

# 堤防表面の変状に応じた三次元点群データの 現出特性の調査

藤原圭哉<sup>1</sup>・脇坂和征<sup>1</sup>・佐藤隆洋<sup>1</sup>・炭田英俊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (株) 日本工営株式会社 (〒102-8359 東京都千代田区九段北1-14-6)

近年の技術の発展により、航空レーザあるいはUAVを用いた堤防の三次元データの集積が進んでおり、今後も加速すると予想される。本業務では、三次元データの有効活用の一例として、各河川で毎年行われている堤防点検作業の効率化・高精度化を目的に、UAVおよび大型除草機によるレーザ計測データを加工・解析し、種々の堤防形状の現出特性を検討した。

検討の結果、堤防形状の変化を伴う変状について、深さ10cm程度の変状から検出可能となることを実証した。将来的には、AI技術を活用した堤防変状の自動検出や、VR技術を活用した、点検の大部分を屋内で完結させることのできる仮想現場をつくりあげる技術に発展させていく。

**Key Words** : 堤防点検の効率化・高精度化, レーザ計測データ, メッシュデータ, 傾斜図, 現出特性

## 1. はじめに

近年、地球温暖化や気候変動の影響で台風や集中豪雨による大規模な水害・土砂災害が頻発している。直近では、小田川の堤防決壊で甚大な被害が生じている。堤防決壊による被害を未然に防ぐためには、日ごろからの堤防管理が不可欠であり、実態把握のための堤防点検の重要性が増している。

各河川で毎年行われている堤防点検は、「堤防等河川管理施設の点検結果評価要領」(以下「評価要領」とする)<sup>1)</sup>に則り、作業員が主に目視によって実施している。日本の河川堤防は、直轄管理区間延長合計のみで約8800kmにもわたり、近年点検要員の不足・屋外作業の負荷・安全性の問題が叫ばれている。

上記を踏まえ、現状の点検よりも効率的かつ高精度な点検に転換を図っていくことが重要である。

点検方法を支える技術として、広範囲を少ない労力で素早く観測できるリモートセンシング技術が挙げられる。中でも植生に覆われた数十cmの変状をとらえるためには、植生表面をとらえる画像の解析ではなく、地表面の情報をとらえることのできるレーザ計測データを用いた解析が有用と考える。

解析により多様な変状の位置と形状を確認できるようになると現状の点検作業の大部分を屋内で、少人数でかつ同一精度で行うことができ、点検の効率化・高精度化に大きく寄与することが期待できる。

本業務では、河川堤防上の様々な変状の現出特性をレーザ計測成果を用いて把握し、変状抽出のため

UAV (SPIDER-UD8)



大型除草機 (Ca1Sok)



図-1 レーザ計測時に用いた機器

の要求性能やその処理、加工方法を特定することを目的として検討を行った。

## 2. 現地調査

### (1) 調査対象範囲

調査位置は円山川の右岸9.2k~11.2k区間とする。

### (2) 調査内容

調査内容については以下のとおりである。

#### a) 大型除草機 (図-1) によるレーザ計測

法面を縦断方向に複数回往復し、大型除草機後部に取り付けたレーザープロファイラーを用いて対象区間法面の点群データを取得する。点群密度は約40000点/m<sup>2</sup>確保された。なお、機材の都合により、川表・川裏面の9.2k~10.2k区間について計測を実施した。

#### b) UAV (図-1) によるレーザ計測

測量高度は60mとし、飛行ルートについては約45

mの離隔で往復し、1往復で100～300点/m<sup>2</sup>を確保した。なお、UAV搭載のレーザースキャナはRIEGL社のminiVUX-1である。

### c) 現地点検（点検・計測）

レーザ計測後に、点検を行い変状の種類・寸法・位置情報を記録するとともに、変状の写真撮影を行った。堤防点検結果については、以下の通り。

- ・対象変状は、「評価要領」の施設区分「土堤」の12種類の変状とした。
- ・調査対象区間では、表-1のように漏水・噴砂を除く11種（全53箇所）の変状が確認された。
- ・モグラ穴については、植生異常を伴い、法面に線につながって穴が露出した状態であったため、別途人為的に作成した。（直径20cm～30cm、深さ10cm、15cm、20cmの3箇所）
- ・現地で確認されなかったガリ侵食についても人為的に作成した。（長さ2.5m、幅30cm、深さ15cm）

