

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 7 :

ドローン、カメラ、レーザー距離計等を活用した実地調査の実証

株式会社パスコ

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（法令）	3
1.3	全体像	4
1.4	実施体制・期間	6
1.4.1	実施体制	6
1.4.2	実施期間	6
2	技術実証内容の詳細	7
2.1	技術実証の方法	7
2.1.1	人工衛星画像を用いた実証	7
2.1.2	IoT インフラ遠隔監視システムによる実証	9
2.2	実施場所等	16
2.3	実施条件等	17
2.3.1	人工衛星画像を用いた実証	17
2.3.2	IoT インフラ遠隔監視システムによる実証	19
3	技術実証の結果	21
3.1	結果の評価ポイント・方法	21
3.1.1	人工衛星画像を用いた実証	21
3.1.2	IoT インフラ遠隔監視システムによる実証	21
3.2	結果及び評価・分析	22
3.2.1	人工衛星画像を用いた実証	22
3.2.2	IoT インフラ遠隔監視システムによる実証	36
3.2.3	まとめ	44
	用語集	45

1 技術実証の概要

1.1 目的

火薬類取締法では、火薬庫を設置し、移転し又はその構造若しくは設備を変更しようとする者に対して、火薬類の製造施設の設置又は火薬庫の設置若しくは移転の工事をした場合には、経済産業省令で定めるところにより、製造施設又は火薬庫につき経済産業大臣又は都道府県知事が行う完成検査を受けることを規定している。また、製造業者又は火薬庫の所有者若しくは占有者は、火薬類の爆発若しくは発火の危険がある製造施設であって経済産業省令で定めるもの（以下「特定施設」という。）又は火薬庫並びにこれらの施設における保安の確保のための組織及び方法について、経済産業省令で定めるところにより、定期に、経済産業大臣又は都道府県知事が行う保安検査を受けなければならない、とされている。

また、火薬類取締法施行規則において、特定施設は「危険工室、火薬類一時置場、日乾場、不発弾等解撤工室等、移動式製造設備用工室及び移動式製造設備」と定義されており、危険工室、火薬類一時置場、日乾場、仕掛け準備場、星打ち場、星掛け場、爆発試験場、燃焼試験場、発射試験場又は廃薬焼却場（以下「危険工室等」という。）は、製造所内の他の施設に対して経済産業大臣が告示で定める保安間隔をとること、及び製造所外の保安物件に対して、同規則で定める保安距離をとることが規定されている。

さらに、火薬類取締法施行規則の別表項目で規定される完成検査及び保安検査の方法においては、既定の保安距離及び保管間隔を満たしているか巻尺や測定器具を用いた測定、目視等により検査することが定められている。

本実証においては、以下の2つの実証を行うことによって、上記の目視検査・測定検査について、衛星画像解析技術、及びIoTインフラ遠隔監視技術を活用し、データの正確性・事故防止等の安全性を確保した上で、火薬類の製造施設及び火薬庫（以下「火薬類関連施設」という。）の設置・変更の状況や既存の施設の維持管理状況の検査を可能とすることで、法定検査業務の効率化・省人化を目指すことを目的とした。

①人工衛星画像を用いた実証

衛星画像の定期的な観測と、土地利用情報を持った地図データ等を用いた解析により、保安距離及び保安間隔が適切に確保されているかを判断し、**現行法令に定められた検査を代替可能であることの実証を行った。**

②IoTインフラ遠隔監視システムによる実証

危険工室等を囲む土堤について、IoT技術を活用した遠隔監視センサによって常時監視し、土堤における崩壊等の異常の発生を**リアルタイムに検知可能であることの実証を行った。**

1.2 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関連施設の土堤等の完成検査・保安検査（施設等間の距離、構造物の高さ、こう配、厚さ等を計測するもの）が対象となる。現状の検査では目視や巻尺での測定等に対応している。

完成検査での保安物件との距離、及び、保安検査での保安物件との距離に変更があった場合は報告が必要とされている。保安物件は表 1 の通りである。

表 1 保安物件（第一種～四種）

保安物件種別	対象物
第一種	国宝建造物、市街地の家屋、学校、保育所、病院、劇場、競技場、社寺及び教会
第二種	村落の家屋及び公園
第三種	家屋（第一種保安物件又は第二種保安物件に属するものを除く。）、鉄道、軌道、汽船の常航路又はけい留所、石油タンク、ガスタンク、発電所、蓄電所、変電所及び工場
第四種	国道、都道府県道、高圧電線、火薬類取扱所及び火気の取扱所

1.3 全体像

本実証では、人工衛星画像で保安物件の対象物がどのように見えるかを確認し、確認できた形状の地図化を行い、火薬類関連施設との距離を計測した。また、どの程度の地上分解能、価格、観測頻度の人工衛星画像が最適か条件を整理した（①）。また、火薬類関連施設周辺の土提の変状をモニタリングするセンサを設置し、どの程度の変状が検知できるかを実証した（②）。具体的には、下記の①、②を行った。

① 人工衛星画像を用いた実証

本実証では、現在、目視等のアナログ的な手法にて行われている保安検査に対して、人工衛星画像を活用することで、リモートでの距離計測や定期的な確認を実現できることを検証した。

まず、本実証に協力いただける火薬類関連施設が立地する地域を選定し、その地域の衛星画像を調達した。調達した衛星画像を用い、GIS ソフトウェアで対象地域の危険工室等及び保安物件の地図データを作成した。この際、1 枚の画像上の保安物件の判読・抽出を行うことに加えて、複数時期の画像を比較することにより、建築物の新築・滅失等を抽出した。そして、GIS ソフトウェアを用いて衛星画像による危険工室等及び既存保安物件の視認性、保安距離・保安間隔の計測の検証を行った。また、どのような地上分解能の人工衛星画像が活用可能か評価した。これらの結果を踏まえて、既存業務の人工衛星画像による代替可能性を考察した（図 1）。

本実証では、実証の条件に合致する地上分解能 1.5m の SPOT-6/7 衛星画像と地上分解能 0.5m の Pleiades 衛星を活用した。SPOT 衛星は Airbus DS 社が 2012 年、2014 年に打ち上げた衛星であり、広域観測を行う中分解能衛星である。日本国内を定期的に撮影することができ、2015 年以降においては、SPOT 衛星を用いた高付加価値製品として、全国整備されたオルソ化画像が提供されており、1 回/年の定期更新が行われている。地上分解能 0.5m の Pleiades 衛星も Airbus DS 社が 2011 年、2012 年に打ち上げた衛星であり、SPOT 衛星よりも高分解能のセンサを持つ人工衛星である。

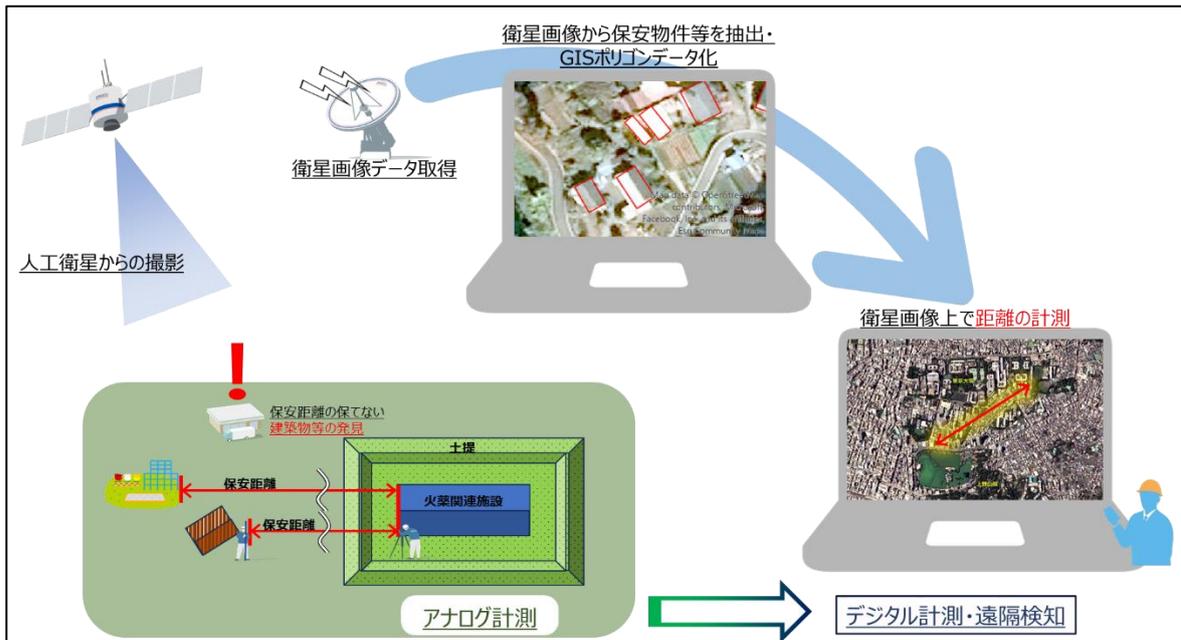


図 1 人工衛星を用いた実証の全体像

② IoT インフラ遠隔監視システムによる実証

本実証では、現在、火薬類取締法施行規則第 44 条第 2 項（完成検査の方法）別表第 2 第 16 項（土堤の基準）及び第 17 項（簡易土堤の基準）、並びに第 44 条の 5 第 2 項（保安検査の方法）別表第四第 16 項（土堤の基準）及び第 17 項（簡易土堤の基準）にて運用されている、危険工室等を囲む土堤管理業務に対して、IoT インフラ遠隔監視システムを活用することで、法令に定める土堤を常時監視し、崩壊等の異常発生により土堤の基準を逸脱する場合のリアルタイム検知が実現できる可能性について検証した。

具体的には、実証フィールドにおいて、危険工室等を囲む土堤を模した盛土構造物の造成を行った。次に、複数の方式による計測機器を盛土構造物に設置した。その後、法面を人為的に変状させ、変位を計測することにより、設置した IoT センサの精度及び崩壊時に異常発生を検知できることの確認、検証を実施した。

実証フィールドにおける検証結果から、IoT インフラ遠隔監視システムの設置位置・設置間隔の手法を検討・確立し、検知可能な変状の種類の確認、計測された値の精度を整理した。また、ヒアリングや文献調査により、土堤崩壊等の事象に対応する火薬類関連施設事業者への適用性（期待される効果）と、設置安全性についても整理した。これらの整理結果を踏まえて、火薬類関連施設への IoT インフラ遠隔監視システム機器設置の適用性について、総合的な評価と実際の土堤適用に向けての考察を行った。（図 2）。

なお、本実証に用いた IoT インフラ遠隔監視システム（Infra Eye、2.1.2(ア)に詳細を記載）は、本来は橋梁等のインフラ施設を想定した変状センサ機器・サービスであり、設置個所の変位（橋台と橋げたの遊間等）を常時観測するものである。屋外設置を想定して防水性、堅牢性を有し、電池駆動により外部電源を不要とし、日毎に通信をしながら最大 5 年間の遠隔監視が可能である。

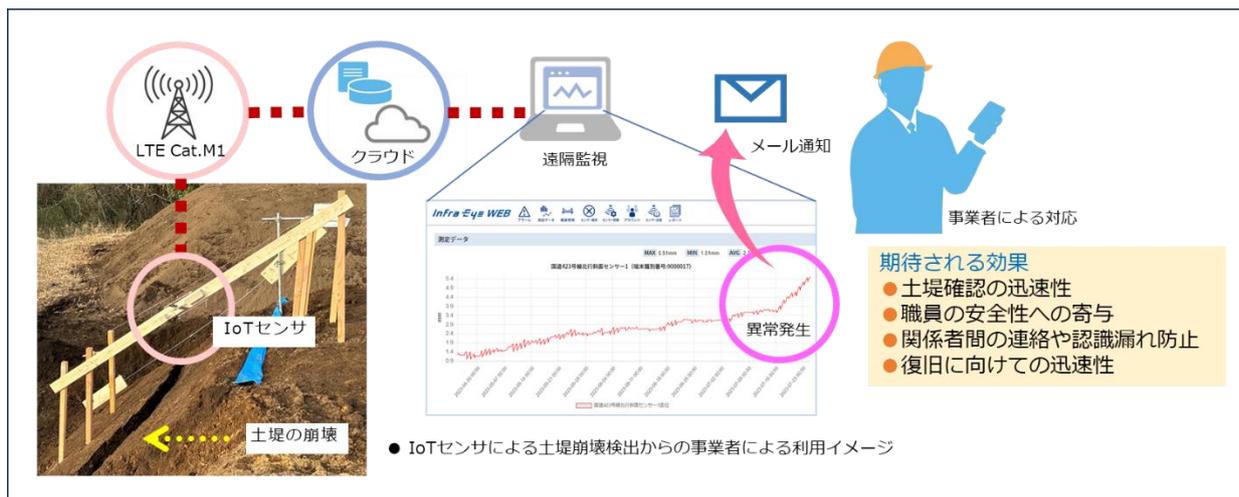


図 2IoT インフラ遠隔監視システムによる実証の全体像

1.4 実施体制・期間

1.4.1 実施体制

実施体制を表 2及び図 3に示す。

表 2 実施体制

事業者名	実施業務・役割
株式会社パスコ（実証事業者）	技術実証の実施、評価、報告書とりまとめ
西日本地質防災株式会社（現地実験協力者）	伸縮計の設置
総合建設ヒコ株式会社（現地実験協力者）	盛土構造物の構築及び掘削作業

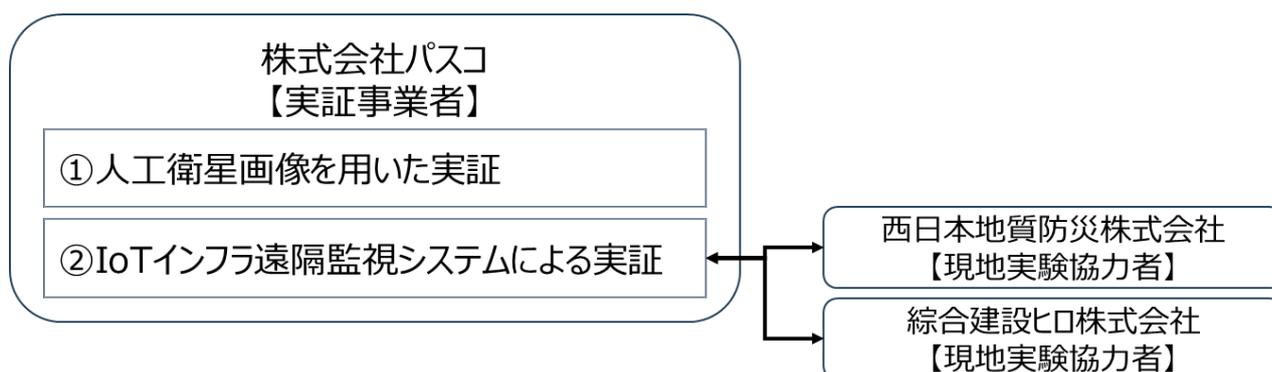


図 3 実施体制

1.4.2 実施期間

令和 5 年 11 月 7 日（火）～ 令和 6 年 2 月 29 日（木）（契約期間）

2 技術実証内容の詳細

2.1 技術実証の方法

2.1.1 人工衛星画像を用いた実証

火薬類関連施設の完成検査・保安検査では、危険工室等と保安物件との距離を計測することが定められている。保安検査は1回／年のため、人工衛星で取得する画像によってこの検査を代替しようとする場合、人工衛星による観測機会が少なくとも年に1回以上は実施されなくてはならない。これを踏まえて、まずは、(1)「適切な人工衛星(画像)の検討」を行った。次に、危険工室等と保安物件との距離計測の準備として、(2)「選定した人工衛星画像からの地図データの作成(デジタル図化)」を行った。そして、(3)「危険工室等と保安物件との距離計測」を行った。最後に、(1)～(3)の結果を踏まえて、(4)「人工衛星画像を火薬類関連施設の完成検査・保安検査に適用することの可否について考察(人工衛星画像の業務への適用可否の考察)」を行った。

