

超音波による河床波・転動粒子の追跡と 掃流砂量の推定方法

METHODS FOR MEASURING BEDLOAD DISCHARGE BY TRACKING DUNE
MOVEMENT AND BEDLOAD PARTICLES BY USING ACOUSTIC SENSING

横山勝英¹・和田昌行²・藤塚慎太郎³・末次忠司⁴・川口広司⁵

Katsuhide YOKOYAMA, Masayuki WADA, Shintaro FUJITSUKA,

Tadashi SUETSUGI and Hiroshi KAWAGUCHI

¹正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²学生会員 首都大学東京大学院 土木工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³東京都立大学 土木工学科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究室室長(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁵正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 河川研究室研究官(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

A hydraulic experiment was conducted on a moving bed channel to develop a method for measuring bedload discharge using Acoustic sensing. Sounds at a frequency of 960 kHz are simultaneously emitted at the upstream and downstream beds from two transducers; the detected sound is expected to reveal some information about the moving bed. The bed forms were surveyed continuously, and the dune shape and rate of progress were analyzed. The time series of the cross-sectional dune shape was clearly understood. The bed load discharge was calculated using the dune height and rate of progress based the assumption that the dune is triangular in shape; the estimated discharge from Acoustic sensing agreed well with the measured sand discharge. The signal strength propagation on the bed surface from upstream to downstream was analyzed as the velocity of moving particles on the bed. The estimated particle velocity of the bottom layer was explained by a logarithmic velocity distribution.

Key Words: Acoustic sensing, Bedload discharge, Dune movement, Particle velocity, Noise correlation

1. はじめに

河道の流砂量を精度良く計測することは重要な技術課題である。浮遊砂・ウォッシュロードに関しては採水分析, 光学式濁度計¹⁾, 差圧式濃度計²⁾, 超音波流速計³⁾など様々な技術が実用化されており, 当該河川の特徴や洪水の水理量などに応じて適切な方法を採用すればよいところまできている。

一方, 河床変動等を予測する上で最も重要な掃流砂に関しては, バケット型採取機, トレンチ方式などが古くから試みられ, 最近では衝突音式⁴⁾⁵⁾, 転倒マス式⁶⁾, 超音波計測⁷⁾⁸⁾などユニークな方法が提案されている。しかし, バケット型採取機は洪水中に沈める作業が相当危険であり, トレンチ方式は小規

模だと洪水初期に埋没してしまい, 大規模だと施工費等の面で困難である。また, 最近提案されている各種方法は精度や操作性などの面からまだ実用の域に達していないと思われる。

これらの方法のうち, 超音波を利用する技術は水面に装置を浸すことで水中の様子をリモートセンシングできるため, 安全性や簡便性などの面から将来性が期待される。そこで本研究では, 横山ら⁹⁾が提案した音響式SS測定装置を用いて掃流砂を計測することを目的として, 水路実験により精度を検証する。すでに開発済みのSS測定装置を活用することで, 掃流砂専用の装置を作成せずに済むため, ひとつの装置で水中の全流砂を把握することが可能になり, さらにコストを下げられる利点を目指している。

