

3次元レーザ点群による河川堤防点検手法の開発

Development of Inspection Method of River Dike using Three Dimensional Laser Point Cloud

藤木三智成	Michinari FUJIKI	(国際航業(株) 技術サービス本部)
西山哲	Satoshi NISHIYAMA	(岡山大学大学院 環境生命科学研究所)
井上浩一	Koichi INOUE	(国際航業(株) 技術サービス本部)
阿部亮吾	Ryogo Abe	(国際航業(株) 技術サービス本部)

本論文は、モバイルマッピングシステム (MMS) によって取得されるレーザ点群を使った河川堤防の点検作業に関する研究成果をまとめたものである。具体的には、レーザ照射範囲と点群密度の関係およびそれらと計測精度の関係を明らかにすることで計測条件を決め、さらに微細な変状が発生している箇所をより迅速かつ簡便に視認するための地形表現図を開発した。この地形開発図は傾斜量図と高度段彩図とを透過合成したものであり、実現場で本手法を試行した結果から、本地形表現図のスクリーニング処理としての有用性を実証した。本論文では、このスクリーニングの後に変状発生箇所を絞り込み、詳細な3次元測量を実施する効率的な点検手法の事例も示した。

キーワード：車両走行計測，河川堤防，3次元計測，傾斜量図，高度段彩図
(IGC : T12, C00)

1. はじめに

河川堤防は、基本的に土質材料で構成されており、材料そのものが劣化する危険性は持たないが、基礎となる地盤の地質が場所ごとに異なる。このため、洪水という外力を受けた時に生じる漏水や洗掘といった現象も場所ごとに異なり、長大な延長と区間・箇所ごとに異なって現れる堤防の状況変化を的確に見極める管理が必要となる。これまで、様々な条件下で生じた過去の変状や被災状況、さらにそれらに対する災害復旧や維持修繕等の履歴から得られる知見を蓄積し、それらのデータに基づく経験に頼った管理を行ってきた。その一方で、近年では地球環境の変化により、大規模災害の発生のみならず、局地的な大雨や集中豪雨が多発しており、各地で計画高水位を上回る出水による甚大な被害が毎年生じる状況になっており、そのような危機的な状況に対応できる治水安全度の向上が求められている。例えば国土交通省社会資本整備審議会では、平成25年4月に公表した『安全を持続的に維持するための今後の河川管理のあり方について〔答申〕』において、堤防外観点検に広域センシング技術を活用する技術を導入し、点検巡視の効率化や洪水時の堤防等の被災の監視等にICT (Information and Communication Technology) を活用した手法を進めるべきとの提言がなされている¹⁾。現在の堤防等河川管理施設及び河道の点検要領においては、平常時の河川巡視を河川の区間区分に応じた適切な頻度にて行ない、さらに重点的に監視が必要な区間では、必要に応じて巡視を強化して、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。ところが、巡視が主に現場を歩き

ながら行なう目視点検によって行なわれているため、迅速かつ効率的な管理作業に変えていくことが困難となっている。また定量的な値で堤防の変状を把握したデータベースが作成されていないことから、洪水に対する危険性を正確に把握できない、あるいは的確な対策を講じることができないといった課題も指摘されており、その解決が望まれていることが、ICTの活用の背景にある。

このICTを活用した効率的な管理作業を実現するものとして、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²⁾。これはGNSS、オドメータあるいは



図-1 本研究にて使用するMMSの概要

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しながら車両走行により対象物の3次元点群を取得するものである。迅速に堤防高の測量が可能になるので、効率的な点検作業を実現するものとして期待されている³⁾。MMSは車両走行という計測手法を用いるため、堤防天端の走行に限定される、あるいは法面に対しては植生の影響を受けるために、レーザ点群の欠損区間などが発生するなどの課題もあるが、従来の目視巡視では把握できなかった天端の沈下状況の面的な把握を量的に実施できるという利点がある^{4),5)}。その一方で、大量のレーザ点群を取得し、当データを解析して変状の程度を量的に把握するためには多大な労力および時間を要する課題がある。あるいは解析によって得られた結果も、標高値を面的かつ連続的に表示したものであるため、データの判読には熟練した技術が要求され、計測手法自体は迅速に実施できながらも点検作業全体としては利便性にかける欠点があった。そこで本研究では、大量のレーザ点群の中から変状が発生している箇所を迅速かつ効率的に見出す、いわゆるスクリーニングする解析手法を開発し、MMS計測による点検作業全体を迅速かつ簡便なものとするを試みる。このスクリーニング処理の実現により、変状箇所を絞り込むことが出来るので、当変状箇所の詳細を同じレーザ点群を使って効率よく3次元で測量することも可能になる。このような3次元データの活用は、建設現場の生産性向上に向けて、測量・設計から施工さらに管理にいたる全プロセスにおいてICT技術を活用して省力化を図るi-Constructionとして注目されている技術に応用できるものである⁶⁾。本論文は、第2章にて、計測条件によってレーザ点群密度および精度等が変化するかどうかを実験的に求め、河川堤防の変状を検出するための計測条件を考察する。次に第2章で求めた計測条件によって得られた実際の河川堤防のデータを利用して、対策の設計までを行なうのに有効な3次元のデータ処理法を第3章で考察し、その成果を論じるものである。

