

Technical Journal of Advanced Mobility

次世代移動体技術誌



- 自動車業界の規格と支援ツールを利用したドローンの機能安全分析
中村 裕子、土屋 武司、鈴木 真二、柏村 陽介、大坪 弘
- 欧州におけるリスクベースアプローチと我が国の無人航空機安全規則への示唆
佐々木 一、鈴木 真二、炭田 潤一郎
- 騒音に励起されるストレスの評価のための感性アナライザ適用可能性
～空飛ぶクルマの社会受容性評価に向けて～
原 進、林 裕介、満倉 靖恵、上出 寛子
- 無人航空機運航リスクアセスメント手法 SORA の国内実証実験への適用
～ケーススタディ：新上五島町での無人ヘリコプター物流～
中村 裕子、坂本 修、佐藤 一郎、中島 徳頭、高田 淳一、石井 啓吾、田中 秀治、久根崎将人

自動車業界の規格と支援ツールを利用した ドローンの機能安全分析

中村 裕子^{*1}, 土屋 武司^{*2}, 鈴木 真二^{**3}, 柏村 陽介^{*4}, 大坪 弘^{*4}

東京大学スカイフロンティア社会連携講座^{*1}

東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻^{*2}

東京大学未来ビジョン研究センター^{*3}

サイバネットシステム株式会社^{*4}

官民連携して空の産業革命, 空の移動革命が推進されている昨今, 経験や知識, 思想の異なるメーカー・サプライヤー・オペレーターが集まり, 様々な種類の無人航空機システム (以下, ドローン) が開発され, 多種多様なサービスの実装が目指されている。今後の利用拡大, 特に都市環境でのサービス実装に向けては, 開発におけるシステムの安全性・信頼性に対する共通の認識や開発プロセスの標準化, そして開発支援ツールの提供が重要である。本研究では, 自動車業界で標準化されている機能安全活動をドローンに適用し, その有効性を議論した。分析にあたっては, 信頼性工学のソフトウェア *Ansys medini analyze* を利用している。本研究は, 機能安全活動への知見を深め, またその適用性を検討することを目的とした初期的な分析だが, 無人地帯上空の物流に利用されるドローンへの機能安全分析の例示と, 機能安全活動による潜在的なリスクやハザードの特定, 今後のドローンの機能安全活動標準化に向けての検討項目の原案とすることを目的とした。

Drone Functional Safety Analysis with a Reliability Engineering Software in Automobile and Aviation Industry

Hiroko Nakamura^{*1}, Takeshi Tsuchiya^{*2}, Shinji Suzuki^{*3}, Yosuke Kashiwamura^{*4}, Hiroshi Otubo^{*4}

Sky Frontier Research Initiative, University of Tokyo^{*1}

Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo^{*2}

Institute of Future Initiatives, University of Tokyo^{*3}

Cybernet Systems Co., Ltd.^{*4}

A single drone operation contains risk to third party on the ground and in the air. Sharing airspace with drones with different level of safety and reliability will increase such risk. Standardizing functional safety analysis among drone manufacture is important when various experience, knowledge and philosophy are found. Authors applied a functional safety analysis standardized in the automotive industry to a drone for delivery, using a reliability engineering software in Automobile and Aviation Industry, Ansys medini analyze.

Keywords: Drone, Reliability engineering, Functional safety analysis, NEDO Dress Project

1. はじめに

官民連携して空の産業革命、空の移動革命が推進されている昨今、経験や知識、思想の異なるメーカー・サプライヤー・オペレーターが集まり、様々な種類の無人航空機システムが開発され、多種多様なサービスの実装が目指されている。そうしたサービスには、単体の運用でも地上や空中の第三者リスクが少なからず存在し、また、安全性・信頼性の異なる機体の密な運用は無人航空機同士の衝突リスクとなる。今後の利用拡大、都市環境でのサービス実装に向けて、ドローン運用の安全性保証の仕組みの拡充が求められ、特に、開発現場でのシステムの安全性・信頼性に対する共通の認識や開発プロセスの標準化、そして開発支援ツールの提供は重要になってくる。

東京大学は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト（Dress プロジェクト）の性能評価基準等の研究開発に産業総合研究所らと参画し、2020年から2年の事業で、無人航空機に求められる安全基準策定のための研究開発に取り組んでいる[1]。その研究の一環として、この度、自動車や航空機産業で実施されている手法を活用しての機能安全分析を行うことになった。ドローン運用に関わるハザード、そして関連するリスクの対処の方法は、ドローンの運用コンセプトや用いるシステムによって様々であり、冒頭に述べたような開発者の多様性もあって、特に機能安全実現について、ドローン産業においてはまだ標準化された活動は無いという[2,3]。一方で、自動車や航空機産業では、機能安全活動の標準化が行われている。

本研究では、国内に関係者が多く、また使用環境に類似の点の多い自動車業界の機能安全活動を参考に、ドローン産業における機能安全活動の促進、標準化に関わる知見を蓄積することを目的とし、ある特定のドローンのユースケースに対する機能安全分析を行った。

2. 機能安全活動と支援ツール

2-1 機能安全活動

機能安全活動とは、そのシステムの安全リスクを0にすることが不可能だとして、システムが関わる危険な潜在的状況を検知し、事故を避け、あるいは事故の影響を止めるための行動を促すものである[4]。安全なシステムの構築のため、設計初期段階から、そのシステムに関わるハザードの解析、ハザード自体を抑制する手段、あるいはハザードの結果を抑制する手段の開発と適切かの立証といった安全分析と、システムがどう安全かの評価やリスクを抑制する手段の分析を含むシステム障害分析を行うことが重要とされている[5]。そうした機能安全活動に利用される手法には次のようなものがある [表 1：詳細は文献 6 等を参照のこと]。

2-2 機能安全活動の標準化

様々な分野において大規模な事故やシステムの複雑化を背景に、機能安全活動の必要性が認識され、2000年に国際電気標準会議（IEC）は、電子機器の機能安全に関わる要求事項を示した国際規格 IEC61508[7]を制定した。この規格は、航空無線技術委員会（RTCA）が制定した航空機搭載ソフトウェアの開発に関わるガイドライン DO-178[8,9]を参考にして作られている。また、自動車産業においても、共有した枠組みやルールといった業界標準への必要性が認識され、IEC 61508を元に、2011年、国際標準化機構（ISO）は、自動車向けの機能安全企画 ISO 26262を発行した。こうした標準規格は、システムが持つリスクを許容可能なものに下げる方策を示しており、許容可能なレベルという安全度水準が同時に議論される。例えば、ISO 26262では、どの程度まで故障や不具合を許容するのかについて ASIL（Automobile Safety Integrity Level）という安全度水準が制定されており、機能安全活動の必要な A～D の4段階および組織レベルでの標準的な品質管理が求められる Quality Management（QM）という区分で、システムが関係しうるハザード

表 1 機能安全活動に利用される手法例

ハザードの解析	
チェックリストによる確認	これまでのシステム障害などの経験や、そうした経験から培ったノウハウに基づき、システムの障害発生の元を洗い出しチェックリストを整備し、確認する方法。
HAZOP (Hazard & Operability)	ハザードを特定するための手法。システムの詳細設計に関する情報がない段階において、チェックリストを用いて大まかにハザードを把握するチェックリスト HAZOP と、正常な状態や条件から逸脱された状態を想定させる一連のキーワードを利用し、そのような状態の原因や影響を特定し評価するガイドワード HAZOP がある。
システム障害分析手法	
FTA (Fault Tree Analysis)	HAZOP 等にて特定したハザードと危害が、なぜ生じるのか系統的に分析する手法。頂上を好ましくない事象とし、その原因となる事象や状態を、子ノード、次のレベルの子ノードとしてツリー状に把握し、論理ゲート記号、ゲート入出力記号、転移記号などを利用し、それぞれの関係性や事象が起こりうる条件などを整理して、定性的または条件等の具体的数値を元に定量的に分析する。
FMEA (Failure Mode & Effects Analysis)	システムの構成要素 1 つ 1 つについて、どのような故障モードが存在し、その原因や、システムの中での上位階層へどのような影響を与えるのか、定められたフォーマットを用いて行う系統的な分析手法。

ドを評価する。評価された ASIL のレベルによって、その後のシステム障害分析や潜在的な障害への手当てが異なってくる（詳細は 3-3 へ）。

2-3 機能安全活動支援ツール

機能安全に関わる一連の分析は、特に特別なツールを利用しなくても可能である。しかし、開発段階では、様々な仕様の変化が起こりうる。複雑なシステムについては、システムのレベルに応じて利用されている分析手法を一元管理し、仕様の変化に対してのトレーサビリティ（例えば FTA/FMEA のライフサイクルにおける追跡）ができ、総合的な妥当性検証が行える環境がより望ましい。今回利用した Ansys medini analyze はシミュレーション業界の代表的なベンダーである米国 Ansys 社から提供されており、主要な安全分析手法を 1 つにまとめた統合ツールで、自動車や航空宇宙、産業機械などの業界で利用されている（表 2）[10]。

表 2 Ansys medini analyze の機能[10]

機能/ツール
アーキテクチャモデリング
機能モデリング
ハザード分析&リスクアセスメント
ガイドワード分析
安全要求の導出と管理
FMEA
FMEDA (Failure Mode, Effect and Diagnostic Analysis)
信頼性予測
FTA
故障ネット
ドキュメント生成
妥当性検証
ツール内でのトレーサビリティ
アーキテクチャ要素への要件の割当
アーキテクチャモデルと FME(D)A ワークシートの同期
アーキテクチャ要素と FTA 事象の同期
FMEA と FTA の同期

3. 物流ドローン機能安全分析

本研究では、ドローンの機能安全分析を行うにあたり、ユースケースとして、仮想的な 8 枚翼ドローン（積載 25 kg）を想定し、無人地帯で有人航空機との遭遇も限られている空域を、機上に搭載したカメラを利用した目視外飛行、ただし離発着は目視内で行うこととした。ドローン産業における機能安全に関する標準

規格はまだない。国内において、自動車産業における機能安全活動の知見が蓄積されつつあることを鑑み、また、一般的な航空機と異なり、使用が許可された範囲では、現在の社会インフラや環境内でユーザーが自由に使用を認められている点において自動車の機能安全分析の親和性が高いのではという観点から、今回の研究では、ISO 26262 規格準拠をベースとした機能安全分析を実施した¹。図1はプロセスの全体像である²。次節で機能/要素の導出と故障ケースの定義を行い、3-2、3-3において、潜在的な故障ケースの検出およびハザード分析とリスクアセスメントを行い、3-4では、ASILレベルと分析されたハザードへの対処の方針である安全コンセプトを検討、さらに3-5や3-6において、システム障害分析を行っていく。

なお、本研究においては、経験値への依存度の高い機能安全分析への知見を深め、ドローンへの適用性を検証することを目的とする。したがって、手順や考え方の整理に重点を置き、部品の故障率などデータが必要な部分は将来の検討項目として、全体を通して定性的な分析を行った。

