

車両移動計測手法の河川堤防点検への適用に関する研究

Application of Mobile Measurement Method to Inspection of River Dike

藤木三智成	Michinari FUJIKI	(国際航業株 営業本部)
西山哲	Satoshi NISHIYAMA	(岡山大学大学院 環境生命科学研究)
井上浩一	Koichi INOUE	(国際航業株 技術本部)
堀川毅信	Takenobu HORIKAWA	(国際航業株 技術本部)
大石哲	Tetsu OOISHI	(国際航業株 技術本部)
鳥田英司	Eiji TORITA	(国際航業株 技術本部)
阿部亮吾	Ryogo ABE	(国際航業株 技術本部)
徳岡杜香	Morika TOKUOKA	(国際航業株 技術本部)

本論文は、レーザスキャナを車両に搭載したモバイルマッピングシステム (MMS : Mobile Mapping System) を河川堤防の点検作業に応用することを試みた成果をまとめたものである。具体的には、これまでは熟練技術者による目視巡視によって判断されていた堤防上の変状を、前記車両が堤防天端上を走行するという簡便な計測手法により、高精度で定量的に把握することの可能性を検証した結果を考察するものである。一連の試行結果より、水平 20mm、標高値 50mm 以内の高精度で堤防天端の沈下等の変状を時系列的に追跡できることが実証され、本研究で提案する MMS によって広範囲におよぶ河川堤防を効率的に点検できる手法が構築できる可能性を示すことができた。

キーワード：車両走行計測、河川堤防、3次元計測、連続堤防高縦断図 (IGC : T-12, C-0)

1. はじめに

我が国では、日降水量 100mm から 200mm 以上の大雨の発生する日数が増加する傾向にある。これは地球温暖化およびそれに伴う水蒸気量の増加といった世界規模の気象の変動が影響していると考えられており、今後も長期的には自然災害を引き起こす可能性のある大雨が多額の地域で増加することが予想されている。例えば、2015年9月には、関東および東北地方において24時間雨量が300ミリ以上という記録的な豪雨が発生するという激甚災害に指定される災害が発生した³⁾ことは記憶に新しい。この災害では国管理の5つの河川と都道府県管理の80の河川において、堤防の決壊、越水や漏水または溢水あるいは堤防法面の欠損・崩落などが発生⁴⁾し、広範囲の地域で避難指示、避難勧告が発令されるほどの影響をもたらした。河川堤防は、基本的に土で築造されることから、堤防内への浸水や越水による堤防の浸食に対して極めて脆く、広域の延長内で1箇所でも決壊するとその流域に多大な被害を及ぼすことから、平常時の維持管理において、決壊の恐れのある箇所を漏れることなく発見し、堤防の天端高を維持する等の対策を迅速に行うことが重要である。このように堤防等河川管理施設及び河道の点検要領においては、平常時の河川巡視は河川の区間区分に応じた適切な頻度とし、重点的に監視が必要な区間では、必要に応じて強化して、総観的に河川の状態把握を行うものとする策定されているが⁵⁾、作業は主に目視点検によるものであり、定量的

な判断をデータベース化することは困難である。また、定期縦横断測量も実施されるが、200m間隔で実施されており、連続した堤防全域において詳細な点検を行う対応に切り替えようとも、予算や人員の減少あるいは技術の伝承が困難といった課題を抱えており、増加傾向にある大雨に対処できる維持管理作業が実施できないのが実情である。

このような背景を鑑み、図-1に示すような車両にレーザスキャナおよびデジタル画像機器を搭載したモバイルマッピングシステム (Mobile Mapping System: 以下 MMS と記す) と称される計測システムを用いた点検手法の導入が、国土交通省において検討されている^{6),7)}。

これは同じく車両に搭載された GNSS、オドメータあるいは慣性計測装置 (IMU: Inertial Measurement Unit) 等によってレーザ照射時の自己位置および照射姿勢を計測することで、人的労力を要することなく、車両走行しながら



図-1 本研究にて使用する MMS の概要

迅速に河川堤防の3次元形状を把握できるので、効率的な点検作業が可能になるものとして期待されている⁸⁾。

このMMSによるレーザ計測に関しては、500mという遠距離の照射距離をもつレーザスキャナ機器を搭載したMMSを用い、走行速度などの各種計測パラメータに対するレーザ点群の計測精度を検証したもの⁹⁾、あるいは本手法を河川堤防の天端高の計測に応用した事例¹⁰⁾、さらには河川堤防計測時のレーザ照射機器の照射範囲を改善するための試み¹¹⁾などが報告されているが、時系列的に取得された河川堤防の3次元形状から変状箇所を抽出するための具体的な手法およびその検証結果を報告した事例は極めて少なく、その有用性が十分に議論されていない。本論文は、岡山県東部を流れる一級河川旭川水系百間川の堤防を対象に、2カ年にかけて計測した3次元レーザ点群から沈下、陥没あるいは不陸等を把握するためのデータ解析手法を考案し、さらにその結果から把握される変状の定量的な評価手法の妥当性を検証した結果を論じるものである。これにより、MMSによる効率的な河川堤防の維持管理手法の実用性を図るための基礎資料を提供できると考える。

2. MMSを用いた河川点検についての考察

2.1 MMSの概要

計測に用いたMMSの基本的特性を表-1に示す。MMSのハード構成は計測データを取得するデジタル画像機器とレーザスキャナ部、そして位置および姿勢を標定するGNSSとIMU部に大別できる。

本計測においては、河川堤防全体をレーザ照射範囲内とするため、最大500mの遠距離までの照射が可能であり、さらにレーザ点群から詳細な河川堤防形状を復元できるように1秒間に30万点の照射が可能なレーザスキャナを2基搭載した。IMUは車両走行時のレーザ照射機器の3軸方向の加速度と角速度の慣性データを計測するもので、それを積分することで機器の姿勢や方位が算出される¹²⁾。

なお、レーザは車両の走行方向に対して45度の角度で照射される。計測は堤防の天端を時速20kmで走行しながら実施し、1往復走行した各レーザを重ね合わせることでレーザ点群密度のさらなる向上を図った。

