

レーザ計測技術の点検実務への 適用に関する検討

EVALUATION OF LASER MEASUREMENT TECHNOLOGY TO DETECTION DEFORMATION OF THE RIVER

小澤淳真¹・安達孝実²・吉田高樹²・関克己³・岡部貴之⁴・山崎崇徳⁴
Atsumasa OZAWA, Takami ADACHI, Takaki YOSHIDA, Katsumi SEKI, Takayuki OKABE and
Takanori YAMAZAKI

¹ (公財) 河川財団 河川総合研究所 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

² 正会員 (公財) 河川財団 河川総合研究所 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

³ 正会員 (公財) 河川財団 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

⁴ 正会員 株式会社パスコ 防災技術部 河川砂防一課 (〒153-0042 東京都目黒区青葉台3-10-1)

With the rapid development of laser measurement technology, it has been expected to take advantage of the technology to the rivers of the inspection work. It is possible to reduce the burden of the inspectors and to improve the inspection accuracy. It is necessary to evaluate the laser measurement technology to deformation of the river. But, there is no evaluation method to focused on the deformation of the river. In this study, we have established the evaluation method to the deformation of the river.

Key Words : laser measurement technology, deformation of the river, reduction of the burden

1. はじめに

近年の計測技術の進歩は目覚ましく、河川の点検において変状を確実に把握するための試行が盛んに行われている。今後、試行結果を踏まえ実務に採用していくことになるが、その際には従来の目視点検を補完または代替できる有用な計測技術を選択する必要がある。

一方、ここ数年の技術動向をみると、特にレーザ計測技術において、レーザの照射数の増加や機器の小型化など、その技術革新が著しい。これまでもレーザ計測技術の点検実務への適用性検討については、MMS（モバイル・マッピング・システム）等で実施されているが、あくまで1つの計測システムの検討にとどまっており、レーザ計測技術全体の適用性の検討はなされていない。

そこで本論文では、レーザ計測技術の普遍的な特性に着目し、レーザ計測技術全般について、点検実務への適用に関する検討を行った。

本稿では、まず2章で、レーザ計測技術を点検実務へ適用するにあたり、従来手法である目視とレーザ計測の比較を行い、両者の特徴について整理を行った。次にその整理結果を受け、3章で点検実務においてレーザ計測技術に求められる役割を明確にし、その役割を果たす

ための課題を明らかにするとともに、4章、5章で、その課題を解決する方法の提案を行った。最後に6章で、現在測量等の分野で広く使われているLP（航空レーザ）、MMS、地上型レーザ、UAVのレーザ計測システムにおいて、5章まで検討結果等を踏まえ、実際の点検実務の現場での適用性について論じた。

2. 目視とレーザ計測の比較

(1) レーザ計測の特徴

a) 不均一な点群データ

レーザ計測では、計測装置からレーザ光を照射し、物体で反射されて戻ってくるまでの時間を計測することで、2点間の距離を計測する方法が主流である。図-1は、レーザ計測方法の1つであるMMSで堤防天端を計測したデータの一例である。このように、計測されたデータは点群データとなり、離散的な位置情報を取得することになる。このため、レーザ計測により変状を検出する場合、点群の疎密（計測点間隔）によっては、変状箇所にはレーザ光が当たらず、変状が検出されない可能性もある。

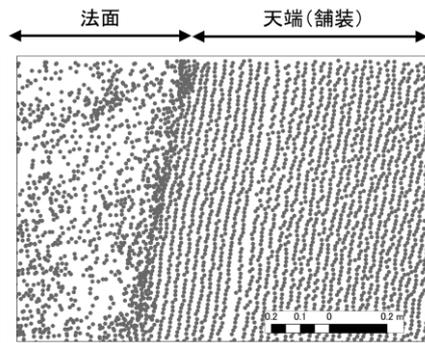


図-1 レーザ計測による点群データの一例

b) 位置精度

レーザ計測では、計測点毎に偶然誤差を持っており、その誤差のばらつきは一般的に正規分布に従うと考えられる。このため、全く凹凸の無い平坦な平面を仮定し、その面をレーザ計測しても、レーザ計測点はある程度の誤差を持ち、ばらつくことになる(図-2)。

