

新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全
に関する調査検討報告書

令和5年3月

新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討会

はじめに

近年、各種構造物の保守点検等においては、撮影機器を搭載したドローン、AI、IoTなどの新技術を活用したモニタリング等の導入が進められてきており、屋外貯蔵タンクの定期点検等においてもこうした新技術の導入が望まれていたところである。一方、屋外貯蔵タンク周囲には危険区域が設定されていたことにより、防爆製品の開発がなされていない新技術は、タンク供用中の定期点検に用いることができない状況にあった。

こうした中、令和3年度に消防庁で実施した「危険物施設におけるスマート保安等に係る調査検討会」の検討結果を踏まえ、屋外貯蔵タンク周囲の危険区域に関し、一定の合理化が図られることとなり、ドローンをはじめとした非防爆の可搬式機器がタンク運用中においても持ち込むことが可能となった。このことから、タンク高所の点検課題解決の方策としてドローンを活用した点検方策に関する調査及び検討を行ってきたところである。

今回の調査検討では、事業者やドローン事業者等へのヒアリングから屋外貯蔵タンクにおけるドローン点検の課題を抽出し、当該課題を解決するための実証実験を行ったうえでドローン点検の有効性を確認し、ドローンを活用した点検方法に係るガイドラインを取りまとめることができた。

本報告書を取りまとめることができたのは、御多忙中にもかかわらず積極的に調査検討に参加され、貴重な御意見を頂いた委員等の御尽力によるところが大であり、厚く御礼を申し上げます次第である。

この調査検討結果が、危険物施設の安全性向上に寄与することができれば幸いである。

令和5年3月

新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討会

座長 辻 裕 一

目 次

第1章 調査検討の概要	5
1. 1 調査検討の目的	7
1. 2 調査検討事項	7
1. 3 検討体制	7
1. 4 検討経過	8
第2章 検討の背景と各種調査結果	9
2. 1 検討の背景	11
2.1.1 屋外タンク貯蔵所で行われる定期点検	11
2.1.2 従来の直接目視によるタンク側板等の点検とその課題	11
2.1.3 175号通知発出前のドローンの飛行位置	12
2.1.4 175号通知発出後のドローンの飛行位置	13
2. 2 ドローンを活用した点検に向けた課題と調査検討の方針	13
2. 3 国内におけるドローンに関係する法令の調査結果	14
2. 4 ヒアリング調査の概要と調査結果	15
2. 5 ドローンに搭載可能な腐食の定量化技術に関する調査結果	16
2. 6 ドローンにより取得した点検データの活用・管理方法に関する調査結果	17
2. 7 その他の調査	18
2. 8 実証実験の検証対象項目	19
2. 9 実証実験の検証対象外項目	20
第3章 ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの点検方法の検討	21
3. 1 実証実験（1回目）	23
3.1.1 実証実験の目的	23
3.1.2 実証実験の概要	23
3.1.3 実験内容及び結果	25
3.1.4 実証実験（1回目）のまとめ	42
3. 2 実証実験（2回目）	45
3.2.1 実証実験の目的	45
3.2.2 実証実験の概要	45
3.2.3 実験内容及び結果	46
3.2.4 実証実験（2回目）のまとめ	61
第4章 まとめ	63
4. 1 まとめ	65
4. 2 今後の課題	65

別記	ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの側板等の点検に係るガイドライン67
参考資料 1	航空法の規制・制度の詳細75
参考資料 2	ヒアリング調査結果の詳細85
参考資料 3	腐食の定量化技術の詳細95
参考資料 4	ドローンにより取得した点検データの活用・管理方法に関する調査結果 の詳細 101
参考資料 5	ドローン以外でタンクの予防保全に活用できる可能性のある技術 107
参考資料 6	ドローンを活用した点検と既存の直接目視点検のコスト比較 115

第 1 章 調査検討の概要

第1章 調査検討の概要

1. 1 調査検討の目的

各保安分野では新技術の導入が進展しており、我が国の高経年化が進んだ大規模な屋外貯蔵タンクの点検においても安全性、効率性を高める新技術の導入により効果的な予防保全を行うことなど、スマート保安の実現が期待されている。屋外貯蔵タンクの側板上部など高所の点検は、従来から目視点検を中心に実施されてきたところであるが、詳細な点検を行うには、仮設足場やゴンドラ等の設置が必要であり、安全面や費用面に関する課題が残されていた。

近年、各種インフラ構造物等に対しては、撮影・測定機器等を搭載した無人航空機（以下「ドローン」という。）を活用した点検の導入が点検作業の高度化、効率化に大きく寄与している。従来、屋外貯蔵タンク周囲には危険区域が設定されており、防爆型の製品開発が進んでいないドローンを維持管理点検に導入することは難しい状況であったところ、令和3年度に消防庁で開催した調査検討会の結果を踏まえ、「屋外貯蔵タンク周囲の可燃性蒸気の滞留するおそれのある場所に関する運用について」（令和4年8月4日付け消防危第175号（以下「175号通知」という。））により、一定の条件下においては、屋外貯蔵タンク周囲は危険区域に該当せず、ドローンその他の可搬式の非防爆構造の電気設備・器具の使用が可能となった。

このような状況を踏まえ、大規模な屋外貯蔵タンクの維持管理の高度化、点検作業のスマート化に向け、新技術のうちドローン等を活用した効果的な予防保全に係る検討することを目的とする。

1. 2 調査検討事項

- (1) 目視代替点検としてドローンを活用する場合の効果的かつ効率的な点検方策の検証及び検討
- (2) 腐食等の定量評価を行うことができる検査技術とドローンを組合せた点検の可否に関する調査
- (3) 定期点検において屋外貯蔵タンクの直近でドローンを飛行させる場合の安全対策に関する検討

1. 3 検討体制

新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討会委員名簿

（五十音順 敬称略）

座長	辻 裕一	東京電機大学 工学部 機械工学科 教授
委員	江藤 義晴	四日市市消防本部 予防保安課長
	瀬上 哲也	横浜市消防局 予防部 保安課長
	田所 諭	東北大学 大学院 情報科学研究科 教授

西 晴樹 総務省 消防庁 消防研究センター 火災災害調査部長
山田 實 危険物保安技術協会 事故防止調査研修センター 統括調査役

事務局 中本 敦也 消防庁 予防課 危険物保安室長
合庭 貴信 消防庁 予防課 危険物保安室 課長補佐
石井 直也 消防庁 予防課 危険物保安室 パイプライン係長
嶋田 椋平 消防庁 予防課 危険物保安室 総務事務官

1. 4 検討経過

検討会の経過は以下のとおりである。

第1回検討会 令和4年 8月 17日
第2回検討会 令和4年 10月 3日
第3回検討会 令和4年 12月 16日
第4回検討会 令和5年 3月 7日

※ 本報告書で使用する略語は以下のとおり

消防法（昭和 23 年法律第 186 号）・・・消防法
屋外タンク貯蔵所のタンク本体・・・・タンク
航空法（昭和 27 年法律第 231 号）・・・航空法

第2章 検討の背景と各種調査結果

第2章 検討の背景と各種調査結果

2. 1 検討の背景

本項では、ドローンを活用した大規模タンクの点検等維持管理の高度化、点検作業のスマート化に向けた検討を実施するに至った背景について記載する。

2.1.1 屋外タンク貯蔵所で行われる定期点検

一定数量以上の危険物を貯蔵する屋外タンク貯蔵所の所有者、管理者又は占有者は、1年に1回以上、屋外タンク貯蔵所が技術上の基準に適合しているかどうかを点検することが法令上、義務付けられている。また、容量が1,000kL以上の液体危険物タンクでは、一定の時期毎に内部開放点検又は保安検査が義務づけられているが、内部の点検に併せてタンク外面の点検も行われるのが一般的である。

表2-1 屋外タンク貯蔵所の定期点検

項目	定期点検 (消防法第14条の3の2)
対象	指定数量の倍数が200倍以上の屋外タンク貯蔵所
時期	1年に1回以上
内容	施設全般が消防法第10条第4項の技術上の基準に適合しているかどうか

2.1.2 従来の直接目視によるタンク側板等の点検とその課題

タンク側板等の点検は、定期点検又は内部開放時の点検において、主として直接目視により行われており、著しい腐食が確認された場合には、当該腐食の定量化を行い、補修の要否が判断される。

従来の直接目視による点検は、地盤面及び階段部等から行われることが多く、この方法ではタンク側板等の全体的な状況が点検できるが、一方で大規模なタンクでは近接目視ができるのは低所及び階段部周辺のみであり、階段部周辺を除く高所については遠望目視とならざるを得なかった。また、地盤面からの目視ではウインドガード等の附属物取付け部には死角が生じることとなり、直接目視が難しい場合があった。(図2-1)

内部開放時の点検では、タンクに足場やゴンドラ等を設置して点検を行うこともあり、この方法であれば、階段部周辺を除く高所や附属物取付け部の死角が生じる箇所であっても近接目視による点検を行うことができる。しかしながら足場等の設置には多大な労力と費用がかかるうえ、高所作業が伴うため、墜落や転落の危険があった。(図2-2)

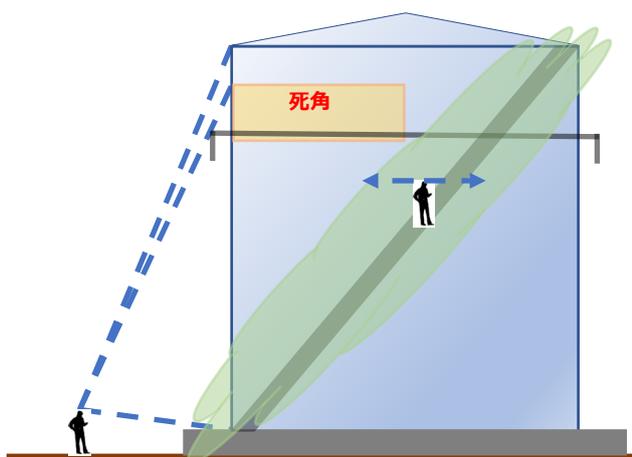


図 2-1 従来の直接目点検

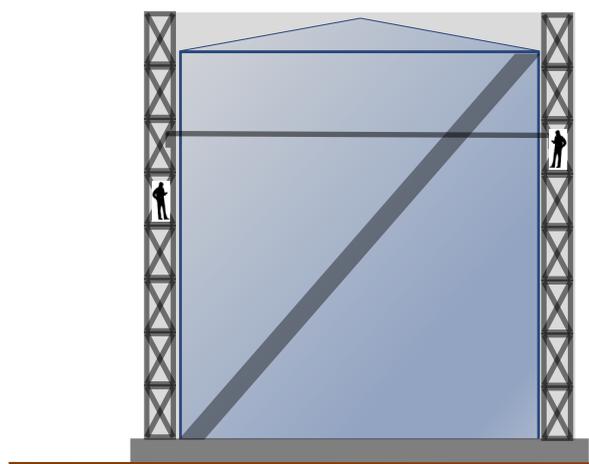


図 2-2 足場を設置して行う点検の例

2.1.3 175号通知発出前のドローンの飛行位置

令和3年3月26日付け消防危第43号「製造所等の定期点検に関する指導指針の整備について」の一部改正について（以下「43号通知」という。）により、危険物施設の定期点検で、目視点検を行うこととしている項目について、検査を実施する者が自らの目視によるときと同等以上の情報が得られると判断した方法であれば、カメラ等の機器を使用することで目視の代替として活用できることが示され、並びに当該機器を使用する際にドローンを活用する場合の留意事項について周知がなされた。しかしながら、従来よりタンクの周囲には危険区域が設定されており、防爆型の開発が進んでいないドローンは、危険区域に進入できないことや防油堤内の危険区域への落下危険を考慮すると、ドローンを活用したタンクの点検は、防油堤の外からでしか行うことができなかった。このため、タンクの点検にドローン導入は進んでおらず、依然として直接目視に頼った点検が行われることが主流であった。

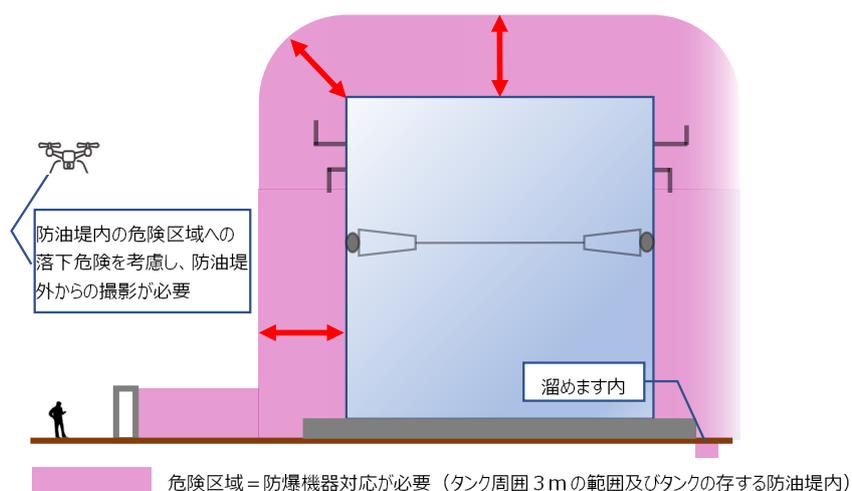


図 2-3 従来の危険区域とドローンの飛行位置

2.1.4 175号通知発出後のドローンの飛行位置

令和3年度に消防庁で実施した「危険物施設におけるスマート保安等に係る調査検討会」では、タンク周囲でドローンやIoT機器の使用を可能とすることを目的として、定常時（危険物の受払いや水切り作業等の特別な作業が行われておらず、貯蔵のみを行っている状態）における可燃性蒸気の滞留状況を測定する実証実験を行っている。この実証実験において、タンクの周囲に爆発性雰囲気となるような濃度の可燃性蒸気は滞留しないことが確認され、令和4年8月4日付け消防危第175号「屋外貯蔵タンク周囲の可燃性蒸気の滞留するおそれのある場所に関する運用について」が発出された。

175号通知により一定条件下での危険区域の合理化が図られたことから、供用中のタンクに接近させたドローン飛行が可能となった。

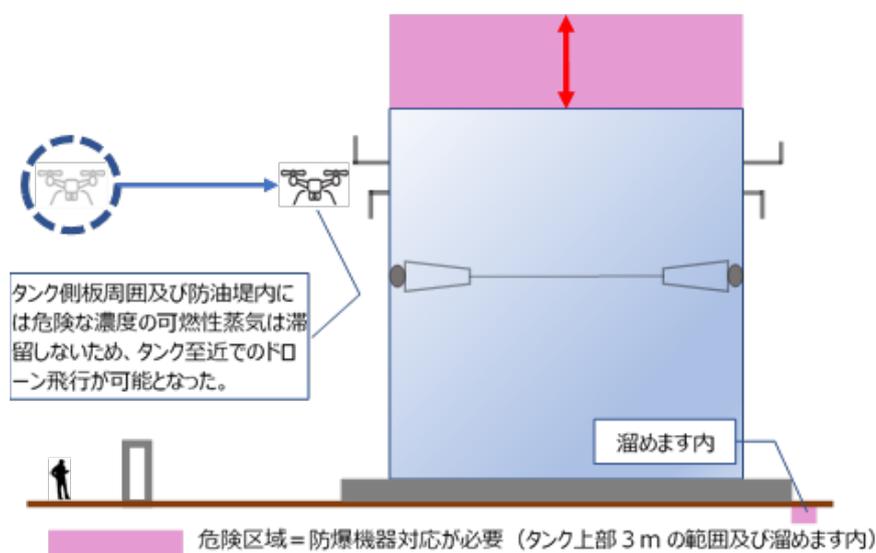


図2-4 175号通知に基づく危険区域とドローンの飛行位置

2.2 ドローンを活用した点検に向けた課題と調査検討の方針

43号通知によれば、ドローンを直接目視点検の代替として使用するためには「検査を実施する者が自らの目視によるときと同等以上の情報が得られると判断した方法」であることが求められるが、具体的にドローンでどのような画像等の点検データが取得できれば直接目視点検の代替とできるかについては示されておらず、どのような条件であれば代替が可能かどうか検討する必要がある。

従来の目視点検で著しい腐食が確認された場合、当該腐食箇所についてケレン作業等を行い、デプスゲージ等の計測機器で腐食深さを定量化したうえで補修の可否を判断しているが、「プラントにおけるドローン活用事例集 Ver. 3.0」P192. 実証実験の事例②屋内（設備内部）での実証実験（令和元年度）によれば、ドローンによりこれらの作業を行うことは困難とされている。

一方で、ドローンに関連する技術は日々進歩しており、ドローンに搭載可能な腐食の定量化技術がないのかどうかについて調査する必要がある。

また、近年ではデータ管理にデジタル技術が活用されており、ドローンで取得した画像等の点検データを効果的に活用・管理できる技術についても調査を実施する。

さらに、これまでタンクの周囲は危険区域とされ、非防爆のドローンをタンクに近接して飛行させることができなかったこともあり、「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver. 3.0」では、プラント内でドローンを飛行させる際の安全対策についての記載はあるが、タンクに近接して飛行させる際の安全対策については言及されていない。175号通知により、一定の条件下であればドローンをタンクに近接して飛行させることが可能となったことから必要な安全対策について検討する必要がある。なお、タンクに近接してドローンを飛行させる際の安全対策については第3章で言及する。

2. 3 国内におけるドローンに関する法令の調査結果

国内でドローンを飛行させる場合、航空法の規制対象となる。

ドローンに関する技術の向上、物流等の利活用へのニーズが高まっていることから、従来は認められていなかったレベル4の「有人地帯における補助者なし目視外飛行」（図2-5参照）を可能とするため、これまでに種々の法整備が進められてきており、令和4年度には航空法が大きく改正された。

これらを踏まえ、航空法におけるドローン飛行に係る規制や制度について調査を行った。

令和4年度中における航空法の改正概要は、表2-2に示すとおり。

航空法の規制・制度の詳細については、参考資料1を参照。

	操縦	自動・自律	
	目視内		目視外（補助者なし）
無人地帯 <small>（離島・山間部等）</small>	レベル1 目視内での 操縦飛行	レベル2 目視内での 自動・自律 飛行	レベル3 無人地帯における目視外飛行
有人地帯			レベル4 有人地帯における目視外飛行

図2-5 飛行レベル

表 2-2 航空法のドローン飛行に係る改正概要

件名	施行時期
(1) 無人航空機の登録制度	令和 4 年 6 月 20 日
(2) 機体認証制度	令和 4 年 12 月 5 日
(3) 無人航空機操縦者技能証明	
(4) 運航に係る手続き等	

2. 4 ヒアリング調査の概要と調査結果

(1) ヒアリング調査の概要

ドローンを点検に活用するに際しての課題抽出等を目的として、令和 4 年 8 月 9 日から 12 月 17 日にかけて、表 2-3 に示す計 19 事業所等に対するヒアリング調査を実施した。なお、ドローンの活用における課題の抽出及びドローンを飛行する上での注意点や対策等の情報収集を目的としたタンク保有事業者、非破壊検査事業者及びドローン関連会社へのヒアリングは実証実験（1 回目）までに実施した。

また、タンク保有事業者、非破壊検査事業者及びドローン関連会社へは表 2-3 に示す主たる目的と併せて腐食の定量化技術やドローンで取得した検査データを効果的に活用・管理できる技術の情報収集についても実施した。

表 2-3 ヒアリング対象と主たる目的

ヒアリング対象	ヒアリング数	主たる目的
タンク保有事業者	9 か所	ドローンの活用における課題の抽出
(石油備蓄)	(2 か所)	
(石油精製事業者)	(2 か所)	
(化学工業事業者)	(5 か所)	
非破壊検査事業者	3 か所	ドローンを飛行させる上での注意点や対策等の情報収集
ドローン関連会社	3 か所	
(ドローンメーカー)	(1 か所)	
(ドローンサービス提供会社)	(2 か所)	
エンジニアリング会社	2 か所	腐食の定量化技術及びドローンで取得した検査データを効果的に活用・管理できる技術の情報収集
地域消防	2 か所	地域間でのドローン活用に対する考え方について意見を抽出

(2) ヒアリング調査結果

タンク保有事業者及び非破壊検査業者並びにドローン関連会社へのヒアリング調査結果から、図2-6に示す各事項が課題として抽出することができた。

図2-6に記載された各課題の中で、太字で示された項目については、実証実験において課題解決のための検証を行うこととした。

実証実験での検証対象もしくは対象外とした理由については、2.8及び2.9で言及する。

ヒアリング調査結果の詳細については、参考資料2を参照。

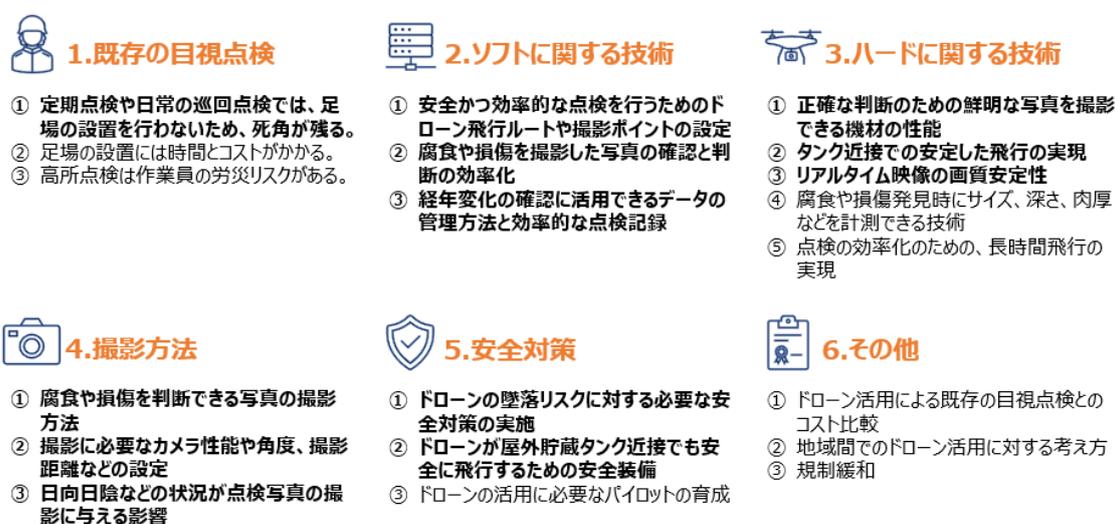


図2-6 ヒアリング調査から抽出した課題

タンク保有事業者及び非破壊検査事業者へのヒアリング中、地域間で消防本部のドローン活用に対する考え方が異なっており、導入の妨げになる可能性があるという意見が出されたことから、地域消防に対してヒアリングを実施した。

結果として、地域ごとにドローン飛行を行う事業者への関わりの深さやドローンを活用した点検への注目度は異なるものの、点検の効率化や異常の早期発見による事故防止に対する期待は高いことがわかり、消防本部の指導がドローン導入を妨げているとは考えられない。

2. 5 ドローンに搭載可能な腐食の定量化技術に関する調査結果

課題抽出のためのヒアリング調査と併せてドローンに搭載可能な腐食の定量化技術について情報を収集した。加えて、海外事例も含めて技術情報の調査を実施した。

調査結果を表2-4に示す。各技術の詳細については、参考資料3を参照。

表 2-4 腐食の定量化技術の調査結果

技術名	目的・用途
UT ドローン（超音波探傷検査）	面探傷検査・肉厚測定
コーティングの膜厚測定	面探傷検査・肉厚測定
ポールドローン＋渦流探傷検査、打音検査	面探傷検査・肉厚測定 劣化箇所の検出
光切断法	傷や錆のサイズ測定
3D 写真計測器	傷や錆のサイズ測定
LIDAR 搭載ドローン	傷や錆のサイズ測定 傷や錆の 3次元情報の取得
EMAT（電磁超音波）	面探傷検査・肉厚測定

現時点では、いずれの技術もドローンに搭載可能で、かつ、現状タンクにおいて点検作業が行っている腐食の定量化を代替することができるという条件を満たすことができず、本調査においてドローンに搭載可能な腐食の定量化技術は見つからなかった。

2. 6 ドローンにより取得した点検データの活用・管理方法に関する調査結果

課題抽出のためのヒアリング調査と併せてドローンで取得した点検データを効果的に活用・管理できる可能性のある技術について情報を収集した。加えて、海外事例も含めて技術情報の調査を実施した。

調査結果を表 2-5 に示す。各技術の詳細については、参考資料 4 を参照。

表 2-5 ドローンで取得した点検データを効果的に活用・管理できる可能性のある技術

技術名	目的・用途
画像解析による腐食箇所のスクリーニング	画像スクリーニング
オルソ画像生成＋点検データ管理	効率的な点検記録の作成
3D 化＋点検データ管理	効率的な点検記録の作成
360 度パノラマ画像＋点検データ管理	効率的な点検記録の作成
飛行ルートの自動生成＋点検データ自動管理	効率的な点検記録の作成 飛行ルート作成の簡易化
統合プラットフォームやデジタルツインと紐付けた管理	効率的な点検記録の作成 データ分析・シミュレーション

これらの技術のうち、ドローンで取得したタンクの検査データを効果的に活用できる可能性があるオルソ画像生成＋検査データ管理技術については、実証実験（1回目）において、画像解析による腐食箇所のスクリーニング技術及び 3D 化＋検査データ管理技術については、実証実験（2回目）において検証することとした。

