

積雪期における堤防変状の検知に向けた取組

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○吉田 智
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 山崎 貴志
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 飯田 美喜

1. はじめに

昨今、日本国内では大規模な地震が発生し、これらの災害により家屋への被災だけではなく、道路の陥没や河川堤防（以降、「堤防」という。）の天端にクラックが生じるなど、土木施設においても多大な被害を受けている。また、近年、気候変動が懸念される中、2024年2月に北海道の上空1,500mには、5月中旬並みの暖かい空気が流れ込み2月の最高気温を更新した。そのため北海道のような積雪寒冷地においても、冬期の降雨により河川水位の上昇が懸念される。国土の約6割以上が積雪寒冷地域に指定されている日本²⁾において冬期に大規模な地震災害が発生した場合、積雪により河川敷地に立ち入っての目視点検は困難となるため、広範囲にわたる堤防の被害状況を効率的かつ迅速に検知する手法の構築は重要となる。

本稿では、積雪下の堤防変状を検知するためのセンサ機器を調査したほか、UAVを用いて広範囲

にわたる堤防を調査する手法について検討を行った。また、市販のUAVに搭載されている光学カメラとLiDARを用い、雪で作製した試験体の変状を認識できるか検証するための模擬試験を行った。

2. 堤防変状検知手法の調査検討

2.1 堤防変状検知センサ機器調査

積雪下の堤防の変状を検知するためには、積雪を透過して堤防の状態を計測できるセンサ機器が適するが、そのようなセンサ機器は一般的ではなく、その存在の有無についても不明である。そのため、積雪を透過して計測できる可能性のあるセンサ機器について調査を行い、それぞれの概要を整理した(表-1)。調査の結果、積雪を透過して積雪下の堤防の変状を計測できるセンサ機器については確認できなかった。なお、傾斜センサやケーブルセンサなどの機器を堤防に直接設置して変状を検知することも考えられたが、機器を設置した

表-1 積雪下の堤防変状を検知するためのセンサ機器の概要

機器種類	機器例	概要（積雪状態の堤防における運用）	運用方法	地形把握	懸念点
電波	マイクロ波レーダ ミリ波レーダ 合成開口レーダ	航空機や人工衛星から地表に向けてマイクロ波(ミリ波)を照射し、反射した電波から地形データを形成	移動体観測	○	●装置が大型・高価 ●透過可能な積雪の量は不明
	GPSビーコン	GPSビーコンを積雪前の堤防上に設置、衛星測位によりGPSビーコンの位置を把握	堤防設置	△	●センサを設置した地点のデータが取れない ●GPSの測位精度(堤防変状を把握可能か) ●取得データの送信に工夫が必要(電波が雪を透過しない可能性)
	RFID	無線通信内蔵ICチップとアンテナで構成されたRFIDタグを積雪前の堤防上に設置、リーダーとの無線通信により、RFIDタグとリーダー間の距離を計測	堤防設置	△	●通信距離は長くない、積雪により減衰が見込まれる ●センサを設置した地点のデータが取れない ●透過可能な積雪の量は不明
	雪崩ビーコン	雪崩ビーコンを積雪前の堤防上に設置、雪崩ビーコンから発する電波を受信器により受信し、おおまかな距離と方向を検知	堤防設置	△	●おおまかな距離と方向しか分からず、有効距離は50m程度 ●センサを設置した地点のデータが取れない ●計測機ではない為データの取得は不可
光	3Dスキャナ LiDAR	UAV等に搭載または地上定点に計測機器を設置、堤防の積雪表面を計測	移動体観測 堤防設置	○	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●データの活用には高度な情報処理が必要(リアルタイム性が低い)
	レーザ距離計	UAV等に搭載し、飛行しながら連続的に堤防の積雪表面までの距離を計測、線的な積雪表面形状を得る	移動体観測	△	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●データ量が少なく面的な地形把握が困難
	光学カメラ (写真測量)	光学カメラで撮影した複数枚の画像から、専用ソフトウェアによる地形の3Dモデル化(フォトリタム)	移動体観測 堤防設置	○	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●積雪表面には濃淡や特徴点が乏しいため、計測が難しい ●データの活用には高度な情報処理が必要(リアルタイム性が低い)
	光学カメラ (画像解析)	光学カメラで撮影した画像の解析(AI認識等)により変状の特徴点などを検出	移動体観測 堤防設置	△	●雪を透過しないため、積雪表面の観測となる ●画像として表現されるものの検出であるため、積雪表面形状の把握は困難
	トータルステーション	堤防上にプリズムやターゲットを設置し、トータルステーションによる測距によりプリズム等の位置を把握	堤防設置	△	●プリズム等を設置した地点のデータが取れない ●プリズム等が積雪に埋まらないように設置する必要がある
超音波	超音波距離計	超音波距離計をUAV等に搭載し、飛行しながら連続的に堤防の積雪表面までの距離を計測、線的な積雪表面形状を得る	移動体観測	△	●雪を透過しないため、積雪表面の計測となる ●データ量が少なく面的な地形把握が困難
物理 センサ	傾斜センサ 加速度センサ	センサを積雪前の堤防上に設置、堤防変状による傾斜角変化や加速度変化を検知(加速度から移動距離も取得可能)	堤防設置	△	●センサを設置した地点のデータが取れない ●取得データの送信に工夫が必要(電波が雪を透過しない可能性)
ケーブル センサ	電気式ケーブル 光ファイバ	ケーブルセンサを積雪前の堤防に埋設または敷設、堤防変状により生じるケーブル変形等の位置を測定器により検知	堤防設置	△	●センサケーブルを設置した区間のデータが取れない ●取得データの送信に工夫が必要(電波が雪を透過しない可能性)

