

屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に向けた ドローン活用の実証実験結果

背景

- 危険物施設におけるドローンの安全な運用方法については、「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等の送付について」（H31.3.29消防危第51号）により周知。（策定後2回の改訂を実施）
※石油コンビナート等災害防止3省連絡会議（消防庁、経済産業省、厚生労働省）における取組み。
 - ✓ 2019年3月：「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 初版」策定
 - ✓ 2021年3月：「プラントにおけるドローン活用事例集Ver3.0」へ改訂
 - ✓ 2022年4月：「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Ver3.0」へ改訂
- ドローンを活用した目視代替点検が可能であることは通知により周知はしているものの、従来の危険区域の考え方から、タンク供用時においては防油堤外からの撮影が前提となっていた。
- 屋外貯蔵タンクの定期点検では、目視点検を主とした点検が行われているが、側板の高所等点検困難箇所については、点検ができていない状況。（こうした部位の点検は足場等設置時にのみ行われる。）
- 「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」（R4.8.4消防危第175号）により、一定の条件下においては屋外貯蔵タンク周囲に可燃性蒸気は滞留せず、危険区域には該当しないものとすることにより、可搬式の非防爆構造の電気設備・器具を使用することが可能となった。

【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】

- 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の実施

目的

- 屋外貯蔵タンクにおけるドローンを活用した点検方法に関するガイドラインを策定し、周知することにより、点検困難箇所における適時適切な詳細点検・補修を促進**



1. 概要 - 実証実験の概要

実証実験の目的

■ 第1回の実験では、ヒアリングで抽出した課題を解決するために、タンク近接での安全な飛行の実現や人の目視に代替となる静止画の撮影方法を検証[※]し、ドローンの有効性を実証

スコープ

- 飛行ルート：屋外貯蔵タンクの外周（外観撮影）
- 操縦方法：マニュアル飛行及び自律飛行での操縦と撮影
- 検証項目：
 - ✓ 従来の点検でタンク付属物の死角や階段などから遠く確認が難しかった箇所に対し、ドローンによる近接での撮影が点検に有効であるかを評価
 - ✓ 屋外貯蔵タンク近接での安定したドローン飛行と効率的な点検が可能であるかを評価
 - ✓ ドローンで撮影した静止画・動画を利用した点検記録の作成方法を評価
 - ✓ 腐食・損傷の撮影に必要なカメラの性能や撮影条件を検証
 - ✓ 屋外貯蔵タンク近接でドローンを飛行させる為の安全対策を評価

体制

- 消防庁 : 実験オーナー
- タンク保有事業者 : 実証実験場所の提供による実証実験協力、既存点検の情報提供
- ドローン事業者 : ドローン飛行の操作および監督
- アクセンチュア : 実験の全体とりまとめ

スケジュール


■ ドローン飛行実験実施日：2022/11/8～2022/11/9（2日間）で2箇所にて実施

※腐食・損傷箇所などの静止画の画像判定は、第2回実験で実施するかを検討



第1回目の実証実験は北海道エリアの2箇所の事業者に協力いただき、実験を実施

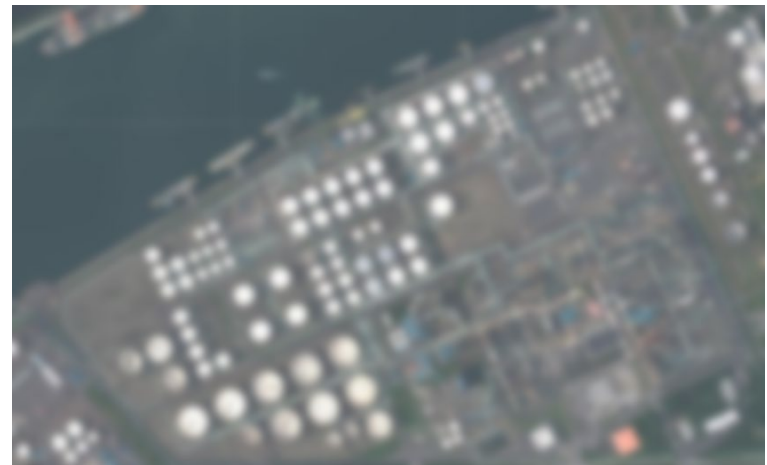


 : 人口集中地区（令和2年総務省統計局）

■ 事業者1

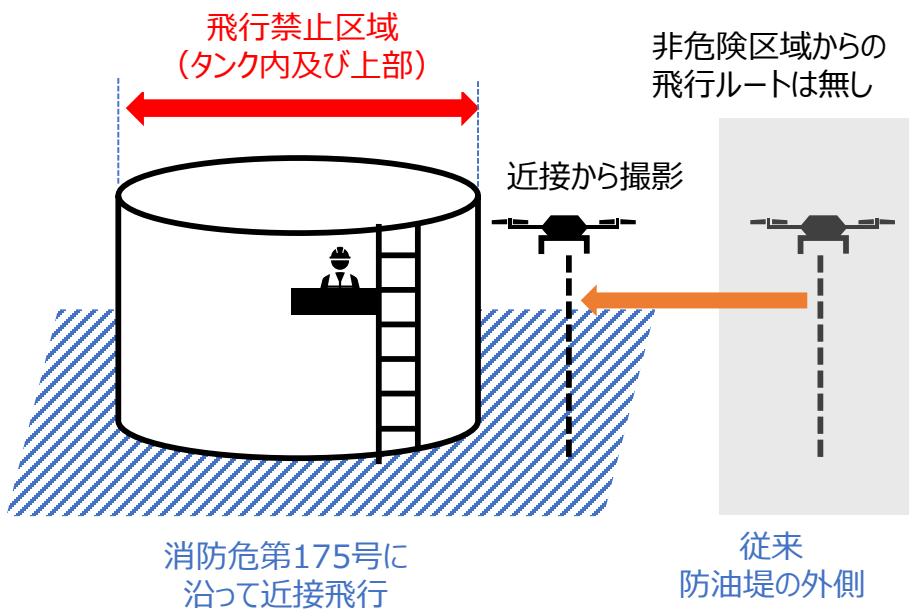


■ 事業者2



第1回の実証実験では、人による目視点検の課題の解決、事業者がドローン活用を推進できるように撮影方法等を中心に実験

実証実験からの期待



人による目視点検や防油堤の外側からの撮影では点検が困難であった箇所に対し、ドローンによるタンクの近接点検の有用性を実証

- ✓ 従来の点検方法（地上やタンク階段などからの人による目視確認）では死角であった箇所が点検できること、安全に点検範囲を拡大できることを確認。
- ✓ 適切な機材選定と飛行ルートの設定を行えば、ドローンを活用し屋外貯蔵タンクを点検ができることを確認。
- ✓ 屋外貯蔵タンクに近接してドローンを飛行、撮影することで、従来の人の直接目視の代替になりうる撮影が可能になることを確認。

目視の代替となりうる鮮明な動画・静止画を取得するための効果的な撮影方法と記録作成に関する実証

- ✓ 「マニュアル飛行+リアルタイム動画の活用」、「自律飛行+一定間隔で機械的に静止画撮影」の2パターンの撮影を実施し、腐食や損傷を判断できる静止画を撮影する為の条件やドローン及び機材の性能を確認。
- ✓ 使用するカメラや撮影角度、画像の詳細度、明るさで撮影パターン分けを行い、腐食・損傷箇所を評価可能な静止画の撮影方法を確認。
- ✓ 静止画から展開図を作成し、腐食・損傷箇所の位置や詳細静止画を利用した記録資料を効率的に作成する方法を確認。

