

鋼製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 ○宮崎 亮直
岩田 清徳
八千代エンジニアリング株式会社 横尾 公博

砂防施設の長寿命化にはその健全度を評価するための点検が必要不可欠であるが、省力化・高度化を目的とした目視点検の代替手法として、樽前山の砂防堰堤では昨年度よりUAV自律飛行による点検を試行してきた。本稿では、小泉の沢川・小糸魚川流域の鋼製砂防堰堤6基を対象としたUAV自律飛行による点検調査について、目視点検との比較を行い、UAVの適用性を検討することで、今後の点検計画立案にむけた取組事例を報告する。

キーワード：長寿命化、インフラメンテナンス、3次元モデル、生産性向上

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（DW）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、目視点検の代替または補助手段としてUAVの利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や精度を把握し、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。

本稿では、直轄砂防施設のうち、小泉の沢川流域、小糸魚川流域の鋼製砂防堰堤6基を対象としたUAV自律飛行による定期点検の調査事例について報告する。

2. UAV自律飛行に向けた事前準備

(1) 対象砂防施設の概要

令和5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。主な構造型式は鋼製砂防堰堤型式であり、このうち令和4年度は覚生川流域の鋼製セル型砂防堰堤3基を対象としてUAV自律飛行による点検を実施した。

本調査では、表1に示す小糸魚川流域（小糸魚川遊砂地、小糸魚川流木捕捉工、小糸魚川砂防堰堤）および小泉の沢川流域（小泉の沢川遊砂地、小泉の沢川1号砂防堰堤、小泉の沢川左支川流木捕捉工）の6基を対象砂防施設とした。

表1 対象とした鋼製砂防堰堤の諸元

施設名 (構造型式)	堰堤長	堰堤高	竣工 年度
小糸魚川遊砂地 (鋼製セル+DW)	176.6m	6.0m	H21
小糸魚川砂防堰堤 (鋼製 DW)	45.9m	4.5m	H21
小糸魚川流木捕捉工 (鋼製流木捕捉工)	110.0m	8.5m	R3
小泉の沢川遊砂地 (鋼製セル+DW)	95.1m	5.0m	H22
小泉の沢川1号砂防堰堤 (鋼製 DW)	76.5m	4.5m	H22
小泉の沢川左支川流木捕捉工 (鋼製流木捕捉工)	42.5m	3.5m	R1



写真1 小泉の沢川遊砂地



写真2 小泉の沢川1号砂防堰堤



写真3 小泉の沢川左支川流木捕捉工

(2) 飛行ルート検討

離発着地点は、現地にて上空の視界が良好であること、調査車両が安全に停車できる等、UAVの離発着に問題ないことを確認した上で図1に示す地点を選定した。小泉の沢川流域の飛行ルートは約2.3km、小糸魚川流域の飛行ルートは約2.5kmとなる。

(3) 飛行方法の検討

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。空撮画像は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が懸念される。本調査は、樹木や植生等の繁茂状況を踏まえ、UAVが安全に飛行できることを前提としつつ、3次元モデルを高精度で作成するため、できる限り施設に近い対地高度・撮影角度にて空撮を行った（図2、表2）。

本調査では、昨年度実施した覚生川流域3基との比較・検証を行うため、昨年度と同機種である「Matrice 300 RTK（表3）」を用いることとした。なお、レベル3

自律飛行（無人地帯での目視外飛行（補助者なし））申請時には、機体の初期故障期間の検証データが必要となるが、現時点で取得可能なメーカーは極めて少ない状況にある（聞き取り調査を実施したところ国内製1社のみ）。そこで本調査では、飛行の安全性を確保するため、各調査地点に補助員を配置したうえで、高高度での監視用機（目視飛行）による安全管理を実施した。

