

超音波式流砂計による河川流送物質の観測 —流速と懸濁物質に比例する信号 (SSI) の 同時測定による観測法の紹介—

SUSPENDED SOLIDS MEASUREMENT BY SUPER-SONIC WAVE,
INTRODUCTION OF SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF VELOCITY, AND
SIGNAL (SSI) PROPORTIONAL TO SUSPENDED SOLIDS.

岩熊眞起¹・河嶋ちか子²・岡本幸久³・菅野修平⁴

Maki IWAKUMA, Chikako KAWASHIMA, Yukihiisa OKAMOTO, Syuhei KANNO

¹正会員 東京建設コンサルタント環境分析センター (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

²非会員 東京建設コンサルタント環境分析センター (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

³正会員 東京建設コンサルタント環境モニタリング研究所 (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区

東町1-36-1)

⁴非会員 東建エンジニアリング調査観測部 (〒330-0841 埼玉県さいたま市大宮区東町1-36-1)

A signal, named SSI, is found to be proportional to suspended solids, which is introduced from signal reflected by super-sonic wave velocity meter. As the result, simultaneous velocity and suspended solids measurement will be realized in the fields. Several results of experiments are introduced and a few technical problems are discussed.

Key Words : Super-Sonic Wave, SSI, suspended solid, continuous observation method

1. はじめに

河川の流砂のみならず、開水路や非満管管路においてすら懸濁性流送物質の連続観測は難しく、洪水を含めた長期間の連続的観測のまとまったデータは少ない。国土交通省の水質自動監視装置（環境水質監視用）による濁度の観測では1時間ピッチの連続観測が行われているが、平水時水位における表層から2割水深の流水の採取であり、長い高水敷区間から堤防の上までの物質輸送力が考慮されていない細い管で輸送された試料の計測である。また計測している項目は濁度であるが、濁度計はその計測原理から、20~40 μm 以下の微細粒子にのみ反応する機器である。河川流送土砂にはそれなりの比率で濁度計反応物質があると、濁度の値にべき乗の式形のキャリブレーションによる換算も散見されるが、ウオッシュロードの一部を計測して全体量を見ている状態であるとも考えられる。

一方では出水時の掃流砂量を現地で人力観測をしている。危険を伴い、大変な労力を必要とし、納得のいく観測成果を得ることは容易ではない。こうした困難度の高い観測に対して、より長時間、長期間の連続的観測データの収集が必要であるとされても、困難極まることであ

る。

筆者らは建設コンサルタントである。その立場から、河道の設計管理等に必要な河川の流砂量（掃流砂量、浮流砂量）の調査観測、湿地帯の保全、ダム貯水池流入負荷量、合流式下水道雨天時流出等のいわゆる懸濁性流送物質の調査、観測をおこなっている。これらの仕事の大半は、物質濃度（C）の分析測定が要（かなめ）である。この場合の物質濃度（C）は採取した試料を持ち帰り分析して測定することが一般的である。しかし、濃度（C）の分析測定は、現地での試料採取も、分析も、ともに労力と費用が掛かることから、現状では物質濃度（C）の観測、分析はデータ数が限られている中での仕事をとなっている。

一方では、水文観測機器の進歩と普及によって、これらの業務を行う場合、水位は自記水位計を設置して調査、観測をおこなうことが一般的になってきている。さらに、掃流力の計算、H-Q式の適用困難性、流量観測精度、感潮区間の順逆流がある等の事由から流速も自記観測する調査・観測も多くなってきており、流量（水位、流速）の連続観測データは多く得られるようになってきている。

このような背景から、流量（水位、流速）データ数と同量レベルの物質濃度（C）が得られれば、その値に流速を乗じて得られる流送物質質量（qb）のデータを多く得

ることができるようになる。qbのデータが水位、流速と同量数得られることにより、河川流砂量についてのより精緻な現象の解明、適合度の高い計算モデルの作成、検討事項の精度の向上等につながるものと考えられる。

筆者らは、この具体的解決手法として、(C)が出力される観測機器を開発した。あわせて、4種の懸濁性物質の分析(6種の懸濁物質濃度)によるキャリブレーション作成をおこなうという二つの技術を組合わせた手法による河川流送物質量の観測を進めている。

機器の開発を終え、昨年秋に数地点に設置したばかりであることより、流送物質量の観測としての報告が可能な水準のデータ収集には至っていない。よって本報告は、観測技術の紹介を中心にした第一報である。洪水時を含む通年の観測データが収集され次第、続報の報告を行う予定である。