実証実験の詳細については第3章で言及する。

2. 7 その他の調査

消防庁では令和5年度以降も引き続き、新技術を活用したタンクの効果的な予防保全に関する調査検討を実施する予定であり、ドローン以外でタンクの予防保全に活用できる可能性のある技術について調査を実施した。

ドローン以外でタンクの予防保全に活用できる可能性のある技術の詳細については、参考資料5を参照。

2. 8 実証実験の検証対象項目

ヒアリング調査から抽出した課題（図2-6）及び各種調査結果を踏まえて、実証実験で検証する課題を整理した。

実証実験の検証対象とした課題と検証内容については、表2-6のとおり。

表2-6 実証実験の検証対象とした課題と検証内容

課題	検証内容
<u>1. 既存の目視点検</u> ①定期点検や日常の巡回点検では、足場を設置しないため、死角が残る	・従来の人の目視点検では困難であった箇所の点検にドローンが有効であることの検証
<u>2. ソフトに関する技術</u> ①安全かつ効率的な点検を行うためのドローン飛行ルートや撮影ポイントの設定 ②腐食や損傷を撮影した静止画の確認と判断の効率化 ③経年変化の確認に活用できるデータの管理方法と効率的な点検記録	・ドローンを活用した効率的なタンクの点検について検証
<u>3. ハードに関する技術</u> ①正確な判断の為の鮮明な静止画を撮影できる機材性能 ②タンク近接での安定した飛行の実現 ③リアルタイム動画の画質安定性	・タンクの腐食・損傷の撮影に必要なカメラの性能を確認 ・タンク近接での安定した飛行を実現できるかを検証 ・構内ネットワーク環境やディスプレイ性能等を確認
<u>4. 撮影方法</u> ①腐食や損傷を判断できる静止画の撮影方法 ②撮影に必要なカメラ性能や角度、撮影距離等の設定 ③日向日陰などの状況が点検静止画の撮影に与える影響	・マニュアル飛行での撮影と自律飛行での撮影による効率化の検証 ・腐食や損傷を判断、評価する上で有効な静止画の撮影方法と明るさの確認
<u>5. 安全対策</u> ①ドローンの墜落リスクに対する必要な安全対策の実施 ②ドローンがタンク近接でも安全に飛行するための安全装備	・タンク近接におけるドローンの安全な飛行方法の検証

課題ごとに検証内容を抽出したものの、検証内容によっては重複するものもあることから、実証実験では表2-6に掲載した検証内容を整理し、以下の4項目に関する検証を行うこととした。

- ① タンク近接飛行を行う際の安全対策やドローン運用上の留意事項に関する検証
- ② 腐食・損傷の撮影条件に関する検証
- ③ ドローン飛行方法と点検の効率性に関する検証
- ④ 点検結果の記録方法に関する検証

2. 9 実証実験の検証対象外項目

実証実験の検証対象外とした課題については、表2-7のとおり。

検証自体を行わないものについてはその理由を記載し、実証実験で検証できる項目ではないものの、別に調査等を行うものについては対応方針を記載した。

表2-7 実証実験の検証対象外とした課題

課題	検証しない理由・対応方針
<p><u>1. 既存の目視点検</u></p> <p>②足場の設置には時間とコストがかかる</p> <p>③高所点検は作業員の労災リスクがある</p>	<p>②：コスト比較については、6. その他 ①で検証を実施</p> <p>③：ドローンで点検する際は高所作業が生じないため、検証を要しない。</p>
<p><u>2. ソフトに関する技術</u></p> <p>②腐食や損傷を撮影した静止画の確認と判断の効率化</p> <p>③経年変化の確認に活用できるデータの管理方法と効率的な点検記録</p>	<p>②、③の一部</p> <p>②のうち判断の効率化及び同③のうち経年変化の確認に活用できるデータの管理方法については、実証実験だけでは解決が難しい。</p> <p>③：本検討会における実証実験で複数年にわたり同じ箇所のデータを収集することはできないため、エンジニアリング事業者等へのヒアリングを通してデータの管理や記録方法を調査</p>
<p><u>3. ハードに関する技術</u></p> <p>④腐食や損傷発見時にサイズ、深さ、肉厚などを計測できる技術</p> <p>⑤点検の効率化のための、長時間飛行の実現</p>	<p>④：現状、タンクにおいて点検作業者が近接して行っている腐食の定量化を代替するドローンに搭載可能な技術は見つからなかった。</p> <p>⑤：長時間飛行については、ドローンのバッテリー性能によるところが大きく、開発メーカーに依存する内容であるため、本検討会では検証対象外とした。</p>
<p><u>5. 安全対策</u></p> <p>③ドローンの活用に必要な操縦者の育成</p>	<p>③：操縦者育成については、航空法による技能証明の動向等の調査を実施</p> <p>調査結果については、2. 3を参照</p>
<p><u>6. その他</u></p> <p>①ドローン活用による既存の目視点検とのコスト比較</p> <p>②地域間でのドローン活用に対する考え方</p> <p>③規制緩和</p>	<p>①：足場を設けて近接目視をした場合とドローンで目視代替した場合のコスト比較を実施</p> <p>詳細については、参考資料6を参照</p> <p>②：地域消防に対してヒアリング調査を実施</p> <p>2.4.1の後段に調査結果を記載</p> <p>③：航空法についての調査を実施</p> <p>詳細については、参考資料1を参照</p>

第 3 章 ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの点 検方法の検討

第3章 ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの点検方法の検討

3.1 実証実験（1回目）

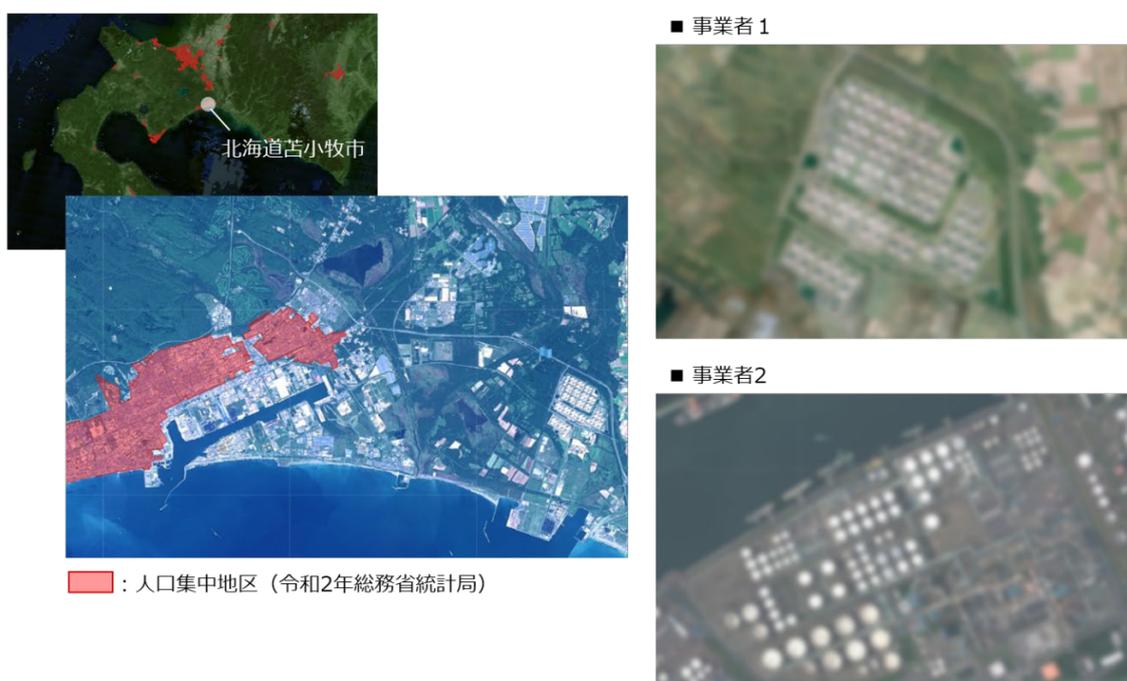
3.1.1 実証実験の目的

第2章で事業者等に対して実施したヒアリングから抽出した課題を解決するため、タンク近接での安全な飛行の実現や、人による直接目視の代替となり得る静止画の撮影方法等を検証し、ドローンを活用した目視代替点検方法の有効性を実証することを目的として実証実験を行った。

3.1.2 実証実験の概要

(1) 実験場所

実験は北海道苫小牧市の2事業者の協力を得て実施した。



出典：国土地理院地図 <https://www.gsi.go.jp/tizu-kutyu.html>

図3-1 実験場所の概要図

(2) 使用ドローン

本実験に使用するドローンは、GPS や IMU などの航法装置だけでなく LiDAR 等の安全機能を搭載した ACSL-PF2（ACSL 社製）を選定した。同機は高解像度カメラなどの重量があるペイロードも搭載できるため、今回の実証実験で求められる高解像度画像の撮影も可能である。

• 実験飛行本機1機+予備機1機

ACSL-PF2



航空法に基づく機体登録：済

Specification		Description
構造	機体大きさ	全長（プロペラ範囲）：1,173 mm 高さ（カバー上面まで）：526 mm 高さ（アンテナ含）：654 mm
	重量（バッテリー込み）	9.5kg
性能	飛行速度	水平:10m/sec、上昇:3m/sec、下降:2m/sec
	高度	150 m（航空法上限）
	最大対気速度	20 m/s
	最大ペイロード	2.75 kg
	最大飛行時間	20分
推進システム		ブラシレスDCモーター
バッテリー		LiPo 6S
フライト制御システム		オートパイロット ACSL AP 3
通信距離		1,000 m
防塵防水性		■ IP55 ※ペイロード無し時
安全機能・装備		■ 障害物検知：Lidar ■ 強風時のフェールセーフ ■ ルート逆順のGo home設定可能 ■ プロペラガード
静止画撮影機能		■ フルサイズ 6,100万画素カメラ
動画撮影機能		■ 4K
映像伝送		■ 2.4GHz映像伝送 ■ 5.7GHz映像伝送

図3-2 実証実験に使用するドローン

(3) 使用カメラ

カメラは、現状のフルサイズレンズ交換式デジタルカメラにおいて高画素センサーが搭載されているα7R IV（SONY社製）を選定した。現状一般的に入手可能な産業用ドローンのほとんどは本カメラのスペックと同等以下のため、本カメラにより撮影した画像の解像度を下げる処理を行えば、一般的なカメラによる解像度相当の画像を生成することで比較検証が可能となる。

Sony α7R IV



Specification		Description
型式		レンズ交換式デジタルカメラ
使用レンズ		ソニーEマウントレンズ
撮像素子		35mmフルサイズ（35.7×23.8mm）、Exmor R CMOSセンサー
ISO感度		100-32,000 (AUTO 100-12,800 上限/下限設定可能)
F値		F3.5-5.6
手振れ補正機能		有
有効画素数		約6,100万画素
静止画	記録画素数 [3:2] (35mmフルサイズ時)	Lサイズ: 9504 x 6336 (約6,000万画素) Mサイズ: 6240 x 4160 (約2,600万画素) Sサイズ: 4752 x 3168 (約1,500万画素)
動画	解像度	4K, FHD

出典：ソニーストア α7R IV (ILCE-7RM4) : <https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-7RM4/>

図3-3 実証実験に使用するカメラ

(4) 検証項目

本実験における検証項目は、第2章で整理した以下の4項目とする。

- ① タンク近接飛行を行う際の安全対策やドローン運用上の留意事項に関する検証
- ② 腐食・損傷の撮影条件に関する検証
- ③ ドローン飛行方法と点検の効率性に関する検証
- ④ 点検結果の記録方法に関する検証

3.1.3 実験内容及び結果

3.1.3.1 安全対策と運用上の留意事項に関する検証

(1) 事前準備

ア ドローン機体の安全対策

ドローン機体には、自動帰還機能※1、衝突回避機能（本実験ではLiDAR SLAMを採用）※2を装備することで突風等による不測の事態や操縦ミス等による衝突、墜落に対する安全対策とした。また、万が一ドローンがタンク又は附属物に衝突した場合、物理的にプロペラを保護することによりドローンの墜落を防ぐ目的でプロペラガードを装備した。

※1 自動帰還機能

プロポ（ドローンを操縦するための送信機をいう。）通信途絶時、バッテリー残量が規定値を下回った場合等に機能が作動し、離着陸場に自動帰還する機能（メーカーにより異なる。）

※2 LiDAR SLAM

レーザースキャンで取得した情報により、位置特定と周囲の地図作成を行い、障害物との衝突を回避する機能。（衝突回避を目的としたセンサー等は様々な種類がある。衝突回避センサー等の参考例を表3-1に示す。）

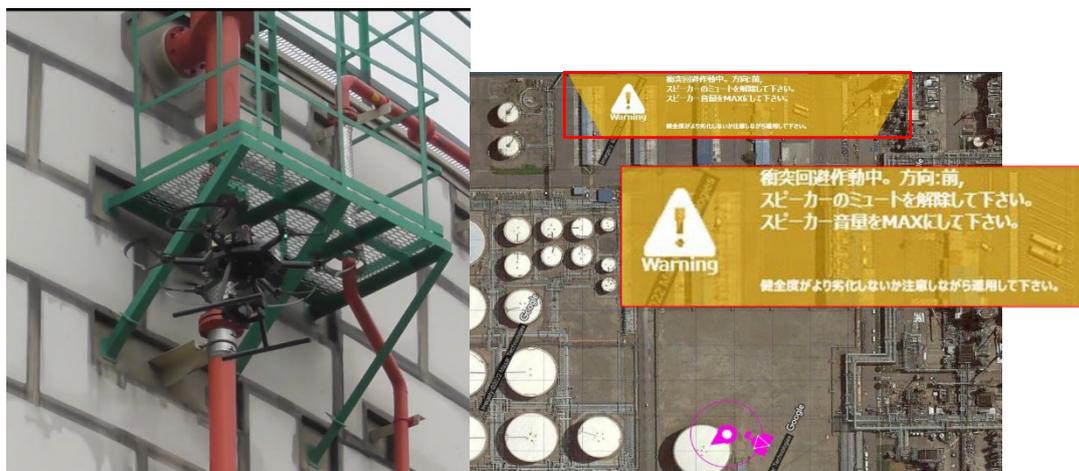


図3-4 衝突回避機能作動確認時の状況

表 3-1 衝突回避センサー等の例

区分	名称	概要
障害物検知	Visual SLAM	カメラで取得した画像から位置特定と周囲の地図作成を行い、障害物との衝突を回避
	LiDAR SLAM	レーザースキャンで取得した情報より、位置特定と周囲の地図作成を行い、障害物との衝突を回避
	赤外線センサー	赤外光を利用し、物体に反射した光を受講することで障害物までの距離を計測
	超音波センサー	超音波を利用し、音波の跳ね返りの時間を利用して障害物までの距離を計測
	ミリ波レーダー	ミリ波帯の電波を使って対象物との距離を測定するレーダーを使用し、障害物を検知
	ビジョンセンサー	複数のカメラで撮影した画像をコンピュータで解析処理することで、障害物を検知
自己位置精度向上	RTK対応ドローン	地上に設置した「基準局」からの位置情報により、高い精度の測位を実現し、ドローンの自己位置を安定
ドローン保護	球殻付きドローン	ドローンが周囲と接触しても墜落しないように、球殻にてドローンを保護

イ 実験実施上の安全距離の設定

ドローンが落下した場合に、当該落下範囲に構造物が存在した場合、構造物を損傷するおそれがあるため、本実験においては落下半径を考慮した安全距離の設定を行った。安全距離の設定に当たっては、「プラントにおけるドローン活用事例集 Ver3.0」を参考に本実験で使用する機体条件、飛行中止基準として設定した風速条件から計算した値(0.8m)に突風の影響等も考慮した余裕距離(3m)を加えた範囲を安全距離(3.8m)とした。

(2) 実験実施及び結果

タンクに接近させてドローン飛行を行い、GPS マルチパスの発生や突風等による衝突危険の有無について検証を行った。なお、タンクドローン間距離が5mまではGPSをONの状態として飛行、タンクドローン間距離が5m未満の範囲においてはGPSをOFFとした完全マニュアル飛行とした。

※ GPS マルチパス

構造物への複数回のGPS電波反射により、測位精度が低下すること。

タンクドローン間距離が5m以上離れた範囲の飛行(GPSがONの状態)では、GPSマルチパスが生じた際にみられるドローンの不安定な挙動は確認されなかった。次にタンクドローン間距離を5m未満で飛行を行った際、最接近距離4.6mの位置において操縦者の意図しないドローンの旋回挙動が確認された。この際、GPSはOFFで完全マニュアル飛行を行っているため、GPSの不具合は考えられないことから、旋回挙動は風により生じたものと考えられる。

なお、操縦系統(ドローン機体-送信機(プロポ)間。通信周波数帯は920MHz帯を使用)の無線通信では、ドローン飛行に支障をきたす問題は発生しなかった。

(3) 実験結果を踏まえた考察等

ア 旋回挙動の原因推定

旋回挙動が生じた箇所は、タンクを強風から保護するためのウインドガードが垂直方向に複数段取付けられており、かつ、いずれのウインドガードもタンクから大きく張り出している箇所であったため、複雑な気流が生じていたことが考えられた。実験時の旋回挙動は、ドローンがウインドガードにより生じた複雑な気流の影響を受けたものと推測される。

イ 考察

タンク近傍でドローンを飛行させる場合は、「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン」や「プラントにおけるドローン活用事例集」の対策を基本としつつ、ドローン機体選定や飛行に際しては以下の点に留意することが望ましい。

(ア) 予測困難な突風等への対応や、無線制御を行うドローンの特性上電波環境や妨害による電波途絶が起きる可能性があるため、以下のような機体側の安全対策を講じ、衝突及び墜落リスクの最小化を図る。

- 非常時自動帰還機能及び衝突回避機能が搭載された機体の選定
- 万が一の衝突に備え、プロペラガードの装着
- 操縦系統の無線通信において、複数の周波数帯を選択することのできるドローン機体の選定

(イ) タンクに接近する事による GPS マルチパスの発生や、飛行位置における突風や気流の変化等、予測困難な事象が発生する可能性があることを念頭にドローンを飛行させる必要があるため、十分な知識・技量を持ったオペレーター の操縦、適切な監視体制の構築が必要である。

(4) その他

ドローン飛行に付随する事前準備やバッテリー交換に要する時間、頻度は以下のとおりであった。

- 事前準備としては、飛行場所の安全確認、初回フライト前のセットアップ、自律飛行のルート設定等を行ったが、所要時間は2～2.5時間程度であった。
- バッテリー交換は、約14分間に一回の頻度で交換を行い、一回の交換に要した時間は2分程度であった。

これらの作業は、いずれも安全な飛行を行うために必要不可欠な作業であり、本実験で確認した範囲においては、点検の効率性を損なうまでの所要時間、頻度は確認されなかった。



図 3 - 5 旋回挙動時の状況

3.1.3.2 腐食・損傷の撮影条件等に関する検証

3.1.3.2.1 静止画撮影条件

(1) 撮影距離による画素分解能の変化

ア 実験実施及び結果

異なる距離からコピー用紙に印刷した視力検査用ランドルト環等を撮影し、静止画の画素分解能（画像データの一画素が写している範囲の一辺の長さをいう。単位は mm/px。以下同じ。）の評価を行った。併せて実際の腐食部を撮影し、画素分解能毎の見え方の違いについて検証を行った。なお、カメラ解像度は 6,100 万画素に設定し撮影している。

まず、それぞれの距離で得られた静止画について、記録されたランドルト環の空白部（10mm）のピクセル数を数えることにより静止画の画素分解能を求めた。その結果を表 3 - 2 に示す。いずれの距離で撮影した静止画についても、実際の画素分解能は理論値から算出される画素分解能よりも小さな値を示したが、これらの差は、撮影距離の誤差やレンズの光学設計の違いなどが影響していると考えられる。

表 3-2 ランドルト環の空白部ピクセル数と距離の関係

距離	18m	15m	12m	9m	6m
ピクセル数	6 ピクセル	7 ピクセル	10 ピクセル	12 ピクセル	18 ピクセル
画素分解能	1.67mm/px	1.42mm/px	1.0mm/px	0.83mm/px	0.56mm/px
理論値※	1.95mm/px	1.63mm/px	1.3mm/px	0.98mm/px	0.65mm/px

※ 理論値は、国土地理院の「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」に掲載されている以下の式を用いて算出した。

$$\text{撮影距離}(m) = \frac{\text{撮影対象の画素寸法}(m)}{\text{使用するデジタルカメラの1画素のサイズ}(m)} \times \text{焦点距離}(m)$$

次に地上から撮影することのできる実際の腐食を撮影し、画素分解能に応じたサイズの異なる腐食の識別度合いの変化を検証した。検証では、撮影距離やカメラ解像度を変化させることにより画素分解能を変化させた静止画で評価を行い、腐食の識別可否を評価した。

本実験では、タンク防油堤に設置された階段の部材に生じている腐食を撮影した。図 3-6 に防油堤階段の全体静止画、図 3-7 に検証に採用した実腐食、図 3-8 及び図 3-9 に距離を変えて撮影した静止画をそれぞれ示す。



図 3-6 実腐食の静止画比較（防油堤階段）

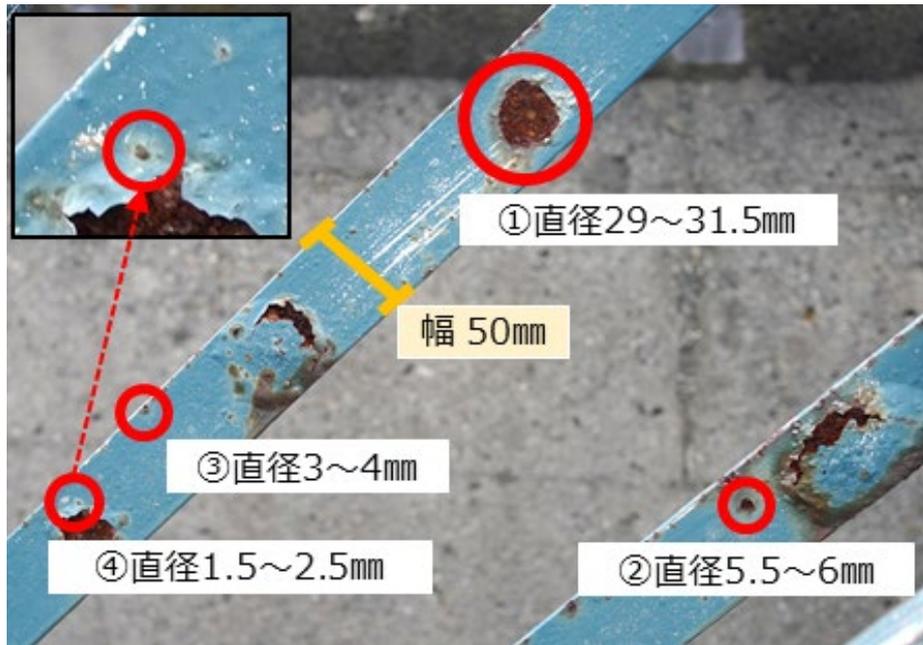


図 3 - 7 検証に用いた実腐食と各腐食の寸法（撮影距離 1m、6, 100 万画素）



図 3 - 8 約 0.5mm/px 相当の静止画（撮影距離 4.6m、6, 100 万画素相当）



図 3-9 約 1.0mm/px 相当の静止画（撮影距離 9.0m、6,100 万画素相当）

各距離で撮影した静止画における腐食の識別可否について腐食寸法毎に評価した結果を表 3-3 に示す。画素分解能（mm/px）の数値が小さいほど、より小さな腐食の検出ができており、精細な静止画であることが分かる。

表 3-3 撮影距離・画素分解能に応じた腐食の識別度の関係

腐食の直径	接写	撮影距離 4.6m (0.5 mm/px)	撮影距離 9m (1.0 mm/px)
① 29～31.5 mm	◎	◎	○
② 5.5～6 mm	◎	○	○
③ 3～4 mm	◎	○	×
④ 1.5～2.5 mm	○	○	×

【凡例】

- ◎：腐食の状態が確認できた
- ：腐食の存在が確認できた
- ×：腐食の存在を確認できなかった

なお、この検証とは別に、本実験で撮影した静止画の画像処理を行い、画素数の異なる静止画間での比較も行ったが、同じ撮影距離で撮影した静止画であれば、画素数の多い静止画ほど、より小さな腐食の検出が可能であった。

イ 考察

画素分解能が小さい精細な静止画を取得するためには、より撮影対象に接近する、カメラ設定で画素数を高く設定するなどに対処が可能である。その他、より高性能のカメラや望遠レンズを搭載するなどの方法も考えられる。一方でこれら対処を行うことにより、タンクへの接近距離が当初計画より近くなる、ドローン重量の増大などドローンの飛行運用に関わる事項に変更が生じるため注意が必要である。

(2) 撮影角度

ア 実験実施及び結果

(ア) 正面からの撮影

ドローンにより腐食・損傷箇所を正面から撮影し、現状定期点検で実施されているポールの先端に取付けたカメラ（以下「ポールカメラ」という。）を人が操作して撮影する方法との比較を行った。

ドローンにより正面から撮影した静止画は、ポールカメラで接写撮影した静止画ほど細かいシールのひび割れを確認できる静止画は得られなかったものの、腐食・損傷箇所を検出するには十分詳細かつ鮮明な静止画を取得することができた。（図3-10）

