

千代田実験水路における掃流砂量の直接計測の試行

Trial direct measurement for the quantity of bed load at Chiyoda experimental channel.

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 ○正会員 柏谷 和久 (Kazuhisa Kashiwaya)
 正会員 新目 竜一 (Ryuichi Shimme)
 正会員 島田 友典 (Tomonori Shimada)
 国土交通省 北海道開発局 帯広開発建設部 非会員 中島 康博 (Yasuhiro Nakashima)

1. はじめに

洪水時における掃流砂量の把握は、総合的な土砂管理の検討等に重要¹⁾である。しかしながら洪水中における掃流砂の直接計測は計測の困難さや危険性から直接計測せず、間接的に掃流砂の移動量等を計測する技術が数多く開発されている^{2,3)}。しかし、これら間接計測は掃流砂移動現象のうち、どの部分を計測しているかが不明である。本研究はこれら計測技術開発における実測データの提供を目的として、掃流砂の移動量計測および移動速度計測を試みたので報告する。

2. 作成した計測機器等

(1)ロードセル採砂器

ロードセルは荷重により生じる起歪体の電気抵抗変化計測を用いた荷重計で、天秤から産業用はかりまで様々な規格が市販されている。本研究では、最大重量 200kg、測定間隔 0.1kg ピッチのロードセルを使用した。併せて内径φ88mm、長さ 0.92m の SUS 製円筒を作成し、円筒底部には土砂の受皿を設置し、受皿と SUS304 製円筒を非接触構造とした(図-1)。ロードセル採砂器を事前に実験水路河床へ埋設し、円筒内に堆積した土砂の重量計測および計測時間により掃流砂堆積量の経時変化を計測するとともに、実験終了後、ロードセル採砂器を河床から掘り出し、円筒内に堆積した土砂の重量・比重・粒径が計測可能である。



写真-1 作成したロードセル採砂器

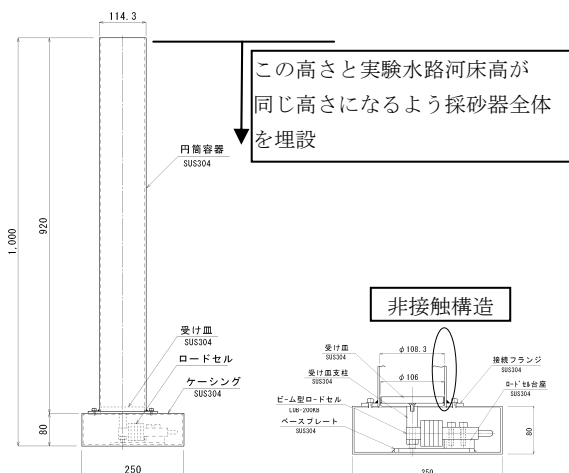


図-1 製作したロードセル採砂器の正面図および断面図

(2)PIT タグ付き掃流砂およびアンテナ

PIT タグは交通系 IC カード等で使用されている RFID (Radio Frequency Identification) 技術を用いており、魚類等の行動把握を目的としたバイオテレメトリ技術⁴⁾として活用されている。PIT タグは併用するアンテナ近傍を通過する際に ID および時刻が記録されるため、PIT タグを添付した掃流砂の流下距離および流下時間により掃流砂の平均移動速度が計測可能と考えた。

今回実験では、平成 26 年度実験時に採取した掃流砂の d50 粒径(図-2)を考慮し、Biomark 社製の PIT タグ(L=9mm、12mm)を用意し、事前採取した河床材にグラインダで溝掘りして接着した。また、アンテナは計測有効距離を考慮し、河床に敷設するタイプ(Cord antennas system)を使用し空洞ブロックにより河床に固定した。ただし、市販されているアンテナ延長などから、実験水路河床幅の半分程度の敷設となった。



