

# 洪水と土砂の観測モニタリング

## Observations and Monitoring of Flood and Sediment Discharges

青木政一<sup>1</sup>・藤田一郎<sup>2</sup>・澤田豊明<sup>3</sup>

Masakazu AOKI, Ichiro FUJITA and Toyoaki SAWADA

<sup>1</sup>正会員 株式会社水環境技術部長 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町10-6 FTビル2階)

<sup>2</sup>正会員 神戸大学工学部建設学科教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>3</sup>正会員 京都大学防災研究所附属災害観測実験センター穂高砂防観測所助教授 (〒506-1422 岐阜県吉城郡上宝村中尾)

Accurate estimations of flood discharge and sediment transportation are of significant importance in the management of river basin as a whole system. In the case of flood discharge measurements, rod floats has long been used since the Meiji era accepting its not enough accuracy. Recently, however, non-intrusive velocity measurement methods that utilize the Doppler effect by microwave or image analysis have come to be available. In this general description, several problems associated with the float method and stage-discharge relationships are firstly pointed out and field measurement results using floats and non-intrusive techniques are compared. Secondly the observation techniques of the sediment transport in mountainous areas are examined. Relation between flow rate and sediment discharge was shown at some time scales. In a stream with the step-pool, the sediment transportation depends on sediment storage in the channel.

*key words: Hydrometry, velocity measurements, float velocity adjustment factor  $F$ , non-intrusive method, sediment yield, sedimentation, sediment transport, sediment storage*

### 1. はじめに

今回の本シンポジウムの特定課題「ア. 洪水と土砂の観測モニタリング及び予測」をテーマにしたのは、治水、防災対策において、水位・流量、土砂観測がもっとも重要な基礎的なデータであり、河川整備計画(数値解析の検証用)として、また防災予報としてなくてはならないデータである。このようなことから、水位・流量、土砂観測がどのように行われ、データにどのような課題を有しているか、またデータを用いる際にどのような配慮が必要であるか。さらに現在どのような新手法が考案されているか示し、その改善点等に関して議論する。

### 2. 水文観測とモニタリングの現状

#### (1) 高水における一般的な流量観測

一般における水位観測所は常に自記水位計によって連続的に水位が計測されている。それに対し流量観測については連続観測が不可能なため、断面積と流速を計測し両者の積として流量を求めている。流速の計測は低水時の可搬式流速計による方法と、高水においては河川に

入ることが危険であることから浮子を投下して浮子の流速を計測する方法に大別される。

ここでの治水、防災対策に重要となるデータとは河川断面を満杯に流れる時の水位と浮子による流速観測によって求める流量である。

このような高水における流量観測は「水文観測」建設省水文研究会<sup>1)</sup>によると内務省がすでに明治24年(1891)に瀬田川で浮子による手法で行われたとある。すなわち浮子による高水時の観測は明治24年以来から行われていることになり、いかに旧態依然の技術に依存しているかが分かる。

図-1は一般的な水位・流量観測所の標準的な施設配置図である。水位流量観測所は基準断面を中心に自記水位計(図中■)が設けられ、浮子投下橋と浮子が安定した流れを呈するようになるまでの助走区間が設けられ、浮子の流速計測を行う第1見通しと第2見通し間が設けられている。また、基準断面、第1・2見通しには流量観測時に水位を計測するものとしての量水標(図中●)を設けておく必要があるものとされている。

このように水位・流量観測所は出来るだけ河床形状の変化のない区間において、低水流観から高水流観までの

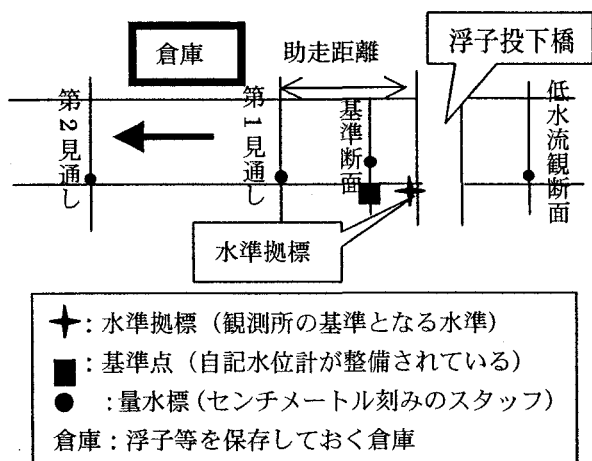


図-1 一般的な水位・流量観測所（施設見取図）

各断面の水位が正確に計測できる施設が整備されておく必要がある。

特に重要なのは観測所の水位については単に相対的な水位値だけではなく、水理計算や上下流からの水面勾配を求めることから、絶対値としての標高が必ず必要となってくる点である。そのために基準断面付近に水準拠標を設け常に国家座標（例えば2等水準）との整合を図っておく必要がある。

