

風力発電等技術研究開発/  
風力発電高度実用化研究開発/  
風車運用・維持管理技術高度化研究開発(無人航空機  
(UAV)とAI画像解析の活用による風車の高度な次世代型  
運用・維持管理技術開発)

嶋田 隆一

関西電力(株) 土木建築室 保全技術グループ

2023年2月3日

問い合わせ先  
関西電力(株) 土木建築室  
保全技術グループ 高木 雄介  
E-mail: [takagi.yuusuke@e4.kepco.co.jp](mailto:takagi.yuusuke@e4.kepco.co.jp)  
TEL:070-2447-4812

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2020年10月

終了 : 2023年 3月

## 2. 最終目標

洋上風力発電における、落雷、台風等による緊急発電停止（保安停止）後の臨時点検、および定期点検での外観点検に対し、UAVおよびAIを用いた画像解析を導入することで迅速化・効率化を図り、運用・維持管理費削減、発電電力量増加を実現する

## 3. 成果・進捗概要

### ① 風車設備点検技術の構築

- 風車の外観を自律飛行により点検するUAVと、撮影画像からAIにより損傷箇所を自動判定するシステムを開発した
- 実風車を対象とした実証試験により、自律飛行、AI開発のソフトウェア開発に必要なデータを取得するとともに、AIモデルによる損傷箇所自動判定技術の有効性について確認した

### ② 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

- 過酷環境下となる洋上風力での飛行にあたって、UAVが十分な連続飛行時間と通信距離、また耐風性、耐寒性、耐雪性を有することを実証試験にて確認した

# 目次

1. 背景および取り組み概要
2. 風車設備点検技術の構築
  - a. 自律飛行技術の開発
  - b. 点検に必要なとなる画像品質
  - c. AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発
3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築
  - a. 連続飛行時間
  - b. 通信距離
  - c. 耐風性
  - d. 耐寒性
  - e. 耐雪性
4. 本事業まとめと展望

# 目次

## 1. 背景および取り組み概要

### 2. 風車設備点検技術の構築

- a. 自律飛行技術の開発
- b. 点検に必要なとなる画像品質
- c. AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発

### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

- a. 連続飛行時間
- b. 通信距離
- c. 耐風性
- d. 耐寒性
- e. 耐雪性

### 4. 本事業まとめと展望

# 1. 背景および取り組み概要 (1/4)

## ●背景

- 洋上風力はゼロカーボン化の主力電源の1つと目され、政府は、**2030年には1,000万kW、2040年には3,000万～4,500万kWと意欲的な導入目標**を発表
- **ライフサイクルコストの3割以上を保守・運転費が占める**とされているが、洋上風力先進地の欧州と異なり、**落雷・台風への対応など日本特有の気候に適合するメンテナンス技術は十分に開発されていない**
- **ゼロカーボンの確実な実現には**、発電所建設技術のみならず、発電電力量の最大化とメンテナンスコストの最小化の観点から、**日本に適合するメンテナンス技術の確立が必須**

## ●目的

- 本技術開発では、**UAV・AIを用いた外観点検技術**を確立することで、**落雷等に伴う保安停止期間（ダウンタイム）とメンテナンスコストを削減し、発電電力量増加・単価低減を目指す**



落雷による緊急停止のイメージ

(左:風車への落雷状況※1、右:船舶で点検等に向かう様子※2)

※1 : 電力中央研究所 <https://criepi.denken.or.jp/koko/light/index.html>

※2 : German Wind Energy Association (BWE) ,2010

UAVによる臨時点検のイメージ

※3 : DRONENEWS [https://drone-school-navi.com/dronenews\\_column/news/wa2018102421/](https://drone-school-navi.com/dronenews_column/news/wa2018102421/)

# 1. 背景および取り組み概要 (2/4)

## ● 国内における落雷発生状況

- 洋上風力の適地では、日本海側を中心に落雷が多発しており、風車への実被害も生じている
- 洋上風力を導入していく上では、確実な被雷対策とともに、落雷時のダウンタイム低減が大きな課題となっている

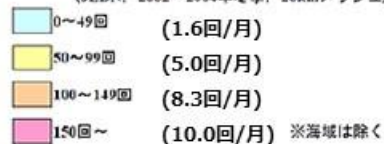
### ○ 落雷回数 <冬季/11月-3月>

落雷回数  
7.8回~/シーズン

落雷回数  
3.9~6.5回~/シーズン

落雷回数  
1.6回~/シーズン

冬季落雷頻度マップ(ピーク電流値50kA以上)  
(JLDN, 2002~2004年冬季, 20kmメッシュ)



円の大きさは風車基数の総数を示す

- 風車1~10基
- 風車11~30基
- 風車31基~

風車の被害分布(落雷アンケート結果より)

- ① ● : ブレード等への基大な被害が発生した風車の割合が10%以上かつ被害が軽微な風車の台数が20%以上
- ② ● : ブレード等への基大な被害が発生した風車台数の割合が10%以上
- ③ ● : 被害が軽微な風車台数の割合が20%以上
- ④ ○ : ①~③以外(被害を受けた風車が少ない)

### ○ 雷対策重点地域



出典:

日本型風力発電ガイドライン 落雷対策編 (NEDO)

# 1. 背景および取り組み概要 (3/4)

## ● 本技術開発による効果

### 現在の外観点検における課題

アクセス船による風車への接近およびロープワーク等による風車ブレード点検



左：German Wind Energy Association (BWE)  
右：JWPA風車発電メンテナンス基礎研修（北拓）

### 本技術開発により期待される効果

陸上からの長距離飛行UAVを用いた風車ブレード点検



DRONENEWS [https://drone-school-navi.com/dronenews\\_column/news/wa2018102421/](https://drone-school-navi.com/dronenews_column/news/wa2018102421/)