2. MMS計測の計測精度に関する考察

MMS計測に用いる機器の基本的特性を表-1に示す。MMS計測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(inertial measurement unit)装置を搭載した車両によって行なう。レーザはスキャナから1秒間に30万点が照射されるが、レーザが照射された点の座標を知るためには、レーザ照射と同時に車両位置とレーザの照射角を1/100秒以下で正確に知る必要がある。そのためにGNSSとIMUが搭載されているが、GNSSは車両の位置情報を高精度に取得できるが、1秒ごとしかデータを取得できない。一方IMUは車両の傾斜角を1/200秒ごとに取得するが、位置情報を取得できない。そこでこの両者を搭載することにより、GNSSを使って1秒ごとの正確な位置を決定し、

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°
デジタル画像性能	
スチルカメラ	500万画素: 4台
全方位カメラ	1600×1200画素: 1台
レーザスキャナ性能	
最大有効測定レート	30万点/秒, 最大300kHz: 2基
レーザビームサイズ	7mm: スキャナー出口 17mm: 50m, 31mm: 100m
最大測定距離	500m (反射率80%の対象物) 180m (反射率10%の対象物)

レーザ点群密度 (点/0.25m²)

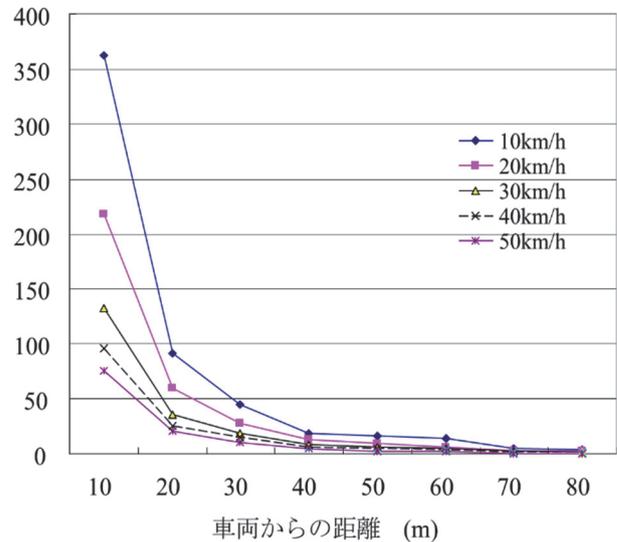


図-2 車両からの鉛直方向の距離とレーザ点群密度の関係

1秒以下のレーザ照射時の姿勢情報はIMUで取得する3軸方向の加速度と角速度の慣性データから決定する。またレーザスキャナは車両の走行方向に対して45度の角度で照射されるものが2基搭載されている。このスキャナからレーザ光が360度の放射状に放射されるが、一般に車両からの距離が長いほどレーザ点群密度が低下する。これを検証したものが図-2であり、建物にレーザを照射したときの車両からの鉛直方向の距離とレーザ点群密度の関係を計測したものである。図の横軸は車両からの鉛直方向の距離、縦軸は0.5m四方の面積内に照射されるレーザ点群の数を示す。レーザ点群密度に関しては、車両速度を10km/hから50km/hまで変化させた場合も示しているが、レーザ点群密度は車両からの距離と共に急激に減少し、さらに車両速度が大きくなるにつれて、同じ照射距離におけるレーザ点群密度が少なくなる。500mの照射距離の仕様であるスキャナを用いても、車両から約20m以内の範囲内しか0.1m以下の間隔の高密度のレーザ点群を得ることが出来ないことが分かる。図-3は、同じく地面に照射した

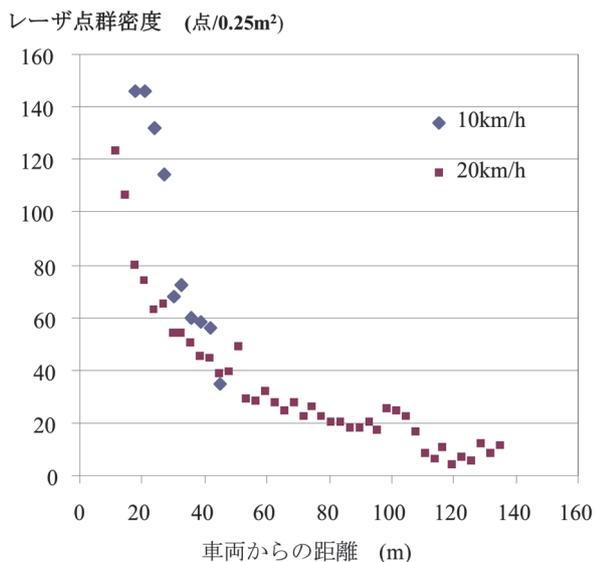


図-3 水平方向の車両からの距離とレーザ点群密度の関係

実際の車両からの水平方向の距離とレーザ点群密度の関係を検証した結果である。図は車両走行速度が10km/hおよび20km/hの事例であるが、車両走行速度が大きくなるとレーザ点群密度が減少する傾向がここでも現れている。これらの結果から、堤防天端を走行しながら計測した場合、標準的な2割勾配の堤防形状では、車両走行速度を30km/h以下に抑えておけば、鉛直および水平距離にして、レーザ照射距離が20mの範囲内では0.5m四方に30点以上のレーザが照射され、0.1m間隔にて堤防の座標を取得できると考えられる。また実際の河川堤防では、法面上の植生や小段等のレーザ照射の障害になる物の影響により、堤防法面全体で均一なレーザ点群を取得することは困難である場合もあるが、少なくとも天端とのり肩部では、堤防形状の再現性が良好なデータを得ることができると示された。これについては、次章において実際の堤防を計測することで確認する。