## 3. メッシュデータを用いた変状の分かりやすい表示方法の検討

### (1) 代表変状の選定

12種類の変状について、以下の観点から、表-2のようにA～Eグループの5グループに分類した。

#### a) 変状の形状特性

変状の規模の大小および形態に着目した。変状規模は取得データの空間分解能に関連する。

#### b) 視覚的な明瞭さ

「急激な変化」「緩やかな変化」など、変状の視覚化に際して着目する観点として「視覚的な明瞭さ」を考慮した。

#### c) 湿潤の有無

レーザの特性から、水分がある場合に二重反射や全反射など不安定な反射となるため正常な値が取れない可能性がある。

#### d) 植生異常の有無

判別に当たって植生を含む地表面データ(DSM)と地形面データ(DEM)の差が関連するため、「植生に関連」の項目を設ける。

#### e) 侵食（ガリ）の取り扱い

侵食（ガリ）・植生異常については、上記特性を考慮するとグループが異なるため、個別に取り扱うものとした（グループ分類上の変状の種類は13種となる）。

### (2) メッシュデータの作成

UAVは最小メッシュを0.07m、大型除草機は0.01mを最小のメッシュサイズとして、それぞれ、2倍・3倍・5倍・10倍と変化させて作成した。

#### a) UAV取得データメッシュサイズ

平均200点/m<sup>2</sup>より、1メッシュ内に点群1点を確保できる0.07mを最小とした。メッシュサイズ0.35m以上の場合メッシュサイズが大半の変状の大きさよりも大きく、明瞭に変状を認識できないと考えられるため検討から除外した。

表-1 変状別点検箇所一覧表

変状種別	箇所	備考
(1) 亀裂	1箇所	
(2) 陥没や不陸	8箇所	
(3) 法崩れ	4箇所	
(4) 沈下	3箇所	
(5) 堤脚保護工の変形	2箇所	堤脚水路・護岸の変形により評価
(6) はらみ出し	2箇所	
(7) 寺勾配	2箇所	
(8) モグラ等の小動物の穴	14箇所	3箇所は人為的に作成
(9) 排水不良	4箇所	
(10) 樹木の進入	1箇所	
(11) 侵食（ガリ）・植生異常	12箇所	1箇所は人為的に作成
(12) 漏水・噴砂	---	排水不良により評価する。

表-2 変状グループ分類一覧表

No	変状	形状特性	変状の明瞭さ	湿潤の有無	植生に関連	変形規模 小 中～大	グループ
8	モグラ等の小動物の穴	線	○			○	A
	モグラ等の小動物の穴（人為的に作成）	点					
1	亀裂	線	○			○	B
5	堤脚保護工の変形	線	○			--	
11-1	侵食（ガリ）（人為的に作成）	線	○			○	
3	法崩れ	面	○			○	
2	陥没、不陸	面	○			○	C
11-2	植生異常	面	○		○	○	
10	樹木の侵入	面	○		○	○	D
4	沈下	面	△			○	
6	はらみ出し	面	△			○	
7	寺勾配	面	△			○	
9	排水不良	面	○	○		○	E
12	漏水・噴砂	面	○	○		--	

表-3 検討に用いる表示方法

表示手法	強調する項目	備考	
① 陰影図	形状	形状または形状に関する要素を強調する方法	
② 段彩図	標高値の変化		
③ 等高線図	標高値の変化		
④ 傾斜図	傾斜角度		
⑤ 地上開度図	形状変化の変化点		
⑥ DSM-DEM差分図	植生等の表面と地形面の差分	植生異常に特化した手法	
⑦ LS-factor解析図	土壌浸食量に関連する指標 $(A/22.13)^{-1} \cdot (\sin \beta / 0.0896)^{1.3}$ A: 斜面長 β: 斜面傾斜	ガリ侵食に特化した手法	
	⑧ TW-Index解析図		地表面の流水の溜まりやすさの指標 $\ln(As/\tan \beta)$ As: 集水面積 β: 斜面傾斜
⑨ SP-Index解析図	侵食されやすさの指標 $As/\tan \beta$ As: 集水面積 β: 斜面傾斜		
	⑩ レーザー反射強度分布図		レーザー反射強度