2.2 MMSによる計測データの特徴について

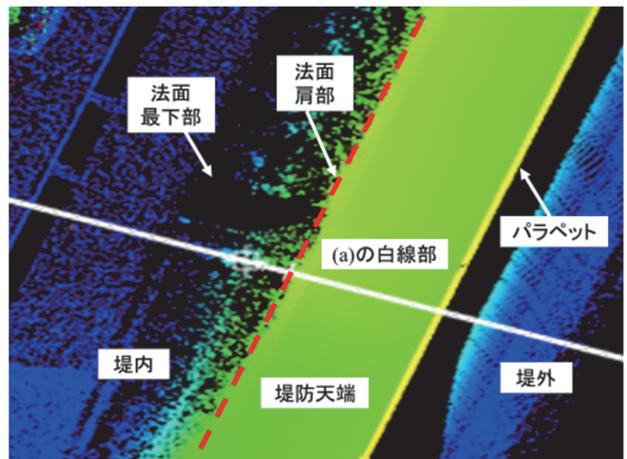
図-2は、本論文の計測対象の現場で取得された各計測データの一例を示すものであり、図-2(b)から分かるように、堤防法尻箇所までレーザは照射されており、堤防全体の形状を把握するために本計測に用いた遠距離照射および高密度レーザ機器による効果が得られている。なお図-2(b)は、パラペット設置箇所の高さを基準として、天端を含めて1.0m低い場所までを緑色で、それより低い箇所を青色で表現している。パラペット設置箇所では、当構造物によって遮られたために、パラペット背面にレーザ光が届かず、レーザデータが欠損する区間が生じているが、堤外

表-1 MMSの仕様上の基本性能

GNSS/IMU性能	
位置精度	水平0.02m, 高度0.05m (GNSS信号連続受信時)
姿勢精度	ピッチ, ロール角0.005° ヘディング角0.015°
デジタル画像機器	
スチルカメラ	500万画素: 4台
全方位カメラ	1600×1200画素: 1台
レーザスキャナ	
最大有効測定レート	30万点/秒, 最大300kHz: 2基
最大測定距離	500m (反射率80%の対象物) 180m (反射率10%の対象物)



(a) MMSによるデジタル画像例



(b) レーザ点群例. 標高によって色を変えて表示している。黒色部(色無し部)はレーザ点群が得られなかった箇所を示す。

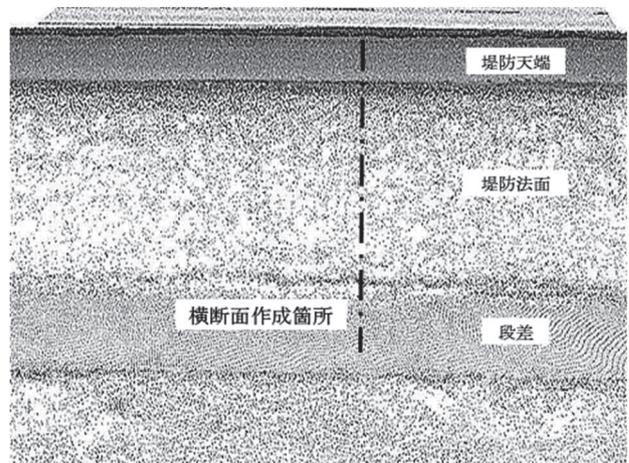
図-2 MMSによる計測データ例

地の法面でパラペットに遮られた箇所以外には、レーザ光が照射されていることが分かる。また図-2(b)においては、色の濃淡は1m²当たりのレーザ光の個数すなわちレーザ点群密度を表現しているが、堤防法面の一部にレーザ点群密度の低い箇所すなわち色が薄い箇所が見られる。レーザ

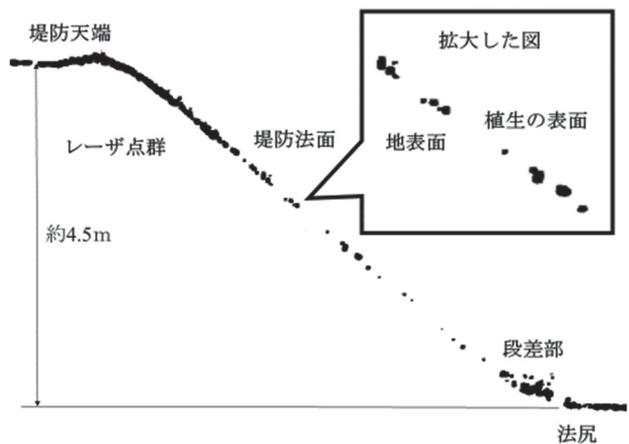
スキャナが約 2m の高さに設置されているため、幅 6m の堤防天端の中央部を走行する場合、鉛直方向から約 57 度以内の範囲はレーザ光が堤防天端に当たり、結果として堤防法肩付近にはレーザ光が入射されない。そこで堤防法肩部近くを走行することで、法面へレーザ光が入射されるように工夫するが、それでもなお勾配をもつ法面に対しては、レーザ光の入射角度が地表面に対して低角になるため、植生が繁茂している場合は、植生に反射されてレーザ光が地表面に到達しない。そこで MMS を法尻箇所を走行させ、そこで得られたレーザ点群を重ねることで法面のレーザ点群密度を高めることを試みた。その結果を、図-3 に示すような植生が繁茂している堤防法面を計測した結果から考察する。図-4(a)および(b)は天端を走行した場合に当法面に照射されたレーザ点群の分布であり、レーザが照射された箇所は黒い点で表現されている。また図-5(a)および(b)は、天端と法尻走行によるデータを重ねたものであり、明らかに法面上のレーザ点群密度が向上していることが分かる。横断面図で見たものが、図-4(b)および図-5(b)であるが、図-4(b)に示すように、天端走行からのレーザ点群のみの場合は、後の 3 章で考察する通り、堤防の形状を正確に表現するために必要な約 400 点/m²以上のレーザ点群密度を堤防天端付近以外、たとえば法面上で得ることが困難となる。一方、図-5(b)のように法尻走行による計測データを重ね合わせた場合は、堤防法面のレーザ点群密度を増加させ、植生やレーザ照射角度の影響によるレーザ点群の欠損部を解消することが分かる。しかしながらレーザ点群は植生の表面部と地盤面からの両者から反射されたものが混在したものとなっており、堤防法面表面の位置を正確に把握するのは困難である。すなわち法尻の走行によって法面箇所のレーザ点群密度を向上させる手段によっても、法面の変状を定量的に把握することの課題は残る結果になった。MMS の法尻走行が可能な箇所も限られることなどを勘案すると、MMS 計測によって河川堤防全体の形状の変化を捉えることは効果的な活用ではないと考えられる。「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」では、いくつかの点検項目が指定されており、法面に関しては、「表法面・表小段の亀裂、陥没、はらみだし、法崩れ、寺勾配化、侵食等はないか」を点検することになっているが、MMS は走行しながら測量できるという簡便な手法は実現できるものの、堤防全体の形状の変化から変状の発生を検出する手法として活用するのではなく、点検要領が定める「堤防天端及び法肩に亀裂、陥没、不陸等の変状はないか」あるいは「天端肩部が侵食されているところはないか」といった天端の計測データを用いて点検を実施する手法を図ることが有用であると考え¹³⁾。実際に図-2 の計測結果から、堤防の天端箇所では高密度にレーザ点群を取得できており、これを利用することで定期縦横断測量に替わる連続堤防高縦断図の作成作業などに MMS による計測を適用することが、本手法の利点を活用できる計測法と考える。そこで次章以降は、天端走行による計測データを用いた結果の考察を行う。