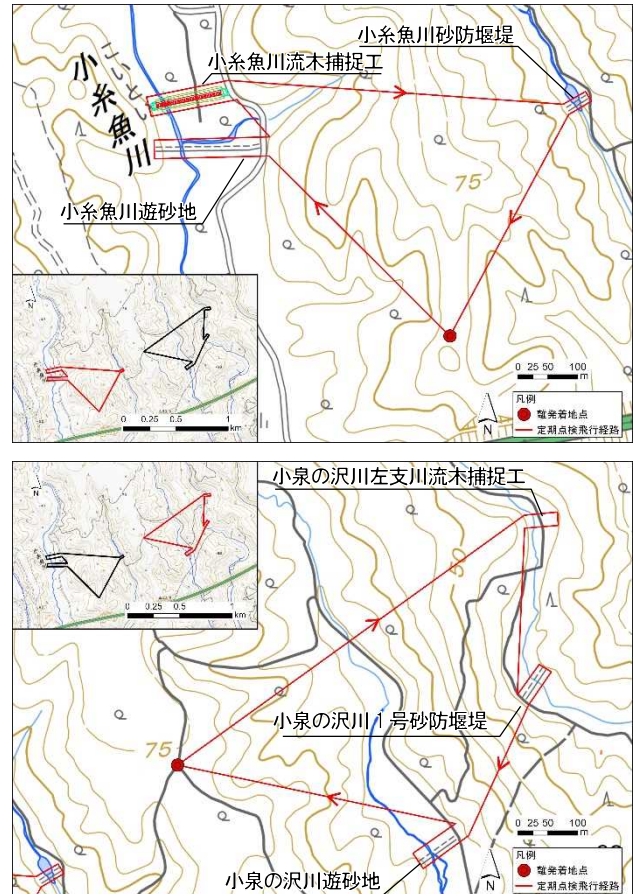


図1 定期点検飛行経路

（上：小糸魚川流域、下：小泉の沢川流域）

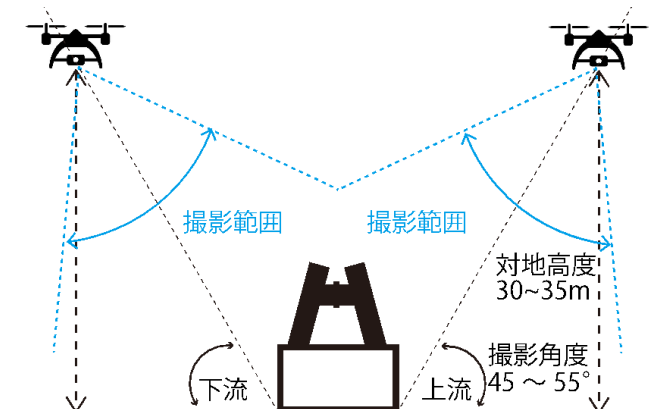


図2 撮影方法

表2 各施設の飛行方法

施設名	対地高度	撮影角度	飛行速度
小糸魚川遊砂地	約 35m	上流面：45° 下流面：55°	5.0m/s
小糸魚川砂防堰堤	約 30m	上流面：45° 下流面：55°	5.0m/s
小糸魚川 流木捕捉工	約 35m	上流面：55° 下流面：55°	5.0m/s
小泉の沢川遊砂地	約 30m	上流面：45° 下流面：45°	5.0m/s
小泉の沢川1号 砂防堰堤	約 30m	上流面：45° 下流面：55°	5.0m/s
小泉の沢川左支川 流木捕捉工	約 35m	上流面：45° 下流面：45°	5.0m/s

表3 使用機器詳細

機種名		Matrice 300 RTK
写真		
	種別	
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

3. UAV自律飛行による点検の概要

(1) UAVを用いた点検手法

小糸魚川流域（小糸魚川遊砂地、小糸魚川流木捕捉工、小糸魚川砂防堰堤）および小泉の沢川流域（小泉の沢川遊砂地、小泉の沢川1号砂防堰堤、小泉の沢川左支川流木捕捉工）の6基を対象としたUAV自律飛行による点検調査を実施した。調査時期は植生による点検精度への影響を評価するため、着葉期（7月）と落葉期（11月）の2度実施した。撮影した画像は、目視による定期点検との比較及び課題抽出のため、写真測量技術（SfM解析：重複した画像を用いた3次元モデル化技術）による3次元モ