### b) 大型除草機取得データメッシュサイズ

大型除草機の点群密度はUAVの約200倍であり、点群数による制約はないため、変状寸法（最小寸法10cm程度）の1/10を最小寸法とした。

### (3) 立体表示方法の検討

堤防の変状は前述のとおり、堤防形状変化、湿潤の有無、植生の有無に大別される。

以上を踏まえ、表-3に示す①～⑩の立体表示方法を用いる。<sup>2) 3), 4), 5)</sup>

### (4) 現出特性の把握

まず、前述のように類似する変状毎にグループ化し、各グループから検討対象とする代表変状を選定した。（Aグループ：3箇所、Bグループ：1箇所、C

グループ：2箇所，Dグループ：1箇所，Eグループ：1箇所）次にUAVおよび大型除草機により取得した点群データを基に前述のようにメッシュデータを作成し，該当表示方法で表示させたものを一覧表とした。

なお，変状の現出特性については，堤防点検に関して知見を有する技術者（5人）が，各立体表示方法・メッシュサイズにより代表変状を表示させた図-2を基に，下記の評価をつけるアンケート調査を行った。回答は変状を明瞭に認識できたものを○とし，変状の認識が困難・不明瞭であるものを×とした2択とした。

### (5) アンケート調査結果

#### a) グループA・B・Dの評価結果(表示方法①～⑤)

大型除草機取得データについてはメッシュサイズを小さくするにつれて○の回答者数が減少する傾向となる。また，立体表示方法については，傾斜図が一番○の回答者数が多いという結果となった。

・UAV取得データについては，メッシュサイズが拡大するにつれて，○の回答者数が減少する傾向となる。また，立体表示方法については，傾斜図が一番○の回答者数が多いという結果となった。

#### b) 侵食(ガリ)の評価結果(表示方法⑦～⑨)

侵食(ガリ)については，以下⑦LS-factor解析図，⑧TW-Index解析図，⑨SP-Index解析図についても検討を行った。

前述の検討で有用な表示方法として選定した「傾斜図」を含めてアンケート調査を行った結果，UAV取得データでは⑦～⑨すべてにおいて判別が困難となり，大型除草機では⑨SP-Index図で明瞭に判別ができるが，傾斜図がより判別しやすいという結果となった。

#### c) グループCの評価結果

グループCの表示方法については，「DSM-DEM差分図」を用いてUAV・大型除草機についてメッシュ寸法別に評価を行う。現出特性については，UAV取得データについては，認識が困難であるという結果となり，大型除草機ではメッシュサイズを0.1mとした場合について差が明瞭になった。しかし，現地写真と対比した結果，植生不良の範囲と整合しないため，今後航空写真等による判別と対比して，検討を行う必要があると考える。

#### d) グループEの評価結果

グループEの「17排水不良」については，レーザー反射強度図（点群データに反射強度を色別に表示）について評価を行う。評価結果としては，点検で確認された小段川表側の湿潤状況を過半数が認識できるという回答結果となったが，検出原因が水によるものか，あるいは土の色によるものか，また範囲や湿潤状態との関係が不明瞭であるため適用性については今後の課題となる。

## 4. 変状の種類と規模に応じた検出限界の整理

前述の結果を踏まえ，有望な表示方法として以下

表-4 検討対象とする表示方法(グループ別)

グループ	変状種別	検討に用いる表示方法
A	8 モグラ等の小動物の穴	①陰影図 ②段彩図 ③等高線図 ④傾斜図 ⑤地上開度図 ※ガリ侵食については以下を追加する。 ⑦LS-factor解析図 ⑧TW-Index解析図 ⑨SP-Index解析図
	1 亀裂	
	5 堤脚保護工の変形	
B	11-1 侵食(ガリ)	⑥DSM-DEM差分図 (メッシュ内点群標高最大値とメッシュ内点群標高最小値の差)
	3 法崩れ	
C	2 陥没、不陸	①陰影図 ②段彩図
	11-2 植生異常	
D	4 沈下	③等高線図 ④傾斜図
	6 はらみ出し	
E	7 寺勾配	⑤地上開度図
	9 排水不良	
	12 漏水噴砂	

