

人命救助におけるドローンの活用効果検証と リスク管理手法の確立

千葉科学大学大学院 危機管理学研究科 危機管理学専攻
博士課程 飯田 涼太

論文要旨

近年、小型無人機（以下：ドローン）は、技術力の進歩と比較的安価になったことにより、物流、環境調査、設備点検、農薬散布、撮影など様々な分野で使用され、ドローンの市場規模は、2021年で約175億ドルであったが、2027年には、1.5倍の約280億ドルまで成長すると見込まれている。ドローン市場の成長に伴い、無人航空機飛行に係る許可・承認申請件数は2022年に91,073件、2023年に81,428件、2024年に93,879件と増加傾向にあり、ドローンの活用が日本国内でも進んでいることは明白である。

一方で、ドローンの普及と共に事故件数も増加しており、2023年度には、事故および重大インシデントとして認定された件数は86件（事故65件、重大インシデント21件）であった。これ以外にも、事故・重大インシデントとして認定されなかった事例が361件報告されており、ドローンに関する事故やその可能性のある事例が増加していることが示唆される。

ドローンの先行研究として、プログラミング教育、ARを用いて死角を可視化する研究、三次元測定についての研究、水稻の除草剤による生育抑制評価法についての研究などが活発に行われている。

このように、ドローンの市場規模の増加や活用が進む一方で、ドローンの活用効果について定量的に評価した文献は少数である。また事故件数が増加傾向にあり議論が不十分であると考えられるため、ドローンの事故を防止するための危機管理モデルの作成が必要であると考えられる。そこで、本研究ではドローンを安全に運用するために必要な、無人航空機危機管理モデル（UAV-RCMモデル）の作成と社会実装の評価を実施することを本研究の目的とした。本論文では、この目的を達成するため、下記の研究を実施した。

- 研究1 海水浴場におけるドローンの有用性についての検証
- 研究2 医療用のIRを参考としたドローン用のIRの作成
- 研究3 ドローン専用の事故分析モデルであるS-SHOELRモデルの作成
- 研究4 UAV-RCMモデルの作成とトライアスロン大会における社会実装実験

下記に各研究について紹介を行う。

研究1では、「海水浴場にて発生する水難事故のリスクに対するドローンを用いた監視活動」をテーマに、研究を実施した。現在、日本には198か所の海水浴場があり、各地でライフセーバーが監視活動を行っている。海水浴場全体を人間の目視のみで監視するには限界があり、ライフセーバーが反射や波により遊泳客を見逃すと報告されている。そこで本研究では、海水浴場で発生し得る溺水者の発見までに要した時間を、目視による監視と、ドローンによる上空からの監視の両群で比較し、ドローンによる監視の有用性を明らかにすることを目的とした。

実験は、海水浴場に模した遊泳エリア（100m×50m）において、ドローンによる監視群と目視による監視群の2群で、溺水者に模した遊泳客（伏し浮き（図1））の発見までの時間を測定し、分析を行った。

海水浴場を前方および後方に分けて分析を行った結果、前方（2、4、7、9回目）では統計学的有意差は認められなかった（*n.s.*）。後方では目視群の発見時間が平均139.8秒であったのに対し、ドローン群では平均60.8秒であり、ドローン監視が有意に速い結果となった（ $p<0.05$ ）。

研究1の結果から、海水浴場後方ではドローンによる監視が有意に早い結果となった。これは、溺水者特有の「伏し浮き」は体のほとんどが水中に隠れるため、上空からの俯瞰画像による監視が発見しやすいと考えられる。最終的に、海水浴場では、ドローンによる監視にすべて置き換えるのではなく、目視による監視とドローンによる監視の二つを併用することが有用であると結論づけた。

