

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調査検討会

第 1 回実証実験結果

第1章 第1回実証実験概要.....	1
1.1 実験の目的	1
1.2 実証実験の概要.....	1
第2章実証方法	2
2.1 実施環境.....	2
2.2 使用する機体	2
2.3 実験内容.....	4
2.3.1 実験の概要.....	4
2.3.2 実験方法	5
2.3.3 飛行時の安全に係る計画.....	7
2.3.4 検証項目	11
第3章 実験結果	14
3.1 実証環境-飛行結果など.....	14
3.2 実証内容.....	14
3.2.1 従来の人を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	14
3.2.2 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の検証.....	18
3.2.3 効率的な点検記録の作成方法の検証	21
3.2.4 タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証	24
3.2.5 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	27
3.2.6 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.....	40
3.2.7 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.....	47
3.2.8 腐食・損傷箇所の特定期におけるリアルタイム動画の有効性の検証	49
3.2.9 ドローンの安全な飛行方法の検証.....	50
第4章 本実証実験のまとめ及び第2回実証実験に向けた課題	53
4.1 まとめ.....	53
4.2 本実証実験の残課題.....	54
4.3 第1回実証実験から見た課題.....	54

第1章 第1回実証実験概要

1.1 実験の目的

本事業においては2回の実証実験が予定されている。第1回実証実験（以下「本実証実験」という。）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、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することを目的とする。

1.2 実証実験の概要

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

表 1 実証実験における役割

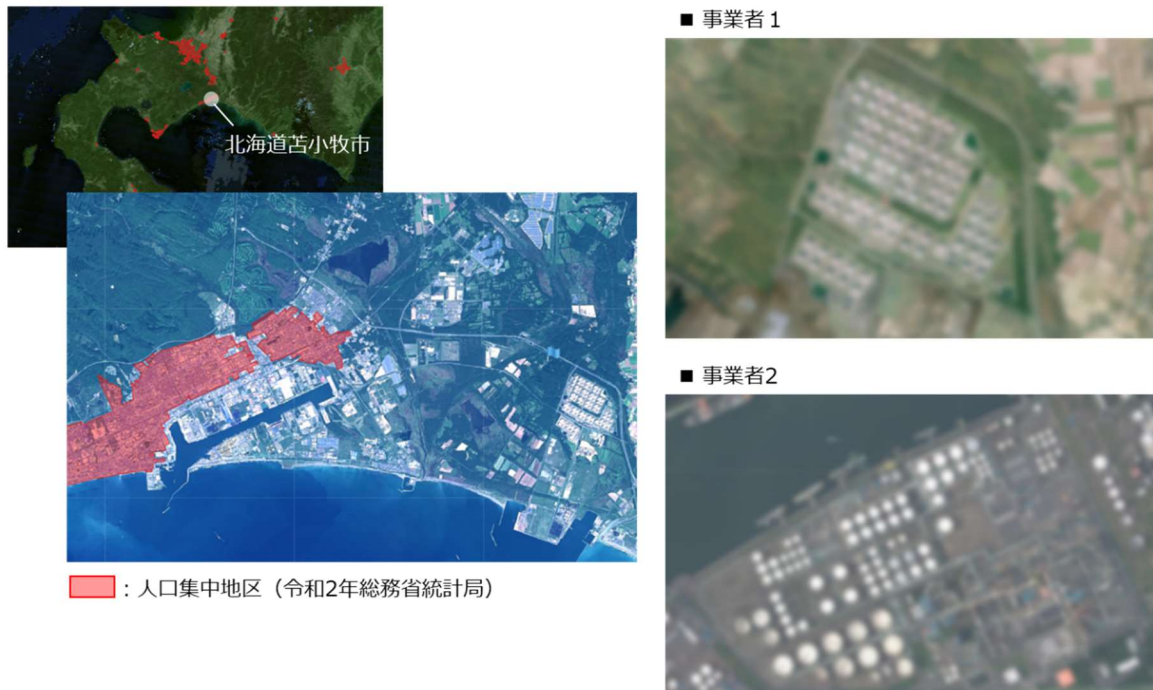
機関名・事業者名	役割
消防庁	実験オーナー
タンク保有事業者	実証実験場所の提供による実証実験協力、既存点検の情報提供
ドローン事業者	ドローン飛行の操作及び監督
アクセントリア	実験の全体とりまとめ

ドローン飛行実験実施日：令和4年11月8日及び9日

第 2 章実証方法

2.1 実施環境

本実証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 1 実験場所の概要図

2.2 使用する機体

本実証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 等のセーフティ機能を搭載した ACSL-PF2 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 2 実証実験に使用するドローン（ACSL-PF2）

ドローンに搭載するペイロードである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 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、撮影画像の解像度を下げる処理を行い、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である。

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 実証実験に使用するカメラ（α7R IV）

2.3 実験内容

2.3.1 実験の概要

本実証実験では、人による目視点検における課題の解決、事業者がドローンを目視点検の代替として点検に活用するための撮影方法等を中心に実験を実施し、その結果から後述の項目の知見を得ることを目標とする。

- (1) 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について、以下の確認を通して実証する。
 - ・ 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する。
 - ・ 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の点検ができることを確認する。
 - ・ 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する。

- (2) 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し、以下の確認を通して実証する。
 - ・ 「マニュアル飛行におけるリアルタイム動画の活用」、「自律飛行における一定間隔での機械的な静止画撮影」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する。
 - ・ 使用するカメラや撮影角度、静止画の詳細度、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する。
 - ・ 撮影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する。

- (3) 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について、以下の確認を通して実証する。
 - ・ 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する。

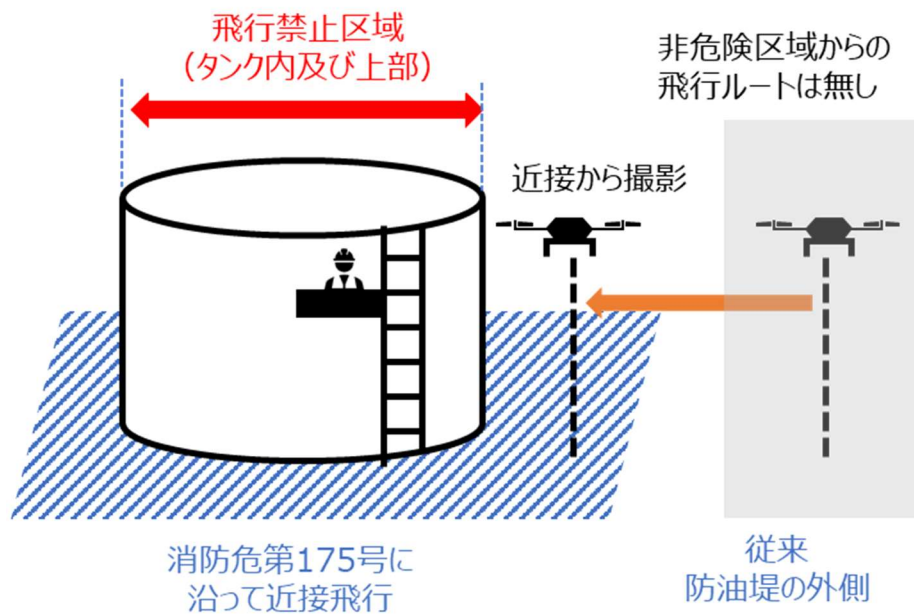


図 4 飛行範囲の概要図

2.3.2 実験方法

本実証実験では、マニュアル飛行と自律方法の 2 パターンの方法で実験を行った。

表 2 実証実験における飛行・撮影パターン

パターン	飛行方法
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する。
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、撮影した静止画はフライト後に確認し、腐食・損傷箇所を確認する。

(1) パターン A

ア 動画における検証のポイント

- ・ 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、スクリーニング作業負荷を軽減できるかを確認する。
- ・ 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ディスプレイ表示及び録画データから確認する。

イ 静止画における検証のポイント

- ・ 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

ウ その他の検証箇所

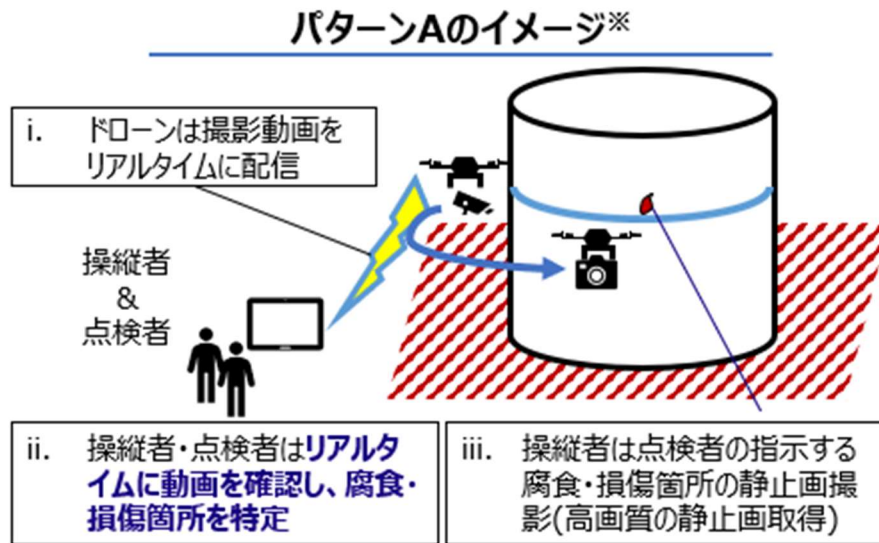


図 5 パターン A の実施イメージ

パターン A においては **エラー！参照元が見つかりません。** に記載のパターンで撮影を実施した。

表 3 撮影パターン表

#	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 ^{※1} (sec)	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画像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画像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	

(2) パターン B

静止画における検証のポイント

- ・ 自律飛行により静止画を機械的に撮影（常に高画質の静止画を取得）
- ・ 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

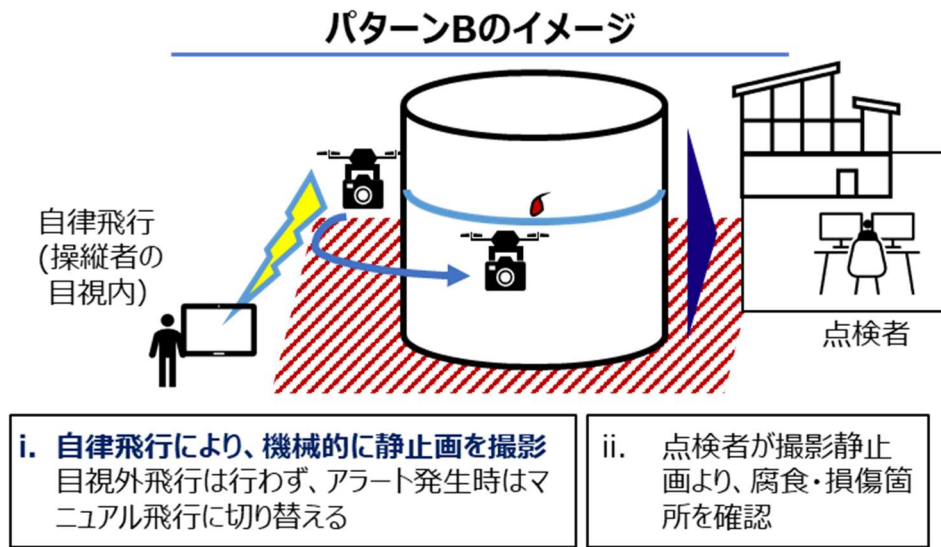


図 6 パターン B の実施イメージ

(3) その他（撮影静止画を利用した腐食・損傷位置の記録作成の検証）

ドローンで撮影したタンク側面の静止画をつなぎ合わせて展開図の様にパノラマ化（オルソ画像化）することで、点検箇所及び腐食や損傷の位置の記録資料として活用が可能なかを検討。