2. 開発した機器と設置と使用方法

(1) 観測機器開発の概要

河川、溪流、用水路、下水管路等の流速測定に広く用いられている長期間メンテナンスフリーで供用できる超音波式ドップラー流速計に改良を加える形で、開発をおこなった。超音波式流速計における懸濁物質濃度と反射信号強度の変化は比例して変化することはよく知られていることであるが、反射信号強度の変化のみでは適用範囲が非常に狭く限定される点をふまえ、「ばらつきノイズ」を基本にしたアルゴリズムによる、懸濁物質量に比例する信号を出力する観測機器として、製造メーカーと共同開発したものである。出力される懸濁物質量に比例する項目名称をSSI(懸濁物質指数: Suspended Solid Index)と呼称した。



図-1 観測機器及び水路底面への設置事例

(2) キャリブレーション項目の多様化

もう一つは、SSI出力を流送物質量濃度(C)に換算するキャリブレーションの作成を工夫している事である。物質濃度項目を、環境基準項目のSS(環境基準では浮遊物質であるが本報告では懸濁物質と記載する)に限定せず2mm, 0.075mm, 0.022mmのふるいを使用して、分析を行う4種を設定、差し引の2種の項目を加えて合計6種のキャリブレーション項目を設定し、観測対象により選択して利用している。

機器出力のSSIは、感度を変えた出力として、SSI-1、

SSI-2, SSI-3の3つの項目があり、観測地点のSSIの変化特性及び懸濁物質分析値をふまえて、利用適合性の良い結果を選択使用することとしている。

採取土砂や採水試料が大量に確保できる地点においては、現場でも簡便に使用できる小型の沈降筒タイプのキャリブレーション実験装置を作成し、製品の付属装置として提供している。

(3) 超音波式流砂計(流速・SSI計)の概要

開発した機器は、650Hzの超音波素子を内蔵させた耐水深100mの小型水没式のセンサーと計測記録器より構成されるドップラー流速計を基本としている。センサーにケーブルがついており、これを計測記録器に接続して使用する。センサーは、量水表保護のH鋼、護岸RC部、床固め等の河川施設、橋脚ピア一等を利用して流水の水利現象の変化を極力生じさせないように設置する。同一地点の水深方向の多段的複数個の設置も可能である。センサーのケーブル長は標準で25mであるが、ケーブル長はより長いものの利用も可能である。

計測記録器は最少インターバル1分で作動し、1次データとして、流速、ドップラー反射信号強度、3種のSSIの合計5項目が計測記録される。計測記録器は小型蓄電池で長期間作動する。また計測記録器に内蔵されている通信器の搭載により準リアルタイムでデータをWEBサイトで閲覧することが可能である。水位センサーを増設することで水位データも同時に観測される。

表-1 観測装置の仕様

事項	内容		
	流速	乾燥密度係数	水温
測定範囲	0.01~8 m/s	0.1~5000	0~50℃
精度	2%ofFS	5%ofFS	±0.3℃
分解能	0.01 m/s	0.1	0.1℃
校正方法	出荷時校正	なし	出荷時校正
測定原理	ドップラーシフト	反射強度変動解析	半導体抵抗変化
センサー材質	SUS 304		
センサー寸法	縦185mm,横50mm,高さ21.5mm 重量:3kg以内		
センサーケーブル	標準25m付(オプション:Max100mまで可)		
ロガー外形材質	ポリカーボネイト(防滴規格IP65)		
ロガー寸法	縦215mm,横177mm,高さ100mm 重量:1.5kg以内		
内蔵電池	なし		
外部電源端子	DC12V(Y端子接続のコネクター付ケーブル)		
消費電流	計測時120mA(待機時0.2mA以下)		
インターバル設定	最小インターバル1分		
データ記録	SDカード(読出はPC利用)		
符号出力	標準品なし(LRS232C出力増設可)		
データ通信機能	標準品なし(FOMA通信機埋設可)		

(4) 機器出力の内容

観測により得られる1次データ(5項目)のうち河川工学の単位で出力されるのは流速(V:m/sec)のみである。ドップラー反射信号強度がS(mV)として出力され、これは相対値である。センサーが河床変動による堆積作用で土中埋まってしまった場合はSが10mV以下となる判別は可能である(センサーが空中にある場合Sは0mV近くになる)。残り3項目のSSIは無次元の相対置出力である。

