。ここでは、濃度分布および速度の自由表面に平行な方向成分の分布が示されているが速度ベクトルの大きさや各速度、乱れ速度などについても同様の解析がなされている。自由表面近くの流動層で粒子濃度が減少していること、その領域が回転速度の増大とともに深さ方向に拡大していることが両者の比較から容易に理解される。

Fig. 5には回転円筒内の中央断面における流速分布の例が示されている[6]。(a)には回転円筒内の粒子運動の模式図が、(b)には(a)のA-B断面に沿う流速分布が示されている。 f は流れの表面を、 F は流動層厚($f-r'$)を、 r は回転円筒の内壁を表している。また、流動層 F は、歪み速度分布により大きく2つの部分、 $f-f'$ および $f'-r'$ に分けられる。 $r-r'$ は剛体回転の部分を示しており、この部分は流動していない。

Fig.5 Schematic view of granular flow and velocity profile measured by NMR

Fig.6 Schematics of sediment trap

3.2 濃度分布の計測

前節でも紹介したようにNMRを用いて濃度分布を知る方法が提案されているが、流砂を含むような固液混相の開水路流れに適用するにはまだ実用的な段階にない。一方、浮遊砂流程度であれば、そのほかに非接触で計測する方法が種々考案されている。

集合流動の場合は、現在のところ直接的に採取して計測するのが一般的である。また、直接採取法としてはサイフォンが一般的であるが、これは浮遊砂流のように比較的固相の粒径が小さく濃度が低い場合について有効な方法である。

粒径が大きくなると相対的に採取口が小さくなり、採取された固相の体積に誤差が生じる。その場合、誤差を小さくするため、Fig. 6に示すように最下流端や河床にトラップを設けそのトラップ上端の高さを変えて流砂を採取することにより濃度分布を求める方法が用いられる。

泥流のように粒径が小さく濃度が高い場合は採取管内の摩擦損失が大きいため採取流速に合わせて吸引する方法をとる。粒径が大きい場合、水路側壁から高速度ビデオなどで撮影された映像から個数濃度を求め、濃度を推察する方法なども行われている。

流砂量や輸送濃度（流砂量を流砂を含む流量で除したもの）の計測は原始的ではあるが下流端で水と流砂をともに採取して行っている。

3.3 応力の計測

流れ場の計測を行うとともに応力構造の直接計測が可能であれば流れの構成則を直接確認できる。このような観点から応力構造に関する計測が若干試みられている。

固液混相流の応力構造に関する計測はBagnold[8]が行った中立浮遊粒子のクェット流での圧力とせん断力に関する独創的な実験が初めてであろうと思われる。その後、応力構造に関する実験はほとんど行われておらず、最近になって間隙水圧に着目した実験が行われている程度である[9],[10]。

クェット流に関する実験では、Fig. 7に示すような外筒回転式の共軸2重円筒装置により両円筒の間にクェット流を生じさせる。内筒に張り付けたダイヤフラムにより圧力を、内筒を支えているトルクスプリングにかかるトルクモーメントからせん断応力を求める。この実験から、粒子相互の衝突に起因する応力と間隙流体のせん断に伴う応力が評価される[3]。

最近行われた間隙水圧に関する実験では、固相に中立浮遊粒子ではなく流砂を含む流れのように、液相に比べ大きな質量密度を持つ粒子が用いられている。開水路流れにおける液相の間隙水圧測定は固相の支持機構や液相の乱れの構造を理解する上で基礎的な資料となる。実際、粒子相互の衝突に起因するせん断応力と間隙水が受け持つせん断応力が実験的に分離できない現状では重要である。計測はピトー管を用いて静圧、動圧の水深方向の分布について行われており、その平均値、乱れ強度、スペクトルなどが調べられている。開水路流

Fig.7 Schematics of coaxial double cylindrical shear tester

Fig.8 A portable sediment trap

れにおける実験結果と回転円筒における実験結果を比較すると、開水路流れでは粒子によるせん断に伴う圧力上昇は認められないが[9]、回転円筒内の開水路流れではせん断に伴い発生すると想定されるせん断応力と同じオーダーの圧力勾配が生じており[10]、両者の間で傾向が異なっている。

このように、構成則に対応した粒子間および間隙流体に受け持たれる圧力とせん断応力の各成分の直接的な計測は現在のところ成功しておらず、その計測法の開発が望まれるところである。