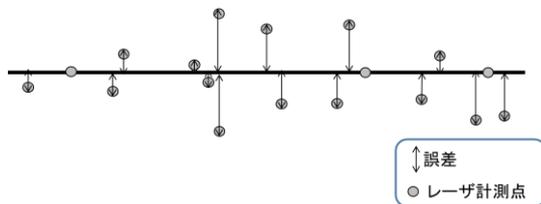


図-2 レーザ計測における誤差のイメージ

表-1は、現在ある代表的なレーザ計測機の精度について示したものである。いずれの計測でも精度は数cm以内(標準偏差)となっており、数cm程度の変状であれば検知することが可能であると考えられる。

表-1 代表的なレーザ計測機の精度

計測種別	精度	備考
LP(航空レーザ)	2~3cm (1σ)	参考文献 1)
MMS	0.5cm (1σ)	VQ-450(RIEGL社)
地上型レーザ計測	0.3cm (1σ)	VZ-400i(RIEGL社)
UAVレーザ計測	2.5cm (1σ)	VUX-1(RIEGL社)

一方、レーザ計測点に偶然誤差が含まれるということは、図-3のように、変状を計測した場合、レーザ計測機の性能、計測点密度によっては、その変状を正しくとらえられない可能性があることを示唆している。

今仮に、精度が1σ=2.5cm、すなわち計測データの約68%は±2.5cm以内に収まる精度のレーザ計測機で、図-3に示す高さが2cmの変状を計測したとする。ここで、変状部と無変状部にそれぞれ1点ずつ計測点が存在すると仮定し(図-3赤丸)、さらに変状部の計測点には2cmの誤差が、無変状部の計測点には誤差が無かったと仮定すると、2点の計測点だけからは、この面は平坦な面だと認識されてしまい、変状を見逃す可能性がある。