次にレーザ点群の座標計測精度を検証した実験結果について記述する⁷⁾。精度検証は、図-2および図-3のデータを取得した建物へのレーザ照射を利用して行なった。図-4は計測の状況を示したもので、走行路線と直角に面する7階建てのビルの窓枠35箇所(5列×7階)を平面ターゲットとして検証した。河川堤防では、MMSが走行する場所は天端が一般的であり、レーザが照射される角度は、図のような仰角とは反対の俯角になるが、レーザで計測される座標値はフットプリントと称されるレーザ照射面積に依存することが知られている。そこで、仰角を変化させる実験によってフットプリントの大きさを変化させ、その場合の精度を把握しておけば、河川堤防を計測する場合の俯角と精度の関係も類推することができる。計測精度の検証にあたっては、GNSS測量で設置した基準点からノンミラー型トータルステーションを用いて窓枠の四隅を計測し、そこから窓枠の重心の座標を求め、それを真値とみなして、MMSで計測した値との差の値を誤差とした。なお

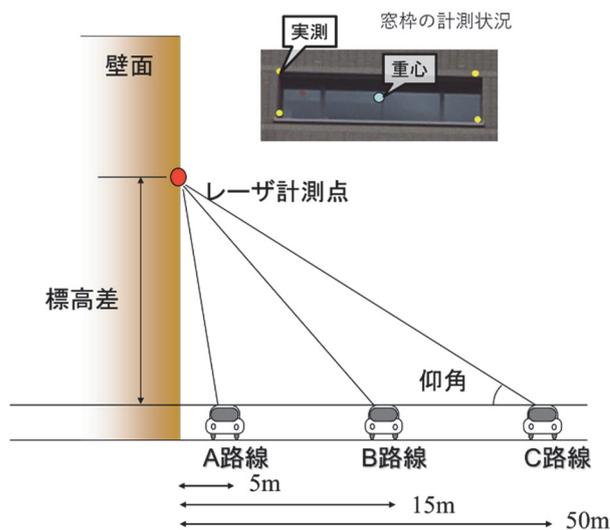


図-4 精度検証実験の状況

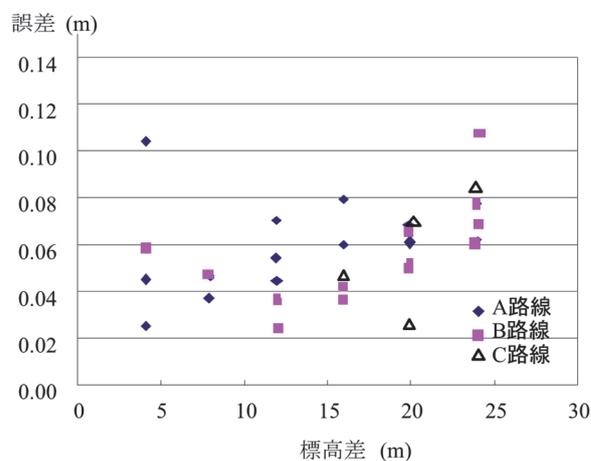


図-5 水平方向の精度検証結果

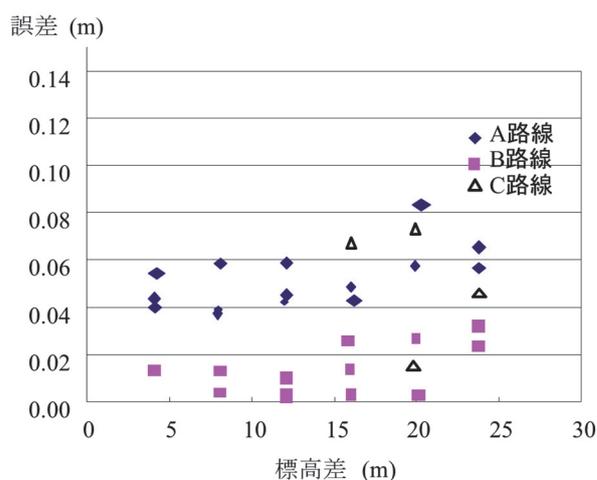


図-6 鉛直方向の精度検証結果

重心の座標を求めたのは、窓枠にはレーザがランダムに照射されるので、それらの点群の座標から窓枠の重心を算出して精度を比較する座標を特定するためである。計測時は、図-4に示すA路線およびB路線では10km/h、C路線では

30km/h の車両走行とした。これは、レーザ照射距離が遠く車両走行速度も大きくした条件の下によってレーザ点群密度の影響が大きく現れたデータを取得し、そのデータを使って計測精度の検証を行なうためである。

