

堤防管理の高度化に向けた 堤防地表面の点群データの活用に関する検討

EVAUATION STUDY ON THE UTILIZATION OF LASER POINT GROUP DATA FOR THE ADVANCED MANAGEMENT OF LEVEE MAINTENACE

安達孝実¹・河野隆治²・関克己³・藤山秀章⁴・小澤淳眞⁵
Takami ADACHI, Ryuji KOHNO, Katsumi SEKI,
Hideaki FUJIYAMA and Atsumasa OZAWA

- ¹正会員 工修 前 (公財) 河川財団 河川総合研究所 戦略的維持管理研究所
(〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)
(現 内閣府 総合海洋政策推進事務局)
- ² (公財) 河川財団 河川総合研究所 (〒103-0001 東京都中央区小伝馬町11-9)
- ³正会員 工博 (公財) 河川財団 (〒103-0001 東京都中央区小伝馬町11-9)
- ⁴正会員 (公財) 河川財団 (〒103-0001 東京都中央区小伝馬町11-9)
- ⁵ (株) パスコ 中央事業部 河川技術室 (〒103-0001 東京都目黒区青葉台3-10-1)

With the advance of the laser measurement technology, the laser point group data can become easily gained through the laser measurement by MMS (Mobile Mapping System), and it is expected to utilize for the levee maintenance management in the future.

In this study, considering the influence of the plants on the levee surface and the difference of the density of the laser point group data depending on the levee location, we evaluated the density of the laser point group data which are effective to evaluate the height of the levee surface by using the actual levee cite data. This result will contribute to the advanced management of levee maintenance by using the laser point group data in the future.

Key Words : Mobile Mapping System, density of the laser point group data, height of levee surface

1. はじめに

計測技術の進展により、MMS (Mobile Mapping System) 等によるレーザ計測で点群データを取得できるようになり、堤防の沈下やはらみ出し等の変状を点群データで経年的・定量的に把握し、今後の堤防管理に活用することが期待される。

点群データの活用においては、堤防地表面の植生による遮蔽の影響や、MMSの場合には堤防下部の点密度が低いことを考慮する必要がある。

本研究は、堤防地表面の植生による遮蔽の影響と堤防の部位による点密度の相違を踏まえ、堤防地表面を代表する標高の計測に有効な点密度を実測データから把握し、点群データを活用した堤防断面の管理の高度化を目指すものである。

なお、各種レーザ計測システムについては、小澤らが特徴を整理しており¹⁾、MMSは短時間に長距離のデータ取得が可能であり上空での強風の影響を受けないという

長所がある反面、車両の通行ができない場所では計測が困難であるという短所があるとしている。また、MMSは、レーザ点群データとカメラ画像を同時に取得し、堤防全体の状況を把握できる長所があるとしている。

2. 計測概要

(1) 計測機器の諸元等

MMSとは、車両にGNSS (Global Navigation Satellite System) 測量機、IMU (慣性計測装置: Inertial Measurement Unit)、走行距離計、レーザ測距装置、デジタルカメラを搭載し、車両周辺の対象地物について三次元レーザ点群及びデジタルカメラ画像を取得する移動計測車両システムである。

また、今回使用したMMS (VQ-450) は、レーザ測距装置を高所に設置した河川計測用の車両であり、レーザ測距装置の搭載位置は地表面から約3.6mである。車両に搭載されたカメラから前方及び側方の撮影も行っている。

(2) 計測時期、計測場所等

MMSによるレーザ計測は2016年6月22日に実施し、計測時の天候は曇りであった。

計測場所はA河川の中流部であり、川裏側の堤防法面には2段の小段がある。レーザ計測は堤防除草後から約1か月経過し、写真-1のように防法面に植生の繁茂が見られる状況で行った。