流量観測については特に高水時のように緊急を要し、さらに危険を伴うため、安全施設や浮子等の予備品が十分に保存出来る様な倉庫を設けて万全をきしておく必要がある。

## (2) 水位・流量観測所の課題

### a) 自記水位計と量水標の水位誤差

流量観測時の水位は量水標の水位を読み取り、この水位と流量の関係から水位流量曲線を作成するもので、この水位流量曲線によって連続して観測の出来る自記水位計の水位から流量を換算するものである。このため、自記水位計と量水標の水位に差が生じていた場合、流量に誤差が生じてくる結果となる。

図-2は自記水位計と量水標の水位差が生じている例を示したものであるが、自記水位計は水位の上昇に伴いセンサーの反応が鈍くなり誤差となる可能性がある。その結果、量水標を縦軸に水位計測値と観測流量を横軸にとり作成された水流量曲線をもとに自記水位計値から流量を換算すると、図-2に示すように観測流量が9,769.8  $\text{m}^3/\text{s}$ に対して水位流量曲線（HQ）から求めた流量は8,826.5  $\text{m}^3/\text{s}$ と約1,000  $\text{m}^3/\text{s}$ の差が生じてくる。この差は約1割に値するものであり、おおむね自記水位計の水位の方が小さく生じ、HQ換算流量の方が小さく

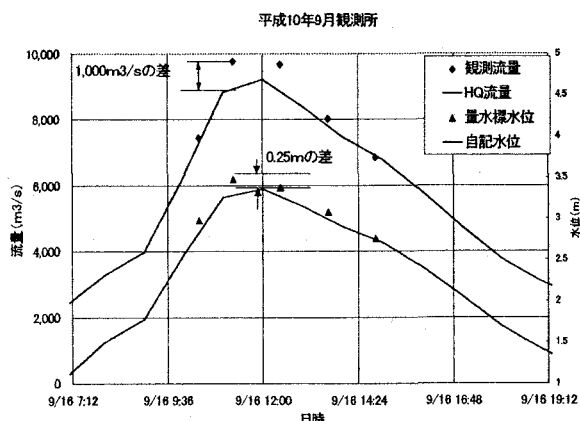


図-2 高水時の水位・流量ハイドログラフ

く出ることが多い。このようなことは自記水位計のもつ特性としてまれに生ずることであり注意が必要である。

### b) 高水時の水位・流量関係

このように、水位流量曲線は常に連続的に観測できる水位から流量を換算するものとして非常に重要なものである。一般にこの水位流量曲線を作成する際は1年間（前年の10月～翌年の3月までの18ヶ月間）の水位と流量の観測値の回帰式によっている。しかし、米田<sup>2)</sup>が示すように水理学的には水面勾配のピーク、流速のピーク、流量のピーク、水位のピークの順に生起する。

図-3は流速、流量、水位の順にピークが生起している現象を抑えた時のハイドログラフである。すなわち同じ水位でも上昇時の流量の方が下降時の流量よりも大きいことになる。このことを水位流量曲線で表現すると図-4の例のように反時計回りにループする現象となり、例えば水位3mにおいて上昇時では1060  $\text{m}^3/\text{s}$ で下降時では885  $\text{m}^3/\text{s}$ と約175  $\text{m}^3/\text{s}$ 異なることが分かる。このとき一般に行われている水位流量曲線（HQ曲線）で流量を算出すると上昇時、下降時ともに996  $\text{m}^3/\text{s}$ となりそれぞれ100  $\text{m}^3/\text{s}$ の相違となる。観測所によって異なるが、水位流量曲線によって換算された高水流量には1割程度の差があり得ることを配慮しておく必要がある。