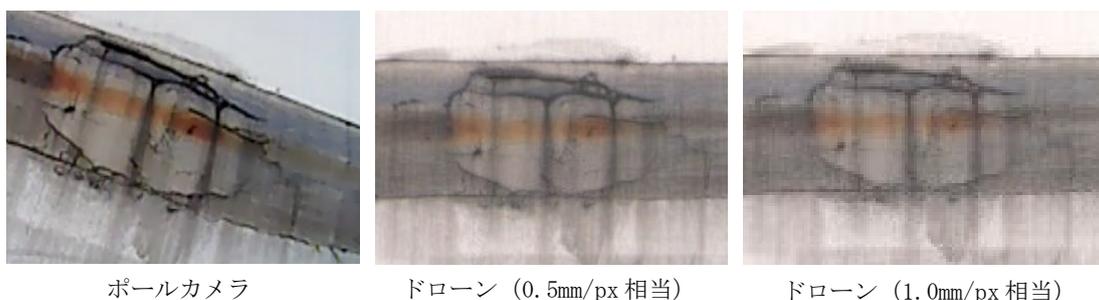


図3-10 損傷箇所をポールカメラとドローンで撮影した様子

(イ) 仰角及び俯角での撮影

正面から撮影することが困難な腐食・損傷箇所について、ドローンに搭載されたジンバル機構を用いて上向き（以下「仰角」という。）及び下向き（以下「俯角」という）撮影を行った。

仰角撮影を行った際は、図3-11 左図のようにドローン機体一部の映り込みが生じたが、静止画を拡大することにより、撮影対象である腐食・損傷部が撮影できていることが分かる。今回使用したドローンと同じような

カメラ設置位置、角度調整機構を持つ機体では、仰角撮影する際は映り込みが生じる範囲を考慮する必要がある。



図 3-11 仰角撮影での静止画

次に、俯角でタンクのウインドガーダーを撮影した際の静止画を図 3-12 に示す。静止画上部に写っているウインドガーダー上面や側板への溶接箇所などは、通常の見視点検では点検が困難な部位となる。地盤面から直接目視ができない部位の点検にドローンを活用した場合は非常に効果的である。



図 3-12 上方からウインドガーダーを撮影した様子

(ウ) 斜め角度からの撮影

腐食・損傷箇所の手前にタンク附属物等が存する箇所において、正面からの撮影では腐食・損傷の全体静止画が取得できない場合が想定される。このため、ドローンを移動して斜めの角度から撮影するケースについて検証を行った。斜めの角度からの撮影により、損傷部の全体を把握可能な静止画が取得できた。(図3-13)

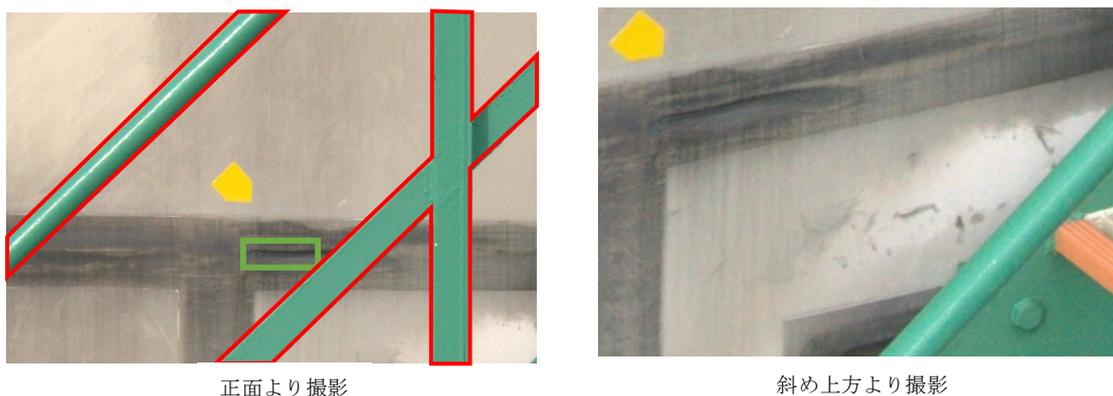


図3-13 損傷部手前にタンク附属物が存する場合の静止画撮影

イ 考察

従来の目視点検では、足場等を用いることなくタンク高所の点検は困難であったうえ、様々な角度から腐食・損傷箇所の確認はできなかった。本実験により直接目視に対するドローンの優位性を改めて確認することができた。

また、本実験では実験実施上の安全面の観点からタンクドローン間の最小距離を4.6mに設定して撮影を行っており、さらに撮影距離を短くすることができれば、より精細な静止画の取得が可能と考えられる。

なお、仰角撮影では機体の一部映り込みが生じたが、機体前方にカメラの内蔵されたドローンや機体上方にジンバルが搭載されているドローンも開発されているので、点検シーンに応じた機体を選定することが望ましい。

(3) カメラ設定条件

ア 実験実施及び結果

ドローンに搭載したカメラで撮影をする場合、撮影した静止画に焦点ズレや撮影ブレが生じる事が想定されることから、カメラ設定の変更によりこれらを解消又は軽減するための対処方法について検証を行った。

(ア) 焦点ズレへの対処

絞り値(以下「F値」という。)を開放に近い状態で静止画撮影を行うと、タンクの撮影では撮影対象(腐食・損傷箇所)の前後に構造物が存する場合や、広めの画角で撮影した場合の画角端部などで焦点ズレが生じるケー

スがある。

本実験では、図3-14の画角端部（消火配管フランジ部）で焦点ズレが生じた箇所について、F3.5~11.0まで範囲でF値を変えて撮影を行ったところ、F8.0以上にて撮影することにより焦点を合わせることができた。



図3-14 撮影位置図

	(1) 画角中心部 (合焦位置)	(2) 画角端部 (焦点ずれ位置)
F値 4.0		
F値 8.0		

図3-15 F値設定と画角内の位置関係に応じた撮影結果

(イ) 撮影ブレへの対処

操縦による移動や風による機体位置の変位など、意図的の有るか否かに関わらず、ドローンの移動中に静止画撮影を行った場合は、取得した静止画に撮影ブレが生じるおそれがある。このため、撮影ブレへの対処方法としてシャッタースピードの設定に関する検証を行った。

検証では、ドローンを移動させながらタンク廻り階段の構成部材を撮影した。図3-16は、ドローンを秒速1.0mの速度で水平移動させながら撮

影した静止画である。左側の静止画（シャッタースピード 1/100 秒）に比べ、右側の静止画（シャッタースピード 1/200 秒）の方が部材の輪郭がよりはっきりと写ることが確認できた。（図 3-16）



シャッタースピード 1/100

シャッタースピード 1/200

図 3-16 シャッタースピードの違いによる画質変化（ドローン水平移動速度 1.0m/s）

イ 考察

撮影対象の前後に附属物等が存する箇所、画角端部等で焦点が合わない場合は、以下の対処方法のいずれか又は併用により焦点ずれを軽減することができる。

- 構造物が写らない位置にドローンを移動させて撮影する。
- F 値の設定を大きくして撮影する。

また、効率性を重視した点検では、ドローンを移動させながら撮影を行うこととなるが、移動速度に応じて適切なシャッタースピードに設定する必要がある。

無風状態の場合を除き、ドローンは常に風の影響を受けているため、撮影時にドローンが移動しているか否かに関わらず、撮影ブレが生じやすい。このため、シャッタースピードを通常の手持ち撮影よりも速めに設定しておくことが望ましい。

なお、F 値及びシャッタースピードは、いずれも設定を変更することにより、画像全体の明暗に影響を与えることとなるため、特に日陰など照度の低い箇所の撮影の際は、画像全体の明暗を考慮した設定変更や撮影時間帯の変更の可否を判断する必要がある。図 3-17 に F 値及びシャッタースピードの設定変更時の効果を参考として示す。

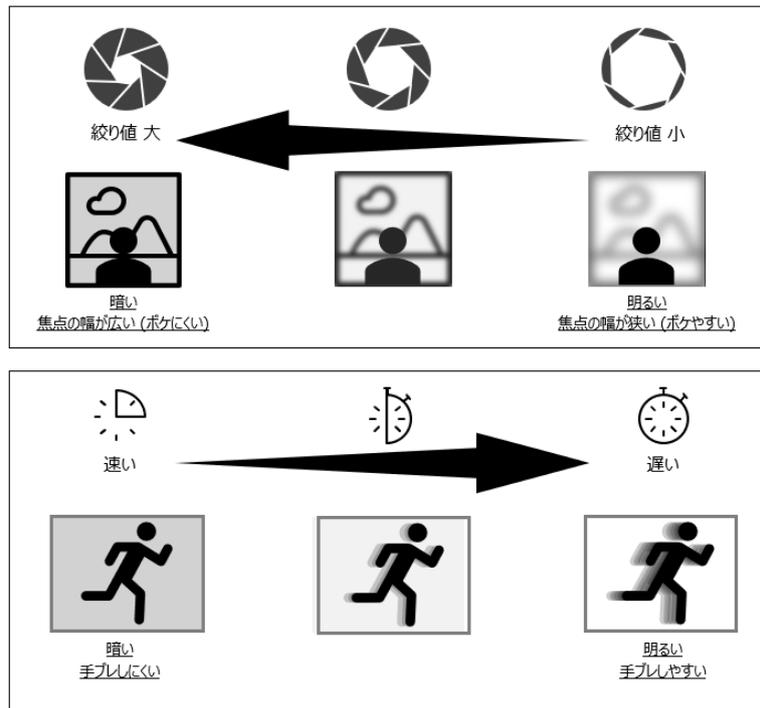


図 3-17 絞り (F) 値とシャッタースピードの設定変更時の効果

3.1.3.2.2 静止画と動画の見え方の違い

(1) 実験実施及び結果

撮影した腐食箇所について、静止画と動画 (4K、フルハイビジョン) による見え方の違いについて検証を行った。腐食箇所は、本実証実験中に確認されたウインドガード支持部材に生じていた腐食とした。(図 3-18)

なお、フルハイビジョン動画については、実験で録画した 4K 動画の解像度を処理をした動画を使用している。



図 3-18 検証に用いた腐食

比較した静止画、4K/フルハイビジョン動画をスクリーンキャプチャした画像

を図3-19に示す。

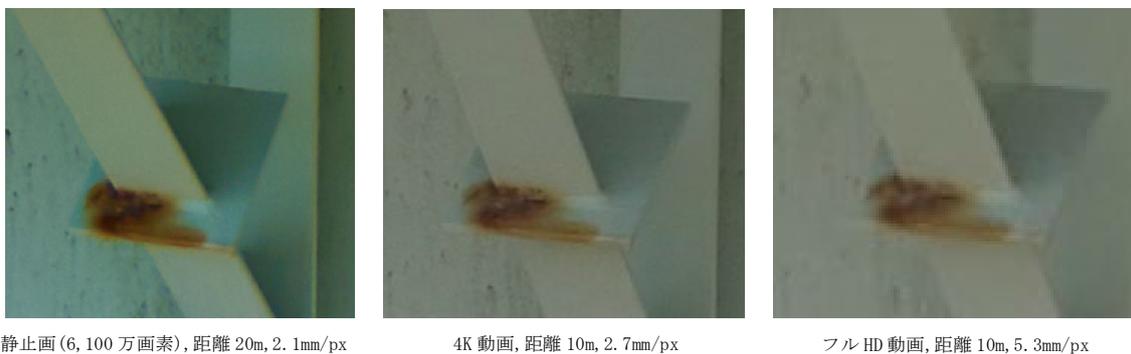


図3-19 静止画と動画の比較

一般的に高画質とされる4K動画は画素数にして約800万画素、フルハイビジョン動画は約200万画素となる。今回比較対象とした静止画は6,100万画素であり、20m離れた位置からの撮影における画素分解能が2.1mm/pxであることから、画像の鮮明度という観点からは、動画は静止画に及ばない。

また、4K動画は10m離れた位置からの撮影における画素分解能が2.7mm/pxであり、面積を有する腐食であれば、ある程度の腐食状態を確認することができると考えられる。

フルハイビジョン動画では、10m離れた位置からの撮影における画素分解能が5.3mm/pxと分解能が約2倍となり、色調の変化により腐食の有無は確認できても、その状態まで確認することは困難であった。

(2) 考察

動画は、録画したものであっても、ドローン飛行中に地上モニターでリアルタイムに確認するものであっても、静止画に比べて画素数が小さいことから、腐食・損傷箇所の詳細な状態を確認したい場合には静止画撮影を併用する必要がある。

また、リアルタイム動画の場合、無線伝送にて4Kなどの高解像度を維持したまま動画を地上まで伝送することは困難である。このため、バックチェック用として、電子記録媒体に録画することにより、高解像度の動画を保存する等の対応が必要と考えられる。

(3) その他

本実験では、映像伝送等に用いた回線周波数帯、ディスプレイは以下のとおり。

- ▶ 映像伝送、データ伝送：2.4GHz
- ▶ ディスプレイ解像度：1920×1080（約200万画素）

リアルタイム動画の伝送においては、多少のコマ落ちが確認されたものの、点検が困難となるほどの大きな問題は生じていなかった。

また、本実験では約 200 万画素相当のディスプレイを使用した。ドローンからはフルハイビジョン相当（約 200 万画素）の動画を伝送していたことから、ディスプレイ上ではドローンから地上へ伝送しているものと同等の約 200 万画素相当の動画を確認することができている。

今回の実験では、地上への映像伝送やディスプレイへの投影については大きな問題は生じていないものの、以下の対策を講じることが望ましいと考えられる。

- ▶ フライトモニターの映像系統は妨害の可能性や混雑する周波数を使用するため、使用する周波数帯を二重化し飛行させることが望ましい。
- ▶ リアルタイム動画確認時、地上のディスプレイ等へ投影される動画状態は、伝送される動画の解像度や圧縮方式、伝送経路、ドローンの映像伝送装置の性能等から決まるため、点検時に要求する動画の質に応じた適切な機体や機器の選択、適切な設定が必要となる。

3.1.3.3 ドローン飛行方法と点検の効率性に関する検証

(1) 実験実施及び結果

ア マニュアル飛行による撮影

タンク外周でマニュアル飛行を行い、ドローンから伝送されるリアルタイム動画をモニタリングし、発見された腐食・損傷部※1 についてのみ静止画撮影を行った。腐食・損傷部一箇所当たり平均 7 枚程度、所要時間は 2~3 分程度※2 であった。また、撮影した静止画の確認に要した時間は、1 枚当たり平均 2 分程度であった。なお、飛行撮影時は 2 名対応（ドローン監視者 1 名、モニター確認者 1 名）、静止画確認時は 1 名対応であった。

※1 検証では、予め協力事業者が調査した腐食・損傷部を撮影した。

※2 リアルタイム動画の確認時間は含まれない。

イ 自律飛行による撮影

タンク外周で自律飛行を行い、タンクドローン間距離 10m の位置から腐食の有無が分かる程度の解像度（画素分解能は約 1.1mm/px）での撮影を目標とし、4 秒に 1 枚の間隔で機械的かつ網羅的な静止画を撮影した。直径 82m のタンク外周 1/4 程度の範囲について、計 41 枚の静止画を撮影し、離陸からの所要時間は約 4 分程度であった。また、撮影した静止画の確認に要した時間は、1 枚当たり平均 2 分程度であった。なお、飛行撮影時は 2 名対応（ドローン監視者 1 名、モニター確認者 1 名）、静止画確認時は 1 名対応であった。



図 3-20 自律飛行によってタンクの側面を自動撮影した際の撮影ポイント

(2) 実験結果を踏まえた考察

今回実施した 2 パターンの飛行・撮影方法に応じて以下のメリット・デメリットがあるため、目的に応じた使い分けを行うことが望ましい。

➤ マニュアル飛行による撮影

【メリット】

- ・タンクドローン間距離、撮影角度、カメラ設定等を変更しての柔軟な撮影が可能である。
- ・GPS 受信が困難な場合においても、気象条件や無線通信上の支障が無ければ飛行の継続が可能である。

【デメリット】

- ・リアルタイム動画での腐食・損傷の有無確認において見逃しが発生する可能性がある。
- ・タンク全体の網羅的な撮影を行いたい場合は、撮り漏らしが発生するおそれがあり、また操縦面においても非効率である。

【適していると考えられる点検シーン】

- ・腐食・損傷箇所が判明している箇所の詳細静止画を撮影する場合に適した飛行・撮影方法であると考えられる。

➤ 自律飛行による撮影

【メリット】

- ・飛行ルート設定を一度行えば自動で飛行を行える。
- ・同ルートの飛行を繰り返し行うことが可能であり、タンク全体の網羅的な

撮影を行うことができる。

【デメリット】

- ・マニュアル飛行のような柔軟な位置調整、設定変更が難しい。
- ・GPS 受信が困難な環境では適用できない。

【適していると考えられる点検シーン】

- ・比較的周囲の開けた大型タンクにおいて、タンク側面の網羅的な撮影を行い、腐食・損傷の有無を点検する場合に適した飛行・撮影方法であると考えられる。

3.1.3.4 点検結果の記録方法に関する検証

(1) 実験実施及び結果

取得した静止画の活用方法を工夫することにより、従来の図面に点検状況を記録する方法に替わる記録管理が可能かどうかについて検証を行った。

ア 静止画のオルソ化

タンク外周 1/4 の範囲を網羅的に撮影した静止画からオルソ画像を生成し、タンク外観をパノラマ的に再現した。生成したオルソ画像は、既存の側板展開図同様にタンク側面の広範囲を表示できた。(図 3-21)

イ オルソ画像への詳細情報の記録

次に、生成したオルソ画像に別途撮影した腐食・損傷箇所の詳細状況が分かる静止画や腐食・損傷の位置、種別、範囲等の情報を紐付けた。(図 3-22)

(2) 実験結果を踏まえた考察

撮影静止画の活用方法を工夫することにより、点検時の状況が視覚的に把握しやすくなることで、特定の作業者が現場に行かずとも複数人での確認が可能となり、属人化を防止することができると考えられる。

なお、オルソ画像の生成には、個々の静止画の撮影位置を特定することが重要となる。撮影位置は、タンク附属物等の目印、撮影時のドローン位置情報等から特定するなどが考えられる。

また、本実験で生成したオルソ画像はタンクドローン間距離 24m の位置から撮影した静止画を用いた。これよりも距離を縮めて撮影した静止画を用いてオルソ化を行えば、オルソ画像のみで腐食・損傷の有無程度であれば確認できることが期待される。

ただし、腐食・損傷の有無だけでなく、さらにタンクに接近して撮影した静止画(腐食・損傷の詳細状況が分かるほどの精細な静止画)を用いた場合は、オルソ化のための位置特定が困難となるほか、静止画枚数及びデータ量の増大によりオルソ画像生成が困難となるので注意を要する。

行い、タンクドローン間距離 4.6m まで接近して飛行を行った。実験においては、GPS 障害や操縦系システムに問題は生じなかったものの、複雑な気流を受けてドローンが旋回挙動を起こす事象が確認されている。

ドローン飛行においては、GPS 障害、磁気エラー、操縦系システムの不具合、複雑な気流、突風等による予測困難な事象により安全な飛行が困難となる状況が生じることから、自動帰還機能や衝突回避機能等の設備的な安全対策を講じるとともに、十分な知識・技量を有するオペレーターの選定並びに適切な監視体制の構築が必要である。

(2) 腐食・損傷の撮影条件に関する検証

同一の腐食・損傷について複数の画素分解能で撮影した静止画を比較することにより、腐食・損傷の有無や詳細状況の確認には画素分解能を目安として撮影距離を決定する必要があることが示唆された。

また、実際の腐食・損傷箇所の撮影においては、飛行体であるドローンの特徴を最大限に活用し、撮影箇所の状況に応じたドローンの移動により、適切な位置から腐食・損傷を撮影することが重要であることが分かった。

なお、絞り値 (F 値) やシャッタースピード等のカメラ側の設定を適切に実施することで、明瞭な静止画の撮影が可能となる。

(3) ドローン飛行方法と点検の効率性に関する検証

本実証実験ではマニュアル飛行と自律飛行それぞれにおいて効率的な点検が可能であるかを検証し、双方のメリット・デメリットを抽出した。これらを理解し、飛行環境や目的に適切な飛行方法を選択することでドローン点検を効率的に行うことができると考えられる。

(4) 点検結果の記録方法に関する検証

ドローンで撮影した静止画からタンク外観をパノラマ的に再現するオルソ画像を生成し、腐食・損傷部の状態の情報や詳細な静止画を紐付ける方法の提案を行った。撮影データの活用方法を工夫することにより、視覚的にタンク全体像と個別箇所の詳細状態が分かる記録作成が可能であり、外観点検の一元的な記録・管理方法となりえるとともに、点検員の属人化を防ぐことにも寄与しうることが示唆された。

3.1.4.2 実証実験（2回目）に向けた課題等

(1) 保有空地やタンク間距離が狭いタンクでの飛行

実証実験（1回目）では、ドローン飛行区域に十分な空地が確保されているタンクにて実験を行っている。しかし、消防法令上の保有空地はタンク規模、貯蔵物の品名に応じて設定される。さらに、同一敷地内の隣接タンクとの間に保有すべきタ

ンク間距離（保有空地の特例）はタンクの設置年代により大きく異なり、本実証実験における空地条件を有しているタンクはむしろ少ない。

より多くの事業者が保有するタンクの点検にドローンを活用できるようにするためには、タンク間距離隔距離が狭いケースにおいても安全な飛行及び点検を行える事について実証する必要がある。

(2) 使用機材等に応じた適切な撮影距離の決定方法

実証実験（1回目）では、使用する撮影機材とカメラ設定条件が同一ならば、撮影対象（タンク）に近づくほど、画素分解能が細かい鮮明な静止画が得られることが分かった。

一方、目視点検で検出すべき腐食・損傷の程度（検出基準値）や使用カメラ等、鮮明な静止画を得るための適切な撮影距離を決定づける因子は、タンクを保有する事業者毎に異なる。ドローンを活用して効果的かつ効率的に点検を行うには、点検実施前に適切な撮影距離を把握しておくことは重要であることから、異なる検出基準値や撮影機材に対応した適切な撮影距離の決定方法を検証する必要がある。

(3) リアルタイム動画の有効性

ドローンから地上へ無線伝送されるリアルタイム動画で腐食・損傷の有無が確認可能であれば、腐食・損傷部の詳細な静止画像を効率的に取得することができることから、実証実験（2回目）ではリアルタイム動画の有効性について検証を行う。

(4) 撮影画像の分析にかかる工数

実証実験（1回目）においては、ドローンの自律飛行を行い、タンク側板について外周の約1/4について計41枚の静止画を撮影した。静止画一枚当たりの分析にかかる工数はそれほど多くの時間はかからないことが確認できたが、タンク全体を撮影した場合は、数百枚に及ぶ静止画の確認作業が発生するため、多くの工数が必要である。

実証実験（2回目）においては、撮影された大量の静止画をAI（人工知能システム）によって解析することで、多くの工数をかけずに腐食・損傷箇所の検出処理できる可能性について検証する。

(5) 撮影結果の可視化

実証実験（1回目）においては、タンク側板の静止画をオルソ化し、パノラマ的なオルソ画像を生成し、当該画像にて点検結果を記録・管理できることを実証した。

実証実験（2回目）においては、タンク全体を撮影データから三次元モデルを構築、オルソ画像と同様に腐食・損傷箇所をマッピングし、より直感的な腐食・損傷箇所の記録・管理方法が可能かどうかについて検証を行う。

3. 2 実証実験（2回目）

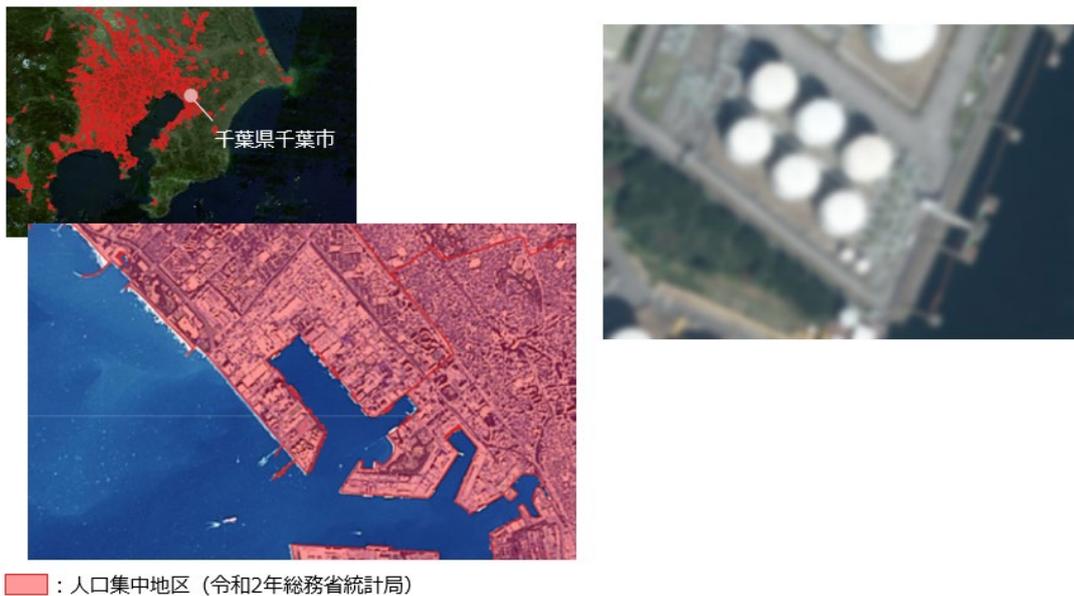
3.2.1 実証実験の目的

本実証実験では、事業者ヒアリングで抽出した課題を解決するために、実証実験（1回目）を踏まえた課題について実証することを目的とする。また、将来的に屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に活用できる可能性のある技術について検証する。