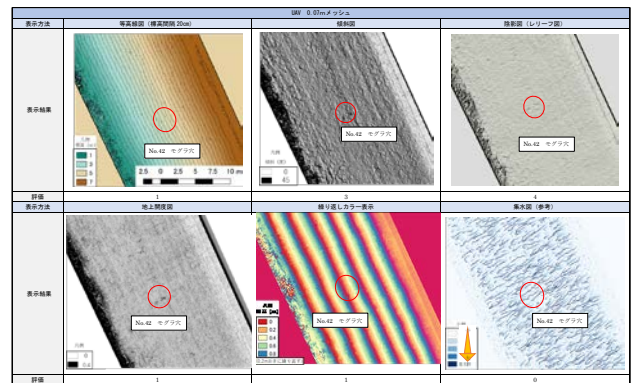


図-2 代表変状における種々の表示方法一覧表作成例

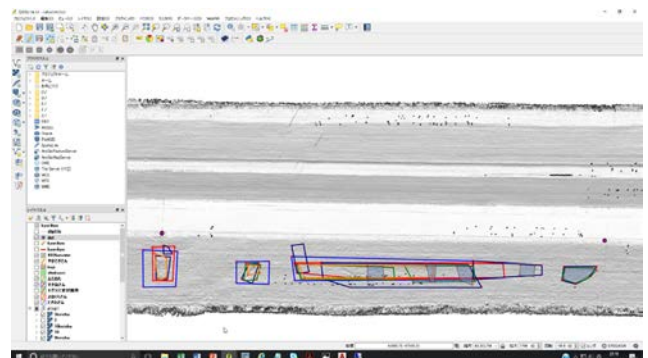


図-3 立体表示例(傾斜図)

の立体表示方法およびメッシュサイズにより変状の検出を行い，検出限界を評価する。

### (1) 検出限界評価方法

立体表示方法については，大型除草機取得データから作成した傾斜図（メッシュサイズ0.1m）とUAV取得データから作成した傾斜図（メッシュサイズ0.07m）の2通りを用いた。なお，図-3のようにコンピュータの画面に表示させて行った。

検出者は堤防点検の実施経験のある技術者5名とし，各技術者に変状と考えられる箇所・範囲を図のようにマークしてもらい，集計を行った。集計結果から，現地点検において確認された変状について，大型除草機の検出率とUAVの検出率の比率を変状のグループおよび変状の寸法別にとりまとめ，UAVと

大型除草機械の適用性を評価した。

## (2) 検出限界評価結果

評価結果については以下ようになった。

### a) 変状グループ別検出率評価 (図-4参照)

・グループAの侵食(ガリ)については、大型除草機で100%の検出率およびUAVで80%の検出率となった。

・大型除草機械のデータにより作成した傾斜図では、グループAの変状(モグラ穴)は80%以上、グループBの変状は60%以上の人数が変状を検出でき、グループDの変状は検出されなかった。

・UAVのデータにより作成した傾斜図では、グループA(モグラ穴)およびグループBともに30%程度であり、グループDの変状は検出されなかった。

・大型除草機械に対するUAVの検出比率は、グループA(モグラ穴)の変状は30%程度、グループBの変状は50%程度であった。

### b) 変状高さ別検出率評価 (図-5, 図-6参照)

・大型除草機では、変状の高さ0.1mから55.0%が検出されており、0.2mで100.0%検出されている。

・UAVでは、変状の高さ0.1m変状については0%であり、検出困難と考えられる。また、0.15m以上になると検出率は増加し、0.2m~0.3mでは55.0%となる。

・大型除草機に対するUAVの検出比率は、UAVにて変状を確認できた深さ0.15m以降変状の高さに対して単調に増加し、0.3mでは73.3%となる。

## 5. おわりに

堤防形状の変化を伴うモグラ穴・ガリ侵食・変状については、大型除草機での取得データから作成した傾斜図では深さ10cm程度の変状から、またUAVでの取得データで作成した傾斜図では深さ15cm程度の変状から検出可能となることを実証した。