### c) 更正係数

今まで述べてきたのは断面積と流速の積によって流量換算された後に生ずる課題である。ここでは断面積と流速の積によって流量に換算される段階での流速の課題について示す。高水時において浮子による流速計測を行った場合、浮子流速は必ずしも鉛直方向の平均流速とは一致しない。例えば、水深10mの場合では吃水が最大4mの浮子を使用するのが通例であるが、浮子の流速は鉛直方向の平均流速とはならない。このようなことから、日本では更正係数で浮子流速を補正して、鉛直方向の流速を求めている。

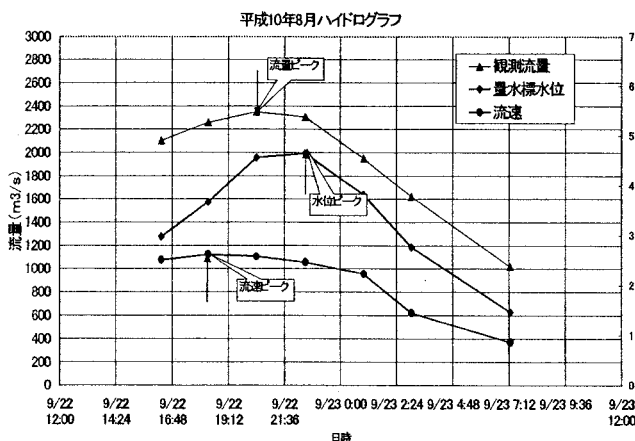


図-3 流速、流量、水位ハイドログラフ

「水文観測」建設省水文研究会<sup>1)</sup>によると表-1のように吃水の長さ別に更正係数を決めており、概ね表-1の更正係数によって鉛直平均流速が求められている。これに対し、WMO<sup>3)</sup> (World Meteorological Organization) や ISO standards<sup>4)</sup> によると表-2に示す通り水深と吃水の割合で係数を設定しており日本とは異なった係数を用いている。例えば、表-3は4m吃水の浮子で計測した大河川の高水の流量を示したものであるが、補正前(a)と吃水の長さで設定した更正係数(表-1)で補正したもの(b)と、水深と吃水の割合で設定した更正係数(表2)で補正したもの(d)とでは値が大きく異なり、1割程度の差が生じていることが分かる。この差は流量が大きいほど大きくなる。この他にも、更正係数を算出する方法は幾つかあり、例えば安芸式、FRANCIS式や物部式といった式がある。

#### d) その他の課題

- ・基準断面と高水流観位置が離れており流量が異なる
- ・測線数の不足(浮子投下本数)によって適正な流速分布が計測されていない
- ・一高水期間中の流観回数の不足によって適正な水位流量曲線が表現されていない
- ・高水敷上に植物等が障害物となって浮子が適正に流下しない。

等といった課題があり、流量算出には様々な課題が山積している。ユーザーの立場にある技術者にもこのような課題を認識しておく必要があると考える。

表-1 浮子の更正係数<sup>1)</sup>

| 水深<br>(m) | 0.7<br>以上 | 0.7~<br>1.3 | 1.3~<br>2.6 | 2.6~<br>5.2 | 5.2<br>以上 |
|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 吃水(m)     | 表面浮子      | 1.5         | 1.0         | 2.0         | 4.0       |
| 更正係数      | 0.85      | 0.88        | 0.91        | 0.94        | 0.96      |

表-2 Reduction factor (k) for surface floats and rod floats<sup>4)</sup>

(表面浮子と浮子の更正係数)

| Surface floats           |       | Rod floats |       |
|--------------------------|-------|------------|-------|
| n (m <sup>-1/3</sup> /s) | k (-) | y/d        | k (-) |
| 0.029~0.037              | 0.78  | 0.10       | 0.86  |
| 0.021~0.028              | 0.84  | 0.25       | 0.88  |
| 0.017~0.022              | 0.87  | 0.50       | 0.90  |
| 0.014~0.019              | 0.89  | 0.75       | 0.94  |
| 0.012~0.016              | 0.90  | 0.95       | 0.98  |

n: function of the channel roughness、y: immersed depth of float、d: depth of water