4. 現地計測手法

現地計測についてはおもに流砂量の把握を目的に研究が進められている。従来より現地において

も掃流砂や浮遊砂などの流砂を直接採取するための装置が考案され計測が行われているが、たとえば、Fig. 8[11]にその一例として示す掃流砂採取装置のように可搬型のものが多く、ごく限られた幅のしかもごく短時間の流砂しか計測できない。さらに洪水時の計測は危険が伴う。したがってこれらの手法では河川のある地点での流砂量を継続的に把握することは難しい。

そのため現地に設置して連続計測する流砂量計測手法の開発が続けられている。計測の対象は、主に時空間的な流砂の非平衡性が強い急勾配河川である。以下、その事例を紹介する。

4.1 流砂採取による計測法

流砂を採取して計測する背景には流砂量と水理量との関係についての実態の把握のみならず、流砂の材料特性、たとえば粒度分布や岩種、密度などを把握する目的がある。これは、理論的考察や実験室における計測結果と実態との間の相違や現地への適用性を明らかにしたいという欲求からきている。

Fig. 9は試験的に現地に施工された流砂を採取して計測する方法の一例である[12]。この計測装置は砂防ダムの落差を利用して計測するように設計されている。砂防ダム天端を越流してきた流砂はスクリーン(1)で流水と分離されバケット(2)に導かれる。バケットはロードセルで常に重量を計測しており、導かれてきた流砂がバケットに蓄えられその結果重量がある値に達するとバケット底面のフラップ(3)が開いてそれを排出する。これを繰り返して、フラップ開閉の時刻とバケット重量の変化を記録することにより刻々と変化する流砂量を求める。

この方法では採取された流砂の一部を保存して後に粒度分布などを測定することはできないが流砂を連続計測することができることや、2基以上設置することにより流砂の横断方向の分布などより精度の高い計測が可能となるなどのメリットがある。流域が小さく河道幅も小さい地点では、洪水水中の粒度分布の変化に関する測定もできるようにサンプリング装置をつけたものもある[13]。

4.2 音響パイプを用いた計測法

流砂が河床近傍のみを運動しているとき、すなわち典型的な掃流砂の場合、流砂運動は個々の粒子の独立した運動としてとらえられる。そこで、河床変動しない固定床に、流れに垂直かつ水平に

パイプを設置すると、流砂はパイプに対してある統計量に従って衝突するものと考えられる。このような考察から円筒パイプの中にマイクロフォンを埋め込み流砂の衝突音を解析することにより流砂量を求めようとする方法が研究されている。

パイプ内部の衝突音の音響特性と粒子の衝突時の種々の物理量との間の関係を調べると、パイプの3つのモードのうち円周モードの振幅と、粒子の持つパイプ表面に垂直方向の運動量との相関が良いことが得られている[12][14]。

しかしながら流砂のパイプとの衝突位置や衝突角度、衝突速度などは一定ではなくある分布をもっており、さらに粒径も多様である。そのためパイプの衝突音の音響特性を支配している衝突時のパイプ表面に垂直方向の運動量と、個々の粒子の大きさとの間に一対一対応がない。したがって何らかの統計量を導入して解析を行う必要がある。現在、2つの考え方に従って解析手法が研究されている[12]。

ひとつはパイプセンサーを縦断方向に2本以上設置し信号音の相互相関をとり信号レベル毎の相関

Fig.9 Sampling and measurement system of sediment discharge

係数、位相差などをもとに流砂量を推察しようとするものである。この考え方は土石流の流量計測にも応用されている[15]。

もう一つは衝突時の運動量と相関が高い円周方向のモードをバンドパスフィルターを用いて取り出し、流砂運動の統計量を利用してその振幅の統計量から粒径別流砂量を推定しようとするものである。この考え方による解析法の基本は以下のようである。まず、同一の水理条件の下では流砂運動の統計が粒径毎に異なる点に着目して、粒径別に、運動量の、粒子の中心とパイプの中心を結ぶ方向成分の統計量を求める。これはパイプに砂礫粒子が衝突する際の衝突位置、衝突角、衝突速度の分布を求めることによって得ることができる。そして運動量と衝突音の円周方向モードの振幅との関係を利用して、パイプセンサー設置箇所における粒径毎の砂礫粒子の通過個数と、振幅レベル毎の衝突音響パルス数との間に次のような関係が成り立つものとして解析を行う。すなわち、 $\vec{S}$ 、 $\vec{N}$ をそれぞれ振幅レベル毎のパルス数ベクトルと粒径別の通過個数ベクトル、 $A(u^*)$ を両ベクトル間の変換行列とすると、次式で表される関係が期待される[12]。

