

テクノロジーマップの整備に向けた調査研究
(アナログ規制の見直しに向けた技術実証等) における技術実証

技術実証報告書

実証類型番号 3 :

ドローン、3D 点群データ等を活用した構造物等の検査の実証

イームズロボティクス株式会社

2024 年 2 月 29 日

目次

1	技術実証の概要	3
1.1	目的	3
1.2	対象業務	3
1.2.1	法令	3
1.2.2	現行業務の概要	3
1.3	全体像	5
1.3.1	対象業務と代替手法	5
1.3.2	実証内容	6
1.3.3	実証内容	7
1.3.4	実証の手順	8
1.3.5	現地実証での使用機材	10
1.4	実施体制・期間	14
1.4.1	実施体制	14
1.4.2	実施期間	14
2	技術実証内容の詳細	15
2.1	技術実証の方法	15
2.1.1	高精細カメラを活用した写真データによる土堤表層の状態の確認	15
2.1.2	LiDAR を活用した現況寸法の確認	18
2.2	実施場所等	19
2.3	実施条件等	19
3	技術実証の結果	21
3.1	結果の評価ポイント・方法	21
3.2	結果及び評価・分析	24
3.2.1	高精細カメラを活用した写真データによる土堤表層の状態の確認	24
3.2.1	LiDAR 搭載ドローンを用いた 3 次元データによる現況寸法の確認	32
3.3	考察	44
3.3.1	精度	44
3.3.2	安定性（汎用性）	44
3.3.3	安全性	45
3.3.4	工数・コスト	45
3.3.5	総括	45
	用語集	47

1 技術実証の概要

1.1 目的

本実証では、火薬類取締法施行規則に基づいて実施される土堤の完成検査・保安検査について、ドローンを活用することで、上空から俯瞰的に撮影した高精細画像や、3次元データを参照した寸法の確認等により得られるデータで、目視等による確認と同等以上の精度で必要な情報を得られるか、検証を行う。あわせて、これらが、検査実施者（事業者、自治体、国の出先機関や民間の調査員）の実務（機材や方法）に適應する可能性についての検証も行う。

1.2 対象業務

1.2.1 法令

本実証では、火薬類取締法施行規則第44条及び第45条の5の検査方法に従って行う「火薬類製造施設・火薬庫（以下「火薬類関連施設」）」の土堤や防爆壁等の完成検査・保安検査を対象とした。特に実証にあたっては、表1のとおり土堤を具体的な検査対象としてドローンの活用可能性等を検証した。

表 1 火薬類取締法施行規則

別表第2（第44条第2項関係）：火薬庫の完成検査項目
2 地上式一級火薬庫の基準
十三 第24条第13号の土堤
16 土堤の基準
七 第31条第7号の土堤の堤面
18 防爆壁の基準
別表第4（第44条の5第2項関係）：火薬庫の保安検査項目
2 地上式一級火薬庫の基準
十三 第24条第13号の土堤
16 土堤の基準
二 第31条第2号の切通の出入口を設けた土堤の構造
七 第31条第7号の土堤の堤面
17 簡易土堤の基準
四 第31条の2第3号の土堤の頂部

1.2.2 現行業務の概要

現在、火薬類取締法施行規則に基づいて実施される土堤の完成検査・保安検査は、検査実施者が、火薬類を取り扱っている敷地内の該当箇所まで実際に赴き、人の目視による確認、メジャー等による計測、測量を行い、製図内容との整合の確認を行っている。完成検査は、火薬

類製造施設・火薬庫等の完全な新築・新設時だけでなく、施設の一部変更（追加・除却）等であっても行う必要があり、保安検査は、1年に一度（自主点検は半年に一度）の頻度で行う必要がある。これらの現地での検査業務を通じて、人手による検査を行うための時間、手間、コストがかかっており、さらには検査項目によっては危険を伴うこともある。

具体的には、以下の通りである。

(1) 目視検査

現在火薬類取締法施行規則第44条及び第44条の5の検査方法に従って、火薬類関連施設の土堤の完成検査・保安検査を目視で行っているが、下記の点で危険をとまなう検査作業、および、検査を行うために時間がかかってしまう内容がある。

- ・ 土堤上部、建物の屋根、上部の壁面など人による目視検査が行いづらい場所がある。また、土堤は数mの高さがあり調査時に落下などの危険を伴う。
- ・ 土堤、屋根などの高所の目視の検査の際足場を組むなどの対策を行わなければならない、手間と時間とコストがかかってしまう。



左写真にあるように土堤は数 m の高さがあり、土堤上部の検査を行うために人が土堤防を上ることは高さもあり危険を伴う。足場を組んで検査を行う場合、時間とコストがかかる（右図）。



- ・ 図 1 実証実験で使用した土堤の写真（左）と足場のイメージ図（右）

(2) 図面等による位置の確認

現在、土堤・防爆壁・保管庫などの建築物の位置など測量を行って設計図面と差異がないか確認検査を行っている。

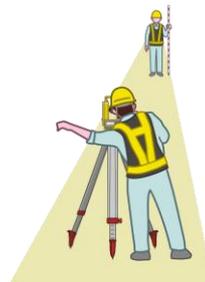


図 2 実際の測量作業のイメージ図

1.3 全体像

1.1 の目的に示したとおり、本実証では、火薬類取締法施行規則に基づいて実施される土堤の完成検査・保安検査におけるドローンの活用可能性について検証を行った。具体的には、「火薬類取締法施行規則第 44 条（完成検査の方法）」及び「第 44 条の 5（保安検査の方法）」並びに参照先となる別表第 1～4 の検査方法に従って、火薬類製造施設・火薬庫等を囲む土堤の完成検査・保安検査について、ドローン、または、その他のデジタル技術を使って、人が行う検査と同等またはそれ以上の精度および優位性があるか、また、時間・手間・コストを削減できるか、危険を減らすことができるかについて確認するとともに、デジタル技術の実装に向けての課題の抽出などを行った。

ただし、評価に際しては、火薬メーカーへのヒアリングを通じ、土堤の設置要件であり、完成検査や保安検査の際に具体的な技術上の基準となる火薬類取締法施行規則第 31 条（土堤）の内容を満たしているかを確認できるか検証することとした。

なお、調査可能期間の制約から、当初予定していた火薬類関連施設においてドローンを飛行させて現場でのリスク等を事前に整理する「プレ点検」までは行わず、現地下見の後、本番実証を行うこととした。

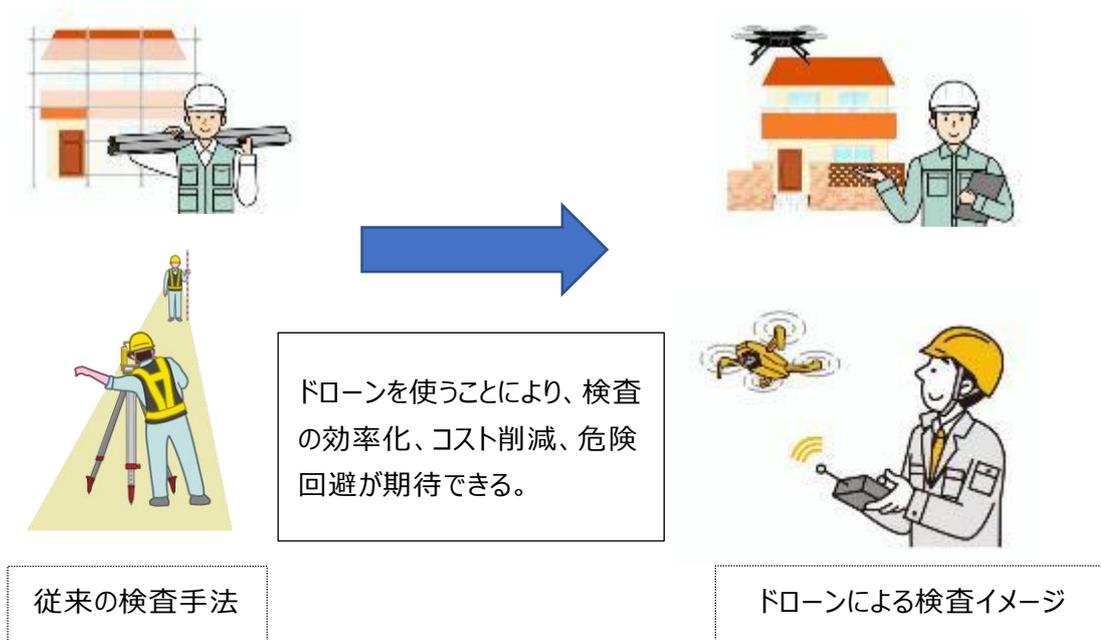


図 3 測量、検査などを人が行う場合とドローンで行う場合のイメージ図

1.3.1 対象業務と代替手法

(1) 保安検査における土堤のひび割れ・変状等の検出作業

火薬類取締法施行規則第 31 条で規定される、土堤の切通の出入口や堤面の被覆、また、頂部における維持管理状況（ひび割れ・変状等）の目視確認作業について、ドローンを活用することで実施可能かを検証した。

なお、火薬メーカーへのヒアリングにより把握した従来の手法（目視）による具体的な確

認内容は以下のとおりである。

- クラックの抽出：土堤の表層全体（内側・外側）を目視により確認し、クラック（ひび割れ）の有無を確認
- 土堤の崩れの確認：土堤の崩れの有無等を目視により確認することで、前回測定データとの差分、図面上の寸法との整合性を確認

(2) 完成検査における土堤の寸法等の測定作業

火薬類取締法施行規則第 44 条で規定される、土堤の設置状況の目視確認作業について、ドローンを活用することで得られる画像や 3 次元データの成果物によって、同法施行規則第 31 条に定められている土堤の要件を確認することができるかを検証した。

1.3.2 実証内容

本実証では、前述の対象業務に応じて、活用するドローンを使い分け、以下の(1)及び(2)の実証を行った。

(1) 高精細カメラ搭載ドローンを活用した写真データによる土堤表層の状態の確認

火薬類製造施設・火薬庫等の上空を避けながら低空で土堤の周辺をドローンを飛行させ、当該ドローンに搭載した有効画素数約 3300 万画素のデジタル一眼レフカメラ（以下「高精細カメラ」）を用いて、土堤表面を網羅的に撮影した。安全に飛行できる方法を火薬メーカーのヒアリング・実証実施までの調整を通じて確認するとともに、土堤表面のクラックが発見できるかの確認を行った。

飛行時にはドローンスパイダー（ドローンが誤って飛行禁止エリアに侵入しないように、ケーブルで係留して物理的に飛行範囲を制限する装置）とジオフェンス（ドローンが誤って飛行禁止エリアに侵入しないようにドローンの飛行範囲をシステム的に制限する機能）を利用し、物理的・システム的な安全対策を行った。ドローンスパイダーで係留措置を講じることで、火薬庫に対し機体が過剰に近接するリスクを排除し、離隔を保ちながら保安検査を安全に遂行できることを確認する。また、実証に先立ちドローンを活用することによって生じる電磁波や静電気の影響を考慮し、火薬庫貯蔵物の発火影響について確認を行った。

(2) LiDAR 搭載ドローンを活用した 3 次元データによる土堤の現況寸法の確認

火薬類製造施設・火薬庫等が集積するエリアの外周から比較的高い高度でドローンを飛行させ、搭載した LiDAR（レーザーの光を対象に照射して、その反射する光によって対象物までの距離や対象物の形等を計測する技術）スキャナにより取得した点群（XYZ の 3 次元の座標情報を保持した点の集まり）データを基に、3D モデルを作成し、3 次元データを活用して土堤の現況寸法を確認した。収集した点群データの処理には専用のソフトウェアを使用し、各点群の座標情報の補正を行った（図 4 のとおり、補正の諸元として飛行前に実際の火薬庫

等で対空標識¹を設置し、あらかじめ標識設置地点を測量することで補正の材料とした。)

実証にあたっては、安全に飛行できる方法を実務者等へのヒアリング・火薬庫等での実証実施までの調整を通じて確認するとともに、実証結果と、火薬メーカーが保有する過去の測量結果（トータルステーション等の測量機器を用いて測量されたもの）を比較し、誤差を把握した。



図 4 滞空標識の設置と測量状況

1.3.3 実証内容

(1) 高精細カメラを活用した写真データによる土堤表層の状態の確認

火薬類関連施設等の上空を避けながら低空で土堤の周辺をドローンが飛行、有効画素数約 3300 万画素のデジタル一眼レフカメラを用いて、土堤表面を撮影した。安全に飛行できる方法を実務者等へのヒアリング・実証実施までの調整を通じて確認するとともに、土堤表面のクラック等が発見できるかの確認を行った。

(2) LiDAR を活用した現況寸法の確認

火薬等取扱施設が集積するエリアの外周から比較的高い高度でドローン飛行し、搭載した LiDAR（レーザーの光を対象に照射して、その反射する光によって対象物までの距離や対象物の形等を計測する技術）スキャナから得られた情報を基に、3D モデルを作成、3次元データを活用した土堤の現況寸法を確認した。安全に飛行できる方法を実務者等へのヒアリング・実証実施までの調整を通じて確認するとともに、実証結果と、火薬メーカーが保有する測量結果（トータルステーション等の測量機器を用いて測量されたもの）を比較し、誤差を把握した。