図-3 MMS によって計測した法面の状況

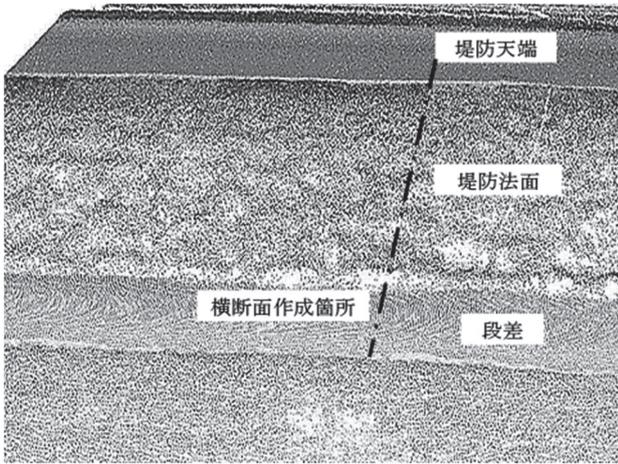


(a) 天端走行によるレーザ点群分布

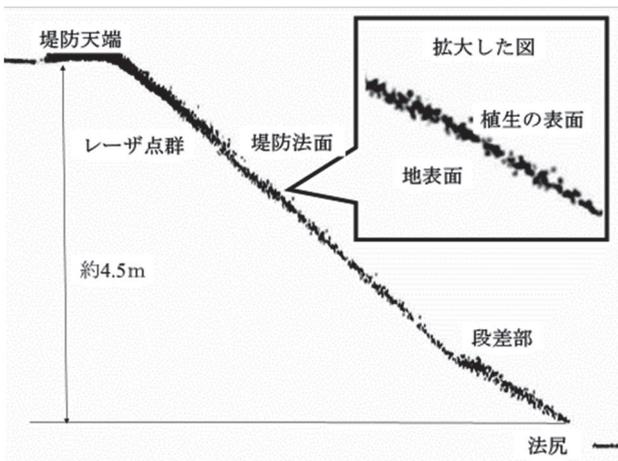


(b) 天端走行による横断面図

図-4 天端走行によるレーザ点群分布



(a) 法尻走行によるレーザ点群との重ね合わせ



(b) 天端および法尻走行による横断面図

図-5 天端および法尻走行によるレーザ点群分布

3. MMS を用いた堤防変状計測について

3.1 MMS による計測精度について

MMS は前述のとおり、走行中の自己の位置を車両に搭載した GNSS で求める¹⁴⁾。したがって、GNSS 信号の受信状況が良好な条件下でないとレーザ点群で計測される座標値の精度は保証できない。本計測での MMS では、既知点からの補正観測情報を利用して移動局に送信し、当移動局の位置をリアルタイムで測定する RTK-GPS (Real-Time Kinetic GPS) 方式の測位を用いるが、この手法では 4 個以上の衛星から信号を受信できなかった場合は Fix 解が求まらない。河川堤防での計測においては、衛星からの信号を遮る構造物が少ない場合が多いが、受信する衛星信号は時間によって変化し、その影響により自己位置の計測値の精度は安定しないことがある。それを改善するために、座標値をトータルステーション等で測量した標点を設置し、当標点に対応する箇所をレーザ点群またはデジタル画像より特定し、その値を用いて MMS 車両の位置や姿勢を再



