

荷重計を用いた新しい掃流砂量観測手法の開発

STUDY ON THE MONITORING METHOD OF BED-LOAD DISCHARGE

二村貴幸¹・山本浩一¹・坂野章²・小川和彦³・日下部隆昭²・末次忠司⁴

Takayuki FUTAMURA, Koichi YAMAMOTO, Akira SAKANO, Kazuhiko OGAWA

Takaaki KUSAKABE and Tadashi SUETSUGI

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

²正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究室 主任研究官 (同上)

³正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究室 交流研究員 (同上) (日本工営株式会社)

⁴正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室 室長 (同上)

In general, river sediment consists of wash load, suspended load, and bed load according to the particle size and behavior. It is difficult to survey bed load discharge especially during the time of flood, because of the complexity of interactions among sand wave and sediment discharge and water discharge.

This paper describes the outline of newly developed devices for bed load discharge survey. We conducted a survey of sediment transportation in Hinuma River during the flood that occurred on Nov.30th, 2003, and we recognized that new method was effective.

Key Words: *monitoring method, bed load discharge, sand wave, interaction, field observation*

1. はじめに

水系一貫の土砂管理を実践していくために、掃流砂をモニタリングし、その観測結果を流砂量式に反映させることは、効率的な河道計画策定や河道管理に役立てる上で重要である。しかし、移動床流れ場では河床形状・掃流砂・水理量は互いに干渉し合う複雑さを有するため、掃流砂把握の精度が悪く、河道計画に十分反映されているとは言い難いのが現状である。

掃流砂については、Einstein以降河床波の影響を考慮して現象を取り扱う考え方が広まっている¹⁾。河床波と掃流砂の関係については、山本²⁾や三輪・大同³⁾は河床波の谷部や山部で掃流砂量や粒径が異なることを水路実験で明らかにしている。しかし、これらはほとんどが定常流下の水路実験での検討であり、実河川のような非定常流れで、混合粒径材料の条件とは異なる。特に河床形状は水理量だけでなく、ハイドロの形状によって影響される履歴性を有する等複雑である。

現地河川においては、これまでADCPを取り付けたラジ

コンボートで河床波を観測し、土研式掃流砂採砂器で掃流砂を観測した研究⁴⁾があるものの、掃流砂量と河床形状の関係を明らかにした研究はあまりない。また、土研式掃流砂採砂器は安定して掃流砂を捕捉できない課題を有しており、新しい掃流砂量の観測方法が求められている。さらに、ラジコンボートにADCPを取り付けた観測では、ボートのロール・ピッチ等による誤差を有し、同一測線上を連続して測定するのは難しい等の問題がある。

本研究では、新たな掃流砂量観測方法と河床波観測方法を現地河川に適用し、河床形態と掃流砂量の関連性を明らかにした。

2. 新たな掃流砂量観測装置に求める性能とその妥当性

(1) 新しい掃流砂量観測装置の考え方

従来、洪水時に直接掃流砂を採取できる装置は、容器を河床に沈める土研式掃流砂採砂器や丸型・角型サンプラー⁵⁾等があるが、これらの問題点は河床波や採砂

器周辺の洗掘によって採取口と河床に隙間が生じたり、採砂器周辺の流水の乱れを助長したりすることによって安定した掃流砂量を捕捉できない点である。その対応として、河床を掘削してトレンチを埋め込む、いわゆる落とし穴式に掃流砂を採取する掃流砂捕捉手法を考案した。ただし、この手法ではトレンチ上面の高さが固定されるため、洪水時に大きな河床高が変化する湾曲部では正確な掃流砂を捕捉することは難しいが、それ以外の箇所では安定して掃流砂を採取できると考えた。

前述の考えの下に、これまで那珂川右支川の涸沼川において、川底のトレンチに設置したバケットで掃流砂を捕捉し、それを引上げて直接採取していた。しかし、ある程度以上に水深や流速が増大すると流木やゴミ等の流下物の量が急増し、バケットを引上げる際に予想以上の大きな負担が装置にかかるとともに、周辺の流水の乱れを助長する等があったため、装置の動作が不安定となり、採取データの精度も極端に低下する等の問題が生じていた。これらのことから、洪水中の高流速時に河床材料を引上げないように、バケットの中に入ってくる砂の重量を量ることによって掃流砂量を間接的に測る方法が有効であると考えた。本検討では、まず掃流砂の重量を測定することの妥当性を、バケットで直接採取した掃流砂観測結果から判断した。