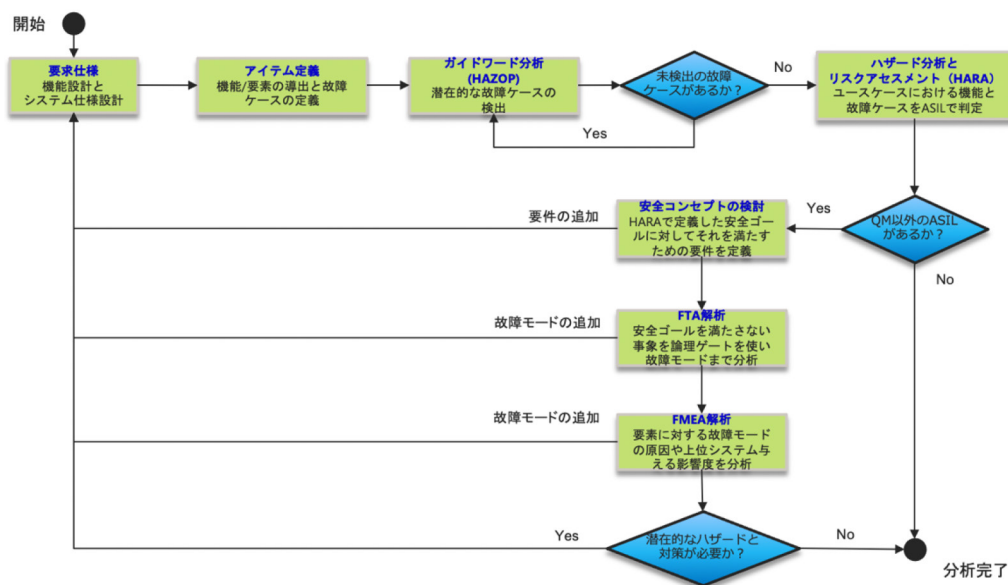


図1 本研究の機能安全分析フロー

3-1 機能/要素の導出

初めに、該当するシステムの要求仕様から機能/要素を導出し、故障ケースを定義した。今回は、冒頭で述べたユースケースの各シーンから、機能の導出を行った(表3)。本研究で対象とするシステムについては、表4にあげた要素から構成されるとし、図2のような各機能と要素の対照表も作成した。

次の手順として、紙面の都合上、詳細な説明は割愛するが、導出された各機能に対して、故障ケースを定義した。例えば、充電機能であれば、充電ができない、バッテリーがフルにならない、充電に時間がかかるなど、経験などに基づきリストしていった。次節のHAZOPの手順も故障ケースを洗い出す手順である。機能安全分析では、故障ケース抽出の網羅性を高めるために様々な手法を用いる。なお、各要素について、要素定義時に、例えばモーターであれば出力不足、動作しないなどと、故障モードも定義した(図3)。

¹機能安全に特化したものではないが、航空機とシステムについては開発プロセスや安全性評価プロセスを定めたARP 4754A/4761が業界標準として存在する。そちらを踏襲する場合には、安全アセスメントにおいて、機能ハザード解析(FHA)やシステム安全評価(SSA)、予備システム安全評価(PSSA)を利用することになる。どの機能安全分析活動がドローンにふさわしいのかは今後検証すべき、論点となる。

²このプロセスは、作業を簡素化して表現したもので、その都度、チューニングやフィードバックが行われる。例えば、HAZOP分析の手順において、未定義の故障ケースを検出した場合に、前工程のアイテム定義に戻り、故障ケースを追加したり、また安全コンセプトの手順で導き出される新たな要件を、最初の工程である要求仕様やシステムモデルに追加するなどの作業が発生する。

表3 物流ドローンの各シーンでの機体機能導出例³

シーン	機体に対する機能安全活動中の機能表現例
担当者が運搬する荷物を搭載する（搭載、固定）	搭載機能 [F001：荷物を搭載する]、固定機能 [F002：荷物を固定する]
操縦者が機体の準備をする（充電、飛行前点検、電源 ON、機体状態の確認）	充電機能 [F003：充電する]、電源機能 [F004：電源を入れる]、機体/通信の状態検知・表示機能 [F005：機体の状態を表示する；F006：機体の姿勢を表示する]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F006：機体の姿勢を表示する；F009：機体の位置を検知する；F010：機体の位置を表示する；F011：機体の高度を検知する；F012：機体の高度を表示する]
操縦者が目視にてドローンを離陸させる（機体/通信状態の確認、機体位置の確認、周囲の確認、機体の上昇）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005-F006]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F006；F009～F012]、気象/電波環境検知・表示機能 [F031：機外の気象状態を検知する；F032：機外の気象状態を表示する；F033：通信状態を検知する；F034：通信状態を表示する]、離陸機能 [F007：機体を上昇させる]
操縦者が目視にてドローン进行操作し、障害物があれば避け、荷物を運搬する（機体状態の確認、機体位置の確認、周囲の確認、目的方向への推進、障害物の確認・回避）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F009～F012]、飛行制御機能 [F008：機体を目的方向に推進させる]、姿勢制御機能 [F016：機体の姿勢を整える]
操縦者が遠隔監視にてドローン进行操作し、障害物があれば避け、荷物を運搬する（機体状態の確認、機体位置の確認、周囲の確認、目的方向への推進、障害物の確認・回避）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F009～F012]、機外状況表示機能 [F035：機外の画像を表示する]、飛行制御機能 [F008]、姿勢制御機能 [F016]
操縦者が目視にてドローンを着陸させる（機体状態の確認、機体位置の確認、周囲の確認、機体の下降、電源 OFF）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F009～F012]、下降機能 [F021：機体を下降させる]、着陸機能 [F022：機体を着陸場所に下ろす]、電源機能 [F023：電源を切る]
ドローンが機上のセンサーを利用し障害物を避ける（機体状態の確認、周囲の確認、機体の下降、電源 OFF）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F009～F012]、障害物検知・表示機能 [F013：障害物を検知する；F014：障害物が近いことを表示する]、障害物回避判断・実施機能 [F026：障害物を避けるための機体を旋回する]、障害物回避モード表示機能 [F027：障害物を避けたことを知らせる]
操縦者との通信が途切れたら事前に設定した手段をとる（通信が途切れたことを確認、機体状態の確認、機体位置の確認、周囲の確認、事前に設定された手段を実施、障害物の確認・回避）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F009～F012]、通信の異常判断・表示機能 [F033；F034]、異常時モード機能 [F024：着陸場所を決める；F008]、異常時モード表示機能 [F037：異常時モードを知らせる]
機体が制御不能になったら緊急着陸をする（機体が制御不能状態であることを確認、動力 OFF、パラシュートの展開）	機体/通信の状態検知・表示機能 [F005]、機体の位置/高度検知・表示機能 [F009～F012]、機体の制御不能判断・表示機能、緊急着陸モード機能 [F023；F029：パラシュートを開く]、緊急着陸モード表示機能
運搬する荷物を下ろす（荷物を着脱、荷物の運び出し）	着脱機能 [F030：荷物を着脱する]

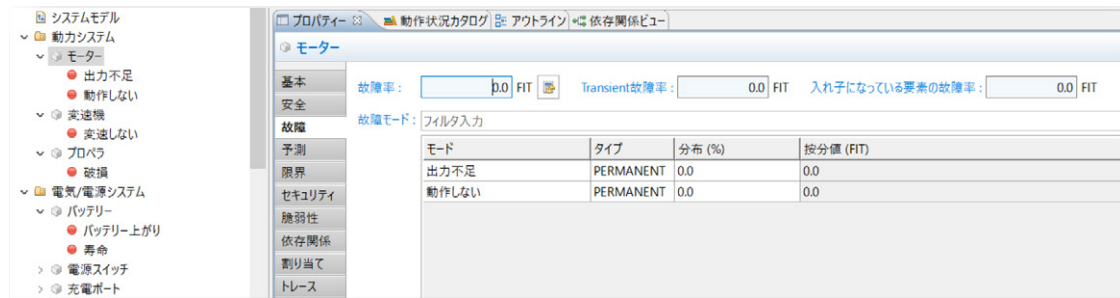
³ カッコ内には機能安全活動においてトレーシングに利用する番号が振り当てられている。FはFunction。ID番号は実際の研究で利用されたもので、ツールの特性上、削除履歴も残しているため、連番にはなっていない。ここで、機能の導出や要素への落とし込みは、分析者の考え方・経験が反映される場である。機能導出にあたり、自動車の機能安全の経験を利用したが、ドローンのメーカーの協力は得ていないため、表3に違和感が残る。機能を定義する際、安全分析の過程で、評価者により誤解や齟齬が生じないよう「○○を△△する」としている。設計段階としては初期段階で、機能の詳細や、その動作の主体が、今回焦点を当てる機体なのか、操縦者なのか曖昧なものがあるが、設計が進む上で解消されるものである。機能/要素の導出はその後のハザード分析の網羅性に影響を与えるが、本研究の直接の目的ではないため、将来の研究項目として対応したいと考えている。

表4 本研究で検討するシステムを構成する要素

システム層	サブシステム層	システム層	サブシステム層
動力システム	モーター	外部通信システム	通信モジュール
	変速機		予備通信モジュール
	プロペラ		アンテナ
電気/電源システム	バッテリー	内部通信システム	コンピュータプロペラ調整器ハーネス
	電源スイッチ		コンピュータアーム角度調整ハーネス
	充電ポート		コンピュータモーターハーネス
	電源ハーネス (モーター)		コンピュータ検知系ハーネス
検知システム	衝突防止カメラ-FR		コンピュータ認知系ハーネス
	衝突防止カメラ-RR		コンピュータ外部通信系ハーネス
	超音波センサー		コンピュータ状態表示ハーネス
認知システム	高度計	状態表示システム	ライト
	姿勢計		モニター
	GPS	本体構造システム	筐体
	速度計		メインフレーム
	気圧計		アーム
	重量計		スキッド (足)
判断/実行システム (ECU)	処理コンピュータ	搭載系	フック
	処理コンピュータ_冗長	安全系	パラシュート

製品要素	8枚翼ドローン									
	機体									
システム層	動力システム		電気/電源システム			検知システム				
サブシステム層	モーター	変速機	プロペラ	バッテリー	電源スイッチ	充電ポート	電源ハーネス (モーター)	衝突防止カメラ-FR	衝突防止カメラ-RR	超音波センサー
ユーザースケースを実現するために必要な機体の基本機能	13	13	13	5	4	1	5	5	5	5
荷物を搭載する	1									
荷物を固定する	1									
充電する	3			○	○	○				
電源を入れる	3			○	○		○			
機体の状態を表示する	7									
機体の姿勢を表示する	6									
機体を上昇させる	11	○	○	○						
機体を目的方向に推進させる	8	○	○	○						
機体の位置を検知する	4									
機体の位置を表示する	6									
機体の高度を検知する	3									
機体の高度を表示する	6									
障害物を検知する	4							○	○	○
障害物が近いことを表示する	6									
機体の姿勢を覚える	8	○	○	○						
機体の姿勢を表示する	6									

図2 機能と要素の比較表イメージ

図3 故障モードの定義作業のイメージ⁴

3-2 ガイドワード分析 (HAZOP)

次に、前手順で定義した機能をガイドワードに照らし合わせ、故障ケースの検出を強化した。以下の12ワードの利用は、経験にどうしても依存してしまう故障ケース分析の網羅性を支援するため、表5にあげられる12のガイドワードを利用して、想定していなかった故障を洗い出す努力を行う。表5には、どのような故障ケースが導かれうるかの例を端的に示してはいるが、どのガイドワードにその故障ケースが分類されるかよりも、12の切り口で、できるだけ多くの潜在的な故障ケースを挙げられるかが、この手順で重要となる。

表5 本研究で検討するシステムを構成する要素

ガイドワード	説明
NO or NOT	その機能が働かないという故障ケースを考える。例えば、荷物が固定できない、機体の位置が検知できない、表示できないなど。
MORE	その機能が量的に過ぎてしまうことを考える。例えば、固定した荷物が重量オーバー、機体の上昇が最大許容速度を超えて行われる、など。
LESS	その機能が量的に十分でないことを考える。例えば、荷物の固定が十分でない、充電が十分できない、機体の推進速度が十分でない、など。
AS WELL AS	その機能が質的に増幅してしまうことを考える。例えば、誤って本来はない障害物を検知してしまう、など。
PART OF	その機能が一部質的に働かないような故障ケースを考える。例えば、機体の状態が一部しか表示されない(検知できないのはLESS)、など。
REVERSE	論理的に逆に機能してしまうことを考える。例えば機体が別方向に推進してしまう、検知や表示に時間がかかってしまう、機体の状態が悪いのに良好と表示されてしまう、など。
OTHER THAN	異なる機能が実行されてしまうことを考える。例えば異常時モードで異なる場所に着陸してしまう、機能すべきでないものが断続的に作動してしまうなど。
EARLY	その機能が本来よりも早いタイミングで実行されてしまうことを考える。例えば、パラシュートの開くタイミングが早く機体への接触が発生する、など。
AFTER	その機能が本来よりも遅いタイミングで実行されてしまうことを考える。例えば、検知や表示に時間がかかってしまう、など。
PERIODIC	その機能が断続的に起きてしまうことを考える。例えば、機体の位置が断続的に表示される、など。