タンクに近接させてドローンを飛行させるための安全対策の有効性を実証

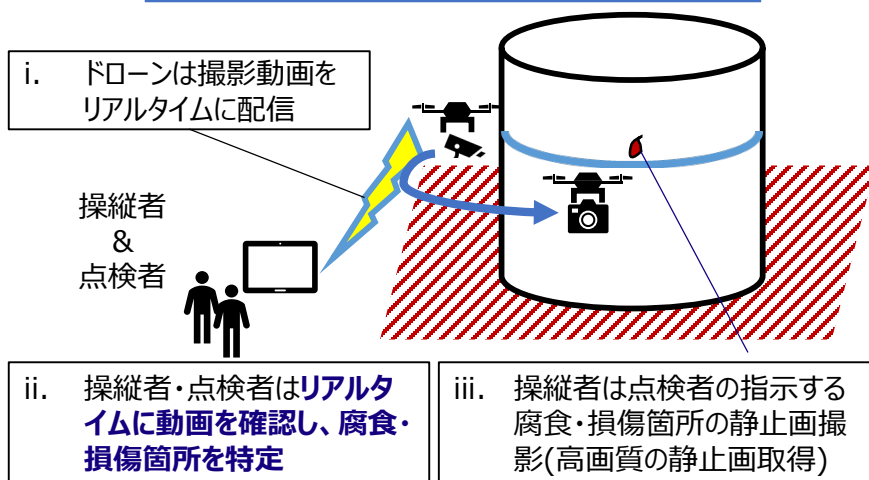
- ✓ 供用中のタンクの近接飛行（5m以内）を想定し、安全にドローンを飛行させるためのリスク対策を実施し、対策の有効性を確認。

複数の撮影・確認方法のパターンを設定し、より効果的な撮影・確認方法を検証。

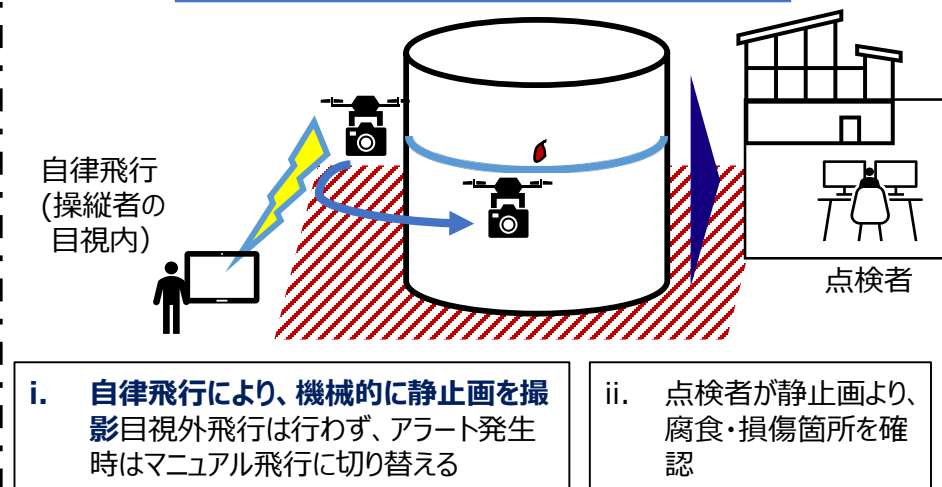
パターンA ドローンを操縦者がマニュアルで飛行させ、リアルタイム動画から腐食・損傷箇所を確認し、撮影が必要と判断される箇所の静止画を撮影

パターンB ドローンによる自律飛行を行い、タンク外周の静止画を機械的に撮影し、腐食・損傷箇所を確認

パターンAのイメージ*



パターンBのイメージ



検証のポイント【動画 📹】

- リアルタイム動画を利用することで、静止画の撮影枚数を削減し、**静止画のスクリーニング作業負担を軽減**
- 動画は静止画に比べ、画質が粗いことが想定される為、**腐食、損傷箇所を把握できるかを確認** (ディスプレイ表示及び録画データ)

検証のポイント【静止画 📷】

- 腐食等を確認できた位置の静止画を撮影し、**腐食等の状況の把握に活用 (詳細点検や補修の要否の判断)**
- 静止画は**条件(撮影距離、角度、明るさ等)**を変えて複数枚、取得
- 点検の証跡として撮影位置情報とともに静止画を保存

検証のポイント【静止画 📷】

- 自律飛行により**静止画を機械的に撮影 (常に高画質な静止画を取得)**
- 点検者が事務所等で静止画を確認し、腐食等の有無の把握に活用 (別角度からの撮影の要否や詳細点検や補修の要否の判断)
- 点検時の証跡データとして撮影位置情報とともに保存、**記録作成**

※パターンAでは、保温材付タンクの外装板や雨仕舞い部の点検等が可能かどうかについて事業者からの許可が出れば、実機タンクで確認

下記の仕様のドローンを使用。

• 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 |
| 動画伝送 | | ■ 2.4GHz動画伝送 ■ 5.7GHz動画伝送 |

下記の仕様のカメラを使用。

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/>

2. 実験計画 - 撮影パターン (パターンAのみ)

パターンAでは、撮影角度、飛行速度、シャッタースピード、絞り値 (F値) を変更した複数のパターンにて撮影を実施した

★：基準とした撮影パターン
青字：基準とした撮影パターンと条件が異なる項目

| # | 評価趣旨 | カメラ画素数 | センサ面積 | 点検対象画素寸法 | 撮影距離 (m) | 撮影角度 | 撮影時飛行速度 (m/s) | シャッタースピード (sec) ^{※1} | 絞り値 (F値) ^{※2} | 備考 |
|----|--------------|---------|-----------|----------|----------|----------|---------------|-------------------------------|------------------------|--|
| 1 | 画素数とデータ容量を評価 | 1500万画素 | 17.3×13 | 1mm/px | 9 | 正面 | 0.0 | 自動 | 自動 | 画素数ごとによる画角の変化、データ量によるハンドリングのしやすさを検証する |
| 2 | | 2600万画素 | 23.5×15.6 | 1mm/px | 9 | 正面 | 0.0 | 自動 | 自動 | |
| 3★ | 基準画像 | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 正面 | 0.0 | 自動 | 自動 | ある腐食箇所での撮影の際の数値 シャッタースピード：1/1600 絞り値：4.5 |
| 4 | 画素寸法を評価 | 6100万画素 | 36×24 | 0.5mm/px | 4.6 | 正面 | 0.0 | 自動 | 自動 | 画素寸法 (1ピクセルあたりの分解能) を比較し、分解能ごとの見え方を比較する |
| 5 | | 6100万画素 | 36×24 | 2mm/px | 18 | 正面 | 0.0 | 自動 | 自動 | |
| 6 | 撮影角度を評価 | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角小) | 0.0 | 自動 | 自動 | 角度を変えた撮影が必要な際に点検に使える静止画が撮影できるかを検証する |
| 7 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角大) | 0.0 | 自動 | 自動 | |
| 8 | 絞り値の評価 | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角大) | 0.0 | 自動 | 3.5 | 斜めから撮影した際に最適な絞り値がどの程度であるかの評価を行う |
| 9 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角大) | 0.0 | 自動 | 4 | |
| 10 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角大) | 0.0 | 自動 | 5.6 | |
| 11 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角大) | 0.0 | 自動 | 8 | |
| 12 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 斜め上(俯角大) | 0.0 | 自動 | 11 | |
| 13 | シャッタースピードの評価 | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 正面 | 1.0 | 自動 | 自動 | 撮影をしながら飛行した際に、どの程度のシャッタースピードであれば検査に適切な静止画が取得できるかの評価を行う |
| 14 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 正面 | 1.0 | 1/100 | 自動 | |
| 15 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 正面 | 1.0 | 1/200 | 自動 | |
| 16 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 正面 | 1.0 | 1/400 | 自動 | |
| 17 | | 6100万画素 | 36×24 | 1mm/px | 9 | 正面 | 1.0 | 1/800 | 自動 | |