(2) バケットによる掃流砂採取方法

掃流砂観測は茨城県を流れる涸沼川28.1km地点にある洪水観測施設で行った。図-1に涸沼川の流域図を示す。涸沼川の流域面積は459km²、流路延長は65kmであり、洪水観測施設近辺の低水路幅は $B \approx 15\text{m}$ 、河床勾配は $I \approx 1/1200$ 、河床材料の平均粒径は $d_m = 6.0\text{mm}$ である。観測施設には、観測員が水面近傍まで近づき観測するための昇降台と、低水路中央部に掃流砂採取装置を内蔵した観測柱がある(写真-1参照)。バケット(直径22cm)はトレンチ内に収納され、バケットの上面が河床高と同一の高さになり、掃流砂がバケット内に捕捉される。捕捉した掃流砂は、バケットを河床から取り出し口まで上昇させ採取する。装置の都合上、掃流砂を採取できる限界水深は2.5m程度である。水位毎に粒径別 u_* / w_0 (u_* :摩擦速度、 w_0 :沈降速度)と無次元掃流力 τ_* を計算し、流砂の運動形態を分類すると、水位T.P.約8.0m(河床高T.P.約6m)から堤防天端の水位T.P.12mまで粒径1.6mm以上の河床材料は掃流形態で流送されると推定された。

(3) 觀測結果

観測結果の一例として、2001年9月11日洪水時に採取された掃流砂の観測結果を次に示す。この洪水では、水位T.P. 10.5m程度まで掃流砂を観測した。図-

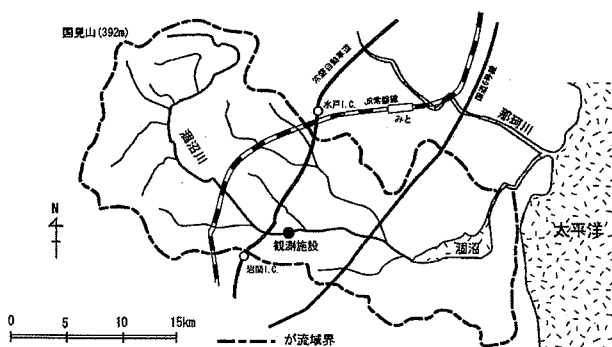


図-1 涸沼川の流域図と観測地点

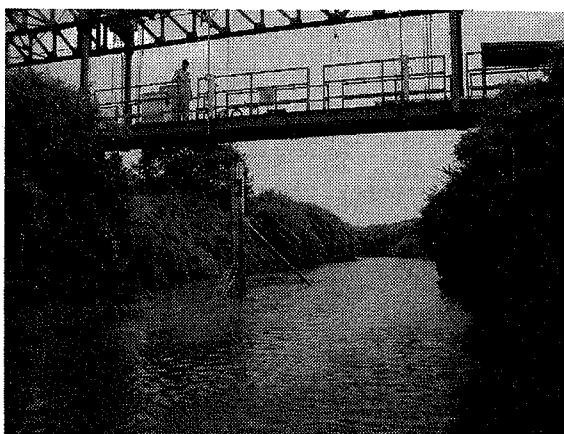


写真-1 涸沼川洪水観測施設の外観

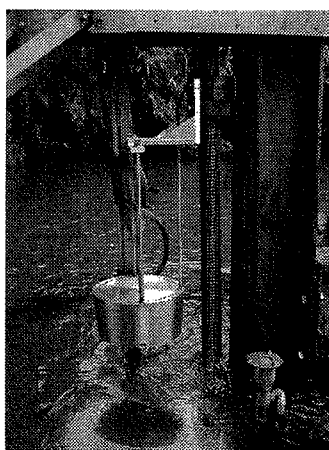


写真-2 荷重計の外観

2 に洪水時における掃流砂の粒径分布を、水深ごとに整理したものを示す。水深が大きくなるにつれて、粒径が粗くなっているのがわかる。これより、「ある程度以上の流量時（水深 2.0m 程度以上）には河床材料と掃流砂の粒度分布はほぼ同程度である」ことが判明したことから、掃流砂の粒度分布を直接把握できないが、掃流砂を重量で測定する”荷重計”を使用した観測で 1 洪水の大水理量時において連続的な掃流砂量を把握する可能性を確認した。