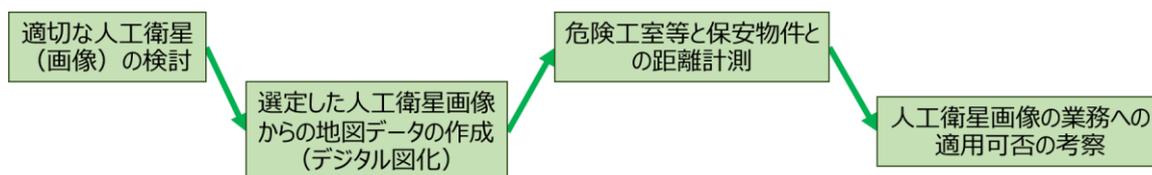


図 4 人工衛星画像を用いた実証の流れ

(1) 適切な人工衛星(画像)の検討

本実証で用いる人工衛星(画像)の選定について、詳細な検討内容は、「2.3 実施条件等」に記載する。検討の結果、本実証事業で使う人工衛星(画像)として、「SPOT 衛星」と「Pleiades 衛星」で撮影された画像を選定した。それぞれの地上分解能等の特徴は、以下の図5のとおりである。なお、「SPOT 衛星」で撮影された画像は、2015年と2022年に撮影されたものを、「Pleiades 衛星」で撮影された画像は、2022年に撮影されたものを使用した。

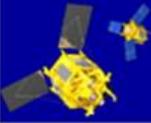
衛星名称 機体	SPOT	Pleiades-1,2
項目		
運用機関/会社	AIRBUS DS社	AIRBUS DS社
打上年月日	2012年9月 2014年6月	2011年12月, 2012年12月
地上分解能	1.5m	70cm (※50cm)
水平位置精度	20m (CE90)	8.5m(CE90) ※UserGuide2012.10
高さ精度 ※GCPなし	20m (LE90)	RMSE=13m 地理院論文
高さ精度 ※GCPあり	10m (LE90)	RMSE=1m以内 地理院論文
単画像新規撮影 価格 (税抜)	340円/km ² (マルチ6m) 680円/km ² (パンシャープン)	スタンダード: 3,000円/km ² 最少購入面積: 100km ² 最少購入幅: 5km
ステレオ新規撮影 価格 (税抜)	1,360円/km ² 340円/km ² (マルチ6m) 680円/km ² (パンシャープン)	スタンダード: 6,000円/km ² 最少購入面積: 100km ² 最少購入幅: 5km

図 5 「SPOT 衛星」と「Pleiades 衛星」の特徴

(2) 選定した人工衛星画像からの地図データの作成 (デジタル図化)

撮影された人工衛星画像を調達し、地形や地物 (建物や道路など) の正確な位置や形状をデジタル化する作業をデジタル図化という。これは、専用の図化機、または、GIS ソフトウェアを用いて行われる。

保安物件や危険工室等を地図に表現する場合、建物の形状をより詳細に図化するほど、図化のコストも大きくなる。例えば、求められる地図の精度に応じて屋根の凹凸、物置の有無などを表現するか否かがコストに影響する。また、一般的に、図化される地域の広さが決まっている場合、地図の縮尺が大きく建物を細部まで表現する必要がある場合に図化のコストは増加する。逆に、縮尺が小さく概要図としての性質が強くなる場合には、それほど高い精度は不要であるため、コストは抑えられる。



図 6 地図の精度（縮尺が大きいほど地図が正確）

以上を踏まえて、本実証では、危険工室等や保安物件といった建物を、1/5,000 の縮尺の地図における図化を参考にしながら、矩形にて図化した。また、本実証での図化は、人工衛星画像を用いて画像上の地物の目視判読を基本として行うが、画像上では判断に迷う地物の判読の際の参考情報として、電子国土基本図等の既にデジタル化された地形図も参照して行った。図化は、国内で広く普及している GIS ソフトウェアである「ArcGIS Pro」を用いた。なお、保安物件であることの確認、保安物件の属性の確認は、別途、地図情報を重ね合わせることで行った。

本実証では、この図化作業と並行して、人工衛星画像による危険工室等及び既存保安物件の視認性の検証を行った。

(3) 危険工室等と保安物件との距離計測

保安距離については、仮に 500m として設定し、危険工室等から距離 500m 圏を GIS のバッファ機能で自動算出することにより計測した。また、対象とした火薬類関連施設内において図化した建物とその建物が隣接する建物との距離を保安間隔とみなして 101 か所計測した。さらに図化した保安物件と施設内の危険工室等との保安距離を 4 か所計測した（合計 105 か所計測した）。計測は GIS の計測機能を用いて行った。これに加えて、「Pleiades 衛星」の画像を用いた計測結果と、「Pleiades 衛星」の画像よりも地上分解能が劣る「SPOT 衛星」の画像を用いた計測結果の比較を行った。

(4) 人工衛星画像の業務への適用可否の考察

(1) ～ (3) の結果を踏まえて考察を行った。

2.1.2 IoT インフラ遠隔監視システムによる実証

本実証においては、実証フィールドの選定を行い、現地にて危険工室等を囲む土堤を模した盛土構造物の構築を行った。その後、機器設置方法の検討結果から、複数の手法で盛土掘削実験を行い、その際の計測結果を得た。また、日本火薬工業会参加団体企業の火薬工場への視

察とヒアリングを通じて、火薬類関連施設事業者への適用性の評価や、無線通信機器であるIoT インフラ遠隔監視システムの安全性評価を行った。

実証実験の結果と机上調査の結果を総合的に評価し、実際の土堤への適用可能性の考察を行った。IoT インフラ遠隔監視システムによる実証のフローを図 7 に示した。



図 7 IoT インフラ遠隔監視システムによる実証のフロー

(1) 検証用盛土構造物の構築

本実証を行うため、検証用盛土構造物の構築を行った。実証フィールドは実証実験を行う上で重機による適切な盛土や整形が可能な、熊本県阿蘇郡西原村河原団地（「2.2 実施場所等」に記載）を選定した。検証用盛土構造物は、法面の傾斜を45度以下、天端を1m以上として造成を行った。検証用盛土構造物の条件については、「2.3 実施条件等」に記載する。

(2) 機器設置方法（観測方法）の検討

IoT 技術を活用した遠隔監視センサによる常時監視により、土堤における崩壊等の異常の発生をリアルタイムに検知可能であることの実証を行うため、機器設置方法等の検討を行った。

IoT センサとしては、Infra Eye という製品を使用した。また、IoT センサの設置方式は、材料費の多寡、機器設置の簡便性や利便性、土堤のある現地への輸送などを考慮し、「①丁張り方式」と「②延長棒方式」の2種類の方式を採用することとした。また、2種類の方式の計測結果を比較するために、以前から地すべり監視等で利用される技術である「伸縮計計測」を、IoT センサでのデータ取得と併せて行った。

(ア) IoT センサ（Infra Eye）

Infra Eye は株式会社パスコが開発し、商標登録された製品・サービスである。初期設定では10分毎に計測を実施し、24時間毎に計測データを無線送信する。あらかじめ設定したしきい値または機器の計測限界である±20mmを超えた場合、アラームメールを発信する。

本製品・サービスは、国及び地方公共団体が管理する道路橋に社会実装されており、国土交通省「点検支援技術性能カタログ（BR030050-V0023）」、及び「NETIS 新技術登録

KT-230317」に登録されている。技術仕様について、表 3 に示す。

表 3 IoT センサ (Infra Eye) の仕様

項目	仕様
大きさ	W50.0±2mm×L 370.2±5mm×H48.5±2mm (出荷時)
質量	370±20 g (電池含む・出荷時)
環境性能	<ul style="list-style-type: none"> ・使用可能な温度範囲：-20.0℃～+60.0℃ ・防水：IPx6 相当 (暴噴流に対して保護)
電池寿命	5 年 (設置環境等により短くなる可能性あり)
通信方式	LTE Cat.M1 対応
変位測定	<ul style="list-style-type: none"> ・最小表示値 0.01mm ・測定精度±0.1mm ・測定範囲-20.00mm ～ +20.00mm (1 軸方向)
温度測定	<ul style="list-style-type: none"> ・最小表示値 0.1℃ ・測定精度±2℃ ・測定範囲-20℃～+60℃
装置外観	

参照 URL : <https://www.pasco.co.jp/products/InfraEye/>

また、Infra Eye の無線通信規格は、DOCOMO または KDDI の LTE Cat.M1 方式を採用している。LTE Cat.M1 は、携帯電話の LTE (4G) と同じ周波数帯域を利用しており、総務省の「技術基準適合証明・認定」を取得している無線機器に該当している。

- ・送信電力：+21dBm (0.13W)
- ・周波数 (対応バンド)：B1/B3/B8/B26/B28
- ・電波法 003-200140 (技術基準適合証明)
- ・電気通信事業法 D200117003 (技術基準適合認定)

(イ) 丁張り方式

地滑り監視の手法として以前からある、丁張りの離隔部 (ぬき板の間にある隙間) にセンサを取り付ける方式を用いた。計測機器の設置イメージを図 8 に示す。

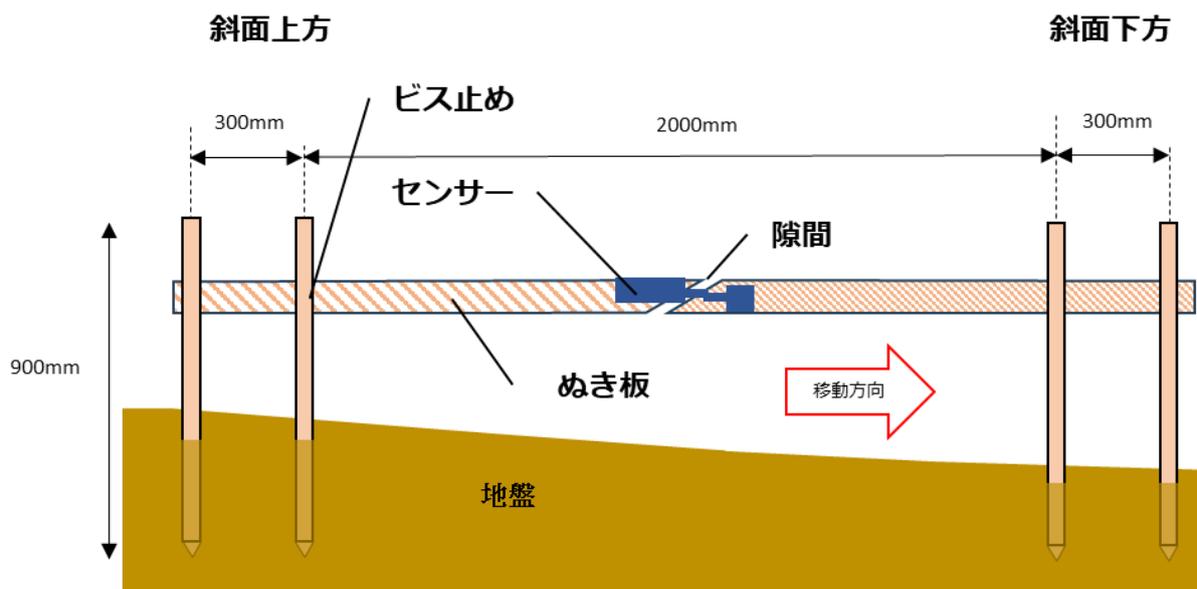


図 8 丁張り方式による計測機器設置イメージ

(ウ) 延長棒方式

弾性や温度変化の影響が少ない材料である CFRP（カーボン繊維強化プラスチック）を延長棒として採用した方式を用いた。計測機器の設置イメージを図 9 に示す。

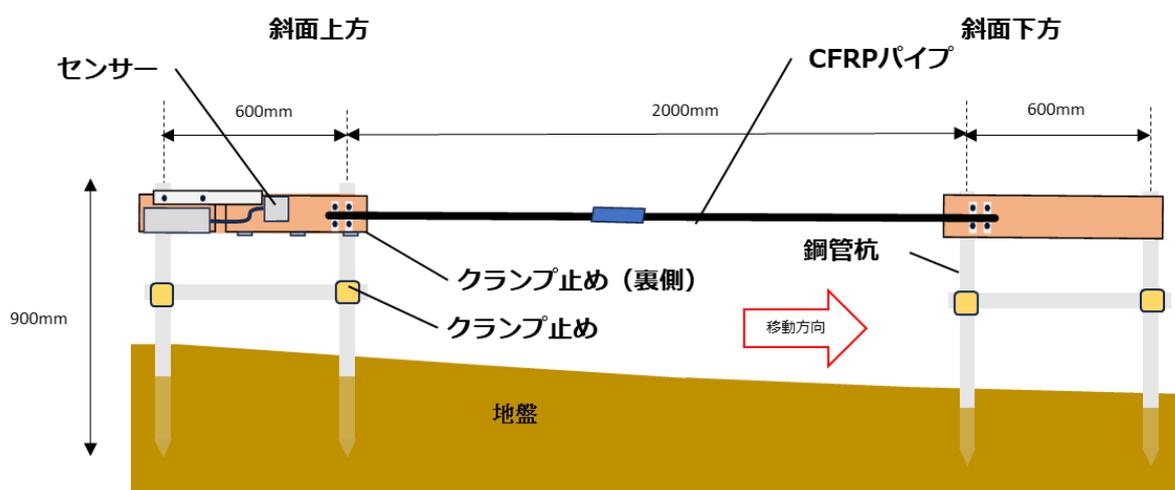


図 9 延長棒方式による計測機器設置イメージ

(エ) 伸縮計計測

Infra Eye を設置した丁張り方式及び延長棒方式との計測結果比較を行うために、地すべり監視等で使用されるインバー線方式による伸縮計による計測を実施した（図 10）。

