

超音波を用いた転動粒子の追跡に関する水路実験

首都大学東京大学院 学生会員 ○藤塚慎太郎  
 首都大学東京准教授 正会員 横山勝英  
 首都大学東京大学院 学生会員 和田昌行

1. はじめに

近年、河川における土砂の流出・堆積により様々な問題が生じているため、土砂動態の把握は重要な課題である。しかし、掃流砂の計測については実用の域に達している手法はないため、本研究では超音波による新たな手法を考案した。河道では摩擦速度が増大すると河床材料が掃流し始め、河床波が発達するので、これらの様子を超音波センサーを用いてモニタリングした。

河床波を追跡しその形状変化から掃流砂量を推定する方法は、横山ら(2006)によって精度検証が行われているため、本研究では粒子速度について検討する。粒子速度は河床波が発達している状況ではあまり重要ではないが、平坦河床に移行した際には重要な情報を持つと考えられる。

2. 実験方法

図-1に計測のアイデアを示す。超音波は水中の浮遊粒子や河床に当たって反射する。得られる音響信号のうち反射強度は河床面を捉え、河床面付近の音波周波数の変調やノイズの時間変化は粒子の移動状況を表すと考えられる。そこで上流側と下流側に2組のセンサーを傾けて設置した。取り付け角度は10degと20degである。

実験水路は全長23m、幅1.2m、高さ1.2mであり、中央部に延長5m、厚さ0.4mの移動床区間を設け、粒径が0.6mm~1.2mmの砂を詰めた。超音波センサーは移動床中央部に設置し、表-1の条件で実験を行った。

3. 粒子移動速度の推定方法

図-2は河床面から6.00mmの位置における音響反射強度の時系列の一例である。河床面直上における反射強度は時間的に均整ではなく、転動する粒子群の運動に関する何らかの情報を含んでいると推測される。上流側と下流側の反射強度時系列がタイムラグを持って伝搬していれば、粒子速度が推定できると考え、相互相関解析を行った。解析の結果、図-3が得られ、ラグが1.8秒の時に相関係数が一番高くなり、ついで0.15秒の時に高くなった。

これをセンサー間隔(0.4m)より速度に変換するとそれぞれ0.117(m/s)、1.4(m/s)となる。ここで粗面の対数流速分布より、河床上20mmでの流速を推定すると0.23(m/s)となり、粒子の速度がこれを上回ることはないと考えられる。したがって、超音波計測から推

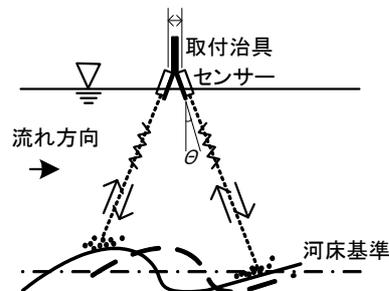


図-1 計測アイデア

表-1 通水ケース

通水	流量 m <sup>3</sup> /s	水深 m	流速 m/s	$\tau_*$	$u_*$ m/s	時間 min
予備	0~0.336	0.5				
1	0.373	0.5	0.623	0.20	0.052	72
2	0.373	0.5	0.623	0.20	0.052	84
3	0.373	0.5	0.623	0.20	0.052	85
4	0.373	0.5	0.623	0.20	0.052	86
5	0.403	0.5	0.666	0.30	0.064	62
6	0.403	0.5	0.666	0.30	0.064	78
7	0.45	0.5	0.744	0.49	0.082	66

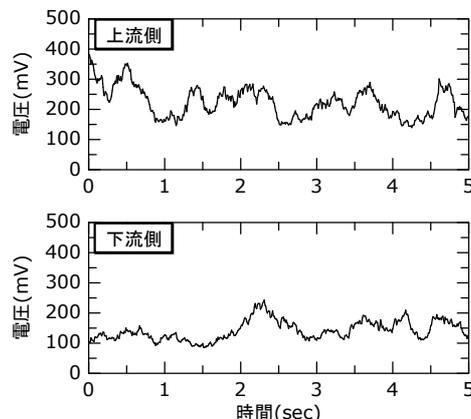


図-2 河床面直上の反射信号 (通水5・河床上6.00mm)

キーワード 超音波計測, 掃流砂, 粒子速度, ノイズ相関, 平坦河床  
 連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京大学院 TEL 0426-77-1111

