

鋼製セル型砂防堰堤を対象とした UAV自律飛行による点検調査について — 目視点検調査との比較による課題抽出 —

室蘭開発建設部 苫小牧砂防海岸事務所 ○中田 拓実
竹原 隆博
本間 雄介

砂防施設は火山噴火や土石流等に対応するため、その健全度を維持することが必要である。砂防施設の健全度は一般的に目視点検調査による変状レベルに基づいて評価される。近年では、目視点検調査に代わる手段としてUAVを用いた調査があげられ、点検調査の省力化・高度化を図る取り組みが行われている。本論文は、樽前山覚生川流域の鋼製セル型砂防堰堤を対象として、UAV自律飛行による点検調査の事例を報告する。

キーワード：DX、レベル3UAV自律飛行、点検調査、長寿命化

1. はじめに

樽前山直轄火山砂防事業では、鋼材と中詰め材を用いた鋼製セル型砂防堰堤や鋼製ダブルウォール型砂防堰堤の整備を進めている。このような砂防施設は、火山噴火、土石流及び地震などの外的要因による損傷や経年劣化が生じることから、点検や現地確認によって施設状況を適確に把握し、求められる機能や性能を長期にわたって維持・確保していく必要がある。

「砂防関係施設点検要領（案）令和4年3月」（以下、点検要領と記載する）では、実施時期や状況による点検種別が区分されており、砂防施設の点検の種類は定期点検、臨時点検、詳細点検から構成される。このうち、長寿命化計画策定を目的とした、経年的な砂防施設の機能及び性能の低下状況を把握するための調査としては、定期点検が該当する。点検要領によれば、定期点検の実施方法として目視点検もしくはUAV点検によるものが基本とされている。

樽前山直轄火山砂防事業における既存砂防施設（以下、直轄砂防施設と記載する）では、目視調査による定期点検が実施されており、点検結果に基づいて変状レベルや健全度が評価されてきた。定期点検の省力化や高度化を図るためには、目視点検の代替手段としてUAVの活用が有益と考えられる。このため、UAV点検によって得られる情報を把握し、直轄砂防施設を対象とした最適な調査計画を立案する必要がある。

本報告では、直轄砂防施設のうち、覚生川流域の鋼製セル型砂防堰堤3基を対象として、UAV自律飛行を用いた定期点検を実施した結果を報告する。さらに、従前

の目視による定期点検結果と比較することで、UAV自律飛行の課題を抽出し、今後の展望について述べる。

2. UAV自律飛行(レベル3飛行)に向けた事前準備

(1) 機種を選定

UAV機種の選定に際し、対象砂防施設の堤頂長が長いこと、鋼製セル型砂防堰堤であることに着目した。すなわち、UAVによる点検調査には堰堤軸方向（上流面と下流面の往復）の目視外飛行が必要不可欠といえることから、施設上下流面の飛行が可能な回転翼機を選定した。UAV自律飛行（以下、レベル3飛行と記載）による点検調査を実施するにあたり、市場流通性を考慮し表1に示す9社19機種について、機種選定に必要なUAVの基本情報やカメラ性能等を収集整理した。

表1 基本情報を収集した UAV 機種の一覧

メーカー	機種名(マルチコプター)
DJI	Mavic3, MATRICE 300 RTK, INSPIRE2, Mavic3CINE, Matrice 30, Phantom4 Pro v2.0, Phantom4 RTK
FreeFly	ALTAX
Skydio	SkydioX2
ProDrone	PD4-AW-AQ, PD6B-Type3
Parrot	ANAFI-USA,
Autel	EVO2 Pro
ACSL	SOTEN, PF2-AE Inspection
Sony	Airpeak S1
石川エナジーリサーチ	Build Flyer

レベル3飛行に用いるUAV機種は、「自律飛行」、「カメラ性能」、「航続距離」を重視して選定した結果、「Matrice 300 RTK」とした。当該機種の航続可能距離は「(スペック上の最高速度) × (スペック上の飛行可能時間) × 70% (バッテリー残量20%程度で着陸することを踏まえて70%とした)」から算出した結果、約39kmが見込まれる。

