

# Technical Journal of Advanced Mobility

次世代移動体技術誌



- 2023 年はドローン「レベル4」実現元年  
鈴木 真二
- 壁面吸着ドローンの開発と活用方法の提案  
菱田 聡、大垣 正信、菱田 康、三輪 昌史、清水 俊彦
- 吸引領域サイズの拡大によるマルチロータ型航空機の構造・制御の最適化  
山口 皓平、原 進
- 消防におけるドローンリモート技術の概念構想（ConOps）の構築と社会実装課題の抽出  
佐々木 一、榎野 尊、寺村 良寛、秋本 修、鈴木 真二
- 日本国内の無人航空機事故（2015-2021）の要因分析と CRM スキルによる予防策の検討  
～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～  
大原 大
- Global Drone Regulations and Research Survey with the Examination of Its Application  
Ghassaq Issa Hasan Alrubaye、Hiroyuki Miyauchi
- 『ポスターセッション in Japan Drone 2023』報告  
テクニカルジャーナル編集委員長 岩田 拓也
- 小型無人航空機（ドローン）のインシデントレポート様式作成の試み  
飯田 涼太、海老根 雅人、五十嵐 仁、村上 龍、日下部 雅之、黒木 尚長

# 2023 年はドローン「レベル4」実現元年



一般社団法人日本 UAS 産業振興協議会  
理事長 鈴木 真二

Technical Journal of Advanced Mobility（次世代移動体技術誌）を 2020 年に発刊し 4 年目を迎えました。技術だけでなく、制度や、教育活動の分析など次世代移動体に関する論文や報告の発表の場として活用して頂き、アクセス数も月 1000 件に到達し、アメリカ、中国など海外からのアクセスも 2 割程度を占めるまでになりました。今後とも、先端的な取り組みや新たな知見をアカデミアだけでなく産業界、研究機関、行政機関などすべての分野、地域から発表して頂ければと思います。

小型無人航空機「ドローン」に関しては、2022 年 12 月 5 日にレベル 4 飛行を可能とする改正航空法が新たに施行され、新たな時代を迎えています。わたくしども JUIDA では、年頭にその年の目標を掲げています。最近では、2020 年は、セキュリティの関心の高まる中、「ドローン、セキュリティ元年」を目標とし、その年には、「特定高度情報通信技術活用システムの開発供給及び導入の促進に関する法律（5G・ドローン促進法）」が施行されました。2021 年は、「ドローン、災害活用元年」を目標に定め、その年に発生した熱海土砂災害では、ドローンの活躍が広く報道されました。2022 年は、「ドローン、社会実装元年」を目標に掲げ、各地でドローンの実証実験が展開され、第 1 回ドローンサミットが 9 月に神戸で開催されました。今年の目標は、いうまでもなく「ドローン、レベル 4 実現元年」です。「レベル 4」の実現、拡大、ひいては社会課題の解決に貢献できるドローンのさらなる活用に向け、Technical Journal of Advanced Mobility が貢献できればと思っています。

2023 年 3 月吉日

理事長

鈴木 真二/Shinji Suzuki

東京大学 名誉教授。東京大学 未来ビジョン研究センター 特任教授。1953 年岐阜県生まれ。79 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。(株)豊田中央研究所を経て、東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻教授を 2019 年に定年退職後、現職。工学博士、専門は航空工学。日本航空宇宙学会会長（第 43 期）、国際航空科学連盟（ICAS）会長（2019-2020）、福島ロボットテストフィールド所長など。著書に、『飛行機物語』（筑摩書房）、『現代航空論』（編著、東京大学出版会）、『落ちない飛行機への挑戦』（化学同人社）、『ドローン活用入門：レベル 4 時代の社会実装ハンドブック』（編著、東京大学出版）などがある。

# 壁面吸着ドローンの開発と活用方法の提案

菱田 聡<sup>\*1</sup>, 大垣 正信<sup>\*1</sup>, 菱田 康<sup>\*1</sup>, 三輪 昌史<sup>\*2</sup>, 清水 俊彦<sup>\*3</sup>

菱田技研工業株式会社<sup>\*1</sup>

国立大学法人徳島大学<sup>\*2</sup>

神戸市立工業高等専門学校<sup>\*3</sup>

エンジニアの高齢化や人手不足がインフラ点検などの高所作業の課題となっている。検査作業へのドローンの利用が検討されているが、ホバリングによる打診検査などの作業を行うことは困難である。機体前面に万能真空吸着グリッパー (UVG) を搭載した壁面吸着ドローンを開発した。UVGは、変形可能なスカートで凹凸表面に吸着できる真空吸盤である。この壁面吸着ドローンは、壁に吸着して機体を固定できプロペラを停止させることも可能で安定した長時間の運用ができる。さらに、作業範囲を広げるために作業機器を備える子機を開発した。子機は、吸着した壁面吸着ドローン (親機) から吊り下げられる。子機にもUVGを装備し壁面に吸着して作業することができる。このドローンシステムにおいて、親機の壁面吸着と子機のコンクリートボードへのドリル作業を実現し、ドローンによる高所作業実現の可能性を確認した。

**Keywords:** 壁面吸着ドローン, 万能真空吸着グリッパー (UVG), 打診検査, インフラ点検

## Development of Wall Adhesion Drone and Proposal of Its Utilization Method

Satoshi Hishida<sup>\*1</sup>, Masanobu Oogaki<sup>\*1</sup>, Yasushi Hishida<sup>\*1</sup>, Masafumi Miwa<sup>\*2</sup>,

Toshihiko Shimizu<sup>\*3</sup>

Hishida R&D Co., Ltd<sup>\*1</sup>

Tokushima University<sup>\*2</sup>

Kobe City College of Technology<sup>\*3</sup>

The aging of engineers and labor shortages are the problems in high-place work such as infrastructure inspections. The use of drones for inspection work is being considered, but it is difficult to perform work such as hammering test by hovering. We have developed a wall adhesion drone with a universal vacuum suction gripper (UVG) on the front of the aircraft. UVG is a vacuum sucker adsorb to uneven surface with deformable skirt. We call this drone as UVG drone. This UVG drone can hold itself by adsorbing it on the wall and stop the propeller, so stable and long operation is possible. Furthermore, in order to expand the work range, we also developed a child machine with work equipment. The child machine is suspended from the adsorbed UVG drone. UVG is also mounted on the child machine. We report that drilling work on concrete wall with child machines was realized by this drone system.

**Keywords:** Wall adhesion drone, Universal vacuum suction gripper (UVG), Hammering test, Infrastructure inspection

## 1. はじめに

インフラの老朽化が社会問題となっている。インフラを安全かつ効率的に運用するためには、適切な点検・修繕作業が不可欠である。しかし、技術者の高齢化や人手不足により維持運用に支障をきたすリスクがある。このため、高所作業の効率化は喫緊の課題となっており、インフラ点検へのドローン活用が検討されている。

そのドローン活用の一例として、ドローンで撮影した画像を用いた検査作業の実用化がある[1]。これは3次元の任意の地点から撮影を行えるというドローンの特徴を生かした例である。一方、構造物の打診検査は重要なインフラ点検作業の一つである。しかし、ドローンで打診検査を行うことは困難である。困難の原因は、打診検査で発生する反力によりドローンのホバリング姿勢が不安定になること、検査時における検査面へのドローンの精密な接近・位置の保持にある。

本研究では、ドローンに万能真空吸着グリッパ UVG を装備した壁面吸着ドローンシステムを提案する。検査対象に吸着することによりドローンは検査面に機体を精密に固定できる。しかし吸着により、ドローンの特徴である移動の容易性が失われる。これを克服するシステムとして、壁面に吸着する親機と親機から吊り下げ移動する子機を開発した。親機は壁面吸着を確実にを行うため、水平飛行を実現するチルト機構を採用し、活用分野を検討した。また、壁面吸着ドローンの高所作業の一例として、子機によるドリル作業を実現した。

## 2. 吸着ドローンの概要

### 2-1 親機と子機による壁面吸着ドローンシステムの概要

吸着ドローンの特性は、様々な用途での利用が期待できる。しかしながら、飛行の後に吸着するドローンで正確な位置決めや高精度の移動を実現することは困難である。そこで、本研究では親機吸着ドローンにぶら下げられ移動できる子機を開発した。子機は、吸着する親機に取り付けられたウインチによって上下に移動する。子機にも UVG が装備されており、フライトコントローラで姿勢制御され、ダクトファンを使って壁面に接近し吸着する。子機に検査装置や作業機器を搭載し、任意の位置に吸着することで、高所での作業を実現する。特許記載した親機と子機のバリエーションを図1に示す。ウインチ設置位置の3つのタイプ（親機、子機、地面）を提案した[2]。

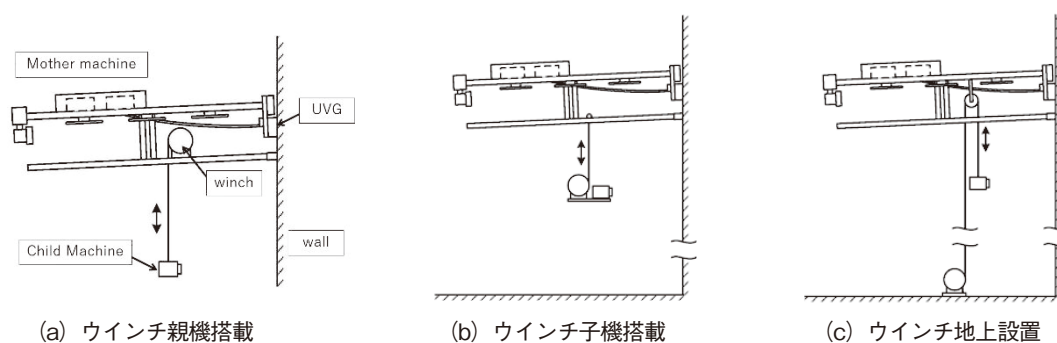


図1 親機、子機とウインチのバリエーション

- (a) ウインチ親機搭載：ウインチが親機に搭載されており、親機と子機が一体で飛行できるので飛行の自由度は高い。高高度での作業を実現できるシステムである。ただし、親機、子機共に小型軽量化が必要である。
- (b) ウインチ子機搭載：ウインチが子機に搭載されており、まず親機が飛行し吸着後、子機を上昇させる。

親機の構造を簡素化でき、子機搭載機器の自由度（特に重量）が上がる。ただし、親機飛行の自由度は地上設置の子機と牽引ケーブルで接続されているため低下する。しかし、子機上昇時の制約はない。

- (c) ウインチ地上設置：ウインチは地上設置されており、親機には滑車を搭載する。大型ウインチの使用により、大型の作業機器を使用できる。高高度の使用は容易ではない。しかし、牽引ケーブルと共に、動力線を接続すれば作業機器に大容量常時給電が可能である。また、ホース等を接続すれば空気、水、塗料や各種メディアの常時供給も可能である。

以上、3種のバリエーションにより本システムはドローンを利用した高所作業の実現に非常に高い自由度を有している。システムの目的は、作業機器を目的の場所まで搬送し、安定した状態で、十分な作業時間を確保することにある。

## 2-2 親機

本研究の壁面吸着ドローン（図2）親機の概要は以下の通りである。機体は大型ヘキサコプタにUVGおよび真空ポンプを搭載しており、吸着機能を持つ。UVGは機体の水平面に対し垂直になるように、機体先端に取り付けられている。鉛直な壁面への吸着を容易にするには、吸着時にUVGを壁面に正対させる必要がある。それには、機体が水平を維持しつつ前進・接近する必要がある。これを実現するために左右のプロペラにチルト機構を装備し、姿勢制御プログラムを改良した（詳細後述）。親機には光学、圧力、力といった各種センサを搭載し壁面との相対距離や吸着圧力を計測し、自律的に吸着離脱する。また子機を吊り下げ移動させるウインチを装備する。主な仕様は以下の通り。



図2 壁面吸着ドローン親機子機

- ・機体形式：ヘキサコプタ（左右のプロペラにはチルト機構あり）
- ・機体寸法：W 2050, D 2150, H 835
- ・電源：LiPo バッテリ 12S, 燃料電池 2400 W×2
- ・吸着機構：UVG×3
- ・総離陸重量：25 kg 未満

## 2-3 子機

子機は壁面吸着ドローンによる高度作業を実現するためのプロトタイプ機である。高所での安定した作業を実現するために、縦方向に配置された2つのUVGで、子機を壁面に吸着させる。本研究では、高所作業の例としてドリル作業を行った。ドリルの操作および前後移動の機構を装備し、ラジコン送信機による遠隔操作を実現した。吸着時に子機を壁面に押付けるのに、ダクトファンを活用する。主な仕様は以下の通り。

- ・機体寸法：W 600, D 450, H 450（移動用ダクトファン2機を含む）
- ・機体重量：8 kg（小型電動ドリルを含む）

## 3. 壁面吸着ドローンの要素技術

### 3-1 UVG 動作原理および設計[3, 4]

図3に、UVGのプロトタイプの組立図を示す。UVGは、メインプレート、スカート、インナープレートで構成されている。UVGには、吸着時の応答性向上を目指し平板を使用した。容積が少ない分、必要となる機密性を膜袋と粉体で構成されたジャミンググリッパにて実現した。凹凸面でも粉体が密閉することで気密性を確保できる特徴がある。本研究で使用するUVGは、インナープレート部に吸着に使用する真空ポートを備える。

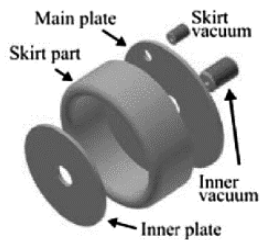


図3 UVGの組立図

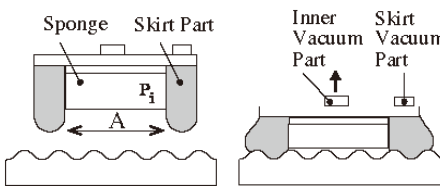


図4 UVGの動作原理

UVGの動作原理を図4に示す。スカートは柔軟な状態にあり、インナープレート部の真空ポートより吸引することでスカートが吸着対象表面の形状に変形しUVGは吸着する。UVGは吸着力に優れているため、図5に示すように表面が不均一な物体にも吸着することができる。

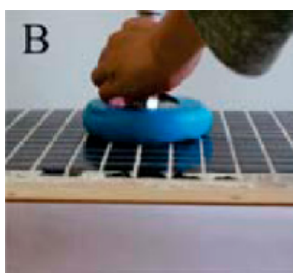
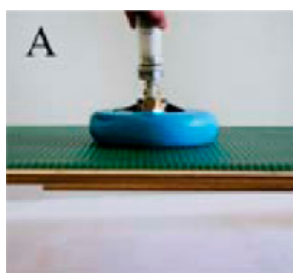


図5 UVG吸着の様子

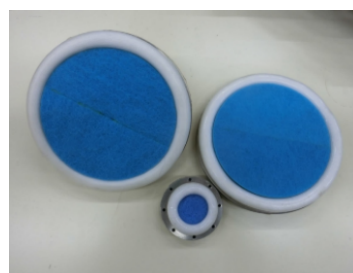


図6 本研究で使したUVG

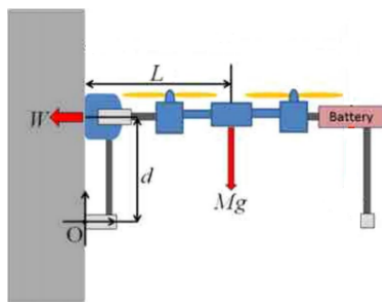


図7 機体とUVGの力学系

壁面吸着ドローンに使用するUVGの理論吸着力は次式から算出される。

$$F = P_i \times A / t \tag{1}$$

ここで、 $F$ は吸着力の理論値(N)、 $P_i$ は内部空間の真空圧力(MPa)、 $A$ はインナープレート面積(mm<sup>2</sup>)である。 $t$ は各用途の安全率である。真空パッドを設計する場合、安全率は水平面に4以上、垂直面に8以上を用いるのが一般的である[5]。たとえば、真空圧力が-0.093 MPaで、インナープレートの有効面積の直径が200 mmのとき、理論吸着力は約2920 Nである。吸着するのは垂直方向の壁なので安全率を8とすると、UVG吸着力は約365 Nである。壁面吸着ドローンの機体には2つのUVGを装備する。機体の吸着力 $W$ は $W = F \times 2 = 365 \times 2 = 730$  Nとなる。

図6に本研究で用いたUVGを示す。壁面吸着時に加わる垂直荷重モーメントを支持するためには、壁面に対して3点で吸着することが望ましい。したがって、2つのUVGを吸引に使用し、他の1つの支点を機体底部に配置した。図7に、ドローン壁面吸着時の機体とUVGの力学系模式図を示す。支点OとUVGとの距離を $d$  mm、ドローンの重量を $Mg$  kg、ドローンの中心とUVGとの距離を $L$  mmとする。式(1)で導

出される機体吸着力を  $WN$  とすると、支点  $O$  を中心とするモーメントにおいて機体が壁面に吸着するには式 (2) の条件が満たされなければならない。

$$W \times d \geq Mg \times L \quad (2)$$

ドローンの重量は機体の中心にあるものとする。距離  $L$  は 1080 mm であった。 $Mg$  の最大重量は 25 kg (LiPo バッテリ搭載, 子機を含む) である。 $O$  の時計回りのモーメントは 265 Nm である。一方  $d$  は 455 mm であり、左回りのモーメントは  $W \times d = 730 \times 0.445 = 332$  Nm である。左回りのモーメントが右回りのモーメントよりも大きいため、UVG は剥がれない。

### 3-2 チルト機構

ドローンを確実に壁に吸着させるためには、吸着する壁面と UVG を正対させる必要がある。しかし通常のドローンは機体を前方に傾けて前進するため、機体は吸着する壁面に傾いたまま接触することになり、吸着は容易でない。本研究では、6 枚プロペラの機体の左右両側のプロペラをサーボモータで傾けて水平推力を発生させるチルト機構を採用した (図 8, 9)。

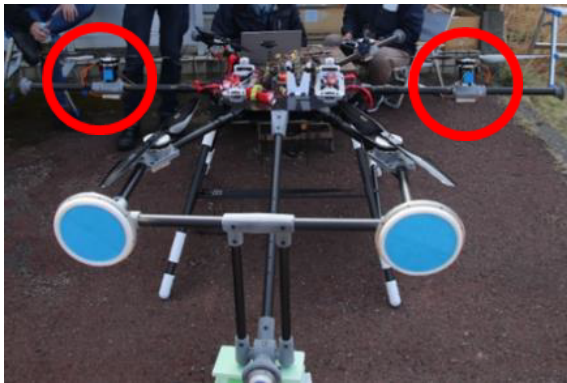


図 8 チルト機構の配置

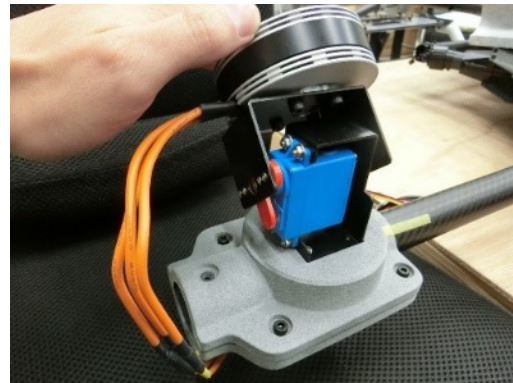


図 9 チルト機構

左右両方のプロペラがチルト機構により前方に傾斜され、機体は水平状態で前進する。また、両方のプロペラが後方に傾くと、機体は後進する。左右のプロペラを前後で異なる方向に調整することで、ヨー方向制御も可能である。チルト機構によるヨー制御は、モータの反トルクによる従来の制御と比較して、ロールピッチ制御からヨー制御が影響を受けにくくなるため飛行性能の向上に有効である。

チルト機構の効果を確認するために、吸着飛行時のログデータを図 10, 11 に示す。この吸着飛行実験の様子は、YouTube 動画 (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=6ZqB2gIUi3c>) にて公開している。

図 10 で、青色はスロットである。12:20:36 に飛行を開始し 12:21:10 に吸着を完了しプロペラを停止している。緑色は機体の速度で、34 秒間に約 5 m 前進している。赤色は機体の Pitch 角度である。機体は前進しているが Pitch 角度は  $\pm 1.5$  度程度でほぼ変化は無い。さらに Pitch 角度と機体速度には相関がみられない。

図 11 では、緑色は機体速度、赤色は機体の Pitch 角度で図 10 と同様である。黄色と青色はチルト機構において左右のプロペラ角度を変化させる各サーボモータへの指令値である。機体は直進しているため黄色と青色で示す左右のプロペラ角度は逆位相となっている。黄色に着目すると、時間遅れが伴うが、中央値より下では機体が増速され、中央値より上では機体が減速されている。これにより、チルト機構により機体の Pitch 角度を変化させずに水平移動を実現できていることがわかる。

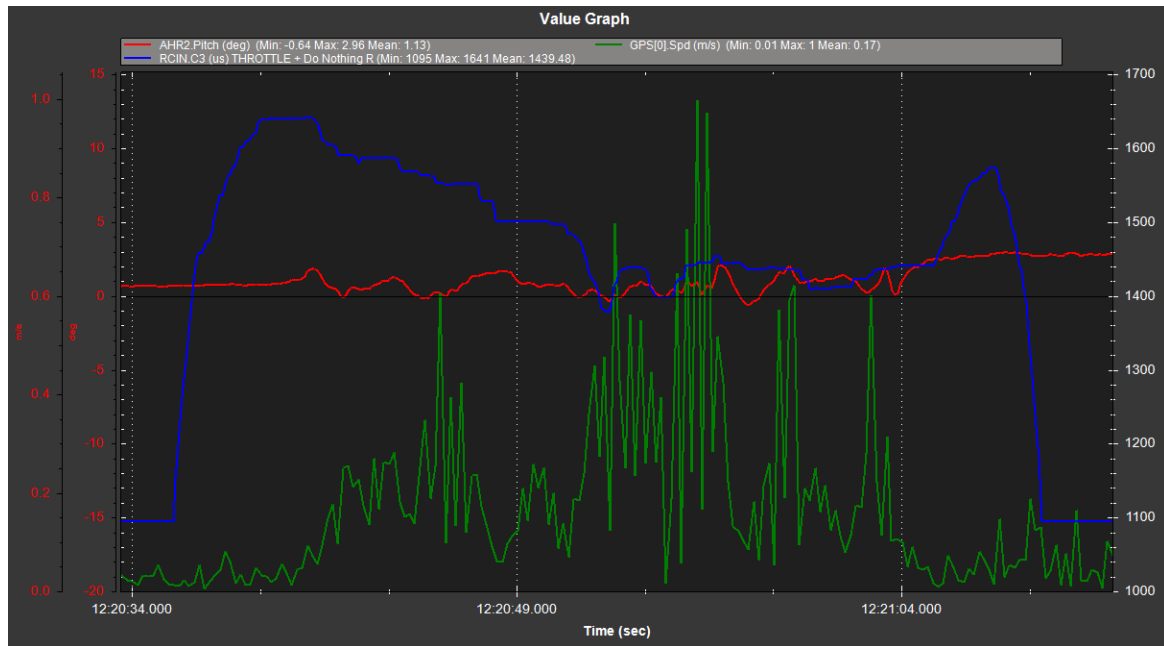


図 10 吸着飛行時のログデータ 1

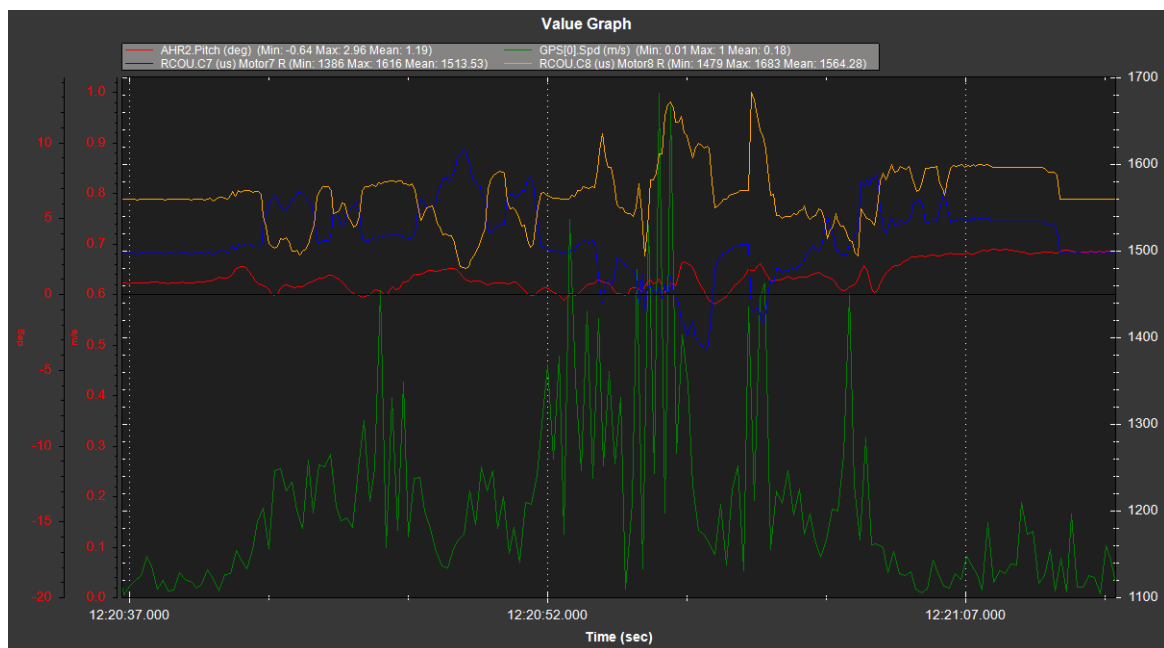


図 11 吸着飛行時のログデータ 2

#### 4. 壁面吸着ドローンシステムの特徴と用途

##### 4-1 壁面吸着ドローンシステムの特徴

ドローンによる高所作業の実現が期待されている。本研究で開発する壁面吸着ドローンの実用化について考察する。壁面吸着ドローンシステムの特徴は以下の通りである。

- ・高所安定作業が可能

ドローンは、空中での作業をホバリングしながら行う。構造物の近くでホバリングすると、姿勢を安定させることが困難である。作業や検査に伴い反力が発生すると、安定したホバリングがさらに困難になる。しかし、壁面吸着ドローンはUVGを用いて機体を壁面等に固定でき、高所での多種多様な作業の実現が期待



できる。

- ・長時間操作が可能

壁面吸着ドローンは、UVG を使用し機体を壁面に吸着でき、プロペラを停止できる。UVG の吸引には、小型真空ポンプが使用される。真空ポンプは小型の LiPo バッテリで 1 時間以上動作させることができる。これにより、ホバリングでは実現できなかった高所での長時間の運用が可能となる。

- ・安全で安定した操業の実現

距離センサや圧力センサなどを用いたロボット技術を活用することで、ドローンは自律で壁面への吸着や離脱が可能となる。このとき、機体を傾けずに前後方向の移動を実現できるチルト機構は非常に有用である。

#### 4-2 壁面吸着ドローンシステムの用途

次に、壁面吸着ドローンシステムの活用が期待される用途の例を示す。

- ・インフラ点検

特徴で述べたように、壁面吸着ドローンは壁面に吸着することで、安定した長時間の運用が可能である。壁面吸着ドローンに各種検査装置を搭載できる。打診検査をはじめとする各種検査機を安定した状態で長時間使用することができる。また、吸着時にプロペラを停止できるため、騒音による試験結果への悪影響を軽減できる。

- ・修繕工事

塗装や補修材の注入作業で反力が発生し、ホバリングが不安定になる。機体を吸着固定できれば、正確な作業を行うことができる。

- ・清掃

水や空気を使った清掃作業も吸着により安定して実現できる。ホース等で水や空気を供給すれば、長時間の作業が可能となる。ケレンのような大きな反力を発生する作業も吸着により可能となる。

- ・サンプリング

新たな作業機器の開発により、サンプルの採取やコア抜き作業も可能である。本研究では、コンクリートボードへの  $\phi 8.5 \text{ mm}$  ドリル作業に成功した。

### 5. 実証実験の結果

#### 5-1 親機の吸着

本研究で開発したドローン吸着実験を行った。親機の吸着状況を図 12 に示す。ドローンは安定した状態で吸着しており、プロペラは停止できている。吸着に用いる真空ポンプの寸法は  $85 \times 60 \times 40 \text{ mm}$  程度、重量は  $280 \text{ g}$  で、各 UVG に 1 台ずつ親機に 3 台を使用している。同ポンプの使用電力は小さい。例えば、LiPo バッテリ  $3\text{S } 2200 \text{ mAh}$  で 1 時間以上の連続運転が可能である。

現在、自律飛行による着脱技術の開発を進めており、自律飛行が実現できると安全・確実な吸着が可能になる。

#### 5-2 子機のドリル作業

検査などに使用する作業用機器を搭載する子機を開発した (図 13)。本研究では、壁面吸着ドローンシステムの高所作業実現の可能性を検証するため、作業用機器に動作時に反力の大きな小型電動ドリルを選択し



図 12 親機の吸着

た。作業時における小型電動ドリルの押付けにはエアシリンダを使用した。エアシリンダ駆動用にも真空ポンプを加圧用として使用した。子機の壁面吸着用に2台のUVG（インナープレートφ110 mm）と真空ポンプ（親機と同一品）を搭載した。子機の寸法は600×450×450 mm、小型電動ドリルも加えた重量は約8 kgである。子機を壁面に押付けるダクトファンはφ90 mmである。子機によるドリル作業実証実験の様子を図14に示す（YouTube URL：<https://www.youtube.com/watch?v=ZPXeimkQkbo>）。子機はコンクリートボードに簡単に吸着し、完全に固定できた。ドリル作業は数秒で完了した。今回は子機に搭載する作業機器としてドリルを選定したが、打診検査器や各種センサなど、使用目的に応じた機器を搭載することが可能である。

本研究で一般的なホバリングドローンでは不可能な、反力が発生するドリル作業に成功した。これにより、ドローンによる高所での点検や作業の実現の可能性を確認できた。

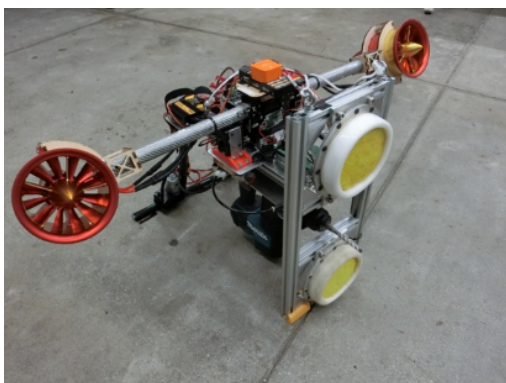


図13 壁面吸着子機



図14 子機のドリル作業実証実験

## 6. 結 論

ドローンによる高所での作業の実現を目指し、壁面吸着ドローンの移動性能と正確な位置決めを実現するために、親機と子機を活用したシステムを提案した。UVGを設計し、吸着ドローンの要素技術としてチルト機構を導入した。また、壁面密着ドローンの特徴や用途についても検討した。

実証実験により、開発したドローンは問題なく壁に吸着できることが確認された。また、子機に小型電動ドリルを搭載してドリル作業を実現し、一般的なホバリングするドローンでは実現が困難な反力が発生するドリル作業に成功した。これにより、ドローンによる高所での点検・作業実現の可能性を見いだせた。

今後、親機および子機の軽量化やRTK-GPSの搭載により、飛行性能と安定性を向上させる。加えて吸着と離脱の自律機能を開発し、システム実用化のための信頼性向上や運用方法の確立、運転手順の成文化を行い、実用化を目指す。

## 謝 辞

本研究は、経済産業省近畿経済産業局の「HyDrone（ハイドローン）プロジェクト」の支援によって行われた。ここに記して、謝意を表す。

投稿受付：2023年1月4日

採録決定：2023年1月31日

## 文 献

- [1] 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2019.
- [2] 菱田 聡，清水俊彦，柿本将大：“無人飛行体”，菱田技研工業株式会社，特許第 6906264 号，2021.7.1.
- [3] Fujita, M., Ikeda, S., Fujimoto, T., Shimizu, T., Ikemoto, S. and Miyamoto, T.: “Development of universal vacuum gripper for wall-climbing robot”, *Advanced Robotics*, vol. 32, No. 6, pp. 283–296, 2018. DOI: 10.1080/01691864.2018.1447238.
- [4] 中村友哉，藤本敏影，岡田宙士，清水俊彦，池本周平，和田明浩，宮本 猛：“壁面吸着用 UVG に基づく打音検査型マルチコプタの開発”，計測自動制御学会論文集，Vol. 54, No. 4, pp. 440–446, 2018.
- [5] [https://ca01.smcworld.com/catalog/en/vacuum/ZP3E-E/6-4-p0377-0494-zp3e\\_en/data/6-4-p0377-0494-zp3e\\_en.pdf](https://ca01.smcworld.com/catalog/en/vacuum/ZP3E-E/6-4-p0377-0494-zp3e_en/data/6-4-p0377-0494-zp3e_en.pdf)（参照日 2023 年 2 月 10 日）.



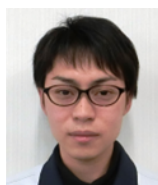
## 菱田 聡

1987 年岡山大学大学院工学研究科修了。同年ダイキン工業株式会社入社エアコンの制御，新冷媒の開発に従事。1991 年菱田技研工業株式会社入社。1998 年より代表取締役社長，現在に至る。次世代ロボット，カスタマイズドローンの開発に従事。



## 大垣 正信

1981 年京都大学航空工学科卒業。同年川崎重工工業株式会社入社。主に航空機に関する研究開発・新規プロジェクトに従事・T-4 の開発・宇宙往還機の研究開発・SST 実験機 航空宇宙学会技術賞受賞・P-1, C-2 の民間転用及び輸出の推進・京大非常勤講師 2020 年より菱田技研工業技術顧問。



## 菱田 康

2015 年金沢工業大学環境建築学部建築学科卒業。同年東鉄工業株式会社入社。新築マンション工事や駅構内改修工事の施工管理業務に従事。2020 年菱田技研工業株式会社入社。次世代ロボット，カスタマイズドローンの開発に従事。



## 三輪 昌史

1996 年和歌山大学助手，2007 年徳島大学講師 2014 年徳島大学准教授，現在にいたる。RTK-GPS で精密に飛行するマルチコプタでの運搬・計測や，マルチコプタや固定翼機に推力偏向システムを加えた機体など，無人機システムに関する研究に従事。博士（工学）。



## 清水 俊彦

2013 年大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成工学専攻博士後期課程修了。2010 年 Italian Institute of Technology 研究員。2013 年神戸市立工業高等専門学校助教。2017 年同准教授，現在に至る。2021 年より中之島チャレンジ実行委員会委員長。万能グリッパと自律ロボットの研究開発に従事。博士（工学）。

E-mail : kcct-ts8@g.kobe-kosen.ac.jp

# 吸引領域サイズの拡大によるマルチロータ型 航空機の構造・制御の最適化

山口 皓平<sup>\*1</sup>, 原 進<sup>\*1</sup>

名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻<sup>\*1</sup>

複数のロータを備えそれぞれの回転数やコレクティブピッチ角の変更によって飛行を制御するマルチロータ型航空機の普及は目覚ましく、空撮や災害救助など様々な分野で広く応用されている。本研究では、このようなマルチロータ型航空機の最適設計手法として、構造パラメータと制御器の準同時最適化手法を提案する。最適化の評価関数として、本研究ではシステムの平衡点周りに存在する安定領域である吸引領域のサイズを用いる。吸引領域サイズが最大化する構造パラメータの値と制御器を探索することで、マルチロータ型航空機に対する構造・制御の両面からの最適設計が可能となる。本稿では吸引領域の可視化にも取り組み、得られた機体が元機体と比較してより大きな平衡点からの逸脱に対応可能であることも示す。

**Keywords:** マルチロータ型航空機, 吸引領域, 最適設計, 非線形システム

## Geometric-Parameter and Controller Optimization of Hovering Multirotor Aircraft by Expanding the Size of the Domain of Attraction

Kohei Yamaguchi<sup>\*1</sup>, Susumu Hara<sup>\*1</sup>

Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University<sup>\*1</sup>

A multirotor aircraft is a rotorcraft with more than two rotors. Owing to its relatively simple mechanisms for flight control, it has been widely used in various fields, such as aerial photography and disaster management. To determine an optimal design for a multirotor aircraft, the geometric parameters and controllers are quasi-simultaneously optimized. The domain of attraction, which defines the stable region around an equilibrium point for a nonlinear system, was used as an objective function for optimization. By finding geometric parameters and the controller that expands the size of the attraction domain, a multirotor aircraft can be optimized. The visualization of the domains shows that the optimized aircraft can deal with a larger deviation from an equilibrium point compared with the original aircraft.

**Keywords:** Multirotor aircraft, Domain of attraction, Optimal design, Nonlinear system

### 1. Introduction

Recently, multirotor aircrafts have been used in various fields, including aerial photography, disaster management [1], package delivery services [2], and hobbies such as drone racing. In 2020, a drone wireless relay system was demonstrated to provide a person facing a natural disaster with mobile phone access [3]. In addition, multirotor aircraft provides a promising type of electric vertical takeoff and landing (eVTOL) aircraft

for flying cars [4, 5]. As the importance of multirotor aircraft has been widely recognized, improving the performance of the aircrafts with regard to the changes in the state variables has attracted considerable attention in research. Increasing the number of rotors is an option for improving aircraft performance; a hexarotor-type or an octorotor-type aircraft performs better than quadrotor-type aircrafts. When the number of rotors is fixed, the performance of the multirotor aircraft can be improved by changing the geometric parameters that define the length of the main arms, angle of the thrust relative to the fuselage, position of the payload, etc. For example, by extending the length of the main arm, the control moment can be increased without improving the performance of the rotor placed at the tip of the arm. However, methods for optimizing such geometric parameters have not yet been sufficiently formulated.

This study focusses the development of a method to find an optimal design for multirotor aircrafts. The optimality of a system is generally ensured by a change in the objective function that effectively defines the performance of the system. Herein, the size of the domain of attraction (DOA) was used as the objective function to evaluate the performance of a multirotor aircraft. The DOA is defined by a set of initial states that converge to an equilibrium point of the system after infinite time. Therefore, DOA is a critical tool in stability analysis because the size of the DOA shows how much the initial points can be far away from the equilibrium point while the trajectories can still be converged. Because the DOA directly visualizes the safety margin of the system, its size can be used to evaluate the performance of the system. In this study, the DOA size was used to evaluate the performance of a multirotor aircraft from the viewpoints of both the structure and controller. By searching for geometric parameters and controllers that maximize the size of the DOA, both the structure and controller of the aircraft can be optimized. In addition, a multirotor aircraft that employs a variable collective-pitch rotor system was assumed. Each rotor has a main motor to rotate the blades and servo motor to change the collective pitch angle. Compared with multirotor aircraft having fixed-pitch rotors, the variable collective pitch mechanism significantly increases the potential applications of this type of aircraft, as suggested in a previous study [6]. Another study demonstrated an increase in the rate of change of thrust, a decrease in control saturation, and the ability to quickly and efficiently reverse thrust [7]. The effectiveness of an aircraft that employs a variable collective pitch rotor system was also shown [8]. By demonstrating the proposed optimization method for a prospective multirotor aircraft, the effectiveness of the method was investigated.

## 2. Methodology

### 2-1 System optimization based on the size of the domain of attraction

The size of the DOA was used to optimize the geometric parameters and controller quasi-simultaneously. For a system  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}; t)$ , the definition of DOA  $R_0$  is given by

$$R_0 = \left\{ \gamma \in \mathbf{R}: \text{if } \mathbf{x} = \gamma \text{ then } \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_{\text{eq}} \right\}, \quad (1)$$

where  $\mathbf{x}$  is the state vector,  $\mathbf{f}$  is a nonlinear function,  $\mathbf{u}$  is the input vector,  $\mathbf{R}$  is real space, and  $\mathbf{x}_{\text{ep}}$  is the static equilibrium point of the system. The DOA directly visualizes the safety margin and robustness of the system around the equilibrium point. In addition, the size and shape of the DOA vary depending on the design of the geometric parameters and controller. In other words, by choosing geometric parameters and a controller that expands the size of the DOA, we can search for an optimal system from the perspectives of structure and control. The simplest way to accurately investigate the shape of the DOA is to investigate the convergence of a large number of initial states around the equilibrium point via numerical integration. To accelerate the

calculation, we proposed and studied an indirect DOA size estimation method that estimates the radius of the hypersphere inscribed by the DOA [9–11]. **Figure 1** shows a sketch of the DOA and inscribed hypersphere.

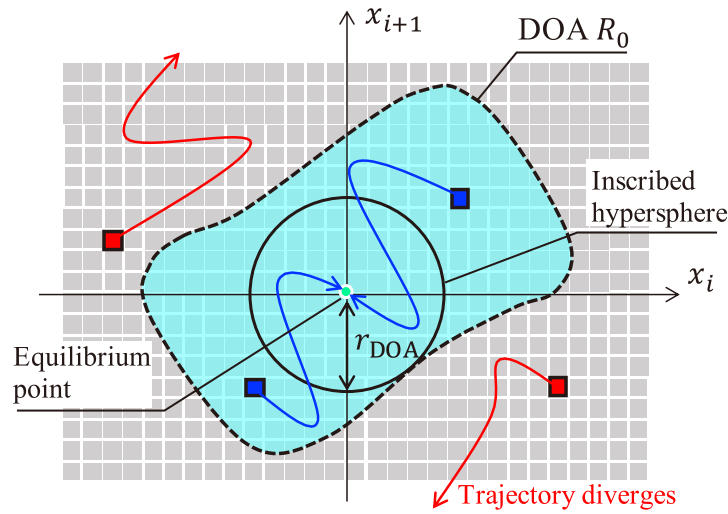


Fig. 1 Domain of attraction and inscribed hypersphere.

Instead of randomly distributing several initial states around the equilibrium point, a smaller number of states is distributed on the surface of a hypersphere. The radius of the hypersphere is updated according to a root-finding algorithm, such as the bisection or golden-section method, to determine the radius  $r_{\text{DOA}}$ . When all trajectories converge to the equilibrium point after a given period, the radius increases. However, when at least one trajectory diverges, the radius decreases. To use the indirect size estimation method, the number of states distributed on the surface was carefully determined. Because the probability that an initial state exists inside the DOA follows a binomial distribution, the probability that  $K$  initial values on the surface of the hypersphere outside  $N$  are inside the DOA is given by  ${}_N C_K p^K (1-p)^{N-K}$ , where  $p$  is the probability that a single state is inside the DOA. When all the initial states are inside the DOA ( $K=N$ ), more than  $p\%$  of the surface is inside the DOA with a confidence of  $1-p^N$ . In other words, an arbitrary condition, defined by the combination of probability and confidence, can be satisfied by changing the number of the initial state  $N$ . For example, 95% of the probability and 99% of the confidence are yielded when  $N > 90$  is satisfied.

The estimation result should be conservative because the obtained size is the smallest distance between the equilibrium point and edge of the DOA. As in Refs. [10] and [11], this method can yield a computational time that enables the use of size as an objective function of the system optimization method. The geometric parameters and parameters that define the controller are searched for such that the sphere radius  $r_{\text{DOA}}$  is maximized. In practice, the optimization scheme is separated into two parts: the S-step and C-step. In the S-step, the geometric parameters that maximize the radius  $r_{\text{DOA}}$  are determined. In the C-step, the parameters that define the performance of the controller are searched. The S- and C-steps are iteratively conducted, and quasi-simultaneous optimization of the nonlinear system is performed. The SC iteration can be accelerated by introducing a parallel computing technique and achieving a practical completion time for optimizing a triple-inverted pendulum system[11].

## 2-2 Multirotor aircraft Model

Herein, a mathematical model for a multirotor aircraft was presented. As shown in **Fig. 2**, the body-fixed coordinate system  $(x_b, y_b, z_b)$ , which is fixed to the center of mass of the aircraft, and inertial system  $(x, y, z)$  are

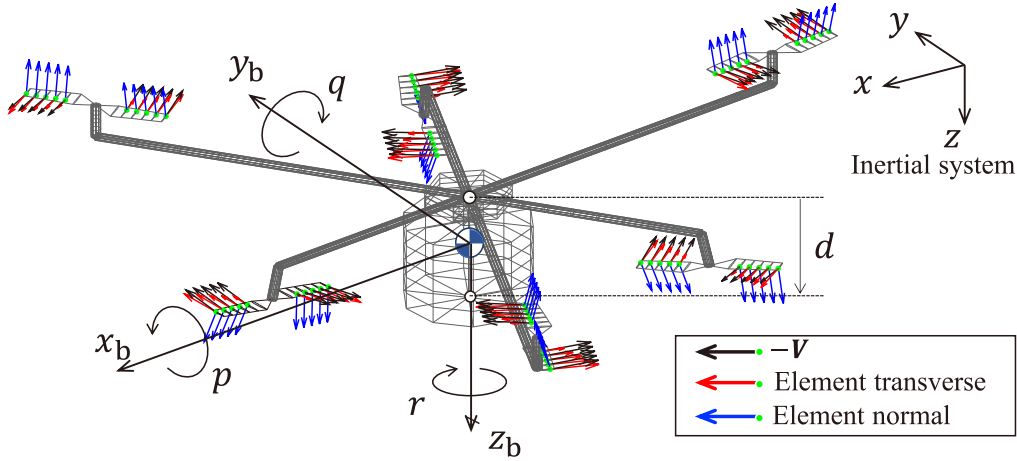


Fig.2 Coordinate systems for multirotor aircraft.

defined.

The rotors were alternated clockwise and anticlockwise. The position of the aircraft  $(x \ y \ z)$  and attitude  $(\phi \ \theta \ \psi)$  are defined in the inertial system, and the velocity  $V = (u \ v \ w)$  and angular velocity  $\omega = (p \ q \ r)$  are defined in the body-fixed system. In addition, the angular velocity of each rotor  $\Omega_i (i = 1, \dots, n_r)$  was considered. The state variable was defined as  $x = (x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi \ u \ v \ w \ p \ q \ r \ \Omega_1 \ \dots \ \Omega_{n_r})^T$ . The equations of motion for the multirotor aircraft are given by

$$\dot{V} = -\tilde{\omega}V + C_1^{B/I}G + \frac{1}{m}F \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = -J^{-1}\tilde{\omega}J\omega + J^{-1}M, \quad (3)$$

where  $\tilde{\omega}$  is the skew matrix used to model the outer product,  $C_1^{B/I}$  is a conversion matrix from inertial to body-fixed systems,  $J$  is the inertia tensor of the aircraft,  $G = (0 \ 0 \ 1)^T$  is a gravity vector in the inertial system, and  $F$  and  $M$  are the vectors that represent the force and moment acting on the aircraft, respectively. To calculate the force and moment on the aircraft, the blades of the rotor were discretized into small elements, and the inflow velocities were calculated for each element. As inputs, the motor torque  $q_{mi}$  and collective pitch angle  $\theta_i$  were considered as  $u = (q_{m1} \ \dots \ q_{mn_r} \ \theta_1 \ \dots \ \theta_{n_r})^T$ . The angular velocity of the rotor is controlled by changing the torque of the motor for each rotor as  $\dot{\Omega}_i = (Q_{mi} - q_{mi})/J_{ri}^{-1}$ , where  $Q_{mi}$  is the torque of the rotor, and  $J_{ri}$  is the moment of inertia of the rotor. Rotor torque  $Q_{mi}$  is determined by the lift and drag acting on the blade element. The nonlinear lift and drag coefficients are given by

$$C_l(\alpha) = [1 - \sigma(\alpha)](C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha) + \sigma(\alpha)[2 \sin(\alpha)S_\alpha^2 \cos \alpha] \quad (4)$$

$$C_d(\alpha) = [1 - \sigma(\alpha)]\left[C_{Dp} + \frac{(C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha)^2}{\pi e_0 AR}\right] + \sigma(\alpha)(2 \sin^2 \alpha), \quad (5)$$

where  $\alpha$  is the angle of attack,  $\sigma(\alpha)$  is the blending function,  $C_{L0}$  is the lift coefficient at  $\alpha = 0^\circ$ ,  $C_{L\alpha}$  is a coefficient,  $S_\alpha$  is the area of an element,  $C_{Dp}$  is the drag coefficient at  $\alpha = 0$ ,  $e_0$  is the Oswald efficiency factor, and  $AR$  is the aspect ratio of the blade. The angle of attack was calculated for each blade element to calculate the lift and drag. The force  $F$  and moment  $M$  were calculated according to the position and angle of the rotor. The moment of the  $i$ -th rotor is also modeled as  $M_{ri} = -(J_{ri}\dot{\Omega}_i n_i + J_{ri}\Omega_i \omega \times n_i)$ . For simplicity, the drag acting on the arms and fuselage was assumed to be sufficiently small and ignored. The induced velocity for the rotor,

$v_i = \sqrt{T_i/2\pi S\rho}$  is used for simplicity. The initial value of the induced velocity  $v_i$  was calculated using simple momentum theory. At every step of the numerical integration, the induced velocity was iteratively solved until it converged to the given value.

### 2-3 Optimization problem settings for multirotor aircraft

The parameters for the S- and C-steps were defined; Fig. 3 shows the geometric parameters of the multirotor aircraft.

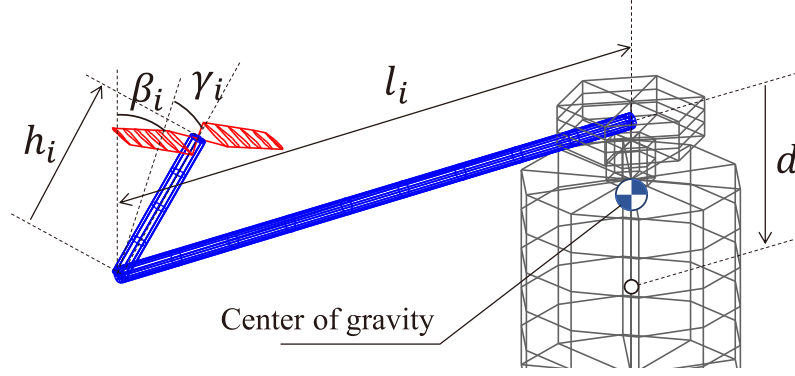


Fig.3 Geometric parameters for optimization.

The parameters, including the main arm length  $l_i$ , sub-arm length  $h_i$ , and rotor mount angles  $\beta_i$  and  $\gamma_i$ , are defined for every rotor as  $i = 1, \dots, n_r$ . To obtain a symmetric structure, these parameters are common for rotors numbered odd ( $i = 1, 3, 5, \dots$ ) and even ( $i = 2, 4, 6, \dots$ ); in addition, the distance between the fuselage center and payload center  $d$  is used. In this study, the aforementioned continuous parameters were optimized only in the S-step. Discontinuous parameters, such as the number of rotors and blades for one rotor, were defined by the authors. The radius of the rotor is 0.15 m and the number of blades is two. The line densities of the main and sub-arms are 0.1 kg/m. The moment of inertia of the rotor is  $J_{r_i} = 0.0017 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . The mass of the rotor, fuselage, and payload were 50, 200, and 300 g, respectively.