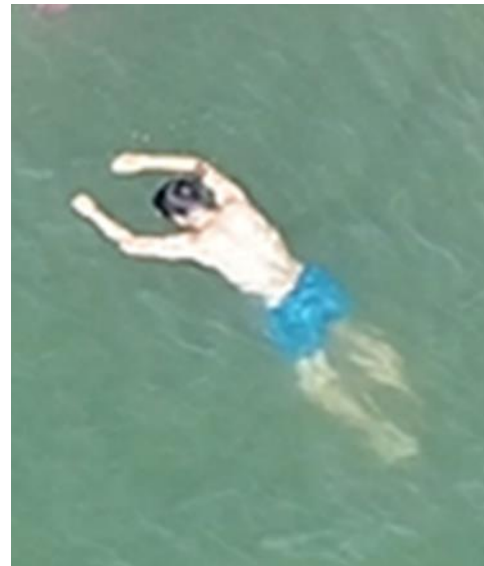


図1 伏し浮きの溺水者

研究2では、「小型無人航空機（ドローン）のインシデントレポート作成の試み」をテーマに、リスクマネジメントの視点から研究を実施した。本章では、リスクアセスメントを実施する一環として、医療のインシデントレポート（以下：IR）を参考に、ドローン用IRの作成を行った。医療用のIRは、事故には至らなかったものの将来的に事故につながる可能性のある「ヒヤリハット事例」や、過ちがあったが実害がなかった「インシデント」を記録し、再発防止に役立てるための報告書である。医療用IRには、インシデントレベル（表1）や事故原因などが選択式として整備されており、系統的な分析が可能な仕様となっている。

一方、ドローンでは事故および重大インシデントの発生時に報告を行うことが法令により定められているが、現行の報告様式は系統的な分類が可能な形式とはなっておらず、事

故原因の分析というよりも、事故による損害等の報告に重きを置いた内容となっている。

表1 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

国土交通省が示す「事故および重大インシデントに関する報告要領」によれば、事故とは人の死傷（重傷）または物件の破損、航空機との衝突または接触が発生した事案を指す。重大インシデントとは、飛行中に航空機との衝突・接触の恐れがあった場合、人が軽傷を負った場合、制御不能となった場合、発火した場合などを指す。国土交通省では、これらの事故および重大インシデントの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る墜落などの軽微なインシデントについては十分な情報収集が行われておらず、事故防止に資するデータの蓄積が不十分であると考えられる。

そこで研究2では、ドローンの系統的な事故分析を行うために、事故・重大インシデントに加え、ヒヤリハットを含めて収集できるドローン専用のIRを作成することを目的とした。

本研究では、ドローン情報基盤システム（DIPS）に掲載された無人航空機事故等一覧をデータベース化し、ドローン事故のみを抽出して分析対象とした。DIPSの「事故発生日」「事故に至った経緯」「事案の概要」に記載された情報を用い、調査期間は2016年1月1日～2020年12月31日とし、該当する事故事例267件を対象とした。

事故報告データは自由記載が多く、記述のばらつきや情報不足があるため解釈に注意を要した。そこで、事故報告に選択式項目を組み込むことを念頭に、調査者2名がKJ法を参考に事故事例のグループ分けを行い、「飛行目的」と「事故原因」を分類した。さらに、医療現場で用いられるインシデントレベル分類を参考に、ドローンに適合するよう定義を調整したドローン用インシデントレベルを作成した。最後に、作成した事故分類とイ

インシデントレベルを用いて、発生日時、飛行目的、インシデントレベル、事故原因、事故概要を基本項目とするドローン用インシデントレポート（IR）様式を作成した。

結果は、飛行目的については14つのカテゴリに分類できた（図2）。事故原因は4つのカテゴリおよび9つのサブカテゴリに分類できた（表2）。また、ドローン用インシデントレベルは9段階として設定できた（表3）。これらの分類結果を基に作成したドローン用IR（別添1）は、国の事故報告書と比較して事故分析に不要な項目を整理し、選択式を取り入れたことで、系統立てたデータ収集を可能にしたと考えられる。