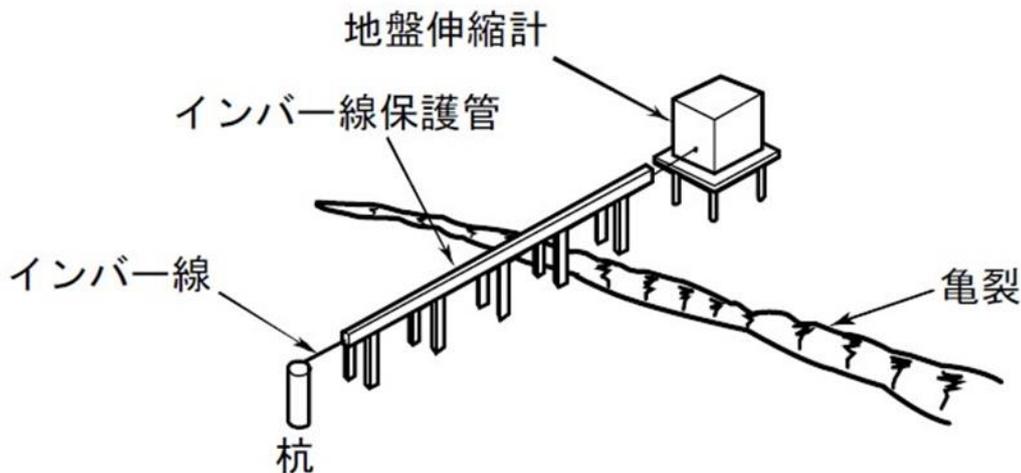


図 10 伸縮計の設置イメージ¹

(3) 検証用盛土構造物の掘削実験方法の設定

実験の種別としては、盛土構造物に設置した複数のセンサ精度を確認、検証するための実験（実験 1）、盛土構造物の崩壊時に異常発生を検知できることを確認、検証する実験（実験 2）に大別し、Infra Eye による 2 種類の方式とその精度比較のための伸縮計によるデータを取得した。表 4 に実験の種別を示す。

表 4 実験の種別

実験種別	目的	方式種別	目的	備考
実験 1	センサ精度確認	① 丁張り方式	当該方式の計測精度確認	Infra Eye 使用
		② 延長棒方式		
		(比較) 伸縮計計測	方式①②との精度比較	従来監視技術
実験 2	異常発生検知	① 丁張り方式	アラーム機能の有効性確認	Infra Eye 使用
		② 延長棒方式		
		(比較) 伸縮計計測	方式①②との精度検証	従来監視技術
※ ①丁張り方式の概要： 地滑り監視の手法として以前からある、丁張りの離隔部にセンサを取り付ける方式 ※ ②延長棒方式の概要： 弾性や温度変化の影響が少ない材料である CFRP（カーボン繊維強化プラスチック）を延長棒として採用した方式				

(4) 検証用機器の設置

実験の現地にて掘削を行い、(1) で示した土堤を模した盛土構造物の造成を行った。その

¹ 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム,平成 19 年 9 月,「土木研究所資料 地すべり防止技術指針及び同解説(提案)」,『ISSN 0386-5878 土木研究所資料第 4077 号』

後（２）で示した各種機器を設置し、実験準備を行った。現地での盛土構造物の造成イメージと実際の機器設置状況を図 11 及び図 12 に示す。

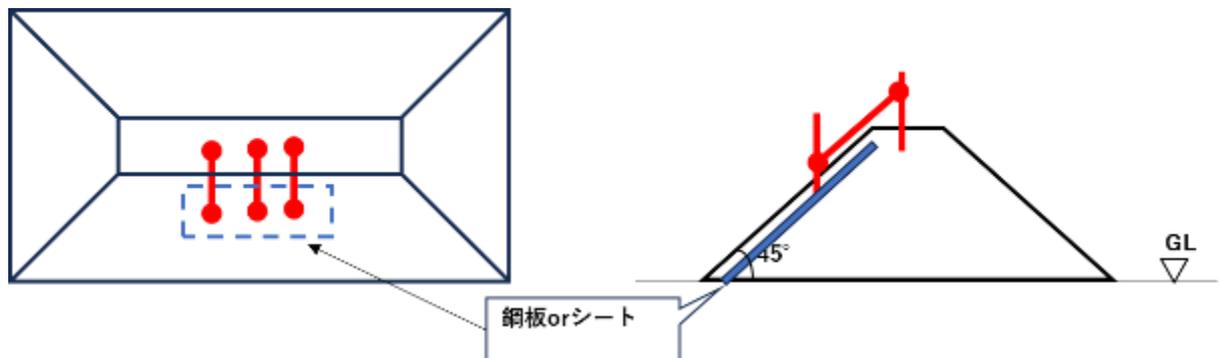


図 11 盛土構造物と設置機器のイメージ



図 12 盛土構造物における機器設置状況

(5) 掘削実験の実施

実験準備の後、盛土構造物に設置した複数のセンサ精度を確認、検証するための実験（実験 1）及び盛土構造物の崩壊時に異常発生を検知できることを確認、検証する実験（実験 2）を行った。

(ア) 実験 1 : 複数のセンサ精度を確認、検証する実験

それぞれの移動杭（測定点下部）を 1 枚のボードに取り付け、盛土をして土堤を模した形状とした。その後ボードを人力で平行に約 5 mm ずつ下に移動させ、その時のデータを収集した。



図 13 実験 1 実施状況

(イ) 実験 2 : 崩壊時に異常発生を検知できることの確認、検証する実験

鉄板、ブルーシートの上に盛土をして土堤を模した形状とした。そこに移動杭を設置し、バックホーで鉄板を徐々に牽引して、法面の崩壊を意図的に発生させる実験を行った。1 分間隔の変位及びアラームメールの受信データを収集した。

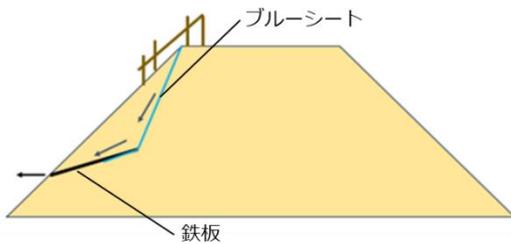


図 14 実験 2 実施状況

2.2 実施場所等

① 人工衛星画像を用いた実証

本実証に協力いただいた火薬類関連施設（図 15）に対して、対象地域の危険工室等及び保安物件の地図（GIS）データの作成（デジタル図化）を行った。2015 年と 2022 年に撮影された衛星画像を確認すると、火薬類関連施設内において、危険工室等の数が増減していることが確認できる。これらの火薬類関連施設と保安物件の距離が保安検査の対象となる。



2022 年 10 月撮影

2015 年 12 月撮影

図 15 対象地域 SPOT 衛星画像による 2 時期の比較（©AIRBUS DS）

② IoT インフラ遠隔監視システムによる実証

実証フィールドは、現地実験を行う上で重機による適切な盛土や整形が可能な、熊本県阿蘇郡西原村河原団地とした。

当該地点は、原子力規制庁が実施する業務において、活断層観測のためのトレンチ掘削作業を実施している現場であり、残土の発生があることから検証用盛土構造物を造成することが比較的容易なこと、重機を用いた掘削作業等を実施する体制（地元業者）が確保しやすいこと、また、作業上の安全性、周辺への影響が少ない事を考慮して実証フィールドに選定した。



図 16 実証フィールドの周辺と盛土構造物の造成状況

また、本実証は、表 5 のスケジュールで実施した。

表 5 IoTインフラ遠隔監視システムによる現地実験のスケジュール

日 時	AM / PM	作業内容
12月25日(月)	PM	打合せ
		実験準備
		盛土構造物の整形
		機器設置
12月26日(火)	AM	機器設置
		実験1(試行)
	PM	実験1(実施)
		実験2(実施)

2.3 実施条件等

2.3.1 人工衛星画像を用いた実証

(1) 衛星画像の選択に関する条件

本実証に使用する人工衛星画像の条件について記載する。図 17 は、地図の縮尺（地図情報レベル）で許容される誤差を示している。例えば、1/1,000 の縮尺であれば、水平誤差は 0.7m まで認められるというのが、国土地理院が定める地図の位置精度である。本実証での保安距離を仮に 500m と設定した場合、地図上で 5cm から 10cm で示される、地図情報レベル 5000 (1/5,000) から、地図情報レベル 10000 (1/10,000) の縮尺を用いてデジタル図化をすることが適当と考えられる。その場合、国土地理院が定める地図の位置精度に基づけば、3.5m~7.0m 程度の誤差にてデジタル図化を行う必要がある。この条件において、デジタル図化のために利用可能なデータは、航空写真や高分解能衛星画像、中分解能衛星画像となる。

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	等高線の標準偏差	データ作成の情報源として想定されるもの
250	0.12m	0.25m	0.5m	現地平板測量等
500	0.25m	0.25m	0.5m	MMS、現地平板測量等、航空写真
1000	0.70m	0.33m	0.5m	航空写真
2500	1.75m	0.66m	1.0m	航空写真、高分解能衛星画像 (Worldview3)
5000	3.50m	1.66m	2.5m	航空写真、高分解能衛星画像 (Pleiades等)
10000	7.00m	3.33m	5.0m	航空写真、高・中分解能衛星画像 (SPOT6等)
25000	17.5m	3.33m	5.0m	航空写真、高・中分解能衛星画像、 GoogleEarth (GoogleEarthは地域によって使用している画像、データが異なる。また、実際精度は保証されていない)
50000	35.0m	6.66m	10m	
200000	140m	33.3m	50m	

* 作業規程の準則 (<http://psgsv.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>)の内容を踏まえて実証事業者において作成

図 17 地図の精度と人工衛星画像

利用する人工衛星の候補を図 18 に示す。一般に地上分解能が高いほど画像は高額になる傾向にある。また、地上分解能が高くなると一度に観測できる範囲が狭くなるため、一定期間内に同一地点を観測する機会が少なくなる。

年に 1 回以上、天候が良いタイミングで撮影された人工衛星画像上で対象地物を明瞭に観測できることが、本実証で利用する人工衛星の条件となる。以上の条件から、Pleiades 衛星や SPOT 衛星といった、50cm または 1.5m の地上分解能（画素の粗さ）をもつ人工衛星が候補となる。これらは、観測可能な地物の詳細度が高く、道路や建物の判別が可能であるため、求める精度に合致している。SPOT 衛星と Pleiades 衛星は高度 620km～694km の低軌道であり、地上分解能の高い画像を撮影可能であるものの、観測幅はそれぞれ 60km 及び 20km と比較的狭いものだが、本テーマでの観測対象となる地域の大きさを考慮すると、十分カバーできるものであるといえる。両衛星は、いずれも仕様を揃えた複数の機体を組み合わせて観測を実施しており、また比較的観測幅（概ね 1 画像当りのサイズと同義）が大きいので、同じ場所を一年に複数回撮影することが可能である。

人工衛星画像を用いる際には、基本的には撮影したい地点の人工衛星画像を、新規観測箇所として予約すること（プログラミング撮影）が求められるが、予め別目的で撮影され、蓄積されたアーカイブ画像を利用することも可能である。ただし、アーカイブ画像の場合は、必ずしも意図するエリアを網羅する画像が存在するかは保証がない。その他、プログラミング撮影を行わない方法として、付加価値製品として事業者が整備する、国内全域の衛星画像をデータベース化した製品・サービスの利用がある。代表的なものとして、パスコ・サテライトイメージ（PSI：PASCO Satellite Image）がある。図 19 は、PSI で提供される衛星画像の例である。これらは SPOT 衛星で撮影されたものである。1.5m の分解能をもち、雲などが少ない好条件の画像を選定し、整備・提供されている。同種のサービスは現在 Pleiades 衛星でも計画されている。

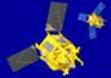
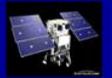
衛星名称 機体	SPOT	WorldView-1	Worldview-2	GeoEye-1	WorldView-3	Pleiades-1,2
項目						
運用機関/会社	AIRBUS DS社	MAXAR社				AIRBUS DS社
打上年月日	2012年9月 2014年6月	2007年10月	2009年10月	2008年9月	2014年8月	2011年12月, 2012年12月
地上分解能	1.5m	50cm	50cm	50cm	30cm	50cm
観測機会	3日に1回程度	4日に1回程度	3日に1回程度	3日に1回程度	3日に1回程度	2日に1回程度
観測幅	約60km	約17.7km	約16.4km	約15.2km	約13.1km	約20km
水平位置精度	20m (CE90)	5m(CE90) ※オフナディア角30度以下のカタログ値 4m(CE90) ※GCPを使用した場合				8.5m(CE90) ※UserGuide2012.10
高さ精度 ※GCPなし	20m (LE90)	5m (LE90) RMSE=1~4.5m (地理院論文)		5m (LE90)	5m (LE90)	RMSE=13m 地理院論文
高さ精度 ※GCPあり	10m (LE90)	RMSE=1m以下 地理院論文				RMSE=1m以内 地理院論文
単画像新規撮影 価格 (税抜)	340円/km ² (マルチ6m) 680円/km ² (パンシャープ)	4,000円/km ² (50cmクラス)		5,100円/km ² (40cmクラス)	13,700円/km ² (30cmクラス)	スタンダード: 3,000円/km ² 最少購入面積: 100km ² 最少購入幅: 5km

図 18 人工衛星の種類とコスト



図 19 毎年撮影されている人工衛星画像の例

以上をふまえ、本実証で使う人工衛星画像には、SPOT 衛星と Pleiades 衛星で撮影された画像を選定した。2 種類の衛星を選定した意図としては、SPOT 衛星と Pleiades 衛星では地上分解能が異なるため、図化される建物形状の正確さも異なることが想定されるためである。SPOT 衛星は 2015 年と 2022 年に撮影されたものを、Pleiades 衛星は 2022 年に撮影されたものを使用した。

(2) GIS 上での保安距離・保安間隔の計測に関する条件

デジタル図化された建物データを使って、GIS にて保安距離・保安間隔を計測した。保安距離については仮に 500m として設定し、危険工室等から距離 500m 圏を GIS のバッファ機能で自動算出することにより計測した。また、図化した保安物件と施設内の危険工室等との距離を手動で計測した。保安間隔については、GIS 上で施設内の危険工室等と隣接する危険工室等との距離を手動で計測した。なお、デジタル図化のためには、GIS ソフトウェア (ArcGIS Pro) を用いた。

2.3.2 IoT インフラ遠隔監視システムによる実証

IoT インフラ遠隔監視システムによる実証については、以下の「実施条件等」を勘案して実施した。

本実証を行うため、検証用盛土構造物の構築を行った。実証フィールドは現地実験を行う上で重機による適切な盛土や整形が可能な、熊本県阿蘇郡西原村河原団地（「2.2 実施場所等」に前述）を選定し、作業員は安全保護具等の着用、作業手順書の読み合わせ、作業前の KY ミーティング、緊急連絡先の事前確認を行い、適切な安全管理のもとに施工した。

土堤を模した盛土構造物の仕様としては、「日本火薬工業会」より提供を受けた危険工室と土堤のイメージ（図 20）を参照し、法面の傾斜を 45 度以下、天端を 1m 以上として造成を行った。