To stabilize the hovering aircraft, a linear quadratic regulator (LQR), optimized at the C-step, was employed. The quadratic cost function  $J$  for the LQR is given by

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (6)$$

Assuming  $\mathbf{Q}$  and  $\mathbf{R}$  are diagonal matrices,  $q_1 \dots q_{n_r}$  and  $r_1 \dots r_{n_r}$  are optimized at the C-step. A linearized system  $\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \delta \mathbf{u}$ , which is required to solve the Riccati equation, is obtained from the nonlinear equations of motion as  $\mathbf{A} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{\text{eq}}, \mathbf{u}=\mathbf{u}_{\text{eq}}}$  and  $\mathbf{B} = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{u} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{\text{eq}}, \mathbf{u}=\mathbf{u}_{\text{eq}}}$ , where  $\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{eq}}$  and  $\delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{eq}}$ . The state variable and input at the equilibrium points  $\mathbf{x}_{\text{eq}}$  and  $\mathbf{u}_{\text{eq}}$  are searched for in a trim flight analysis. For hovering flight, for example, rotation speed  $\Omega_i$  and collective pitch angles  $\theta_i (i = 1, \dots, n_r)$  that satisfy  $(x \ y \ z) = \mathbf{0}$ ,  $(\phi \ \theta \ \psi) = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{V} = \mathbf{0}$ ,  $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$ ,  $F_x = F_y = 0$ , and  $\mathbf{M} = \mathbf{0}$  are searched.

The SC iteration in this study is defined as follows: at the S-step, the trim flight analysis is conducted for every change in the geometric parameters; the inertia tensor was indirectly optimized using the S-step. At the C-step, trim analysis was conducted only once at the beginning of the optimization search. These problems are summarized in Table 1.

Therefore, the problem addressed here is much more complicated than in the authors' previous work [10, 11]. The nonlinear equations of motion that define the motion of the aircraft have 12 degrees of freedom; thus, by



Table 1 Optimization problem settings.

Objective function	Step	Constraints
Maximize: $r_{\text{DOA}}$	S-step	$0.3 \leq l_i \leq 1.0$ m $-0.2 \leq h_i \leq 0.2$ m $-45^\circ \leq \beta_i \leq 45^\circ$ $-45^\circ \leq \gamma_i \leq 45^\circ$ $-0.5 \leq d \leq 0.5$ m
	C-step	$0 \leq q_i \leq 500$ $0 \leq r_i \leq 500$

changing the geometric parameters, the nonlinear effect can be enhanced. In addition, the iterative calculation scheme can be unstable for infeasible values of state variables. In the authors' previous work [12], the aerodynamic force model was simplified by solving the induced velocity using simple momentum theory to address the problem. In this study, we employed Monte Carlo-based optimization for the SC iteration. By investigating the size of the DOA for the stochastically generated set of geometric parameters and matrices for the LQR, each DOA estimation step becomes independent of the other steps.

### 3. Optimization Example: Hexarotor Aircraft ( $n_r=6$ ) case

A multirotor aircraft optimized using the proposed method is presented here. As an example, the hexarotor aircraft ( $n_r=6$ ) in hovering flight ( $\mathbf{x}_{\text{eq}} = \mathbf{0}$ ) was optimized. In this example, the number of SC iterations was set to 1, and the number of samples for the Monte Carlo method to estimate the DOA size was 300. The radius of the hypersphere was updated according to the bisection method. The convergence of a state variable was investigated to determine whether the state variable was smaller than a given threshold value after 10 s of simulation time. The original and optimized structures are summarized in Fig. 4.

As shown in Fig. 4(a), the geometric parameters of the original hexarotor aircraft are  $h_i = 0.15$  m,  $l_i = 0.5$  m,  $\beta_i = \gamma_i = 0^\circ$  ( $i = 1, \dots, n_r$ ), and  $d = 0.2$ . In addition, the initial matrices used to define LQR performance are  $\mathbf{Q} = \text{diag}\{1\}$  and  $\mathbf{R} = \text{diag}\{1\}$ . The DOA size of the initial hexarotor aircraft was  $r_{\text{DOA}} = 0.0316$ . As shown in Fig. 4(b), the parameters optimized at the S-step are  $l_{1,3,5} = 0.396$  m,  $l_{2,4,6} = 0.794$  m,  $h_{1,3,5} = -0.0969$  m,  $h_{2,4,6} = -0.00622$  m,  $\gamma_{1,3,5} = 19.8^\circ$ ,  $\gamma_{2,4,6} = -0.614^\circ$ ,  $\beta_{1,3,5} = 35.1^\circ$ ,  $\beta_{2,4,6} = 15.5^\circ$ , and  $d = 0.248$  m. The optimized matrices are  $\mathbf{Q} = \text{diag}\{6.04 \ 21.8 \ 102 \ 46.2 \ 128 \ 174 \ 14.6 \ 55.9 \ 274 \ 7.40 \ 45.1 \ 3.79\}$  and  $\mathbf{R} = \text{diag}\{109 \ 0.0123 \ 14.2 \ 6.46 \ 262 \ 145 \ 134 \ 130 \ 98.2 \ 260 \ 489 \ 340\}$ . The size of the DOA was  $r_{\text{DOA}} = 0.0887$ , which is approximately three times larger than the original value. By conducting a DOA-based optimization, a hexarotor aircraft that can deal with a larger deviation from the equilibrium point was obtained. As a result of the change in  $h_i$ , all rotors are inverted. By changing the rotor angles,  $\beta_i$  and  $\gamma_i$ , the lift generated by each rotor was also changed. In other words, the lift generated by the aircraft projection on the  $xy$ -plane was larger than that of the original hexarotor aircraft. Because the lift of the rotor can be used to generate the yaw moment, the optimized hexarotor aircraft can handle a larger deviation from the equilibrium point. These results also show that the even numbered main arms are approximately twice as long as the odd arms. The angles  $\beta_i$  and  $\gamma_i$  of the even numbered arms are larger than those of the odd numbered arms. Because the length of the odd numbered arms is longer than that of the even numbered arms, a larger control moment can be generated with smaller angles  $\beta_i$  and  $\gamma_i$ .

To evaluate the obtained geometric parameters and matrices  $\mathbf{Q}$  and  $\mathbf{R}$ , the DOAs of the two hexarotor-type

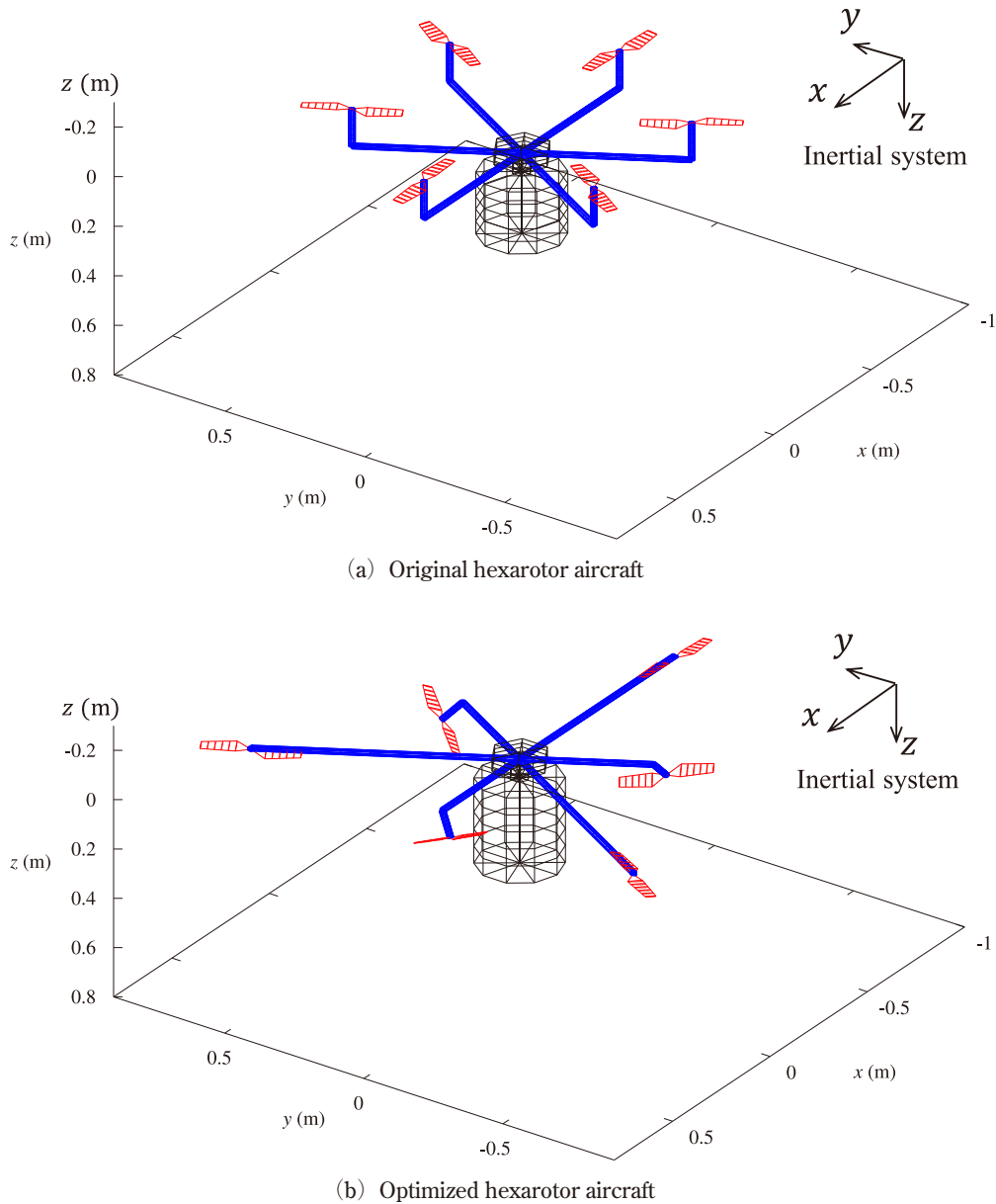


Fig. 4 Comparison of the geometric parameter optimization results for the hexarotor-type aircraft.

aircrafts are shown in Fig. 5. To investigate the performance of the aircraft with regard to the deviations in the variables accounting for the attitude,  $(\phi \ \theta \ \psi)$  are chosen as the axes. Several initial states are generated by randomly changing the variables  $\phi, \theta, \psi, p, q, r$ , and the convergence of the initial states is investigated by integrating the equations of motion (Eqs. (2) and (3)). The colors of the markers indicate the time required for convergence. The red markers depict the initial states that cannot converge to the equilibrium point within 10 s. For visibility, the range of the  $\phi$ -axis was set to  $[-0.1 \ 0]$ . As shown in Fig. 5, in the vicinity of the equilibrium point, the initial states converged in a shorter time. As the initial states move away from the equilibrium point, the convergence time tends to be longer. One can see that the size of the optimized aircraft in Fig. 5(b) is larger than that of the original aircraft in Fig. 5(a). Moreover, the convergence time of the original hexarotor-type aircraft tended to be longer than that of the optimized aircraft. Therefore, the proposed method works successfully, and the aircraft improves its performance with regard to the deviations from the equilibrium point.

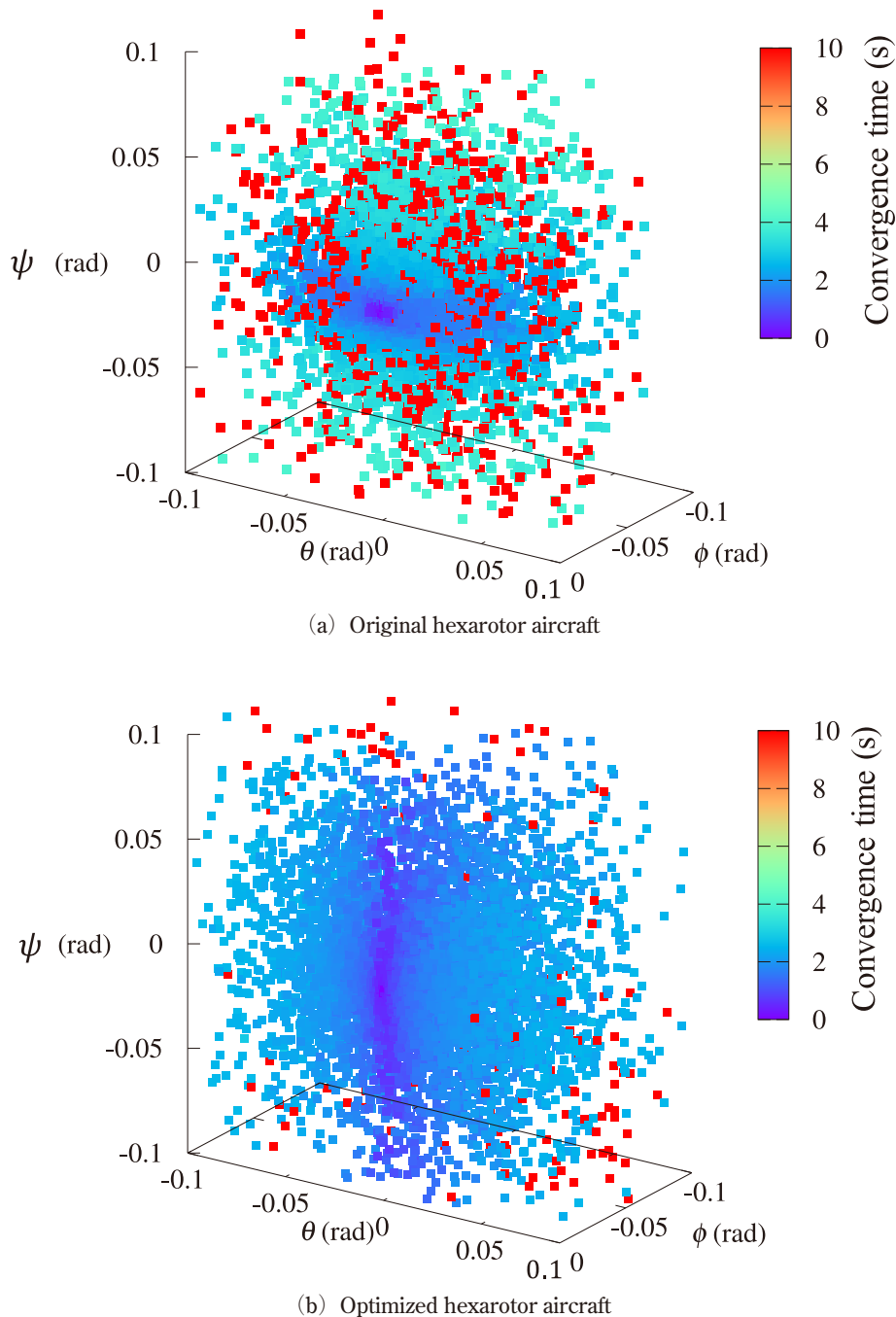


Fig. 5 Visualization of the DOAs for hexarotor-type aircraft.

#### 4. Conclusions

In this study, a method for optimizing a multirotor aircraft based on the size of the attraction domain was proposed and studied. Using the fast domain of the attraction size estimation technique, both the geometric parameters and parameters of the controller that expand the size of the domain were searched. By applying the proposed optimization method, named S- and C-steps, a hexarotor-type aircraft that can deal with a larger deviation from an equilibrium point compared with the original aircraft was obtained.

In addition, the proposed method can be efficient in optimizing multirotor aircraft in the forward-flight state. The reduction of the head-up pitching moment that limits the cruise speed of a multirotor aircraft can be achieved by optimizing the geometric and control parameters. Although the optimization will be useful for

various eVTOL aircrafts, the aerodynamic interaction between the rotors should be modeled. The authors will continue to improve the proposed method in future studies.

Received: January 13, 2023

Accepted: March 6, 2023

## References

- [1] Mantovani, J., Cavalhieri, C. P., Carou, C. B. and Gramani, M. F. : "Multicopter UAV as a natural disaster monitoring tool in Brazil," *Proceedings of EGU General Assembly 2019*, Vienna, Austria, p. 11431, 2019.
- [2] Amazon Prime-Air website, <https://www.aboutamazon.com/news/tag/prime-air>, accessed on Jan. 9, 2023.
- [3] SoftBank News, [https://www.softbank.jp/en/sbnews/entry/20200914\\_01](https://www.softbank.jp/en/sbnews/entry/20200914_01), accessed on Feb. 10, 2023.
- [4] Ehang official website, <https://www.ehang.com/index.html>, accessed on Jan. 9, 2023.
- [5] Volocopter official website, <https://www.volocopter.com>, accessed on Jan. 9, 2023.
- [6] Borenstein, J. : "The HoverBot—An electrically powered flying robot," 1992.
- [7] Cutler, M., Ure, N. K., Michini, B. and How, J. P. : "Comparison of fixed and variable pitch actuators for agile quadrotors," *Proceedings of ALAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2011.
- [8] Tadokoro, S. : *Disaster Robotics*, Chapter 3, Springer, Cham, 2019.
- [9] Horibe, T., Zhou, B., Hara, S. and Tsubakino, D. : "Quantitative measure for nonlinear unstable systems based on the region of attraction and its application to designing parameter optimization inverted pendulum example," *Advanced Robotics*, Vol. 32, No. 8, pp. 399–410, 2018.
- [10] Yamaguchi, K. and Hara, S. : "On geometric parameter optimization method for quad tilt-wing UAV based on indirect size estimation of domain of attraction," *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 1678–1687, 2021.
- [11] Yamaguchi, K. and Hara, S. : "Quasi-simultaneous optimization of geometric parameters and controller for non-linear systems using indirect size estimation of domain of attraction," *Proceedings of SICE Annual Conference*, Kumamoto, Japan, Sept. 5, 2022.
- [12] Yamaguchi, K. and Hara, S. : "Quasi-simultaneous optimization of geometric parameters and controller for spacecraft and aircraft via size expansion of the domain of attraction," *Proceedings of The 59th Japan Society for Aeronautical and Space Science Chubu Kansai Joint Conference*, online, Nov. 19, 2022.



**Kohei Yamaguchi**

KOHEI YAMAGUCHI received Ph.D. degree in electrical engineering from Kyoto University, Kyoto, Japan, in 2017. From 2017 to 2018, he was a Research Assistant Professor with the Department

of Aerospace Engineering, Nagoya University. Since then, he has been an Assistant Professor with the Department of Aerospace Engineering, Nagoya University.

E-mail: kohei.yamaguchi@mae.nagoya-u.ac.jp



**Susumu Hara**

SUSUMU HARA received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Keio University, Japan, in 1992, 1994, and 1996, respectively. In 2000, he joined the faculty of Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan. In

2008, he joined the faculty of Nagoya University, Nagoya, Japan, where he is currently a Professor with the Department of Aerospace Engineering.

# 消防におけるドローンリモート技術の概念構想 (ConOps) の構築と社会実装課題の抽出

佐々木 一<sup>\*1</sup>, 榎野 尊<sup>\*2</sup>, 寺村 良寛<sup>\*2</sup>, 秋本 修<sup>\*3</sup>, 鈴木 真二<sup>\*1</sup>

東京大学未来ビジョン研究センター<sup>\*1</sup>

株式会社アイティアイディ (ITID)<sup>\*2</sup>

東京大学大学院工学系研究科<sup>\*3</sup>

人が立ち入ることが困難な環境へのアクセスを可能とするドローンリモート技術はそのシステムを構成する要素技術の急速な進展によって広い用途での可能性が構想されている。リスクの高い環境での運用が前提となる防災や災害状況把握を目的とした実用化はその構想段階において社会システムとの十分な調和を目指す必要がある。欧州航空安全機関 (EASA) では Specific カテゴリに部類される飛行ミッションのリスク評価手法の最上流において概念構想 (Concept of Operations: 以下 ConOps) の提示が求められている。我が国でも 2022 年の改正航空法の施行により一定の制度設計がなされた一方で、技術的社会的双方の概念構想の提示については現時点では運用者の個別対応に委ねられており十分な事例が存在しない。本研究では、ビル火災における複数ドローンの消火活動支援をケースとしシステムズエンジニアリングに基づいた ConOps の構築を試みると同時にこの社会実装において検討すべき概念検討項目、技術検証項目、事業検証項目の抽出を実施した。ConOps 構築のガイドラインが実現することは、必要となる技術的要件、サービス要件、社会的制約などについて運用者とステークホルダーとの合意形成を得るプロセスが円滑となりドローンリモート技術の社会実装に貢献するものである。

**Keywords:** 概念構想, ConOps, 消防, ドローンリモート技術, 社会実装課題

## Construct a Concept of Operations (ConOps) and Identify Social Implementation Issues for Use of Drone-based Remote Technology in Firefighting

Hajime Sasaki<sup>\*1</sup>, Takeru Kayano<sup>\*2</sup>, Yoshihiro Teramura<sup>\*2</sup>, Osamu Akimoto<sup>\*3</sup>, Shinji Suzuki<sup>\*2</sup>

Institute for Future Initiatives, The University of Tokyo<sup>\*1</sup>

ITID, Ltd.<sup>\*2</sup>

School of Engineering, The University of Tokyo<sup>\*3</sup>

The rapid development of elementary technologies for drone-based remote technology, allowing access to environments that are difficult for humans to enter, has opened the door to a wide range of potential applications. The practical use of drones for disaster prevention and monitoring in high-risk environments needs to be fully harmonized with societal systems at the design stage. The European Aviation Safety Agency (EASA) requires the submission of a Concept of Operations (ConOps) at the beginning of the Specific Operation Risk Assessment (SORA) process for flight missions in Specific category. Japan is also required to submit a revised aviation risk assessment plan by 2022. While a certain institutional design has been established in Japan with the implementation of the revised Civil Aviation Law in 2022, the submission of concepts for both technical and social aspects is currently left to the individual response of operators. In Japan, the construction of ConOps in drone-based remote technology is limited in terms of methods and

items, and examples are also limited. In this study, we attempted to construct ConOps based on the systems engineering using the case of firefighting support by multiple drones in an urban building fire. At the same time, we extracted items for conceptual study, technical verification, and business verification that should be considered in social implementation. The realization of these guidelines will facilitate the process of consensus building between operators and stakeholders on the necessary technical requirements, service requirements and social constraints. It will contribute to the social implementation of drone-based remote drone technology.

**Keywords:** Concept of operations, ConOps, Firefighting, Drone-based remote, Social implementation issues

## 1. はじめに

人が直接アクセスすることのできない遠隔地や特殊環境での情報収集や探査を目的とするリモート技術の可能性が拡大しつつある。宇宙開発における月面や小惑星探査をはじめとした探査機、体内に対する非侵襲的なアプローチとしての遠隔制御や、プラントにおける無人航空機（ドローン）による情報収集や点検などが挙げられる。これらのリモート技術によって我々は、対象となる場所の距離、物理的サイズ、危険性といった属性を理由に直接侵襲することのできなかつた対象へのアクセスを可能としてきたが、近年のロボティクス、センシング、XR、ネットワークとAIなどの要素技術の統合によって人間能力の飛躍的拡張を支える技術群としてより広い目的を達成させることに寄与している[1]。

なかでもドローンによる防災や災害状況把握を目的としたリモート技術は市民に対して便益や重要性が伝わりやすく社会的需要が高いことかが指摘されており、北米市民を対象とした調査結果ではドローンの保全活用のうち最も支持が高い領域として消火活動や救助を挙げている[2]。実際に北米では近年の連邦火事管理技術法の整備によってドローン配備が進められており、オレゴン、カリフォルニア、コロラドを中心に消火活動に用いられつつある[3]。また自動自律制御によって火災現場に急行し、火災現場における初動対応をサポートするシステムなどが実用化されている[4]。また、日本においても消防関係者の98%が火災初期における指揮活動時のドローン活用が有効と回答した報告がされ、その期待が高いことが示された[5]。実際の運用としても2020年には静岡県焼津市にて国内初のドローン隊が整備され[6]、2023年1月には山口県岩国市では山火事の状態把握への活用を目的として赤外線カメラやスピーカーを搭載したドローンの配備が行われている。2021年静岡県熱海市土石流災害において実際に有効性が確認されるなど[7]、昨今の災害の激甚化を背景に災害時におけるオペレーションとして期待されている。2022年4月時点で、全国の消防本部のうち59.4%（429消防本部）がドローンの導入がなされている状況にある[8]。国土交通省は大規模自然災害時の初動対応の在り方として、無人航空機による虫の目の必要性やリアルタイムな情報伝達の必要性について指摘している[9]。我が国では、2022年に人口密集地上空の目視外飛行（レベル4）が可能となったことを受け、有事におけるドローンを用いたリモート技術の活用の幅は広がる。

ドローンリモート技術のように、複数の要素技術から構成される技術システムが実社会に活用されるためには、既存の社会システムとのシームレスかつ柔軟に協調することが理想的である。ドローンを活用したリモート技術が現実的に活用されつつある背景には、近年の低遅延で高速な通信技術や、高性能なカメラの搭載、人工知能、小型大容量なバッテリーの普及といった要素技術の進展が存在する。これら個別技術システムが複雑になる中、要求されるシステム機能について、運用者はより理解をすることが求められる。Aydin (2019) はドローンに対する知識のずれそのものが運用におけるリスクであると指摘しており、調査によって特にドローンの用途に関する認識が不十分であったことを示している[10]。ドローンリモート技術のよう

に社会への影響が大きい技術システムの実装には便益とリスクの双方の理解が求められる。

いくつかの規制当局は明示的に、運用者が利用シーンごとにその目的やビジョン、要求される機能はもとより周辺の社会システムを含めたステークホルダーに対して理解することを要求しつつある。欧州航空安全機関 (EASA) では、リスクが高いカテゴリ (Specific) に分類される飛行ミッションのリスク評価手法 (Specific Operation Risk Assessment) の最上流において、概念構想 (Concept of Operations: 以下 ConOps) の提出が求められている [11]。一方で、我が国では、2022 年の改正航空法の施行により飛行申請に加えて機体登録や操縦ライセンス登録の義務化など一定の制度設計がなされた。これにより、ドローンリモート技術においても、規制とバランスのとれたイノベーションの推進に寄与すると考えられる。ただし、個々のミッションに対して求められる技術的社会的なリスクアセスメントに関しては現時点では運用者が個別に対応することが求められており、十分な事例も存在していない。Humble (2014) は保全のためにドローンを使用することの社会的影響の可能性については十分な注意が払われていない [12] と指摘している。ConOps の取り組みについて特定のケースに焦点を当てた議論を行うことに一定の意義がある。

ConOps は、要求の変化に対応するシステム全体としての利用・運用の在り方とそれに伴うコンポーネントとしての運用のあり方や相互依存関係をもとにした概念である。IEEE によれば、ConOps はシステム全体の定量的および定性的なシステム特性を、ユーザー、バイヤー、開発者、およびその他の組織要素 (トレーニング、施設、人員配置、メンテナンスなど) に伝達するためのものであるとしている [13]。また、嶋津らは IEEE が示す ConOps は、(a) 対象領域の現在の状態 (As is) と、課題が解決した際の同領域のあるべき状態 (To be) を明示し、後者の実現のために何を作る必要があるかを明示するものとしている [14]。また、米国の FAA が発行するドローン運航管理システム (UTM: Unmanned Aircraft System Traffic Management System) では、ConOps の目的はエコシステムの開発と運用に関するビジョンを提示し関連する運用および技術要件を説明するものであるとしている [15]。すなわち ConOps は、システムを運用するにあたってそのコンセプト (概念) と目的ならびにその実現手段を記述するものである。ConOps の構築を通じ、関係者間で周辺システムの理解やステークホルダーごとの要求事項の明確化をすることで運用リスクに係る視点について合意形成を得、ドローンリモート技術の社会実装のための課題を抽出することに寄与する。

本研究は、有事におけるリモート技術のなかでも特に市街地ビル火災における複数ドローンの消火活動支援をケースとし、システムズエンジニアリングの考え方に基づいた基本構想の構築を試みる。当該ケースに資するシステムを社会実装する際に必要となる技術的要件、対応するサービス要件、社会的制約を明らかにするもので、研究開発段階においてシステム要求を明確化するための ConOps 構築プロセスの重要性と社会実装における課題を抽出することの意義を議論する。

## 2. 手 法

### 2-1 概 要

本研究は主に ConOps の上流工程に着目し具体的には図 1 に示すとおり大きく 3 つの段階のステップによって構成する。第一ステップはスコープ (適用対象) とコンテキスト (ステーション/周辺システム) の構築である。第二ステップは調査および専門家ヒアリングを通じて業務フロー (As is/To be) の構築を行う。第三ステップとして、得られたシーン (To be) から、個別のユースケースシーンを構築する。ワークショップとヒアリングを通じた合意形成を行い、それぞれの議論を元に概念検証、技術検証、事業検証項目を抽出することで、ドローンリモート技術の社会実装に資する課題を得る。

ConOps を構成するそれぞれの要素の構築および社会実装課題の抽出は、実際にドローンリモート技術の研究開発をしているメンバーによるディスカッションをベースとして実施した。具体的には国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託研究である「革新的ドローンリモート技術の社会実

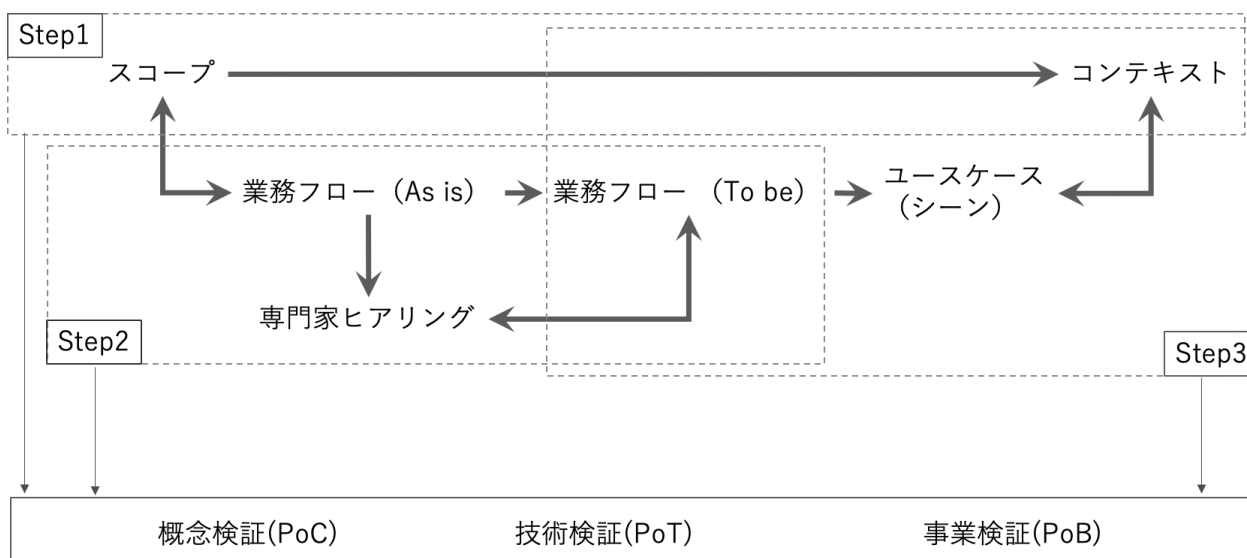


図1 ドローンリモート技術における ConOps 上流構築と検証項目抽出概要

装に関する研究開発」(以下 NEDO ドローンリモートプロジェクト) コンソーシアムメンバーによるディスカッション形式のワークショップによって合意形成を図った。また、ワークショップのファシリテーションはシステムズエンジニアリングに基づき(株)アイティアイディ (ITID) および(株)電通国際情報サービス (ISID) の主導により行った。

## 2-2 手順

第一ステップは、スコープ、コンテキストで構成される。まず、スコープの構築では、適用対象としてなぜ消防(ビル火災)に着目するのかを整理し「消防」と親和性のある分野/応用できうる分野/関連性のある分野を整理する。消防に焦点を当てる本ケースの位置づけを明確にするため、日常性と実用性の軸によって整理を行った。これによって、消防から応用できうる異分野を特定しその関係性の理解に務める。次にコンテキストの構築では、スコープの位置付けやその後のケースを踏まえて、関連するステークホルダーや関係し得る周辺システムを確認する。

第二ステップでは、スコープならびに現在の消防活動の情報を元に消火活動のシーン (As is) を作成した。得られた現在の消防のシーン (As is) に基づき、消火活動が現在抱えている課題を抽出し、またドローンリモート技術が提供する可能性について、消防関係者に対してヒアリングを行った。専門家ヒアリング対象者は表 1 に示すとおりビル火災の専門家ならびに災害の専門家を選定した。ヒアリングのテーマとして、消防業務の実態とニーズ/課題に関するもの(テーマ 1)と、ドローンリモートの活用におけるニーズ/課題、必要要件に関するもの(テーマ 2)の 2 つのテーマについてヒアリングを行った。これら専門家ヒアリングによって抽出された現状課題を解決するためのドローンリモート技術によるユースケースシーン (To be) の作成を行った。

第三ステップでは、業務フロー (To be) ならびに第一ステップで構築したコンテキストを元に、各ユースケースシーンにおけるステークホルダーの明確化を整理し、それぞれの要求事項を抽出した。

これら ConOps (運用構想) の構築の中で、社会実装まで見据えて検証していくべき事項を抽出した。検証事項は、ユーザーに便益を提供できているか、想定どおりの活用ができているかといったコンセプト検証 (Proof of Concept : PoC)、採用技術が妥当であるか技術的に成立するかといった技術検証 (Proof of Technology : PoT)、最後に事業としてあるいは法規制において成立するかといった事業検証 (Proof of Business : PoB) の観点で抽出した。検証分類を表 2 に示す。



表 1 専門家ヒアリング概要

ヒアリング対象	消防庁広域応援室	消防庁消防研究センター
ヒアリング日時	2022年8月5日	2022年7月15日
消火活動業務の実態に関するヒアリング質問項目（テーマ1）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 通報を受けて出動するまでの間に取得する必要がある情報</li> <li>・ 現場の情報把握で隊員が気を付けていること</li> <li>・ 環境の定量情報</li> <li>・ 現場到着後の情報把握の課題</li> <li>・ 各種情報はどのよう伝達され判断がなされるのか</li> <li>・ 消防活動における典型的な体制</li> <li>・ 消防活動におけるデジタル活用について</li> <li>・ 組織間での意思疎通について</li> </ul>	
ドローンリモート技術の活用におけるニーズと課題に関するヒアリング質問項目（テーマ2）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 隊員の出動前にドローンで先行把握できると有効な情報</li> <li>・ 火災現場および経路でのドローン飛行において考慮すべき環境条件</li> <li>・ 火災現場特有の環境（煙、熱等）において有用なセンシング技術</li> <li>・ 火災現場におけるドローンを用いた活用に対する現場の意識</li> <li>・ ドローン活用の課題</li> <li>・ 音についての弊害</li> <li>・ 消防以外の他組織との連携について</li> </ul>	

表 2 検証分類

	PoC : Proof of Concept (概念検証)	PoT : Proof of Technology (技術検証)	PoB : Proof of Business (事業検証)
Validation (妥当性確認) Do the right thing	例) 便益はあるか	例) 用いる技術は妥当か	例) 事業として適切か
Verification (成立性検証) Do the thing right	例) 想定通り活用できるか	例) 技術的に成立するか	例) 事業として成立するか

### 3. 結 果

スコープについて議論するにあたり消防におけるリモート技術の要件を明確にした。ワークショップを通じてスコープについて議論された結果を図2に示す。スコープは日常性と実用性の2軸で整理した。本ケースであるビル火災における消防活動が位置する結果と他のケースとの相対的な関係を整理した。これによって消防のケースで必要となることが想定される中核技術の適用可能性についても整理した。例えば、刻一刻と変化する火災現場を想定した複数ドローンの協調飛行技術やリアルタイム3D化技術は「大規模災害」「警備」「点検」「測量・調査」「建設」「倉庫・工場」など目視外環境における状況把握でも活用が見込める。また、火災現場であらゆる種類の人を識別するためのAI学習技術は、要救助者の探索が必要な「大規模災害」や、不審者の見極め等が必要な「犯罪対応」や「警備」での活用が見込める。消防のケースは大規模災害に次いで、安全安心の実現のために必要な非日常的なケースである。

また、ドローンリモート技術の特長を生かしやすい観点として、高所や内部の状況が人の目視では確認が難しい点、立地や火災箇所等によって対応方法が変わるため、消防隊員の現場到着前の早期の情報収集が重要である点、要救助者、避難者、野次馬、消防隊員など不特定多数の人がいる点が挙げられた。これらの特徴を活かす観点で、消防におけるスコープのなかでも具体的にはビル火災に焦点を当てることで合意を得た。表3にスコープ（適用分野）での議論において抽出された社会実装課題と検証項目について示す。

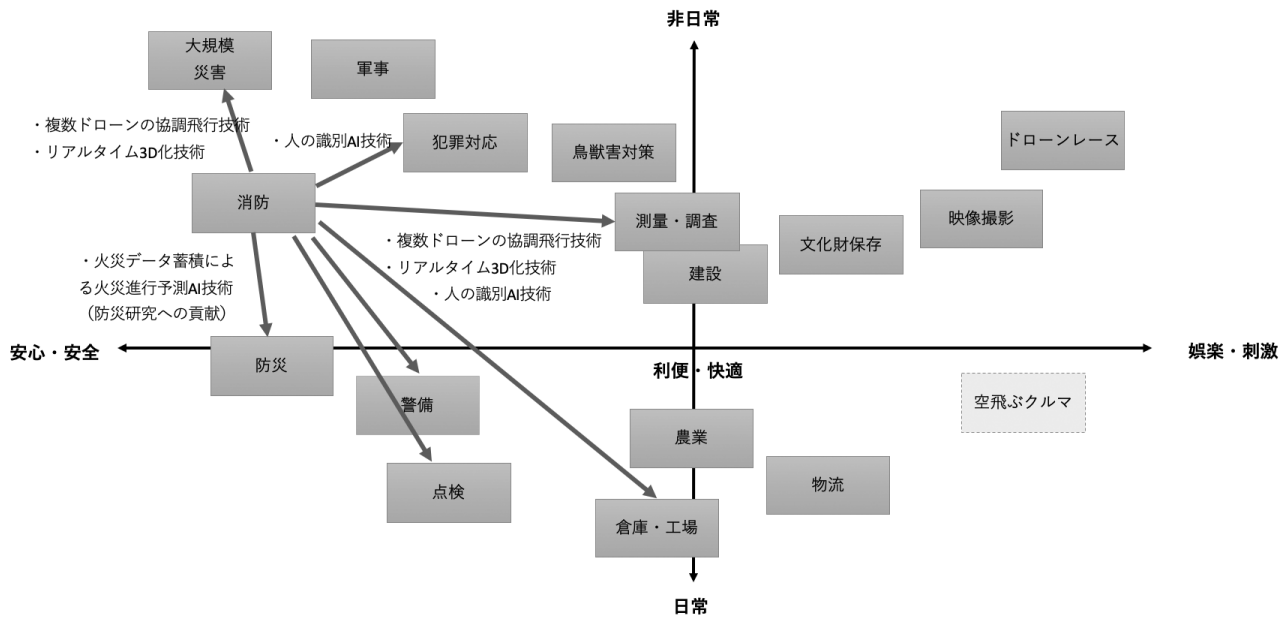


図2 スコープ（適用分野）

表3 スコープ（適用分野）構築時に抽出された社会実装課題と検証項目

社会実装課題	検証項目	検証分類
・経済波及効果を生み出すためのドローンリモート技術の適用先の洗い出しと見極め。	・消防以外の適用先の仮説に対してドローンリモート技術の便益が見込めるのかどうかの検証。	PoB
	・適用先において事業として成立するかどうかの検証（市場規模や収支の試算等）	PoB

ステークホルダーの議論では、上記で設定されたビル火災に焦点を当てつつもその周辺システムが抱える技術的課題、社会的課題を整理する。まず、ドローンリモートシステムの構成要素としてセンサー搭載ドローンの周辺に操作者、解析者、リモートシステムとしてのVR空間、低遅延、高速、大容量な回線が不可欠となる。これらの技術的なシステムの周辺として革新的ドローンリモートシステムを定義した。これらを整理した図を図3に示す。また、表4にコンテキストでの議論において抽出された社会実装課題と検証項目について示す。

現在のビル火災における消火活動の業務フロー（As is）を作成した結果を図4に示す。時間軸としての出動、現場状況把握、消防活動の流れと、空間軸としての火災現場と移動経路ならびに本部（消防署）に分けて整理した。

業務フロー（As is）を元に消火活動業務の実態に関するヒアリング結果をAppendix 1に示す。またドローンリモート技術の活用におけるニーズ/課題に関するヒアリング結果をAppendix 2に示す。表中のイタリックは実際の発言を示す。

現在の消火活動業務フロー（As is）とヒアリング結果を元に、消防活動のフローの中の主要シーンを3段階に分割した。まず、出動命令と同時に隊員よりも先んじてドローンが出動することが求められるため複数台ドローンの出動・飛行（シーンA）のシーンが必要となる。次に、実際に現場に到着し情報収集をするためのシーンとして複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム3D空間構築（シーンB）が必要となる。また、データ収集に留まらずドローン自身が消火活動を支援する要求があることから、消火活動・救助活動・避難誘導といったシーンとしてドローンによるビル火災消防支援（シーンC）が想定される。その

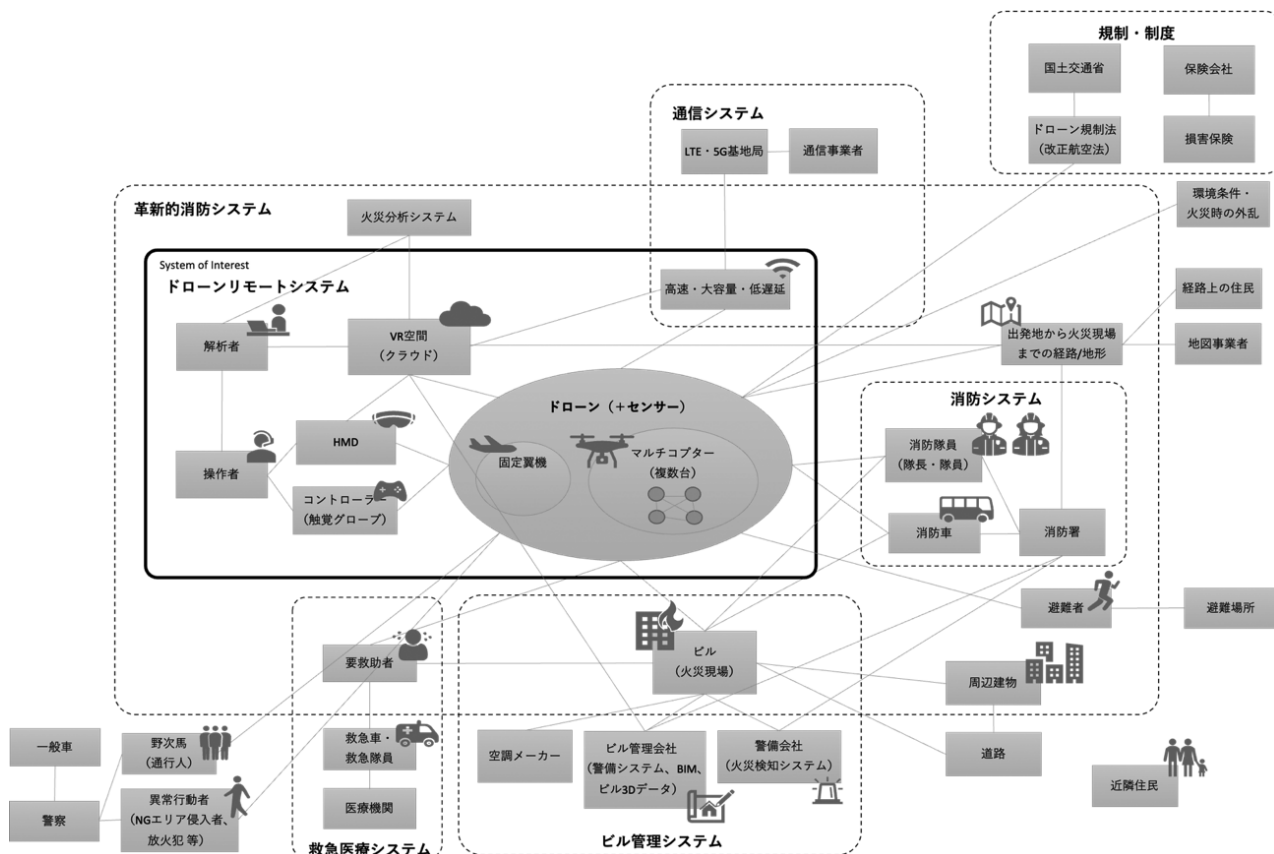


図3 コンテキスト

表4 コンテキスト構築時に抽出された社会実装課題と検証項目

社会実装課題	ステークホルダー	検証項目	検証分類
<ul style="list-style-type: none"> <li>社会実装に向け対応すべき各種規制や制度の整理</li> <li>規制の整備/改正など行政への働きかけ</li> </ul>	ドローン規制・航空 改正法・監督官庁	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状の規制がどの程度影響するか</li> <li>規制改正による運用への影響</li> </ul>	PoB
<ul style="list-style-type: none"> <li>現状、一人の操縦者が操縦できる機体数の制約の規制がある。</li> </ul>	ドローン規制・航空 改正法・監督官庁	<ul style="list-style-type: none"> <li>1対多飛行の運用を実現するための技術検証とリスクアセスメント</li> </ul>	PoT
<ul style="list-style-type: none"> <li>墜落等による二次災害に備えた社会保障の検討</li> </ul>	損害保険	<ul style="list-style-type: none"> <li>社会保障制度の構築とその影響</li> </ul>	PoB
<ul style="list-style-type: none"> <li>LTE/5Gの上空利用に伴う地上への影響を踏まえた対策検討(技術的解決, 規制対応)</li> <li>通信速度の技術的限界を踏まえた「リアルタイム性」の検討(実現ステップの明確化)</li> <li>サイバーセキュリティ対策の検討</li> <li>通信が届かない場所での対策</li> </ul>	通信事業者	<ul style="list-style-type: none"> <li>市街地の5G環境や通信が十分届かない環境等における運用検証</li> <li>サイバーセキュリティの安全性担保</li> </ul>	PoT
<ul style="list-style-type: none"> <li>ドローンの安全性については社会的理解が十分とはいえないことから地域住民の理解を得るための取り組み。</li> </ul>	近隣住民・避難場所・ その他市民	<ul style="list-style-type: none"> <li>公の場でのデモンストレーションによる市民の反応の検証</li> <li>住宅街など住民の近くでのドローン実験等による受容性の検証(アンケートやインタビューで懸念点や対策案を把握)</li> </ul>	PoC
<ul style="list-style-type: none"> <li>撮影画像に関するプライバシー問題</li> <li>騒音に対する対応検討</li> </ul>	近隣住民・避難場所・ その他市民	<ul style="list-style-type: none"> <li>住宅街などでの実験等を通して市民が抱くプライバシー懸念の検証</li> </ul>	PoC

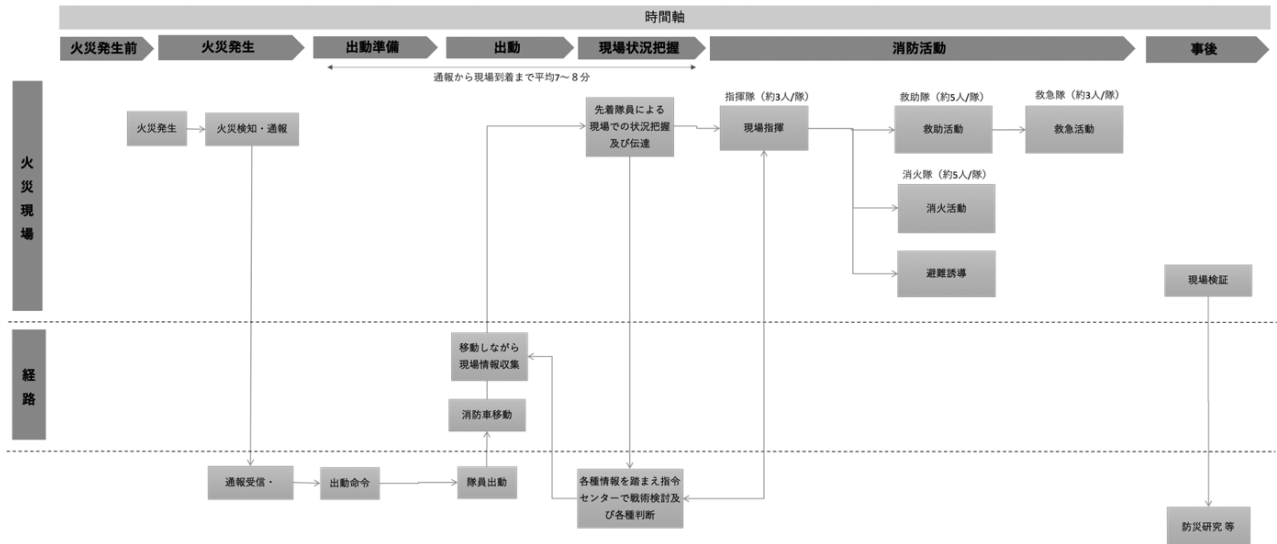


図4 現在の消火活動業務フロー (As is)

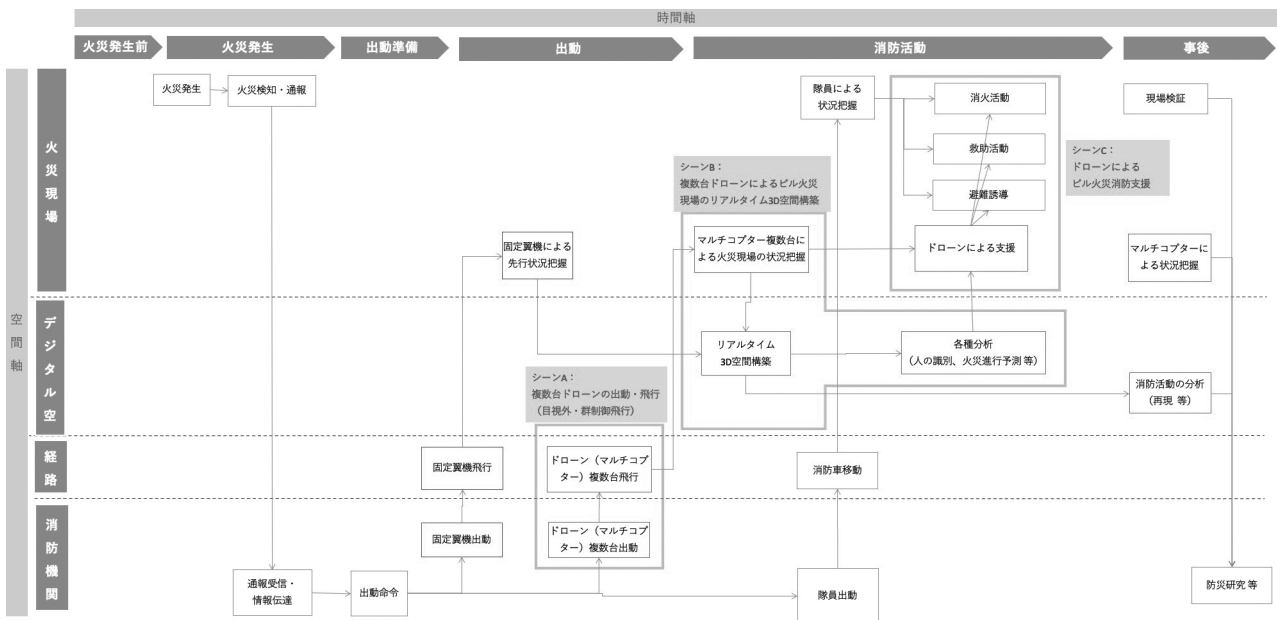


図5 業務フロー (To be)