¹ 空中写真による測量にあたって地上に設置する標識であり、撮影された空中写真との関係で評定点や検証点の目印となるもの。

上記の結果を踏まえ、取得データの精度（含：信頼性）、データ取得（デジタル技術）運用方法の安定性・安全性・工数（省力化）・コストの評価を実施した。

1.3.4 実証の手順

以下の手順にしたがって、実証を行った。

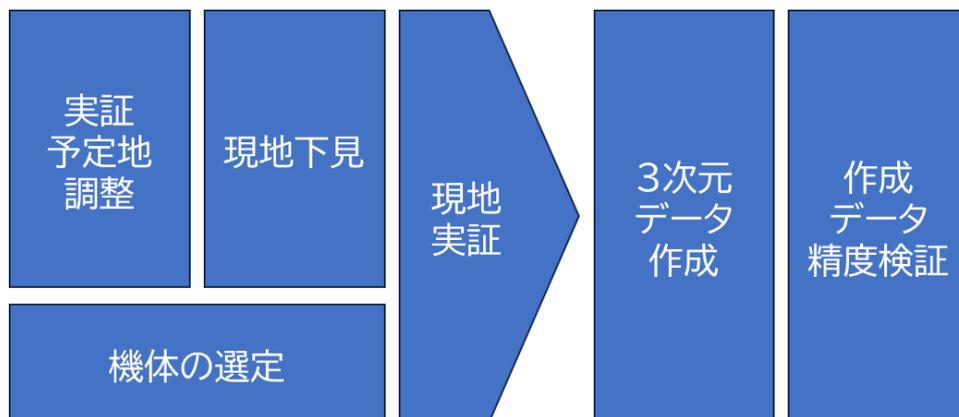


図 5 実証の手順

(1) 実証予定地調整

以下の条件に基づき、火薬メーカーの工場施設（火薬庫等）で実施できるよう調整を行った。

- 実際に稼働中であること
- 敷地内のドローン飛行を許諾いただけること
- 現場図面などの設備情報を開示いただけること

調整に際しては、火薬を取扱保管している区画は、LTE・無線等の電波も出力管理されており、電子機器を利用する場合、1MHz 毎に 10mW 以下の出力に抑えることが前提条件として求められた。そのため、本実証において、ドローンを含めた各電子機器（プロペラ・モーターなど）から発する電磁波についても、上記出力以下であれば問題ない旨を確認し、その前提で火薬メーカーの工場施設での実証を実施できることとなった。

(2) 現地地下見

上記(1)で調整がついた火薬類関連施設等の敷地内の設備や周辺環境を確認し、ドローンの飛行における電柱や配電線といった障害物や部外者立入の可能性といった外因的な懸念の有無を確認した。

(3) 機体の選定

実証に用いる機体としては DJI 製とイームズロボティクス製のドローンを選定し、すでに建築物等の点検業務等で実績があるものを使用した（各機体の性能等については 1.3.4 参照）。

(4) 現地実証

火薬類関連施設等での飛行においては現地地下見を踏まえて、講じた係留措置やジオフェンス設定を施すことで、安全に考慮した飛行を行った。

具体的には、火薬庫から十分な距離を保った飛行を行い、ジオフェンスで系統的な安全策を施す、また機体に対してはドローンスパイダーで係留措置を施して飛行を行い、点検対象の建物や構造物の外観、損傷や劣化、周辺地形、建物付帯設備などの全周囲の状態を撮影した。また、カメラジンバル（カメラの角度調整機構）の遠隔操作やカメラの設定値も変更できるよう開発し、GNSS 精度²により画角がずれた場合や逆光等でカメラ設定値を変更する必要がでた場合でも対応できるようにした。

飛行中は想定通りの画角を捉えているかを確認し、着陸後にカメラ内 SD カードに映像データが保存されていることを確認していった。ドローンに搭載したカメラ（α7 等）を使用して、損傷や劣化、材質の外観や位置関係などの点検対象項目を撮影した。撮影時には、必要な解像度と視野範囲の確保、また安全性を考慮した上で飛行ルート、ジンバル角度を調整した。

(5) 3次元データ作成

ドローンで撮影した高精細画像を元に、画像処理ソフトウェアを使用して3次元データを作成した。ドローンに搭載した LiDAR スキャナを使用して建物や構造物の点群データを取得した。LiDAR スキャナはレーザー光を使用して対象物から距離データを取得し、高密度な点群データを生成する。取得した点群データを処理し、建物や構造物の3次元点群データを生成した。

(6) 作成データ精度確認

生成した3次元点群データと実際の図面と比較することで、当該データの精度を計測した。

(7) ドローンおよびデジタル技術の活用

これらをドローンまたはデジタル技術を使って時間、手間、コストを削減、危険を減らすことができるかどうか技術検証を行って確認または課題の抽出などを行った。

² GNSS : Global Navigation Satellite System の略。ドローンは、GNSS 衛星から送信される衛星の位置や信号送信時刻などの情報を受けて、正確な位置を確認することができるが、参照可能な衛星が十分でない場合、GNSS 精度が落ちることがある。

1.3.5 現地実証での使用機材

(1) 高精細画像データ取得用機材

・ドローン

機体①高精細カメラ搭載機 (E6106-FLMP2)	
機体外観	
所有者（製造者）	イームズロボティクス株式会社
サイズ	全長 999 mm×全幅 1140 mm×全高 615 mm（プロペラ含まず）
重量	9kg（バッテリー除く）
最大離陸重量	13kg（ペイロード推奨 5 kg未満）
飛行時間	約 40 分/離陸重量 9.kg、バッテリー搭載時
耐風性能	10 m/s 以上
フェイルセーフ機能	バッテリー残量規定値以下での帰還。プロポ通信断での帰還
飛行範囲制限機能	飛行距離制限オーバーによる帰還
プロペラガード	なし
通信	テレメトリー-2.4GHz 送信出力：6.3 mW(+8 dBm) AMIMON CONNEX mini (送信出力：200mW、運用上の帯域幅：20MHz)
周辺機材	・2.4GHz テレメトリーユニット ・プロポ FMT-02 ・AMIMON CONNEX mini ドローンスパイダー（係留措置）
ペイロード項目	PARASAFE SONY a7R4 AMIMON CONNEX mini

・カメラ

SONY α7R4	
外観	
撮像素子	35 mm フルサイズ (35.9 x 23.9 mm)、Exmor R CMOS センサ
カメラ有効画素数	約 3300 万画素
総画素数	約 3410 万画素
撮像素子アスペクト比	3:2
カラーフィルター	RGB 原色フィルター
質量(g)	約 658 g
(バッテリーとメモ리카ードを含む)	
質量 (g) (本体のみ)	約 573 g
外形寸法 (幅 x 高さ x 奥行)	約 131.3 x 96.4 x 79.8 mm、約 131.3 x 96.4 x 69.7 mm (グリップからモニターまで)
使用温度範囲	0 - 40°C

・レンズ

SONY Sonnar T* FE 35mm F2.8 ZA	
外観	
焦点距離(mm)	35
焦点距離イメージ(mm)	52.5
画角 (APS-C)	44°
画角 (35 mm判)	63°
開放絞り (F 値)	2.8
最小絞り (F 値)	22
質量 (g) (本体のみ)	120
外形寸法最大径×長さ(mm)	61.5 x 36.5

・ドローンパイダー

空撮技研 DS-003PRO	
外観	
仕様	(最大展張距離)100m(5号テグス)
材質	ステンレス
ブレーキ	手動ディスクブレーキ方式
質量(kg)	8.85
電源	リチウムポリマー電池(11.1V・5000mAh)
制御方式	モータダイレクト駆動

・Wi-Fi アンテナ等送受信関連

双葉電子工業 AMIMON Connex mini	
外観	
通信距離(屋外)	約 500m(見通し)
伝送遅延	1mS 未満
通信周波数	5.1 - 5.7GHz
周波数設定	自動設定
ビデオフォーマット	1080p/60, 1080p/50, 1080i/60, 1080i/50, 1080p/30, 1080p25, 1080p/24, 720p/60, 720p/50, 525i/60, 625i/50
使用環境温度	0 - 45℃

(2) 点群データ取得用機材

・ドローン

機体②LiDAR スキャナ搭載機 (DJI Matrice600PRO)	
機体外観	
体格サイズ	1668x1518x727mm(アーム展開時)
機体重量	約 9.5kg (標準バッテリーTB47S 6 個搭載時)
台風速	8m/s
飛行時間	約 32 分 (ペイロードなし)

・LiDAR スキャナ

YellowScan	YellowScan Voyager
外観	
ショット数/秒	最大 1800 khz
精度	0.5 cm
正確度	1cm
最大レンジ	760m
重量	3.5kg(バッテリーを含まない)

・GNSS 受信機

TOPCON	HiPer SR
外観	
精度 (RTK)	水平 (10mm + 1.0ppm × 測定距離) m.s.e. 垂直 (15mm + 1.0ppm × 測定距離) m.s.e.
寸法	W150 × D150 × H64mm
質量	0.85kg
内蔵メモリ	2GB
耐水・防塵性	JIS C0920 IP67 に準拠

1.4 実施体制・期間

1.4.1 実施体制

事業者名	実施業務・役割
イームズロボティクス株式会社 (実証事業者)	実証実験の実施
パーソルプロセス&テクノロジー株式会社 (再委託先)	実証実験における実地サポート、及び実証レポート等の作成支援
株式会社 COBALT (再委託先)	LiDAR による位置検証
火薬メーカー (再委託先)	事業会社としての場所、知見提供

1.4.2 実施期間

2023年11月30日～2024年2月29日

2 技術実証内容の詳細

2.1 技術実証の方法

2.1.1 高精細カメラを活用した写真データによる土堤表層の状態の確認

(1) 実証内容の前提

実証場所の特性を考慮し、安定した飛行が可能なドローン機体（E6106-FLMP2）に、さらにドローンスパイダーを装着して低空で飛行させ、当該ドローンに搭載した高精細カメラ（SONY α7R4）により火薬類関連施設等を取り囲む土堤を撮影し、その画像からクラックが検出可能か、確認を行った。また実証フィールドの使用に伴い化薬メーカーよりドローン飛行に対する安全管理の要望があり、ドローンスパイダーによる物理的な安全対策のほか、図7のとおりジオフェンスによるシステム的な安全対策等も講じた。

併せて、火薬類関連施設等へのドローンの飛行による影響や落下等の危険がなく実施できるかの確認を行った。



ドローンスパイダー

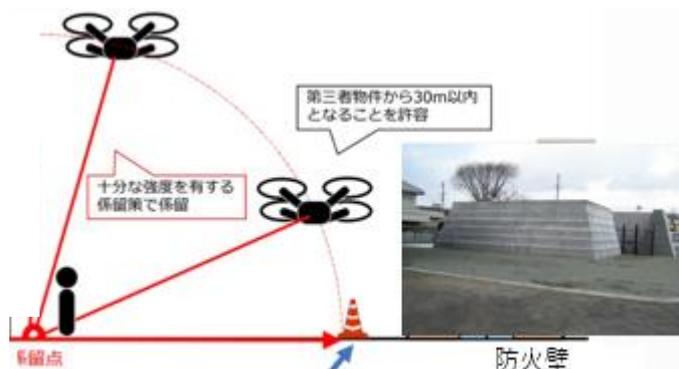
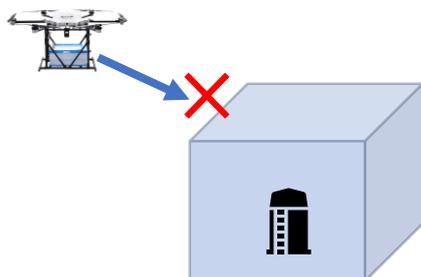


図 6 ドローンスパイダーによる係留のイメージ図



火薬庫周辺にジオフェンス（仮想的な飛行禁止エリア）を設定し、ドローン飛行中に設定したエリア内に進入できないよう、システム面から制限を講じる。

図 7 ジオフェンスによるシステム的安全対策

(2) 実証内容の詳細

① 実証準備

ドローンを飛行させるにあたって、実証の調整に伴って必要となった実施条件（2.3 参照）

を満たしているかの確認を行った。また、土堤の周辺には電柱・電線・樹木の枝等が張り出しており、これらの存在を、地上方ドローンの操縦者や補助者等で確認する等、安全確認を実施した。

またドローンに搭載した高精細カメラで検出を試みるクラックの代替として「クラックスケール」を用いた。野外の明暗差が画像データ取得の精度に影響するかを確認するため、土堤の日向・日陰の両方にクラックスケールを設置した。

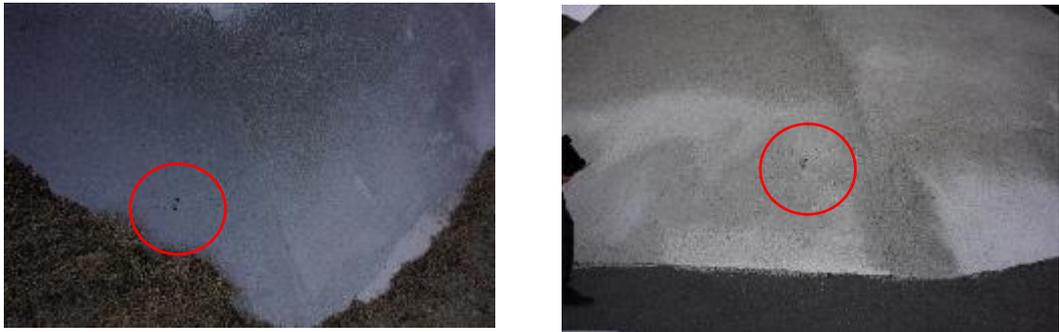


図 8 土堤に設置したクラックスケールを撮影した画像
(左：日陰・ISO640、右：日向 ISO250)

② 手動飛行による土堤の表層の撮影

土堤の横で手動飛行によって土堤の外周を高度 15～20m 程度で飛行させ、土堤の外側・内側（火薬類製造施設・火薬庫等に面した側面）の両方を漏れなく撮影した。

なお飛行前には、ドローンが火薬庫や土堤の外観すべてを検査できる距離および検査対象が解像できる範囲、かつ安全と思われる範囲でフライトプランの作成とレンズを選定した。また、検証にかかった時間または逆光などによる影響を調査した。