図-5 は水平方向の精度、図-6 は鉛直方向の精度を検証した結果であり、それぞれ図-4 に示す標高差を変えた場合を表示したものである。水平方向および鉛直方向の精度に関しては、車両からの距離に応じて計測精度が劣る傾向が現れている。これは、レーザ点群密度が関係していると考えられる。一方水平方向の計測精度では仰角に対しての明瞭な依存性がほとんど見られないが、鉛直方向の精度に関しては車両走行の路線による精度の差が見られる。これは A 路線の場合、建物の近傍を走行することによって GNSS が受信する衛星数に障害が出るためであり、また C 路線の精度も劣るのは、図には示していないが走行路線近傍に樹木があり、その影響を受けたためである。路線 A の場合には 0.1m を超える誤差が発生する場合もあるが、河川堤防の計測時には天空の視界は良好であるので、前記影響も少ないと考えられる。これらの結果から、レーザ照射距離が大きくなることでレーザ点群密度は少なくなるが、車両より約 20m の範囲では、仰角を変えてフットプリントが計測精度に与える影響を検証した結果から、法尻箇所においても、レーザ光が届くならば 0.1m 以下の誤差で測量できることが示された。

3. MMS を用いた堤防変状計測の結果および考察

3.1 レーザ点群解析手法の有用性の考察

本章では、MMS 計測によって得られた 3 次元点群データから、河川堤防の変状を抽出する解析技術の開発結果について記述する。本研究では、具体的なレーザ点群の解析技術として、ボリューム ムビジュアライゼーション(Volume Visualization)と称される技術の導入を試みる。これは、人間が苦手とする大量の空間データの一括処理をコンピュータによって視覚化し、逆にコンピュータが苦手とするデータの意味のある解釈を人間が引き出す処理を行なうという、人間とコンピュータの双方の適切な作業分業を行なうものである。具体的には、空間情報のデータをユーザーが効率よく処理できる情報に変換して表示する機能を付加することで、この技術を具体化する。ここでは、MMS 計測によって得られた数値標高データを色を変えて表現した標高値と、傾斜量をグレースケールの濃淡で表現したものを透過合成した画像地図として表現することにより、このボリューム ムビジュアライゼーションを実現させる。

この技術の特徴は、任意の地点の標高と地形の傾斜度が同時に面的に表示され、かつ両情報とも局所地形計測量である地形情報としての意味が提供されることにある⁸⁾。また陰影起伏図やその他の標高情報を伴わない擬似的な立体感をもつ地形表現図と比較した場合、色相で直感的に得られる高低差を表現するので、尾根部や谷部の反転や高度

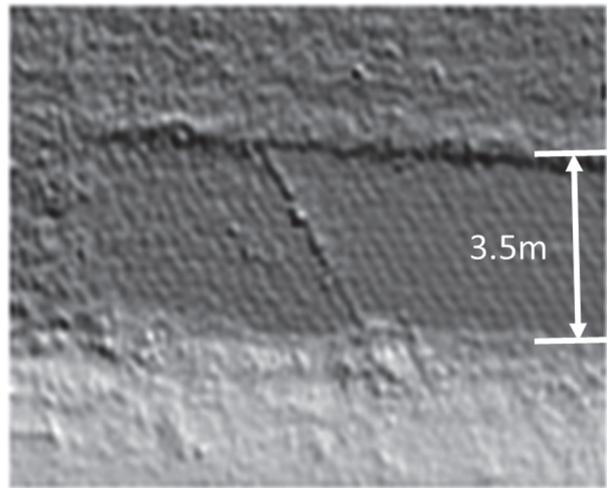


図-7 レーザ点群を陰影起伏図として表示させた例

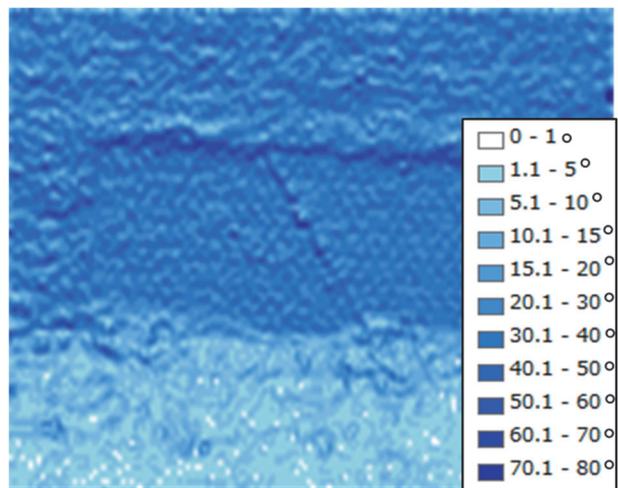


図-8 レーザ点群を傾斜量図として表示させた例
凡例は傾斜量を表す。

位置関係といった地形に関する情報を錯誤無く把握できる。立体感を表現する手法には、凹凸の相対的値を無彩色の明度に割り当て、さらに赤色などの彩度に割り当てた傾斜量を合成して起伏感を表現するものがある。しかしながら、標高情報を伴わないで、凹凸感の生成により擬似的に立体感を得る方法では、広範囲の高低差を直感的に得ることができず、緩傾斜地などの地形判読には不向きである。本手法は、単に立体感を出すように表現する地形表現ではなく、複合的な情報によって、2次元平面であっても立体を理解するような視覚化によって、河川堤防の変状を迅速かつ見落とし無く抽出することを試みるものである。3次元レーザ点群からは数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) が作成される。この DEM には、国土地理院が提供する 50m メッシュのもの等 2 万 5 千分の 1 の地形図から作成されたものであるが、走行車両からのレーザ計測によって取得された点群はランダムに分布しているため、TIN (Triangulated Irregular Network : 不整三角網モデル) を作成することでメッシュデータを得る。このようにして作成された DEM データを利用することで、地