【地形把握】 ○：地形または積雪表面形状を面的に把握できる。 △：地形または積雪表面形状の部分的な把握しかできない。

地点の変状しか検知できず、広範囲にわたる堤防すべてを検知できるようにセンサ機器を設置することは現実的ではない。

2.2 UAVにおける調査手法の検討

積雪下の堤防変状を把握するには、広範囲にわたる堤防の調査を行う必要があるため、センサ機器を搭載して広範囲を飛行できる無人航空機（以後、「UAV」という。）が有用である。なお、UAVの機体形状には、回転翼型、固定翼型、VTOL（Vertical Take-Off and Landing, 垂直離着陸）型に分類される。回転翼型は、狭い場所で離着陸が可能で、空中に静止できるという特性を生かして、可視光や赤外線カメラを搭載し、写真や動画を撮影する用途に多く用いられている。また、固定翼型は、回転翼型に比べ速く飛べるほか、エネルギー効率の面でも回転翼型に比べ優れている。そのため長距離の飛行や、長時間滞空することができることから広範囲の測量や調査といった用途に使用されている。しかし、離着陸には回転翼型に比べ広いスペースが必要となる。近年では、長距離・長時間の飛行が可能な固定翼型と、狭い場所で離着陸が可能で、空中に静止できる回転翼型の良さを合わせ持ったVTOL型も登場している。

UAVの飛行形態にはレベル1～4の飛行形態があり、レベル1は目視内での操縦飛行、レベル2は目視内での自動・自律飛行、レベル3は無人数帯における目視外飛行、及びレベル4は有人地帯における目視外飛行となっている。積雪状態にある堤防上の移動は容易ではないため、変状を調査するには、地上の1地点から操作できることが重要である。そのため広範囲にわたる堤防を調査するには、目視外飛行（レベル3以上）が必要である。一般的にUAVの遠隔制御は送信機と機体間での直接通信を行うものであり、その通信可能距離は長くても数キロメートル程度であることから、広範囲に及ぶ堤防の調査には、レベル3で操作地点を随時移動しての多地点操作が考えられる（図-1）。モバイル機器用の通信規格であるLTEを利用した制御方式のUAVもあり、LTE通信網の範囲内であれば、飛行距離の制限がほぼなくなり一地点からの操作が可能となるが（図-2）、バッテリー容量などによる飛行距離の制限が生じる。

2.3 堤防変状要因の検討

堤防に変状を生じさせる要因の一つとして地震災害が考えられたことから、過去の地震による堤防の被害状況について文献調査を行った。しかし、地震による積雪下での堤防変状を記録した文献や資料を確認することはできなかった。そこで堤防の被害31件が一覧表としてまとめられていた1983年日本海中部地震震害調査報告書³⁾を参考として整理したところ、全31件の被害において堤防に縦断亀裂が発生し、22件（71%）で堤防天端の



図-1 レベル3飛行（LTEなし）のイメージ



図-2 レベル3飛行（LTEあり）のイメージ

沈下が発生していた。なお、沈下が発生した22件の最大沈下量の平均値は0.49mであった。

このような変状が堤防に発生した場合、積雪量や雪質にもよるが、堤防に亀裂が発生すれば堤防の積雪にも同様の亀裂が発生するほか、堤防天端が数十センチメートル沈下すれば、積雪の表面も同様に沈下することが想定される。しかし、どの程度の堤防変状であれば積雪表面に影響が表れるかの知見がないため、今後、積雪表面に影響が出る条件（変状規模、積雪量、雪質など）について検討が必要である。