写真-1 MMSによる撮影写真

(3) 分析対象とした区間及びその状況

今回分析対象とした堤防の部位は、天端、法面上部、法面下部、刈草が集積された堤防の小段、未除草であった堤防の天端法肩であり、イメージを図-1に示す。

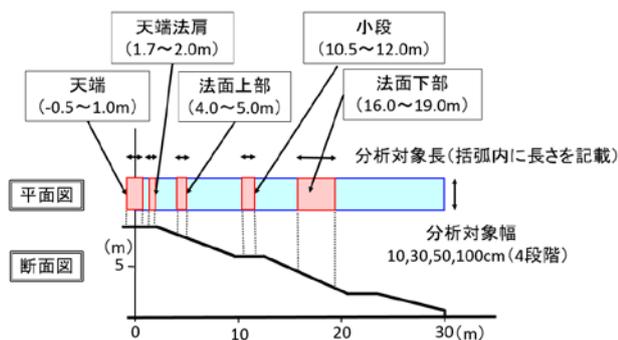


図-1 点群データの分析対象範囲のイメージ

ここで、分析対象幅とは堤防法線と直交する帯状の区間の幅を指し、分析対象長は天端中央を起点とした法線下部までの水平延長を示す(図-1)。

分析対象とした法面上部・法面下部は、ともに法面勾配がほぼ一定とみなせる区間で、法面上部・法面下部ともに高さ20~30cm程度のチガヤが繁茂していた。天端はアスファルト舗装がされており、植生はない。

堤防の小段には刈草が約30cmの高さで集積されていた。堤防の天端法肩は高さ約60cm、幅約30cmで未除草のチガヤが繁茂していた。

(4) 点群データの分析対象ケース

点群データの分析対象ケースは以下のとおりである。

a) 天端、法面上部、法面下部の分析範囲

- 分析対象幅 : 10,30,50,100cmの4段階
- 分析対象長 : -0.5~1.0m, 4.0~5.0m, 16.0~19.0m
- 分析対象断面 : 1断面(天端)
3断面(法面上部・法面下部)

なお、植生の影響は箇所ごとに異なることが想定されたため、約40m間隔の3断面で分析することとした。

b) 堤防の小段の分析範囲

- 分析対象幅 : 50cm
- 分析対象長 : 10.5~12.0m, 10.7~11.2m, 10.9~11.1m
- 分析対象断面 : 1断面

c) 堤防の天端法肩の分析範囲

- 分析対象幅 : 10,30,50,100cmの4段階
- 分析対象長 : 1.7~2.0m
- 分析対象断面 : 1断面

3. 点群データの処理の考え方

(1) 点群データの特徴

MMSによる計測の特性として、レーザ測距装置からの距離が長くなるにつれて有効な点群の数が少なくなることが挙げられる。

また、堤防における計測では、レーザ光が堤防地表面に到達する前に、地表面の標高よりも高い植生をデータとして捉える可能性が高い。

なお、レーザ計測では計測点毎に偶然誤差を有し、そのばらつきは一般的に正規分布に従うと考えられるが、代表的なレーザ計測機の精度は数cm以内¹⁾であり、本計測で使用したレーザ計測機(VQ-450)の精度は0.5cm(=標準偏差1 σ)²⁾とされている。

(2) 点群データの処理の考え方

航空レーザ測量では、数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)の作成にあたり、地表面遮蔽物部分の計測データを除去することをフィルタリングといい、地表面遮蔽物として建物、植生等を例示している³⁾。

堤防における計測では、レーザ光が堤防地表面に到達する前に地表面の標高よりも高い植生をデータとして捉える可能性が高いため、植生の影響の除去が重要である。

一方で、分析対象である堤防法面は必ずしも平坦ではなく凹凸があることなどから、堤防法面について分析範囲の標高値を特定することは難しく、分析対象とした範囲の標高は一定の幅を持たせて示すことが適当と考えられる。

