

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の概要】

対象業務 (法令)	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行う火薬類製造施設・火薬庫の土堤の完成検査・保安検査
実証の全体像	<p>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は、人の目視による評価や製図内容の確認によって行われている。これらの作業について、ドローンを活用した上空からの俯瞰的な確認や、3Dデータを参照した寸法の確認により代替可能かを検証する。</p> <p>【実証全体の流れ】</p> <p>(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 有効画素数約3300万画素のデジタル一眼レフカメラ（高精細カメラ）を搭載したドローンを土堤の外側（危険区域外）で飛行させ、取得した画像データから、土堤の表層全体（内側・外側）が問題なく被覆されているか、クラック（ひび割れ）の検出ができるかの確認を行った。</p> <p>(2) LiDAR搭載ドローンを活用した3Dデータによる土堤の現況寸法の確認 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）スキャナを搭載したドローンを火薬類製造施設・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飛行させ、取得した点群データ（XYZの3Dの座標情報を保持した点の集まり）を基に3Dモデルを作成、土堤の現況寸法を確認した。</p> <p>(3) 結果の評価 これらの結果を踏まえ、取得データの精度、データ取得運用方法の安定性・安全性・工数（省力化）・コスト（効率化）の評価を実施した。</p> <p>以上の実証方法を通じて、火薬類製造施設・火薬庫の土堤の完成検査・保安検査について、ドローン、または、デジタル技術を使って、人が行う作業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・コストを削減し、危険を減らすことができるか確認、課題の抽出などを行った。</p>

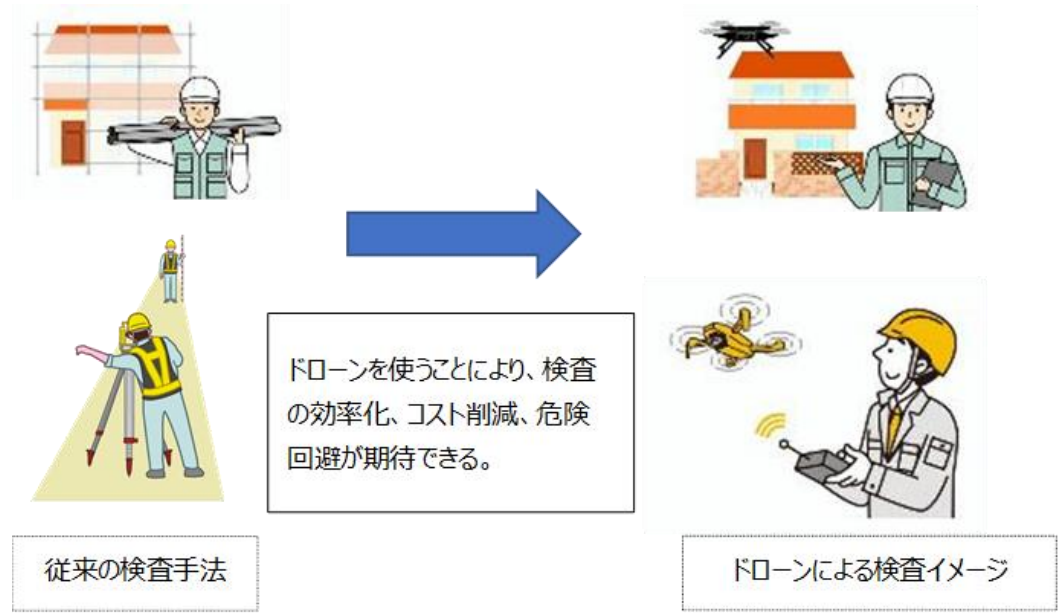


図1 測量、検査などを人が行う場合とドローンで行う場合のイメージ図

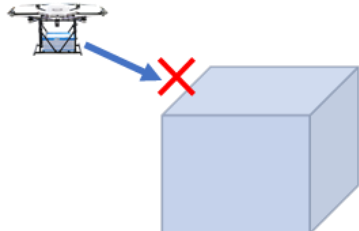
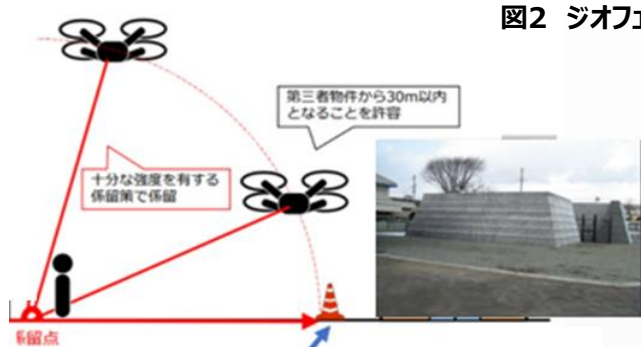