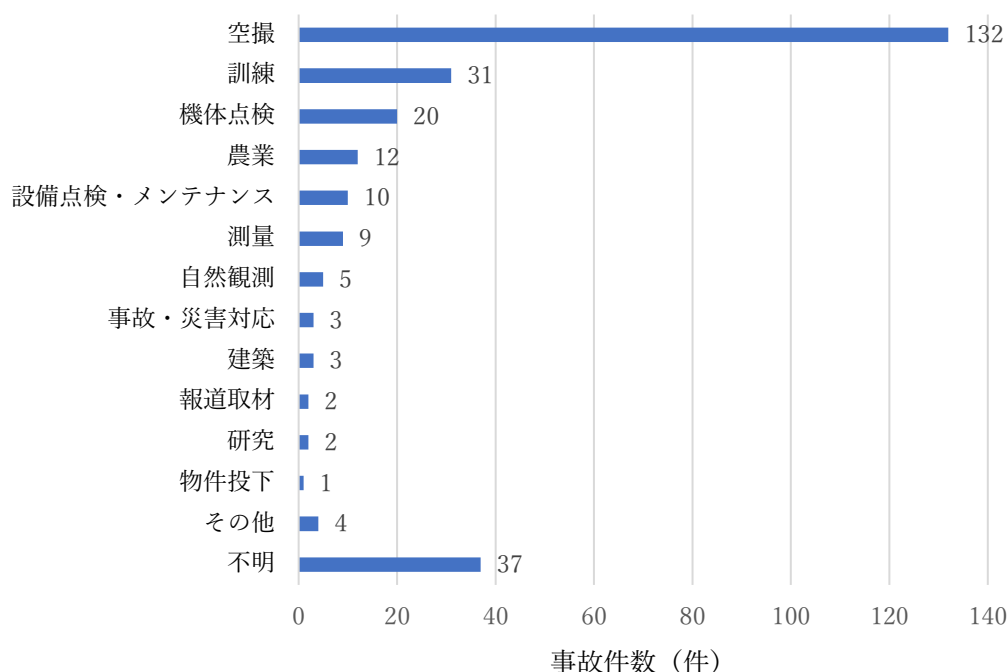


図2 飛行目的別のドローン事故

表2 事故原因の分類と事故件数

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	農業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

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（ヒヤリハット）	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	誤って物件又は人に接近した	2
	3	物件又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 人が怪我を負い、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

研究3では、「SHELモデルを骨格としたS-SHOELRモデルの作成」をテーマに、ヒューマンエラーの視点から研究を実施した。本研究では、加藤らの定義を引用し、ヒューマンエラーとは、「個人の不注意やミス」といった単純な結果ではなく、組織や環境要因などが相互作用する中で顕在化する現象」と定義した。従来、ヒューマンエラーの解析にはEdwardsのSHELモデルなど、各産業分野に適合させた解析モデルが用いられてきた。これらすべてのSHELモデルの基礎となっているのがEdwardsのSHELモデルである。EdwardsのSHELモデルとは、1972年にEdwardsによって提唱されたヒューマンファクター分析の基礎モデルであり、人間（Liveware）を中心に、Software（ソフトウェア：手順・規程・マニュアルなど）、Hardware（ハードウェア：機器・装置など）、Environment（環境：物理的・組織的環境）、Liveware（他の人間：組織やチーム）との相互作用を分析することで、エラーの発生要因を明らかにするものである。

本章では、研究2で収集したインシデントレポートをもとに対策方法を立案する手法として、EdwardsのSHELモデルを改良したS-SHOELRモデルを作成した。まずEdwardsのSHELモデルを用いて国土交通省報告の事故事例を解析し、ドローン事故の現状と特徴を明らかにした上で、ドローン特有の要因を抽出した。

H.F. HawkinsのSHELモデルで事故事例を解析した結果、ドローン特有の事故として「安全管理不備」に該当するものが30件（図3）と最も多く、安全管理は飛行前に実施されるべき最優先事項であることから、既存のm-SHELLモデルを参考に「m（マネジメント）」を「S（Safety）」へと改変し、モデルの最初に組み込んだ。また、2つのL（当事者／当事者以外）のうち、当事者をOperator（操縦者）に変更し、モデル使用時の混乱を防

止した。さらに、ドローンは無線通信に依存して操縦されること、そして研究2で電波・通信障害による事故が多数報告(図4)されていたこと、から、Radio wave(電波・通信)要素を新たに追加した。以上の構成要素の頭文字から、本モデルをS-SHOELRモデルと命名した。(図5)