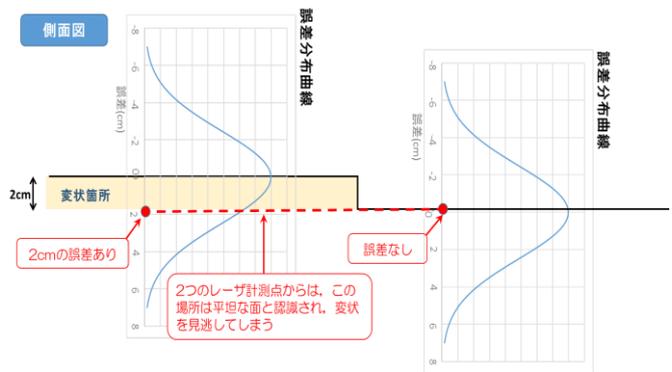


図-3 レーザ計測による変状の見逃しの模式図

以上の検討から、レーザ計測を用いて変状の検出を行う場合、計測点数、計測点間隔を考慮することが重要であると考えられる。

(2) 変状検出における目視とレーザ計測との比較

前項でのレーザ計測の特徴等を踏まえ、目視とレーザ計測で変状の検出を行う場合の比較を行った。

表-2 変状検出における目視とレーザ計測の比較

	目視	レーザ計測
点検データ	<ul style="list-style-type: none"> 人間の視認性の特徴に左右される 点検時の状況に左右される 	<ul style="list-style-type: none"> 点群による離散的な情報となる 各計測点には偶然誤差が含まれる
空間一様性	<ul style="list-style-type: none"> 点検者の経験や知見に基づき、取得する変状に差があり、一定基準で変状取得はされない 	<ul style="list-style-type: none"> 点検対象の全範囲に対して、一律なデータ取得が可能である
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> 視認性が重要となるため、光量が少ない中での点検は点検精度に影響が出る可能性がある 豪雨等、点検者の状態に悪影響を及ぼす場合は、点検精度に影響が出る可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 外部の光量の条件には左右されない 一般的なレーザ計測機で使用されているレーザ光は近赤外レーザであり、水に吸収される特性があるため、雨天日の計測は不可
対象物	<ul style="list-style-type: none"> 目視では認識できない微小な形状変化は取得不可 広範囲の変化(広域の地盤沈下等)を認識することは不可 	<ul style="list-style-type: none"> 計測機の性能にもよるが、微小な変化を捉えることは可能 表面に水がある場合は欠測する可能性が高い 反射率の低い物質(黒色の物質等)はレーザ光が反射されず、計測できない可能性がある
容易性	<ul style="list-style-type: none"> ポール等の道具があれば、簡単に実施可能 	<ul style="list-style-type: none"> 計測までの準備に時間がかかる
最終成果までの処理	<ul style="list-style-type: none"> 現場での点検結果そのものが最終成果となる場合が多く、特別な処理を必要としない場合が多い 	<ul style="list-style-type: none"> データ処理に多くの時間を要する 得られたデータから変状部を抽出する標準的な手法は確立されていない

表-2から、レーザ計測では微小な変状を検出できることが大きな特徴と言える。一方、目視では、点検自体の容易さや、変状を把握するまでの迅速性が大きな特徴といえる。

3. レーザ計測技術に求められる役割と課題

(1) レーザ計測技術に求められる役割

以上の比較から、レーザ計測を点検実務へ適用するにあたっては、以下の2つの役割が求められていると考えられる。

a) 目視点検の代替技術

これまでの目視点検の代替技術として、目視で発見できる変状を確実に取得するとともに、処理時間を短縮させ、迅速性を向上させることが必要であると考えられる。

b) 微小な変状の取得

倉田ら (2015) ²⁾は、パイピングの予兆となる洪水時の地面のふくらみについて模型実験を行い、最大3cm程度の変状の発生を確認している。このように、目視点検で発見の難しい微小な変状を取得することで、機能低下のメカニズムの解明につながることを期待される。レーザ計測技術にはこのような微小な変状を取得することも重要な役割であると考えられる。

(2) 課題

a) 目視点検の代替技術

目視点検の代替技術とするためには、目視点検の要求水準に対して適切なレーザ計測仕様を作成することが重要である。特に、必要以上の過剰な点群データの取得は、データ処理の迅速性を低下させる大きな要因となり、過少な点群データでは、取得すべき変状を見逃し、要求水準を満足しない危険性がある。このため、過不足の無いデータを取得できる仕様が必要となる。

b) 微小な変状の取得

微小な変状を捉えるにあたっては、図-2で示した通り、レーザ計測における誤差の問題がある。このため、計測点間隔から、どの程度の規模の変状まで計測できるのかを評価する方法が必要である。

4. 課題解決のための提案手法

(1) 提案手法の概要

変状抽出に注目したレーザ計測の仕様を考える場合、機器自体がもつ性能と計測点間隔が重要な要素であると考えられる。機器性能は取得できる変状の鉛直方向の大きさに影響し、計測点間隔は取得できる変状の水平方向の大きさに関係する。

このため、本研究においても、変状の規模に対する要

求水準と、レーザ計測機器自体が持つ性能を与条件とし、過不足の無い最適な計測点間隔を推定する手法を作成することとした。

一方、微小な変状の取得限界に関しては、レーザ計測機の性能と計測点間隔を与条件として、検出可能な最小の変状を推定を行うこととした。この方法では、上記と同様の考えを適用することができる。