定される粒子速度は 0.117(m/s)となった．この値は側面より観察された粒子速度と概ね一致しており，妥当であると考えられる．

4. 粒子速度の推定結果

移動床実験は約 1 時間行われ，この間に超音波計測が約 5 分間隔で実施されたため，全計測について河床面付近の反射強度を相互相関解析し，タイムラグから粒子速度を求めた．河床面からの距離は 3.00mm, 5.25mm, 6.00mm, 7.50mm の 4 パターンについて解析した．なお，得られた粒子速度が明らかに流速対数分布よりも大きい場合には次に相関係数が高いラグを採用した．

得られた結果の一例を図-4 に示す．図中の実線は超音波測量された河床変動の状況であり，▲印が推定粒子速度である．これより得られた粒子速度は 0.1(m/s)付近に分布していることが分かる．実際の流砂の移動状況は，河床の背(25 分～40 分)において最も速く，谷(13 分，50 分～55 分)では静止か渦巻いていたが，本解析ではそのような速度変化の傾向は見受けられなかった．このことは，河床面上の音響反射データが厳密な意味での粒子速度を捉えているわけでないことを示唆している．

そこで，得られた粒子速度を通水ごとに平均し，河床面からの高さごとに整理したところ，表-2 が得られた．表のメッシュ部分は相互相関係数が高かった粒子速度である．これより底面剪断応力  $\tau_*$  が上昇するほど河床から高い位置での反射信号が有意な情報を持っていることがわかり，実際の粒子の転動状況を反映しているといえる．

表-2 から抽出した最適粒子速度と断面平均流速との関係をプロットすると図-5 が得られた．図中の○印は砂粒が移動し始める限界の理論流速である．これより，断面平均流速が増大するにつれて粒子速度が増大する傾向が捉えられた．

5. 考察

解析の結果，通水ごとの平均粒子速度は実際の粒子速度と概ね一致しており，底面剪断応力が増大するほど粒子が高い位置まで跳躍している様子を捉えることができた．しかし，粒子があまり動いていない河床波の谷部でも粒子速度が計算され，粒子の跳躍高さ(5.25mm～7mm)も実際よりは大きかった．

以上より，超音波は粒子の個体を識別しているのではなく，底面付近の固液混相流を捉えていると考えられる．掃流砂センサーは群波長が 12mm の超音波パルスを発振し，また超音波は 6.8 度の広がり角で伝搬する．そのため，河床上のピンポイントの情報ではなく体積的な情報が得られ，これを解析することで粒子の平均的な移動状況が把握されると結論づけられた．

参考文献

山本晃一：沖積河川学，山海堂，pp. 383-423，1996  
 横山・和田・藤塚ほか：水工学論文集第 50 巻，pp. 159，2006

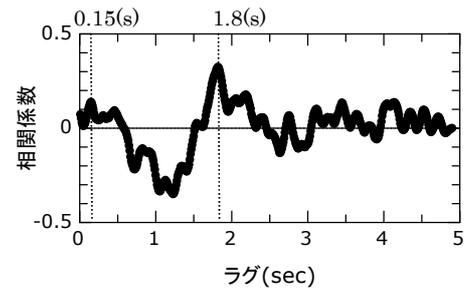


図-3 相互相関解析結果  
(通水 5・河床上 6.00mm)

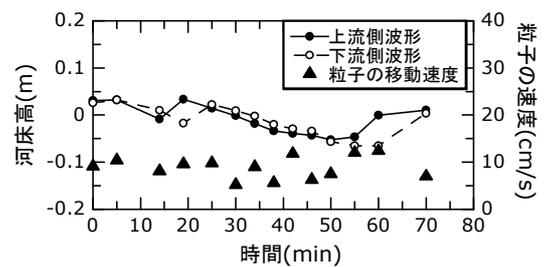


図-4 粒子速度と計測位置  
(通水 5・河床上 6.00mm)

表-2 粒子の平均移動速度 (m/s)

通水	$\tau_*$	河床からの距離 ( $\times 10^{-3}$ m)			
		3.00	5.25	6.00	7.50
4	0.20	0.105	<b>0.096</b>	0.083	0.102
5	0.30	0.085	0.095	<b>0.087</b>	0.078
7	0.49	0.118	0.124	0.142	<b>0.125</b>

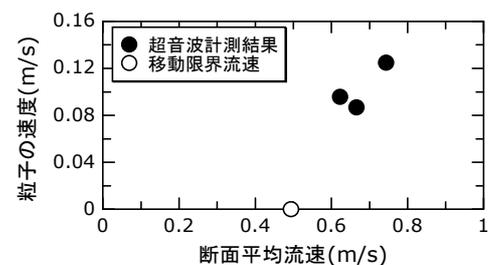


図-5 断面平均流速との比較