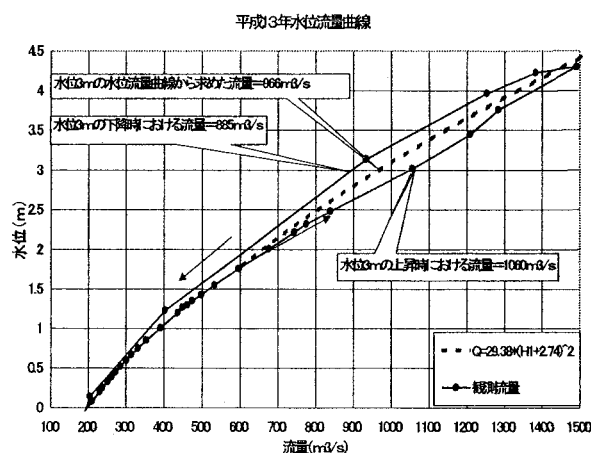


図-4 高水時の水位流量曲線

表-3 更正係数によって補正された流量(単位m³/s)

|        | 表-1の<br>更正係数 | 流観-<br>表-1 | 表-2,3の<br>更正係数 | 流量・表<br>2,3 |
|--------|--------------|------------|----------------|-------------|
| a      | b=a*0.96     | c=a-b      | d=a*0.9        | e=a-d       |
| 12,194 | 11,706       | 488        | 10,975         | 1,219       |
| 11,103 | 10,660       | 445        | 9,995          | 1,111       |
| 9,746  | 9,356        | 390        | 8,771          | 975         |
| 8,373  | 8,040        | 335        | 7,538          | 838         |

### 3. 非接触型流速計測法に関する共同研究

#### (1) 研究の背景

上述の議論からも明らかのように、浮子を用いた流量計測法には種々の問題点が含まれている。そこで、注目されたのが非接触型の流速計測法であり、平成11年から平成13年にかけて独立行政法人土木研究所、財団法人土木研究センターおよびメーカー(アジア航測、小糸工業、拓和、東京建設コンサルタント、横河電子機器)に

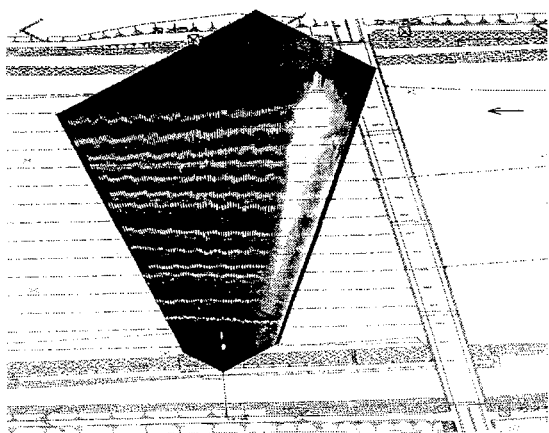


図-6 浮子の軌跡（魚野川）

による共同研究が実施された<sup>7)</sup>。この共同研究では、実河川洪水（魚野川および布川）の計測や風洞水槽による実験が共同で行われ、数々の貴重な知見が得られた。

## (2) 浮子観測の問題点

浮子観測に関連する問題は2.でも述べたが、観測実施上の観点から整理すると以下のような問題点がある。

- (a) 観測には常に3～5名の人手が必要だが、浮子観測を専門とする業者が少なくなっている点
- (b) 急な出水の場合には、観測が間に合わずピーク流量を欠測する場合がある点
- (c) 連続的な流量観測の実施が実際上困難な点
- (d) 浮子が必ずしも測線上を移動しない点
- (e) 出水規模が大きい場合、観測そのものの遂行が危険でピーク流量を欠測する場合がある点

このうち、(d)の問題点を如実に示しているのが図-6に示す浮子の軌跡である。この図は夜間の洪水流観時に左岸側から撮影された発光浮子の軌跡を合成し、幾何補正したものである。この図から明らかなように、浮子の軌跡は特に河岸近くで河道中央に偏移する傾向を示している。これは河岸近くで強まる内部二次流の影響と思われるが、見通し断面を通過中に浮子は水深や流速が小さな河岸近くから、水深も流速も大きくなる中央寄りへと移流されることになる。従って、測線を通過すると仮定して算出した流量は若干過大評価される可能性がある。なお、軌跡が左右に大きく変動しているように見えるのは、浮子の上下の揺動が幾何補正時に強調されたためである。

## (3) 非接触型計測装置の特徴

非接触型の流速計測装置には、ドップラー効果を利用する装置と画像解析を利用する装置がある。前者には電波流速計や超音波流速計、後者にはPIVやオプティカルフローを利用する方法がある。これらの方法すべてに

