

冬期地震災害における河川堤防変状検知手法の検討 ー積雪下の河川堤防の変状検知に向けた模擬試験ー

吉田 智*1 飯田 美喜*1

1. はじめに

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¹⁾した。そのため、北海道のような積雪寒冷地においても、冬期に雨が降ることも想定され、この降雨により河川水位が上昇することも懸念される。また、昨今、日本国内では大規模な地震災害が頻発しており、これらの地震災害において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。しかし、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（写真1）。そのため、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。

そこで寒地土木研究所（以降、「寒地土研」という。）では、無人航空機（以降、「UAV」という。）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い、市販のUAVに搭載されている光学カメラとLiDARを用いて、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実施したので報告する。

2. 堤防変状検知手法の調査検討

2.1 堤防変状要因について

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が、積雪下における地震による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⁾を参考に被害状況を整理したところ、全31件で堤防に縦断亀裂が発生したほか、22 件（71%）で堤防天端の沈下が発生していた。

渇水期である冬期間に地震災害における被災において、堤防の機能が喪失したものについては、緊急に修繕対応する必要性が高くなる。この堤防の機能が喪失する変状とは、「耐震性能の照査において考慮する外水位は、原則として、平常時の最高水位としたものである。⁴⁾」と言われていることから、堤防の機能が喪失する変状は、計画高水位（HWL）を下回る亀裂や沈下と考えられる。

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上の積雪にも同様の亀裂が発生することが考えられるほか、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、雪質等）について検討が必要である。

2.2 UAV における調査手法の検討

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、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。また、傾斜センサやケーブルセ



写真1 河川敷地内の状況
（上：夏期、下：冬期）

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。なお、点検は、徒歩による写真撮影が基本とされており⁵⁾、時期にもよるが、積雪状態にある堤防の変状を徒歩で点検することは困難を極める。そのため、広範囲にわたる堤防の点検には、堤防を俯瞰的に調査できる UAV にセンサ機器を搭載して実施することが有用である。

UAV 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、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。なお、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 は無人地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の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）。なお、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 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

（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. 3UAV に搭載するセンサ機器の検討

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ったため、積雪表面計測への適用性の検討が必要である。

UAV に搭載可能な LiDAR には、高速 LiDAR、LiDAR ラインセンサなどの種類があり、これらの特徴などについてとりまとめたものを表 1 に示す。

表 1 UAV に搭載されている LiDAR

	概要	操作性	費用	拡張性	流通性	現場適合性	質量
高速 LiDAR	360 度を計測できる高速型のレーザスキャナであり、地形のみならず周辺の建築物や森林などの取得に適する。	光学カメラと同等の作業員の操作で計測が可能。	安価な機器が増えていますが今でも光学カメラより高価	点群処理の方法について一般的に広く研究されているため、適用できる手法が多い。	多数の製品が販売されている。	雪面も 3 次元的な計測が可能だが、レーザ照射周波数が低いので点が比較的疎になる。	中型以上の UAV に搭載可能。
LiDAR ラインセンサ	高速 LiDAR に対して特定方向にのみ照射することで地形等の計測に特化したセンサ。	光学カメラと同等の作業員の操作で計測が可能。	高速 LiDAR と同程度から、やや高価なものが多い。	点群処理の方法について一般的に広く研究されているため、適用できる手法が多い。	UAV とセットで購入することが可能。	雪面も 3 次元的な計測が可能。	中型以上の UAV に搭載可能。

今回の模擬試験には、面的に地形を把握することができる光学カメラと、地形等の計測に特化した LiDAR ライセンスを用いた。

3. 堤防変状検知手法の検証

3.1 模擬試験方法

地震災害発生後、広範囲にわたる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) と 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、寒地土研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 1～3 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。

3.2 模擬試験結果

模擬試験は正午頃に実施しており、当日の天候は曇りであった。光学カメラでは、画像のセルに対するグレースケールの違いを判断でき、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可能であった。しかし、エリア C は他のエリアと比較して変状の視認性は低かった (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。なお、変状の長さや幅の評価は可能であるが、深さについての評価はできなかった。



図 4 模擬試験で使用した試験体

表 1 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℃～50℃

表 2 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 3 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/m²
動作温度	-20℃～40℃

