

堤防法面の変状把握におけるUAVレーザ測量の適用限界

APPLICABILITY OF UAV LASER SURVEYS TO ASSESS DEFORMATION IN RIVER LEVEE SLOPES

中村 賢人¹・福島 雅紀²・諏訪 義雄³

Kento NAKAMURA, Masaki FUKUSHIMA and Yoshio SUWA

¹正会員 元 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 研究官
(関東地方整備局 下館河川事務所 調査課 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成1753))

²正会員 博士(工学) 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 主任研究官
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 室長 (同上)

Recently UAV has been expanding its application to river surveys. UAV laser surveying and leveling were carried out on the river embankment surface where vegetation grows, and their difference and laser transmittance were examined. In addition, a vegetation survey on the levee was conducted to clarify the influence of the vegetation and the density of the vegetation on the surveying accuracy of UAV laser surveying. As a result, it was confirmed that in order to measure the surface shape of the embankment law surface, it is important to control the plant height to about 50 cm or less in the case of plants of the grass family with small leaf area.

Key Words : UAV, laser scanner survey, levee damage, surface deformation

1. 研究の背景と目的

国土交通省は、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」¹⁾に基づき、出水期の前後において河川構造物や河道の点検を目視によって実施し、変状が発見された場合には対策の必要性や優先度を検討するなどの維持管理を行っている。しかし、長大な堤防の点検を目視によって実施するには、点検実施者に技術力が要求される上、点検要員と点検時間の観点から多大な労力を要する。そこで国土交通省は、Unmanned aerial vehicle (以下、UAVと呼ぶ) にレーザ測量機器を搭載し、堤防の点群データを取得することで (以下、UAVレーザ測量と呼ぶ)、点検の効率化を目指している²⁾。

UAVレーザ測量は、航空レーザ測量に比べ、低い高度からレーザを照射することにより、小さいフットプリントで高密度な点群データの計測が可能であり、植生の繁茂する堤防法面でも、堤防法面までレーザが到達することが期待されている。渡辺ら³⁾は植生の繁茂する状況下でUAVレーザ測量の測量精度の定量的評価を目的に、植生が繁茂する砂州上の形状を測量し、GPS測量成果と

比較することで、植生の繁茂密度が高い地点では河床までレーザが到達していないことを確認した。また、河川堤防の法面に草丈が高く根が浅い植生が繁茂すると、土壌の緊縛力が低下し、堤体が弱体化することが知られている。目視点検を実施しやすくすることに加え、堤体の弱体化を防止するため、国管理河川の堤防では年2回の除草を標準としている⁴⁾。本報告で対象とする小貝川の堤防でも年2回の除草を行っており、チガヤ等のイネ科の植物が優占している。このような植生が繁茂する場におけるUAVレーザ測量の測量精度については、定量的な評価を実施した事例はほとんどない。

そこで本報告では、高さ1.5m程度の植生が繁茂する河川堤防 (延長30m) において、延長3mごとに区間分けを行い、それぞれの区間で植生高を10cm~90cmに刈り揃え、UAVレーザ測量により堤防形状を計測した。同時に、各区間で3測線 (合計30測線) を設定し、水準測量によって横断形状を計測した。両者を比較することで、植生高や植生の繁茂密度がUAVレーザ測量の測量精度に与える影響を確認した。なお、本検討は、UAVレーザ測量成果から堤防表面の変状を検出するための事前検討として実施したものである。



図-1 調査対象範囲及び調査ブロックの設定



図-2 UAVの外観

2. 調査内容

(1) 調査対象範囲

利根川水系小貝川49.6k付近右岸にて、延長30m程度の河川堤防を調査区間として設定した。堤防高は5m程度、川表法面勾配は3割程度、川裏法面には小段が有り、第一法勾配が3割程度、第二法勾配が2割程度である。図-1に示す通り、同区間を3m毎に10個のブロックに分割し、植生高が10cm～90cmとなるように10cmずつ高さを変えて、各箇所の植生高を刈り揃えた（以下、刈り揃えた高さを調整高と呼ぶ）。残る1箇所は刈り揃えを実施せず、最大で1.5m程度の植生が繁茂していた。なお、刈り揃えた範囲において、調整高以下の植生については刈り揃えの対象とせず残した。