⁴ここで、タイプとは、故障が一時的なものと、永続的なものの意である。按分値は、FIT (Failure in Time) で10億時間あたりの故障率だ。時間依存するものであれば、関数で故障率を設定することもできる。今回は、要素の部品依存を便宜上考慮せず、定性的な解析に努めていることから、故障分布および按分値は0.0とした。今後の研究においては、実際に利用しうる部品のデータに基づいて、故障モードを定義することとなる。

3-3 ハザード分析とリスクアセスメント (HARA)

前項までの手順で定義した故障ケースについて、ハザードと潜在的影響を検討した(図4)。例えば、操縦者が障害物回避を行う「操縦者が直視して操縦」するシーンにおいて、障害物の検知/表示機能の故障ケースにより、検知された障害物の表示が遅くなってしまう場合を、「障害物の有無が不明」となるハザードの状態と分類し、潜在的影響として、「障害物と衝突する」と整理した。さらに、本手順では、それぞれのハザードについて、深刻度、遭遇頻度、制御性を評価した。

それぞれのハザードのリスクレベル評価については、ISO 26262 で定義されているASIL を利用した。ASIL は、その後の機能安全活動の工程で、許容されるリスクまで落とし込む作業を定める指標として重要なものである。

ユーザケース						機能と故障ケース		ハザード定義とASILの判定							
ID	種別(UAS)	天候	風速	地上状況	パイロット使用状況(UAS)	制御方法	機能	誤動作	ハザード	潜在的影響	深刻度	遭遇頻度	制御可能性	ASIL	安全ゴール
HE003	上空	霧	5m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F014] 障害物が検知されず表示される	[MF043] 障害物が検知されず表示されない	[H012] 障害物の有無が不明	障害物と衝突する	S3	E3	C1	A	[G012] 障害物の有無が不明で表示されない
HE004	上空	霧	3m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F014] 障害物が検知されず表示される	[MF044] 障害物が検知されず表示されない	[H012] 障害物の有無が不明	障害物と衝突する	S3	E2	C0	QM	
HE005	上空	霧	5m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F014] 障害物が検知されず表示される	[MF044] 障害物が検知されず表示されない	[H012] 障害物の有無が不明	障害物と衝突する	S2	E3	C1	QM	
HE008	上空	任意の天候	5m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F016] 機体の姿勢を監視する	[MF047] 機体の姿勢が監視されない	[H002] 安定飛行できない	機体が落下する	S3	E3	C1	A	[G015] 機体の姿勢が監視されない
HE009	上空	任意の天候	5m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F016] 機体の姿勢を監視する	[MF048] 機体の姿勢が監視されない	[H002] 安定飛行できない	機体が落下する	S3	E2	C1	QM	
HE125	上空	任意の天候	3m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F006] 機体の姿勢が監視される	[MF046] 機体の姿勢が監視されない	[H014] 機体の姿勢が不明	機体が落下する	S3	E3	C1	A	[G012] 機体の姿勢が不明で表示されない
HE126	上空	任意の天候	5m/s以下	森林/田畑	一般飛行	操作者が直視して操縦	[F006] 機体の姿勢を監視する	[MF045] 機体の姿勢が監視されない	[H014] 機体の姿勢が不明	機体が落下する	S3	E3	C1	A	[G012] 機体の姿勢が不明で表示されない

図4 HARA のイメージ⁵

ASIL の決定には、その深刻度 (Severity)、ハザードの遭遇頻度 (probability of Exposure)、制御可能性 (Controllability) を特定する必要がある(表6)。表6~8は自動車業界で用いられているものだ。今回のケースでは無人地帯を飛行し地上の第三者へのリスクを、また有人航空機との遭遇が限られていて空中の第三者へのリスクを極力排除したユーザケースに限定しているため、ハザード分析における“深刻度”を調整することにした。本来、表7にあるように、人命に関わるケースを最も危険度の高いS3とするが、本分析においては、機体が落下、もしくは障害物との衝突をS3とした。S0は一般飛行に問題がないもの、S1S2は、衝突することはないが、飛行ミッションに対する被害に応じて設定することとした。この調整は、その後の分析結果に影響を与える。今後の研究として、ユーザケースを拡大し、第三者へのリスクを考慮した分析を行うこと、さらにドローン用の深刻度の定義をする必要があると認識している。

機能安全分析では、ASILの区分によって、その故障ケースに対する対処が変わる。QMにあたるケースについては、準拠した組織レベルでの品質管理が求められていて、国内でドローン製造者は、一般的に、国際的な品質マネジメントシステムISO 9001の取得が適当であるとされており、そのレベルでの対応が必要と解釈できるであろう。一方、ASILの各レベルが割り振られるハザードにおいては、それ以上の管理が必要になると解釈できる。今回の研究では、ASIL D, Cに区分されるケースについて、FTAを、すべての故障

⁵ 赤枠のように、故障ケースに影響しうる様々な状況をユーザケースとして設定していくことで、前節で行った故障ケースの洗い出しを補強することができる。運航する天候、風速、地上状況、操縦者等によるヒューマンエラー、飛行ルート付近での火災など有害な外的要因、外部システムの不具合などが、ユーザケースを考える上での要素となりうる。本研究では、単純化のため、その要素の多くを検討から除外している。緑枠のASIL判定においては、遭遇頻度、制御可能性など、人依存による評価となるため、基準のブレが出ないよう、作業では、極力コメントを付加するなどの工夫を行なっている。その上で、こうした判断には業界による経験が重要だと考えられ、筆者らは今後の研究において、メーカーと共に再度判定を行う必要性を感じている。

表6 ASILの決定

深刻度のクラス	ハザード発生頻度のクラス	回避可能性のクラス		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	ASIL A
	E4	QM	ASIL A	ASIL B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	ASIL A
	E3	QM	ASIL A	ASIL B
	E4	ASIL A	ASIL B	ASIL C
S3	E1	QM	QM	ASIL A
	E2	QM	ASIL A	ASIL B
	E3	ASIL A	ASIL B	ASIL C
	E4	ASIL B	ASIL C	ASIL D

表7 深刻度のクラス[11]

クラス	S0	S1	S2	S3
内容	傷害なし	軽度及び注程度の傷害	重度及び声明を脅かす傷害 (生存の可能性がある。)	生命を脅かす傷害 (生存がはっきりしない)

表8 ハザード発生頻度のクラス[11]

クラス	E0	E1	E2	E3	E4
内容	可能性なし	可能性が非常に低い	可能性が低い	可能性が中程度	可能性が高い

表9 回避可能性[11]

クラス	C0	C1	C2	C3
内容	一般的に回避可能	容易に回避可能	通常は回避可能	回避困難または回避不可

ケース/ハザード/故障モードについてはFMEAの作業を行った。

なお、ASIL Dに関しては表6のように深刻度S3、発生頻度E4、回避可能性C3とそれぞれクラスが最も高い場合に該当する。本研究では、機体の判断により障害物との衝突を回避するための行動において機体旋回やその回避行動の計算処理で不具合/故障があった場合などをASIL Dとして評価した。センサーなどの不具合/故障による障害物が検知できないなどは、本研究ではASIL Cと評価された。これは障害物と衝突する可能性はあるものの、発生頻度は最大クラスではなくE3と判断したことによる。

3-4 安全コンセプトの検討

前手順にてASIL A～Dが割り振られたハザードに対して、対策となる安全ゴール、さらに、その安全ゴールを満たす手段となる安全コンセプト、要件の定義や、必要に応じて、ソフトウェア安全要求やハードウェア安全要求の特定、要求仕様の追加を検討した⁶。例えば、図5で示す安全コンセプトは、前手順において「機体を下降させる」機能の故障ケース⁷について設定した「機体が下降しない場合はパラシュートに

⁶安全ゴールの設定の様子は図5の最右列でも見ることができる。

⁷機体が下降しない場合には、「垂直方向に移動しない」ハザードの状態が生まれ、そのまま飛行するとバッテリー切れによる落下の危険があると想定し、本研究では、そのようなケースについて、深刻度S3、遭遇頻度E4、制御可能性C3として、ASIL Dと区分していた。

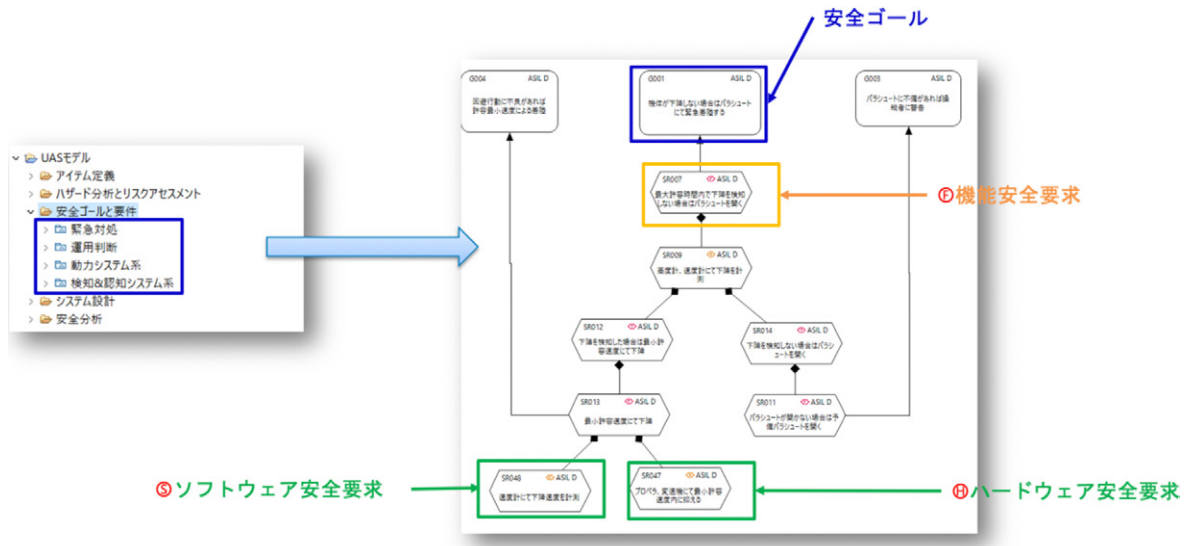


図5 安全コンセプトの検討のイメージ

て緊急着陸する」という安全ゴールに関わる安全コンセプト検討の様子である。

なお、本研究では、54の故障ケース、18のハザード、18の安全ゴールを設定した。その安全ゴールには、G001のような、緊急対処のアプローチの他、運用判断、速度を抑えるような動力システムに関わるもの、検知手段に冗長性を持たせるなど検知や認知システムに関わるもの、と大きく4つに区分されるものを設定した。対策が同じハザードに対し、同じ安全ゴールを設定することで膨大になりがちな機能安全分析によるミスや作業工数を抑えるといった工夫も必要であると考えられる。

3-5 FTA 解析

これまでの手順で、ASIL C/D に区分されたハザードに対して設定された安全ゴールに対して、安全ゴールの機能が実行されるまでの故障モードを FTA 解析した。FTA 解析は、HAZOP 等にて特定したハザードと危害が、なぜ生じるのか系統的に分析する手法であり、複数の要素（部品など）が関係して故障する複合的故障モードも分析可能である。