2.4 堤防変状検知センサ機器検討

2.1で堤防の変状を計測するためのセンサ機器について調査したが、堤防の亀裂や沈下などの変状を上空から俯瞰的に計測でき、UAVに搭載可能なセンサ機器として光学カメラ、LiDAR、ミリ波レーダ、レーザ距離計、超音波距離計などが挙げられる。これらのセンサ機器においてレーザ距離計と超音波距離計については、UAVへの搭載実績を確認できなかったため、UAVへの搭載可否や方法の検討が必要である。また、ミリ波レーダは、UAVの障害物回避を目的としたものであるため、積雪表面計測への適用性の検討が必要である。よって、UAVへの搭載実績があり、面的に地形を把握することができる光学カメラとLiDARを用いて

模擬試験を行った。

3. 堤防変状検知手法の検証

3.1 堤防変状検知手法の模擬試験

地震災害発生後、広範囲におよぶ河川堤防を迅速に点検するには、UAVで上空から俯瞰的に点検するのが効率的である。そこで長距離を高速で飛行でき、狭い場所でも離着陸が可能なVTOL型のUAV(Trinity F90+, Quantum-Systems社)に搭載されている光学カメラ(RX1 RII, SONY社)やLiDAR(Qube240)が、積雪上に発生する変状を認識できるか検証する模擬試験を行った。模擬試験は、寒地土木研究所構内の実験棟横に堤防を模した試験体を雪で作製し、その表面に大きさの異なる3種類の変状を作り、台座の上に固定したUAVを実験棟の窓から屋外に張り出して模擬試験を実施した(図-3, 4)。使用したUAV及び計測機器の仕様を表-2~4に示す。なお、河川堤防を模した試験体に変状を作る際、変状の大きさや方向を判別するため試験体を図-5のようにエリア分けした。



図-3 模擬試験で使用した試験体

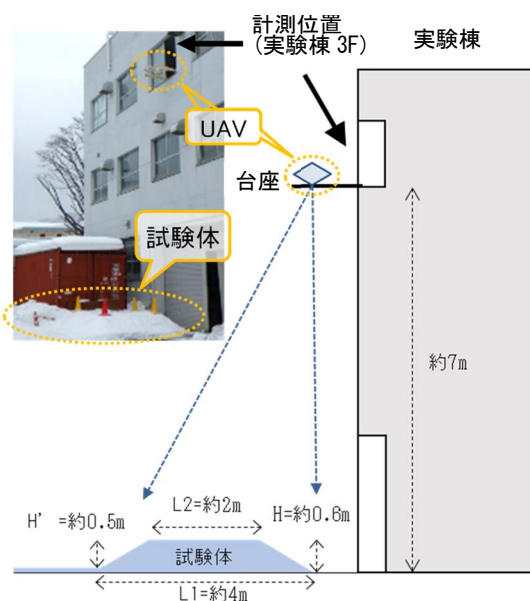


図-4 模擬試験イメージ

3.2 堤防変状検知手法の模擬試験結果

光学カメラは、どのエリアにおいても変状の有無をおおよそ認識することができたが、エリアCは他のエリアと比較して変状の視認性が低かった(写真-1)。これは、斜面の角度と太陽光の入射の関係で、変状の陰影ができなかったことが要因と考えられる。

LiDARは、機器の計測範囲(スキャナ視野角 70°)の影響で取得できた点群データは計測位置の真下に位置するA, C, D-1, D-2に限られた(図-6)。3種類の変状において、小さな変状(10mm×60mm)をLiDARで認識することは困難であった。しかし、中程度(50mm×120mm)及び

表-2 VTOL型UAVの仕様

項目	仕様
最大離陸重量	5.0kg
寸法(翼幅)	2.394m
最適巡航速度	17m/s
最大飛行高度	4.500m
最大飛行時間	90分
コントロール距離	5~7.5km
最大ペイロード	700g
動作温度範囲	$-12^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$

表-3 光学カメラの仕様

項目	仕様
有効画素数	約4,240万画素(7,952×5,304px)
F値	F2~F22
焦点距離	35mm
画角(35mm判相当)	63°

表-4 LiDARの仕様

項目	仕様
波長	905nm
最大飛行高度	140m AGL
推奨飛行高度	100m AGL
精度	1.8~2.5cm
正確度	<3cm
スキャナ視野角	70°
点密度(飛行高度100m)	50~100点/ m^2
動作温度	$-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$