以上を踏まえ、点群データの高さ方向の分布を確認し、最下層から一定の高さを超えた点群は植生による影響を受けていると判断し、除去することとする。

(3) 仮想地表面の設定

本分析では、堤防地表面の真値を特定するのは難しいことから、仮想地表面を設定し、仮想地表面を基準として計測された点データの標高を評価することとした。

仮想地表面の設定は、地表面に到達したと想定される点データを活用し、分析対象区間の端部（法面上部は端部5cmの区間、法面下部は端部10cmの区間）の最も低い点を仮想地表高として、その点を結ぶ面を仮想地表面として作成することとした。

なお、仮想地表面の勾配は法面上部で1:1.98～1:2.26、法面下部は1:2.75～1:2.99であり、3断面で極端な差異がないことを確認している。

4. 計測幅の評価

(1) 断面を捉える計測幅

どの程度の計測幅があれば、堤防断面として把握できるかを調べるため、分析対象幅を10,30,50,100cmの4種類に設定し、点群データをプロットしたものを図-2に示す。

レーザ測距装置からの距離が遠いほどデータ数が少なくなるが、今回の計測の点密度（堤防天端で約4800点/m²）であれば、分析対象幅10cmの点群データで堤防の地表面を概ね表現することが可能である。

一方で、点群は一定の分布幅があり、堤防法面の植生等の影響があることが分かる。

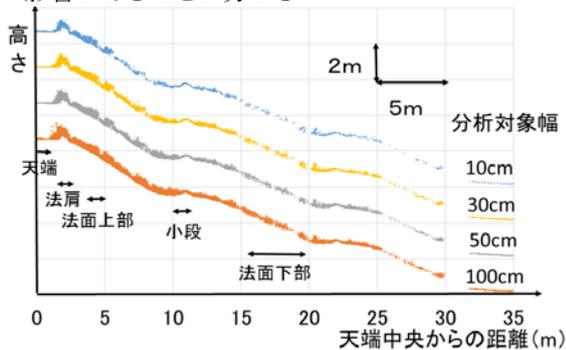


図-2 分析対象幅10,30, 50,100cmの点群の分布状況

なお、法面上部・法面下部の点群の分布イメージは写真-2に示すとおりであり、レーザ測距装置からの距離の

相違で点密度が異なり、分布も一様でないことが分かる。

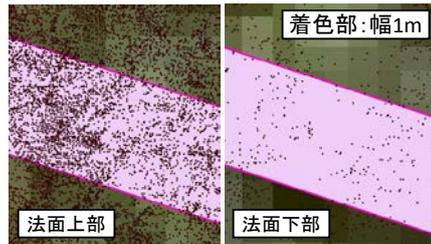


写真-2 法面上部(左)と法面下部(右)の点群分布

(2) 堤防の部位による計測幅の評価

堤防の法面上部、法面下部において、仮想地表面と計測データの標高差を整理したものを図-3(a)-(h)に示す。

今回の計測の点密度（堤防天端で約4800点/m²）であれば、今回の計測で対象とした堤防の法勾配と植生の場合、概ね30～50cmの分析対象幅があれば、点密度が小さい法面下部であっても、植生による点群データへの影響を捉えうることが分かる。