形再現性の高い数 10mm 間隔の密な等高線図を得ることもでき、結果として地形の変化を高精度に捉えることができる。その一方で、変状の発生による等高線の変化を、経験の無い技術者はすぐに判読することが出来ないため、これまでは陰影起伏図によって直感的に等高線の変化を捉える試みがなされてきた。図-7は、本計測によって得られた河川法面におけるコンクリートブロックの3次元点群データから作成した陰影起伏図の例である。図から分かるように、地表面の形状を直感的に把握することができ、特に高低差や格差が確認されるような形状が強調されて表現されるが、同じ地形でも光源の方向によって見える印象が大きく異なる。特に影になった部分は、逆に地形が判読しにくいという課題が発生する。一般には図に示すような斜めから光を入射させる方向の光源を設定したとき、立体感をもっとも強く感じられるが、立体感を出せば出すほど影の部分の詳細な地形判読が困難になる¹⁰⁾。

次に、これまで一般的に用いられている傾斜量図で3次元点群データを処理した結果を図-8に示す。傾斜量図は、地形の傾斜の度合いを示すものなので、傾斜が大きければ大きいほど大きな傾斜値で地形を表現する¹¹⁾。これは図に示すように、傾斜が急なところを濃い色で、緩いところを淡い色で表現する。図-7とは異なって方向依存性が解消されるため、陰影起伏図と異なり影部分も判読しやすくなる長所がある。その一方で、傾斜量図には標高に関する情報が無いために、河川堤防の変状などを把握する場合に重要となる標高の変化を捉えることができない。例えば、尾根部や谷部が複雑に入り組んだ場所では、尾根部と谷部が同じような傾斜量の変化になり、両者の区別がつかない欠点が発生する場合がある。そこで本研究では、傾斜の変化のみではなく、標高値の変化も同時に取得した方が、河川堤防の微細な形状変化に起因した変状を見逃し無くできると考えた。DEMの標高情報を可視化して表現する手法としての高度段彩図の技術を取り入れ、標高図を目的に応じた着色を行なって表現することも試みられているが、この高度段彩図においては標高分布が表現されるものの、傾斜の変化は読み取りにくく、一般的に明瞭な地形表現が困難である。本研究では、傾斜の変化を明瞭に表現できる傾斜量図と高度段彩図とを透過合成することを試みた。透過合成では、不透明度を100%に調整した傾斜量図の上に、カラー表示した高度段彩図の不透明度を50%に減じて表示させる。この手法により作成した地形表現手法が図-9であり、尾根部や谷部の逆転が生じることも解消されるので堤防の沈下状態を間違うことなく視覚的に把握することが可能になる。さらに地形の重要な要素である「標高」と「傾斜」を組み合わせることによって、地形認識における着目点群の相対的な位置関係や地形の高低差を直感的に誤りなく把握することができる。このように標高と傾斜の情報が連続量として、それぞれ独立に把握できる利点があり、さらに抽出したい微小地形の存在する標高帯や傾斜範囲に合わせて、標高表示色やグレースケールの明暗を調節することにより、変状箇所を視覚的に捉えやすくなる。