写真-2, 3 PIT タグ付き掃流砂、アンテナ敷設状況

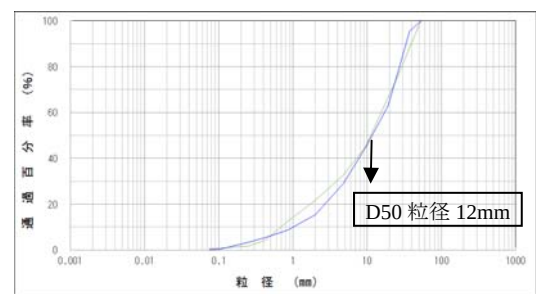


図-2 捕捉した掃流砂の粒径加積曲線

3. 試行概要

試行は十勝川水系千代田実験水路において H28.7.21 に実施した。通水流量は千代田分流堰第 4 ゲートの越流水深管理により $Q=10\text{m}^3/\text{s}$ 程度(図-3)とし、なるべく定常状態を維持するよう努めた(ハイドログラフの上昇期および下降期は除く)。

計測機器は、ロードセル採砂器および PIT タグアンテナの他、流速・水深等の水理量や流砂速度と流砂移動方

向計測のため aDcp (1,200kHz) による横断流心での定点観測を実施した。なお、各実験機器の機種選定、配置計画等に関して、実験水路における過年度実験の精密流量観測データ等⁵⁾を参照し決定した(写真-4、図-4)。

ロードセル採砂器は通水流量変動時の土砂混入を防ぐため、開口部を鋼製蓋により塞ぎ、通水流量が定常状態になった段階で開口した。

PIT タグ付き掃流砂は実験水路左岸側の鋼矢板裏から釣竿等により水路の流心部に投入した。個数は3粒径区分(4.75~9.5mm:100個、9.5~13.2mm:50個、13.2~19.0mm:50個)の計200個を2~3分おきに5個づつ、主に流心へ投入した。なお、粒径区分はPIT タグの長さ9mm、12mm および平成27年度に実施された河床材料調査による代表粒径(19mm)⁵⁾を勘案して決定した。

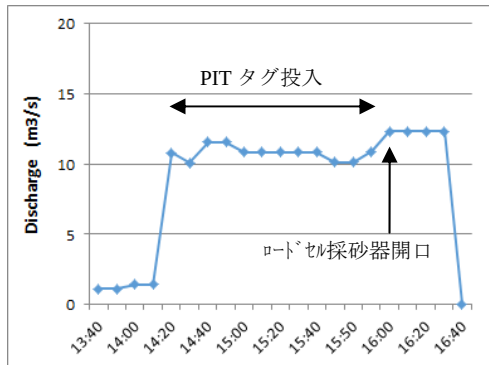


図-3 千代田実験水路 通水流量

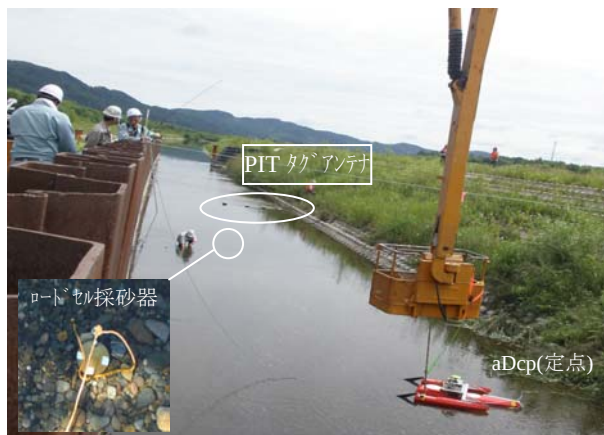


写真-4 機器配置状況 (通水前)



図-4 実験設備配置のイメージ図

4. 試行結果

(1) 水理諸量

・aDcpによる水理量

表-1 は、今回計測した水理量と参照した過年度の水

理量である。粗度係数は、実験水路において平成27年度に実施⁵⁾された精密流量観測($Q=11.7\text{m}^3/\text{s}$)で算出された数値、代表粒径および水中比重は平成26年度にロードセル採砂器で採取した掃流砂から算出した数値である(図-2)。また、表-2 は観測した水理量等により芦田・道上の式⁶⁾およびMeyer-Peter・Mullerの式⁶⁾などから算出した単位幅あたりの掃流砂移動量および掃流砂移動速度である。