図-6 実験で用いた精度検証用球体

計算して計測精度を確保する手法も用いられているが、河川堤防の計測においては、計測区間が長距離に及ぶため標点を設置することは計測作業の効率化を妨げるものとなる。そこで、本 MMS においては GNSS, IMU に加えてタイヤの回転数を計測するオドメータ (DMI: Distance Measuring Instrument) を加えた 3 種の計測値を複合させた測位計算を行なうことで、GNSS 信号の受信の不安定さを改善する。ただし IMU 計測値は車両の加速度や角加速度を積分して姿勢を算出するので、時間とともに蓄積する誤差が含まれる。そこでカルマンフィルタに代表される状態推定フィルタを用いた演算処理を導入し、各種センサによる位置や速度情報をリファレンスとして利用し、カルマンフィルタの出力値を慣性装置等の値にフィードバックするルースカップリング (loose Coupling) と称される演算技術を導入することで GNSS および IMU 信号の不安定さを解消し、補正用の標点を設置することなく高精度の計測が実施できることを試みる¹⁵⁾。これは POSLV といった名称で実用化されているシステムであり、航空レーザ測量において、使用するカメラの位置および角度を正確に計測することができるため、地上に標点を設置することなく、レーザ測量の処理を行うことを可能にしたという実績がある¹⁶⁾。しかしながら、搭載した機器への振動の影響が少ない航空機という移動体を用いた場合の実績であり、車両に搭載した場合に走行速度によって変わる移動中の上下動の影響がどのように現れるのかは確認されていない。さらに、前述のとおり、MMS は航空レーザ測量に比べて点群密度は高いが、レーザ光の地表面への入射角は低く、植生の影響を受けやすい。その際、MMS 車両の自己の位置を計測する精度が、レーザ点群密度や低入射角のレーザの照射距離と共に、どのように影響して表れるのかも検証されていない。そこで本研究では、河川堤防の計測に先立ち、導入した車両の自己位置を計測するシステムが、表-1 に示す仕様通りの水平 20mm、標高値 50mm を得るための計測条件を把握するための実験を実施する。実験は図-6 に示すように、半径 100mm の球体を道路から 10m 間隔に 9 本設置し、道路上を走行した MMS によってレーザ点群を取得する。MMS には 2 基のレーザスキャナが搭載されており、進行方向に対して 45 度の角度でレーザは照射され

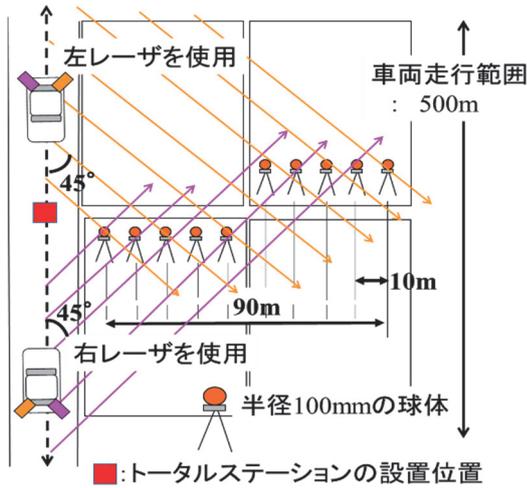


図-7 精度検証用球体の配置図

図-7は球体の配置とレーザー照射の方向を平面図で表したものである。車両から球体には、各走行時に左右のどちらか1基からのレーザースカナからのレーザーが照射されるが、往復走行によって左右のレーザースカナからの各レーザー点群を重ね合わせることでレーザー点群密度を高めることができる。この点群から球体の形を推定し、それを利用して中心座標を算定し、さらに別途同じ中心座標を±(3mm+3ppm×D:Dは測定距離、単位はmm)の測定精度をもつトータルステーションを用いて測量した際の値との差すなわち較差を求め、MMSによるレーザー計測の精度を推定した。図-8および図-9は、MMSの往復走行によって計測した場合の水平方向の座標値と標高の座標値の較差を示したものである。なお図-8および図-9ともに、MMSの走行速度を変化させ、それぞれの較差を求めた。ここで較差は式(1)のようにして求めた。

$$DIS = OBS - TV \quad (1)$$

ここで DIS: 較差, OBS: MMSによって計測した座標値, TV: トータルステーションで計測した座標値

前述のとおり、POSLVシステムはGNSSによる自己の位置を計測する精度の不安定さを解消する利点を有しているが、MMSに導入した際に車両走行速度やレーザー照射がどのように影響するのかわからなかった。トータルステーションによる測量値が正しいと想定した場合の結果ではあるが、図よりレーザー照射距離が50m以内であれば、車両の走行速度には依存することなく、前述の目標とする機器の性能上の計測精度が確保できることが分かる。機器の仕様上は、レーザーの照射距離は100m以上であるが、照射距離が50mを超えると較差が大きくなる傾向が現れる。これは照射距離が大きくなると、レーザー光は到達しているものの、球体を正確に認識できる照射点数が確保されないことによると考えられる。この理由を考察するため、図-8および図-9に示した計測とは異なり、往復ではなく片道走行時の左レーザーのみによる照射によって計測した結果が図-10である。較差は同じく式(1)を用いて、水平方向の精度を評価した。往復走行による計測結果と比