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の概要】

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	・実証実験の設計・実施・考察 ・実証実験の効果検証 ・全体のとりまとめ
	パーソルプロセス&テクノロジー株式会社 (イームズロボティクスより再委託)	・実証実験（①デジタル一眼レフカメラを搭載したドローンを用いた計測による土堤表層の状態の確認）におけるサポート、及び、実証レポート等の作成支援
	株式会社COBALT (イームズロボティクスより再委託)	・実証実験（②LiDARセンサで取得した点群データを活用した3Dデータの作成を活用した土堤の現況寸法の確認）におけるサポート、及び、実証レポート等の作成支援
	火薬メーカー (イームズロボティクスより再委託)	・火薬メーカーとしての各検査項目や実務上の知見提供 ・実証への場所の提供
実施期間	2023年11月30日～2024年2月29日	

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の詳細】

技術実証の方法	技術実証項目	実証内容
	<p>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</p>	<ul style="list-style-type: none"> イームズロボティクス社製のドローン（E6106-FLMP2）に、有効画素約3300万画素のデジタル一眼レフカメラを搭載し、安全な離隔を保った上空から、点検対象となる土堤の外観（損傷、劣化等）等の全周囲の状態を撮影した。 手動飛行により土堤外周を高度15～20m程度で飛行、土堤の外側・内側（火薬類製造施設・火薬庫等に面した側面）の両方をもれなく撮影した。 実際の飛行を通じて、ジオフェンス外から、かつ、ドローンスパイダー（DS-003PRO）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った。その上で、亀裂・破損などを検出することを想定して、疑似的な破損（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。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>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入れないよう、システム面から制限を講じる。</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>図2 ジオフェンスのイメージ</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>図3 ドローンスパイダーの利用イメージ</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図4 クラックスケール（例）</p> </div> </div>

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の詳細】

技術実証の方法	技術実証項目	実証内容
	<p>②点群データを活用した3Dデータの作成を活用した土堤の現況寸法の確認</p>	<ul style="list-style-type: none"> LiDAR スキャナ（YellowScan Voyager）をドローン（DJI Matrice600 Pro）に搭載、敷地内の点群データを取得し、土堤の3Dデータを作成、ソフトウェアを用いて検査に必要な寸法を計測した。なお、火薬工場敷地内への落下防止策を講じつつ必要なデータを取得するため、上空135mで敷地外周を飛行しながらの点群データ取得を行った。 取得した点群データに基づき3Dモデルを作成し、実際の完成検査時の測量結果と誤差1割以内の精度で土堤の寸法を計測し、検査ができるの確認を行った。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>(DJI Matrice600PRO)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(YellowScan Voyager)</p> </div> </div> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">  <p>図6 飛行ルート（施設外周を飛行）</p> </div>

図5 本実証に用いた機器

図6 飛行ルート（施設外周を飛行）

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の詳細】

実証場所① 某火薬メーカー、火薬工場（防犯・安全の観点から秘匿）

【日程】

1日目：2024年1月27日（土）

ジオディフェンス、ドローンスパイダーによる係留をした状態での土堤の撮影

2日目：2024年2月24日（土）

ドローンに搭載したLiDARセンサーによる点群データ取得

（防犯・安全の観点から、詳細な場所に関する情報は秘匿）

実施条件

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、対策内容を決定する。
- 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。
- 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。

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】

結果の評価の観点

- 対象となっている法令は、「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）」及び参照先となる別表1～4の検査方法だが、評価に際しては、火薬メーカーへのヒアリングを踏まえ、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。

評価項目	内容
精度	<ul style="list-style-type: none">実証において得られた成果物が、火薬類取締法施行規則第31条における土堤の内容を確認できるかまた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と比較し、1割以内の誤差で取得できているか撮影した写真について、どの程度の大きさのクラックを検出できるのか。また、野外の明暗差の中でも一定の解像度で画像が取得できるか
安定性	<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計測は、特殊な技能によらず安定的に可能か
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、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は何か
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、今回の検査工程を比較し、必要人員・時間・必要機材の数量を定量的に比較
コスト （効率化）	<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

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】

結果の評価の ポイント・方法

■ 評価ポイントと評価方法（精度）

【精度】

実証において得られた成果物が、火薬類取締法施行規則第31条における土堤に対する規定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。