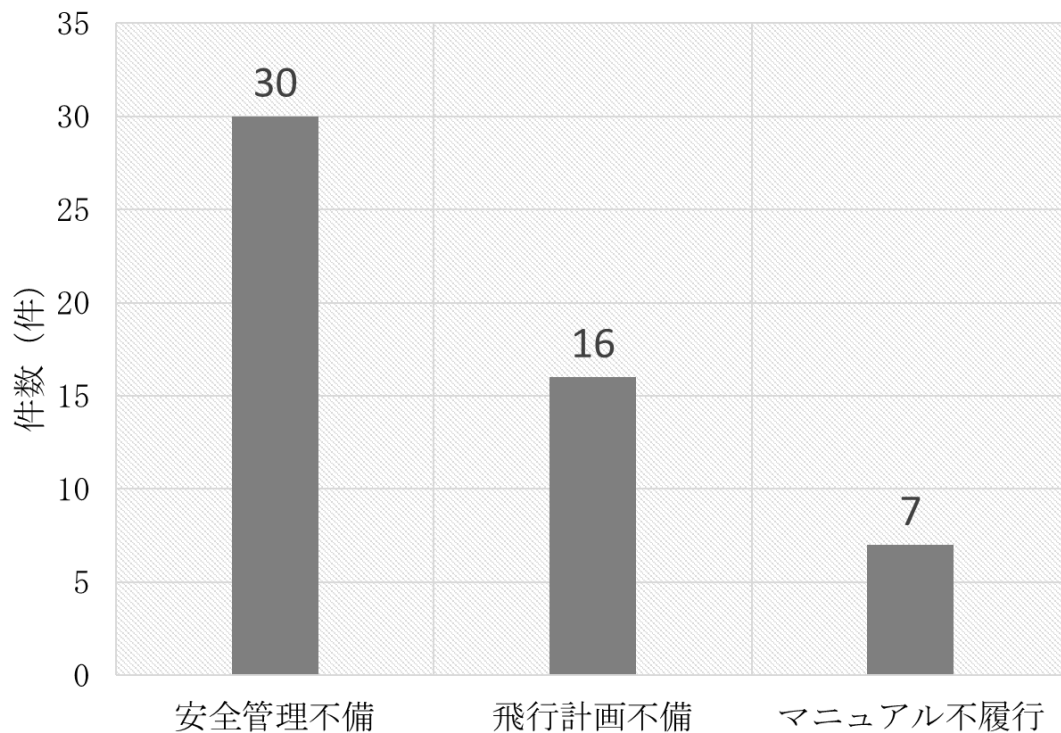


図3 ソフトウェアの内訳

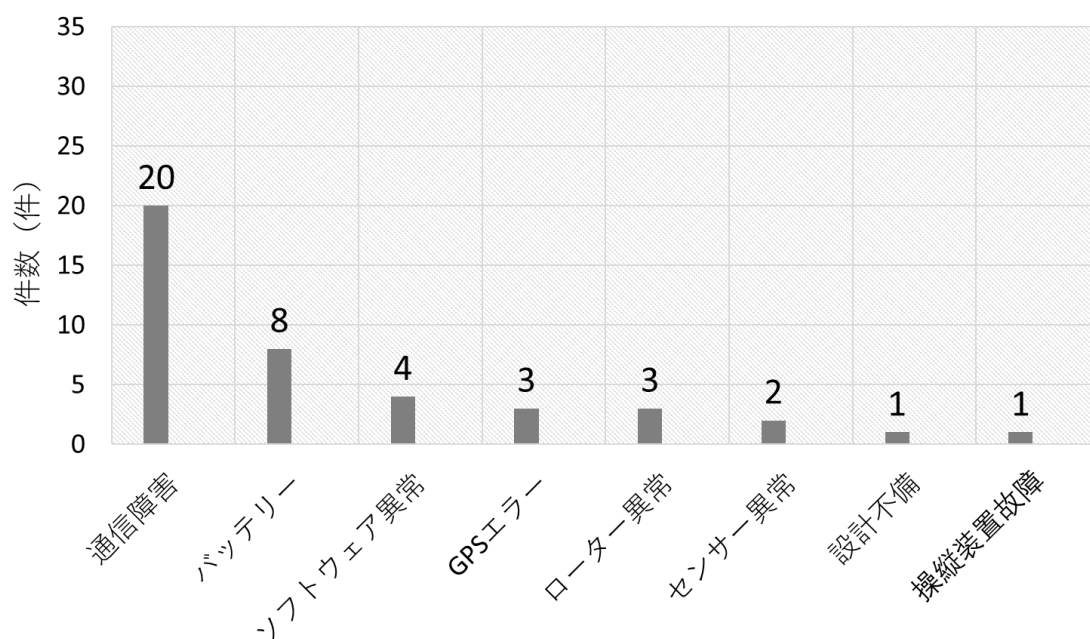


図4 ハードウェアの内訳

	要素	内容
	S（安全）	安全対策、リスク評価、飛行経路設定、異常時の対処方法、飛行前点検などドローンを安全に飛行させるための事項。
	S（ソフトウェア）	飛行計画、飛行マニュアル、関連法規、などの形とならない事項。
	H（ハードウェア）	ドローン本体、システム（アプリケーション含む）コントローラーなど主に危機に関する事項。
	O（オペレーター）	操縦者本人（操縦技能、ヒューマンファクター、体調）に関わる事項。
	E（環境）	天候（雨、風、照度、気温等）、飛来物（鳥、昆虫等）、音、飛行空間の広さ、飛行時間等、環境に関わる事項
	L（本人以外）	当事者以外の人々（指示・助言をする人、第三者）に関する事項
	R（電波・通信）	通信障害や電波障害、磁気障害に関する事項