(2) 測量

a) UAVレーザ測量

計測に使用したUAVは、図-2に示すような回転翼タイプである。また、UAV、レーザスキャナ及びIMU/GNSSの仕様を表-1に示す。IMU/GNSSによって得られたUAVの姿勢と位置の情報を用いて、レーザスキャナより取得された点群データを座標及び標高の情報を持つ点群データに変換した。なお、レーザを地盤に到達させるため、調査対象範囲の上空を3回飛行し、3回の飛行で得られた点群データを重ね合わせて、300点/m²以上と高密度な点群データを作成した（図-3）。なお、レーザのフットプリントの大きさは2cm程度である。

表-1 UAV、レーザスキャナ及びIMU/GNSSの仕様

UAV (ルーチェサー チ社製： SPIDER-UD8)	重量：10.5kg（バッテリー含む）
	外形寸法：900×900×450mm
	駆動：モーター駆動
	瞬間最高速度：90.0km/hr（25m/sec）
	耐風：地上風速10m/sec以下
	最大飛行時間：14分
レーザスキャナ (RIEGL社製： miniVUX-1)	最大搭載可能重量：14.5kg
	重量：1.6kg
	外形寸法：242×99×85mm
	レーザクラス：クラス1
	測定距離：250m（ターゲット反射率60%）、150m（ターゲット反射率20%）
	最短測定距離：3m
IMU/GNSS	精度 / 確度：15mm / 10mm
	有効測定レート：100,000測定/秒
	位置精度：0.05～0.3m

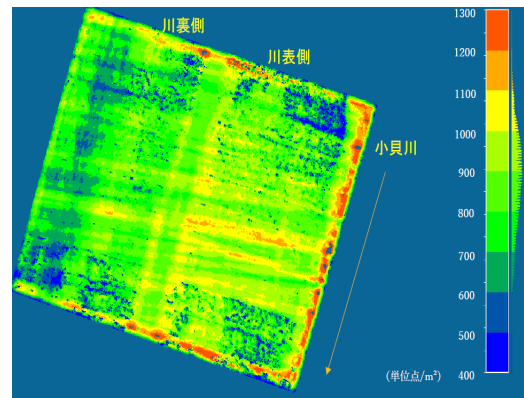


図-3 点群データの取得密度の分布

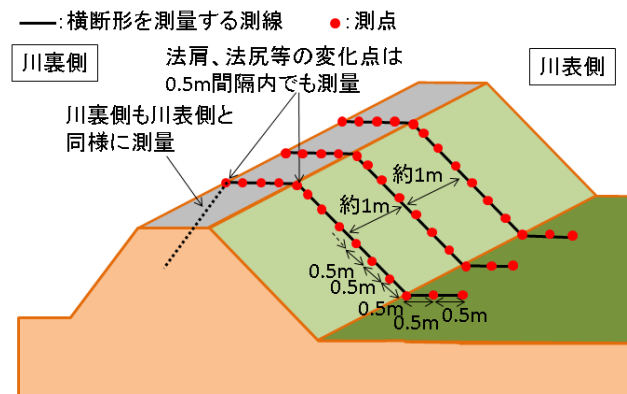


図-4 各ブロックにおける横断測線及び測点

b) 水準測量

UAVレーザ測量の測量精度を把握することを目的に、レベルとスタッフを用いた水準測量を実施した。水準測量を実施する地点としては、(1)で設定した各ブロックにおいて横断測線を縦断方向約1m間隔に3本設定し、各測線において図-4に示す通り、法尻付近の高水数幅100cmを含めて、堤防断面形状を50cm間隔で計測した（以下、地形測量結果と呼ぶ）。なお、50cm間隔の間