- アクセス船による風車への接近が、海象状況によっては出来ない場合がある
- 今後の洋上風力導入拡大に対応したロープワーカーの確保が必須であり、またロープワークは、作業時の落下による労災リスクがある
- 一般的にロープワークは長時間の作業となるため、風車ダウンタイムが長い
- 一般的に外観点検は目視により行われるが、点検者の技量に依存するところが大きく、抜け漏れが発生する可能性がある

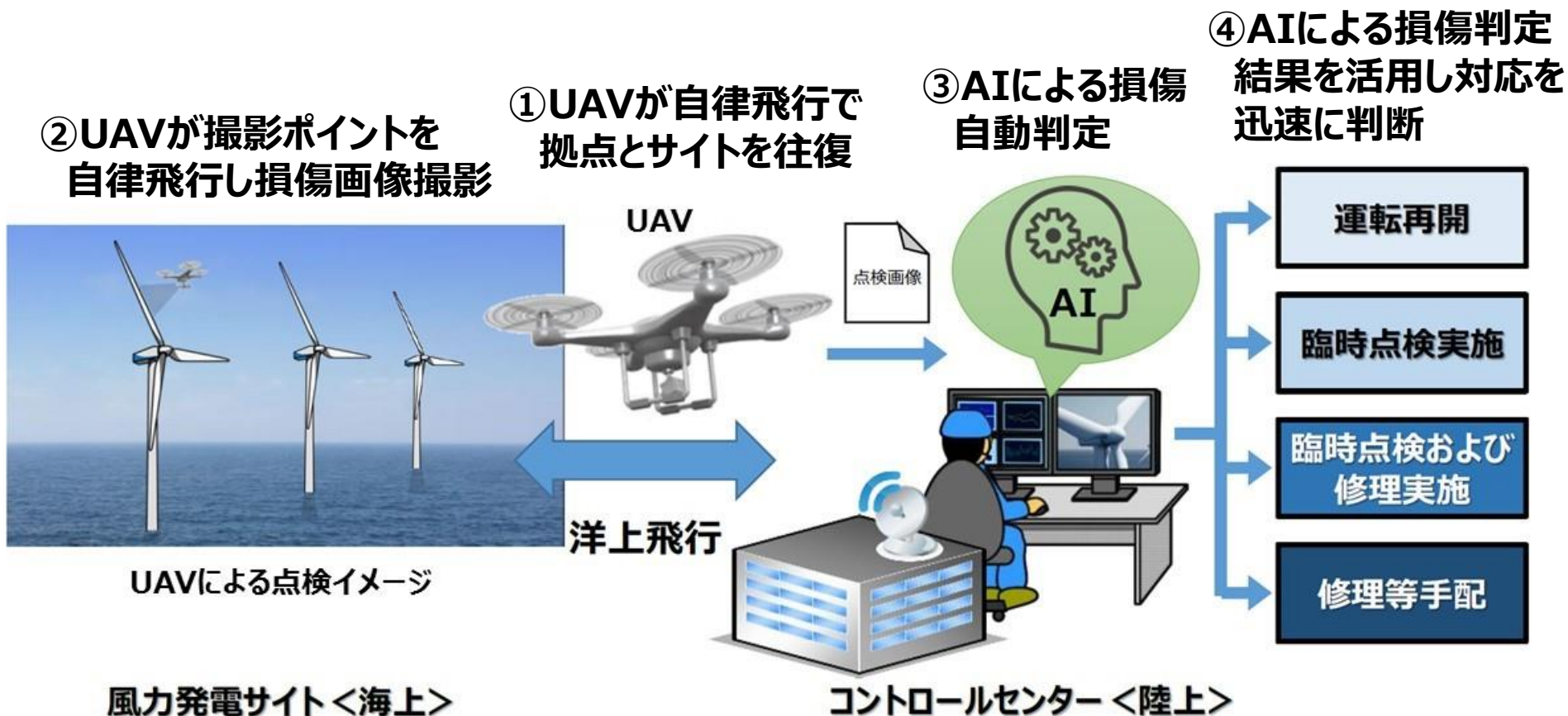
- 長距離飛行UAVは陸上から風車まで直接飛行が可能のため、海象状況に依存することなく点検が可能
- ロープワーカーを確保する必要がなく、またロープワーク中の落下による労災リスクを回避できる
- UAVを活用することで迅速な点検が可能となり、風車ダウンタイムの低減が見込める
- 高画質カメラによりブレード全体を撮影することで、ブレード表面の劣化・損傷状況を網羅的かつ客観的に評価できる