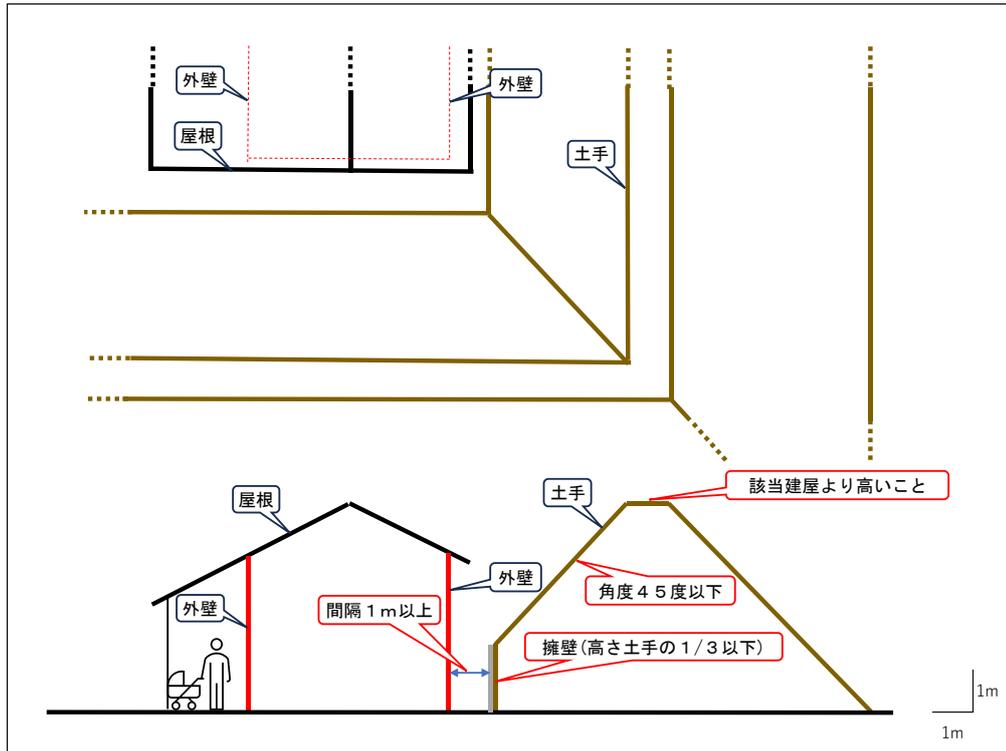


図 20 危険工室と土堤のイメージ

3 技術実証の結果

3.1 結果の評価ポイント・方法

本実証における結果の評価の観点、人工衛星画像を用いた実証においては、衛星画像解析技術を活用し、危険工室等の保安間隔及び保安物件の保安距離に対する目視検査・測定検査が代替できるか、IoT インフラ遠隔監視システムによる実証においては、IoT インフラ遠隔監視技術を活用し、危険工室等を囲む土堤について、火薬類取締法施行規則等に定められた高さ、形状等が保持できなくなるような変状を捉えることで、土堤の目視点検、巡回を代替できるか否かを判断することにある。

3.1.1 人工衛星画像を用いた実証

人工衛星画像を用いた実証については、以下の「結果を評価するポイント・方法」を勘案して実施した。

(1) 衛星画像による危険工室等及び既存保安物件の視認性

視認性の評価として、衛星画像から得られる建築物の位置精度と、図化できる建物の正確さを評価した。位置精度については、衛星画像上の保安物件を拡大し、建物の形状などが人間の目でしっかりと視認できるかどうかを評価した。図化できる建物の正確さは、衛星画像から実際に図化できるかどうかを評価した。

(2) 保安距離・保安間隔の計測及び計測に利用できる衛星画像の地上分解能

保安距離については仮に 500m として設定し、危険工室等からの距離 500m 圏を GIS のバッファ機能で自動算出することにより計測できること、GIS 上で保安物件と施設内の危険工室等の距離を手動で計測できることを確認した。保安間隔については、GIS 上で施設内の危険工室等と隣接する危険工室等との距離を手動で計測できることを確認した。また、計測に利用できる衛星画像の地上分解能の評価として、今回は、地上分解能の異なる 2 つの衛星画像（SPOT 衛星、Pleiades 衛星）を用いて計測した建物間距離を比較し、地上分解能が高い画像を用いた場合と地上分解能が低い画像を用いた場合との誤差が、概ね地図情報レベル 5000 で許容される水平位置の標準偏差内（3.5m 以内）に収まることを基準にして、地上分解能が低い画像が利用できるかどうか評価した。

3.1.2 IoT インフラ遠隔監視システムによる実証

IoT インフラ遠隔監視システムによる実証については、以下の「結果を評価するポイント・方法」を勘案して実施した。

(1) IoT インフラ遠隔監視システムの設置方式・精度・検知可能な変状の種類と限界

IoT インフラ遠隔監視システムによって土堤の変状の検出が可能であることを評価した。具体的には、適切な機器の設置方式、計測された値の精度、検知可能な変状の種類と限界の 3 点を

評価した。評価の方法として、「2.1.2IoT インフラ遠隔監視システムによる実証」に示す実験 1、実験 2（表 4）にて取得した結果を取りまとめ、分析した。また、長期的なデータ取得・通信試験の実施により、崩壊等の検知のための長期的なデータ取得が可能であることも併せて確認した。

(2) 火薬類関連施設事業者への適用性

火薬類関連施設の土堤運用実態を踏まえた、IoT インフラ遠隔監視システムの火薬類関連施設事業者への適用性を評価した。評価の方法として、「日本火薬工業会」の参加団体へ、実際の土堤での IoT インフラ遠隔監視システムの活用可能性や関係法令に関するヒアリングを行った。

(3) IoT インフラ遠隔監視システムの設置安全性

本実証の目的は、危険工室等を囲む土堤への設置についての検証を行うものであるため、通信機器である IoT センサ（Infra Eye）自体の通信による発火の可能性を、システムの設置安全性として評価した。評価の方法として、文献調査と、「日本火薬工業会」の参加団体へのヒアリングを行った。

(4) 火薬類関連施設への IoT インフラ遠隔監視システム機器設置の適用性

上記（1）～（3）の評価結果を踏まえて、IoT インフラ遠隔監視システム機器設置の適用性について、総合的な評価と実際の土堤適用に向けての考察を行った。

3.2 結果及び評価・分析

3.2.1 人工衛星画像を用いた実証

(1) 選定した人工衛星画像からの地図データの作成（デジタル図化）結果（衛星画像による危険工室等及び既存保安物件の視認性の評価）

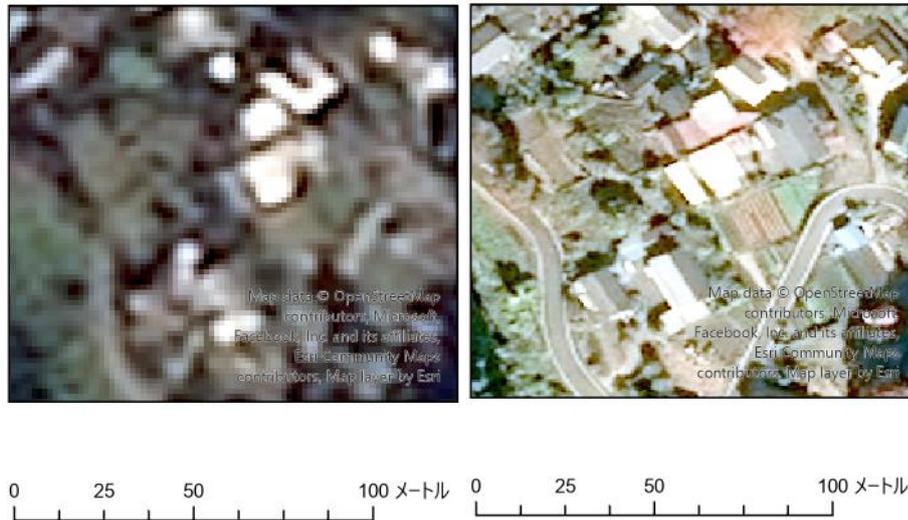
同じ地域を撮影した SPOT 衛星及び Pleiades 衛星の画像を拡大し、範囲を揃えた衛星画像から保安物件を確認することで、2 つの衛星（SPOT 衛星及び Pleiades 衛星）で撮影された画像の位置精度を評価した。また、実際にデジタル図化を行うことで、図化できる建物の正確さを評価した。以降、図化した画像内の赤の矩形が建物等の輪郭を示す。図 22、図 24、図 26、図 28、図 30、図 32、図 35、図 38 は、保安物件（市街地の家屋、学校など）を図化した例示である。保安物件は画像に対する目視によって特定しており、目視では特定が難しい場合は地形図を用いて特定した。図 33、図 36 は保安物件のうち鉄道と国道が含まれる画像であるが、これらは目視による範囲の特定のみを行い図化は行っていないため、特定した範囲を紫色点線の矩形で示す。

拡大した衛星画像を用いて保安物件を確認した結果、総じて Pleiades 衛星は保安物件の輪郭が明瞭であり、視認性が高いことが確認できた。一方、SPOT 衛星は比較的に小さい建物は視認しづらいことが分かった。

地図データの作成（デジタル図化）において、地形図等と照らし合わせて確認した結果、視認

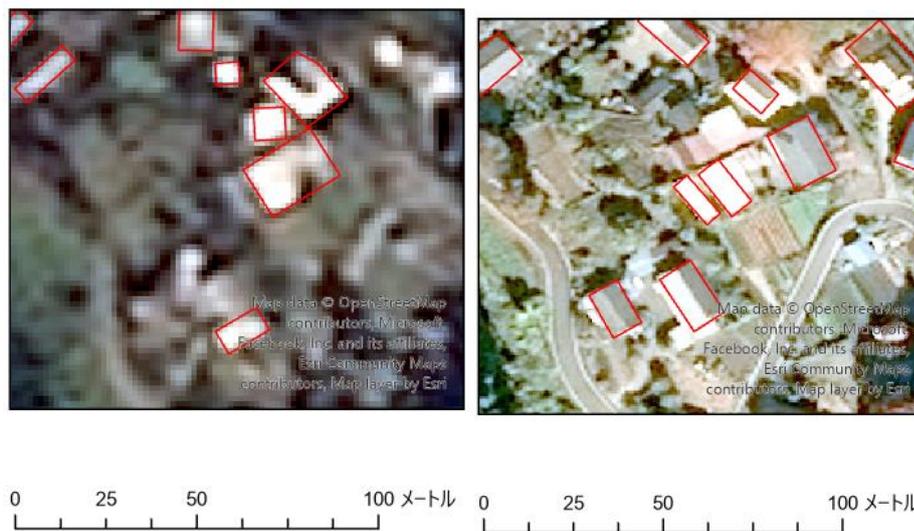
性の違いから Pleiades 衛星では正確に建物を抽出できるが、SPOT 衛星では抽出が困難な傾向があった。

- 第一種保安物件 市街地の家屋



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 21 衛星画像からみる第一種保安物件（市街地の家屋）（©AIRBUS DS）

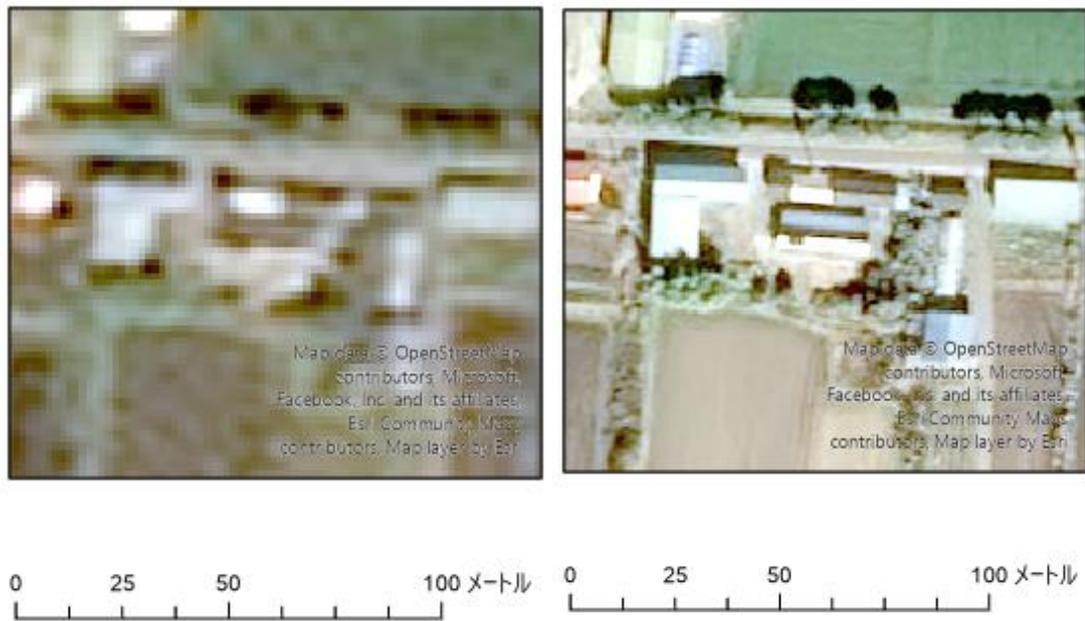


SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

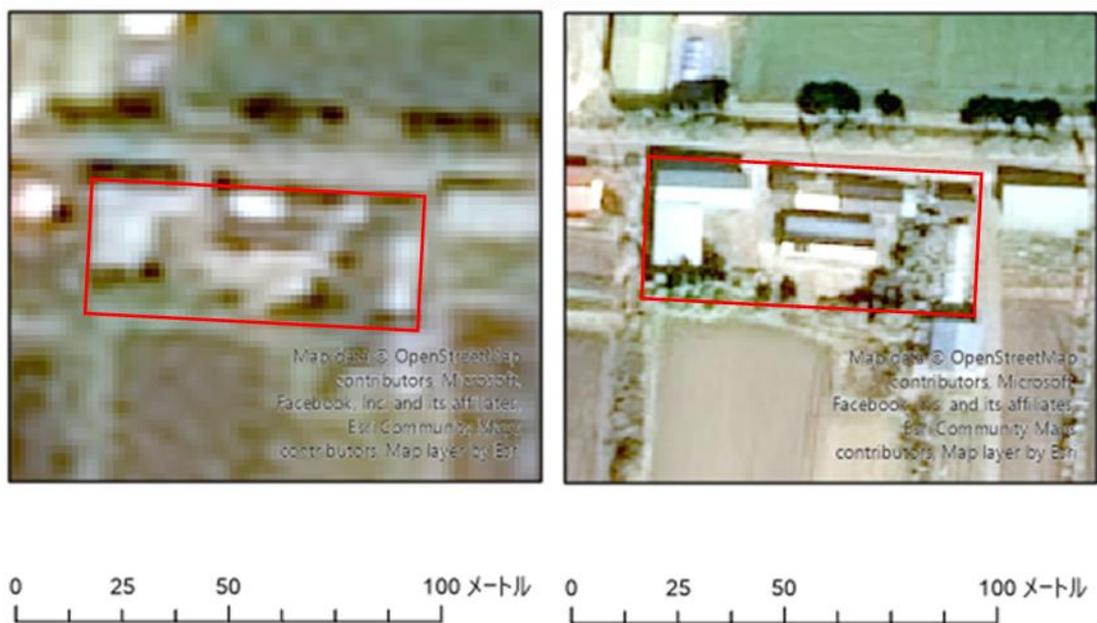
図 22 図化した衛星画像 第一種保安物件（市街地の家屋）（©AIRBUS DS）