3. 荷重計による掃流砂量と RSS ソナーによる河床波の観測

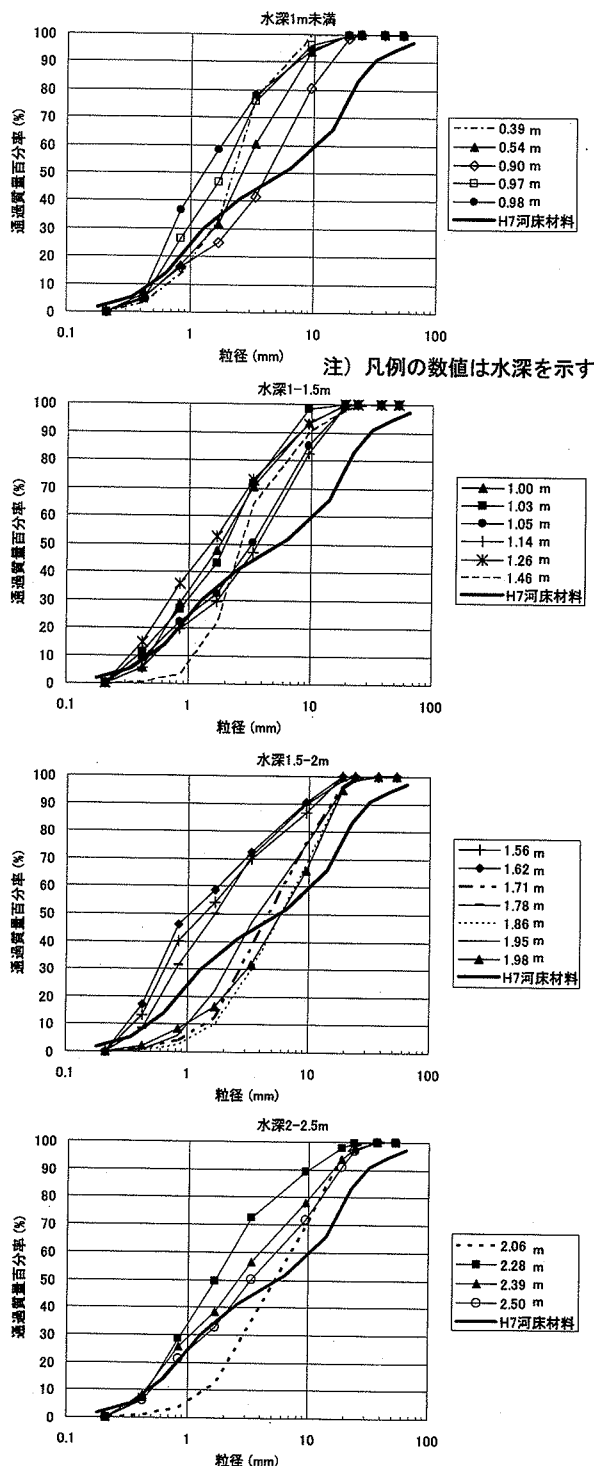


図-2 水深ごとの掃流砂の粒度分布

(1) 荷重計とRSSソナーの概要

掃流砂量を荷重計で、河床波をヘッド回転型サイドスキャンソナー (Rotating Side-Scan Sonar, RSSソナーと略する) でそれぞれ以下のような手法で観測する。写真-2は荷重計の外観で、歪みゲージが内蔵されており、掃流砂の重量をリアルタイムで測定可能である。荷重計の底面には穴があり、そこからの上向きと荷重計上面からの下向きの圧力差から重量(単位: ニュートン, 以下Nと表す)が算出される。