このSSIで表される無次元相対置出力の流砂量、流送物質量の濃度への変換には観測地点毎のキャリブレーションが必要である。標準的に入手可能な豊浦の標準砂、硅砂、カオリン、石炭灰等を利用したキャリブレーション標準化の研究を継続して行っているが、観測地点毎の

分析値を利用したキャリブレーションが最適であると考えている。

本装置のSSI出力は流速の影響を除去した出力値となっており、基本的には物質濃度（C）の観測である。したがって次式でqbの算定が可能である。

$$qb=(V) \cdot fl(SSI) \cdot h \quad (1a)$$

但し qb：単位幅当たりの流送物質質量 (g/m・sec)

V：流速 (m/sec)

h：水深 (m)

(5) SSIの精度と直線性

本装置の流速（V）は超音波のドップラーシフト量が流速に比例するとして、卓越周波数の計測をおこない流速を測定している。ドップラー反射信号強度は全広帯域受信強度の信号強度である。SSIはドップラー反射信号の周波数特性毎信号強度のばらつき度合いが、反射信号ゾーン内の懸濁物質濃度と比例的関係があるとして測定している。ばらつきノイズの計測であるため、一定時間の計測が必要であり標準計測時間を40秒間とっている。40秒の間に河川流況にはないような現象、たとえば人が数秒触っていた時に見られる著しい異常値が出現する場合には、誤差の発生が考えられる性質のものである。また、精度を低下させる原因物質として泡の発生がある。

SSI信号はどの程度の懸濁物質濃度まで比例関係があるのかは重要な課題である。流速1m/secの水路及び沈降筒試験では5000~9000g/m³程度までの濃度での比例的関係は確認できている。いずれにせよ流送物質の特性により比例関係は異なるものである。

より高濃度の掃流砂の流下の場合には信号強度の低下となり検知は可能である。掃流砂量へ濃度の換算はまだ検討中である。土質特性として空隙率が65~80%を切ると、超音波反射信号は大きく減少する。その反応を利用した掃流砂のキャリブレーション作成の検討は進めているところである。

表-2 SSI出力の特徴

項目名称	反応特性	主な観測内容物
SSI・1	低感度	掃流砂(浮流砂)
SSI・2	中感度	ウォッシュロード、浮泥
SSI・3	高感度	懸濁性有機物、浮泥

キャリブレーションの作成は観測地点での採砂・採水による分析試験値からの作成が基本であるが、流砂量公式等による計算値からの推定、および、当該地点で採取した流砂を用いての実験水路等での作成も考えられる。

3. SSIから流送物質濃度（C）の換算キャリブレーション

(1) 観測地点での採水と分析

観測機器はインターバルを設定し連続作動している。したがってSSIが記録されている時間に現地で試料を採取して、分析測定を行えば、より現地状況に即したキャリブレーション解析用試料を得ることができる。

キャリブレーションは表-3に示した項目により懸濁物質の分析し、作成する。環境基準などでは懸濁物質（SS）は初めに2mmのフルイを通過させた試料の分析である。河川に懸濁している物質全体を考えると、フルイを通過させない全量での懸濁物質の分析が重要である。

74μmでカットした項目（C₂）の分析を行うことにより、粘土・シルトを除いた砂分量のみの流砂を得ることができる。また、22μmでカットした項目（C₃）の分析を行うことによって、ウォッシュロードのキャリブレーションを得ることができる。

表-3 キャリブレーション項目の一覧

項目	記号	内容	摘要	例 丁川河口 (g/m ³) 内容
フルイ通過なし 総懸濁物質質量 (全SS)	C ₁			2446
懸濁物質質量 (SS)	SS (C ₀)	環境基準項目	環境基準項目	2436
シルト・粘土	C ₂	濁度計に反応性がよい	74μm以下のSS	492
微細粒子	C ₃		22μm以下のSS	265
流砂量 (I)	C ₁₂	C ₁₂ =C ₁ -C ₂ シルト・粘土を除いた砂分量	74μm以上のSS	1954
流砂量 (II)	C ₁₃	C ₁₃ =C ₁ -C ₃ ウォッシュロード等を除いたSS	22μm以上のSS	2180