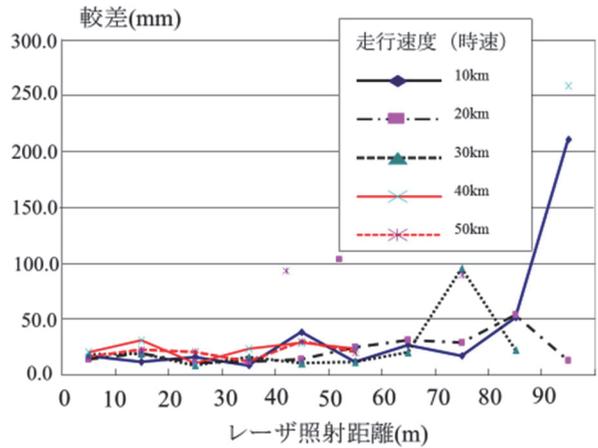


図-8 往復走行によるレーザー計測の水平方向の精度

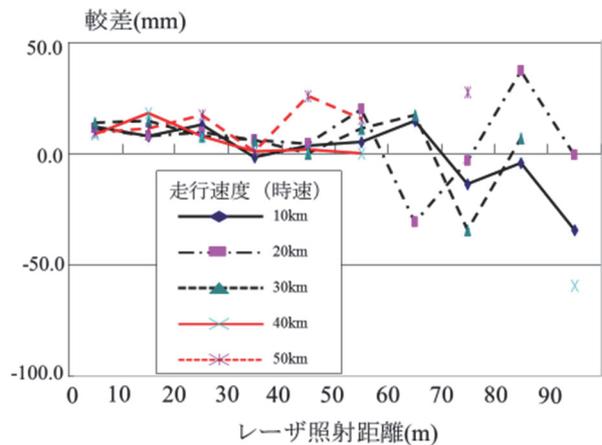


図-9 往復走行によるレーザー計測の標高値の精度

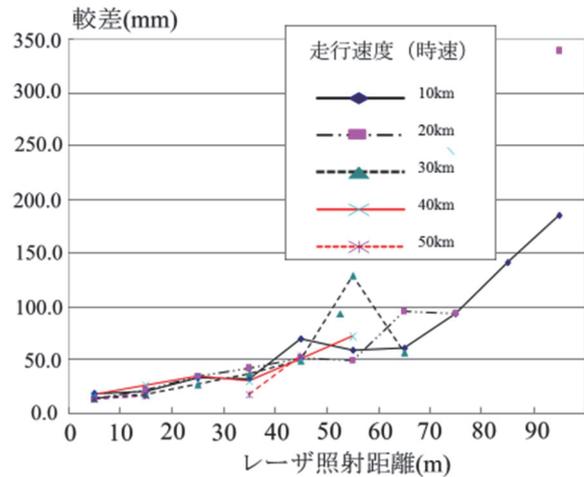


図-10 片道走行によるレーザー計測の水平精度

較して、レーザー照射距離に対して較差が大きくなっている。これらの結果より、照射されるレーザー光の個数が少ないと、対象物の形状の認識に誤差が発生しやすくなるため、計測精度が劣化すると考えられる。またレーザー点群密度は、車両走行速度に依存することも明らかになり、河川堤防の変

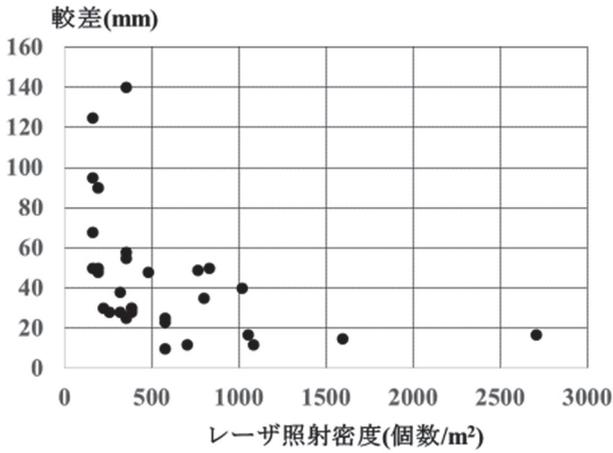


図-11 レーザ照射距離とレーザー点群密度の関係

状検出を目的とした MMS においては、計測の効率化との兼ね合いもあるが、走行速度を抑制してレーザー点群密度の向上を図った方が、変状の認識は容易になることが分かる。この片道走行による結果から、球体に照射されたレーザー光を 1m^2 当たり照射されるレーザー光の個数に換算してレーザー点群密度とし、それと較差の関係を示したものが図-11 である。図には、レーザー点群密度が小さくなると、較差が大きくなる傾向が示されている。これらの結果から、POSLV が有効に働いていても計測精度を確保するには、 400 点/ m^2 以上のレーザー点群密度が必要になり、そのためレーザー照射距離は 50m 以内、車両走行速度は時速 30km 以内で往復走行することが望ましいことが把握できた。

3.2 堤防天端の変状解析結果

本節では、1 度の計測値から堤防天端の変状を解析した結果をまず考察する。最初に MMS の河川堤防天端走行によって取得されたレーザー点群密度の分布を図-12 に示す。前章での結果から、堤防の形状を正確に表現するためには約 400 点/ m^2 以上のレーザー点群密度が必要となるが、天端部ではこの点群密度が確保できる一方で、法面から堤内にかけてレーザー点群密度は低下している。この図からも MMS の天端走行により取得したデータでは、堤防天端の計測値を活用することが効果的であることが分かる。

次に図-13 に、MMS によるレーザー点群より 10cm メッシュの TIN (triangulated irregular network: 不整三角網) モデルで内挿補間することにより作成した河川堤防の数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) の例を示す。この 3 次元的に復元された河川堤防モデルを用いて、連続堤防高縦断面図を作成する。縦断面図は 2500 分の 1 の河川基盤地図上において図-14 に示す 3 測線、すなわち河川堤防中央の位置 (図において C と表示)、さらにこの中央の位置から 1.5m (C+1.5 と表示)、および 3.0m (C+3.0 と表示) の位置にある計 3 測線の標高データを求めた。

図-15 に河口から $1\text{km}+600\text{m}$ ~ 2km の地点間の縦断面図を示す。堤防天端中央(C)および C+1.5 の 2 測線での縦断面勾配は $1/3500$ と推定でき、車両走行によって連続堤防高縦