(2) 簡易シミュレーションによる推定

本研究では、以下の通り簡易的なシミュレーションにより最適な計測点間隔及び検出可能な微小変状を推定する方法を提案する。

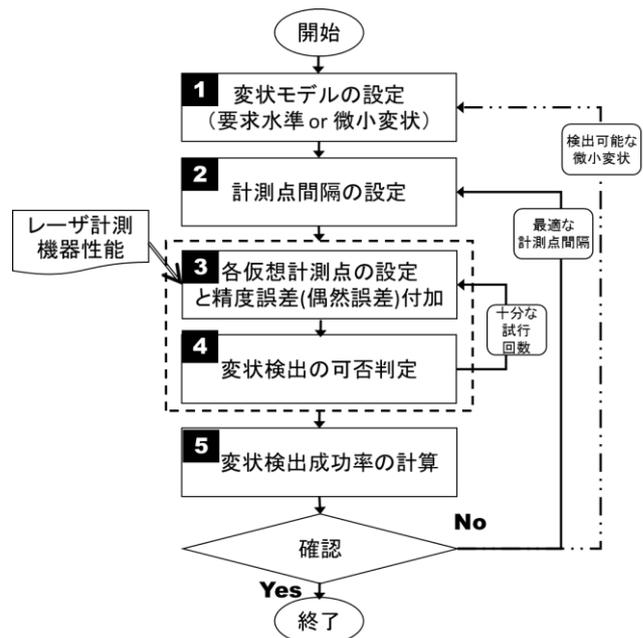


図-4 簡易シミュレーションのフロー

- ①: 図-5の通り、要求水準を満足する変状を設定する。
- ②: その変状が発生している場所(領域A)および変状が発生していない場所(領域B)に適切な計測点間隔を設定する。
- ③: ②で設定した間隔で計測点を発生させ、それぞれの計測点に、レーザ計測機の性能表に記載のある精度誤差を与える。
- ④: ③の状態では、領域Aと領域Bのレーザ計測点の高さ方向の平均値をそれぞれ計算し、その差が設定した変状の高さ以上である場合は抽出成功、そうでない場合は抽出失敗とする。
- ⑤: ③、④について十分な回数を行い、変状抽出が成功する確率を求める。ここでは、最適な計測点間隔を推定する場合と、検出可能な最小の変状を推定する場合とで確認する視点が異なる。

【最適な計測点間隔の推定】

成功率が100%に近い場合は、点群データの過剰取得の可能性があるので、計測点間隔を広くする。成功率が低い場合は、計測点間隔を狭くする。

【検出可能な微小変状の推定】

成功率が100%の場合は、さらに小さな変状の抽出ができる可能性があるため、変状の規模を小さくし、再度シミュレーションを実施する。

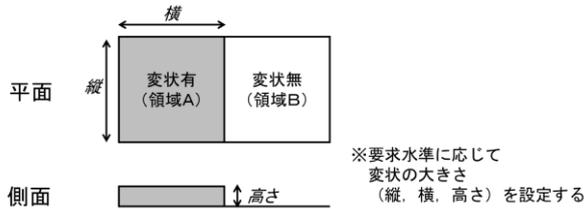


図-5 設定する変状モデル

(3) 簡易シミュレーションの実施

前項で設定したフローに従い、以下の条件で簡易シミュレーションを実施した。今回はシミュレーション環境をエクセル上に整備し、計算を行った。

表-3 簡易シミュレーションに用いた設定値

①	変状モデル	領域A (縦×横×高さ) : 40cm×40cm×1cm 領域B (縦×横×高さ) : 40cm×40cm×0cm
②	機器性能 (表-1 MMSに使用されているVQ-450を想定)	計測方向に0.5cm (1σ)
③	試行回数	1,000回

表-3に基づいて実施した計測結果を以下に示す。ここでは、計測点間隔 (図-4②) と変状抽出成功率 (図-4⑤) について示す。

表-4 簡易シミュレーションの実施結果

計測点間隔	抽出成功率
【Case I】 15cmに1点 (領域A, Bにそれぞれ10点程度)	100.0%
【Case II】 20cmに1点 (領域A, Bにそれぞれ4点程度)	100.0%
【Case III】 30cmに1点 (領域A, Bにそれぞれ2点程度)	98.5%
【Case IV】 40cmに1点 (領域A, Bにそれぞれ1点程度)	94.5%

表-4の結果より、計測方向に0.5cm (1σ) の計測精度を持ったレーザ計測機 (表-1, MMSに使用するVQ-450を想定) を用いて、1cm程度の形状変化を伴う変状を取得することを考えた場合、最適な計測点間隔は、Case II (計測点間隔20cm) であることが確認できる。計測点間隔を20cm以下した場合は、過剰なデータ取得のため、データ処理に時間がかかる可能性があり、間隔を20cm以上にした場合は、変状を見逃す危険性がある。