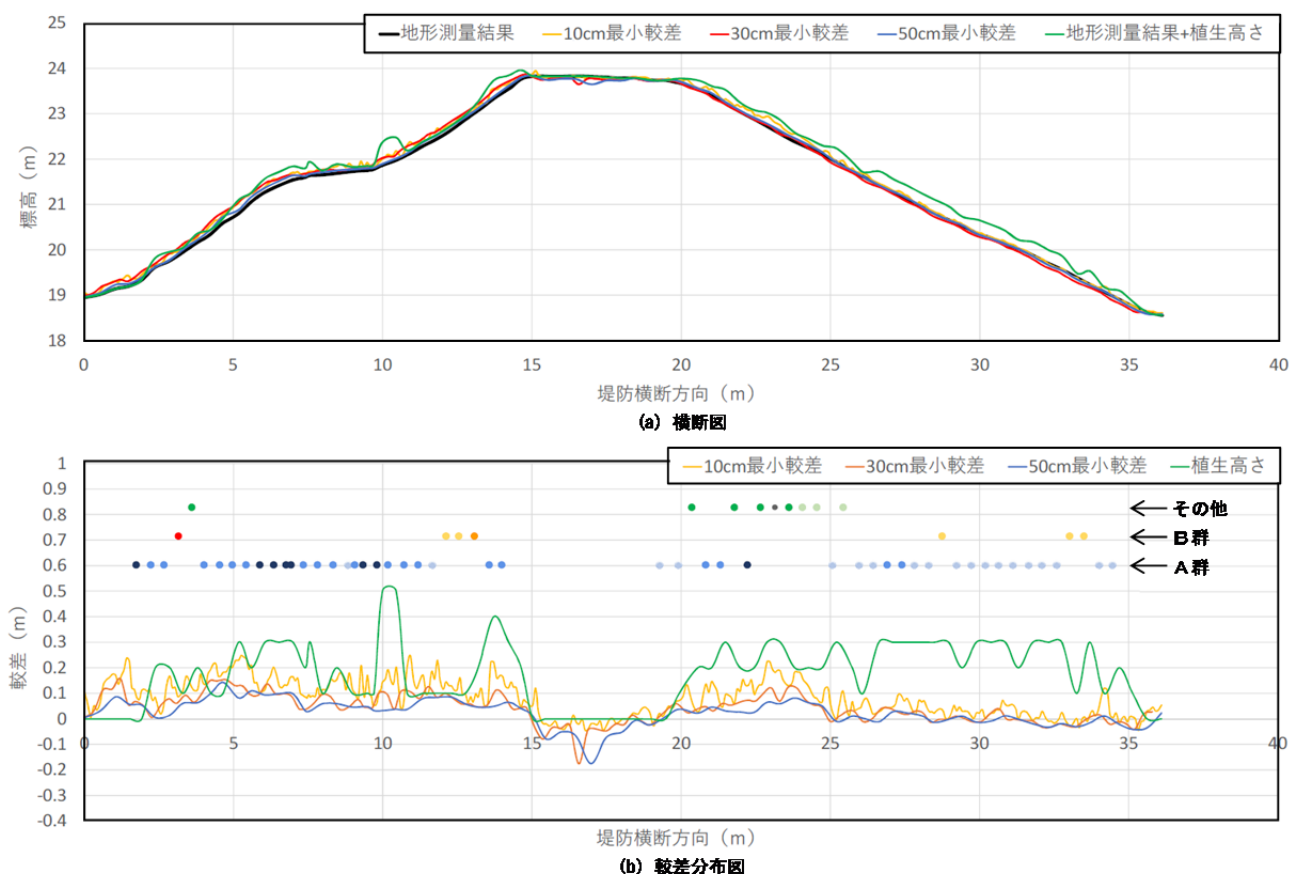


図-5 横断面図（水準測量、UAVレーザ測量）の比較と植生の繁茂状況

に地形の急変点があった場合には、その点の位置と標高を測量した。以下、水準測量で計測した点を測点と呼ぶ。

図-5は、横断面図の一例として、植生高を0.3mに刈り揃えたブロック6の下流側測線について、較差と植生の繁茂状況を合わせて示す。横断面図には、水準測量で得た地形測量結果に加え、UAVレーザ測量で得た断面図（10cm最小較差等）もプロットした。10cm最小較差とは、測点を中心とする10cm枠を設け、そこで計測された点群データの中から堤防表面形状との較差が最も小さい点を調べ、その較差を地形測量結果の標高に加えてプロットしたものである。堤防表面形状については、30本の横断測線上で得られた測点からTINを作成し、点群データの位置での表面形状を補間した。なお、30cm最小較差、50cm最小較差についても、枠の大きさを変えて算定した最小較差である。植生高さ、A群、B群、その他については、次項で説明する。

(3) 植生調査

UAVレーザ測量の測量精度に与える植生の影響を確認するため、調査対象範囲に優占する植生群落を確認し植生分布図を作成した（図-6）。次に、各植生群落の特徴を調査するため、各ブロックで6点ずつ（10ブロックあるので合計60点）抽出し、図-6に“□”で示す30cm四方の管理区分別調査枠（以下、調査枠と呼ぶ）を設け、繁茂密度を確認し、疎、中間、密の三段階に分類した。