実際の飛行を通じて、ジオフェンス外、かつドローンスパイダーによる係留を実施した状態で、土堤全体の撮影ができるかの確認を行うと同時に、亀裂・破損などを検出することを想定して、疑似的に破損を模したもの（クラックスケール）を用いて、これが検出できるかの確認を行った。



図 9 電線、電柱、樹木と離隔を保ちながらドローンを飛行させている様子

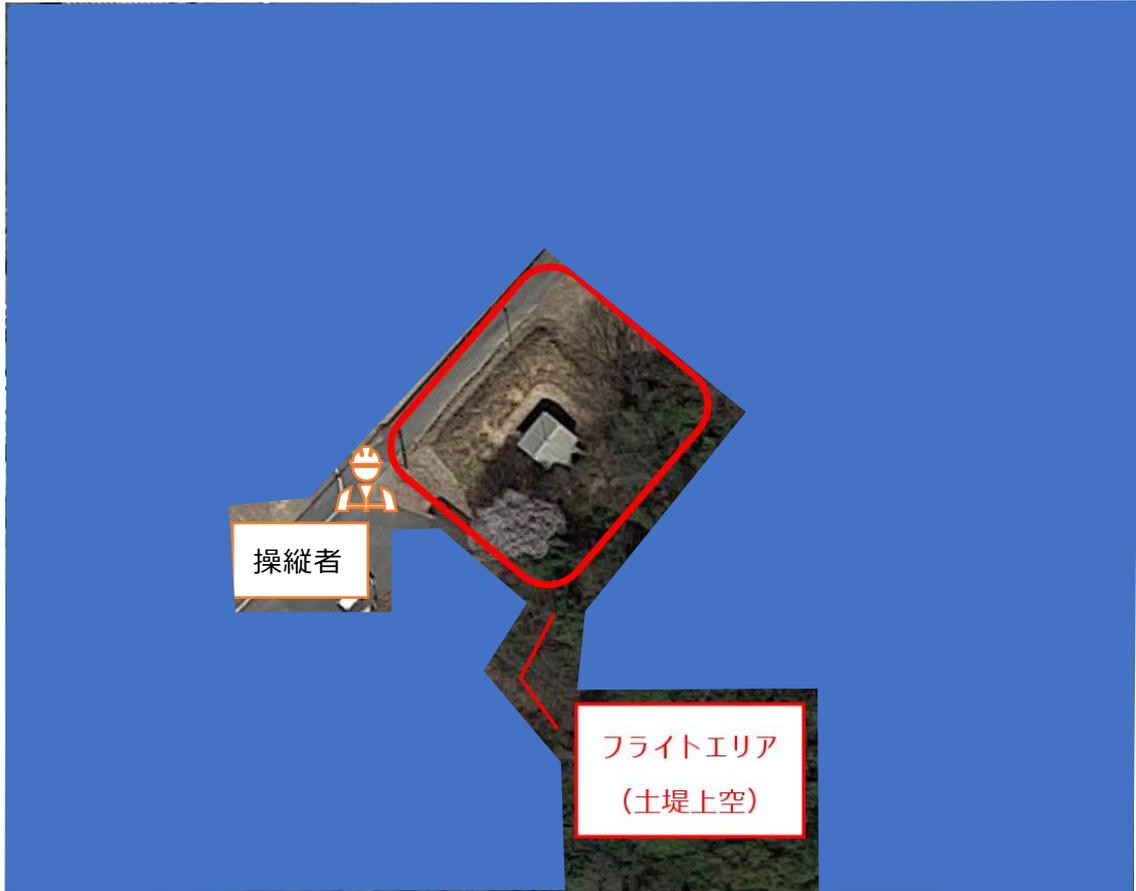


図 8 土堤の周りの飛行計画（安全・防犯の観点より秘匿）

なお、本実施項目においては、SONY が提供する Camera Remote SDK (software develop kit の略。カメラをコントロールするための固有の構築ツールのセット) を用いることで、操縦者が手元のプロポよりカメラのシャッターを切ることができるよう設定を行った。具体的にはドローンの飛行中にカメラで撮影されている映像を AMIMON (無線伝送装置) で地上側の操縦者横に設置したモニターに送信し、カメラの画角に土堤全体が収まっていることを確認しシャッターを切る操作をプロポから行った。撮影した画像データはカメラ内の SD カードに保存され、ドローン着陸後に PC にて実データの確認を行った。

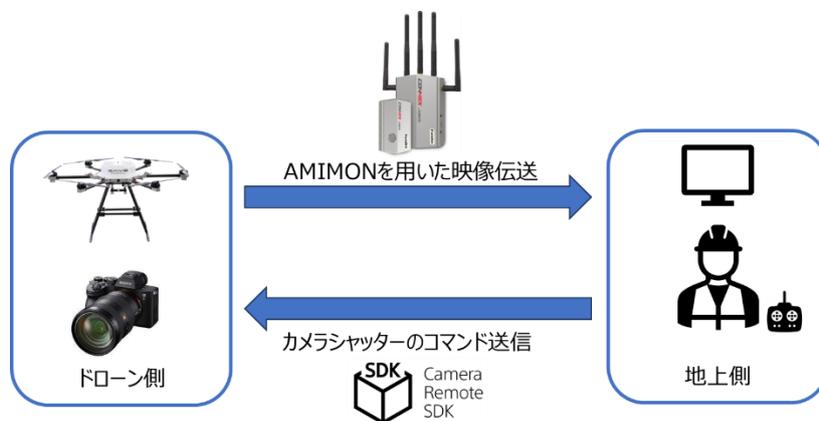


図 9 カメラ撮影および地上への画像伝送ブロック図

2.1.2 LiDAR を活用した現況寸法の確認

(1) 実証の前提

LiDAR を搭載したドローン（Matrice600PRO）を上空 135m の高さで施設外周を飛行させて取得した点群データを用いて 3D モデルを作成し、実際の図面・測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と現況の整合の確認（工場のセキュリティの問題から、図面提供は不可なので、火薬メーカー側に取得データを提供して十分な精度かを確認してもらう方法で実施）がとれるかの確認を行った。あわせて、当該調査手法が火薬類関連施設にとって安全であるかの確認を行った。

またプロポを用いて手動で飛行すると、飛行スピードにバラつきが生じて点群を均一に取得できないため、フライトソフト（VC Technology が提供する「Litchi」）を用いて常に飛行スピードが一定となるフライトプランを作成し、ミッション飛行にて測量を実施した。

(2) 実証内容の詳細

① ミッション飛行の飛行ルートの策定

火薬類製造施設・火薬庫等の上空は、万が一のドローンの落下を考えると避ける必要があることから、以下の通り、火薬工場の外周をめぐって LiDAR データの取得を試みる飛行ルートを策定することとした。

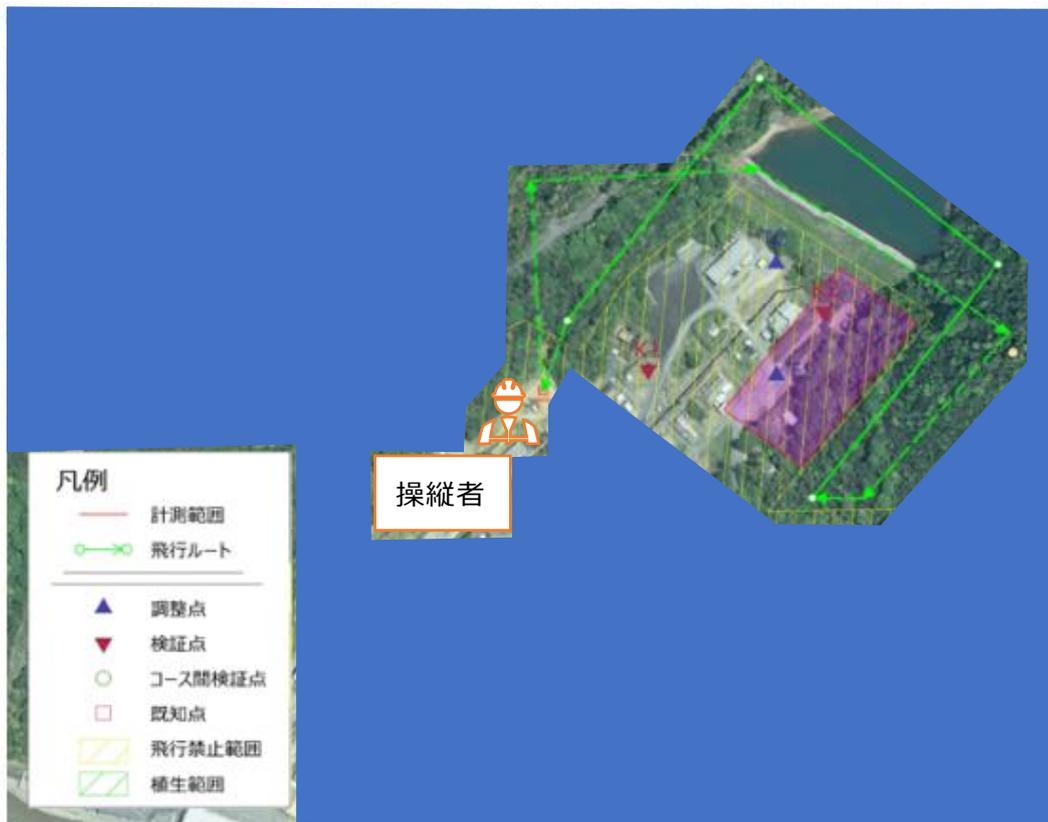


図 10 火薬工場の周りの飛行計画（安全・防犯の観点より詳細は秘匿）

② 飛行ルートで安全に航行できることを確認

まず、実際に検査のために飛行させるドローンよりも小型のドローン（Mavic2 PRO）を用いて、上記①の事前確認済みの飛行ルートをテスト飛行させ、問題がないことを確認した。



図 11 小型のドローン（Mavic2 PRO）

③ ミッション飛行による点群データの取得

上記②によって安全にドローン航行できることを確認したのち、実際に検査に用いる LiDAR 搭載ドローンを自動飛行させ、点群データの取得を行った。

④ 精度検証

ドローンによって取得した点群データを、専用ソフトウェア（CAD Japan が提供する「AutoCAD Civil3D」）を用いて 3D モデル化し、実証に先立って地上で測量し取得したデータとの誤差を確認した。なお、実証期間の関係から、後述の 2024 年 2 月 24 日の現地実証では、安全対策を施した安全な飛行を行って点群データを取得できるか検証を行うこととし、点群データの精度自体については、別途 COBALT が、今回と全く同様の場所・方法にてドローンを飛行させた際に取得していた点群データの提供を受けて検証を行った。

2.2 実施場所等

【場所】：火薬メーカーの某火薬工場（防犯・安全の観点から詳細は秘匿）

【日程・実証内容】

1 日目：2024 年 1 月 27 日（土）

ジオフェンスの設定、ドローンスパイダーによる係留による安全対策をした状態でのドローンに搭載した高精細カメラによる土堤の撮影

2 日目：2024 年 2 月 24 日（土）

ドローンに搭載した LiDAR スキャナによる土堤の点群データの取得

2.3 実施条件等

火薬工場内、および、火薬工場周辺においてドローンを飛行させるため、以下の調整を行った。

- 当該施設の管理者に、飛行方法・範囲を伝えた上で事前に下見を行い、ドローンが万が一にも危険区域内に落下することがないように、協議の上、対策内容を決定した。落下に伴うリスク対策として、高精細カメラでの撮影ではドローンスパイダーでの係留とドローン専用のパラシュート（PARASAFE）の具備が求められたが、ドローンにパラシュートを具備することで操縦時に機体のバランスが崩れるリスクがあり、当該施設の管

理者と調整の結果ドローンスパイダーでの係留のみとした。また LiDAR 測量では、飛行の前後に 50km/h 程度まで速度を上げて姿勢制御の飛行を行う必要があり、係留措置及びパラシュートの具備自体が危険であるため、施設の完全敷地外且つ 100m 以上の高高度で飛行することで係留措置は行なわないこととした。

- ドローン飛行に際しては、当該施設管理者立ち会いのもとで実施することとし、実証時の記録に用いる電子媒体は施設管理者から貸与を受け、施設管理者の防犯・安全の観点からの情報漏洩リスクがないような対策を講じた。
- その他、国土交通省航空局の許可・承認を得ていること、「国土交通省航空局標準マニュアル②(令和 4 年 12 月 5 日版)」に従うこと等、ドローンを飛行させる上で、基本的な規則・ルールを順守した。
- 国交省への飛行手続として、ドローン情報基盤システム (DIPS2.0) に実際に飛行させる機体及びリモート ID と操縦者の登録、また飛行計画の通報を実施した。
- 高精細カメラの映像を地上モニターへ伝送するために 5.7GHz 帯の電波を使用するため、日本無人機運行管理コンソーシアム (JUTM) に対し、当該電波を使用する旨の運用調整を実施した。

3 技術実証の結果

3.1 結果の評価ポイント・方法

火薬工場での現地実証により取得したデータ（高精細カメラによる土堤表層の画像データ、LiDAR による測量結果（点群データ））、および、実証後のドローンオペレーション担当者、また火薬メーカー担当者へのヒアリングをもとに、以下に示す評価項目・内容に基づいて、検査実施者の実務に適応するかの評価を行った。