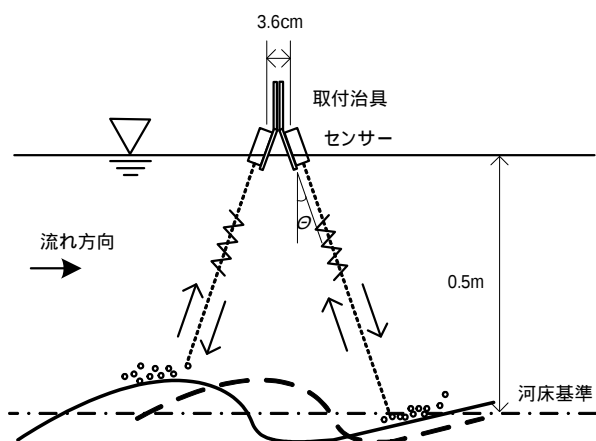


図-1 掃流砂計測のアイディア

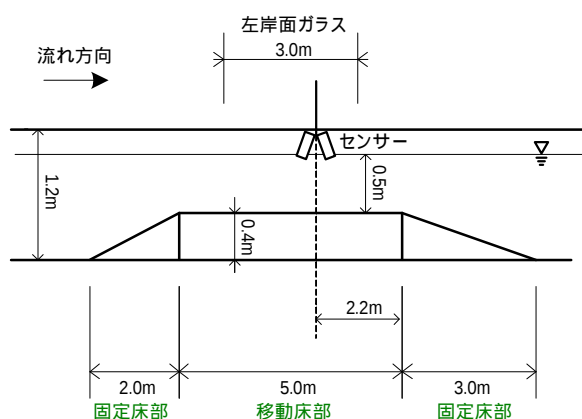


図-2 実験水路の概要

2．計測原理と装置

本研究では沖積河道のセグメント2-2領域を計測の対象として設定し、砂の挙動を把握することを試みる。掃流砂計測のアイディアを図-1に示す。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。そのため、河床波上の粒子の運動と河床波の前進状況を把握すれば、河道の掃流砂量を知ることができると考えられる。

このような水中の状況を超音波により間接的に計測する。超音波は水中の浮遊粒子や河床に当たって反射し、音波の反射強度は粒子の濃度や密度境界面を表し、周波数変調（ドップラーシフト）は粒子の移動速度を表すと考えられる。この2つの情報を同時に計測するために、センサーを垂直軸から任意の角度傾けて音波を照射する。2組のセンサーを下流側と上流側に傾けて設置すると、それぞれの中心軸上における河床までの距離を計測できるため、河床波の前進状況を把握できる。また、粒子の移動ベクトルに対して垂直に音波を当てても周波数変調は生じず、移動方向に音波を当てれば最大の変調が得ら

表-1 通水ケース

通水	流量 m ³ /s	水深 m	流速 m/s	τ_*	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

表-2 超音波測定ケース

通水	周波数 kHz	時間 (回数)	方法	round
1	960	5秒(500)	・横断方向に6点で移動計測 ・パルス数は4,16,64 ・取付角は10度及び20度	4
2	960	5秒(500)	・水路中央で固定 ・パルス数は4,16,64	30
3	960	5秒(500)	・取付角は20度	46
4	960	5秒(500)	・横断方向に6点で移動計測	14
5	960	5秒(500)	・パルス数は16で固定	12
6	960	5秒(500)	・取付角は10度及び20度	14
7	960	5秒(500)		12

れるため、センサーを中心軸から傾ける必要がある。ただし今回の実験ではドップラー解析は行わず、別の簡易的な手法により粒子速度を予備的に推定した。

音響装置は超音波センサーと信号受発信装置、AD変換装置、記録用PCから構成されている。本装置では周波数として200kHzと960kHzを装備しているが、音波の性質として波長が短い方が水中の懸濁土砂による濃度減衰が大きいものの、測距精度と速度の計測精度が良いため、今回は周波数として960kHzを用いた。本装置では960kHz信号の生波形をサンプリングするため、解析上の分解能は0.75mmになり、水中の詳細な変化や粒径が0.2～2mm程度の砂粒の動きを捉えることが可能である。なお、市販の魚群探知機や音響測深器でも測距は可能であるが、分解能が10cm程度であって詳細な形状を捉えるには不十分である。

3．実験方法

水路実験は図-2に示す国土技術政策総合研究所の大型二次元水路で実施した。水路のサイズは幅1.2m、高さ1.2m、全長23mであり、上流からの給水量と下流側の水位を調節することで所定の流速を作り出す。水路の全体はコンクリート製であるが、中央部の3m