※1 自動設定でのシャッタースピードの数値範囲(sec)：1/5000～1/250

※2 自動設定での絞り値(F値)の数値範囲：4.0～22.0

- 従来の点検でタンク付属物の死角や階段などから遠く確認が難しかった箇所に対し、ドローンによる近接での撮影が点検に有効であるかを評価
- 屋外貯蔵タンク近接での安定したドローン飛行と効率的な点検が可能であるかを評価
- ドローンで撮影した静止画・動画を利用した点検記録の作成方法を評価
- 腐食・損傷の撮影に必要なカメラの性能や撮影条件を検証
- 屋外貯蔵タンク近接でドローンを飛行させる為の安全対策を評価

検証内容 (想定している点検内容、対策)

評価ポイント

① 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

✓ 従来は点検が困難だった範囲を含め、腐食などを発見、容易かつ安全にスクリーニングに活用できるかを確認

【撮影予定箇所】

- 側板上部
- ウィンドガーダーの死角
- 階段部
- スティフナー等の付属物

【撮影予定の腐食、損傷※】

- 外面の割れ
- ひび
- スケール
- 錆汁
- 塗装材のはがれ

② タンク近接での安全かつ効率的な点検を行うための飛行ルートを検証

✓ ドローンが計画した飛行ルートに沿って、屋外貯蔵タンク近接で安定して飛行できる距離

✓ 自律飛行においては有効な静止画撮影ポイント設定を確認し、効率的な静止画撮影ができるかを確認

③ 効率的な点検記録の作成方法の検証

✓ 静止画を利用し、点検で発見された腐食や損傷などの位置を効率的に作成できるかを確認 (静止画からの腐食や損傷箇所の図面化)

✓ 問題ない箇所についても、点検の記録として活用できるかを確認

✓ 点検員 一人一人への依存を解消できるかを確認

検証内容 (想定している点検内容、対策)

評価ポイント

- ④ タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証
- ⑤ 屋外貯蔵タンクの腐食・損傷の撮影に必要なカメラの性能を確認
- ⑥ 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
- ⑦ 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
- ⑧ 腐食・損傷箇所の特定におけるリアルタイム動画の有効性の検証
- ⑨ ドローンの安全な飛行方法の検証
- ⑩ 既存の人による目視点検と比較し、効率化の程度を検証 (参考情報)

- ✓ タンクの近接飛行でも衝突回避機能を有することで、安定した飛行が可能であること
- ✓ 想定以上にタンクへ近接しないことを確認
- ✓ 事前セットアップ、キャリブレーション、バッテリー交換等、飛行時以外の設定に必要な時間・回数を計測

- ✓ 目視と同等以上の静止画を撮影するにあたり、必要な撮影条件 (撮影データの詳細度、角度、明るさ等) を確認
- ✓ 腐食や損傷箇所の撮影、リアルタイム動画の撮影に必要なカメラの性能を確認

- ✓ マニュアル飛行での撮影と自律飛行での撮影では、腐食や損傷を確認に必要な、静止画や必要な時間などを確認
- ✓ 撮影後のスクリーニング作業の負荷を確認
- ✓ リアルタイム動画では、腐食や損傷箇所等の把握がどの程度可能かを
確認
- ✓ 構内ネットワークやディスプレイ性能等を確認

- ✓ 衝突回避機能、緊急離脱機能の有効性を確認
- ✓ 事前に作成する飛行計画の内容は安全な飛行に資する内容であったかを確認
- ✓ 屋外貯蔵タンクの点検においては、「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」の対策で過不足が無いかを確認

- ✓ 既存の点検方法とドローンを活用した点検でどの程度効率化が見込め
そうかを確認

※ 腐食や損傷を撮影した静止画の確認と判断の効率化の課題については、第1回の実験で目視と同等以上の静止画が撮影できたのちに画像解析等の活用を検討する予定



3. 実験結果 - 検証結果①


検証内容 従来の人の目視点検では困難であった箇所への点検にドローンが有効であることの検証

評価ポイント 従来は点検が困難だった範囲を含め、腐食などを発見、容易かつ安全にスクリーニングに活用できるかを確認

実験方法 近接飛行を行い、タンク附属物及び附属物により死角となっている箇所に対し、カメラの角度を上下に変えて撮影


実験結果

- カメラの角度を変えることで、従来死角となっていた部分の静止画を撮影することができた



消火配管を下から撮影した様子
(配管の錆および支持材への錆汁の様子)


※黄色の表示は、協力事業所に予め腐食等がある撮影ポイントを調査してもらい、当該箇所にマーキングしたもの（以降、本資料において同じ。）




※撮影位置図

映り込み

拡大範囲



ウインドガーダーの上部分を上から撮影した様子



拡大範囲



撮影位置図

考察

- ✓ カメラ角度を上向きにして撮影する場合は、ドローン下にカメラが設置されている都合上、プロペラなどの映り込みが生じた
- ✓ 機体下方に搭載されるジンバルによっては上向きの設定ができないものも存在するが、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、撮影シーンに応じて機体選定をすることが望ましい
- ✓ 複雑な構造が入り組んでいる場所においては焦点が別の場所に合ってしまうなど、希望する被写体に焦点が合わない可能性がある



3. 実験結果 - 検証結果②

| | |
|---------------|---|
| <p>検証内容</p> | <p>タンク近接での安全かつ効率的な点検を行うための飛行ルートを検証</p> |
| <p>評価ポイント</p> | <ul style="list-style-type: none"> ドローンが計画した飛行ルートに沿って、屋外貯蔵タンク近接で安定して飛行できる距離 自律飛行においては有効な静止画撮影ポイント設定を確認し、効率的な静止画撮影ができるかを確認 |
| <p>実験方法</p> | <ul style="list-style-type: none"> マニュアル飛行においては、近接飛行時の通常とは異なる風の流れ等による飛行への影響を想定しつつも、可能な限りドローンをタンクに近づけて飛行（離隔約4.6m） 自律飛行においては、タンク外周を一定の撮影条件で機械的に撮影することから、GPS電波反射の発生による飛行への影響を考慮し、離隔約10mにて飛行 |
| <p>実験結果</p> | <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">真上から見た場合（Google Mapを使用し作成） 斜め横から見た場合（Google Mapを使用し作成）</p> <p style="text-align: center;">静止画 - 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</p> <ul style="list-style-type: none"> マニュアル飛行、自律飛行ともに動画伝送に不具合が発生した際に予防措置として着陸させることはあったが、制御系のシステム自体には問題はなかった マニュアル飛行の場合には離隔4.6mまで近接させた上で安定した飛行を行うことができたが、あるフライトにおいては風の対流の影響によりドローンが旋回挙動を示した（後頁「タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証」へ詳細を記載） 自律飛行の場合、離隔10mの飛行では計画した通りに飛行させることができた |
| <p>考察</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 飛行場所の電波環境や妨害による電波途絶・突風等のリスクに備え、タンクの近接飛行の際には十分な離隔距離から徐々に近づけていくように飛行させたり、衝突回避機能が確実に作動するかの事前点検などの対策は然ることながら、着陸場所への自動帰還の設定や複数の周波数の利用等、システム側での防衛策・安全策によるリスクの最小化も同様に行う必要がある |

3. 実験結果 - 検証結果③ (1/3)

検証内容

効率的な点検記録の作成方法の検証

評価ポイント

- ・ 静止面を利用し、点検で発見された腐食や損傷などの位置を効率的に作成できるかを確認（静止面からの腐食や損傷箇所の図面化）
- ・ 問題ない箇所についても、点検の記録として活用できるかを確認
- ・ 点検員 一人一人への依存を解消できるかを確認

実験方法①

- ・ 既存の点検記録用に使用される図面等へマーキングすることを想定し、静止面の画角内に収めた附属物等の位置を目印として腐食/損傷のおおよその場所が把握可能かを確認