MIYAZAKI Akitoshi, IWATA Kiyonori, YOKOO Kimihiro

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。

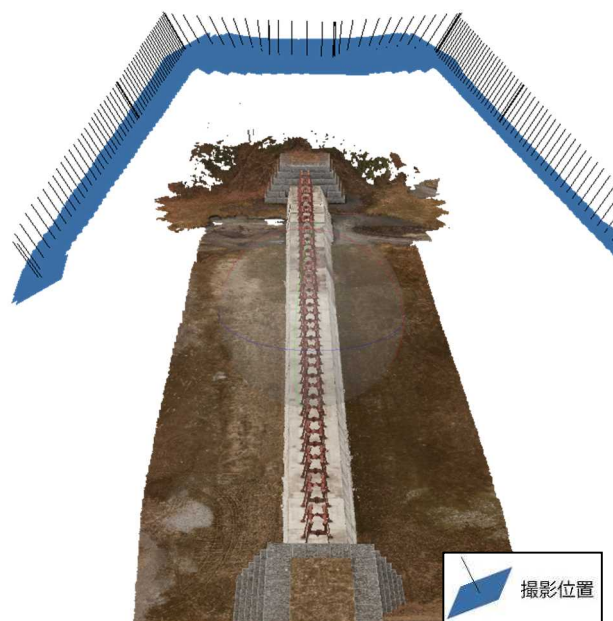


図3 撮影方法のイメージと3次元モデル

(2) SfM解析による3次元モデルの作成

UAV自律飛行による空撮データを用いて、図4～6に示すような3次元モデルを作成した。なお、本稿では、Agisoft MetashapeにてSfM解析を実施した。



図4 小泉の沢川遊砂地:3次元モデル



図5 小泉の沢川1号砂防堰堤:3次元モデル



図6 小泉の沢川左支川流木捕捉工:3次元モデル

4. 目視点検との比較検討

(1) 比較項目の抽出

砂防施設の健全度は、部位毎の変状レベルに応じて評価される。例えば、壁面材は中詰め材の流出を伴う変状が認められた場合、機能や性能が低下していると判断される。このため、壁面材の点検項目のうち、「中詰め材の流出」に直結すると考えらえる変状を点検項目として抽出した。他部位についても同様に点検項目を抽出し、目視点検との比較を行った。

(2) 比較結果

従前の目視点検による点検調査票と同アングルでの画像データを今回のUAV点検結果から作成した3次元モデルより抽出し、各点検項目について比較・検証した。表4は目視点検による確認箇所数を基準とし、UAVによる確認可能箇所数を整理したものである。すなわち、表4の値が目視点検数に近いほどUAVが目視点検と同等の精度を得られたといえる。また、精度が低下した項目については、色別に原因を整理した。

a) 比較結果①（壁面材）

着葉期と落葉期の3次元モデルを比較すると、可視範囲に差が認められ、落葉期では視認性は改善されるものの、目視点検の全項目を網羅するには至らなかった。壁面材の近傍に植生が繁茂しているため、UAVを用いた

施設点検には、壁面材周辺の植生を伐採する必要がある。

b) 比較結果②（水通し天端）

鋼製セル+DW型砂防堰堤については、一部で植生の影響が認められるものの、目視点検の大部分の項目を網羅することができた。鋼製DW型砂防堰堤については、植生の影響による精度の低下が認められたものの、落葉期では改善する砂防施設も認められた。また、小泉の沢川1号砂防堰堤は落葉期において植生の影響が少ない砂防施設であったが、天端コンクリートと壁面材の接合部のモデル化精度が低くなった。

c) 比較結果③（前庭部）

着葉期、落葉期ともに前庭部の点検項目について確認可能であった。

d) 比較結果④（その他点検項目）

周辺の法面については、比較的新しい小泉の沢川左支川流木捕捉工を除き植生の影響による精度低下が認められた。また、水面やスリット等の狭窄部の3次元モデル化が困難であることによる精度低下も明らかとなった。

e) 比較結果⑤（流木捕捉工）

流木捕捉工は鋼管の3次元モデル化が困難であったため、UAV点検が難しい結果となった。これを検証するため、図2に示した撮影方法に加えて、鉛直や水平からの撮影を試行したが、良好な結果は得られなかった。鋼管については、空撮画像による評価や目視点検との組合せが望ましいといえる。