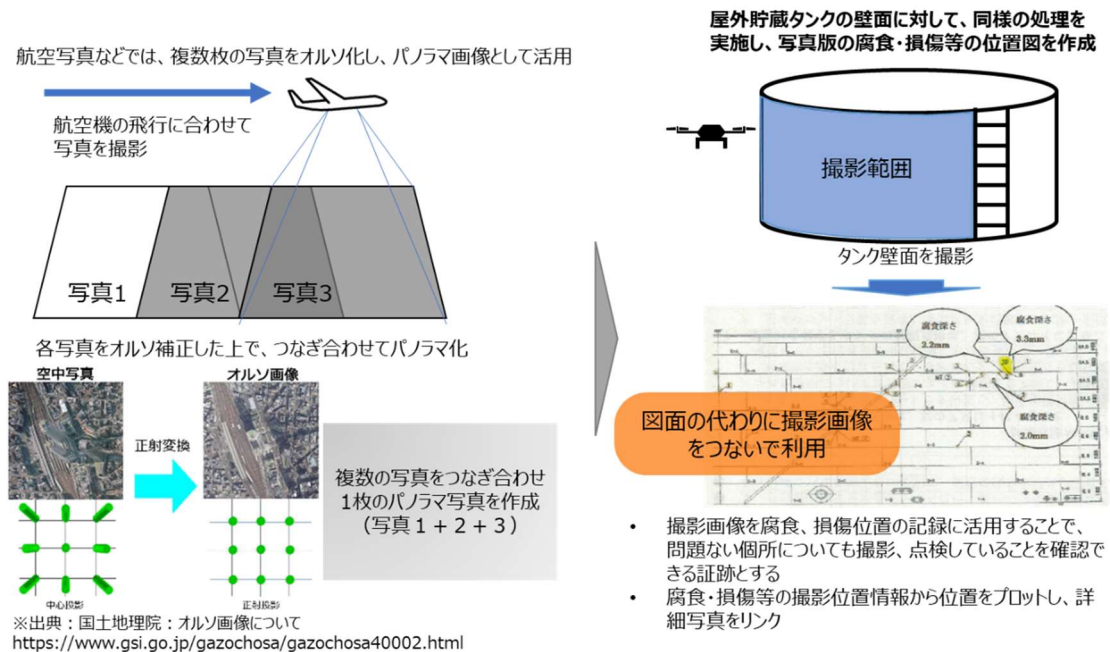


図 7 取得した静止画の後処理及び活用方法

2.3.3 飛行時の安全に係る計画

本実証実験では、屋外貯蔵タンクの近接での飛行を想定する為、安全対策の実施がこれまで以上

に重要である為、安全面を十分に検討した飛行計画を立案した。

(1) 自動帰還機能の搭載

緊急事態が発生した場合に、速やかに自律的にドローンの状態を把握し、現状の飛行区域からの離脱及び事前に設定した安全地帯へ着陸させる機能を搭載したドローンを使用する。

緊急事態とは、ドローン操作用の電波が途絶した場合やバッテリー残量が規定の値以下になった場合であり、操縦者の画面上に自動的に緊急時操作画面が立ち上がる。緊急操作が行われない場合は、自動的に着陸地点に帰還し、着陸することにより、意図しない場所への落下等事故を避けるような機能を具備している。

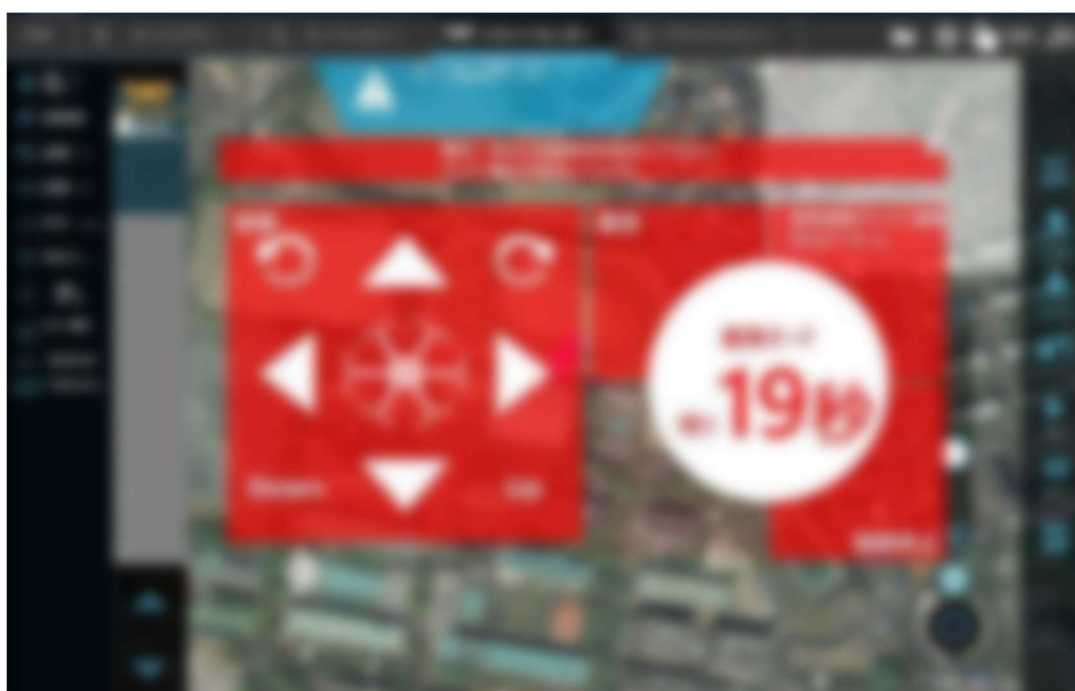


図 8 自動帰還機能が動作した際の地上局画面

(2) 衝突回避機能

操縦ミスや突風などで機体の変位した場合など、タンクへの衝突回避を支援する機能を搭載したドローンを使用する。そのため、衝突回避機能を用い安全を確保した上で、これまでよりも撮影対象までの距離を縮めることができる。本実証実験においては、表 4 に示す衝突回避センサー等のうち、LiDAR SLAM を採用するとともに、万が一衝突した際にもタンク等の損傷を最小限に抑えるためプロペラガードを取付けた機体を採用することとした。

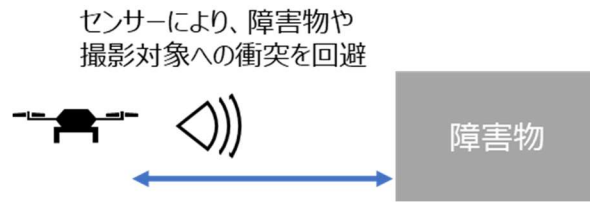


図 9 衝突回避センサーの動作イメージ

表 4 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

(3) 安全距離の設定

高度 25m からの落下範囲は半径 0.8m となる。(プラントにおけるドローン活用事例集 Ver3.0 を参考に落下範囲を計算) マニュアル飛行の場合、通常はこの落下半径に加え、突風等も考慮して、3m 程度の余裕距離を持って撮影を行う。今回の実験ではよりタンク近接での飛行を目指し、タンク-ドローン間距離 5m 以内での撮影を実施する。

一方で、自律飛行では、タンクに近づくことにより GPS の電波が反射し、通常の GPS 誤差 (GPS の電波受信が良好な状態であっても $\pm 2m$ 程度の誤差) よりも誤差が大きくなる可能性があるため、タンク-ドローン間距離 10.0m まで接近して撮影を行う。

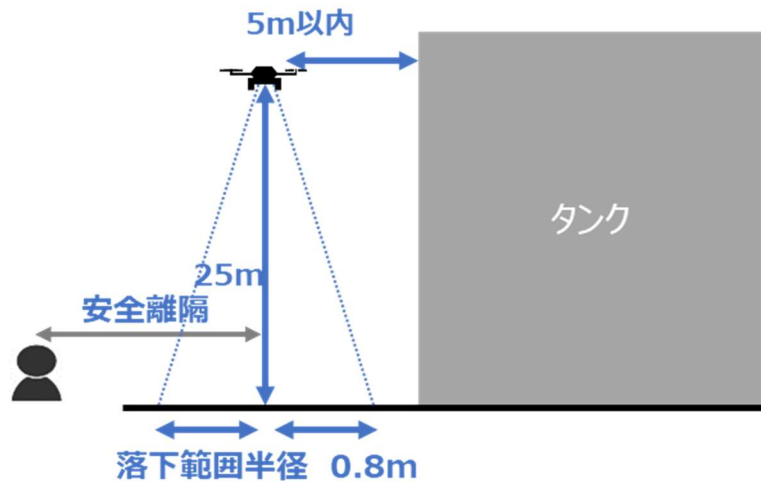


図 10 落下予想範囲の計算結果

(4) 飛行高度の制限と危険エリアとして残る設備の保護

消防危第 175 号の通知を参考にタンク近接を飛行するにあたり、危険箇所として残るためます付近や配管のフランジ部などには、万がードローンが落下しても衝突しないように保護材（足場材などで囲いを作る）を配置する。