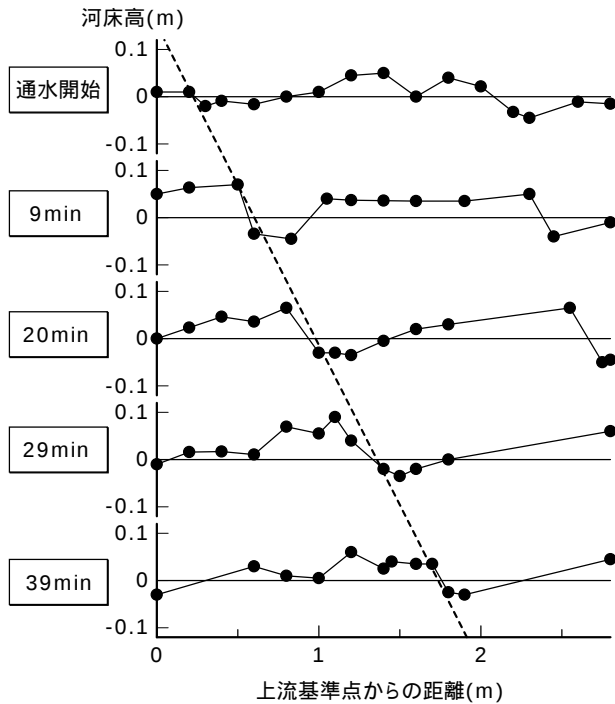


図-3 壁面付近河床波の一例

区間は観察用のガラス壁となっている．水路の中央区間に延長5m，厚さ0.4mの移動床を作成し，砂河道での掃流砂測定を想定して粒径が0.6～1.2mmの4号乾燥珪砂を敷き詰めた．また，移動床の前後で流れが滑らかに変化するように，上流側には延長2mのスロープを，下流側には延長3mのスロープを設置した．全体を移動床にするとセンサー付近の局所的な掃流砂量を計量できないため，区間を短く取ってセンサー上流側の洗掘量と下流側の堆積量を計量し，これをセンサー直下の掃流砂量とした．

実験の手順は次の通りである．定常流で砂の掃流状態を発生させ，水面から超音波測定を行うと同時に側面からビデオ撮影とスケッチを行う．さらに水理量として水位縦断，掃流砂計測断面近傍の鉛直流速分布を計測する．通水後には，移動床区間の河床高と移動床区間よりも下流に流出・堆積した砂量を測定し，単位時間あたりの流砂量を算定する．下流に堆積した砂はすべて回収し，移動床開始地点の洗掘箇所を埋め戻して次の実験を行うものとする．この際，移動床の河床波はならさない．

通水ケースを表-1に，超音波計測ケースを表-2に示す．無次元掃流力を0.2から0.49まで変化させて7通水を行った．通水時間は60～80分とした．超音波センサーの取付角は垂直軸から10度と20度の2通りとし，またセンサーを水路中央に固定する場合と横断測量の要領で移動計測する場合を試した．

なお，通水中には水面勾配や流速はほとんど変化せず，等流状態で実験は行われた．

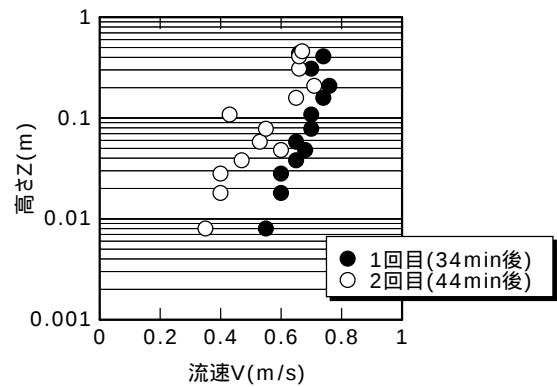


図-4 通水時の流速鉛直分布

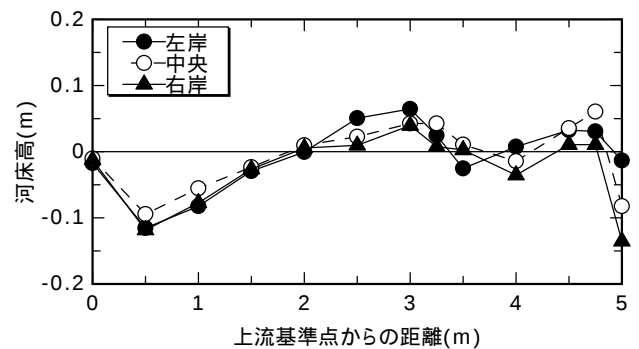


図-5 通水後の河床の様子

4．実験結果

(1) 河床波の移動状況

水路側壁から観察した河床波の一例を図-3に示す．波高 H_s が0.15m程度，波長 L_s が1.5m程度の波が図中の破線で示す速度で移動していることがわかる．河床波上では粒径の2～3倍の層厚で砂粒子が転動していた．河床波を山本¹⁰⁾の方法で分類すると，直径 d が1mmの一樣粒径からなる開水路で，水深粒径比 H/d が500，流速係数 ϕ が9，無次元掃流力 τ_* が0.2～0.4の場合には砂漣が発生し， τ_* が0.5の場合には砂漣から砂堆へと遷移する．