5. 簡易シミュレーションの妥当性の検証

簡易シミュレーションの妥当性を検証するため、現場でレーザ計測を実施した。使用したレーザ計測技術はMMSである。

(1) MMSレーザ計測の概要

MMSレーザ計測の概要を以下に示す。

表-5 MMS計測の概要

計測日時	2016年6月22日
計測場所	堤防天端
搭載センサー	GNSS (位置情報取得)
	IMU (姿勢情報取得)
	レーザ計測機 カメラ
点間隔	車両進行方向 : 約2cm 車両進行方向に直角な方向 : 約2cm

表-6 レーザ計測機 (VQ-450) の概要

パルスレート	最大550kHz
スキャンレート	最大200Hz
レーザ光の広がり角度	0.3mrad
到達距離	800m
精度	8mm
確度	5mm



図-6 計測に使用したMMSの概観

(2) 検証用の人為的変状設置

前章で実施した簡易シミュレーションの条件設定に合わせるため、検証用の人為的な変状を用意し、これを舗装路面上に設置して計測を行った。検証用変状の大きさは、簡易シミュレーションの設定時と同じ40cm×40cmの正方形で、高さについては1cm, 5cm, 10cmの3種類を用意した。

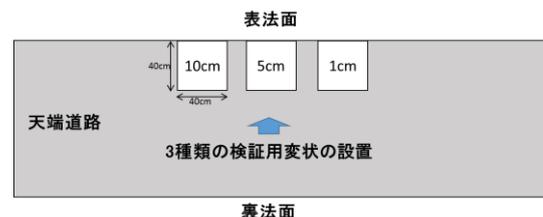


図-7 検証用の人為的変状の設置概要

(3) 計測結果

MMSの計測結果を以下に示す。以下は、計測された全点群データ（計測点間隔2cm×2cm）からTINモデルを構築し、表現したものである。

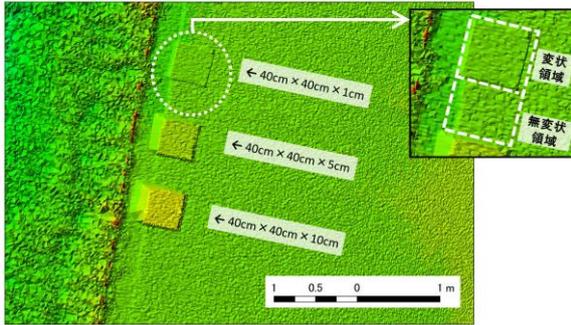


図-8 MMSによる計測結果

(4) 妥当性の検証

MMSにより計測した点群データを用いて、簡易シミュレーション結果の妥当性について検証を行った。

具体的には、図-9の通り、まず、4(3)の簡易シミュレーション実施条件に合わせ、40cm×40cm×1cmの検証用の変状領域（図-8拡大図、図-5の領域Aに対応）、および隣接する無変状領域（図-8拡大図、図-5の領域Bに対応）に存在する計測データから、Case I～CaseIVの条件を満たすように無作為に点群を抽出した。

次に、抽出した点群データに対して、変状領域及び無変状領域それぞれの高さの平均値を計算し、高さの差が1cm以上ある場合は検出成功とした。これを簡易シミュレーションと同じく1000回実施し、変状検出成功率を算出した。なお、図-8の範囲の計測は非常に短時間で実施したため、この範囲でのMMSにおけるGNSS/IMUの誤差は同じとし、ここでは考慮しない。

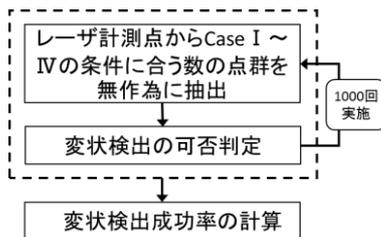


図-9 MMS計測データによる変状検出率の計算手順

図-9の手順で実施した場合の変状検出成功率と簡易シミュレーションにより計算された検出率（表-4）を表-7及び図-10に示す。

表-7 MMS実測データを用いた検出成功率の検証

計測点間隔	簡易シミュレーションによる検出成功率	MMS計測結果による検出成功率
Case I	100.0%	100.0%
Case II	100.0%	98.6%
Case III	98.5%	93.1%
Case IV	94.5%	86.3%