水面勾配はaDcp計測(SP635)平均水位と実験水路水位観測所(SP1304.8)観測平均水位により算出した数値である。なお、実験前日までの降雨により、十勝川本川水位が平常時より上昇しており、十勝川本川と実験水路下流部の合流点の水位も上昇したため、水面勾配が実験水路平均河床勾配約1/500よりも緩い結果となった。

表-1 今回計測の水理量 (下線は参照数値)

流量Q	水深h	流速u	水面勾配	フルード数
11.7m³/s	1.06m	1.62m/s	1/837	0.50
粗度係数	代表粒径	水中比重	流砂速度	
0.039	0.012m	1.62	2.7cm/s	

表-2 推定される掃流砂諸量

摩擦速度	限界摩擦速度	無次元掃流力	無次元限界掃流力
0.100m/s	0.099m/s	0.053	0.051
単位幅あたり掃流砂移動量 ⁶⁾			掃流砂移動速度 ⁷⁾
7.8E-06 m³/sec/m			0.4cm/sec
(MPM) 掃流砂移動量 ⁶⁾			
3.3E-06m³/sec/m			

(2) ロードセル採砂器による掃流砂移動量

図-4 はロードセル採砂器で捕捉した掃流砂重量の時間変化である。

計測を開始してから約21分(計測開始16:10、満砂16:31)で満砂になったと推定される。

満砂までに要した時間、ロードセル採砂器に

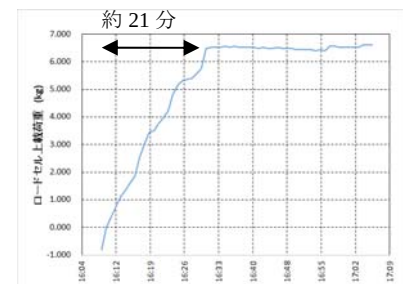


図-5 ロードセルによる重量計測結果

堆積した土砂量(円筒内体積)および掃流砂捕捉幅(直径0.088m)により推定される単位幅あたりの掃流砂移動量は $0.003\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ ($4.8\text{E}-05\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)となる。これは、表-2の掃流砂移動量(芦田・道上の式)の約6倍の値であった。

(3) PIT タグ付き掃流砂による掃流砂移動速度の推定

PIT タグ付き掃流砂は、SP620(アンテナまで50m)で散布を行ったが、散布後、20分以上経過してもアンテナ設置断面の通過が確認できなかった。そのため、散布位置をSP650(アンテナまで20m、SP661(アンテナまで9m) SP665(アンテナまで5m)に順次変更し、散

布を継続した。

表-3 は PIT タグアンテナで感知した掃流砂の流下距離、流下時間および推定される流下速度である。アンテナ設置位置までの流下が確認できた掃流砂は7個であり、平均流下速度は粒径 4.75-9.5mm で 0.317m/min(0.5cm/s)、粒径 13.2-19.0mm で 0.71m/min(1.2cm/s)となった。この速度は、既知の水理量から算出される掃流砂移動速度(0.4cm/s)と同程度であったが、aDcp 計測の流砂速度の約 19%・約 44%の値であった。

表-4,5,6 は、通水終了後、目視およびポータブル式の PIT タグアンテナ(写真-5)により通水終了後に回収した PIT タグ付き掃流砂の分布状況である。作業の結果、計 43 個回収することができた。なお、PIT タグ付き掃流砂は、主に河床表面で確認できたが、一部の掃流砂は深さ 10cm 程度まで埋もれていた。

表-3 アンテナ感知の PIT タグ一覧と流下速度の推定

ID	粒径分布(mm)	投入SP(m)	流下距離(m)	投入時間	タグリーダー通過時間	流下時間	流下速度 m/min
6030618	4.75 ~ 9.5	665	5	15:38:00	15:47:48	0:09:48	0.510
6030617	4.75 ~ 9.5	665	5	15:38:00	15:52:22	0:14:22	0.348
6030614	4.75 ~ 9.5	665	5	15:38:00	15:58:16	0:20:16	0.247
6030611	4.75 ~ 9.5	665	5	15:38:00	16:08:40	0:30:40	0.163
5373478	13.2 ~ 19	661	9	16:02:00	16:08:40	0:06:40	1.350
5373474	13.2 ~ 19	661	9	16:02:00	16:31:29	0:29:29	0.305
5373488	13.2 ~ 19	661	9	16:06:00	16:23:51	0:17:51	0.504