(2) 沈降筒によるキャリブレーションの作成

キャリブレーション作成用の沈降筒はSSI計の標準付属品となっている。沈降筒は 内径130mm、高さ1720mm、有効水面までの高さ1700mmの円筒であり、中間部と下部に採水コックが付いている。また、上部には、砂などの物質を入れた容器を支持するふたが付いている。

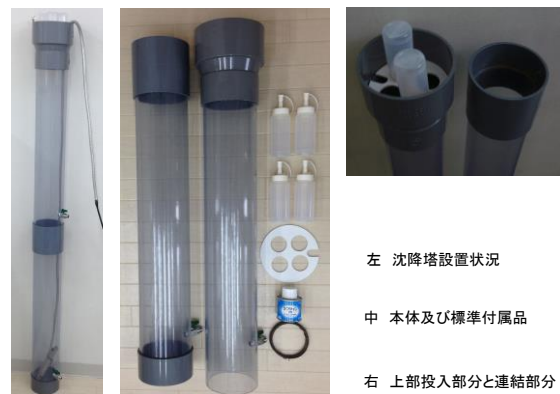


図-2 沈降筒

標準例としての実験は砂（粒径0.2~0.4mmが多く含まれる洗浄した天然砂「きらら」）を用い、1分間に既定流出量となるように先端をカットした容器に砂を充てんし投下した。

時間当たりの投下量から沈降筒内の流送物質濃度（C）を計算で求めた。また、採水試料の分析により懸

濁物質濃度 (SS) を求めた。

表-4 キャリブレーション実験結果の例

投入段階	流速	計算物質濃度	懸濁物質濃度	SSI1	SSI2	SSI3	信号強度 mV
	m/sec	mg/l	mg/l	無次元	無次元	無次元	
1	0.04	125	241	3.5	9.6	9.6	120.8
2	0.04	250	1890	14.6	37	37.8	123.9
3	0.05	375	1470	17.3	43.1	44.8	216.2
4	0.04	1500	6780	64.1	71.5	86.6	360.0
5	0.05	3000	8190	182.3	151.2	210.8	597.2

懸濁物質とSSIには図に示すように相関関係がみられ、これによりSSIから流送物質濃度の推定が可能であるといえる。

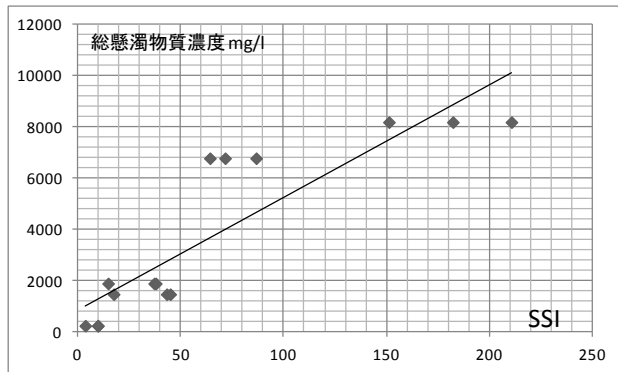


図-3 SSIと懸濁物質の関係

また、懸濁物質濃度に対して、沈降筒直径130mmを水深と仮定し、各段階の流速を基に、式(1a)によりqbの算出を行った。表-5がその結果である。

表-5 キャリブレーション実験によるqbの算出

投入段階	流速	SSI2	計算総懸濁物質質量	懸濁物質質量	qb
	m/sec	無次元	g/m ³	mg/l	g/m ² ・sec
1	0.04	9.6	578	241	3
2	0.04	37	2203	1890	11
3	0.05	43.1	2565	1470	17
4	0.04	71.5	4249	6780	22
5	0.05	151.2	8977	8190	58

注1) 総懸濁物質質量は表-3に示すC1

注2) 計算総懸濁物質質量はSSI2との相関式より算出

2. 河川等での試験観測事例

(1) 平水時小河川における感度確認

清澄でかつ比較的浅い河川で、流送物質となる土砂や砂をわずかに投入し、SSIを観測したところ、図に示すような変化が得られた。観測機器のセンサーに近いところでの実験であるが、良好な感度で反応した。