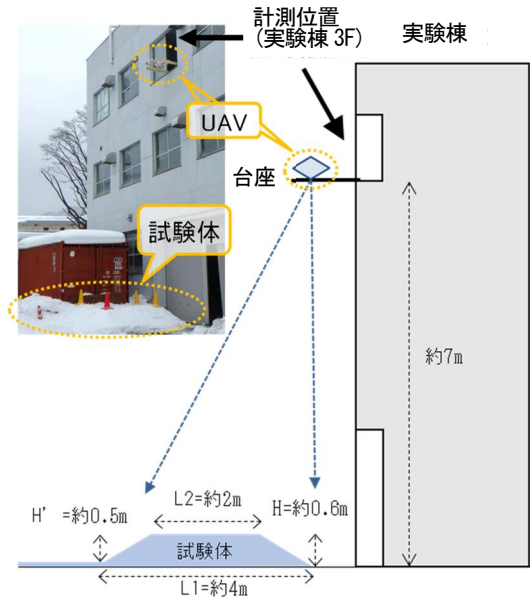


図 3 模擬試験イメージ

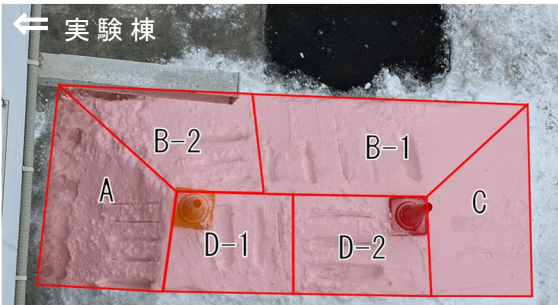


図 5 試験体のエリアについて (試験体の上から撮影)

LiDAR は、機器の計測範囲（スキャナー視野角 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）及び大きい（100mm×180mm）変状の判別は可能であった（図 7、8）。なお、大きい変状の深さを点群処理ソフトの Cloud Compare



写真 1 光学カメラによる変状の撮影状況
（試験体の上から撮影）

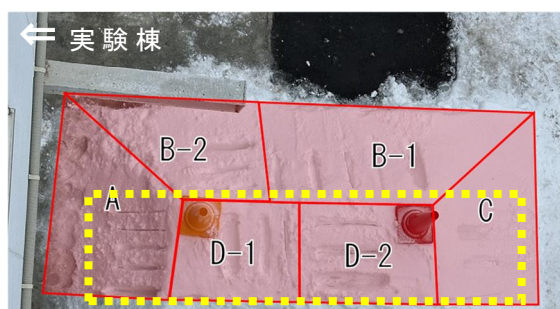


図 6 LiDAR で計測できたエリア
（黄色破線で囲った部分）

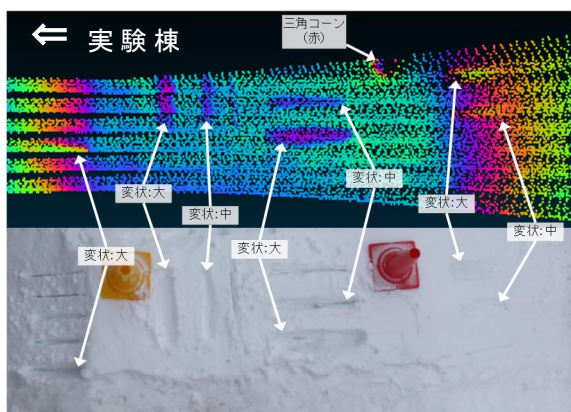


図 7 LiDAR での計測結果

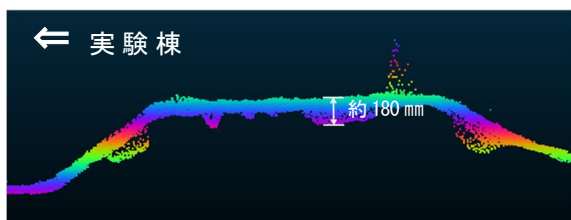


図 8 LiDAR での計測結果（断面方向）

で計測したところ約 180mm となり（図 8）、作製した深さの形状を精度良くセンシングできていた。また 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、模擬試験では、点群に厚みやブレが発生し、本来の精度で計測できていない可能性がある。また、今回の模擬試験は低い高度で計測していることから、実際の飛行高度で計測した場合、得られる点群の密度は少なくなることが想定される。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、光学カメラと LiDAR を用い、どの程度の変状を計測することが可能なのかについて確認する必要がある。

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、光学カメラで変状の長さや幅の評価は可能であったが、深さについての評価はできなかった。また、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。

なお、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.html> (2024. 9. 26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.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局治水課、河川構造物の耐震性能照査指針・解説（Ⅱ．堤防編）、p. 3、2016. 3.
- 5) 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、2012. 5.