表-4, 5, 6 通水終了後 投入位置別の掃流砂確認状況
(数値は確認個数)

SP	620 ~621	621 ~622	622 ~623	623 ~624	624 ~625	625 ~626	626 ~627	627 ~628	628 ~629	629 ~630	630 ~631	631 ~632	632 ~633	633 ~634	634 ~635	635 ~636	636 ~637	637 ~638	638 ~639	639 ~640
流下距離 (m)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17~18	18~19	19~20
9.5mm ~13.2mm					1	1		1	1				1						1	1
13.2mm ~19mm			1			2	3		1			1		3						

SP	650 ~651	651 ~652	652 ~653	653 ~654	654 ~655	655 ~656	656 ~657	657 ~658	658 ~659	659 ~660	660 ~661
流下距離 (m)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11
4.75mm ~9.5mm								8			1

SP	660 ~661	661 ~662	662 ~663	663 ~664	664 ~665	665 ~666	666 ~667	667 ~668	668 ~669	669 ~670	670 ~671	671 ~672	672 ~673	673 ~674	674 ~675
流下距離 (m)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15
4.75mm ~9.5mm										2					
9.5mm ~13.2mm					1			3	2	2					
13.2mm ~19mm					2			1	2					1	



写真-5 ポータブル式の PIT タグアンテナ⁸⁾

5. 考察

①ロードセル採砂器による掃流砂移動量の計測

ロードセル採砂器により、掃流砂の直接採取および満砂までの時間を計測可能であることが確認できた。これら計測結果により、単位幅あたりの掃流砂移動量の計測

の可能性が示唆された。

②PIT タグ付き掃流砂による掃流砂移動速度の計測

PIT タグを装着した掃流砂および PIT タグアンテナの併用により、掃流砂の平均移動速度の計測が可能であることが確認された。一方、課題もいくつか確認された。

今回は、河床に敷設するタイプのアンテナにより計測を行っている。PIT タグの感知有効距離は約 30~50cm(カタログ値)で、実験水路の既往実験による小規模河床波の最大落差約 20cm より大きいため採用したが、実験前の稼働テストでは有効距離が約 10 cm となった。これは、アンテナ出力の水中減衰によるものか、PIT タグを掃流砂に埋め込んだことによる感知能力減衰によるものかは不明である。

また、同一の PIT タグをアンテナが連続感知してしまうことも多発した。今回使用した PIT タグアンテナは複数 PIT タグが感知範囲内にあると一つの ID のみを記録してしまうため、アンテナ上を通過した掃流砂全てを感知できない。このため、PIT タグ付き掃流砂が他の掃流砂の転動や堆積に巻き込まれアンテナ付近に残留した場合や、アンテナ固定ブロックに引っかかった場合、同一 ID のみを記録し、他の PIT タグ付き掃流砂の流下が感知されなかった可能性がある。

さらに、PIT タグアンテナの延長が短く、実験水路横断幅 8m のうち、約 3m しか敷設できなかったため、左岸を流下した掃流砂を感知できなかった可能性がある。

③掃流砂移動量、移動速度の実測値と算出値の相違

本研究では、掃流砂移動量および移動速度を実測することができたが、サンプル数としては極めて少ないため算出値の比較は難しい。ただし、実験水路の特性などから推定できる不確定要因を下記に示す。

・実験区間内の背水影響

実験水路の通水流量は分流堰からの越流水深で制御されており十勝川本川水位の影響を受けないが、下流合流点水位は本川水位の影響を受ける。表-7 は、平成 27 年 7 月 28 日に実験水路で計測された水理量である。通水流量および流速は今回実験と差異は少ないが、水深は今回観測値より低い。このため、本実験時には平成 27 年度実験時より多くの背水影響を受け、鉛直流速分布もしくは平面流速分布が平成 27 年度実験時と大きく異なっていたと推察される。