実験結果①



撮影位置

目印とした配管

撮影位置図



目印となる配管を含めて撮影することで、階段のどの位置の静止画であるかを確認できた



図面へのマーキング（一例）

- ・ 撮影の際に同画角内に附属物を含めることで、附属物を目印として腐食/損傷のおおよその位置を特定できた

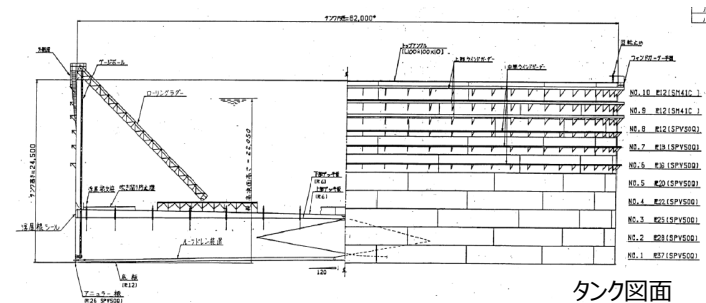
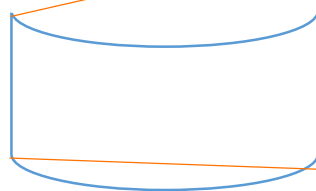
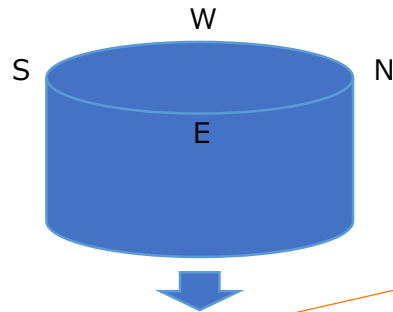
考察

- ✓ 把握した腐食/損傷の位置等を既存図面にプロットすることにより、その後の詳細点検や経過観察への活用が期待できる
- ✓ 撮影の際に附属物等の目印となるものを画角内へ収めて撮影を行わなければ、腐食/損傷の位置特定やオルソ画像生成の作業が困難となるため、極力画角内に目印を収められるような飛行ルートを検討する必要がある
- ✓ 近傍に大きな目印となる附属物がない場合は、側板の溶接線や撮影位置情報・ジンバル角度等から位置を特定する、前後の静止画との関係性から損傷位置を特定するなどの対応が必要（タンクに施工される外面塗装に、予め位置が特定できるようなマーキングをしておく等の対応も考えられる）

実験方法②

- 腐食/損傷箇所の記録の効率化のため、点検箇所のマーキングの際に使用する図面の代替となるオルソ画像（正射投影画像）をタンク外周の静止画から生成

実験結果②



オルソ画像（離隔約24m※1の距離から撮影した114枚の静止画から北東・東・南東の三枚を生成）※2

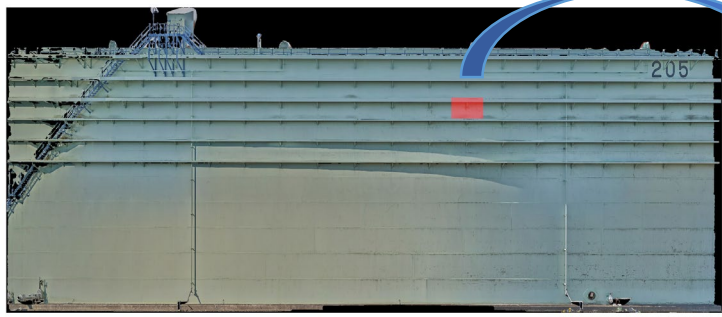
- ※1 タンク側板全体の静止画取得が目的となることから、通常よりも長い離隔距離より撮影
- ※2 オルソ画像右上の黒い部分は、当該部分の有効な撮影データの不足によるもの

- タンク外周の静止画を繋ぎ合わせることでオルソ画像を生成し、腐食/損傷箇所の位置を記録として残すことができた（次頁参照）
- オルソ画像の生成処理は、ほぼ自動で行うことができたが、約8時間程度の時間を要した

実験方法③

- オルソ画像上へ腐食/損傷の位置をマッピングし、クリックすると種別・大きさ等のコメントや詳細情報が表示されるシステムを作成

実験結果③



タンク側面の静止画から生成したオルソ画像



クリックすると腐食/損傷の詳細静止画が表示される (イメージ)

- オルソ画像を利用することで腐食/損傷の位置情報が把握し易く、また実際の腐食/損傷の詳細静止画とともに管理を行うことで、当事者以外であっても腐食/損傷の状態の確認が容易となる

考察

- ✓ 本実証実験で撮影した距離 (24m) よりもタンクに近接した位置からの静止画をオルソ化した場合、当該オルソ画像で撮影距離に応じた腐食や傷の有無程度であれば確認できることが期待される。
- ✓ 上述の腐食や傷の有無の確認だけでなく、さらにタンクに接近して撮影した静止画 (腐食等の詳細状況が分かる静止画) を使用する場合には、オルソ化する際に必要な附属品等の目印が映り込まないことや、データ量や生成時間の増大などにより、オルソ画像生成が困難になると考えられる。
- ✓ 別途撮影した損傷部位の詳細静止画をオルソ画像にリンクさせるなどして記録することで、客観的なデータとして点検結果を保存することが可能と考えられる

検証内容

タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証

評価ポイント

- タンクの近接飛行でも衝突回避機能を有することで、安定した飛行が可能であること
- 想定以上にタンクへ近接しないことを確認

実験方法①

- マニュアルでの近接飛行にてウインドガーダー支持部材の腐食を撮影

- 今回のマニュアルでの近接飛行の際には、衝突回避機能の既定値とした5m^{※1}を超えての近接での撮影のために操縦者が安全に注意を払った上で衝突回避機能をオフにして飛行させた^{※2・3}が、近接時にドローンが旋回の挙動を示した。原因は、ウインドガーダーの凹凸での対流が発生したこと、プロペラガードを装着していることにより通常よりも風の影響を受けやすい状態であったことが推察される。

風の対流の影響を受け、機体が傾いている様子



実験結果①

- ※1 障害物近接ではGPS遮蔽、マルチパス、磁気エラー等の発生の可能性が高まるため、今回は衝突回避機能の設定値を5mに設定することとした
- ※2 事前にデモとして、ドローンをタンクへ意図的に近づけることで衝突回避機能の有効性を確認した際の詳細を後頁「ドローンの安全な飛行方法の検証」へ記載
- ※3 本実験目的の一つとして、タンク離隔距離を最低3m以上とした上で、どこまでタンクに近接出来るか確認すべく、衝突回避機能を解除してドローンを飛行させた。

考察

- ✓ 風の対流や突風等の気象の影響を予め想定した上で安全な飛行ルートの設定を行う必要がある
- ✓ タンク側板への近接飛行を行う場合は、予期せぬ事態に備え、プロペラガードの装着や衝突回避機能等のドローンの設備的な安全対策を図るとともに、十分な知識・技量を持ったオペレーターが操縦するなどの安全対策をとることが必要である

3. 実験結果 - 検証結果④ (2/2)

検証内容

タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証

評価ポイント

- 事前セットアップ、キャリブレーション、バッテリー交換等、飛行時以外の設定に必要となる時間・回数を計測

実験方法②

- 事前セットアップ、キャリブレーション等、飛行時以外の設定に要する時間を計測
- バッテリーの持続時間、交換回数、交換に必要となる時間を計測

実験結果②

- 初回フライト前のセットアップ、自律飛行のルート設定には1名対応の換算で2～2.5時間程度の時間を要した
- 今回実験の平均飛行時間と、バッテリー残量は30%を目安として着陸させることから算出すると、約14分間に1回のバッテリー交換が必要となる計算となった
- バッテリー交換は1名対応で、1回当たりの交換時間（地上に着陸させてから再び離陸させるまで）は、2分間程度の時間しか要しなかった

考察

- ✓ 飛行時以外のセットアップや自律飛行の飛行ルートの設定には数時間要する場合があるため、天候や日没時間等を考慮した飛行計画を作成する必要がある
- ✓ バッテリー持続時間は機体により異なるほか、搭載する機器重量や飛行時の風速によっても大きく変化するので、ドローンメーカーの公表値にとらわれることなく、飛行時はバッテリー残量の定期的な確認を行い、残量に余裕がある状態で交換を行うことが重要である
- ✓ 自律飛行時の飛行ルートの設定について、短時間で容易に設定できるような技術開発が期待される