※SPOT 衛星では画像が不明瞭であるため、一部の家屋が判読できていない、あるいは建物形状を正確に捉えられていない。

- 第一種保安物件 学校

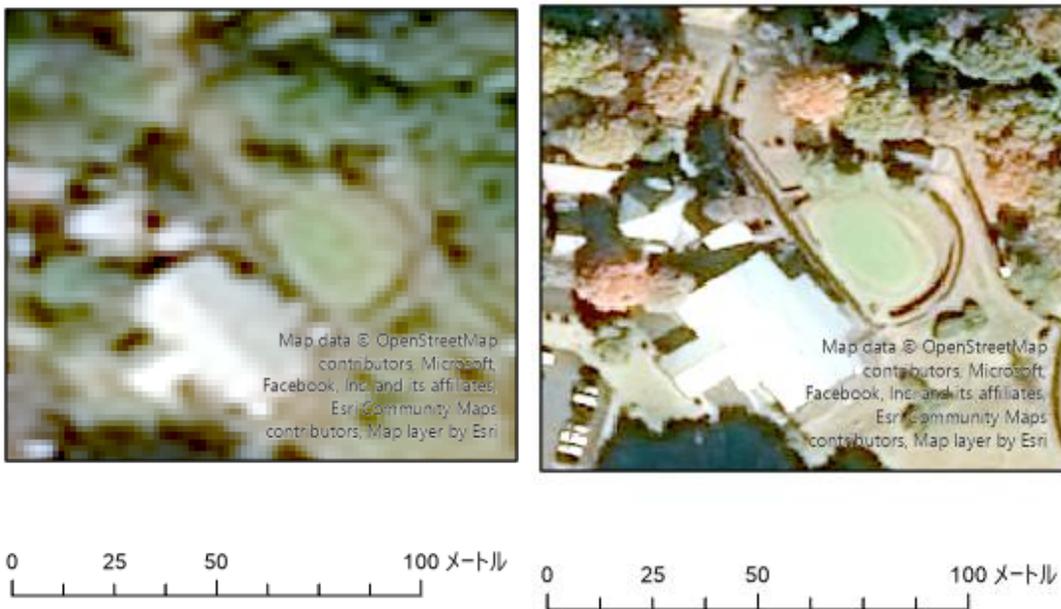


SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
 図 23 衛星画像からみる第一種保安物件（学校）（©AIRBUS DS）

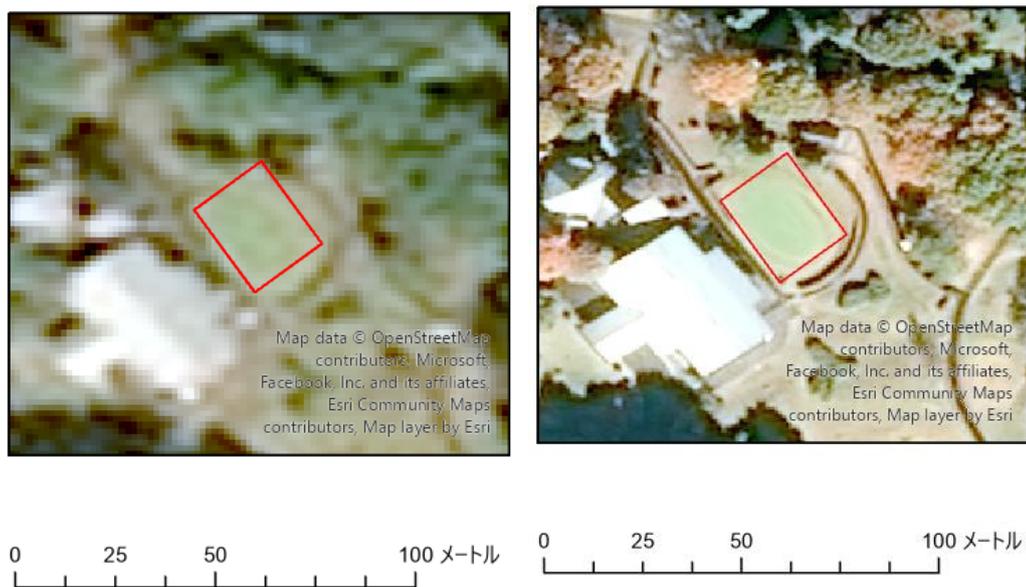


SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
 図 24 図化した衛星画像からみる第一種保安物件（学校）（©AIRBUS DS）

- 第一種保安物件 劇場、競技場

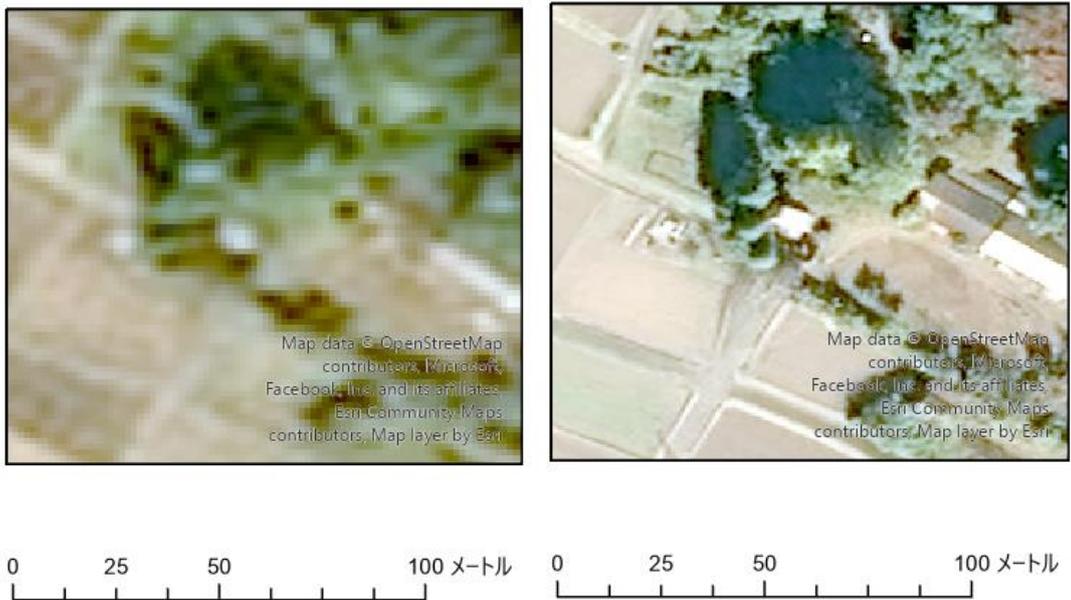


SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
 図 25 衛星画像からみる第一種保安物件（競技場）（©AIRBUS DS）

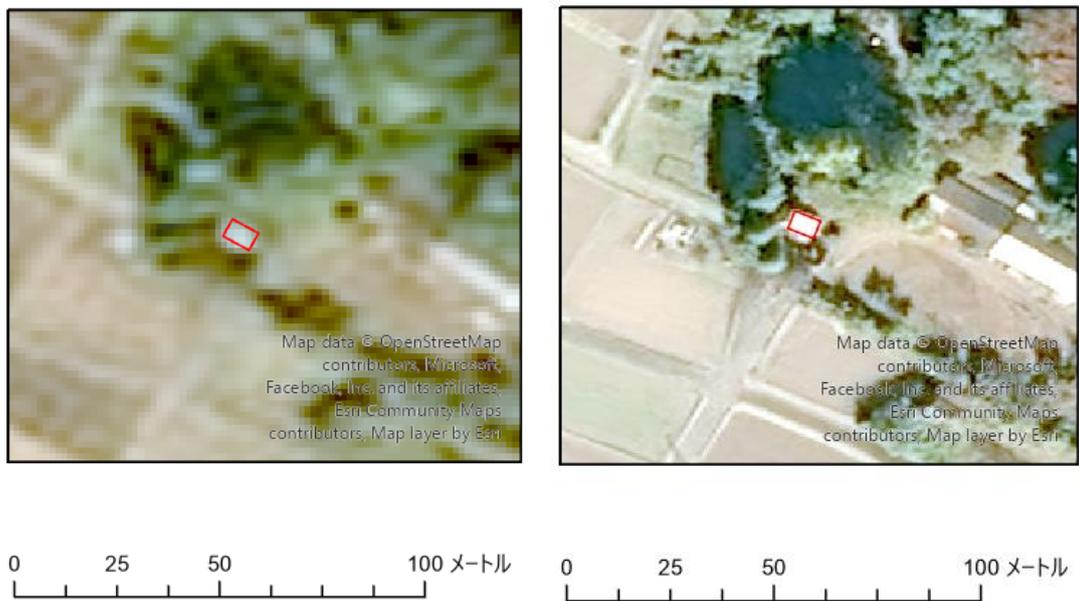


SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
 図 26 図化した衛星画像からみる第一種保安物件（競技場）（©AIRBUS DS）

- 第一種保安物件 社寺及び教会



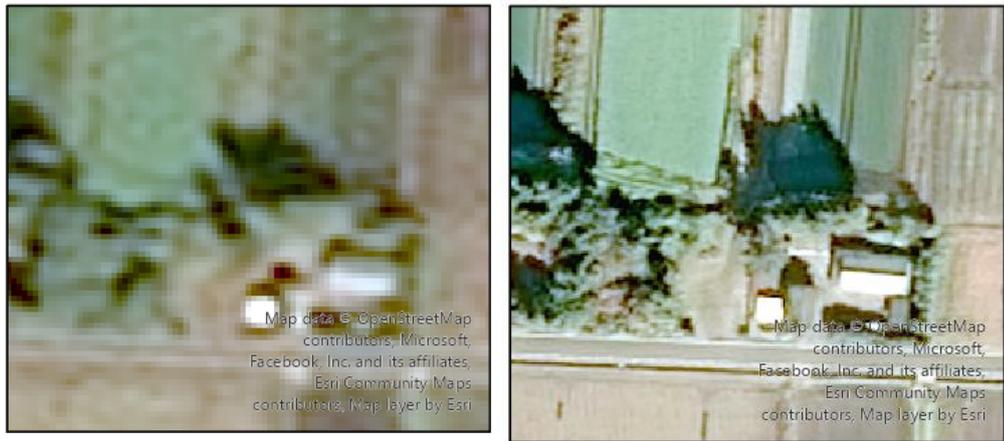
SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
 図 27 衛星画像からみる第一種保安物件（神社）（©AIRBUS DS）



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
 図 28 図化した衛星画像からみる第一種保安物件（神社）（©AIRBUS DS）

※SPOT 衛星では画像が不明瞭であるため、建物形状を正確に捉えられていない。

- 第二種保安物件 村落の家屋及び公園



0 25 50 100メートル

0 25 50 100メートル

SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 29 衛星画像からみる第二種保安物件（村落の家屋）（©AIRBUS DS）



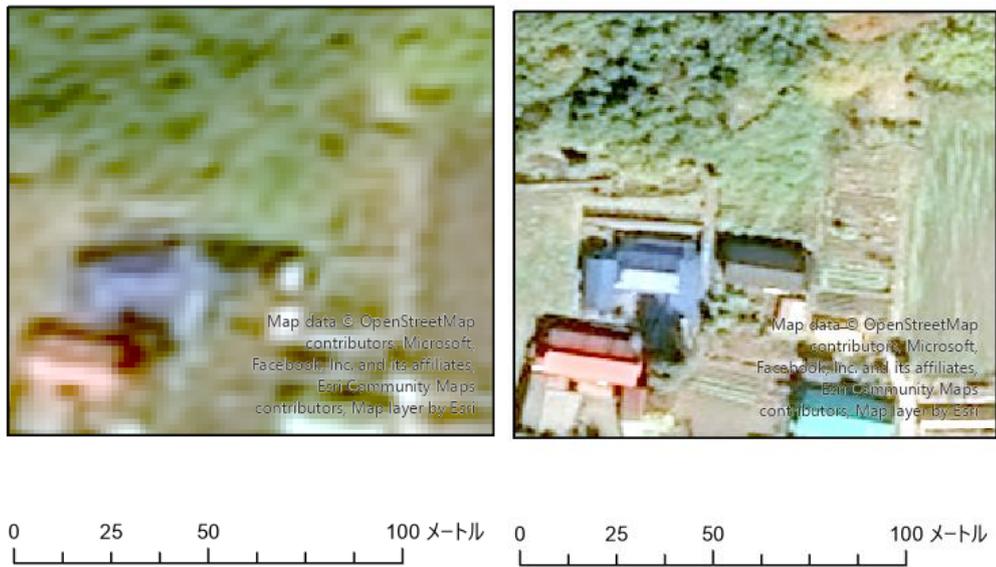
0 25 50 100メートル

0 25 50 100メートル

SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 30 図化した衛星画像からみる第二種保安物件（村落の家屋）（©AIRBUS DS）

- 第三種保安物件 家屋（第一種保安物件又は第二種保安物件に属するものを除く。）



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

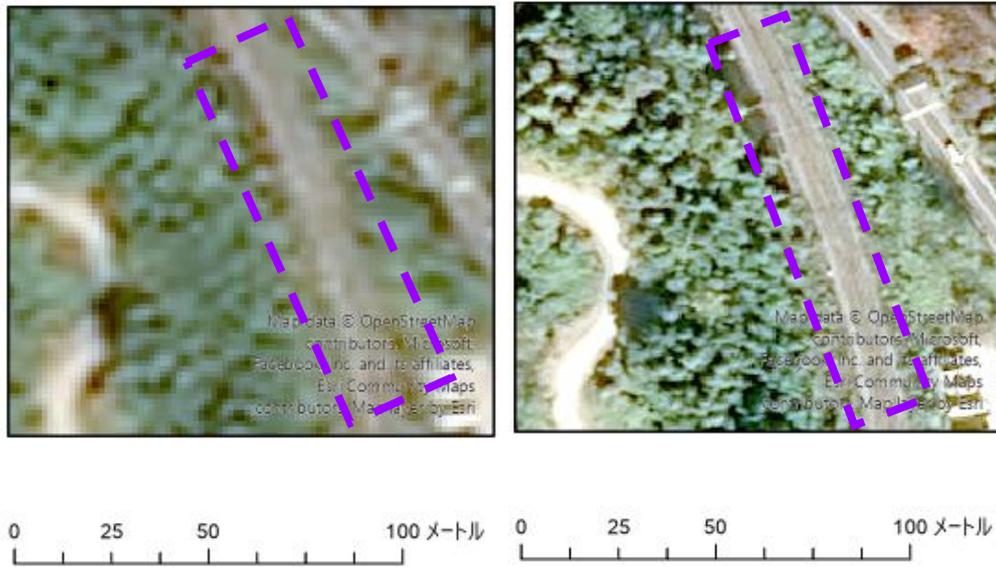
図 31 衛星画像からみる第三種保安物件（家屋）(©AIRBUS DS)



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 32 図化した衛星画像からみる第三種保安物件（家屋）(©AIRBUS DS)

- 第三種保安物件 鉄道、軌道



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 33 衛星画像からみる第三種保安物件（鉄道）（©AIRBUS DS）

- 第三種保安物件 発電所、蓄電所



同地点が取得した Pleiades 衛星画像の範囲外のため画像無し

SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 34 衛星画像からみる第三種保安物件（水力発電所）（©AIRBUS DS）