表2 選定機種の機体情報

機種名		Matrice 300 RTK
写真		
		
種別		マルチコプター
機体仕様	重量	6300g
	最大積載量	2.7kg
	プロペラ枚数	4枚
	展開時寸法 (長さ×幅×高さ)	810×670×430mm
	対角線長・翼幅	895mm
	最大飛行速度	17.0m/s
	運用限界高度(海拔)	7000m
	最大風圧抵抗	15m/s
動作環境温度		-20~50℃
自律飛行可否		可
LTE通信使用可否		可
GNSS	使用衛星	GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS
カメラ	機種名	ZENMUSE P1
	センサーサイズ	フルサイズ
	有効画素数	4500万画素
ジンバル		-
本体バッテリー	容量	5935mAh
	飛行時間	55分
航続可能距離		39.27km

(2) レベル3飛行の概要

レベル3飛行は無人地帯での目視外飛行(補助者配置無し)である(図1 橙枠)。申請書類は多岐にわたるが、対象地域は東日本に位置するため東京航空局へレベル3飛行の許可・承認申請書を提出した後、北海道防災航空室や北海道警察本部等への事前周知を行った。



図1 小型無人機の飛行レベル
(国土交通省航空局 令和2年6月)

3. 飛行ルートの検討

(1) UAV点検対象砂防施設

令和4年度末において樽前山直轄火山砂防事業区域内の砂防施設は14基が完成している(予定含む)。主な構造型式は鋼製砂防堰堤型式であることから、将来的にレベル3飛行による点検調査を直轄区域全域で実施するためには、直轄区域を代表する施設を選定し、各施設に共通する課題を明らかにすることが求められる。このため、対象砂防施設は、表3に示す覚生川1号砂防堰堤、覚生川2号砂防堰堤及び熊の沢川2号砂防堰堤の3基とした。これらは、堤頂長L=233.98m~342.64m、堤高H=14.5mの鋼製セル型砂防堰堤である。

表3 対象とした鋼製セル型砂防堰堤の諸元

施設名 (構造型式)	堰堤長	堰堤高	竣工年度
覚生川1号砂防堰堤	342.64m	14.5m	H27
覚生川2号砂防堰堤	233.98m	14.5m	H29
熊の沢川2号砂防堰堤	244.15m	14.5m	R4



図2 覚生川1号砂防堰堤



図3 覚生川2号砂防堰堤



図4 熊の沢川2号砂防堰堤

(2) 飛行ルートの検討

離発着地点は、送電線、維持管理用道路の整備状況及び砂防堰堤の位置を踏まえて、熊の沢川2号砂防堰堤左岸側袖部セル天端とした。

レベル3飛行に際しては、熊の沢川2号砂防堰堤の左岸袖天端を離発着地点として、覚生川1号砂防堰堤、覚生川2号砂防堰堤の順序で飛行するルート（図5）を設定した。飛行ルートの総距離は約4.0kmである。