3. 実験結果 - 検証結果⑤ (1/5)

検証内容 屋外貯蔵タンクの腐食・損傷の撮影に必要なカメラの性能を確認

評価ポイント 腐食や損傷箇所の撮影、リアルタイム動画の撮影に必要なカメラの性能を確認

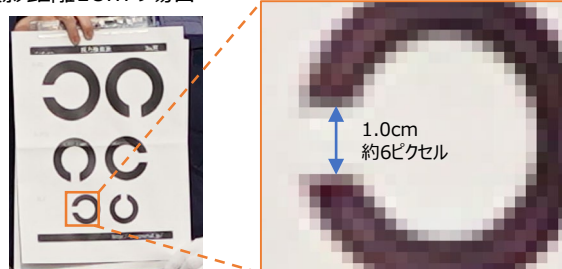
- 実験方法①
- 本実証実験の撮影距離の最大値を決定するため、事前に予備実験を実施。地上にて距離と解像度の参考となる視力検査用ランドルト環を撮影し、ランドルト環空白部の1cm程度の解像度が読み取れるかを確認
 - 本実証実験に使用したカメラの性能の場合、撮影対象から18mの距離で約2.0mm/ピクセルの静止画が得られることと、一般的なタンク間の距離を考慮し遜色無いと思われることから、撮影距離の18mを基準とし、3mおきにカメラに近づけて撮影
 - 最も遠い18mにおいても1cm程度の解像度が問題無く読み取れたため、今回の実証実験の撮影距離の最大値を18mに設定することとした

【参考】

- 18mの距離から撮影した場合、ランドルト環の空白1cm部分が約6ピクセルであることから、撮影対象画素寸法は約1.67mm/ピクセルであった（理論上の撮影対象画素寸法は約1.95mm/ピクセル）※1

実験結果①

撮影距離18mの場合



予備実験に使用した
視力検査用ランドルト環

ランドルト環の空白部ピクセル数と距離の関係※2

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
| 18m 6ピクセル 1.67mm/ピクセル (理論値: 1.95mm/ピクセル) | 15m 7ピクセル 1.42mm/ピクセル (理論値: 1.63mm/ピクセル) | 12m 10ピクセル 1.0mm/ピクセル (理論値: 1.30mm/ピクセル) | 9m 12ピクセル 0.83mm/ピクセル (理論値: 0.98mm/ピクセル) | 6m 18ピクセル 0.56mm/ピクセル (理論値: 0.65mm/ピクセル) |

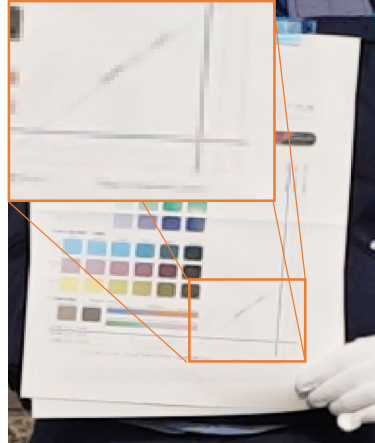
※1 参考式：撮影距離(m) = 撮影対象の画素寸法(m) ÷ 使用するデジタルカメラの1画素のサイズ(m) × 焦点距離 (m)
出典：国土地理院 UAV を用いた公共測量マニュアル (案)

※2 実測値と理論値の差は、撮影距離の誤差やレンズの光学設計の違いにより発現

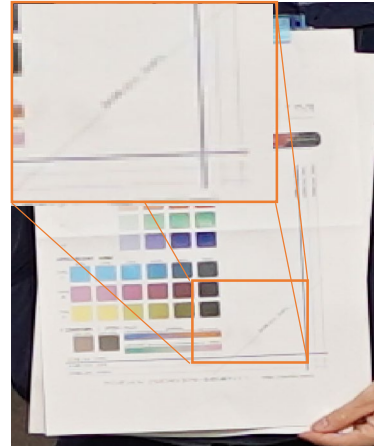
【参考】

- 更なる見え方の参考とするため、様々な色調・形状のパターンが記載されたプリンターテスト用の解像度チャートを利用し、ランドルト環を用いた予備実験と同様に地上にて18mから3mおきにカメラに近づけて撮影を行った
- 最も遠い18mの距離からも1.0mm程度の解像度の線は問題無く読み取れたが、しかし0.5mmや0.2mmの解像度の線は6m近くにならないければ鮮明に線を読み取ることができなかつた。また、カラーチャートの色の見え方に特に変化はみられなかつた

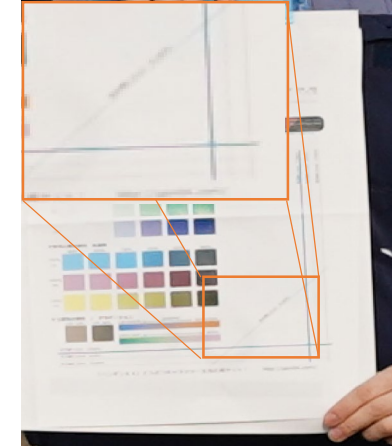
撮影距離ごとの解像度チャートの見え方



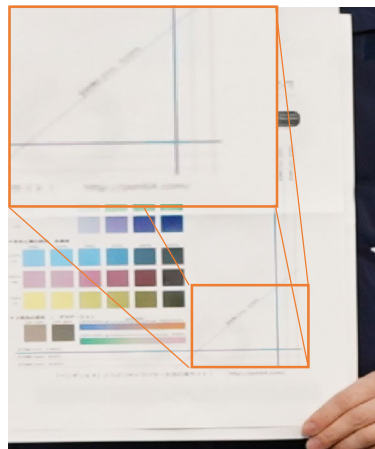
18m



15m



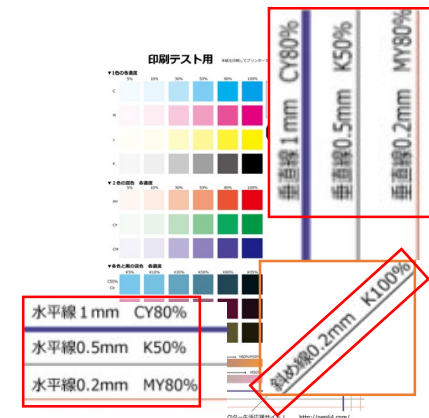
12m



9m



6m



プリンターテスト用の解像度チャート

3. 実験結果 - 検証結果⑤ (3/5)

実験方法②

- 地上にて、6100万画素にて異なる撮影距離（接写/4.6m/9m）から階段の手摺部の様々なサイズの錆を撮影し、錆の見え方を比較



各サイズの錆の見え方

| 錆の直径 | 接写 | 撮影距離 4.6m (0.5mm/ピクセル) | 撮影距離 9m (1.0mm/ピクセル) |
|-------------|----|---------------------------|-------------------------|
| ① 29~31.5mm | ◎ | ◎ | ○ |
| ② 5.5~6mm | ◎ | ○ | ○ |
| ③ 3~4mm | ◎ | ○ | × |
| ④ 1.5~2.5mm | ○ | ○ | × |

【凡例】

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

実験結果②

- ピクセルあたりの大きさが小さいほど、鮮明な静止画が得られる。各静止画における錆の見え方は以下の通りであった
 - 接写：1.5mm以上の錆の存在を確認でき、3mm以上の錆は腐食の状態が確認できた
 - 0.5mm/ピクセル：1.5mm以上の錆の存在を確認でき、29mm以上の錆は腐食の状態が確認できた
 - 1.0mm/ピクセル：5.5mm以上の錆の存在を確認でき、4mm以下の錆は存在を確認できなかった