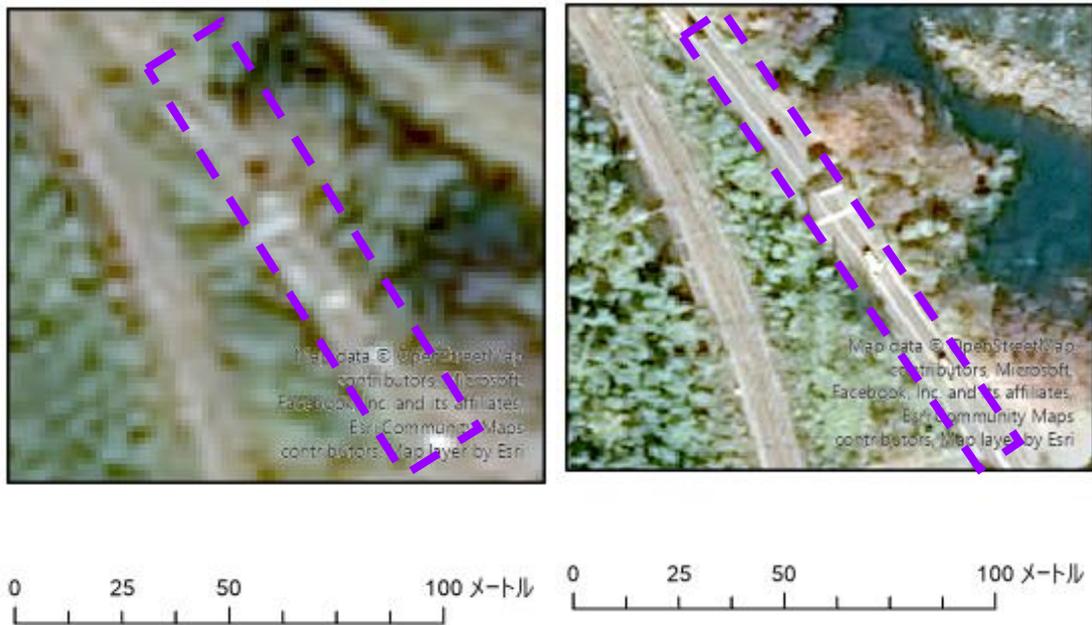


同地点が取得した Pleiades 衛星画像の範囲外のため画像無し

SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

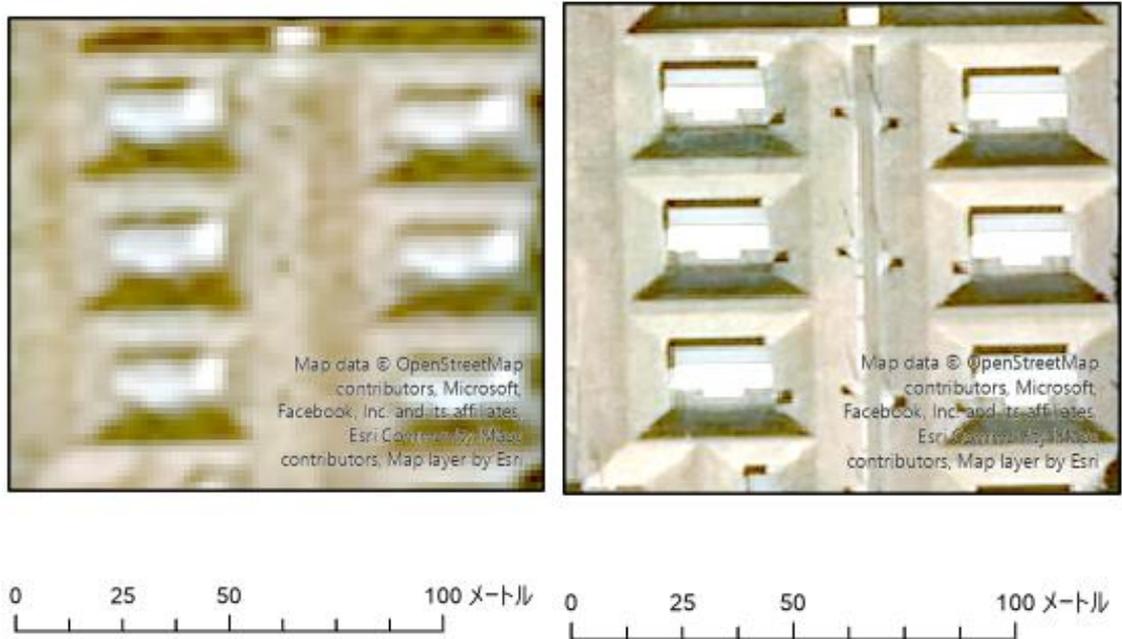
図 35 図化した衛星画像からみる第三種保安物件（水力発電所）（©AIRBUS DS）

● 第四種保安物件 国道、都道府県道



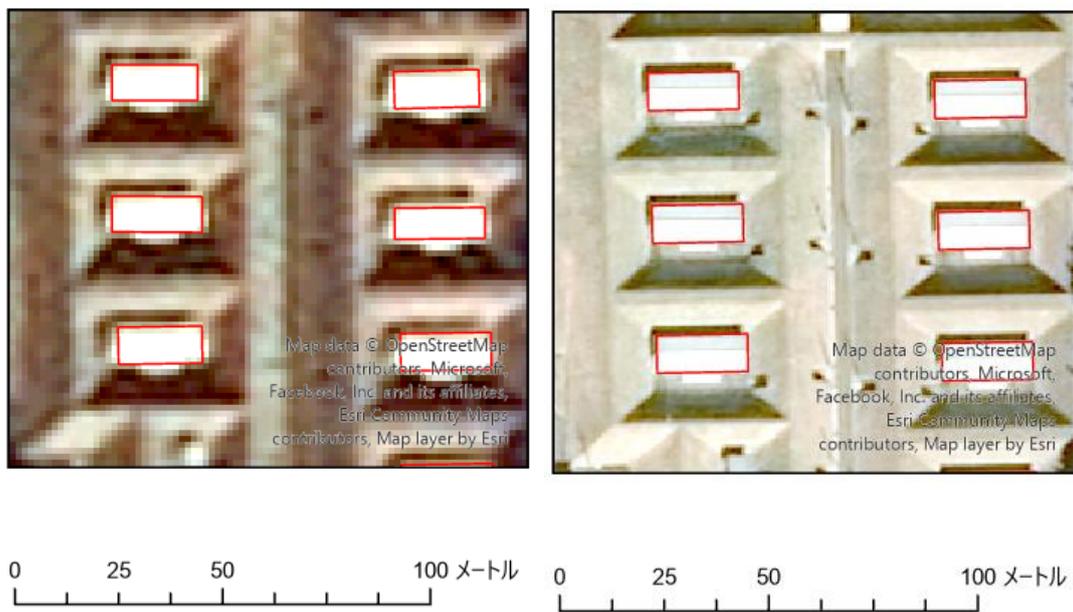
SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m
図 36 衛星画像からみる第四種保安物件（国道）（©AIRBUS DS）

- 第四種保安物件 火薬類取扱所及び火気取扱所



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 37 衛星画像からみる第四種保安物件（火薬庫）（©AIRBUS DS）



SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 38 図化した衛星画像からみる第四種保安物件（火薬庫）（©AIRBUS DS）

(2) 危険工室等と保安物件との距離計測結果（保安距離・保安間隔の計測及び計測に利用できる衛星画像の解像度地上分解能の評価）

SPOT 衛星の地上分解能 1.5m と Pleiades 衛星の地上分解能 0.5m では、地上分解能（画素の粗さ）の違いから、図 21～SPOT 衛星 地上分解能 1.5m Pleiades 衛星 地上分解能 0.5m

図 38 のように図化される。図化されたベクトルデータを用いて保安距離、保安間隔の計測を行った。また、計測に利用できる衛星画像の地上分解能の評価を行った。

図 39 と図 40 は、対象エリア全体の図化された危険工室等の建物データと仮に 500m とした保安距離の範囲（赤い曲線）を重ねたものである。なお、両衛星画像ともに危険工室等を赤い矩形で記載している。それ以外の建物については、SPOT 衛星は 2 時期のデータを用いており、2015 年画像で確認できる物件を青の矩形で、2022 年画像で新たに確認できた物件を黄の矩形で記載している。Pleiades 衛星は 1 時期（2022 年）のデータを用いており、すべて青色の矩形で記載している。このように、保安距離の範囲を GIS のバッファ機能で算出・設定し、地図上に可視化できることを確認した。

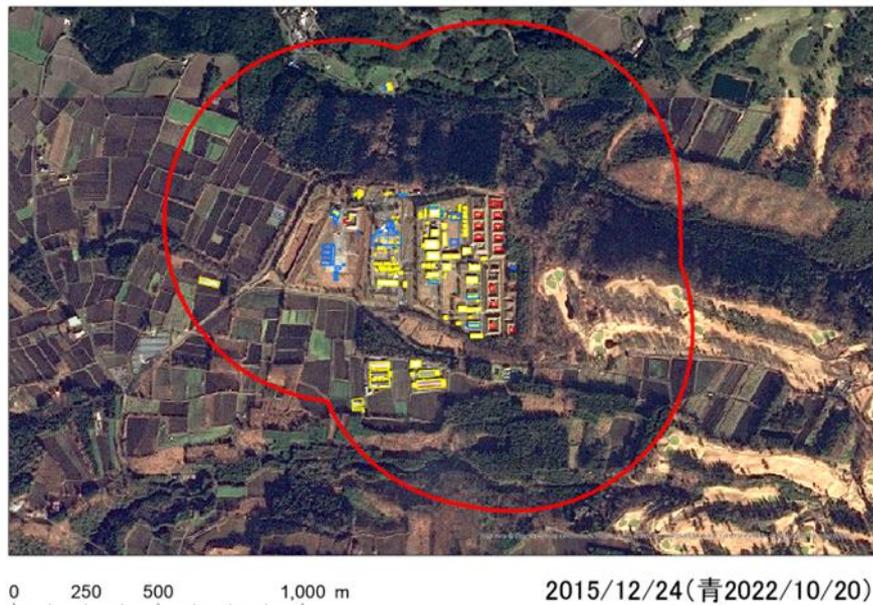


図 39 SPOT 衛星から得られた対象エリア全体の図化された建物データと 500m 保安距離範囲のイメージ(©AIRBUS DS)

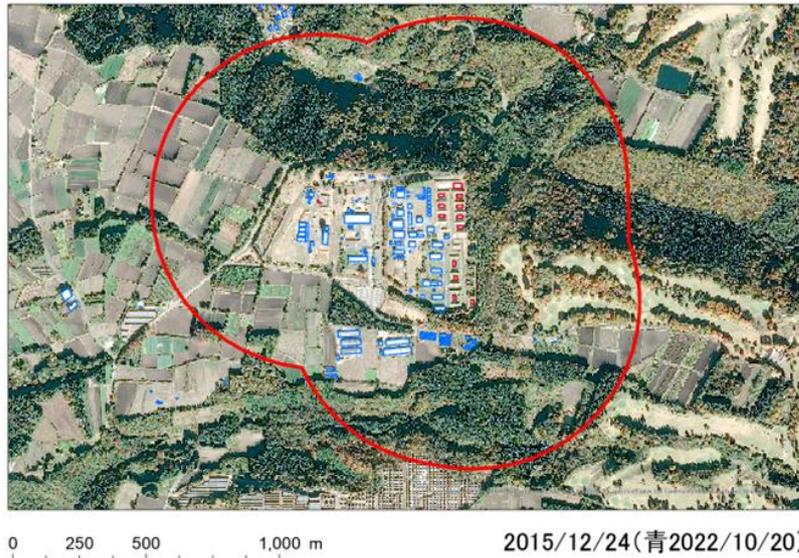
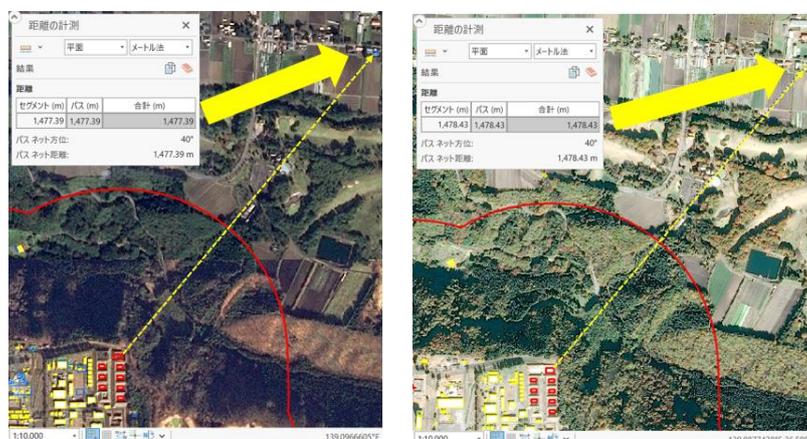


図 40 Pleiades 画像から得られた対象エリア全体の図化された建物データと
500m 保安距離範囲のイメージ(©AIRBUS DS)

保安距離・保安間隔の計測について、対象とした火薬類関連施設内において図化した建物とその建物が隣接する建物との距離を保安間隔とみなして 101 か所計測した。さらに、図化した保安物件と施設内の危険工室等との保安距離を 4 か所計測した（合計 105 か所計測した）。地上分解能の高い Pleiades 画像を用いる方が、より正確な地物の図化が可能であり、それによって距離の計測結果の精度が高いことが想定できる。そこで、SPOT 衛星と Pleiades 衛星の 2 つの衛星から得られた距離の差分を計算し、2 つの衛星画像でどれだけ計測結果に差が生じるのかを確認することで、Pleiades 衛星に比べて地上分解能の低い SPOT 衛星でも計測に問題がないかを評価した。

なお、距離の計測では、図化した建物の矩形の最短エッジ間の距離を直線状に計測した。GIS 上での距離計測の一例として、危険工室から近隣の学校までの距離を GIS によって計測したイメージを以下の図 41 に示す。



SPOT 衛星 1.5m(図化) Pleiades 衛星 0.5m (図化)

図 41 GIS 上での距離計測の一例(©AIRBUS DS)

(黄色矢印の指示先に学校。点線矢印が距離計測のイメージ)