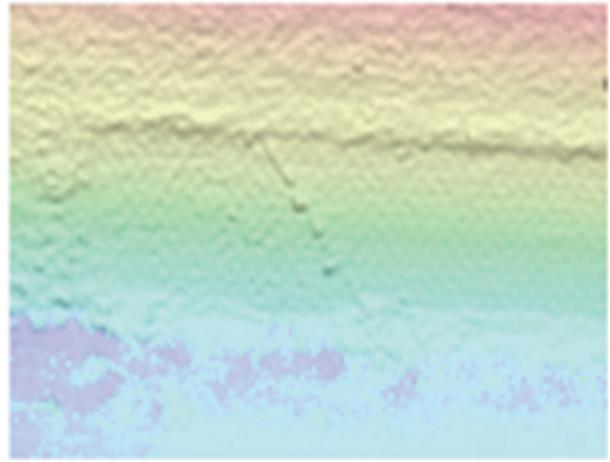


図-9 傾斜量図と高度断彩図の合成例

レーザ点群の間隔は 100mm

なお標高は相対値として 0m (青色) から 4m (桃色) の間グラディエーション表示している。

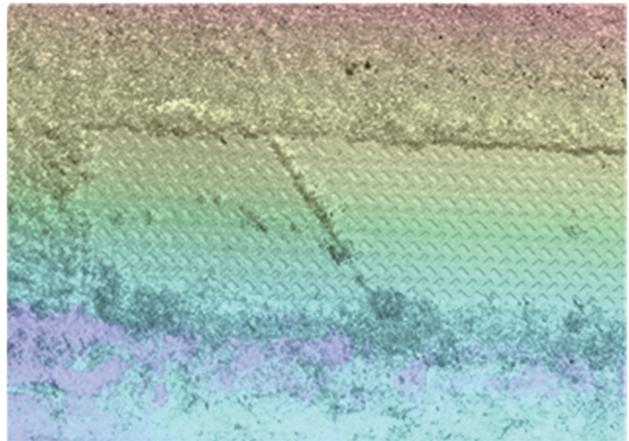


図-10 傾斜量図と高精度高度断彩図の合成例

レーザ点群の間隔は 10mm

図-9は100mm間隔の標高図であるが、MMSの高密度レーザ点群を活かした10mm間隔の標高図に変えて傾斜量図と合成した例が図-10である。河川堤防全体を視認する際にはデータ量が膨大になるので、変状箇所の抽出には表示させる作業効率の良い図-9を用い、抽出箇所をより詳細に視認したい際には図-10を用いる。レーザ点群を高密度なものにすれば、2次元での表現ながら、計測対象のブロックの形状も視認できており、本手法の自動化も容易なことから、視覚的に地形の微小な変化を把握しやすい図を短時間で処理することができる。

図-11に本研究によるポリビュー ムビジュアルライゼーション手法の工程を示す。河川堤防の変状箇所を視認する際、レーザ点群は3次元の座標値をもつので、計測データから河川堤防を3次元的に復元する手法が一般に用いられる。その場合、標高値をカラーで表示する、あるいは等高線間隔の違いを強調して傾斜量を表現することで、変状箇所を見やすくすることも行なわれるが、膨大なデータ量から成る堤防形状を3次元で表示し、任意の角度から眺めるため

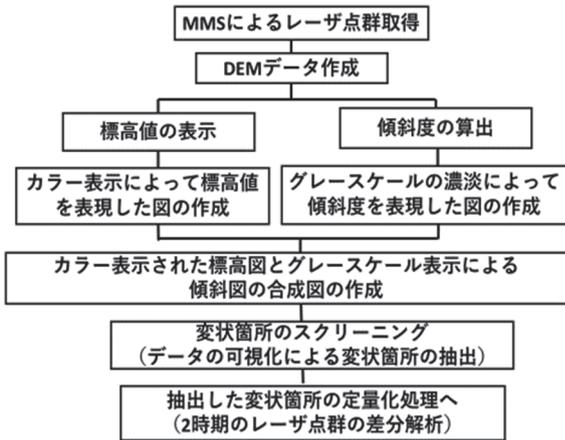


図-11 本研究による解析工程の手順

には、必要となるパソコンやソフトに要するコストが高くなる。また延長の長い河川堤防を3次元で再現されたものを視認していくには時間を要する。本手法は、標高値と傾斜などの地形情報を、それぞれの情報を失うことなく平面的に連続して表示するので、パソコンに必要となるグラフィックボードに要するコストも抑えられる。また平面的な表示であっても、3次元的な立体感は表現されるので、視認による変状箇所の抽出が容易になり、関連する作業時間の節約が可能となる利点がある。

3.2 開発した解析手法の有用性の考察

次に、本解析手法の一連の工程の有用性を実現場にて検証した結果について論じる。現場は岡山市内を流れる百間川左岸における距離標 5.0km から 10.6km の区間であり、堤防天端を約 30km/h で走行しながらレーザ点群データを取得した。計測区間における幾つかの変状を目視点検によって確認しておき、それらが MMS 計測による一連の工程でどのように検出できるのかを検証することで、開発手法の有用性を考察した。図-12 は計測区間に存在する変状箇所の一つであり、法肩の部分に法崩れが発生している状態を示したもので、目視では植生の繁茂状態が異なっているので視認しやすいが、地形の凹凸状態の定量的な状態を把握することは困難であり、MMS 計測によって、どの程度定量的に抽出できるのかを検討した。

図-13 は、MMS 計測によるレーザ点群密度の状況を示すもので、天端走行によって得られた点群密度分布である。図中の黒色で示したラインが MMS の走行場所であり、凡例は 0.5m×0.5m の面積内のレーザ点群の個数である。レーザ点群密度を向上させ、0.1m 間隔の点群密度を確保するため、計測は往復走行によって実施した。この結果、堤防法肩部は 600 点以上/m² の高密度で計測されていることが分かる。図中の白丸の箇所が、図-12 に示した変状箇所である。図-14 は、開発した手法による傾斜量図と 10mm 間隔の標高図を合成したもので、赤丸で示した箇所が変状箇所である。この箇所をさらに視覚的に分かりやすくするために、等高線を図中に描いたものが図-15 であり、変状箇所



図-12 計測対象区間に存在する法崩れ

下図は法崩れ箇所の一部を天端から写した拡大図

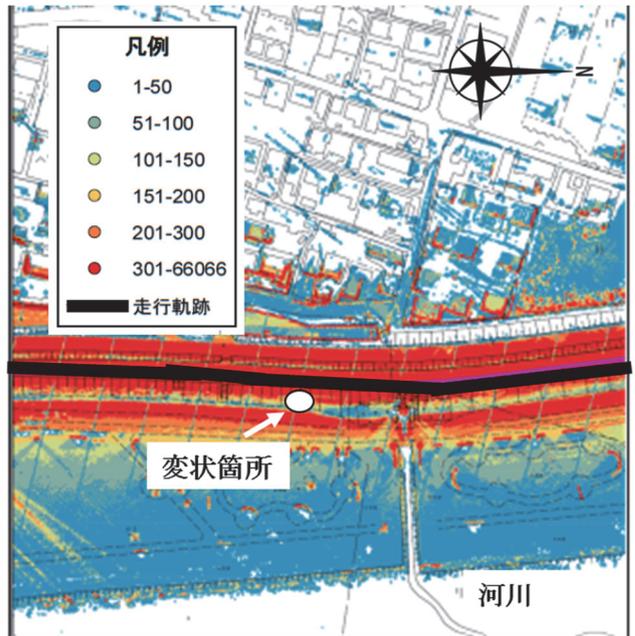


図-13 レーザ点群密度分布

の抽出をより視覚的に分かりやすく表現できている¹²⁾。この手法により、素早く変状箇所をスクリーニングすることが可能で、計測終了時から計測データの視認によって変状を抽出する工程を数時間以内に行なうことができ、河川堤