図6は作業のイメージだ。「位置の検知について GPS と通信モジュールの2系統で検知する」という安全ゴールについて、それを満たさない状態を整理している。これにより「機体の位置を検知できない」故障ケースに対して根本的な原因、および故障の組み合わせが特定できた。本研究では、定性的な分析に留めているが、採用部品の依存性を定量的に考慮するために、落とし込んだ故障ケースに対して各メーカーが提供する故障率（分布、按分値）や、故障率ハンドブック（FIDES ガイド[12]、IEC 61709[13]など）、またこれまでの経験上の実績値から計算した故障率を定義することで頂上の事象に対して計算することでシステムの不稼働率、および不信頼性の確率の評価が可能となる。

3-6 FMEA 解析

機能安全分析の最終的な段階である FMEA 分析では、各機能について、これまでの手順で解析してきた各故障ケースとハザード、その原因について整理を行い、各要素の潜在的故障およびその直接的な原因と影響を RPN（Risk Priority Number：リスク優先度）で評価した。なお、RPN は以下のように計算した。

$$\text{RPN} = \text{影響度} * \text{発生頻度} * \text{検出度}$$

影響度、発生頻度、検出度の値は表10をベースに設定した。発生頻度、検出度は、部品や制御システムの具体的なデータから設定すべきであるが、本研究では便宜的に表11のような値を入力して分析を行った。発生頻度については高度計や気圧計などの認知システムを3と仮定し、これを基準に外部の影響で不具合/

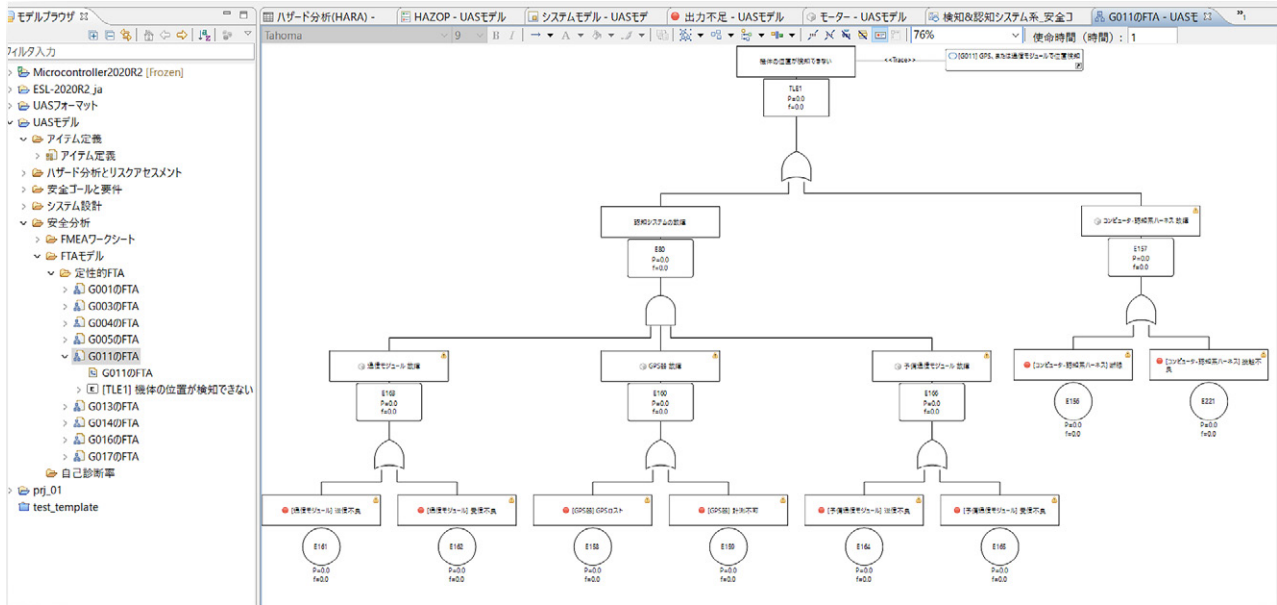


図6 FTA分析のイメージ⁸

表10 影響度/発生頻度/検出度と値の外観

値	影響度	発生頻度	検出度
0	未指定	未指定	未指定
1	なし	ほぼなし	ほぼ確実
2	非常に稀	非常に低い	非常に高い
3	稀	低い	高い
4	非常に低い	やや低い	やや高い
5	低い	中程度	中程度
6	中程度	やや高い	低い
7	高い	高い	非常に低い
8	非常に高い	かなり高い	ありそうにない
9	警告を伴って危険	非常に高い	非常にありえそうにない
10	警告を伴わず危険	持続して発生	不確実

表11 今回のRPN評価に利用した暫定的な発生頻度/検出度

項目 (表4に対応)	発生頻度	検出度
検知システム	4	3
認知システム	3	2
判断/実行システム (ECU)	5	4
外部通信システム	3	2
内部通信システム	4	2
状態表示システム	4	1
その他 (機体, 動力系)	6	1

⁸ 機体の位置を表示する機能の故障ケースとして「機体の位置を検知しない」ことによるハザード「機体の位置が不明」は、例え障害物検知の機能が動作して障害物との衝突を避けられたとしても、目的地に到達できないという影響が考えられた。そこで、当該故障ケースに対して、「位置の検知についてGPSと通信モジュールの2系統で検知する」ことを安全ゴールとした。「位置の検知についてGPSと通信モジュールの2系統で検知する」安全ゴールを満たさない事象として「機体の位置を検知できない」を頂上に、その原因となる詳細な事象や状態を、子ノード、次のレベルの子ノードとしてツリー状に把握し、論理ゲート記号、ゲート入出力記号、転移記号などを利用し、それぞれの関係性や事象が起こりうる条件などを整理している。

故障の発生頻度が若干高いであろう検知システム（各種センサー）を4，外部の影響を最も受けやすい機体/動力系を本研究で最も高い6とした。検出度は検査時に不具合/故障を検知できるかを示したもので，外見からでも検知できるケースがある機体/動力系を1とし，ECUのような特別な検査をしなければ検知できないものを4としている。

図7は本研究でのFMEA分析結果の一部だ。RPNのスコアの他，影響度と発生頻度，影響度と検出度，あるいは発生頻度と検出度の度合いで色分けをすることで，数多くある潜在的故障原因について，設計者に

コンポーネント/機能	潜在的故障	潜在的故障影響	影響度	最大影響度	リスククラス	潜在的故障原因	発生頻度	検出度	RPN	影×発	影×検	発×検
[F013] 障害物を検知する	[MF042] 障害物の検知に時間がかかる	⚠️ ハザード [H011] 機体の高度が不明	4	10	S	④ 処理コンピュータ ⑤ 処理速度の低下	5	4	...	●	●	●
		⚠️ ハザード [H012] 障害物の有無が不明	10	10	S	④ 予備処理コンピュータ ⑤ 処理速度の低下	5	4	...	●	●	●
					S	④ コンピュータ-検知系ハーネス ⑤ 接触不良	4	2	80	●	●	●
[F014] 障害物が近いことを表示する	[MF043] 障害物が近いことを表示しない	⚠️ ハザード [H012] 障害物の有無が不明	10	10	S	④ 通信モジュール ⑤ 送信不良	3	2	60	●	●	●
					S	④ 予備通信モジュール ⑤ 送信不良	3	2	60	●	●	●
					S	④ アンテナ ⑤ 破損	6	1	60	●	●	●
					S	④ モニター ⑤ メッセージ喪失	4	1	40	●	●	●
					S	④ 処理コンピュータ ⑤ 動作しない	5	4	...	●	●	●
					S	④ 予備処理コンピュータ ⑤ 動作しない	5	4	...	●	●	●
	[MF044] 障害物が近いことを表示するのに時間がかかる	10	10	S	④ 通信モジュール ⑤ 送信不良	3	2	60	●	●	●	

図7 FMEA作業のイメージ

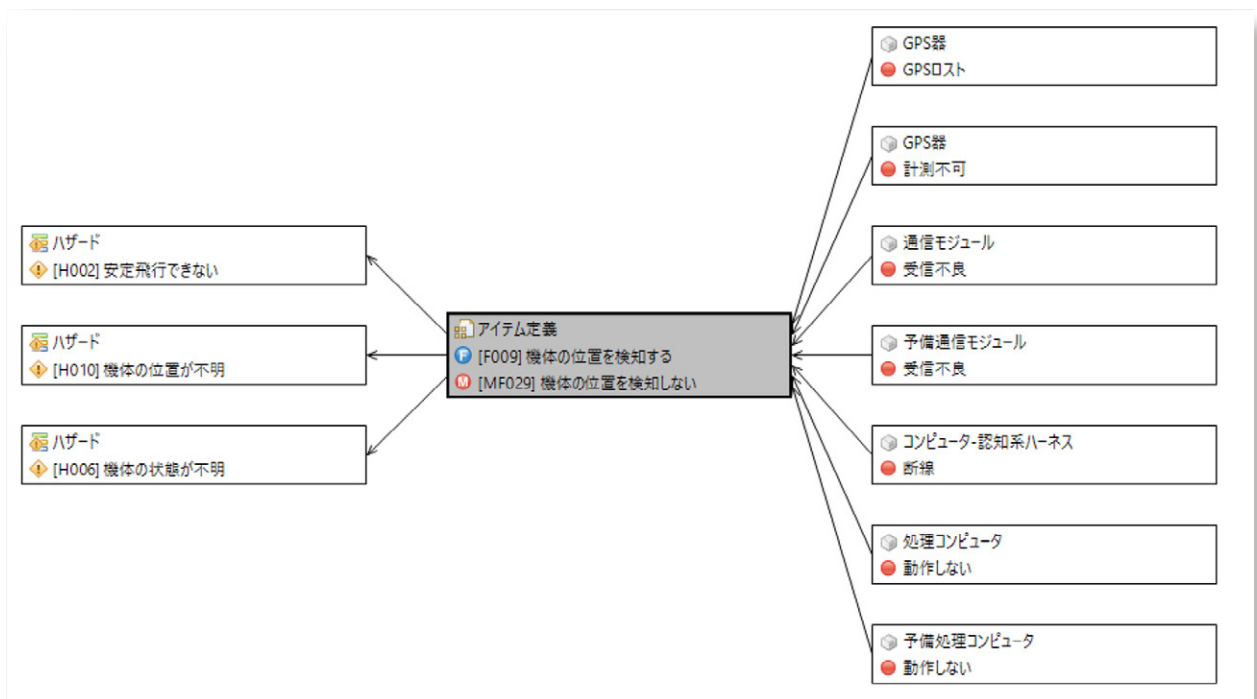


図8 故障ネットによる影響範囲の特定のイメージ

注意を払う優先順位を促している。3-3で議論したように、今回は深刻度の評価を調整しているため、影響度が強く出る傾向があるが、それを加味しても、故障原因間に優先順位の差を示すことはできた。

また FMEA では、システム内で発生し得る故障の原因-影響の連鎖を理解することが重要だ。本研究では図 8 のように機能/故障ケースによって影響するハザード、故障モードの依存関係を把握する故障ネットという手法で潜在的な故障の原因と影響範囲を特定した。

4. 考 察

機能安全分析活動をドローンに適応するにあたり、今回の研究には大きく 2 つの制限があった。1 つは、具体的な機体、構成する部品類により分析を行ったわけではないこと、2 つ目は、自動車業界の ASIL をドローン用に調整したことである。

1 つ目の制限に関しては、機能やハザードの洗い出しなどドローンの設計の経験に依存する考察や、機体を構成する部品のデータなど定量的な分析は次回以降、メーカーとの共同研究で取り組みたいと考えている。ツールを用いたことで、抽出した機能や要素や故障ケースなどといったアイテムを修正すると、一般的な文章ツールではフェーズをまたぐ際に、コピーやリンクミスなど信頼性が低下しがちであるが、今回利用した機能安全分析ツールでは、トレーシング機能を有しているため、信頼性を維持しやすい。今後の分析では、本研究で行った分析を土台にして、違和感の生じた部分への修正加筆で対応することが可能である。我々の一連の研究は、ドローン産業における機能安全分析の支援であり、今回や次回以降の研究で得た知見はできる限り公開していく。なお、機能安全分析を開発現場で活用していくには、その要求仕様の設定の際、今回紹介したような機能安全分析の手順を意識した設定を行うと、スムーズに機能安全分析を行うことができる。