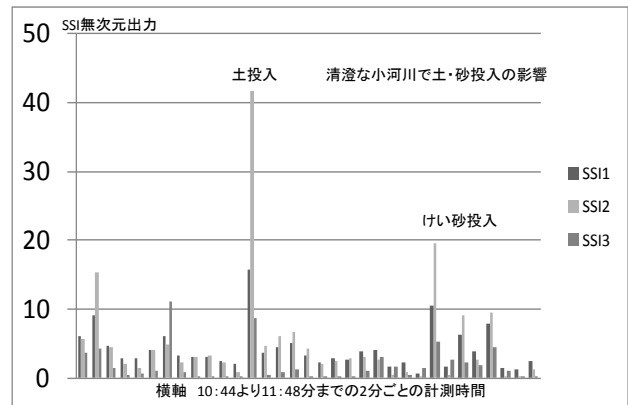


図-3 土・砂投入による感度確認試験

(2) 泡の流下による影響確認

降雨後の比較的流速は大きく、大量の泡が変化して発生している状態で、SSIへの影響を観測した。泡の変化に対してSSIの変化は少なく、泡による妨害により流送物質として測定されてしまうことは少ないと考えられる。

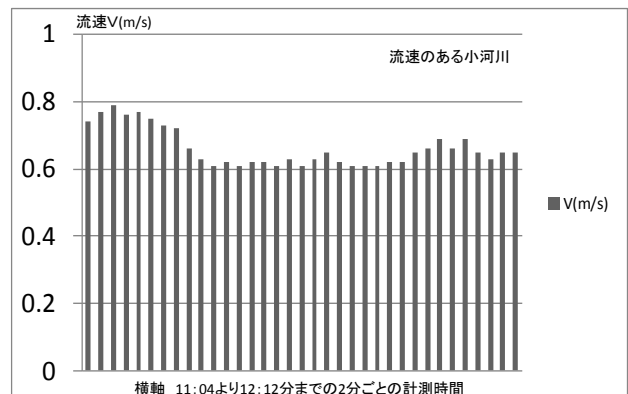


図-4 泡の流下による影響確認試験(流速)

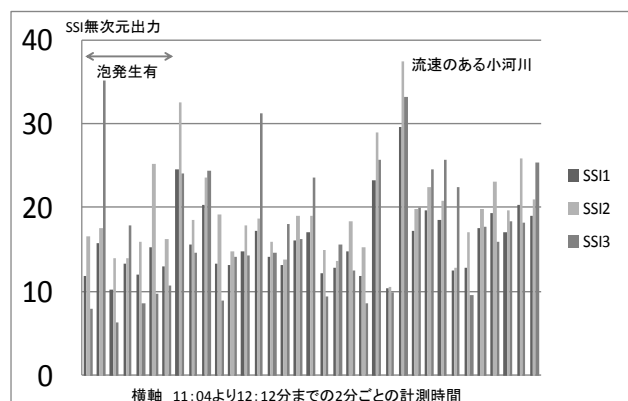


図-5 泡の流下による影響確認試験(SSI)

(3) 流速変化の大きい樋門周辺での観測

本川が洪水流であり、樋門排水の出口で、流速の変化が大きい場所での観測である。樋門出口の河床底泥が湧昇し、SSIは当該河川のベースの20倍以上の値として観

測されている。実際に目視でもかなりの濁りある状況での観測である。

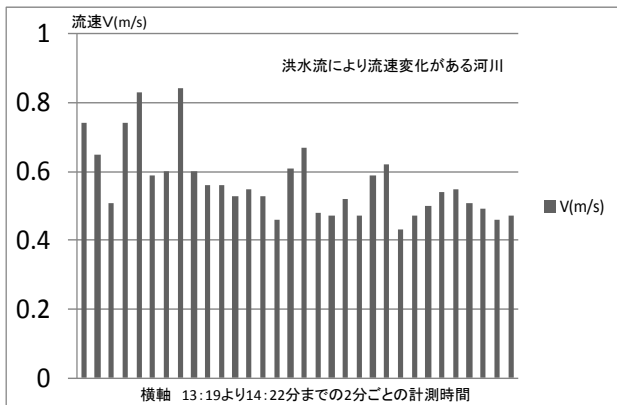


図-6 流速変化のある河川の確認試験(流速)

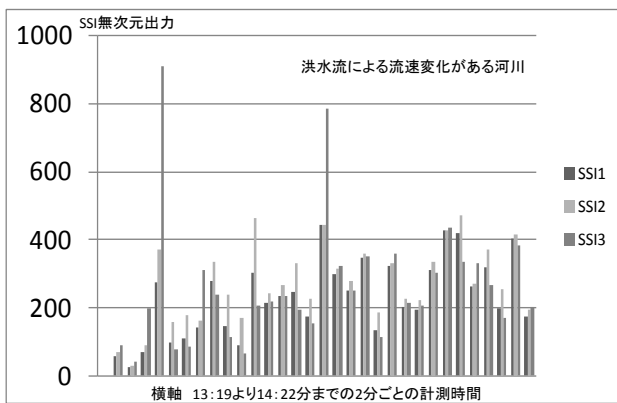


図-7 流速変化のある河川の確認試験(SSI)