後の事後処理は防災研究、あるいはトレーニングといった可能性もあることが挙げられた。これらの業務フロー (To be) を作成した結果を図5に示す。

作成した業務フロー (To be) をより具体化させるための専門家ヒアリングを行った結果を Appendix 3 に示す。回答はいずれも消防庁広域応援室である。表中のイタリックは実際の発言を示す。業務フロー (To be) の構築ならびに対するヒアリングを元に抽出された社会実装課題と検証項目を表5に示す。

得られた業務フロー (To be) および専門家ヒアリングの結果を元に3つのシーンにおけるステークホルダーごとの要求を整理した結果を示す。図6にはユースケースA (複数台ドローンの出動・飛行) の概念図を示した。表6には専門家ヒアリング結果ならびにコンテキスト (図3) を元に、ユースケースシーンAにおけるステークホルダーの要求を整理した。

またユースケースシーンA構築時に抽出された社会実装課題と検証項目を表7に示す。

図7にはユースケースシーンB (複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム3D空間構築) の概

表5 業務フロー (To be) 構築時に構築時に抽出された社会実装課題と検証項目

社会実装課題	検証項目	検証分類
・ビル内部の自律飛行&センシング技術の開発	・ビル内部の自律飛行&センシングの技術検証	PoT
・ビル火災を再現したサイバー空間は消防活動のシミュレーション、トレーニングとしての利用可能性	・消防活動のシミュレーションやトレーニングでの活用の有用性を確認するための検証	PoC
・ドローンの使い方を考慮した搭載センサーの選定が必要。(重量, 伝送レートの問題によりセンサーの搭載数に制限が生じる。)	・各ユースケースシーンにて適したセンサーを見極めるための技術検証(複数ドローンの使い分け, 移動方法, 時間差利用, 充電, センサーの乗せ換えなど踏まえた使い方を定義し, 各ドローンに搭載するセンサーの選定が必要(カメラ, ミリ波レーダー, LiDAR等))	PoT
・それぞれのシーンにおけるマルチコプター/固定翼機の使い分け方の深堀検討(特徴, 飛行可能時間を踏まえた対応可能距離, ランニングコスト等)	・消防現場を想定した活用, 業務フローの妥当性検証	PoC
・固定翼機を利用する場合の離着陸方法, 状況把握方法(上空を巡回しながらの計測等)の深堀検討	・VTOL型も含めた機体の使い分けの見極め	PoT

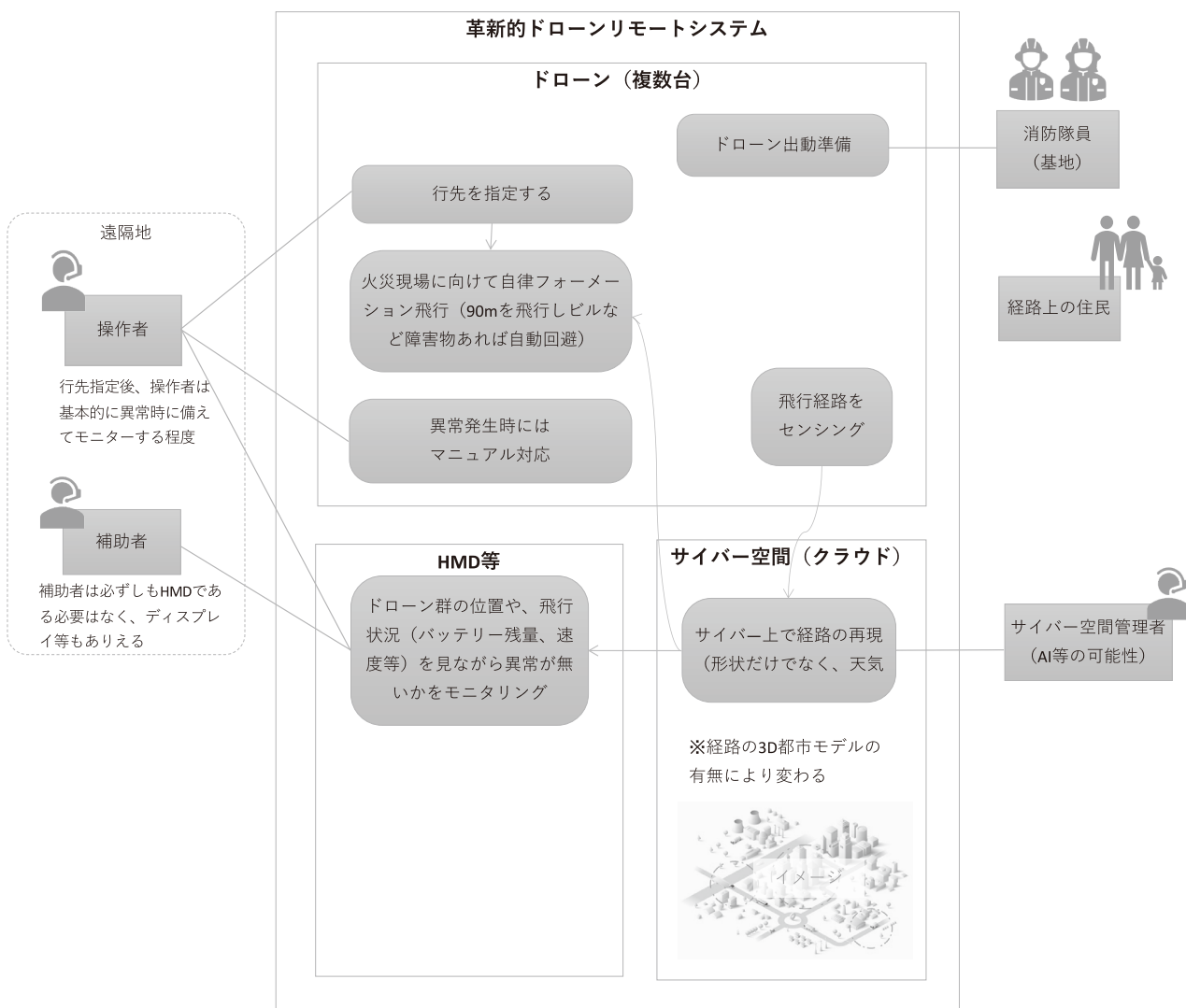


図6 ユースケースシーン A (複数台ドローンの出動・飛行)

表6 ユースケースシーン A（複数台ドローンの出動・飛行）におけるステークホルダーの要求

ステークホルダー	要求
操作者	マニュアル操作はせずに済ませたい。マニュアル時の操作ミスもカバーして欲しい。遠隔でも違和感なく操作できてほしい。
補助者	異常は未然に検知したい（異常に繋がり得る外乱を把握したい）。
消防隊員（基地）	通報があったらすぐにドローンが出動できる状態にしないとイケない。
経路上の住民	騒音は困る。絶対に落ちてほしくない。もしくは落ちても安全なルートを通ってほしい。
サイバー空間管理者	素早く（リアルタイムに）高精度なサイバー空間を再現したい。

表7 ユースケースシーン A（複数台ドローンの出動・飛行）構築時に抽出された社会実装課題と検証項目

社会実装課題	検証項目	検証分類
・複数ドローンの操作に関する規制対応の検討（再出）	・各種規制対応策の運用が可能かどうかの検証。	PoB
・バーチャル空間上における風速，気温，気圧，天気などの情報の再現	・バーチャル空間上で気候を再現することによるニーズと意義の検証。	PoC
	・技術的な再現可能性，精度の検証。	PoT

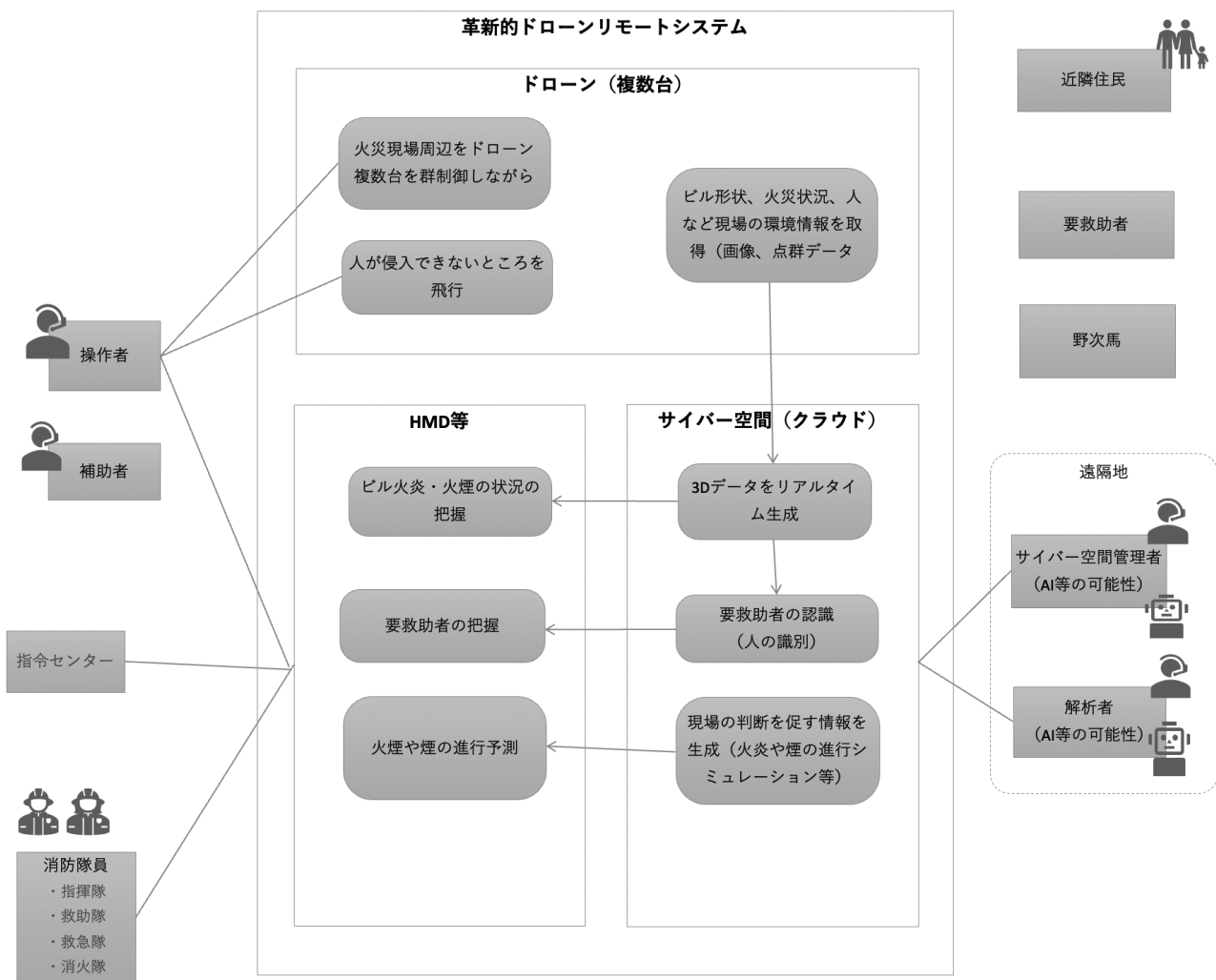


図7 ユースケースシーン B（複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム 3D 空間構築）

念図を示した。表 8 には専門家ヒアリング結果ならびにコンテキスト (図 3) を元に、ユースケースシーン B におけるステークホルダーの要求を整理した結果を示す。

ユースケースシーン B (複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム 3D 空間構築) 構築時に抽出された社会実装課題と検証項目を表 9 に示す。

表 8 ユースケースシーン B (複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム 3D 空間構築) におけるステークホルダーの要求

操作者	過酷な環境でも衝突や制御不能など事故に至らないこと。3D データ生成のために必要情報を最短で取得できるよう飛行したい。
指令センター	消防作戦の立案に必要なあらゆる情報を素早く把握したい①火災や被害の状況等 (要救助者の有無, 負傷者の有無, 火災の場所 (何階建て建物の何階で延焼中), 火災の有無, 火災の原因, 煙の状況, 色, 火点付近の活動危険, 周辺住民等の避難状況等) ②建物 (建築) 関係 (建物の構造・用途, 平面図, 建築設備, 消防用設備等の設置状況, 作動状況, 周辺建物との距離及び延焼危険) ③建物 (建築以外) 関係 (周辺道路の状況, 危険物, 阻害物質の有無, 種類と量)
消防隊員	三大危険を迅速に把握したい。(要救助者の状況: 有無・人数・位置・状態)。延焼の可能性: 火災の方向, 周辺建物の状況等。隊員の危険の可能性: 可燃物・危険物の有無等)。人が目視等では確認できない情報を把握したい。各種情報及び作戦を隊員と迅速に共有したい。少人数で消防活動を行えるようにしたい。
近隣住民	ドローンが撮影する画像に映りたくない。
サイバー空間管理者	素早く (リアルタイムに) 高精度なサイバー空間を再現したい。
解析者	素早く/高精度な解析結果を算出したい

表 9 ユースケースシーン B (複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム 3D 空間構築) 構築時に抽出された社会実装課題と検証項目

社会実装課題	検証項目	検証分類
・ビル内部を含めたそれぞれの環境における状況把握方法の深堀検討 (火煙下でのミリ波レーザーによる要救助者把握, 防犯カメラ活用によるビル内状況把握等)	・どのような状況がどのような方法で把握できれば有用かの確認 (デモンストレーションおよび専門家ヒアリング) ・各種の状況把握方法 (センシング⇒バーチャル空間での再現) が実現可能かどうかの技術検証	PoC PoT
・ドローンリモート技術を活用する場合のあるべき消防体制の検討必要	・消防現場を想定したシミュレーションおよびトライアルによる体制の検証	PoC

図 8 にはユースケースシーン C (ドローンによるビル火災消防支援) の概念図を示した。表 10 には専門家ヒアリング結果ならびにコンテキスト (図 3) を元に、ユースケースシーン C におけるステークホルダーの要求を整理した結果を示す。

ユースケースシーン C (ドローンによるビル火災消防支援) 構築時に抽出された社会実装課題と検証項目を表 11 に示す。

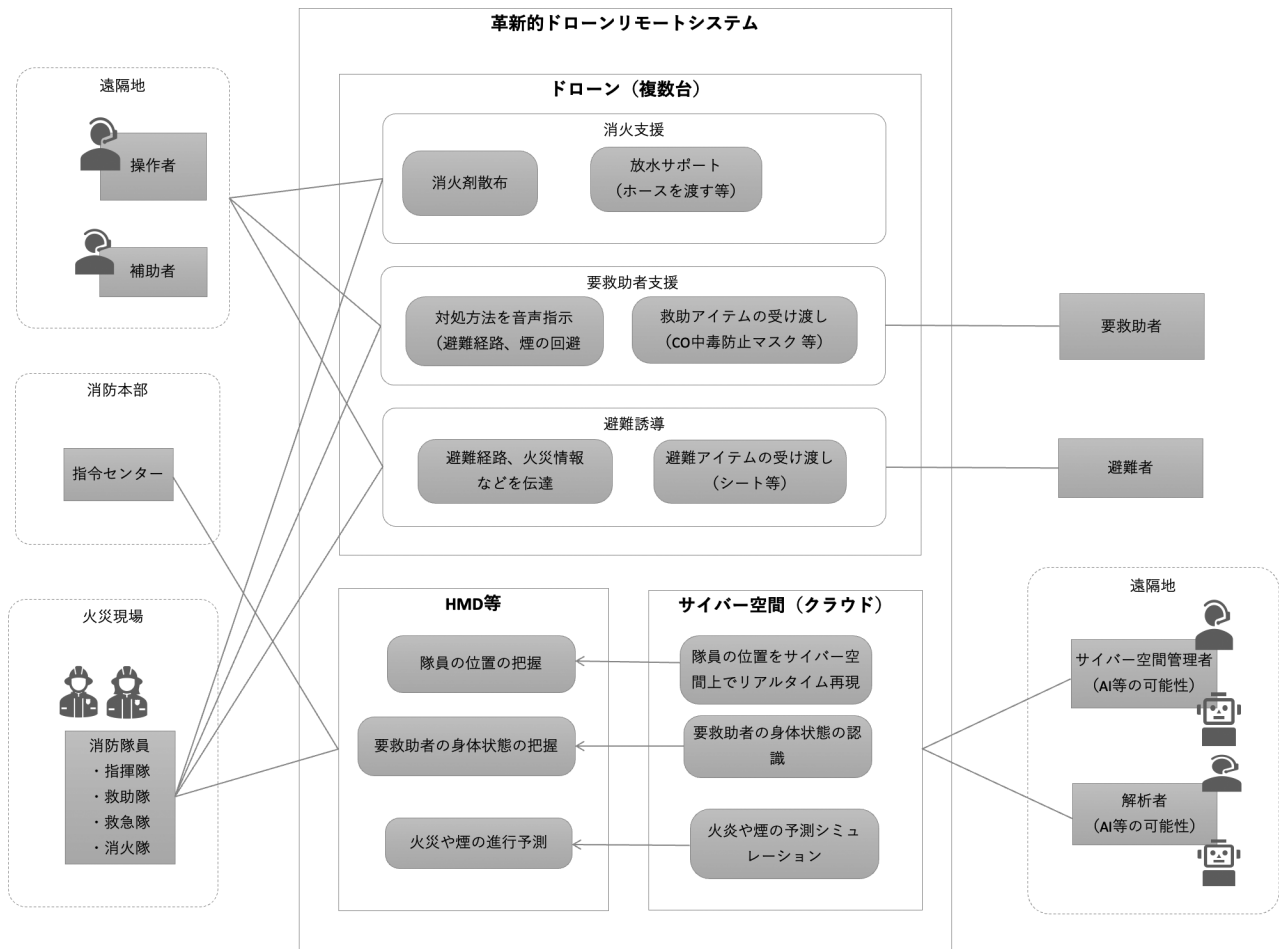


図 8 ユースケースシーン C（ドローンによるビル火災消防支援）

表 10 ユースケースシーン C（ドローンによるビル火災消防支援）におけるステークホルダーの要求

<p>操作者/補助者</p>	<p>経験が浅くても容易に操縦したい。他のドローンや有人飛行機などと衝突しないようにする必要がある（報道機関、学術関係者、一般人などがドローンを飛ばしている場合あり）。</p>
<p>消防隊員</p>	<p>全隊員の位置を把握し、最適な作戦指示を行いたい。人員不足を解消したい。消火を効果的に行いたい。（効果的な場所に放水、隊員の手を要することなく放水、届かない場所に消火剤散布など）。要救助者を効果的に救助したい（対処方法を的確に指示、届かない場所でも救助アイテムを渡したいなど）。避難誘導（隊員が動かずとも半自動で避難経路を指示）。地域住民に非難されないようにしたい。地域住民にドローン活用についてネガティブな印象を与えたくない（墜落の懸念、騒音、プライバシー問題等）。関係機関（警察、自衛隊、県消防、消防庁、総務省等）と情報共有。現場の解釈で判断する必要がないよう明確な指示がほしい。</p>
<p>要救助者</p>	<p>自分の状況を伝えたい。どうすれば良いか教えてほしい。</p>
<p>サイバー空間管理者</p>	<p>3D 形状以外の情報もサイバー空間上で再現したい。</p>



表 11 ユースケースシーン C（ドローンによるビル火災消防支援）構築時に抽出された社会実装課題と検証項目

社会実装課題	検証項目	検証分類
・火災シミュレーション技術の開発（東京都など国内外で事例あり）	・火災シミュレーションの精度などの技術検証	PoT
・ドローン自体の騒音や現場の喧騒により、要救助者は音声による情報伝達が困難。	・実際の消防現場の騒音状況の把握調査 ・実際の消防現場で情報伝達方法を実験し成立性を検証	PoT
・バーチャル空間上に画像以外の情報を取得し再現。	・バーチャル空間上で再現する意義のある情報の検証	PoC
・ビル内部の情報（3D 構造、火災、煙、酸素や CO 濃度、温度、人の位置等）取得。	・画像以外の情報をバーチャル空間上で再現する技術検証	PoT

#### 4. 考 察

スコープ（適用分野）の構築において、ビル火災での活用を前提にドローンリモート技術のシステム開発を行うことによる異分野への波及効果について議論を実施した。火災現場という厳しい環境での運用が可能となれば広い可能性が見込めるが、その一方でリモート技術の社会実装のユースケースとして最初に行うべき適用分野としては要求水準が比較的高い。費用対効果やリスクとベネフィットの観点からも事業として成立するかといった事業構想計画の構想は重要な PoB の視点であるが、そのためにも政府とユーザーが一丸となってリスクアセスメントの指針を示すことが望ましい。

コンテキストの議論においては、ドローンリモートの技術システム周辺には多くのステークホルダーが存在することが関係者間で認識された。新規技術の社会実装のためには、個別の運用実施者と当局がコンテキストを理解し、社会システムに対する影響を議論しリスクアセスメントと対策を検討する必要があることが示唆される。ビル火災という有事のユースケースにむけた社会実装に目を向けるだけでなくドローン自体が社会で受け入れられるためには、有事であっても撮影画像のプライバシーやサイバーセキュリティを含む一般的なドローン活用に付随する課題の整備や社会の理解が不可欠である。

専門家ヒアリングでは現在の消火活動の業務フロー（As is）の事実関係の整理とドローンリモート技術に対する期待と課題について具体的な指摘を得た。特に初動では三大危険（要救助者、延焼、可燃物の有無）を迅速に把握することが重要であることから、ドローンによって消防車より先に到着し状況把握することの意義は高い。既存調査からも実際の隊員の期待が伺えていることがそれを裏付けている[5]。ヒアリングでは、ドローンの活用における現時点の大きな課題の一つが人員の不足であるという指摘が挙げられた。ドローンの習熟養成には一定の投資が不可欠であると同時に、経験に大きく左右されない操作方法についても技術的な要求として挙げられたことは、システム開発の上流において留意すべき事項である。一方で、現場で取得したデータを元にしたデジタルツインの構築の用途として教育・トレーニングの効果が高いという指摘も得られている。3D モデルによるトレーニングコンテンツの構築によってドローンリモート技術習熟者育成を促し、運用が広がることにより多様な現場データを元にしたコンテンツが創出されるような循環の構築が必要である。

また3段階に分けたそれぞれのユースケースで検討すべき議論が明確になった。ユースケース A（複数台ドローンの出動・飛行）は近隣消防施設から現場までの出動シーンを想定しており、出動ごとに毎回異なる経路によって飛行することが想定される。したがって、マニュアル操作で出動を行うことは現実的ではなく自律飛行によることが想定され、操作者や補助者は異常自体の検知にリソースを投入する必要がある。また経路上の住民の理解を得られやすい幹線経路をあらかじめ想定することが不可欠となる。ユースケース B（複数台ドローンによるビル火災現場のリアルタイム 3D 空間構築）では、実際のビル火災現場において 3D モデルをリアルタイムに構築し、必要な情報を収集するシーンを想定している。消防隊員は三大危険（要救

助者の状況、延焼の可能性、隊員の危機)に関する情報を最も必要としており、ビル火災におけるドローンの活用意義が高いシーンのひとつである。複数ドローンにより多角的に対象を撮像し、効率的な3Dモデルの構築を目指すシーンを想定している。このシーンでの社会実装における課題はドローンやセンサーの耐環境性はもちろんのこと、実際に実用に耐えうる環境がどの程度かといった情報が不可欠となる。ドローンの環境性能については現在消防において運用がなされている基準が指針となるが、LiDERやミリ波レーダーをはじめとした各種センサーが火災の煙環境のなかでどこまで実用に資するかといった実験が必要となる。また、得られたデータがどのように消防隊員に共有され意思決定が行われるかについての議論も同じく実環境に基づき行うことが望ましい。ユースケースシーンC(ドローンによるビル火災消防支援)は、リアルタイムに構築した3Dモデルをもとに、隊員が要救助者を発見することや、ドローン自身による消火活動が想定される。高出力かつ高ペイロードな大型ドローンによる放水や、救助物資搬送などはこのユースケースシーンに含まれる[16, 17]。また、ドローンが取得可能でありまた取得する意義のある情報の一つに音が挙げられる。集音マイクの搭載によって、声を上げる要救助者の発見が期待される一方で、実際のビル火災では喧騒や自身のノイズによって、どの程度の影響があるのかといった検証が不可欠となる。また、要救助者の特定には顔認識技術の搭載が必要となるが、同時に、要救助者でない者のプライバシーへの配慮も不可欠となる。Aydin (2019) はドローンに対する社会的受容の阻害要因としてテロによる使用とプライバシーの懸念を挙げている[18]。また Schlag (2013) は米国の現行法ではドローン使用による潜在的なプライバシー侵害に対して不十分であるとし適切なレベルの保護を確立するための消費者保護法を提案している[19]。今回のユースケースは消火活動という公共活動であり、商用ドローンに対するそれとは比較的低いものの社会受容の障害になることが想定される。

ConOpsの構築による参加者間における認識の共有と合意形成を得るプロセスを通じて、社会実装にむけた課題についての発言を抽出した。専門家ヒアリングから得られた現状の課題はもとより期待と障害についての発言は、ConOpsを精緻化させるための議論のきっかけとして複数の視点を提供した。ヒアリング結果を元に参加者が議論を行い技術開発および運用に活かす議論で新たな視点や解決方針を得ることが重要であることが認識された。現時点の技術ならびに社会システムでの実装ではなく、将来の時点で可能となる要求項目を議論するための視点が必要であることについても合意形成が得られたことから、今後は本研究を元にしたドローンリモートのロードマップの議論を行うことを課題とする。

## 5. ま と め

本研究は、ドローンを活用したリモート技術の特定のユースケースとして消防、特にビル火災支援に着目し、ConOpsの構築を通じて社会実装のためのシステム開発における課題抽出を行った。ドローンリモート技術を構成する要素技術が日々進展する一方で、社会システムに対し可能な限りシームレスに目的とする用途を実現するためには、適切な課題抽出のプロセスが必要である。新規技術の社会実装の計画の一部は、手元にある技術ならびにその組み合わせをもとに可能と思われる計画を進めがちであるが、その背後には多くのステークホルダーや課題が存在している。特にドローンリモート技術のように、便益リスク両面において社会システムへの影響が高く、また複雑な技術システムによって構成されている場合、上流段階における概念構想の構築や課題意識に関する合意形成が不十分であれば社会実装を妨げる事象となる起因を見落としかねない。ConOpsの構築は運用者や開発者が見落としていた課題や検証項目を抽出するに不可欠なプロセスでもある。NEDOドローンリモートプロジェクトでは、今回提示されたビル火災のユースケースにおいて要求される機能に対して個別の要素技術の開発が進めつつある。その一方で、要求を満たす個別技術が開発されたとしても社会システムや理解が得られていなければ社会実装の実現には至らない。ConOpsによって一定の概念検討と社会実装課題の抽出が可能となったが、今後は個別技術のロードマップをもとに社会実装

のロードマップを作成することが必要であろう。また本研究ではリスク分析そのものについて触れていないことから、ConOpsの完成には実際のユースケースにおいて想定される環境をもとにした故障解析や信頼性解析を行うことが必要である。

EASAがリスクの高い運用カテゴリに対して提示しているSORAでは、ConOpsの作成は一回で完成させることを目指すのではなく幾度の試行錯誤を通して合意形成を構築していくことが想定されている[11]。我が国においてもSORAに類するリスクアセスメントの手法の整備がなされることが理想的ではある一方で、個別の運営管理者や開発者が自発的にConOpsの策定や課題抽出のサイクルを行う文化が醸成されることはまた望ましい。レジャーとしてのスカイスポーツが航空産業との橋渡しの役割を有している米国では、ルールメイキングにおいて国とユーザ団体の円滑で柔軟なコミュニケーションが行われる文化がすでに醸成されており、ドローンの規制や制度設計においても有効に機能している。ドローンのように、高度な技術による複雑なシステムが社会に受け入れられるためには規制当局だけでイニシアチブをとることは非現実的であり、国と民間非営利組織の連携はもちろんのこと民間組織同士の連携によって適切なリスクアセスメントの指針と合意形成を得る必要がある。

## 謝 辞

この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21004）の結果得られたものである。ConOpsの検討は株式会社アイティアイディ（ITID）、株式会社電通国際情報サービス（ISID）、イームズロボティクス株式会社、株式会社NTTドコモ、産業技術総合研究所 情報・人間工学領域によって行われた議論に基づくものである。またヒアリングに応じていただいた、消防庁消防研究センター技術研究部地震等災害研究室の土志田正二様、消防庁国民保護・防災部防災課広域応援室の成田正樹様、山本勝巳様、他皆様への感謝の意を表す。

投稿受付：2023年1月23日

採録決定：2023年1月31日

## 文 献

- [1] NEDO：“人工知能活用による革新的リモート技術開発”，[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100194.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100194.html)（2023年1月20日アクセス）。
- [2] Markowitz, E. M., Nisbet, M. C., Danylchuk, A. J. and Engelbourg, S. I.：“What’s that buzzing noise? Public opinion on the use of drones for conservation science”, *BioScience*, Vol. 67, No. 4, 382–385, 2017.
- [3] Hevang, D.：“Fireball-dropping drones and the new technology helping fight fires”, *National Geographic*, Oct. 19, 2020.
- [4] Reagan, P. B. J.：“Fotokite launches tethered drone system for firefighters”, 2019. Available online: <https://dronelife.com/2019/04/17/fotokite-launches-tethered-drone-system-for-firefighters/>（2023年1月20日アクセス）。
- [5] 清水幸平, 新井場公徳, 土志田正二, 藤井皓介：“火災現場における無人航空機を用いた情報収集方策に関する調査”, 消防研究所報告 = *Report of National Research Institute of Fire and Disaster*, (128), 図巻頭-1p, 2020.
- [6] 経済産業省：“自治体のドローン・自動配送ロボット等の利活用促進に向けた調査報告 ドローンモデル自治体”, 2022. [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/robot/pdf/drone\\_report2.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/robot/pdf/drone_report2.pdf)（2023年1月20日アクセス）。
- [7] 土志田正二, 清水幸平：“土砂災害時の消防救助活動におけるドローンの活用とニーズ”, *計測と制御*, Vol. 59, No. 7, 465–470, 2020.
- [8] 消防庁：“消防防災分野におけるドローン活用の手引き”, 2022. [https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/040331\\_drone.pdf](https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/040331_drone.pdf)（2023年1月20日アクセス）。
- [9] 国土交通省：“大規模自然災害時の初動対応における装備・システムのあり方（提言）”, 2009.
- [10] Aydin, B.：“Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice”, *Technology in Society*, Vol. 59, 101180, 2019.
- [11] EASA：“Cover Regulation to Implementing Regulation (EU) 2019/947, 2012. <https://www.easa.europa.eu/en/document->

library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems?page+4%23%5FToc18667479 (2023年1月20日アクセス).

- [12] Humle, T., Duffy, R., Roberts, D. L., Sandbrook, C., St John, F. V. and Smith, R. J. : "Biology's drones: Undermined by fear", *Science*, Vol. 344, No. 6190, 1351, 2014.
- [13] IEEE : "Guide for Information Technology—System Definition—Concept of Operations (ConOps) Document 1362", 1998.
- [14] 嶋津恵子, 古川康一, 高野研一 : "計画期間短縮と運用コスト低減を両立させる ConOps 作成のための 2×2 requirement チャートの提案", 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, 670-679, 2011.
- [15] FAA : "UTM Concept of Operations Version 2.0 (UTM ConOps v2.0)", 2022. [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/UTM\\_ConOps\\_v2.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/UTM_ConOps_v2.pdf) (2023年1月20日アクセス).
- [16] Aydin, B., Selvi, E., Tao, J. and Starek, M. J. : "Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting", *Drones*, Vol. 3, No. 1, p. 17, 2019.
- [17] Peña, P. F., Ragab, A. R., Luna, M. A., Isaac, M. S. A. and Campoy, P. : "WILD HOPPER: A heavy-duty UAV for day and night firefighting operations", *Heliyon*, Vol. 8, No. 6, e09588, 2022.
- [18] Aydin, B. : "Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice", *Technology in Society*, Vol. 59, 101180, 2019.
- [19] Schlag, C. : "The new privacy battle: How the expanding use of drones continues to erode our concept of privacy and privacy rights", *Pittsburgh Journal of Technology Law & Policy*, 2013.

Appendix 1 消火活動業務の実態に関するヒアリング結果 (消防庁広域応援室)

質問内容	回答内容
通報を受けて出動するまでの間に取得する必要がある情報はどのようなものがあるか。	大きく分けて3点。①火災や被害の状況等：要救助者の有無，負傷者の有無，火災の場所（何階建て建物の何階で延焼中），火災の有無，火災の原因，煙の状況，色，火点付近の活動危険，周辺住民等の避難状況等。②建物（建築）関係：建物の構造・用途，平面図，建築設備，消防用設備等の設置状況，作動状況，周辺建物との距離及び延焼危険。③建物（建築以外）関係：周辺道路の状況，危険物，阻害物質の有無，種類と量。
現場の情報把握で隊員が気を付けていること。例えば音（声）の情報。5感でどのような情報は把握しているか。	一番は視覚的な情報。「助けて」の声も聞く。臭気で危険物が燃えているかどうか（マスク要否の判断材料）。隊員は任務が付与されるため，各隊員は全体俯瞰が難しくなる。全体的な安全管理をする必要が出てくるため，そこにドローン活用は有効。
環境の定量情報はどのようなものがあるか。	火災環境（近づける距離，消防服の耐熱温度など等）の数値化は現場ではしていない。ヘルメットの表面が変形してきたら危険などのノウハウがあるが，数値化はされていない。ビルの外壁の材質の情報は必要（燃えやすいかどうか等）
現場到着後の情報把握にどのような課題があるか。	課題としてはそれらの情報は通報者，建築物の関係者，防災センター職員等から得る必要があるが，建物側の方から情報が得られないことが多い。
情報はどのような手段で，誰に伝達され，どのように検討され，何の判断がなされるのか。	消防職員（指揮隊）に伝達される必要がある。もしくは，出火建物関係者の確保ができなかった場合，最先着隊の小隊長が状況確認後，無線等により指令室経由等で出場隊に伝達される。それを踏まえ，救助の必要性，消火の戦術等の検討，他機関を含めた増隊の必要性の判断がなされる。
消防活動における典型的な体制はどのようなものか。（役割，人数等）	基本的には，指揮隊（3人/隊），救助隊（5人/隊），消火隊（5人/隊），救急隊（3人/隊）となる。隊の出動規模は，要救助者の数，建物の規模，延焼の状況，住宅密集地や水利不便地区等周辺状況により異なる。

質問内容	回答内容
消防活動においてどの程度デジタル活用が進んでいるのか。	<p>①火災等の情報に関する現場と指令センターとの情報共有：政令市や一部消防本部では、指揮隊などにドローンやiPadが配備されており、現場で撮影した動画、画像が、現場の指揮隊、消防本部で共有可能となっている。</p> <p>②建物に関する情報の指令センターとの情報共有：消防本部によっては、防火対象物であれば、台帳が電子化されており、出場隊によって指令システムと連携して建物の概要を確認ができる。(危険物施設含む)</p> <p>③出勤の最適化：多くの消防本部において、常に各消防車両の動態についてはシステム(GPS等)で管理されており、災害発生場所に最も近い消防車両が選定されて出勤する仕組みになっている。</p>
消防、医療、自衛隊など異なる組織間での意思疎通はどのように行われているか。課題はなにか。	<p>大規模火災で他機関と連携する場合は、病院(搬送先の調整、現場に医師要請をするか否か)、警察(一般市民が近づかないように規制線を敷くこと)である。多数傷病者発生災害での病院との連携については、EMIS(広域災害救急医療情報システム)を活用し、各救急指定病院の受入れ可能状況の把握に努めるが、病院側での操作担当が常時システムを監視していないため、病床の空き状況が古いことが多い。</p> <p>大きな方針については、本部から他機関に連絡を取り、調整をすることが多い。</p> <p>小規模消防本部であれば、本部(指令センター等)もしくは現場指揮本部で、有線もしくは口頭で他機関との連絡調整を行うケースが多い。</p> <p>大規模な火災が発生した場合、消防本部で情報が整理されていない現場の状況を共有すること。(京都アニメーション火災の場合、病院での受入体制をすぐに取っていただく必要があると思われたが、現場での負傷者が確定していない状況で病院との調整が必要であった)。</p>

#### Appendix 2 ドローンリモート技術の活用におけるニーズ/課題、必要要件について(消防庁および消防研究所)

質問内容	回答内容
隊員の出勤前に、ドローンでどのような情報が先行把握できると有用か。	<p>ドローンで得られると考えられる情報としては、火災の場所(何階建て建物の何階で延焼中)、火炎の有無、煙の状況、色、周辺建物との距離、周辺住民等の避難状況、周辺の道路状況。</p> <p>消防車より先に到着して情報把握できると良い。(要救助者など)。その際の問題は、部隊にその情報をどう伝えるかだが、現場にデジタル端末持たせるのは難しい。手軽、書き込めるなどの理由から現場は紙が良いという実情もある。</p>
火災現場及びその経路でのドローン飛行において考慮すべき環境条件や想定課題。	<p>環境条件は、火災による輻射熱。風速、風向。気象状況(降雨)等。課題としては、ドローンを飛行させる位置が上空の場合、それらの情報を得ることが難しいこと。</p> <p>ビル群で/人がいる中、安全を担保できるのかが課題。消防が事故を起こすことはNG。最近ドローンが複数台飛ぶことが多い(報道、学会、個人等)ことに加えて有人機も飛ぶ。それらとの衝突のリスクあり。航空管制必要。また、どこが音頭とるのかも課題。</p> <p>大規模火災では、どこから煙が来ているか、水をどこから入れるか、要救助者がいるかどうかなどが把握できると良い。</p> <p>現状は映像、画像での目視確認。山岳救助時に遭難者を探すためサーマル使っている様子だが、サーマルでのセンシングは火災現場では難しい。周囲の延焼をサーマルで探すことをしたいという相談があったことはある。</p>
火災現場特有の環境(煙、熱等)において有用なセンシング技術にはどのようなものがあるか。	<p>遠赤外線カメラによる熱画像。危険物火災現場における、有毒ガスの発生状況。</p> <p>土砂災害では映像、画像を元に、災害前後の地図作成をやっている。地震計を活用している例は見たことある。</p>
現場到着後の情報把握にどのような課題があるか。	<p>課題としてはそれらの情報は通報者、建築物の関係者、防災センター職員等から得る必要があるが、建物側の方から情報が得られないことが多い。</p>

質問内容	回答内容
火災現場におけるドローンを用いた活用に関してどのように受け止められているか。	過去に行った消防大学の訓練生 (隊長クラス) を主に対象とした調査では、火災現場におけるドローンの活用は好意的な結果が得られている [5]。大規模なら理解が得られやすいが、1軒の火災においては「まずは消火を優先すべき」と市民から見られることもある。
ドローン活用の課題はどのような点があるか。	現場ではドローン飛ばすための人が足りない (2~3人) というのが一番の課題。規模が大きい消防本部だとドローン部隊もちらほら現れてきているが、小さいところだとまだまだ少ない。大規模災害の際には、消防庁がドローン活用をしようとしており、政令指定都市であればドローン活用が始まりだしている。また、予算の9割は人件費と設備の維持費でありドローン運用の予算は課題。
音についての弊害はあるか。	小型ドローンで問題になったことはない。要救助者探索時におけるサイレントタイムを避ければ大丈夫だと思う。
消防以外の他組織 (警察, 自衛隊等) との連携は。	土砂災害の際は、1日1回意識合わせの会議をしていたが、地域に詳しい地元消防が音頭取ることが多い。その際、紙の地図を囲んで協議をする。デジタルも使えるが最終的には紙にした。 また、「現場に解釈させるな」とよく講演では言っている。現場ではどう解釈すべき情報なのかを明確にした情報でないと受け入れにくいかもしれない。 一方で、粗い状態でも有用なデジタル情報はある。熱海の土砂災害だと、家がどこまで流れたか、そこに人がいる可能性あるか (安全確認できているか)、それを踏まえどこをどのくらい掘るべきか、の判断が必要だった。

Appendix 3 シーン (To be) に対する専門家ヒアリング結果

質問内容	回答内容
固定翼飛行の想定時間、マルチコプターの飛行時間はどの程度のものが必要か。	消防署から火災現場までの距離に依存するが一般的には7分程度。現場到着から消火活動の流れが区切れるわけではなく、通報があった時点から作戦を考え始める。したがって消防車両の中ですべての火災現場情報を把握しておく必要がある (火災, 煙, 要救助者の有無など)。同時に車両内で酸素マスクなど装備の準備, 情報収集, 作戦検討を行う。7分後に情報が整った, では遅い。7分後までに消火活動の準備を整えすぐに開始できる必要がある。
どういう情報がドローンで分かるか。上空からの画像情報など。	火災現場による土砂災害だと上空からの情報は有効。大規模火災の場合に欲しいのは建物の中の情報。煙が出ている場所がわかれば火災の位置はわかる。ビル火災だと建物内の情報が必要。タブレットやHMDなどで映像や画像は有効とは思いますが、実現可能性と再現時間がポイント。3D再現はほぼリアルタイム可能。7分後の到着時点で確認は可能な見込み。建物内の情報把握は消防でもこれまでいろいろ検討されてきているが難しいというのが現時点の結論。
現場指揮官が見える場所は限られるため、デジタルツイン上であらゆる観点から見ることは有効と考えるか。	有効と考えられる。
現場での指揮系統の中での本技術の有効性は。刻一刻と変化する状況を、デジタルツイン上で指揮官が把握して、隊員に伝えることは有効か。	有効だろう。現場最先着がやるべきは3大危険情報の把握。人命危険 (要救助者有無, 要救助者に関する情報 (人数, 特徴, 状況)), 延焼危険 (火炎噴出状況, 隣接建物との距離, 風向/風速 (ex 糸魚川火災)), 活動危険 (隊員に危害が及ぼしうる可燃性液体 (タンク), LPGボンベ, 獐猛な犬等) を把握すること。 そのために現場一巡する。一巡できない環境の場合ドローンが有効。ビル火災の場合, 手振り要求がある場合, 部隊配置の検討が必要。ハシゴ車をどこに置くか等。要救助者がどこにいるのかかわかると有効。

質問内容	回答内容
消防拠点からの距離は4～5 km くらいの想定で大丈夫か。	5分以内であればOK。固定翼機だと厳しいが、マルチコプターの離着陸も想定すると5分なので、成立する。
消防トレーニングでのドローンリモート技術の活用はできないか？(デジタル空間上で現場再現して訓練に活用)	大変有効。現場速報の訓練など (google マップ上の黒煙情報を見せて建物面積、延焼危険を推測する訓練等)。HMD 等でバーチャル上で再現し、判断・伝達を行う有効なトレーニングが期待できる。
ドローン+デジタルツインによって災害現場のどのような情報が把握できると有用か。災害現場や作戦会議の場でどのような活用の仕方が考えられるか。想定される課題。	被害状況の全容、建物の平面図や、立面図が考えられる。土砂災害、浸水災害の場合は地図画像などが挙げられる。
SIP4D (基盤的防災情報流通ネットワーク) との連携の可能性はありえるか。	大規模火災では、消火、救助は消防機関のみで対応することが通常であるため、考えにくいのではないかと。



#### 佐々木 一

東京大学未来ビジョン研究センター特任准教授。博士 (工学)。三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所などの民間技術職や、東京大学政策ビジョン研究センター准教授を経て現職。専門は技術経営、イノベーションマネジメント、知識工学、複雑システムにおける意思決定支援。



#### 榎野 尊

(株)ITID シニアコンサルタント。前職は大手精密機器メーカーにてデジタルカメラの開発に従事。電気技術者として電子回路・基板設計、制御設計、工場の監査や製品立ち上げ等を経験。ITID 参画後は自動車メーカーの発想力強化や新価値創造活動、開発現場の DX 推進、精密機器メーカーの開発業務改革など支援。



#### 寺村 良寛

(株)ITID シニアマネージャー。早稲田大学理工学部卒。(株)電通国際情報サービスを経て現職。製造業向けシステムズエンジニアリング導入、開発プロセス改革、新規事業企画、サービスデザインなどのほか、システム思考による自治体向けまちづくり戦略、スマートシティ推進、社会システムデザインなどに従事。



#### 秋本 修

(一財)総合研究奨励会日本無人機運行管理コンソーシアム事務局長、(公財)福島ロボットテストフィールド副所長 (一社)日本産業用無人航空機工業会理事 (一社)ドローンサービス推進協議会理事。



#### 鈴木 真二

東京大学名誉教授，同未来ビジョン研究センター特任教授。(株)豊田中央研究所，東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻教授を経て現職。工学博士，専門は航空工学。日本航空宇宙学会会長 (第 43 期)。国際航空科学連盟 (ICAS) 前会長。一般社団法人日本 UAS 産業振興協議会 (JUIDA) 理事長など。

# 日本国内の無人航空機事故（2015-2021）の 要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～

大原 大<sup>\*1, \*2</sup>

EVA Airways (B777 Fleet, Flight Management Department, Flight Operations Division)<sup>\*1</sup>

Five Star Group Inc.<sup>\*2</sup>

無人航空機利活用の大幅な拡大が見込まれる中、事故防止は最も重要な課題である。本研究では、日本国内で2015-2021年度の間に発生し国土交通省に報告された無人航空機による事故の特徴と要因を分類した。7年間に発生した448件の事故のうち、事故要因が不明のものを除くと、人的要因を含むものが78%にのぼった。特に複合要因の事故では「飛行計画の不備」を含むものが82%であった。事故の低減については、航空安全のためのノンテクニカルスキルである「CRM（クルー・リソース・マネジメント）」を無人航空機領域にも広げ、再発防止に取り組むことが望ましい。

**Keywords:** 無人航空機, 事故, 人的要因, クルー・リソース・マネジメント (CRM), 遠隔操作パイロット, コンピテンシー, 安全

## Factor Analysis of UAS-Related Accident in Japan (2015-2021) and Preventive Methods Using CRM Skills — Further Prevention of Human Error-Related Accident —

Dai Ohhara<sup>\*1, \*2</sup>

EVA Airways (B777 Fleet, Flight Management Department, Flight Operations Division)<sup>\*1</sup>

Five Star Group Inc.<sup>\*2</sup>

As the use of unmanned aircraft is expected to expand significantly, accident prevention is the most important issue. This study classified the characteristics and factors of unmanned aircraft accidents that occurred in Japan between fiscal year 2015 and 2021 and were reported to the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. 448 accidents occurred during the seven-year period, and 78% of them involved human factors, excluding those with unknown accident factors. In particular, 82% of the accidents with multiple factors involved “inadequate flight planning.” Regarding the reduction of accidents, it is desirable to extend “Crew Resource Management (CRM),” a non-technical skill for aviation safety, to the unmanned aircraft domain to prevent recurrence.