2 つ目の制限は、今回の機能安全分析では、自動車業界の標準である ASIL を利用し、さらに、今回は第三者へのリスクが制限された運航計画であったため、ASIL を評価する要素であるリスク深刻度の判定も調整した。その結果、FMEA 分析の段階では、目的とする潜在的故障原因の優先順位づけはできたものの、どれも比較的影響度が高い結果となった。今後の研究においては、ドローン用の深刻度を定めて分析を行い、その影響を検証するとともに、ドローンの運航に最適な安全度水準の検証を行う必要がある。航空機には安全規格にて DAL (Development Assurance Level) という指標が利用されており[14]、しかしながら、航空機の中の人への危害を中心に考えられている指標であるため、ドローン運航の関係者および地上や空中の第三者のリスクを適切に考慮した指標作りが必要になる。なお、近年、世界の航空局が参加する JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned System) が作成した SORA (Specific Operations Risk Assessment) [15]には、計画するユースケースの地上や空中の第三者へのリスクを評価し、そのリスクに応じて機体システムやその製造者と整備者・操縦者・補助者や外部システム側での対応を指定する水準となる SAIL (Safety Assurance and Integrity Level) を提案している。SORA の目的は、その計画しているユースケースの運航許可を航空局が与えるかどうかの判断、あるいはこれまで民間航空機産業で蓄積された安全に対する知見を提供する視点で作られており、機体やシステムの設計者が保証するユースケースを通して危険が潜在していないかを確認し対応する目的の機能安全分析とは、目的が異なる。したがって、SAIL の概念をそのまま ASIL の代用はできないが、実現させる安全性は同じであるため、整合性を意識しながら、ドローンの機能安全分析の安全度水準を今後議論していく必要がある。

5. お わ り に

ISO 26262 をベースに、ドローンの無人地帯物流利用用途をユースケースに、機体に注目して主要な機能を抽出し、FTA, FMEA 等の各種機能安全分析を実施した。機能から抽出された要素について、採用部品に

依存する定量的な分析は今回行わなかったものの、ハザードの原因となる誤動作や故障ケースの洗い出し、そしてハザードの洗い出しからの誤動作や故障ケースの抽出など、機能安全分析手法を利用して、ハザード解析の網羅性を高めた。そして、各故障ケースとそのハザードの、深刻度、遭遇頻度、制御可能性を分析し、リスク相応の品質管理を促すための ASIL 判定を実施した。高い ASIL と判定された故障ケースとハザードについては、そのリスクを回避するための対策として、安全ゴールと、その達成計画である安全コンセプトを検討した上で、その対策について FTA, FMEA を実施した。部品に依存する定量的な分析ではなく、定性的な分析にとどまったが、リスク優先度分析は機能し、特に注意すべき故障原因を強調することができた。一連の分析は、適切に改良・拡張、あるいは多くの人々が利用できるよう、分析に利用した判断軸はコメントに残しており、また活動フェーズを通して整合性が取れるよう、リンク機能の充実した機能安全分析ツールを利用している。機能安全分析活動への理解を深め、ドローン産業における機能安全分析活動の開発および標準化につながる結果を残すことができた。今後は、ドローンのメーカーと共同で、実際の機体システムに対して定量的な、また航空法に即したユースケースについて機能安全分析を実施する予定の他、ドローン産業にとっての最適な安全度水準の議論などを進めたいと考えている。

投稿受付：2021 年 5 月 19 日

採録決定：2021 年 6 月 10 日

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（JPNP17004）の結果得られたものです。

文 献

- [1] <https://nedo-dress.jp/introduction/introduction-1-1-3>.
- [2] <https://wpo-altertechnology.com/functional-security-analysis-in-drones/>
- [3] 岡部康平, 岩田拓也：“ドローン（UAV）のリスクアセスメント標準化に向けて,” 計測自動制御学会システム情報部門 学術講演会, 2018.
- [4] <https://www.iec.ch/safety>
- [5] M. Borg, et al. : “Safely Entering the Deep: A Review of Verification and Validation for Machine Learning and a Challenge Elicitation in the Automotive Industry” *Journal of Automotive Software Engineering*, arXiv:1812.05389v1
- [6] 情報処理推進機構：“組込みシステムの安全性向上の勧め,” SEC Books, オーム社, 東京,
<https://www.ipa.go.jp/files/000005118.pdf>
- [7] <https://webstore.iec.ch/publication/22273>.
- [8] <https://www.rtca.org>
- [9] 中村裕子, 鈴木真二：“「空の産業革命」「空の移動革命」のキーワード“自動化”“自律化”の認証の壁と実現に向けた世界の取り組み,” 2020 年 68 巻 1 号 p. 8-14, https://doi.org/10.14822/kjsass.68.1_8
- [10] <https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/medini/>
- [11] 茂野一彦：自動車用機能安全規格 ISO 26262 の紹介, MSS 技報, Vol. 23. <https://www.mss.co.jp/technology/report/pdf/23-05.pdf>
- [12] <https://www.fides-reliability.org/en/node/6>
- [13] <https://webstore.iec.ch/publication/28554>
- [14] <https://www.sae.org/standards/content/arp4754a/>
- [15] 中村裕子, 鈴木真二：“米国初の航空運送事業認定に至る協議から我が国でのドローン宅配実現に向けての考察,” 運輸政策研究, Vol. 23, pp. 48-55, 2021

**中村 裕子**

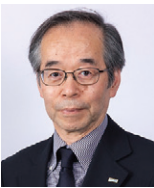
東京大学スカイフロンティア 社会連携講座特任准教授。国内自動車会社を経て、東京大学（航空イノベーション総括寄付講座）へ。2013年、工学博士（東京大学）取得、2017年8月より特任准教授。2019年2月現職。イノベーションマネジメント、ドローンリスク管理、低高度空域運航管理（UTM）、国際標準規格化の研究に従事。JUIDA 参与、日本無人機運行管理コンソーシアム事務局次長、ASTM International/SAE International/EUROCAE_ 会員。

E-mail : techhn@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

**土屋 武司**

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 教授。同専攻、博士（工学）取得後、航空宇宙技術研究所（現 JAXA）を経て、2002年同専攻専任講師。2007年助教授（後に准教授）。2015年より現職。航空機の飛行力学及び飛行制御、飛行ロボット（ドローン）、航空交通システムの研究に関する教育研究に従事。日本航空宇宙学会（フェロー）、日本機械学会、計測自動制御学会、AIAA（American Institute of Aeronautics and Astronautics）会員。

E-mail : tsuchiya@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

**鈴木 真二**

東京大学 名誉教授、未来ビジョン研究センター 特任教授。東京大学修士課程修了後。豊田中央研究所を経て、86年、工学博士取得後、東京大学助教授。96年、東京大学大学院教授（航空宇宙工学）。2019年4月現職。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、日本 UAS 産業振興協議会理事長、日本無人機運行管理コンソーシアム代表、GUTMA 名誉会員など。

E-mail : tshinji@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

**柏村 陽介**

サイバネットシステム株式会社 CAE 事業本部 CAE 第1事業部 エレクトロニクス技術部 技術第2課 課長。外資系半導体自動設計ソフトウェアベンダーを経て、2015年にサイバネットシステムに入社。2020年に電気系 CAD/CAE の知見を基に半導体含む機能安全分析のエンジニアとして従事。

E-mail : ykashiwa@cybernet.co.jp

**大坪 弘**

サイバネットシステム株式会社 技術本部航空宇宙技術部 部長。民間企業にて航空機開発～量産化を経験した後、2020年にサイバネットシステムに入社。同社の航空宇宙関連技術を担当。

E-mail : h-otsubo@cybernet.co.jp

欧州におけるリスクベースアプローチと我が国の無人航空機安全規則への示唆

佐々木 一^{*1}, 鈴木 真二^{*1}, 炭田潤一郎^{*2}

東京大学未来ビジョン研究センター^{*1}

技術士事務所炭田航空宇宙企画^{*2}

2022年より有人地帯における補助者なし目視外飛行（レベル4）が実現することが期待されるなか我が国の無人航空機の用途と可能性は拡大していくことが予想される。無人航空機の発展のためには既存の有人航空機が持つ安全基準との融和性を考慮しつつ、適切な安全管理とイノベーションの促進のバランスが取れるルールメイキングが必要となる。このような議論をするにあたっては先んじている諸外国の枠組みが参考になる。米国は先駆けてその運用環境を持っているが、欧州では2019年に無人航空機の規則をEU加盟国中心に統合化する枠組みが決定した。リスクベースアプローチとして3つのカテゴリを分類しつつそれに応じた安全認証基準を設けたことやパイロットに対する適切な訓練、オペレータや機体の登録などが特筆される。本稿では、まず欧州航空安全機関（EASA）が考える航空機リスクに対する考え方やその認証の位置づけについて整理する。さらに、これらの欧州の動きを元に我が国無人航空機に関する規制の考え方について議論をするものである。我が国の無人航空機の社会実装のためには安全規則に関する国際的なハーモナイゼーションはもとより、そのための官民連携が一層重要となる。

Keywords: 無人航空機, リスクベースアプローチ, 欧州航空安全機関 (EASA), レベル4, 安全規則

Risk-Based Approach in EASA and Implications for Unmanned Aircraft Safety Regulations in Japan

Hajime Sasaki^{*1}, Shinji Suzuki^{*1}, Junichiro Sumita^{*2}

Institute for Future Initiatives, The University of Tokyo^{*1}

Aerospace Project Planning^{*2}

Applications and possibilities of unmanned aerial vehicles in Japan are expected to expand further as “Beyond Visual Line of Sight, Populated Areas” (Level 4) is expected to become a reality in 2022. The development of unmanned aerial vehicles will require rulemaking that balances appropriate safety management with the promotion of innovation while considering compatibility with existing safety standards for manned aircraft. In this discussion, we can refer to the frameworks of other countries that are ahead of us. The U.S. was the first to have such an operating environment, and in Europe, a framework to integrate rules for unmanned aerial vehicles has been decided in 2019, mainly by EU member states. Noteworthy are the three categories of risk-based approaches with corresponding safety certification standards, appropriate training for pilots, and registration of operators and aircraft. In this paper, we first summarize the European Aviation Safety Agency’s (EASA) approach to aircraft risk and its certification criteria. This paper discusses Japan’s approach to the regulation of unmanned aircraft based on these European developments. To implement unmanned aerial vehicles in society in Japan, international harmonization of safety regulations, as well as the importance of public-private partnerships for this purpose, will become even more essential.