$$\vec{S} = A(u^*)\vec{N} \quad (1)$$

ここに、 u^* は摩擦速度である。この変換行列には逆が存在する事が期待される。このとき各シグナルレベル毎のパルス数から粒径別の通過個数、すなわち粒径別流砂量を次式で得ることができる。

$$\vec{N} = A^{-1}(u^*)\vec{S} \quad (2)$$

なお、変換行列 A に逆が存在するためにはパルス数ベクトルと粒径別通過個数ベクトルの次元は一致している必要がある。また、変換行列 A は流れの強さに依存するから、この方法に従う場合は変換行列が流れのパラメーター（たとえば式(1),(2)であれば u^* ）の関数としてあたえられている必要があり、また、同時に水理量を計測しておく必要がある。この変換行列の推定については流砂運動に関する数値計算を行って定めることができるが、実験的にも検討されている[16]。

この手法を用いるときのパイプセンサーの長さには衝突パルスの減衰と単位時間あたりの衝突回数

によりきまる。ただし、円周方向のモードの信号の減衰率はかなり大きいのでパイプの長さは2回の粒子がほぼ同時に衝突することがない程度の長さにも長くすることができる。また、パイプは固定床上に固定するため、たとえば、砂防ダムの天端などを利用してパイプの半分程度を埋め込むように設置する。このとき、防震ゴムなどを用いてパイプに堤体からの音響信号（雑音）が入ってこないように遮音する必要がある。

音響パイプを用いた手法はセンサーの設置法を種々検討すれば広い適用範囲を持つことが期待されかつシステムの設置が容易であることから現時点で最も現実的な現地計測手法のひとつであると考えられる[17]。

4.3 超音波を用いた計測法

音は水中を伝播するときの減衰率が小さく信号媒体としてすぐれている。そこで、超音波を用いて流砂の映像、あるいは大きさと位置、移動速度を求めて流砂量を求める方法が検討されつつある[18]。

超音波を用いる方法を前節の方法と比較すると、衝突音をもとに解析する方法はパッシブな方法、超音波を用いる方法はアクティブな方法といえることができる。

超音波は単一あるいはアレイを組んで発振し、受信子は発振子と同じ位置（反射波を利用）あるいは反対側において（透過波を利用）計測する。特に超音波アレイ発振子を河床に設置して上方に向かって超音波を発振し流砂による反射波を利用する方法は、瞬間瞬間の流砂の断面映像が得られることから、2つ以上アレイを並べることにより流砂個々の大きさ、位置、流速などの解析が可能となる。現在までに基本的な原理の確認と流砂量解析の可能性、信号処理の基礎的なアルゴリズムの開発が行われている[18]。しかしまだ実験室における流砂量計測に適用されるほどには至っておらず、さらに現地に適用する場合、超音波発振子の流砂による破壊や太陽光による構造的な疲労など耐久面での問題も考えられ実用化にはかなりの時間を要しそうである。

4.4 画像解析による土石流の表面流速の測定

流速の現地計測はレーダードップラーをはじめ様々な方法で行われているが、土石流のような集合流動の場合流れの表面まで砂礫粒子が存在するため、流れの表面での粒子のラグランジュ的な追

Fig.10 Temporal change of surface velocity of a debris flow by the spatial filtering method

跡が可能である。したがって土石流の表面を動画として撮影することによりPIVや、より簡単にパラレル・スリット・レティクル上のイメージを空間フィルタを用いて処理することにより表面流速ベクトルを得ることができる。特にパラレル・スリット・レティクルを用いると、データが1次元のため解析システムが簡単で済み現地計測に向いている。Fig. 10は、現地でパラレル・スリット・レティクルを用いて得られた土石流イメージを空間フィルタ法を用いて解析し、流速の時間変化として示した例である[19]。

5. おわりに

流砂を含む流れの計測法について、実験室レベルでの集合流動に関する計測を中心に紹介し、現地における計測手法として流砂量計測を中心に紹介してきた。

実験室レベルでは集合流動の計測が流砂を含む流れのメカニズムを理解するためにも重要であると考えられるが、現在のところ流れ内部の各相の運動特性を計測することが難しく、また各相の応力構造を直接的に計測する技術がない。そのため、流れの本質について実験的に確認することができない。これは流れの理解の仕方が研究者によってまちまちな状況をゆるしており、その結果、研究者間の研究成果相互の比較や議論さえ難しい状況にある。