なお、精度の評価にあたっては、火薬類取締法施行規則第 31 条における土堤の要件を確認できるかを基準として用いることとした。

表 2 評価項目・観点

評価項目	評価観点
精度	<ul style="list-style-type: none">・ 実証において取得したデータを用いることによって、火薬類取締法施行規則第 31 条における土堤の要件を満たしていることを確認できるか・ LiDAR による測量データは、上記要件に係る事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較し 1 割以内の誤差で取得できているか・ 高精細カメラにより撮影した画像データについて、どの程度の大きさのクラックを検出できるのか、また、野外の明暗差がある中でも一定の解像度で画像が取得できるか
安定性（汎用性）	<ul style="list-style-type: none">・ 一定品質のデータ取得のためのドローン操作や LiDAR 測量は、特殊な技能によらず安定的に実施可能か
安全性	<ul style="list-style-type: none">・ 準備・計画、実施、検査・評価等の一連の検査工程について、安全性に関して問題点がなかったか、また、特に有用だったポイント、今後に向けて、改善すべきポイント等を整理しているか
工数（省力化）	<ul style="list-style-type: none">・ 現状の検査工程で実施した場合と、実証で用いた検査工程で実施した場合の検査に要する工数（必要人員・時間・必要機材の数量）を定量的に比較した際に省力化が図られているか
コスト	<ul style="list-style-type: none">・ 現状の検査時の人員・時間にもなうコスト、今回の手法を用いることによる削減されるコスト、現状における必要な物品・システム等の導入に想定されるコストを整理し、コストが削減されているか

各評価項目における具体的な評価方法は、以下の通りである。

【精度】

実証において取得したデータが、火薬類取締法施行規則第 31 条における土堤の要件を満たすことができるかを確認する。また、LiDAR による測量データは、上記規定の内容において事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較し 1 割以内の誤差で取得できているかを確認する。

火薬類取締法施行規則第 31 条で求める土堤の要件とその確認方法となる実証内容の対応関係は、表 3 の通りとなる。

表 3 火薬類取締法施行規則第 31 条で求める要件と対応する実証内容

規則で求める要件	対応する実証内容
<p>一 土堤は、その内面の堤脚から火薬庫の外壁まで 1 メートル以上の距離においてできるだけ接近して構築すること。</p>	<p>LiDAR 測量結果より生成した 3D モデルから、内面の堤脚から火薬庫の外壁までの距離を計測し、事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較して、1 割以内の誤差で取得できているかを確認。</p>
<p>二 土堤に切通の出入口を設けた場合には、平面図において火薬庫の本屋から外方に引いたすべての直線が必ず土堤の頂上の線と交さするような構造とすること。</p>	<p>LiDAR 測量結果より生成した 3D モデルにおいて左記の規則で求める要件を満たすことを確認。</p>
<p>三 土堤にトンネルを掘って出入口とする場合には、平面図において火薬庫の外壁からトンネルの方に引いたすべての直線が必ずトンネルの壁の線と交さするような構造とすること。</p>	<p>※本実証において対象とした土堤の出入口は切通であり対象外</p>
<p>四 土堤は、45 度（最大貯蔵量爆薬 600 キログラム以下の火薬庫であつて、土堤の内面を鉄筋コンクリートで補強する場合には、当該部分については、75 度）より急でないこう配とし、高さは煙火火薬庫にあつては軒までの高さ（1.5 メートル未満の場合は、1.5 メートル）、その他の火薬庫にあつては屋頂の高さ（一 1.5 メートル未満の場合は、1.5 メートル）以上とし、頂部の厚さは 1 メートル以上とすること。</p>	<p>LiDAR 測量結果より生成した 3D モデルから、土堤の勾配及び頂部の厚さを計測し、事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較して、1 割以内の誤差で取得できているかを確認。</p>
<p>五 土堤の堤脚をやむを得ず土留とするときは、土堤の高さの 3 分の 1 以下とし、最大貯蔵量爆薬 1 トン以上の場合には、内面の土留は、爆発の際軽量の飛散物となるものを使用すること。ただし、煙火火薬庫に土堤を設ける場合における材料については、この限りでない。</p>	<p>LiDAR 測量結果より生成した 3D モデルから、土留が土堤の高さの 1/3 以下であるかを確認。さらに、事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較し 1 割以内の誤差で取得できているかを確認。 ※本実証において対象とした土堤は最大貯蔵量爆薬 1 トン以下にあたり、材質の確認については対象外</p>
<p>六 火薬庫が 2 以上隣接し、中間の土堤を兼用するときは、その土堤に通路を設けないこと。</p>	<p>※本実証において対象とした土堤は中間の土堤を兼用せず対象外</p>
<p>七 土堤の堤面は、できるだけ芝草類又はセメントモルタルで被覆をすること。</p>	<p>高精細カメラにより撮影した画像データから、土堤全体が被覆されていることを確認</p>

また、高精細カメラにより撮影した画像データについて、どの程度の大きさのクラックを検出できるのか確認する。この確認にあたっては、野外の明暗差（日向・日陰）があっても、一定の解像度で画像が取得できるかの確認を行うため、土堤の日向・日陰（図 14）に、それぞれクラックスケール（図 15）を貼りつけ、どのサイズまでが読み取れるかで評価を行う。



図 12 対象となる土堤の日向・日陰の様子

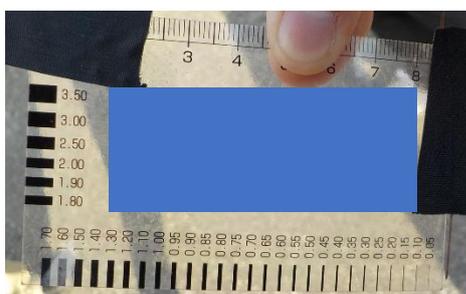


図 13 クラックスケール

【安定性】

今回の実証（LiDAR による測量、高精細カメラによる土堤外観撮影）において、ドローンオペレーション担当者（イームズロボティクス及び COBALT）に対してヒアリングを行い、必要となるスキルの洗い出しを行う。洗い出したスキルに対して「習得に必要な工程」「習得に必要な期間」「代替可能なシステムの有無」を整理し、今回の実証で用いたモデルの稼働安定性について確認する。

【安全性】

実証における一連の工程について整理し、火薬メーカーの担当者とともに振り返りを実施する。その中で今回の実証で特に有用であるポイントや、改善が見込まれる点についてヒアリングを実施する。

【工数（省力化）】

火薬メーカーに現状の検査工程をヒアリングし、必要人員・時間・必要機材の数量を整理する。また実証における具体的工程と時間について計測し、現状の検査工程と比較を行う。

【コスト】

火薬メーカーに現状の検査工程におけるコストをヒアリングし、現状の検査工程に必要なコストを整理する。また実証において必要な機材やシステムの導入について必要なコスト（費用）を概算し、現状の検査工程と比較を行う。

3.2 結果及び評価・分析

実証における成果物及びヒアリング結果から、各評価観点における評価・分析結果を以下に記す。

3.2.1 高精細カメラを活用した写真データによる土堤表層の状態の確認

(1) 実証の結果

実証の方法（2.1.1）に従って、ドローンオペレーション担当者として操縦者と補助者の1名ずつの体制で、土堤表層の状態の撮影を行った。実証場所の周囲には障害物（電線・電柱・樹木等）が存在したが、ジオフェンスの設定、ドローンスパイダーによる係留による安全対策を講じた上で、土堤周辺から撮影を行い、これらの障害物に接触することなく、土堤の内面・外面をくまなく撮影することができた。

また当日の天候は晴れ時々曇りで降雨は無し、風速は平均 2m/s であった。



図 14 実証に用いたドローン&カメラ



図 15 ドロンスパイダーによる係留
(点線囲み部分にワイヤーがあり、ドローンの足と繋がっている)



図 16 土堤周辺の環境（電線・電柱・樹木など）

実証場所の電柱及び配電線で囲まれた環境や、係留措置によって飛行範囲が限られる等の条件下で、土堤表層の被覆や、最大限、土堤全体を撮影可能となるレンズの設定を行った。

表 4 カメラ及びレンズの設定

シャッター速度	1/800 固定
ISO	手動
絞り値	f = 7.1
測光モード	中央重点測光
露出補正	0STEP
ホワイトバランス	自動

(2) 評価・分析

実証結果に基づき、評価項目ごとに以下のとおり評価・分析を行った。

【精度】

評価方法：実証において取得したデータが、火薬類取締法施行規則第 31 条における土堤の要件を満たしていることを確認できるか

以下、太字箇所が、火薬類取締法施行規則第 31 条の各項目である。

[七 土堤の堤面は、できるだけ芝草類又はセメントモルタルで被覆をすること。]

評価結果：ドローン搭載の高精細カメラにより撮影した画像から、土堤全体が被覆されていることを確認できた。(図 21)。



図 17 ドローンにて撮影した画像による確認

評価方法：高精細カメラにより撮影した画像データについて、どの程度の大きさのクラックを検出できるのか、また、野外の明暗差がある中でも一定の解像度で画像が取得できるか

評価結果：ドローンを飛行させながらオペレーション担当者が高精細カメラで撮影した場合、クラックスケールにピントが合わず、高精細カメラの性能が十分に発揮されず、スケールを視認できる解像度に至らなかった。



図 18 ドローンにて撮影した画像（日向）による確認



図 19 ドローンにて撮影した画像（日陰）による確認

上記実証結果は、周辺障害物との接触を防ぐため離隔を保ったことによる環境上の問題が大きいと思われる、撮影方法を工夫することで改善する余地があると推察された。そこで、カメラ性能に照らし、最大どの程度の精度の画像データを得ることが可能かを確認するため、カメラをドロ

ーンから取り外し、地上から日向・日陰のクラックスケールを撮影した。結果は、以下のとおりである。なお、10m の離隔を保った場合にズームレンズを使用することで、クラック判別の範囲が広がるが、撮影できる画角の広さが狭まることに注意が必要であると考える。

表 5 カメラ及びレンズの設定

ポイント	離隔	結果
日向	5m	0.20mm の大きさのクラックまで判別可能
	10m	1.80mm の大きさのクラックまで判別可能
日陰	5m	0.35mm の大きさのクラックまで判別可能
	10m	- (フィールドの都合上離隔を取れず断念)