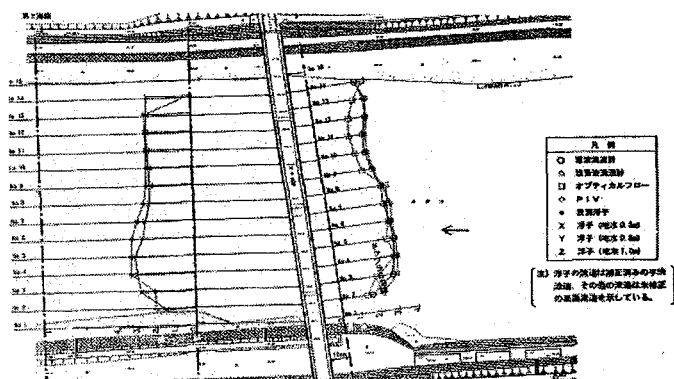


図-7 魚野川における流速分布計測（平成13年4月）

共通する唯一の特徴は、どの方法も水表面の流速を計測しているという点である。従って、平均流速を算出するための更正係数は浮子の場合とは異なってくる。仮に、鉛直流速分布が1/7乗則に従っているとすると、平均流速は表面流速の0.875倍となる。共同研究では水圧式水深流速計によって魚野川洪水時の鉛直流速分布が計測され、更正係数は0.8～0.9の範囲にあり、平均値は0.85という結果が得られている。ただし、表面流速は風の影響を受ける可能性があるため、風洞実験による詳細な検討が行われた。

## (4) 風の影響の除去法<sup>6,7)</sup>

非接触型流速計で表面流速の計測を可能としているのは水表面に発生している波の存在である。この波は何らかの乱流擾乱（ボイルなど）や風等を契機として発生し、水粒子自体の動き（表面流速）の上に載る形で水表面を伝播する微小振幅波であり不規則波と考えられる。これらの波は方向性を持たないため、風がない場合には各不規則波成分が打ち消しあって表面流速成分が卓越して検出されるものと期待できるが、一様に風が吹いている場合には風向に沿った成分を有する波が発生し、それが計測値における誤差要因となる可能性がある。東らは、有効幅2m、有効長さ25mの実験水路を用いて順風、逆風下における各非接触計測装置の比較を行った<sup>7)</sup>。その結果、計測値には風の影響が認められること、静水時の吹送流は水面上10m換算流速の1.6%程度であることなどがわかった。また、これらの結果を逆に利用して風の影響を補正するアルゴリズムも提案された<sup>7)</sup>。

## (5) 各流速計の特徴

共同研究で利用された非接触型流速計には、各々に特有の特徴がある。また、魚野川における流速分布の計測結果の一例を図-7に示した。PIV法は浮子観測の断面、他の方法は橋脚の影響を排除するために橋の上流側の断

面で計測が行われているが、どの方法も同様な流速分布を示しており良好な結果が得られていることがわかる。

#### (6) 非接触型流速計測法のまとめ

以上より、非接触計測法には各々特徴があるが、どの方法を用いても3(2)で指摘した浮子法の短所を補える可能性があり、今後の流量観測手法として有効であることが確認できた。一般的には、ドップラー効果を利用する計測器はリアルタイムの点計測に強く、画像解析法は平面的な計測が特徴である。各々の特徴を理解した上で使い分ければ効果的な流量モニタリングが可能となる。

ただ、流量観測精度の客観的な比較のためには、ADCPのような装置による計測との比較が不可欠である。

### 4. 土砂流出観測（モニタリング）<sup>8)</sup>

#### (1) 土砂流出観測（モニタリング）の現状

土砂流出の観測の必要性が明確になっていない。観測成果の活用に関しても具体的な検討がなされていない。ある地点で土砂流出の観測が実施され、資料が得られても観測地点の水理・河床条件、上流からの土砂供給量と粒径特性などが不明であることが多く、その地点における土砂流出現象を十分説明することができない。

また、土砂流出の観測成果に基づいて流砂量式に対する適合・不適合の議論に終始することが多く、対象地点での流砂量を議論する目的がなおざりにされている。

一方、流砂量式は流れや河床が定常な状態において実験などから導かれているため、諸条件が非定常な実河川に適用するには無理がある。それを考慮した上で、観測結果から土砂流出現象について検討すべきである。また、観測結果は土砂流出現象の一面しか捉えていないことが多く、観測された流砂量などの取り扱いには十分に慎重でなければならない。