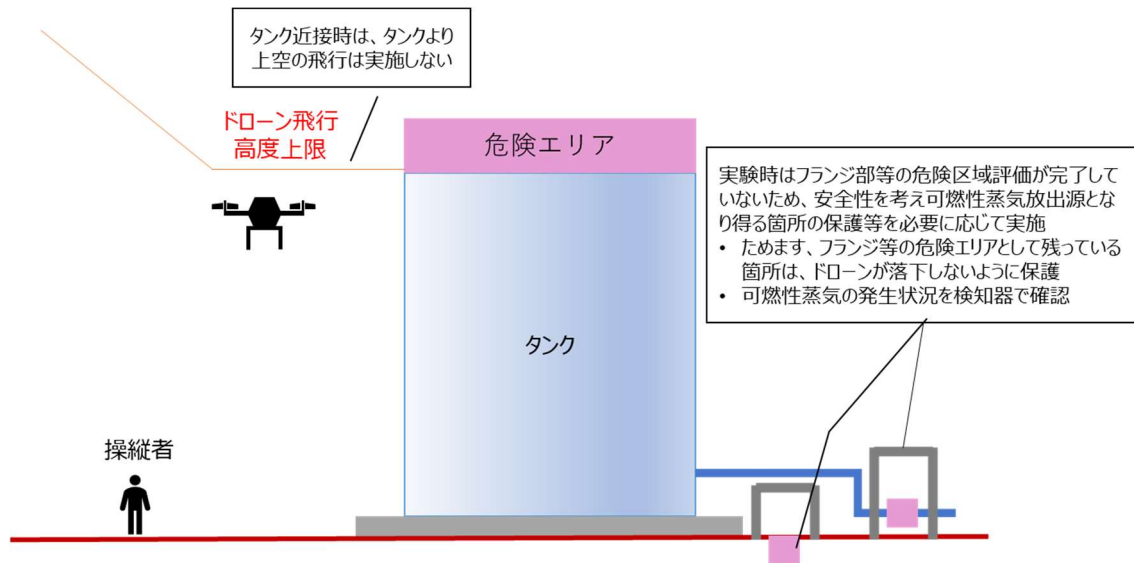


図 11 飛行範囲と危険エリア図

(5) その他のリスク

石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議の「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」及び、「プラントにおけるドローン活用事例集 Ver3.0」を参考に安全対策を実施する。

2.3.4 検証項目

(1) 検証項目

検証項目は下記の5つの観点で評価を行い、ドローンでの検査が実用に耐えるかの確認を行う。

- ・ 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

(2) 検証内容及び評価ポイント

検証項目の実施内容ごとに評価ポイントを定めた。検証内容とその評価ポイントの一覧を表5に示す。

表 5 評価検証内容及び評価ポイント一覧

検証内容	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	<ul style="list-style-type: none"> ・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する
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	<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
③効率的な点検記録の作成方法の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・撮影静止画を利用し、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（撮影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
④タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証	<ul style="list-style-type: none"> ・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
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	<ul style="list-style-type: none"> ・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
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	<ul style="list-style-type: none"> ・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
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	<ul style="list-style-type: none"> ・マニュアル飛行での撮影と自律飛行での撮影では、腐食や損傷の確認に必要な、静止画や必要な時間などを確認
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	<ul style="list-style-type: none"> ・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

検証内容	評価ポイント
⑨ドローンの安全な飛行方法の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突回避機能、非常時の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

第3章 実験結果

3.1 実証環境-飛行結果など

実験は令和4年11月8日及び9日に実施した。

3.2 実証内容

3.2.1 従来の人目視点検では困難であった箇所点検にドローンが有効であることの検証

(1) 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する。

(2) 検証方法

事業者の協力を得て事前に点検困難部位に存する腐食・損傷箇所を把握したうえで、当該腐食・損傷箇所をドローンに搭載したカメラにて以下の方法により撮影した。

- ① 腐食・損傷部を正面から撮影し、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。
- ② 正面から撮影することが困難な腐食・損傷箇所について、ドローンで撮影する場合の上向き（以下「仰角」という。）及び下向き（以下「俯角」という）撮影について、ドローンに搭載されたジンバル機構を用いた検証を行った。

(3) 検証方法①の結果及び考察

ア 検証結果

タンク保温外装板相互接続部のシール損傷箇所を撮影した結果を図12～図14に示す。

ポールカメラによる撮影は、人がカメラ位置を適宜修正するなどして撮影を行うことができる。取得した静止画を図12に示す。撮影距離を0.1mとして撮影しているため、損傷状況が良く分かる静止画を取得することができた。一方、今回サンプルとして利用した損傷箇所の位置がポール長さの限界に近い高さに位置していたことから、安定したポール操作が困難であったため、正面からの静止画を残すことはできなかった。

ドローンに搭載したカメラで撮影した静止画（図13及び図14）では、ドローンを損傷箇所の位置まで移動させることにより、正面からの撮影を行った。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・損傷部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。

イ 考察

- ・ポールカメラによる撮影は、非常に有効であるものの、ポール長さ等の制限があり、腐食・損傷の位置によっては撮影が困難になる場合もある。
- ・本検証では、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と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、より鮮明な静止画の取得が可能と

考えられる。



図 12 ポールカメラにより撮影した静止画（撮影距離 0.1m）



図 13 約 1.0mm/px 相当の静止画（撮影距離 9m,6,100 万画素相当）

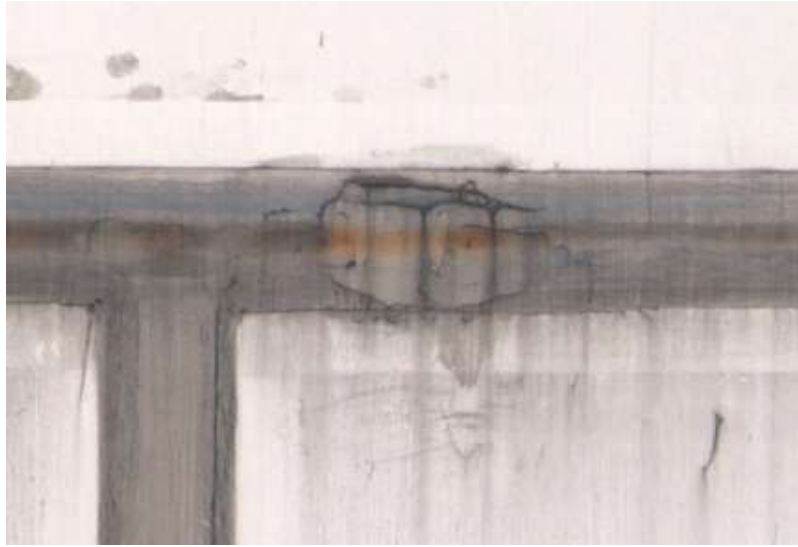


図 14 約 0.5mm/px 相当の静止画（撮影距離 4.6m,6,100 万画素相当）

(4) 検証方法②の結果及び考察

ア 検証結果

ドローンから仰角で撮影を行った際、プロペラや機体一部の映り込みが生じた。映り込みの状況を図 15 に示す。撮影対象は図 15 に表示した箇所の橙枠内であり、当該箇所を拡大したものを図 16 に示す。拡大前は機体の映り込みが目立っているが、当該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。

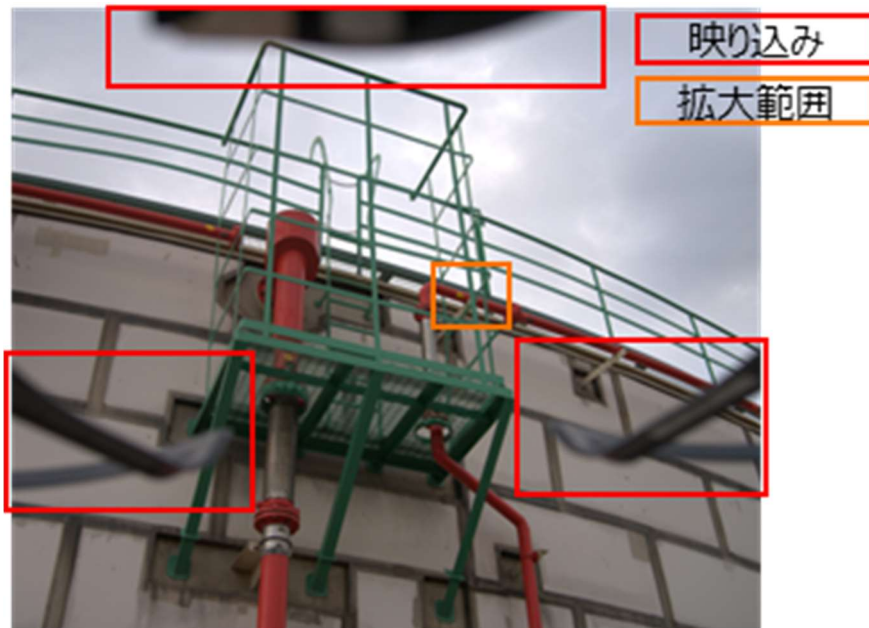


図 15 仰角撮影での静止画



図 16 図 15 の一部を拡大した静止画（配管腐食の様子）

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示す。静止画上部に写っているタンク側板にウインドガーダーが溶接接合されている箇所などは、通常の目視点検では点検が困難な部位となる。仰角で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事が分かった。



図 17 上方からウインドガーダーを撮影した様子

イ 考察

- ・仰角撮影が必要な場合、ドローンによってはジンバルが上に向かない機種も存在するので注意を要する。
- ・仰角撮影において機体の映り込みが生じないように撮影するためには、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選定することが望ましい。
- ・通常の直接目視による点検においては、地上から仰角での目視が主となること、また廻り階段などからは俯角での目視が可能であるものの、一部の範囲しか目視ができないことなどから、ドローンを使用して俯角撮影をする場合の優位性を確認することができた。

3.2.2 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の検証

(1) 評価ポイント

- ・ドローンが計画した飛行ルートに沿って、マニュアル飛行・自律飛行ともに屋外貯蔵タンク近接で安定して飛行できる距離を確認する。
- ・自律飛行において、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する。

(2) 検証方法

マニュアル飛行及び自律飛行におけるタンク-ドローン間距離を以下の距離に設定し、安定した飛行ができるか、またタンク近傍において発生が懸念される異なる風の流れや突風、金属タンクの影響による GPS のマルチパス（複数回の GPS 電波反射による測位精度の低下をいう。以下同じ。）等の発生の有無、について検証を行った。

- ・マニュアル飛行時のタンク-ドローン間距離：4.6m（最接近距離）
- ・自律飛行時のタンク-ドローン間距離：10m

自律飛行における撮影ポイント設定については、タンク-ドローン間距離 10m からの撮影であるため腐食の有無が分かる程度の解像度での撮影を目標とし、4 秒毎にタンクの 1/4 周程度撮影を行い、タンク高所の網羅的な静止画を効率的に取得できるかどうかについての検証を行った。

(3) 検証結果及び考察

ア 検証結果

マニュアル飛行、自律飛行ともに映像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、操縦系システム及びドローンの飛行自体には問題は無く、概ね安定して計画した飛行ルート通りに飛行できた。また、GPS のマルチパスが発生した際のドローン挙動は確認されず、マルチパスは発生していなかったものと考えられる。ただし、マニュアル飛行の最接近距離約 4.6m の近接飛行においては、一度だけ機体が風にあおられる事象が発生した。（3.2.4 の項を参照。）

次に自律飛行における実際の撮影ポイントを図 18 及び図 19 に示す。撮影実施前に撮影範囲の網羅的な静止画を効率的に取得するための設定を行ったうえで飛行撮影を実施した。タンク-ドローン間距離 10m、画素分解能は約 1.1mm/px での撮影を行い、撮影した静止画からは腐食・損傷の有無程度は識別できることを確認した。自律飛行による自動撮影は効率的な撮影が実現できる一方で、撮影漏れの生じない設定が必要であることに注意を要する。