通水時の流速鉛直分布を図-4に示す．1回目の計測（開始34分後）よりも2回目（44分後）の方が底面から0.2mの範囲で流速が遅くなっている．流速の計測位置は図-3の3.5m地点であり，図中には示されていないが開始34分後では河床波の低減部斜面で計測されており，また44分後には谷付近で計測されていた．そのため後半では波高0.15mの山の陰になって底面付近の流速が低下し，低下率は底面に近づくほど大きくなり，底面より8mmの位置では流速が約50%になった．

図-5は通水終了後の河床の様子であるが，上流側で大きく掘れている．これは給砂せずに通水したことにより，上流側河床が掃流砂の供給源になったためである．連続給砂を行わない場合の流砂量を評価

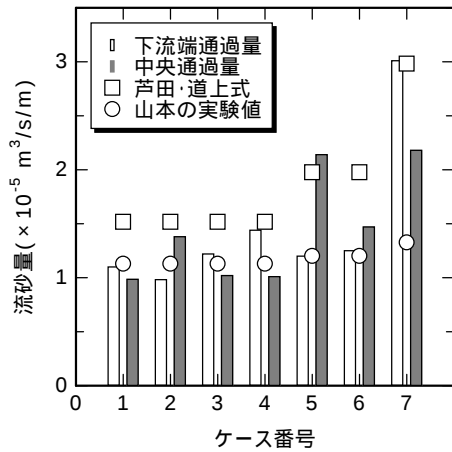


図-6 単位幅流砂量の比較

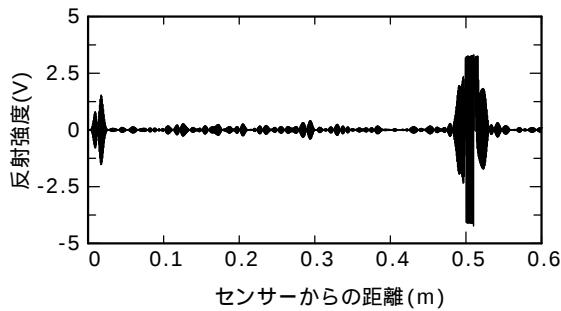


図-7 超音波の反射波形

する方法として、超音波計測断面（2.8m）よりも上流側の河床変動量から求める方法と移動床下流端からスロープに流出した量から求める方法の2つが考えられる。

図-6にこれらの方法によって求めた各ケースの単位幅掃流砂量を示す。なお、流砂量は砂の空隙率（0.4）を考慮して実質堆積に変換しており、参考のために芦田道上式による推定値と山本¹⁰⁾の実験値も示している。これより、本実験で得られた流砂量は既往の研究に概ね沿っており、移動床実験として妥当であることが分かる。2つの方法で求めた流砂量は最大で1.8倍異なり、 τ_b が0.3以上でばらつきが大きい。 τ_b が増大するほど河床波が大きくなるため、通水終了前に河床波の山が下流端を乗り越えたか否かで下流端堆積量の変動幅が大きくなる。そのため、本実験では上流側の河床変動量から得られた掃流砂量を採用した。

(2) 超音波計測の結果

超音波計測によって得られた信号波形を図-7に示す。センサーから0.5m付近に強い反射が見られ、この位置が河床であると判別できる。図-7のデータは100Hzで5秒間計測しており、一回につき500プロファイルが得られている。各プロファイルの電圧値を0Vで折り返して全てプラスに変換し、同じ水深の反射強度データを平均して1プロファイルを作成した。