# 1. 背景および取り組み概要 (4/4)

## ● 本技術開発が目指す運用・維持管理技術の概要

UAVおよびAI画像解析技術の概要を示す



風車の次世代型運用・維持管理技術のイメージ



# 目次

## 1. 背景および取り組み概要

## 2. 風車設備点検技術の構築

### a. 自律飛行技術の開発

### b. 点検に必要なとなる画像品質

### c. AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発

## 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

### a. 連続飛行時間

### b. 通信距離

### c. 耐風性

### d. 耐寒性

### e. 耐雪性

## 4. 本事業まとめと展望

## 2. 風車設備点検技術の構築 a.自律飛行技術の開発 (1/4)

### ●実施内容

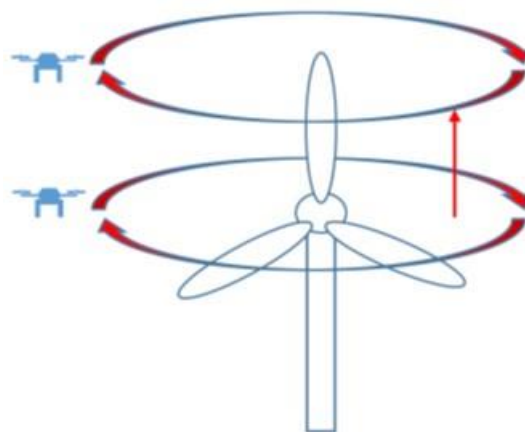
**UAVの自律飛行技術を確認する**ことを目的として、  
陸上・洋上風車を対象とした以下の実証試験を実施した

No.	確認項目	実証試験	結果
I.	・UAV飛行機能	最大で2km離れた地点から洋上風車へのUAV安定的自律飛行	<b>達成</b>
II.	・UAV飛行機能 ・風車全体の画像取得	UAV自律飛行による風車画像の取得	<b>達成</b>
III.	・UAV飛行機能 ・ブレード沿いの画像取得	ブレードに沿ったUAV自律飛行と風車画像の取得	(着床式について) <b>達成</b>

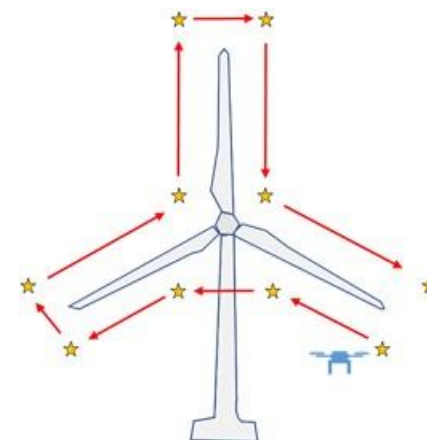
検証 I



検証 II



検証 III

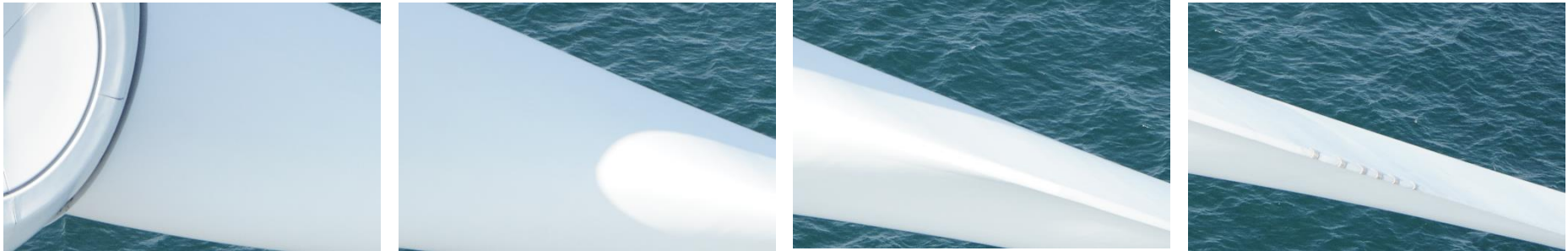
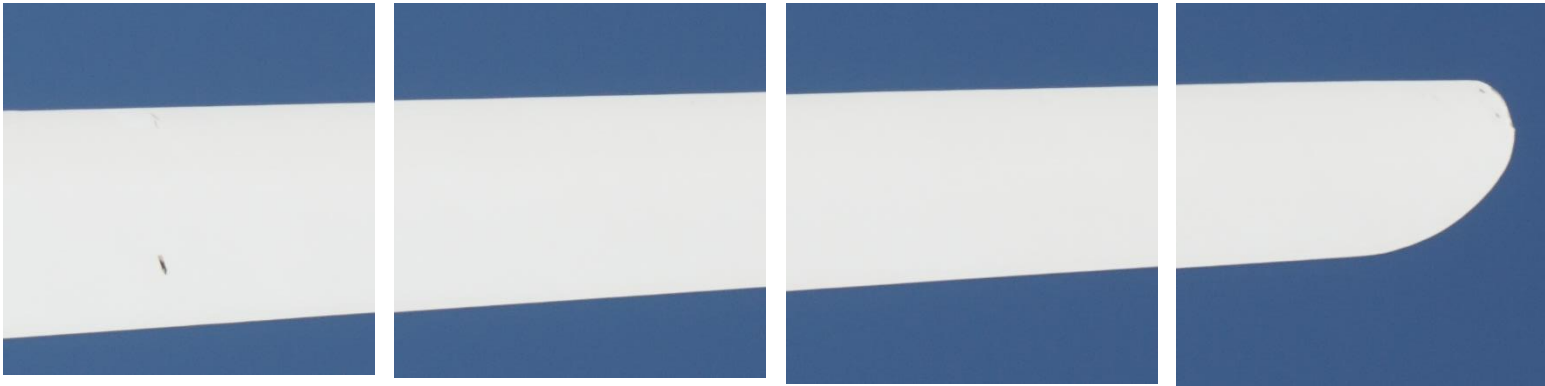


## 2. 風車設備点検技術の構築 a.自律飛行技術の開発 (2/4)



実証試験状況 (別UAVで撮影)