図 18 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（真上から）



図 19 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（斜め横から）

イ 考察

- ・本検証では安定した飛行ができたものの、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、以下のようなシステム

側での安全対策を講じ、リスクの最小化を図ることが望ましいと考えられる。

- 通信不可能となった場合に自動で着陸場所に戻るよう設定する
 - 同じ周波数帯の電波が混在する場合、干渉による通信障害が起こる可能性があるため、複数の周波数帯を選択することのできる機体を選定することが望ましい
- ・上記対策に加え、衝突回避機能をドローンに搭載し、作動点検を行ったうえで飛行させる必要がある。
 - ・自律飛行による自動撮影は効率的な撮影が実現できる一方で、撮影漏れの生じない設定が必要であることに注意を要する。

3.2.3 効率的な点検記録の作成方法の検証

(1) 評価ポイント

- ・撮影静止画を利用し、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（撮影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。

(2) 検証方法

効率的な点検記録の作成方策の一案として、取得した静止画から正射投影画像（以下「オルソ画像」という。）を生成し、さらに当該オルソ画像への腐食・損傷状況の詳細静止画や情報を紐付ける記録方法について検証を行った。

(3) 検証結果及び考察

ア 検証結果

自律飛行で撮影した複数のタンク外周静止画を、計算機上で自動実行することにより、オルソ画像を生成し、タンク外観をパノラマ的に再現することができた。生成したオルソ画像を図 20 に示す。なお、処理に要した時間は 8 時間程度であった。

通常、点検時に検出された腐食・損傷の位置等については、側板展開図など既存の図面に記録されることとなるが、生成したオルソ画像は、図面同様に広範囲を表示できることが分かった。

(図 21)

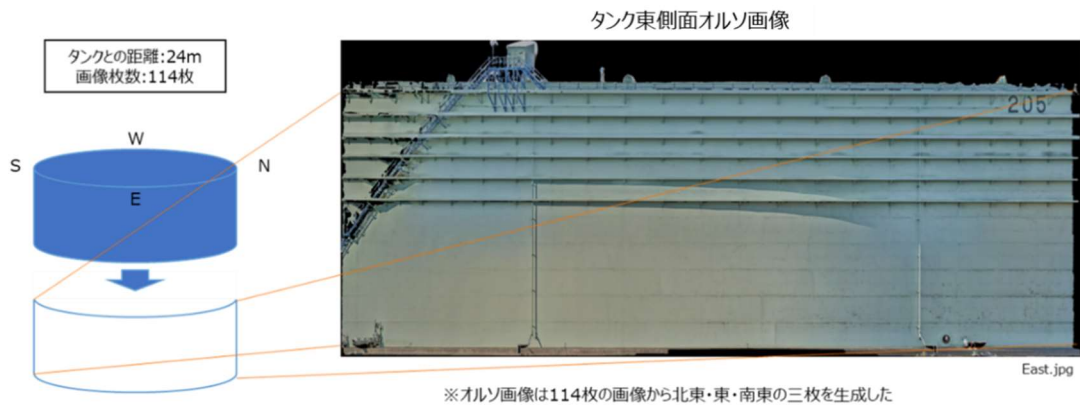


図 20 オルソ画像のイメージ

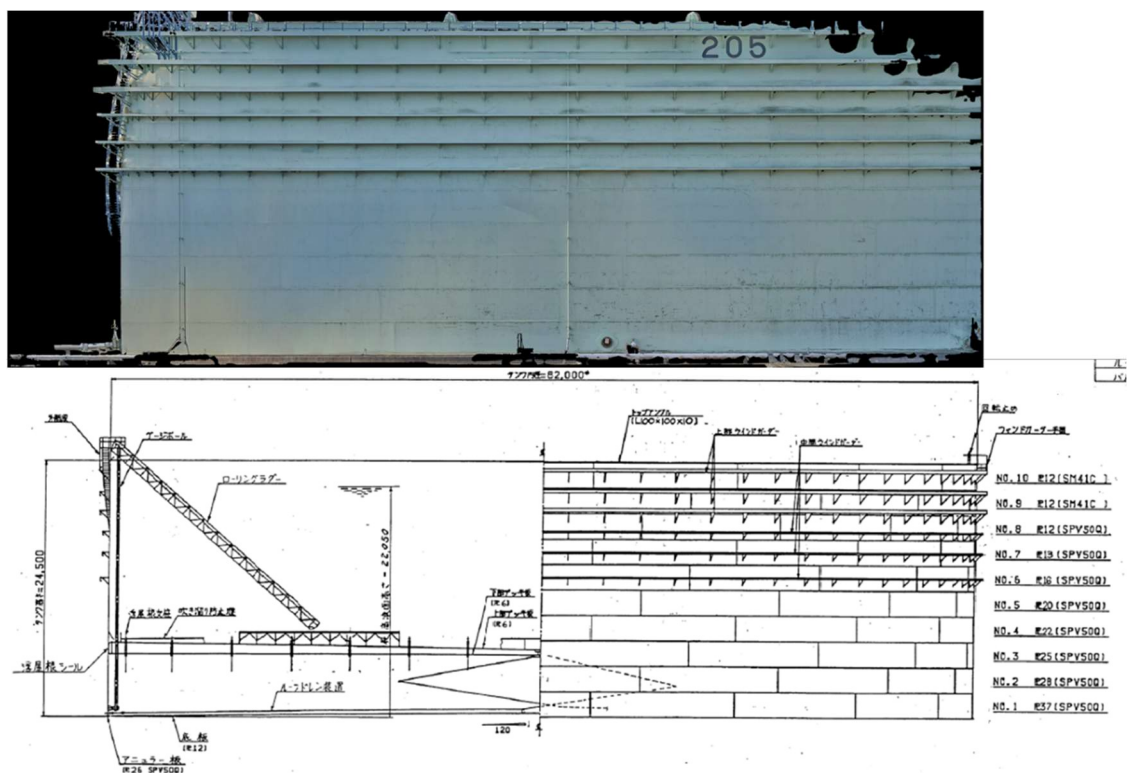


図 21 オルソ画像と図面の比較

本検証で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のリンクや腐食/損傷の位置、種別、範囲等の情報を紐付ける記録方法について検証を行った。

図 22 の赤表示部分に図 23 の詳細静止画や腐食・損傷の情報を紐付けたものであるが、オルソ画像の活用方法を工夫することにより、効率的な点検記録の作成や点検データの管理が行えることが示唆された。



図 22 損傷位置記録方法の一案 全体像（イメージ）

位置X	位置Y	損傷箇所ID	登録日	損傷種別	損傷サイズ	コメント
120	15	1	2022.11.10	錆	50mm x 30mm	ドローンでの検査で発見



図 23 損傷位置記録方法の一案 損傷部位拡大（イメージ）

イ 考察

- ・本検証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ており、オルソ画像そのもので腐食・損傷の有無を確認することはできなかったが、24m よりもタンク-ドローン間距離を縮めて撮影した静止画を用いて生成したオルソ画像であれば、腐食・損傷の有無を確認できることが期待される。

- ・ただし、さらにタンク-ドローン間距離を縮めて撮影した腐食・損傷の詳細が分かる程の鮮明な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事が想定されるほか、データ量や生成時間が増大する等の問題点があり、オルソ画像の生成が困難になると考えられる。
- ・撮影静止画の活用方法を工夫することにより、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。
- ・オルソ画像の生成や腐食・損傷箇所の記録を行うためには、静止画がタンクのどの位置なのかを特定することが重要となる。このため、撮影の際に同画角内にタンクの附属物等の目印を含めて撮影することで当該目印から位置を特定する、撮影時のドローン位置情報から位置を特定するなどが考えられる。

3.2.4 タンク近接での安定した飛行を実現できるかの検証

(1) 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
- ・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・回数を計測する
- ・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

(2) 検証方法

- ① 撮影のための飛行時以外の時間、頻度が点検の効率性に影響を与えるかどうかについて、回数及び時間の測定により検証を行った。
- ② マニュアル飛行でタンク近接飛行を行い、衝突回避機能の有効性とタンク近接飛行時の飛行安定性について検証を行った。

(3) 検証方法①の結果及び考察

ア 検証結果

- ・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 2～2.5 時間程度の時間を要した。
(飛行場所の安全確認を行った時間を含む。)
- ・約 14 分間に 1 回のバッテリー交換を行った。※
なお、バッテリー交換 1 回当たりの所要時間は 2 分程度の時間を要した。
※ 平均飛行時間とバッテリー残量 30%を目安として着陸させたことから算出。

イ 考察

- ・フライト前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。
- ・自律飛行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。

- ・バッテリー持続時間はドローン機体により異なるほか、撮影高度や風速によっても大きく変化するので、余裕を持った飛行計画を作成することが重要である。

(4) 検証方法②の結果及び考察

ア 検証結果

- ・衝突回避機能を障害物（タンク）までの距離 5m に設定して飛行させたが、この設定未達の距離までタンクに近づかないよう機体運用を行った。このため、想定以上にタンクに接近したケースはなかった。本検証における飛行ルートの例を図 24 示す。
- ・さらにタンク-ドローン間距離を 5m 未満での飛行を検証するため、衝突回避センサー及び GPS 機能を OFF にして完全マニュアル飛行を実施※した。この際、ドローンが風にあおられ旋回動作を行うという事象が発生した。（図 25）

※今回採用した衝突回避機能が GPS と連携するシステムとなっており、タンクにより近接した場合には GPS 遮蔽、マルチパス、磁気エラー等の発生する可能性が高まることが考えられたため、完全マニュアル飛行にしたもの。

イ 考察

- ・当日の気象状況や風の対流、突風等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。



図 24 飛行ルート为例



図 25 風にあおられ、機体が傾いている様子

3.2.5 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

(1) 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、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する。

(2) 検証方法

本実証実験で使用するカメラ（α7R IV、図 3）を用いて以下の検証を行った。

- ① 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。
- ② 動画撮影を行い、4K 撮影時とフルハイビジョン撮影時の見え方の違いについて検証を行った。

(3) 検証方法①の結果及び考察

ア 検証結果

(ア) 検証①-a：撮影距離を変化させた場合の画素分解能評価

コピー用紙に印刷した視力検査用ランドルト環について 18m 離れた位置から撮影を開始し、3m ずつ距離を縮めながら 6m 離れた位置まで撮影を繰り返して静止画を取得した。カメラ解像度は 6,100 万画素に設定し撮影を行った。

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（図 26 の最下段のランドルト環空白部 1.0cm の部分）のピクセル数を数え、静止画の画素分解能を求めた。その結果を表 6 に示す。