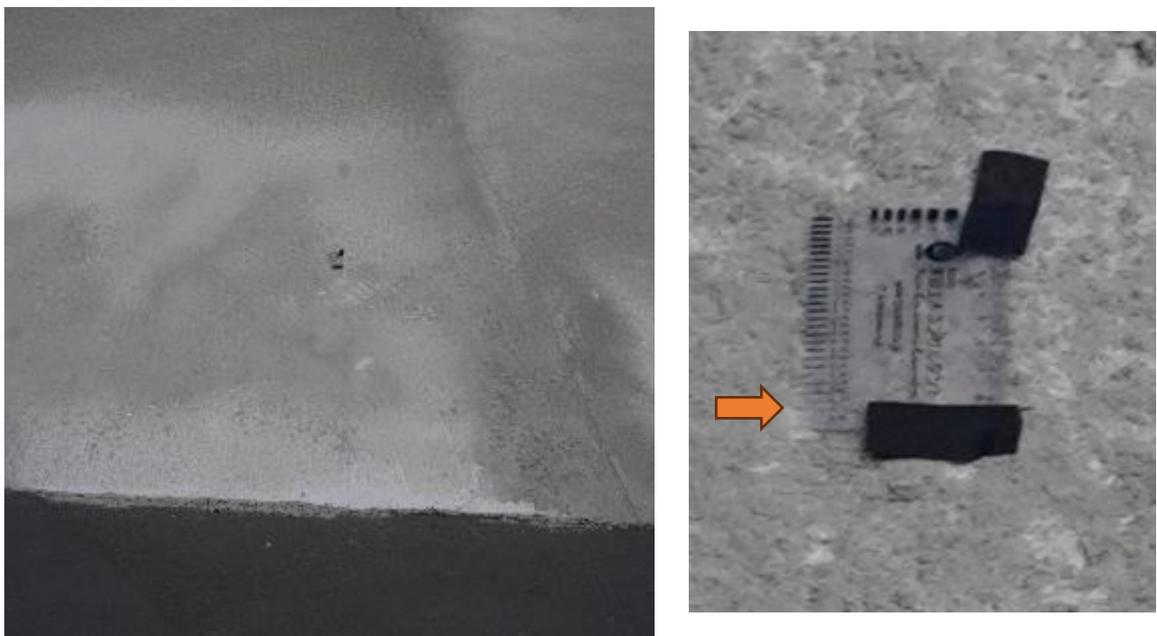


図 20 地上にて撮影した画像（日向 5m）による確認結果

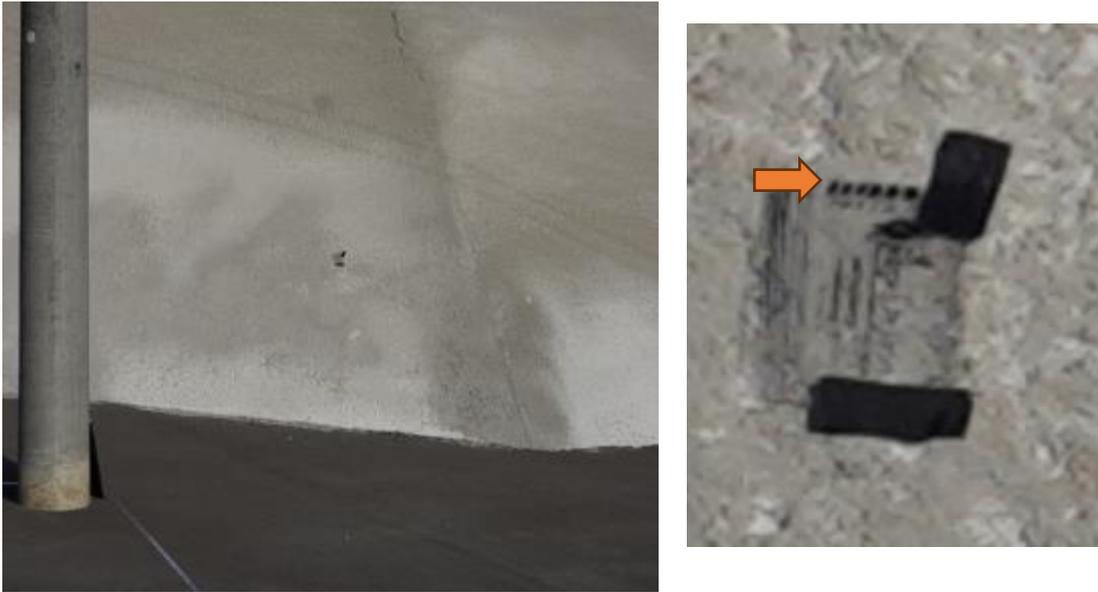


図 21 地上にて撮影した画像（日向 10m）による確認結果

【安定性】

評価方法：一定品質のデータ取得のためのドローン操作や LiDAR 測量は、特殊な技能によらず安定的に実施可能か

評価結果：ドローンオペレーション担当者へのヒアリングの結果、今回の実証の遂行に必要なスキルとして以下が挙げられた。

- ・ 本実証における一定品質のデータ取得のためには、ドローン飛行の一般的な知識、ドローン操縦スキル（ドローンパイダーによる係留、障害物をよけながら安全に飛行する技術）、機体の仕様に対する理解、飛行させる環境へのリスクアセスメント、補助者との連携等が求められる。
- ・ また、火薬類関連施設的环境は、様々であることから、検査に必要なドローン撮影を安全に実施する観点から、実際の導入にあたっては、事前に本実証による手法を適用可能な検査項目について、施設管理者に説明・協議を行うことが求められる。
- ・ 習得に必要な工程として、操作についての最も初歩的な講習については 1 週間程度のカリキュラムが民間のドローンスクールより展開されており、飛行における一般的な知識と最低限の操作については習得可能。応用的なドローン操縦スキルや飛行におけるリスクアセスメント、飛行時の補助者との連携については民間のスクールでも体系的なカリキュラムが設けられておらず、現場経験を重ねて習熟する必要がある。参考として今回のドローンオペレーション担当者は通算飛行時間 200 時間以上の経験を有する。
- ・ 代替可能なシステムの有無については、障害物を回避する観点で Visual SLAM（カメラから得られた映像データから、自分の位置や姿勢と周辺の物体の位置情報を 3 次元で把握する技術）の開発が進んでいるが、今回の実証場所にあるような木の枝や配電線など細い構造物を漏れなく認知することは難しい。

- ・ 今回実証に用いたモデルの稼働安定性について、障害物の回避などドローン飛行の自動化が進んでいるが、ドローンの飛行においてオペレーション担当者がスキルの習熟を重ねる必要があり、安定した導入と稼働には時間を要するものと考えられる。

以上のヒアリング結果を踏まえると、特殊な技能までは必須ではないと考えられるが、少なくともドローン飛行に関する講習等を通じて一般的な知識と最低限の操作方法を習得しておくとともに、一定程度の現場経験を重ねておく必要があると考えられる。また、安定的にドローン飛行による撮影を行うにあたっては、機体特性や飛行環境等を事前に理解しておくことも肝要である。また飛行オペレーションをサポートするような技術も日進月歩で開発されており、運用の安定性における前提が変わるような技術革新がなされることも、可能性として考えられる。

【安全性】

評価方法：準備・計画、実施、検査・評価等の一連の検査工程について、安全性に関して問題点がなかったか、また、特に有用だったポイント、今後に向けて、改善すべきポイント等を整理しているか

評価結果：実証フィールドの使用に伴い火薬メーカーが求めたドローン飛行に対する安全管理対策に対応した状態で、安全にドローン飛行を行い、墜落・衝突や火薬類の発火等も生じずに、土堤全体の表層を確認できる画像を取得することができた。安全にドローン飛行を行うにあたって有用な点として、下見を実施することで、電柱や電線などの障害物の介在といった現場のリスクが明らかになり、そのリスクを踏まえたオペレーションの準備を行うことができた。例としてフェイルセーフの設定があり、基本的な設定として離陸場所へ帰還する設定があるが、経路上に電線がある場合帰還時に接触するリスクがあるため、その場にホバリングする設定に変更した。また、改善が見込まれる点としてドローンスパイダーで係留することで、障害物と係留するロープが接触するリスクがあり、ドローンの運航においてオペレータが配慮すべき要因が増えることにつながった。係留措置がドローンの安全な運航を阻害する要因となったことで、係留が必ずしも安全であるとは限らないことが明らかになった。

【工数（省力化）・コスト】

評価方法：（工数）現状の検査工程で実施した場合と、今回の検査工程で実施した場合の工数（必要人員・時間・必要機材の数量）を定量的に比較した際に省力化が図られているか
（コスト）現状の検査時の人員・時間にもなうコスト、今回の手法を用いることによる削減されるコスト、現状における必要な物品・システム等の導入に想定されるコストを整理し、コストが削減されているか

評価結果：今回の実証における検査工程に要した人員・時間・必要機材・コストは、以下の通りである。

表 6 工数・コストまとめ

工程	人員人数	時間	必要機材 (種類×数量)	コスト
現地下見※	施設管理者 ×3 ドローン運用 者×1	2 時間	デジタルカメラ×1	特になし
準備・設置	ドローン運用 者×2	1 時間	ドローン機体×1 プロポ×1 GCS×1 地上用モニター×1 ドローンスパイダー ×1	機材費用： 200,000 円 (レンタル) 対応費用： 300,000 円 輸送及び
飛行（検査実 施）	ドローン運用 者×2	1 時間	ドローン機体×1 プロポ×1 GCS×1 地上用モニター×1 ドローンスパイダー ×1	移動宿泊費： 300,000 円：
確認・評価	施設管理者 ×3 ドローン運用 者×2	0.5 時間 (30 分)	PC×1 投影用モニター×1 (現地備品)	特になし

※現状の検査工程では発生しない工程だが、安全に飛行するため必要な作業として包含し記載

また現状の完成検査における工程に要する人員・時間・必要機材・コストは、以下の通りである（表 7）。表内に記載はないが、半年に 1 回の自主点検時における目視確認にかかる時間は 10～15 分、その他の項目の確認については 2 時間程度であり、一般的には土堤の検査には時間負荷がかかっていない。別途土堤の高さや勾配・土堤の頂部の厚みなど本格的に検査しようとする場合は、法肩と法尻を測量することによって判断可能である。測量に 1 時間、図面に起こして各種寸法の確認に 2 時間を要する。足場を組み上げて検査を行う場合は組み上げに 2 日、撤去に 1 日を要する。足場を組み上げる検査準備を除き、工数の観点では概ね現状の検査と変わらない結果となった。現状の検査手法との比較の結果については、3.3.4 で考察する。

表 7 現状の検査工程における工数・コストまとめ

工程	人員人数	時間	必要機材 (種類×数量)	コスト
変更許可申請 書の提出	施設管理者 ×1	4 時間	なし	なし
変更許可証の 受領	(経済産業 省)	-	なし	なし

工事の実施	-	-	-	-
完成検査の予約（日時、担当者）	経済産業省 ×1 施設管理者 ×1	4 時間	なし	なし
完成検査申請書の提出	施設管理者 ×1	4 時間	なし	検査費用： 72,000 円
完成検査の事前確認	施設管理者 ×2	2.5 時間	メジャー、斜度計など計測器具	なし
完成検査	経済産業省 ×1 施設管理者 ×2	1 時間	メジャー、斜度計など計測器具	なし
完成検査証の発行	（経済産業省）	-	なし	なし

さらに、火薬メーカーへのヒアリングの結果、現行の検査工程は 1.2.2 にも記載しているが、以下の課題等が明らかになった。

<現行の作業>

火薬類を取り扱っている敷地内を点検・検査・調査実施者に実際に当該箇所までおもむき、人の目視による確認、メジャー等による計測、測量を行い、製図内容の確認との整合確認を行う。

<課題>

- ・ 完成検査は、火薬類取扱施設の完全な新築・新設時だけでなく、施設の一部変更（追加・除却）等であっても行う必要があり、煩雑な作業である。
- ・ 特に、土堤は数 m の高さがあり、上部は地上からの目視検査ができないことから、はしご等を使って登って確認を行う必要があるため、調査者が落下する危険がある。場合によっては、高所の目視検査のために、足場を組むなどの対策を行わなければならない、このような作業に手間と時間とコストがかかる。

3.2.1 LiDAR 搭載ドローンを用いた 3 次元データによる現況寸法の確認

(1) 実証の結果

本実施項目におけるドローンの飛行にあたっては、ドローンオペレーション担当者として操縦者と補助者の 1 名ずつの体制で実施した。実証にあたっては、火薬メーカーが求める安全対策を踏まえて、施設の完全敷地外且つ 135m の高高度で飛行するルート（図 12）にてドローン（Matrice600PRO）をミッション飛行させ、搭載した LiDAR スキャナより安全に点群データの取得ができた。1 回のフライトの所要時間としては 3～4 分程度（準備時間は 45～60 分程度）であり、GNSS 精度が不安定であったこともあり、再飛行も行った。当該再飛行も含めたフライト回数は 2 回であり、後述のとおり 3D モデル作成に必要な十分な点群データを取得できた。



図 22 実証に用いたドローン、LiDAR スキャナ

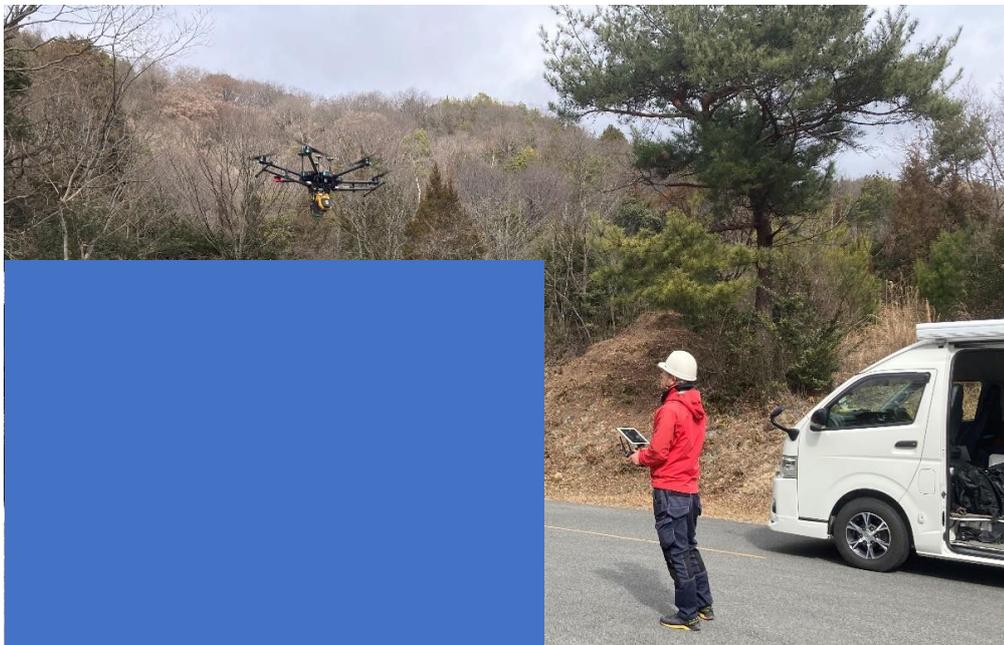


図 23 実証時のドローン飛行の様子（安全・防犯の観点より詳細は秘匿）

取得した点群データについては、AutoCAD Civil3D を用いて 3D モデル化を行い、事前に火薬メーカーが測量図（図 25）で測定された断面図と照らし合わせて比較を行うための土堤等の 3D モデルを作成した（図 24）。作成した 3D モデル上で横断ラインに沿った断面図を作成し（図 27）、比較用の測量データと重ね合わせることによって、3D モデルと測量データの誤差について確認を行った（図 26）。