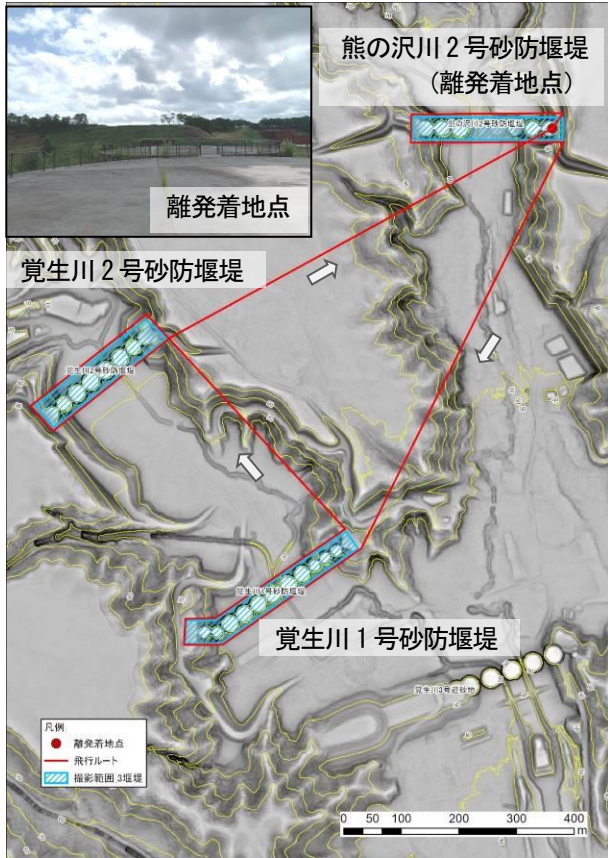


図5 覚生川～熊の沢川飛行ルート

4. レベル3飛行による点検の概要

(1) レベル3飛行に関する諸元

a) 概要

選定したUAV機種を用いて、覚生川1号砂防堰堤、覚生川2号砂防堰堤及び熊の沢川2号砂防堰堤を対象としたレベル3飛行を実施した。撮影した画像は、定期点検としての課題抽出のため、写真測量技術（SfM解析：重複して撮影された複数の写真から抽出した多数の特徴点を用い、共線条件による制約に基づいて、カメラの内部標定要素及び外部標定要素、特徴点の三次元座標を一度に求める手法※国土地理院）による3次元モデル化を行い、目視による定期点検結果との比較を行った。

b) 撮影方法

3次元モデルの精度はUAVによる空撮画像の解像度によって定まり、解像度は対地高度とカメラセンサーサイズによって影響を受ける。砂防施設に近接すればするほど高解像となるため、詳細な変状箇所も把握可能となる

一方で、①撮影範囲が狭くなり往復回数が増加することでバッテリー交換が頻繁となること、②堰堤本体や樹木等の支障物に接触する危険性も増大すること、③撮影時のラップ率が低下することで、SfM解析そのものが実施できなくなってしまうことから、定期点検の実施手法として適切な撮影方法を検討した（図6）。

今回のUAV点検に用いた機体のカメラはフルサイズセンサー（約35.9mm×24.0mm）であり、対地高度50mにおいても約10mmの変状を把握可能である。今回の撮影では、変状レベル評価とラップ率の観点から対地高度を袖天端から50mに設定した。

撮影角度は上下流面を1往復することで全面の画像データが取得可能となるよう、水平方向を0°として60°の角度から撮影した。

飛行速度は画像データに影響するため、効率性と解像度に着目して設定した。今回は、飛行速度「2.5m/s」、「5.0m/s」および「15.0m/s」にて試行した結果、画像データが良好に取得できた「5.0m/s」を採用した。

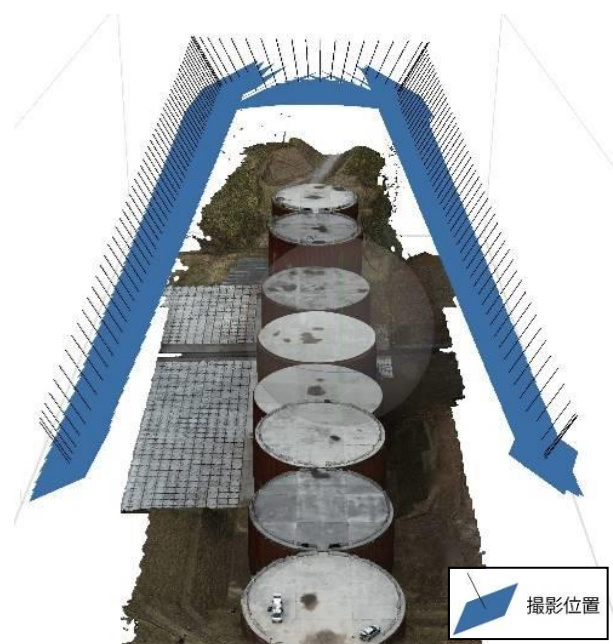
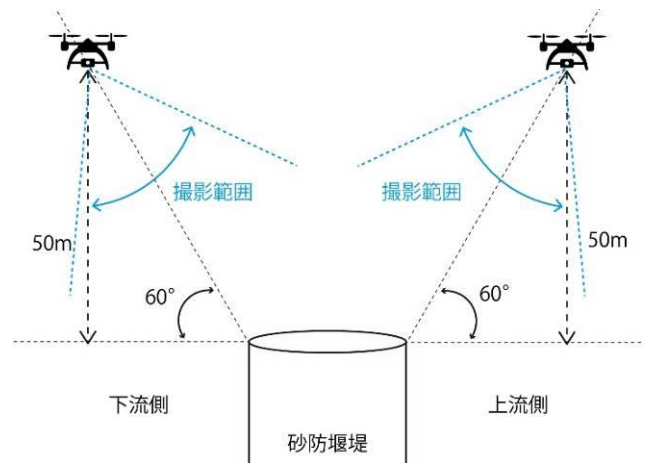