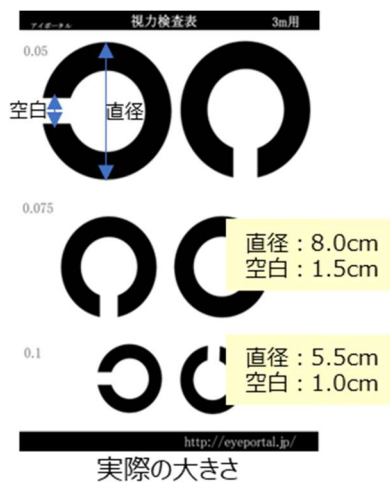


図 26 評価で使用したランドルト環の大きさ

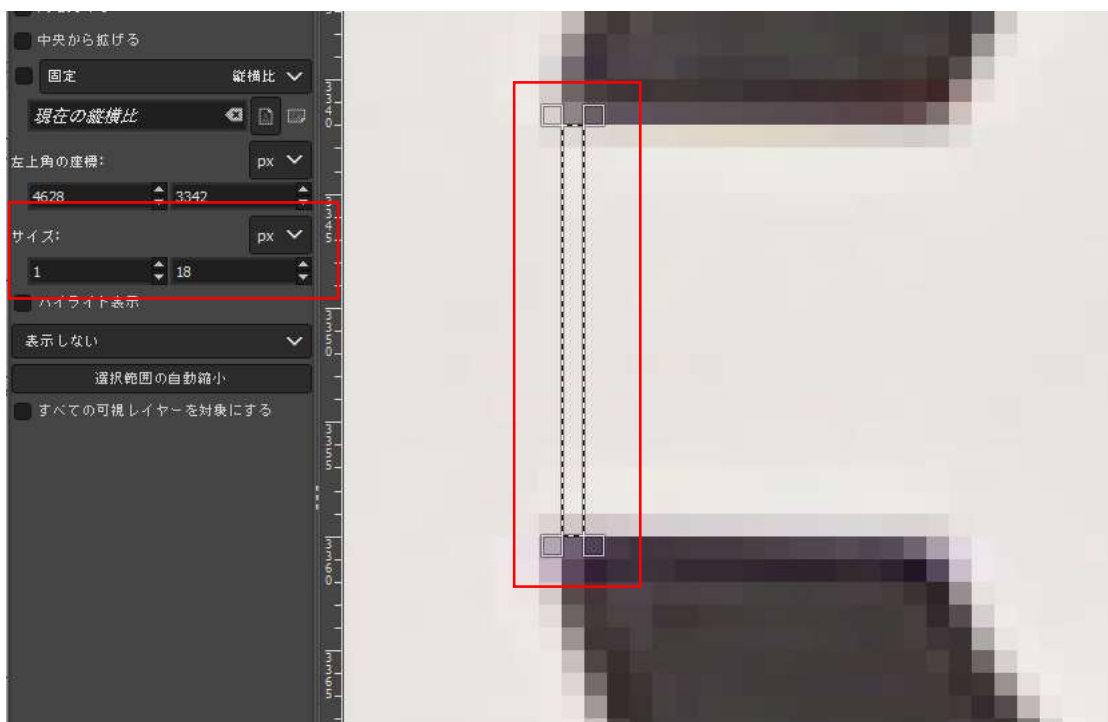


図 27 ランドルト環空白部分のピクセル数カウント方法

表 6 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	1.42mm	1.0mm	0.83mm	0.56mm
理論値	1.95mm	1.63mm	1.3mm	0.98mm	0.65mm

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。

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

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により差異が生じていると考えられる。

いずれにせよ、6,100 万画素相当の撮影を行えば、18m 離れた距離から撮影した場合であっても、2mm/px 程度の画素分解能で撮影を行うことができることが確認できた。

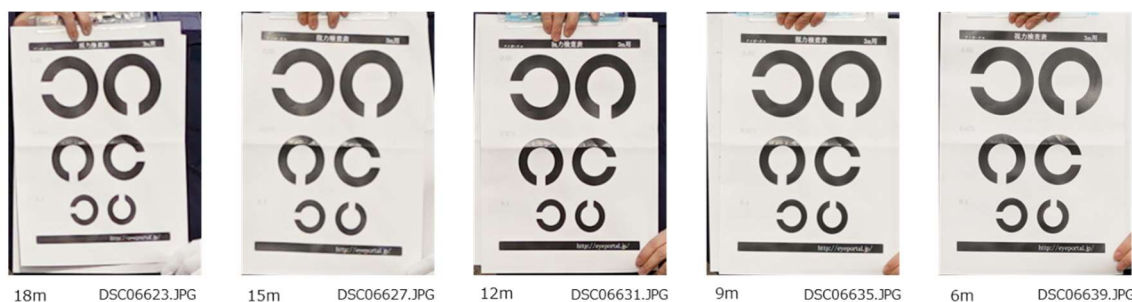


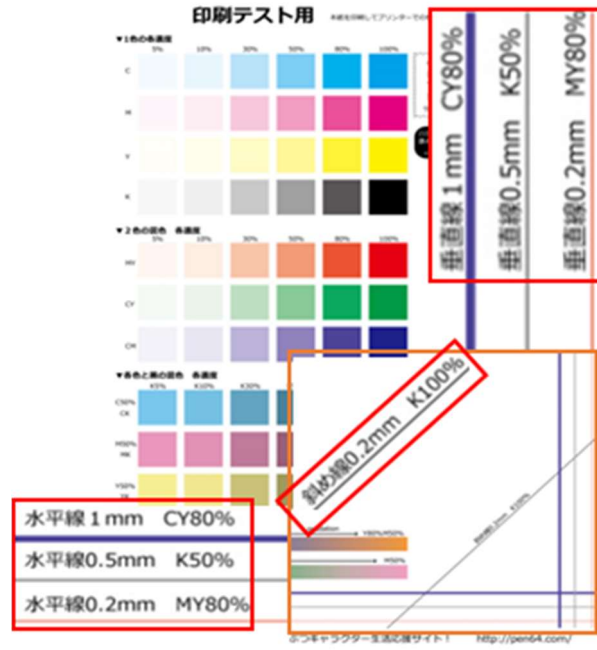
図 28 距離ごとのランドルト環の写り方

(イ) 検証①-b：撮影距離を変えた場合の線状模様の識別評価

次に、同じコピー用紙に印刷したプリンターテスト用の解像度チャートについて、18m 離れた位置から撮影を開始し、3 m ずつ距離を縮めながら 6m 離れた位置まで撮影を繰り返して静止画を取得した。カメラ解像度は 6,100 万画素に設定し撮影を行った。

それぞれの距離で得られた静止画について、チャート上の 0.2mm から 1mm の水平・垂直・斜線を識別することができるかについて評価を実施した。

評価の結果、1mm の線は 18m 離れても問題なく識別することができた。しかし 0.5mm や 0.2mm の線は 6m 近くにならないと鮮明に識別することができなかった。



実際の大きさ

図 29 評価で使用した解像度チャートにおける線の太さ



図 30 撮影距離ごとの線の写り方

(ウ) 検証①-c：画素分解能の変化による実腐食の識別に関する検証

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变化させ、0.5mm/px～2.0mm/px までの画素分解能を有する静止画で評価を行った。

撮影には、タンク防油堤に設置された階段の部材に生じている実腐食を採用した。図 31 に防油堤階段の全体、図 32 に検証に採用した実腐食を示す。



図 31 ピクセルあたりのサイズを変化させた場合の試験 拡大位置



図 32 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）

最初に、図 32 の腐食箇所に対して、カメラ解像度を 6,100 万画素に設定し、4.6m 及び 9.0m の距離から撮影を行い、各腐食の識別可否を評価した。画素分解能は、4.6m 撮影時が約 0.5mm/px（図 33）、約 9.0m 撮影時が 1.0mm/px（図 34）となる。

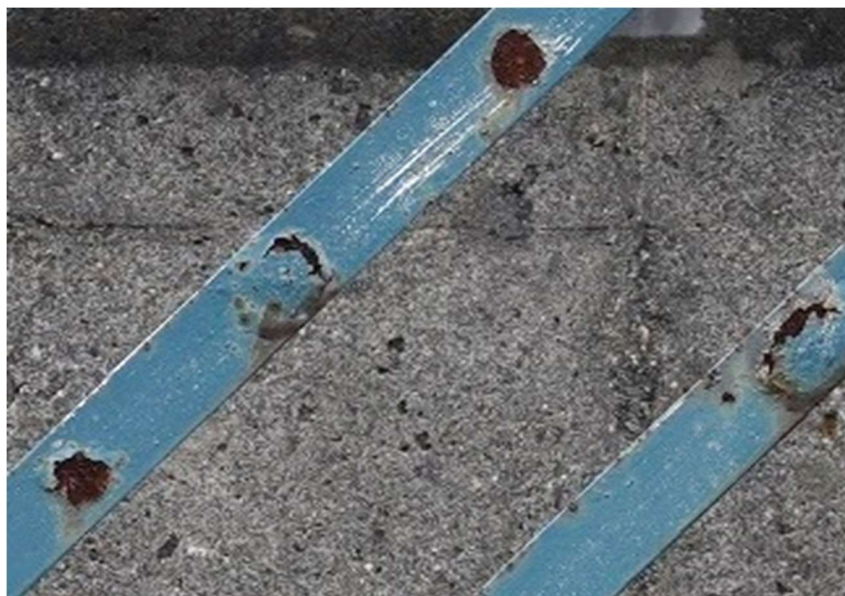


図 33 約 0.5mm/px 相当の静止画（撮影距離 4.6m、6,100 万画素相当）



図 34 約 1.0mm/px 相当の静止画（撮影距離 9.0m、6,100 万画素相当）

それぞれの静止画について、図 32 で寸法を示す各腐食に対する識別度合いを評価した結果は以下のとおりであった。

- ・接写：1.5 mm以上の腐食の存在を確認でき、3 mm以上の腐食の状態が確認できた。
- ・約 0.5 mm/px：1.5 mm以上の腐食の存在を確認でき、29 mm以上の腐食の状態が確認できた。
- ・約 1.0 mm/px：5.5 mm以上の腐食の存在を確認でき、4 mm以下の腐食は存在を確認できなかった。

画素分解能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、鮮明な画像であることが分かる。評価結果の一覧を表 7 に示す。

表 7 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

次に、同一距離から撮影した 6,100 万画素の静止画から画素数の異なる静止画を生成し、直径 30mm 程度の腐食の見え方と各静止画のデータ容量を比較した。(図 35～図 40)



図 35 約 0.5mm/px 相当 (撮影距離 4.6m,6100 万画素相当,47.4MB)