SPOT 衛星及び Pleiades 衛星の地上分解能の違いによる保安間隔の計測差は表 6 の通りである。

表 6 2つの衛星画像をもとに計測した保安距離・保安間隔とその差

保安距離・保安間隔 (m)			保安距離・保安間隔 (m)			保安距離・保安間隔 (m)			保安距離・保安間隔 (m)						
番号	SPOT画像	Pleiades画像	差	番号	SPOT画像	Pleiades画像	差	番号	SPOT画像	Pleiades画像	差	番号	SPOT画像	Pleiades画像	差
1	47.41	46.49	0.92	28	113.74	113.91	-0.17	55	95.6	97.68	-2.08	82	106.13	104.37	1.76
2	664.05	664.05	0	29	97.71	98.44	-0.73	56	98.97	98.7	0.27	83	100.29	100.61	-0.32
3	1936.17	1934.24	1.93	30	97.42	97.1	0.32	57	110.89	111.27	-0.38	84	97.48	98.03	-0.55
4	898.44	900.62	-2.18	31	97.25	97.8	-0.55	58	104.17	104.43	-0.26	85	135.24	135.12	0.12
5	1570.53	1571.03	-0.5	32	99.61	100.13	-0.52	59	100.07	100.73	-0.66	86	124.51	124.51	0
6	28.94	29.3	-0.36	33	105.02	103.97	1.05	60	97.72	98.02	-0.3	87	115.92	115.38	0.54
7	28.38	29.38	-1	34	110.63	110.87	-0.24	61	97.34	97.12	0.22	88	109.03	108.33	0.7
8	34.58	35.11	-0.53	35	118.86	119.16	-0.3	62	96.66	98.81	-2.15	89	103.33	102.1	1.23
9	29.2	29.4	-0.2	36	66.13	66.66	-0.53	63	100.39	101.27	-0.88	90	98.36	99.09	-0.73
10	28.93	28.65	0.28	37	52.32	52.94	-0.62	64	103.1	103.19	-0.09	91	96.89	97.43	-0.54
11	33.36	33.13	0.23	38	40.56	40.71	-0.15	65	88.35	87.55	0.8	92	171.59	171.57	0.02
12	43.95	42.25	1.7	39	31.43	31.98	-0.55	66	74.56	73.36	1.2	93	159.43	159.38	0.05
13	54.72	55.09	-0.37	40	29.45	28.77	0.68	67	59.85	59.68	0.17	94	147.28	147.17	0.11
14	69.14	68.51	0.63	41	28.65	29.84	-1.19	68	47.27	46.64	0.63	95	136.43	136.63	-0.2
15	30.94	31.3	-0.36	42	36.72	36.89	-0.17	69	35.97	35.91	0.06	96	126.01	125.65	0.36
16	29.33	29.28	0.05	43	58.63	58.61	0.02	70	29.8	30.69	-0.89	97	116.13	116.31	-0.18
17	30.4	30.72	-0.32	44	45.37	45.18	0.19	71	95.71	93.88	1.83	98	107.9	108.26	-0.36
18	38.29	38.42	-0.13	45	35.11	35	0.11	72	80.2	78.84	1.36	99	164.73	165.25	-0.52
19	50.63	49.72	0.91	46	29.51	30.31	-0.8	73	66.48	65	1.48	100	152.13	151.78	0.35
20	64.01	63.22	0.79	47	29.1	29.46	-0.36	74	53.1	52.09	1.01	101	141.22	140.25	0.97
21	77.41	77.46	-0.05	48	32.84	33.77	-0.93	75	41.57	39.61	1.96	102	130.44	130.03	0.41
22	100.23	100.16	0.07	49	42.96	43.13	-0.17	76	30.96	32.2	-1.24	103	120.83	119.51	1.32
23	98.42	97.29	1.13	50	115.91	116.22	-0.31	77	29.06	30.16	-1.1	104	110.28	111.87	-1.59
24	97.51	97.46	0.05	51	107.81	108.2	-0.39	78	140.75	141.78	-1.03	105	103.61	104.35	-0.74
25	99.57	98.11	1.46	52	103.22	102.19	1.03	79	129.68	130.56	-0.88	平均	-	-	-0.068
26	101.94	100.73	1.21	53	100.57	99.25	1.32	80	120.81	120.46	0.35	標準偏差	-	-	1.134
27	105.52	106.53	-1.01	54	97.05	97.23	-0.18	81	112.61	112.26	0.35				

図 42 より SPOT 衛星と Pleiades 衛星の地上分解能の違いによる計測のずれ幅の最大値は 2m 程度である。これは、地図情報レベル 5000 で許容される水平位置の許容誤差 3.5m の範囲内であり、予め抽出された建物間の距離の計測に関しては地上分解能 1.5m の SPOT 衛星でも十分と評価した。

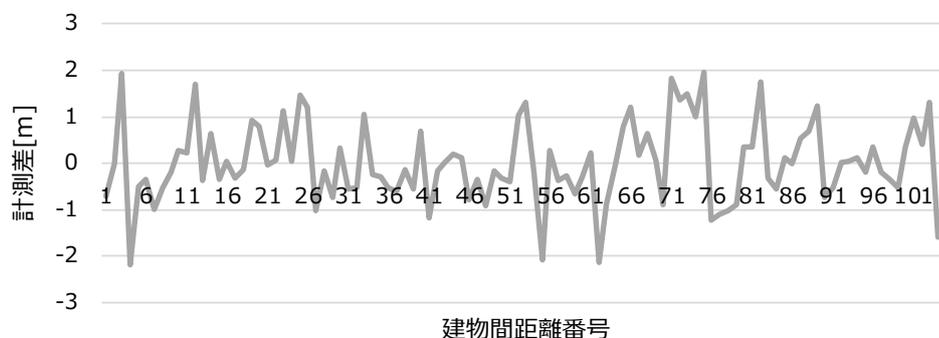


図 42 SPOT 衛星と Pleiades 衛星の建物間の計測差 (m)

(3) 人工衛星画像の業務への適用可否の考察

本実証を通して、SPOT 衛星及び Pleiades 衛星による保安物件の視認性、位置精度を検証した。

実証の結果、実証地域内の保安物件のうち、SPOT 衛星では建物ではない競技場や公園等の一部の保安物件が判読困難であった。一方で、Pleiades 衛星では明瞭に確認できた。計測に利用できる衛星画像の地上分解能については、SPOT 衛星画像上の計測値と Pleiades 衛星画像上の計測値の差は、最大で 2m 程度であり、SPOT 衛星でも問題なく計測できることが確認できた。

したがって、新規の保安物件候補を検出する際には、Pleiades 衛星を用いることが必要だが、位置精度の観点からは地上分解能 1.5m の SPOT 画像でも十分な性能を有しており、予め把握されている建物間の距離の計測に関しては適用が可能である。

なお、SPOT 衛星と Pleiades 衛星のいずれも保安物件の属性の確認は、別途、地図情報を重ね合わせる必要がある。今後の展望として、現在、Pleiades 衛星を用いて、AI による建物自動図化のモデルが開発されており、今後の AI を活用した保安物件の自動抽出が期待出来る。

定期的に観測される人工衛星画像のアーカイブ画像の調達価格は SPOT 衛星で 6,100 円 (100k m²)、Pleiades 衛星で 60,000 円 (25k m²) であり、ヒアリングの結果からも、費用を理由に人工衛星画像の活用自体が否定されることは無いと考えられる。したがって、本実証に用いた技術を用いた検査は、撮影機会やコストの観点からは、年に 1 回以上の保安物件等の確認が可能であることが分かった。

3.2.2 IoT インフラ遠隔監視システムによる実証

IoT インフラ遠隔監視システムによる実証については、以下の「結果及び評価・分析」を勘案して評価を実施した。

(1) データ取得及び技術実証の実施結果 (設置方式・精度・検知可能な変状の種類と限界の評価)

実験 1 及び実験 2 それぞれの設置した機器の起動から、計測結果を取得、データ送信までが正常に行われたことを確認した。それぞれの収集データからその結果を示す。

(ア) 実験 1 の結果 (設置方式・精度の評価)

丁張り方式、延長棒方式及び伸縮計の計測結果を図 43 に示す。ボードを人力で平行に約 5 mm ずつ下に移動させる操作から、経過時間とともに、それぞれの方式による変位が増加していることが確認された。できる限り経過時間に比例したボードの移動を行い、すべての方式で直線的な変位を検出する結果となった。

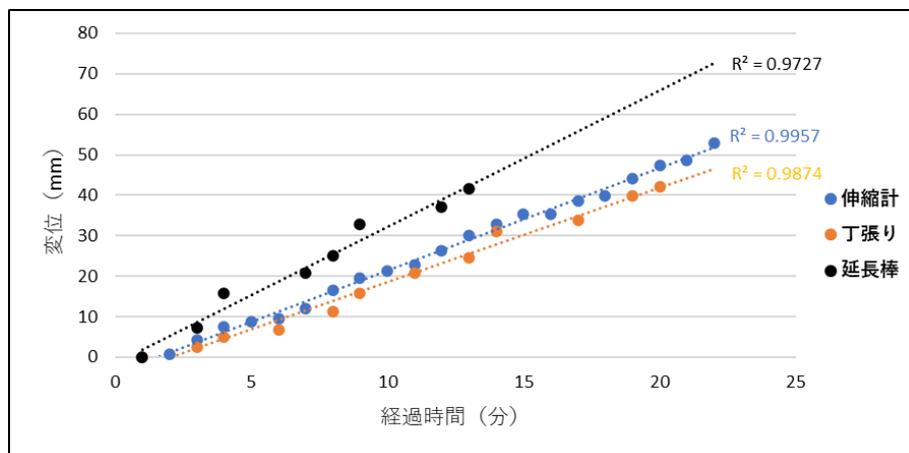


図 43 それぞれの方式による変位計測結果

また、方式の違いにより変位の傾きに差があることから、伸縮計の計測結果を基準として、丁張り方式及び延長棒方式との変位の差分を図 44 に示す。

現地での実験時にはボードを平行移動するように努めていたが、開始 4 分までの間ではボードが平行移動していなかった。開始 4 分までの平行移動からのズレが、延長棒方式の変位を大きくした要因であると推測される。よって丁張り方式、延長棒方式及び伸縮計との差分比較は実験開始 4 分後からとした。

伸縮計と丁張り方式及び延長棒方式との変位の差分は、 $\pm 5\text{mm}$ 以下となっており、すべての方式で概ね同等の変位を検出する結果となった。

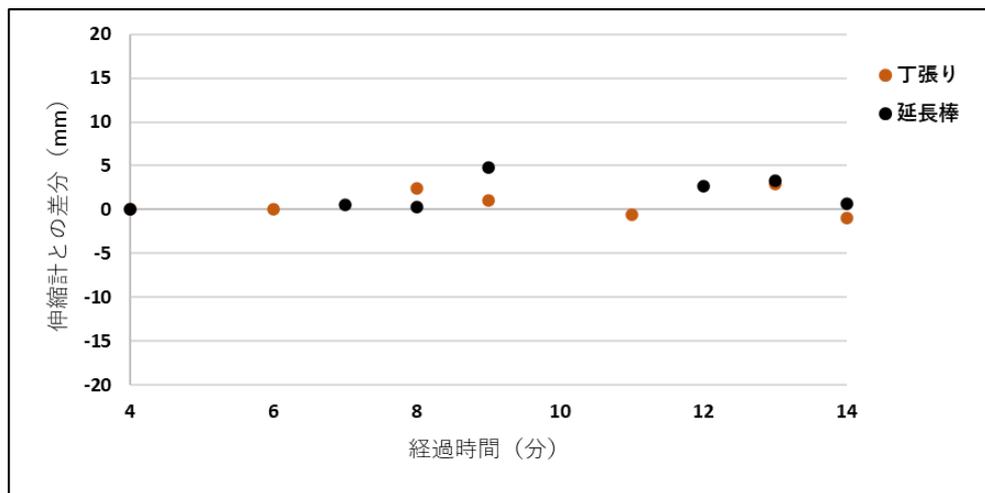


図 44 伸縮計と丁張り方式及び延長棒方式との変位の差分

以上のことより、それぞれの方式による IoT センサの挙動は、一定の精度が担保されていることが確認でき、検証用盛土構造物による現地実験の結果から、土堤における常時監視への適用が期待できる結果となった。

(イ) 実験 2 の結果（検知可能な変状の種類と限界の評価）

丁張り方式、延長棒方式及び伸縮計の計測結果を図 45 に示す。バックホーで鉄板を徐々に牽引して、法面の崩壊を意図的に発生させる操作を行い、IoT センサのアラームメール発信の基準値（約 40mm）の変位を超えるまでの挙動を確認し、その時のデータを収集した。

実験の開始から約 14 分後に丁張り方式、約 18 分後に延長棒方式でアラームメールが発信されることが確認された。また、現地の状況からは約 18 分後に盛土構造物の崩壊（地割れ）が始まったことが確認された。

盛土構造物の崩壊（地割れ）が目視確認できたタイミングと、延長棒方式のアラームメールはほぼ同じ時刻となったが、丁張り方式は、崩壊（地割れ）よりも約 4 分前にアラームメールが発信された。この結果は、土堤崩壊の開始とアラームメールが必ずしも同じタイミングになるとは限らず、センサで検知できる変位の挙動から、土堤の崩壊が目視確認できる前の状態においても法面の異常が検知できる可能性があると言える。

土堤自体の比較的大規模な崩壊（地割れ）に伴う、崩壊初期の変位から検知が可能であ

り、アラームメールの発信によって崩壊の発生自体のリアルタイムの把握、及び計測結果を確認することでその直前の挙動の確認ができることが分かった。一方で、本実証に用いた IoT センサは変位の測定範囲が最大 40mm となることから、それ以上の変位の計測は不可能であり、検知可能な変位の限界である。以上のことより、IoT センサの挙動から比較的大規模な法面の異常発生を検知できる結果となり、土堤における崩壊等の異常発生に対して、適用が期待できる結果となった。

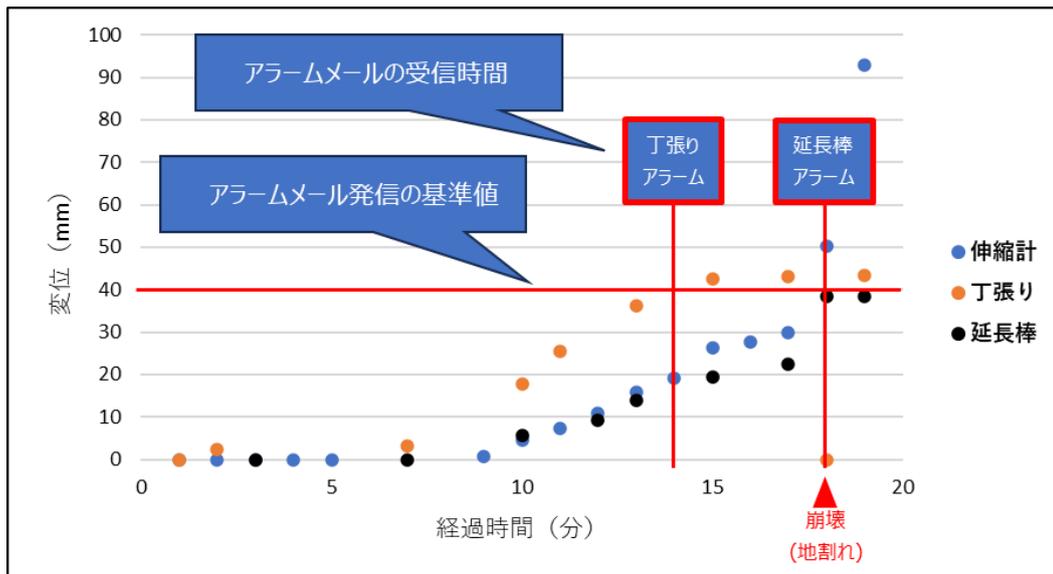


図 45 それぞれの方式による変位計測結果とアラームメール受信時間の関係



図 46 盛土構造物の崩壊（地割れ）の状況と受信アラームメール

(2) 長期的なデータ取得・通信試験の実施

本実証で用いた丁張り方式と延長棒方式での一定程度の長期間データ取得が可能であることを検証するため、検証用盛土構造物での現地実験とは別の場所で、静置した場合のデータ検証を行った。実験場所は通常は人の立ち入らない平地な場所を選定し、常時監視を行うことにより、その挙動を確認した。

(ア) 実験場所

株式会社パスコ関連会社（埼玉県内）



(イ) データ取得期間

2023年12月4日（月）12:00～2024年2月12日（月）11:50

※ 10分間隔 / 10,080データ（70日分データ）

(ウ) 実験の結果

丁張り方式、延長棒方式ともに、長期において連続的な観測とデータ取得を行うことができた。両方式を比較した場合、丁張り方式が延長棒方式より変位差が大きくなる傾向が見られた。これは両方式に使用されている部材の熱膨張（温度の上昇によって物体の体積や長さが膨張する現象）の違い等の理由が考えられる。