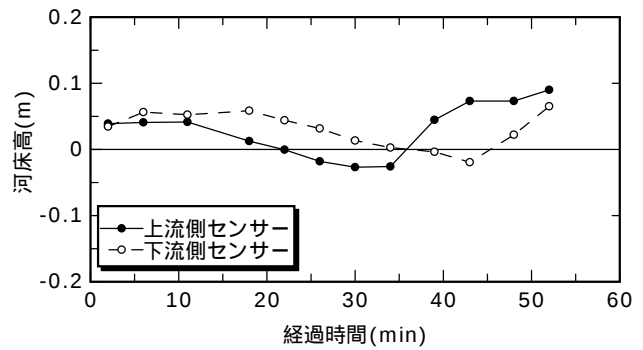


図-8 超音波による測量結果

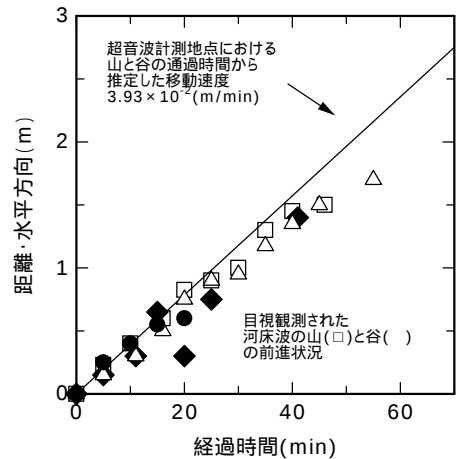


図-9 河床波移動速度の比較

さらに、しきい値（0.5V）を超えた場合に河床と判断して、センサーから河床までの距離を求め、センサー取付角度を考慮して水深に変換した。

得られた測量結果の一例を図-8に示す。通水開始35分で河床波の谷が上流で観測され、その約10分後に下流側センサーで捉えられている。河床までの距離と取付角度の幾何学的な関係によって、各センサーが計測している河床面上の2点間距離が求まるので、前述の時間差から河床波の移動速度が求まる。図-3によって得られる河床波の移動速度とガラス壁近傍の超音波計測の結果を比較したところ図-9が求まり、両者は概ね一致していた。

次に、横断測量の要領で計測した結果を図-10に示す。これは、河床横断形状の時間変化であり、色の薄い部分が河床波の山を表している。各測線において山と谷が交互に通過する様子が読み取れ、また山や谷が約0.2m離れた上流測線から下流へと伝搬する様子がわかる。さらに横断方向に形状が一樣ではなく、水路中央部（0.6～0.8m）において特に河床波の高低差が小さく、側壁では逆に高低差が大きくなっている。これは川幅水深比の小さい水路実験（本研究は2.4）でよく見られる状況である。

以上より、超音波を用いた精密測量によって河床波の移動状況を詳細に把握できることが示された。

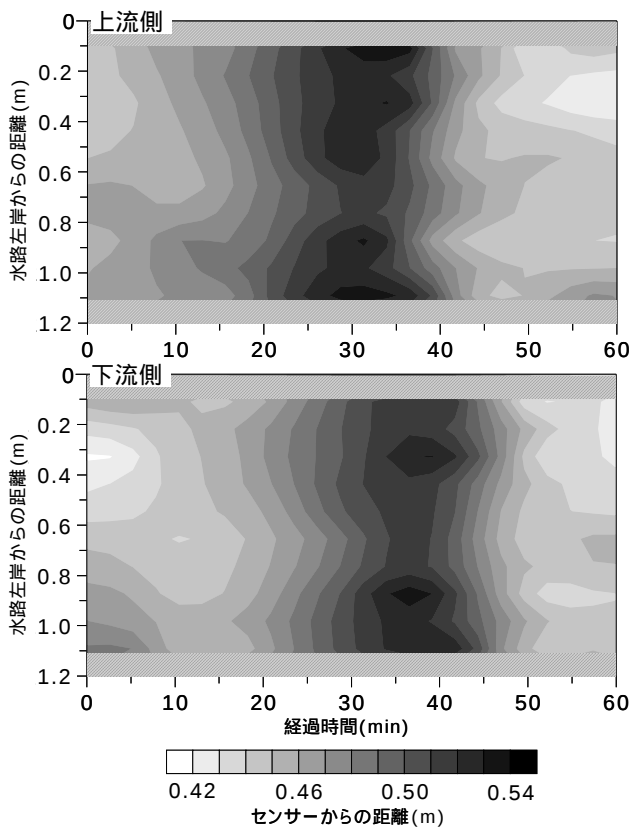


図-10 河床の経時変化

5. 掃流砂量の推定と評価

(1) 河床波追跡による掃流砂量の推定

河床波の形状を三角形と仮定し、波長 L_s 、波高 H_s の波が Δt 後に距離 l だけ前進したとすると、河床波の移動速度は次のように表される。

$$v = \frac{l}{\Delta t} \quad (1)$$

また、1波の通過時間を T とすると、波長 L_s は

$$L_s = vT \quad (2)$$

となる。波の縦断方向の断面積は三角形の仮定より次のようになる。

$$A = \frac{L_s H_s}{2} \quad (3)$$

以上をまとめると、単位幅掃流砂量は次で与えられる。

$$q_s = \frac{A}{T} = \frac{l H_s}{2 \Delta t} \quad (4)$$

これより、波高と Δt における移動距離 l が分かればよく、逆に移動距離 l をセンサー間距離とすれば、上流側センサーから下流側センサーに波が伝搬するまでの時間 Δt が分かればよいことになる。