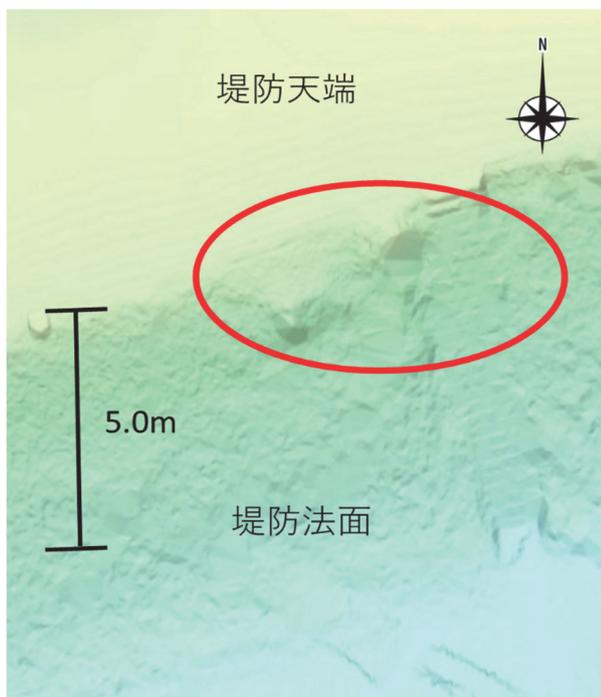


図-14 傾斜量図と高精度高度断彩図の合成図

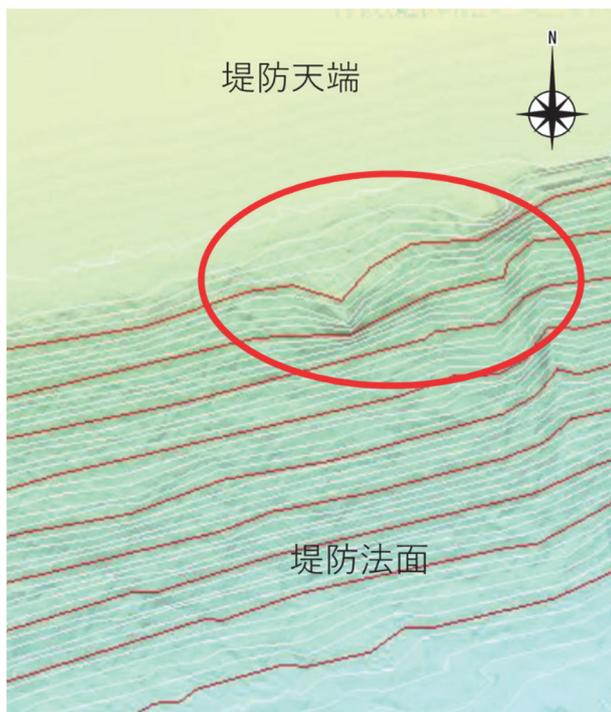
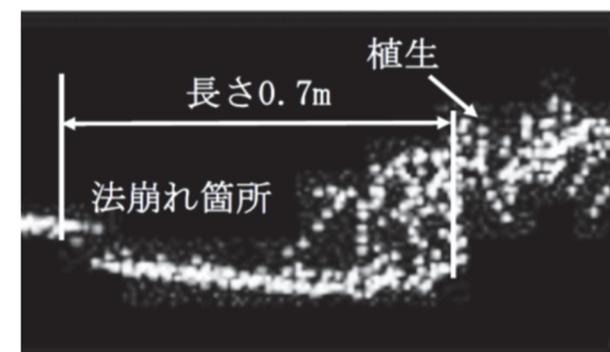
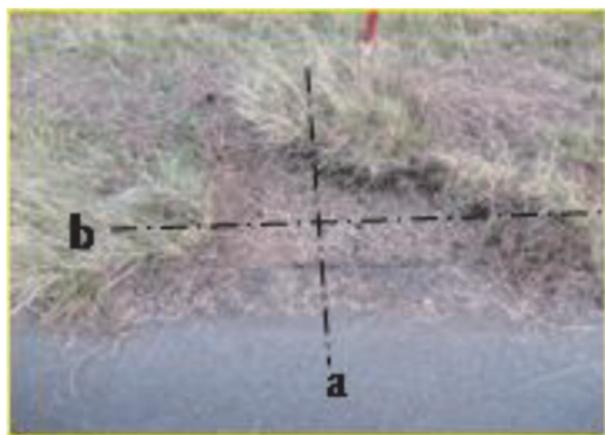