Keywords: Unmanned Aircraft System, Risk-based approach, EASA, Level 4, Safety rulemaking

1. はじめに

世界中で無人航空機の用途が広がる中、我が国では2021年6月11日公布の航空法改正[1]により2022年には有人地帯における補助者なし目視外飛行（レベル4）の実現が期待され、関係各所による環境整備も進みつつある。同時に新たな技術が社会実装される過程においては、安全な運用のための規制に関する課題の整理と議論が一層必要となっていく。適切な規制は、技術が社会受容を獲得する過程において不可欠であり同時に競争と強調を生みイノベーションを促進させる。無人航空機特有の問題としては既存の有人航空機制度との調和や活用といった視点も重要となり、産官学はもとより国際的なハーモナイゼーションを前提とした議論が重要である。このような観点について議論するにあたって、欧米をはじめとしてすでに先んじている枠組みについても参考にしていくことが肝要である。特に欧州ではEASA（欧州航空安全機関 European Union Aviation Safety Agency）により無人航空機の枠組みがEU規則2019/947、2019/945として制定された[2]。これはEU加盟各国の無人航空機制度をEASAが統合する方針で打ち出した枠組みであり、小型航空機無人機から大型航空機無人機までカバーできるリスクベースの考え方は我が国の無人航空機制度にも参考になる。本稿では、欧州における枠組みについて概要を触れつつ、我が国の無人航空機の発展にむけたルールメイキングについて議論をする。

EASAのUASに対する考え方は、社会に受け入れられる安全性と環境に対する保護のレベルを設定し、同時に無人航空機によって新しい産業が進化、革新、成熟するのに十分な柔軟性を提供するものである。そのためには有人航空に導入されているシステムを単純に移植するのではなく、より進歩的で柔軟なものとする必要があるとしている[3]。欧州で提案された枠組みはリスクベースアプローチに基づくシステム構築や大枠のカテゴリ分けとその運用方法に関するものである。このような流れは我が国の無人航空機の制度を議論するにあたって大きく参考となる。

2. EASAが要求する耐空性とその手続き

2-1 リスク評価の基本的考え方

リスクは、危害の発生確率とそれが発生したときの重大性の組み合わせとして定義される[4]。EASAはすべてのリスクが許容できるかどうかをもって安全性の基準としており、EASAにおけるUASのリスク評価の基本は、地上や空中での第三者に対するリスクを許容できる範囲にすることとされる[5]。UASの認証基盤たる安全性を確保するためには、機体や関連システムごとに運用の各局面で想定される発生要因を検討し、それに対する対策をフィードバックすることが要求されている。これは有人機においてすでに機体の安全性評価プロセスとして推奨されている方法である[6]。また、制度やリスクの考え方も現状の有人機制度を習ったものであり、そこではリスクをMinor（安全性を大きく低減しない故障など）、Major（緊急着陸につながるような故障など）、Hazardous（コントロール下の機体墜落故障など）、Catastrophic（地上の人命に関与しかねない墜落や他の航空機に危害を与えかねない暴走など）で分類している。

2-2 認証概念

一般的に航空機の安全に対する国際規則は1944年締結の国際民間航空条約（通称、シカゴ条約）の付属書（Annex）で規定され、シカゴ条約に基づき1947年に国際連合の専門機関として設立された国際民間航空機関（ICAO）が管理する。そのなかで、航空機は耐空性を有していることの認証を当局により受ける必要性を規定しており、また関与するシステム運用者、パイロット、空域監視者等に対しても資格認定を求めている。これは運用者（組織含む）の申請による認定された機関の認証対応によるものになるが、機体に関しては個々の機体の耐空性証明、型式ごとの型式証明、および例えば設計のみ対象の限定的証明等々であり、各国の民間航空局において類別ごとに航空法においてその要件が規定されている。

認証に関してはEASAでは、「製品、サービス、組織、または個人が、適用される要求事項に準拠してい

ることを認証機関が法的に承認すること」のように定義されている[7]。ここでいう認証とは、耐空性すなわち「意図された機能を達成するために安全な方法で動作する航空機、航空機システムまたはコンポーネントの状態」と、運用すなわち「与えられた環境の中で、航空機を運用することに関連するすべて」の2つの側面を有する。従って、認証状態とは「安全で信頼性の高い設計をベースとした全体システムが耐空性を有していること」はもとより「求められる設定運用空域、そこでの通信保持、関係者の資質要求、システム耐空性/安全性の保持等により、安心できるシステム運用を保持できる状態であること」が基本にある。この考えに基づき、各国の民間航空局（NAA）、欧州の EASA、米国の FAA などは、ICAO シカゴ条約で定められた航空安全規制と要件の実施を担う。安全規則は一般的に3つの視点、すなわち手続き規則（Procedural Rule：行政手続き、認証手続きなど）、設計基準（Design Standard：耐空性／認証仕様書など）、運用基準（Operational Standard：空域統合、メンテナンス、クルーの資格認定など）に分類されそれぞれの規則文書から構成されている。型式証明、耐空性証明、および例えば設計のみ対象の限定的証明等、Part 21 に準拠した CS21 を基幹とした有人機適用制度に同等の認証制度となっており、これを義務付ける規則類や多くの補足支援文書も整備されている。

航空規格開発組織（Standards Development Organizations：SDO）は、産業界、研究機関、運用ユーザー、民間航空当局の代表者を集め、さまざまなテーマの認証プロセスを支援するための合意に基づく規格を作成する。SDO には、RTCA、ASTM、SAE、EUROCAE 等の民間非営利団体があり、これらの規格は、民間航空当局によって承認され認証要求事項に準拠するための許容可能な適合性証明手段として引用されることがある。

2-3 無人航空機（UAS）の呼称

無人航空機を表す語は複数存在するが、EASA や FAA では無人航空機 UA（Unmanned Aircraft）およびそれを遠隔に操縦するための装置全般を含んだものの意として UAS（Unmanned Aircraft System）の呼称が一般的に用いられる¹。UAS はシステムに対する呼称であり機体はもとより遠隔操縦パイロット、システム運用者、空域/領域監視者等の関係者やそれに付随するものを含む。一方で、ICAO では RPA ならびに RPAS（Remotely Piloted Aircraft System）が用いられる。厳密には RPAS は UAS のサブセットであり、UAS には自律航行のものが含まれるのに対し RPAS には自律航行無人航空機は含まれないといった差異が存在する。ICAO がいち早く定義を定めたがゆえ、加盟国たる EASA 各国においても UAS と RPAS の併用を余儀なくされている。いずれもシステム全体を対象とする語であることに変わりなく、すなわち無人航空機の制度や仕組みを議論する上では個別要素ではなくシステム全体を対象とすべきことが分かる。UAS の定義はほぼ世界的に同一であり、本稿においても統一して UAS を用いる。

2-4 UAS の安全に対する姿勢の変遷

当初の EASA における UAS の安全に対する姿勢としては、UAS は有人機以上のリスクを持つことがあってはならないという考え方が基本にあった²[8]。その後 ICAO では人や他の航空機に危害を加える状況は排すべき³[9]という考え方が提示され、また 2015 年のリガ宣言では、現状の有人航空機の安全性と同程度のレベルを求めるべきである⁴という考え方が提示されてきた[10]。今回の EASA の枠組みでは運用の観点においても有人機航空分野と同程度のものにしていくべきであるということが挙げられた⁵[11]。この UAS の

¹なお FAA では“Unmanned”を“Uncrewed”にするといった用語の見直しが決まっている。これは無人航空機に関する FAA のアドバイザー委員会（Drone Advisory Committee）に設置されたジェンダー・ニュートラルな用語を検討するための作業部会（TG-10）で議論され 2021 年 6 月に承認されたものである。

²“A civil UAS must not increase the risk to people or property compared with manned aircraft of equivalent category.” [8]

³“A remotely piloted aircraft shall be operated in such a manner as to minimize hazards to persons, property or other aircraft...” [9]

⁴“The incremental integration of drones in the aviation system must not reduce the level of safety presently achieved in civil aviation” [10]

⁵“Considering the specific characteristics of UAS operations, they should be as safe as those in manned aviation” [11]

耐空性に対する考え方は現在世界の各機関において共通認識となっているが全体としてほぼ有人機と同等のリスク安全性をとろうとすることも共通認識とされている。実際に、UAS 故障の程度とその確率についても有人機と合わせた表現で関係づけをしている。

一般的に有人航空機の耐空性は機体、エンジン、プロペラなどを対象としたものであるがその目的は搭乗者の安全確保といった側面が強い。一方で UAS の耐空性は、地上の人物に対して危害を加えない安全なものであることおよび、空中の他の飛行物体に対して危害を加えない安全なものであることが要求され、有人航空機のそれよりも広い範囲が要求される。以上のことから、UAS においては、安全性レベルはもとより運用自体を有人航空機相当にするという考え方にに基づき、その安全性基準および認証手続きについて有人機と同じものをそのまま移植するのではなく、UAS 独自の安全性基準を設けるべきであるという考え方となっている。

2-5 UAS におけるリスクベースカテゴリ

EASA では UAS をそのリスクレベルに応じて 3 つのカテゴリ (Open カテゴリ, Specific カテゴリ, Certified カテゴリ) に分類し、各カテゴリに応じた認証手続きを規定している。以降それぞれの概要について示す。

2-5-1 Open カテゴリ

Open カテゴリの対象は最大離陸質量 25 kg 以下であり高度 120 m 以下の運用領域かつ空港や建造物から十分離れて運用することが前提となる。主に運用リスクが低い一般用途、ホビー、空撮用途が対象であり、Open カテゴリではフライトを開始する前に事前認証を要求しない。基本的に Open カテゴリは人口密集地帯の飛行や物資投下は不可であり、有視界飛行が前提となる (Follow me モードによる領域監視付きの場合の目視外飛行は許容)。Open カテゴリは飛行運用により A1, A2, A3 の 3 つのサブカテゴリが存在する。その概要は表 1 のとおりであり、A1, A2 は第三者近くの飛行であり、機体サイズで区分され、A3 は第三者を

表 1 Open カテゴリのサブカテゴリ (参考文献[13]を元に著者作成)

最大離陸質量	サブカテゴリ	運用制限	オペレータ登録	パイロット技能証明	年齢制限
250 g 未満	A1 (*A3 サブカテゴリでの飛行も可能)	原則、第三者上空は飛行禁止。飛行する場合であっても最低限にする必要がある。	不要 (トイドローンでなくカメラ・センサーが搭載されているものを除く)	訓練義務なし	なし
500 g 未満		群集の上空の飛行禁止。	必須	・ユーザーマニュアルの理解。 ・各国の定める訓練もしくはテストの完了。あるいは、A1/A3 サブカテゴリのオンライン試験の証明取得。	16歳以上
2 kg 未満	A2 (*A3 サブカテゴリでの飛行も可能)	群集の上空の飛行禁止。 第三者から水平方向に 50 m の距離をとること。		・ユーザーマニュアルの理解。 ・各国の定める訓練もしくはテストの完了。あるいは、A2 サブカテゴリのオンライン試験の証明取得。	
25 kg 未満	A3	人の近くや上空の飛行禁止。 住宅地、商業地、工業地から 150 m 以上離れること。		・ユーザーマニュアルの理解。 ・各国の定める訓練もしくはテストの完了。あるいは、A1/A3 サブカテゴリのオンライン試験の証明取得。	

(注：CE マーキングが義務化される 2022 年 12 月 31 日までの規則。以降は A1 の機体質量上限は 900 g, A2 の機体質量上限は 4 kg となる)

排除した領域での上限質量までの機体による飛行としている。また機体には登録番号、質量、運用、機体能力に応じた CE マーキング⁶によるクラス (C0～C4) の表示添付が必要となっている[12]。その要件の概要を表 2 に示す。C1, C2, C3 の機体に関しては飛行中に自己位置のリモート通知が義務付けられる。各サブカテゴリで使用できる機体クラスを表 3 にまとめる。

Open カテゴリの認証手続きは、適用機体システムとその運用に対しての安全性順守に対する申請者の自己判断によるものであり、基本的に運用を制限してリスクを許容範囲に収めようとするものである。Open カテゴリにおいてのオペレータおよびパイロットには必要な知識と技能が求められており、2-7 において整理する。また機体およびシステムに対しては認定された第三者機関による認証行為が今後求められることになる。

2-5-2 Specific カテゴリ

Specific カテゴリは Open カテゴリ以上のリスクを伴う飛行を対象とし、Open の上限を超える機体質量の機体や、CE マークのない機体の利用、120 m 以上の飛行、目視外飛行、群衆上空の飛行などが相当する。対象となる機体質量の上限は 600 kg である。Specific カテゴリでは、基本的には運航者は後述の SORA と

表 2 機体の CE クラスの主な要件

	C0	C1	C2	C3	C4
機体質量	250 g 未満	900 g 未満, または人頭部への落下エネルギーが 80 ジュール以下	4 kg 未満	25 kg 未満	25 kg 未満
速度	19 m/s 以下	19 m/s 以下	固定翼機を除き 3 m/s 以下の低速飛行が可能		ロストリンク支援以外の自律飛行を禁止
識別番号		識別番号			
リモート識別		リモート識別			
最大音響パワー (年次措置あり)		81 dB	81 dB + 質量により加算		
ジオアウェアネス機能		必要			
制御リンク保護			必要		
安全機能		必要			
突起物制限		あり			
動力		電動のみ			
機体強度要求		あり			
バッテリー残量表示		必要			
ライト装着		必要			

表 3 OPEN カテゴリにおけるサブカテゴリと機体クラスの関係

	C0	C1	C2	C3	C4
A1	OK	OK	NG	NG	NG
A2	OK	OK	OK	NG	NG
A3	OK	OK	OK	OK	OK

⁶ EU の法律で定められた安全性能基準を満たすことを示す表示。必要であれば第三者認証機関による検査を受ける[12].