## 2. 風車設備点検技術の構築 a.自律飛行技術の開発 (3/4)

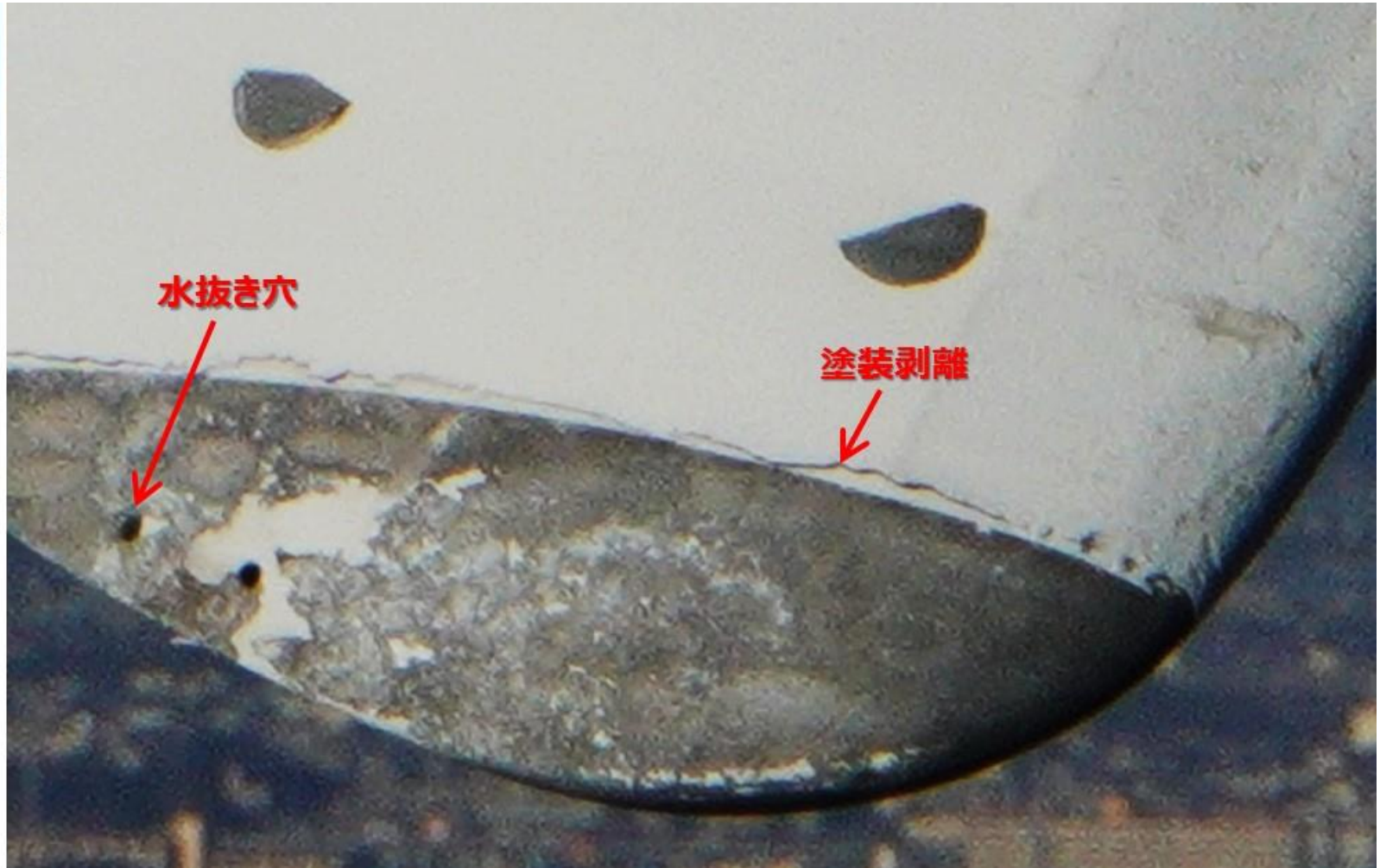


実証試験にて取得した画像

### ●結果 1

これまで複数の陸上・洋上風車にて実証試験を繰り返し実施し、  
UAVの自律飛行と風車の撮影画像の取得に成功している

## 2. 風車設備点検技術の構築 a.自律飛行技術の開発 (4/4)



### ●結果2

複数の風車メーカー・点検事業者へのヒアリングを踏まえ、  
**「撮影画像は、ロープワークと同等の損傷判定が可能であり点検技術として適用可能」**  
と評価した

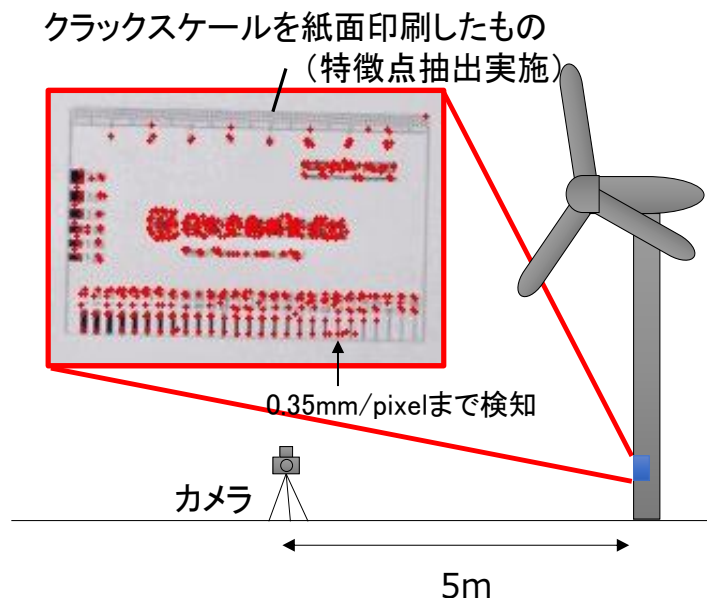


## 2. 風車設備点検技術の構築 b.点検に必要となる画像品質

撮影画像の品質に関しては、前述の実証試験のほか、クラックスケールを紙面印刷したものをを用いた基礎検討も実施した

### ●実施内容

- 風車タワーに設置したクラックスケールを紙面印刷したものを撮影距離や焦点距離等を変更しながら撮影する
- 撮影された画像のクラックスケールの目盛をクラックに見立てて特徴点抽出を行うことで、画素分解能の確認を行った