#### (2) 土砂流出観測（モニタリング）の課題

流域一貫を目的とした土砂管理を目指すならば、〔土砂生産→土砂流出→堆積〕からなる土砂流出システムと〔斜面→河道→湖底（海底）〕からなる土砂流出プロセスを対象地点において考慮する必要がある。

土砂流出システムと土砂流出プロセスを考慮し、観測の目的を明確にすることによって、観測場所、観測内容、観測時間間隔、測定範囲などが決められ、合理的な観測が可能となる。

京都大学防災研究所では山地流域における土砂流出の実態を明らかにするために、1965年、神通川上流の蒲田川支川足洗谷において流出土砂の観測を開始し現在まで継続されている。

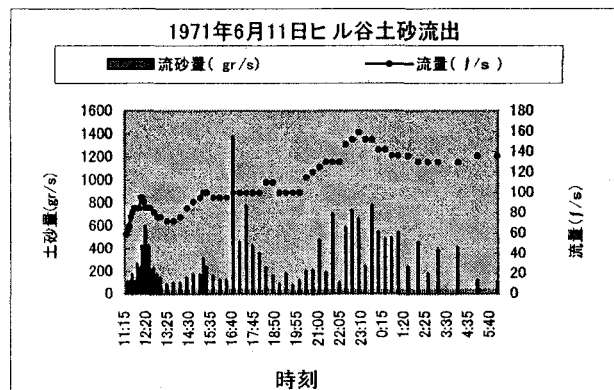


図-8 ヒル谷試験流域における流砂の実態

ここに、足洗谷試験流域の小支川であるヒル谷において得られた観測成果を時間、日、出水毎、年と4段階に観測時間を変えて土砂流出の観測に関する課題について検討する。

ヒル谷試験流域は流域面積0.85 km<sup>2</sup>で、中・下流部に堆積した厚さ10～20mの堆積層を侵食してステップ・プールからなる階段状の流路が形成されている。1960頃にヒル谷支川の源流部に崩壊が発生し、この裸地斜面からの土砂生産によって洪水時などに濁りの発生が認められるようになった。この崩壊地からの土砂生産と下流での流出土砂との関係を明らかにすることを目的として観測が開始された。

ヒル谷流域の出口に流量・流砂量観測のための試験ダム（幅：10m、高さ：3m）が設置され、水位および電気伝導度の観測が開始された。堆砂測量はダム貯水池内（幅：7m、長さ：15m、深さ：1～2m）で実施され、流砂量計測はバイパス・パイプ（径：25cm）によって試験ダム下流でサンプル採集と同時に行われている。

図-8はヒル谷試験流域の出口における一洪水時の土砂流出を5～30分間隔で示したものである。この流出土砂の平均粒径は裸地斜面における生産土砂と同様で約5mmである。上流の裸地斜面から生産された土砂は階段状の河床を約1.2km流下して観測地点に到達している。

流出土砂は流量の増加に伴い増加しているようであるが、洪水の後半では流砂量が減少する傾向にあり、河床の堆積物が無くなり、また、上流からの給砂も無くなったものとする。この様に上流からの給砂・河床条件が観測地点の土砂流出現象を支配していることが分かる。

その一例を図-9に示す。この図には4月の融雪出水が欠測しているが、毎秒約100リッターの出水があった。

この時点では上流の裸地斜面からの土砂は殆ど流出していない。その後の出水によって生産土砂は河道を流下し、図-8に示す6月11日頃の出水時には観測地点付近の河床に到達しており、約8m<sup>3</sup>の土砂流出があった。そ

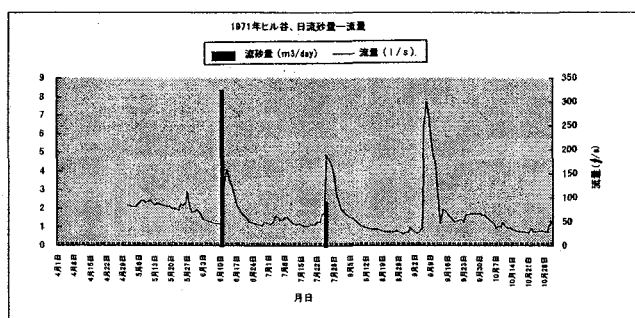


図-9 ヒル谷試験流域における流砂の実態

の後、7月の前期出水を超える流量で約2m³の流出土砂があり、その後、7月の出水を超える9月の出水では流出土砂は観測されていない。これは観測地点より上流の河床堆積土砂調査において流出可能な土砂が流出して無くなっていることから理解される。このように観測地点より上流の河床条件および土砂生産条件が流量と流砂量の関係を支配していることが分かる。