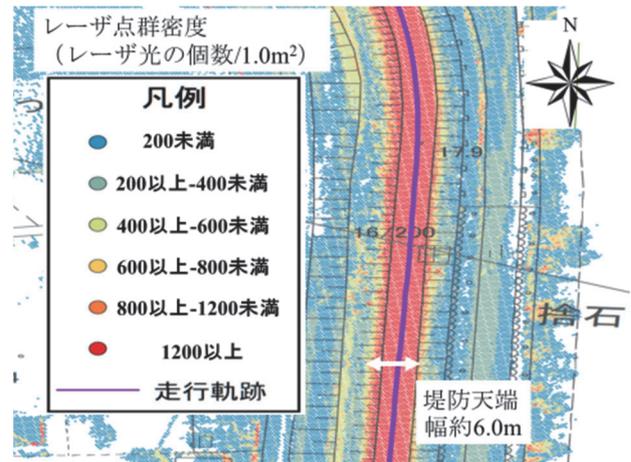


図-12 MMS の天端走行時のレーザー点群分布

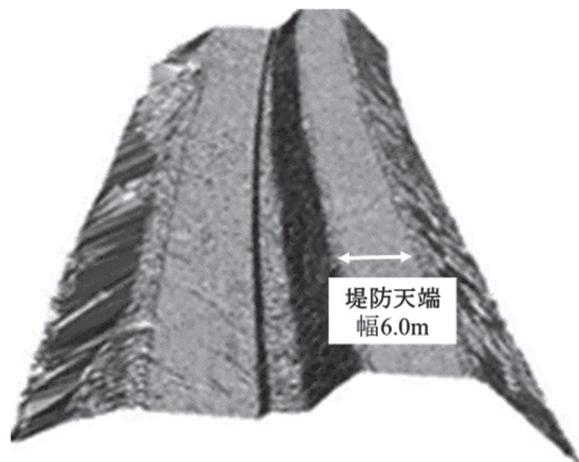


図-13 DEM によって再現された河川堤防例

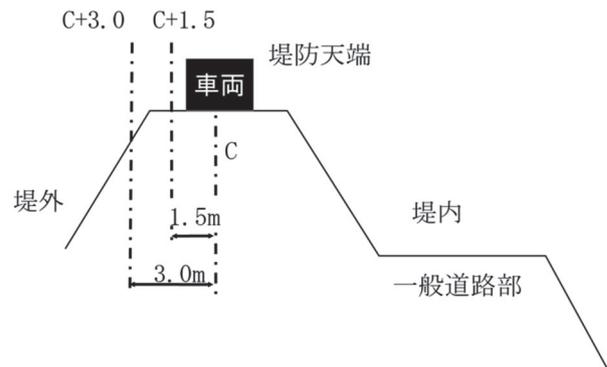


図-14 測線の設定状況

断面図が作成できることで、測量作業の効率化を示す結果を得ることができた。図の $1\text{km}+740\text{m}$ の位置において、C、C+1.5 および C+3.0 の位置に、前後の場所より約 0.1m 以上の急な標高差があり、凹状の地形があることが読み取れる。本計測の計測精度を検証する目的も含めて、当該箇所を目視にて点検した結果を図-16 に示す。図中に現位置の目視によって判断された窪地を青色の実線で示す。

「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」では、「天端肩部が侵食されているようなところはないか(あるいは

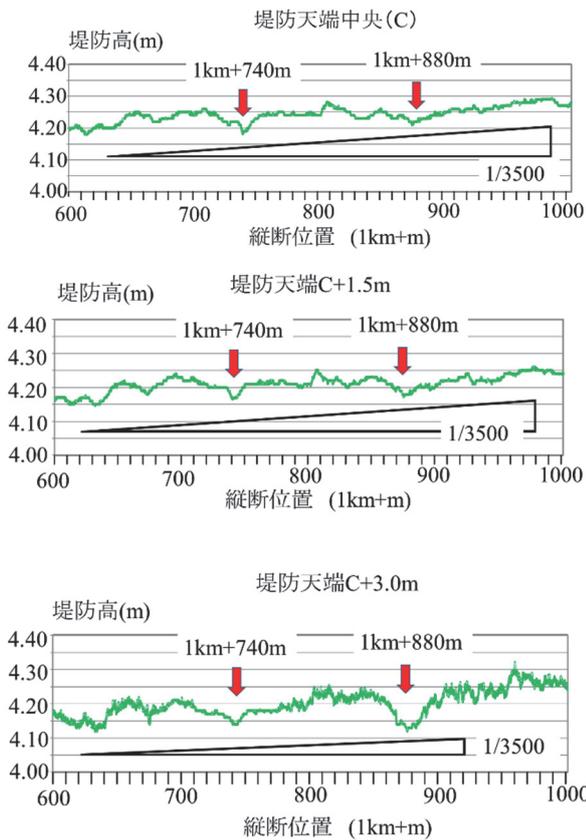


図-15 連続堤防高縦断図作成例

出水期前よりも進行していないか」を目視により点検することになっているが¹³⁾、実際の目視作業では定量的な評価は困難である。一方、本計測では車両走行により約50mmの窪地として当該箇所が定量的に検出できることが分かる。また図-15におけるC+3.0mの縦断図において1km+880mの箇所の縦断図に大きく凹状の変化が見られる。当該箇所は、前述の1km+740mの箇所とは異なり、堤防天端中央Cの縦断図では大きな凹状のものとしては観察されない。この状態を同じく現地にて目視確認したところ、図-17のように堤防天端から堤外地への進入路に相当する箇所であり、図-15の計測値を裏付ける結果を得た。すなわち河川基盤地図上で法肩と判断したC+3.0mは堤防法面内の一部であり、今回の結果はその形状を明確に捉えている。以上の結果から、レーザ点群から得られたDEMから複数の測線での連続堤防高縦断図を作成することにより、天端の状態をどの箇所がどのようになっているのかを定量的に評価する手法としての利点が実証され、レーザ点群から得られたDEMから複数の測線での連続堤防高縦断図を作成することにより、天端の状態を定量的に評価する手法としてMMSが活用できると考える。

3.3 堤防天端の2時期のデータ比較

次に、2013年と2015年に実施したMMS計測のデータを重ね合わせることによる変状解析結果を示す。前述の解析と同様に百間川河口の1km+600mから2kmの区間の右



図-16 目視による窪地の確認結果

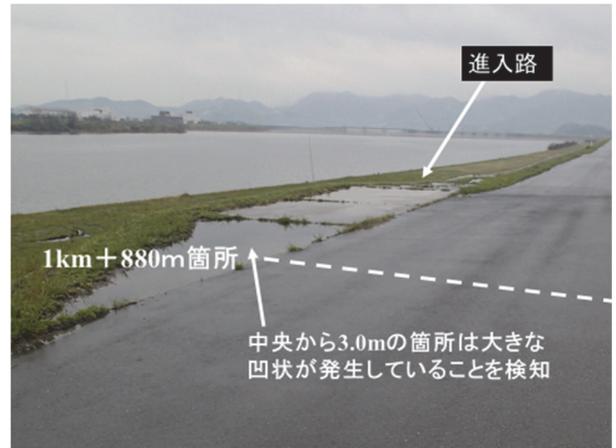


図-17 目視による進入路の確認結果

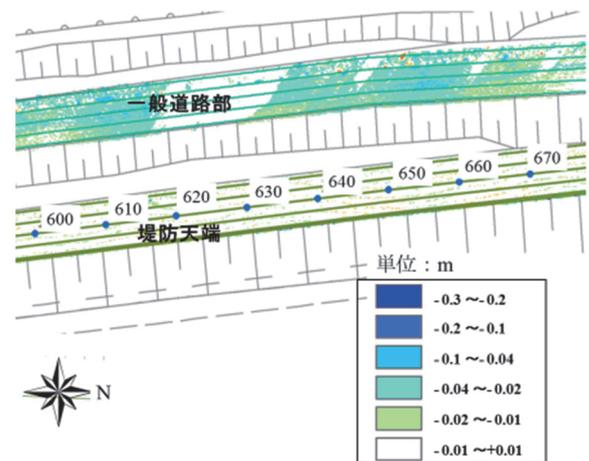


図-18 2時期の計測値を重ね合わせた際の標高値差

岸部堤防において、2500分の1の河川基盤地図上における図-14に示す堤防天端部の3測線、すなわち河川堤防中央の位置(図においてCと表示)、さらにこの中央の位置から1.5m(C+1.5と表示)、および3.0m(C+3.0と表示)の位置にある計3測線の標高データを考察する。