5. 堤防の部位による点群データの評価

(1) 天端における点群データの評価

天端は点密度が概ね4800点/m²であり、高さ方向の差異も約2cm内であった(図-4)。

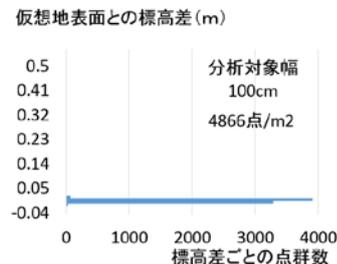
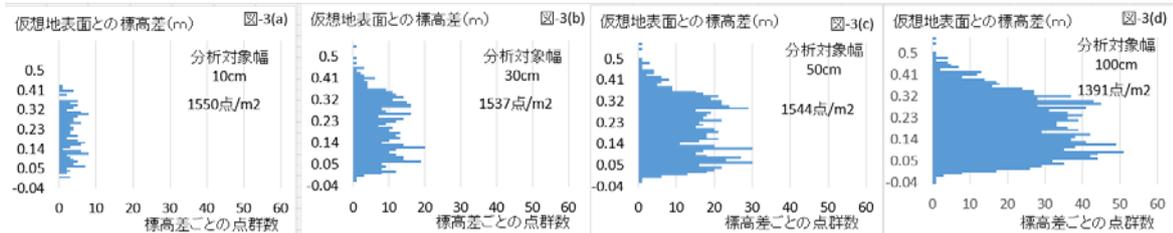


図-4 仮想地表面と計測データの標高差の関係(天端, 分析対象幅100cm)

法面上部(4.0～5.0m)



法面下部(16.5～19.5m)

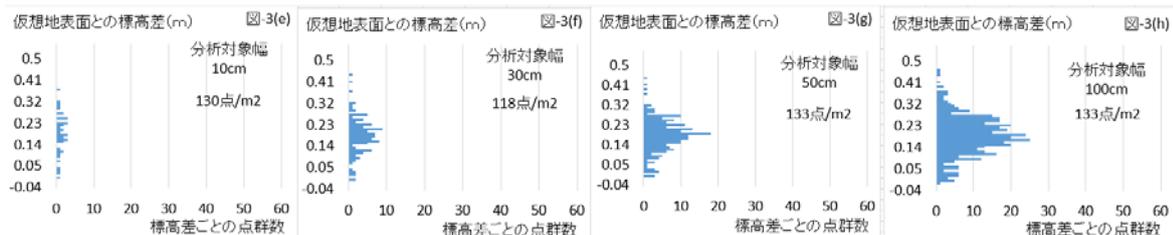


図-3(a)-(h) 仮想地表面と計測データの標高差の関係(法面上部・法面下部, 分析対象幅10, 30, 50, 100cm)

(2) 法面上部における点群データの評価

法面上部の3断面の点密度は約1400~2100点/m²であった。

仮想地表面と計測点の標高差が小さな点から累積して整理したものが図-5である。仮想地表面と計測点標高の差は最大で40cmであり、植生の上部を捉えている。

点群が地表面をとらえている範囲の判断基準については、草丈5cmとしている³⁾ものがあることから、本分析では仮想地表面から5cmに属する点群が地表面を捉えていると考えることとした。

分析対象とした3断面では、仮想地表面を基準として高さ0~2.5cmの範囲に5~14%の点群が、0~5cmの範囲に11~33%の点群が属する。仮に、0~5cmの範囲を属する点群が地表面を示すと考えれば、67~89%の点群が植生の影響を受けたものと想定され、地表面を示す有効な点群の点密度は153~689点/m²となった。

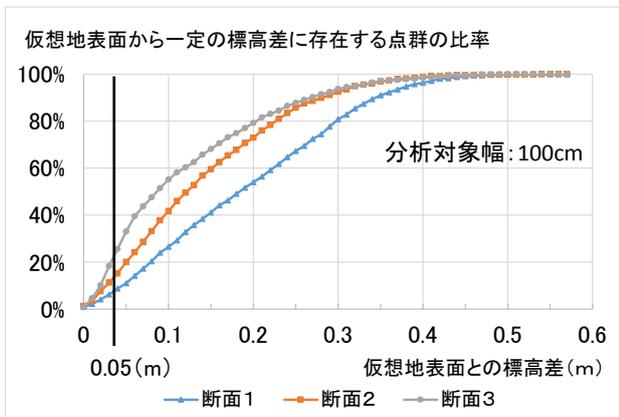


図-5 仮想地表面から一定の標高差に存在する点群の比率
(法面上部 (3断面), 分析対象幅100cm)