実験方法③

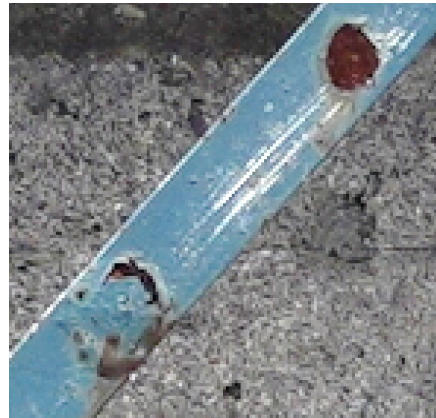
- 地上にて、撮影距離9mでの階段手摺部の錆の静止画から画素数の異なる静止画を生成し、前頁で比較を行った錆のうち最も大きな直径29mm以上の錆の見え方・データ容量を比較

撮影距離：9m

1ピクセル当たり約1.0mm
(6100万画素相当)
45.7MB



1ピクセル当たり約1.5mm
(2600万画素相当)
19.3MB



1ピクセル当たり約2.0mm
(1500万画素相当)
11.2MB



実験結果③

- いずれの静止画からも直径29mm以上の錆の有無は確認でき、1mm/ピクセルの静止画であれば拡大した際のボケが少なく、より精細に腐食部分を確認することができた

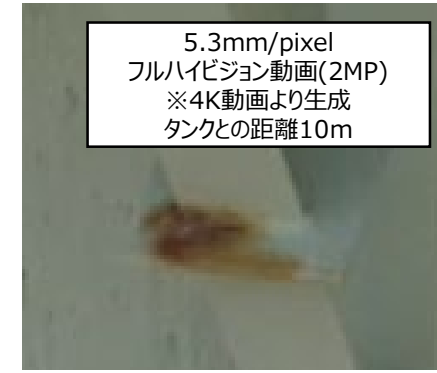
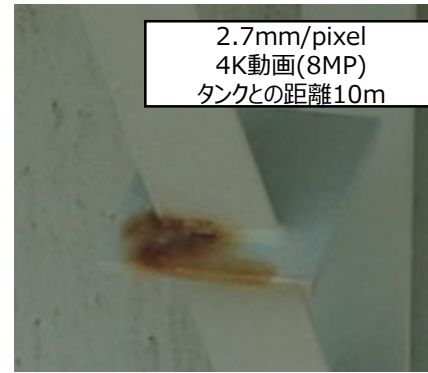
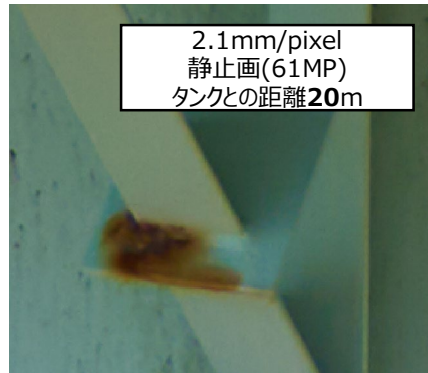
考察

- ✓ 高解像度の静止画を得るには撮影距離を短くするか、高性能のカメラや望遠レンズの搭載が必要となる。高性能のカメラ等を搭載する場合にはドローン重量が大きくなることや費用が高むことが考えられるため、目的・用途に合ったカメラの選定が必要である
- ✓ 画素数が高い程腐食/損傷箇所の判断が容易となるが、その分データ容量が増加し、データの受け渡しやデバイス上で参照する際のパフォーマンスに影響する

実験方法④

- 静止画に加えて動画（リアルタイム動画とは異なり、メモリーカードに録画）を撮影
- 腐食箇所における静止画/動画(4K・フルハイビジョン) の見え方の違いを確認

実験結果④



- 4K動画（800万画素）の場合は腐食の状態をより精細に確認でき、より静止画に近い見え方となる。フルハイビジョン動画（200万画素）の場合、錆の有無は確認することができるが、細かい状態を確認することは難しい



撮影位置図

考察

- ✓ リアルタイム動画の場合、無線伝送にて4Kなどの高解像度の動画を地上まで伝送することは困難。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（録画動画は4K撮影であれば4K動画として保存される。）
- ✓ リアルタイム動画や録画動画は静止画に比べて画素数が小さいことから、腐食/損傷の状態をより詳細に確認したい場合には静止画での撮影を併用する必要がある

検証内容

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

評価ポイント

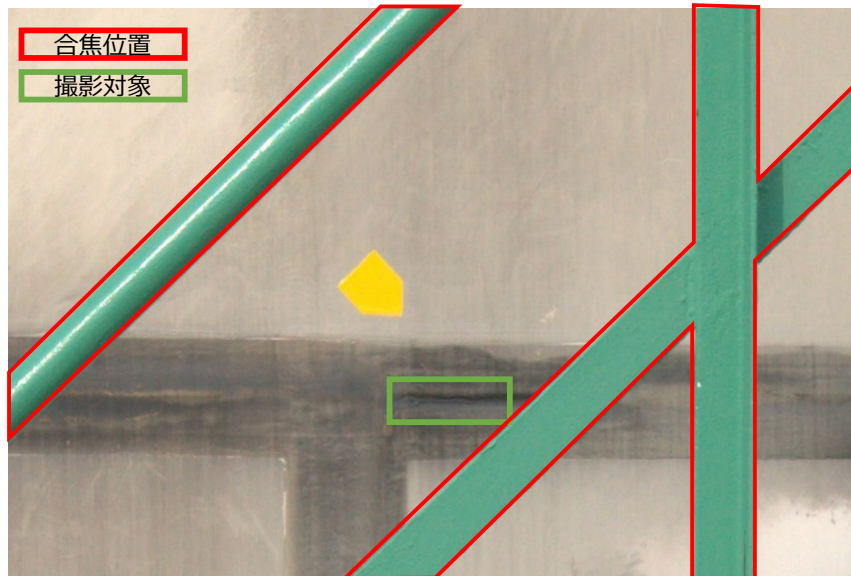
目視と同等以上の静止画を撮影するにあたり、必要な撮影条件（撮影データの詳細度、角度、明るさ等）を確認

実験方法①

- 撮影対象の腐食/損傷部の前後に附属物等が位置しているため、撮影対象に焦点が合わない場合を想定し以下の撮影を実施
撮影対象：側板保温外装板シール部の凹み
撮影方法①：腐食/損傷部の範囲内に附属物等が重ならないような位置に移動し、斜め上の角度より撮影
撮影方法②：同画角内での撮影距離の違いによるボケを想定し、絞り値（F値）を変更して撮影

【参考】

- 撮影したい箇所的前後に階段手摺等の構造物が存在する場合、本来撮影したい箇所ではない当該構造物部分に焦点が合ってしまう場合がある。また、飛行時間が短く小さい画面を見ながらのオペレーションとなる場合、このように撮影対象に焦点が合わないことが想定される。
その際には、絞り値（F値）を大きくすることにより、焦点の前後のボケが解消されることが想定される