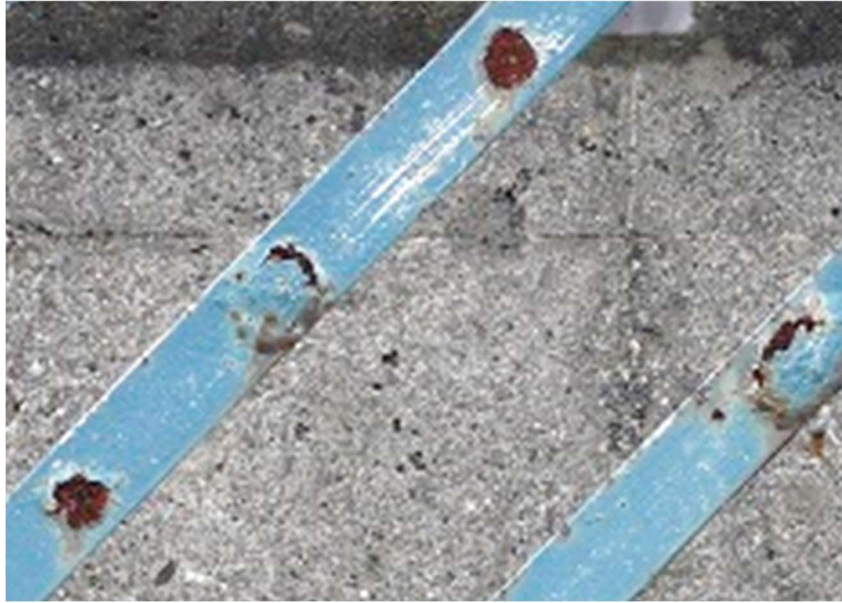


图 36 約 0.7mm/px 相当 (撮影距離 4.6m, 2,600 万画素相当, 19.8MB)



图 37 約 1.0mm/px 相当 (撮影距離 4.6m, 1,500 万画素相当, 11.4MB)



图 38 約 1.0mm/px 相当 (撮影距離 9m, 6,100 万画素相当, 45.7MB)



图 39 約 1.5mm/px 相当 (撮影距離 9m, 2,600 万画素相当, 19.3MB)



図 40 約 2.0mm/px 相当 (撮影距離 9m, 1,500 万画素相当, 11.1MB)

いずれの画像からも直径 30mm 程度の腐食の有無程度は確認できるが、1mm/px 程度の画素分解能で撮影した静止画であれば拡大した際のボケが少なく、より精細に腐食の状態を確認することが可能であった。

イ 考察

- ・高解像度の静止画を取得するためには、撮影距離を短くする、高性能のカメラや望遠レンズを搭載する方法がある一方で、これら対処方法を行うことで、タンクへの接近距離、ドローン重量の増大などドローン飛行に関わる事項が問題になることも想定される。
- ・同じ距離からの撮影であれば、画素数を高く設定するほど、精細な静止画を取得しやすくなるが、静止画一枚当たりの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ことが考えられる。

(4) 検証方法②の結果及び考察

ア 検証結果

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タンクウインドガーダー支持部材に生じていた腐食とした。（図 41）

なお、フルハイビジョン動画については、実験中に 4K 撮影により録画した動画から生成した動画を使用している。



図 41 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（スクリーンキャプチャしたもの。）をそれぞれ図 42～図 44 に示す。



図 42 静止画(61MP,撮影距離 20m, 2.1mm/px)



図 43 4K 動画(8MP,撮影距離 10m, 2.7mm/px)

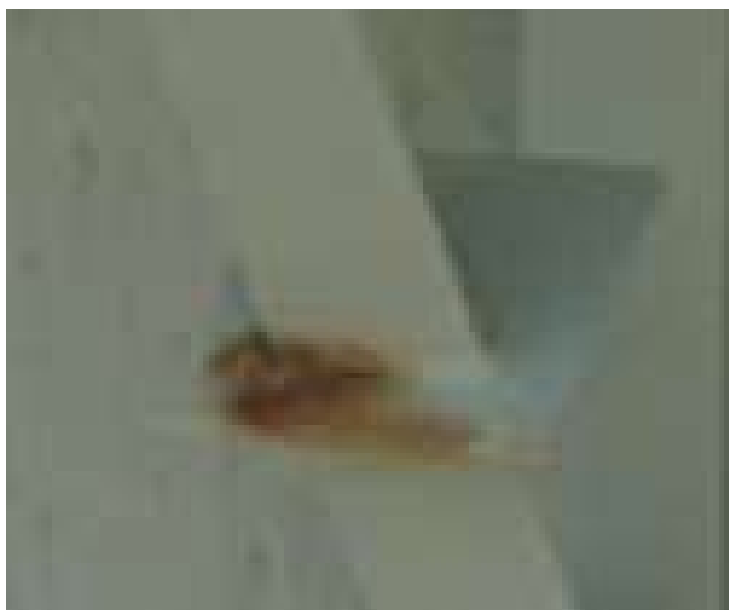


図 44 フルハイビジョン動画(2MP,撮影距離 10m, 5.3mm/px)

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、その状態までは確認することが

困難であった。

イ 考察

- ・リアルタイム動画の場合、無線伝送にて 4K など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。
- ・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・損傷の状態を詳細に確認したい場合には静止画撮影を併用する必要がある。

3.2.6 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

(1) 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）を確認する。

(2) 検証方法

ドローン飛行での静止画撮影を行い、以下の検証を行った。

- ① 撮影対象である腐食・損傷の前後に附属物等が位置しているなど、撮影対象にカメラ焦点が合わない場合を想定し、以下の撮影方法の検証を行った。
 - a 腐食・損傷部の前後に附属物等が重ならない位置にドローンを移動させ、斜め上の角度より撮影
 - b 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（以下「F 値」という。）を変更して撮影
- ② ドローンの移動中や突風等による意図しない移動時等の撮影を想定し、シャッタースピードの設定方法に関する検証を行った。

(3) 検証方法①の結果及び考察

ア 検証結果

ドローン飛行を行い、タンク保温外装板の損傷（凹み）部を撮影した。図 45 及び図 46 に当該損傷部を正面から撮影した静止画を示す。静止画から分かるとおり、損傷部手前に廻り階段の手摺りが存するため、当該損傷部にはカメラ焦点が合いづらくなっている。



図 45 撮影位置図

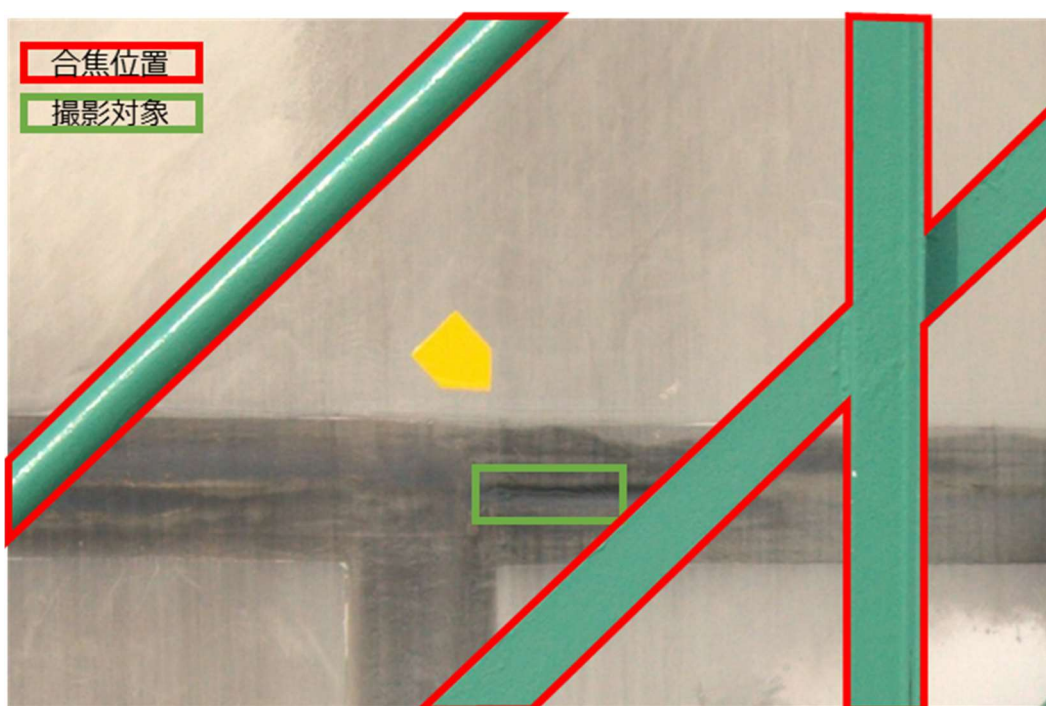


図 46 手前の構造物に合焦しており、撮影対象が焦点ずれしている様子

(ア) 検証①-a : 腐食・損傷部の斜め上の角度からの撮影

図 46 に示すタンク保温外装板の損傷部に対し、斜め上の位置までドローンを移動させ、F 値を 4.0 に設定し撮影を行った。撮影した静止画を図 47 及び図 48 に示す。

損傷部正面から撮影した際には廻り階段手摺り部が損傷部の手前に位置していたが、斜め上から撮影したことにより損傷部の手前から構造物が無くなったため、損傷部に焦点が合うことが確認できた。



図 47 撮影位置図



図 48 画面中心部 (F4.0)

(イ) 検証①-b : 撮影対象に焦点が合いづらい場合における F 値を変更した撮影

静止画による目視代替点検では、ある程度広い範囲を静止画撮影し、当該静止画を拡大して画角内全体について確認を行うことが効率的であると考えられる。円筒型のタンクにおいては、タンク正面からの撮影であっても画角の中心部と端部のレンズからの距離が異なるため、F 値を開放に近い設定としたまま広範囲を静止画撮影した場合に画角端部の焦点が合わないことも想定される。

このため、図 47 の角度からの静止画撮影において、焦点ズレしている画角端部に焦点を合わせるため、F 値設定を変更した静止画撮影を行った。

検証①-a において F4.0 で撮影した際の図 47 中、②画面端部の拡大静止画を図 49 に示す。図 48 では画角中心部の損傷部には焦点が合っていたが、同画角内端部においては焦点が合っていないことが分かる。



図 49 画面端部の焦点がずれている (F4.0)

次に同じ位置から F 値を 8.0 に設定し撮影した静止画を図 50 及び図 51 に示す。図 50 は図 48 と同じ画角中心部の静止画であるが、F4.0 の撮影時と変わらず焦点が合っていることが分かる。また、図 51 は図 49 と同じ画角端部の静止画であるが、画角端部の消火配管フランジ接続部に焦点が合うことが確認できた。

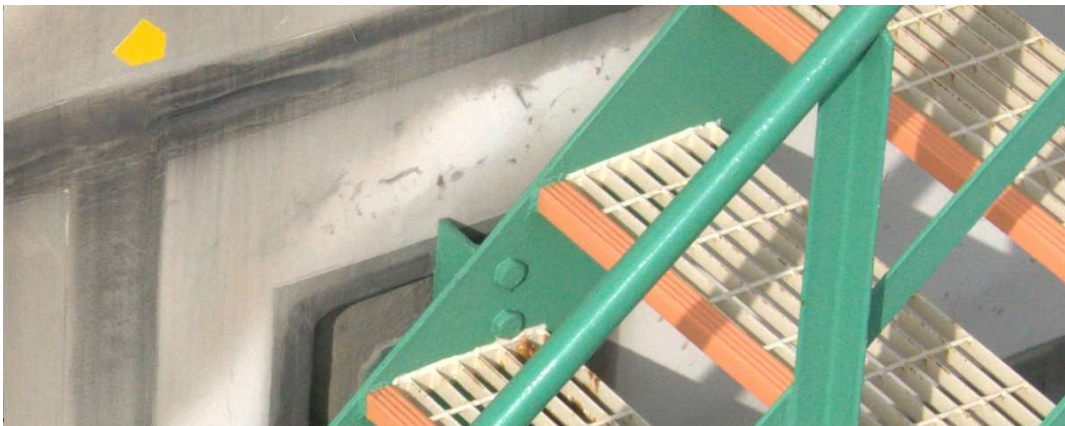


図 50 画面中心部 (F8.0)