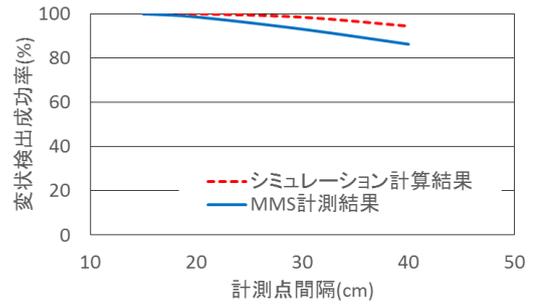


図-10 簡易シミュレーションとMMS計測データによる変状検出成功率の比較

表-7及び図-10から、今回提案した簡易シミュレーションにより推定された変状検出成功率は、実際にレーザ計測した点群データを使った場合に比べ、若干高くなっているものの、比較的良く一致していることが確認できた。このため、今回提案した簡易シミュレーションを用いることで、要求水準を満たす最適なレーザ計測点間隔を設定することが可能であると考えられる。

また、取得可能な微小変状の推定においても、同じ簡易シミュレーションで実施するため、シミュレーション結果と実際の結果で大きな差異は無いと推測される。

6. レーザ計測技術の点検実務への適用について

これまでは、レーザ計測技術を点検実務へ適用するにあたっての役割や課題、その解決方法等について、主に変状の検出の観点から検討を行った。

一方で、レーザ計測システムを点検実務へ適用するにあたって、現場の制約等により適用が困難となる場合が考えられる。ここでは、現在、測量等の分野で広く利用されているLP（航空レーザ）、MMS、地上型レーザ、UAVの各レーザ計測システムを点検実務へ適用させる場合について整理を行った。

(1) 各種レーザ計測システムの特徴

上記4種類の各種レーザ計測システムについて、主な特徴、長所、短所について整理を行った。

また、前章までの変状取得に関する検討において、計測点間隔が重要な要素となることが示されており、この項目にも留意した。整理結果を表-8に示す。

(2) 点検実務で考慮すべき状況の整理

現行の巡視・点検には、主に平常時・出水時の巡視、出水期前・台風期・出水後の点検、及び地震後の点検がある。ここでは、点検時に想定される状況を考慮し、平常時、出水時、地震後の3種類に分類し、その特徴を整理した（表-9）。

表-8 各種レーザ計測システムの特徴一覧

レーザ計測システム	LP(航空レーザ)	MMS	地上型レーザ	UAV	
計測方法	特徴	レーザ計測機を飛行機またはヘリコプターに搭載し、上空500m～2,500m程度から計測を行う	計測用車両にレーザ計測機を搭載し、データ取得を行う。	三脚にレーザ計測機を設置し、計測を行う。計測機は360度回転しながら全周囲のデータ取得を行う。	UAVにレーザ計測機を搭載し、上空30m～150m程度から計測を行う
	長所	・地表の状況に左右されず、上空から計測ができる ・短時間に広範囲のデータ取得が可能である	・短時間に長い距離のデータ取得が可能である ・LPの短所である上空の気象状況(強風等)などの影響は受けない	同じ場所で複数回計測機を回転させて計測を行うため、非常に高密度なデータが取得できる	地形的な条件や安全面から人や車両が入れない場所でも、計測が可能となる場合がある
	短所	降雨時の計測は不可			
計測点間隔の特徴	・上空の気象状況(強風等)によっては航空機の飛行ができない場合もある ・航空機と地面との間に雲があると、レーザが雲に遮られ計測できない	車両が通れない場所は計測できない	1箇所に設置して計測を行うため、広い範囲の計測には向かない	強風時は計測できない	
	・飛行機による計測の場合は、計測点間隔50cm程度 ・ヘリコプターによる計測の場合は、低速飛行が可能であり、計測点間隔の狭い高密度なデータ取得が可能	低速運転を行うことで、計測点間隔の狭いデータの取得が可能(システム上、停車時のデータ取得はできない場合が多い)	同じ場所で複数回計測機を回転させて計測を行うため、点間隔の狭い非常に高密度なデータが取得できる	UAVをホバリングさせることで、計測点間隔の狭い高密度なデータ取得が可能	

