

山地河川における土砂移動現象への測域センサの活用

清水武志・吉永子規・藤村直樹・石塚忠範

1. はじめに

近年、レーザ距離計やデジタル写真から3次元形状計測を簡易に行うソフトウェアなどの新しい機器や方法により、誰でも容易に物体形状や地形を高密度の点群として取得可能となった。本稿では、産業用ロボット分野で利用されるレーザ距離計のひとつである測域センサを、砂防分野で対象とする山地河川における土砂移動現象へ活用するための実験と適用例を紹介する。

2. で測域センサの概要、3. で水中の砂礫堆積物への適用可能性の確認実験、4. で細粒成分土砂の混入の程度に応じた水面形状の計測可能性の確認実験、5. で室内実験や現地観測での適用事例を紹介する。

2. 測域センサ

1軸走査型の測域センサは、内部の反射板を高速で回転させ、赤外線レーザ光の照射角度を変化させながら回転面内に存在する対象までの距離を計測する光波距離計である。本稿に示す全ての実験および観測で、北陽電気株式会社製の測域センサ UXM-30LX-EW を使用した。これは、905 nm の近赤外線レーザ光を0.25度ステップで発射し回転面内の760点（190度走査）において距離（測距範囲0.1～30m）を計測して、物体形状を計測する機器である。1軸走査の場合、走査面内の物体形状が線として得られるため、これを断面と呼ぶことにする（測域センサによる計測方法のイメージは後述する実験の図-2参照）。1断面を0.05s（20Hz）で計測可能であることから、時系列的に詳細な断面変化を追跡可能である。

3. 水中砂礫堆積物計測実験

3.1 目的

測域センサが静水中に存在する砂礫・石の計測可能性の確認を目的とする実験を行った。

3.2 方法

高さ約1.5mの位置に測域センサを固定し、水平な地面に幅43cm、高さ16cm、奥行き32cm（内側）のプラスチック製の箱（以下、箱）を設置する。箱内の中央から一方は空とし、もう一方に数mmから数10cmの直径をもつ砂礫を20～40mm程度堆積させる（写真-1）。実験ケースは表-1に整理した。各ケースにおいて、測域センサで約10秒間計測を行い、出力された距離データの中央値を算出し、地面が水平になるようにデータを回転させて断面図を作成した。

3.3 結果

計測結果を図-1に示す。いずれのケースも箱の形状は、センサとの位置関係によって反射の仕方が変化するため歪が生じている。図-1aに示す最も単純なケース1の場合、断面における砂礫堆積厚は、表-1に示した定規の計測値と概ね同値である。この場合、箱の縁や砂礫堆積物の近傍（水平距離350から500mm付近）は多重反射などの影響と考えられるが、距離が変化し床に陥没や突起が見られ、正確な形状が計測できていない。砂礫堆積厚の3倍程度の水深の水を張ったケース2では、砂礫堆積物の形状が不鮮明である（図-1b）。この理由として、水面と砂礫堆積表面の2つの境界面によるレーザ光の反射や水中における散乱が考えられる。これは水面を大きく振動させると断面形状が乱れることから明らかである。距離が正確に計測可能か試すために水深は変えずに砂礫堆積厚を厚くにしたケース3では、ケース1と同様に砂礫堆積層の形状が明瞭に計測された（図-1c）。