そこで、各センサーで得られた河床高の時系列

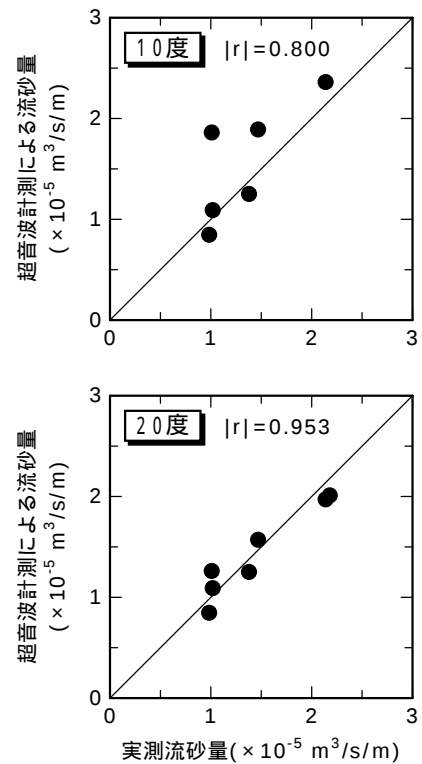


図-11 流砂量の相関図

データ(図-8)を多項式で近似して上流側波形と下流側波形の相互相関を求め、相関係数が最大となるラグを伝搬時間 Δt として採用した。求めた各数値から単位幅流砂量を計算すると図-11が得られた。超音波測量で推定された流砂量は実測値と概ね整合しており、本手法の有効性が定量的に示された。

なお、センサー取付角が10度の場合よりも20度の方が実測流砂量との相関が高く、相関係数が0.953となった。10度の場合は河床面での2点間距離はおよそ0.21mであり、20度では0.4mである。一方、河床波の波高は0.15m程度、波長は1.5m程度であるため、10度の場合は河床波の規模に対して計測点が接近しすぎており、ラグの推定精度が悪くなったと考えられる。したがって、一カ所にセンサーを取り付けて現地の河川で使用する際には、2点間距離 l が波高の2倍以上になるように水深と取付角度の関係を考慮する必要がある。

(2) 掃流砂粒子の移動速度

次に、河床波上の粒子移動速度を推定するが、本論文ではドップラー解析の前段階として簡易的な手法を試みる。河床波上の粒子の移動は時間的に完全に均整ではなく、何らかの不規則性を有している。そこで、近接した2地点からの超音波反射波には、粒子移動の不規則に関する情報が捉えられ、これが上流側から下流側センサーへと伝搬すると予想される。

5秒間に500回計測したデータから、河床面直上の反射強度を抽出し(図-12)、上流側の反射強度時系

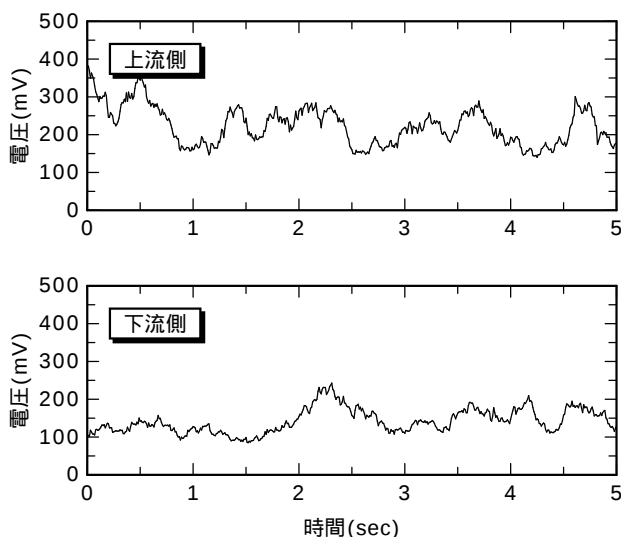


図-12 河床面直上の反射波

列と下流側の時系列を相互相関解析すると、図-13が得られた。ラグが1.8sのときに相関が最も高く、ついで0.15sとなり、これを流速に変換するとそれぞれ0.117m/sと1.4m/sになる。ここで、粗面の流速対数分布則から推定される流速は底上20mmで0.23m/sであるから、掃流砂の流速が0.2m/sを超えることはない想定される。したがって、図-12から推定される粒子移動速度は0.117m/sとなる。