図 5 作成した S-SHOELR モデル

研究4では、研究2.3で作成したIR及びS-SHOELRモデルを用いて、本研究の目的である無人航空機危機管理モデル（UAV-RCMモデル：Unmanned Aerial Vehicle Risk & Crisis Management Model）の作成を行った。このUAV-RCMモデルは、ドローンの事故を防止するために、事故データの収集、分析を系統的に行うためのドローン用危機管理手法である。UAV-RCMモデルは、品質管理等を継続的に向上させるマネジメント手法であるPDCAサイクルを軸に作成した。これは、今後成長が見込まれる分野であるドローンとの親和性が高いと考えたためである。UAV-RCMモデルを作成するため、下記の通り作成条件を定めた。

- ① PDCAサイクルを軸とし作成する
- ② 各フェーズで実施すべき事項を定め、チェックリスト化する
- ③ フェーズ内の優先事項は法令関係を優先する
- ④ UAV-RCMモデルには、IR及びS-SHOELRモデルを使用する
- ⑤ 短時間で容易に、実施・解析できるモデルとする

作成したUAV-RCMモデルを図6に示す。

次に、作成したUAV-RCMモデルを用いた運用を、九十九里トライアスロン大会で実証した。その結果、PDCAサイクルの各フェーズで実施すべき事項が明確になっているため、問題なく実際の現場でも使用することができた。また、トライアスロン大会では飛行中に電波遮断が発生し、1件のヒヤリハットを経験した。しかし、PLAN（計画）でS-SHOELRモデルを用いてリスクアセスメントを実施しており、電波障害をリスク対策の一環として、非常時のフェールセーフ機能の設定を行い、RTH（Return To Home：電波遮断時などに自動で離陸地点へ戻る機能）を有効化していた。その結果、電波遮断と同時に

ドローンが自動帰還を開始し、事故を防ぐことができた。このことから、PLAN（計画）のフェーズで S-SHOELR モデルを用いたリスク評価を実施し、リスク対策を講じていたため、トライアスロン大会上空というリスクが高い環境においても、事故を防ぐことができたと考えられる。