(4) 都市排水路での安定性の確認

降雨がなく流況変化のない時期に、観測安定性の確認のため、小河川で一週間の連続観測した。SSI出力863データのうち、SSI値が20を超えるものは、SSI3は14、SSI2は8、SSI1は0であった。このピーク出現は、観測誤差の可能性があり、今後さらに実験を重ねてカットできるアルゴリズムの改良を進めている。

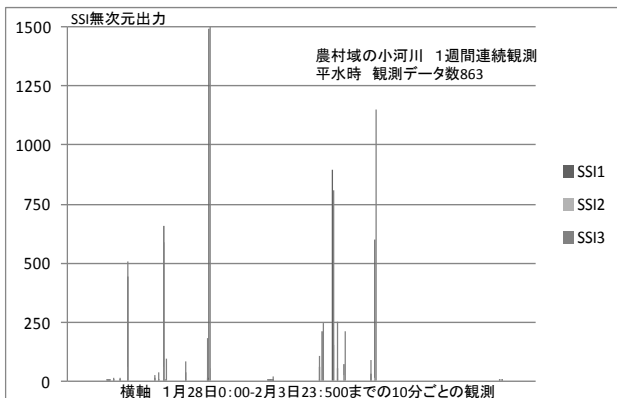


図-8 無降雨期間試験観測(1週間)

(5) 降雨による出水時の観測

川幅約数mの都市河川の降雨による出水時の流出時の観測である。降雨による出水に対して、水位、流速の変化が観測されている。ここでSSIも同様の変化が得られている。SSIと流送物質濃度との詳細なキャリブレーションの作成ができれば、qb(流送物質質量)の算定が可能となる。

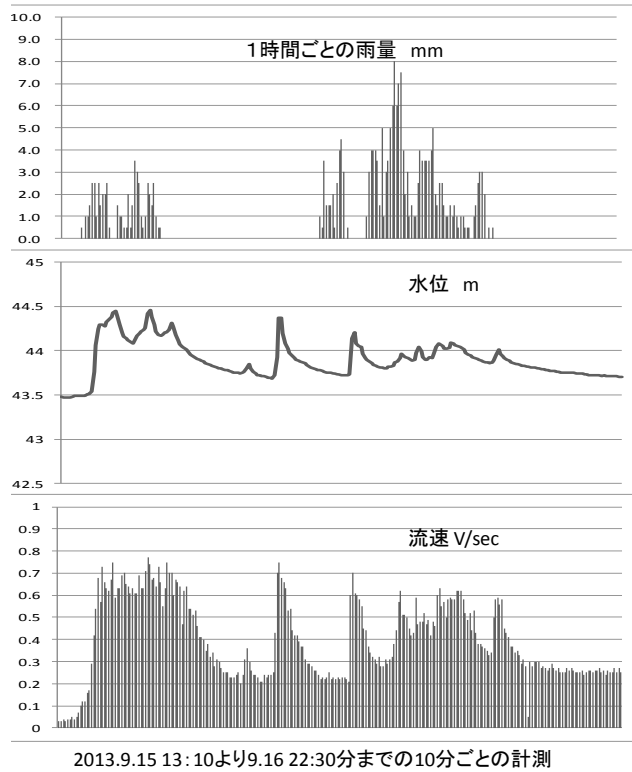


図-9 降雨時都市排水路の雨量・水位・流速

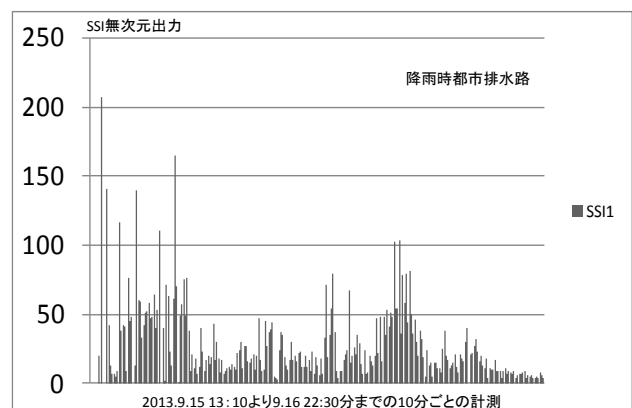


図-10 降雨時都市排水路の変化 (SSI1)