3.2.2 実証実験の概要

(1) 実験場所

本実証実験は千葉県千葉市の事業者に協力を得て実施した。



出典：国土地理院地図

図3-23 実験場所の概要図

(2) 使用ドローン

実験に使用するドローンはGPSやIMUなどの航法装置だけでなくVisual SLAMを安全機能として搭載したSkydio 2+を選定した。同機は小型で全方位への障害物検知の機能を搭載しており、本実証実験で求められる狭い場所での撮影や、複雑な構造物が多い環境での撮影が可能である。

 <p>Skydio 2+</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実験飛行本機1機+予備1機 ・ 航空法に基づく機体登録：済 	<p>機体性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ● カメラ一体型 ● 大きさ（アンテナアップ）：229(l) x 274(w) x 126(h) mm ● 大きさ（アンテナダウン）：229(l) x 274(w) x 76(h) mm ● 重量（バッテリー含む）：800 g ● 最大飛行速度（海面、無風）：約16m/s（36mph） ● 最大抵抗風速：約11m/s（25mph） ● 最大飛行時間：27分 ● 動作温度範囲：-5℃～40℃ ● バッテリー：リチウムイオンポリマー
	<p>カメラ性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ● イメージセンサ：Sony IMX577 1/2.3" 12.3MP CMOS ● 静止画：1,200万画素 ● 動画：4K ● F値：f/2.8 ● 焦点距離：3.6 mm ● シャッタースピード：1～1/1920 s ● ISO感度：100-3200 ● 画素寸法(4m)：約1.7 mm/pix
	<p>安全機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 安全機能：全方位への障害物検知機能(Visual SLAM) ● プロペラガード：取付不可 ● 障害物回避：Visual SLAM（全方向）

図3-24 実証実験に使用するドローン

(3) 検証項目

本実験における検証項目は、3.1で整理した以下の5項目とする。

- ① 保有空地やタンク間距離が狭いタンクでの飛行に関する検証
- ② 使用機材等に応じた適切な撮影距離の決定方法に関する検証
- ③ リアルタイム動画の有効性に関する検証
- ④ AI画像解析を用いたタンクの腐食等検出可能性に関する検証
- ⑤ タンクの3Dモデルの生成と点検記録作成に関する検証

3.2.3 実験内容及び結果

3.2.3.1 保有空地やタンク間距離が狭いタンクでの飛行に関する検証

(1) 実験実施及び結果

突風やネットワーク不良により不安定な飛行となった場合を想定し、Visual SLAMによる全方位への障害物検知機能を備えた小型のドローン機体(最大寸法274mm)をタンク間距離が7.7mとなる場所で飛行させ、安定した飛行が可能であるかどうかを検証した。タンクドローン間距離は約3mとした。

想定された突風による影響、電波・通信環境の乱れによる影響等は生じず、安定した飛行を行うことができた。飛行中の様子を図3-25に示す。



図 3-25 タンク間距離が狭いタンクの外周を飛行させている様子

(2) 考察

タンク間距離が狭くタンクが密集しているような箇所でドローンを飛行させる場合は、機体がタンクの陰に入りやすい、タンクへの接触の危険度が高い等のリスクが高まることから、3.1.3.1(3)イに記載した安全対策のほか、以下のような機体選定や安全対策を講じることが望ましい。

- 比較的小型のドローン機体を選定すること。※
 - 全方位の障害物検知機能（Visual SLAM や LiDAR 等）を備えておくこと。
 - 機体監視員の増員、離発着場所の複数設定などの安全対策を講じること。
- ※ 本実験で飛行作業を担当したドローン事業者では、狭所でドローン飛行を行う場合、機体サイズが通過予定の構造物間隔の約 5～10 分の 1 以下であることを安全上のおおよその目安として設定している。ただし、小型機体を選定した場合は、風の影響を受けやすいという場合もあるため、機体諸元・性能、操縦者の技量、当日の気象条件等を総合的に判断して機体選定を行う必要がある。

3.2.3.2 使用機材等に応じた適切な撮影距離の決定方法に関する検証

(1) 実験実施及び結果

実証実験（1回目）では、静止画の画素分解能の値が小さいほどより小さな腐食・損傷が識別できること、カメラ条件が同一であれば画素分解能は撮影距離に依存することが分かった。定期点検における腐食等の検出基準値や使用されるカメラ等点検機材は事業所毎に異なることが想定されることから、事業所における検出基準値や選定したカメラ等点検機材に応じた適切な撮影距離の決定方法の一案について実験を実施した。

今回、撮影距離決定方法の一案として検証する方法は、複数寸法の単純な幾何学模様又は QR コードをコピー用紙に印刷し、距離を変えながら撮影することにより、一定の識別等が可能となった距離を撮影距離として決定する方法となる。

設定した幾何学模様、QR コードの仕様と適切な距離の判断基準は以下のとおりとした。

➤ 幾何学模様

○仕様：直線及び点模様で構成し、5つの異なる幅、直径の模様を一枚のコピー用紙に表示したもの。寸法は一段階下に写る毎に約0.8倍とした。（幅、直径はきりの良い値に丸め、mmオーダーとcmオーダーを用意した。）

○判断基準：検出基準値より一段階下の直線及び点模様が識別できること。

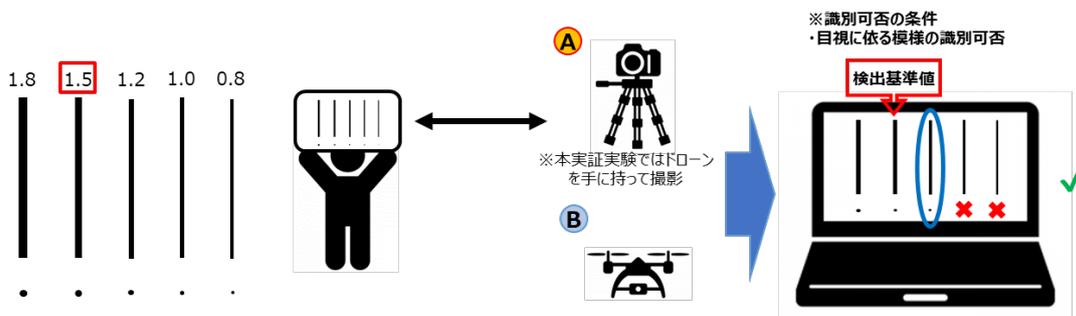


図3-26 幾何学模様の仕様と実験方法

➤ QRコード

○仕様：1セルのサイズを調整したQRコードを5つの異なる寸法で作成し、一枚のコピー用紙に表示したもの。寸法は一段階下に写る毎に約0.8倍とした。（1セルのサイズはきりの良い値に丸め、mmオーダーとcmオーダーを用意した。）

○判断基準：セルの大きさを検出基準値未満の寸法に調整したQRコードの機械読み取りが可能であること。

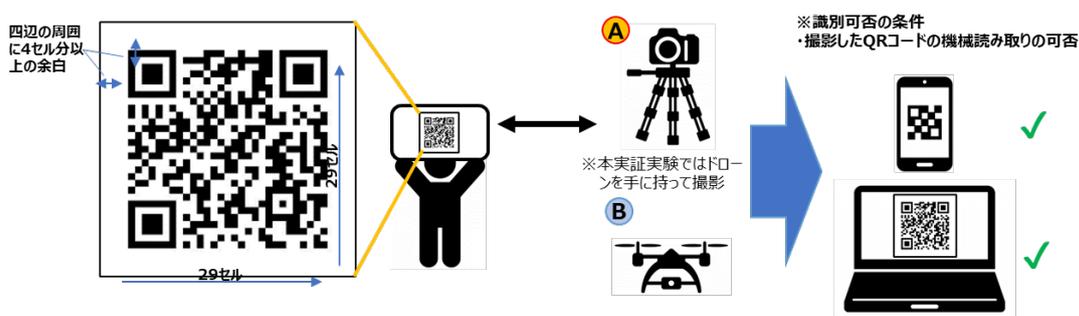


図3-27 QRコードの仕様と実験方法

撮影距離は3.1.3.2.1に示した理論式から導き出される距離を基準として、距離を変えながら順次撮影を行った。

また、ドローン（カメラ一体型）を手に持った状態と、ドローンをホバリングさせた状態で撮影を行い、風や振動により結果に差異が生じるかどうかについても検証した。

結果を表3-4及び3-5にまとめた。

表 3-4 直線及び点で構成した幾何学模様を用いた実験結果

	No.	検出基準		識別最小模様 幅又は直径 (mm)	A 条件を 満足した距離 (m) (手持ち)	B 条件を 満足した距離 (m) (ホバリング)
		腐食等の 検出基準値 (mm)	理論式による距離 (m)			
基準をmm 単位に設定	1	1.8	4.2	1.5	6.0	6.0
	2	1.5	3.5	1.2	5.6	6.0
	3	1.2	2.8	1.0	4.2	4.6
	4	1.0	2.3	0.8	3.5	4.2
基準をcm 単位に設定	5	18	42	15	42	42
	6	15	35	12	39	39
	7	12	28	10	35	33
	8	10	23	8.0	28	23

表 3-5 QR コードを用いた実験結果

	No.	検出基準		1セルの大きさ (mm)	一辺の長さ (mm)	A 条件を 満足した距離 (m) (手持ち)	B 条件を 満足した距離 (m) (ホバリング)
		腐食/損傷の 検出基準値 (mm)	理論式による距離 (m)				
検出基準が mm単位	1	1.8	4.2	1.5	55.5	2.3	2.3
	2	1.5	3.5	1.2	44.4	1.9	1.9
	3	1.2	2.8	1.0	37.0	未検出	未検出
	4	1.0	2.3	0.8	29.6	未検出	未検出
検出基準が cm単位	5	18	42	15	555	23	23
	6	15	35	12	444	19	19
	7	12	28	10	370	未検出	未検出
	8	10	23	8.0	296	未検出	未検出

未検出：撮影を実施した最低の距離においても検出されなかった



図 3-28 機械読み取りが不可となった QR コードの見え方

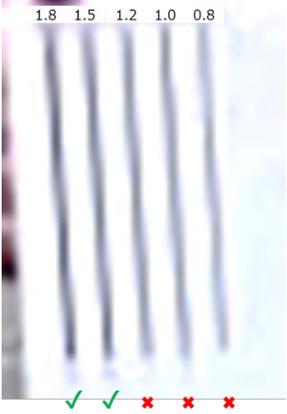
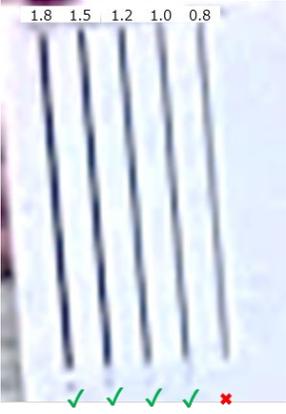
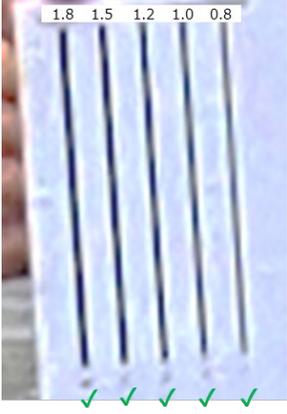
検出基準値	1.8mm	1.5mm	1.2mm	1.0mm
A 手持ち	撮影距離：6m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 	撮影距離：5.6m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 	撮影距離：4.2m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 	撮影距離：3.5m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 
B ホバリング	撮影距離：6m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 	撮影距離：6m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 	撮影距離：4.6m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 	撮影距離：4.2m 1.8 1.5 1.2 1.0 0.8 

図 3-29 直線及び点状模様の写り方

検出基準値	1.8mm	1.5mm	1.2mm	1.0mm
A 手持ち	撮影距離：2.3m 1セルの大きさ：1.5mm 	撮影距離：1.9m 1セルの大きさ：1.2mm 	撮影距離：1.9m* 1セルの大きさ：1.0mm 	撮影距離：1.9m* 1セルの大きさ：0.8mm 
B ホバリング	撮影距離：2.3m 1セルの大きさ：1.5mm 	撮影距離：1.9m 1セルの大きさ：1.2mm 	撮影距離：1.9m* 1セルの大きさ：1.0mm 	撮影距離：1.9m* 1セルの大きさ：0.8mm 

※赤字で撮影距離に※印がついているものは、検証した最低距離（1.9m）においても判断基準を満足しなかったもの。（機械読み取りができなかったもの）

図3-30 QRコードの写り方

幾何学模様における検出基準値の一段階下の線状及び点状模様が識別可能な撮影距離は、mm オーダーの検出基準値では理論式から導かれる撮影距離以上の距離で識別が可能となり、cm オーダーの検出基準値では理論式から導かれる撮影距離と識別可能となった距離は概ね一致した。(表 3-4、図 3-29)

QR コードの読み取りが可能な撮影距離は、理論式による撮影距離よりもかなり短い距離でしか判断基準を満足できる結果は得られなかった。ただし、機械読み取りができなかった QR コードにおいても、人の目によればある程度はドットの識別が可能な状態なものもあった。(表 3-5、図 3-28 及び 3-30)

また、いずれもホバリングと手持ちでは条件を満足した距離に大きな差は見られなかった。

(2) 実験結果を踏まえた考察

理論式の活用は撮影距離やカメラの諸元(センサーサイズ、画素数、焦点距離)及びカメラを搭載するドローンを選定する上で判断の目安となる。しかし、レンズの光学設計の違いなどにより実測値と理論値に差が生じることが考えられるため、実際に使用する撮影機器で撮影した静止画の事前のチェックが点検における手戻りの未然防止に有効となる。

本実験では、単純な幾何学模様と複雑なドットパターンをもつ QR コードを用いた検証を行った。単純な幾何学模様では理論式と同じ、若しくは理論式よりも離れた距離で設定した判断基準をクリアすることができた。一方、QR コードでは理論式よりもかなり近づいた距離でないと設定した判断基準をクリアすることができなかった。これは判断基準を幾何学模様では人の目による識別の可否、QR コードでは機械読み取りの可否としたところによるものと思われる。実際、機械読み取りができなかった QR コードの静止画を拡大して観察したところ、ぼやけてはいるものの、セルの識別はある程度可能であった。しかし、QR コードは数百のセルによる複雑なドットパターンで構成されており、セルの大きさを検出基準値の寸法に合わせて作成している。人の目により、数百のセルについて識別の可否を判断するというのは現実的ではなく、実験の結果からもあまり複雑ではない単純な模様を用いて判断することで適切な撮影距離の決定が十分に可能であると考えられる。

なお、判断基準とした識別の可否は極めて定性的な基準であり、事前検証を行う人によって判断が異なる可能性があることに注意する必要がある。この検証自体が事業者自らで設定した検出基準値以上の腐食・損傷を確実に検出することを目的とした検証であるという趣旨を考慮して事前検証が行われることが望ましい。

(3) その他

両検証で検出基準値 1.5mm としたときに適切と判断された距離と同等の距離で撮影した腐食静止画及び QR コード静止画の見え方を図 3-31 に示す。

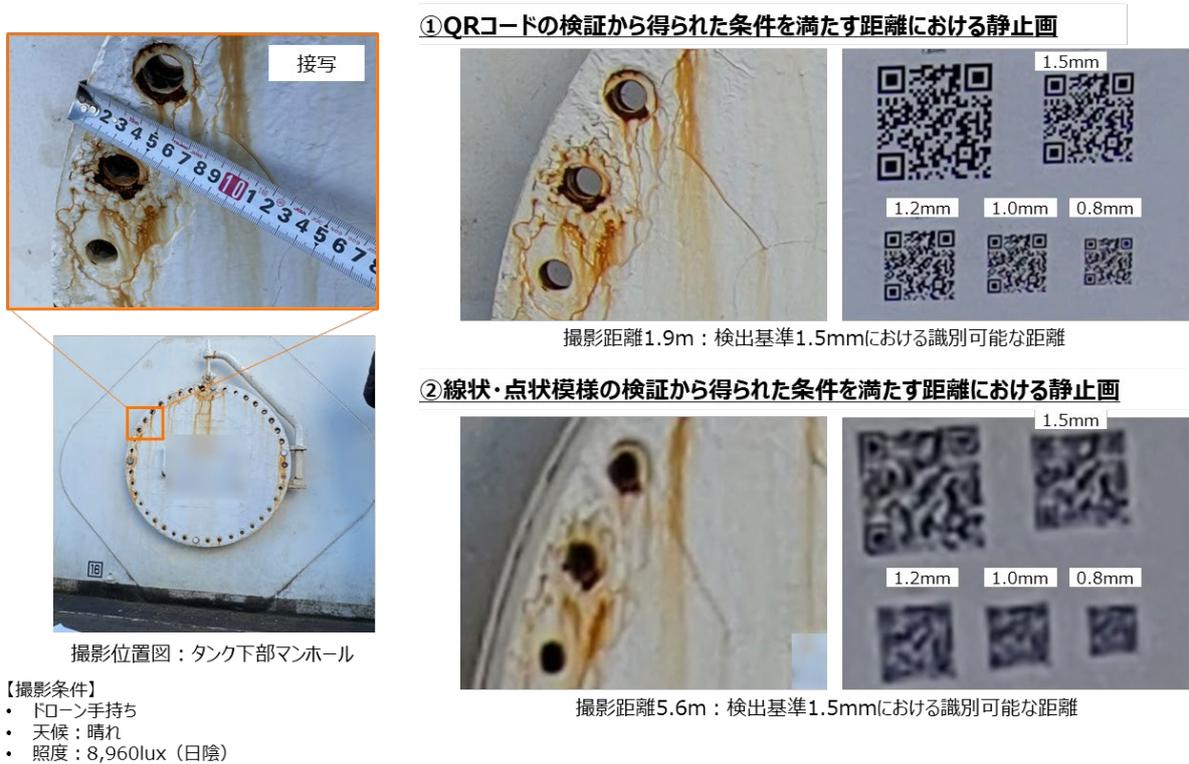


図3-31 距離ごとの錆の見え方比較

3.2.3.3 リアルタイム動画の有効性に関する検証

(1) 実験実施及び結果

事前の直接目視により実験タンク側板に生じている腐食箇所を6箇所（表3-6中、#①～⑥）ピックアップし、寸法・位置を記録した。実験においては、当該箇所を含むタンク側板外周4分の1程度をタンクドローン間距離約3mにてドローンを飛行させ、当該腐食箇所を知らない被験者がドローンから送信されるリアルタイム動画を見て、腐食の検出が可能かどうかについて検証を行った。また、当該リアルタイム動画を4Kで録画（以下「4K動画」という。）し、ドローン飛行の後で被験者が4K動画を視聴した場合においても同様の検証を行った。

リアルタイム動画においては、ある程度の面積を有する目立つ腐食は容易に検出ができていた一方で、以下の腐食については検出することができなかった。

- 5mm程度の腐食（#①～③、⑤）
- 単一の状態で存在する10mm以下の腐食（④）
- 10mm前後の腐食が群をなしている腐食で色の薄い腐食（#⑬、⑮）
- 単一の状態で存在する30mm前後の腐食で色の薄い腐食（#⑯）

その他、事前にピックアップしていなかった腐食箇所を検出することができた。

4K 動画においては、リアルタイム動画では検出できなかった色の薄い腐食も検出することができたが、腐食の大きさだけに着目するとリアルタイム動画とは差が生じない結果となった。

表 3-6 リアルタイム動画、4K 動画毎の腐食箇所確認結果

#	事前確認※1	種別	形状	単一の腐食/損傷の寸法※2	薄い	錆汁	地上からの高さ	リアルタイム動画	4K 動画
①	○	錆	点状	5mm			3.0m	×	×
②	○	錆	点状	5mm			2.5m	×	×
③	○	錆	点状	5mm			2.5m	×	×
④	○	錆	点状	10mm以下			3.5m	×	×
⑤	○	錆	点状	5mm			2.5m	×	×
⑥	○	錆	点状	15mm	●		2.0m	○	○
⑦	-	錆	点状×2	10mm以下			3.5m	○	○
⑧	-	錆	点状×3	10mm以下			4.0m	○	○
⑨	-	錆	点状	20mm前後			4.5m	○	○
⑩	-	錆	点状	20mm前後	●		6.5m	○	○
⑪	-	錆	点状	20mm前後	●		7.0m	○	○
⑫	-	錆	点状×多数(広範)	50mm前後	●		6.5m	○	○
⑬	-	錆	点状×多数(広範)	10mm前後	●		6.0m	×	○
⑭	-	錆	点状×多数(広範)	30mm前後	●		7.0m	○	○
⑮	-	錆	点状×多数(広範)	10mm前後	●		7.0m	×	○
⑯	-	錆	点状	30mm前後	●		7.0m	×	○

A リアルタイム動画、4K動画の両方で発見できなかった腐食

10mm以下の単独腐食は、リアルタイム動画でも4K動画でも検出することができなかった。

B リアルタイム動画で発見できた腐食

リアルタイム動画、4K動画では、15mm以上の単独腐食や個々の腐食が10mm以下であってもそれらが群を成している腐食は検出することができた。

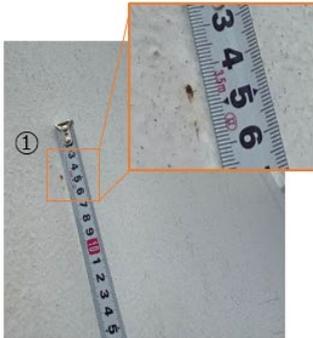
C リアルタイム動画で見逃したが4K動画では発見した腐食

色の薄い腐食は、リアルタイム動画では見逃したが、4K動画では検出することができた。

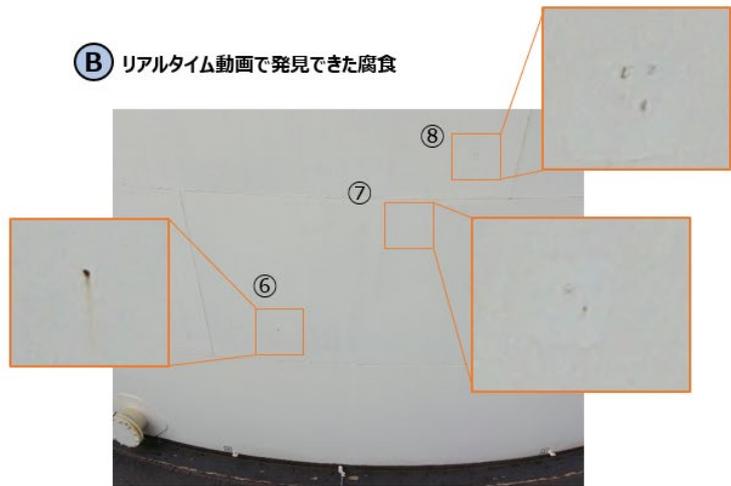
※1 事前に直接目視にて抽出を行っていた腐食/損傷。ただし、腐食の寸法の計測が概ね可能となる一定の範囲内での確認を行った。

※2 高所の腐食は計測不可であったため、目視による側板の高さや他の腐食からの相対値
なお、複数の点腐食が群をなしている腐食場合、個々の点腐食の最大寸法を表す。

A リアルタイム動画、4K動画の両方で発見できなかった腐食



B リアルタイム動画で発見できた腐食



C リアルタイム動画で見逃したが4K動画では発見した腐食

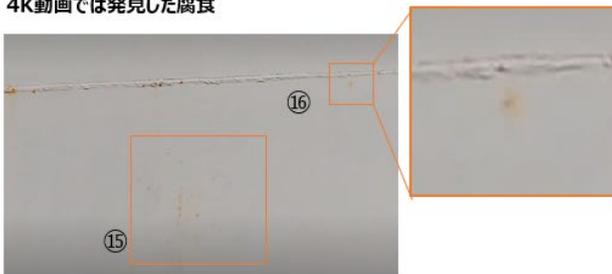


図 3-32 見逃しが生じた腐食箇所 (表 3-6 中 A, B, C 各点に対応)

検出した腐食箇所をマッピングしたものを図3-33に示す。リアルタイム動画での検証時には、タンクの溶接線や附属物を頼りにおおよその腐食位置の記録を行うことはできたが、誤って実際の位置とは異なる位置へ記録を行っていたケースも見受けられている。