最終的に実証検証を行い、UAV-RCM モデルは、危機管理モデルとして実施すべき内容が明確であり、短時間で容易に実施・解析できるモデルであると結論づけた。

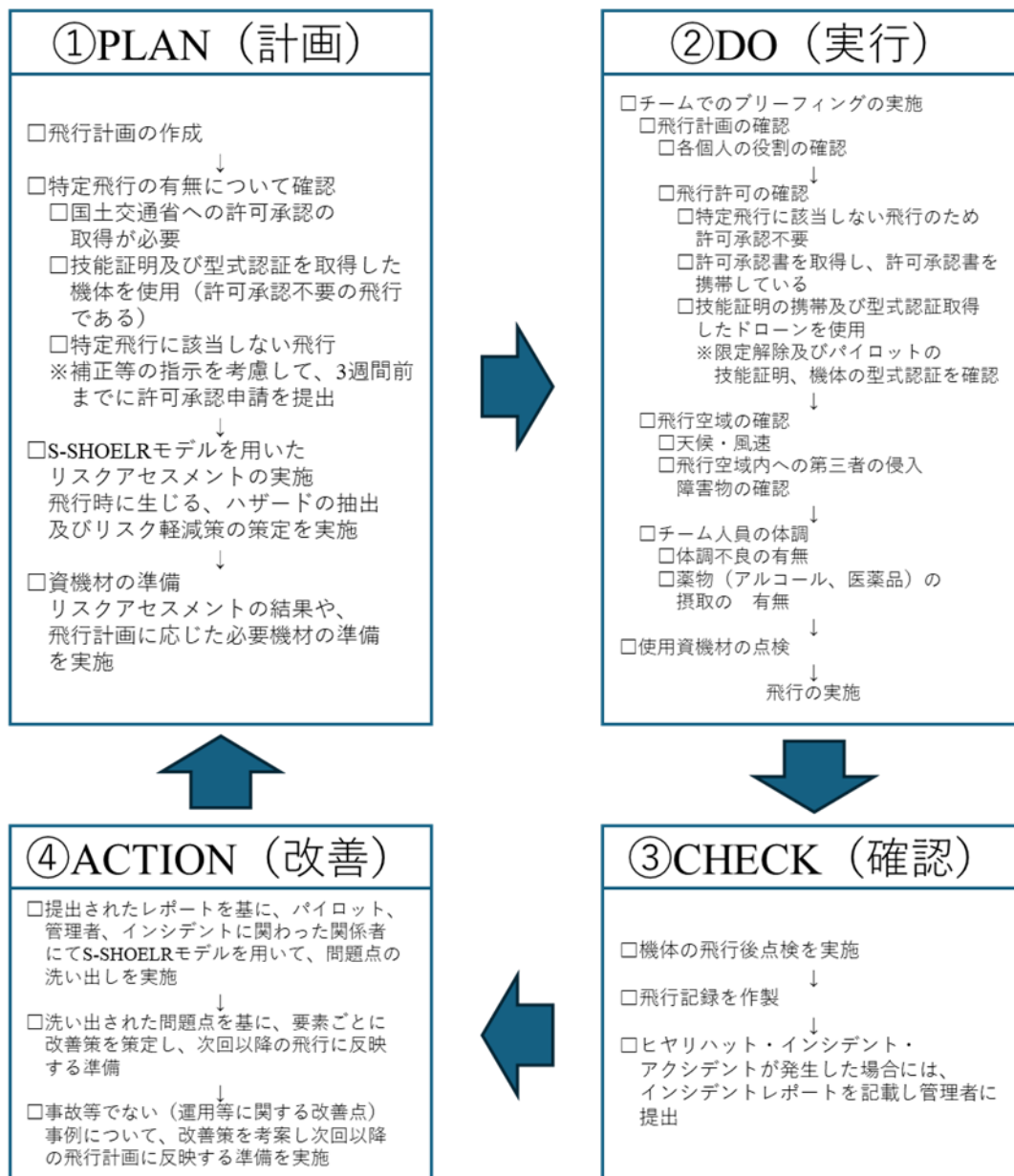


図 6 作成した UAV-RCM モデル

本論文では、ドローンを安全に運用するために必要な UAV-RCM モデルの作成と社会実装の評価を実施することを目的に掲げ、研究を行った。本研究では、目的を達成するため、下記の研究を実施した。

- ・海水浴場におけるドローンの有用性についての検証
- ・医療用の IR を参考としたドローン用の IR の作成
- ・ドローン専用の事故分析モデルである S-SHOELR モデルの作成

これらの研究を基に、最終的に九十九里トライアスロン大会にて、無人航空機危機管理モデル（UAV-RCM モデル）を作成し、実装実験を通じて本モデルの評価を実施した。

最後に、本研究で提示した UAV-RCM モデル、IR および S-SHOELR モデルは汎用性を有する設計としている。そのため、使用する産業や分野に応じて改良の余地がある。本研究で得られた知見がドローンを安全に運用するための一助となり、健康で安全・安心な社会の実現に資するものと信ずる。

別添1 考案したドローンインシデントレポート

ドローン インシデントレポート			
<i>Drone Incident Report</i>			
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	☐ 0 誤ったことが予防できた ☐ 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） ☐ 2 誤って物件又は人に接近した ☐ 3 物件又は人に接触するも墜落せず損害がなかった ☐ 4 ドローンが墜落した ☐ 5a 人が怪我を負った ☐ 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） ☐ 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） ☐ 6 人が死亡した		
飛行目的	☐ 空撮 ☐ 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		
事故原因	【大分類】 ☐ 機械的 ☐ 人為的 ☐ 外因的 ☐ その他 ()		
	【小分類】 ☐ 操縦制御不能 ☐ 電波通信障害 ☐ バッテリー ☐ 自動飛行 ☐ 操縦ミス ☐ 見失い ☐ 補助者との連携ミス ☐ 風 ☐ 鳥 ☐ その他 ()		
事故概要	☆具体的に5 W1H（いつ、どこで、だれが、なにを、なぜ、どのようになったか）を用い、客観的に明確に記載すること。		