(3) 法面下部における点群データの評価

法面下部の3断面の点密度は約100~150点/m²であった。

法面上部と同様に、仮想地表面と計測点の差が小さなものから累積して整理したものが図-6である。仮想地表面と計測点標高の差は最大で35cmであり、植生の上部を捉えている。

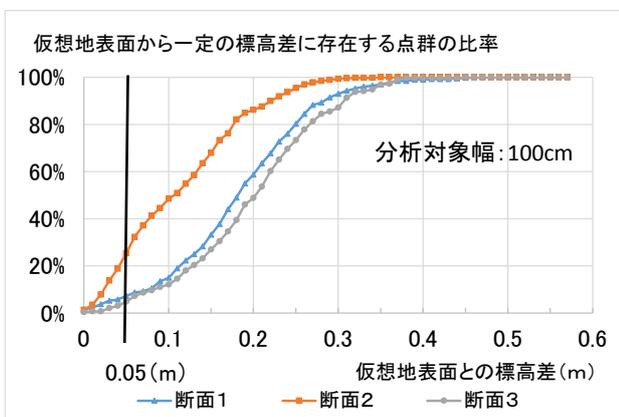


図-6 仮想地表面から一定の標高差に存在する点群の比率
(法面下部 (3断面), 分析対象幅100cm)

分析対象とした3断面では、仮想地表面を基準として高さ0~2.5cmの範囲に1~11%の点群が、0~5cmの範囲に5~25%の点群が属する。仮に、0~5cmの範囲に属する点群が地表面を示すと考えれば、75~95%の点群が植生の影響を受けると想定され、地表面を示す有効な点群の点密度は5~39点/m²となった。

なお、法面上部・法面下部の各3断面で点群の分布に差があったのは、植生の繁茂状況が各断面で差があったためと推察される。

(4) 小段の集草部における点群データの評価

小段の集草部は10.5~12.0mの範囲である。3段階の分析対象長で分析した結果が図-7~図-8である。

分析対象長が最も小さい10.9~11.1mの場合には鉛直方向20cm以下の点群の分布がなく、点群が集草部の表面を捉えてしまっており、地表面を捉えることが困難なことが分かる。

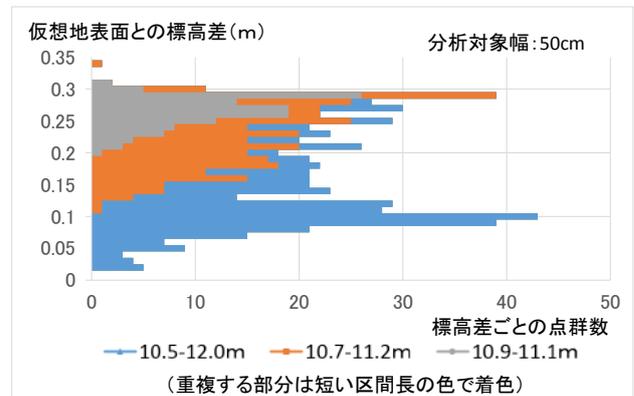


図-7 分析対象長を変化させた場合の標高差ごとの点群数
(小段, 分析対象幅50cm)

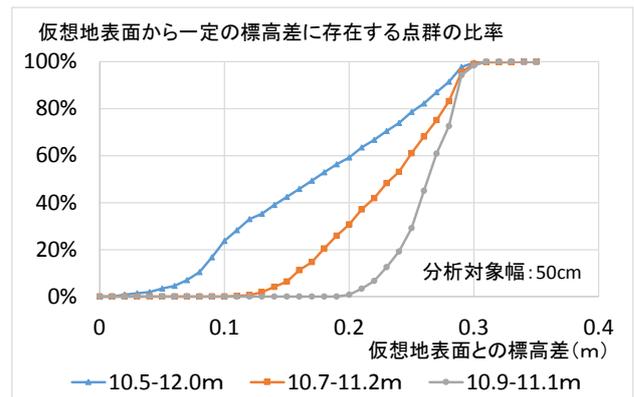


図-8 仮想地表面から一定の標高差に存在する点群の比率
(小段, 分析対象幅50cm)