図6 撮影方法のイメージと3次元モデル

(2) SfM解析による3次元モデルの作成

UAV自律飛行（レベル3飛行）による空撮データを用いて、図 7に示すような3次元モデルを作成した。なお、本検討では、Agisoft MetashapeにてSfM解析を実施した。

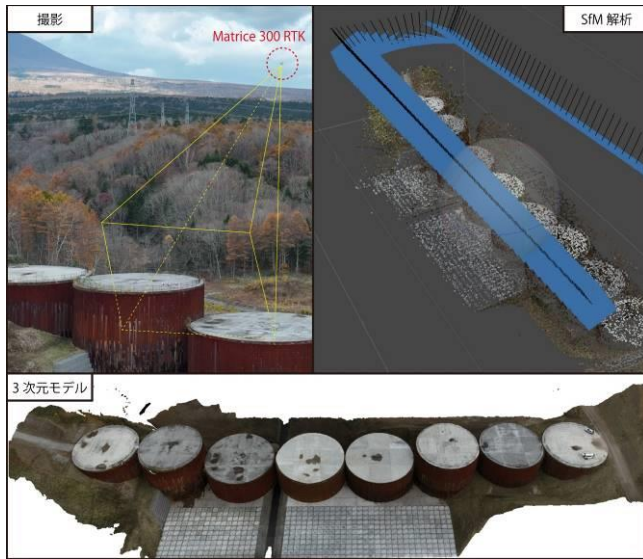


図 7 3次元モデルの作成結果

5. 目視点検との比較

(1) 比較結果

UAV点検結果を用いて、目視による点検調査票と同アングルでの画像データを3次元モデルから抽出し、比較・検証した。ここでは、熊の沢川2号砂防堰堤での比較結果を示す。なお、本検討では、日照条件による陰影の影響を評価するため、晴天時（日照時間0.2hr）と曇天時（同0.0hr）の2通りの日照条件で撮影を行った。

a) 比較結果①（アクセス可能箇所での比較）

取付流路、壁面材、スリット部、袖天端、安全対策施設を対象として、比較した結果を表 4に示す。写真①は取付流路のひび割れであるが、UAV点検では画像が不鮮明でひび割れを把握することができなかった。これは、対地高度を離発着地点から50mとしたため、取付流路までの高度は約70mに達したことが影響したと考えられる。写真②及び③は壁面材及びスリットの状況を示している。これらの3次元モデルについては影になっていること、上空から撮影しているため、垂直面の解像度が低下していることから比較することは困難であった。写真④及び⑤は袖天端コンクリートの段差比較である。UAV点検による3次元モデルでは植生や日照の影響で変状を把握することができなかった。写真⑥及び⑦は袖天端コンクリートの目地の開きを比較した結果であり、両者ともほぼ一致していることがわかる。写真⑧では、袖天端コンクリートの沈下状況を比較しており、両者ともほぼ一致していることがわかる。このことから、横方向の開きや

明確な段差を有する縦方向の変状は精度よく把握できるといえる結果となった。

表 4 点検手法による比較（1/2）

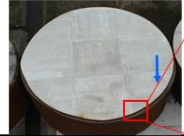




定期点検(目視)		UAV点検(Matrice 300 RTK)	
令和4年実施結果		H34.9.16 日照時間: 0.2h	H34.11.3 日照時間: 0.0h
写真①		取付流路(スリット)	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	×
		評価(UAV)	×
		ひび割れ不明瞭	ひび割れ不明瞭
写真②		壁面材の変形(下流面)	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	×
		評価(UAV)	×
		文字確認困難	赤字確認困難
写真③		河達状況	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	×
		評価(UAV)	×
		スリット認識不可	スリット認識不可
写真④		袖部セルの段差	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	×
		評価(UAV)	△
		植生により計測不可	影でモデル化不可
写真⑤		袖天端コンクリートの段差	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	×
		評価(UAV)	×
		段差不明瞭	段差不明瞭
写真⑥		袖天端コンクリートの目地の開き	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	○
		評価(UAV)	○
		2 cm	2.1 cm
写真⑦		袖天端コンクリートの目地の開き	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	○
		評価(UAV)	○
		2.7 cm	2.8 cm
写真⑧		袖の沈下	
変状レベル(目視)	a	評価(UAV)	△
		評価(UAV)	○
		植生により計測不可	27.8 cm

○：UAV点検により変状レベル評価が可能な項目
 △：条件次第で変状レベル評価が可能な項目
 ×：変状レベル評価が困難な項目

b) 比較結果② (アクセス困難箇所と比較)