**Keywords:** UAS, accident, human factor, CRM (Crew Resource Management), remote pilot, competency, safety



## 1. 背景

航空法の改正に伴い、2022年12月より、無人航空機操縦者の国家資格制度が創設・開始され、レベル4での本格運用が徐々に広がっていく時期を迎えた。貨物の配送やインフラ点検等を始め、今後数年で大幅な利用拡大が見込まれる[1]。

航空機事故は6-8割がヒューマンエラーによる事故と報告されている[2]。重大事故の防止のためには、過去の事件事例の検証と、そこからの学習が重要である。有人航空機においては、1977年のテネリフェ事故をはじめ、世界で発生した数々の過酷事故の検証と反省をもとに、特に人的要因によるリスクを低減させるため「CRM（クルー・リソース・マネジメント）」と呼ばれる航空安全のためのスキルが確立されてきた[3]。有人機運航に携わる者には年1回の訓練が国際的に義務付けられており[4]、航空機事故は過去40年間に世界的に大幅に減少することとなった[5]。

2010年代からの無人航空機開発・利用の急増を背景に、国際民間航空機関（ICAO）では、無人航空機操縦者（Remote Pilot）にも安全への脅威に対処するためCRMの知識を有することが求められるとしており[6]、日本でも無人航空機の国家資格制度の学習要項の中に、CRMが含まれた[7]。一方、無人航空機の飛行は歴史が浅く、操縦・運航に携わる人の背景となる業界や職種も多様であるため、CRMスキルについての認知度は低く、無人航空機の運航とCRMスキルとをどのように結びつけたらよいのかについての具体的な資料や教材は極めて少ない。また、無人航空機の訓練でどのようにCRMスキルを応用していくかについての手法も確立されていない。

本研究は、日本国内で発生した無人航空機事故に関する基礎的な資料を構築し、事故がどのような場面で発生しうるかについて理解しやすくするとともに、ソフト・ハード面での事故防止策を検討し、特に人的要因に起因する事故の発生を防ぐためにCRMスキルをどのように応用できるのかについて例示することで、広く無人航空機事故防止の訓練に役立てられるようにすることを目的としている。

## 2. 目的と方法

### 2-1 目的

日本国内で発生した無人航空機事故に関する基礎的な資料の構築のため、2015年4月から2022年3月までの各年度に国土交通省に報告された無人航空機による事件事案の特徴の分類と主要因の分析を行う。また、事件事案の主要因の種類ごとに、安全運航のためのノンテクニカルスキル「CRM（クルー・リソース・マネジメント）」のうちどのような要素を適用することによって再発防止に向けた対策を行うことができるかを例示する。

### 2-2 方法

分析の対象として用いたのは、2015（平成27）年4月から2022（令和4）年3月までに日本国内で発生した無人航空機に係る事故トラブルのうち、国土交通省航空局に報告があり国土交通省ホームページ「過去の事故情報等の一覧」[8]に掲載されている事例448件である。各年度4月から翌年3月までに報告された事例が掲載されており、2015年度：12件、2016年度：55件、2017年度：63件、2018年度：79件、2019年度：83件、2020年度：70件、2021年度：86件となっている。

各事例の報告には、「発生日」「飛行させた者又は所属団体等」「飛行場所」「機体（種類、特徴等）」「事案の概要」「航空法上の許可・承認の要否」「許可・承認の有無」「当局の対応」「報告された原因分析及び是正措置」が記載されている。

#### 【無人航空機による事件事案の特徴の分類】

##### 1) 無人航空機事故の件数と機体の種類

機体の種類ごとの無人航空機事故の件数について、報告事例の「機体（種類、特徴等）」の項目を用いて

分類した。2018年度までは「マルチコプター」「ヘリコプター」「ラジコン機」など機体の種類と大きさが記載されているが、2019年度以降は具体的なメーカー名と機種名が記載されていたため、2019年度以降のものは機種を確認した上で2018年度以前と同様の機体の種類に分類し直して集計した。なお、用途が農業用（主に農薬等の空中散布）であるものについては、ヘリコプター型、マルチコプター型を問わず「農業用無人航空機」とした。これを含め、「マルチコプター」「ヘリコプター」「ラジコン機」「飛行機（小型・無人）」「自作機・その他」「農業用無人航空機」「不明」の7つに分類した。

## 2) 飛行目的と事故件数

飛行目的ごとの無人航空機事故の件数、その増減をグラフ化した。飛行目的については、報告事例の「事案の概要」の項目の中に記載されている飛行目的や内容から、「空撮」「空中散布（農薬等）」「調査・測定・点検」「飛行・操縦訓練」「趣味・個人的飛行」「試験飛行・実証実験」「その他業務」「不明」の8つに分類した。

## 3) 機体の種類と事故事案の結末

機体の種類によって事故の特徴が異なるかを確認するため、機体の種類ごとに、事故事案の結末がどのようになったかをまとめた。事故事案の結末とは、最終的に機体がどのような状態になり事故に至ったかのことを示し、「接触」「接触+墜落」「墜落」「衝突」「衝突+墜落」「不時着」「墜落+発火」「紛失」「ヘリコプターとの接近」「その他」の10項目に分類した。分類の際には、報告事例の「事案の概要」の項目の中に記載されている内容を用いた。

なお、機体の種類としては、近年利用が急増しているマルチコプター等と、農業用の空中散布等で用いる機体は大きさや重量が異なることから、主要な機体として「マルチコプター」「農業用無人航空機」の2つを抽出した。（その他についても分析済みではあるが今回の報告は省略する。）

## 4) 無人航空機事故による人的・物的被害の件数

無人航空機事故による被害の件数について、報告事例の「事案の概要」の項目の中に記載されている内容のうち、人の負傷の有無、物的被害の有無、発火や延焼があったかが記載されている部分を用いて、「人的被害」「物的被害」「発火・延焼」の3つに分類して集計した。

## 5) 無人航空機事故による人的被害の内容と事故要因

無人航空機事故により人的被害が生じたものについて、その具体的な内容と原因等を、主要な機体である「マルチコプター」「農業用無人航空機」のそれぞれについて全件を簡潔に記述した。

## 6) 無人航空機事故による物的被害の内容

無人航空機事故により物的被害が生じたものについて、その具体的な内容を、主要な機体である「マルチコプター」「農業用無人航空機」のそれぞれについて分類した。

## 7) 無人航空機事故により発火・延焼が発生した事例

無人航空機事故により発火・延焼が発生した事例について、機体を問わずすべての事例を列挙した。

## 【無人航空機事故の主要因・CRMによる事故防止策】

## 8) 無人航空機事故の主要因の分析

無人航空機事故の報告事例の「事案の概要」「報告された原因分析及び是正措置」の内容を参考に、事故の主要因と考えられるものを分類した。主要因の項目としては、一般社団法人日本UAS産業振興協議会（JUIDA）安全運航管理者コース教材[9]に掲載されているカテゴリと同一の9項目を採用した。具体的には「1. 機体点検・整備不良」「2. 操縦ミス」「3. 飛行計画の不備」「4. チーム内連携ミス」「5. 気象（風・雨等）」「6. 電波・通信（GPS受信を含む）」「7. バッテリー」「8. その他」「9. 不明」である。

事故要因の分類は個人の主観を排除できないことから、研究従事者のJUIDA認定講師3名がそれぞれ独立に全事例を分類する作業を行って、3名分の分類結果を集計した後に検討を行うこととした。

また、1つの事故事例に複数の要因が想定されるものがあることから、各講師は1事例に複数の番号を挙げることを可とし、下記の集計の方法をとった。

(1) 各事例について、3名分を集計し、要因として挙げられた数が最も数が多かった項目を主要因と推定した。

(2) 主要因と推定される項目が複数あった事例（要因として挙げられた数が同一であった場合）、または3名が別々の項目を要因として挙げたために項目の重複がなかった事例に関しては、主要因を「10. 複合要因」とした。

### 9) 無人航空機事故の主要因の実例と CRM による事故防止策

無人航空機事故の主要因について、カテゴリ名だけでなく具体的な事例を挙げるにより事故に対する想像・理解を深めることができると考え、「不明」を除く8つのカテゴリの主要因について、事例を複数挙げて記載した。また、各事例の事後対応と予防策について、報告事例の「報告された原因分析及び是正措置」の項目を参照し編集・追記した。

さらに、各事例のような事故を防止するため、航空安全のために操縦者に求められている CRM（クルー・リソース・マネジメント）をどのように活用することができるかを示すため、CRM スキルの5分野15項目の要点（大原，2022[10]）のうち特に当該事例に適応できると考えられる CRM スキルの内容と項目を例示した。CRM スキルを無人航空機事故防止のために学習する取り組みは、国家資格制度の開始により広がっていくと推測されるが、具体的に無人航空機運航のどのような場面で CRM スキルを用いることができるのかの資料は極めて乏しいため、7.に挙げられたような事故要因を未然に防ぐための教育訓練に役立てられるよう、実際の事故事例と結びつけてイメージできる資料とすることを目指した。

## 3. 結 果

### 3-1 無人航空機事故の件数と機体の種類

2015年度から2021年度までの7年間に発生し報告された無人航空機による事故トラブル等448件を機体の種類ごとに分類し、図1に示した。なお、2019年度からは農作業中の農業用無人航空機の事故が国土交通省航空局で集計されているため、2018年度以前に比べて農業用無人航空機による事故の報告数が多くなっており、単純比較はできない。参考値として、7年間で報告された事例では多い順に「マルチコプター（309件）」「農業用無人航空機（103件）」「飛行機（小型・無人）（17件）」「ヘリコプター（5件）」「ラジコン機

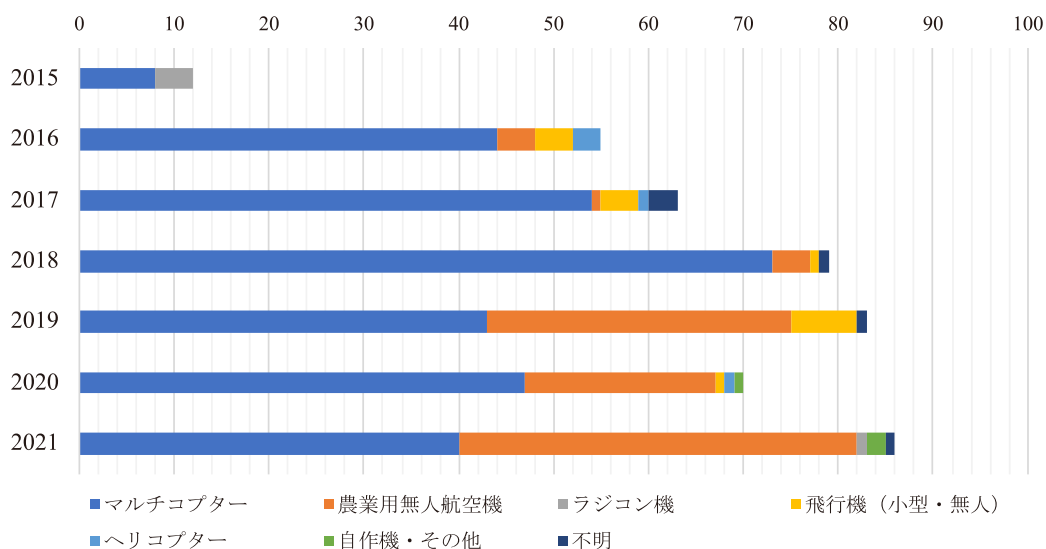


図1 報告された無人航空機事故の件数と機体の種類（2015-2021年度）

(5件)」「自作機・その他(3件)」であり、「不明」は6件であった。「不明」は、飛行機やヘリコプターからの通報・報告で、何らかの無人航空機とみられるものが自機に接近したというものであった。

2019年度から2021年度までの3年間では、全体で239件のうち、事故数の多い順に「マルチコプター(130件, 54.4%)」「農業用無人航空機(94件, 39.3%)」「飛行機(小型・無人)(8件, 3.3%)」「自作機・その他(3件, 1.3%)」「ヘリコプター(1件, 0.4%)」「ラジコン機(1件, 0.4%)」であり、「不明」は2件(0.8%)であった。

マルチコプターによる事故は、2019-2021年度は40件台となっており、2018年度の73件から減少しているが、新型コロナウイルスの感染拡大の影響によりイベント空撮等の業務や趣味等での飛行件数が2018年度以前より減少している可能性も考えられる。農業用無人航空機は、2021年には過去3年間で事故数が最も多くなっている。

### 3-2 飛行目的と事故件数

無人航空機の飛行目的別の事故件数を、図2に示した。3-1と同様に、2019年度以降は農業用無人航空機による農業を目的とした飛行が集計されているため、2018年度以前とは比較ができないが、参考値として7年間で事故トラブル等の報告が最も多かったのは「空撮(170件)」「空中散布(農薬等)(104件)」「調査・測定・点検(47件)」「飛行・操縦訓練(36件)」「趣味・個人的飛行(36件)」「試験飛行・実証実験(27件)」「その他業務(19件)」「不明(9件)」であった。

2019年度から2021年度までの3年間では、全体で239件のうち、事故の多い順に「空中散布(農薬等)(95件, 39.7%)」「空撮(81件, 33.9%)」「調査・測定・点検(18件, 7.5%)」「飛行・操縦訓練(15件, 6.3%)」「その他業務(13件, 5.4%)」「趣味・個人的飛行(8件, 3.3%)」「試験飛行・実証実験(8件, 3.3%)」で、「不明」は1件(0.4%)であった。

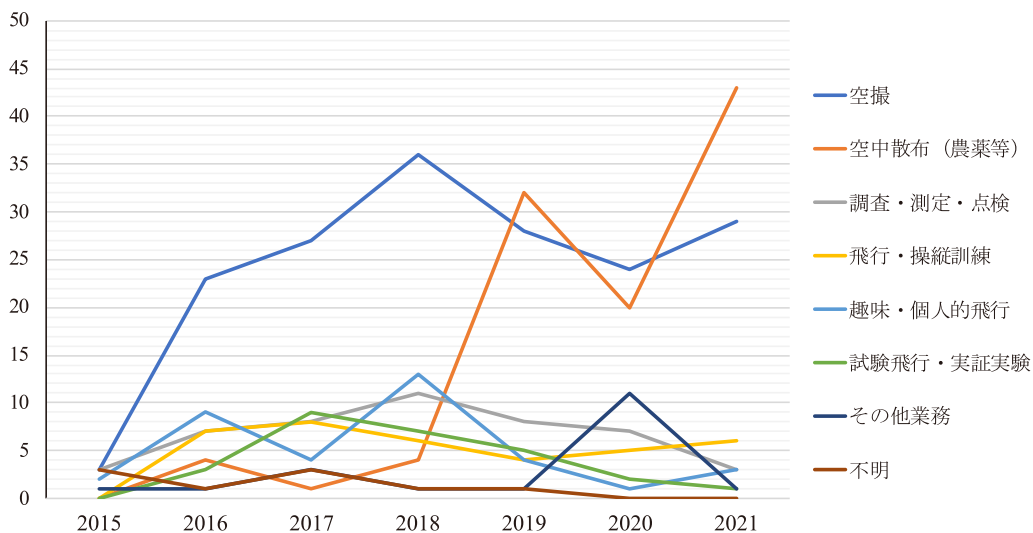


図2 飛行目的別無人航空機事故の件数(2015-2021年度)

### 3-3 機体の種類と事故事案の結末

事故トラブルの報告件数の多いマルチコプターと農業用無人航空機について、事故事案の結末がどのようなものであったかを図3に示した。マルチコプターでは「紛失」が最も多く、36%を占める。対して農業用無人航空機では「紛失」はゼロであった。

マルチコプターでは「墜落」が34%、「接触+墜落」が18%、「衝突+墜落」が4%であるのに対し、農業用無人航空機では「接触+墜落」が60%、「衝突+墜落」が4%で、墜落のみの事案は1%であった。マ

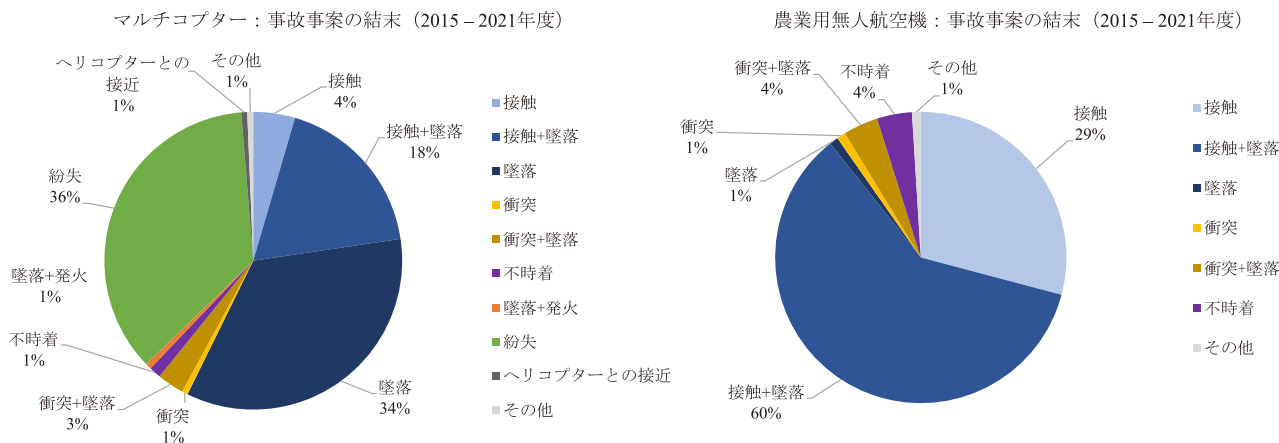


図3 機体の種類と事故事案の結末（2015-2021年度）

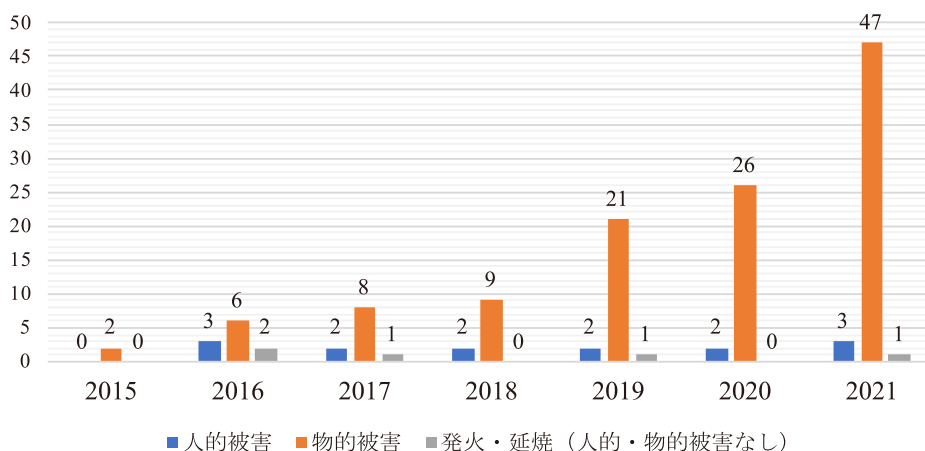


図4 無人航空機事故による人的・物的被害の件数（2015-2021年度）

マルチコプターは様々な用途・場所で用いられ、比較的小型の機体が多いのに対し、農業用無人航空機は大型の機体が多く、圃場など特定の場所で使用されることが多いことに起因すると考えられる。特に農業用無人航空機では圃場周辺の電線・電話線等への接触を伴うものが多い（詳細は3-5を参照）。

なお、マルチコプターでは全309件のうち、36件（12%）が水没（海上・河川等）を伴っていた。

### 3-4 無人航空機事故による人的・物的被害の件数

無人航空機事故によって人的・物的被害が起きた件数を年度ごとにまとめた（図4）。人的被害は年間2-3件のペースで発生しており、これまでの7年間では大きな増減はなかった。物的被害については、農業用無人航空機によるものが集計されるようになった2019年度から増加しており、2021年度には最も多く47件であった。物的被害の全件数のうち、農業用無人航空機によるものは、2019年度：18件（85.7%）、2020年度：19件（73.1%）、2021年度：40件（85.1%）となっている。

### 3-5 無人航空機事故による人的被害の内容

2015年度から2021年度までの7年間に、無人航空機事故によって人的被害が発生した事案の被害の内容を表1-1、1-2にまとめた。表1-1はマルチコプターについて、表1-2は農業用無人航空機について、過去に報告されたすべての事案を列挙している。

マルチコプターでは、ドローンの落下により人に接触したものや、飛行中に人に接触したもの、着陸時に操縦者や補助者等に接触したものなどが報告されている。

農業用無人航空機では、飛行中に風に煽られるなどして機体がバランスを崩し人に接触するなどの事例の

表 1-1 無人航空機事故による人的被害の内容と事故要因：マルチコプター（2015-2021 年度）

年度	飛行させた者	人的被害の概要	原因分析または関連事項
2016	事業者	・ 建築現場撮影のため飛行させたところ、通信が途絶し、自動帰還にて降下中にクレーンに衝突し落下。落下場所にいた工事作業者に機体が接触し、顔に切り傷を負わせた。	・ 飛行場所の電波環境の悪化のため、無人航空機と送信機間の通信が断絶し、操縦不能になったと思われる。
2017	研究機関	・ 橋梁点検の実証試験のため飛行させていたところ、突然操縦不能となり関係者に接触した。当該人は救急搬送され、右手親指を数針縫う負傷を負った。	・ 飛行制御プロボの操作モードが、縦士の意図に反して突然変更されたため、モード変更に気が付かない操縦士が操縦不能（混乱）に陥った。
	事業者	・ イベントの一環として行われたドローン菓子撒きのために飛行中の無人航空機がバランスを崩して落下し観客を負傷させた。6名が救急搬送され、3名が軽傷を負った。	・ 機体が飛行許可を受けていたものと異なっていた。 ・ 安全上必要な確認を行わないまま飛行させた。
2018	事業者	・ 試験飛行のため飛行させていたところ、着陸時、降着装置が誤作動したため、姿勢を崩し、無人航空機が操縦者と補助者に接触した。操縦者と補助者は裂傷及び打撲を負った。	・ 着陸時に無人航空機の降着装置が誤作動し、機体の姿勢が不安定になったと考えられる。
2019	事業者	・ 撮影のため無人航空機を体育館内で飛行させていたところ、操縦を誤り付近の人に接触し墜落した。擦過傷及び打撲を負った。	・ 機体と人との距離を見誤ったものと考えられる。
2020	事業者	・ 動物調査のため無人航空機を飛行させていたところ、突風により墜落しそうになった機体を操縦者が受け止めようとし、手を負傷した。	・ 原因不明。
2021	行政機関	・ 空撮のため無人航空機を飛行させた後、着陸しようとしたところ、機体が風に煽られ付近にいた機体監視者と接触し、手を負傷した。	・ 操縦者の意思と異なる動きが生じた時に適切な操作ができなかった。 ・ 危険箇所の確認不足であった。 ・ 操縦者と機体監視者の事前打合せが不十分であったことから、不用意に機体に接近した。
	事業者	・ 空撮のため無人航空機を飛行させていたところ、着陸時に補助者に接触し負傷した。	・ 風が穏やかでもまた強まる可能性があることや、地上で風が弱くても上空では強風の可能性があることの風の特質について認識が不足していた。 ・ プロペラガードの保護機能について過大評価をし、プロペラの殺傷能力について過小評価を行っていた。

表 1-2 無人航空機事故による人的被害の内容と事故要因：農業用無人航空機（2015-2021 年度）

年度	飛行させた者	人的被害の概要	原因分析または関連事項
2016	農業関連団体	・ 農薬散布飛行により登園中の園児に農薬がかかった旨の連絡を受けた。	・ 散布飛行中突風が吹いたため中止したが、因果関係は不明。
2018	個人	・ 農薬散布のため飛行させていたところ、離陸時に突風に煽られ機体が横転し操縦者に接触した。操縦者は右足膝に裂傷を負った。	・ 離陸時の予期しない突風に対応できず機体が姿勢を崩したものと考えられる。
2019	農業関連団体	・ 空中散布のため飛行させていたところ、着陸時に風に煽られ機体が横転し操縦者に接触した。操縦者は右手中指を骨折した。	・ 原因確認中。
2020	農業関連業者	・ 農薬散布のため飛行させていたところ、風に煽られスライドし、付近にいた人と車に接触し墜落した。人は負傷した。	・ 着陸時に機体が傾いて接地したため、着陸判定が出来ずその時点でモータを停止せず姿勢制御を続けた。 ・ 接地した後に、ドローンを安定して制御するために必要な電圧を下回っていた。
2021	農業関連業者	・ 農薬散布のため飛行させていたところ、第三者の車両に接触し墜落した。また機体を回収する際にプロペラが回転している状態であったことから操縦者が手を負傷した。	・ 原因確認中。

ほか、散布中の農薬が人にかかった事例も報告されている。

### 3-6 無人航空機事故による物的被害の内容

無人航空機事故による物的被害の内容について、マルチコプター、農業用無人航空機のそれぞれについて図5に示した。

マルチコプターの事故については、飛行場所が多様であるとみられ、物的被害の中では家屋・倉庫など建屋への被害（接触・墜落・損傷）が最も多かった。また、被害が発生する前段階として「突如操縦不能となった」「操縦操作を誤った」「風に流された」などの記述が見られた。

一方、農業用無人航空機の事故については、飛行場所が主に田畑などの圃場とみられ、物的被害の中では電線・架線・電話線・ケーブルテレビ回線等への接触・損傷が最も多かった。

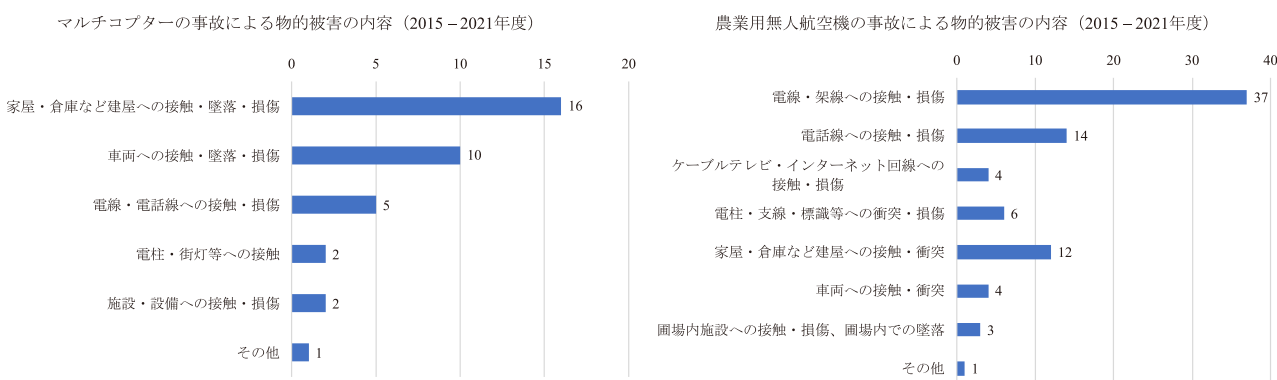


図5 無人航空機事故による物的被害の内容：マルチコプター、農業用無人航空機（2015-2021年度）

### 3-7 無人航空機事故により発火・延焼が発生した事例

無人航空機事故の経過の中で発火・延焼が発生した事例は、2015年度から2021年度までの間に5件あった。その内容（事案の概要、原因分析・関連事項）について、表2に示した。機体は、ヘリコプター、マルチコプター、飛行機（小型・無人）、ラジコン機と多様であった。

うち3件は原因については不明となっているが、4件は墜落時の衝撃により発火したとみられ、墜落場所の周辺の落ち葉や草木などが燃えている。なお、これらの事例による直接的な人的被害・物的被害は報告されていないが、発火や延焼を伴う事案については国土交通省に報告すべきものとなっている。

### 3-8 無人航空機事故の主要因の分析

2015年度から2021年度までに発生した448件の事故トラブルの報告事例に記された内容から、主要因を以下の10項目（「1. 機体点検・整備不良」「2. 操縦ミス」「3. 飛行計画の不備」「4. チーム内連携ミス」「5. 気象（風・雨等）」「6. 電波・通信（GPS受信を含む）」「7. バッテリー」「8. その他」「9. 不明」「10. 複合要因」）に分類したものを表3に示した。

主要因が不明であるものを除くと、多い順に、「10. 複合要因」：79件（17.6%）、「3. 飛行計画の不備」：64件（14.3%）、「2. 操縦ミス」：41件（9.2%）、「1. 機体点検・整備不良」：37件（8.3%）、「6. 電波・通信（GPS受信を含む）」：29件（6.5%）、「5. 気象（風・雨等）」：28件（6.3%）、「7. バッテリー」：9件（2%）、「8. その他」：2件（0.4%）となっている。

このうち、「1. 機体点検・整備不良」「2. 操縦ミス」「3. 飛行計画の不備」「4. チーム内連携ミス」の4つを『人的要因』、「5. 気象（風・雨等）」「6. 電波・通信（GPS受信を含む）」「7. バッテリー」を『外的要因（気象・通信・ハードウェア等）』とした。

「10. 複合要因」については、主要因に挙げられた複数の項目に1, 2, 3, 4のいずれかが含まれていれば『人的要因を含む』と定義した。全79件のうち、すべてのケースが人的要因を含んでいた。そのうち「3. 飛

表2 無人航空機事故により発火・延焼が発生した事例

年度	飛行させた者	機体	事案の概要	原因分析または関連事項
2016	ラジコン機クラブ	ヘリコプター	・趣味のため飛行させていたところ、機体に異常が発生し動力を失った状態で着陸させたが、着陸直後に機体が炎上し、付近の葦原が焼失した。	・原因は不明。
	個人	マルチコプター	・目視外飛行の訓練を行っていたところ、自ら設置した訓練用障害物に接触し、墜落した。墜落後に機体から発火し、付近の草が焼失した。	・墜落の衝撃で部品の一部が破損し回路がショートし、発火したためと思われる。
2017	個人	マルチコプター	・地表計測のため飛行させていたところ、突如操縦不能となり墜落した。墜落後、機体の部品から発火し周辺の落ち葉に延焼した。	・機体に搭載された制御装置あるいは通信装置の故障が原因である可能性が高い。特に、姿勢制御装置の異常、電子コンパスの異常、GPS受信機の異常、送信機と期待感の通信異常、あるいは複数要因の組み合わせによる影響が考えられる。
2019	個人	飛行機（小型・無人）	・趣味のため飛行させていたところ、突如制御不能となり墜落した。その後、墜落した機体から出火し、付近の芝生に延焼した。	・原因は不明。
2021	個人	ラジコン機	・趣味のため飛行させていたところ、操作を誤り機体が墜落した。その際付近の河川敷において火災が発生し草木が燃えた。	・原因は不明。

表3 無人航空機事故の主要因

無人航空機事故の主要因	件数（2015-2021年度計）	概要
1. 機体点検・整備不良	37 (8.3%)	人的要因 36.3%
2. 操縦ミス	41 (9.2%)	
3. 飛行計画の不備	64 (14.3%)	
4. チーム内連携ミス	20 (4.5%)	
5. 気象（風、雨等）	28 (6.3%)	気象・通信・ハードウェア等外的要因 14.8%
6. 電波・通信	29 (6.5%)	
7. バッテリー	9 (2.0%)	
8. 複合要因	79 (17.6%)	複合要因 17.6% うち全件が人的要因を含む
9. その他	2 (0.4%)	その他 0.4%
10. 不明	139 (31.0%)	不明 31.0%
合計	448	

「不明」を除いた場合、**人的要因を含む事故が78.0%**にのぼる。  
 「不明」をカウントした場合でも、**人的要因を含む事故が53.9%**

行計画の不備」を含むものが64件（81.0%）となっており、最も多かった。無人航空機運航にあたり、事前の想定や飛行環境の確認が不十分であった可能性がある。

なお、事故要因が「9. 不明」であるものは31%にのぼった。事故の詳細が報告されていないか記載されていない、または調査中・確認中となっており、情報が不十分であった。今後、国土交通省により情報が追記された場合には再分析を行う。

事故要因が「9. 不明」と分類された139件を除いた場合には、人的要因を含む事故（1, 2, 3, 4, 8に分類された241件）が全体に占める割合は78.0%にのぼる。「9. 不明」を含めた場合でも、人的要因を含む事故が53.9%と半数以上を占めるため、人的要因を減らすことが事故防止につながると予想される。

### 3-9 無人航空機事故の主要因の実例と CRM による事故防止策

最後に、無人航空機事故の各主要因に分類された事例の具体例と、各事案の是正措置を参考にした事故予防策、事故予防に向けて適応可能な CRM スキル、該当する CRM スキルの項目名を表4にまとめた。



表4 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
1 機体点検・整備不良	・経年劣化に伴う部品の故障。	定期的な外部点検を行う。	機器の状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。着陸後に必ず外部点検を行うように計画する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・脱着可能なプロペラアームが不完全に取り付けられていた。	機体に追加安全処置を施すとともに、緊急着陸の手順を厳密化する。	何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・バッテリーの装着が適切ではなかった。	飛行前点検項目として、バッテリー装着時に、確実に装着されていることを確認するよう飛行マニュアルを改訂する。	タスクの中に飛行前点検項目を追加する。何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・プロペラガードが脱落した。	飛行前にプロペラの取り付け状態について再確認を徹底する。	タスクの中に飛行前点検項目を追加する。何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・受信機の故障、もしくは振動によるコネクタケーブルの抜けまたは接触不良。	飛行前の機体確認を徹底する。	タスクの中に飛行前点検項目を追加する。何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・カメラジンバルの電源供給コネクタが外れた。	カメラジンバルの電源供給を司る配線ルートを改善するとともに、飛行前点検で電源供給コネクタの重点的な点検を実施する。	タスクの中に飛行前点検項目を追加する。何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
2 操縦ミス	・飛行中操縦者がモニターを注視していたところ、樹木の存在に気が付かなかった。	操縦者から死角が生じた場合や安全確保が難しい場合には2名以上の補助員を必要とする場所に配置し安全飛行を徹底する。	周囲の環境をモニターし、いつもと違う部分はないかなど確認する。一点集中になっていないか都度確認する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 警戒 (Vigilance)
	・バッテリー残量の判断を誤り、かつ機体をホーム地点に戻す操作を誤った。	バッテリー残量30%以内に帰還させることとし、ホームロック操作の訓練回数を増やし習熟を図る。	より多くのリソースを活用し、現状を判断し今後どうなるのかを分析する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・障害物の存在を把握していたが、障害物との距離感を見誤った。	飛行経路の事前確認を実施し、適切な位置に安全管理者を配置するとともに、操縦者に対し助言する等の連携を密にする。	タスクを行うための準備不足、勉強不足がないか確認する。メンバーとのブリーフィングのための場を設定する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), ブリーフィング (Briefing)
	・カメラアングルの調整に意識が集中し、周囲の安全確認を怠った。	飛行経路の事前確認や監視員の適切な配置を徹底するとともに、飛行状況を容易に視認できる距離で飛行させる。	一点集中になっていないか都度確認する。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。	警戒 (Vigilance), タスクの配分 (Distribution)
	・突風にあおられた際に操縦者が慌てた。	飛行中は周囲の状況に十分注意して飛行させるとともに、急激な操作を行わないように注意する。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・オペレーターの疲労が蓄積し、注意力が散漫になった。	毎年同じ場所で散布を行っているが、ハウスがいつも気になっていた。線の高さ等再確認しナビゲーターとオペレーターとの連絡を密にし、共有し今後の事故を発生しないよう万全を期す。	全員が自分のタスクを確実にこなせるように配分する。疑問に思ったことは躊躇せずに口に出す(時期を逸さない)。	タスクの配分 (Distribution), 安全への主張 (Assertion)

表4 無人航空機事故の主要因の実例と CRM による事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
2 操縦ミス	・ 旋回時のバンク角が大きすぎたため、高度低下し機体のバランスが崩れた。	バンク角に制限を設け、飛行速度にあったバンク角で旋回をする。	冷静に行動し、実行しながらも行動が最良であるか検討を続ける。現在の状況から今後どう変化するか分析する。	実行 (Action), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・ ドローンを自動操縦から手動操作に切替えた際、進行方向操作を誤った。	手動操作時の機体方向、周辺確認を徹底する。	操作を行ったときや、操作を変更するときにはメンバーに伝える。現在の状況から今後どう変化するか分析する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・ 自動飛行 (追従) モードを過信し、わずかに目視を怠った。	目視外飛行では、補助者を適切に配置する。補助者が衝突回避不能と判断した場合は直ちに RTH にて帰還させる。30 m 以上の確保が出来ない場所では、必ずプロペラガード装着にて飛行させる。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。慣れていることでも問題意識を持って確認をする。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 警戒 (Vigilance)
3 飛行計画の不備	・ 飛行経路選定時に障害物との安全間隔を考慮しておらず、飛行時においても障害物との距離測定を誤った。	飛行前に操縦者、補助者全員で飛行エリア、周辺の障害物、補助者の配置位置、飛行中の連絡体制、緊急時の手順確認を徹底する。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。より多くのリソースを活用して情報を集める。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・ 操縦者と補助者間で、飛行予定ルートなど事前に情報共有せずに飛行させた。	飛行前に飛行内容、ルート、高度など操縦者と補助者間で確認し飛行させる。補助者は飛行ルート逸脱の際は操縦者へ警告する。	情報共有に十分な時間をとる。情報は省略せず正確に伝える。他のメンバーが納得して行動できるようにする。	ブリーフィング (Briefing), 情報の双方向での確認 (2Way communication), リーダーシップ (Leadership)
	・ 操縦者が飛行中に通行人からの呼びかけに対応するなど、操縦に集中できない状況下で飛行させた。	操縦者が操縦に専念できるよう操縦者の近くに補助者を配置し、補助者が第三者への対応を行う。また、飛行前の事前周知を行い、必要に応じ管理者等へも周知の協力を依頼する。	コントロール (Control), ナビゲーション (Navigation), コミュニケーション (Communication) の順に優先順位を決定する。安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。	優先順位付け (Prioritizing), 解決策の選択 (Decision)
	・ 船舶から飛行させていたため、自動帰還機能作動時、設定した着陸地点と船舶の位置が異なっていた。	飛行中は船舶を停船させる。	現在の状況から今後どう変化するか分析する。状況の変化に応じて計画しなおす。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・ 低温の環境下で飛行させたため、バッテリーの性能が低下し、動作不良が発生した。	低温の環境下で飛行させる際は、バッテリーの取扱いに注意するとともに、各種諸元を監視しつつ飛行させる。	現在の状況から今後どう変化するか分析する。機器の状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・ 誤った飛行経路を設定して自動飛行を行った。	飛行経路上の障害物等の有無を確認した上で飛行計画を策定する。	情報の確認を行う。タスクを行うために十分な時間をとる (時間が足りなければ、時間を作り出すことも考慮する)。	情報の双方向での確認 (2Way communication), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・ 飛行経路の障害物の有無を十分に確認しなかった。	飛行経路の事前確認を徹底するとともに、安全飛行に関する講習を受講する。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
・ 崖の上を飛行したことで電波障害または突風に流された。	飛行経路の状況や地形などを確認し障害物に十分注意して飛行させる。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)	

表4 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
3 飛行計画の不備	・上空(高度60m)の風速が機体性能を上回り、操縦不能になった。	高度による風速の違いを定量的に把握、それに応じて飛行判断を実施する。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	計画と時間管理(Planning and Time management), 状況の予測と問題点の分析(Anticipation and Analysis)
	・航空局標準マニュアルに記載の「補助者を配置する」「学校の上空では飛行しない」を遵守せず飛行させた。	社内に安全管理者を配置する。事前に飛行計画表を作成し、それに基づいて補助者の配置位置を決める。	意思決定のリソースが自分の把握している以外にもあるか確認する。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。タスクを行うために十分な時間とリソースを確認する。ブリーフィングのための場を設定する。	解決策の選択(Decision), 計画と時間管理(Planning and Time management), ブリーフィング(Briefing)
	・離陸点より70mの高さで河川の上流へ水平移動する設定としていたが、急勾配により、上流では地上と機体の高度差が40m程度となった。	飛行開始前に十分な現地確認を行う。勾配が急な河川上で飛行する場合は、上流部に離陸地点を設定する。機体を撮影高度まで上昇させ、周辺の地形・障害物より十分に高いことを確認する。	タスクを行うために十分な時間をとる。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	計画と時間管理(Planning and Time management), 状況の予測と問題点の分析(Anticipation and Analysis)
	・現場でチェックシートを改変してしまった、クロスチェックの仕組みになっていなかった。	ドローン飛行に関するルール改善・複数人でチェックする仕組みの強化。	ブリーフィングのための場を設定する。情報共有に十分な時間をとる。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。	ブリーフィング(Briefing), 決定・行動のレビュー(Critique)
	・離陸ポイントで風速を確認したが全体を把握できていなかったため、測定以上の強風でコントロール不能に陥った。	1箇所での風速計の測定に限らず撮影現場全体の調査を行ってから飛行をする。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。より多くのリソースを活用して情報を集める。	計画と時間管理(Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有(Monitor and Recognize), 決定・行動のレビュー(Critique)
	・風速計の携帯を忘れていた。安易な判断でテスト飛行をさせた。	危険予測を実施する。製品マニュアル及び無人航空機の許可・承認書に沿って運用する。風速計等を必ず携帯する。風速5m以上の場合は、監視は2名以上で行い必ず1名は風下に配置する。緊急時着陸場所を計画時に選定しておく。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。	計画と時間管理(Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有(Monitor and Recognize)
4 チーム内連携ミス	・飛行中、補助者が他業務のため途中で不在となった。	常時補助者を配置させ、周囲の状況等を操縦者に伝える等飛行の安全を確保するための措置を最優先させる。	互いに質問・情報提供することの重要性を認識する。優先順位とその変更はメンバー間で共有する。	ブリーフィング(Briefing), 優先順位付け(Prioritizing)
	・電線の存在を把握していたが、操縦者と補助者がともに距離感を見誤り、接触した。	事前確認で電線や電柱等、見えにくい位置の障害物を見落とし、操縦者及び補助者の経路・立ち位置を含めた飛行経路を設定する。作業の慣れによる思い込みがないよう、安全を第一に、操縦者及び補助者で相互の連携(コミュニケーション含む)を常に心掛ける。	慣れていることでも問題意識を持って確認をする。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。情報の確認を行う。	警戒(Vigilance), タスクの配分(Distribution), 情報の双方向での確認(2Way communication)
	・飛行開始後、徐々に風が強くなっていることに気付かず飛行を中止する判断が遅れた。補助者が気象状況の変化に気付かず必要な助言ができなかった。	操縦者は飛行前に気象状況を確認し風が強くなりそうな場合は飛行を中止する。補助者は飛行中も風速計を確認し最大瞬間風速が5m/s以上の場合にはすぐに飛行を中止させる。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。「一点集中」に陥らないように注意する。	状況の把握と認識の共有(Monitor and Recognize), 警戒(Vigilance)

表4 無人航空機事故の主要因の実例と CRM による事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
4 チーム内連携ミス	・補助者は配置していたが、無人航空機についての知識のない工事現場技術者であった。	十分な飛行経験のある補助者の設置を行う。	常に先を考えて業務をサポートする。全員が自分のタスクを確実にこなせるように配分する。	リーダーシップ (Leadership), タスクの配分 (Distribution)
	・操縦者含め見張り役や補助者間の連絡体制が確立していなかった。	教育訓練の実施および連絡体制を構築する。	相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。情報の確認を行う。	ブリーフィング (Briefing), 情報の双方向での確認 (2Way communication)
	・組織として標準飛行マニュアルの存在を認識しておらず、管理体制に不備があった。	安全飛行体制を構築する。安全飛行を維持するための遵法体制を維持向上する。	タスクを行うために十分な時間をとる。安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。意思決定のリソースが自分の把握している以外にもあるか確認する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 解決策の選択 (Decision)
	・補助員との連絡に手旗を使用していたが、操縦者が無人航空機に意識が集中し合図を見落とした。	補助員との連絡にトランシーバも併用する。飛行前に補助員と十分打合せを行う。	「一点集中」に陥らないように注意する。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。	警戒 (Vigilance), ブリーフィング (Briefing)
	・外気温が高くなり、オペレーターの注意が散漫した。経験があった場所での防除ということもあり障害物や散布の慣れから油断があった。	必要な人数の補助者を配置し、操縦者との円滑な連絡手段を確保する。事故発生の際に必要な対応や連絡先などをリストアップし、非常時に備える。ヒヤリ・ハット事例を細かく記録し、組織内でその都度共有する。	慣れていることでも問題意識を持って確認をする。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。	警戒 (Vigilance), タスクの配分 (Distribution), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・大区画での作業で、オペレーターとナビゲーターの連絡に無線を用いていたが、距離が離れたことから無線連絡が途切れた。	大区画で作業をする際には、区画を分割して作業を行うことで通信途絶による事故の防止を図る。各作業員に対して安全航行についての注意喚起を行い、危険箇所の確認を徹底する。	情報分析から潜在的な危険性を発見する。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・補助者から操縦者に電話線があることは伝えてあったが、操縦者は6本の線のうち4本しか目視できず、その見えている線のみと思い操縦を行った。	現地確認を徹底する。オペレーターとナビゲーターの連携強化を行う。	情報は省略せず正確に伝える。疑問に思ったことは躊躇せずに口に出す(時期を逸しない)。より多くのリソースを活用して情報を集める。	情報の双方向での確認 (2Way communication), 安全への主張 (Assertion), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
・オペレーターとナビゲーターが機体の動きのみを見ており、電線の位置を把握できていなかった。	事前確認では電線や電柱等、見えにくい位置の障害物を見落とさず、オペレーターおよびナビゲーターの経路・立ち位置を含めた飛行経路を設定する。作業の慣れによる思い込みがないよう、安全を第一に、オペレーターおよびナビゲーターで相互の連携(コミュニケーション含む)を常に心掛ける。	「一点集中」に陥らないように注意する。より多くのリソースを活用して情報を集める。チームのパフォーマンスをモニターし、望ましい環境を維持する。	警戒 (Vigilance), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), チームに適した雰囲気づくり (Climate)	
5 気象(雨、風等)	・天候判断を誤り、霧の中を飛行させた結果、飛行制御部などが水分により誤作動をおこした。	降水や霧の場合は飛行を行わない。飛行中もモニターにより天候監視を行い、降水や霧が確認された場合は帰還させる。	より多くのリソースを活用して情報を集める。現在の状況から今後どう変化するか分析する。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), 計画と時間管理 (Planning and Time management)

表4 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
5 気象 (雨、風等)	・瞬間的にも強風がある中で飛行を実施した。木々の揺らぎで風速判断を行っていた。	補助員等により常時デジタル風速計の計測を行い、操縦者へ適宜伝える。	より多くのリソースを活用して情報を集める。行動した結果に決定の効果が現れているか評価する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), 決定・行動のレビュー (Critique)
	・山頂付近に吹き付けた風が機体下方から煽るような形で吹き付けたことにより、機体の自動調整範囲を超えるピッチ/ロール角になってしまった。	尾根等の地形の急変箇所には近づかない等の運用を行う。対地高度を上げて、地形からの距離をとり、地形に起因する乱流の影響範囲からできるだけ距離を取る。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・離陸時の予期しない突風に対応できず機体が姿勢を崩した。	気象状態を常に把握し、状況が変化した場合は直ちに飛行を中止する。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・上空は地上よりも強い風が吹いていたため、自動帰還できず風に流された。	無人航空機にリールタイプの暴走防止装置を取り付けて飛行させるとともに、飛行前に気象状況の確認を徹底する。	より多くのリソースを活用して情報を集める。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・向かい風により、機体に負荷がかかってバッテリーが想定よりも早く消耗した。	バッテリー残量の半分程度となった場合や飛行目的が達成できた時点で速やかに帰還させる。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。より多くのリソースを活用して情報を集める。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・小雨が降っており、機体内への浸水による機能不良から操縦不能に陥った。	ドローン飛行前に天候状況を確認する。悪天候下のドローン飛行を行わない。	安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	解決策の選択 (Decision), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
・機体の運用限界を超える突風が発生した。	地上及び上空や地形等による風速の違いを十分に把握するため、飛行場所に応じた適切な風速確認を実施する。	安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。	解決策の選択 (Decision), 計画と時間管理 (Planning and Time management)	
6 電波・通信	・直線的な見通しの範囲外となり通信が途絶え、また、山の斜面により捕捉するGPS数が不足した。	定期的な点検時に強制的に電波を遮断し自動帰還が作動するか確認する。離陸から帰還まで地上操縦装置からの機体の見通しを確保し、かつ、捕捉するGPS数が不足しないよう山の斜面から十分な距離を確保する。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・飛行場所付近の鉄橋により電波干渉を受け、通信途絶(制御不能)となった。	周囲の安全確認を行う。鉄橋には近づかない。また、強い磁界を発生する装置付近では飛行させない。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・磁気を帯びている場所で飛行及び飛行前の準備作業を行ったことで、機体が磁気の干渉を受け、GPSに誤作動が生じた。	周辺環境を確認し、磁気が帯びているものの近くで飛ばさない。また、磁気を帯びているものの存在が想定される場合は、機体にヒモを取り付けて段階的に試験飛行を行う。誤動作が発生した場合は機体等の異常の有無を確認し、異常が見受けられた場合は必要な処置を行う。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・物件等の影響により位置情報の通信が不安定になった。	物件等との距離を十分確保し、位置情報の通信を遮るような建造物の影に入る時は注意する。	業務負荷が高くなる(状況が悪化する)場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)

表4 無人航空機事故の主要因の実例と CRM による事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
6 電波・通信	・電波障害により GPS が正常に動作しなくなり設定した経路を逸脱した。	無人航空機の運航方法や緊急時の対応方法を詳細化し徹底する。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・送信機と機体の通信が途切れ、何らかの異常により位置情報が取得できなくなった。	機体のメンテナンス、周辺環境の確認、他の事故事例の把握や危険予測を踏まえた飛行計画の立案を徹底する。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・飛行経路上の山林が電波の遮蔽物となり、通信環境を悪化させた。	通信距離、飛行可能時間等にゆとりを持ち、周囲の地形等も十分に考慮した飛行計画を立案する。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・高圧電線付近を飛行したことによる、電波障害が発生した。	機体の状況を把握するため、フライトログについて記録を残す。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・機体が山陰に入ったことで機体と送信機との通信が途絶えた。	障害物等の影響により機体と送信機との通信状況が悪くなる恐れがあるため、電波強度（通信状況）を補助者とともに十分注意して飛行させる。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
7 バッテリー	・強風が発生したことにより、バッテリーが想定よりも早く消費した。	バッテリー残量に十分余裕を持たせた飛行計画を立案する。急激な天候の変化等を察知した際は速やかに機体を安全に着陸できるように訓練を行う。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・飛行当時の気温が低かったため、バッテリーの性能低下が起きた。	気温が低い時は、バッテリーの残量に十分注意し、不要な飛行は控える。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・充電電池の不具合。	飛行前に充電電池を含めた飛行前点検を徹底し、離陸後は低空にて飛行状態を確認した上で通常飛行に移る。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・バッテリーの高温化による異常。	表面温度等のバッテリーの状態を管理する。外気温が高く、直射日光が当たる環境下での使用は極力控える。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・バッテリー成分の異常、バッテリーを充電する際のシステム上の不具合。	飛行前点検時にバッテリーに異常がないことおよびバッテリーが装着部にしっかりと装着されていることを確認してから飛行する。少しでも膨らみや違和感を感じたらそのバッテリーは使用しない。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
・バッテリー取り扱い時の衝撃による破損。	チェックリストに機体のバッテリーの取り扱いと装着確認を追加する。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。冷静に行動し、実行しながらも行動が最良であるか検討を続ける。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), 実行 (Action)	

表4 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
	・機体が飛行予定範囲からはみ出した。補助者は操縦者の判断で配置しなかった。太陽の反射光により機体を見失った。操作画面を注視して無人航空機を見ていなかった。	関係法令・飛行マニュアルを再確認する。飛行予定範囲および関係各所への飛行事前連絡の徹底。必要数の補助者を配置する。社内で再講習を実施。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。ブリーフィングのための場を設定する。安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。「一点集中」に陥らないように注意する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), ブリーフィング (Briefing), 解決策の選択 (Decision), 警戒 (Vigilance)
	・操縦者の意思と異なる動きが生じた時に、適切な操作ができなかった。危険箇所の確認不足であった。操縦者と機体監視者の事前打合せが不十分であったことから、不用意に機体に接近した。	危険箇所の事前確認を操縦者と監視者が一緒にすることで情報共有を図る。操縦者および監視者は、機体の位置取りや立ち位置等について事前に打合せを行い連携を図るとともに、離着陸時は機体から十分な安全な距離を確保する。	より多くのリソースを活用して情報を集める。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。常に先を考えて業務をサポートする。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis), タスクの配分 (Distribution), ブリーフィング (Briefing), リーダーシップ (Leadership)
8	・飛行開始時のバッテリーの充電率が60%の状態で行を開始し、その後、電池残量減少のアラームが鳴っていたのにも関わらず、飛行を継続させた。	飛行開始時はバッテリーの充電が100%であることを確認した上で使用開始する。電池残量は常に確認し、アラームが鳴り、電池残量が25%を未満となった場合には速やかに帰還させる。	安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。時間制限とタスクの緊急度を考慮して決定する。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	解決策の選択 (Decision), 優先順位付け (Prioritizing), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
複 合 要 因	・前回の飛行より半年以上期間が空いており、事前練習の不足および気の緩みもあり、また、補助者からの注意喚起も少なかった。	練習会および安全講習の実施、飛行予定場所の事前確認、飛行させる者の横に熟練者を配置する。また、飛行させる者と補助者相互間の注意喚起を徹底する。	慣れていることでも問題意識を持って確認をする。危険であると感じた時は自己主張の程度を強める。全員が自分のタスクを確実にこなせるように配分する。	警戒 (Vigilance), 安全への主張 (Assertion), タスクの配分 (Distribution)
	・補助者が無人航空機の動きを確認しておらず、操縦者と補助者の連絡体制も不適切であった。また、飛行させた際、付近に複数の無人航空機が飛行していたため、電波障害が発生した可能性もある。	無人航空機の飛行状況の監視を徹底するとともに、操縦者と常に連絡を密にする。また、無人航空機を離陸させる前に付近に他の無人航空機の有無について確認する。	相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。チームのパフォーマンスをモニターし、望ましい環境を維持する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	ブリーフィング (Briefing), チームに適した雰囲気づくり (Climate), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・オペレーターの操作ミス、熟練オペレーターであるが故の「慣れ」による油断、ナビゲーターからの注意喚起が不十分による連携不足。	定期的なオペレーター研修会等の開催による安全フライトに対する意識の醸成、過去の無人ヘリ事故の事例をあげた危機管理の啓発、事前確認による飛行経路および障害物等の把握の徹底、危険地帯を散布区域から除外するなどリスク回避、農林水産航空協会などが示す安全対策の励行、その他、安全フライトのための基本事項遵守の徹底。	慣れていることでも問題意識を持って確認をする。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。危険であると感じた時は自己主張の程度を強める。チームのパフォーマンスをモニターし、望ましい環境を維持する。	警戒 (Vigilance), ブリーフィング (Briefing), 安全への主張 (Assertion), チームに適した雰囲気づくり (Climate)