表4 点検項目の比較結果一覧

凡例：評価箇所の減少理由			点検項目																								
			壁面材					水通し天端			前庭部			その他点検項目					流木捕捉工								
			摩耗・腐食	破損	変形	継手の開き	漏水	吸出し防止材の変状	沈下	摩耗	ひび割れ	目地の開き	流出	沈下	摩耗	ひび割れ	周辺の法面変状	護岸変状	河道洗堀	河道土砂堆積	安全対策施設腐食・損傷	鋼管摩耗・腐食	鋼管変形・欠損	床版コンクリート摩耗	床版コンクリートひび割れ		
評価例																											
目視点検数			10	← 目視による評価項目数																							
R5.7月 自律飛行			4	← UAV点検による評価項目数 ※4項目が確認可能																							
R5.11月 自律飛行			4	※植生の影響で6項目が確認不可																							
施設名（構造型式）		調査日	撮影方法																								
小糸魚川遊砂地 （鋼製セル+DW型砂防堰堤）		目視点検数		10	10	10	4	6	6	19	16	16	16					6	4	6	6	1					
		R5.7月 自律飛行		4	4	4	1	3	3	18	16	16	16					1	2	1	1	0					
		R5.11月 自律飛行		4	4	4	1	3	3	18	16	16	16					1	3	2	2	0					
小糸魚川砂防堰堤 （鋼製DW型砂防堰堤）		目視点検数		8	8	8	4	4	4	11	11	11	11	1	1	1	1	7		5	5						
		R5.7月 自律飛行		0	0	0	0	0	0	7	7	7	7	1	1	1	1	1		3	3						
		R5.11月 自律飛行		2	2	2	2	0	0	7	7	7	7	1	1	1	1	1		4	4						
小糸魚川流木捕捉工 （鋼製流木捕捉工）		目視点検数																12		6	6		1	1	13	13	
		R5.7月 自律飛行																	11		3	3		0	0	13	13
		R5.11月 自律飛行																	11		4	4		0	0	13	13
小泉の沢川遊砂地 （鋼製セル+DW型砂防堰堤）		目視点検数		15	15	15	6	9	9	16	14	14	14					7	2	4	4						
		R5.7月 自律飛行		7	7	7	2	5	5	15	13	13	13					4	1	4	4						
		R5.11月 自律飛行		11	11	11	4	7	7	15	13	13	13					6	2	4	4						
小泉の沢川1号砂防堰堤 （鋼製DW型砂防堰堤）		目視点検数		6	6	6	4	2	2	24	24	24	24					6		4	4	2					
		R5.7月 自律飛行		3	3	3	2	1	1	18	18	18	18					0		2	2	0					
		R5.11月 自律飛行		6	6	6	4	2	2	21	21	21	21					4		4	4	0					
小泉の沢川左支川流木捕捉工 （鋼製流木捕捉工）		目視点検数																6		8	8		1	1	4	4	
		R5.7月 自律飛行																	6		8	8		0	0	4	4
		R5.11月 自律飛行																	6		8	8		0	0	4	4



図7 小糸魚川遊砂地3次元モデル（着葉期）



図8 小糸魚川砂防堰堤3次元モデル（着葉期）

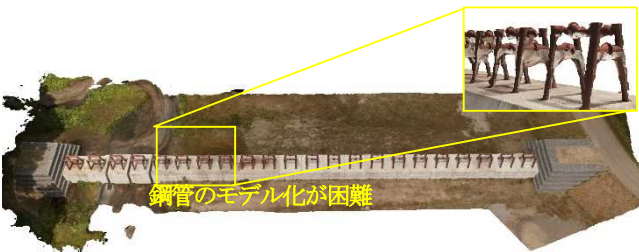


図9 小糸魚川流木捕捉工3次元モデル（着葉期）



図10 小泉の沢川遊砂地3次元モデル（着葉期）



図11 小泉の沢川1号砂防堰堤3次元モデル（着葉期）



図12 小泉の沢川左支川流木捕捉工3次元モデル(着葉期)



図13 小糸魚川遊砂地3次元モデル（落葉期）



図14 小糸魚川砂防堰堤3次元モデル（落葉期）

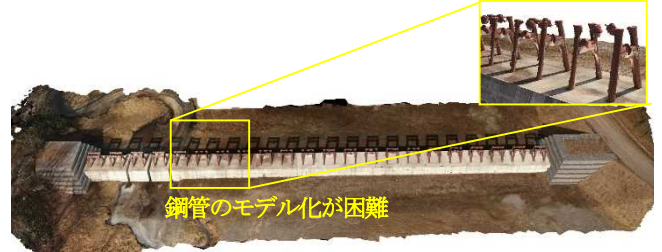


図15 小糸魚川流木捕捉工3次元モデル（落葉期）



図16 小泉の沢川遊砂地3次元モデル（落葉期）



図17 小泉の沢川1号砂防堰堤3次元モデル（落葉期）



図18 小泉の沢川左支川流木捕捉工3次元モデル(落葉期)

5. UAVを用いた施設点検の効率化検証

樽前山直轄火山砂防事業では平成27年度より目視による砂防施設の定期点検を実施している。従前から実施している目視点検と、UAVを用いた施設点検との作業効率性を比較するため、令和4年度にUAV点検を実施した覚生川流域（覚生川1号砂防堰堤、覚生川2号砂防堰堤）、熊の沢川流域（熊の沢川2号砂防堰堤）、小糸魚川流域（小糸魚川遊砂地、小糸魚川流木捕捉工、小糸魚川砂防堰堤）および小泉の沢川流域（小泉の沢川遊砂地、小泉の沢川1号砂防堰堤、小泉の沢川左支川流木捕捉工）において、1フライト3施設の目視外自律飛行（補助員有）による各施設の砂防施設点検票を作成するまでの作業時間を算出し、目視点検との比較を行った。なお、SfM解析ではアプリケーション上の自動計算に要した時間を算出している。