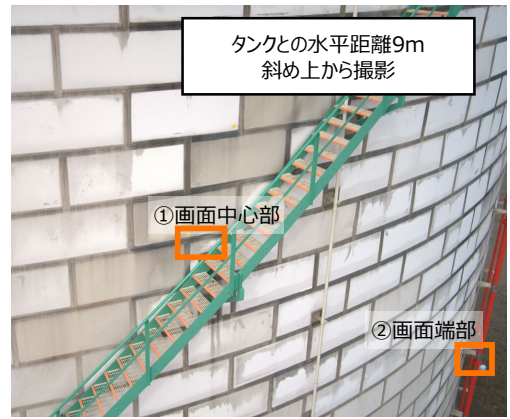
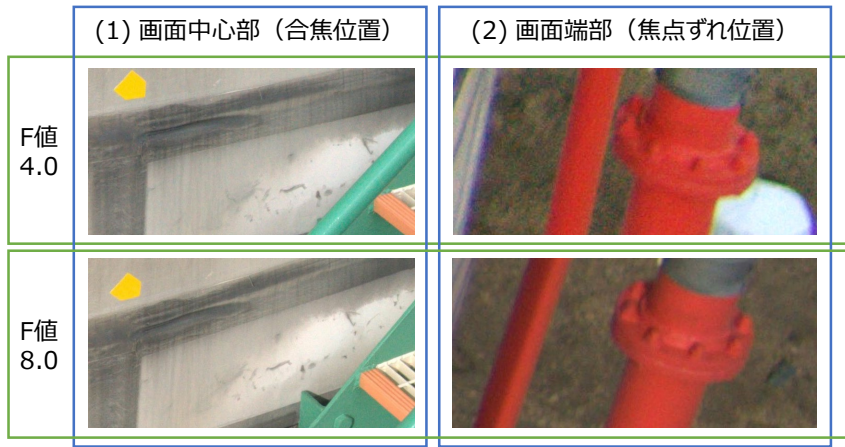
手前の階段手摺部分に合焦しており、撮影対象が焦点ずれている様子（絞り値：4.5）



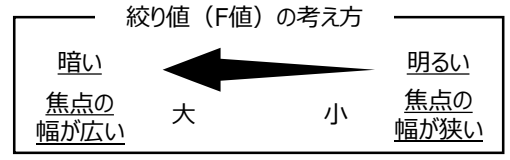
撮影位置図

実験結果①

実験結果①



撮影位置図



- 絞値 (F値) を4.0で撮影した場合、(1)撮影対象である画面中心部のシール凹み部分は鮮明に撮影できているが、(2)撮影対象ではない画面端部においては静止画がぼやけ、判読が難しくなる
- 絞値 (F値) を8.0で撮影した場合、(1)撮影対象である画面中心部のシール凹み部分は鮮明に撮影できており、また(2)撮影対象ではない画面端部においてもF値4.0ではぼやけていた部分のぼやけが改善された
- 画面端部までを識別の対象とする場合、今回は絞値をF8-16程度にした撮影が適当であった

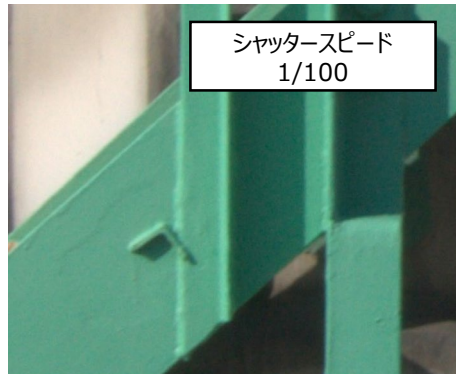
考察

- ✓ 撮影対象の前後に附属物が存在する箇所で、腐食/損傷部全体が撮影できない、撮影対象に焦点が合わない場合は、以下の①、②又は①・②の併用による対処方法を取ることで解決することができる。
 - ①腐食/損傷部の全体が画角に収まる位置にドローンを移動させて撮影する (移動は水平・垂直方向を問わない)
 - ②絞値 (F値) の設定を大きくして撮影する
- ✓ 絞値 (F値) の変更は、静止画全体の明暗に影響を与えることから、日向/日陰などの撮影環境条件に応じて、撮影角度や絞値設定の変更の可否を判断する必要がある

実験方法②

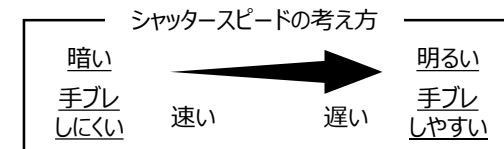
- 点検時の撮影箇所が多い場合を想定し、撮影の効率化の検証のため、ドローンを静止せずに秒速1.0mのスピードで飛行させたままタンクに付属する階段部分を撮影
- 静止面のブレを想定し、シャッター速度を変更して撮影

実験結果②



撮影位置図

- シャッター速度1/100においては等倍で確認した場合に若干のブレが生じ、シャッター速度1/200より速い場合にはブレが確認されなかった



考察

- ✓ 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、静止画にブレが発生しやすい。このことから、シャッター速度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。
- ✓ シャッター速度についても、静止画全体の明暗に影響を与える。前述の絞り値（F値）設定の変更を伴う撮影を併用する場合は、静止画全体の明暗を考慮した設定変更の可否を判断する必要がある。

3. 実験結果 - 検証結果⑦ (1/3)

検証内容

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

評価ポイント

- マニュアル飛行での撮影と自律飛行での撮影では、腐食や損傷を確認に必要な、静止画や必要な時間などを確認
- 撮影後のスクリーニング作業の負荷を確認

実験方法①

- マニュアル飛行による腐食/損傷箇所の撮影、自律飛行によるタンク外周の機械的な撮影について、それぞれの撮影やスクリーニングに要した時間、撮影枚数を計測

実験結果①

- 撮影に要した時間について、マニュアル飛行の場合は1撮影パターンの撮影に要する撮影時間は約2～3分間×2名対応※（平均撮影枚数：約7枚）であった
- 自律飛行の場合は本実証実験を実施した11.3万キロリットルのタンク外周約4分の1の機械的、かつ網羅的な撮影に要する撮影時間は約4分間×2名対応※（撮影枚数：41枚）であった。また、1回の飛行ルートの設定に要した時間は約35分間×1名対応であった
- スクリーニングに要した時間は、1枚当たり平均2分程度×1名対応であった

※：操縦者1名+飛行監視/撮影画角確認等1名 での対応

3. 実験結果 - 検証結果⑦ (2/3)

マニュアル飛行/自律飛行それぞれにおけるフライトの概要

| | | マニュアル飛行 | 自律飛行 |
|--------------|----------------|--|---|
| 撮影方法 | | ドローンを操縦者がマニュアルで飛行させ、リアルタイム動画から腐食・損傷箇所を確認し、撮影が必要と判断される箇所の静止画を撮影 | ドローンによる自律飛行を行い、タンク外周の静止画を機械的かつ網羅的に撮影し、腐食・損傷箇所を確認 |
| 目的 | | 腐食/損傷の有無、および状態の把握 | 腐食/損傷の有無の把握 |
| 撮影対象 | | 腐食/損傷箇所 | タンク全周の4分の1 |
| 撮影枚数 | | 平均 7枚 | 平均 41枚 |
| 所要時間 | ルート設定 | - | 平均 35分×1名/ルート (同ルートの場合には2回目以降の設定は不要) |
| | 撮影(飛行) | 平均 2~3分×2名 | 平均 4分×2名 |
| | スクリーニング | 平均 2分/枚 | 平均 2分/枚 |
| メリット | | <ul style="list-style-type: none"> ✓ カメラの角度、設定値を変更しての柔軟な撮影が可能 ✓ 近接飛行による詳細静止画の取得が容易 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 腐食/損傷の取り漏らしが無い |
| デメリット | | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 腐食/損傷有無の見逃し・撮り漏らしの可能性あり | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 一定の設定の下柔軟な対応が難しい ✓ GPS受信不可の環境下では実施困難 |

考察

- ✓ マニュアル飛行による撮影は、自律飛行と比較し撮影角度や設定値を変更しての柔軟な撮影が可能であり、近接飛行が比較的容易であるが、一方で腐食/損傷有無の撮り漏らしが発生する可能性も否定できず、またタンク全体の網羅的な撮影は操縦の面において非効率である。このため、マニュアル飛行による撮影は腐食/損傷有無が判明している箇所での詳細静止画の撮影の場合に適した飛行方法であると言える
- ✓ 自律飛行による撮影は、マニュアル飛行と比較しルート設定を一度行うことで繰り返し同じルートにて飛行させることができるため、タンク全体の機械的な撮影を行うことができ、腐食/損傷有無の撮り漏らしを防ぐことができるが、一方で一定の設定の下での飛行のため柔軟な撮影が難しく、GPS受信不可の環境下では自律飛行は困難となる。このため、自律飛行による撮影は腐食/損傷有無の探索のためのタンクの網羅的な撮影の場合に適した飛行方法であると言える
- ✓ 上記より、マニュアル飛行/自律飛行に適した目的は異なるため、目的に応じた使い分けを行い必要に応じて併用を行いながら腐食/損傷の発見、および詳細の確認を行うことが望ましい