表-9 点検時に考慮すべき状況

点検種類	考慮すべき状況
平常時	・点検時に考慮すべき状況は特にない
出水時	・堤防への河川水の浸透等により、堤体自体の強度が低下している可能性がある ・越水や決壊の危険性がある
地震後	・地震動そのものによる影響、また液状化の発生等により、堤体自体の強度が低下している可能性がある

(3) 各種レーザ計測システムの点検実務への適用

表-8、表-9をもとに、各種レーザ計測システムの点検実務への適用について考察を行った。

a) 平常時

平常時の点検は、目視点検を基本とし、特に注意すべき区間(重点監視区間等)は、必要に応じてレーザ計測により微小な変状の把握を行うのが良いと考えられる。その際、注意すべき区間の範囲や地理的条件によって、MMS、地上型レーザ、UAVを選択し、把握すべき変状の規模により、5章で提案した簡易シミュレーションを使って最適な計測仕様を立案する方法が考えられる。

b) 出水時

出水時の点検では、降雨時や堤防等の計測対象物の表面が水で覆われる場合、レーザ光(近赤外レーザ)が水に吸収されてしまい計測が困難な場合が多い。このため、目視あるいは写真撮影等の別の方法をとる必要がある。

水が乾きレーザ計測が可能になっても、堤体自体の強度が低下している可能性があるため、MMSによる点検には注意が必要である。また、出水時はパイピング等、進行しつつある堤防の機能低下の状態を捉えることも、レーザ計測の重要な役割と考えられる。このため、目視等で地表面の状態変化に注意し、地上型レーザやUAVにより、微小な地面の変位を捉えることが重要となる。

c) 地震後

地震時の点検においても、堤体自体の強度が低下している可能性があるため、MMSによる点検には注意が必要である。このため、地震後の点検では、目視の他、地上型レーザ及びUAVによる計測を基本とし、堤体の安全性が確認されたのちMMSにより広域な範囲の計測を

行うのが適切と考えられる。

7. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ・目視とレーザ計測の比較結果から、点検実務でレーザ計測技術に求められる役割として、目視点検の代替技術、及び機能低下メカニズムの解明等を目的とした微小変状の抽出の2つがあると考えられる。
- ・レーザ計測機の性能、計測点間隔、検出可能な変状規模には関係性があり、この関係性から、変状検出に関するレーザ計測技術の点検実務への適用性を評価できる。
- ・現在、測量等の分野で広く利用されているレーザ計測システムを対象に、平常時、出水時、地震後の各点検に適用する場合について、計測システムの特性を踏まえて検討を行った。

これまでのレーザ計測技術の点検実務への適用性検証は、ある特定のレーザ計測機を対象としており、その方法自体に汎用性が無く、新しい機器が開発された場合は、その都度検証を行う必要があった。近年の技術革新のスピードを考えると、この方法の改善が必要である。

本論文では、レーザ計測技術が持つ普遍的な特性に着目し、点検実務への適用性の新しい検証方法を提案した。これにより、技術革新のスピードに合わせた、さらには異なる要求水準に合わせた適切な適用性の検証が可能になり、河川管理の効率化・高度化に寄与と考えられる。

参考文献

- 1) 齋藤和也 監修：図解航空レーザ計測，財団法人 日本測量調査技術協会，pp.28, 2008.
- 2) 倉田大輔，笹岡慎吾，福原直樹，森啓年，服部敦，佐々木哲也，石原雅規，吉田直人：河川堤防の進行性破壊における前兆となる地表変位の把握，第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，講演概要集，pp.16-19, 2015

(2017. 4. 3受付)