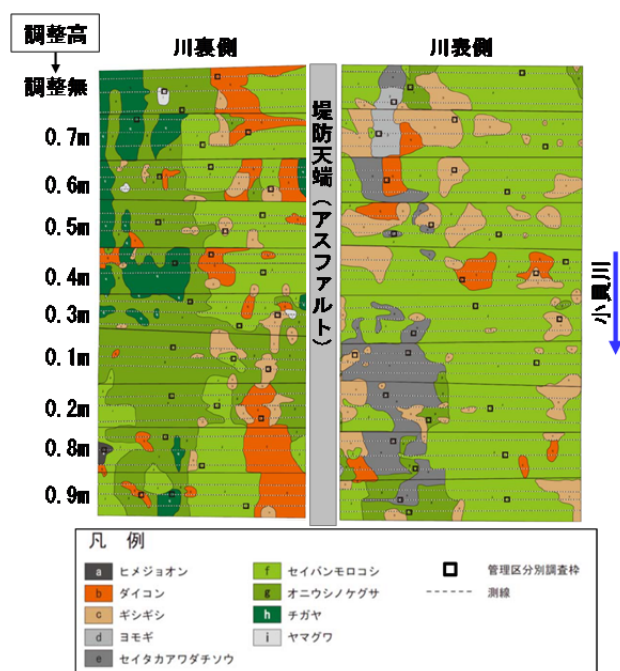


図-6 植生分布図

また、葉の面積によって、レーザを阻害する度合いが異なると考えられることから、上空から見た時の葉の面積が小さい植生（以下、A群と呼ぶ）と葉の面積が大きい植生（以下、B群と呼ぶ）に分類した。表-2は分類の目安を、図-7はA群としてセイバンモロコシ、B群として

表-2 繁茂密度の分類の目安と測点数

葉の広がりから見た植生の種類	繁茂密度の分類	測点数	繁茂密度を分類する際に計測した植生数
A群 (上空から見た葉の面積小)	疎	511	セイバンモロコシ：7~23 オニウシノケグサ：12~39 チガヤ：30
	中間	503	セイバンモロコシ：25~30 オニウシノケグサ：48
	密	284	セイバンモロコシ：37~54 オニウシノケグサ：64~142 チガヤ：73~87
B群 (上空から見た葉の面積大)	疎	115	ダイコン：16~19 ギンギシ：3~9
	中間	142	ダイコン：21~22 ギンギシ：10~14
	密	156	ダイコン：32~42 ギンギシ：15~24

A群(セイバンモロコシ)



B群(ギンギシ)



図-7 繁茂密度の分類

ギンギシを例として繁茂状況を示す。セイバンモロコシに加え、オニウシノケグサ、チガヤをA群、ギンギシに加え、ダイコンをB群と分類し、これらを次章の検討対象の植生とした。

水準測量の際に、各測点において、優占する植生の種類（A群、B群）、植生高さ（30cm方形枠内の平均的な植生高さを目視によって判断し計測した高さ）、繁茂密度（疎、中間、密）を調べた。表-2には、確認された測点数、及び繁茂密度を分類した際の計測した植物の数を記載した。ここで、同じ植生の種類として分類した植生でも、葉の形状や枚数が異なるため、異なる本数（例えば、B群の疎でダイコンは16~19本に対して、ギンギシは3~9本）でも同じ繁茂密度に分類した。

図-5の植生高さは、上記の植生調査で記録した高さを地盤標高に加えて表示したものである。また、各測点で優占する植物の種類と繁茂密度を色の濃さで表示した。なお、図-5にあるヒメジョオン、ヨモギ、ヤマグルワ、セイタカアワダチソウについては、花卉や穂の形状がA群

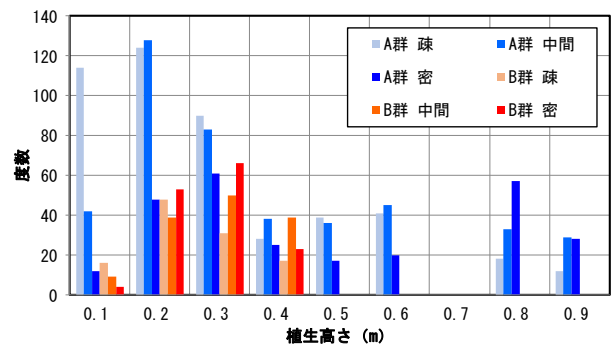


図-8 植生の種類別・繁茂密度別の植生高のヒストグラム

やB群と異なり、しかもその分布範囲が小さいことから、その他と表示した。また、その他の植生は、次章の検討対象から除外した。図-5を見ると、植生高さが高い箇所、繁茂密度が密な箇所、B群繁茂箇所などでは、較差が大きくなっている。なお、天端での較差が負になっている理由については確認できていない。