この簡単な実験から、水面振動によるレーザの

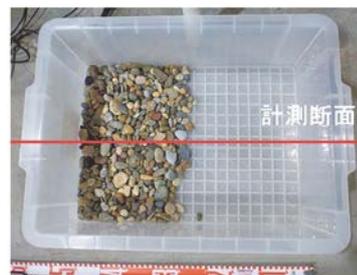


写真-1 ケース1の計測対象

表-1 実験ケース

	砂礫堆積厚 (mm)	水深 (mm)
ケース1	20	0
ケース2	20	70
ケース3	40	70

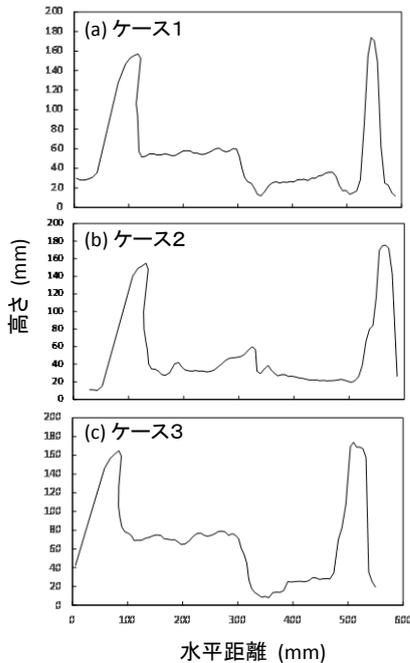


図-1 砂礫堆積物計測結果

乱れが小さい場合、水中に存在する砂礫が計測可能であるが、砂礫堆積厚が十分では無い場合、シグナルが弱く計測できないことが分かる。ただし、近赤外線は水に吸収されるため水深が大きい場合計測できない可能性が高い。

4. 土砂濃度変化に伴う水面計測実験

4.1 目的

山地河川においては、砂礫が掃流砂として流下するほか、細粒成分土砂は浮遊砂やウォッシュロードとして下流へ伝播する。細粒成分が豊富な流体の場合、測域センサによる水面からの反射強度が高いことが予測されるため、正確な水面形状を計測できる可能性がある。そこで、細粒土砂の混入の程度と水面計測の関係の調査を目的とした室内実験を行なった¹⁾。

4.2 方法

水平面に水槽を置き、鉛直上向き高さ2mの位置に測域センサを設置する (図-2)。細粒成分土砂の濃度を変化させて、測域センサの真下を0°として-1.25° ~ 1.25° の範囲における距離を計

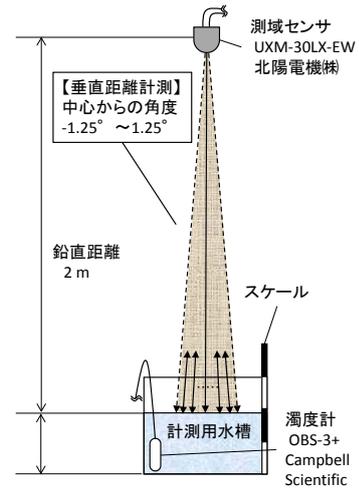


図-2 実験状況

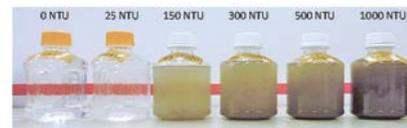


写真-2 濁度と土砂濃度

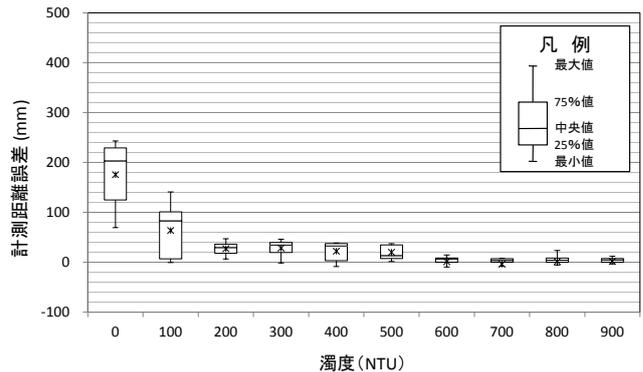


図-3 濁度と計測距離の誤差

測する。ここで、細粒成分土砂の濃度はD&A Instrument 社製の濁度計OBS-3で計測した濁度で表現する。濁度は流体を透過する光による光学的な指標であり、精製水1リットルにホルマジン1mgを均一に分散させた懸濁液の濁りが1NTUとして定義される。水に混合する細粒成分土砂は、50%粒径0.22mm、土粒子密度2.755g/cm³の火山灰を用いた。濁度の設定値は、0、100、200、300、400、500、600、700、800、900NTUの10段階とした。参考として写真-2に濁度と土砂濃度の関係を示す。測域センサによる距離測定は、火山灰が均質に拡散するように攪拌させ、濁度計が設定値を示すことを確認しながら水面が概ね静止するまで待ち、実施した。