3. 実験結果 - 検証結果⑦ (3/3)

検証内容

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

評価ポイント

- ・ 構内ネットワークやディスプレイ性能等を確認

実験方法②

- ・ 実証実験場所の通信環境に対し、ドローンが安定して飛行していたか、画像・データは遅延することなく転送されたか、リアルタイム動画に使用するディスプレイの表示は鮮明であったかを確認

実験結果②

- ・ 通信環境に起因するドローンのエラーや画像・データのノイズ等の発生は確認されなかったが、多少のコマ落ちは確認された※
- ・ 今回は200万画素（フルハイビジョン相当）の解像度のディスプレイを使用しており、ドローンからも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送信しているものと同程度の解像度の動画を確認することができた

※実験時に利用した回線

- ・ 送信機・機体間：920MHz
- ・ 動画伝送、テレメトリ：2.4GHz

考察

- ✓ 安定した構内ネットワーク環境下での飛行を行うことができればドローンの飛行に問題は無いが、操縦システムとフライトモニターの動画システムは使用する電波帯域を分けて飛行させることが望ましい。無線中継器を活用することでより安定した飛行が可能となると思われる
- ✓ ドローンから地上のディスプレイ等へ伝送される動画の解像度と圧縮方式により変動するが、伝送された動画の解像度に対応するディスプレイを使用することで、ドローンから見る動画に近似した動画をディスプレイ上でも確認することができる



3. 実験結果 - 検証結果⑧

検証内容 腐食・損傷箇所の特定におけるリアルタイム動画の有効性の検証

評価ポイント リアルタイム動画では、腐食や損傷箇所等の把握がどの程度可能かを確認

実験方法①

- カメラから見ているリアルタイムの動画を別途用意したモニターへ投影し、リアルタイム動画を確認しながら腐食/損傷の有無を探索。腐食/損傷が確認された場合は、当該箇所の撮影により効率的な点検・スクリーニング作業が可能となるかを確認

実験結果①



リアルタイム動画を確認している様子

- リアルタイム動画による腐食/損傷の有無を判別できるかどうかについては、検証できていない。
- 実験での確認時、太陽光の反射により画面が見えづらい場合があることが分かった。

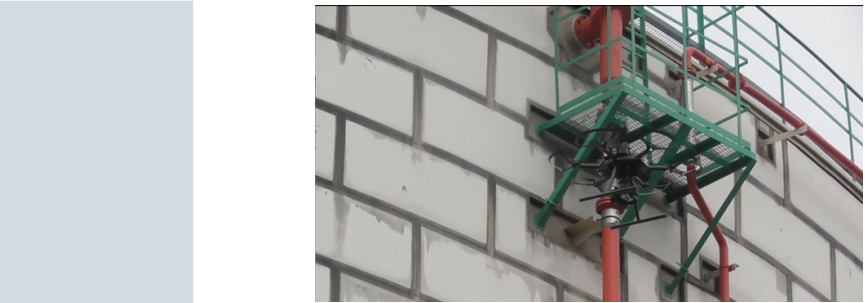
考察

✓ 実験事項全般について検証ができていないため、第2回実証実験にて検証を行うこととする。

検証内容 ドローンの安全な飛行方法の検証

- 評価ポイント**
- 衝突回避機能、緊急離脱機能の有効性を確認
 - 事前に作成する飛行計画の内容は安全な飛行に資する内容であったかを確認
 - 屋外貯蔵タンクの点検においては、「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」の対策で過不足が無いかを確認

実験方法① ドローンをタンク側面へ意図的に近づけ、衝突回避機能が問題無く作動したかを確認



ドローンを意図的に接近させたが、衝突回避機能が動き衝突回避した様子

飛行管理ソフトウェア上での表示

衝突回避機能作動時

衝突回避作動中。方向:前, スピーカーのミュートを解除して下さい。スピーカー音量をMAXにして下さい。
健全度がより劣化しないが注意しながら運用して下さい。

実験結果①

- 衝突回避機能が問題無く動作し、タンク側面へ接触しないことが確認できた
- ドローン事業者より、プロポの通信が途絶した場合、バッテリー残量が規定値よりも下回った場合等には緊急離脱機能が作動し、離陸地点へ自動帰還する機能を備えていることを確認した

緊急離脱機能作動時

プロポ通信途絶


バッテリー残量警告

考察

- ✓ 衝突回避機能を有するドローンを利用することで、設定値を超えてのタンクへの近接を回避することができる
- ✓ その他、プロポの通信が途絶した場合、バッテリー残量が規定値を下回った場合、電波を良好に受信できなくなった場合に離陸地点へ自動で帰還する非常時の機能を利用することで、より安全にドローンを飛行させることができる



3. 実験結果 - 検証結果⑩

| | |
|-----------------|--|
| 検証内容 | 既存の人による目視点検と比較し、効率化の程度を検証（参考情報） |
| 評価ポイント | 既存の点検方法とドローンを活用した点検でどの程度効率化が見込めそうかを確認 |
| 実験方法 | <ul style="list-style-type: none"> 既存の点検方法とドローンを活用した点検を比較し、削減が見込まれる工数・コストを本実証実験に協力いただいた事業者へヒアリング |
| 実験結果 (事業者回答) | <p>本実証実験の対象とした屋外貯蔵タンク1基（3万キロリットル）の場合、</p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <ul style="list-style-type: none"> 既存の点検方法と比較し高所点検の際にゴンドラの利用が不要となることから、作業工数は1/2程度の削減が期待できる ドローンを自社で購入・操縦し維持管理する場合を鑑みても、コストにして約200万円程度の削減が期待できる 静止画からの腐食/損傷箇所の補修判断の可否については、近接での目視点検から得られる3次元的な情報や五感を頼りにした判断と比較し、ドローンでの静止画からは正確な判断をすることが難しいと感じた </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;">  <p>実験協力 タンク保有事業者</p> </div> |
| 考察 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ ドローンを利用しての屋外貯蔵タンクの点検は、既存の点検方法と比較し工数・コストともに削減が期待できる（事業者ごとに所有するタンクのサイズ、設置数、操縦者の委託の有無によっては変動がある） ✓ タンク保有事業者側におけるドローンを活用した点検の導入可否判断に際しては、コストや工数の減少は大きな関心事であることが分かった。全てのタンクについて網羅的なコスト比較調査はできないが、ある大きさのタンクで足場を立てて従来の目視点検を実施した場合とドローンを活用した目視代替点検をした場合のコストを比較するための調査を継続実施する。 |



4. 第1回実証実験結果から見た課題

今回の実証実験の結果から得られた課題2点の詳細を以下に示す

課題①

- 点検に使用するドローンやカメラ等の機材は事業者ごとに異なる。今回の実験で得られた撮影条件を一律に基準として示すことはできない。

今回の実証実験において使用した機材を基に、撮影距離やカメラの設定、スクリーニング時の腐食/損傷箇所の見え方、ドローンの安全な飛行における機能等の一例として紹介しているが、点検に十分となる条件の組み合わせは機材の諸元に依るところが大きい

課題②

- タンク間の離隔距離が狭いタンクにおいて安全に飛行できるか

今回はタンク間の距離や周辺に遮蔽物の無い、ドローン飛行を実施するにあたり条件の整ったタンクを利用し実験を実施することができたが、現状はタンクの設置年代によっては、タンク間距離が10m以下となるようなタンクが数多く存在する

第2回実証実験においては、第1回実証実験結果から見た
これら2点の課題の解決のための検証を実施することとする
(資料3-3「実証実験及び点検方法に関する調査結果を踏まえた第2回実証実験について」へ詳細を記載)