3. 堤防法面におけるUAVレーザ測量の適用性

堤防法面における変状を把握するためには、堤防法面の形状の変化を適切に測量できることが前提となる。本章では、調査対象とした植生の状態を整理した上で、植生高や繁茂密度の違いがレーザ測量成果と水準測量成果の較差、レーザの表面植生の透過状況に与える影響を確認した。

(1) 調査対象とした植生の状態

図-8は、植生の種類別（A群、B群）かつ繁茂密度別に見た植生高のヒストグラムである。ほとんどの植生が0.2m及び0.3mに該当しており、高さ1m以上の植生がほとんどないことから、0.1m~0.9mの植生を分析の対象とした。また、植生高さ0.7mのA群、植生高さ0.5m以上のB群、その他の植生は、その数をほとんど確認できなかったことから検討対象から除外した。

(2) 較差の最小値

各測点における較差最小値を植生高さ別に集計し、その最頻値を整理した（以下、較差最小最頻値と呼ぶ）。

図-9及び図-10は、それぞれA群及びB群の較差最小最頻値を方形枠の大きさ別に表す。また、図-11及び図-12はそれぞれA群及びB群の繁茂密度別の較差最小最頻値を表す。ここで、繁茂密度別の較差最小最頻値については、方形枠の大きさが0.3mの場合を記載した。

図-9及び図-10から、方形枠の大きさによらず、A群及びB群ともに植生高さが大きくなるとともに較差最小最頻値が大きくなる傾向である。

上空から見た葉の面積が小さいA群では、方形枠の大きさによらず、植生高さが0.5mよりも大きくなると、較

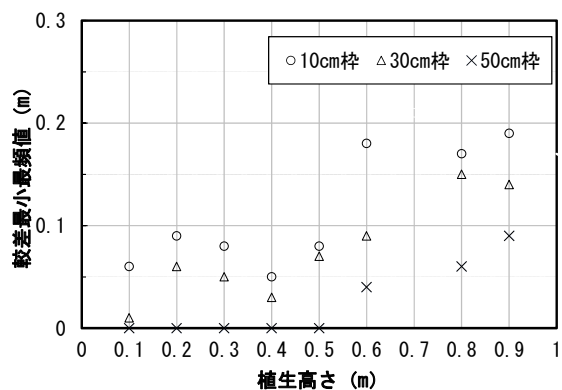


図-9 植生高と較差最小最頻値の関係 (A群)

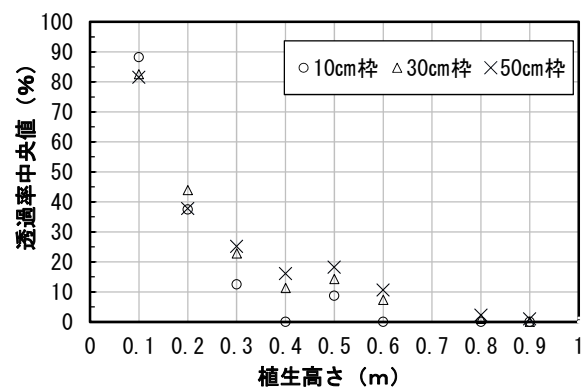


図-13 植生高と透過率中央値の関係 (A群)

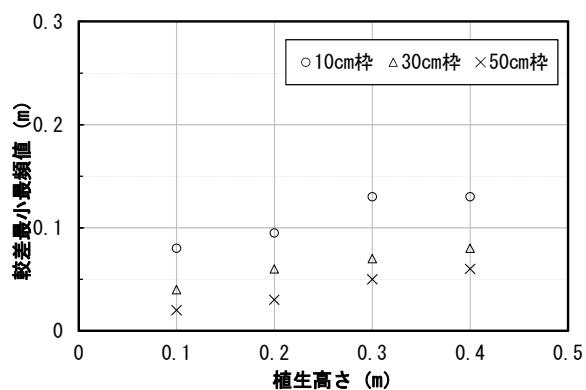


図-10 植生高と較差最小最頻値の関係 (B群)