記録された距離データにレーザ発射角度の余弦を乗じ鉛直距離に換算した上で算出した中央値を

計測距離とした。予め計測した測域センサー水面間距離と計測距離との差を計測距離誤差として評価する。

4.3 結果

図-3に計測結果を箱ひげ図で示す。横軸が濁度で縦軸は計測距離誤差である。0NTUの場合、3.と同様に、レーザ光は水面で反射するだけでなく床や水中でも散乱する。その結果、誤差の中央値は約 170mmで、ばらつきは25と75パーセントイル間を見ると約 100mmと大きな値を示す。100NTUでは、これらの値は小さくなるものの、大きな誤差とばらつきを示す。濁度が増加するにつれて、計測距離誤差とそのばらつきの幅がともに小さくなる。今回の実験では600NTU以上で、計測距離誤差が約5mm、ばらつきが約5mmを示した。このことから、細粒成分土砂が増加すると濁水表面からの反射が強くなるのが分かる。以上より、高濃度の土石流や土砂流では水面を計測して水深が計測できる。

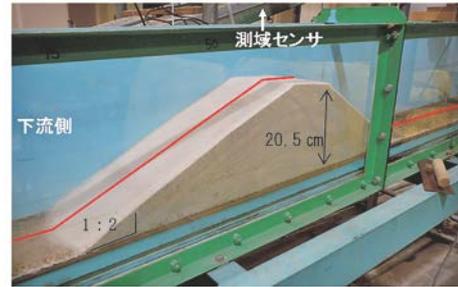


写真-3 天然ダム実験

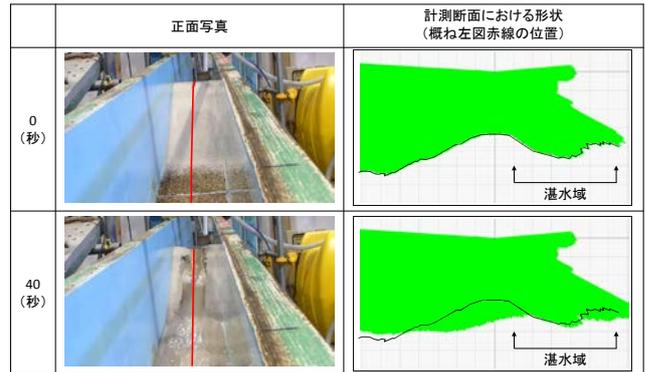


図-4 天然ダム越流侵食時の写真と計測結果

5. 適用事例

5.1 はじめに

3. および4. の実験より、測域センサーは高い時間分解能で断面形状を計測可能で、1) 水面が穏やかで浅い水深の清水であれば水中の土砂を計測可能であり、2) 細粒成分土砂の濃度が高い場合は水面形状が計測可能である。また、石礫や巨石が水面に存在すればレーザは反射される。これらの特性を踏まえ、天然ダム越流侵食の室内実験および現地観測の適用事例を紹介する。

5.2 天然ダム越流侵食時の土塊形状変化計測

天然ダム上流の湛水が越流すると、天然ダムの構成土塊が侵食され、下流域へ土石流が流下する。そこで、天然ダム越流侵食時の土塊形状変化を調べるために室内実験を行った。天然ダム土塊の形状変化を計測する場合、上方から撮影した動画や写真等を用いることが多いが、データ処理の簡素化と時間分解能の向上を目的として測域センサーを用いた。天然ダムの越流侵食時に水面は乱れないため3. のように水面下の土塊が比較的良好に計測可能と期待でき、さらに、侵食が著しく土砂濃度が高くなれば4. のように水面が計測可能と考えられるためである。