表 4 無人航空機事故の主要因の実例と CRM による事故防止策（続き）

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした 事故予防策	事故予防に向けて適応可能な CRM スキル	左記に該当する CRM スキルの項目名
8 複 合 要 因	・飛行前の風速の測定について、当日の飛行可否は天気予報と体感での判断であった。また、機体を緊急着陸させる選択肢もあったが判断できなかった。	飛行前および飛行中は風速計による確認を行い、規定値を超える風速を確認した場合は、速やかに飛行を中止する。また、事前に綿密な飛行計画を立案し、十分安全を確保できる計画とする。各種判断が適切にできるよう操縦技量の向上や周知等を徹底する。	意思決定のリソースが自分の把握している以外にもあるか確認する。冷静に行動し、実行しながらも行動が最良であるか検討を続ける。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。疑問に思ったことは躊躇せずに口に出す（時期を逸さない）。	解決策の選択 (Decision), 実行 (Action), 決定・行動のレビュー (Critique), 安全への主張 (Assertion)
	・目視外飛行になることが予想されたにもかかわらず、事前に地形などの飛行経路の確認を怠った。また、操縦者と監視員の連携不足のため、監視員による飛行制止が間に合わなかった。	・飛行前に地形等の飛行経路について十分な確認を行うとともに、飛行経路に応じた人数の監視員を配置して飛行させることを徹底する。	タスクを行うために十分な時間をとる（時間が足りなければ、時間を作り出すことも考慮する）。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。ブリーフィングのための場を設定する。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), ブリーフィング (Briefing)
	・事前の現地確認不足。着陸時のオペレーターの立ち位置に問題があった。また、(農薬等の) 散布効率にとらわれ、最短ルートで移動、着陸させようとして電線の下をくぐらせてしまった。	・事前の現地確認において、特に障害物や近くに電線のある危険箇所については散布地図に明記するよう指導を徹底する。	タスクを行うために十分な時間をとる。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。ブリーフィングのための場を設定する。「一点集中」に陥らないように注意する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize), ブリーフィング (Briefing), 警戒 (Vigilance)
	・作業効率を優先し電線・道路を越えて飛行し、ナビゲーターが適切な位置に移動する前に飛行を先行させた。	飛行ルート上に遮蔽物がある場合は、その周辺で電波状況 (2.4 GHz 帯) をアプリで確認する。当日の最初のテスト飛行で、自動帰還機能が正常に機能するか確認する。より視野が広くなり、また、視野を補完できるような位置に監視員を配置する。	安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。時間制限とタスクの緊急度を考慮して決定する。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。	解決策の選択 (Decision), 優先順位付け (Prioritizing), タスクの配分 (Distribution)
	・機体が突風に煽られた際に、操縦者が慌てて操作ミスをした。機体と操縦者、監視者と操縦者との距離が通常以上に離れており、機体の挙動に対して繊細な操作が行えなかった。撮影範囲が広大な業務は初めてであり、操縦者・監視者ともに経験が少なかった。	一定期間に一回以上の突風を感じる場合は飛行を行わない。突風が生じるような場所にはとどまらない。また、そのような場所で、繊細な操作が必要な場合は、操縦者と機体、操縦者と監視者の位置をなるべく離さない。通常業務と異なるような状況では、従来よりも監視者や補助者を追加し、配置や伝達方法等を十分に検討して飛行させる。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), ブリーフィング (Briefing), 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
9 そ の 他	・鳥の急接近に対応が間に合わずドローンと接触し羽が折れ墜落となった。	チェック項目に、周辺環境の確認を追加する。飛行中に異常や周囲の状況で危険を感じた場合には、直ちに操縦者へ報告し、安全な場所へ着陸させるまたは、その場で急上昇等の操作を行い危険を回避する。	業務負荷が高くなる（状況が悪化する）場合に備えて計画する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	計画と時間管理 (Planning and Time management), 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)



CRM スキルの項目名は、下記に挙げる 5 分野 15 項目[10]を用いている。

1. 状況認識 (Situational Awareness)
  - ・ 状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
  - ・ 警戒 (Vigilance)
  - ・ 状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
2. チームの形成 (Team Building)
  - ・ リーダーシップ (Leadership)
  - ・ チームに適した雰囲気づくり (Climate)
  - ・ 意見の相違の解決 (Conflict Resolution)
3. 意思決定 (Decision Making)
  - ・ 解決策の選択 (Decision)
  - ・ 実行 (Action)
  - ・ 決定・行動のレビュー (Critique)
4. 業務負荷 (ワークロード) マネジメント (Workload Management)
  - ・ 計画と時間管理 (Planning and Time management)
  - ・ 優先順位付け (Prioritizing)
  - ・ タスクの配分 (Distribution)
5. コミュニケーション (Communication)
  - ・ 情報の双方向での確認 (2Way communication)
  - ・ 安全への主張 (Assertion)
  - ・ ブリーフィング (Briefing)

具体的な事象や場面を想像することで、訓練に用いることができるようにすることを目指すものである。なお、個人の捉え方によって、どのような CRM スキルを用いることができるかについては意見が多様であるため、あくまでも例示とし、無人航空機運航における CRM について考える基礎資料としたい。

## 4. 考 察

### 4-1 日本国内での無人航空機事故の特徴

分析対象とした 7 年間 (2015-2021 年度) の間に国内で発生した無人航空機による事故トラブルについて、全体の件数では 2021 年度の 86 件が最も多くなっている。顕著な増加傾向とは言えないが、新型コロナウイルスの感染拡大の影響により業務や個人的目的での飛行件数が抑制されていた可能性が考えられる。機体別では「マルチコプター (130 件, 54.4%)」「農業用無人航空機 (94 件, 39.3%)」の 2 つを合わせると 90% 以上を占めていた。

事故の結末を機体ごとに見てみると、マルチコプターでは小型の機体が多いことから、風に流されたり見失ったりすることによる「紛失」が 36% と多くみられた。紛失した機体が発見に至っていない事案も数多くあり、紛失時の対策 (報告, 周辺地域への周知等) が重要である。紛失後に墜落して人的・物的被害を生む可能性もある。また、「墜落」も 34% と多く、電波障害や何らかの異常により突如操縦不能になるケースや、操縦ミス、突風などによる墜落が主であった。墜落場所や被害のあり方についても多様であった。

一方、農業用無人航空機については、機体がある程度の大きさ・重量があることや、飛行範囲が圃場などに限られていることもあり、紛失の事例は見られなかったが、「接触+墜落」が 60%、「接触」が 29% と、電線・電話線・インターネット回線等の架線や近隣の建屋に接触するケースがほとんどを占めていた。農業用の無人航空機の利用については今後急速に拡大する可能性があり、事故報告件数も増加することが予想さ

れる。農薬・肥料散布等については、従来のヘリコプター型だけでなく、ここ数年はマルチコプター型の機体も普及していることから、これまでに報告された事故事例とは異なる様相の事故トラブルにつながる可能性も否定できない。

人的被害の発生については年間 2-3 件であり、顕著な増加は見られなかったが、墜落等により周囲の人に接触し負傷させる事案は複数起きている。また、物的被害については農業用無人航空機によるものを中心に増加傾向にあり、最も多かった 2021 年度で 47 件であった。ただし、今後はレベル 4 運航の開始に伴い人的被害・物的被害の内容も多様になってくる可能性がある。

#### 4-2 無人航空機事故の主要因と事故防止の課題

無人航空機事故の主要因は、多い順に、「複合要因（17.6%）」、「飛行計画の不備（14.3%）」、「操縦ミス（9.2%）」、「機体点検・整備不良（8.3%）」、「電波・通信（GPS 受信を含む）（6.5%）」、「気象（風・雨等）（6.3%）」、「バッテリー（2%）」、「その他（0.4%）」となっている。

事故要因が「不明」と分類されたものを除いた場合には、人的要因を含む事故が全体に占める割合は 78.0%にのぼり、「不明」の事案を含めた場合でも、人的要因を含む事故が 53.9%と半数以上を占めた。

特に「飛行計画の不備」に関しては、単独の主要因としては最も多く、「複合要因」の事案に関しても 81%が「飛行計画の不備」を伴うものであったことからすると、これまでの多様な運航において、計画作成時点での体制や手法に課題があったと考えられる。現在標準化されている飛行計画作成の手法やそのための訓練方法についても、無人航空機利活用の実態に合わせて変更すべき点がある可能性は否定できず、経時的に事故事例の分析や操縦者・運航者の実態調査を行って検証することが望ましい。

なお、当該カテゴリに分類されたものの、実際に飛行計画自体に不備があったのか、その計画の実行段階で不備があったのかについて判別できないものもあった。ただし、事故事例の中には、地形の見落としや気象状況の評価の誤りなど事前の計画段階での情報収集・分析が不十分であることが見受けられるものも少なくないため、飛行計画を複数名で作成しチェックすること、そのための十分な情報収集を行うことは必須である。

Harms-Ringdahl[11]は、産業における安全管理のための計画作成について、「計画した段階で評価し、実行段階でも評価する」ことを基本とするよう訴えている。また、実行段階で準備が整っているかの確認事項として、「機器などハードウェアが OK か」「人が OK か」「手順が OK か」の 3 つをとともに確認して初めて、システムとして準備が整っていると認識できるとしている。（人については適切な訓練を受けていることも要素として含まれるとしている。）無人航空機運航者においても、飛行計画の作成時に内容を複数名で確認するとともに、飛行前のブリーフィング時にも再度飛行計画、チェックリストの確認を複数名で行い、現地の状況等によって変更が生じた場合には速やかに計画を修正し情報共有することが重要である。

#### 4-3 無人航空機領域における CRM（クルー・リソース・マネジメント）の適用方法と注意点

本研究では、CRM スキルをどのように無人航空機領域に適用していくかについて具体的な考え方を示すために、事故トラブル事例の事例・要因別に、その改善策のため CRM スキルのうちどの要素が当てはまる可能性があるかについて例示した。特に、「状況の把握と認識の共有（Monitor and Recognize）」「計画と時間管理（Planning and Time management）」「状況の予測と問題点の分析（Anticipation and Analysis）」「警戒（Vigilance）」「ブリーフィング（Briefing）」などのスキルが事故防止に役立つと思われる事例が多かった。

国土交通省「無人航空機の飛行の安全に関する教則」（2022 年）[7]に含まれている、「安全な運航のための意思決定体制（CRM 等の理解）」の項目では、CRM の標準的な学習・訓練方法については記されていない。具体的な事案をもとに、操縦者・運航者各自がよりよい事故防止策を検討できるような資料や訓練方法が求められている。

古田[12]は、「座学で CRM の知識や方法を学んでも、それらを実際の運航ですぐに活用できるとは限らず、学んだ知識や方法を実際に活用するための訓練の場が必要となる」と指摘している。そのため、各国の航空会社においては、LOFT (Line Oriented Flight Training) と呼ばれるトレーニングで、シミュレータ (模擬飛行装置) を使用して、路線運行で発生する様々な事態の模擬を行い、ロールプレイ等で CRM 定着のための実践を行ってきた。無人航空機においても、有人機と同様の利活用が増加するにつれて、机上学習だけでなくシミュレータやロールプレイによる訓練が必要となることが予想される。

また、個人や団体による小型無人航空機の利用拡大が続く中、その課題として、Balogら[13]は、『機体の検知・追跡・操作管理の限界に加えて、運航に携わる者の“command (指示)”, “control (操作)”, “communication (コミュニケーション)” のいわゆる「C3」の標準化が進んでいない」ことを挙げている。特に、有人機とは異なり知覚的な情報不在のまま目視外で操作する場面では、無人航空機の操縦者が警戒と関与をどのように維持するべきかが問われていると指摘している。今回の事故事例の分析でも「操縦ミス」「チーム内連携ミス」など実際の飛行場面でのミスが目立っており、CRM の理解を深めることによって、指示やコミュニケーションのあり方を含めたノンテクニカルスキルの向上に寄与できれば望ましい。

一方、Salasら[14]は、CRM の訓練を航空業界以外の業種に適用する場合、CRM 訓練の内容の修正やアップデートを続けていくことが必要であり、短期・長期での効果を検証するためのリソース (データや評価方法等) に研究者等がアクセスできるようにすることが重要であると示唆している。無人航空機領域は従事者の業種も幅広いため、業界ごとの慣例や特徴、作業手順等を参考にした上で、その分野に従事する人たちが理解しやすい内容に修正・アップデートしていく作業も必要であると考えられる。

#### 4-4 次世代の航空安全に向けて：さらなる情報収集と分析の必要性

“1 件の重大事故の背後には 29 件の軽微な事故があり、さらにその背後には 300 件のヒヤリハット事例がある” とした「ハインリッヒの法則」で知られる Heinrich は著書「Industrial Accident Prevention (産業災害防止論)」の中で、事故など労働災害が発生した場合には、直接的なコストだけでなくその 4 倍の間接的なコストも同時に生じることになる (1 対 4 の比率) と指摘している[15]。間接的なコストには、負傷者の損失時間、事故の影響で作業を停止することになった他の人々の損失時間、監督者や組織幹部による原因調査や災害報告に要する時間、新たな事故防止のための訓練の費用、違約金の支払いなど社会的な側面で生じるコスト、などが含まれる。

同書の中で Heinrich は、事故が発生した場合の報告のあり方について、責任者がたった一つの原因を求めればよいということではなく、背後にある真因を知るために、関係者に当時の行動や状態について単純に列挙してもらう方式が望ましいと述べている。当該の作業にあたった従事者皆が、自らの行動や気持ちと、その特徴、潜在的なリスクについて気付いてもらうことの重要性を示していると言えるだろう。

日本では、2022 年の法改正により無人航空機事故・重大インシデントの報告が義務化され、国土交通省の報告書様式には、発生した事象の概要を記載する欄がある[16]。このような報告時には、報告者が要因を断定して記載するのではなく、複数の関係者からのヒアリング等をもとに、あらゆる側面での行動、状態について列挙することができれば、情報がより広く深く蓄積され、今後の事故防止に役立つのではないだろうか。

参考として、IATA (国際航空運送協会) による航空機事故の報告書では、「脆弱な状態 (安全管理体制や訓練を含む)」、「脅威 (外的要因)」、「フライトクルーによるエラー (人的要因)」、「望ましくない航空機の状態 (起こった事象)」、「対処方法」のそれぞれの項目について、どのような要因があったかが記載されている[17]。環境・ハード面など外的要因、関係者による人的要因、その前段階にあるシステムや訓練体系などの潜在的なリスクを含めた様々な側面から検証することの重要性が示されている。

また、ヒューマンエラー低減のためのリスクアセスメントについて Hurst[18]は、「リスクに関する論争

には広い範囲にわたる問題があり、論争は、歓迎すべきである。リスクアセスメントは、多分野にまたがる活動であり、どれか一つの分野がそのまま貫徹されるものではないと考えるべきである」とし、多分野にわたるチームで探求すべきだと指摘している。今後、無人航空機分野において複数の業種が一緒になって従事する機会が増えることを考えると、多分野の視点からの情報提供や分析が必須になってくると考えられる。

なお、今回の分析で事故の主要因が「不明」となっているものが31%を占めていることについては、電波・通信の不具合や機器のプログラム面での問題など、他の IT 機器等と通じる課題が挙げられると考えられる。「突如操作不能になった」と表現されている事例が数多く存在しているように、機器や電波環境の改善がなされない限りは原因を最後まで究明することができないケースも一定程度存在し続けると予想される。

原因の特定に向けたハード面での対策については、機体へのフライトレコーダーの搭載、プロポ（コントローラー）またはコントロールシステムへのボイスレコーダー等の配備などが挙げられる。これまではマルチローター型の小型機が主流であったことから、例えば趣味飛行や訓練などでどこまでの装備が求められるかは明確ではなかったが、今後レベル4運航で大型機による配送や人の輸送が行われるようになると、事故の程度によっては運航者側に責任があったかどうかの判断の根拠となるデータが必要となる可能性がある。一方、フライトレコーダーを搭載している機体の場合、メーカーへのデータ分析の依頼が有償となる場合があり、運航者がそのコストを負担して事故分析を行っているかについては実態は明らかではない。

原因の特定に向けたソフト面での対策については、事故等の報告をしやすい環境づくりが挙げられる。2022年の法改正により事故（人の死傷又は物件の損壊を伴うもの、航空機との衝突または接触）または重大インシデンの国土交通省への報告が義務化されたが、運航者が自主的な報告にどこまで取り組めるかが今後の焦点の一つといえよう。

アメリカ連邦航空局（FAA）では、無人航空機による事故が発生した場合に、NASA（アメリカ航空宇宙局）の航空安全報告プログラム（ASRP）に一定の要件を満たす報告書（「違反が意図的ではなく、不注意であったこと」を示す）を期限内（違反後10日以内、または違反を認識した日もしくは認識すべきであった日に事故または発生に関する報告書に記入し、NASAに交付または郵送）に提出すれば、運航者による建設的な態度とみなし、仮に違反の認定がなされたとしても民事罰や認証停止はなされないとしている[19-21]。匿名での報告が可能であり、誰でも閲覧できるため、事例収集や知見の共有に役立っている。このような制度のあり方も参考となる可能性がある。

今回分析の対象とした国土交通省に報告され収集されている事故トラブル事例は448件と限られているが、操縦者ライセンスの国家資格化など法改正と利活用のさらなる拡大を受けて、2023年度以降は報告件数が大幅に増加する可能性がある。国土交通省から発表される事例は情報が「確認中」「原因分析中」と記載されているものも少なくないが、その後に明らかになった情報があれば公開されることを望みたい。同時に、操縦者や運航従事者においても、事故トラブルが起きた場合には適切な手順により速やかに報告するとともに、関係機関による検証作業に積極的に協力することを基本としていくべきである。

## 5. 終わりに

本研究は、CRM（クルー・リソース・マネジメント）をどのように無人航空機の運航に活用していくかについての基礎的資料として、国内で既に発生した事故事例をもとに検証したものである。幅広い業種の人々が無人航空機を利用するようになってきているため、事故がどのような場面で発生しうるかについて理解しやすくするとともに、ソフト・ハード面での事故防止策を検討し、特に人的要因に起因する事故の発生を防ぐためにCRMスキルをどのように応用できるのかについて例示することを目的とした。

国内で発生した無人航空機による事故トラブルにおいては、2015年度から2021年度まで7年分の分析により、原因不明のものを除くと人的要因を含む事故が8割近くを占めることが明らかになり、ヒューマンエ

ラーの低減が重要であることが改めて示唆された。

一方、インフラとしての定着が期待される中で、将来的には、無人航空機の操縦のあり方がマニュアルだけでなく大幅にシステム化していくことが想定される。そのため、有人航空機と同様に、30-40年先を見据えた事故防止策を構築するにあたり、常にその時点で「何が起きているのか」を検証し、事故を未然に防ぐ対策のあり方を継続的に検討していく必要がある。本研究の成果は、これからの無人航空機の操縦および安全運航管理に関する教育・訓練のあり方について議論を深めていくための継続的な分析の一環として活用されることを期待したい。

2022年の法改正とともに様々な機体が広範囲で実用化され、現時点では想像できないような利活用方法も将来的に展開される可能性があるが、ひとたび重大事故が発生してしまうと、無人航空機業界全体の信頼や発展に大きな影響を与えかねない。運航に携わる幅広い人々が、航空事故防止の基礎であるCRMについての知識を得るとともに、実際の訓練でも活用し、業界全体で安全運航に努めていくことが求められている。

投稿受付：2023年3月22日

採録決定：2023年4月14日

## 謝 辞

本研究で分析にご協力いただきました増尾ふゆの氏（航空機操縦士，JUIDA認定講師）、桃井良幸氏（JUIDA認定講師）に御礼申し上げます。

## 文 献

- [1] 内閣官房 小型無人機等対策推進室：“レベル4飛行の実現，さらにその先へ”，2022.  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/drone\\_platform/pdf/20220721kouen.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/drone_platform/pdf/20220721kouen.pdf), p. 3 (accessed on March 15, 2023).
- [2] Helmreich RL, Foushee HC：“Why CRM? Empirical and theoretical bases of human factors training”, in Kanki BG *et al.* (eds) : *Crew Resource Management*, Elsevier, 2010, pp. 5-20.
- [3] Helmreich RL, Merritt AC, Wilhelm JA：“The evolution of crew resource management training in commercial aviation”, *International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 9, No. 1, pp. 19-32, 1999.
- [4] 日本航空機操縦士協会：Aeronautical Information Manual Japan (AIM-J), effective for January 1- June 30, topic 911-913, 2023.
- [5] The Boeing Company：“Accident rates and onboard fatalities by year”, in *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents -Worldwide Operations 1959-2021*, 2022, p. 10.
- [6] International Civil Aviation Organization (ICAO) UAS Advisory Group：“RPAS Manual”, in *Training and Education General Recommendations*, <https://www.icao.int/safety/UA/UASToolkit/Pages/Narrative-Training.aspx> (accessed on March 15, 2023).
- [7] 国土交通省：“無人航空機の飛行の安全に関する教則（令和4年11月2日）”，2022.  
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001520517.pdf> (accessed on March 15, 2023).
- [8] 国土交通省：“無人航空機による事故等の情報提供「過去の事故情報等の一覧」”，  
[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_ua\\_houkoku.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_ua_houkoku.html) (accessed on March 15, 2023).
- [9] 一般社団法人日本UAS産業振興協議会：無人航空機安全管理者コース教材，p. 13, 2020.
- [10] 大原 大：“ドローン利活用における安全運航スキルと人材育成～CRM（クルー・リソース・マネジメント）の観点から～”，*Technical Journal of Advanced Mobility*, Vol. 1, No. 3, pp. 1-11, 2022.
- [11] Harms-Ringdahl L：*Safety Analysis—Principles and Practice in Occupational Safety*—, Elsevier Applied Science, 1993.
- [12] 古田一雄：ヒューマンファクター10の原則—ヒューマンエラーを防ぐ基礎知識と手法—, 日科技連出版社, 2008, pp. 70-71.
- [13] Balog CR, Terwilliger BA, Vincenzi DA, Ison DC：“Examining human factors challenges of sustainable small unmanned aircraft system (sUAS) operations”, in Savage-Knepshield P, Chen J (eds) : *Advances in Human Factors in Robots and*

*Unmanned Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 499, pp. 61-73, Springer, Cham, 2017.

- [14] Salas E, Wilson KA, Burke CS : “Does crew resource management training work? An update, an extension, and some critical needs”, *Human Factors*, Vol. 48, No. 2, pp. 392-412, 2006.
- [15] Heinrich HW *et al.* (総合安全工学研究所訳) : ハイน์リッヒ産業災害防止論, 海文堂, 1982.
- [16] 国土交通省航空局 : “無人航空機の事故及び重大インシデントの報告要領 (令和 4 年 11 月 4 日)”, 2022.  
<https://www.milt.go.jp/koku/content/001520661.pdf> (accessed on March 15, 2023).
- [17] International Air Transport Association (IATA) : “2009-2013 aircraft accidents—Top contributing factors, 2009-2013”, *IATA Safety Report 2013* (50th edition), Section 4, p. 31, 2014.
- [18] Hurst NW (花井荘輔訳) : *Risk Assessment—The Human Dimension—* (リスクアセスメント—ヒューマンエラーはなぜ起こるか, どう防ぐか—), 丸善株式会社, 2000.
- [19] Federal Aviation Administration (FAA) : “Aviation Safety Reporting Program (ASRP) for UAS”, May 31, 2022.  
[https://www.faa.gov/uas/getting\\_started/asrp](https://www.faa.gov/uas/getting_started/asrp) (accessed on March 31, 2023).
- [20] Federal Aviation Administration (FAA) : “AC 00-46F - Aviation Safety Reporting Program” issued on April 2, 2021.  
[https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_00-46F.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_00-46F.pdf) (accessed on March 31, 2023).
- [21] National Aeronautics Space Administration (NASA) : “UAS Safety Reporting”, <https://asrs.arc.nasa.gov/uassafety.html> (accessed on March 31, 2023).



#### 大原 大

エバー航空 ボーイング777操縦士/北米、  
欧州、東南アジア路線担当。飛行時間約  
9,000 時間。JUIDA 認定校「NEXAIRS  
DRONE ACADEMY」を展開する Five  
Star Group Inc. 代表取締役。2006 年

International Aviation Academy of New Zealand を卒業後, JAL  
グループで運航乗務員を経て現職。

E-mail : [ohara@five-star-group.com](mailto:ohara@five-star-group.com)

# Global Drone Regulations and Research Survey with the Examination of Its Application

Ghassaq Issa Hasan Alrubaye<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Miyauchi<sup>\*1</sup>

Building Research Institute<sup>\*1</sup>

With the launch of new operations of drones starting in the UA level 4 Flight in Japan or the U-Space in EU, various practical drone operations are increasing rapidly. While it is considered that regulations on specific operations are also required at the same time, in this paper, the author was able to examine the application of the characteristic operation methods applied in each country in the Japanese civil engineering and architecture industry and the need for specific new regulations by examining regulations or research trends related to drones in various countries, and systematically & collectively convert them to data.

**Keywords:** Global, Drone, Regulations, Civil engineering, Architecture, Construction

## 1. Introduction

Social implementation of drone (UAV) is further advancing as the revised Aviation Law was enforced on December 5, 2022 in Japan, and the range of specific utilization is expanding. Since different types of UAV operations are increasing rapidly, more specific regulation-establishments or infrastructure-developments for certain industries are expected to be needed urgently such as the infrared investigation by UAVs for exterior wall tiles[1]. Meanwhile, UAV regulations are rapidly established and developed around the world, therefore, it is necessary to have an organized/reliable information from each country as the demand for international drone operations is expected to increase.

For that reason in this paper, the research of drone acts from official aviation authorities of different countries are summarized, and a research of the trends of drone academic journals using the global research database, Web of Science[2] (WoS), which includes 100% of the journal impact factor given journals was conducted.

The consideration will be given to discussing the possibilities of advancing the UAV utilizations in different aspects of operations in the Civil Engineering/Architecture fields after the analysis of the research results.

## 2. Research Methods

### 2-1 Drone Laws/Regulations

The data in Table 1 was obtained from governmental sources dedicated to UAVs from respective countries, and the official information was summarized from law statements of the aviation agencies or ministries such as MLIT (Japan), FAA (USA), CAA (UK), CASA (Australia), EASA (EU), ENAC (Italy), CAAC (China), KOCA (Korea), CAAS (Singapore), CAD/TCCA (Canada), etc.

○ suggests that laws or regulations exist or described in official information from governmental authorities.

× suggests that clear statements or regulations were not found.

The cell which has only explanation without the above suggests that there is a system under development, or general rule will be applicable even though this rule is not having direct description to this categorization in the table.

Table 1 (a) Drone Laws & Policies in each country as of March 2023.

	Drone laws & policies						
	General drone						
	Drone registrations	Pilot license (training) or drone operator	UTM (UAV traffic management)	Height	Night	Beyond visual line of sight (BVLOS)	Safety (uninvolved people, etc.)
Japan	○ All: ≥100 g, Type 1 Model/Aircraft (Category III), Type 2 Model/Aircraft (Category II)	○ First rank (Category III) · Second rank (Category II)	○ UTMS: rolling out in the coming years	○ 150 m	○ Permissions, or license: second rank/second type or above	○ Permissions, or license: second rank/second type or above. Including Level 4 (DID)	○ 30 m from people, buildings, vehicles, etc.
China	○ ≥250 g, Multiple categories depending on weight, purposes	○	○ UACS (drone cloud service)	○ 120 m	○	○	○ 30 m from the crowd
US (differ by state)	○ Certified: all (<55 pounds), Recreational: >250 g	○ Certified RP & recreational	○ UTM: FAA & NASA are conducting research (& LAANC)	○ 400 feet (about 120 m)	○ Anti-collision lighting	○ Developing under the BEYOND program (some exceptions)	○
UK (some similarities with EU)	× All ≥250 g or <250 g which is not a toy and with camera: register as operator/owner (not drone)	○ Flyer ID (theory test) & operator ID	○ ATM (Air Traffic Management), ATC, ATS, ANSP (Air Navigation Service Provider)	○ 120 m (400 feet)	○ Follow basic VLOS principle & lighting/illumination requirements	○ Within specific category with operational authorization (DID: with DAA)	○ Horizontal distance: 50 m, or 1:1 rule (Differs by drones, etc.)
EU (some differences in each country)	○ Same as UK  Drones: only when the drone is certified	○ UAS Operator & trainings for pilot	○ U-Space	○ 120 m (400 feet)	○ With green flashing light	○ Specific category (and certified) (DID: ×)	○ 30 m France/Luxemburg: 30 m, Italy: 50 m (Differs by drones, etc.)
Canada	○ 250 g-25 kg, >25 kg: certificate	○ Basic & advanced (for 250 g-25 kg)	○ RTM (UTM): developing with SkySensus & AirMarke	○ 122 m (400 feet)	○ With light	○ With permission (DID: ×)	○ 30 m from bystanders
Australia	○ Business: all, Recreational: from mid-2023	○ Operator accreditation, ReOC, RePL	○ UTM: under development & reviewing laws	○ 120 m (400 feet)	○ Authorizations	○ Authorizations (DID: ×)	○ 30 m from people
South Korea	○ Commercial: all, Non-profit: all >2 kg, Safety certification: >25 kg	○ Pilot certificate (Type 1-4 according to the aircraft weight for >250 g)	○ Under development	○ 150m	○ With special flight approval	○ With special flight approval	○
Singapore	○ >250 g: all	○ UA basic training certificate, UA pilot license (depending on purpose, weight, location)	○ CFMS (UA tracker)  Necessary for operator permit holder	○ 200 feet (about 60 m)	○ Within line of sight (lighting system for BVLOS)	○ With operator permit and Class 1 activity permit	○



Table 1 (b) Drone Laws &amp; Policies in each country as of March 2023.

	Drone laws & policies						
	General drone					Civil engineering	Architecture
	Operating over uninvolved people	Operations require a permission/ authorization	Micro drone	Recreational flight	Indoors	(Or other industries)	
Japan	○ Not allowed except level 4 (Category III)	○	○ Drone act (<100 g)	Same rule applies	× Other laws such as radio act, etc. can apply	○ Guidelines for using new technology[3]	○ Infrared investigation by UAV for exterior wall tiles[1]
China	○ When the crowd is approaching: ≥10 m (horizontally too)	○	○ (<250 g)	Same rule applies	×	× (Plant protection)	
US (differ by state)	○ Wavier (some exceptions)	○	○ ≤0.55 pounds (≤250 g)	○ Recreational flyer	×	× (Telecommunications, highways)	
UK (some similarities with EU)	○ (Differs by drones, categories, assembly of people, etc.)	○ Specific (and certified), certain exceptions for ≤1 kg of tethered UAS operation	○ <250 g which is not a toy and with camera: no registration, & no training	As a member of CAA recognized model aircraft organization, or open & specific category	×	× -Drone safe register™: network of commercial drone operators: roof inspection, thermal imaging, 3D modeling, church/spire inspection, survey, construction, mapping, etc. -Guideline from church	
EU (some differences in each country)	○ (Differs by drones, categories, assembly of people, etc.)	○ Specific category (and certified) (excluding STS, applicable from 1/1/2024)	○ Same as UK	Authorization to model aircraft clubs/ associations, or open & specific category	×	×	×
Canada	○ With advanced certificate	○ SFOC-RPAS	○ (<250 g) No drone certificates require	Same rule applies	×	×	×
Australia	○ (× except approved delivery services)	○	○ (≤250 g) Operator accreditation only for jobs	○ Operator accreditation from mid-2023 (>250 g)	×	×	×
South Korea	○ Prohibition over densely populated areas or large crowds without permission	○ Permission for photograph, flight approval, special flight approval, business registration	○ ≤250 g All aviation safety rules or pilot codes applies	○ All aviation safety rules or pilot codes applies	× No approval required; night is ok too with proper lighting	×	×
Singapore	○ Medium/high risk category of BVLOS	○ Operator permit (CFMS & UA tracker), activity permit	○ ≤250 g (No permits or licenses are required if flight purpose and location doesn't require them)	○ Training certificate or pilot license for >1.5 kg. Educational rule ≒ recreationa	○ License or permit are required depending on purpose or use	×	× (Mentioning illustrations for "UA operator permit and a Class 1 activity permit" such as: a survey or an inspection of any site or building)

2-2 Trends of drone utilization

Figures 1-6 and Table 2 are the research results\*1 of the trends of drone academic-research journals obtained from WoS. Some papers are included in multiple categories, creating duplicated results. Unrelated papers were still included even after careful filtering. Also, 2022's results were lower than 2021's, possibly because the latest papers are not updated/included yet. Additionally, the most common unrelated occurrences of the term "drone" included papers on bees as well as the pharmaceutical drug, dronedarone, etc. were excluded.

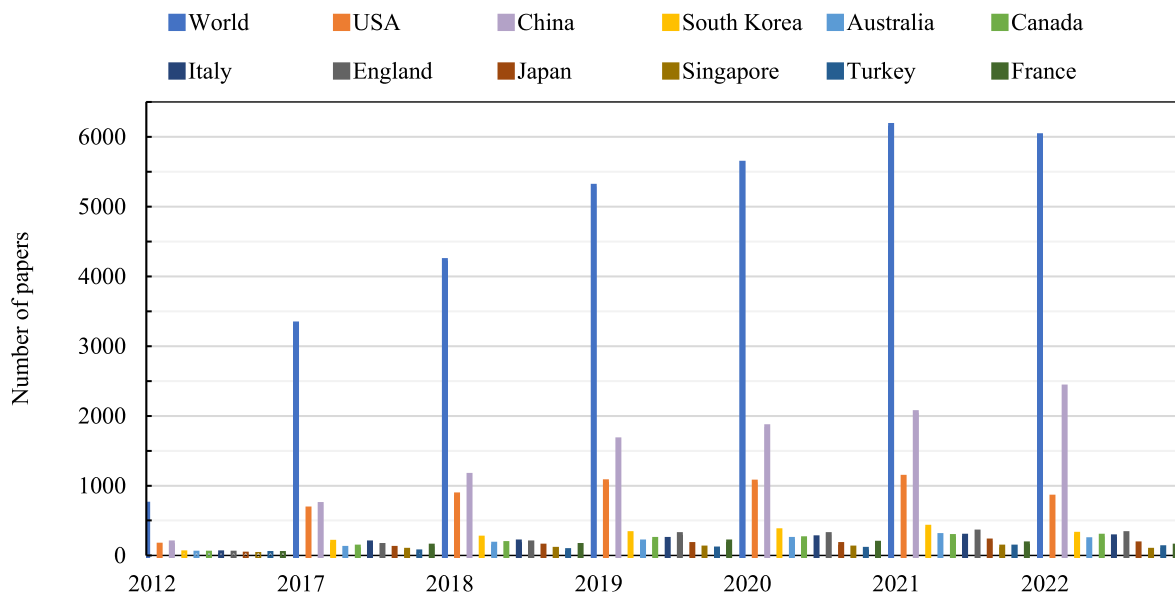


Fig. 1 Global drone utilization case study in conferences or journals in "WoS".

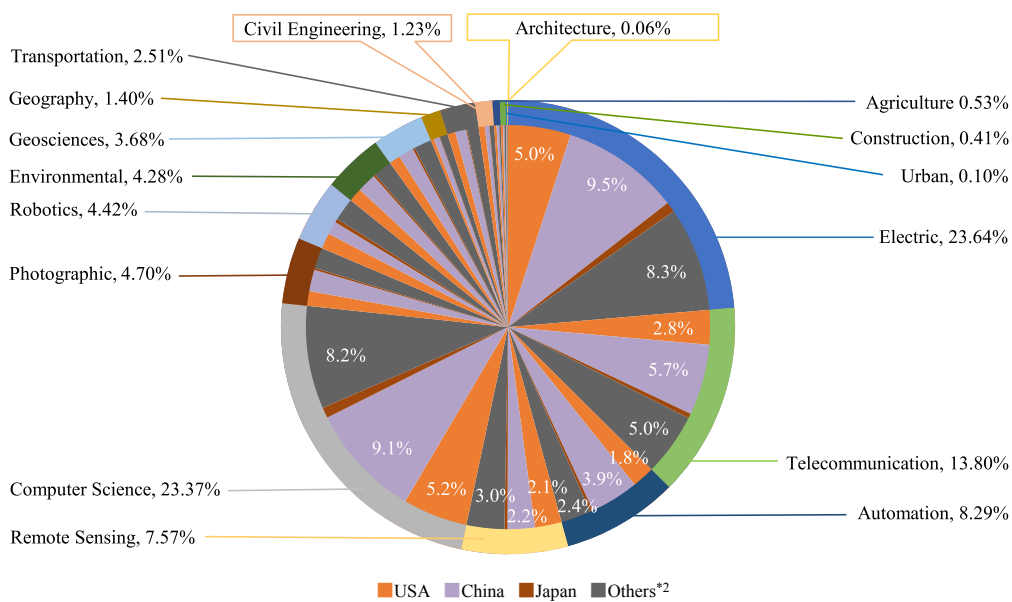


Fig. 2 Percentages of global drone utilization case study.

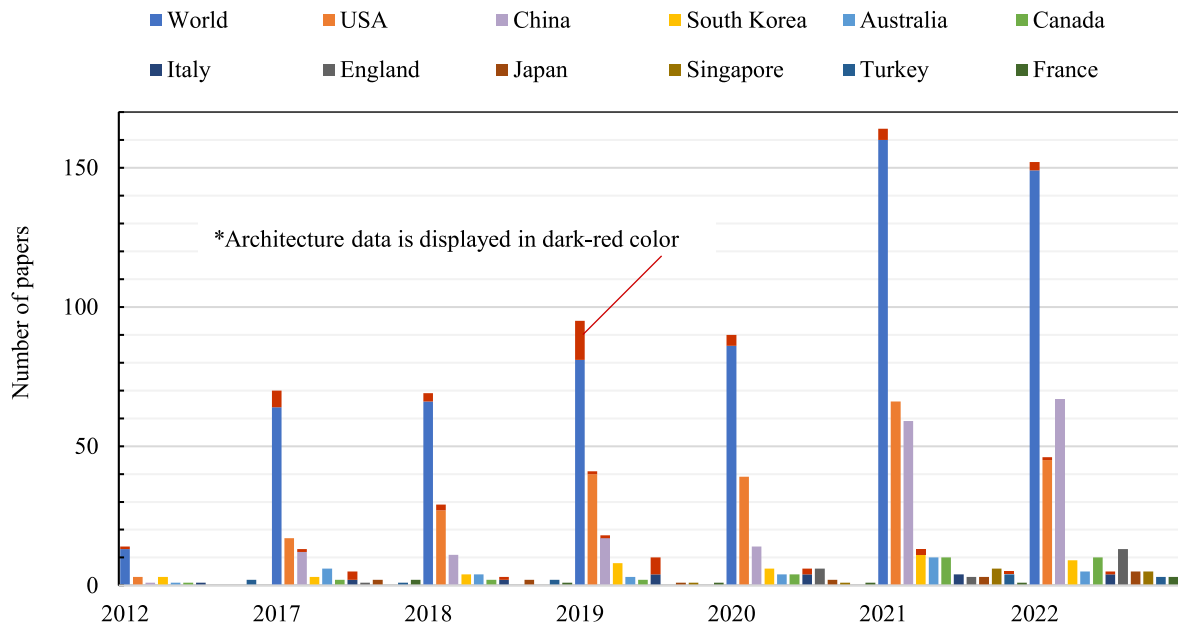


Fig. 3 Utilizations of drones in civil engineering and architecture respectively.

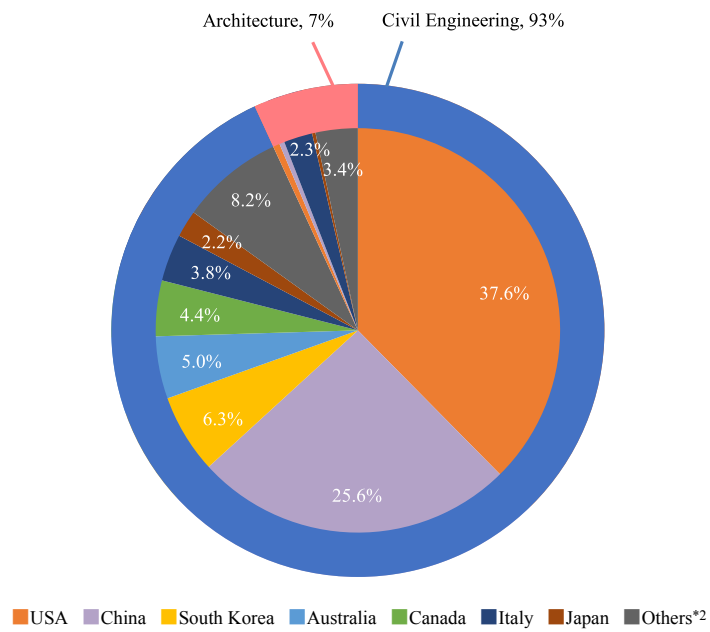


Fig. 4 Percentages in civil engineering/architecture fields.

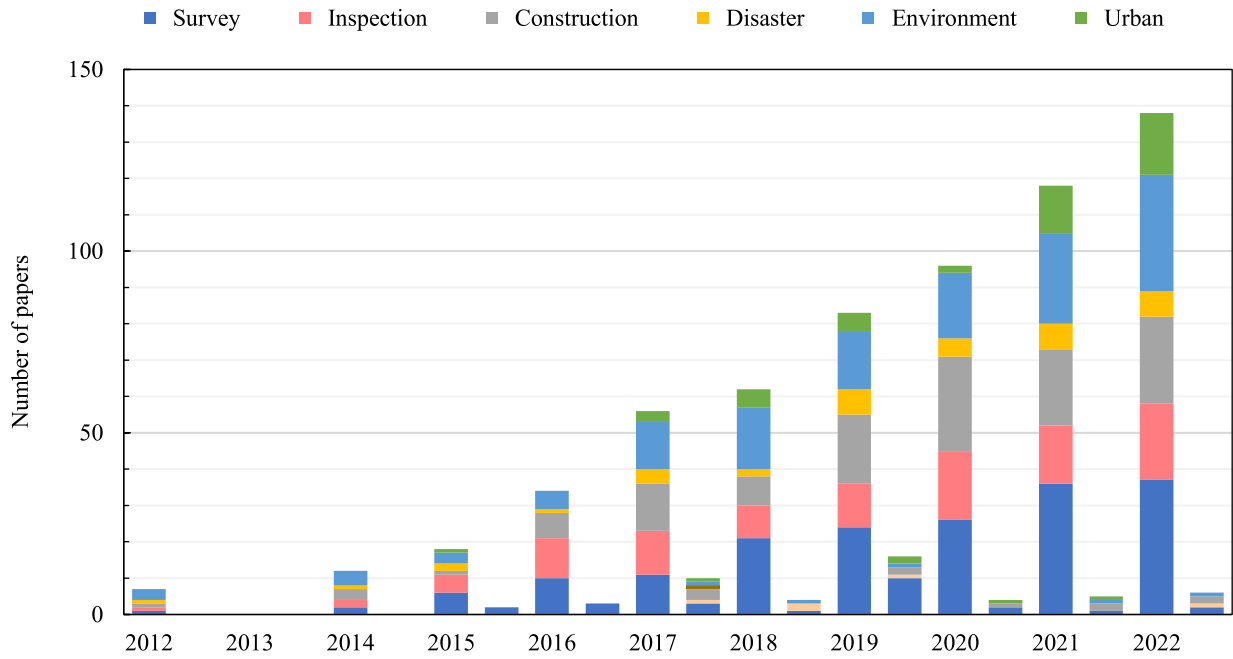


Fig. 5 Utilization of drones in respective topics in civil engineering and architecture (right).

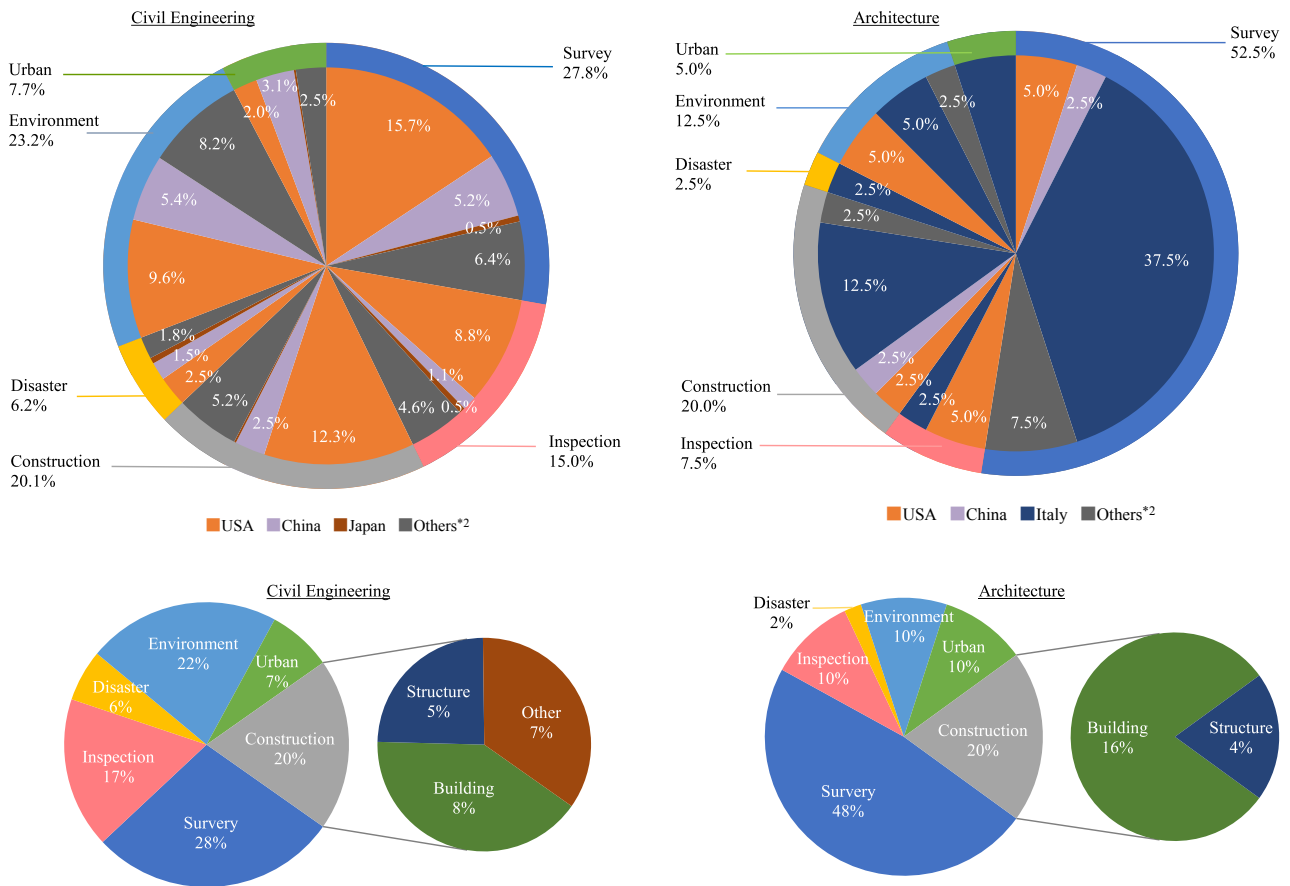


Fig. 6 Trends of topics in civil engineering/architecture.

Table 2 Most cited papers in civil engineering/architecture.

Field	Title	Keywords	Summary (excerpts)
Civil engineering	Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system	global positioning system (GPS), laser scanning, photogrammetry, robotic total station (RTS), airplane and helicopters, remotely piloted vehicles (RPV), unmanned aerial vehicle (UAV), unmanned aircraft systems (UAS), 3D range point cloud generation and mapping, autonomous vision-based, infrastructure sensing, efficiency, productivity and safety in geomatics and surveying, construction, checking, construction & building technology, engineering	The scope of the presented work is the performance evaluation of a UAV system that was built to rapidly and autonomously acquire mobile three-dimensional (3D) mapping data. A performance model for estimating the position error was developed and tested in several realistic construction environments.
	A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits	bridge inspection, visual servoing, unmanned aerial vehicles, automation, construction & building technology, engineering	This paper describes the dynamics of an UAV for monitoring of structures and maintenance of bridges. It presents a novel control law based on computer vision for quasi-stationary flights above a planar target. The first part of the UAV's mission is the navigation from an initial position to a final position in an unknown 3D environment. The new control law uses the homography matrix computed from the information obtained from the vision system.
	UAVs for coastal surveying	beach surveys, coastal monitoring, Structure from motion, RTK-GPS, DEM/DTM, coastal erosion, coastal mapping, coastal management, photogrammetry, topography, engineering	Survey-grade UAVs that incorporate internal RTK-GPS for high accuracy positioning and requiring a single operator only to safely deploy in the field, remove the need for separate and time-consuming on-ground surveying of ground control points (GCPs), previously required during post-deployment data processing. Rapid post-storm deployment of UAV surveying has been successfully integrated into an established coastal monitoring program spanning 4 decades at Narrabeen Beach, Australia. This has extended the scope of this program to include detailed measurements of dune and beachface erosion spanning the full 3.5 km long embayment at a spatial scale and temporal resolution that were previously unfeasible.
	A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering	unmanned aerial vehicle, UAV application, automatic control, artificial intelligence navigation, image processing and analysis, nuclear power plant, transportation, disaster response, construction management, mobile mapping, flood monitoring and assessment, flight control, simultaneous localization, probabilistic roadmaps, trajectory tracking, control-system, control law, design, algorithm, network, air, engineering, instruments & instrumentation	This paper gives an overview of the state of UAV developments and their possible applications in civil engineering. The paper begins with an introduction to UAV hardware, software, and control methodologies. It also reviews the latest developments in technologies related to UAVs, such as control theories, navigation methods, and image processing. The paper concludes with a summary of the potential applications of UAV to seismic risk assessment, transportation, disaster response, construction management, surveying and mapping, and flood monitoring and assessment.
	Autonomous UAVs for Structural Health Monitoring Using Deep Learning and an Ultrasonic Beacon System with Geo-Tagging	damage detection, neural-networks, identification, computer Science, construction & building technology, engineering, transportation	This article proposes an autonomous UAV method using ultrasonic beacons to replace the role of GPS, a deep convolutional neural network (CNN) for damage detection, and a geo-tagging method for the localization of damage. Concrete cracks, as an example of structural damage, were successfully detected with 97.7% specificity and 91.9% sensitivity, by processing video data collected from an autonomous UAV.

Field	Title	Keywords	Summary (excerpts)
Architecture	ACCURACY ASSESSMENT OF A UAV-BASED LANDSLIDE MONITORING SYSTEM	landslides, UAV, structure-from-motion, georeferencing, bundle, adjustment, DEM	Mini unmanned aerial vehicles complemented by structure-from-motion (SfM) photogrammetry and modern per-pixel image matching algorithms can deliver a time-series of landslide elevation models in an automated and inexpensive way. This research investigates the potential of a mini UAV, equipped with a Panasonic Lumix DMC-LX5 compact camera, to provide surface deformations at acceptable levels of accuracy for landslide assessment. The study adopts a self-calibrating bundle adjustment-SfM pipeline using ground control points (GCPs).
	Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures	unmanned aerial vehicle, drone, thermography, infrared inspection, protocol, zero energy building	The research aims to develop a protocol for Unmanned Aerial Vehicles with infrared cameras (IR-UAVs) flights to survey building thermography to use IR-UAVs in the construction domain. Through a series of test flights and a literature study, the protocol was developed. The protocol was verified during a final test flight surveying PV-panels and the thermal shell of a building.
	Modeling and deterioration mapping of facades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry	3D laser scanning, deterioration mapping, digital photogrammetry, ortho-mosaic, ultra-lightweight UAV, urban area, urban facade, structure-from-motion, 3D, heritage, registration, acquisition, complex, architecture, construction & building technology, engineering	This article presents the application of a very small and ultra-lightweight drone (less than 300 g) equipped with a low-cost camera, particularly suitable for operating in very narrow spaces. A close range photogrammetric survey performed to analyze a huge historical building facade in Bologna (Italy) pointed out a good accuracy level, confirmed by the validation of the results carried out by a 3D laser scanner survey. Moreover, a map of the degradation has been realized to support further restoration analysis, demonstrating that this low-cost, fast, and easy-to-use survey technique can be applied to other similar urban contexts at the same time.
	CLIFF COLLAPSE HAZARD FROM REPEATED MULTICOPTER UAV ACQUISITIONS: RETURN ON EXPERIENCE	UAV, 3D point clouds, photogrammetry, cliff collapse hazard, Normandy, France	In the project SUAVE, the investigation was conducted whether an octocopter UAV photogrammetric survey would perform sufficiently well in order to repeatedly survey cliff face geometry and derive rock fall inventories amenable to probabilistic rock fall hazard computation. An experiment was therefore run on a well-studied site of the chalk coast of Normandy, in Mesnil Val, along the English Channel (Northern France). Point cloud density proved a critical parameter to reproduce faithfully the chalk face's geometry. Additional ICP was necessary to reach centimeter-level accuracy and segment rock fall scars corresponding to the expected average daily rock fall volume (ca. 0.013 m <sup>3</sup> ).
	COMBINATION OF TERRESTRIAL LASERSCANNING, UAV AND CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D RECONSTRUCTION OF COMPLEX CHURCHES IN GEORGIA	laserscanning, photogrammetry, data fusion, 3D reconstruction, cultural, heritage	Photogrammetric images and terrestrial laser scans were carried out as part of a measurement campaign for the three-dimensional recording of several historic churches in Tbilisi (Georgia). The aim was the complete spatial reconstruction with a spatial resolution and accuracy of approx. 1 cm under partly difficult external conditions, which required the use of different measurement techniques. The best completeness and quality of the resulting 3D model was achieved by using laserscan data and images simultaneously.