図 51 画面端部 (焦点ずれ位置) 絞り値 F8.0

F 値設定と画角内位置に応じた静止画撮影結果を図 52 にまとめた。

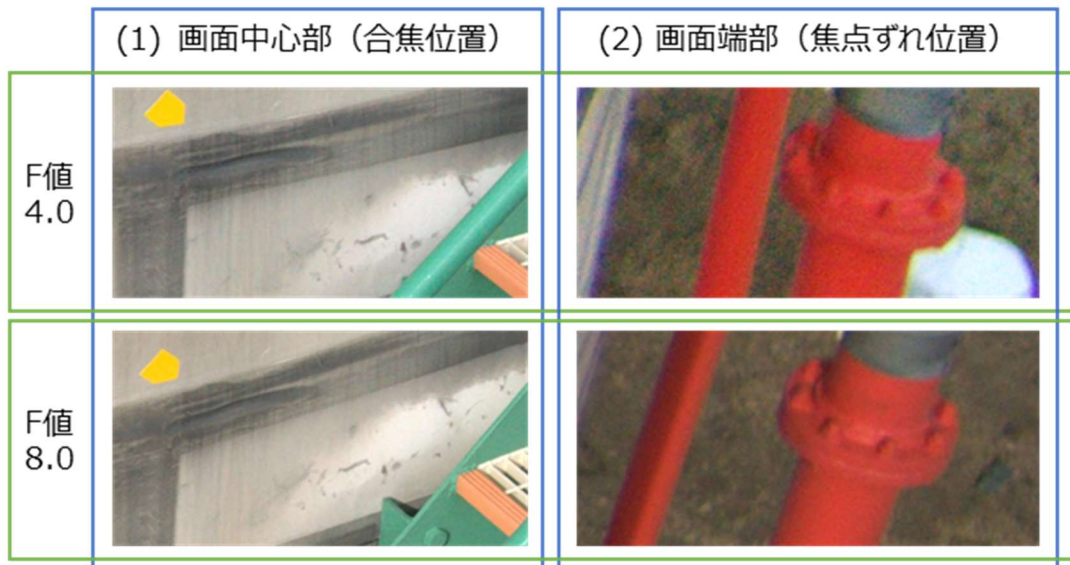


図 52 F 値設定と画角内の位置関係に応じた撮影結果

なお、本検証では F3.5～11.0 までの検証を実施した。検証においては F8.0 にて撮影することにより画角端部に焦点を合わせることができた。

また、図 47 のように腐食・損傷部の手前に附属物等が存する角度であっても、F 値を大きめに設定して撮影を行うことにより、附属物後方の腐食・損傷部に焦点を合わせることが可能となる。ただし、この場合には附属物により死角が生じることについては注意しなければならない。

参考として F 値設定の考え方を図 53 に示す。

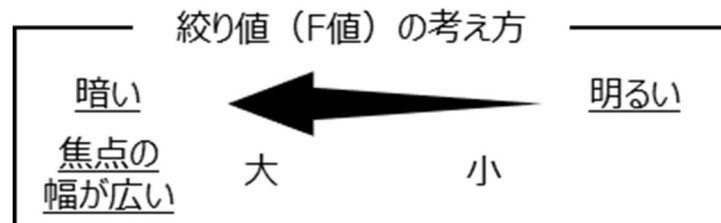


図 53 F 値設定の考え方

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①又は②、若しくは①及び②の併用による対処方法をとることにより解決することができる。
 - ① 腐食・損傷部手前に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。
 - ② F 値の設定を大きくして撮影する。
- ・F 値の変更は、画像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に応じて、撮影角度や F 値設定の変更の可否を判断する必要がある。

(4) 検証方法②の結果及び考察

ア 検証結果

ドローンによる外観静止画の撮影では、効率的に撮影を行うために移動しながら撮影を行うことが

想定される。また、操縦による移動の有無に関わらず、突風等の影響による意図しない機体の移動も考えられる。ドローンが移動しながら静止画撮影を行った場合は、取得した静止画にブレが生じるおそれがあることから、撮影ブレの解消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。

シャッタースピード設定の考え方を図 54 に示す。

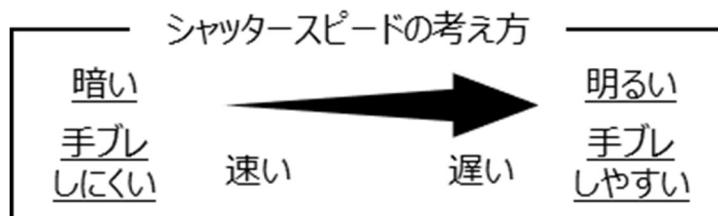


図 54 シャッタースピード設定の考え方

検証では、ドローンを移動させながら図 55 に示すタンク廻り階段の構成部材を撮影した。

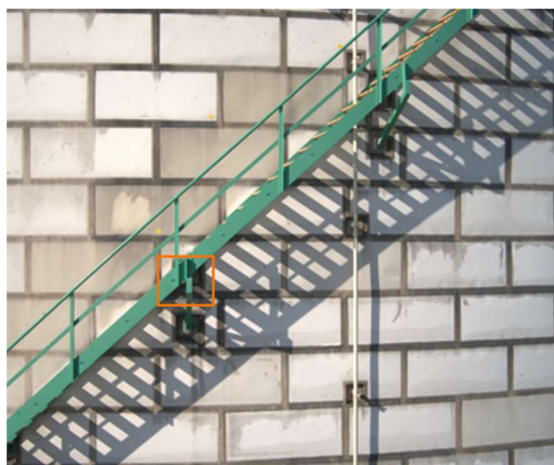


図 55 撮影位置図

ドローンを秒速 1.0m の速度で水平移動させながら、シャッタースピードを 1/100 秒に設定して撮影し、等倍まで拡大した静止画を図 57 に示す。拡大しないと分からない程度ではあるが、若干のブレが生じていることが確認できた。

次にシャッタースピードを 1/200 秒に設定して撮影し、等倍まで拡大した静止画を図 57 に示す。図 56 で生じていたブレは解消され、部材の輪郭がよりはっきりと写ることが確認できた。



図 56 シャッター速度 1/100 (ドローン水平移動速度 1.0m/s)



図 57 シャッター速度 1/200 (ドローン水平移動速度 1.0m/s)

イ 考察

- ・今回実施した検証条件では、シャッター速度を 1/200 秒に設定することでブレのない静止画が撮影できたが、よりドローンの移動速度を上げた状態で撮影する場合は、さらにシャッター速度を上げる必要がある。
- ・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、撮影画像にブレが生じやすい。このため、シャッター速度を通常の手持ち撮影よりも早めに設定しておくことが望ましい。
- ・F 値と同様、シャッター速度の設定を変更することによっても画像全体の明暗に影響を与えることとなる。特に日陰など照度の低い箇所の撮影の際、シャッター速度の設定変更又は F 値設定の変更若しくは両方の設定変更を併用する場合は、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。F 値及びシャッター速度の関係について **エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。

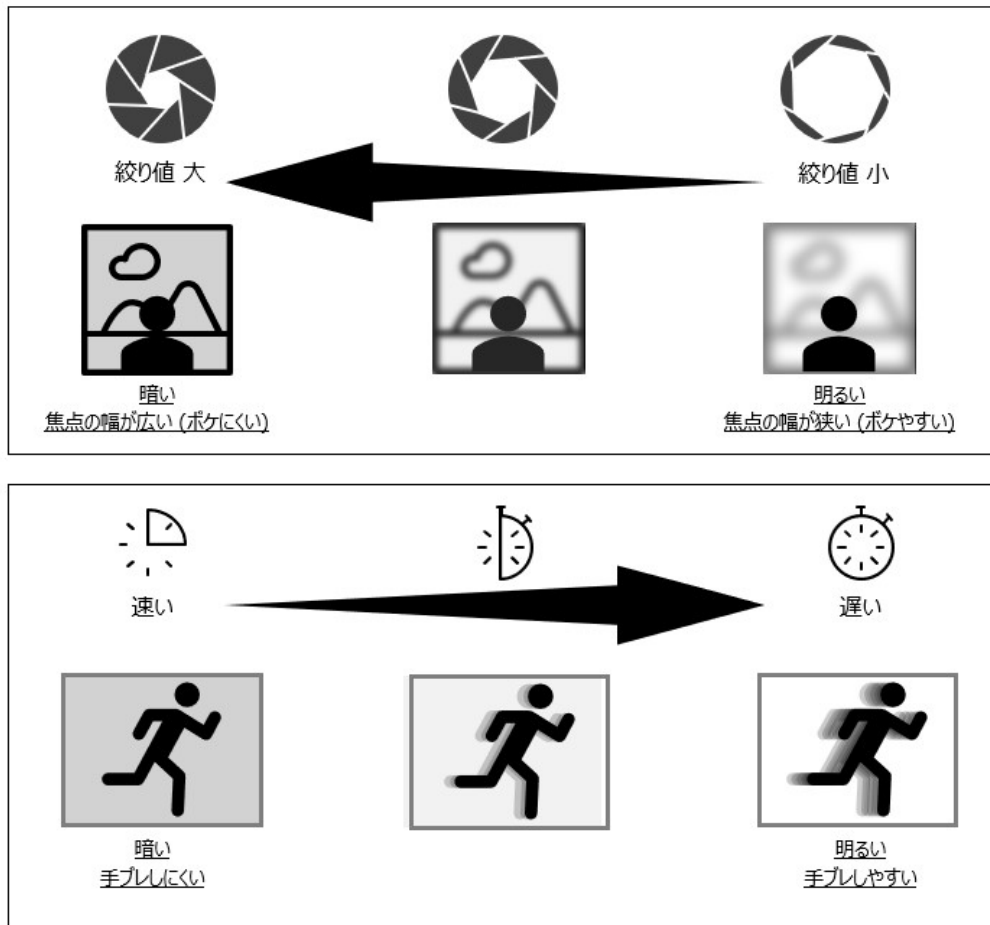


図 58 絞り値とシャッタースピードの関係

3.2.7 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

(1) 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、撮影画像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
- ・構内ネットワークやディスプレイ性能等を確認

(2) 検証方法

飛行中のドローンによる静止画撮影状況から、以下の項目について検証を行った。併せてそれぞれの方法におけるスクリーニング負荷、静止画確認作業の負荷について検証を行った。