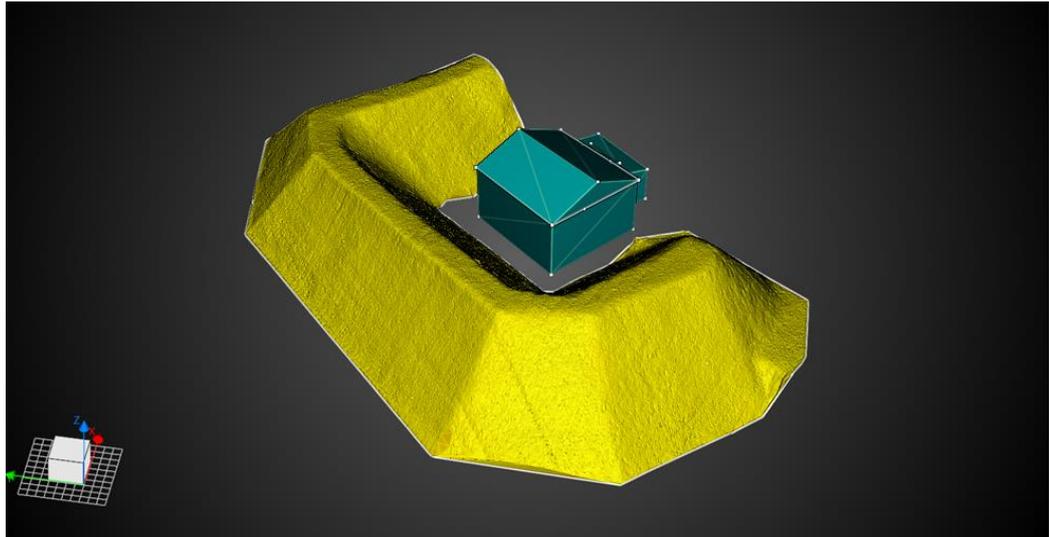


図 24 作成した 3D モデル

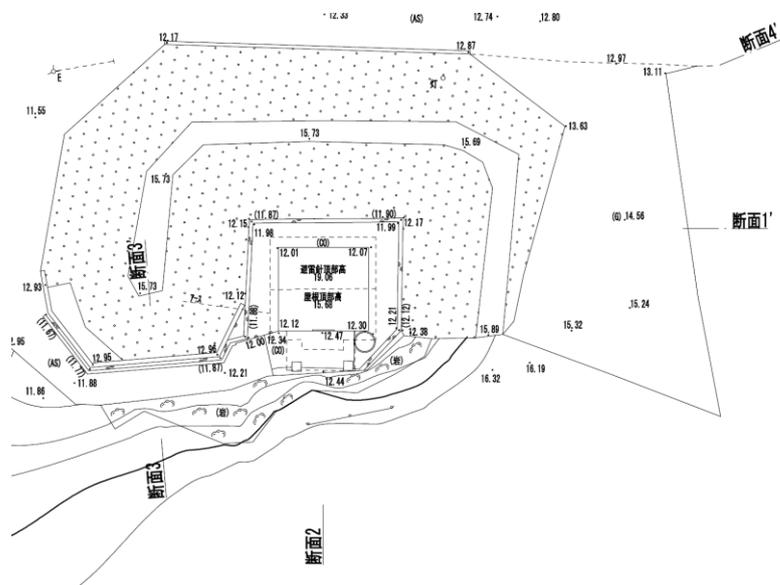


図 25 火薬メーカーにおける事前測量図（部分抜粋）

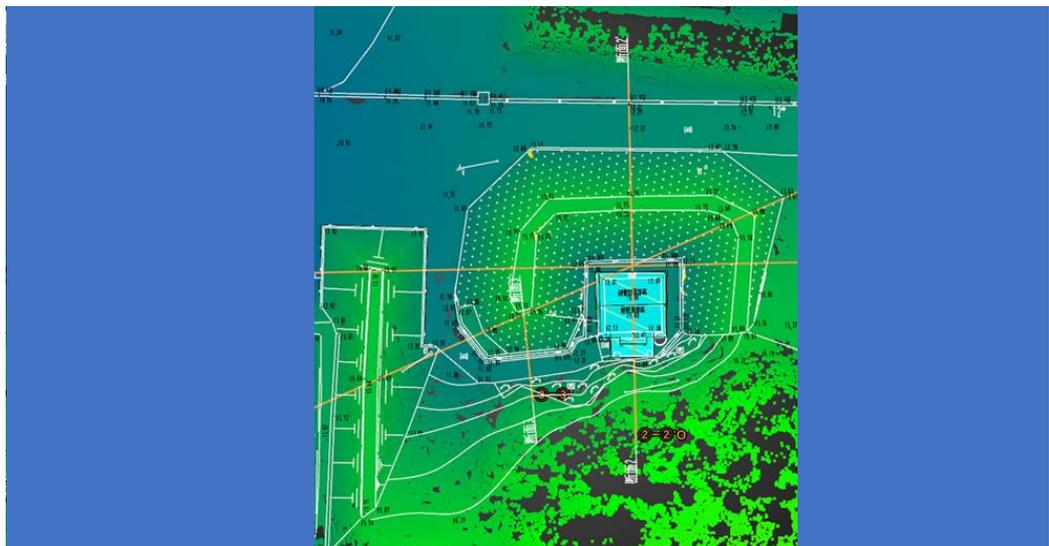


図 26 平面図との重ね合わせと断面図の設定

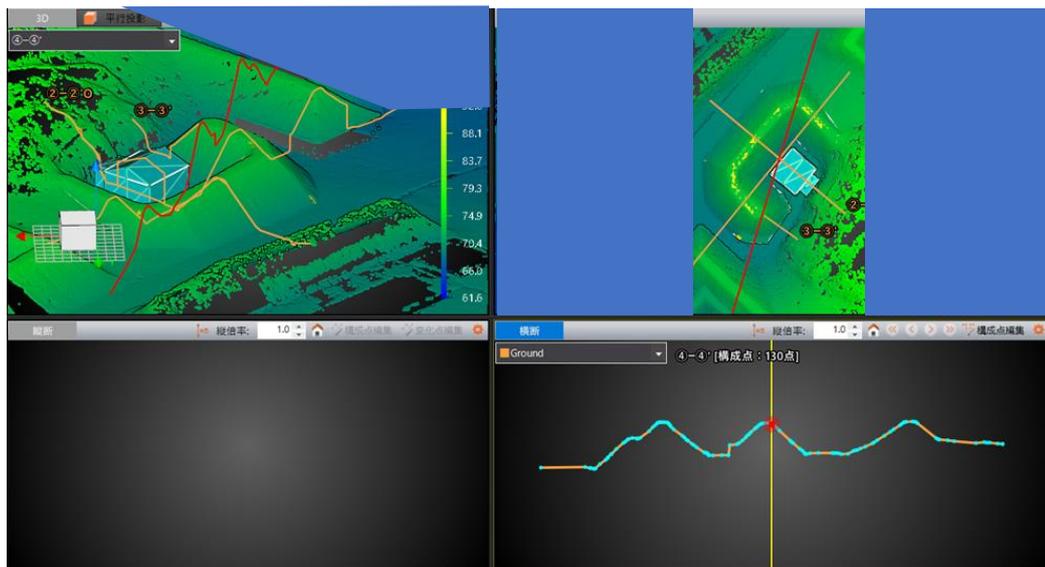


図 27 断面図の抽出

(2) 評価・分析

実証結果に基づき、評価項目ごとに以下のとおり評価・分析を行った。

なお、以下の評価・分析のうち「精度」に関しては、前述のとおり、COBALT から別途提供を受けた点群データをもとに行った。

【精度】

評価方法：実証において取得したデータが、火薬類取締法施行規則第 31 条における土堤の要件を満たしていることを確認できるか

評価結果：COBALT から提供を受けた LiDAR による測量結果（点群データ）より、火薬類取締法施行規則第 31 条に基づく下記内容を確認した。以下、太字箇所が、火薬類取締法施行規則第 31 条の各項目である。

[一 土堤は、その内面の堤脚から火薬庫の外壁まで 1メートル以上の距離においてできるだけ接近して構築すること。]

評価結果：事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較して、内面の堤脚と各外壁の離隔について、1m 以上の離隔があることを確認した。また事前の測量結果における土堤と火薬庫の距離（図 28）は 1370mm で、今回の測量結果は 1360mm（図 29）となり 1 割以内（約 0.74%）の誤差でデータを取得出来ていることを確認した。

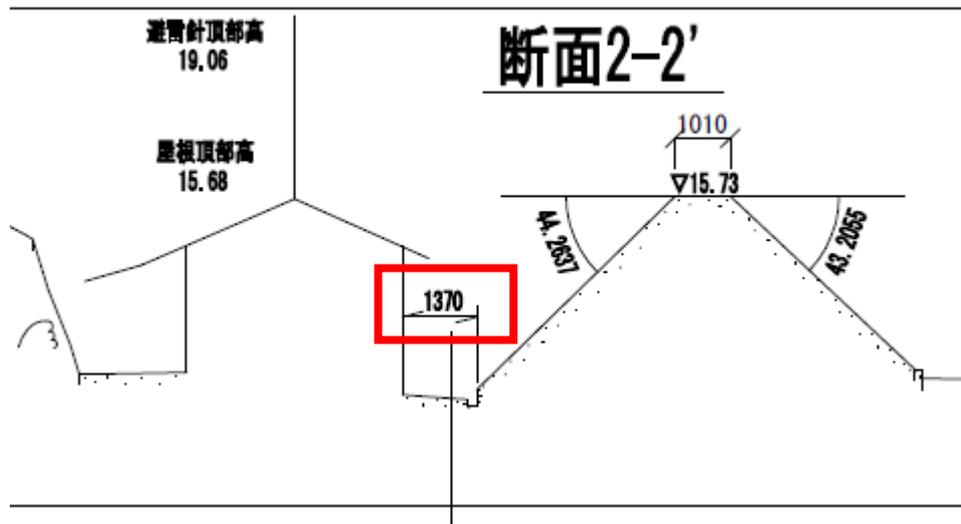


図 28 事前の測量結果における土堤と火薬庫との距離

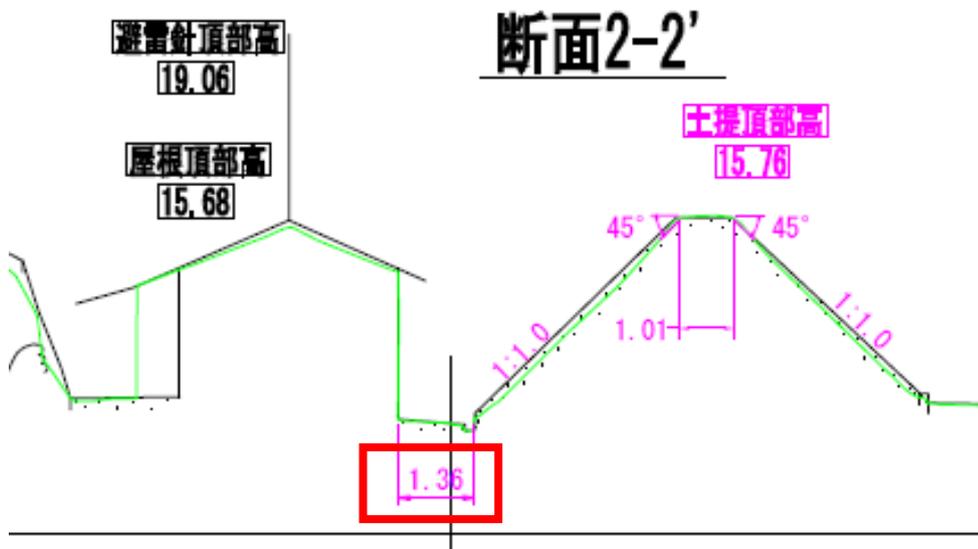


図 29 3Dモデル（緑線）の断面図における計測結果

また3Dモデルから事前測量で得られたデータ以外の部分（完成検査時の測量結果がない部分）についても確認を行い、内面の堤脚と各外壁の離隔について、1m以上の離隔があることを確認できた。

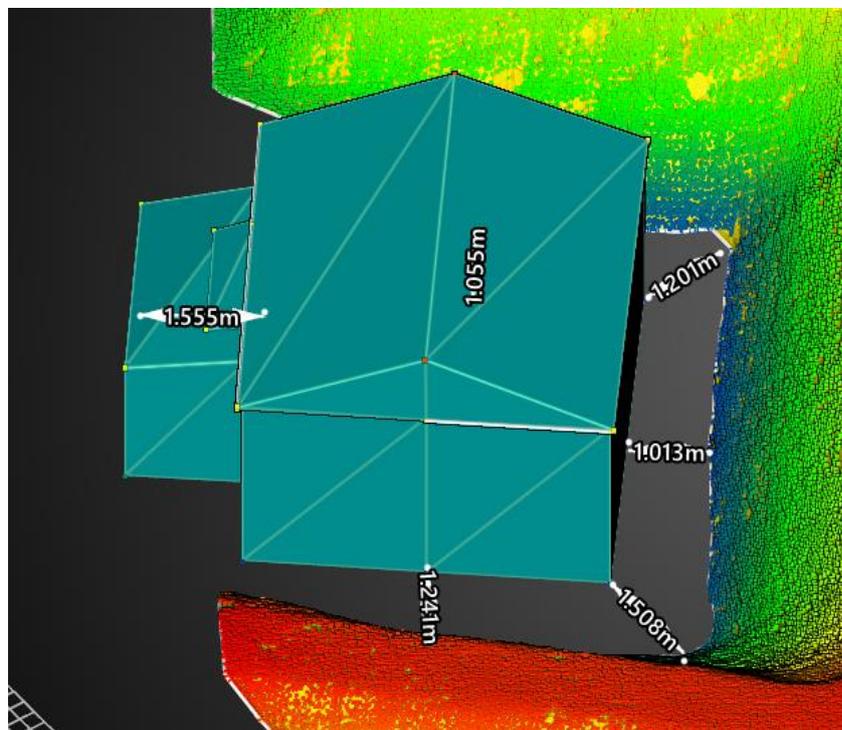
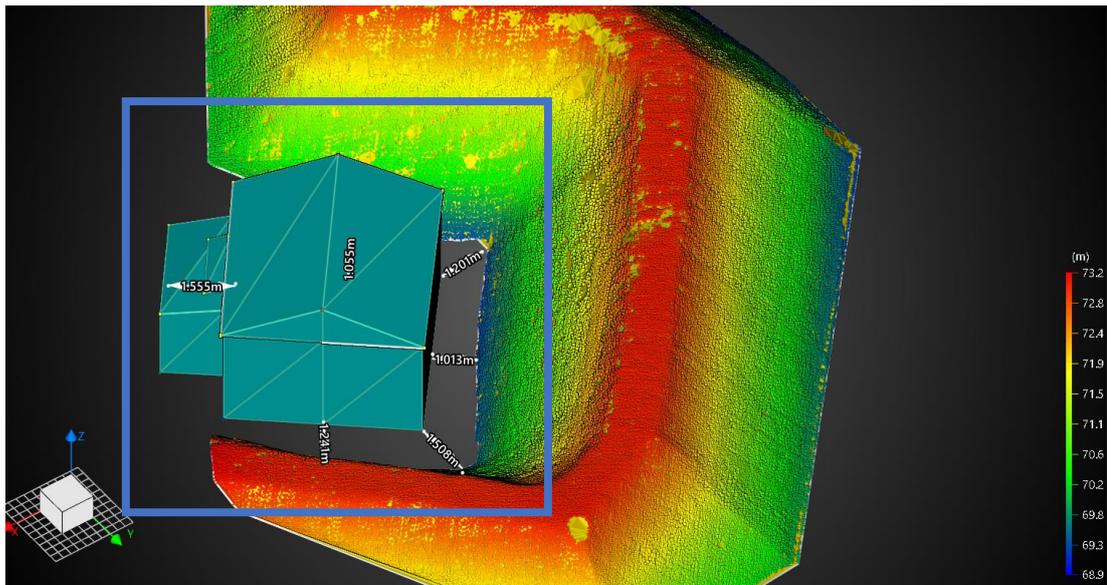