評価項目	評価方法
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。	<ul style="list-style-type: none"> LiDAR測量結果より生成した点群情報から、内面の堤脚から火薬庫の外壁までの距離を計測、事前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。
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。	<ul style="list-style-type: none"> 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。
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るような構造とすること。	※対象土堤の出入り口は切通であり対象外
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根の高さ（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。	<ul style="list-style-type: none"> LiDAR測量結果より生成した点群情報から、土堤の勾配及び頂部の厚さを計測、事前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。
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1/3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。	<ul style="list-style-type: none"> ドローン撮影の写真から、土留の形状が確認できるか。 LiDAR測量結果より生成した点群情報から、土留が土堤の高さの1/3以下であるかを確認。さらに、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。 ※対象土堤は貯蔵量が一定量以下であり材質は考慮しない
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。	※対象土堤は中間の土堤を兼用せず対象外
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。	<ul style="list-style-type: none"> ドローンより撮影した写真から、土堤が被覆されている形状を確認

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】



結果の評価の ポイント・方法

■ 評価ポイントと評価方法（精度以外）

観点	評価ポイント	評価方法
安定性	一定品質のデータ取得のためのドローン操作やLiDAR計測は、特殊な技能によらず安定的に可能か	<ul style="list-style-type: none"> 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実施、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	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	<ul style="list-style-type: none"> 実証における一連の工程について整理し、火薬メーカーご担当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）	現状の検査工程で実施した場合と、今回の検査工程を比較し、必要人員・時間・必要機材の数量を定量的に比較	<ul style="list-style-type: none"> 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 （効率化）	現状の検査時の人員・時間にともなうコスト、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	<ul style="list-style-type: none"> 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計測し、現状の検査工程と比較を行う。



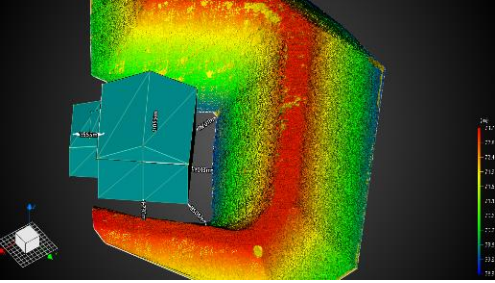
【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】

実証の実施結果	技術実証項目	実証結果
	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	<ul style="list-style-type: none">• 技術実証の方法に従って土堤表層の状態の撮影を行った。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、ドローンパイダーによる係留を行いながら、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。• 実証フィールドの電柱及び配電線で囲まれた環境や、係留措置を要することから飛行範囲が限られる条件下で、なるべく全体を抑えられるレンズの設定を行った。 <div data-bbox="1370 572 2308 896"></div> <p data-bbox="1531 918 2226 946">図7 高精細カメラを活用した土堤表面の状態の確認の様子</p> <div data-bbox="1360 979 2316 1279"></div> <p data-bbox="1500 1293 2130 1322">図8 日なたと日陰に設置されたクラックスケールの様子</p>

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】

実証の実施結果	技術実証項目	実証結果
	<p>②点群データを活用した3Dデータの作成を活用した土堤の現況寸法の確認</p>	<ul style="list-style-type: none">まず、実際に飛行するドローンよりも小型のドローン（Mavic2 PRO）を用いて、上記の事前確認済みのフライトルートを試飛行して、問題がないことを確認。安全に航行できることを確認したのち、実際のドローンを自動飛行させ、点群情報の取得を行った。なお、実証期間の関係から、現地実証（2/24実施）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、3Dモデル化や点群データの精度については、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。 <div data-bbox="1294 658 1722 968"></div> <p data-bbox="1309 982 1681 1015">図9 試飛行したMavic2 PRO</p> <div data-bbox="1964 658 2430 968"></div> <p data-bbox="1982 982 2364 1015">図10 ドローンが飛んでいる様子</p> <div data-bbox="1595 1025 2086 1305"></div> <p data-bbox="1684 1315 1997 1343">図11 取得した点群データ</p>

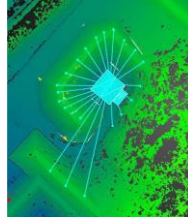
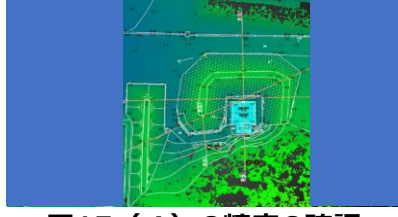
【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】