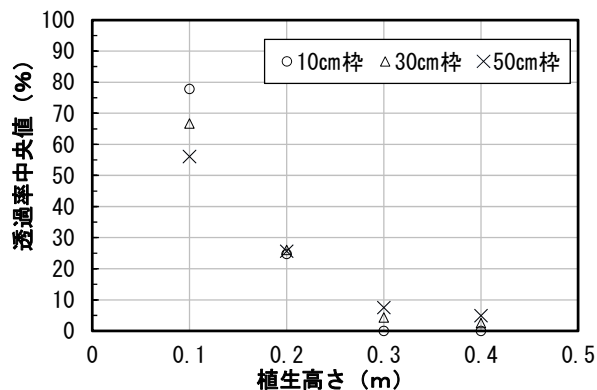


図-14 植生高と透過率中央値の関係 (B群)

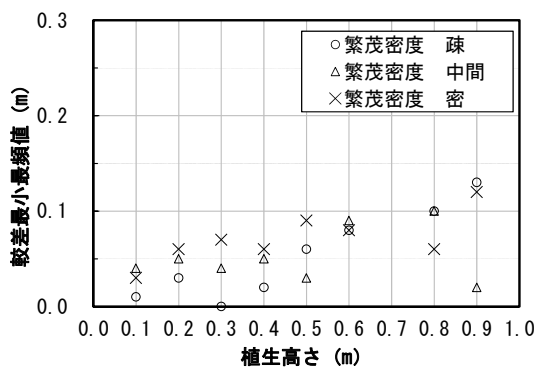


図-11 植生高と較差最小最頻値の関係 (A群, 繁茂密度別)

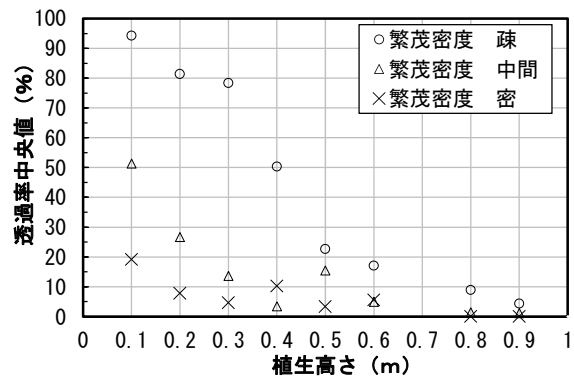


図-15 植生高と透過率中央値の関係 (A群, 繁茂密度別)

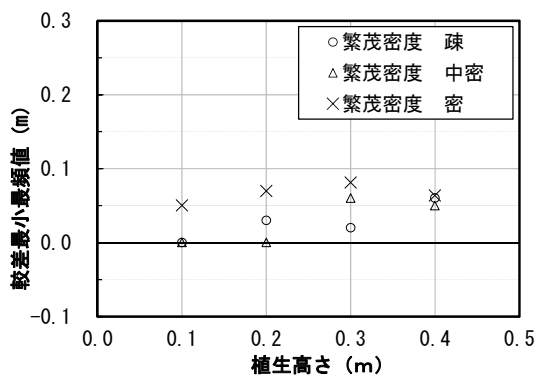


図-12 植生高と較差最小最頻値の関係 (B群, 繁茂密度別)

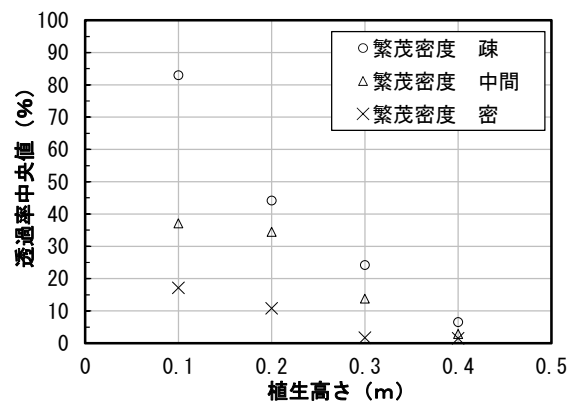


図-16 植生高と透過率中央値の関係 (B群, 繁茂密度別)