映像から読み取られた粒子速度は約0.1m/sであったため、河床直上における反射波時系列の相関解析によって掃流砂の移動速度をある程度把握できるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では砂河床における掃流砂の移動状況と流砂量を計測する手法として、超音波による水中リモートセンシング技術について検討した。上下流2方向に傾けた2組のセンサーから超音波を発振し、精密測量をおこなうことで河床波の形状と移動速度を捉え、これから掃流砂量を精度良く計算できることを示した。また、近傍2地点における河床直上の反射強度時系列を相互相関解析することで、粒子の移動速度を推定できることを示した。

なお、河床波が発達している状況では、精密測量によって掃流砂量を推定出来るので粒子移動速度の情報はあまり重要ではない。しかし、掃流力が上昇して平坦河床に遷移した際には、掃流砂層厚と濃度、移動速度から掃流砂量を求める必要があるため、粒子の移動速度をドップラー解析によって高精度に推定する必要がある。

今後は、ドップラー解析を行うことと本装置を現地に適用することが課題である。

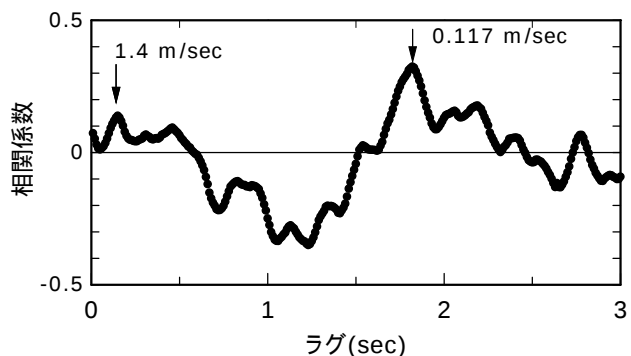


図-13 相互相関の解析結果

謝辞 本研究は河川環境管理財団河川整備基金「超音波による流砂計測手法の開発」(代表者:横山勝英)の補助により行われた。また、国土技術政策総合研究所の坂野章主任研究官(当時)には移動床実験の考え方についてご教授頂いた。水路実験では(株)建設技術研究所の二瓶功氏に、超音波センサーの製造については(株)光電製作所の松瀬隆哉氏にご協力頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)横山勝英:濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察,土木学会論文集, No. 698 / -58, 93-98, 2002
- 2)角哲也, 森田佐一郎, 越智隆志, 小宮秀昭:差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発, 水工学論文集, 第46巻, pp. 779-784, 2002
- 3)横山勝英, 宇野誠高, 森下和志, 河野史郎:超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1486-1490, 2002
- 4)桑村貴志, 宮藤秀之, 山崎久勝:音圧を利用した掃流砂観測手法の開発, 水工学論文集, 第46巻, pp. 631-636, 2002
- 5)小田晃, 長谷川祐治, 水山高久, 野中理伸, 宮本邦明:水理実験室におけるハイドロフォンを用いた流砂量計測, 水工学論文集, 第48巻, pp. 745-750, 2004
- 6)二瓶泰雄, 塗師隆生:河床内トラップ型簡易掃流砂計の試作, 河川技術論文集, 第11巻 pp. 327-332, 2005
- 7)上野鉄男, 宇民正, 木下良作, 鈴木篤, 左近裕之, 山崎隆洋, 三加茂利明, 奈島光宏:斐伊川における洪水時の流砂量計測の試み, 水工学論文集, 第43巻, pp. 707-712, 1999
- 8)山本浩一, 二村貴幸, 小川和彦, 坂野章, 日下部隆昭, 末次忠司:河床変動観測へのヘッド回転型サイドスキャンソナーの適用に関する研究, 河川技術論文集, Vol. 10, pp. 297-302, 2004
- 9)横山勝英, 梅田信, 山崎久勝:音響式SS測定装置開発に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp. 547-552, 2005
- 10)山本晃一:沖積河川学, 山海堂, pp. 383-423, 1996

(2005.9.30受付)