RSSソナーは、写真-3のように360度回転可能な

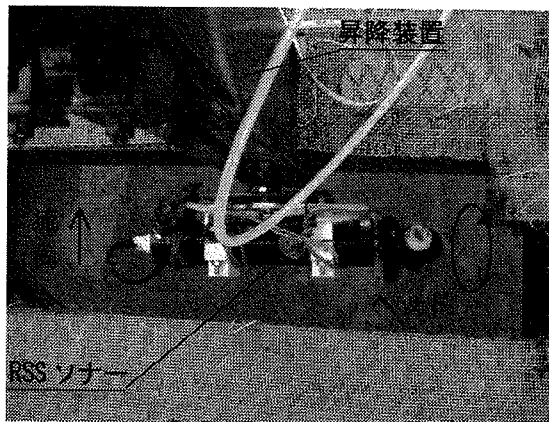


写真-3 RSSソナーの外観と設置状況

表-1 実験ケース

実験ケース	τ_*	流量 (m^3/s)	水深 (m)	土砂供給条件
I-1	0.12	0.50	0.35	0N~平衡状態まで
I-2				0N~10Nまで
I-3				0N~20Nまで
I-4				0N~30Nまで
II-1	0.21	0.69	0.37	0N~平衡状態まで
II-2				0N~10Nまで
II-3				0N~20Nまで
II-4				0N~30Nまで

ヘッド部を有し、そこから675kHzの超音波を水中に発射しながら回転させることにより、回転面内での音波の反射強度の空間分布が得られるものである。

静水中での荷重計においては、±約1%の高精度のデータが得られるが、実河川の流水中においては、荷重計の支柱やトレンチの存在によって、流水や流砂の動きが乱れる等、高い精度が得られない可能性が考えられる。このため、荷重計を現地河川に設置する前に、室内実験における検証によってトレンチ内への掃流砂の流入状況、周辺の流況、荷重計データの関係を把握した。

(2) 室内実験における荷重計の検証

a) 実験方法

実験は、河床勾配のない深さ1.21m、幅1.21m、長さ23.2mの直線水路で行った。掃流砂の挙動が見れるよう水路側面にアクリル板がある範囲に、現地河川において荷重計を下げた状態(図-6参照)と同様の設置方法になるよう、ラワン合板で床を0.4m上げ、直径22cmの円柱状トレンチをつくり、その中に荷重計を埋め込んだ。

実験は、河床材料や水深、流量等を現地と同一条件でできないため、定性的な判断として現地と τ_* を概ね合わせた。現地の $\tau_*=0.2$ (現地観測した時の最高水位T.P.8.80m, $I=1/1200$, $d_{90}=6.0\text{mm}$ で計算)と同程度の $\tau_*=0.21$ (粗度係数 $n=0.013$ として求めた)とその約半分の $\tau_*=0.12$ になるように水深と流量を設定した。実験は表-1に示す8ケースを行い、荷重計の上流から $d_{90}=3.2\text{mm}$ の均一砂を1分間に約3L供給し、

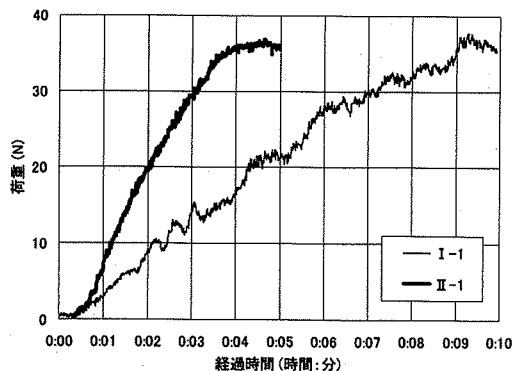


図-3 水路実験時の荷重計データ

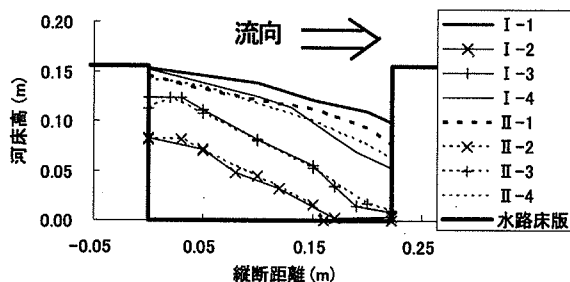


図-4 トレンチ内の掃流砂堆積縦断形状

荷重計の値が0Nから10N, 0Nから20N, 0Nから30N, 0Nから動的平衡状態になるまでの4種類を, 流量 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ と $0.69\text{m}^3/\text{s}$ の定流で行った. データのサンプリング時間は0.5秒間隔である.

b) 実験結果

図-3は実験結果の一例として, 掃流砂が荷重計上面で動的平衡状態になるまで供給した2ケースの荷重データを示す. 2N程度変動しているものの, トレンチ内に入ってくる掃流砂と比例して荷重が増加しているのがわかる.