差最小最頻値が0.1mよりも大きくなる。ここで、植生高さ0.1mは除草時の刈高の一つの目安であり、較差0.1m以下はUAVレーザ測量の堤防法面形状計測への適用性を判断する上でも目安になると考えた。50cm方形枠にすると較差は小さくなるが、方形枠内のどの位置を計測した結果であるかが不明確となり、水平方向の位置精度が低下する。

上空から見た葉の面積が大きいB群では、0.4m以下の植生しかなく、較差は0.15m以下と小さいが、方形枠を50cmと大きくしても、較差はゼロにはならず、葉の影響が大きいことが分かる。

(3) 透過率

前項と同様に、各測点において方形枠を設定し、各枠内でUAVレーザが堤防地表面まで到達した割合を透過率として、次式によって求めた。

$$\text{透過率(\%)} = \frac{\text{各メッシュ内で測点との較差が10cm以下の点群数}}{\text{各メッシュ内に存在する全点群数}} \times 100$$

図-13及び図-14は、それぞれA群及びB群の透過率中央値を方形枠の大きさ別に表す。ここで、透過率中央値とは、同じ植生高さの測点における透過率を集計し、中央値を算定したものである。また、図-15及び図-16は、それぞれA群及びB群の繁茂密度別の透過率中央値(30cm枠の場合)を表す。A群とB群ともに、枠の大きさによらず、植生高さが高くなると透過率中央値が小さくなる傾向を確認できる。

上空から見た葉の面積が小さいA群の場合は、植生高さが0.5mでも10%の割合でレーザ光が透過することを期待できる。ここで、10%とは、UAVレーザ測量の点群密度が航空レーザ測量の10倍程度の密度を有していることから、透過率10%になっても航空レーザ測量と同程度の点群密度を確保できるとした一つの目安である。

一方、上空から見た葉の面積が大きいB群の場合、植生高さが0.3mになるとレーザ光がほとんど透過しない。堤防表面に生じた小さな亀裂やモグラ穴等の変状を確認したい場合には、100%近い点群密度があっても6cm四方に1点の計測点となるため、長さ20cm程度以下の変状は把握しにくい。

枠の大きさを広くすると、透過率は大きくなるが、水平精度は低下する。図-15及び図-16に示すように、繁茂密度を疎にする方が、透過率を大きくする上で有効であり、測量精度を維持する上でも有利である。

4. おわりに

植生の繁茂する河川堤防法面上でUAVレーザ測量と水準測量を行い、それらの較差及びレーザの透過率を調

べた。合わせて、法面上の植生調査を行い、植生高や繁茂密度がUAVレーザ測量の測量精度に与える影響を整理した。3章の結果をまとめると、以下の通りである。

- 葉の面積の小さい植生、主にイネ科の植生が繁茂する堤防法面上では、草丈を50cm以下に管理することで、UAVレーザ測量により堤防の表面高を計測可能である。なお、この場合の点群密度は現行の航空レーザ測量と同程度の値を確保することができる。
- ギシギシ等、上空から見た葉の面積が大きい植生が繁茂する堤防法面上では、草丈が30cm程度になるとレーザは堤防表面にほとんど到達しない。

こうした結果を踏まえ、堤防の植生管理、UAVレーザ測量の留意点を整理すると、以下の通りである。

- UAVレーザ測量により堤防の変状を把握するためには、上空から見た時の葉の面積が大きい植生の繁茂を抑制し、繁茂密度を低く抑えることが重要である。特に、堤防表面の変状を把握するためには、繁茂密度の抑制が重要である。
- 実務上、出水期後の除草は9月～10月にかけて実施される。今回調査した小貝川では、除草後一ヶ月程度で高いもので1.5m程度まで草丈が伸びていた。一方、除草高は10cmであるが、その後の植生の生長は地域の気候や該当年の出水状況や日照状況によっても異なるので、過去の生長状況を踏まえて、除草後数週間以内に測量を実施することが望まれる。

最後に、UAVレーザ測量成果から堤防表面の変状を把握するためには、対象とする変状によって空間スケールが異なるため、変状の程度と検出の可否について、さらに検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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，2016。
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課河川保全企画室：革新的河川管理プロジェクト（第一弾）～陸上・水中レーザードローンの開発状況～，河川，Vol.854，2017。
- 3) 渡辺豊，河原能久，北真人：UAVを用いたレーザ測量の河川地形の精度評価，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73，No.4，I_553-I_558，2017。
- 4) 国土交通省：国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）

(2018. 4. 3受付)