図 30 内面の堤脚から火薬庫外壁の離隔計測結果

[二 土堤に切通の出入口を設けた場合には、平面図において火薬庫の本屋から外方に引いたすべての直線が必ず土堤の頂上の線と交さるような構造とすること。]

評価結果：3D モデルにおいても、火薬庫から外方に向けたすべての直線が、土堤の頂上の線と交差することを確認できた（図 30）。また火薬メーカーより本項における確認観点として「火薬庫本屋において、切通に一番近い箇所から外方に線を引いたときに、土堤外に抜けない構造であることを確認している」との言及があり、併せて本観点についても土堤頂上と交差することを確認した（図内赤線）。

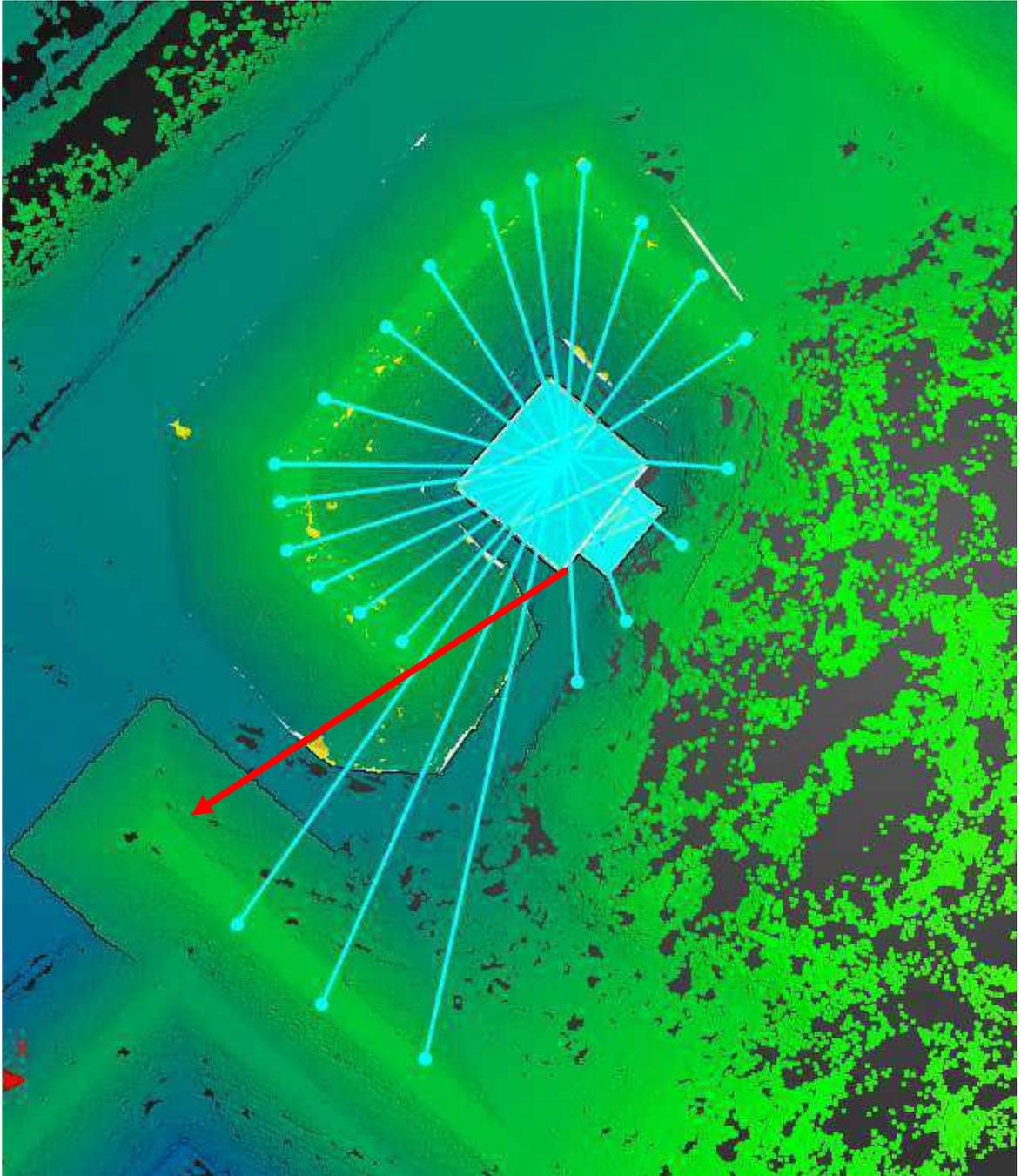


図 31 火薬庫本屋と土堤頂上との交差計測結果

[四 土堤は、45 度（最大貯蔵量爆薬 600 キログラム以下の火薬庫であつて、土堤の内面を鉄筋コンクリートで補強する場合には、当該部分については、75 度）より急でないこ
う配とし、高さは煙火火薬庫にあつては軒までの高さ（1.5 メートル未満の場合は、1.5 メ
ートル）、その他の火薬庫にあつては屋頂の高さ（1.5 メートル未満の場合は、1.5 メー
トル）以上とし、頂部の厚さは 1 メートル以上とすること。]

評価結果：3D モデルにおいても、土堤の勾配が 45 度ないしそれ以下であること、土堤の高
さが火薬庫の屋頂の高さ以上であること、また頂部の厚さが 1m 以上であることを確認できた
（図 30、31）。また事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較して、各
測定結果の誤差についても 1 割以内の誤差で取得することができた（表 7）。

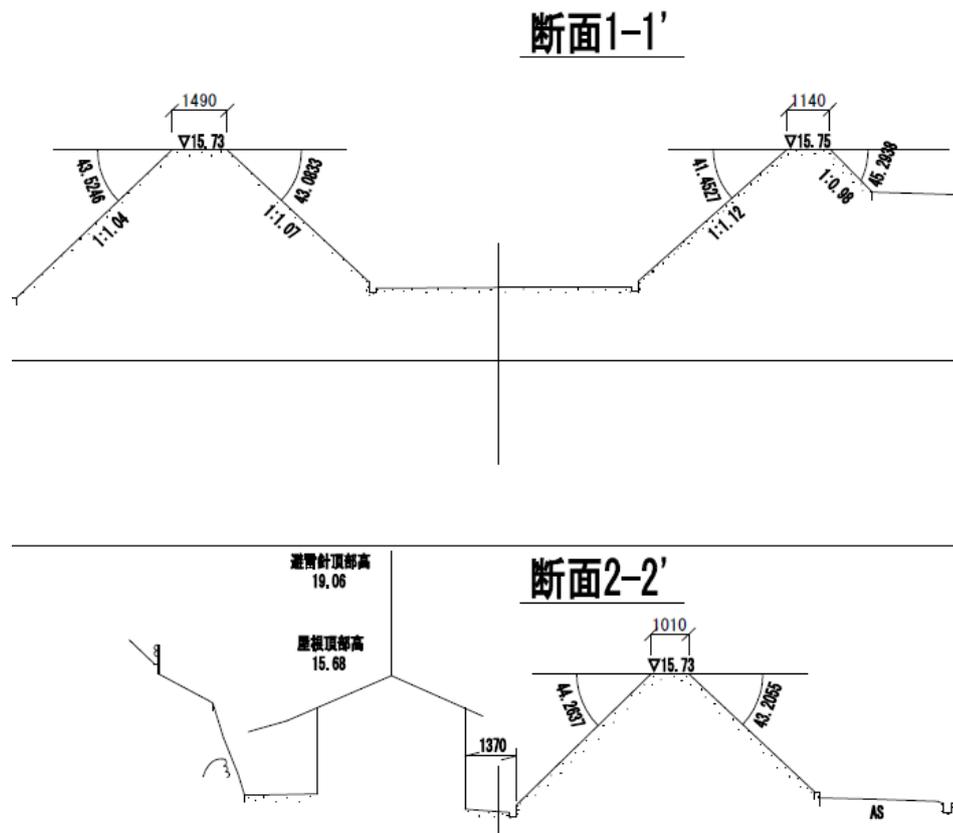


図 32 事前の測量結果における土堤の勾配と高さ及び頂部の厚さ

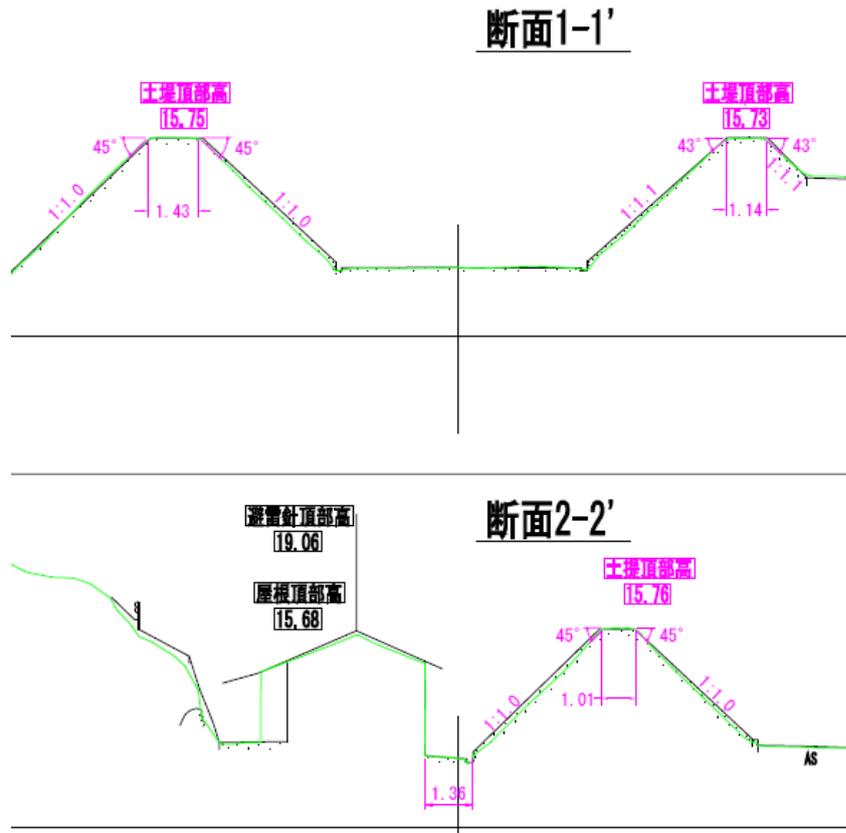


図 33 3D モデル（緑線）の断面図における計測結果

表 7 各計測結果の誤差

	土堤勾配左 (誤差率)	土堤勾配右 (誤差率)	頂部高 (誤差率)	頂部の厚さ (誤差率)
断面 1-1'左	1.4754° (3.28%)	1.9167° (4.26%)	20mm (0.13%)	60mm (4.20%)
断面 1-1'右	1.5473° (3.60%)	2.2938° (5.33%)	20mm (0.13%)	0mm (0.00%)
断面 2-2'	0.7363° (1.64%)	1.7945° (3.99%)	30mm (0.19%)	0mm (0.00%)

[五 土堤の堤脚をやむを得ず土留とするときは、土堤の高さの3分1以下とし、最大貯蔵量爆薬1トン以上の場合には、内面の土留は、爆発の際軽量の飛散物となるものを使用すること。ただし、煙火火薬庫に土堤を設ける場合における材料については、この限りでない。]

評価結果：3Dモデルにおいても、対象の土留が土堤の高さの3分の1以下であることを確認した。また事前の測量結果（実際の完成検査時の測量結果）と比較して、土留の高さの誤差は10mm、土堤部分の高さは40mmとなり1割以内の誤差（土留：約1.08%、土堤：約1.42%）で取得出来ていることを確認した。

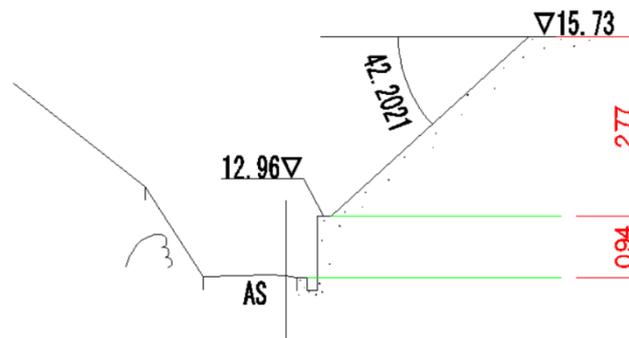


図 34 事前の測量結果における土堤の勾配と高さ及び頂部の厚さ

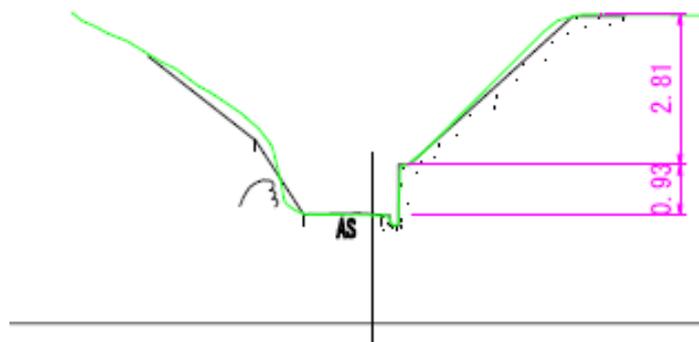


図 35 3Dモデル（緑線）の断面図における計測結果

【安定性】

評価方法：一定品質のデータ取得のためのドローン操作や LiDAR 測量は、特殊な技能によらず安定的に実施可能か

評価結果：ドローンオペレーション担当者へのヒアリングの結果、今回の実証内容の遂行に必要なスキルとして以下が挙げられた。

- ・ 本実証における一定品質のデータ取得のためのドローン操作を行った COBALT の技術者は、ドローン飛行の一般的な知識の他に、ドローンの操縦スキルを有するだけでなく、自動飛行設定用ソフトの理解、3次元測量に関する知識・経験を豊富に有していたため、3Dモデルまでを一連のプロセスで捉えることができた。そのため、データ取得直