通水後のトレンチ内の荷重計上面に堆積した掃流砂の形状として, トレンチ中央測線の縦断形状を図-4に示す. 上流から下流に堆積高が低くなる傾向は各ケースとも共通しており, 堆積形状は堆積量や水理量に係わらず, ほぼ一定であることがわかる. 図-5に, 荷重計から求めた重量と実際の掃流砂の重量の関係を示す. 30N~40Nの所で荷重計の重量の方がやや小さくなっているものの, 両者には高い相関が見られる. この状況は, τ_* に係わらず一定の傾向を示す. 以上から, トレンチ内に入ってくる掃流砂を荷重計で測定すると, ある程度以上重量のから荷重計の方が小さめの値を示すが, それ以下ではほぼ妥当な値を示すことがわかった.

(3) 現地における掃流砂量観測

a) 観測方法

現地における荷重計を使った掃流砂量観測を行う観測柱の構造図を図-6に示す. 河床にトレンチがあり, その中にエアコンプレッサーで昇降可能なトレンチ蓋と同調して動く荷重計が設置されている. 掃流砂量観測時には, 荷重計をトレンチ内に降下させ, 荷重計上面に掃流砂を溜めて満杯になるまで, 観測台

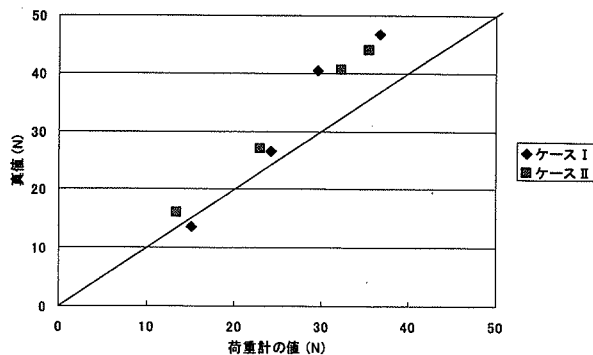


図-5 荷重計から算出した重量と実際の重量の関係

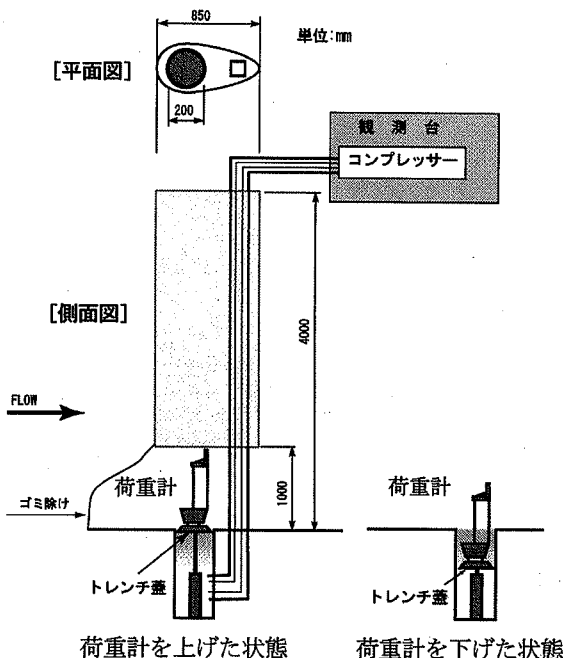


図-6 観測柱の構造図

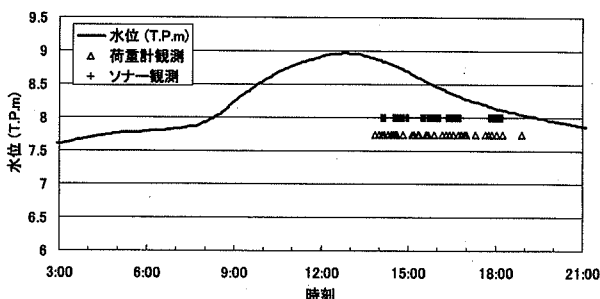


図-7 掃流砂・RSSソナーの観測時刻と水位の関係

上のデータロガーに0.5秒間隔でデータ収録する. その後は, 荷重計をトレンチから上昇させて, 溜まった掃流砂を流水によってフラッシュさせ, 次の測定のためにスタンバイした.