解決手法としては、実験区間上下流の水位計設置による水面勾配計測、aDcp 等による精密な鉛直流速分布および平面流速分布の計測が必要である。

表-7 実験水路における水理量比較

(上段：平成 27 年度⁵⁾、下段：今回実験)

流量※	水深	径深	流速※※	水面勾配
11.2m ³ /s	0.78m	0.65m	1.57m/s	1/148
11.7m ³ /s	1.06m	0.86m	1.62m/s	1/837

※流量は、平成 27 年度が実測値、今回実験が千代田分流水管理データから引用

※※流速は、平成 27 年度が断面平均流速、今回実験は定点観測 aDcp による点データ

6. 掃流砂直接計測の今後に向けて

本研究ではロードセル採砂器による掃流砂移動量の計測および PIT タグ添付掃流砂による掃流砂移動速度の計測を試行した。今後、実河川への適用などを考えた際の改良点を下記に示す。

- ・非定常流れによる掃流砂移動量の変動を計測するためロードセル採砂器の計測可能時間の延長

ロードセル採砂器は事前埋設が必要なため、実河川のような非定常流れで運用するには、計測可能時間を延長することで、より多くのデータ採取が可能となる。計測可能時間の延長を図る手法としては、下記が考えられる。

- ①掃流砂採取部の大容量化もしくは複数化（リボルバー形式）
- ②連続採砂ではなく、例えば毎正時採砂が可能となるよう、開口部開閉の遠隔操作化

- ・PIT タグ添付掃流砂の計測率の向上

今回の実験では、PIT タグ付き掃流砂を 7 個/200 個しか感知できなかった。このことを踏まえ、感知率向上の可能性のある改良点について、下記に示す。

- ①感知幅の拡大のため、より長い河床敷設アンテナ（Cord antennas system）の開発
- ②同一 PIT タグ ID を感知した場合のデータ棄却手法の開発
- ③感知有効距離がより長い PIT タグの導入

- ・利便性の向上

今回の実験では、河床に敷設するタイプの PIT タグアンテナを使用した。事前敷設が必要なため利便性が悪い。今回は準備できなかったが、水面に浮かべて使用するアンテナが市販されており、こちらを使用すればより簡便に計測が可能となる。

7. まとめ

本研究は掃流砂の直接計測技術の開発を目的に、ロードセルおよびバイオテレメトリ技術の流用による計測を試行した。その結果、掃流砂移動量および掃流砂移動速度の計測ができることが確認された。一方、課題も明らかとなり、今後は、取得したデータのさらなる解析、計測機器や手法の改良、異なる流量での実証を行っていく予定である。

8. 謝辞

本研究は、(株)田中三次郎商店さまから PIT タグアンテナの貸与および現地計測について、水理実験さまから実験準備および実験実施について多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1)国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準 調査編,第 16 章第 1 節-2,2014.4.
- 2) 萬矢敦啓ら：ADCP を用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法, 水工学論文集,第 54 巻,pp.1093-1098, 2010.
- 3) 鈴木拓郎,水野秀明,小山内信智,平澤良輔,長谷川祐

治：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究, 砂防学会誌 Vol.62, No.5, pp.18~26, 2010.

4)寒地土木研究所水環境保全チーム：河川工作物評価（魚介類対象）のためのバイオテレメトリー調査ガイドライン, 2016.8.

5)国土交通省北海道開発局帯広開発建設部：第 10 回十勝川千代田実験水路アドバイザー委員会資料, pp.31, 2016.

6)土木学会：水理公式集（平成 11 年度版）, P163.

7)M, Sekine. and H, Kikkawa : Mechanics of saltating grains. II, Jour . Hydraulic Engineering , ASCE , vol118 , 4 , pp.536-558 , 1992.

8)Biomark 社 <http://www.biomark.com/catalog/antennas/> から引用