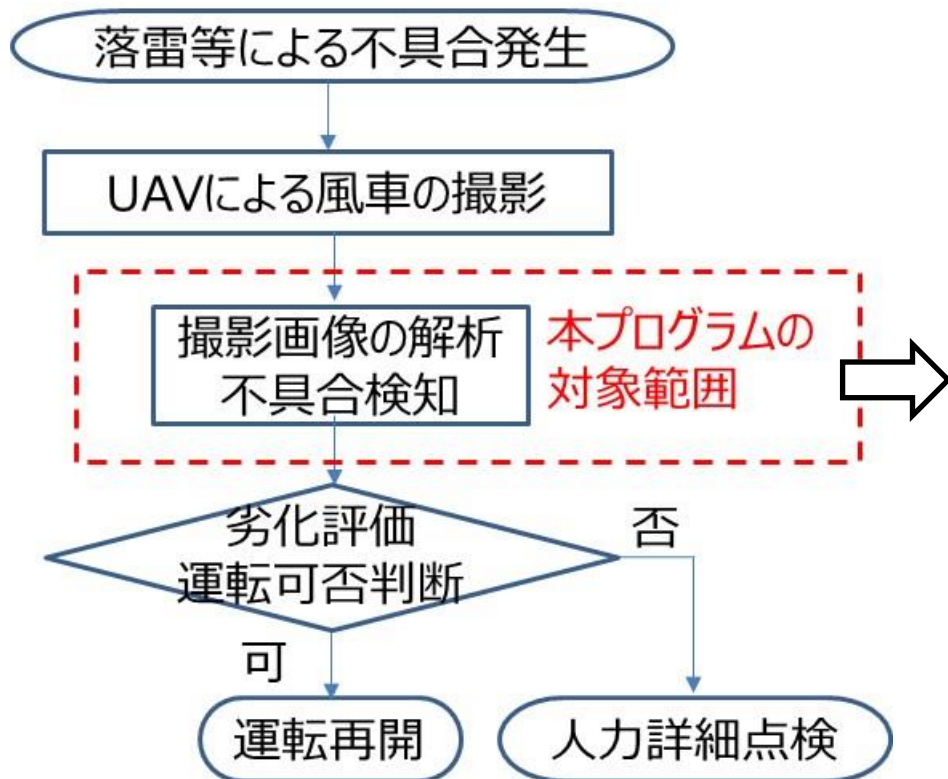


### ●結果

- 実測画素分解能は、撮影条件に基づく理論値と同程度(0.35mm/pixel)であることを確認した
- UAVでの撮影時も、撮影条件を適切に設定すれば、想定した微細な損傷を検知可能である

## 2. 風車設備点検技術の構築 c.AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発 (1/3)

落雷時等に緊急停止の際に、風車の安全確認（運転可否判断）を行う人的コストの低減  
および判定時間の短縮を図ることを目的として、UAVから撮影した一連の撮影画像に対して  
AI等を用いて損傷箇所を自動判定するプログラムを開発した



AI導入により想定される点検業務フロー

### ●開発内容

AI導入に伴う点検業務フローを想定し、以下の2項目について検討を実施した

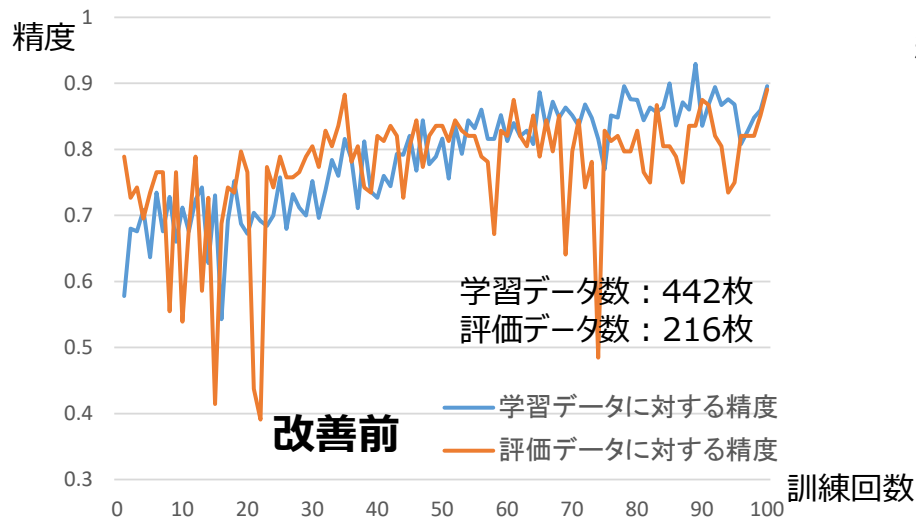
- UAVから撮影した撮影画像のうち、それぞれの画像内の不具合有無を自動判定できる2クラス分類モデルの開発
- 上記モデルで不具合有と判定された画像内で、損傷箇所を明示できる手法の有効性の検討