また, 掃流砂量の観測と同時に, RSSソナーで縦断方向の河床面形状を同時に観測した⁶⁾. 観測は写真-3のように観測施設の昇降台にRSSソナーを上下できる装置を取り付け, 観測時にRSSソナーを水面下に下ろして行った.

b) 観測結果

2003年11月30日の洪水を対象とした観測のタイ

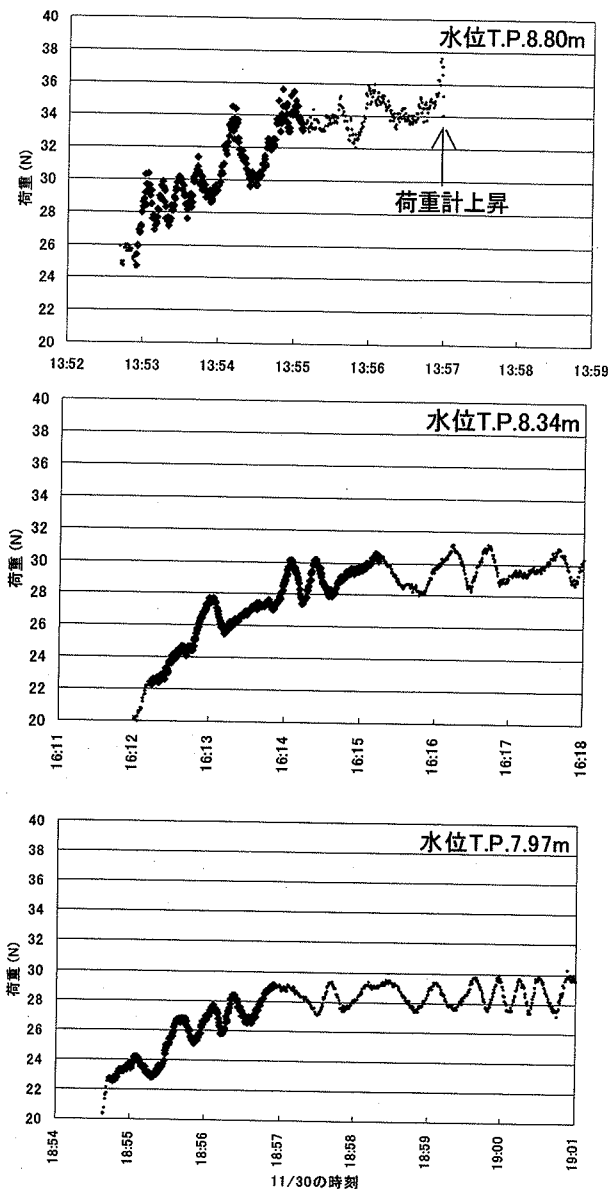


図-8 荷重計のデータ

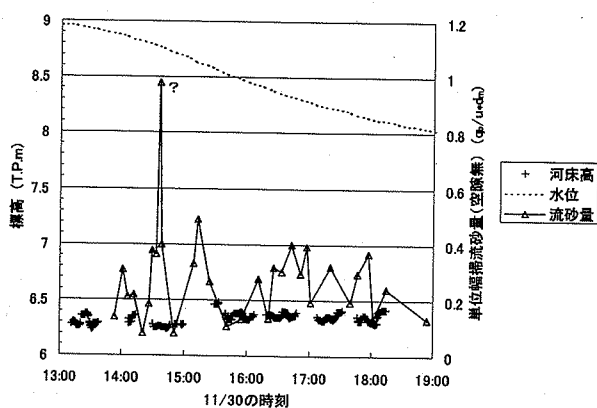


図-9 掃流砂量・河床高・水位の時間変化

ミングを、水位ハイドログラフとの関係で示したのが図-7であり、観測は洪水減水期の水位 T.P. 8.86m から 8.11m の間で実施した。

図-8 は観測結果の一例として、代表的な 3 時点 T.P. 8.80m, 8.34m, 7.97m の荷重データを示す。時間の経過に伴い、荷重が全体として増加しているが、