実証の 評価結果	技術実証項目	評価結果
	<p>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</p>	<p>【精度】ドローンにて撮影した画像から、土堤全体がセメントモルタルで被覆されていることを確認できた一方で、ドローン飛行しながら一眼レフ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、スケールを視認できる解像度に至らなかった。</p> <div data-bbox="1192 444 1564 748"></div> <p data-bbox="1200 762 1811 791">図12 ドローンにて撮影した画像（日向）による確認</p> <div data-bbox="1589 491 1829 719"></div> <div data-bbox="1939 434 2405 748"></div> <p data-bbox="1982 762 2364 791">図13 ドローンにて撮影した画像</p> <p>【安全性】危険工室（火薬類一次置場）に対する防爆仕様に対応した状態で、安全にドローン飛行を行い、360度むらなく画像を取得することができた。</p> <p>【安定性】本実証におけるドローン飛行に関しては、ドローン飛行における一般的な知識、ドローン操縦スキル（ドローンス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必要。実現可能なメニューを施設管理者に説明・協議を行うことが求められる。</p> <p>【工数・コスト】機材のレンタルから実際の対応費用、また現地への機材輸送から移動宿泊費用を踏まえ800,000円程度のコストが見込まれる。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り、危険作業の代替の観点では有用となる。</p>

【類型3 イームズロボティクス株式会社】技術実証 最終報告サマリー

【技術実証の結果】

実証の評価結果	技術実証項目	評価結果
	<p>②点群データを活用した3Dデータの作成を活用した土堤の現況寸法の確認</p>	<p>【精度】COBALTから提供を受けたLiDARによる測量結果より、火薬類取締法施行規則第31条に基づく内容を確認できた。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 土堤内面の堤脚から火薬庫の外壁まで1メートル以上かつ接近して構築 (2) 切通の出入口は、火薬庫本屋から外方に引いた全直線が土堤の頂上の線と交さ (4) 土堤は45度より急でないこう配、高さは煙火火薬庫は軒までの高さ、その他の火薬庫は屋頂の高さ以上とし、頂部の厚さは1メートル以上 (5) 土堤の堤脚を土留とする際、土堤の高さの1/3以下 <p>➡これらの全てについて、LiDARセンサにより取得した点群データから作成した3Dモデルにおいて、事前に測量した結果と比較して1割以内の誤差であることを計測・確認できた。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>図14 (2)の確認</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図15 (4)の精度の確認</p> </div> </div> <p>【安全性】事前に計画したフライトルートに従って、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。初回飛行時に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・再取得を行っている。また敷地周辺の森林部分を飛行したため、野鳥がドローンに近寄ってくる点には注意が必要である。</p> <p>【安定性】一般的なドローンの操縦知識・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・経験を有している必要がある。</p> <p>【工数・コスト】高精細カメラでの実証コストに加え、取得データの後処理（3Dデータ及び報告書作成）の費用を含めると、2,700,000円程度のコストが見込まれる。</p>

【技術実証の結果】

実証の結果分析

【精度】高精細カメラを活用した画像データによる土堤表層の状態の確認、点群データを活用した3Dデータの作成を活用した土堤の現況寸法の確認の両方において、**土堤に求められる要件を確認することが、おおむね可能であることを確認できた。**

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は、クラックスケールを判定できるまでの解像度に至らず、どのような条件でも可能とは言えない。**今後、確認したい部分を詳細に撮影できるレンズの選定、より接近した撮影等の工夫も考えられる。**

【安全性】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、点群データを活用した3Dデータの作成を活用した土堤の現況寸法の確認の両方において、安全な方法で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。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、こうしたプロセスを踏んで慎重に行い、安全性について万全を期す必要がある。**

【安定性】本実証におけるドローン飛行によるデータ取得・分析では、以下のような技術・ノウハウを有する技術者があたる必要がある。これらに全て対応しようとすると、**様々な環境下で飛行させる前提となるため、そのスキルを習熟した技術者と考えると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、安定した運用が望める可能性もある。**

- ドローンに関すること
 - 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（機体仕様の理解、飛行環境へのリスクアセスメント、実施可能な飛行方法、自動飛行設定用ソフトの理解）
- 3D測量に関すること
 - 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

【工数・コスト】実際の点検では、土堤のみというケースは少なく、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るため、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。また現状の検査費用は、火薬メーカーへのヒアリングによると手数料72,000円/回のほか人件費等の事務費のみ、とのことである。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。