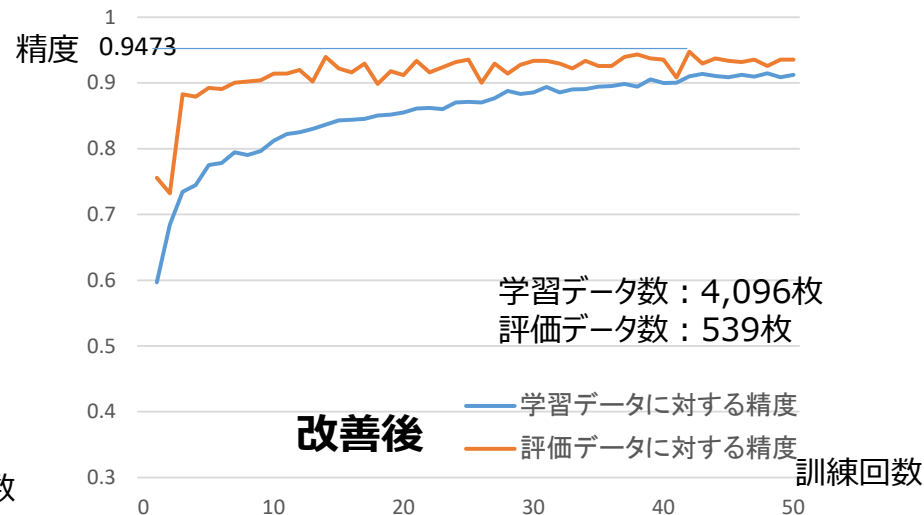
## 2. 風車設備点検技術の構築 c.AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発 (2/3)

### ●不具合有無を自動判定できる2クラス分類モデルの開発

- ディープラーニングのうち、畳み込みニューラルネットワークを用いた2クラス分類モデルにより、**入力画像を「不具合有」と「不具合無」の2つに大別するAIを構築した**
- 当初UAVから撮影した点検画像のみを基にモデルを構築したが、その後精度向上のため、**地上から撮影した風車画像を学習データとしてデータ拡充した**
- また、学習データ、評価データを追加する際に**モデルに畳み込み層を追加し**表現力を高めた



⇒精度の振れ幅が大きく、安定しなかった



⇒精度が向上し安定した

### ●結果

データを拡充・追加し、モデルに畳み込み層を追加することで、**精度向上プロセスが安定し、評価データに対して最高値94.73%の判定精度を持つモデルを作成することができた**

また、テストデータに対して検知漏れとなった画像でも、隣接する画像では損傷有と判定できることを確認し、**モデルの誤判定が原因で検知できていない損傷は実質ないと判断できた**

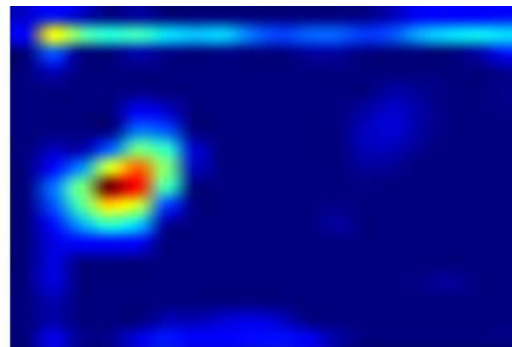
## 2. 風車設備点検技術の構築 c.AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発 (3/3)

### ●不具合有と判定された画像内で損傷箇所を明示できる手法の有効性の検討

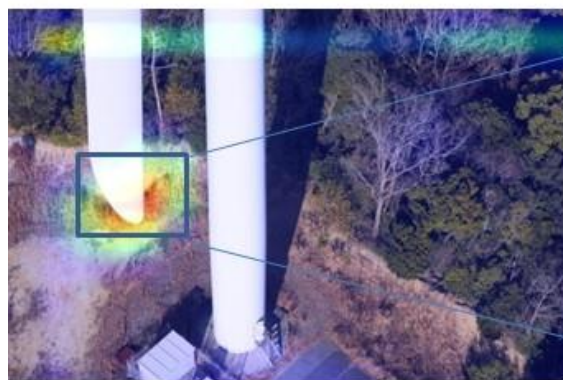
- 2クラス分類モデルによる不具合有無の判定に加えて、画像内で損傷箇所を明示することで点検時間の更なる短縮を図ることを目指し、Grad-CAMのクラス活性化ヒートマップと呼ばれる手法を適用した



入力：撮影画像



出力：画像に対する不具合有クラスのヒートマップ  
赤が損傷箇所



入力と出力の重ね合わせ結果



チップレセプタ塗装剥離

### ●結果

一定の条件下（学習データが十分あるケース）で、損傷箇所明示が可能であることを確認した

# 目次

## 1. 背景および取り組み概要

## 2. 風車設備点検技術の構築

a. 自律飛行技術の開発

b. 点検に必要なとなる画像品質

c. AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発

## 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

a. 連続飛行時間

b. 通信距離

c. 耐風性

d. 耐寒性

e. 耐雪性

## 4. 本事業まとめと展望

# 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

## ● UAVの飛行品質

- UAVは、使用用途を踏まえて必要となる下表の飛行品質を確保している
- 過酷環境下での飛行が想定されることから、連続飛行時間、通信距離、耐風性、耐寒性、耐雪性に関して、各ページに示す実証試験にて性能を確認した