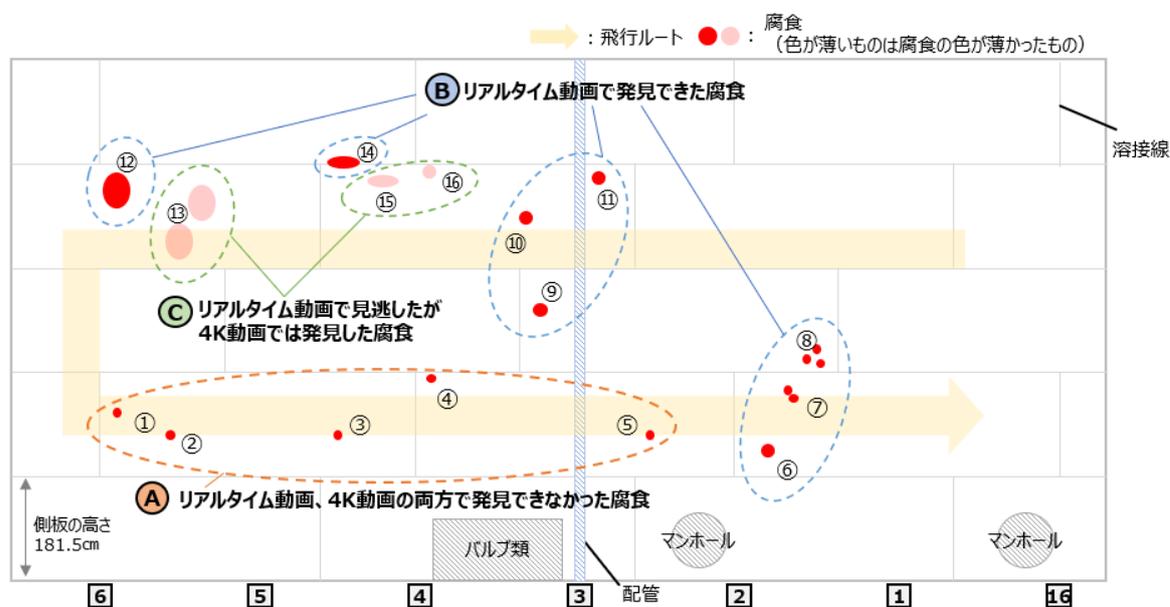


図3-33 タンク側板展開図への腐食箇所のマッピング

次にリアルタイム動画、4K動画、静止画における腐食の見え方を比較した。各画像を図3-34に示す。リアルタイム動画→4K動画→静止画の順で画素数が高くなるに従い、画像の鮮明度が増すことが分かる。

推定10数mm程度の塗膜の割れは4K動画及び静止画では認識することができたが、リアルタイム動画の画面ではぼやけてしまい認識することができなかった。

なお、今回使用したドローンが地上へ送信するリアルタイム動画については、解像度はHD(720p)、圧縮方式はH.264形式、伝送容量は0.5~2.1Mbpsであった。

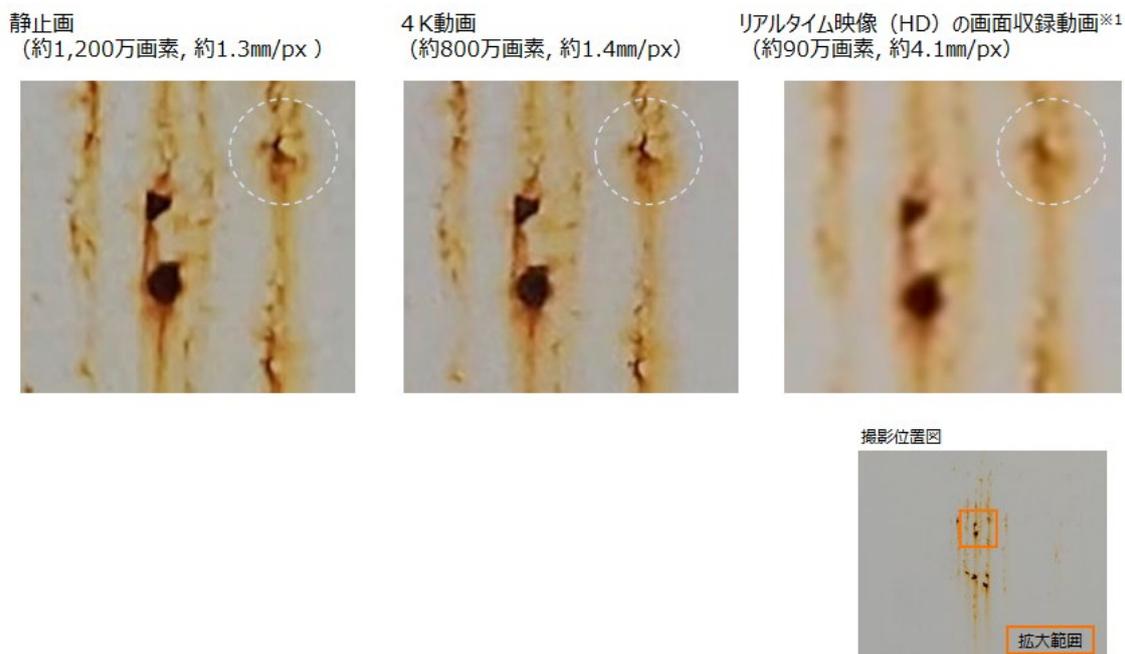


図 3-34 静止画、リアルタイム動画、4K 動画による腐食の見え方の比較

(2) 実験結果を踏まえた考察

リアルタイム動画かどうかに関わらず、動画を用いた点検においては、数 mm 程度の小さな腐食を検出することが困難であることが分かった。また、リアルタイム動画では、画質が高精度ではない分、色味の薄い腐食・損傷の発見が難しく、移動するドローンから伝送される動画を確認するため、点検者には一定程度の集中力が必要となる。

しかし、今回リアルタイム動画で見逃した腐食は、いずれも小さい又は色味の薄い腐食であり、リアルタイム動画による点検を行ったからといって、重大な見落としが頻発するとは考えにくい。リアルタイム動画による点検は、腐食・損傷を発見した場合にその場で高解像度の静止画撮影が可能な点が大きなメリットであり、既往の目視点検よりははるかに効率的であるといえる。

ただし、タンク側板の腐食では、外面塗装の塗膜剥落を伴わずに塗膜下で腐食が進行する腐食形態がある。こうした腐食形態では錆汁の滲出により腐食の進行を検知できるため、リアルタイム動画を 4K などの高精細動画で同時録画し、事後検証が可能となる記録を残しておくことが望ましい。

(3) その他

屋外ではリアルタイム動画の確認時、太陽光等の反射によりディスプレイの視認性が悪くなる場面が想定される。このため、屋外での利用を目的に設計された高輝度ディスプレイを用いることや、ディスプレイ自体に遮光フード・シェードを取付けることにより、屋外におけるディスプレイの視認性を向上させることが望ま

しい。

3.2.3.4 AI 画像解析を用いたタンクの腐食等検出可能性に関する検証

(1) 実験実施及び結果

大量の静止画確認には多くの工数を要することが想定されることから、将来的な工数削減の可能性の有無について確認するため、ドローンで撮影したタンク側板の静止画を既存の AI 画像解析モデル（配管腐食検出用解析モデル）を用いて腐食検出が可能かどうかについて検証を行った。

結果として、タンク側板に生じた腐食のうち、塗膜が剥落した腐食の一部については検出されたものの、目視ではっきりと分かるほどの腐食であっても検出できないものがあった。また、塗膜割れの箇所などから錆汁が滲出しているような箇所、塗膜の剥落を伴わない腐食進行箇所については検出ができなかった。（図 3-35 及び 36）

(2) 実験結果を踏まえた考察

本実証実験で使用した AI 画像解析モデルは配管の腐食を学習させて構築したモデルであるため、タンクにおいては検出されない腐食があった。タンクに対する静止画を用いた点検への AI 導入に向けては、タンク特有の腐食形態を学習させたモデルを構築する必要がある。

現段階においてタンク点検に今回用いた AI 画像解析モデルをそのまま導入することはできないが、将来的にタンク腐食の検出用に AI モデルが構築され、画像解析により腐食箇所の状態等を定量的に把握することができるようになれば、ドローン点検と組み合わせることで、より効率的なタンク外観点検、計画的な予防保全が可能となるといったことが期待される。

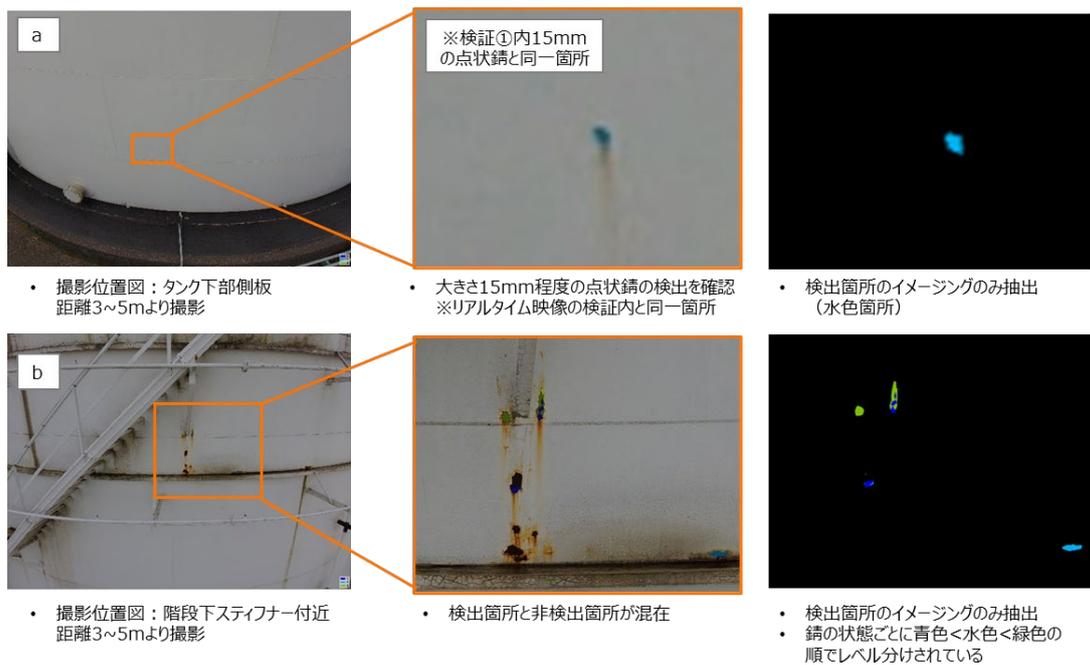


図 3 - 35 AI (配管腐食検出解析モデル) による解析結果

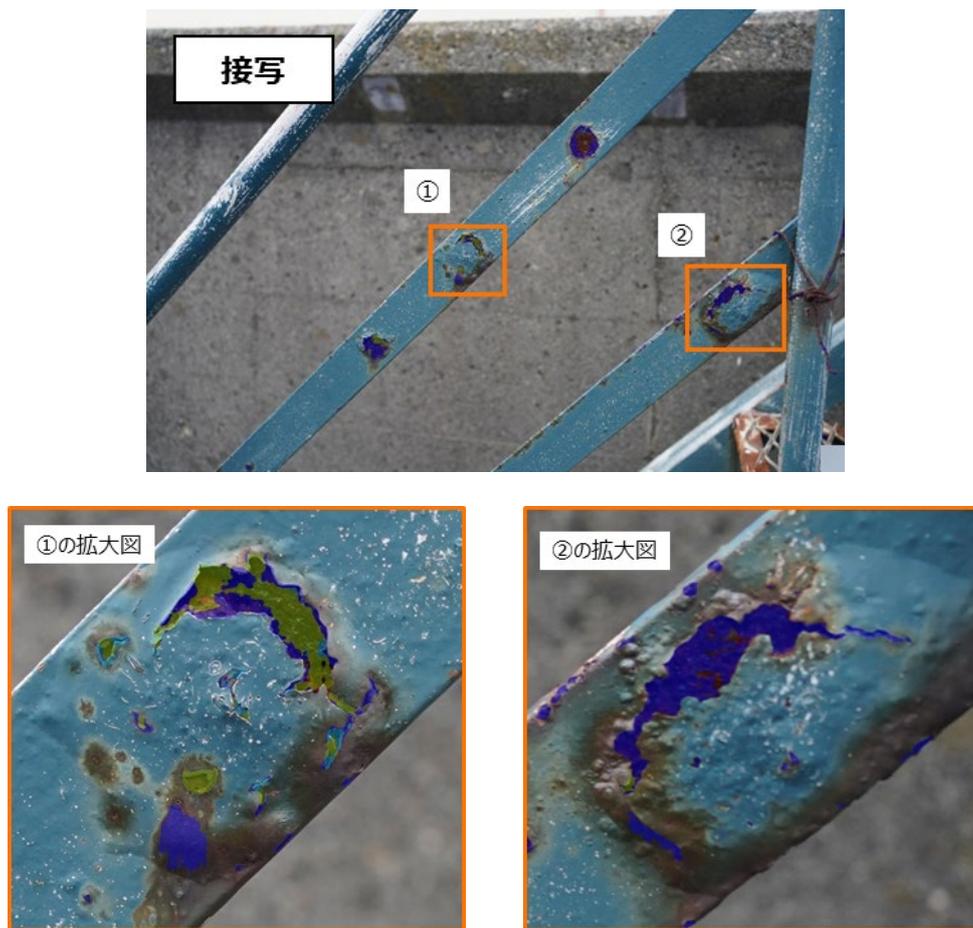


図 3 - 36 塗膜剥落箇所と浮き箇所の検出状況 (実証実験 (1回目) 時の静止画)

3.2.3.5 タンクの3Dモデルの生成と点検記録作成に関する検証

(1) 実験実施及び結果

実証実験（1回目）では、タンク外観静止画から平面的なオルソ画像を生成したが、本実験では立体的な3Dモデルを作成し、オルソ画像と同様に腐食・損傷箇所をマッピングし、より直感的な腐食・損傷箇所の記録・管理方法が可能かどうかについて検証を行った。

静止画撮影時のオーバーラップ率・サイドラップ率はともに70%に設定し、直径21.3m、高さ14.7mのタンクに対して計1,655枚の静止画を撮影した。

3Dモデル作成には複数の静止画を繋ぎ合わせることで立体形状を再現するSfM（Structure from Motion）の手法を用い、撮影した全静止画を使用してモデルを作成している。なお、モデル作成には合計53時間程度を要した。所要時間の内訳は以下のとおり。

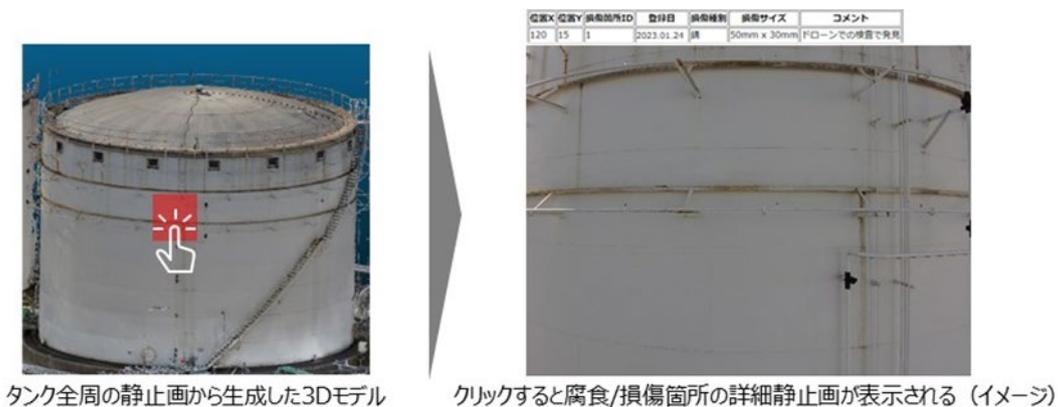
- ① 計算機での処理（ファーストトライ）：24時間
- ② 計算機での処理（1の結果より設定を変更してセカンドトライ）：24時間
- ③ ノイズの除去やスムージング等の手作業：5時間

生成した3Dモデルを図3-37に示す。附属物が無いなど、特徴点の少ない箇所では曲面が上手く再現できず凹んだ形状に見える部分もあったが、腐食・損傷の詳細静止画や情報をプロットして管理するのに十分な3Dモデルが生成できた。



図3-37 実験タンクの3Dモデル

実証実験（1回目）のオルソ画像と同様、生成した3Dモデルに腐食・損傷箇所の詳細静止画や情報を紐付けた。（図3-38）



タンク全周の静止画から生成した3Dモデル

クリックすると腐食/損傷箇所の詳細静止画が表示される (イメージ)

図 3-38 3D モデル上から詳細静止画を表示したイメージ

(2) 実験結果を踏まえた考察

実証実験(1回目)で検証した平面的なオルソ画像に対して、実証実験(2回目)では立体的な3Dモデルの作成とその活用方策に関する検証を行った。

どちらもタンク外観静止画から生成したものであるが、3Dモデルは立体的である分、オルソ画像と比してより直感的な腐食状況の把握が可能であると思われる。

一方で、使用する静止画枚数が多く、実験を行った4,000kL級のタンクであってもモデル生成1回当たり24時間を要した。また、附属物等特徴点の少ない箇所においては、側板部に実際には存在しない凹みが生成される結果となった。また、本実験では腐食・損傷の有無や状態を確認できるような高精細な3Dモデルの作成を目的としていないため、高画素数のカメラを用いておらず、タンク・ドローン間距離も安全側に立った距離にて撮影を行っている。オルソ画像における注意点と同様に、より高精細な3Dモデルを生成するために高解像度の静止画を撮影しようとした場合は、タンクへの接近距離やカメラ性能を変更する必要があり、静止画1枚当たりの画角が狭まることによる附属物等特徴点の映り込み減少によるモデル精度の低下、静止画枚数増加に伴う生成処理時間、データ容量の増大が生じることとなる。

このように点検の記録作成・管理等に3Dモデルの利活用が期待できる一方で、効率性という観点から見た場合、現状では3D技術の課題は多い。このため、現状においてはオルソ画像による点検記録作成・管理を導入し、将来的に課題を克服する技術が開発された場合には3Dの導入を進めていくなどの対応が考えられる。

なお、本実験では静止画のみから3Dモデルを生成するSfM手法を用いており、実際には存在しない側板部の凹みが生成される結果となったが、より高精細な3Dモデルを得るためには、SfMと他の技術を組み合わせることや他の3D化技術(LiDAR等)を活用することが望ましいと考えられる。

3.2.4 実証実験（2回目）のまとめ

実証実験（2回目）では、実証実験（1回目）を踏まえて5つの検証項目を設定し、実験の実施し、考察を行ってきた。ここでは、5つの検証内容毎の総括的なまとめを記す。

(1) 保有空地やタンク間距離が狭いタンクでの飛行に関する検証

タンク間距離が狭くタンクが密集しているような箇所でドローンを飛行させる場合は、タンクへの接触の危険度が高まるため、実証実験（1回目）における安全対策のほか、比較的小型のドローン機体を選定することや、機体に全方位の障害物検知機能（Visual SLAM や LiDAR 等）を装備しておくことが望ましい。ただし、小型機体を選定した場合は、風の影響を受けやすいという場合もあるため、機体諸元・性能、操縦者の技量、当日の気象条件等を総合的に判断して機体選定や監視体制の決定を行う必要がある。

(2) 使用機材等に応じた適切な撮影距離の決定方法に関する検証

ドローンを活用した点検を実施する際は、事業者自らが設定する検出基準等に対して、使用する機材で撮影した場合に腐食・損傷がどのように画像に投影されるかを予め知っておくことは、点検作業の手戻りを防ぐためにも重要である。このことから、本実験では、使用機材等に応じた適切な撮影距離の決定方法として単純な幾何学模様と複雑な QR コードを用いた事前検証方法について検証を行った。両者の実験結果を比較し、より理論に近い値が得られ、判断も容易であることから、単純な幾何学模様を用いた方法を提案することとする。ただし、この方法は定性的な判断手法であり、検証作業により判断にばらつきが出ることに注意して実施する必要がある。

(3) リアルタイム動画の有効性に関する検証

実験においてリアルタイム動画で見逃した腐食は、いずれも小さい又は色味の薄い腐食であり、リアルタイム動画による点検を行ったからといって、重大な見落としが頻発するとは考えにくい。リアルタイム動画による点検は、腐食・損傷を発見した場合にその場で詳細静止画の撮影をできることが大きなメリットであり、既往の目視点検よりは効果的かつ効率的な点検が実現可能と考える。

ただし、検出した腐食・損傷箇所の点検の証跡として静止画撮影を行うとともに、リアルタイム動画での見落としに備え、4K などの高精細動画で同時録画しておき、事後に当該動画を活用したバックチェックを行うことが望ましい。

また、リアルタイム動画の確認は屋外で行われることが想定されることから、屋外使用に適したディスプレイ、又は附属品を活用することが望ましい。

(4) AI 画像解析を用いたタンクの腐食等検出可能性に関する検証

本実験では配管腐食検出用 AI 解析モデルをタンク側板腐食に適用したが、実験の

結果を踏まえると現段階においてタンク点検に今回用いた AI モデルをそのまま導入することはできない。しかしながら、将来的にタンク腐食の検出用に AI モデルが構築され、画像解析により腐食箇所の状態等を定量的に把握することができるようになれば、ドローン点検と組み合わせることで、より効率的なタンク外観点検、計画的な予防保全が可能となるといったことが期待される。

(5) タンクの 3D モデルの生成と点検記録作成に関する検証

オルソ画像同様、3D モデル上に詳細静止画や点検時の情報を紐付けることで外観点検の一元的な記録・管理方法となりえるとともに、点検員の属人化を防ぐことにも寄与しうることが示唆された。なお、本実験では撮影静止画のみを用いて SfM 手法により 3D モデルを生成したが、より精度の高い 3D モデルを生成したい場合には、SfM と他の技術との組合せや他の 3D 化技術 (LiDAR 等) を活用してモデルを生成する方法などが考えられる。

第4章 まとめ

第4章 まとめ

4. 1 まとめ

本調査検討会においては、従来、人による目視を中心として行われてきた屋外貯蔵タンクの点検困難部位の点検に、ドローンを導入することに向けた課題の解決策について調査検討を行ってきた。

第2章では、現状の屋外貯蔵タンクを取り巻く点検制度や危険区域の合理化等を踏まえ、事業者、ドローン事業者を含む検査会社、消防本部にヒアリング調査を行い、ドローン点検の課題等について整理を行った。また、第3章では、2回に渡る実証実験を行い、ドローンを活用した目視代替点検の有効性を確認するとともに、課題解決に向けた方策を検討した。

調査検討会では、これらヒアリング調査や実証実験の結果を踏まえ、別記に「ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの側板等の点検に係るガイドライン」をとりまとめた。

4. 2 今後の課題

(1) より高度な自動点検に向けた課題

本調査検討会開催中の令和4年12月には、有人地帯における目視外飛行、いわゆるレベル4飛行を認める航空法令の改正が行われ、今後、社会全体においてドローンの利活用がさらに進んでいくものと考えられる。本調査検討会においては、これまで危険区域であったタンクの防油堤内でドローンを活用した目視代替点検の方策について検討を行ったが、目視内でのマニュアル操縦及び自律飛行の検討にとどまっている。

タンク定期点検に目視外飛行を導入することができれば、目視点検の自動化も可能となり、さらなる点検効率化が望めることとなるが、現状では、GPSの誤差、マルチパスの問題や、ドローン自律飛行システムの安全性・信頼性やバッテリーの持続時間などといった解決すべき課題がある。

ドローンを活用した自動点検の可否については、今後のGPS誤差等を解決するための準天頂衛星システム等の整備状況や技術開発の動向を踏まえて、改めて検討を行う必要がある。

(2) 腐食状態の把握に資する技術の開発

実証実験(2回目)では、タンク側板腐食等を撮影した静止画に既存の配管腐食検出用AI解析モデルの適用を試したが、現段階においてタンク点検に今回用いたAI画像解析モデルをそのまま導入することはできないことが分かった。しかしながら、タンク腐食の検出用にAIモデルが構築され、画像解析により腐食箇所の状態等を定量的に把握することができるようになれば、ドローン点検と組み合わせることで、さらに効果的かつ効率的なタンク外観点検が可能となることから、タンク外面の腐食形態に即した学習データの蓄積が進み、将来的にはタンク腐食検出用のAIモデルが構築されることに期待したい。

(3) ドローン以外の新技術

本調査検討では、新技術のうちドローンによるタンクの高所点検にテーマを絞った検討を行ってきたが、その他のタンク検査・点検においても、依然としてアナログな手法で行われる点検・検査が多く残されている状況である。近年の技術開発により他の保安分野では新技術導入が進展しつつあることから、安全性、効率性を高める点検・検査に係る新技術に関する情報収集・共有を継続していくことが重要である。

別記 ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの側板等
の点検に係るガイドライン

ドローンを活用した屋外貯蔵タンクの側板等の点検に係るガイドライン

1 本ガイドラインの目的

屋外貯蔵タンクにおける定期点検では、従来より目視を中心とした点検がなされてきている。大規模な屋外貯蔵タンクの供用中に高所などのいわゆる点検困難部位とされる箇所の点検を行うには、地盤面及び廻り階段からの目視検査が行われてきた。

近年、産業分野においては新技術としてのドローンの利活用に注目が集まっており、保安分野における点検にもドローンの導入が進みつつある。

一方、危険物施設においては危険区域内の防爆規制により、非防爆機器であるドローンの導入が進んでいなかったところ、屋外貯蔵タンクにおいては「屋外貯蔵タンク周囲の可燃性蒸気の滞留するおそれのある場所に関する運用について（通知）」（令和4年8月4日消防危第175号）により、一定の条件下における危険区域の合理化が図られたことにより、ドローンを定期点検に導入することが可能となった。

カメラ等撮影機器を搭載したドローンを従来の目視点検に替えて屋外貯蔵タンクの点検困難部位の点検に導入することにより、地盤面からの目視で生じる死角対策、足場等設置コストの低減、高所危険作業の削減等の効果が期待でき、効果的かつ効率的な予防保全につなげることができる。

本ガイドラインは、タンク供用中の定期点検又は開放時の点検でタンク外面を点検するためにカメラ等撮影機器を搭載したドローンを用いて従来の目視点検に代替する点検を行う際に、タンク所有者等が自主保安を推進するために参考となる指針として策定するものである。