UAV点検では、SfM解析処理に時間を要するものの、目視点検と比べ、多くの施設で作業時間の短縮が確認できた。特に現地での作業時間は、1施設あたり目視点検9時間に対し、UAV点検15分程度と大幅に短縮できたことから、作業効率と安全性は飛躍的に向上したといえる。一方で、覚生川1号砂防堰堤は袖折れ構造となっていることから、写真枚数が増加し、SfM解析処理に特に時間を要した。このように、施設規模や構造によって施設点検時間に差異が生じる結果となった。

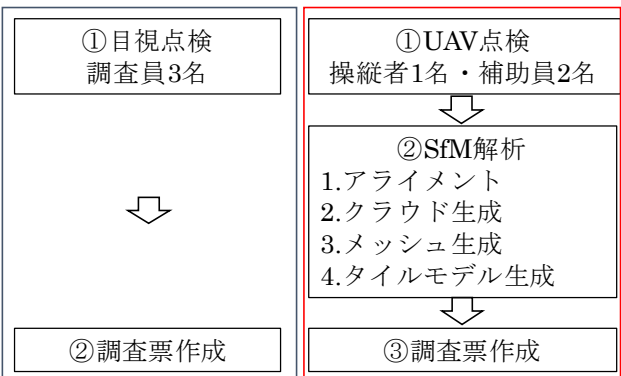


図 19 各点検手法の作業手順

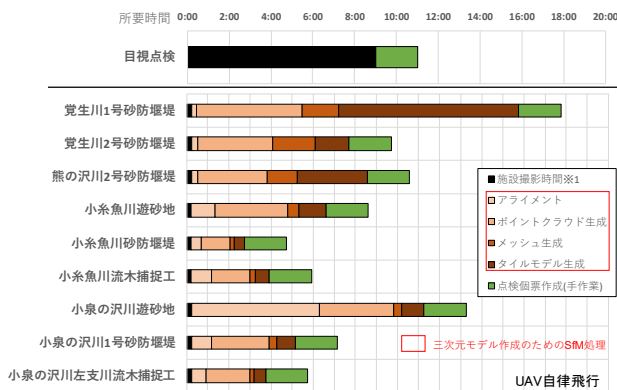


図 20 各点検手法の作業時間

6. おわりに

過年度から今年度にかけて実施したUAVを用いた施設点検について、現状の目視点検結果に基づく砂防施設点検票をアウトプットとした場合には、表5に示すような課題が挙げられる。

一方で、UAVを用いた施設点検では、目視点検に比べて「立入困難な高所でも安全に作業ができる」「施設の撮影時間が短い」「定期目視点検以外の異常が認められていない箇所でも、3次元モデルを保存することで定期的に記録として残しておくことができる」などの利点も多く認められた。今後、これらUAVを用いた施設点検のメリットを最大限生かした施設点検を行う際には、①植生の定期的な伐採（落葉期の調査でも確認不可の項目が多く存在した）、②砂防施設点検票の見直し（劣化曲線に基づく点検の合理化や流域特性を加味した点検計画の立案）なども想定される。また、SfM解析に要する処理時間、モデル化精度等は今後改善される可能性もあり、技術動向を注視していく必要がある。

その他、今回の検討では、「中空構造を有する流木捕捉工等では完全な3次元モデルは生成できない」ことが明らかとなった。したがって、現時点では植生が繁茂した砂防施設や、流木捕捉工などは目視点検とUAV空撮画像を用いた施設点検を併用するなどして、点検の効率化と高精度化を図っていく必要があると考えられる。

表 5 各点検手法の長短

	目視点検	UAV 撮影+SfM 処理
メリット	・ 気象条件に左右されず、植生下の施設でも確認することが可能。 ・ 変状箇所を直接計測することができ、近接写真の撮影も可能。	・ 目視点検に比べて施設の撮影時間が圧倒的に短い。 ・ 高所作業を要しないので安全に施設を撮影可能。 ・ 3次元モデルを用いて各所の計測が可能。 ・ 施設をモデル化することで、定期目視点検以外の異常が認められていない箇所でも、定期的に記録を残しておくことが可能。
デメリット	・ 施設全体をくまなく点検するには、時間を要する。 ・ 高所作業を要する立入困難な箇所の状況は確認することができない。	・ SfM 処理に時間を要する ・ 施設構造によっては写真撮影枚数が多くなり、目視と比較して効率性に劣る場合もある。 ・ 植生が繁茂した施設では、適切なモデル作成が困難。 ・ 中空構造を有する流木捕捉工等では適用不可。