将来的には、堤防の変状をAI技術を活用して自動的に検出し、堤防点検前に点検箇所を絞り込む精度の高いスクリーニング手法として発展させていく。さらに、河川点検の経験者でなくとも容易に変状箇所と程度が判断でき、またVR技術を活用して室内で臨場感をもって点検作業の大部分を完結する、仮想現場をつくりあげることを目標に技術開発を行う。

実用化に向けての今後の課題としては、堤防の形状変状以外の変状(植生異常・排水不良)の検出方法の確立、傾斜図よりも正確に変状をとらえられかつ誤検出・未検出の少ない表示方法の検討が挙げられる。また、レーザ測量データがより広範囲に及んだ場合の効率的なデータ処理方法についても考慮する必要がある。

**謝辞:** フィールド提供及びデータ提供等に際して、豊岡河川国道事務所および国土技術総合政策研究所に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

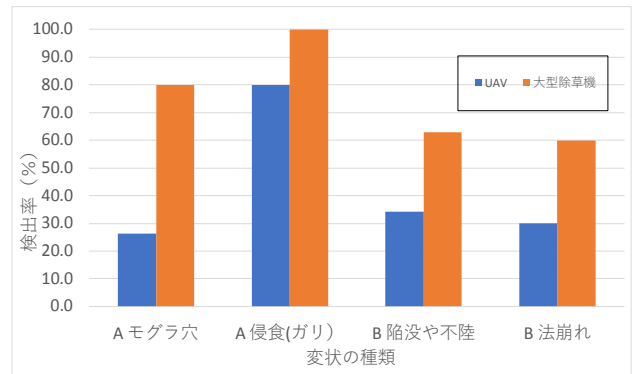


図-4 変状別検出率

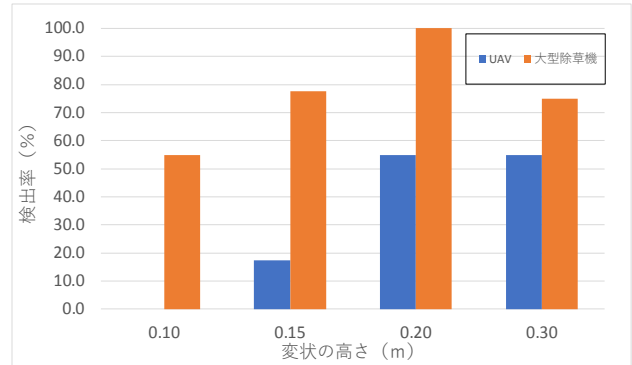


図-5 変状の高さ別検出率

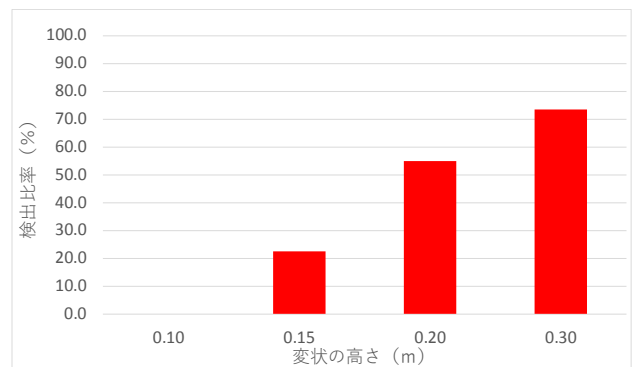


図-6 変状の高さ別 (UAV/大型除草機) 検出比率

## 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の点検結果評価要領，pp.5, 2015
- 2) L. Wang and H. Liu.: An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling, *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2) pp.193-213, 2006
- 3) Mohsen Mansouryar and Amin Hedayati: Smoothing Via Iterative Averaging (SIA) A Basic Technique for line Smoothing, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol4(3) pp.307-311, 2012.
- 4) 横山隆三, 白沢道生, 菊池 祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, Vol.38, No.4, pp.26-34, 1999
- 5) Ryuzo Yokoyama, Michio Shirasawa, and Richard J.Pike.: Visualizing Topography by Openness: A New application of Image Processing to Digital Elevation Models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.68, pp.257-265, 2002