\*1 Research themes based on the keywords: "Drone/UAV/Unmanned Aerial Vehicle/UAS/Unmanned Aerial System/sUAS/Unmanned Aircraft System/Remotely Piloted Aircraft/RPAS/Aerial Robotic Technology/Unoccupied Aerial Vehicle/Unoccupied Aerial System/Remotely-Piloted Aircraft System/Unoccupied Aircraft/Unmanned Aircraft/Unmanned Multicopter/Autonomous Aircraft" as of February 2023

\*2 Others: "South Korea/Australia/Canada/ (Italy) /England/Singapore/Turkey/France"

### 3. Analysis

The ratio displayed in these graphs is only for the selected data, so when looking at the original data in WoS which includes all countries or fields, these ratios will change slightly. It is not practical to list all fields (over 200 fields) and countries in one graph, and the presented graphs still give very close image to the obtained original data, so the graphs were created in this way.

The data of graphs was collected from 2000 to 2022, and the number of total publications of papers in Drone topic was 40,865 in the world as of February 2023 (**Table 3**). China accounts for almost 29%, USA accounts for about 20%, and South Korea was 5.6%. Japan accounts for 2.7% and it is 12th in WoS data base.

In Civil Engineering field, which accounts for 1.73% of total Drone related papers in original data (1.23% in **Fig. 2**), USA comes at top and accounts for almost 40%, China and Korea follow as they account for about 27% and 6.7% respectively. Japan accounts for 2.3% and it comes at 10th (**Table 4**).

In the same way, Italy comes at top in Architecture field as it accounts for almost 35%, Spain and USA follow as both account for about 8.3%. Japan accounts for about 4% (**Table 5**). However, the percentage of total numbers of Drone related papers for this field was only about 6% to Civil Engineering field. This is thought to be because Civil Engineering field is very large field that most of Architectural works can be included in Civil Engineering work.

When looking at years of publications, past 4 years accounts for more than half publications of Drone related papers in past 22 years. This shows a clear steep increase in numbers of Drone research.

Same can be said for Civil Engineering field, however, only past 3 years account for more than half publications of Drone related papers, so Civil Engineering field shows a rapid growth in the entire drone field.

For Architecture field, on the contrary, this steep increase is not shown, but instead the year which had most publications in Drone topic was 2019 (14 publications, 29.1%) and 2016 (11 publications, 22.9%). Only these combined 2 years will account for more than half of publications in past 22 years.

**Table 3** Publication of papers related to drone.

Countries/regions	Record count	% of 40,865
China	11,847	29.0
USA	8,076	19.8
Korea	2,291	5.6
England	1,950	4.8
Italy	1,838	4.5
Canada	1,612	3.9
Germany	1,576	3.9
Australia	1,574	3.9
Spain	1,452	3.6
France	1,293	3.2
India	1,259	3.1
Japan	1,112	2.7

**Table 4** Papers related to drone in civil engineering field.

Countries/regions	Record count	% of 706
USA	279	39.5
China	190	26.9
Korea	47	6.7
Australia	37	5.2
Canada	33	4.7
Italy	28	4.0
England	24	3.4
Germany	24	3.4
India	18	2.6
Japan	16	2.3
Spain	16	2.3
Singapore	14	2.0

**Table 5** Papers related to drone in architecture field.

Countries/regions	Record count	% of 48
Italy	17	35.4
Spain	4	8.3
USA	4	8.3
China	3	6.3
Germany	2	4.2
Japan	2	4.2
Netherlands	2	4.2
Poland	2	4.2
Scotland	2	4.2
Korea	2	4.2
Ukraine	2	4.2

From **Figs. 1 and 2**, it is shown that drone mechanic itself, communication, and system-related research are the majority, and the Environment, Geoscience, Geography, etc. follow them. As can be seen from **Figs. 3 and 4**,

Civil Engineering data is much higher than Architecture as the former includes a wider range of operations.

Looking at all graphs together, China appears to be leading in drone-related research, while USA data seems to be highest in the Civil Engineering field. This is probably because China is more active in research on drone and its systems, while in the USA there is more research on practical applications on Civil Engineering. And as for Architecture field, Italy seems to be advanced as shown in Fig. 6, and this is probably because there are more studies related to archeology or old buildings such as churches (Table 2). In addition, since many studies in Architecture focus more on the building itself, the results that include “Environment” is lower than that of Civil Engineering, and “Building” in Construction is higher (Fig. 6).

\*Although Japan has many academic papers related to Drone, most are published only in local societies' journals, so they're not reflected in the data obtained from WoS.

#### 4. Discussion

As seen from Table 1, Japan seems to be more advanced than other countries in regulations related to drones for construction industry. For the further development of the industry, specific regulations or systems can be considered, such as Singapore's indoor operation rules[22], and UK's registration system of drone operators approved for specific operations that can be outsourced[11].

Additionally, there are many narrow roads with high buildings in Japan, and it can be considered that the approach of research and experiments conducted in “Modeling and deterioration mapping of facades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry,” in consideration of these environments can be applied to Japanese structures and buildings (Table 2).

In Japan, the wooden rate is high not only in housing but also in public buildings[27], yet compared to other studies, there are few studies and experiments on the wooden structures conducted globally, and there are currently no specific rules regarding the use of drones in wooden buildings. However, using Drones for wooden structures has many advantages. For example, by equipping thermal cameras to drones, it is possible to identify many construction defects, water leaks and some electrical problems such as outlets that are hotter than others because of overloaded circuits, damage, or loose wiring. It can help curing these deficiencies early on, when they are less expensive to fix.

With the detection of the signs of heat and energy loss around the building — whether poor insulation, gaps in cavity walls or inefficient appliances — spots where energy loss has occurred can be recognized. Fixing these issues early can often mean lower energy bills.

Therefore, what can be considered for the drone operation is that “MLIT, Notification No.282, 2022” [1] may be further developed, and regulations that may be required to apply to wooden structures may be established.

In addition, there are approximately 9,000 articles in analog regulation laws, and in October 2022, Japan Government announced a policy for reviewing 99% of these[28]. Additionally, MLIT is already conducting multiple activities such as reflection of UAV photogrammetry work rules in the standard rules, investigation and study on efficiency improvement of UAV photogrammetry, revision of UAV laser survey work manual, or, demonstration experiment to consider the necessity of creating rules and support measures when using river skies as flight routes, etc. [29].

These movements from Japan government can speed up the establishment of regulations or rules that is related to digital technology, which is linked to Drone directly as it uses digital technology. Therefore, it is expected that the regulations related to the above-discussed items or many other items will be easily



considered and enacted in the near future, which will enhance the growth of each industry in Japan because it will lead to massive cost down and improvement of efficiency in many different aspects as it is already proved by many demonstration experiments conducted by government and companies. Not only that, but this will be one of the prime examples in the Global Drone industry as Level 4 Flight is currently an advanced law in the industry. In the future, regulatory-system developments may progress for global drone operations.

## 5. Conclusions

- 1) The UAV rules in Japan are readily intelligible, compared to US' that differ by state, and EU's that require confirmation in the country where drone operation is necessary. The rules in Japan are also published in English besides Japanese, while in China and France, English translation is not available from the official authorities.
- 2) Unlike other countries, operating drones beyond visual line of sight over densely inhabited districts, is an official rule in Japan.
- 3) Civil Engineering/Architectural fields show the important role in Japan and is advancing from the viewpoint of drone regulations globally.
- 4) As general drone regulations are established and implemented in different operations rapidly, detailed regulations for each specific operation are becoming necessary just as many regulations are already planned and put under consideration by Japan government, and different considerations and discussions could be made in this paper.

Received: May 1, 2023

Accepted: May 12, 2023

## References

- [1] MLIT, Notification No.282, 2022 ([https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku\\_house\\_tk\\_000161.html](https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk_000161.html)).
- [2] <http://webofscience.com/> (<https://clarivate.com/webofsciencegroup/>).
- [3] Guidelines for using new technology ([https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5\\_1.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_1.pdf)).
- [4] Drone Flight Rule, MLIT, Japan ([https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)).
- [5] The Drone Act, Japan (<https://www.npa.go.jp/english/uas/uas.html>).
- [6] China UAS regulations ([http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201601/t20160113\\_26519.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201601/t20160113_26519.html)), (<https://www.mlit.go.jp/common/001201817.pdf>), ([http://www.caac.gov.cn/en/XWZX/201705/t20170524\\_44222.html](http://www.caac.gov.cn/en/XWZX/201705/t20170524_44222.html)), (<https://www.mlit.go.jp/common/001269584.pdf>).
- [7] USA Drone Rules (<https://www.faa.gov/uas>).
- [8] Code of Federal Regulations, USA (<https://www.ecfr.gov/titles>).
- [9] UK Drone Rules (<https://www.caa.co.uk/drones/>).
- [10] UAS Regulation, UK ([https://regulatorylibrary.caa.co.uk/2019-947/Content/UAS947\\_1.htm](https://regulatorylibrary.caa.co.uk/2019-947/Content/UAS947_1.htm)).
- [11] Drone Safe Register, UK (<https://dronesaferegister.org.uk/>).
- [12] Australia Drone Rules (<https://www.casa.gov.au/drones>), (<https://www.drones.gov.au/>).
- [13] The Federal Register of Legislation, Australia (<https://www.legislation.gov.au/>).
- [14] EU Drone Regulations (<https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones>).
- [15] National aviation authority (NAA) of EASA Member States (<https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones/naa>).
- [16] Italy, NAA (<https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/droni>).
- [17] d-flight, Italy ([https://www.d-flight.it/new\\_portal/en/](https://www.d-flight.it/new_portal/en/)).
- [18] France, NAA (<https://www.ecologie.gouv.fr/politiques/drones-uas>).

- [19] Luxembourg, NAA (<https://dac.gouvernement.lu/en/drones.html>).
- [20] KOCA, Korea (<http://koca.go.kr/>), (<https://drone.onestop.go.kr/>).
- [21] Aviation Safety Act, Korea ([https://elaw.klri.re.kr/kor\\_service/lawView.do?hseq=60120&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/kor_service/lawView.do?hseq=60120&lang=ENG)).
- [22] Singapore Drone Rules (<https://www.caas.gov.sg/public-passengers/unmanned-aircraft>).
- [23] Air Navigation Act, Singapore (<https://www.caas.gov.sg/legislation-regulations/legislation/air-navigation-act>).
- [24] Advisory Circulars, Singapore (<https://www.caas.gov.sg/legislation-regulations/guidelines-advisory/unmanned-aircraft/advisory-circulars>).
- [25] Canada Drone Rules (<https://tc.canada.ca/en/aviation/drone-safety>).
- [26] Consolidated Regulations, Canada (<https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-96-433/page-110.html#h-1000299>).
- [27] Wooden rate of public buildings estimated by the Forestry Agency, Japan (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/riyou/230324.html>).
- [28] Temporary Digital Administrative Research Commission (5th) (<https://www.digital.go.jp/councils/administrative-research/9abb8161-865e-4a57-96ca-1877c44e092d/>).
- [29] Public-Private Council for Improving the Environment for Small Unmanned Aerial Vehicles (18th) ([https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi\\_dai18/gijisidai.html](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai18/gijisidai.html)).



#### イーサ ガサク

国立研究開発法人建築研究所材料研究グループ交流研究員。東京コンサルタンツ(株)土木エンジニア。現職において公共土木・建築構造物の建設、維持管理、防災に関する調査業務・診断・調査結果編

成等の管理・監督を行う傍ら、土木・建築分野におけるドローン運用について様々な研究を実施している。日本建築学会会員、日本建築ドローン協会会員など。

E-mail : isa.gasaku@gmail.com

#### Ghassaq Issa Hasan Alrubaye

Exchange Researcher at the Material Research Group of Building Research Institute. Civil Engineer at Tokyo Consultants Co., Ltd. Conducting various research on drone operations in the Civil Engineering and Architecture fields, while managing/supervising surveys work, diagnosis, results compilation, etc. related to the construction, maintenance, and disaster prevention of public civil engineering & building structures at the current work. A member of the Architectural Institute of Japan, Japan Architectural Drone Association, etc.



#### 宮内 博之

国立研究開発法人建築研究所材料研究グループ上席研究員。2003年東京工業大学大学院博士(工学)取得。東京工業大学建築物理研究センター助教、カナダ・NRCに派遣され、2008年に韓国・忠南

大学校建築工学科に異動、副教授となる。2014年より現職。東京理科大客員教授、お茶の水女子大学客員教授、日本建築学会ドローン技術活用小委員会主査、日本建築ドローン協会副会長など。

E-mail : miyauchi@kenken.go.jp

#### Hiroyuki Miyauchi

Researcher at the Material Research Group of Building Research Institute. In 2003, acquired Dr. (Engineering), Tokyo Institute of Technology. He was an Assistant Professor at the Building Physical Research Center of the Tokyo Institute of Technology, dispatched to Canada/NRC, transferred to the Department of Architecture Engineering of Chungnam National University (South Korea) in 2008, and became an associate professor. Incumbent since 2014. A visiting professor at Tokyo University of Science and Ochanomizu University, Chief of the Architectural Institute of Japan Drone Technology Utilization Subcommittee, and Vice Chairman of the Japan Architectural Drone Association, etc.

# 『ポスターセッション in Japan Drone 2023』 報告

テクニカルジャーナル編集委員長

一般社団法人日本 UAS 産業振興協議会 (JUIDA)

常務理事 岩田 拓也

近年、ドローンの大型化を経て人が搭乗する次世代エアモビリティの開発に発展する時代になりました。JUIDA は、昨年に引き続き、本年6月、国際的な次世代エアモビリティ産業のサプライチェーン創出のための本格的な専門展示会 & コンファレンスとして、「第8回 Japan Drone 2023」と「第2回 次世代エアモビリティ EXPO 2023」を同時開催しました。第2回となる「Technical Journal of Advanced Mobility (TJAM)」(以下、テクニカルジャーナル)のポスターセッションは、今回会場中央に広いスペースが設けられ、15社(団体)から20枚のポスターが集まりました。著者によるプレゼンテーションには、研究開発に関心を持つ研究者や事業関係者等多くの方が集まり、発表後、共同研究や商談を持ちかけられる例もありました(図1)。ジャーナル本誌に掲載された論文のほか、一般からも最新の研究成果をご発表いただきました。これらの一般参加のポスターは今後論文としての投稿が予定され、ポスターセッションが論文投稿の敷居を下げる役割を果たしています。

また、今年は、ベストポスター賞を発表し、会場で表彰式を執り行いました(図2)。選考委員会はJUIDA 理事長およびJUIDA ジャーナル編集委員会で、選考基準は、①新規性/アイデアで、内容が公知、既発表または既知のことから容易には導き得るものでないこと、②有用性/ユーザビリティで、内容が学術上、産業上、その他実用上何らかの意味で価値があること、③話題性/期待度で、社会的に内容の認知度が高まっている、またはこれから高まる可能性があることといたしました。

ベストポスター賞の結果は、「JUIDA 理事長賞」菱田技研工業株式会社(壁面吸着ドローンの開発と活用方法の提案)、「ベストポスター賞」国立研究開発法人建築研究所(Global Drone Regulations and Research Survey with the Examination of its Application)、Zメカニズム技研株式会社(鏡像配置XY分離クランク機構を用いた極低振動ガソリンエンジンの開発)、株式会社Five Star Group(日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討~ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて~)、の皆様でした。おめでとうございます。

最後に、今回多くの学会様(一般社団法人電気学会、一般社団法人日本ロボット学会、一般社団法人電子情報通信学会、公益社団法人計測自動制御学会)にご後援をいただきました。深く感謝申し上げます。

今後ともドローン及び次世代エアモビリティの情報ハブとなるべくテクニカルジャーナルを発展させて参りますので、何とぞよろしくお願い申し上げます。

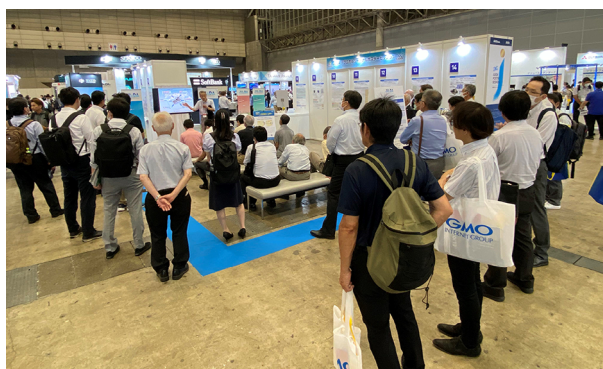


図1 プレゼンテーションの様子



図2 ポスター賞授賞式

# Technical Journal of Advanced Mobility

## デザイン思考を用いた無人航空機向け 機体概念検討フレームワークのユーザー像の明確化

氏名	上野 真	所属	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
	山田 健翔		国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
	松本 万有		国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
	加藤 裕之		国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
	古江 奈々美		東京理科大学経営学部(現一橋大学大学院経営管理研究科)

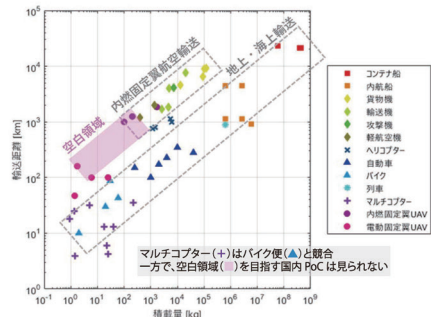
### 課題：

近年の無人航空機運用の特徴：

- 用途が多様
  - 非航空産業からの参入が目立つ
  - 従来の輸送手段と比べ設計の自由度が高く、多様性がある。
- 非航空産業からの参入者にとって多種多様な種類の機体から、各々のビジネス目的に適した機体を適切に評価して選定することには一定のハードルがある。

実際、無人航空輸送の国内 PoC はバイク便と競合する領域で行われており、航空工学の知見に基づいた事業設計能力の付与が必要である。

ユーザーである無人航空機物流事業者にとってどのような情報が不足しているかを把握して、事業設計に適切な情報を出力する概念設計フレームワークを提供したい。



様々な輸送機械の積重量—輸送距離プロット

### デザイン思考の適用：

本研究の対象とするようなユーザーニーズに対する共通認識が確立していない課題に対して有効な「デザイン思考※」を用いて、要求を満たして無人航空機ビジネスの活性化に資するフレームワークのコンセプト案と、背景にあるシステム像を提示する。スタンフォード式の5つのステップのうち、前半2つのステップを用いて問題の把握に取り組んだ。(具体的には以下に示す内容を左から右に向かって実施)

※：優れたデザイナーが顧客のニーズを念頭に製品の使い勝手やサービスの内容を思索する際の方法を体系化した、インページョンを実現するための開発手法の一つ



スタンフォード大学式デザイン思考5つのステップ

共感マップ	カスタマージャーニー	事前 NABC 分析	インタビュー	事後 NABC 分析	Feedback Capture Grid
ユーザーがある特定のシーンで見聞きしていることや言動などを具体的に考察することを通じて、ユーザーの抱える感情であるペイン(不安や悩み)とゲイン(喜びや願望)を明らかにするための分析手法	プロダクトのユーザーの使用体験をその前後の工程も含めて時系列に表し、各場面においてプロダクトがどのように使われるかを具体的に追うことで必要な機能を抽出するための分析手法	Need (顧客のニーズ)、Approach (顧客のニーズを満たすための手段)、Benefit (アプローチの費用対効果)、Competition (競合相手や代替品に対する優位性)の四項目を定義することを通じて、コンセプトが提供する価値を吟味するための分析手法	モックアップを用いたインタビュー(輸送を含む無人航空機の運用事業を主とする企業6社と機体開発を行う企業2社)	インタビュー結果を踏まえた事前 NABC 分析の修正	プロダクトに対する定性的な意見を、賛成意見(Things that worked)、批判意見(Needs to change)、質問(Questions we still have)、アイデア(Ideas to try)に分類することで、プロダクトに求められる方向性を抽出するための手法

### 結果と考察を踏まえた結論：

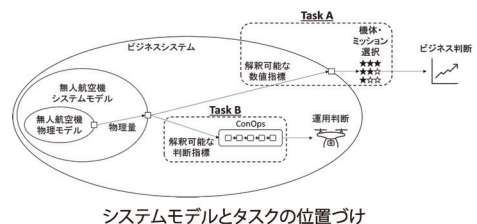
FCG によるインタビュー結果の整理から明らかになった点：

#### ① 主要な二つのタスクが存在する：

**Task A：機体性能評価に対する要求**

**Task B：運用面で運航確率定量化にかかわる要求**

② Task A に関しても Task B に関しても機体の性能情報に基づいた理論的なアプローチは不足しており、それを賄うだけの時間も人件費も投入しづらい。これらを踏まえて事後 NABC 分析を実施したところ、Task A と Task B が右図のような無人航空機ビジネスシステムの中に位置づけられた。



システムモデルとタスクの位置づけ

これらのタスクを行うためには現状では高度な航空工学の知見を必要とし、特に非航空産業からの参入者には達成困難である。また、参入当初で財務基盤が強いとは言いがたい初期の事業者にとって容易に使えるような検討基盤は存在しないため、これを満たすフレームワークの必要性が示された。また、フレームワークの工学的な出力と社会との接続を表すインターフェース、加えてインターフェースの理解を促進する判断指標の設定と普及が必要であることも同時に示された。

無人航空機産業は情報の粘着性(OEMとユーザーいずれかのみが持っている情報ももう一方に移転しにくいこと)が存在するが、デザイン思考の手法を用いることで、ユーザーの抱えている問題とその解決のために求められる機能を明らかにすることができた。





## 壁面吸着ドローンの開発と活用方法の提案

氏名：菱田 聡\*<sup>1</sup> 大垣 正信\*<sup>1</sup> 菱田 康\*<sup>1</sup>  
三輪 昌史\*<sup>2</sup>  
清水 俊彦\*<sup>3</sup>

所属：菱田技研工業株式会社\*<sup>1</sup>  
国立大学法人徳島大学\*<sup>2</sup>  
神戸市立工業高等専門学校\*<sup>3</sup>

### はじめに

インフラの老朽化が社会問題となっている。インフラを安全かつ効率的に運用するためには、適切な点検・修繕作業が不可欠である。高所作業の効率化は喫緊の課題となっており、インフラ点検へのドローン活用が検討されている。

ドローンに万能真空吸着グリッパ(以下UVGと記す)を装備した壁面吸着ドローンシステムを提案する。壁面に吸着する親機と、親機から吊り下げ移動し、同じく壁面に吸着し作業を行う子機を開発した。親機には壁面吸着を確実にを行うため、水平飛行を実現するチルト機構を採用し、活用分野を検討した。

### 壁面吸着ドローン

親機である壁面吸着ドローンと、親機から懸下され移動できる子機を開発した。壁面吸着ドローンの鉛直な壁面への吸着を容易にするため、左右のプロペラにチルト機構を装備し、水平姿勢制御プログラムを搭載した。



図1 親機、子機

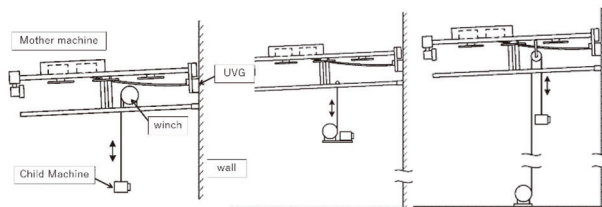


図2 チルト機構

想定される壁面吸着ドローン活用分野は次のとおり

- ・インフラ点検：打音検査や各種検査機
- ・補修作業：塗装や補修材注入
- ・清掃：水、エア、ケレンによる清掃
- ・サンプリング：堆積物の採取、小型のコア抜き

取得した特許(特許第6906264)に記載した3通りのウインチ搭載方法を図3に示す。(a)は飛行の自由度 (b)は親機の構造を簡素化 (c)は作業機器の大型化に対応できるシステムである。



(a)ウインチ親機搭載 (b)ウインチ子機搭載 (c)ウインチ地上搭載

図3 親機、子機とウインチ設置位置

本システムはドローンを利用した高所作業の実現に非常に高い自由度を有している。また、作業機器を目的の場所まで搬送し、安定した状態で、十分な作業時間を確保することが可能である。

### 実証実験の結果

親機ドローンは安定した姿勢で壁面に吸着し、プロペラを停止できた。子機はUVGでの壁面吸着により、反力が発生するドリル作業を実現した。



図4 親機の壁面吸着



図5 子機のドリル作業

### 結論と今後の目標

UVGを装備した壁面吸着親子ドローンシステムにより、ホバリングでは困難な、反力が発生する作業に成功した。今回は子機に搭載する作業機器としてドリルを選定したが、打診検査器や各種センサなど、用途に応じた機器を搭載し高所作業が可能である。

今後はシステム実用化のための信頼性向上や運用方法の確立、運転手順の成文化を行い、実用化を目指す。



# Technical Journal of Advanced Mobility

## 空飛ぶクルマの社会受容性獲得に向けた便益効果評価

高原 虎太郎  
原 進  
満倉 靖恵  
上出 寛子  
草野 智

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻  
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻  
慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科  
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学 未来社会創造機構  
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻

### 社会受容性の獲得

背景：空の産業革命による影響に対する不安<sup>[2]</sup>  
騒音・景色の変化  
→ スムーズな社会実装のために受容性を獲得する必要  
アプローチ：  
① 社会受容性に対する定量評価の確立<sup>[3]</sup>  
② 受容基準の設定



Fig.1 空飛ぶクルマ(S4)<sup>[1]</sup>

### ① 簡易脳波計による定量的評価

簡易脳波計によりストレス上昇値を計測  
感性アナライザ<sup>[4]</sup>：ストレス・集中・好み・沈静・興味の感情をリアルタイムで計測する簡易脳波計

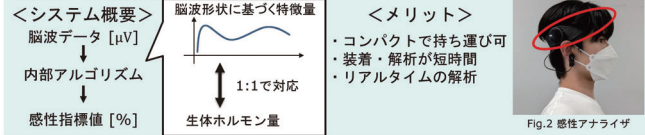
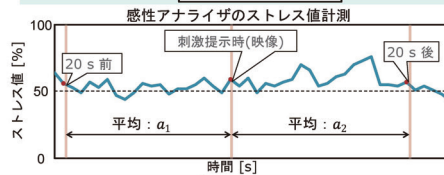


Fig.2 感性アナライザ

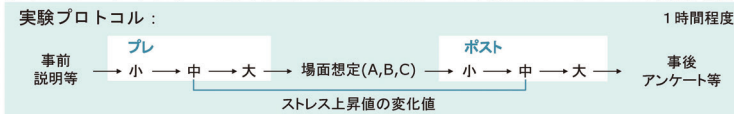


ストレス上昇値  
 $x [%] = a_2 - a_1$

### ② 受容基準の設定と分析

受容基準：ストレス増加が許容できる騒音レベル [dB]  
先行研究：ドローンの騒音 → 主観ストレス → ドローン飛行運用条件<sup>[5]</sup>  
問題点：用途やステークホルダーによるストレス耐性の変化がある  
→ 騒音だけで評価するのは不十分

まずステークホルダーを大学生に固定し用途ごとの音量とストレスの関係を評価



i人目参加者のj番目(音量)の実験における  
C群の平均値を基準にした相対値  $S_{cr}$   
= 場面想定で得るストレス耐性：

$$S_{cr} = \frac{1}{N_k} \sum_i (x_i^{j+3} - x_i^j) - \frac{1}{N_c} \sum_i (x_i^{j+3} - x_i^j) \quad (k = A, B)$$

A群	B群	C群
影響力 大 (災害派遣 <sup>[6]</sup> )	影響力 小 (オフィスモビリティ <sup>[6]</sup> )	何も用途を提示 (統計制)
ストレス耐性 大 (予想)	ストレス耐性 小 (予想)	何もない標準ケース (統計制)

Fig.3 教育内容

### 実験条件



Fig.4 実験環境

→ 名古屋駅のテラス席に座っている様子を幾何学的に模倣

Fig.5 空飛ぶクルマのCG

音	映像		
	音量	時間帯	昼間
$L_{AE}$ [dB]	73 82 91	飛行高度 [m]	15
		飛行速度 [km/h]	25
		時間 [s]	18

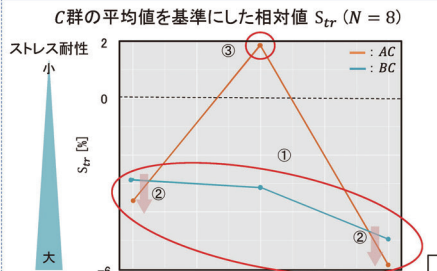
### 場面想定

世の中の情勢  
(空飛ぶクルマの基本知識の教育)：  
・ 2035年前後で空飛ぶクルマが身近な存在  
・ 便益、リスク時の対応等が周知

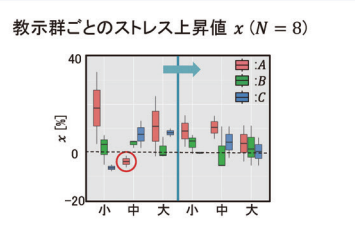
場面設定(例)：  
・ 岐阜県、長野県全域で大規模な山火事が発生  
・ 多くの空飛ぶクルマが救急救命や災害派遣のため愛知県から出動

参考文献  
[1] (株)Joby Aviation, <https://www.jobyaviation.com/>, (Accessed, 2023.6.8).  
[2] 空の移動革命に向けた官民協働、空の移動革命に向けたロードマップ(策定), 経済産業省, 2022.3.  
[3] Susumu Hara, Yasue Mitsukura, Hiroko Kamide, "Noise-Induced Stress Assessment—On the Difference Between Questionnaire-Based and EEG Measurement-Based Evaluations—", Technical Journal of Advanced Mobility, Vol.3, No.6, pp.81-90, 2022.9.  
[4] 満倉靖恵, "脳波によるリアルタイム計測とその応用", 電子情報通信学会論文誌-情報処理, Vol.135, No.2, pp.180-186, 2020.1.  
[5] Antonio J. Torija, Rory K. Nicholls, "Investigation of Metrics for Assessing Human Response to Drone Noise", International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol.9, No.3152, 2022.3.  
[6] 伊藤 貴史, 千原 崇哉, "「空飛ぶクルマ」の社会的受容性向上に向けたMSSAD-インターリスの活用", RM FOCUS, Vol.7, pp.1-7, 2023.1.

### 予備実験結果と考察



- ① 負の値：場面想定の効果
- ② AC < BC: 影響力が大きいほど場面想定効果が顕著
- ③ 正の値：仮説と反する



- ③ 正の値 = 映像が流れた時にストレス減少  
→ 実験が始まったことに対する安心 (アンケートより)
- ・ 想定場面では不適
- ・ 環境、操作因子に対する個人差を統制する必要
- ・ 現在ドーム型スクリーンの個室小部屋を検討

まとめ：  
・ 影響力が大きい用途ほどストレス減少の傾向がある  
・ しかし実験環境の不備が確認された

今後の課題：  
・ サンプル数を増やして統計的検証(N = 66)  
・ 受容騒音レベルの探索に拡張





# Technical Journal of Advanced Mobility Global Drone Regulations and Research Survey with the Examination of its Application

○イサー ガサク 国立研究開発法人 建築研究所  
宮内 博之

イサーが口頭で説明します。6/28(水) 13:00-14:00  
★連絡先(イサー宛): isa.gasaku@gmail.com  
日本語での説明希望、質問・問合せ等、お気軽に  
ご連絡ください。

## Introduction / Research Method

本研究では、様々な国の公式航空当局からのドローン法の調査を要約し、また、グローバル学術データベースでありインパクトファクター付与ジャーナルを100%収録しているWeb of Science (WoS) を使用して、ドローンアカデミックジャーナルの傾向の調査を実施した。

研究結果の分析後、土木/建築分野での運用の様々な側面におけるUAV(無人航空機)利用を進める可能性を議論するための考察を示した。

- ▶ **ドローン法 / 規制:** データは、それぞれの国のUAVIに関する政府の情報源から得られ、情報は航空機関または省庁などの法文から要約した。MLIT(日本)、FAA(米国)、CAA(英国)、CASA(オーストラリア)、EASA(EU)、ENAC(イタリア)、CAAC(中国)、KCOCA(韓国)、CAAS(シンガポール)、GAD/TCCA(カナダ) など。
- ◆ ○ ⇒ 法律または規制が存在、または、公式情報に記載あり。
- ◆ × ⇒ 明確な記載や規制は見つからなかった。
- ◆ 上記以外 ⇒ 開発中のシステムがあるか、または、表中の特定の分類に対する直接的な説明がルールに無い場合も一般的なルールが適用される。

▶ **ドローンの研究動向:** グラフは、2023年2月にWeb of Scienceから入手したドローン学術研究論文の動向調査から作成した(収集されたデータ: 2000年~2022年)。グラフに表示される比率は、選択したデータのみであり、全ての国または研究分野(200以上の分野)は含まれていない。

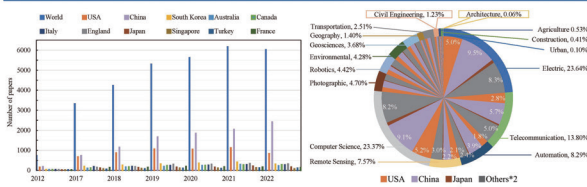


Fig1. Global drone utilization case study in Conferences or Journals in "WoS"

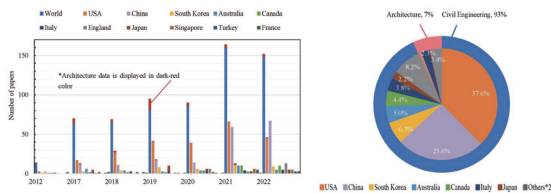


Fig2. Utilizations of drones in Civil Engineering and Architecture respectively

## Analysis / Conclusions

### 考察

- ・建設分野のドローンに関する規制において、日本は世界的にも進んでいるようである。シンガポールのような屋内飛行に関する規制や、UKのように国家資格を持つドローンオペレーターに業務委託できる登録システムなども、日本国内で検討できる。
- ・現在、木造建築物でのドローン使用に関するルールはないが、木構造物にドローンを使用するには多くの利点がある。たとえば、ドローンに赤外線カメラを装備することにより、多くの建設欠陥、水漏れ、いくつかの電気的問題を特定できる。これらの欠陥の修復コストが安い段階で、早期に修復する事に役立つ。
- ・「国土交通省告示第282号(改正令和4年国土交通省告示第110号)」の確立や、UAV写真測量の作業規程の準則への反映など、既に複数の活動が実施されている。日本政府または企業からの動きは、デジタル技術やドローンに関する規制やルールの確立を高速化できる。これは、既に証明されているように、多くの異なる側面で大幅なコスト削減し効率の向上につながるため、日本の各産業の成長を促進する。またこれは、レベル4飛行と同様に、グローバルドローン業界の主要な例の1つになる。将来、規制システムの開発は、グローバルなドローン運用のために発展する可能性がある。

### 結論:

- 1) 日本の無人航空機の規則は、州ごとに異なる米国や、ドローン操作が必要な国において確認が必要なEUと比較して、容易で分かりやすい。日本の規則は日本語以外に英語でも掲載されているが、中国とフランスでは、英語の翻訳は公式当局から入手できない。
- 2) 他の国と違い、人口集中地区(DID)のドローン目視外飛行は、日本では公式ルールである。
- 3) 日本の建設分野は、国内で重要な役割を示しており、ドローン規制の観点から、世界的にも進んでいる。
- 4) 一般的なドローン法が制定され、様々な運用で実用されている中、日本政府によって既に多くの規制が計画・検討されているように、各特定の運用に対する詳細な規制の整備が必要になっており、本研究では様々な検討や考察を示すことができた。

最後に、様々な分野でドローン運用が急速に増加している中、他の国では建設関連の規制が無いため、日本がこれらの分野でルールを整備して世界に例を示す先進的な国となり、ドローン法が無い国における法・事業整備の支援により、双方の国における経済促進を期待できたりする良い機会であると考察した。

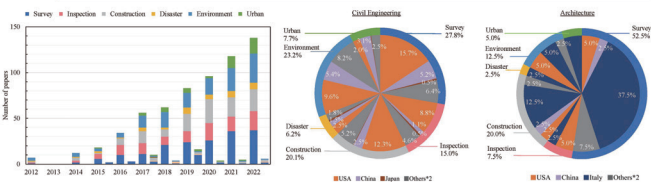


Fig3. Utilization of drones in respective topics in Civil Engineering and Architecture (right)

Table 1. Drone Laws & Policies in each country as of March 2023

	Drone Laws & Policies														
	General Drone														
	Drone Registrations	Pilot License (Training) or Drone Operator	UTM (UAV Traffic Management)	Height	Night	Beyond Visual Line of Sight (BVLOS)	Safety (Uninvolved people, etc.)	Operating over uninvolved people	Operations require a Permission / Authorization	Micro Drone (< 100g)	Recreational Flight	Indoors	Civil Engineering (Or other industries)	Architecture	
Japan	All: ≥100g, Type 1 Model/Aircraft (Category III), Type 2 Model/Aircraft (Category II)	First rank (Category III) - Second rank (Category II)	UTMS: Rolling out in the coming years	150m	○	○	Permissions, or License: Second rank/Second type or above	○	○	30m from people, buildings, vehicles, etc.	Not allowed except level 4 (Category III)	○	○	○	○
China	≥250g, Multiple categories depending on weight purposes	○	UACS (Drone Cloud Service)	120m	○	○	○	○	○	30m from the crowd	When the crowd is approaching: ≤10m (horizontally too)	○	○	○	○
US (Differ by state)	Certified: All (< 55 pounds), Recreational: >250g	Certified RP & Recreational	UTM: FAA & NASA are conducting research (& LAANC)	400 feet (About 120m)	○	○	Anti-collision lighting	○	○	Developing under the BEYOND program (some exceptions)	○	○	○	○	○
UK (Some similarities with EU)	All: ≥250g or <250g which is not a toy and with camera; register as operator/owner (not drone)	Flyer ID (theory test) & Operator ID	ATM (air traffic management), ATC, ATS, ANSP (Air Navigation Service Provider)	120m (400 feet)	○	○	Follow basic VLOS principle & Lighting / illumination requirements	○	○	Within Specific category with operational authorization (DID: with DAA)	Horizontal distance: 50m, or 1:1 rule (Differs by drones, etc.)	○	○	○	○
EU (Some differences in each country)	Same as UK; Drones: Only when the Drone is certified	UAS Operator & Trainings for pilot	U-Space	120m (400 feet)	○	○	With green flashing light	○	○	Specific category (and certified) (DID: ×)	30m, France/Luxembourg; 30m, Italy/50m (Differs by drones, etc.)	○	○	○	○
Australia	Business: All, Recreational: From mid-2023	Operator accreditation, ROC, RePL	UTM: Under Development & reviewing laws	120m (400 feet)	○	○	Authorizations	○	○	Authorizations (DID: ×)	30m from people	○	○	○	○
Singapore	>250g: All	○	CFMS	200 feet (About 60m)	○	○	Within line of sight (Lighting system for BVLOS)	○	○	○	○	○	○	○	○

<Reference> <http://webofscience.com/> (<https://clarivate.com/webofsciencegroup/>)



J-stage JUIDAジャーナル



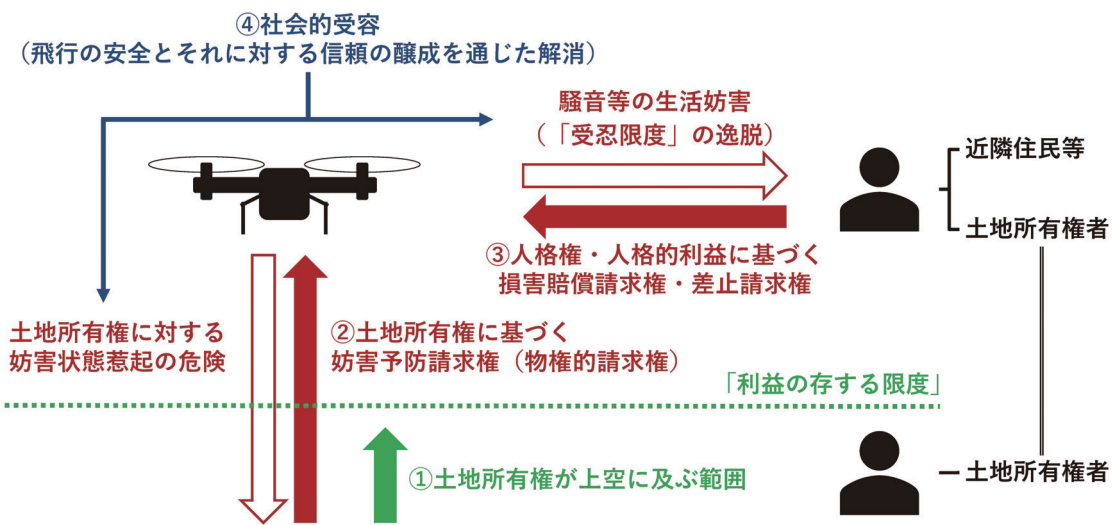
# Technical Journal of Advanced Mobility

## 無人航空機飛行と土地所有権 ～他人所有地の上空利用についての法的整理～

武田 智行 JUIDA 会員、弁護士法人御園総合法律事務所 弁護士  
中村 裕子 JUIDA 参与、弁護士法人御園総合法律事務所 顧問

法的関係の整理は、社会受容性も含めた無人航空機の社会実装を進めていく上で必要不可欠である。本稿（in press）は、2021年に内閣官房小型無人航空機等対策推進室から公表された「無人航空機の飛行と土地所有権の関係について」で示された考え方について、筆者の理解に基づき敷衍するとともに、若干の考察を加えるものである。

今後は、日本無人機運行管理コンソーシアムにおいて開催されている自治体ネットワーク（UIC2-Japan、現在10都道府県が参加）の勉強会にて議論を積み重ねていく予定である。



### ①土地所有権

土地所有権は、土地所有者の「利益の存する限度」において地上空に及ぶ。ここでの「利益」は、土地利用に関する利益であり、土地所有者が主張・立証しなければならない。

「利益の存する限度」に含まれない上空の飛行は、土地所有権による制約を受けない

### ②土地所有権に基づく妨害予防請求権

土地所有権が直接に及ぶ範囲外での飛行であっても、墜落等により土地に危害が生じるリスクが認められる場合には、土地所有者は、リスクを生じさせる飛行を差止めることが可能。

### ③人格権・人格的利益（平穏な生活を営む権利・利益）

飛行の騒音等が社会的に受忍すべき限度を超え、平穏な生活を妨害するものと認められる場合には、土地所有者その他の平穏な生活を妨害された者は、生活妨害となる飛行を差止めることが可能。

土地所有権が直接に及ばない上空であっても、飛行に対する制約がないわけではない

### ④社会的受容

妨害予防請求権におけるリスクや人格権における受忍限度は、社会通念を基準として判断されるため、社会的受容がなされることは、こうしたリスクや受忍限度の逸脱に対して消極に働く。

社会的受容は、無人航空機飛行に関する法的関係においてもキーワード







## 鏡像配置 XY 分離クランク機構を用いた極低振動ガソリンエンジンの開発

氏名 吉澤 匠 / 吉澤 穰 / 吉澤 慧 / 子安 玲 所属 Zメカニズム技研株式会社

### 技術概要 Technical overview

XY分離クランク機構は、独自の厳正直線運動機構である。本機構はコネクティングロッドの揺動を無くし、ピストン変位を正弦波形にすることで、一次振動・二次振動を発生させないことが特徴である。これをエンジン機構部に組み込み、機構とシリンダを鏡像的に配置することで、一次振動・二次振動の解消と、機構自体の効果によりピストンの首振り軽減し、極低振動・高速回転が可能な新構造エンジンを製作した。従来エンジンとXY分離クランク機構の振動をキャンベル線図(図2・円の大きさが振動を表す)を用いて比較すると、XY分離クランク機構の方が、一次振動・二次振動の双方において大きく減少することを確認した。これをドローンに発電機(レンジエクステンダー)として搭載することで、電子制御に外乱を与えることなく航続距離を大幅に改善することが可能となる。

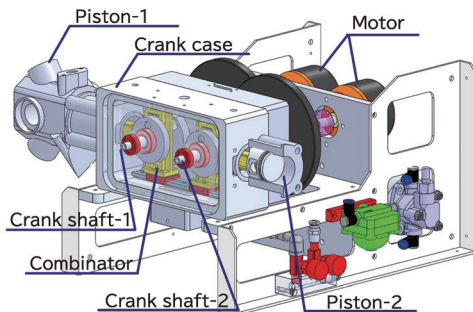


Fig.1 XY分離クランク機構 2気筒鏡像配置エンジン

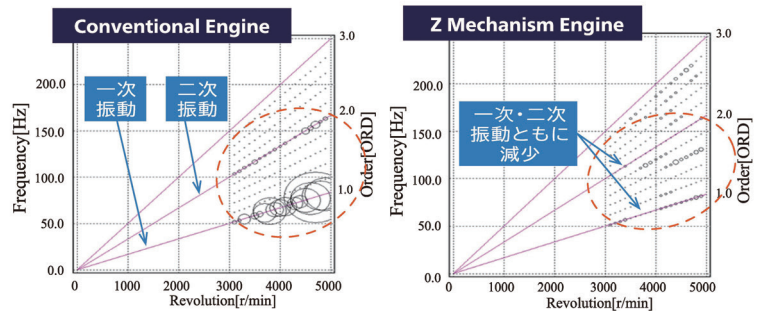


Fig.2 50ccエンジン振動比較 (キャンベル線図)

### 発展技術 Advanced Technology

ドローンにエンジンを搭載する場合、極低振動性のほか、本体の小型化が求められる。そこで単気筒でも2気筒鏡像配置のエンジンと同様の低振動効果を得られるように考案したのが、二重偏心Zメカニズム(Z-CCR)である。内部機構を図3に示す。これは2つの軸(内軸・外軸)が相互逆転することで、単気筒でも振動の打ち消しを可能とした。これを実証するため本機構を用いた単気筒エンジン(図4)を試作し、ベースエンジンの振動と比較した。その結果、図5に示すように、一次振動、二次振動ともに大幅な減少を確認した。今後、このエンジンを用いた発電システムの開発を進める。

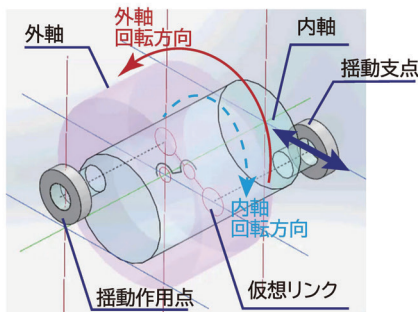


Fig.3 Z-CCR 構成概念図

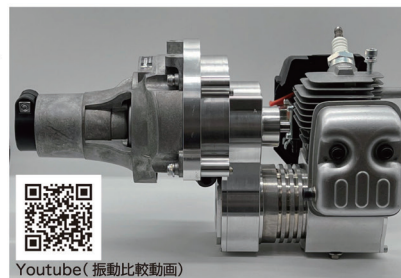


Fig.4 Z-CCR 単気筒エンジン (試作機)

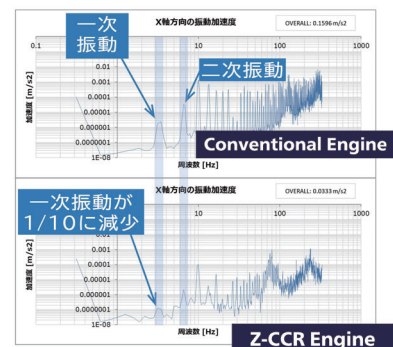


Fig.5 振動の比較



# Technical Journal of Advanced Mobility

## On Geometric and Control Parameters Optimization for Multirotor-type Aircraft based on the Indirect Size Estimation of the Domain of Attraction

山口 皓平, 原 進 名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻



### はじめに

- マルチロータ型航空機がさまざまな分野で活躍
  - 空撮, 荷物輸送, 研究, 災害監視, ホビー, ...
- 空飛ぶクルマ(eVTOL機)としても採用されている
- eVTOL機を取り巻く状況は未だ流動的で, さまざまな構造が提案・検討されている
  - 飛行性能向上・安全性確保のため効果的な機体の最適化手法の確立が重要

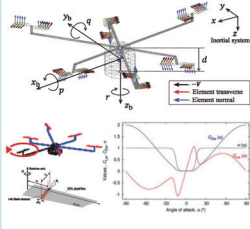
- 複雑な(非線形)システムの構造・制御最適化手法を提案する
- マルチロータ型航空機に提案手法を適用・効果を検証する

### マルチロータ型航空機モデル

- 運動計算には並進・回転運動に関する非線形運動方程式を用いる

$$\dot{V} = -\partial V + C_1^{B/I} G + \frac{1}{m} F \quad F: \text{空気力}, M: \text{モーメント}, J: \text{機体の慣性テンソル}, V = [v_x, v_y, v_z]^T, \omega = [p, q, r]^T, G = [0, 0, g]^T, \text{重力加速度ベクトル}, m: \text{機体質量}$$

- 機体構造を決定する構造パラメータを変数として扱うことが可能なモデルを設定する
- 各ロータの回転数制御とブレードのピッチ角を制御するコレクティブピッチ制御を併用する機体を想定する
- 単純運動量理論・ブレード翼素理論を組み合わせ, 収束計算で誘導速度を求める
- 翼素の迎角 $\alpha$ に対して $C_l(\alpha), C_d(\alpha)$ 曲線を用いて空力を計算する



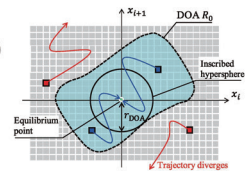
### 最適化手法の提案

#### 吸引領域 (Domain of Attraction : DOA)

- 吸引領域(DOA): あるシステムの平衡点周りにおいて, 無限時間経過後に平衡点へと収束する状態で定義される領域

$$\frac{d}{dt} f = f(x, u; t) \quad R_0 = \{ \gamma \in R: \text{if } x = \gamma \text{ then } \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_{eq} \}$$

(非線形) システム DOAの定義



- DOAのサイズ=平衡点からの状態量の逸脱に対してシステムが復旧可能な限界値
  - 大きな吸引領域を達成するシステム=平衡点からの逸脱に強いシステム
- システムの構造と制御器性能の両方に影響されてDOAのサイズ・形状が変化する
  - DOAサイズを最大化する構造と制御を探索することでシステムを最適化する

#### DOAサイズの推定手法

- 直接推定手法: システムの平衡点周りの初期値の収束性をMonte-Carlo法で数値的に調査する → 理論がシンプル, 計算量が膨大

- 間接推定手法: 平衡点を中心とする半径 $r_{DOA}$ の超球表面の初期値の収束性をMonte-Carlo法で数値的に調査し, DOAに内接する超球半径 $r_{DOA}$ を求める → 計算量が少なく高速, 推定結果が保守的

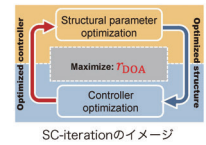
#### DOAサイズの拡大によるシステムの最適化

- 吸引領域サイズ $r_{DOA}$ の最大化を目的関数とした2つの最適化スキームを設定する

- 機体の構造パラメータの最適化: S-step
- 制御器パラメータの最適化: C-step

- S-stepとC-stepの繰り返し適用により, 対象システムを構造・制御の両面から準同時的に最適化する

→ SC-iteration と定義する



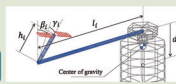
### 最適化手法の適用結果

#### 最適化問題の設定

- Linear Quadratic Regulator (LQR)によりホバリング状態で安定化されたHexa-copter (6発ロータ)を最適化の対象とする

- Maximize:  $r_{DOA}$
- S-step**
- $0.3 \leq l_i \leq 1.0 \text{ m}$
  - $-0.2 \leq h_i \leq 0.2 \text{ m}$
  - $-45^\circ \leq \beta_i \leq 45^\circ$
  - $-45^\circ \leq \gamma_i \leq 45^\circ$
  - $-0.5 \leq d \leq 0.5 \text{ m}$
- C-step**
- $0 \leq q_i \leq 500$
  - $0 \leq r_i \leq 500$
- ※ 条件は  $i: \text{even, odd}$  でそれぞれ共通とする ( $l_1 = l_3 = l_5, l_2 = l_4 = \dots$ )
- ※ 今回は SC-iteration 一回の適用 (S-stepとC-stepをそれぞれ1回ずつ適用する)

{ アーム長  $l_i$ , サブアーム長  $h_i$ , ロータ取り付け角  $\beta_i, \gamma_i$ , ペイロード位置  $d$  }



$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad Q = \text{diag}\{q_i\}, \quad R = \text{diag}\{r_i\}$$

LQRの2次の評価関数 最適化の対象とする行列の対角成分

### Future works

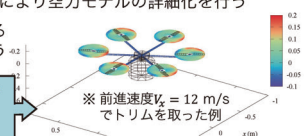
#### 最適化の適用範囲の拡大

- 構造最適化: Hexa-copter以外の構造を最適化する
- 制御則最適化: 非線形制御則の最適化に適用する

#### 空力モデルの詳細化・前進飛行の検討

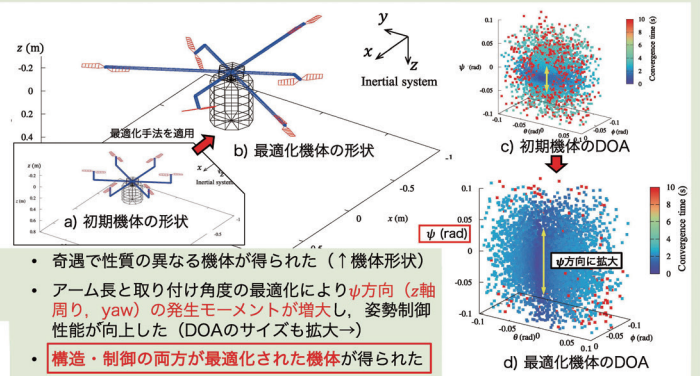
- Dynamic inflowの実装により空力モデルの詳細化を行う
- 前進飛行の条件における機体形状の最適化を行う

Dynamic inflow (Peters-He model) による前進飛行時の誘導速度分布計算例



#### Hexa-copterの最適化結果

得られた制御パラメータの値:  $Q = \text{diag}\{6.04, 21.8, 102, 46.2, 128, 174, 14.6, 55.9, 274, 7.40, 45.1, 3.79\}$   
 $R = \text{diag}\{109, 0.0123, 14.2, 6.46, 262, 145, 134, 130, 98.2, 260, 489, 340\}$



### Updates for the original paper

K. Yamaguchi and S. Hara, Technical journal of advanced mobility, vol. 4, no. 2に關して, 下記のように内容を補足・訂正します.

- Two-dimensional lift and drag coefficients for blade elements  $C_l(\alpha)$  and  $C_d(\alpha)$  were modeled by Eqs. (4) and (5).