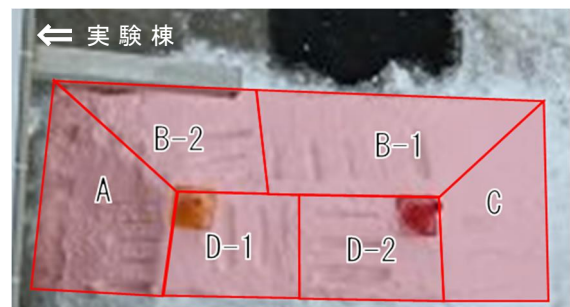


図-5 試験体のエリアについて
(試験体の上から撮影)

大きい（100mm×180mm）変状については、試験体の上から計測した点群からも変状の有無の判別は可能であった（図-7, 8）。なお、積雪面の変状を明瞭にするため、これらの図に示している点群の各点の表示は大きく設定している。また、大きい変状の深さについて点群処理ソフトの Cloud



写真-5 光学カメラによる変状の撮影状況（試験体の上から撮影）

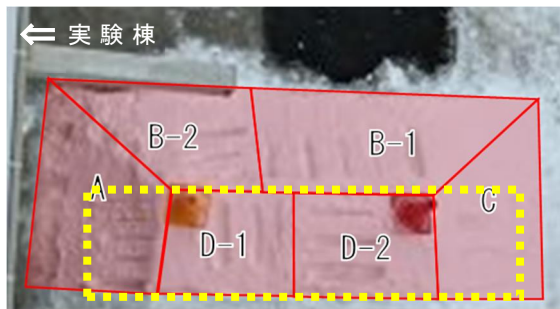


図-6 LiDAR で計測できたエリア（黄色破線で囲った部分）

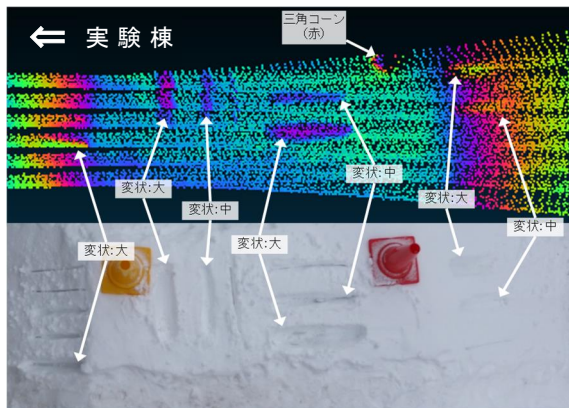


図-7 LiDAR での計測結果

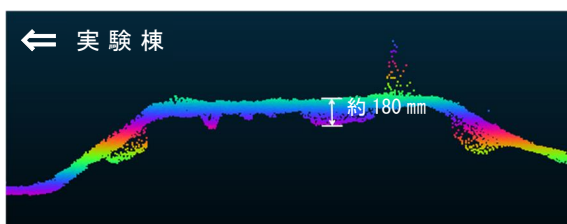


図-8 LiDAR での計測結果（断面方向）

Compare で計測したところ、約 180mm という値であった（図-8）。LiDAR は、光学カメラの撮影で視認性が低かったエリア C でも、他のエリアと変わらずに認識できていたことから、斜面の角度や太陽光の入射角の影響を受けにくいことを確認した。

今回の模擬試験は、実験棟 3 階の窓より UAV を外に張り出し、静止した状態で試験体を LiDAR 計測したが、実際の VTOL 型の UAV における LiDAR 計測は、一定の速度で飛行した状態で積雪表面の点群を取得するため、今回の模擬試験のように UAV を静止した状態での計測は、点群に厚みが発生し、本来の精度で計測ができていない可能性がある。そのため、今後は積雪に覆われた雪面上を実際に飛行させ、光学カメラや LiDAR を用いて変状を計測する必要がある。

4. まとめ

積雪下の堤防の変状を検知する手法として、市販の UAV に搭載されている光学カメラと LiDAR を用い、雪で作製した試験体の変状を認識できるか検証を行った。その結果、光学カメラで変状を認識することは可能であったが、太陽光の入射角の関係で場所により視認性が低いところもあった。また、LiDAR では中程度（50mm×120mm）以上の変状でなければ認識できなかったが、太陽光等の影響を受けないことを確認した。

今後は、積雪に覆われた雪面上を実際に飛行させ、光学カメラや LiDAR を用いて変状を計測する予定である。

参考文献

- 1) 日本気象協会（tenki.jp）：北海道の記録室2024年2月編 2月統計史上1位を更新する最高気温、<https://tenki.jp/forecaster/kamanyan/2024/02/27/27668.htm> 1（2024.7.12確認）
- 2) 日本建設機械化協会：2005除雪・防雪ハンドブック（除雪編），p.112，2004.
- 3) 土木学会日本海中部地震震害調査委員会：1983年日本海中部地震震害調査報告書，pp.538-542，1986.