呼ばれるリスク評価を実施したうえで、必要な認証を基本的には各国の航空当局から取得することが求められる。ただし、Specificにおいても比較的リスクが低い2種類の飛行に関しては、機体のクラス（C5およびC6）と標準シナリオ（STS-01, STS-02）が用意され、当該シナリオに対応する訓練・試験を経て申請ができる準備がなされている。二つのシナリオの概要を表4に整理する。

表4 Specific カテゴリにおける標準シナリオ

標準シナリオ	STS-01	STS-02
運航内容	Open カテゴリ A2 サブカテゴリにおいて機体質量が4 kgを超える場合。高度120 m以下。制御された都市部等での目視内飛行が該当する。	操縦者から補助者のない場合は1 km以内、補助者がいる場合は2 km以内を目視外で飛行させる。高度120 m以下。制御された郊外での物流などが該当する。
機体クラス	C5	C6
機体要件	Openでの機体要件に加え、高度情報の提供、緊急飛行終了機能、リンク喪失時の対応等が義務付けられる。固定翼機は排除される。最大質量25 kg以下で、機体規模は3 m以下。	C-5に加えて更に飛行範囲を超えないような手段およびプログラム飛行機能が求められる。最大質量25 kg以下で、機体規模は3 m以下。
操縦者の要件	オンラインの学科試験に合格し、必要な試験と実技トレーニングに合格する。	オンラインの学科試験に合格し、必要な試験と実技トレーニングに合格する。

標準シナリオに該当しない場合は、後述のSORAによるリスク評価を行い必要となる機体認証を取得するとともに、トレーニング方法を各国当局に提案して認証を得てトレーニングを実施することになる。この際、Openカテゴリから逸脱する領域について求められる安全性評価の適合性ならびに試験による検証とともに示した申請が必要となる。EASAは特に新規の設計やリスクレベルの高いものに対して関わるとしている。Specificカテゴリのオペレータや遠隔パイロットにはほぼCertifiedカテゴリに等しいレベルの資質や資格が求められるがLUC-Light UAS Operator Certificateという認証をオペレータが各国当局から取得すればオペレータの自己評価を各国当局が承認することが可能となる。

2-5-3 Certified カテゴリ

Certifiedカテゴリは機体規模3 m以上のものによる、人口密集地上空、貨物輸送、人の運搬などの運用に供する場合でありすなわちエアタクシーや輸送用途が対象となる。それゆえ有人航空機と同等レベルのリスク基準が求められるカテゴリである。認証の対象は、機体、エンジン、プロペラ、地上設備、C2リンク、などの各要素システムと当該UAS運用マニュアル等で耐空性に対する適合性とコンプライアンスを各々に受け、製造過程を含めて第三者チェックを受け、関連試験やシミュレーション等でその確認を受ける。またオペレータ、パイロット、空域監視社等関係者にはシステムレベルに応じた資格が要求される。EASAでは現在詳細を策定中である。

2-6 SORA

SORA (Specific Operation Risk Assessment) はSpecificカテゴリの飛行ミッションのリスク評価手法である。認可当局や運用責任者に承認される最終的な地上リスクや空中リスクのクラスを設定できるものであり、UASの最終システムの構築も目指したリスク分析による安全性評価手法である。なおSORAはリスクをシステムティックに判断できる手法としてJARUS (Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems) が検討および提案したものをEASAが採用した[14]。

SORAでは地上リスクGRC (Ground Risk Class) と上空リスクARC (Air Risk Class) の評価に基づいて全体のリスクを設定する。地上リスクGRCは、人、財産、重要インフラがUAによって打撃を受けるリス

クに関連しており、人口密度、操作の種類（VLOS または BVLOS）、UA のサイズに関する操作環境を考慮する。上空リスク ARC の判定では、主に空域内の有人航空交通の密度と構成から得られる、空域内で有人航空機に遭遇する確率を考慮する。GRC と ARC のそれぞれの値を取得した後、両者を組み合わせることで、ミッションの最終的な評価、いわゆる SAIL（Specific Assurance and Integrity Level）が決定される（表 5）。

表 5 SAIL の判定表（参考文献[15]をもとに著者作成）

		残存する上空リスク			
		a	b	c	d
最終的な 地上リスク	< 2	I	II	IV	VI
	3	II	II	IV	VI
	4	III	III	IV	VI
	5	IV	IV	IV	VI
	6	V	V	V	VI
	7	VI	VI	VI	VI
	> 7	Category C operation			

SORA はレベル設定を図 1 に示す 10 ステップで行い、各種のリスク軽減対策とその効果を反映してのシステム作りおよび結果をコントロールする。値が高いほど潜在的なリスクが高いことを意味する。SORA の過程ではリスクの軽減策が要求されるが、これらは具体例が提示されており、DAA（Detect and Avoid）システムの導入を始め、機器の追加や U-space サービスへの加入を含む運用の変更などによって SAIL を下げることができる。このように具体的に例示することでより安全なシステム構築を補助し、SAIL レベル V～VI に該当する高いリスクレベルの場合に対しても軽減を実施できる方向を示唆し、Certified カテゴリへの組み換えを含めた広い受け入れ態勢をとっている。

なお、SORA の代替手段としては次のようなケースが想定されている。ひとつは前述の通り、Appendix 1 に例示されている標準シナリオに合致する程度に明確にリスクが少ない場合である。この場合は申告書を提示することで SORA の代替手段とすることができる。また、定型的な利用に関しては SORA より簡素な PDRA（Predefined Risk Assessment）が示されている場合は、それを SORA の代替とできるとされている [16]。

SORA を用いることで、Specific カテゴリでも BVLOS での運用や人口密集地上空での運用を検討が可能となる。すべての運用を SORA や PDRA で分析し、結果として Certified カテゴリでの認定手続きを要する場合もありうるが、厳しい判定の場合は Specific カテゴリのまま認定のレベルを上げて許可していくことも可能である。認定の対応をできるだけやりやすい手続きのもとで認めていこうとする姿勢がうかがえる。ただし、現状の SORA が定性的評価にとどまるだけに、FHA/PSSA もともに求められる場合があり、結果として申請手続きを複雑化している側面もある。EAUROCAE が主催する UAS Airworthiness and Safety training では今後 SORA において議論すべき対象のひとつとして、リスク確率の定量化の可能性についても言及された。SORA は依然として開発途上にある。サイバーセキュリティや Unmanned Traffic Management (UTM)、また複数のドローン操作が行われることによって生じるリスクについて考慮されておらず、EUROCAE UAS Airworthiness and Safety training ではこれらの観点についても今後の Annex が期待されると指摘された。

SORA は無人機（UA）の運用者と無人航空機システム（UAS）の製造者の両者から入力求められるものであり、また当局との密な調整も可能にする点で運用安全性の獲得目標に対しての適合性を与える点で耐空

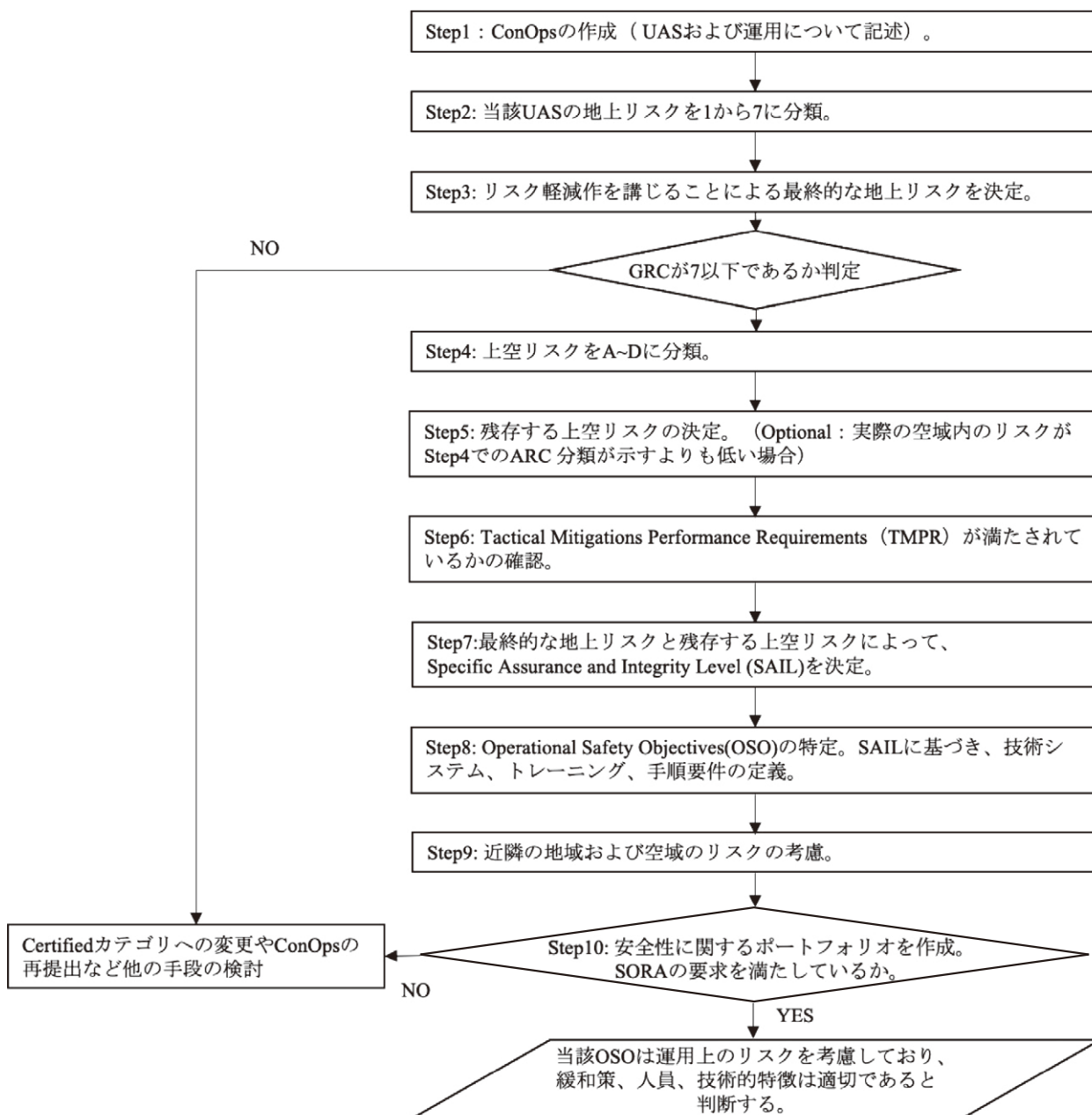


図1 SORAにおける手順概要 (参考文献[15]を元に著者作成)

性安全性評価の証査として使われる。また EASA には現状の応用展開での自由度と今後の方向性を配慮した概念の展開がいくつか見られるが、その中の一つとして U-space がある。U-space は、現時点では安全性などの懸念から禁止もしくは厳しい制限下にある無人航空機の運用の幅を段階的に広げるための計画である [17]。これは C-2 リンクやリモート ID と呼ばれる自己情報発信システム等にとどまることなく、近未来における有人機との干渉下での運用で求められる現行交通管制系との融合も想定したもので、UAS 進入禁止領域があればその境界も明示しながら、両者を含めた広い運用環境を提示し、そこでの天候情報等も含めた諸情報交換とそれらに基づく交通安全運航システムに繋がる概念を導くものになっている。