図-18は、2時期のレーザ点群の標高値を重ね合わせた結果の一例である。図-14に示す各測線において重ね合わせた際に生じる偏差の分布状態を各測線の値をつないだ

面的な値として示している。図-18に示すように、堤防天端部では白色の分布、すなわち±10mm以下の偏差内でDEMデータが重なり合っていることが分かる。当該箇所での堤防天端部では沈下等の変状の発生は、定期横断測量では確認されておらず、2時期の堤防天端部の計測値が±10mm以下で重なり合う本結果は、表-1に示す仕様通りの高精度計測ができていないこと、すなわち本計測手法の再現性が高精度で実現できることを実証している。また、堤防天端に隣接する一般道路部では20～40mmの標高差が検出されている。前述のとおり、堤内地での計測精度は堤防天端部に比較して高いとは言えないが、図-9から考慮される計測精度以上の標高値の変化が出現しており、沈下が発生している可能性があることを示している。

図-19は、図-15に示す2013年で実施した連続縦断堤防高図に2015年の計測結果を重ね、堤防高の経時変化を詳細に見たものである。2015年の計測結果と2013年の計測結果をそれぞれ赤色と青色で示す。変状が発生していないことから、赤色と青色の堤防高値はほぼ重なり合う結果となる。すなわち堤防天端(C)とC+1.5mの堤防肩部では、2時期の計測値が一致する結果となっており、沈下などの変状が出現していない状態を追跡できることを示している。C+3.0mの縦断堤防高図においては、少し堤防高の状態の変化が見られるが、これは法面を含んでいる箇所であり、天端走行の場合には法面部の一部に十分なレーザ点群密度が保証できないために発生したものと考える。

この2時期の標高についての計測値の重なり合いを詳細に見たものが表-2である。この結果より、堤防天端(C)とC+1.5m(堤防肩)の測線上の偏差は最大値でも20mm以下、ばらつきを示す標準偏差は2～3mmの値となっており、沈下が発生していない当計測対象箇所の状況が広範囲にわたって高精度で再現できている。C+3.0mの測線も他の測線に比べて精度が劣るものの、最大で30mm以下の精度で3次元モデルが再現できていることを示しており、一般的な航空レーザ測量による±150mmの精度と比較して、MMS計測では非常に高精度の面的な計測が可能であることを示している¹⁷⁾。また図-15で示した1km+740mの箇所にて発生していた窪地については、当該箇所の標高値には変化が見られないことから当該箇所の変状は進行性の状態でないことも明らかになり、これまでの目視による巡視と比較して、変状の経時変化を定量的に評価できる本手法の利点がここでも示されている。

さらに図-13に示したDEMを用いて2時期の標高値を重ねて横断面にした例が図-20であり、1km+600mの箇所の2015年度および2013年度の計測値を、それぞれ赤色と青色で示す。2014年には当該箇所の定期横断測量が実施されているが、その際堤防天端は2%勾配を持っていたことが報告されており、横断面の経時変化からも詳細に定量的な点検を行うことができることが分かる。このように堤防天端を走行するMMS計測により、これまでの目視による巡視では困難であった定量的な計測を、車両走行という効率的な手法で実現できることが実証できた。

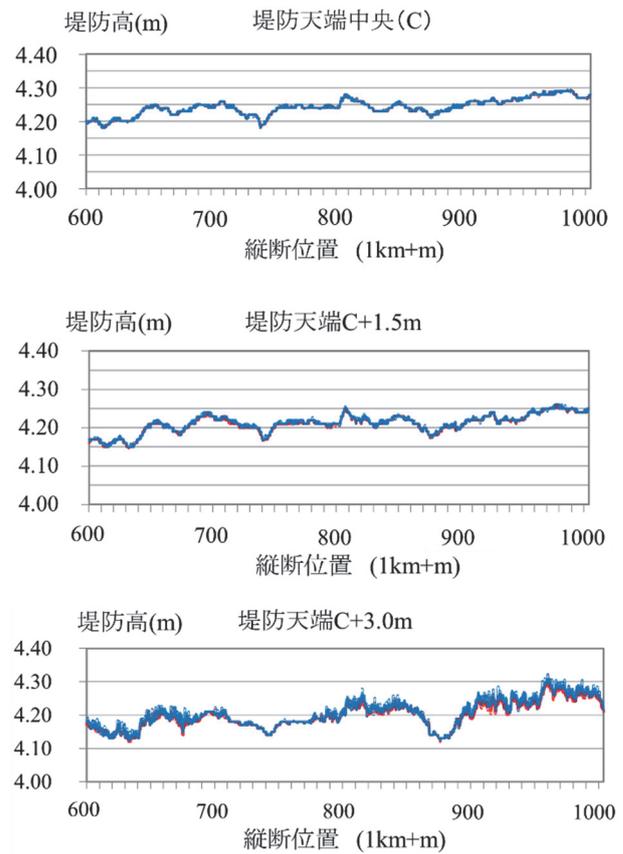


図-19 連続堤防高縦断図の2時期の重ね合わせ

表-2 2時期のレーザ点群の重ね合わせ結果

	中央(C)	C+1.5m	C+3.0m
偏差(最大値)(mm)	10.0	10.0	10.0
偏差(最小値)(mm)	-13.0	-14.0	-23.7
平均値 (mm)	0.0	1.0	-11.0
標準偏差 (mm)	2.0	3.0	24.0