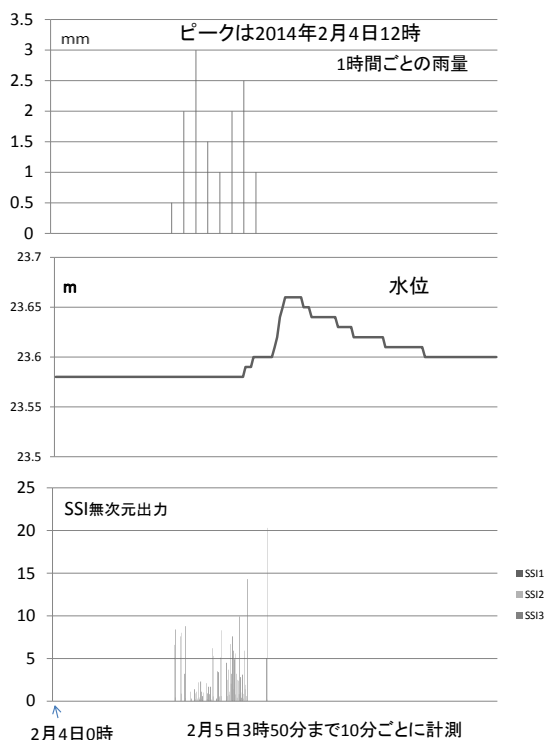


図-11 降雪時都市排水路の変化

5. まとめと今後の課題

超音波式流速計のドップラー信号を下に、ばらつきノイズから、流砂、粘土・シルト、懸濁性有機物、泡等の含有量に、比例的に変化する信号を取り出し、SSI (Suspend Solid Index) と呼称した。

このSSIは常に流速と同時に出力されるものであることより、SSI出力を持つ超音波式流速計を超音波式流砂計と命名した。この観測装置を用いて実験的な観測を行い次のような知見を得た。

- ・実河川においての実験観測ではSSIは土砂等懸濁物質に比例的に変動した。
- ・沈降筒で細砂を沈降させた場合ではSSIは沈降土砂と比例的に変動した。
- ・SSIは流速0.04～2.00m/secの範囲では流速の影響は小さい。流速1.0～2.0m/secにおいても懸濁物質のない河川ではSSIは最大10～25以内の値であった。
- ・泡立ちが著しい小河川の観測において懸濁物質のない河川ではSSIは20から30以内であった。
- ・SSIは懸濁物質の濃度 (C : g/m³) に比例的に変動する。

・SSIと懸濁物質濃度 (C : g/m³) の関係において、キャリブレーションとなる相関図の作成が可能である。これにより無次元のSSIは濃度 (C : g/m³) の単位に変換できる。

・懸濁物質濃度 (C : g/m³) , 流速 (V : m/sec) , 水深 (h : m) により流送物質量(qb : g/m/sec)が算定できる。

・当該現地ごとの試料を用いて、SSIと懸濁物質濃度の相関図からキャリブレーションを作成することにより、本装置を当該現地に設置し、流送物質量の連続観測が可能となる。

・連続的な流送物質量の測定が可能であることより、流砂量観測の高度化並びに観測精度の向上、計算モデルのチェックなどが可能となると考えられる。

・使用したセンサーは一点の観測である。水深方向に多点観測が可能な橋脚取付型センサーを開発中である (図-12)。



図-12 橋脚取付型センサー

本報告は開発した超音波式流砂計による観測事例紹介の第一報である。課題としては、高濃度の浮流砂、掃流れ砂への適用が可能かの検討が必要であり、今後、さらに実験を重ねて、これらの検討を進めていく。また、現地観測事例の蓄積が必要であることから、多くの関係者に使用していただけることを願っている。

謝辞：計測機器の開発、改良、沈降塔の設計・制作を行った東建エンジニアリング名古屋工場の方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 曾山和弘, 大熊義史, 畠中泰彦, 浅野文典, 福岡捷二: 河川の掃流砂量の測定と掃流砂量観測技術・評価技術に関する研究, 河川技術論文集, Vol.17, pp.5-10, 2011.

(2014. 2. 10受付)