- Based on the three-dimensional performance of the blade that was defined for the aspect ratio  $AR$ , nonlinear curves  $C_l(\alpha)$  and  $C_d(\alpha)$  were approximated.

#### Corrections

- $C_{Dp}$  is the drag coefficient at  $\alpha = 0 \rightarrow C_{Dp}$  is the  $C_D$  when  $C_L = 0$  (in page 4)
- $2 \sin(\alpha) S_d^2 \cos \alpha \rightarrow 2 \sin(\alpha) \sin^2 \alpha \cos \alpha$  (Eq. (4), in page 4)



J-stage JUIDAジャーナル





# Technical Journal of Advanced Mobility

## 日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～ (1)

氏名 大原 大 所属 エバー航空 運行乗員部 ボーイング777操縦士  
株式会社 Five Star Group (NEXAIRS DRONE SOLUTION)

### 1. 背景と目的

航空法の改正に伴い、2022年12月より無人航空機操縦者の国家資格制度が創設・開始され、レベル4での本格運用が徐々に広がっていく時期を迎えた。貨物の配送やインフラ点検を始め、今後数年で大幅な利用拡大が見込まれる。

航空機事故は6-8割がヒューマンエラーによる事故と報告されている。有人航空機においては、世界で発生した数々の過酷事故の検証と反省をもとに、特に人的要因によるリスクを低減させるため「CRM (クルー・リソース・マネジメント)」と呼ばれる航空安全のためのスキルが確立されてきた。運航に携わる者には年1回の訓練が国際的に義務付けられている。

無人航空機開発・利用の急増を背景に、国際民間航空機関 (ICAO) では、無人航空機操縦者 (Remote Pilot) にも、安全への脅威に対処するためCRMの知識を有することが求められるとしており、日本でも無人航空機の国家資格制度の学習要項の中に、CRMが含まれた。一方、無人航空機の飛行は歴史が浅く、操縦・運航に携わる人の背景となる業界や職種も多様であるため、CRMスキルについての認知度は低く、無人航空機の運航とCRMスキルとをどのように結びつけたらよいのかについての具体的な資料や教材は極めて少ない。

本研究は、日本国内で発生した無人航空機事故に関する基礎的な資料を構築し、事故がどのような場面で発生しうるのかについて理解しやすくするとともに、ソフト・ハード面での事故防止策を検討し、特に人的要因に起因する事故の発生を防ぐためにCRMスキルをどのように応用できるのかについて例示することで、広く無人航空機事故防止の訓練に役立てられるようにすることを目的とした。

### 2. 方法

・分析の対象として用いたのは、2015 (平成27) 年4月から2022 (令和4) 年3月までに日本国内で発生した無人航空機に係る事故トラブルのうち、国土交通省航空局に報告があり国土交通省ホームページ「過去の事故情報等の一覧」に掲載されている事例448件である。  
2015年度：12件、2016年度：55件、2017年度：63件、2018年度：79件、2019年度：83件、2020年度：70件、2021年度：86件となっている。

・各事例の報告には、「発生日」「飛行させた者又は所属団体等」「飛行場所」「機体 (種類、特徴等)」「事案の概要」「航空法上の許可・承認の要否」「許可・承認の有無」「当局の対応」「報告された原因分析及び是正措置」が記載されている。  
これらの情報をもとに、下記の2つのカテゴリで計9項目の分析を行った。

#### 【無人航空機による事故事案の特徴の分類】

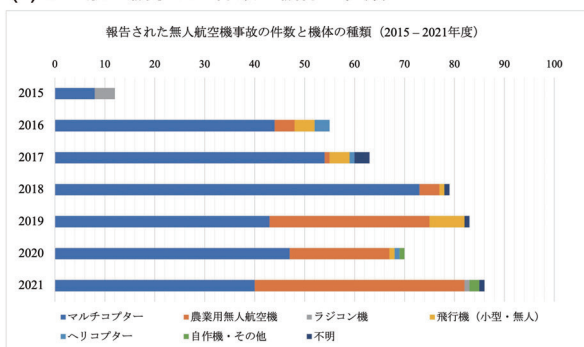
- (1) 無人航空機事故の件数と機体の種類、(2) 飛行目的と事故件数、(3) 機体の種類と事故事案の結末、(4) 無人航空機事故による人的・物的被害の件数、(5) 無人航空機事故による人的被害の内容と事故要因、(6) 無人航空機事故による物的被害の内容、(7) 無人航空機事故により発火・延焼が発生した事例

#### 【無人航空機事故の主要因・CRMによる事故防止策】

- (8) 無人航空機事故の主要因の分析、(9) 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策

### 3. 結果

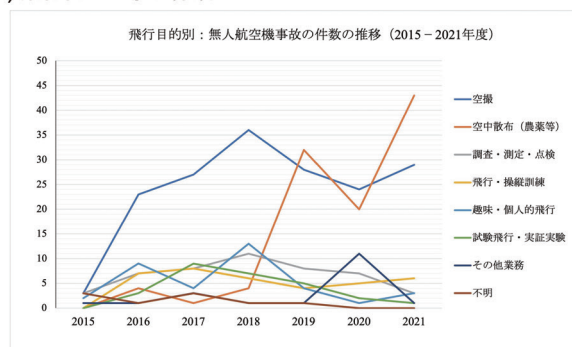
#### (1) 無人航空機事故の件数と機体の種類



2019年度からは農作業中の農業用無人航空機の事故が国土交通省航空局で集計されているため、2018年度以前に比べて農業用無人航空機による事故の報告数が多くなっており、単純比較はできない。

2019-2021年度の3年間では、全体で239件のうち、事故数の多い順に「マルチコプター (130件、54.4%)」「農業用無人航空機 (94件、39.3%)」「飛行機 (小型・無人) (8件、3.3%)」「自作機・その他 (3件、1.3%)」「ヘリコプター (1件、0.4%)」「ラジコン機 (1件、0.4%)」であり、「不明」は2件 (0.8%) であった。

#### (2) 飛行目的と事故件数



(1)と同様、2019年度からは農作業中の農業用無人航空機の事故が国土交通省航空局で集計されているため、2018年度以前と単純比較はできない。

2019-2021年度の3年間では、事故の多い順に「空中散布 (農業等) (95件、39.7%)」「空撮 (81件、33.9%)」「調査・測定・点検 (18件、7.5%)」「飛行・操縦訓練 (15件、6.3%)」「その他業務 (13件、5.4%)」「趣味・個人的飛行 (8件、3.3%)」「試験飛行・実証実験 (8件、3.3%)」で、「不明」は1件 (0.4%) であった。





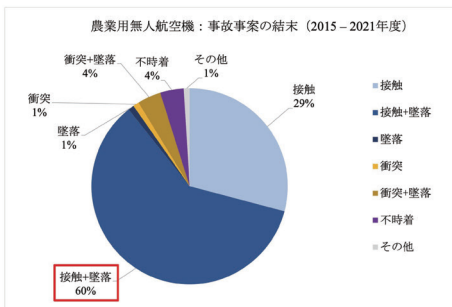
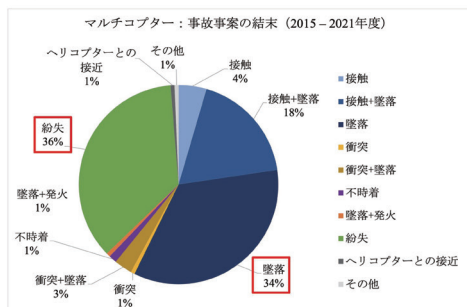
# Technical Journal of Advanced Mobility

## 日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～ (2)

氏名 大原 大 所属 エバー航空 運行乗員部 ボーイング777操縦士  
株式会社 Five Star Group (NEXAIRS DRONE SOLUTION)

### 3. 結果

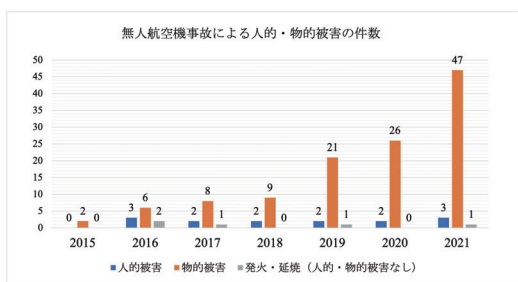
#### (3) 機体の種類と事故事案の結末 (マルチコプター, 農業用無人航空機)



・マルチコプターでは「紛失」が最も多く、36%を占める。対して農業用無人航空機では「紛失」はゼロであった。  
 ・マルチコプターでは「墜落」が34%、「接触+墜落」が18%、「衝突+墜落」が4%であるのに対し、農業用無人航空機では「接触+墜落」が60%、「衝突+墜落」が4%で、墜落のみの事案は1%であった。  
 マルチコプターは様々な用途・場所で用いられ、比較的小型の機体が多いのに対し、農業用無人航空機は大型の機体が多く、圃場など特定の場所で使用されることが多いことに起因すると考えられる。特に農業用無人航空機では圃場周辺の電線・電話線等への接触を伴うものが多い。

※ マルチコプターでは全309件のうち、36件(12%)が水没(海上・河川等)を伴っていた。

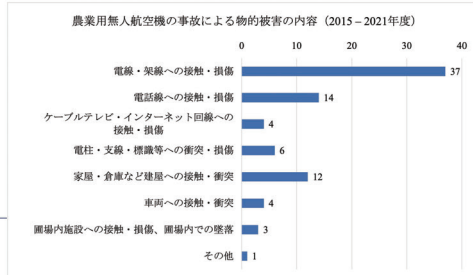
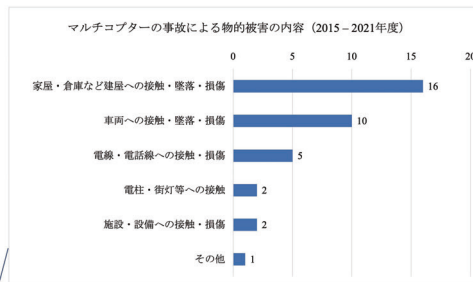
#### (4) 無人航空機事故による人的・物的被害の件数



・日本国内の無人航空機事故による人的被害は年間2-3件のペースで発生しており、これまでの7年間では大きな増減はなかった。  
 ・物的被害については、農業用無人航空機によるものが集計されるようになった2019年度から増加しており、2021年度には最も多く47件であった。物的被害の全件数のうち、農業用無人航空機によるものは、2019年度：18件(85.7%)、2020年度：19件(73.1%)、2021年度：40件(85.1%)となっている。

・マルチコプターの事故については、飛行場所が多様であるとみられ、物的被害の中では「家屋・倉庫など建屋への被害(接触・墜落・損傷)」が最も多かった。また、被害が発生する前段階として「突如操縦不能となった」「操縦操作を誤った」「風に流された」などの記述が見られた。  
 ・農業用無人航空機の事故については、飛行場所が主に田畑などの圃場とみられ、物的被害の中では電線・架線・電話線・ケーブルテレビ回線等への接触・損傷が最も多かった。

#### (5) 無人航空機事故により発生した物的被害の内容 (機体別)



#### (6) 無人航空機事故により発火・延焼が発生した事例

年度	飛行させた者	機体	事案の概要	原因分析または関連事項
2016	ラジコン機クラブ	ヘリコプター	・趣味のため飛行させていたところ、機体に異常が発生し動力を失った状態で着陸させたが、着陸直後に機体が炎上し、付近の菓原が焼失した。	・原因は不明
	個人	マルチコプター	・目視外飛行の訓練を行っていたところ、自ら設置した訓練用障害物に接触し、墜落した。墜落後に機体から発火し、付近の草が焼失した。	・墜落の衝撃で部品の一部が破損し回路がショートし、発火したためと思われる
2017	個人	マルチコプター	・地表計測のため飛行させていたところ、突如操縦不能となり墜落した。墜落後、機体の部品から発火し周辺の落ち葉に延焼した。	・機体に搭載された制御装置あるいは通信装置の故障が原因である可能性が高い。特に、姿勢制御装置の異常、電子コンパスの異常、GPS受信機の異常、送信機と期待感の通信異常、あるいは複数要因の組み合わせによる影響が考えられる。
2019	個人	飛行機 (小型・無人)	・趣味のため飛行させていたところ、突如操縦不能となり墜落した。その後、墜落した機体から出火し、付近の芝生に延焼した。	・原因は不明
2021	個人	ラジコン機	・趣味のため飛行させていたところ、操作を頼り機体が墜落した。その際付近の河川敷において火災が発生し草木が燃えた。	・原因は不明

・2016年から2021年までに5件発生しており、うち4件は墜落時の衝撃により発火したとみられ、墜落場所の周辺の落ち葉や草木などが燃えている。  
 ・これらの事例による直接的な人的被害・物的被害は報告されていないが、発火や延焼を伴う事案については国土交通省に報告すべきものとなっている。



J-stage JUIDAジャーナル





# Technical Journal of Advanced Mobility

## 日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～ (3)

氏名 大原 大 所属 エバー航空 運行乗員部 ボーイング777操縦士  
株式会社 Five Star Group (NEXAIRS DRONE SOLUTION)

### 3. 結果

#### (7) 無人航空機事故による人的被害の内容 (機体別)

◆ マルチコプターの事故により人的被害が発生した事案 ドローンの落下により人に接触したものの、飛行中に人に接触したものの、着陸時に操縦者や補助者等に接触したものが報告されている

年度	飛行させた者	人的被害の概要	原因分析または関連事項
2016	事業者	・建築現場撮影のため飛行させたところ、通信が途絶し、自動帰還にて降下中にクレーンに衝突し落下。落下場所にて工事作業中に機体が接触し、顔に切り傷を負わせた。	・飛行場所の電波環境の悪化のため、無人航空機と送信機間の通信が断絶し、操縦不能になったと思われる
2017	研究機関	・橋梁点検の実証試験のため飛行させていたところ、突然操縦不能となり関係者に接触した。当該人は救急搬送され、右手親指を数針縫う負傷を負った。	・飛行制御プログラムの操作モードが、縦士の意図に反して突然変更されたため、モード変更に気が付かない操縦者が操縦不能(混乱)に陥った
	事業者	・イベントの一環として行われたドローン菓子撒きのために飛行中の無人航空機がバランスを崩して落下し観客を負傷させた。6名が救急搬送され、3名が軽傷を負った。	・機体が飛行許可を受けていたものと異なっていた ・安全上必要な確認を行わないまま飛行させた
2018	事業者	・試験飛行のため飛行させていたところ、着陸時、降着装置が誤作動したため、姿勢を崩し、無人航空機が操縦者と補助者に接触した。操縦者と補助者は裂傷及び打撲を負った。	・着陸時に無人航空機の降着装置が誤作動し、機体の姿勢が不安定になったと考えられる
2019	事業者	・撮影のため無人航空機を体育館内で飛行させていたところ、操縦を誤り付近の人に接触し墜落した。擦過傷及び打撲を負った。	・機体と人の距離を見誤ったものと考えられる
2020	事業者	・動物調査のため無人航空機を飛行させていたところ、突風により墜落しそうになった機体を操縦者が受け止めようとし、手を負傷した。	・原因不明
2021	行政機関	・空撮のため無人航空機を飛行させた後、着陸しようとしたところ、機体が風に煽られ付近にいた機体監視者と接触し、手を負傷した。	・操縦者の意思と異なる動きが生じた時に適切な操作ができなかった ・危険箇所の確認不足であった ・操縦者と機体監視者の事前打合せが不十分であったことから、不用意に機体に接近した
	事業者	・空撮のため無人航空機を飛行させていたところ、着陸時に補助者に接触し負傷した。	・風が穏やかでもまた強まる可能性があることや、地上で風が弱くても上空では強風の可能性があること風の特質について認識が不足していた ・プロペラガードの保護機能について過大評価をし、プロペラの殺傷能力について過少評価を行っていた

◆ 農業用無人航空機の事故により人的被害が発生した事案 飛行中に風におおられるなどして機体がバランスを崩し人に接触するなどの事例のほか、散布中の農薬が人にかかった事例も報告されている

年度	飛行させた者	人的被害の概要	原因分析または関連事項
2016	農業関連団体	・農業散布飛行により登園中の園児に農薬がかかった旨の連絡を受けた	・散布飛行中突風が吹いたため中止したが、因果関係は不明
2018	個人	・農業散布のため飛行させていたところ、離陸時に突風に煽られ機体が横転し操縦者に接触した。操縦者は右足膝に裂傷を負った。	・離陸時の予期しない突風に対応できず機体が姿勢を崩したものと考えられる
2019	農業関連団体	・空中散布のため飛行させていたところ、着陸時に風に煽られ機体が横転し操縦者に接触した。操縦者は右手中指を骨折した。	・原因確認中
2020	農業関連業者	・農業散布のため飛行させていたところ、風に煽られスライドし、付近にいた人と車に接触し墜落した。人は負傷した。	・着陸時に機体が傾いて接地したため、着陸判定が出来ずその時点でモータを停止せず姿勢制御を継続した ・接地した後に、ドローンを安定して制御するために必要な電圧を下回っていた
2021	農業関連業者	・農業散布のため飛行させていたところ、第三者の車両に接触し墜落した。また機体を回収する際にプロペラが回転している状態であったことから操縦者が手を負傷した。	・原因確認中

#### (8) 無人航空機事故の主要因の分析

無人航空機事故の主要因	件数 (2015-2021年度計)	概要
1. 機体点検・整備不良	37 (8.3%)	人的要因 36.3%
2. 操縦ミス	41 (9.2%)	
3. 飛行計画の不備	64 (14.3%)	
4. チーム内連携ミス	20 (4.5%)	
5. 気象 (風、雨等)	28 (6.3%)	気象・通信・ハードウェア等 外的要因 14.8%
6. 電波・通信	29 (6.5%)	
7. バッテリー	9 (2.0%)	複合要因 17.6%
8. 複合要因	79 (17.6%)	
9. その他	2 (0.4%)	その他 0.4%
10. 不明	139 (31.0%)	不明 31.0%
合計	448	

・2015年度から2021年度までに発生した448件の事故トラブルの報告事例に記された内容から、主要因を10項目に分類。  
・「複合要因」については、主要因に挙げられた複数の項目に「1. 機体点検・整備不良」「2. 操縦ミス」「3. 飛行計画の不備」「4. チーム内連携ミス」のいずれかが含まれていれば『人的要因を含む』と定義した。全79件のうち、すべてのケースが人的要因を含んでいた。

「不明」を除いた場合、人的要因を含む事故が78.0%にのぼる。  
(「不明」をカウントした場合でも、人的要因を含む事故が53.9%)

・「複合要因」の中では「3. 飛行計画の不備」を含むものが64件(81.0%)と、最も多かった。無人航空機運航にあたり、事前の想定や飛行環境の確認が不十分であった可能性がある。  
・事故要因が「9. 不明」であるものは31%にのぼった。事故の詳細が報告されていないか記載されていない、または調査中・確認中となっている。国土交通省により情報が追記された場合には再分析を行う。



J-stage JUDAジャーナル





# Technical Journal of Advanced Mobility

## 日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～ (4)

氏名 大原 大 所属 エバー航空 運行乗員部 ボーイング777操縦士  
株式会社 Five Star Group (NEXAIRS DRONE SOLUTION)

### 3. 結果

#### (9) 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策

無人航空機事故の各主要因に分類された事例の具体例と、各事案の是正措置を参考にした事故予防策、事故予防に向けて適応可能なCRMスキルの項目名を表にまとめた。具体的な事象や場面を想像することで、訓練に用いることができるようにすることを目指すものである。なお、個人の捉え方によって、どのようなCRMスキルを用いることができるかについては意見が多様であるため、あくまでも例示とする。CRMスキルの項目名は、5分野15項目(TJAM 2022, Vol.3, No.1, p1-11 参照)を用いている。

	各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした事故予防策	事故予防に向けて適応可能なCRMスキル	左記に該当するCRMスキルの項目名
1 機体不良	・経年劣化に伴う部品の故障	定期的な外部点検を行う。	機器の状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。着陸後に必ず外部点検を行うように計画にする。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・脱着可能なプロペラアームが不完全に取り付けられていた / 脱落した	機体に追加安全装置を施すとともに、緊急着陸の手順を厳格化する。飛行前にプロペラの取り付け状態について再確認する。	何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・受信機の故障、もしくは振動によるコネクタケーブルの抜け又は接触不良	飛行前の機体確認を徹底する。	タスクの中に飛行前点検項目を追加する。何か間違いがあるかもしれないという気持ちで機器の状態をよくモニターする。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
2 操縦ミス	・飛行中操縦者がモニターを注視していたところ、樹木の存在に気が付かなかった	操縦者から死角が生じた場合や安全確保が難しい場合には2名以上の補助員を必要とする場所に配置し安全飛行を徹底する。	周囲の環境をモニターし、いつもと違う部分は無いかなどを確認する。一点集中になっていないか確認する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)、警戒 (Vigilance)
	・障害物の存在を把握していたが、障害物との距離感を見誤った	飛行経路の事前確認を実施し、適切な位置に安全管理者を配置するとともに、操縦者に対し助言する等の連携を密にする。	タスクを行うための準備不足、勉強不足がないか確認する。メンバーとのブリーフィングのための場を設定する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・カメラアングルの調整に意図が集中し、周囲の安全確認を怠った	飛行経路の事前確認や監視員の適切な配置を徹底するとともに、飛行状況を容易に視認できる距離で飛行させる。	一点集中になっていないか確認する。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。	警戒 (Vigilance)、タスクの配分 (Distribution)
	・突風にあおられた際に操縦者が慌てた	飛行中は周囲の状況に十分注意して飛行させるとともに、急激な操作を行わないように注意する。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・オペレーターの疲労が蓄積し、注意力が低下した	毎年同じ場所で開催を行っているが、農業用ハウスがいつも気になっていた。高さ等再確認しナビゲーターとオペレーターの連絡を密にし、事故が発生しないよう万全を期す。	全員が自分のタスクを確実にこなせるように配分する。疑問に思ったことは躊躇せず口に出す(時期を逸さない)	タスクの配分 (Distribution)、安全への主張 (Assertion)
	・旋回時のバンク角が大きすぎたため、高度低下し機体のバランスが崩れた	バンク角に制限を設け、飛行速度にあったバンク角で旋回をする。	冷静に行動し、実行しながらも行動が最良であるか検討を続ける。現在の状況から今後どう変化するか分析する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)、状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
3 飛行計画の不備	・ドローンを自動操縦から手動操作に切替えた際、進行方向操作を誤った	手動操作時の機体方向、周辺確認を徹底する。	操作を行ったときや、操作を変更するときはメンバーに伝える。現在の状況から今後どう変化するか分析する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)、状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・飛行経路設定時に障害物との安全間隔を考慮しておらず、飛行時においても障害物との距離測定を誤った	飛行前に操縦者、補助者全員で飛行エリア、周辺の障害物、補助者の配置位置、飛行中の連絡体制、緊急時の手順確認を徹底する。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。より多くのリソースを活用して情報を集める。情報分析から潜在的な危険性を発見する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・操縦者と補助者を誤って、飛行予定ルートなど事前に情報共有せず飛行させた	飛行前に飛行内容、ルート、高度など操縦者と補助者間で確認し飛行させる。補助者は飛行ルート逸脱の際は操縦者に警告する。	情報共有に十分な時間をとる。情報は省略せず正確に伝える。他のメンバーが納得して行動できるようにする。	ブリーフィング (Briefing)、情報の双方向での確認 (2Way communication)、リーダーシップ (Leadership)
	・操縦者が飛行中に通行人からの呼びかけに対応するなど、操縦に集中できない状況下で飛行させた	操縦者が操縦に専念できるように操縦者の近くに補助者を配置し、補助者が第三者への対応を行う。また、飛行前の事前周知を行い、必要に応じ管理者等へも周知の協力を依頼する。	コントロール (Control)、ナビゲーション (Navigation)、コミュニケーション (Communication) の順に優先順位を決定する。安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。	優先順位付け (Prioritizing)、解決策の選択 (Decision)
	・船舶から飛行させていたため、自動帰還機能作動時、設定した着陸地点と船舶の位置が異なっていた	飛行中は船舶を停船させる。	現在の状況から今後どう変化するか分析する。状況の変化に応じて計画しなおす。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・誤った飛行経路を設定して自動飛行を行った	飛行経路上の障害物等の有無を確認した上で飛行計画を策定する。	情報の確認を行う。タスクを行うために十分な時間をとる。(時間が足りなければ、時間を作り出すことも考慮する)	情報の双方向での確認 (2Way communication)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・航空局標準マニュアルに記載の「補助者を配置する」「学校の上空では飛行しない」を遵守せず飛行させた	社内に安全管理者を配置する。事前に飛行計画表を作成し、それに基づいて補助者の配置位置を決める。	意思決定のリソースが自分の把握している以外にもあるか確認する。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。タスクを行うために十分な時間をとりリソースを確認する。ブリーフィングのための場を設定する。	解決策の選択 (Decision)、計画と時間管理 (Planning and Time management)、ブリーフィング (Briefing)
・現場でチェックシートを改変してしまった、クロスチェックの仕組みになっていなかった	ドローン飛行に関するルール改善・複数人でチェックする仕組みの強化	ブリーフィングのための場を設定する。情報共有に十分な時間をとる。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。	ブリーフィング (Briefing)、決定・行動のレビュー (Critique)	
4 チーム内連携	・風速計の携帯を忘れていた。安易な判断でテスト飛行をさせた。	危険予測を実施する。製品マニュアル及び無人航空機の許可・承認書に沿って運用する。風速計等を必ず携帯する。風速5m以上の場合、監視は2名以上で行い必ず1名は風下に配置する。緊急時着陸場所を計画時に選定しておく。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・飛行中、補助者が他業務のため途中で不在となった	常時補助者を配置させ、周囲の状況等を操縦者に伝える等飛行の安全を確保するための措置を最優先させる。	互いに質問・情報提供することの重要性を認識する。優先順位とその変更はメンバー間で共有する	ブリーフィング (Briefing)、優先順位付け (Prioritizing)
	・電線が存在を把握していたが、操縦者と補助者が共に距離感を見誤り、接触した	事前確認で電線や電柱等、見えにくい位置の障害物を見落とし、操縦者及び補助者の経路・立ち位置を含めた飛行経路を設定する。作業の慣れによる思い込みがないよう、安全を第一に、操縦者及び補助者で相互の連携(コミュニケーション含む)を常に心掛ける。	慣れていても問題意識を持って確認をする。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。情報の確認を行う。	警戒 (Vigilance)、タスクの配分 (Distribution)、情報の双方向での確認 (2Way communication)

J-stage JUDAジャーナル





# Technical Journal of Advanced Mobility

## 日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～ (5)

氏名 大原 大 所属 エバー航空 運行乗員部 ボーイング777操縦士  
株式会社 Five Star Group (NEXAIRS DRONE SOLUTION)

### 3. 結果

#### (9) 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策 (抜粋・続き)

各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした事故予防策	事故予防に向けて適応可能なCRMスキル	左記に該当するCRMスキルの項目名	
4 チーム内連携ミス	・飛行開始後、徐々に風が強くなっていることに気付かず飛行を中止する判断が遅れた。補助者が気象状況の変化に気付かず必要な助言ができなかった。	操縦者は飛行前に気象状況を確認し風が強くなりそうな場合は飛行を中止する。補助者は飛行中も風速計を確認し最大瞬間風速が5m/s以上の場合はすぐに飛行を中止させる。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。「一点集中」に陥らないように注意する。	状況の把握と認識の共有(Monitor and Recognize)、警戒 (Vigilance)
	・補助者は配置していたが、無人航空機についての知識のない工事現場技術者であった。	十分な飛行経験のある補助者の設置を行う。	常に先を考慮して業務をサポートする。全員が自分のタスクを確実にこなせるように配分する。	リーダーシップ (Leadership)、タスクの配分 (Distribution)
	・操縦者を含め見張り役や補助者間の連絡体制が確立していなかった。	教育訓練の実施及び連絡体制を構築する	相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。情報の確認を行う。	ブリーフィング (Briefing)、情報の双方での確認 (2Way communication)
	・組織として標準飛行マニュアルの存在を認識しておらず、管理体制に不備があった。	安全飛行体制を構築する。安全飛行を維持するための選法体制を維持向上する。	タスクを行うために十分な時間をとる。安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。意思決定のリリースが自分の把握している以外にもあるか確認する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、解決策の選択(Decision)
	・補助員との連絡に手紙を使用していたが、操縦者が無人航空機に意識が集中し合図を見落とした。	補助員との連絡にトランシーボも併用する。飛行前に補助員と十分打合せを行う。	「一点集中」に陥らないように注意する。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。	警戒 (Vigilance)、ブリーフィング(Briefing)
5 気象(雨、風等)	・大区画での作業で、オペレーターとナビゲーターの連絡に無線を用いていたが、距離が離れすぎたことから無線連絡が途切れた。	大区画で作業をする際には、区画を分割して作業を行うことで通信途絶による事故の防止を図る。各作業員に対して安全航行についての注意喚起を行い、危険箇所の確認を徹底する。	情報分析から潜在的な危険性を発見する。業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・天候判断を誤り、霧の中を飛行させた結果、飛行制御部などが水分により誤作動をおこした	降水や霧の場合は飛行を行わない。飛行中もモニターにより天候監視を行い、降水や霧が確認された場合は帰還させる。	より多くのリソースを活用して情報を集める。現在の状況から今後どう変化するか分析する。業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・山頂付近に吹き付けた風が機体下方から煽るような形で吹き付けたことにより、機体の自動調整範囲を超えるピッチロール角になってしまった	尾根等の地形の急変箇所には近づかない等の運用を行う。対地高度を上げて、地形からの距離をとり、地形に起因する乱流の影響範囲からできるだけ距離を取る。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・上空は地上よりも強い風が吹いていたため、自動帰還できず風流に流された	無人航空機にリールタイプの暴走防止装置を取り付けて飛行させるとともに、飛行前に気象状況の確認を徹底する。	より多くのリソースを活用して情報を集める。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
	・向かい風により、機体に負荷がかかってバッテリーが想定よりも早く消耗した	バッテリー残量の半分程度となった場合や飛行目的が達成できた時点で速やかに帰還させる。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。より多くのリソースを活用して情報を集める。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)
6 電波・通信	・小雨が降っており、機体内への浸水による機能不良から操縦不能に陥った	ドローン飛行前に天候状況を確認する。悪天候下のドローンは飛行を行わない。	安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	解決策の選択 (Decision)、状況の把握と認識の共有(Monitor and Recognize)
	・直線的な見通しの範囲外となり通信が途絶え、また、山の斜面により捕捉するGPS数が不足した	定期的な点検時に強制的に電波を遮断し自動帰還が作動するを確認する。離陸から帰還まで地上操縦装置からの機体の見通しを確保し、かつ、捕捉するGPS数が不足しないよう山の斜面から十分な距離を確保する。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・飛行場所付近の鉄橋により電波干渉を受け、通信途絶 (制御不能) となった	周囲の安全確認を行う。鉄橋には近づかない。また、強い磁界を発生する装置付近では飛行させない。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・磁気帯びている場所で飛行及び飛行前の準備作業を行なったことで、機体が磁気干渉を受け、GPSに誤作動が生じた	周辺環境を確認し、磁気が帯びているもの近くで飛ばさない。また、磁気帯びているものの存在が想定される場合は、機体にヒモを取り付けて段階的に試験飛行を行う。誤動作が発生した場合は機体等の異常の有無を確認し、異常が見受けられた場合は必要な処置を行う。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	状況の把握と認識の共有(Monitor and Recognize)、計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・送信機と機体の通信が途切れ、何らかの異常により位置情報が取得できなくなった	機体のメンテナンス、周辺環境の確認、他の事故事例の把握や危険予測を踏まえた飛行計画の立案を徹底する。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
7 バッテリー	・強風が発生したことにより、バッテリーが想定よりも早く消費した	バッテリー残量に十分余裕を持たせた飛行計画を立案する。急激な天候の変化等を察知した際は速やかに機体を安全に着陸できるように訓練を行う。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
	・飛行当時の気温が低かったため、バッテリーの性能低下が起きた	気温が低い時は、バッテリーの残量に十分注意し、不要な飛行は控える。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・バッテリーの高温化による異常	表面温度等のバッテリーの状態を管理する。外気温が高く、直射日光があたる環境下での使用は極力控える。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。状況の変化に応じて計画しなおす。	計画と時間管理 (Planning and Time management)
8 要因	・飛行前点検時にバッテリーに異常がないこと及びバッテリーが装着部にしっかりと装着されていることを確認してから飛行する。少しでも膨らみや違和感を感じたらそのバッテリーは使用しない。	飛行前点検時にバッテリーに異常がないこと及びバッテリーが装着部にしっかりと装着されていることを確認してから飛行する。少しでも膨らみや違和感を感じたらそのバッテリーは使用しない。	機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
	・機体が飛行予定範囲からはみ出した。補助者は操縦者の判断で配置しなかった。太陽の反射光により機体を見失った。操作画面を注視して無人航空機を見ていなかった。	関係法令・飛行マニュアルを再確認する。飛行予定範囲及び関係各所への飛行事前連絡の徹底。必要数の補助者を配置する。社内で再講習を実施。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。ブリーフィングのための場を設定する。安全確保のため譲ることのできない最低ラインを確立する。「一点集中」に陥らないように注意する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、ブリーフィング(Briefing)、解決策の選択(Decision)、警戒 (Vigilance)





## Technical Journal of Advanced Mobility

### 日本国内の無人航空機事故(2015-2021)の要因分析とCRMスキルによる予防策の検討 ～ヒューマンエラーによる事故の防止に向けて～ (6)

氏名 大原 大 所属 エバー航空 運行乗員部 ボーイング777操縦士  
株式会社 Five Star Group (NEXAIRS DRONE SOLUTION)

#### 3. 結果

##### (9) 無人航空機事故の主要因の実例とCRMによる事故防止策 (抜粋・続き)

各事故要因の具体例 (抜粋)	事案の是正措置を参考にした事故予防策	事故予防に向けて適応可能なCRMスキル	左記に該当するCRMスキルの項目名
8 複 合 要 因 ・ 操縦者の意思と異なる動きが生じた時に、適切な操作ができなかった。危険箇所の確認不足であった。操縦者及び監視者の事前打合せが不十分であったことから、不用意に機体に接近した。	危険箇所の事前確認を操縦者と監視者が一緒にすることで情報共有を図る。操縦者及び監視者は、機体の位置取りや立ち位置等について事前に打合せを行い連携を図るとともに、離着陸時は機体から十分な距離を確保する。	より多くのリソースを活用して情報を集める。特定の問題対処のみに集中しないように、自分自身や他のメンバーをモニターする。相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。常に先を考えて業務をサポートする。	状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)、タスクの配分 (Distribution)、ブリーフィング(Briefing)、リーダーシップ (Leadership)
・ 前回の飛行より半年以上期間が空いており、事前練習の不足及び気の緩みもなかった。	練習会及び安全講習の実施、飛行予定場所の事前確認、飛行させる者の横に操縦者を配置する。また、飛行させる者と補助者相互間の注意喚起を徹底する。	慣れていることでも問題意識を持って確認をする。危険であると感じた時は自己主張の程度を強める。全員が自分のタスクを確実にこなせるように配分する。	警戒 (Vigilance)、安全への主張 (Assertion)、タスクの配分(Distribution)
・ 補助者が無人航空機の動きを確認しておらず、操縦者と補助者の連絡体制も不徹底であった。また、飛行させた際、付近に複数の無人航空機が飛行していた為、電波障害が発生した可能性もある。	無人航空機の飛行状況の監視を徹底するとともに、操縦者と常に連絡を密にする。また、無人航空機を離陸させる前に付近に他の無人航空機の有無について確認する。	相互の連絡方法や問題への対処方法を確認する。チームのパフォーマンスをモニターし、望ましい環境を維持する。機器やメンバーの状況、周囲の環境をモニターし、情報を共有する。	ブリーフィング (Briefing)、チームに適した雰囲気づくり (Climate)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)
・ 飛行前の風速の測定について、当日の飛行可否は天気予報と体感での判断であった。また、機体を緊急着陸させる選択肢もあつたが判断できなかった。	飛行前及び飛行中は風速計による確認を行い、規定値を超える風速を確認した場合は、速やかに飛行を中止する。また、事前に綿密な飛行計画を立案し、十分な安全を確保できる計画とする。各種判断が適切にできるよう操縦技量の向上や周知等を徹底する。	意思決定のリソースが自分の把握している以外にもあるか確認する。冷静に行動し、実行しながらも行動が最良であるか検討を続ける。決定直後に、その決定が正しいかどうかを見直す。疑問に思ったことは躊躇せず口に出す(時期を逸さない)	解決策の選択 (Decision)、実行 (Action)、決定・行動のレビュー (Critique)、安全への主張(Assertion)
9 そ の 他 ・ 鳥の急接近に対応が間に合わずドローンと接触し羽が折れ墜落となった。	チェック項目に、周辺環境の確認を追加する。飛行中に異常や周囲の状況で危険を感じた場合には、直ちに操縦者へ報告し、安全な場所へ着陸させる又は、その場で急上昇等の操作を行い危険を回避する。	業務負荷が高くなる (状況が悪化する) 場合に備えて計画する。リスクや異常を認知した場合は速やかに共有し評価する。	計画と時間管理 (Planning and Time management)、状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)

#### 4. 考察

これまでに日本国内で発生した無人航空機事故では、要因が「不明」と分類されたものを除いた場合には、**人的要因を含む事故が全体に占める割合が78.0%**にのぼり、「不明」を含めた場合でも、**人的要因を含む事故が53.9%**と半数以上を占めた。特に「**飛行計画の不備**」に関しては、**単独の主要因としては最も多く、「複合要因」の事案に関しても81%が「飛行計画の不備」を伴うものであった**。これまでの多様な運航において、計画作成時点での体制や手法に課題があった可能性があり、そのための訓練方法についても、無人航空機利活用の実態に合わせて柔軟に変更・追加すべきである。

本研究では、CRMスキルをどのように無人航空機領域に適用していくかについて具体的な考え方を示すために、事故トラブル事例の要因別に、その改善策のためCRMスキルのうちのどの要素が当てはまる可能性があるかについて例示した。特に、「状況の把握と認識の共有 (Monitor and Recognize)」「計画と時間管理 (Planning and Time management)」「状況の予測と問題点の分析 (Anticipation and Analysis)」「警戒 (Vigilance)」「ブリーフィング (Briefing)」などのスキルが事故防止に役立つと思われる事例が多かった。

「座学でCRMの知識や方法を学んでも、それらを実際の運航ですぐに活用できるとは限らず、学んだ知識や方法を実際に活用するための訓練の場が必要となる」と指摘されており、無人航空機においても、有人機と同様の利活用が増加するにつれて、**机上学習だけでなくシミュレータやロールプレイによる訓練が必要となる**ことが予想される。

#### 【参考】CRM (クルー・リソース・マネジメント) スキル習得に適した機体の開発



NEXAIRS X1



無人航空機の国家資格でも学習することが必須になった「クルー・リソース・マネジメント(CRM)」は、**有人航空機で事故防止のために役立てられている安全管理スキル**です。世界各国の航空会社で航空機運航に携わる者に学習・訓練が義務付けられています。CRMスキルをどのように習得し訓練を行っていくかについては議論の余地がありますが、座学での学習だけでなく、実際の運航場面に当てはめて、ヒヤリハットや事故に至るプロセスを体験し、その回避操作を演練することによって無人航空機の安全確保に貢献できればとの思いから、機体の開発に至りました。

『NEXAIRS X1』は、「クルー・リソース・マネジメント(CRM)」の実地訓練に用いることのできる「CRM訓練モード」を搭載。操縦者が**事故の起こるプロセスを演練することで、事故防止に役立てることが**できます。

また、GPSのON/OFF機能や、オーバーライド機能を有した送信機2台を標準装備しており、国土交通省による告示で示されている国家資格の修了審査に必要な機体要件に準拠しています。

カメラ機能を利用しない「目視内飛行」では、タブレットの接続をしなくても、送信機のみで起動からジャイロリセット、コンパスキャリブレーションまで行うことができ、バッテリー残量やGPSのON/OFFや受信個数の確認もできるなど、スクールでのユーザビリティを最大限に考慮。リモートIDも付属されています。

J-stage JUIDAジャーナル





## Technical Journal of Advanced Mobility

大型 A A M 搭載用ガスタービン発電機開発 ～次世代ハイブリッド動力システム～

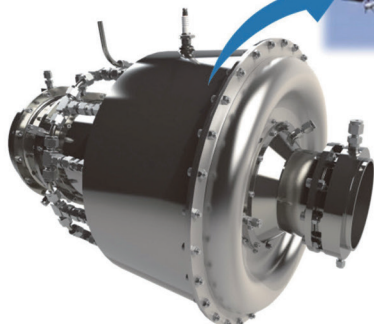
氏名 福島幸夫・太田豊彦

所属 エアロディベロップジャパン株式会社

### 大型ドローン・空飛ぶクルマ向け 国産タービンハイブリッド動力システム



ADJ独自開発  
ガスタービン発電機と  
バッテリーのハイブリッド

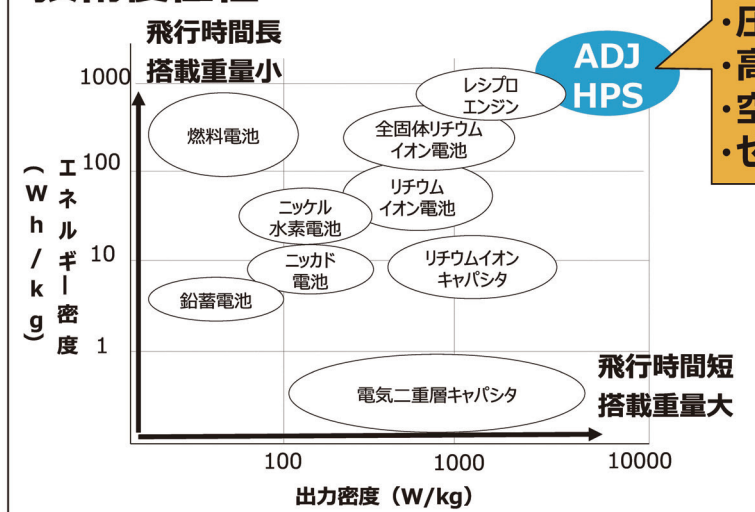


既存LiBドローン  
49kg積載・8分間 飛行

ADJパワーユニット(40kW×2基)搭載ドローン  
40kg積載・**60分間** 飛行可能

※机上計算より

#### 技術優位性



- ・圧倒的コンパクト設計(一体構造)
- ・高エネルギー密度/高出力密度
- ・空飛ぶクルマへの拡張性能あり
- ・ゼロエミッション燃料への対応可

#### 拡張性



#### 量産モデルの予約注文・見学について

タービンハイブリッド動力システム量産モデルの予約注文、技術スペックに関するヒアリングなどをご希望される方は、以下の連絡先までお問い合わせください。

連絡先：[info@aerodevelop.jp](mailto:info@aerodevelop.jp)

窓口：田邊敏憲（代表取締役）

JUANDA

JUIDAジャーナル



## Technical Journal of Advanced Mobility

# 点検・診断におけるμドローン利用の可能性調査



DIEGO MARCELO RAMIREZ JOVE, 山口佳樹 (筑波大学)



創基151年  
筑波大学50周年記念  
50TH ANNIVERSARY OF  
UNIVERSITY OF TSUKUBA

### 研究概要および研究背景

近年、超高層建造物など建造物の巨大化とその保守管理作業に注目が集まっている。なぜなら、建設時および運用時の両方において資源とエネルギーの節約および高効率な利用が期待されるからである。但し、その前提として、建造物の寿命が十分に長いことが求められる。この実現において、建造物の点検やメンテナンスは不可欠であり、特に高さ1,000階を超える超高層建造物ではその安全性や信頼性の保証から緻密かつ網羅的な調査が要求され、この実現が求められる。

これまでに、センサーを伴ったワイヤー敷設による点検・診断・管理が既に提案されているが、実装が容易な反面、問題も多い。例えば、総重量の増加、建造費・維持費の増加、特殊な施工方法による高難度作業などが挙げられる。身近な例で示すと、車種により異なるが、自動車で使用される配線（ワイヤーハーネス）は普通自動車のサイズでも全長で最大10km程度に達し、その重量は50kgを超える。そして、大規模建造物においては、これが無視できない量となる。

そこで本発表では、屋内の点検・診断・管理についてマイクロドローンを利用することを提案する。そして、マイクロドローンの誘導方式とその自動制御の可能性について報告する。

### 実装システムの概要とこれまでの実験結果

試験環境として重量が約30gの Crazyflie2.0 を選択し、これで自律飛行できるかを試みた（図1）。マイクロドローンを採用した理由は、①屋内の全てでGPSを利用することは難しい、②無線通信の制約から遠隔操作を常に保証できない、③ダクトなどの空間を考えるとサイズが限定される、④落下して重大事故とならない、などである。

なお、オリジナルの Crazyflie 2.0 にカメラがなかったことから、CMOSセンサ(OV7670)を小規模FPGA(Spartan-6)に直接接続し、撮像画像を実時間処理することで、自律飛行に挑戦している[1][2]。

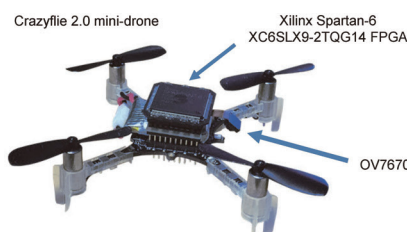


図1 Crazyflie 2.0 と FPGA 映像処理部（約30g）

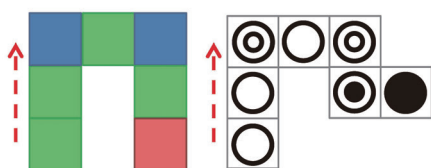


図2 エネルギー消費から考えられたパターン

### 新しい提案手法

同心円状シンボルの採用は、その大きさから一定精度の高度調整も可能にするなど、メリットは大きい。また、図3に示すように、安定してシンボル抽出が可能であることを確認している。また、実時間ストリーム動画処理を行っていることから、仮に抽出に失敗しても前後の成功した抽出情報を用いて補完や先読みを行い、信頼性を高めることができることもわかっている。しかし、飛行方向の決定において、複数シンボルを得ないと正しい方向を得ることができず、実用においてはこの部分の改良が求められていた。

そこで、シンボルを同心円状から三角形とし、飛行方向もシンボルより同時に得ることができるよう改良を行った。これにより、自機の位置（高さ）とドローン位置決定後の制御（飛行方向）について、シンボルが一つしかなくても十分な情報を得ることができるようになった。

### 現在のまとめ

三角形を基本形状にすることで飛行方向を得ることができるようになったが、高度、撮影角度、撮影タイミングによって三角形の形状が変化したり、場合によっては台形ないし頂点の欠けた凹型のシンボルとなるため、これが正しい制御の妨げとなっていた。これらについて解決し、シンボルの全てがフレーム内にある場合で97%の精度、シンボルの一部がフレーム境界にかかる場合でも94%の精度で計測が可能となった。

### 参考文献

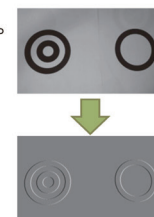
- [1] Jiahao Cheng. FPGA image processing to support the autonomous flight of microdrones. March 2021.  
[2] Zhang Chenguang. Self-flying drone system by marker recognition. March 2022.