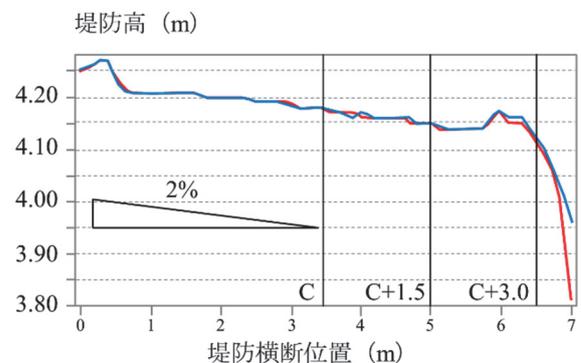


図-20 横断面図の2時期の重ね合わせ

4. 結 言

本論文では、車両走行という迅速かつ簡便な手段によっ

て、河川堤防の変状を定量的に把握する計測手法の構築を試み、計測精度の検証および変状検出結果の妥当性について、現場計測データを用いて考察した。その結果、次の結論を得た。

- (1) GNSS, IMU および DMI の各計測値を複合させて、車両走行時のレーザ照射位置および姿勢を取得する MMS 計測を用いて、河川堤防の変状を把握する手法を実現するための計測に関する基本的な特性を把握する実験を行った。その結果、数 100m の照射距離特性を有するレーザスキャナを用いての精度検証を行ったところ、レーザ照射距離が 50m 以内であれば、時速 30km 以内で往復走行によって 400 点/m² 以上のレーザ点群密度を確保すれば、前述の GNSS・IMU・DMI 複合航法の仕様通りの水平 20mm、標高値 50mm の精度を保持できることが分かった。
- (2) 堤防天端走行では高精度計測が可能なレーザ点群密度を天端では取得できるが、法面ではレーザ点群の欠損区間などが発生する。それを補完するために法尻走行による計測データを活用する試みも実施したが、植生の影響を考慮すると、天端走行のデータから「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」が定める天端の変状に関する項目を把握する手法として使用することが効果的である。その場合、従来の目視巡視では把握できなかった定量的かつ面的な点検を高精度で実施できることが実証された。
- (3) 天端は高精度での計測が可能なことから、2 時期のレーザ点群を重ね合わせることで連続堤防高縦断面図の経時変化を簡便に求めることが可能であった。この場合、(1)に記述した GPS・IMU・DMI の複合航法では水平 20mm、標高値 50mm 以内の精度で当該経時変化を追跡することが可能であることを現場データにより実証した。

上記の他、車両走行による計測という効率的な手段と高精度を活かした定量的な利点により、任意の横断面図による変状発生有無の点検作業も容易にできることが示された。本論文では記述していないが、デジタル画像データを活用した「亀裂」「目地開き」および「法崩れ」等の検出も可能であることは現場でも確認できており、今後は現場での実証例をさらに増やすことで、MMS による計測手法の各点検項目への適用の可能性をまとめていく予定である。

参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート 2015, pp.21-31, 2016.
- 2) 気象庁：異常気象リスクマップ 大雨が増えている, <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/heavyrain.html>, アクセス年月日 2016 年 10 月 13 日.
- 3) 内閣府：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による被害状況等について(平成 28 年 2 月 19 日 12:00 現在), p.1.
- 4) 内閣府：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による被害状況等について(平成 28 年 2 月 19 日 12:00 現在), pp.6-15.
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領, pp.4-5, 2012.
- 6) 久保田啓二郎, 大浪裕之, 西山哲, 東良慶：自然災害被害の予測・把握技術の高度化に向けて-堤防の変状等を高精度に把握するモバイルマッピングシステムの開発, 土木技術資料, 55 号, pp.6-9, 2013.
- 7) 東良慶, 吉岡裕嗣, 西山哲, 石川貴一郎, 船田征, 久保田啓二郎：モバイルマッピングシステムの河川堤防管理への適用性の検討, 土木学会河川技術論文集, 第 19 巻, pp.21-26, 2013.
- 8) 西山哲：車両走行型レーザスキャナを用いた迅速かつ効率的河川堤防検査手法の開発, 河川, 69 巻, 807 号, pp.30-33, 2013.
- 9) 間野耕司, 石井一徳, 平尾公孝, 橘菊生, 吉村充則, Devrim Akca, Armin Gruen：移動計測車両測量システム(MMS)により取得される点群の精度評価, 写真測量とリモートセンシング, Vol.52, No.6, pp.189-200, 2013.
- 10) 橘菊生, 間野耕司, 島村秀樹, 西山哲：河川堤防計測へのモバイルマッピングシステムの適用, 写真測量とリモートセンシング, Vol.54, No.4, pp.166-177, 2015.
- 11) 橘菊生, 間野耕司, 島村秀樹, 西山哲：河川堤防計測のための高所設置型 MMS の開発と精度検証, 応用測量論文集, 第 26 巻, pp.75-86, 2015.
- 12) 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一, 清水聡：モバイルマッピングシステムによる都市空間モデリング, 計測自動制御学会産業論文集, 第 8 巻, 17 号, pp.132-139, 2009.
- 13) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領, p.15, 2012.
- 14) 石川貴一郎：Mobile Mapping System による道路測量について, 精密工学会誌, 79 巻, 5 号, pp.397-400, 2013.
- 15) 熊谷秀夫：GPS/IMU の最新動向, 写真測量とリモートセンシング, Vol.49, No.5, pp.326-331, 2010.
- 16) Applanix 社：<http://www.applanix.com/products/land/p-oslv.html>, アクセス年月日 2016 年 10 月 12 日.
- 17) 宮瀬正, 柘植貢, 田中茂信, 森田真一, 野田敦夫, 川村啓一, 山本幸次, 目黒嗣樹：航空機搭載型レーザ及び地上型レーザ計測の前浜地形計測への適用, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1426-1430, 2005.

(2016 年 6 月 20 日 受付)