水通し天端へのアクセスは困難であることから、目視点検では写真による変状確認のみを実施している。水通し天端コンクリートのUAV点検による3次元モデルによる評価結果を表5に示した。写真⑨では3次元モデルを用いた天端コンクリート目地の開きであり、設計延長(10m)を正しく計測できた(変状レベルはaである)。写真⑩～⑬は水通し天端コンクリートの沈下や壁面材とのズレを計測した結果であり、日照時間によらず計測できていることがわかる。このように、アクセス困難な場所においては、UAV点検によって点検の高度化が図れる可能性があると考えられる。

表5 点検手法による比較 (2/2)

定期点検(目視) 令和4年実施結果	UAV点検(Matrice 300 RTK)	
	R4.9.16 日照時間: 0.2h	R4.11.4 日照時間: 0.0h
写真⑨	水通し天端コンクリートの開き	
変状レベル(空撮) a	評価(3Dモデル) ○	評価(3Dモデル) ○
		
写真⑩	水通し天端Conと壁面材の離れ	
変状レベル(空撮) -	評価(3Dモデル) ○	評価(3Dモデル) ○
		
写真⑪	水通し天端コンクリート沈下状況	
変状レベル(空撮) -	評価(3Dモデル) ○	評価(3Dモデル) ○
		
写真⑫	水通し天端Conと壁面材の離れ	
変状レベル(空撮) -	評価(3Dモデル) ○	評価(3Dモデル) ○
		
写真⑬	水通し天端コンクリート沈下状況	
変状レベル(空撮) -	評価(3Dモデル) ○	評価(3Dモデル) ○
		

(2) まとめと課題の抽出

本検討から得られたUAV点検の課題を以下に整理する。

a) 周辺影響の課題

可視光によるモデル化の特性上、植生に覆われた範囲

では、植生を透過することができず、構造物を認識することができないため、変状レベル評価は困難であった。また、影や白飛びとなっている箇所(例えばセルの接合部)については、植生と同様に、変状レベル評価は困難であった。これらに対応するためには、日照条件が十分な条件下に植生を伐倒することや、より構造物に接近するか、画像の明度やホワイトバランスを調整する対応策が考えられるが、接触による機体破損の可能性もあり、高度化や合理化とのバランスをとりながら実施方法を模索する必要があるといえる。

b) 3次元モデルを用いた定量評価の課題

写真測量技術は重なり合う画像データから立体的な3次元モデルを作成する手法である。袖や水通し天端コンクリートの目地の開きや隙間等の平面的な情報は高精度で取得可能である一方、わずかな段差に関しては不明瞭なモデルとなり、定量化が困難(変状レベルの評価ができない)であった。また、鋼製セル型砂防堰堤の壁面材やスリット部等の鉛直方向の変状は、3次元モデルによる変状レベル評価が困難であった。

5. おわりに

本報告では、レベル3飛行による点検(UAV点検)と技術者による目視点検について、比較検証を行った。

UAV点検により、①足場が無く、アクセスが困難であった水通し天端コンクリートの変状レベルの定量化が可能になること、②レベル3飛行により同一地点(撮影高度、位置)での空撮データが取得できるため、経年変化が明確になること、③砂防施設のみならず地山や周辺道路も撮影することで、周辺の変状も併せた変状評価が実施可能となることといった利点が明らかとなり、変状レベル評価の精緻化や将来的には劣化予測の精度向上が期待される結果となった。

一方で、小さい段差やスリットがモデル化できないといった3次元モデルの課題や、樹木が繁茂している箇所では砂防施設の変状を把握できないといった周辺影響による課題も顕在化した。次年度以降の対策としては、UAV点検で全施設の点検を行い、過年度調査結果と比較して変状の進行が認められた施設を対象として、目視点検を実施することで合理化が図れると考える。また、アクセス困難箇所やセル天端はUAV点検、壁面材は目視点検といった、アクセスやモデル化の課題を踏まえた点検手法の組み合わせも考えられる。これらの課題はUAV点検技術のみで解決されるものではなく、砂防施設の機能や性能に着目した上で、UAV点検と目視点検を組合せた総合的な点検計画の立案が必要と考えられる。今回得られた成果課題を踏まえて、高精度かつ合理的な点検計画を立案し、砂防施設の長寿命化を図りたいと考える。