現在一般に用いられている計測技術そのものはプリミティブなものであり、流れの本質的な理解を得るためにも今後の計測技術の飛躍的な向上が望まれる。そのためには、たとえばNMRのような

種々の計測技術にかかわっている研究者との共同研究が必要であろう。

流砂を含む流れの現地観測については流砂量の計測が重要なテーマとなっている。直接的に流砂を採取して計測する方法も試みられているが装置が大がかりなものになる欠点がある。それに対して音響パイプや超音波発振子を用いて流砂運動を他の信号媒体による信号に変換し、それを解析することにより間接的に流砂量を得る方法が検討されている。これは設置が容易であるというメリットがあるが信号処理法によりその精度が左右される。精度の高い信号処理法の開発が要求される。

将来的には間接的な手法が主流を占めると思われるが、しばらくは直接的な計測と併用されるであろう。

現地観測を目的とした計測においても、実験室レベルでの計測とはその目的手法とも異なっているものの、同様に計測技術の飛躍的な向上が望まれている。

参考文献

- [1] 宮本邦明, 土石流流動のメカニズム(1), 砂防学会誌, Vol.45, No.4, 40-45 (1992)
- [2] 宮本邦明, 土石流流動のメカニズム(2), 砂防学会誌, Vol.45, No.5, 22-27 (1992)
- [3] 宮本邦明, 土石流流動のメカニズム(3), 砂防学会誌, Vol.45, No.6, 42-49 (1993)
- [4] たとえば、伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明・竹内宏隆, 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, Vol.43, 635-640 (1999)

- [5] たとえば、芦田和男・山野邦明・神田昌幸, 高濃度流れに関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, No.29B-2, 361-376 (1986)
- [6] Nakagawa, M., Altobelli, S. A., Caprihan, A. C., Fukushima, E., and Jeong, E.-K., Non-invasive Measurements of Granular Flows by Magnetic Resonance Imaging, Exp. In Fluid 16, 54-60 (1993)
- [7] <http://www.nmr.org/expfl16-93-2.htm>
- [8] Bagnold, R. A., Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear, Proc. Roy. Soc. A225, 49-63 (1954)
- [9] 石川芳治・石塚忠範・前田昭浩・高濱淳一郎, 計量骨材を用いた掃流状集合流動の水路実験, 平成6年度砂防学会研究発表会発表概要集, 179-182 (1994)
- [10] 堀田紀文・宮本邦明・鈴木雅一・太田猛彦, 回転円筒水路を用いた高濃度固液混相流における間隙水圧分布の測定, 砂防学会誌, Vol.50, No.6, 11-16 (1998)
- [11] Guy, H. P. and Norman, V. W., Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment, Techniques of Water-resources Investigation of United States Geological Survey, Book 3, Applications of Hydraulics (1970)
- [12] 栗原淳一・宮本邦明, 音響を利用した流砂量計測装置について, 新砂防, Vol.44, No.5(178), 26-31 (1992)
- [13] Miyamoto, K., Kurihara, J., Sawada, T., and Itakura, Y., Study on Field Measuring Methods of Sediment Discharge, Erosion and Sediment Transport Monitoring Programs in River Basins, IAHS Publication No.210, 107-114 (1992)
- [14] Taniguchi, S., Itakura, Y., Miyamoto, K., and Kurihara, J., A New Acoustic Sensor for Sediment Discharge Measurement, Erosion and Sediment Transport Monitoring Program in River Basins, IAHR Publication No.210, 135-142 (1992)
- [15] Itakura, Y., Kamei, N., Takahama, J., and Nowa, Y., Real Time Estimation of Discharge of Debris Flow by an Acoustic Sensor, XIV IMEKO World Congress Vol.XA, 127-131 (1997)
- [16] 澤井健二, 衝突音による粒径別流砂量測定法, 平成8年度砂防学会研究発表会講演概要集, 261-262 (1998)
- [17] 水山高久・富田陽子・野中理伸・藤田正治, ハイドロフォンによる流砂量の観測 (続報), 砂防学会誌, Vol.50, No.6, 44-47 (1998)
- [18] 小倉久直・中山純一・澤井健二・鈴木宏・宮本邦明, 超音波による流砂の映像化と流砂量計測について, 自然災害科学, 7-2, 73-78 (1988)
- [19] 板倉安正・竹内雅浩・笠原正雄・小倉久直, 空間フィルタ速度計測法の不規則動画像シミュレーションと土石流表面速度測定への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.10, 1092-1098 (1991)