一方、出水毎に流量と流砂量の関係が変化する例は図-10に示すとおりである。この図において河道堆砂量に着目すると、それが多い場合に流量と流砂量の関係は左に偏り、流出土砂量が多くなる。このような原因として、上流崩壊地からの土砂生産量、河道堆砂量の変化などが考えられる。これらをパラメータとすると出水毎の流砂量の変化が説明できる。

図-11は複数洪水によって流出する年間土砂量と年最大流量の関係を示したものである。土砂流出量の予測の目的によっては、この程度の関係から土砂流出量の推定も可能になる。

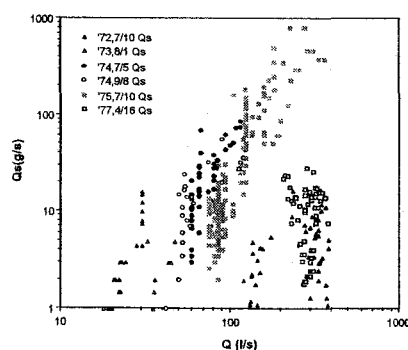


図-10 ヒル谷流域の出水による土砂流出の相違

### (3) 土砂流出の予測への応用に関する課題

川は上流から様々な物質を運んでおり、その一つに土砂礫がある。土砂礫の大きさ、岩種、流出量などは上流域の土砂環境に関する情報を提供しており、その情報を十分に生かすためにはどのような観測をすべきかが、観測目

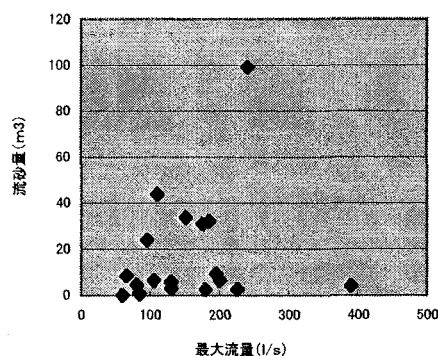


図-11 ヒル谷流域の最大流量と年間流砂量

的・観測手法の開発とともに今後の大きな課題である。

## 5. まとめ

今日、洪水・土砂観測モニタリングの中心的役割を担っているのは国土交通省であり、その歴史は古く、様々な努力と研究がなされてきている。

また、洪水・土砂観測モニタリングはかなりの公共性を有しており、一般に直接的な目的を持たない場合が多く、多様な要素をもっている。そのため、厳密な精度が要求できない。また、観測モニタリングにはまだまだ対象河川の水文水理現象を十分に認識された上での観測がなされていない等のことから、厳密な精度が期待できないことが想定される。今後は観測に機械技術向上もさることながら、河川の持つ水文・水理的現象を認識した上での観測が要求される。今後さらなる観測手法の向上と技術者の育成が必要である。最後に資料に関しては独立行政法人土木研究所から資料提供の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献：

- 1) 水文観測：国土交通省河川局監修、社団法人全日本建設技術協会 2003.
- 2) 米田正文：洪水特性論，土木雑誌社，1953.
- 3) Guide to hydrological Practices: WMO No.168 1997
- 4) Measurement of liquid flow in open channels-Velocity-area methods reference number ISO 748:1997(E)
- 5) 土木研究所他：共同研究報告書第291号「非接触型流速計測法の開発」，2003.
- 6) 深見・東・吉谷・田村：河川流量調査を目的とした非接触型流速計に対する風の影響 1. 既往の知見に基づく風の影響モデルの構築，土木学会第57回年次学術講演会第II部門，2002.
- 7) 東ら：河川流量調査を目的とした非接触型流速計に対する風の影響 2. 室内水路実験，土木学会第57回年次学術講演会第II部門，2002.
- 8) 藤田・澤田・水山：山地流域における濁度変化と土砂動態，水工学論文集，第47巻，pp.739-744，20

(2003. 4. 11受付)