後に精度を評価した上で、データの再取得を行うなど、無駄のない実証を行うことが可能となった。

- ・ 習得に必要な工程として、3.2.1 にて述べた内容と同様にドローンのフライトオペレーションについて、現場経験を重ねて習熟する必要がある。参考として今回のドローンオペレーション担当者は通算飛行時間 300 時間以上の経験を有する。それと併せて特に測量分野における知見が必要となる。こちらも体系的なカリキュラムは無く、現場経験を重ねて習熟していくものとなる。測量分野でのドローン活用の傾向として、ドローンオペレータが測量の知識をつけて対応分野を広げるケースより、もとより測量業務を行う事業者がツールとしてドローンを導入するケースが多い。参考として国家資格の測量士資格について、必要な学習期間は 500 時間程度と言われている。

代替可能なシステムについて LiDAR 測量より精度は劣るが、より簡易的に導入可能な測量手法として SfM 写真測量が挙げられる。一定の等間隔で撮影された写真群から特徴となる点を抽出し、隣接する画像との共通した特徴点についてカメラのレンズ情報を諸元に解析し、点群を作成する手法となる。等間隔で撮影するための飛行ミッションの自動作成や、写真からの解析から点群の生成について、現在様々な製品がリリースされている。専門的な知識が無くても使用できることから、高い精度を求めない場合の測量ニーズに応えるものと考えられる。

以上のヒアリング結果を踏まえると、3.2.1 と同様に特殊な技能までは必須ではないと考えられるが、本実施項目で行った LiDAR 測量による 3D モデル化を行うのであれば、少なくともドローン飛行に関する講習等を通じて一般的な知識と最低限の操作方法を習得しておくとともに、測量分野における一定程度の現場経験を重ねておく必要があると考えられる。また、安定的にドローン飛行による LiDAR 測量を行うにあたっては、機体特性や飛行環境等を事前に理解しておくことも肝要である。導入においてその精度よりも導入の効果を確認したいというニーズにおいては、SfM 測量関連のソリューションを試すことにより、LiDAR 測量より安価にその効果を確認できるかと考える。

【安全性】

評価方法：準備・計画、実施、検査・評価等の一連の検査工程について、安全性に関して問題点がなかったか、特に有用だったポイント、今後に向けて、改善すべきポイント等を整理
--

評価結果：事前に計画した飛行ルートに従って、安全に自動でのドローン飛行を行い、LiDAR データの取得ができた。

なお、1 回目の飛行直後に GNSS 精度が十分であったかの確認を行ったところ、飛行タイミングにより GNSS 精度が十分でなく、3D データにする際に誤差が生じる可能性があったため、その場で再飛行・再取得を行った。原因について、たまたま撮影時にドローンが捕捉している衛星数が少なく、衛星から得られる位置情報が少ないことから、十分な精度を得ることができなかった可能性が考えられる。こういった状況は時々発生し得るものであるため、上記のような事態

になっても再試行できる程度に、ゆとりをもった工程設計が必要である。

このほか、飛行ルートには敷地周辺の森林部分も含まれていた。立地の特性上、野鳥がドローンに反応して近寄ってくる可能性があり、避けられない不確定要素でもあるため、営巣地から野鳥が飛び立ったときに即座に手動飛行で回避できるだけの森林部分との距離の確保は必要でないかと示唆される。

【工数（省力化）・コスト】

<p>評価方法：（工数）現状の検査工程で実施した場合と、今回の検査工程で実施した場合の工数（必要人員・時間・必要機材の数量）を定量的に比較した際に省力化が図られているか</p> <p>（コスト）現状の検査時の人員・時間にとまなうコスト、今回の手法を用いることによる削減されるコスト、現状における必要な物品・システム等の導入に想定されるコストを整理し、コストが削減されているか</p>

評価結果：今回の検査工程において要した人員・時間・必要機材・コストは、以下の通りである。現状の検査手法との比較の結果については、3.3.4 で考察する。

表 8 工数・コストまとめ

工程	人員人数	時間	必要機材 種類×数量	コスト
現地下見※	施設管理者 ×3 ドローン運用 者×1	2 時間	デジタルカメラ×1	特になし
準備・設置	ドローン運用 者×2	1 時間	ドローン機体×1 プロポ×1 GCS×1 LiDAR スキャナ ×1 GNSS 受信機 ×1	機材費用： 500,000 円 (レンタル) 対応費用： 400,000 円 撮影データ後処理： 670,000 円
飛行（点群データ取得）	ドローン運用 者×2	1 時間	ドローン機体×1 プロポ×1 GCS×1 LiDAR スキャナ ×1 GNSS 受信機 ×1	輸送及び 移動宿泊費： 150,000 円：
確認・評価	CAD オペレー タ×1	40 時間	PC×1 3D データ作成 用ソフト×1	3D データ作成： 700,000 円 3D データの評価・ 分析： 300,000 円

※現状の検査工程では発生しない工程だが、安全に飛行するため必要な作業として記載

3.3 考察

3.3.1 精度

ドローンに搭載した高精細カメラで撮影した画像データと、LiDAR スキャナによる測量データを利用して作成した 3D モデルを用いることで、土堤に求められる要件（火薬類取締法施行規則第 31 条）を確認することが、おおむね可能であることを確認できた。特に事前測量（実際の完成検査時の測量結果）との比較という点で、今回対象としたすべての項目において 1 割以内の誤差で取得することができた。

一方で、ドローンに搭載した高精細カメラで撮影した画像から、クラックスケールを判定できるまでの解像度には至らなかった。これは実証フィールドの環境や、飛行範囲が限られる条件も、影響していると考えられるが、どのような条件でも可能とは言えない結果となった。今後の対策として、全体を抑えて撮影するものではなく、確認したい部分を詳細に撮影できるズームレンズの選定、安全確保の条件が許せば、より接近して撮る等のフライトプランの検討が考えられる。また、今回のフィールドにおいては、火薬類取締法施行規則第 31 条の 3 に関する点検はできず、上空から撮影するというドローンの特性からも、トンネルにおける要件の確認は難しいものと考えられる。

また、火薬メーカーへのヒアリング結果からは、土堤の調査のみに限定すれば、ドローンを使った調査の精度は十分であるとの評価を得ている。実際に、クラックの検出までは検査項目に入っておらず、実証で実施したスケールのもので検出できれば十分との声もあった。

これらを踏まえると、より高精度の検査実施に向けての改善点はあるものの、当初、企図していた目的における精度は、十分に得られたと考えられる。ただし、当初よりドローンで検出できる範囲が限定的（トンネルの場合や火薬庫内等は計測を想定していない）であったことから、本実証の技術によるドローンを用いた検査は、火薬類取締法施行規則第 31 条の一部項目の確認における代替案の 1 つとしての活用が望ましいと考えられる。

3.3.2 安定性（汎用性）

本実証におけるドローン飛行によるデータ取得、および、その分析を行う上では、以下のような技術・ノウハウを有する技術者が行う必要がある。

- ドローンの操作に関すること
 - 操縦スキル（ドローンパイダーによる係留、障害物をよけながら安全に飛行する技術、補助者との連携）
 - 知識・知見（機体の仕様に関する理解、飛行させる環境へのリスクアセスメント、実施可能な飛行方法のバリエーション、自動飛行設定用ソフトの理解）
- 3次元データの分析に関すること
 - 3D 測量に関する知識・経験
 - 3D モデルを作成するアプリケーション・分析の技術・知見

上記に挙げたように、様々な環境下で飛行させる前提となるため、そのスキルが習熟した技術者と考えれば限定的になってしまう。一方で、事業者や検査対象となる拠点を固定し想定すべきリス

クや運用が常に決まっている形で運用することで、一定安定した運用が望める可能性もある。

3.3.3 安全性

ドローンに搭載した LiDAR スキャナによる測量、高精細カメラで撮影の両方において、安全にデータ取得を行うことができた。火薬類を取り扱う場所、火薬類の種類等は様々であることから、気象条件等のドローン飛行に関する基本的な条件の他に、事前の下見、施設管理者との協議が重要である。そのため、今後、ドローンを用いた検査が認められる場合においても、ドローンに対する係留措置や飛行範囲をシステム上制限するジオフェンス機能を活用した安全措置を講じて慎重に行い、安全性について万全を期す必要がある。

3.3.4 工数・コスト

危険区域外からの測定で、保安距離を精度よく測量できること、土堤のクラックを検出できる点など有効性は認めるものの、実際の火薬類関連施設における点検では、土堤のみというケースは少ない。また土堤以外も含めた様々な検査を行う必要がある場合がほとんどであり、本実証部分のみをドローンで実施しても、大幅な工数削減にはつながらない。

また、今回利用したドローン、カメラ、LiDAR スキャナ等は何れも高額であり、かつ、ドローンを飛ばす技術者にも一定程度の経験者を配備する必要がある。また現状の検査費用としてかかるのは、火薬メーカーへのヒアリング結果によると、手数料 72,000 円／回のほか人件費等の事務費のみ、とのことだった。表 7 にある通り、検査には火薬メーカーとして延べ 20 時間程度を要するので、その一部について時間削減の可能性はあるが、ドローンを活用した点検約 2,700,000 円は、新たな費用ということになる。

今後、火薬類取締法施行規則第 44 条第 2 項関係で、完成検査のメール申請、ドローン測量によるデジタルデータが証憑として認められる等の流れや、より広範囲での検査の自動化とともに、工数・コストが下がってくれば、実運用が見えてくる可能性も考えられる。

3.3.5 総括

以上を踏まえると、火薬類取締法施行規則第 44 条及び第 44 条の 5 におけるアナログ規制の見直しに対する本実証で用いた技術の適用可能性としては、精度・安全性に関しては十分に代替可能であると言える。一方で、火薬メーカー等の火薬類を取り扱う管理者の点検業務は、一般的に土堤のみを対象とせず他項目の点検を兼ねることを考えると、効率化（時間短縮）の効果が高いケースは多くない。また、現状においては、カメラや LiDAR スキャナ、それを安全に飛行させるためのドローンや関連設備、技術者に係るコストも、当該管理者の時間・コストに見合う状況にはない。

しかしながら、点検に限らず、これらの技術には、本実証の場面以外に応用可能性があると考えられる。たとえば、地震・水害・土砂災害等の自然災害が発生した可能性がある場合には、LiDAR スキャナを搭載したドローンによって工場の全域を撮影して破損箇所を検出し、破損がある可能性がある箇所についても高精細カメラ搭載のドローンを遠隔地から飛行させて検査することで、管理者が危険にさらされることなく、安全に点検を行うことが可能である。

このように、本実証については、点検手法としては、あくまでも一例として紹介するにとどめるべきで

あり、それ以上のことは難しいと考えられる。しかし、「火薬類を取り扱う施設周辺で安全対策を施したドローンを飛行させた」という実績は 1 つの進歩であり、土堤以外の箇所、完成検査・保安検査以外の場面、さらに規制にかかる場面以外への応用等、活用の場面を広げて行くことが期待される。

3.4（参考）火薬メーカーからのヒアリング評価

<今回の実証に協力いただいた火薬メーカーへのヒアリング結果>

今回の実証を経た感想

- ◇ 作業性とデータの正確性については良い。
- ◇ 危険区域外からの測定で、ここまで保安距離を精度良く測量できる技術に驚いた。
- ◇ 土堤火薬庫などから保安距離を測定するには有用。（工場内のロケーション確認）
- ◇ 実際の火薬庫＋土堤の完成検査では火薬庫の内装部分などの検査項目はドローンで実施できないため、結果的に検査官の工数が大幅に減少することはないが、土堤のみの完成検査であればメリットがある。

ドローン点検によるメリットが生じる可能性がある場面

土堤及び火薬庫に対する検査は以下のタイミングで実施している。

- 完成検査（新設時）
- 定期自主検査（設置済の対象物：半年に 1 回）

各検査対象について、ドローンでの点検によるメリットの有無を以下に整理した。

	火薬庫＋土堤	火薬庫のみ	土堤のみ
ドローン点検のメリット	△	×	○
ドローンで検査できる箇所	土堤の規格 火薬庫から土堤の距離	—	土堤の規格 火薬庫から土堤の距離
ドローンで検査できない箇所	火薬庫の内部 （照明設備、保管設備、帳簿など）	火薬庫の内部 （照明設備、保管設備、帳簿など）	—

【凡例】○：メリットあり △：一部メリットあり ×：メリットなし

メリットが生じる前提・その他解決が求められること

- ◇ 本実証で行ったドローンによる点検を行った費用が、人手による点検費用を下回る。
- ◇ 完成検査の報告書をメール申請できるようになる。
- ◇ ドローン測量によるデジタルデータが証跡として用いることができる。

用語集

用語	定義・解説
LiDAR	レーザー光を照射して、その反射光の情報をもとに対象物までの距離や対象物の形などを計測する技術
ジオフェンス	ドローンが誤って飛行禁止エリアに侵入しないように、ドローンの飛行範囲を系統的に制限すること
ドローンスパイダー	ドローンが誤って飛行禁止エリアに侵入しないように、ケーブルで係留して物理的に範囲を制限するもの
GNSS 精度	Global Navigation Satellite System の略。ドローンは、GNSS 衛星から送信される衛星の位置や信号送信時刻などの情報を受けて、正確な位置を確認することができるが、参照可能な衛星が十分でない場合、GNSS 精度が落ちることがある