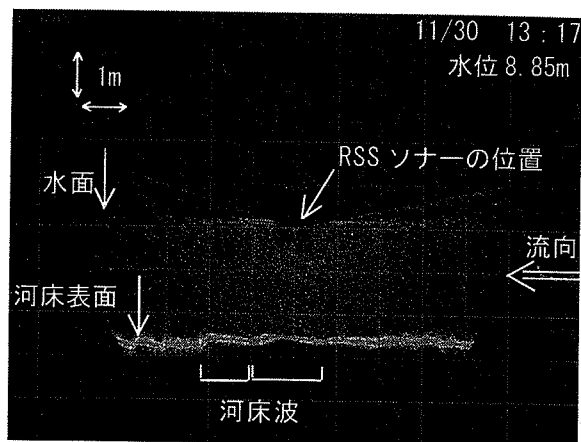


図-10 RSSソナーで観測された河床表面と水面の縦断形状

表-2 河床波の諸元一覧表

No.	波長 (cm)	波高 (cm)	速度 (cm/s)	単位幅 流砂量 ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)
1	120	7.5	0.13	0.30
1'	312	16	0.17	0.82
2	125	5	0.14	0.21
3	240	10.5	0.05	0.15
4	265	6	0.14	0.25
5	265	7	0.22	0.47
6	160	7.2	0.14	0.30
7	230	6.3	0.10	0.19
8	158	10	0.08	0.24
9	100	6.7	0.13	0.25
10	320	7.7	0.06	0.15
11	105	6	0.12	0.22
12	120	8	0.09	0.20
13	120	6.4	0.06	0.12
14	167	5.6	0.14	0.23
15	150	11.8	0.08	0.28
平均値	185	8.0	0.12	0.27

データは 20 秒～60 秒程度の周期で 2N～5N 程度の変動を繰り返す、その振幅は水位の高い時の方が大きい。洪水時の水面では、河床や河岸から渦が発生していたことから、この渦によって荷重計上面にかかる力が発生したことが一因と考えられる。図-8 から単位時間・単位幅あたりの掃流砂量を求める際には、荷重計の測定精度を考慮し、30N 近傍までのデータ (図-8 の黒丸大) から最小自乗法により傾きを算出し、荷重計の直径 22cm で割ることにより各時刻の値を求めた。その時系列変化を図-9 に示す。同図には洪水時の水位と、RSS ソナーから得られた河床高 (トレンチ位置と同一地点データではなく、同一横断測線上の 4m 左岸側に離れた位置における値) についても同様に示した。同図より、掃流砂量はばらつきはあるものの、約 $0.1 \sim 0.4 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ の範囲に集中している。掃流砂量と河床高変化の関係については、あまり明確な相関が見られなかった。

RSS ソナーで観測中のモニター画面の一例を図-10 に示す。同図は 13:17 時点の河床表面と水面の縦断形状を示したもので、これから河床波の存在が確認できる。RSS ソナーによる観測回数 (スキャン回数) は 236 回で、そのうち代表的な時点における 16 回のデータから河床波の波長・波高・移動速度を求めた。

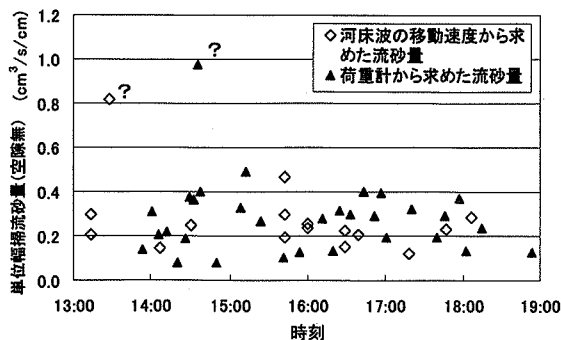


図-11 ソナーと荷重計から求めた流砂量の関係

さらに、河床波の縦断形状を三角形近似とし、浮遊砂がゼロの条件で河床波一波長の移動に伴う単位幅掃流砂量を、河床波の波高×移動速度× $(1-\lambda) \times 1/2$ (λ :空隙率)として求めた結果も表-2に示す。これより、観測期間中には波長約200cm、波高約8cmの河床波が、約0.1cm/sの速度で移動していたことがわかる。図-11は、河床波の移動速度から求めた掃流砂量と、荷重計からもとめた掃流砂量を時系列に整理したものである。この図より、両者の掃流砂量には高い整合性があるのがわかる。この河床波が砂堆とすると、その波長は平衡状態で水深の数倍程度になることが一般的である。観測時の水深(2~3m)からすると、10m程度の波長を有する砂堆が形成されるものと考えられるが、これに比べて本観測では約200cmとかなり短い波長であった。これは水深と粒径比 H/d や τ_* から推定すると、砂堆と砂澁の境界領域に位置しており、典型的な砂堆の発生領域ではなかったためと言える。