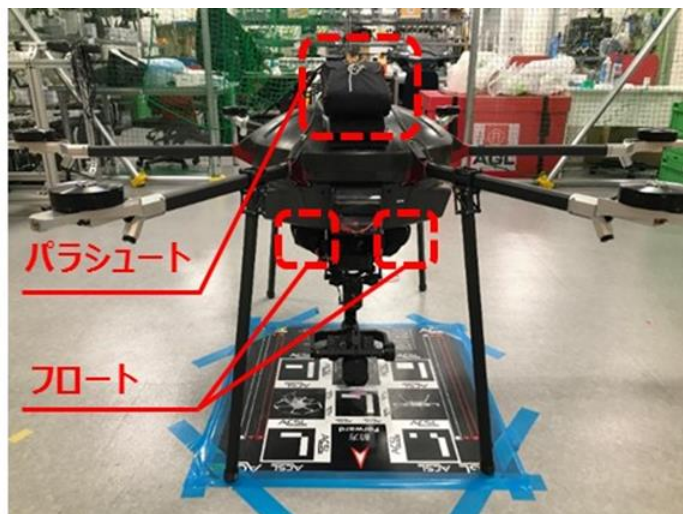
飛行品質

制御方式	オート／マニュアル
連続飛行時間 (⇒P21)	1時間以上飛行可能
通信距離 (⇒P22)	25.5kmで通信強度問題なし
耐風性 (⇒P23,24)	対気速度16.5m/sで飛行可
耐寒性 (⇒P21)	0.3℃～2.0℃程度で問題なし
耐雪性 (⇒P25)	降雨量換算1.0mm/hの降雪で飛行可
耐雨性	IPX2相当の設計
安全機能	FPV、衝突回避、パラシュート、フオート、燃料流出防止等



### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

#### ● UAVの仕様



項目	仕様
直径 (mm)	1,660
全高 (mm)	850
乾燥重量 (kg)	21.0
最大ペイロード (kg)	10.0
プロペラ (枚)	6
発電機	混合ガソリンエンジン を使用

UAVは、万が一の墜落に備え、  
パラシュート、フロートを備え付けた

### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築 a. 連続飛行時間、d. 耐寒性

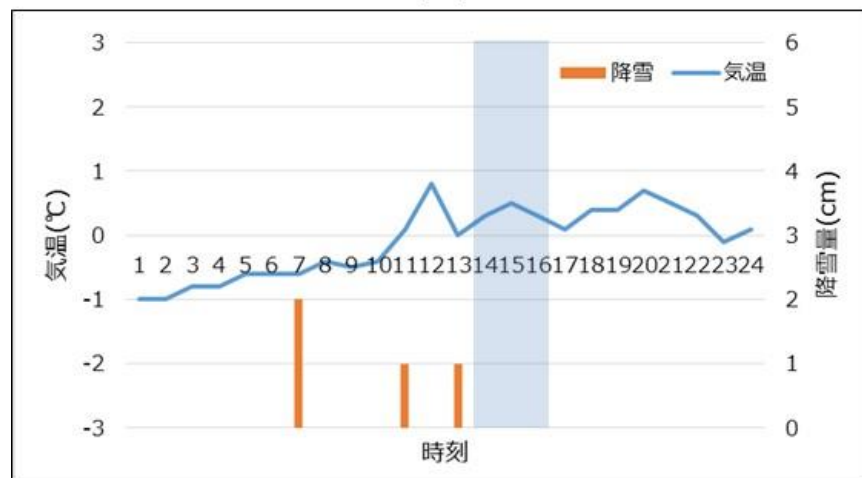
#### ●実施内容

UAVは、日本海側などの寒冷地での長時間飛行が想定されることから、実際に寒冷地での飛行試験を行い、連続飛行時間、耐寒性について確認した

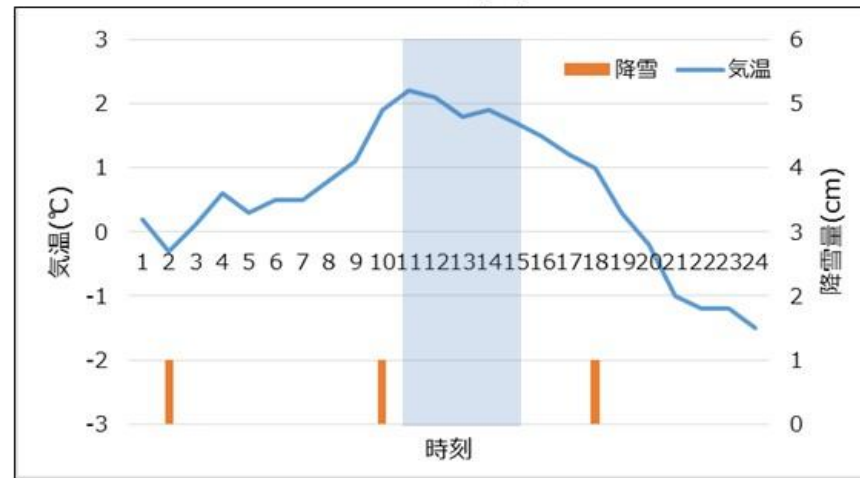


実施状況写真

2022/2/8



2022/2/9



■:主なドローン飛行時間

#### ●結果

- 70分の連続飛行を確認 ⇒ 1時間以上飛行可能
- 冬季に想定される0.3°C~2.0°C程度の低温環境下での飛行において問題が  
無いことを確認できた



### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築 b. 通信距離

#### ●実施内容

- 洋上風車までの自律飛行を想定し、通信距離に関する試験を行った
- UAVを送信地点（茅ヶ崎海岸ヘッドランド）でホバリングを行い、25.5km先の受信地点（小田原市さかなセンター）にて機体テレメトリ情報及び映像情報を受信できるか確認した