本実証の目的である土堤における崩壊等の検知に対しての基準値（約 40mm）と比較した場合、長期的な観測としては、両方式ともに十分な精度が得られたと考えられる。

このことより、土堤における観測への適用が期待できる結果となった。

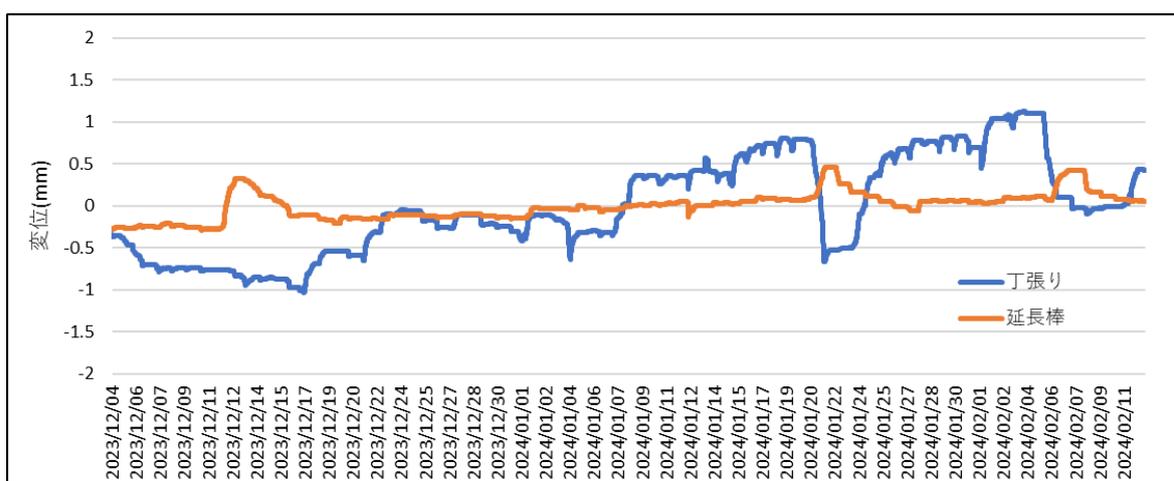


図 48 長期的なデータ取得の実験結果

(3) 火薬類関連施設事業者への適用性の評価

IoT センサによる現地実験に先立ち、実際の土堤やその形状、危険工室との相対的な配置を確認するため、「日本火薬工業会」の参加団体への視察を行った。また、実際の土堤での IoT インフラ遠隔監視システム活用の可能性や関係法令のヒアリングを行った。

その結果、火薬類関連施設の土堤運用実態を踏まえ、平時におけるモニタリングによる“安心感”の確保はもとより、台風や地震等の緊急時における“異常の発生”を検知することにより、事業者の土堤確認の迅速性や職員の安全性への寄与、また関係者間の連絡や認識漏れを無くし、復旧に向けての迅速性に寄与する可能性がある旨のコメントを得られた。

参加団体からのヒアリング結果を元に、表 7 に火薬類関連施設事業者への IoT インフラ遠隔監視システムの適用性の評価結果を示す。

表 7 火薬類関連施設事業者への適用性の評価

事業者への適用性 (期待される効果)	事業者への適用性 (期待される効果) の内容	評価
安心感の確保	平時においてモニタリングしていることの安心感	可能性あり
異常発生の検知	台風や地震等の緊急時における“異常発生”の検知	可能性あり
職員の安全性確保	事業者の土堤確認の迅速性や職員の安全性への寄与	可能性あり
連絡ミス防止	関係者間の連絡や認識漏れの防止	可能性あり
復旧の迅速性	復旧に向けての迅速性に寄与する可能性	可能性あり

(4) IoT インフラ遠隔監視システムの設置安全性の評価

本実証の目的は、危険工室等を囲む土堤への設置についての検証を行うものであるため、通信機器である IoT センサ (Infra Eye) の通信による発火の可能性を、システムの設置安全性として評価した。

2.1.2(2)(ア)で前述したとおり、Infra Eye の無線通信規格は、「送信電力：+21dBm (0.13W)」となっている。小阪・黒木・加藤^{2,3}は、携帯電話の出力 (0.8W) を踏まえ、「最も良い条件下で 100%無線電源のエネルギーが電気雷管に入れば周波数にほとんど無関係に無線電波出力 0.8W 以上は電気雷管を発火するエネルギーを持ち、その可能性がある。」と結論付けている。

以上の事から、携帯電話の出力 (0.8w) と比較した場合、Infra Eye の送信電力 (0.13W) は明らかに低いこと、また、危険工室等を囲む土堤へ実装する場合には、電気雷管 (電気着火する仕組み) に Infra Eye が近接する可能性は限りなくゼロであることから、発火の可能性は低いと考えられる。

また、前述の「日本火薬工業会」の参加団体への視察の際には、電気雷管が土堤付近にない場合、土堤への通信機器の設置についてはほとんどの場合問題がない旨のコメントも得られた。

機器仕様と文献調査の結果を基に、表 8 に機器仕様と文献調査による IoT インフラ遠隔監視システムの評価結果を示す。

表 8 機器仕様と文献調査による IoT インフラ遠隔監視システムの評価

設置安全性の観点	設置安全性の評価方法	得られた結果
Infra Eye の送信電力	送信電力 (0.13W) の安全性評価	安全性は高い
電気雷管との近接性	土堤の設置により電気雷管への近接があるか	近接する可能性は低い

² 小阪安則・黒木和弘・加藤浩之,[2003],「無線電波に対する電気雷管のエネルギー受信特性」,『火薬と保安 35(1),21-26』(公益社団法人全国火薬類保安協会)

³ 小阪安則・黒木和弘・加藤浩之,[2003],「高周波エネルギーに対する電気雷管の発火特性」,『Science and Technology of Energetic Materials 329 号 Vol.64,No,2』(一般社団法人火薬学会)

(5) 火薬類関連施設へのIoT インフラ遠隔監視システム機器設置の適用性の評価

上記したとおり、現地実験に用いた各方式の計測結果（設置方式・精度・検知可能な変状の種類と限界の評価）、火薬類関連施設事業者への適用性の評価、IoT インフラ遠隔監視システムの設置安全性の評価結果から、土堤における崩壊等の異常発生に対して、IoT インフラ遠隔監視システムの適用が期待できる結果となった。

これまでの結果を踏まえ、総合的な評価と実際の土堤適用に向けての考察を行う。

(ア) 技術実証の結果分析と実際の土堤への実用可能性の考察

本実証では、丁張り方式と延長棒方式の2種類の方式により現地実験を行った。その結果、測定精度や機器の安全性については、同等と位置づけられた。

一方で、実際の土堤への実用可能性としては、材料費の多寡、機器設置の簡便性や利便性、土堤のある現地への輸送などを考慮する必要がある。実際の土堤への実用に向けて、各方式で得られた結果の違いを表9に示した。

表9 機器設置方法（方式種別）の違い

方式種別	材料費 コスト	総重量 (※)	作業工数 (設置時間)	設置作業 難易度	測定精度	機器の 安全性
丁張り方式	安価 約4千円	約5.2kg	約1時間 /2人	易しい	良好	高い
延長棒方式	高価 約25千円	約8.6kg	約2時間 /2人	難しい	良好	高い

※ IoT センサ (Infra Eye) を含めた各方式の総重量

両方式を比較すると、丁張り方式の方は部品点数が少なく、コスト、総重量及び設置作業の簡便性で優位な結果となった。これは現地への輸送コストや輸送手段についても優位と言える。

また、現地実験から得た感触として、装置の組立てや設置作業においても、丁張り方式の方が扱いをしやすいことから、現地の工事業者へ設置を委託する際にも、優位になると推測できる。

(イ) 技術実証の評価と設置基準（案）の考察

本実証の目的である、「危険工室等を囲む土堤について、IoT 技術を活用した遠隔監視センサによって常時監視し、土堤における崩壊等の異常の発生をリアルタイムに検知可能であることの実証」においては、一定の成果が得られた。今後実際の土堤への実用に向けて、設置基準（案）を考察する。

ヒアリング結果、及び土堤の法的な設置趣旨や用途を鑑みると、通常の風雨による水みちや軽微な欠損は修繕等の対象とされず、検出の主体にはならないことから、相当規模の物理的なインパクトからの崩壊等を想定した運用が適切と考えられる。その理由から、数メートルピッチの設置間隔は必要ではなく、土堤の4方向に各1箇所の設置を基準にすることを提案する。

また、崩壊時には電波の発生する通信センサ (Infra Eye) が土砂とともに流れ落ちる可能性があることから、機器は危険工室の反対側の土堤法面に設置することを提案する。

設置基準は案であり、実際の土堤の状態や状況、想定される災害の種類（地震や台風などの地域差）など、実態を踏まえて今後検討していく必要がある。

表 10 設置基準（案）

項目	設置基準	備考
設置箇所	土堤の4方向（合計4箇所）	相当規模の崩壊等を想定
設置方向	危険工室の反対側の土堤法面	崩壊等時の安全性を考慮
設置方式	丁張り方式	安価・設置の簡便性・利便性を考慮
※ 設置には、実際の土堤の状態や状況、想定される災害の種類を考慮すること。		

（ウ）今後の課題と将来展望

本実証を通して得られた結果及び「日本火薬工業会」及びその参加団体のヒアリングを通して、以下の課題が見えた。

1 点目は、土堤の上下方向における設置箇所の課題である。本実証では検証用盛土構造物の天端から下方に向けて約 2メートルの区間で杭打ちを行い、その間の変位を確認した。実際の土堤は大小があるため、土堤の上端から下端のどの部分への設置が有効であるかの課題が残った。参加団体へのヒアリングにおいても、「土堤崩壊の過程は様々な要因や崩れ方のパターンがある。」とのコメントがある事から、上下方向の設置箇所については今後の検討を要する。また、杭打ちの間隔を広げた場合の検証を行うなど、設置方式の改良の余地もある。なお、横方向の設置間隔については、（イ）において設置基準（案）として整理した通りであるが、より大型の土堤を対象とする場合等には、設置基準の再検討も想定するべきである。2 点目は、IoT センサ（Infra Eye）の通信環境が途絶えた時の対応の課題である。Infra Eye の無線通信規格は、DOCOMO または KDDI の LTE Cat.M1 方式を採用していることから、大規模災害の発生時にネットワーク障害があった場合には、当然にアラーム発信なども行われぬ。Infra Eye は通信が遮断された場合には、3日間分のデータを保持し、通信環境の復旧後、その3日間データの抽出が可能となるが、即時性の求められる、火薬類関連施設事業者の異常発生の検知、職員の安全性確保、関係者間の連絡などに支障がでる可能性もあるため、こちらも今後の検討課題とする。

3 点目は、万が一危険工室等において爆発が起こった際の、機器の飛散防止策や、飛散した場合の影響に関する課題である。設置する機器は設置部材の選定においても軽量の木材や CFRP 素材を採用し、表 9 の通り IoT センサ（Infra Eye）本体を含めた機器の総重量は比較的軽量ではあるが、今後具体的な飛散防止策、あるいは飛散した場合の影響に関して検討する必要がある。

以上の課題を踏まえた将来展望としては、実際の土堤への適用を実現し、そのモニタリングから課題解決を図っていくことが望ましく、また火薬類関連施設の土堤以外の工作物への適用も検討が必要である。さらには、複数の火薬類関連施設事業者の土堤運用の実態を踏まえ、崩壊等が起こった場合の影響が大きく、優先的に監視すべき場所など、より実態にあった適用性の評価に結びつけることが必要である。

3.2.3 まとめ

本実証においては、「人工衛星画像を用いた実証」、及び「IoT インフラ遠隔監視システムによる実証」の二つの技術テーマで技術実証を実施し、前項までの通り、それぞれの技術実証において一定の適用可能性を確認することができた。

また、火薬関連施設等における定期的な保安検査においては、当然に法令に則った保安距離等の計測・検査が行われているが、実際には施設の安全操業や近隣の安全確保のため、日常的な点検や、点検とは位置づけられる以前の従業員による勤務中・通勤途上での観察等によって、施設周辺の土地利用の変化や土堤の変状等が把握されていることが事業者等へのヒアリングからも、うかがうことができた。

本実証で行った人工衛星による観測と IoT インフラ遠隔監視システムによる監視は、ここで改めて述べるまでも無く、いずれもリモートによる観測・監視技術であるが、片や宇宙からの観測によって数 km から数十 km という観測幅で地表の姿を捉える技術、片や構造物等の変状を数 mm 単位で捉える技術である。かつ、いずれも運用方法によって、途切れなく継続的に観測・監視が出来ることが特長と言える。

また、本実証で技術実証を行った二つの技術は、従来の目視や現地計測を伴う法定点検業務をデジタル技術で直接的に代替することだけでなく、デジタル／リモート技術によって、事業者が日常的に行っている点検等についても、それらを補完し、より網羅的で見逃しの無いものにする可能性を示唆していると考えられる。

用語集

用語	定義・解説
中分解能衛星	地球観測衛星は、地上を撮影するセンサの性能により、高分解能（1m 未満）、中分解能（1m 以上～30m 未満）、低分解能（30m 以上）に分類される
地図情報レベル	デジタル地図における測定の精度を表す尺度。高レベルほど細かい道路や建物が描かれる。地図情報レベル 2500 は、縮尺 1/2500 に相当する。
図化 (デジタル図化)	撮影された人工衛星画像を調達し、地形や地物（建物や道路など）の正確な位置や形状をデジタル化する作業のこと。専用の図化機、または、GIS ソフトウェアを用いて行う。最近では、AI によって自動抽出する手法が開発されたが、衛星画像の高分解能化や適切な学習が必要である。
SPOT 衛星	フランスの Airbus DS 社が製造・打ち上げ・運用する商業用の人工衛星である。2012 年に SPOT-6 が、2014 年に SPOT-7 が打ち上げられた。人工衛星の高度は 694km、軌道は太陽同期準回帰であり、一定の周期で同一時刻に特定の地点の上を通過する。撮影される衛星画像の地上分解能は 1.5m、観測幅は 60km である。
Pleiades 衛星	フランスの Airbus DS 社が製造した高分解能の人工衛星で、Pleiades-HR（2011・2012 年打ち上げ）と PleiadesNeo（2021 年打ち上げ）がある。前者は、高度 694km、画像の地上分解能 50cm、観測幅 20km である。後者は、高度 620km、画像の地上分解能 30cm、観測幅 14km である。
保安距離	火薬類関連施設が、所外の保安物件（市街地の家屋、学校、病院等の万一の発火又は爆発による影響から保護しなければならない物件）に対して確保しなければならない距離。
保安間隔	火薬類製造所内の他の施設に対して確保しなければならない距離。
IoT	センサやデバイスといった「モノ」がインターネットを通じてクラウドやサーバーに接続され、情報交換することにより相互に制御する仕組み。
GIS	地理情報システム（GIS : Geographic Information System）は、地理的位置を手がかりに、位置に関する情報を持ったデータ（空間データ）を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術。
丁張り	建築や土木・建設の工事の前段階として、木杭や水糸を用いて“施工の基準となる仮設物”を造る作業。
CFRP	カーボン繊維強化プラスチック。軽くて強度が高く、温度変化の影響が少ない。
土堤	土を小高くもって作られた水や風を防ぐ堤防。
LTE Cat.M1 方式	省電力、即時性、信頼性に優れた既存 4G LTE の携帯電話通信網

用語	定義・解説
	を利用する LTE 標準規格。
法面	切土や盛土によって作られる人工的な斜面のこと。堤防の斜面など。
トレンチ	細長い発掘溝のこと。塹壕 (ざんごう)。