(5) 天端法肩における点群データの分布特性

天端法肩にはチガヤが繁茂しており、植生の高さは約60cmである。分析対象幅100cmにおいて、仮想地表面と計測点の差が小さなものから累積して整理したものを図-9~図-10に示す。

分析対象幅100cmの場合、下部5cmに存在する点群の比率は約0.8%（13点/1824点）に過ぎず、点群がほぼ地表面に到達していないことが分かる。なお、点密度は約6000点/m²である。

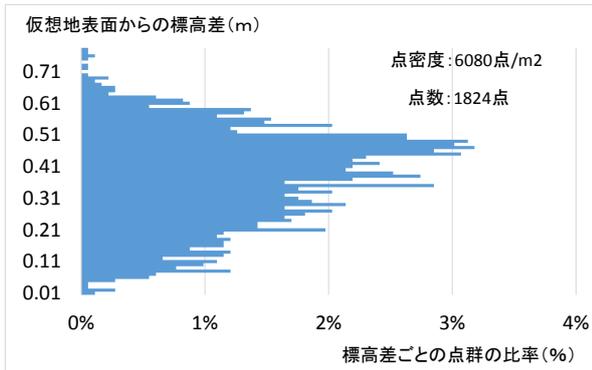


図-9 仮想地表面から一定の標高差に存在する点群数（天端法肩、分析対象幅100cm）

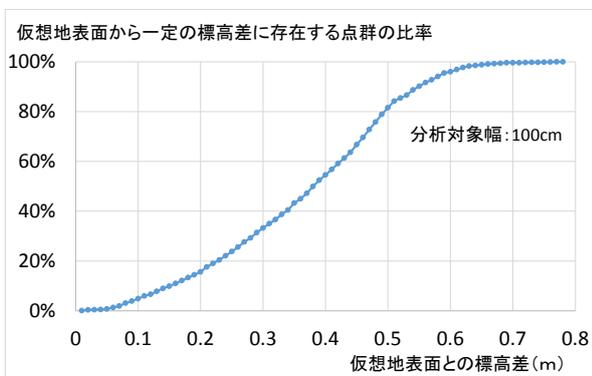


図-10 仮想地表面から一定の標高差に存在する点群の比率（小段、分析対象幅100cm）

6. 植生の影響を考慮した矩形グリッドの信頼度

(1) 一定の信頼度を確保するための点密度の考え方

点群が分布する矩形グリッドの精度は、矩形グリッド内に存在する有効な点群数で判断することが可能である。

「三次元点群を使用した断面図作成マニュアル（案）」では、傾斜変換点（地形の傾斜方向及び勾配が著しく変化する点）及び主要な構造物が存在しない箇所については、標高を算出する地点の間隔が10.0mの場合、使用する三次元点群の標準的な点密度は「1m²につき4点以上」としている⁴⁾。

また、「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」では、地形以外の特徴を示す特徴点や成果に不要となる特徴点等の異常点を取り除くものとしており、草、樹木を例として挙げている。土木施工において使用する三次元点群の点密度は、標準の密度で「0.25m²につき1点以上」としている⁵⁾。

以上を踏まえ、本稿では「①1m²につき4点以上」「②0.25m²につき1点以上」を判断基準として、点群の実測値を用いて評価を行うこととした。

(2) 点群の実測値を用いた堤防の各部位における矩形グリッドの信頼度

a) 各部位における矩形グリッドの精度

法面上部、法面下部及び天端について、実測の点密度、仮想地表面から5cmに存在する点群の比率、地表面を示すと想定される点群の点密度は、分析対象長100cmの場合、表-1のとおりであり、法面上部・法面下部とも①②の判断基準を上回っている。