- ① マニュアル飛行及び自律飛行を行い、腐食/損傷部の確認に用いる静止画取得に必要な時間などを確認する。なお、マニュアル飛行及び自律飛行における撮影方法は以下のとおりとした。
 - a マニュアル飛行：飛行中の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※についてのみ静止画を撮影する。

※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。

- b 自律飛行：自律飛行中に一定間隔で機械的に静止画を撮影する。
- ② 検証で使用する通信環境、ディスプレイが点検の支障とならないかを確認する。
 - a 通信環境によるドローンの飛行安定性に問題は生じないか。
 - b 通信環境、ディスプレイの性能上の問題により、リアルタイム動画の確認に問題は生じないか。

(3) 検証方法①の結果及び考察

ア 検証結果

(ア) 検証①- a

一箇所の腐食・損傷部に対し、平均 7 枚程度の撮影を行い、撮影に要した時間は 2～3 分程度であった。(ドローン操縦者 1 名、ディスプレイ確認者 1 名の計 2 名対応)

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。(確認者 1 名の対応)

※ 検証①- a では、予め協力事業者が調査した腐食・損傷部の静止画撮影を行っている。本検証で想定しているマニュアル操縦による静止画撮影は、ドローンからディスプレイへ伝送されるリアルタイム動画により腐食・損傷の有無を確認し、検出された腐食・損傷部の詳細静止画を撮影することであったため、リアルタイム動画による確認時間が含まれていないことに注意を要する。

(イ) 検証①- b

直径 82m のタンクの外周約 4 分の 1 (約 65m) に対し、自律飛行を行い、4 秒に 1 枚の間隔で計 41 枚の撮影を行った。撮影に要した時間は約 4 分であった。(ドローン監視者 1 名、ディスプレイ確認者 1 名の計 2 名対応)

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。(確認者 1 名の対応)

イ 考察

- ・マニュアル飛行による撮影では、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。また、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。一方、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こと、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の発生や操縦面においては非効率であることなどがデメリットとして挙げられる。このためマニュアル飛行による撮影は、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方法であるといえる。
- ・自律飛行による撮影では、飛行ルート設定を一度行えば自動で飛行を行える。繰り返しで同ルートの飛行を行うことも可能であり、タンク全体の網羅的な撮影を行うことができる。一方で、マニュアル飛行のような柔軟な撮影が難しいこと、GPS 受信が困難な環境では適用できないことがデメリットとして挙げられる。このため、自律飛行による撮影は、比較的周囲の開けた大型のタンクにおいて、腐食・損傷の有無を点検し、詳細な点検を実施すべき箇所を把握するなどといった目的の撮

影をする場合に適した飛行方法であるといえる。

- ・上記より、マニュアル/自律各飛行方法で適した目的が異なることから、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・損傷の発見及び詳細状況の確認を行うことが望ましい。

(4) 検証結果②の結果及び考察

ア 検証結果

本検証で使用した回線の周波数帯、ディスプレイは以下のとおりである。

- ・ 機体-送信機間（操縦系統）：920MHz
- ・ 映像伝送、データ伝送：2.4GHz
- ・ ディスプレイ解像度：1920×1080（フルハイビジョン相当）

操縦系統に関しては、上記通信環境に起因するドローン飛行に支障をきたす問題は発生しなかった。一方で映像伝送に関しては、リアルタイム動画において、多少のコマ落ちが確認された。

また、本検証では約 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た。ドローンからも約 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。

イ 考察

- ・ 操縦系統とフライトディスプレイ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、それぞれの系統において複数の周波数帯を選択することのできる機体を選定することが望ましい。
- ・ 電波の受信機と送信機が離れるにつれて伝送が不安定になる可能性があるため、複数のタンク点検を行う場合など離れた距離で飛行を行う際は無線中継器の活用を検討し、安定した通信状況の確保が必要である。
- ・ 地上のディスプレイ等で確認できる動画の状態は、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といったパラメータによって決まるため、点検時に要求するリアルタイム動画の質に応じた適切な機体や機器を選択し、適切な設定をする必要がある

3.2.8 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

(1) 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

(2) 検証方法

地上ディスプレイに投影されるドローンからのリアルタイムの動画を確認しながら腐食/損傷の有無を確認し、腐食・損傷が確認された場合は、当該箇所の詳細な静止画を撮影することにより、静止画撮影枚数を抑えた効率的な点検が可能となるかを検証する。

※ 本実証実験では、本検証項目全般について検証ができていない。このため、第 2 回実証実験にて検証を行うこととする。

なお、本実証実験でのディスプレイ確認時、太陽光の反射により画面が視認しづらい場合があることは分かった。(図 59)



図 59 地上ディスプレイに太陽光が反射している様子

3.2.9 ドローンの安全な飛行方法の検証

(1) 評価ポイント

- ・衝突回避機能、非常時の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

(2) 検証方法

衝突回避機能、自動帰還機能を搭載した機体を採用し、当該機体の使用を前提とした飛行計画の作成、飛行計画に基づく飛行を行った。また、衝突回避機能については、意図的にドローンをタンクに接近させ、当該機能が働くかの検証を行った。

(3) 検証結果及び考察

ア 検証結果

衝突回避機能の作動検証においては、設定されたタンク-ドローン間距離（5 m）未満にドローンを移動させる操作を行っても、操作が無効化され、衝突を回避することが確認できた。回避動作時の静止画を図 60 に、回避動作時のディスプレイ上での表示を図 61 に示す。



図 60 衝突回避機能が働き衝突回避した様子



図 61 衝突回避機能作動時の飛行管理ソフトウェア上での表示

また、自動帰還機能についてはドローンメーカーのカatalog確認及び説明聴取により、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に機能が作動し、離着陸場に自動帰還する機能を備えていることを確認した。自動帰還機能作動時のディスプレイ画面表示例を図 62 に示す。



図 62 自動帰還機能作動時の飛行管理ソフトウェア上での表示例

上記安全機能の確認を行ったうえで、飛行・撮影を実施したが、予定されていた撮影内容の実施、安全に関する重大な懸念事項は生じなかった。

イ 考察

- ・操作ミスや突風等による不意な機体変位に備え、衝突回避機能や自動帰還機能を搭載したドローンを活用することで衝突・墜落事故のリスクを低減することが可能である。
- ・万が一の衝突に備えて、プロペラガードを備えた機体を選定することが望ましい。
- ・「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、点検するタンク周囲の状況に応じた安全対策の検討、飛行計画の策定が必要となる。

第4章 本実証実験のまとめ及び第2回実証実験に向けた課題

4.1 まとめ

本実証実験では、5つの検証項目を設定し、検証項目毎に検証内容、評価ポイントを定めて実験を実施し、考察を行ってきた。ここでは、5つの検証項目毎の総括的なまとめを記す。

(1) 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の点検が有効であるかの評価

通常の直接目視による点検では点検員が確認しにくい高所や死角が生じるようなタンク付属物の影やウインドガード付近の腐食・損傷部についてもドローンを水平・垂直方向に移動させ、正面や斜めから撮影することで腐食・損傷の有無を確認するのに十分有効であることがわかった。

(2) 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の評価

本実証実験ではマニュアル飛行で4.6mまでタンクに接近したが、操縦系のシステム及びドローン飛行に問題は生じず、概ね安定した飛行が可能であることが確認できた。しかし、タンク接近時に機体が風に煽られ旋回する動作も発生したことから、非接近飛行の際と同等以上に気象状況や対流、突風等による影響を検討し安全な飛行ルートを設定するとともに、衝突回避機能や自動帰還機能等の安全機能を備えたドローンや十分な知識・技量を有するオペレーターの選定が必要である。

また、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たが、各々のメリット・デメリットを理解し、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の効率性が発揮できることが示唆された。

(3) ドローンで撮影した写真・映像を利用した点検記録の作成方法の評価

オルソ化技術を用いてタンク外観をパノラマ的に再現する図の作成及び腐食・損傷部の状態の情報や詳細な静止画の紐づけによる手法が点検員の属人化を防ぐ、ドローンの撮影データの効率的な記録・管理方法となりえることが示唆された。一方でオルソ画像を効率的に生成するためには、静止画の位置が把握できるようにタンクの付属物等を静止画内に写り込ませる必要があり、それらを考慮して飛行の計画を立てる必要がある。

(4) 腐食・損傷の撮影に必要なカメラの性能や撮影条件の検証

同一の腐食・損傷に対し複数の画素分解能の画像を比較し、腐食・損傷の有無や状態（大きさや膨らみ）を確認するのに必要な概ねの画素分解能が示された。

また、ドローンによって目視と同等以上の静止画を撮影するにあたり、絞り値やシャッタースピード等のカメラのパラメータを適当に設定することで、正面だけでなく角度のある位置からの撮影やタンク付属物の映り込みによるピントボケの抑制やドローンが移動しながらの撮影が可能になることが示唆された。

(5) 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

「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」を基本とした安全対策を行うことで、屋外貯蔵タンク近接での飛行においてもリスクの低い飛行が可能となることが確認できた。

4.2 本実証実験の残課題

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にて腐食・損傷の有無が判別できるか否かについては、本実証実験での検証ができていない状態である。リアルタイム動画で腐食・損傷の判別が可能であれば、腐食・損傷部の詳細な静止画像のみを効率的に取得することができることから、本項目については第2回実証実験で検証を行う。

4.3 第1回実証実験から見えた課題

(1) 適切な撮影距離の決定方法

本実証実験では、使用する撮影機材と設定条件が同一ならば、撮影対象（タンク）に近づくほど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）、使用するカメラなど、鮮明な静止画を得るために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。このことから、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に関する検証を行う。

(2) 保有空地やタンク間距離が狭いタンクでの飛行

本実証実験では、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た。一方、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、タンク間距離が狭いケースにおいて安全な飛行及び点検を行うための方策等を検証する必要がある。このため、第2回実証実験では、第1回実証実験で選定したタンクよりもタンク周囲の空地幅が狭いタンクでの飛行について検証を行う。

4.3 その他

(1) 撮影画像の分析にかかる工数

第1回実証実験においては、ドローンの自律飛行を行い、タンク側板について数百枚の高解像度静止画を撮影し、静止画一枚当たりの分析にかかる工数を確認した。静止画一枚を確認する時間は多くないが、数百枚におよぶ静止画の点検全体で考えた場合は、多くの工数が必要である。第2回実証実験においては、撮影された大量の静止画をAI（人工知能システム）によって解析し、錆や損傷の恐れがある場所の検出を目指し、ドローンにて大量の静止画を撮影した場合においても多くの工数をかけずに処理できる可能性について検証する。

(2) 撮影結果の可視化

第1回実証実験においては、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管理できる点が実証された。第2回実証実験においてはタンク全体を撮影し、三次元モデルを構築し、オルソ画像による管理と同様に腐食・損傷箇所をマッピングし、より直感

的に腐食・損傷箇所管理を行い、修繕計画の立案や修繕作業に活かすことのできるかどうかについて
検証を行う。