実験は写真-3に示すように水路内に天然ダム模

型を作成し、上流からじわじわと水を流入させ越流侵食を発生させるものである。天然ダム土塊の上方30cmの位置に測域センサーを設置し、水路に沿って計測断面(写真-3赤線)を設け越流中の土塊侵食過程を計測する。越流開始直後(0秒)と40秒後における、正面写真および断面形状計測結果を図-4左右にそれぞれに示す。右図ではレーザ光の通過域を緑で示す。つまり、緑と白の界面に物体が存在する。越流侵食開始前にレーザ光で計測された初期形状を黒線で示す。これを見ると、天然ダムの土塊部分および下流水路表面の状態は良好に計測された。しかし、湛水域内の形状は、水位計の存在や流入水による湛水域内の乱れなどの影響を受けて、実際の形状と異なった。図-4左の写真を見ると、越流開始後40秒で下方侵食および側方侵食によって天然ダム土塊天端の中央部から水みちが発達し、下流へ土砂が流下している様子が分かる。図-4右に示す同時刻の計測結果を見ると、天然ダム土塊部分では黒線の下方に緑のレーザ光通過域が、下流域では黒線の上方に白部分が見られることから、侵食後の土塊形状と、土石流水深が計測されたことが分かる。レーザ光の反射が土塊か水面のいずれによるかは明らかでないが、その点は従来の写真測量やビデオ解析でも水面下の土塊の形状は見えないため同様である。

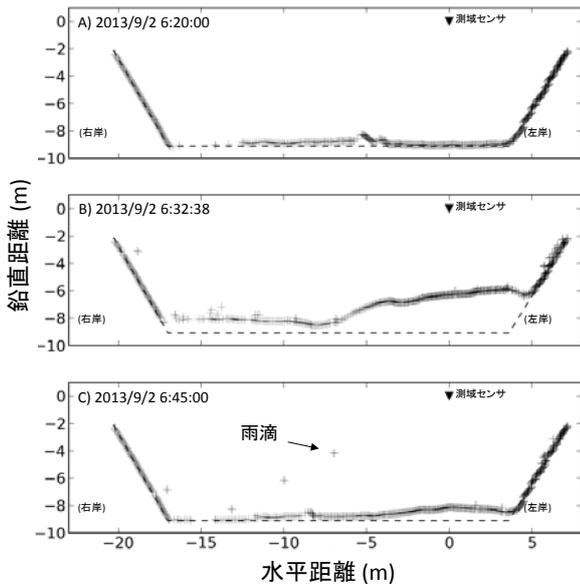


図-5 桜島における土石流計測結果



写真-4 図-5 B) の6時32分計測時の土石流映像 (大隅河川国道事務所提供)

しかし、測域センサを用いると20Hzの高時間分解能で天然ダム土塊侵食過程および下流の堆積過程の土塊の変化を距離データとして取得でき、より精密に形状変化を追跡できる。

5.3 土石流現地観測

土砂を豊富に含み表面に巨石や石礫が露出している土石流の表面形状を、砂防堰堤の水通しの上方に設置した測域センサで計測した。図-5には、桜島有村川流域で2013年9月2日に発生した土石

流の計測結果を示す。河道が屈曲している場所であるため、ピーク流量付近の6時32分において土石流が左岸に偏流している状態が計測できたことが分かる。同時刻の映像を参考に写真-4に示す。一方、図-5の6時32分および6時45分の右岸付近を見ると雨粒による反射が見られる。これは適切にデータを処理すれば除去できる。河道の屈曲の影響で偏流した土石流水面を連続的に計測することは一般に使用される直下の点を計測する水位計では不可能であり、測域センサの有効性が分かる事例である。

6. まとめ

ロボット産業で利用される測域センサを山地河川における土砂移動現象に活用するための事例を紹介した。新技術を使うことによって新しいデータが取得可能となるが、他分野の技術を導入するためには様々な工夫が必要となる。その参考になれば幸いである。

謝 辞

実験に当たりエコモット(株)の能和幸範氏と(株)東京建設コンサルタントの梶昭仁氏、桜島現地観測について国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所および桜島砂防出張所の関係各位にご協力いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 能和幸範、木佐洋志、山越隆雄、石塚忠範：土石流断面計測の精度向上に向けたセンサーの開発、第62回平成25年度砂防学会研究発表会、pp.B-278～279、2013
- 2) 大坂剛、高橋英一、國友優、山越隆雄、能和幸範、木佐洋志、石塚忠範、宇都宮玲、横山康二、水山高久：桜島における土石流荷重計による単位体積重量測定、砂防学会誌、Vol.65、No.6、pp.46～40、2013

清水武志



国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 研究員
Takeshi SHIMIZU

吉永子規



前 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 交流研究員
Shiki YOSHINAGA

藤村直樹



国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 主任研究員
Naoki FUJIMURA

石塚忠範



前 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム 首席研究員
Tadanori ISHIZUKA