検証地点 水平距離：25.5kmを確保

#### ●結果

- 920MHz：機体テレメトリ情報、5.7GHz：映像情報をそれぞれ送受信可能であることを確認した
- なお、映像情報は、UAV飛行時に周囲の状況（船舶等）を視認できる性能を有している



### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築 c. 耐風性 (1/2)

#### ●実施内容

UAVは、暴風時は飛行しないため、平常時の気象を想定した耐風性に関する試験を行った  
試験は以下に示す風洞（気流発生装置）を用いた

具体的な実施内容は以下の3項目

- ・屋外試験により16.5m/sの対気速度での飛行を実施  
（風速4.5m/s、飛行速度12m/s、ペイロード2.8kg）
- ・定常風（8m/s）下における飛行性能を評価
- ・突風環境下における飛行性能を評価  
（UAVが定常風下（10m/s）を横切ることで突風を再現）



### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築 c. 耐風性 (2/2)

#### ●結果

実証試験の結果から、耐風性能について以下の通り評価した

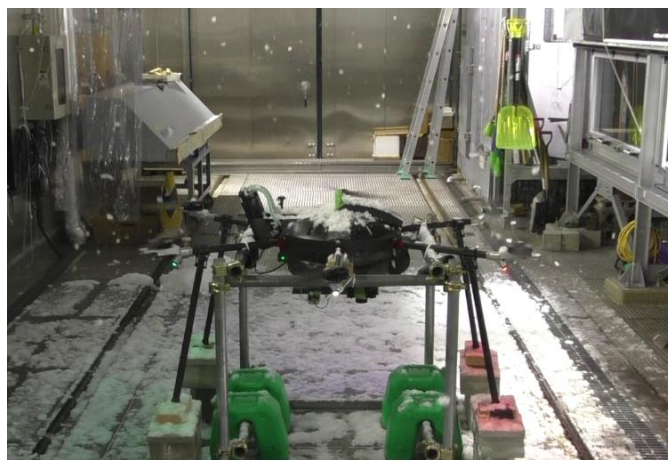
観点	必要性能	評価
<b>飛行時間</b> の制約	拠点（陸上）と風車間の移動において、 <b>迅速に移動</b> できること	屋外試験により、対気速度16.5m/s（飛行速度12m/s、気流風速4.5m/s）での飛行を確認した →実環境下においても、 <b>十分な移動能力を確保できる</b> と考えられる
<b>点検品質</b> の確保	<b>定常風</b> に対して、安定的な飛行を行い、点検用画像が取得可能であること	風速 8 m/sまでは点検画像を取得するための安定的な飛行が可能であった →実環境の定常風下においても、 <b>安定的な飛行を行い、点検用画像を取得できる</b> と考えられる
<b>安全性能</b> の確保	<b>突風</b> に対して、UAVの墜落、風車への追突などの事故事象を発生させないこと	風速10m/sの突風において、飛行安全性を確保可能であった →実環境の突風においても、 <b>安全性能を確保できる</b> と考えられる

### 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築 e. 耐雪性

#### ●実施内容

UAVは、日本海側などの降雪地域での飛行が想定されることから、室内実験室にて**降雪装置を用いた耐雪性に関する試験**を行った

- 機体は単管にて固定し、プロペラが回転しても上昇しないようにする
- 飛行中のプロペラを想定したローター回転数40,000rpmで5分間回転させる
- 降雨量換算1.0mm/hの降雪を行い、着雪状況、およびローター回転数への影響について確認を行った（降雪装置の制約から降雨量換算1.0mm/hとした）



室温：-15℃程度

#### ●結果

- 降雨量換算1.0mm/hの降雪、およびローター回転数40,000rpmの状態、降雪による着雪、影響はなかった
- また、ローター回転数MIN25,000rpmでも確認したが、影響はなかった
- **風車までの移動時に予報外の降雪に遭遇したとしても安全に飛行可能**と考えられる

# 目次

## 1. 背景および取り組み概要

## 2. 風車設備点検技術の構築

a. 自律飛行技術の開発

b. 点検に必要なとなる画像品質

c. AI等による損傷箇所自動判定プログラム開発

## 3. 過酷環境下でのUAV飛行技術構築

a. 連続飛行時間

b. 通信距離

c. 耐風性

d. 耐寒性

e. 耐雪性

## 4. 本事業まとめと展望

# 本事業まとめと展望

## ●まとめ

- 落雷等で緊急発電停止した、ブレード、タワー、ナセル等の**外観の目視による全体確認**、および**AIによる損傷自動検知**に対応できる画像取得を可能とする**自律飛行プログラムを搭載したUAVを開発した**
- UAVは過酷環境下での使用が想定されるが、**十分な連続飛行時間と通信距離、また耐風性、耐寒性、耐雪性を有すること**を実証試験にて確認した

## ●展望

- 洋上風力発電を導入拡大していく上で、**運用・維持管理費の削減、落雷等によるダウンタイム低減が重要課題である**
- **本技術を多くの事業者に利活用していただくことを目指し**、引き続きUAV飛行技術等の改良、改善に取り組んでまいりたい

(謝意)

本発表は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の課題設定型産業技術開発費助成金の助成を受け実施した、「風力発電等技術研究開発/風力発電高度実用化研究開発/風車運用・維持管理技術高度化研究開発（無人航空機（UAV）とAI画像解析の活用による風車の高度な次世代型運用・維持管理技術開発）」を紹介したものである。ここに謝意を表す。