図-15 図-14の合成図に等高線を描いた例
等高線は1.0m間隔。

防点検の作業をより迅速に行なうことができる。さらに当変状箇所レーザ点群の状態を詳細に見たのが図-16である。図-16は、法崩れ箇所の幅0.4m、長さ0.7mの範囲を、図に示すようにaおよびbの2方向のレーザ点群の断面図で示したものである。このように、600点/m²以上の点群が得られることで、法崩れの状態を定量的に把握するための3次元測量が可能である。すなわち高度断彩図と傾斜量図の合成図上で変状箇所をスクリーニングし、その後当



a断面のレーザ点群



(a) b断面のレーザ点群

図-16 法崩れ箇所に詳細な3次元測量を実施した結果

該箇所のレーザ点群を詳細に見る工程によって、計測から変状発生箇所の特定までを迅速に定量化するというMMSを活用した計測法を試行した事例を示すことができた。

さらに変状箇所のスクリーニング後の処理として、法崩れの状態の経時変化を定量化したものが図-17である。図は2年前にMMS計測によって得られたレーザ点群データによる標高値の差分結果を示したもので、2年間にどの程度変状が進行したのかを表したものである。MMS計測は、前章でも議論したように高精度の天端の座標値を面的に取得することが可能であり、時期の異なる計測値の差分も容易に得ることができる¹³⁾。図中のValueで表した値は、現在の標高値と2年前の計測によって得た標高値との差であり、青色で表示したところが0.1m沈下していることを表している。当箇所は図中に示したように法崩れが発生している箇所であり、スクリーニングによって抽出した変状箇所に対して再度詳細な解析によって進行具合を定量



図-16 2 時期の計測データから変状の経時変化を定量化した例

化したものである¹⁴⁾。全計測データの詳細な解析をすることなく、スクリーニング処理によって変状箇所の特が可能になったことから、一連の工程を自動化させることで、堤防点検のための 3 次元計測をリアルタイムで実施できる可能性を示すことができた。

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取得できる 3 次元レーザ点群を活用して河川堤防を点検する計測手法の構築を試み、次の研究成果を得た。

- (1) 時速 30km 以内での走行によって高精度の座標値が取得できる MMS 計測による 3 次元レーザ点群の解析手法として、傾斜量図と高度段彩図とを透過合成する地形表現図の作成を開発した。これにより、これまでの DEM から作成される傾斜量図や標高図単独の表示方法に比べて、微細な堤防の地形の高低差を直感的に把握することができ、変状箇所を視覚的に捉えやすくなる。これにより、迅速な変状抽出を行なえる可能性があることを実例で示した。
- (2) 実現場での実証では、微細な法崩れを対象にして試み、開発したスクリーニング処理の手法によって当法崩れを検出できることを明らかにした。さらにこの結果を活用して、大量の点群データの中から当箇所を絞り込んで詳細な 3 次元測量を実施することを試み、レーザ点群の差分結果から目視点検では困難な変状の定量化を精度よく行なえる事例を示した。

MMS によって得られた 3 次元データは、対策工の設計や施工管理にも活用できるので、計測から解析までの一連の工程に 3 次元データを取り入れて省力化を図ろうとする i-Construction の概念にも合致した応用につなげることができる。今後は解析工程の自動化をすすめ、MMS 計測を活用したリアルタイムでの堤防点検技術の構

築を行なっていく予定である。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会：安全を持続的に確保するための今後の河川管理のあり方について（答申），p.19，2013.
- 2) 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，Vol.55，No.4，pp.6-9，2013.
- 3) 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.
- 4) 西山哲：車両走行型レーザスキャナー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.
- 5) 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.
- 6) 国土交通省：技術調査 i-Construction 推進コンソーシアム，http://www.mlit.go.jp/tec/tec_mn_000008.html，（閲覧日 2017.6.15）.
- 7) 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.
- 8) 山本強：3 次元ボリュームデータのビジュアライゼーションとその応用，計算機統計学，Vol.6，No.1-2，pp.49-60，1993.
- 9) 佐々木寿，向山栄：地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用，航空機レーザスキャナ

- DEMを用いたカラー標高傾斜図(ELSAMAP), 応用地質, Vol.49, No.6, pp.318-330, 2009.
- 10) 野上道男: 地理情報とくにラスター型数値地図利用の高度化, 情報地質, Vol.2, No.4, pp.331-339, 1991.
- 11) 神谷泉, 黒木貴一, 田中耕平: 傾斜量図を用いた地形地質の判読, 情報地質, Vol.11, No.1, pp.11-24, 2000.
- 12) 向山栄・佐々木寿: 新しい地形情報図 ELSAMAP(特集 地形表現が生み出す地図可能性), 地図, Vol.45, No.1, pp.47-56, 2007.
- 13) 藤木三智成, 西山哲, 井上浩一, 堀川毅信, 大石哲, 島田英司, 阿部亮吾, 徳岡杜香: 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, 地盤と建設, Vol.34, No.1, pp.109-117, 2016.
- 14) 東良慶, 西山哲, 石川貴一郎, 吉岡裕嗣, 島村秀樹, 大浪裕之: モービルマッピングシステムによる河川堤防の高精度計測, 土木学会河川技術論文集, 第20巻, pp.485-490, 2014.

(2017年6月19日 受付)