### 今後の課題

現在の問題は飛行時間であり、ドローンがホバリングするだけで7分程度、FPGAの制御を含めると6分程度である。このため、点検・診断等へ応用するには不十分である。低消費電力型FPGAへの置換や演算処理の簡素化によりFPGA部の電力を1/10程度まで減らせると考えられ、その省力化を進めている。

図3 シンボル抽出



## 連続放水ドローンの開発と垂直流体力の活用

氏名 木場田慶矩、富樫盛典 所属 国土館大学大学院 工学研究科

【研究目的】：電力と水を地上から「常時供給」する事で、長時間飛行しながら放水し、消火活動できるドローンの開発を目指している。放水時に発生する流体力の「垂直成分」 $F_z$  を飛行高度向上に活用し、「水平成分」 $F_x$  はフレア操作で制御した。

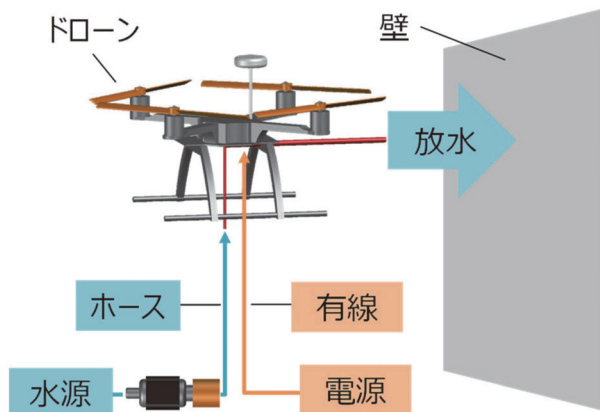


図1. 開発したドローンの概要

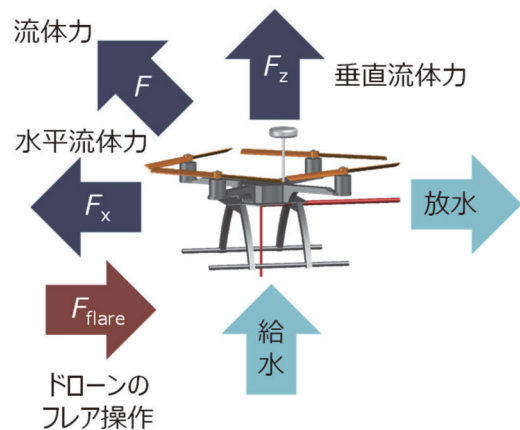


図2. 垂直流体力活用時のフレア操作

【研究結果】：クアッド型ドローンに、ペイロード350g 相当の放水装置一式を装着し、バッテリー交換や水の補充を行うことなく、「飛行高度の0.21m」相当の垂直流体力を活用し、放水流量 0.05 L/s、放水時間 42 s、飛行高度 3.3 mの達成を確認した。

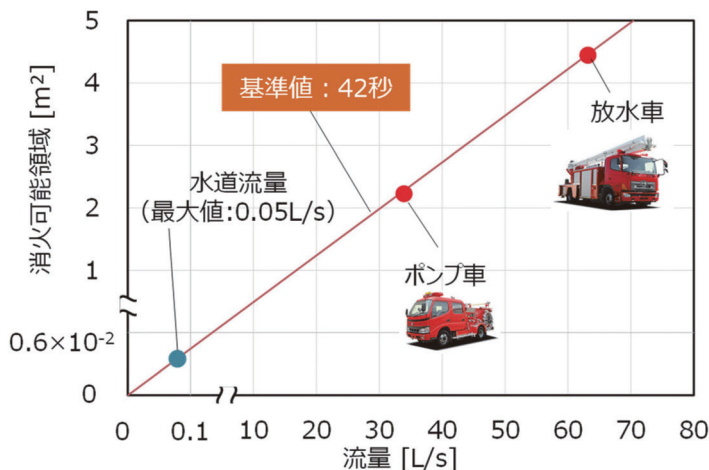


図3. 消火流量と消火時間の関係

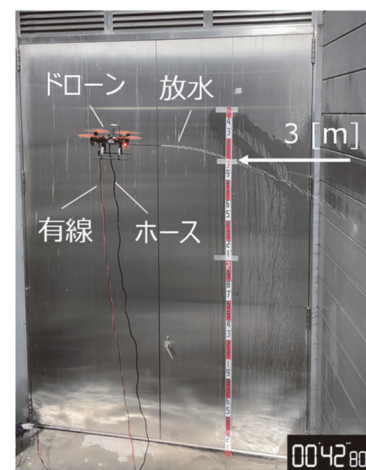


図4. 連続放水の飛行実験



## Technical Journal of Advanced Mobility

# 編隊飛行ドローンの飛行安定性解析とその応用

氏名 安藤樹生、富樫盛典 所属 国土館大学大学院 工学研究科

【研究目的】：離陸後に空中で飛行する2台のドローン同士が、安定にホバリングできる間隔をドローンまわりの流体シミュレーションにより求め、さらに4台の編隊飛行ドローンを用いて、低木に網掛けをする作業の効率的なアシストを目指している。

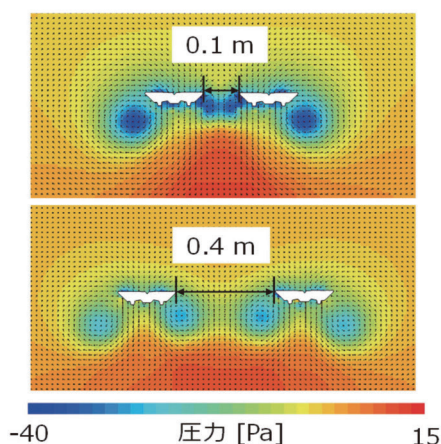


図1. ドローンまわりの流体シミュレーション

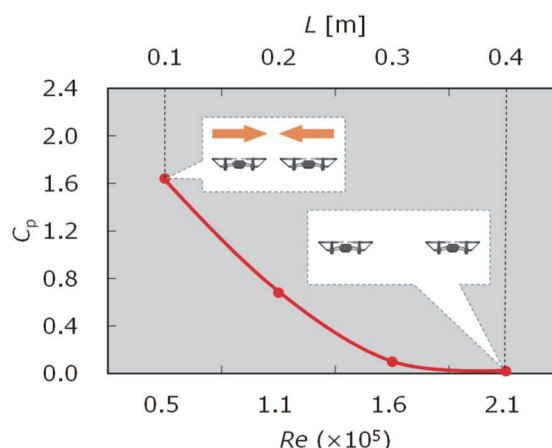


図2. 安定ホバリングの飛行間隔

【研究結果】：編隊飛行ドローンの間隔が0.4 m以上で、圧力の影響を受けずに安定飛行できることを確認した。また、網を持ち上げ0.9 mの低木模型まで移動し、ドローンの回転運動のみで網をリリースすることで、網掛け作業ができることを確認した。

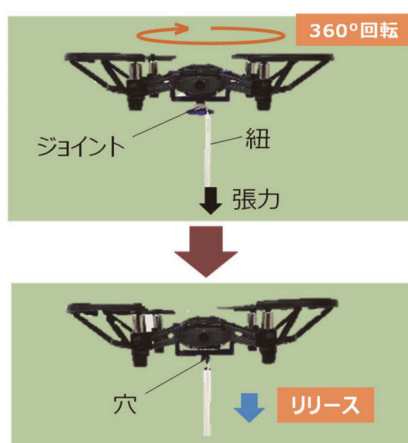


図3. 回転運動による網のリリース機構

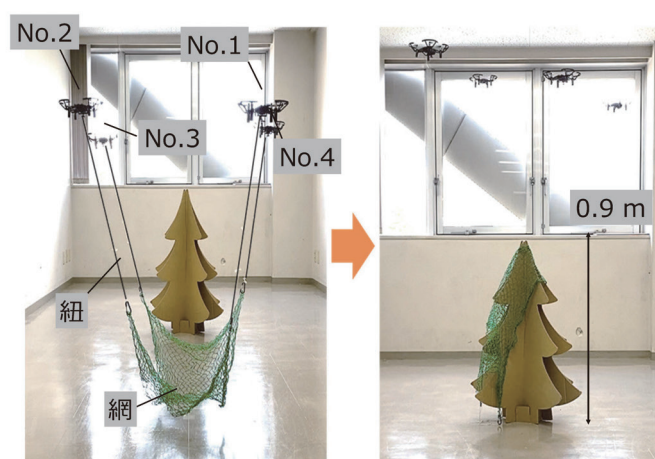


図4. 編隊飛行ドローンによる網掛け実験



# 空水ドローンによるマイクロプラスチックの採取法開発

氏名 瀧浪隼翔、富樫盛典 所属 国土舘大学大学院 工学研究科

【研究目的】：国内における河川や港湾に流出したMP(マイクロプラスチック)の23%がPE(ポリエチレン)あるいはPP(ポリプロピレン)で構成された人工芝である。そこで、それらを安価かつ汎用的な空水ドローンを活用し、試験的にサンプリングする方法を開発した。



図1. 採取ネットを装着したドローン

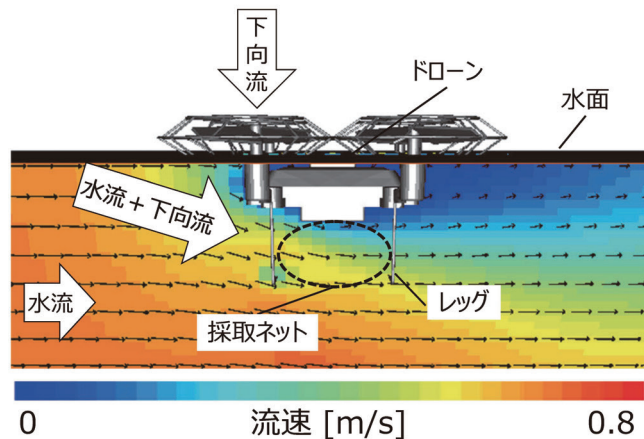


図2. ドローンまわりの流体シミュレーション

【研究結果】：流体シミュレーションより、プロペラ下向流と川の水の流れの合力を活用して、MPをネットで採取できることがわかった。採取実験ではプールにPEとPPを5gずつ撒き、6分間の実験を行った。その結果、理論採取量の約50%を採取できる事を確認した。

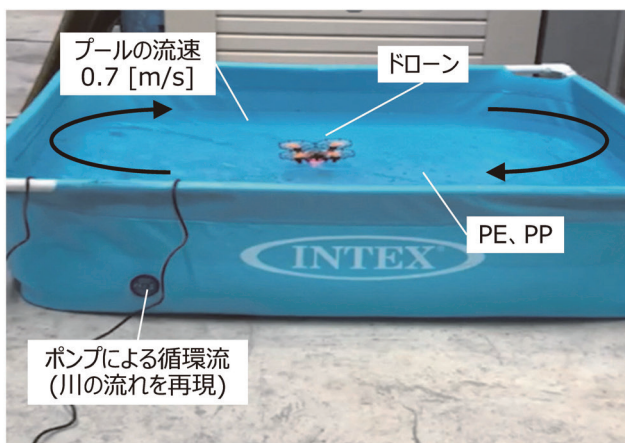


図3. プールでの採取実験方法

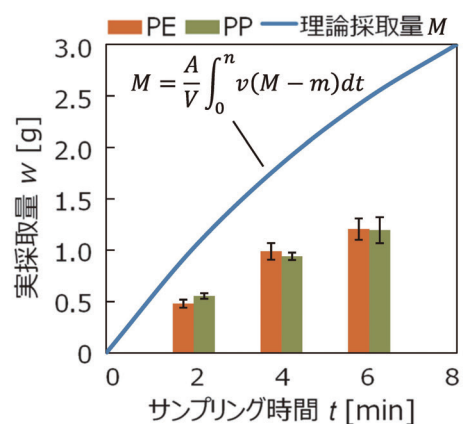


図4. プールでの採取実験結果



# Technical Journal of Advanced Mobility

## 空間IDの発行技術とドローンへの応用

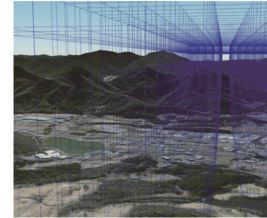
氏名 武田 全史 所属 株式会社 Cube Earth e-mail:takeda@cubearth.jp

### 1. はじめに

「空間ID」とは、特定の場所や空間を識別するための一意の識別子であり、位置情報技術やデジタルマッピングなどの分野で使用され、インドアナビゲーション、場所ベースのサービス、ロケーションマーケティングなどのアプリケーションに応用されている。

空間IDのドローン応用を考える場合、気象、電波環境、構造物をデジタルマッピングして、経路作成の自動化、他のドローンとの接触回避などに応用が期待されている。

ここでは地球全表面上で等倍のボクセル型の新しい空間IDを発行する技術とその応用方法について紹介する。



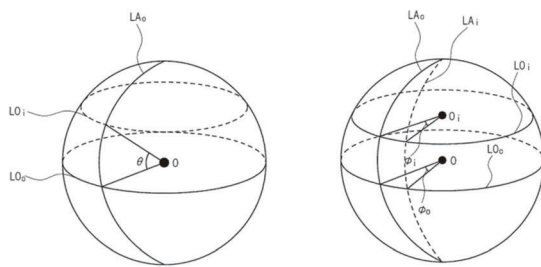
### 2. 空間ID発行方法

地球表面を正六面体(3D)もしくは正方形(2D)で分割(メッシュ化)し、各領域に識別子としてID(空間のアドレス)を付加する技術。地球は楕円体であるが、数学的な補正を行うことで平面、正立方体に分割して扱うことができるようになる。

当技術の主な特徴は下記の通り。

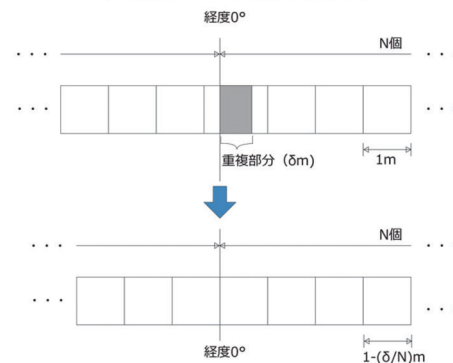
- 正六面体に分割して、ID(空間ID)を付与する。
- 正方形、正六面体の1辺の大きさは~500mで可変にできる。
- 1m正六面体で地球表面~約16,000m~約16,000mで分割した場合、約15垓個のアドレスが発行され地球表面のすべてをアドレスで管理することができる。

#### 空間ID発行処理の概要



1. 地球を楕円球体として考える
2. 各緯度と経度の単位長さを計算
3. 同緯度方向の周回の余りの長さを算出
4. 余りを各緯度の構成要素数で割り、分割数分ずらす
5. 同緯度周回上で切れ目のないグリッドを作成
6. すべての緯度で同一の処理を行う。
7. 作成した矩形を単位垂直方向で拡張し、ボクセルとする
8. 緯度経度高度の値をビット処理して空間IDとする

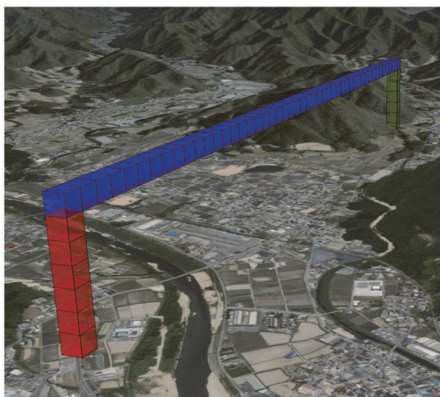
#### 地球を経線方向で等間隔でセルを作ったときに発生する重複部分の対する対応



※ $\delta/N[m]$ は位置推定の誤差よりも非常に小さくすることで無視できる。  
※特許取得済み(特許6817504)

### 3. ドローンへの応用

#### ドローン航行用のコリドー(飛行空域)記述例

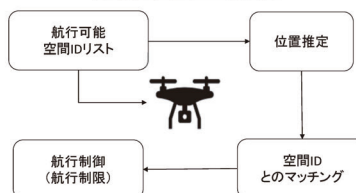


ドローンの航行を支援するために、空間IDを使用したドローン航行用のコリドー(飛行空域)の構築が可能で、このコリドーでは、ドローンの航行可能な空間IDをピックアップし、速度制限などの情報を付加ができる。さらに、自律飛行レベル4の場合、4G/5Gの電波使用可能領域を空間IDで記述することができ、安定飛行を保證できる範囲を可視化し、航路設計に応用することができる。

このようなドローン航行用のコリドー(飛行空域)では、ドローンの制御プログラムやUTM(Unmanned Traffic Management)に空間IDと紐づく属性を利用することで、安定飛行や航行制限、安全保証を実現することができる。空間IDには、航行可能な領域や航路の制約、速度制限などの情報を組み込むことができ、これにより、ドローンの飛行経路の設計や制御が容易になり、ドローンの安全かつ効率的な運航を確保する事ができる。

空間IDを活用したドローン航行用のコリドーは、航空交通管理や都市部でのドローンの利用拡大など、ドローンの安全な運航に向けた重要な基盤となる技術である。

#### 航行位置位置の制限例



### 4. 今後の展開

今回、MKS単位系準拠の空間ID発行技術を構築することができた。今後、2023年に試験公開予定の国土地理院の精密重力ジオイドを利用したジオイド高の結果を空間IDに紐付けて公開し、ドローン航行に応用できるように努める。その他、ドローン航行に応用できそうな空間IDを利用したデータを公開する予定である。





# 小型無人航空機（ドローン）の インシデントレポート様式作成の試み

飯田 涼太<sup>\*1, \*2</sup>, 海老根雅人<sup>\*1, \*2</sup>, 五十嵐 仁<sup>\*1, \*2</sup>,  
村上 龍<sup>\*1, \*3</sup>, 日下部雅之<sup>\*2</sup>, 黒木 尚長<sup>\*1, \*2</sup>  
千葉科学大学大学院危機管理学研究科<sup>\*1</sup>  
千葉科学大学危機管理学部<sup>\*2</sup>  
明治国際医療大学保健医療学部<sup>\*3</sup>

近年、比較的安価かつ技術力の進歩により、様々な分野で無人航空機が活用されている。ドローンの活用が進む一方で、無人航空機による事故件数も増加傾向にあり、国土交通省に報告された無人航空機による事故件数は、2020年度で71件であったが、2021年度では139件と倍増した。無人航空機による事故件数が増加している背景には、過去の事故事例から効果的な対応策が検討されていないことが一因として挙げられる。本研究は、医療業界で使用されているインシデントレポートの手法を用いて、リスクアセスメントを実施するために必要な、事故原因の分類とインシデントレベルの設定を行い、インシデントレポート様式の作成を試みた。

**Keywords:** 危機管理, リスクマネジメント, クライシスマネジメント, インシデントレポート, ドローン

## Formulation of Incident Report Format for Flight of Unmanned Aerial Vehicles

Ryota Iida<sup>\*1, \*2</sup>, Masato Ebine<sup>\*1, \*2</sup>, Hitoshi Igarashi<sup>\*1, \*2</sup>,  
Ryu Murakami<sup>\*1, \*3</sup>, Masayuki Kusakabe<sup>\*2</sup>, Hisanaga Kuroki<sup>\*1, \*2</sup>  
Graduate School of Risk and Crisis Management, Chiba Institute of Science<sup>\*1</sup>  
Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba Institute of Science<sup>\*2</sup>  
School of Health Science and Medical Care, Meiji University of Integrative Medicine<sup>\*3</sup>

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have been utilized in various fields due to their relatively low cost and technological advancement. While the use of drones is increasing. The number of accidents involving UAVs is also on the rise, with 71 accidents reported to the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) in the fiscal year 2020, doubling to 139 in FY2021. One of the reasons for the increase in the number of accidents involving UAVs is the lack of effective countermeasures based on past accident cases and their insightful studies. This study attempted to create an incident reporting format for drones by employing the methodology used in the healthcare industry for incident reporting. It involved the classification of accident causes and the setting of incident levels necessary for conducting risk assessments.

**Keywords:** Risk and crisis management, Incident report, Drone (UAV)



## 1. 背景

近年、無人航空機に関連する技術力の進歩により、無人航空機が比較的安価に入手可能となり、その汎用性の高さから、物流、撮影、設備点検、農薬散布、測量など様々な分野で利用されている。無人航空機の世界市場規模は2021年で約175億ドルと推測され、2027年度には280億ドルに達すると見込まれている[1]。無人航空機の市場規模が拡大すると同時に、目視外飛行等を行うために国土交通省に対して行われた許可承認申請件数は2019年で48,364件、2020年で60,068件、2021年で75,049件と増加しており[2]、様々な場面で無人航空機の活用が進んでいると考えられる。ドローンユーザーの増加に伴い、操縦者を養成する講習団体数も増加しており[3]、国土交通省ホームページに掲載されている講習団体数は、2022年12月現在で1,491団体[4]と、指定自動車教習所(1,246箇所)を上回っている[5]。

ユーザー数の増加や、利用範囲が拡大する一方で、無人航空機による事故件数も増加している。国土交通省に報告のあった無人航空機による事故件数は、2020年度は71件であったが、2021年度では139件と許可申請数と共に倍増した[6]。事象例の一例として、イベントで菓子撒きのために飛行していた無人航空機がバランスを崩し、参加者に接触し6名が救急搬送され3名が軽傷を負った事例や、測量検証実験でドローン飛行中に、機体が制御不能となり見失い、飛行場所に隣接するソーラーパネルを破損した事例などが注意喚起のため国土交通省ホームページに掲載されていた[6]。

本研究では、無人航空機の中でも広く一般に流通し、行政、民間問わずあらゆる場面での活用が期待されているドローン(本論文では4つ以上の回転翼をもつマルチコプターを指す)を対象に、医療事故の体系的な対策手法を参考にして、ドローンにおける事故対策について提言したいと思う。

多くの医療現場では、医療従事者が勤務中に遭遇したインシデントやアクシデントについて、レポート様式(以下IR: Incident Report)で報告する制度が運用されている[7, 8]。IRは医療機関により記載方法等に違いがあるが、発生場所、発生日時、事故種別、発生要因、事故概要、インシデントレベル、改善策、その他の危険事象の分析に活用し得る情報を記載し、これらの報告事項を基に、事故防止策の制定や、リスクの周知などのリスクアセスメントが実施されている。

一方、無人航空機による事故については、2022年12月の航空法改正に伴い、事故、重大インシデントについて報告が義務付けられた。しかし、国土交通省が示している事故および重大インシデントに関する報告要領によると[9]、人の死傷(重症)または物件の破損、航空機との衝突または接触が事故として定義され、飛行中の航空機との衝突又は接触の恐れがあった場合、無人航空機により人が負傷(死傷、重症以外)した場合、制御が不能となった場合、発火した場合を重大インシデントと定義している。国土交通省は、事故および重大インシデントについて報告を求めているが、誤って物件や人に接近した事例や、操縦ミスにより墜落(ドローンのみの破損)した事例について報告義務はない。航空法が改正された2022年12月以前は、事故および重大インシデント以外の事故についても任意で報告が求められており、報告された事例は国土交通省のホームページ上に報告一覧として記載されていたが、現在は記載されていない。

危機管理の観点から考えると、過失により物件や人に接近した事例や、操縦ミスによる墜落など、重大インシデントおよび事故以外のインシデントや、ヒヤリ・ハット事象を収集し、それらの情報から事故防止のための手立てを考案する必要がある[10]。

本研究では、報告されたドローンによる事故の科学的な調査と、効率的な対策を立案するため、国内で発生したドローン事故報告を対象とし、事故内容の分類及びインシデントレベルの設定を行い、IRの様式を作成した。

## 2. 目的

本研究では、医療業界で使用されているIRの手法を用いて、ドローンによる事故原因の分類と、インシ

メントレベルの設定を行い、インシデント報告とリスクアセスメントを効率的に実施するために必要な IR を開発する。

### 3. 方 法

#### 3-1 調査対象と調査期間

ドローン情報基盤システム（以下 DIPS : Drone Information Platform System）に掲載されている[11]，無人航空機に関する事故等の一覧をデータベース化し，ドローンによる事故のみを抽出し，調査対象とした。本研究では，DIPSに掲載された情報から，事故発生日，事故に至った経緯，事案の概要の項目に記載された情報を使用し，調査を実施した。調査期間は2016年1月1日から2020年12月31日までとし，調査期間中に発生した事故事例267件を対象とした。

#### 3-2 事故原因の分類

リスクの包括的な一覧を作成することは，事故原因の特定と，類似の危険事象が発生するリスクを減少させるための一つの方法として用いられている[12]。インシデントおよびアクシデントの科学的な調査と，効率的な対策の立案には，事実の正確な把握が重要であるが，国土交通省から入手したデータは自由記載の部分が多いため，事故に至った経緯や被害状況等が正確ではなく，曖昧な記載が散見される。IRの先行研究においても，事実の誤認や情報の不足によって，原因を見誤り，対策の有効性が大きく低下する可能性があることが報告されている[13]。これらの問題を解決するため，ドローンによる事故について分類を行い，運用時のリスクを明らかにしたうえで，事故報告書に選択式として組み込むことが有用と考えた。よって，入手したドローン事故報告書を調査実施者2名で，KJ法[14]の手法を参考に，事例ごとにグループ分けを行い，「飛行目的」と「事故原因」についての分類を行った。

#### 3-3 インシデントレベルの作成

多くの医療現場で使用されている IR には，インシデントレベルが定められており[15]，事故レベルに応じた対応策が検討されている。本研究では，多くの医療現場で使用されているインシデントの影響分類を参考に[16]，インシデントレベルを作成した。また，作製したインシデントレベルを用いて，インシデントレベルごとの事故件数について検討を行った。

#### 3-4 インシデントレポートの作成

次に上記の事故分類とインシデントレベルを用いて，IRの様式作成を行った。入力する基本情報は，①発生日時，②飛行目的，③インシデントレベル，④事故原因，⑤事故概要である。

### 4. 結 果

#### 4-1 事故原因の分類

ドローンの飛行目的について分類を実施した結果，「撮影」，「訓練」，「機体点検」，「農業」，「設備点検・メンテナンス」，「測量」，「自然観測」，「建築」，「事故・災害対応」，「研究」，「報道取材」，「物件投下」，「不明」の14カテゴリに分類することができた。飛行目的ごとの事故は，空撮が132件（49.4%）と多く，次いで，訓練31件（11.6%），機体点検20件（7.4%）となった（図1）。

次に，事故原因は，「機械的」，「人為的」，「外因的」，「不明」の4カテゴリに分類し，細分化すると，機械的事故は「操縦制御不能」，「電波通信障害」，「バッテリー」，「自動飛行」に，人為的事故は「操縦ミス」，「見失い」，「自動飛行」，「補助者との連携ミス」に，外因的事故は「風」，「見失い」，「鳥」に分類することができた。事故原因の概要例と事故件数を表1に示す。大分類の事故件数では，機械的な事故が150件（56.1%），人為的な事故が71件（27.6%），外因的な事故が40件（14.9%）の順であった（表1）。

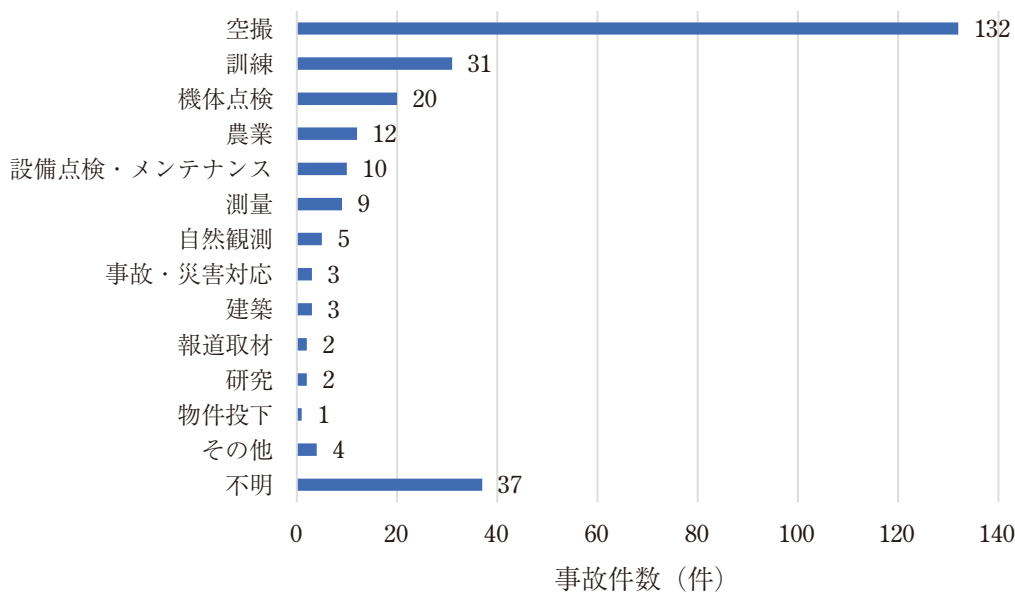


図1 飛行目的別のドローン事故件数

表1 事故原因の分類

カテゴリ	サブカテゴリ	事故概要例	件数	合計
機械的	操縦制御不能	空撮のため無人航空機飛行中、操縦不能となり車庫の屋根に墜落し屋根を損傷	83	150
	電波通信障害	空撮のため無人航空機飛行中、通信が途絶え山中に墜落	49	
	バッテリー	空撮のため無人航空機飛行中、バッテリー切れとなり海上に墜落	14	
	自動飛行	空撮のため無人航空機が、自動操縦中で飛行中に離陸地点から400m先に墜落	4	
人為的	操縦ミス	空撮のため無人航空機飛行中、操作を誤り機体を見失い紛失	49	71
	見失い	趣味のため無人航空機飛行中、機体の位置が把握できなくなり墜落	11	
	自動飛行	測量のため無人航空機を飛行中、自動操縦の設定を誤り、鉄線に接触し墜落	5	
	補助者との連携ミス	農薬散布のため無人航空機飛行中、補助者との連携がうまく取れず、倉庫に接触墜落	6	
外因的	風	無人航空機を飛行させていたところ、強風により制御不能となり紛失	36	40
	見失い	練習飛行のため、自宅庭で飛行中、急な雨と風の影響で機体を見失い、約200m離れた民家の倉庫の屋根に墜落	2	
	鳥	橋梁の現況調査のため無人航空機飛行中、鳥に接触し河川に墜落し、機体を紛失	2	
不明	不明	空撮のため無人航空機飛行中、飛行経路から逸脱し鉄塔に接触後墜落	6	6

#### 4-2 インシデントレベルの作成

ドローン事故における、インシデント・アクシデントの定義は、「国立大学附属病院医療安全協議会」が定めた医療における「インシデントの影響度分類」(表2)を参考とし[16]、ドローン用のインシデントレベルを作成した。作成したインシデントレベルと、レベルごとの事故件数を表3に示す。

次に、飛行目的と事故分類ごとのインシデントレベルについて、検討を行った(表4)。飛行目的とインシデントレベルを整理したところ、レベル(5a, 5b, 5ab)を最も多く占めたのは農業であった。農業による事故報告は12件であったが、そのうち7件(58.3%)が人または物件に対して損害(レベル5a, 5b, 5ab)を与えた事故であった。

事故分類とインシデントレベルは、大分類では、機械的な要因が150件(56.1%)、人為的な要因が71件(27.6%)、外因的な要因が40件(14.9%)であり、その内レベル(5a, 5b, 5ab)のみに限ると、事故件数は

表2 国立大学附属病院医療安全協議会が定める医療におけるインシデントの影響度分類

事故の種類	レベル	説明
インシデント	0	エラーや医薬品・医療用具の不具合が見られたが、患者には実施されなかった
	1	患者への実害はなかった（何らかの影響を与えた可能性は否定できない）
	2	処置や治療は行わなかった（患者観察の強化、バイタルサインの軽度変化、安全確認のための検査などの必要性は生じた）
アクシデント	3	3a 簡単な処置や治療を要した（消毒、湿布、皮膚の縫合、鎮痛剤の投与など）
		3b 濃厚な処置や治療を要した（バイタルサインの高度変化、人工呼吸器の装着、手術、入院日数の延長、外来患者の入院、骨折など）
	4	4a 永続的な障害や後遺症が残ったが、有意な機能障害や美容上の問題は伴わない
		4b 永続的な障害や後遺症が残り、有意な機能障害や美容上の問題を伴う
	5	死亡（原疾患の自然経過によるものを除く）
その他		

国立大学附属病院医療安全協議会、インシデントの影響度分類より引用し一部改変

表3 ドローン事故によるインシデントの影響度と事故件数

事故の種類	レベル	影響度分類	事故件数
インシデント	0	間違ったことが予防できた	0
	1	軽微な操縦ミス（誤操作、着陸時にドローンが転倒、着陸予定地以外に着陸した）	4
	2	誤って物件または人に接近した	2
	3	物件または人に接触するも墜落せず損害がなかった	5
アクシデント	4	ドローンが墜落した	234
	5	5a 人が怪我を負った	7
		5b 物が破損するなどの損害を与えた（ドローンの破損は含まない）	14
		5ab 人が怪我負い、物を破損するなどの損害を与えた（5a, 5bの複合）	1
	6	人が死亡した	0
その他			0

表4 ドローン事故によるインシデントレベルの影響度分類と飛行目的の事故件数

飛行目的	インシデントレベル									合計
	0	1	2	3	4	5a	5b	5ab	6	
空撮	0	3	1	2	120	1	0	5	0	132
訓練	0	1	0	0	29	0	0	1	0	31
機体点検	0	0	1	1	16	1	0	1	0	20
農業	0	0	0	0	5	2	4	1	0	12
設備点検・メンテナンス	0	0	0	0	9	1	0	0	0	10
測量	0	0	0	1	7	0	0	1	0	9
自然観測	0	0	0	0	4	0	0	1	0	5
建築	0	0	0	0	2	1	0	0	0	3
事故・災害対応	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
研究	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
報道取材	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
物件投下	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
不明	0	0	0	0	36	0	0	1	0	37
合計	0	4	2	4	235	7	1	14	0	267

21 件であり、機械的な要因が 10 件 (47.6%)、人為的な要因が 7 件 (33.3%)、外因的な要因が 4 件 (19%) となった (表 5)。

表 5 ドローン事故によるインシデントレベルの影響度分類と事故原因の事故件数

カテゴリ	サブカテゴリ	インシデントレベル								合計	
		0	1	2	3	4	5a	5b	5ab		6
機械的	操縦不能・制御不能	0	2	2	0	72	2	5	0	0	83
	電波障害・通信障害	0	0	0	0	46	1	2	0	0	49
	バッテリー	0	0	0	0	14	0	0	0	0	14
	自動飛行	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4
人為的	操縦ミス	0	0	0	2	41	1	5	0	0	49
	見失い	0	0	0	0	11	0	0	0	0	11
	自動飛行	0	0	0	0	5	0	1	0	0	6
	補助者との連携ミス	0	0	0	1	4	0	0	0	0	5
外因	風	0	0	0	1	32	2	0	1	0	35
	鳥	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
	見失い	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2
	不明	0	1	0	0	4	1	0	0	0	6
	合計	0	4	2	4	235	7	14	1	0	267

#### 4-3 インシデントレポートの作成

前項で作成した事故原因の分類と、インシデントレベルを用いて、ドローン用のインシデントレポートを作成した (図 2)。記載内容は、①発生日時、②飛行目的、③インシデントレベル、④事故原因、⑤事故概要とし、飛行目的とインシデントレベルについては本研究の結果を基に選択式とした。また、事故概要は 5W1H (いつ、どこで、誰が、何を、なぜ、どのようになったか) を記載することが、インシデントの再発防止に有効と報告されていることから [7]、注意書きを記載した上で自由記載とした。

## 5. 考 察

### 5-1 事故原因の分類

事故原因の分類を行った結果、飛行目的を 14 カテゴリに分類できた。この結果から、現在ドローンを利用する目的を概ね把握できたと考えられる。しかし、飛行目的が具体的に記載されていない記述も見られたため、「不明」という項目を作成した。これは事故報告書の自由記載が多いこと、報告のポイントを理解しておらず、説明が不十分になったため発生した事例だと考えられる。次いで事故件数が多い、訓練、機体点検については、ドローンの操縦技量が乏しい操縦者が操縦を行うこと、故障等のリスクがある機体を飛ばしているために事故事例が多く報告されたと考えられる。このような飛行を実施する場合には、ドローンをロープ等で係留して飛行するなどの処置を講じることにより、ドローンが予期しない挙動を生じたとしても、最小限の被害で事故を留めることが可能であると考えられる。

事故原因の分類では、4 カテゴリ、10 サブカテゴリに分類することができた。267 件の事故について分類を行った結果、97.8%の事故原因を機械的、人為的、外因的に分類することができ、これをインシデントレポートに組み込むことにより、より簡単かつわかりやすい分類が可能となった。

しかし、医療現場では体系的な IR の記載方法について積極的に教育が実施されていないため、研修医のみならずその指導医でさえも質の高い IR の書き方を知らないケースが多いと報告されている [7]。そのため、ドローンの事故報告書についても同様に、正しい記載方法が教育されていないことが、曖昧な事故報告書の提出につながる一因であると考えられる。

## ドローン インシデントレポート

### *Drone Incident Report*

報告日	年 月 日 ( )	発生日時	年 月 日 ( ) 時 分頃
インシデントレベル	<input type="checkbox"/> 0 誤ったことが予防できた <input type="checkbox"/> 1 軽微な操縦ミス（誤操作、着陸時にドローンが転倒、着陸予定地以外に着陸した） <input type="checkbox"/> 2 誤って物件又は人に接近した <input type="checkbox"/> 3 物件又は人に接触するも墜落せず損害がなかった <input type="checkbox"/> 4 ドローンが墜落した <input type="checkbox"/> 5 a 人が怪我を負った <input type="checkbox"/> 5 b 物が破損するなどの損害を与えた（ドローンの破損は含まない） <input type="checkbox"/> 5 ab 人が怪我負い、物を破損するなどの損害を与えた（5a,5bの複合） <input type="checkbox"/> 6 人が死亡した		
飛行目的	<input type="checkbox"/> 撮影 <input type="checkbox"/> 訓練 <input type="checkbox"/> 機体点検 <input type="checkbox"/> 農業 <input type="checkbox"/> 設備点検・メンテナンス <input type="checkbox"/> 測量 <input type="checkbox"/> 自然観測 <input type="checkbox"/> 建築 <input type="checkbox"/> 事故・災害対応 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 報道取材 <input type="checkbox"/> 物件投下		
事故原因	【大分類】	<input type="checkbox"/> 機械的 <input type="checkbox"/> 人為的 <input type="checkbox"/> 外因的 <input type="checkbox"/> その他 ( )	
	【小分類】	<input type="checkbox"/> 操縦制御不能 <input type="checkbox"/> 電波通信障害 <input type="checkbox"/> バッテリー <input type="checkbox"/> 自動飛行 <input type="checkbox"/> 操縦ミス <input type="checkbox"/> 見失い <input type="checkbox"/> 補助者との連携ミス <input type="checkbox"/> 風 <input type="checkbox"/> 鳥 <input type="checkbox"/> その他 ( )	
事故概要	☆具体的に5W1H（いつ、どこで、だれが、なにを、なぜ、どのようにになったか）を用い、客観的に明確に記載すること。		

図2 ドローンインシデントレポート

## 5-2 インシデントレベルの作成

本研究では、医療機関で広く使用されている患者へのインシデントの影響度分類を参考に、ドローンのインシデントレベルを作成した結果、0から6のレベルに分類することができた。ドローンの事故についてインシデントレベルを定めることは、事故防止のための対策を立案する上で、事故レベル判断するために有用であると考えられる。労働災害の研究から導き出されたハインリッヒの法則によると、「1件の重大事故（アクシデント）の背景には、29件の軽傷事故（インシデント）が起きており、軽傷事故の背景には、さらに300件の障害のない事故（ヒヤリハット）が発生している」と報告されている[10, 17]。そのため、インシデントレベルの設定を行うことにより、ドローンによる事故を容易に分類することが可能となり、系統立てて、対策立案が可能になったと考えられる。

インシデントレベルの分類を行った結果、0から6のインシデントレベルに分類することができ、4が最も多い結果となった。ドローンを運用する際は、原則、第三者の上空では、飛行させないことが周知徹底されているため、ドローン墜落というアクシデントが起きても、人や物件に被害が及びにくいいため、ドローンの墜落が多くなったと考えられる。

飛行目的とインシデントレベルを検討した結果、農業では12件のうち、7件が人または物件、またはその両者に対して損害を与えた。農業での事故が多い要因として、作業環境が関係していると考えられる。農業の内訳は、11件が農薬散布によるものであり、農薬散布が行われる田畑は、民家または作業施設が近隣に存在していたり、大型のドローンを運用するために、必要な人員が飛行エリア近辺に多く配置されるなどの要因が、重大事故につながる環境であったと考えられる。また、航空法において、農薬散布は物件投下として取り扱われており、国土交通省が講習団体に求めているカリキュラムによると、物件投下の訓練数は5回以上の物件投下の訓練を必要としているが、投下する物については指定していない[18]。そのため、単に固形物を投下する場合と、農薬を散布しながら飛行するのでは、操縦技法が全く異なるため、現状では満足に訓練が実施できていないと考えられる。

## 5-3 インシデントレポートの作成

本研究で得られた結果を踏まえて、ドローン用のIRを作成し、飛行目的、事故原因、インシデントレベルを択一選択と自由記述の記述式にすることができた。医療現場では、IRを積極的に作成利用しており、インシデントレポートの収集および分析から、インシデントの実態を把握し、医療安全の向上につながっていると考えられている[19]。今回作成したIRも同様にドローンを安全に運用するために有用であると考えられる。また、飛行目的や事故原因、インシデントレベルを選択式にすることにより、事故データを系統立てて解析しやすくなり、事故防止のための対策を立案しやすくなると考えられる。

今回開発したIRでは、事故概要に自由記載を取り入れたが、一般的に日本語では主語が省略され、主語一述語の関係が不明瞭になる傾向にあり、曖昧さや読みづらさの原因になることが指摘されている[19]。したがって、5W1Hを厳格に適用することで、曖昧さや読みづらさが改善すると考えられる。また、近年アンケート調査やマーケティング等で用いられているテキストマイニングの手法を用いることにより、得られた自由記載を客観的に分析し、隠れたリスクの発見につながるものと考えられる。

## 6. 結 論

本研究ではドローンにおける事故原因の分類と、医療業界で使用しているリスクアセスメントの手法を参考にし、インシデントレベルの設定を行い、その結果を基に、有効的な対策を立案するためのIRの作成を行った。従来から使用されている事故報告書は、そのほとんどが自由記載となっているため内容が不明瞭であり、事故の経緯や原因の特定を行うことができず、有効な対策を講じることができていない。また、国土交通省が示している、事故および重大インシデントのみの事故事例の収集では、軽傷事故とヒヤリハットの

収集ができず、対策方法を確立できないため、ドローンによる事故件数は減少せず、ユーザー数の増加と共に、事故件数は増加の一途をたどると考えられる。そのため、本研究で作成したIRを、スクールやJUIDA等のドローンに関わる団体で収集、解析することで、具体的な対策立案が可能となると考える。

しかし、IRを使用している医療現場では、医療者自身が、正しいIRの記載方法を理解していないことが指摘されており[7]、ドローンについても同様で、国土交通省が示すカリキュラムに事故報告書の記載方法を教えることは求めている[18]。そのため、ドローンの教育課程に「危機管理」の講習項目を導入し、危機管理の基礎、過去の事故事例から事故防止策の作成方法、事故報告書の記載方法などについての解説や演習を行う科目を導入することにより、事故報告書やIRなどの有用性および、記載方法の理解が深まり、将来的には、事故事例の収集が増加し、より良い事故対策立案につながるものと考えられる。

海外ではドローンによる事故について、分析や分析方法についての教育、対策方法について提案を行う企業が生まれるなど[20, 21]、ドローンによる事故対策について議論が進み、国際的な標準化が進みつつある。日本国内ではドローンによる事故対策及び事故対策教育について議論が進んでいないため、本研究を皮切りに議論が進むことが望まれる。

ドローンの事故報告については、事故内容の分類とインシデントレベルを用いたIRを利用することにより、体系的に事故内容を明らかにすることができる。その結果、今まで明らかになっていなかった、ドローン操縦時におけるリスクを表面化させることができ、今まではリスクとして捉えられていなかった事象に対して、リスクアセスメントを実施することが可能となり、有効な対策をより立てやすくなったと考える。

投稿受付：2023年9月19日

採録決定：2023年11月10日

## 文 献

- [1] 株式会社矢野経済研究所：ドローン（UAV/UAS）の世界市場に関する調査を実施（2021年）。[https://www.yano.co.jp/press-release/show/press\\_id/2903](https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2903)（2022年12月1日アクセス）。
- [2] 国土交通省：無人航空機飛行に係る許可承認申請件数の推移。[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html)（2022年7月18日アクセス）。
- [3] 源 悠里：“ドローンスクールの現状と操縦ライセンス制度の展望”，計測と制御，Vol. 59, No. 7, pp. 487-491, 2020.
- [4] 国土交通省：航空局ホームページに掲載されている無人航空機の操縦者に対する講習等を実施する団体。<https://www.mlit.go.jp/common/001220070.pdf>（2022年12月1日アクセス）。
- [5] 一般社団法人全日本指定自動車教習所協会連合会：“事業報告”，2022.
- [6] 国土交通省：過去の事故情報等の一覧。[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_ua\\_houkoku.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_ua_houkoku.html)（2022年7月19日アクセス）。
- [7] 前田佳孝，鈴木義彦，浅田義和，山本真一，川平 洋，新保昌久：“医療インシデントレポートの自由記述における事象の表現傾向に関する分析”，人間工学，Vol. 57, Supplement, pp. 2F1-5, 2021.
- [8] 川村治子：ヒヤリ・ハット11,000事例によるエラーマップ完全本，医学書院，2003.
- [9] 国土交通省航空局安全部長：無人航空機の事故及び重大インシデントの報告要領。<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001520661.pdf>（2023年6月6日アクセス）。
- [10] 阿部好文：医療安全キーワード50，診断と治療社，2005.
- [11] 国土交通省：Drone Information Platform System。<https://www.dips.mlit.go.jp/portal/>（2022年7月25日アクセス）。
- [12] ISO 31000：2018（JIS Q 31000：2019）リスクマネジメント解説と適用ガイド，日本規格協会，2019.
- [13] 横山裕一：“英語圏における労働災害理論の変遷に基づくインシデントレポートの評価とグローバル化時代のインシデントレポートの提言：機能的インシデントレポート作成のすすめ”，慶應保健研究，Vol. 34, No. 1, pp. 75-86, 2016.
- [14] 山浦晴男：質的統合法入門：考え方と手順，医学書院，2012.
- [15] 河畑力生，小林弘幸，曾田秀子，田城孝雄，丸井英二：“インシデントレポートの電子化による効果の検討”，順天堂医学，Vol. 57, No. 1, pp. 31-37, 2011.



- [16] 医療安全管理協議会, 国立大学付属病院: インシデントの影響度分類. <http://square.umin.ac.jp/anzenhc/information/index.html> (2022年7月18日アクセス).
- [17] 救急救命士標準テキスト編集委員会: 救急救命士標準テキスト, へるす出版, 2020.
- [18] 国土交通省: 航空局ホームページに掲載する無人航空機の操縦者に対する技能認証等を実施する団体等の確認手続について. [https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html) (2022年7月19日アクセス).
- [19] 有光 隆, 八木秀次, 呉 志強, 李 在勲: “読みやすいテキストと日本語の文章構造に関する一考察”, 工学教育, Vol. 62, No. 2, pp. 2\_51-52\_56, 2014.
- [20] DroneSec: DroneSec. <https://dronesec.com/> (2023年9月26日アクセス).
- [21] SkySafe: Drone Forensics. <https://www.skysafe.io/drone-forensics> (2023年9月26日アクセス).



#### 飯田 涼太

千葉科学大学危機管理学部保健医療学科助教。2015年救急救命士取得。2017年千葉科学大学大学院修士（危機管理学）取得。2019年より千葉科学大学にてドローンについての研究，教育を実施して

いる。

E-mail: riida@cis.ac.jp



#### 海老根雅人

千葉科学大学危機管理学部保健医療学科講師，2008年臨床工学技士取得。取得。2019年より千葉科学大学にてドローンについての教育研究を実施している。

E-mail: mebine@cis.ac.jp



#### 五十嵐 仁

千葉科学大学危機管理学部危機管理学講師。2018年カナダブリティッシュコロンビア司法大学にてICS (incident command system) を含む緊急事態管理監取得。2023年千葉科学大学大学院博士（危機管理学）取得。アジア，アフリカで緊急事態対応の

仕組みづくりを行い現職。

E-mail: higarasi@cis.ac.jp



#### 村上 龍

明治国際医療大学保健医療学部救急救命学科助教。2019年救急救命士取得。2021年千葉科学大学大学院修士（危機管理学）取得。

E-mail: r\_murakami@meiji-u.ac.jp



#### 日下部雅之

千葉科学大学危機管理学部保健医療学科講師。2001年救急救命士取得。2018年千葉科学大学大学院修士（危機管理学）取得。消防職を経て現職。

E-mail: hkusakabe@cis.ac.jp



#### 黒木 尚長

千葉科学大学危機管理学部教授，大学院危機管理学研究科教授。1985年医師免許取得。大阪大学医学部法医学教室に19年在籍し准教授を経て現職。大阪府監察医。大阪大学招へい教授。入浴熱中

症の第一人者。

E-mail: hkuroki@cis.ac.jp

## 一般社団法人 日本 UAS 産業振興協議会（JUIDA）

JUIDA は、日本の無人航空機システム（UAS）の、民生分野における積極的な利活用を推進し、UAS 関係の新たな産業・市場の創造を行うとともに、UAS の健全な発展に寄与することを目的とした中立、非営利法人として、2014 年 7 月に設立されました。

国内外の研究機関、団体、関係企業と広く連携を図り、UAS に関する最新情報を提供するとともに、さまざまな民生分野に最適な UAS を開発できるような支援を行っています。同時に、UAS が安全で、社会的に許容されうる利用を実現するために、操縦技術、機体技術、管理体制、運用ルール等の研究を行うとともに政策提言を行っています。

### Technical Journal of Advanced Mobility

#### 次世代移動体技術誌

##### 第 4 号

発行日 : 2023 年 3 月 14 日

編集・発行 : 一般社団法人日本 UAS 産業振興協議会  
東京都文京区本郷 5-33-10  
いちご本郷ビル 4F

URL : <https://uas-japan.org/>

email : [journal@uas-japan.org](mailto:journal@uas-japan.org)

当会および投稿者からの許可なく掲載内容の一部およびすべてを複製・転載・配布することを固く禁じます。

ISSN 2435-5453