レーザの距離に伴う拡散の観点からは、一定長の矩形グリッドに入る点群の点密度は距離の二乗に反比例すると考えられる。レーザ測距装置からの代表距離は天端で約3.6m、法面上部（区間中心）で約6.7m、法面下部（区間中心）で約20.0mであり、概算では、仮想地表面から5cmに含まれる点群の点密度は、法面上部で天端の約1/3.5、法面下部で約1/31となる。

一方で、今回の計測では、仮想地表面から5cmに含まれる点群の点密度は、法面上部で堤防天端の約1/7～32、法面下部で約1/130～1050となっている。

表-1 仮想地表面から5cmに含まれる点群の点密度

計測位置	断面	実計測での点密度	仮想地表面から5cmに含まれる点群の比率	仮想地表面から5cmに含まれる点群の点密度	天端の点密度を1とした場合の比率
		(点/m ²)	(%)	(点/m ²)	
法面上部	断面1	1391	11.0%	153	1/31.8
	断面2	1905	20.1%	382	1/12.7
	断面3	2086	33.0%	689	1/7.1
法面下部	断面1	133	7.3%	10	1/505
	断面2	153	25.3%	39	1/126
	断面3	96	4.8%	5	1/1046
天端	断面1	4866	100.0%	4866	-

なお、堤防除草直後であれば、植生の高さは仮想地表面から5cmよりも低くなると想定される。仮に、仮想地表面から2.5cmに含まれる点群が地表面を示すと考えると、法面上部で約1/16～68、法面下部で約1/300～3700と試算された。

b) 個々の点の到達確率が一定である場合の矩形グリッドの信頼度

法面上部・法面下部の各3断面の点群について、表-1で示した実計測での点密度と仮想地表面から5cmに含まれる点群の比率を用いて、地表面に到達したと想定される点群が「①1m²につき4点以上」「②0.25m²につき1点以上」を上回る確率を算出したところ、表-2のとおりとなった。

法面上部は点密度が大きいため①②ともに100%であるが、法面下部は点密度が小さいため断面によって差が発生している。これは、断面1・3と断面2では点密度自体は大きく変わらないが、仮想地表面から5cmに存在する点群の比率に大きな差があることによる。

表-2 点密度に係る基準①②を満足する確率

計測位置		「①1m ² につき4点以上」を満足する確率	「②0.25m ² につき1点以上」を満足する確率
法面上部	断面1	100.0%	100.0%
	断面2	100.0%	100.0%
	断面3	100.0%	100.0%
法面下部	断面1	91.7%	98.9%
	断面2	100.0%	100.0%
	断面3	69.6%	68.9%

(3) 堤防除草後を想定した矩形グリッドの信頼度

矩形グリッドの精度を向上させるには、地表面に到達したと想定される点群の数をより多くすることが重要である。そのためには、堤防除草から計測までの期間を短くし、植生が小さい時期に計測することが有効となる。

ここでは堤防除草によって仮想地表面から5cmまでに存在する点群の比率が上昇すると考え、比率の上昇によって「①1m²につき4点以上」「②0.25m²につき1点以上」を満足する確率がどの程度上昇するかを試算した。点密度は、法面下部の3断面の実測の点密度96~153点/m²を踏まえ、100,125,150点/m²と設定した。