荷重計による測定は、固定点におけるものであり、河床波は下流に流下することから、両者の相対的な位置関係による掃流砂量への影響を検討する。図-12は、荷重計で求めた掃流砂量 q_b を無次元化した $q_{b*} (=q_b/u_*d_b)$ と τ_* ($d_b=6.0\text{mm}$ で算出)の関係について、荷重計と移動する河床波の位置関係(同図右上の河床波の位置を表す1~4)をパラメータとして示したものである。これより、値にばらつきはあるものの河床波の山の付近で掃流砂量が多く、谷の部分で少ない傾向が見られる。これは山本が示した実験水路での結果と同一の傾向である²⁾。

同図には、荷重計による観測結果以外に流砂量式として芦田・道上式(河床波有、無)も記述している。その結果、荷重計による観測結果は τ_* が同じでも q_{b*} には最大5倍近くの違いがあり、芦田・道上式(河床波有)よりやや小さい値を示した。

4. 結論と今後の課題

本研究では現地河川で水理量の大きな時における掃流砂特性把握の一環として掃流砂の重量を量ることによる掃流砂量測定方法を提案した。涸沼川の観測によって次のような有効性を見いだした。①流砂

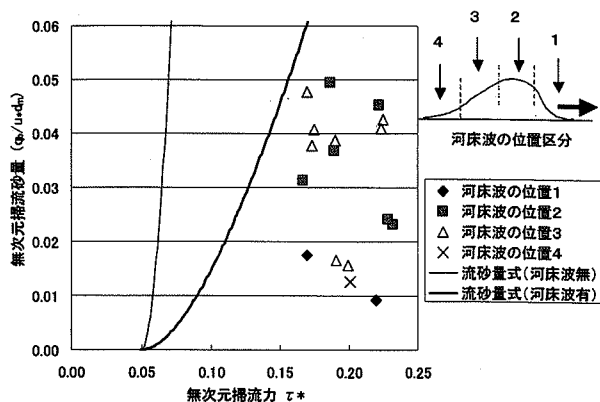


図-12 掃流力と流砂量の関係

量式やRSS ソナーで観測した河床波から求めた掃流砂量の結果と比較して妥当な傾向を示した。②掃流砂量は河床波の位置によって異なることを確認した。

本研究で得られた研究成果から、掃流砂観測に適用する際の課題として、次のことが考えられる。適切な観測時間、観測位置、観測手法等を決める際には、河床に形成される河床波の形態とスケールを把握することが重要である。特に、河床波のクレストやボトムによって掃流砂量に数倍程度の違いがあるため、平均的な掃流砂量を求める際には連続的な観測が必要となる。従来の掃流砂観測では、一時点の観測データがほとんどであり、構造上の問題があるため、その対策として少なくとも断続的(河床波の1波長の中で数回程度)な観測が必要と考えられる。その点、本研究のトレンチ方式は有効であるが、さらに精度を上げるためにはトレンチの規模を大きくすることや、掃流砂の洪水時の連続的な直接採取等が必要不可欠と考えられる。

長期的な河道の安定性検証の一環として河床変動計算が行われるが、その精度を大きく左右する掃流砂量については現地観測のデータは十分とはいえず、ばらつきが大きいのが現状である。実河川の洪水時の観測、特に水中の河床変動の把握は、ハード的に想像以上に困難な面があるが、避けては通れない重要な課題であると考えられる。

参考文献

- 1) Einstein: The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow, U.S. Dept of Agric, No. 1026, 1950
- 2) 山本晃一: 河道特性論, 土木研究所資料第2662号, 1988. 8
- 3) 三輪浩他: 混合砂の分級と河床波の形成過程の相互作用に関する実験的研究, 水工学論文集第35巻, 1991. 2
- 4) 喜澤一史他: 平成11年鶴川洪水観測による水理特性と河床波の考察, 第55回土木学会年次学術講演会, II-103, 2000. 9
- 5) 佐藤美和子: 山地流域における土砂動態の計測技術の開発, 北枝情報, Vol. 13, pp. 11-12, 2002. 9
- 6) 山本浩一: 河床変動観測へのスキニングソナーの適用に関する研究, 土木学会関東支部第31回技術研究発表会, 2004. 3

(2004. 4. 7受付)