2 ドローン機体における安全対策

「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン」（石油コンビナート等災害防止3省連絡会議、以下「3省ドローンガイドライン」という。）によるほか、以下の安全対策を講じること。

- (1) 非常時の自動帰還機能が搭載されていること。
- (2) 機体周囲の障害物をセンサー等により検知することで衝突を防止する機能を装備すること。なお、センサー等にあっては、表-1を参考とすること。
- (3) ドローンを飛行させる環境に応じて適切な耐強風性能を有する機体を選定すること。
- (4) 操縦系統及び映像伝送系統の無線設備は、それぞれ複数の周波数帯が使用可能であることが望ましい。
- (5) 点検対象タンクと隣接タンク間を飛行させる場合は、タンク間距離から導き出されるドローン運用事業者の推奨する大きさの機体を選定することが望ましい。

- (6) 万が一の衝突時に落下を防ぐためのプロペラガード等を装着すること。ただし、装着することにより突風等の影響を受けドローンの飛行が不安定となる恐れがある場合にあつてはこの限りではない。

表-1 衝突回避センサー等の例

区分	名称	概要
障害物検知	Visual SLAM	カメラで取得した画像から位置特定と周囲の地図作成を行い、障害物との衝突を回避
	LiDAR SLAM	レーザースキャンで取得した情報より、位置特定と周囲の地図作成を行い、障害物との衝突を回避
	赤外線センサー	赤外光を利用し、物体に反射した光を受講することで障害物までの距離を計測
	超音波センサー	超音波を利用し、音波の跳ね返りの時間を利用して障害物までの距離を計測
	ミリ波レーダー	ミリ波帯の電波を使って対象物との距離を測定するレーダーを使用し、障害物を検知
	ビジョンセンサー	複数のカメラで撮影した画像をコンピュータで解析処理することで、障害物を検知
自己位置精度向上	RTK対応ドローン	地上に設置した「基準局」からの位置情報により、高い精度の測位を実現し、ドローンの自己位置を安定

3 飛行に際しての安全対策

ドローンの飛行に際しての安全対策は、3省ドローンガイドラインによるほか、飛行区域周囲の状況、飛行時の気象条件等に応じて以下の点に留意すること。

- (1) ドローンの飛行前に事業所内関係部署に対する飛行計画等の事前周知、調整を行うこと。
- (2) 「屋外貯蔵タンク周囲の可燃性蒸気の滞留するおそれのある場所に関する運用について」（令和4年8月4日付消防危第175号）1の（1）及び（2）の要件に適合していることを常時確認するとともに、同通知2の安全対策を講じること。
- (3) 強風や突風等に対する適切な監視体制を構築すること。なお、ウインドガーダー等タンク附属物により複雑な気流も生じうるので注意する必要があること。
- (4) 同一タンクヤード内にタンクが複数存する箇所等、周囲の状況によりドローンが監視員の死角に入りやすい箇所では飛行する際は、監視員の増員、複数の離発着場所の設定等、ドローンを見失わない監視体制とすること。ただし、航空法（昭和27年法律第231号）の定めに従い目視外飛行を行う場合にあつてはこの限りでない。
- (5) 自律飛行を行う際に不測の事態が生じた場合には、マニュアル操縦への切り替え等に対応すること。
- (6) バッテリーは、残量に余裕を持った交換を行うこと。

4 タンク外観撮影に関する留意事項

- (1) 静止画の撮影距離決定のための事前検証

タンク所有者等が使用するカメラを用いて自らの定める平面的な検出基準値以上の寸法をもつ腐食等を確実に検出するため、以下の要領を参考に実機カメラを用いた事前検証を行い、撮影距離（タンクドローン間の距離）を決定すること。

- ① 検出基準値の寸法を含む複数の寸法で構成される単純な模様を印刷したコピー用紙等を地上において実機カメラで撮影する。検証に用いる模様の例を図-1に示す。

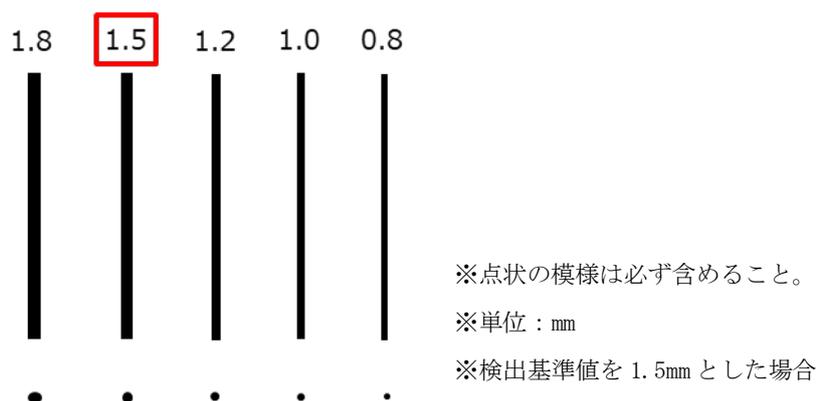


図-1 使用カメラの事前検証に用いる模様の例

- ② 以下の式により導き出された撮影距離から撮影を開始する。

$$\text{撮影距離}(m) = \frac{\text{撮影対象の画素寸法}(m)}{\text{使用するデジタルカメラの1画素のサイズ}(m)} \times \text{焦点距離}(m)$$

- ③ 撮影した静止画をディスプレイ等で確認し、検出基準値の一段下の点状模様が識別できた撮影距離以下の距離をドローン点検時の撮影距離として決定する。検出基準値未満の点状模様が識別できない場合は、当該点状模様が識別できるまで撮影距離を短くして撮影及び静止画確認を繰り返す。

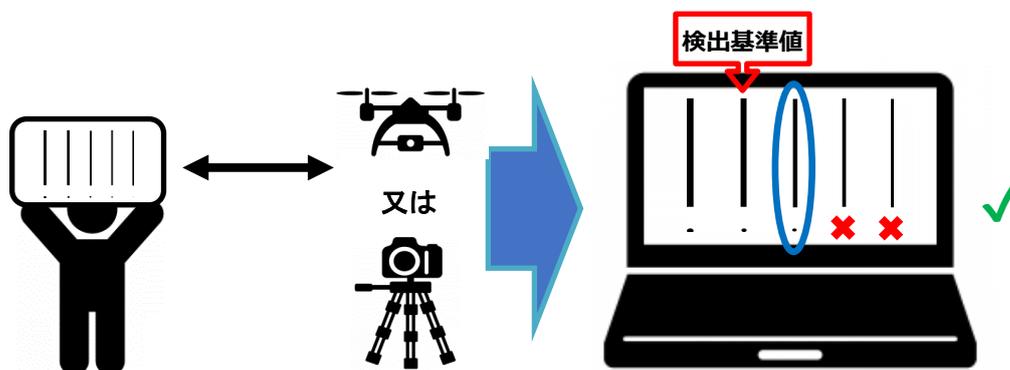


図-2 事前検証の概念図

(2) 静止画撮影時の留意事項

- ア 腐食等の位置や附属部等障害物の有無などに応じて、適切な位置にドローンを移動させて撮影を行うこと。
- イ 静止画の焦点が合わない等の不具合が生じることが想定される場合は、カメラ設定等を適切に行うことにより不具合の解消又は軽減を図ること。静止画に生じる不具合の解消・軽減策の一例を参考として表-2に示す。

表-2 静止画に生じる不具合とその解消・軽減策の一例（参考）

想定される不具合	不具合が生ずる要因等	カメラ設定による解消又は軽減策	カメラ設定以外の解消又は軽減策
焦点が合わない	<ul style="list-style-type: none"> 腐食等が存する箇所付近に附属物等がある。 広めの画角で撮影した場合の画角端部 	絞り値（F値）を大きくする。	<ul style="list-style-type: none"> 腐食等に焦点が合うような位置にドローンを移動させる。
撮影ブレが生じる	<ul style="list-style-type: none"> ドローン移動中の撮影 風によるドローンの変位 焦点距離が長い 日陰など周囲の照度が低い等 	シャッタースピードを速くする。	<ul style="list-style-type: none"> ドローンを静止させて撮影する。 撮影日又は時間帯を変更する。

(3) リアルタイム動画による点検時の留意事項

ドローンを活用した点検は、飛行方式（自律飛行/マニュアル）、点検する画像方式（静止画/動画）などにより様々な方法が考えられるが、飛行しているドローンから地上ディスプレイにリアルタイムで伝送される動画（以下「リアルタイム動画」という。）による点検を行う場合は、以下によること。

- ア 伝送されるリアルタイム動画の画素数に対応した無線通信設備、ディスプレイを用いること。なお、屋外でディスプレイ観察を行う場合は、高輝度ディスプレイ、遮光シェードなどの活用によりモニターの視認性を確保すること。
- イ リアルタイム動画により腐食等を検出した場合は、当該箇所の静止画を撮影するとともに、位置等の情報を記録すること。
- ウ リアルタイム動画による点検は、ドローン移動中の動画を確認しつつ腐食等の検出を行うことから、カメラの録画機能により動画を録画し、事後検証ができる記録を残すこと。

5 その他

- (1) ドローンを活用した目視代替点検の結果は、タンク側板の展開図面等に記録するとともに撮影した静止画、動画を保存すること。また、既存図面への記録に替えて、タンク静止画から生成したタンク全体の3Dモデル、オルソ画像（正射投影画像）等に腐食等の詳細静止画や位置等の情報を紐付け、電子的に記録管理すること

も差し支えないものであること。

- (2) 本ガイドラインは、タンク外面を点検する際の目視代替点検として、ドローン及び撮影機器を用いた点検方策を示したものである。このため、開放中の特定屋外貯蔵タンクが「特定屋外貯蔵タンクの側板の詳細点検に係るガイドラインについて」（平成25年3月29日付消防危第49号）中、別添「特定屋外貯蔵タンクの側板の詳細点検に係るガイドライン」（以下「詳細点検ガイドライン」という。）、2の詳細点検を実施すべきタンクに該当した場合は、本ガイドラインに基づく点検ではなく、詳細点検ガイドラインに基づく詳細点検を行うべきであること。ただし、同ガイドライン中、直近から目視で確認することとされている事項については、足場やゴンドラ等を設置せずにドローンを活用した点検に替えても差し支えないものであること。

参考資料 1 航空法の規制・制度の詳細

航空法の規制・制度の詳細

1 無人航空機の登録制度

所有者等の把握、危険性を有する機体の排除等のため、令和2年6月24日に公布された改正航空法に基づき無人航空機の機体の登録制度が創設され、100グラム以上の無人航空機の登録が義務化された。

所有者は、ドローン情報基盤システム（DIPS）2.0より機体情報、所有者・使用者情報の登録申請を行い、発行された登録記号の機体への明示、リモートID機能の搭載が必要となる。

詳細については以下を参照

国土交通省 無人航空機の登録制度：

https://www.mlit.go.jp/koku/koku_ua_registration.html

2 ドローン飛行レベル

ドローン飛行レベルとは、人口密度や機体の操縦難易度に応じて作られた、無人航空機を飛行させる上での区切りのことを指す。

航空法の改正により、令和4年12月5日からこれまで認められていなかったレベル4飛行（有人地帯における目視外飛行）が可能となった。

	操縦	自動・自律	
	目視内	目視外（補助者なし）	
無人地帯 <small>（離島・山間部等）</small>	レベル1 目視内での 操縦飛行	レベル2 目視内での 自動・自律 飛行	レベル3 無人地帯における目視外飛行
有人地帯			レベル4 有人地帯における目視外飛行

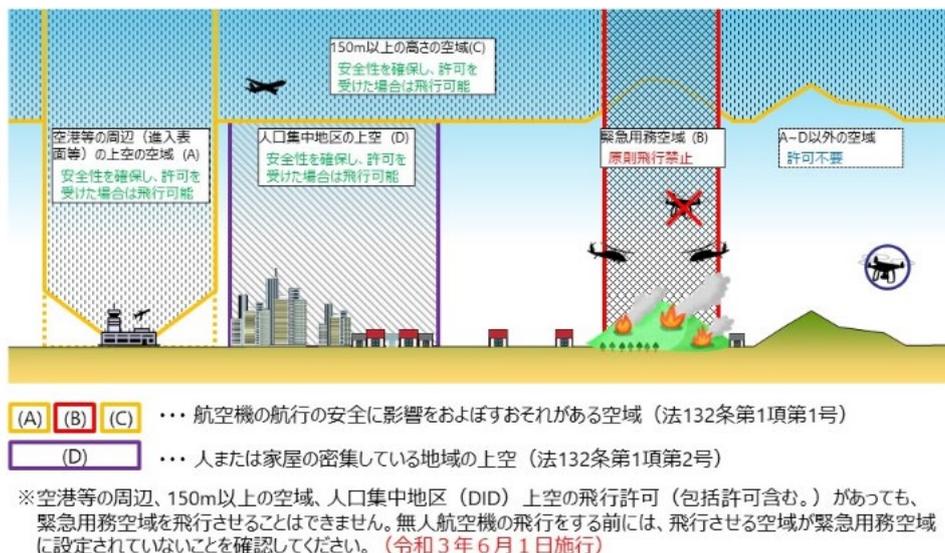
図1 ドローン飛行レベル

3 特定飛行

「特定飛行」とは、無人航空機を(1)の(A)から(D)の空域で飛行させる場合及び(2)の(i)から(vi)の方法で飛行させる場合を指し、その飛行に際してはあらかじめ国土交通大臣の許可及び承認若しくはそれらのいずれかを受ける必要がある。

(1) 無人航空機の飛行の許可が必要となる飛行空域

図2に示す、(A) 空港等の周辺の空域、(B) 緊急用務空域、(C) 地表面又は水面から150m以上の高さの空域、(D) 人口集中地区の上空 において無人航空機を飛行させる場合には、あらかじめ、国土交通大臣の許可を受ける必要がある。



出典：国土交通省 HP

図2 無人航空機の飛行の許可が必要となる飛行空域

(2) 無人航空機の飛行の承認が必要となる飛行方法

図3に示す(i)夜間飛行、(ii)目視外飛行、(iii)30m未満の飛行、(iv)イベント上空飛行、(v)危険物輸送、(vi)物件落下 の飛行方法の場合には、あらかじめ、国土交通大臣の承認を受ける必要がある。



出典：国土交通省

図3 無人航空機の飛行の承認が必要となる飛行方法

4 無人航空機の飛行形態

無人航空機の飛行形態については、図4に示すリスクに応じた3つのカテゴリーに分類される。

なお、リスクが高いものからカテゴリーⅢ、Ⅱ、Ⅰに分類され、該当するカテゴリーに応じて手続きの要件が異なる。

カテゴリーⅢ	特定飛行のうち、無人航空機の飛行経路下において立入管理措置を講じないで行う飛行。（＝第三者の上空で特定飛行を行う）
カテゴリーⅡ	特定飛行のうち、無人航空機の飛行経路下において立入管理措置を講じたうえで行う飛行。（＝第三者の上空を飛行しない）
カテゴリーⅠ	特定飛行に該当しない飛行。 航空法上の飛行許可・承認手続きは不要。

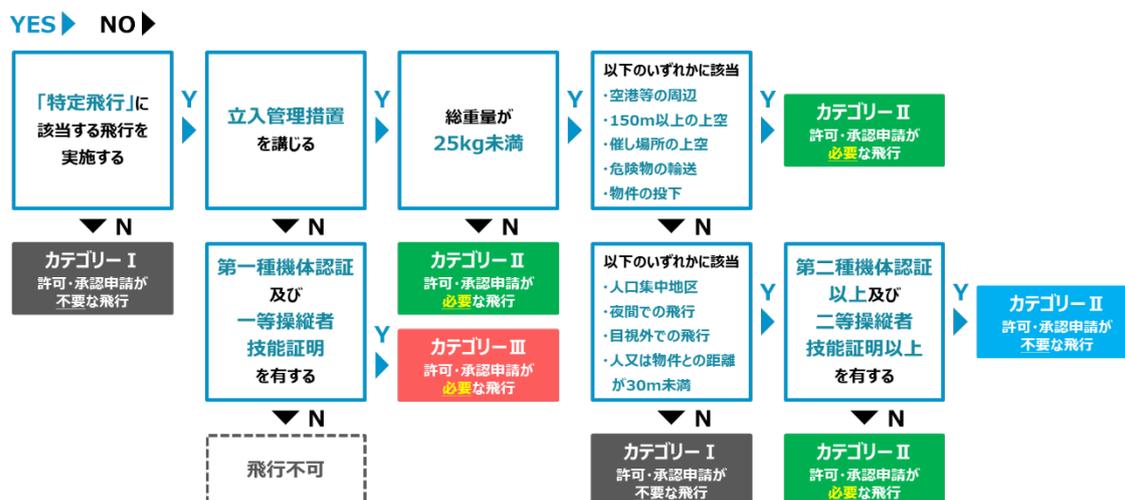
※ 立入管理措置とは、無人航空機の飛行経路下において、第三者（無人航空機を飛行させる者及びこれを補助する者以外の者）の立入りを制限することを指す。

出典：国土交通省 HP

図4 飛行カテゴリー概要

5 飛行カテゴリーの決定手順

図5に示す手順により、飛行カテゴリーが決定される。



※ 機体認証及び操縦者技能証明の取得により、カテゴリーⅡ飛行のうち一部の飛行許可・承認手続きが不要になる場合がある。

出典：国土交通省 HP

図5 カテゴリー決定フロー

6 各飛行カテゴリーで必要となる手続き

各飛行カテゴリーで必要となる手続きは次のとおり

(1) カテゴリーⅠ飛行

特定飛行に該当しないため、飛行許可・承認の申請は不要

(2) カテゴリーⅡ飛行

特定飛行のうち空港等周辺、150m 以上の上空、イベント上空飛行、危険物輸送及び物件投下に係る飛行並びに最大離陸重量 25kg 以上の無人航空機の飛行については、立入管理措置を講じた上で、無人航空機操縦士の技能証明や機体認証の有無を問わず、個別に許可・承認を受ける必要がある。

また、特定飛行のうち上記以外（人口密集地区上空、夜間、目視外、30m 未満飛行であって、飛行させる無人航空機の最大離陸重量が 25kg 未満の場合）については、立入管理措置を講じた上で、無人航空機操縦士の技能証明を受けた者が機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合、飛行マニュアルの作成等無人航空機の飛行の安全を確保するために必要な措置を講じることにより、許可・承認を不要とすることができる。

この飛行マニュアルは、無人航空機を飛行させる者が安全の確保に必要な事項を盛り込み、その内容や形式は、飛行の実態に即して作成し、これを遵守する必要がある。

これら以外の場合の飛行は、個別に許可・承認を受ける必要がある。

(3) カテゴリーⅢ飛行

カテゴリーⅢ飛行は、一等無人航空機操縦士の技能証明を受けた者が第一種機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合であって、飛行の形態に応じたリスク評価結果に基づく飛行マニュアルの作成を含め、運航の管理が適切に行われていることを確認して許可・承認を受けた場合に限り行うことができる。

なお、レベル4飛行もカテゴリーⅢに含まれる。

7 機体認証・型式認証

機体認証及び型式認証とは、特定飛行を行うことを目的とする無人航空機の強度、構造及び性能について、設計、製造過程及び現状が安全基準に適合するか検査し、安全性を確保するための制度である。

表 1 機体認証・型式認証概要

区分	対象となる機体	有効期限
第一種機体認証	立入管理措置を講ずることなく行う特定飛行を目的とした機体（カテゴリーⅢ飛行）	1年
第一種型式認証		3年
第二種機体認証	立入管理措置を講じた上で行う特定飛行を目的とした機体（カテゴリーⅡ飛行）	3年
第二種型式認証		3年

(1) 機体認証

無人航空機の利用者が所有する一機毎の機体が対象となる。

特定飛行を行うことを目的とする無人航空機の強度、構造及び性能について、設計、製造過程及び現状が安全基準に適合するか検査し、安全性を確保するための認証制度

なお、型式認証を受けた型式の無人航空機は、機体認証の検査の全部または一部が省略される。

(2) 型式認証

主にメーカー等が設計・製造する量産機が対象となる。

特定飛行に資することを目的とする型式の無人航空機の強度、構造及び性能について、設計及び製造過程が安全基準及び均一性基準に適合するか検査し、安全性と均一性を確保するための認証制度

詳細については以下を参照

国土交通省 機体認証等：<https://www.mlit.go.jp/koku/certification.html>

8 無人航空機操縦者技能証明

無人航空機操縦者技能証明とは、無人航空機を飛行させるために必要な技術（知識及び能力）を有することを証明する資格制度で、一等無人航空機操縦士、及び二等無人航空機操縦士に区分され、機体の種類や飛行方法に応じて限定が付されている。

当該技能証明が必要となる飛行については、図5 カテゴリー決定フローを参照

表2 無人航空機操縦者技能証明の資格区分とその概要

区分	対象となる飛行	無人航空機の種類	飛行方法
一等無人航空機操縦士	立入管理措置を講ずることなく行う特定飛行（カテゴリーⅢ飛行）	25kg未満の、 ・マルチローター ・ヘリコプター ・飛行機 のいずれかを選択	昼間の目視内飛行
二等無人航空機操縦士	立入管理措置を講じた上で行う特定飛行（カテゴリーⅡ飛行）		

※ 限定変更を行うことで、操縦する無人航空機（ヘリコプター/マルチローター/飛行機）の追加、最大離陸重量の拡大（25kg以上）、昼間飛行に加えて夜間飛行、目視内飛行に加えて目視外飛行が可能となる。なお、最大離陸重量、飛行可能な時間帯、飛行の際の目視範囲の拡大は、技能証明書の新規申請時から行うことができる。

詳細については以下を参照

国土交通省 無人航空機操縦者技能証明等：

<https://www.mlit.go.jp/koku/license.html>

9 運航に係る手続き等

無人航空機を飛行させるために必要な運航に係る手続き等については以下のとおり。

(1) 飛行計画の通報

無人航空機を特定飛行させる者は、事前に当該飛行の日時、経路等の事項を記載した飛行計画を国土交通大臣に通報しなければならない。

(2) 飛行日誌の作成

無人航空機を特定飛行させる者は、飛行・整備・改造等の情報を遅滞なく飛行日誌に記載しなければならない。

(3) 事故等の報告及び負傷者救護義務

無人航空機に関する事故または重大インシデントが発生した場合、当該無人航空機を飛行させるものが、直ちに飛行を中止し、負傷者を救護すると共に、当該事故又は重大インシデントが発生した日時及び場所等を国土交通大臣に報告しなければならない。

詳細については以下を参照

国土交通省

飛行計画の通報・飛行日誌の作成：<https://www.mlit.go.jp/koku/operation.html>

事故等の報告及び負傷者救護義務：

https://www.mlit.go.jp/koku/accident_report.html

10 飛行カテゴリー別に必要となる手続き及び対象となる制度等

各飛行カテゴリー区分に応じて必要となる手続き、求められる機体認証及び操縦者技能証明並びに運行に係る制度等については表3のとおり。

表3 飛行カテゴリー別に必要となる手続き及び対象となる制度等

カテゴリー区分	第三者上空	飛行区分・方法		機体認証	操縦者技能証明	許可承認申請	運行に係る制度		
		①	②				飛行計画の通報	飛行日誌の作成	事故等の報告
Ⅲ	飛行する	●	●	第一種	一等	必要	必要	必要	必要
	飛行する	●	×	第一種	一等	必要	必要	必要	必要
	飛行する	×	●	第一種	一等	必要	必要	必要	必要
Ⅱ	飛行しない	●	●	なし	なし	必要	必要	必要	必要
	飛行しない	●	●	第二種以上	二等以上	必要	必要	必要	必要
	飛行しない	●	×	なし	なし	必要	必要	必要	必要
	飛行しない	●	×	第二種以上	二等以上	必要	必要	必要	必要
	飛行しない	×	●	なし	なし	必要	必要	必要	必要
	飛行しない	×	●	第二種以上	二等以上	不要	必要	必要	必要
Ⅰ	飛行しない	×	×	—	—	不要	推奨	推奨	必要

飛行区分・方法

- ①：空港周辺の空域、150m以上の空域、イベント上空飛行、危険物輸送、物件落下、総重量 25kg 以上
 ②：人口集中地区、夜間飛行、目視外飛行、30m未満の飛行

詳細については以下を参照

国土交通省

無人航空機を屋外で飛行させるための手続きについて：

<https://www.mlit.go.jp/common/001579420.pdf>

なお、今後の技術開発状況等によりドローンを活用したタンク自動点検を行うことが可能となった場合は、目視外飛行を行うことから、立入管理措置の有無に応じてカテゴリーⅡ又はⅢに該当することとなる。このため、点検に際しては、表3を参考に航空法令の定めに応じた適切な手続きを行う必要がある。

参考資料2 ヒアリング調査結果の詳細

ヒアリング調査結果の詳細

1 ヒアリング対象と主たる目的

ヒアリング対象と主たる目的については表1のとおり

表1 ヒアリング対象と主たる目的

ヒアリング対象	ヒアリング数	主たる目的
タンク保有事業者	9か所	ドローンの活用における課題の抽出
石油備蓄	2か所	
石油精製事業者	2か所	
化学工業事業者	5か所	
非破壊検査事業者	3か所	ドローンを飛行させる上での注意点や対策等の情報収集
ドローン関連会社	3か所	
ドローンメーカー	1か所	
ドローンサービス提供会社	2か所	
エンジニアリング会社	2か所	腐食の定量化技術及びドローンで取得した検査データを効果的に活用・管理できる技術の情報収集
地域消防	2か所	地域間でのドローン活用に対する考え方について意見を抽出