分析結果(図-11~図-12)から、仮想地表面から5cmまでに存在する点群の比率が0.1以下になると、急激に①②を満足する確率が低下するのが分かる。

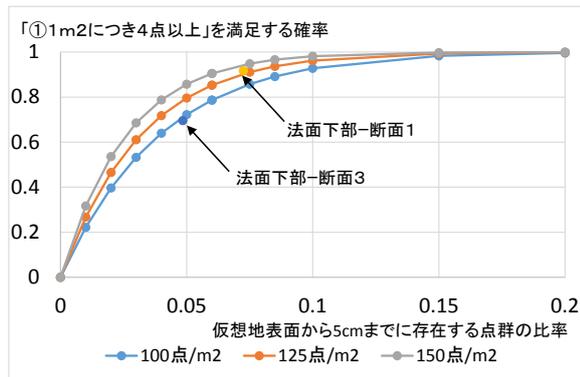


図-11 基準「①1m²につき4点以上」と点密度の関係

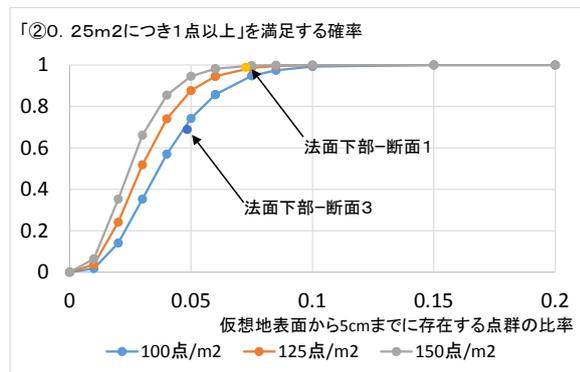


図-12 基準「②0.25m²につき1点以上」と点密度の関係

この分析は、除草後一定の時間が経過し、植生が著しく繁茂した状況では、計測を実施しても、点群の計測データから地表面を把握することは難しいことを示唆している。

今後、点群の地表面の到達確率と植生の繁茂状況の関係を現地計測で把握することで、「除草後からいつまでに計測を行えば堤防法面の標高を精度よく計測できるか」を把握できると考えている。

7. まとめ

本研究では、MMSによる点群データと植生による遮蔽の影響を把握することを目的として、堤防の各部位におけるMMSによる点群データの計測結果の分析を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1)堤防法面の仮想地表面を設定し、一定の幅を持たせて堤防法面の標高値を示すことは、堤防法面が必ずしも平坦でなく標高値を一つに特定することが難しい点や、植生の影響を除去するという点から有効な手法になり得る。
- (2)今回の計測は堤防除草から約1か月後に行っており、計測位置によっては、仮想地表面から5cmに含まれる点群の比率が5%程度まで低下していた。これは点群の大部分が植生で遮蔽されていることを意味し、堤防除草後の早い段階で計測することの重要性を示唆している。
- (3)MMSによる計測ではレーザ測距装置からの距離の増加に伴い点密度が大きく減少し、今回の計測では法面下部の点密度は法面上部の1/10程度となった。仮に植生で遮蔽される点群の比率が同じであっても、地表面に到達したと想定される点群数には大きな差が生じるため、グリッドの信頼度が大きく異なりうることを示唆している。

今回はA河川の法面上部・下部の3断面で行った計測結果をもとに分析したものであり、今後は分析箇所を増やし、傾向の相違があるかどうかを確認する必要がある。

あわせて、植生の繁茂状況・植生の種類と点群の地表面への到達度の差異を実測データから整理し、計測時期と信頼性の関係等について検討を行うことが重要である。

参考文献

- 1) 小澤淳真, 安達孝実, 吉田高樹, 関克己, 岡部貴之, 山崎崇徳: レーザ計測技術の点検実務への適用に関する検討, 河川技術論文集 第23巻, pp329-334, 2017.
- 2) 国土交通省国土地理院: 航空レーザ測量による数値標高モデル (DEM) 作成マニュアル (案), 2006.
- 3) 郷家康弘, 千葉孝寿, 武田貴子, 高田浩徳: 堤防管理へのモータルマッピングシステム活用検討について, 平成27年度国土交通省東北地方整備局管内業務発表会, 2015.
- 4) 国土地理院: 三次元点群を使用した断面図作成マニュアル (案), 2016.
- 5) 国土交通省国土地理院: UAVを用いた公共測量マニュアル (案), 2017.

(2018. 4. 3受付)