2 調査期間

令和4年8月9日から12月17日まで

3 各ヒアリング対象に対するヒアリング内容

ヒアリング調査でどのヒアリング対象にどの項目の聞き取りを行ったかは表2に示すとおり

表2 各ヒアリング対象に対するヒアリング内容

ヒアリング項目	内容	ヒアリング対象			
		タンク保有 事業者・ 非破壊検査 事業者	ドローン 関連会社	エンジニ アリング 会社	地域 消防
(1)ドローンの活用 事例・活用ニーズ	・石油備蓄基地、プラント保安分野等での活用事例 ・ドローンと併せて活用している技術や活用を期待している技術	●			
(2)ドローン活用の 課題	・タンクの点検にドローンを活用する上で課題となっている事象	●	●		
(3)既存点検方法の 有効性と課題	・通知等で示されている既存の点検方法や実際に現場で行われる点検の有効性と課題 ・タンクの点検で将来、課題になると考えられる課題	●			
(4)ドローンやセンサ ー等に求める性能	・タンクの点検にドローンを活用するにあたり、飛行時間、安全性能、通信速度、撮影後の処理等に係る課題や搭載するカメラや点検用センサーに必要な性能	●	●		
(5)ドローンでの撮影 方法やスクリー ニング方法	・効率的な腐食箇所の検出のために撮影やスクリーニング作業で実施している方法や工夫	●	●		
(6)近接飛行を行う 場合の安全対策	・隣接するタンク間の飛行や腐食箇所の詳細な写真撮影のために、ドローンを近接飛行させる場合の安全対策	●	●		
(7)腐食の定量化技 術・ドローで取得 した検査データを 管理・活用できる 技術	・腐食の定量化技術・ドローンで取得した検査データを管理・活用できる技術情報の収集	●	●	●	
(8)ドローン以外の 新しい点検技術	・ドローン以外でタンクの点検効率化に活用できる技術情報の収集	●		●	
(9)地域間での ドローン活用に 対する考え方	・地域間でドローンの活用に対して考え方にどのような違いがあるのか				●
(10)その他	・その他の意見	●	●	●	●

4 各ヒアリング項目に対するヒアリング結果

(1) ドローンの活用事例・活用ニーズ

石油備蓄基地、プラント保安分野におけるドローン活用状況の調査結果を図1及び図2に示す。

ドローンの活用は一部運用中の事業者もいるが、実証実験までという事業者が大半であった。

175号通知の発出により、今後の活用を検討しているという意見が多く聞かれたが、ヒアリング調査の時点では各事業者で社内ルールや安全対策の検討を行っている段階であった。

ドローンと併せて活用している技術や活用を期待している技術としてUTドローンが挙げられたが、検査結果の再現性がない等の問題があり、実用化には至っていない。

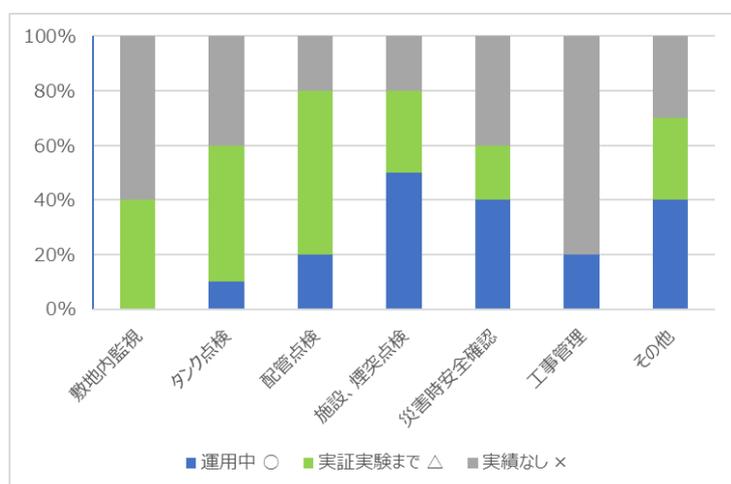


図1 タンク保有事業者のドローンの活用状況

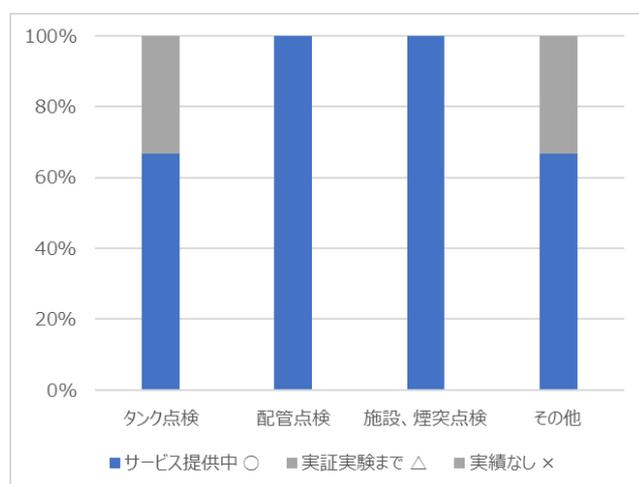


図2 非破壊検査事業者のドローンの活用状況

(2) ドローン活用の課題

従来、タンクの周囲には危険区域が設定されており、危険区域内でドローンを飛行させることはできない。

タンクの周囲3mと防油堤内は危険区域とされており、防油堤内への落下危険を考慮するとドローンを活用したタンクの点検は防油堤外からでしか行うことができず、これがタンクの点検にドローンを導入することへの課題となっていた。

しかしながら175号通知が発出されたことにより、一定条件下であれば供用中のタンクにドローンを近接して飛行させることが可能となり、前述の課題は解決された。

ヒアリング調査の実施時期が175号通知発出直後であったことから、供用中のタンクにドローンを近接させて行う点検、または、その実証実験を行っている事業所はなかった。

(3) 既存点検方法の有効性と課題

既存の直接目視点検では、低所及び階段部周辺の近接目視可能な場所で腐食等を発見した場合には、腐食のサイズや肉厚測定等がすぐにでき、補修が必要な場合もすぐに対応できる点を多くの事業者がメリットとして挙げていた。

また、画像での判断と異なり、周辺状況を確認することで腐食の発生要因を特定できる場合もあるとの意見もあった。

しかしながら、定期点検や日常の巡回点検で特に問題が発見されなければ、足場等が設置されないため、死角等の直接目視が難しい部分に腐食が発生している場合には見逃される可能性があり、課題として考えられている。

階段部周辺を除く高所で近接目視での点検を行う場合には足場またはゴンドラの設置が必要となるが、足場の設置には多大な労力とコストがかかり、足場、ゴンドラどちらの場合においても高所作業が伴うため、墜落や転落の危険があるとの意見が出された。

【ヒアリング対象の声（抜粋）】

- ・ 人が近くで目視確認できるメリットとして、もし腐食が確認された場合、実際の腐食状況を目視や触診でより正確に判断することができる。（タンク保有事業者）
- ・ 人による目視点検の場合、腐食の発生が疑わしい箇所について、すぐに触って、詳細点検の可否を判定できる。（タンク保有事業者）
- ・ 錆のこぶ近傍だけでなく周辺全体の状況を確認することで腐食を発生させた要因（外面腐食の場合に雨水が侵入してきたルート、滞留しやすい部位）推定や他の類似部位の確認がスムーズに行える場合がある。（タンク保有事業者）
- ・ 側板上部などは足場・ゴンドラが無い場合は大半が目視検査不可。ウインドガードが広い（検査員が乗ることが出来る板厚を有するもの）場合に限っては手すり・親綱を設置して目視検査も可能。（非破壊検査事業者）

(4) ドローンやセンサー等に求める性能

多くの事業者がドローンの飛行時間、カメラ性能、耐風性能等の基本的な性能向上を望んでいる。

また、ドローンで階段部周辺を除く高所で腐食等を検出した場合、その場ですぐに腐食サイズや肉厚の測定を行うことは難しく、腐食の定量化が可能なセンサー等の開発も望まれている。

【ヒアリング対象の声（抜粋）】

- ・ ドローンでの撮影画像と従来の足場上で、近接しての撮影画像ではかなりの差異があるように感じる。（タンク保有事業者）
- ・ 従来の直接目視検査では、その場にいるので、深さ測定と、腐食範囲と位置情報を正確に測定できるがドローンでは難しい。（非破壊検査事業者）

- ・ 飛行時間が 30 分程度と短いため、日常運用に耐えられるか懸念がある。(タンク保有事業者)

(5) ドローンでの撮影方法やスクリーニング方法

ドローン活用した点検を効果的なものにするためには、撮影方法が非常に重要と考えられている。

多くの事業者が、腐食等の有無や深さ測定、肉厚測定等の必要性を判断するためには、複数の角度からの撮影が必要だと考えている。

リアルタイム映像で点検を行う場合、映像の画質が構内ネットワークや通信環境に左右されることがあるため注意が必要との意見もあった。

【ヒアリング対象の声（抜粋）】

- ・ 腐食等の有無の判断だけであれば直接目視でもドローンでもそれほど変わりはないと考える (タンク保有事業者)
- ・ 静止画は 2 次元的な情報しか得られないので角度を変えて静止画の枚数を増やすなどの対応は必要だと考えています。(タンク保有事業者)
- ・ 直接目視の場合、見る角度を容易に変えることができるので、明るさ等の周辺環境が変わっても正確に状況を把握できるが、ドローンの場合は撮影角度を容易には変更できないのではないかと感じる。(タンク保有事業者)
- ・ リアルタイム動画伝送のサービスを提供しているが、プラント事業所内はモバイル公衆回線の電波が弱く、動画が荒くなってしまっている (ドローン関連会社)

(6) 近接飛行を行う場合の安全対策

タンク近接でのドローンの飛行では、ドローンがタンクに衝突し、墜落する危険性があり、安全対策として衝突回避機能等を搭載したドローンを活用することが適切であると考えられている。

また、ドローン関連会社からは、タンクに近接すると GPS が反射し、自己位置の特定が難しくなるとの意見が出された。

タンクに近接した飛行は難易度が高く、操縦者に高い操縦技術が求められており、操縦者の育成も課題として挙げられた。

【ヒアリング対象の声（抜粋）】

- ・ タンク近接でドローンを飛行させるには、センサー、SLAM 等を用いた障害物検知等の安全対策が必要と考える。(ドローン関連会社)
- ・ GPS 制御が物件に近づくと誤反応を起こしやすい為、安易に物件に近づくことができないので何処までの範囲まで近づくかの判断が難しい。(タンク保有事業者)

- ・ まずはドローン飛行技能のある方をお願いして点検することになると思うが、将来的には高い技術を持った操縦者を育成したいと考えている。(タンク保有事業者)

(7) 腐食の定量化技術・ドローンで取得した検査データを管理・活用できる技術

(ア) 腐食の定量化技術

本編第2章2.5及び参考資料2-3を参照

(イ) ドローンで取得した検査データを管理・活用できる技術

本編第2章2.6及び参考資料2-4を参照

(8) ドローン以外の新しい点検技術

本編第2章2.7及び参考資料3-5を参照

(9) 地域間でのドローン活用に対する考え方

これまで近接しての直接目視が困難であった階段部周辺以外の高所の点検や異常の早期発見にドローンが活用されることに対する地域消防の期待感が高い。

飛行計画に関する事前協議等については、地域間で対応に異なりがあり、飛行計画書の受領に留まる地域もあれば、事業者と対面で計画の確認を行う地域もあった。

一部では事業者の飛行に際して立会いを依頼し、ドローンの飛行に関するリスクや安全対策の検証を行い、地域全体の技術導入の推進や安全性の向上につなげる活動も行われている。

【ヒアリング対象の声（抜粋）】

- ・ ドローン活用の促進により、施設点検が容易になるため、異常の早期発見による事故防止の効果に期待している(地域消防)
- ・ 自治体で作成した作成例により自主的な情報提供として電子メールにより飛行計画書を受領している。気づいた点があれば確認する(地域消防)

(10) その他

タンク保有事業者は開放検査での活用よりも供用中タンクの定期点検や巡回点検にドローンの活用を検討している。

また、これまでは従来の危険区域内にドローンが進入できなかったため、ドローンを活用した点検を本格的に検討できておらず、直接目視点検とドローンを活用した点検のコスト比較等は行っていないが、実際に導入するとなるとドローンを活用した点検がどのくらいのコスト削減につながるかは重要な指標となるとの意見が多く聞かれた。

今後、ドローンの活用を拡大するために航空法の規制緩和や地域間におけるドローン

活用の考え方がある程度統一されたものとなることが望ましいとの意見もあった。

【ヒアリング対象の声（抜粋）】

- ・ 開放検査では、ドローンを活用した点検の後、補修のために結局ゴンドラを使用しなければならなくなり、二度手間になるのではないかと考えており、日常点検で活用する方がメリットはあると感じる。（タンク保有事業者）
- ・ 詳細なコスト比較はドローンを導入する際に行うことになると思いますが、ドローンの飛行や撮影を外注するとなるとコストが安くなるとは限らないのではないかと考えています。（タンク保有事業者）
- ・ 多くの事業者が管轄消防に確認や相談をしているが、対応が地域間で統一されていないように感じる。（ドローン関連会社）
- ・ ドローンの活用拡大には航空法の規制緩和も重要だと思います。（タンク保有事業者）

参考資料3 腐食の定量化技術の詳細

腐食の定量化技術の詳細

1 調査結果

技術情報に関する調査結果を表1に示す。

表1 腐食の定量化技術の調査結果

技術名	目的・用途
UT ドローン（超音波探傷検査）	面探傷検査・肉厚測定
コーティングの膜厚測定	面探傷検査・肉厚測定
ポールドローン+渦流探傷検査、打音検査	面探傷検査・肉厚測定 劣化箇所の検出
光切断法	傷や錆のサイズ測定
3D 写真計測器	傷や錆のサイズ測定
LiDAR 搭載ドローン	傷や錆のサイズ測定 傷や錆の3次元情報の取得
EMAT（電磁超音波）	面探傷検査・肉厚測定

2 各技術の詳細

各技術の詳細について以下に示す。

なお、下記の表記は現時点での技術段階を示す。

- ・開発中：開発段階であり、実地での実証実験に至っていない
- ・実証実験：実地での実証実験等による検証は行っているが、運用には至っていない
- ・運用中：事業者による運用や検査事業者等によるサービスが展開されている段階

(1) UT ドローン（超音波探傷検査）（実証実験）

超音波探傷装置を搭載したドローンにより側板高所の検査を実施するもの。

1回あたりの飛行時間は15分程度、1日に200～300箇所程度の測定できる。

足場等を設置することなく側板高所の点検ができるため、不具合の早期発見やコスト低減が期待できる。

一方で、附属物取付け部付近、余盛のある溶接線近傍及び腐食の激しい表面については計測が難しいという欠点がある。

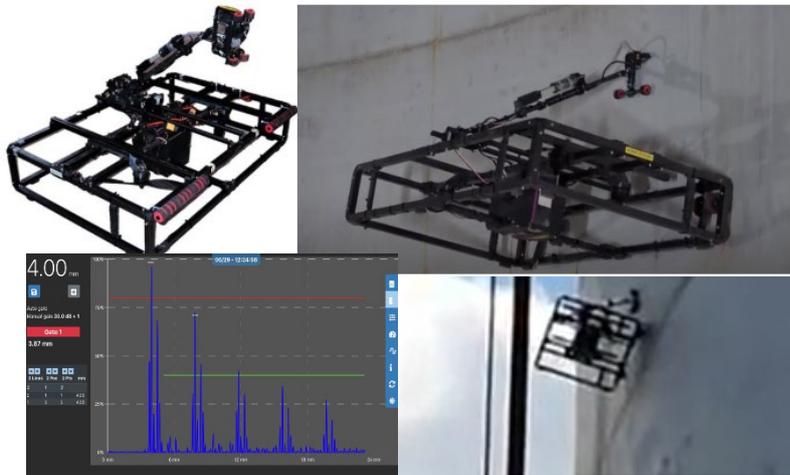


図1 UT ドローンを使用した点検

出典：厚生労働省 プラント設備等におけるドローンを活用した点検事例集
Terra Drone 株式会社、Terra Inspectioneering B.V.

(2) コーティングの膜厚測定（実証実験）

(1)で説明した UT ドローンに取付けるセンサーを変更したもので、飛行時間や測定数は UT ドローンと同様

UT ドローンと同じく附属物取付け部付近、余盛のある溶接線近傍及び腐食の激しい表面の計測は難しい。

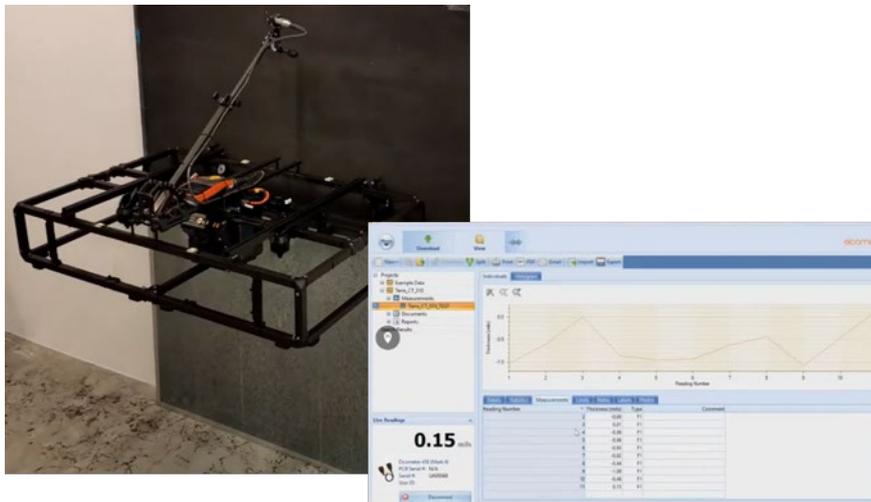


図2 コーティング膜厚測定

出典：厚生労働省 プラント設備等におけるドローンを活用した点検事例集
Terra Drone 株式会社、Terra Inspectioneering B.V.

(3) ポールドローン+渦流探傷検査、打音検査（運用中）

ポールドローンに非破壊検査のセンサーを搭載し、金属構造物を対象とした肉厚測定やコンクリート部材を対象とした打音検査の実施が可能である。

ドローン自体がポールにより係留されているため、航空法の規制対象外となる。

ポールで係留されていることにより検査できる高さに限界があり、10m程度の高さまでしか対応できない。



図3 ポールドローンを活用した点検

出典：新日本非破壊検査株式会社

(4) 光切断法（運用中）

レーザー光により、溶接ビートの断面を非接触で計測する技術
計測時間が非常に短く、機材も軽量化されている。

錆等の下の状況を把握できる可能性はあるが、孔食の把握は難しく、ドローンに搭載するには計測機器に改造を施す必要がある

(5) 3D写真計測器（運用中）

対象物を撮影した画像等から幅や奥行きを含む長さをmm単位で計測する技術
高所での採寸作業に要する時間を低減でき、採寸忘れも起こらない。

ただし、傷や腐食のサイズを測定するためには接写の必要があり、ドローンに搭載するには計測機器に改造を施す必要がある。

また、振動によるブレが大きく、精度に欠ける可能性がある。



図4 3D写真計測器による計測の様子

出典：株式会社リアリムジャパン

(6) LiDAR 搭載ドローン (運用中)

照射した数本のレーザー光が物体に当たって跳ね返ってくるまでの時間を計測し、物体までの距離や方向を測定する LiDAR 機能により、リアルタイムに 3D 点群データを取得する技術で、3D 点群データから錆や腐食の形状、サイズを把握することができる。

SLAM(映像認識による自己位置推定技術)技術を搭載のドローンでは、室内や配管内などの非 GPS 環境かつ人が入れない目視外の空間の点検も可能で設備内部での作業リスクを低下させることが期待できる。

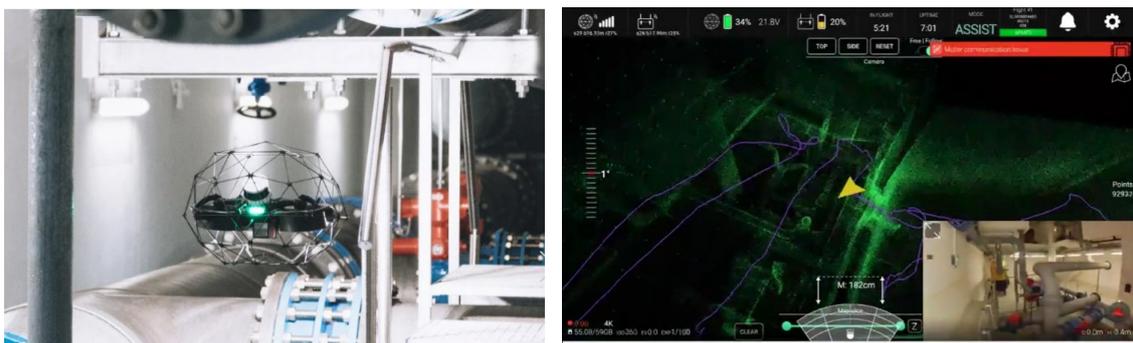


図5 LiDAR 搭載ドローンによる点検

出典：ブルーイノベーション株式会社

(7) EMAT (電磁超音波) (運用中)

電磁的に試験体内部に超音波を発生させ超音波の送受信を行い、試験体の厚さを測定する技術で面探傷検査・肉厚測定に使用される。

原理としては、磁気と電流を用いて試験体表面にローレンツ力及び磁歪を発生させた試験体内部に超音波を伝播させる。伝播させた超音波は金属の反対側で反射して戻ってくる。これを電気信号として受け取り、伝播時間を計測して厚さに変換するものである。

なお、調査時点では機器が大型であり、ドローンへの搭載は難しい。

参考資料 4 ドローンにより取得した点検データの
活用・管理方法に関する調査結果の詳細

ドローンで取得した点検データを効果的に活用・管理できる技術

1 調査結果

技術情報に関する調査結果を表1に示す。

表1 ドローンで取得した点検データを効果的に活用・管理できる技術の調査結果

技術名	目的・用途
画像解析による腐食箇所のスクリーニング	画像スクリーニング
オルソ画像生成+点検データ管理	効率的な点検記録の作成
3D化+点検データ管理	効率的な点検記録の作成
360度パノラマ画像+点検データ管理	効率的な点検記録の作成
飛行ルートの自動生成+点検データ自動管理	効率的な点検記録の作成 飛行ルート作成の簡易化
統合プラットフォームやデジタルツインと紐付けた管理	効率的な点検記録の作成 データ分析・シミュレーション

2 各技術の詳細

各技術の詳細について以下に示す。

なお、下記の表記は現時点での技術段階を示す。

- ・開発中 : 開発段階であり、実地での実証実験に至っていない
- ・実証実験 : 実地での実証実験等による検証は行っているが、運用には至っていない
- ・運用中 : 事業者による運用や検査事業者等によるサービスが展開されている段階

(1) 画像解析による腐食箇所のスクリーニング（運用中）

AI画像解析モデルを用いてドローンで撮影した画像等から腐食評価を行う技術
撮影画像等を点検作業者が判断する作業負担が軽減され、効率化される。

また、点検作業者の主観が介在しないので、一定の判断が可能となる等のメリットがある。

配管用のモデルは構築されているものの、屋外貯蔵タンク側板専用開発されたモデルは調査時点では存在していないことが確認された。

なお、通常、AI画像解析モデルの構築には多数のデータと時間を要する。

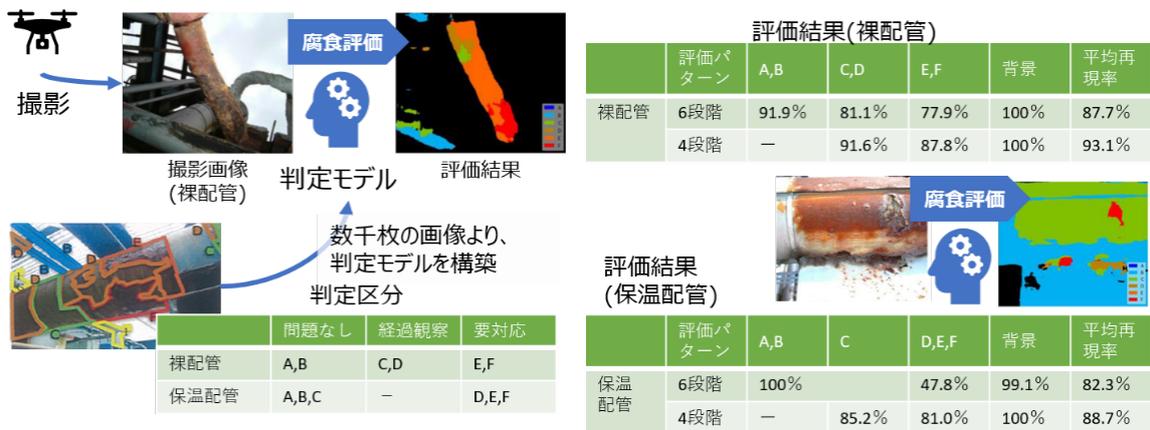


図1 AI 画像解析モデル

出典：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業 報告書

(2) オルソ画像生成+点検データ管理

ドローンで撮影したタンク側面の写真をオルソ画像化し、つなぎ合わせることで従来の点検で使用されるタンク側板の展開図の様なパノラマ写真を生成する技術
オルソ画像上に腐食等の詳細画像や点検記録等を紐付けることで、過去データとの比較による劣化の進行具合の確認に活用できる。

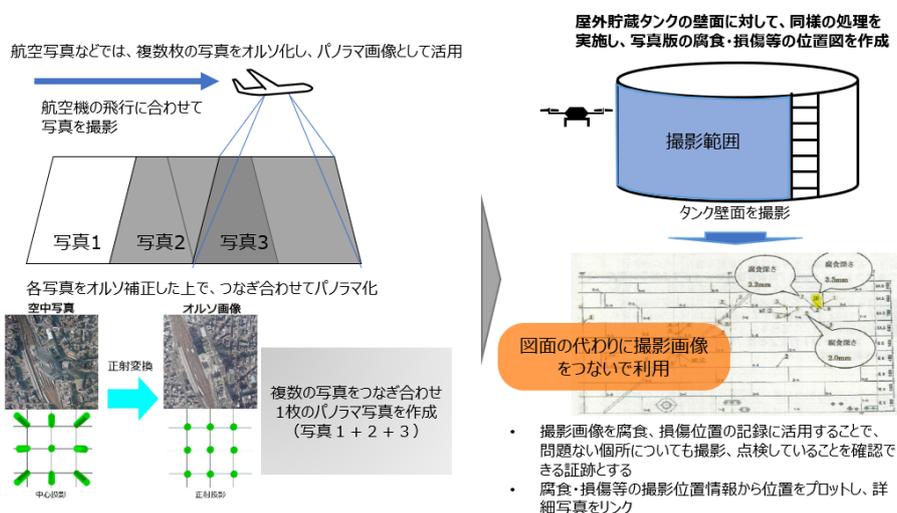


図2 オルソ画像の生成

出典：国土地理院（オルソ画像について）

<https://www.gsi.go.jp/gazochosa/gazochosa40002.html>

(3) フォトメトリグラフィー (SfM) による 3D 化+点検データ管理 (運用中)

ドローンで撮影した複数枚の写真から、SfM ソフトを使用して 3D モデルを作成し、

点検計画の立案や 3D モデル上に腐食等の詳細画像や点検記録等を紐付けることで、過去データとの比較による劣化の進行具合の確認に活用できる。

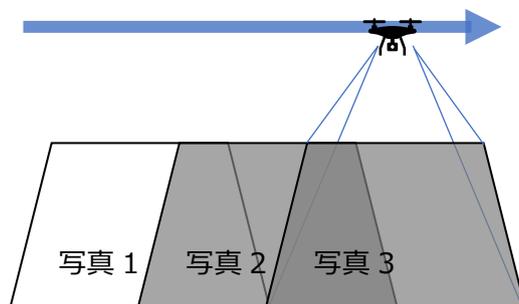


図3 SfM (Structure from Motion) の原理

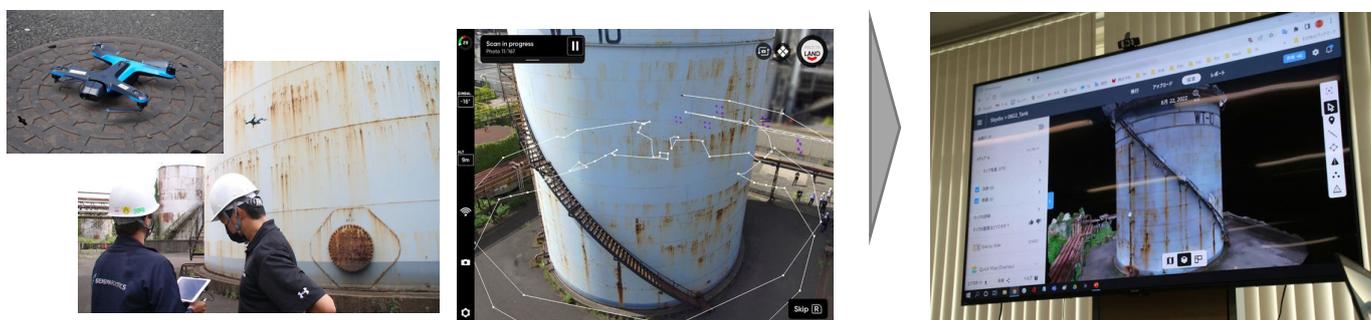


図4 SfMによるタンクの3D化

出典：株式会社センシロボティクス

(4) 360度パノラマ画像+点検データ管理（運用中）

360度カメラ（超広角レンズや多数のカメラ）を使用し、パノラマ画像を作成する。

パノラマ画像へ図面や画像を含む点検記録、作業指示等の情報を詳細な位置と紐付けて管理が可能。

VRと組み合わせれば、現場にいなくとも、現場にいるように位置関係を直感的に把握・共有することができる。

360度カメラをドローンに搭載して撮影した事例もある。



図5 360度カメラによるパノラマ画像の作成

出典：株式会社センシロボティクス

(5) 飛行ルートの自動生成+点検データの自動管理（運用中）

点検対象のタンクを設定し、防爆エリアや上空飛行禁止エリアを考慮して自動で飛行ルートを設定する。

点検データはクラウド上で一元管理し、タンクごとに撮影データを自動で振り分けを行う。

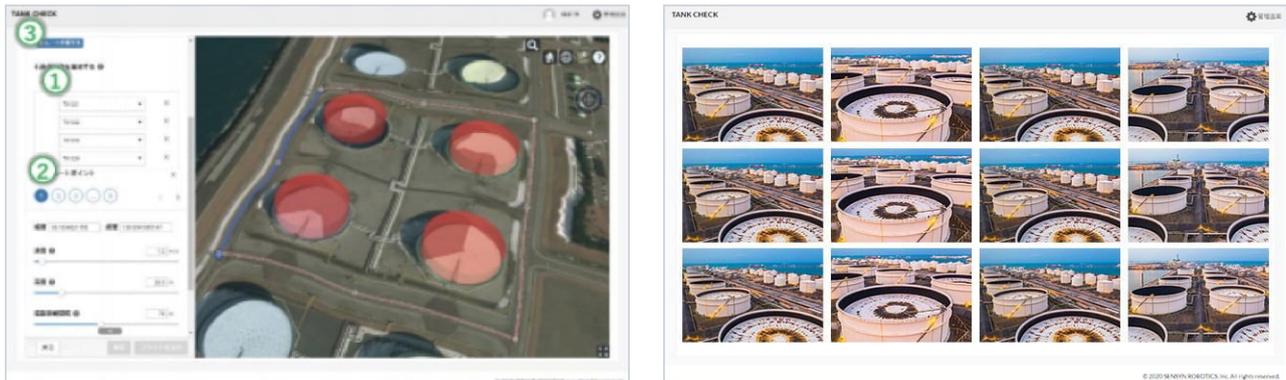


図5 飛行ルートの自動生成と点検データの自動管理

出典：株式会社センシンロボティクス

(6) 統合プラットフォームやデジタルツインと紐付けた管理（技術段階は仕様による）

保全・検査管理システムや腐食シミュレーターと共に、ドローンの撮影データを統合運用する。

石油化学プラントの膨大な蓄積データ及びリアルタイムデータから設備に関する必要な情報を効率よく収集し、位置情報と合わせて管理することでデータ分析やシミュレーションに活用できる。

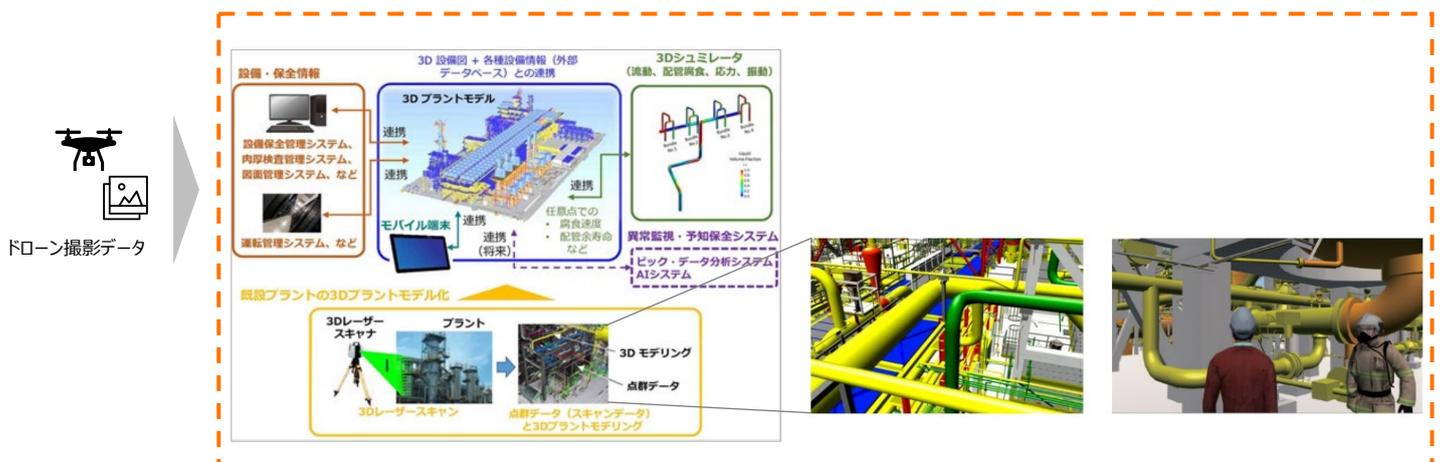


図6 統合プラットフォームやデジタルツインと紐付けた管理

出典：http://www.khk-syoubou.or.jp/pdf/magazine/188/gi_jyutsu_info03.pdf

参考資料 5 ドローン以外でタンクの予防保全に
活用できる可能性のある技術

ドローン以外でタンクの予防保全に活用できる可能性のある技術

1 調査結果

技術情報に関する調査結果を以下の表に示す。

表1 ドローン以外でタンクの予防保全に活用できる可能性のある技術の調査結果

技術名	目的・用途
タンクに吸着する検査ロボット	目視検査 板厚測定 等
AE法によるタンク底板の非破壊検査	底板の腐食検知
光ファイバ・センシングによるタンク接続配管の減肉モニタリング	接続配管の減肉・損傷・温度変化
四脚歩行検査ロボット	3D スキャン等による施設内異常検知 アナログ計器の読み取り等

2 各技術の詳細

各技術の詳細について以下に示す。

なお、下記の表記は現時点での技術段階を示す。

- ・開発中 : 開発段階であり、実地での実証実験に至っていない
- ・実証実験 : 実地での実証実験等による検証は行っているが、運用には至っていない
- ・運用中 : 事業者による運用や検査事業者等によるサービスが展開されている段階

(1) タンクに吸着する検査ロボット (運用中)

ア-1 マグネットクローラ型ロボット①

永久磁石タイヤによってタンク側板に吸着し、タンクの補強部材溶接部近傍や各種鋼構造物を目視検査するロボット

自動走行センサー、ジャイロセンサー、衝突回避センサーを搭載している。
連続走行時間は最大3時間で、走行速度は撮影時で3～5m/min、最高速度は12m/minである。

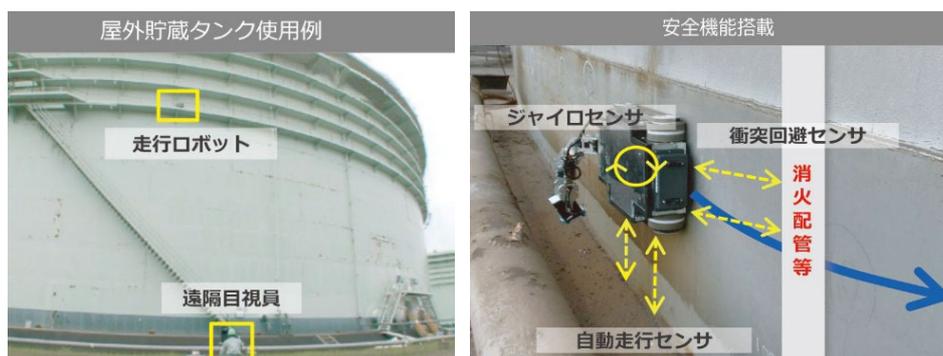


図1 マグネットクローラ型ロボット①による点検イメージ

出典：株式会社ウイズソル

アー2 マグネットクローラ型ロボット②

強力なマグネットローラーでタンク側板に吸着し、モーター駆動にて自動制御で走行、搭載された 32ch 超音波厚さ計で連続板厚測定を行うロボット

走行速度は、最高 150mm/sec、1 回の走行で約 340mm 幅範囲を測定できる。

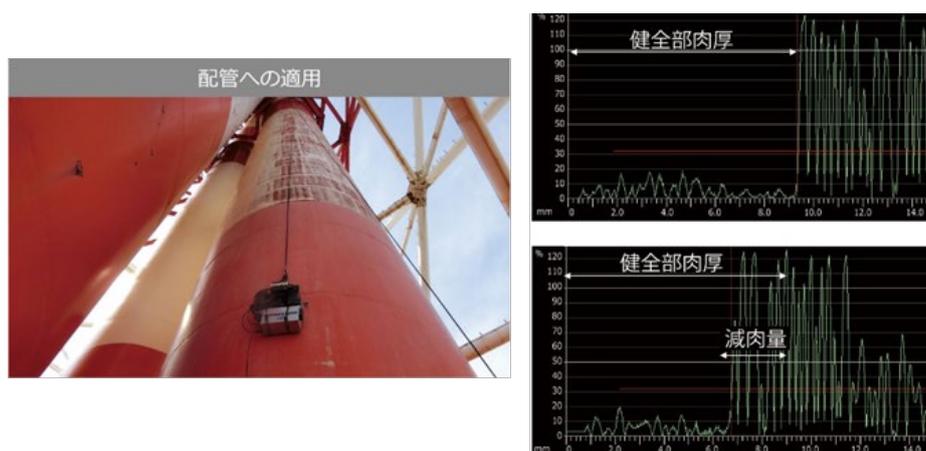


図2 マグネットクローラ型ロボット②による点検イメージ

出典：株式会社ウイズソル

イ 磁石車輪型ロボット

ゴムライニングされた車輪の内部に強力なネオジウム永久磁石を内蔵した、磁石車輪で鋼製壁面に吸着しながら移動して作業するロボット

カメラやアーム、切断用ガスバーナー、飛散防止型のケレン・塗装システム等、作業内容によって必要となる機器の搭載が可能となっている。

走行速度は、0～10m/min



図3 磁石車輪型ロボットの点検イメージ

出典：株式会社技術開発研究所

- (2) アコースティック・エミッション法によるタンク底板の非破壊検査（運用中）
 タンク底部で傷が発生した際のアコースティック・エミッション（以下「AE」という）を事前に設置したセンサーで計測することで、欠陥や劣化をリアルタイムで把握する非破壊検査技術

なお、アコースティック・エミッションとは材料内部で微小破壊やき裂の進展、腐食などの局所的かつ急激なエネルギー解放に伴って弾性波が発生する現象である。

タンクを開放することなく検査が可能で、簡易的に短時間で検査作業が可能のため、タンクの自主保安管理に活用できる可能性がある。

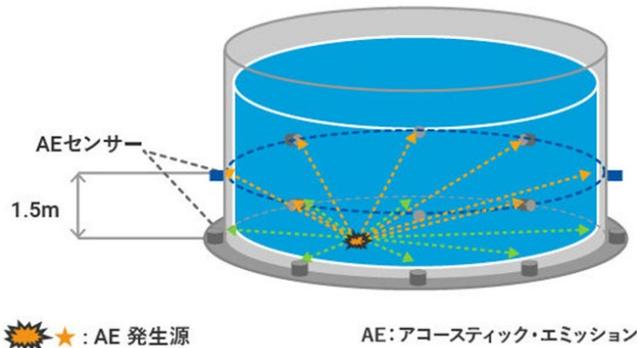


図4 AE法によるタンク底板の非破壊検査の活用イメージ

出典：<https://www.chiyodacorp.com/jp/service/chas/material-diagnosis/>

- (3) 光ファイバ・センシングによるタンク接続配管の減肉モニタリング（運用中）
 配管へスパイラル状に光ファイバ・モジュールを敷設し、面ひずみを計測、ひずみ分布データを逆解析することによって、残存肉厚や減肉形態（位置と形状など）、変形（曲がりや凹み）、表面温度分布配管状態（変形・温度・減肉）を定量的に算出し、モニタリングを行うタンク附属配管の検査に適用可能な技術である。
 過去の計測情報によって変化を予測して異常を自動判断できる。

また、あらかじめ閾値を設定することによってアラームを発報させることも可能である。

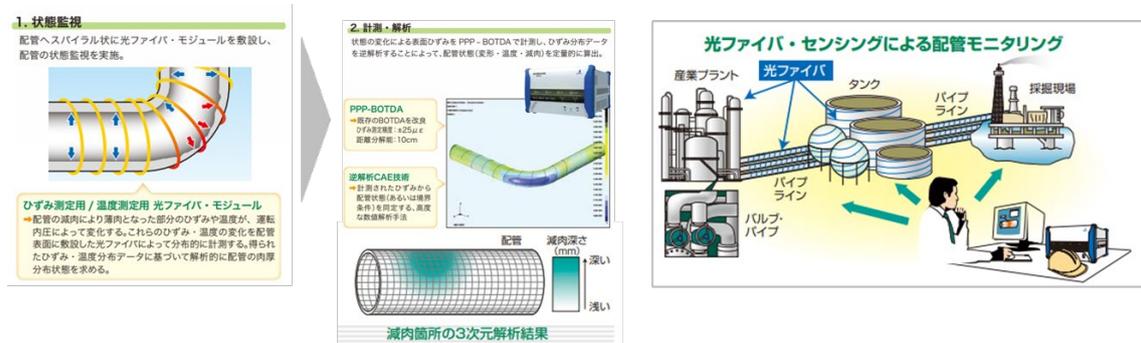


図5 光ファイバ・センシングによるタンク接続配管の減肉モニタリング

出典：https://www.neubrex.jp/pdf/jp_fiber_optics_condition_monitoring_system_for_piping.pdf

(4) 四脚歩行検査ロボット（運用中）

ANYbotics 社が開発しているロボットで、海外の石油・ガス業界や化学プラント等での使用実績がある。

四脚歩行検査ロボット

概要：ANYbotics社が開発中の完全自律歩行可能かつ多様な検査機能を保持した四脚歩行検査ロボット

<p>機動性</p> <ul style="list-style-type: none"> 45°までの坂、階段を歩行可能 25cm高までの乗り越え 狭い通路の移動 自己回復機能 		<p>検査機能</p> <ul style="list-style-type: none"> ゲージ、カウンター等アナログ計器の読取 ホットスポット、ガス濃度等異常検知 3Dスキャンによる施設環境変化特定 音響解析による機器の動作状況検知(異常騒音等) 	
<p>防爆対応</p> <ul style="list-style-type: none"> IECEX、ATEX規格に従って、ゾーン1での使用認定取得済 		<p>完全自律作業</p> <ul style="list-style-type: none"> Wi-FiやGPSなしで完全自律作業 リアルタイム障害物回避 自動充電ポート帰還 雨天、屋内外、昼夜問わずの作業可能 	

出典：ANYbotics社（フォーリス、スイス）

図6 四脚歩行検査ロボットの概要

四脚歩行検査ロボットANYmalロボットによる石油・ガス業界における使用実績*1

使用実績 1：完全自律歩行・検査(PETRONAS社)

- ✓ 指定した歩行箇所の自律歩行、チェックポイントと検査対象物の自動撮影・検査
- ✓ 階段の昇降、障害物の乗り越え
- ✓ 指定箇所の腐食撮影
- ✓ 音響センサーによる機械振動異常検知
- ✓ サーモグラフィーによるホットポイント検知
- ✓ 強風、濡れた路面の歩行、昼夜、屋内外での作業
- ✓ 60分間の連続検査作業の実施
- ✓ 検査作業員不要によるHSEリスク、OPEXの削減

腐食部撮影



*1：ANYmalXは現在開発中につき、非防爆・同等機能搭載のANYmal Bethの使用実績を掲載

サーモグラフィー検査



屋外自律歩行

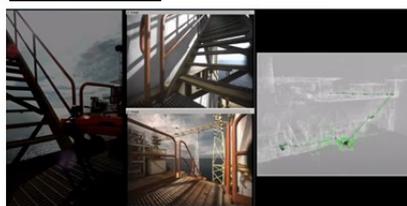


図7 海外の石油・ガス業界における使用実績

四脚歩行検査ロボットANYmalロボットによる化学業界における使用実績*1

使用実績 2：プラントのデジタル化(BASF社)

- ✓ 作業員が手作業で実施してきた反復検査作業、分析の自動化
- ✓ 10平方キロメートルの複合化学プラントのデジタル化
- ✓ 3Dモデル活用による検査事前シミュレーションの実施
- ✓ 測定位置など正確かつトレース可能なデータの取得、レポート作成
- ✓ 音響センサーによる機械振動異常検知
- ✓ サーモグラフィーによるホットポイント検知

3Dモデルに沿った自律歩行



*1：ANYmalXは現在開発中につき、非防爆・同等機能搭載のANYmal Bethの使用実績を掲載

音響検査



作業シミュレーション

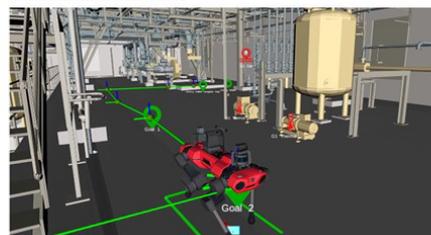


図8 海外の化学プラントにおける使用実績

出典：ANYbotics社

参考資料 6 ドローンを活用した点検と既存の直接
目視点検のコスト比較

ドローンを活用した点検と既存の直接目視点検のコスト比較

1 調査概要

タンク保有事業者へのヒアリングの中でコストに関する意見が多く出されたが、実際にコスト比較を行ってはおらず、ドローンを活用した点検が既存の直接目視点検と比べてどれほどコスト削減につながるかはわからなかった。

そこでドローンを活用した点検と既存の直接目視点検のコスト比較を実施することとした。

コスト比較を行う上では、2つの点検方法の条件をできるだけ一定にする必要がある。

まず、階段部周辺を除く高所をドローンで撮影した画像等の画角と同じ視点で従来の直接目視点検を行う場合、足場を設置する必要があるため、直接目視点検はタンク全周に足場を設置した場合の費用とした。

また、足場を設置して行う従来の直接目視点検では、腐食等があれば定量化を行い補修の可否を判断することができるが、一方で、ドローンを活用した点検の場合、腐食の定量化の技術情報に関する調査で、そのような技術は見つからなかったことから、本調査では、直接目視またはドローンを活用した目視代替により腐食等を検出するところまでを費用の比較対象とした。

なお、タンクの形状はさまざまであるため、本調査では実際に設置されている 1700kL のタンクと 4000kL のタンクを対象とした。

加えて、ヒアリング調査から従来の直接目視点検では、現在、多くの事業者が足場設置・解体及び外面腐食検査は外注しているとの回答であったことから、従来の直接目視点検では、足場設置・解体及び外面腐食検査に係る費用を算出し、ドローンを活用した点検では、多くの事業者がドローンの飛行・撮影作業を外注し、撮影画像からの腐食の検出は自前で行うことを想定しているとの回答であったことから、ドローンを活用した点検では、ドローンの飛行・撮影に係る費用を算出し、比較することとした。

なお、費用算出のために、設置されているタンクの保有事業者とドローン関連会社に協力を依頼し、タンク保有事業者には従来の直接目視点検にかかる費用を、ドローン関連会社にはドローンを活用した点検でかかる費用を算出させ、算出された費用を比較することとした。

コスト比較の条件をできるだけ一定としたものの、2つの点検の作業内容がまったく同じではないため、一概のコスト比較が難しい部分もあることから本調査は参考として活用されたい。

2 調査対象

(1) 1700kL タンク

容 量：1700kL

直 径：14.5m

高 さ：13.6m

保温材：有

(2) 4000kL タンク

容 量：4000kL

直 径：18.4m

高 さ：16.4m

保温材：無

3 調査結果

(1) 1700kL タンク

既存の直接目視点検

足場解体・設置費用：1,300万円

外面腐食検査費用： 300万円

合 計：1,600万円

ドローンを活用した点検

ドローン飛行・撮影費用： 75万円

合 計： 75万円

(2) 4000kL タンク

既存の直接目視点検

足場解体・設置費用：1,000万円

外面腐食検査費用： 50万円

合 計：1,050万円

※当該タンクは腐食状況が軽微であるため、1700kL タンクと比べて費用が安価となった。

ドローンを活用した点検

ドローン飛行・撮影費用： 100万円

合 計： 100万円

4 考察

既存の目視点検で、階段部を除く高所部について、ドローンを活用した点検で撮影した画像と同じ視点で点検する場合、タンク全周に足場を設置する必要があり、費用が高額となる。

ドローンを活用した点検では、足場を設置することなく高所部を点検できるため、格段に費用を抑えることができる。

一方で、足場を設置して行う従来の直接目視点検では、腐食等があれば、その場で腐食等の定量化を行い、すぐに補修の要否の判断につなげることができるが、ドローンの活用した点検の場合には、ドローンでの点検ののち、別に足場やゴンドラを設置して追加で腐食等の定量化を行わざるを得ない。

しかしながら、事前にドローンを活用した点検を行うことで、ピンポイントで足場やゴンドラの設置ができることから、従来の直接目視点検よりも費用を抑えられる可能性がある。