2-7 操縦者の資格

Open カテゴリと、Specific カテゴリの STS-01, STS-02 に関しては操縦者の資格が整理されているので、ここではその内容について整理する。操縦者の資格は、知識に関するものと、実技に関するものに大別されるが、Open カテゴリでは知識に関しては、機体のマニュアルを理解することとオンラインでの自主学習お

よびオンラインでの試験に合格することが必要で、人の近くを中規模（質量 4 kg 未満）のドローンを飛行させる A2 サブカテゴリではオンラインでの自主学習の後に各国の学科試験に合格することも求められる（表 6）。Open カテゴリでの実技は表 6 の内容を自主的にトレーニングする必要がある。Specific カテゴリの STS-01, STS-02 に関しては、知識として Open カテゴリでのオンライン学習・試験に加え、表 6 の二重丸箇所に該当する項目の学科試験に合格しなければならない。

表 6 学科トレーニング項目（参考文献[16]をもとに著者作成）

	A1, A3	A2	STS-1	STS-2
安全	○	○	○	○
空域管理	○	○	○	○
航空法	○	○	◎	◎
人間の特性	○	○	◎	◎
操作方法	○	○	◎	◎
UAS 知識	○	○	◎	◎
プライバシー	○	○	○	○
保険	○	○	○	○
セキュリティ	○	○	○	○
気象		◎	◎	◎
UAS 飛行性能		◎	◎	◎
地上リスク緩和策		◎	◎	◎
ナビゲーション				◎
目視外飛行				◎

○はオンラインの学習とオンライン試験、◎は学科試験

実技に関しては、表 7 に示す実技訓練の修了認定が求められる。学科、実技ともに認定書は各国当局が認めた法人が発行できる。

表 7 実技トレーニング項目（参考文献[16]をもとに著者作成）

	A1～A3	STS-01	STS-02
運用の準備	○	◎	◎
飛行の準備	○	◎	◎
飛行（通常時）	○	◎	◎
飛行（異常時）	○	◎	◎
飛行後の作業	○	◎	◎
目視外運航			◎

○は自主トレーニング、◎は認証が必要

STS-01, STS02 の標準シナリオでない場合は、各国当局にトレーニング方法を提案し、その認証を受け、トレーニングを修了することが必要となる。また、Certified カテゴリの操縦士はパイロットライセンスが要求される。

2-8 認証プロセスの今後の検討

前述の通り Open カテゴリにおいて基本的に申請は不要であり、適用機体システムと運用に関する申請者の自己申告に基づき運用を制限してリスクを許容範囲に収めている。機体を含めた適用機材については、そ

の製造者に対し第三者機関による通常の認証手続きを求めている。

一方 Specific カテゴリにおいては、Open カテゴリを超えるところについては求められる安全性評価への適合性を、試験等によるその検証とともに示した申請が必要であるという考え方である。その際運用者としての資格およびパイロットの要求レベルに応じた資格の提示やシステム運用マニュアルの添付が必要となる。Specific カテゴリでのリスクに対する考え方は、システム設計でのリスク軽減と運用でのリスク軽減を調和をとって実施しようとする領域といえる。これら一連の申請から認証に至るまでの期間に当局との協議によって適切な認証に導かれる。なおこの間に申請者側から問題を提起することに対する議論を柔軟に受け入れる姿勢をとっており、つまり議論によって新たな領域を広げていこうという姿勢である。

Certified カテゴリにおける認証手続きは現在検討が進んでいる段階だが、基本的には有人航空機同等の CS21 に準拠することが想定される。EUROCAE UAS Airworthiness and Safety training によれば、安全性の評価についても、有人機で用いられる FHA (Failure Hazard Analysis) で故障レベルを定義し、PSSA (Preliminary System Safety Assessment) でハード/ソフトに対するリスク軽減案の検討やその FDAL (Functional Development Assurance Level)/IDAL (Item Development Assurance Level) のレベル付け等を行い、SSA (System Safety Assessment) で FMEA (Failure Mode Effect Analysis)/FTA (Failure Tree Analysis) 等を用いての安全システムの構築やその最終安全性評価を実施していく手法が適用される。安全性評価には立ち合いも要求することからも有人機並みといえる。なお現在の EASA の公式な情報によれば、Certified カテゴリに関しては主に 3 つの運用タイプに分類して現在議論されている [18]。ひとつは、管制空域 A~C にて計器飛行 (IFR) で行われる貨物ドローンの国際飛行で、EASA の範囲内の飛行場への離着陸を対象とするものであり、これらを現時点では運用タイプ 1 と呼んでいる。例えばパリからニューヨークに貨物を輸送する無人の A320 などが該当する。また、U-Space 空域において事前に定義されたルートを使用した都市もしくは農村環境でのドローン操作の運用などに該当するものとして運用タイプ 2 と分類されている。これは個人の家や建物に来るエアタクシーや荷物配達サービスなどが該当する。さらにこの運用タイプ 2 と同様の運用ではあるものの、パイロットが操縦する運用形態は個別に運用タイプ 3 として分類されて議論される。これらの Certified カテゴリに関する改正案については近日アップデートが予定されている [18]。

3. 欧州における EASA 無人航空機制度に基づく我が国制度への考察

本稿では EASA の UAS 制度を構成している 3 つのカテゴリについて整理した。すなわち、現時点での UAS を容易に発展させ得てその展開が容易な Open カテゴリ、より大きな機体での運用領域を広げて、その使い方も発展的多様性を持つほとんどすべての UAS を対象にしながらも比較的緩やかな認可システムにした Specific カテゴリ、通常有人機並みの認証制を持つ Certified カテゴリである。これらカテゴリ種別の全体像を表 8 に示した。一方で、同様に我が国の今後予定しているカテゴリ種別の概要を表 9 に示した。

EASA における UAS の運用のあり方には有人航空機との融和性を認める姿勢があり、認証制度も有人機の完備した規則体系の上に立ち、現状の UAS 規則をクラス別に整備しようとしている。そのみならず不足するところについては UAS の解釈を付加しながらも有人機のそれを利用して進めている。そのようなことが、UAS 全体に対して柔軟に対応できているベースになっていると考えることができる。設計と運用のリスク低減策をバランスよく講じながら、リスクベースの対応法をとって Open, Specific, Certified の各分野での成立解を設定できるようになっている。最もリスクが低いとされている Open カテゴリひとつとってもその運用や機体サイズによって異なるサブカテゴリが用意されておりリスクに応じた考え方が随所に見られる。

我が国で検討されている分類の中で最もリスクが低いとされるカテゴリでは 100 g 以上の無人航空機に対して一律で運用制限を設定しており、また比較的厳しい基準でもある。欧州に限らず米国も最も小さいリス

表8 EASA カテゴリ概要 (参考文献[11]をもとに著者作成)

区分		集会上空	第三者上空	目視外	120 m 以上	危険物輸送/ 物件投下	人輸送	SORA 評価	機体	機体サイズ	速度	リモート ID	飛行認証	機体認証	操縦技能
Open	A1	×	○	×	×	×	×	-	C0	< 250 g	< 19 m/s	-	-	CE 規格	-
	A1	×	極力避ける	×	×	×	×	-	C1	< 900 g	< 19 m/s	必要	-		オンライン試験
	A2	×	人から 30 m 離れる	×	×	×	×	-	C2	< 4 kg	低速モードあり	必要	-		オンライン試験+ 各国の試験
	A3	×	居住地から 150 m 離れる	×	×	×	×	-	C3, C4	< 25 kg		-	-		オンライン試験
Specific	STS-01	×	居住地の制御された区域	×	空中リスク低い	×	×	I, II	C5	< 25 kg, < 3 m	< 5 m/s	-	必要	SC-Mid リスク	各国の試験+技能 訓練
	STS-02	×	過疎地の制御された区域	○	空中リスク低い	×	×	I, II	C6 (非電動も可)	< 25 kg, < 3 m	< 50 m/s	-	必要		各国の試験+技能 訓練
	SORA によるリスク評価により申請し許可を得る。						○	×	III, IV	機体は SORA の評価により必要な機能を実現し、申請許可を得る。 < 600 kg			必要		訓練方法を提案し承認を得る
Certified	SORA によるリスク評価で Certified 以上になった場合						○	○	V 以上	600 kg 未満は SC が発行、600 kg 以上の場合は検討中			必要	SC-Hi リスク	操縦ライセンス
							○	○					必要	検討中	操縦ライセンス

表9 我が国のカテゴリ次期制度予定 (改定航空法をもとに筆者が作成)

区分	機体	第三者上空	有人機空域	DID (人口密集地域)	夜間	目視外/目視内	人・物から 30 m 未満	イベント上空	危険物輸送・物件投下	機体認証	操縦免許 (16 歳以上)	飛行時の許可承認	機体登録 (リモート ID 含む)
カテゴリ I	> 100 g, < 25 kg	×	×	×	×	×	×	×	×	不要	不要	不要	必要
カテゴリ IIB	< 25 kg	×	×	○	○	○	○	×	×	必要 (第二種)	必要 (二等)	不要	必要
カテゴリ IIA	制限なし	×	○	○	○	○	○	○	○	第二種, なくても可	二等, なくても可	必要	必要
カテゴリ III	制限なし	○	○	○	○	○	○	○	○	必要 (第一種)	必要 (一等)	必要	必要

カテゴリーについては厳しい運用レギュレーションを設けておらず比較的自由度は高い。また、我が国におけるカテゴリーⅡはAとBに2つに分かれるものの、機体質量25kg以下に対しては一律の運用制限を課すものである。小規模な小型無人機の一律の規制は、今後の我が国の無人機産業育成の観点において一定程度の障害になる可能性は否定できない。なおカテゴリーⅢは基本的にあらゆる運用を許容する状況ではある。しかしながら、例えば質量や運動エネルギーによる区分や、過疎地での運用と東京都上空での運用が同じレギュレーションで問題ないかという疑問は残る。このような点において、リスクに応じたサブカテゴリーの検討などはEASAを参考にするという観点が議論に値するだろう。

あわせて我が国の分類は第三者上空への飛行に対して厳しい制限が存在し、事実上カテゴリーⅢ以外はその飛行が認められない。そのような観点で第三者上空に関して言えば欧米に比べてリスクセンシティブであるきらいはある。我が国では無人航空機に関連する事故が起きた際にはその内容を問わずセンセーショナルに報じられてしまうことも少なくない。軽微な事故であっても十分な対策はすべきであるが、リスクの内容によらず一律の規制を当てはめることは不自然でもある。あくまでリスクはその発生要因の発生確率とその影響の度合いであり、許容できる範囲にすることがリスク評価の基本であるというEASAの考え方は客観的なアプローチとして参考に値する。その反面、目視外飛行についての考え方には比較的寛容でもあるようにも見える。これは、物流による用途を想定した際に必要となるといったことからその必要性を広く認める方向性であるように見える。欧米ではむしろ目視外飛行については厳しいことがわかる。これは、テロ対策などの観点が背景として存在する可能性は否めない。EASAが参考になるとはいえその分類基準をそのまま参照にするのではなく、このような各国の背景を含めたリスクベースの運用レギュレーションという根本的な考え方は参考になる。

そのような観点からも、システム展開の自由な発想を損なわず比較的容易な認証にもつなげ得るSORAのリスクに応じた制度化は、我が国なりのリスク軽減策例の提示を加えた方向性の具体化としても検討に値するのではないだろうか。その場合、航空局が産業界との接点を有し有機的に連携することが求められることになるだろう。

我が国でも2021年3月に航空法改正案が閣議決定されたことを受けて、従来飛行が許可されなかったレベル4（第三者上空の目視外飛行）での飛行許可や、従来飛行ごとに許可承認が必要となっていたレベル3以下の飛行について機体認証、ライセンスの義務が課せられる。飛行範囲の拡大と同時に全体の規制の合理化・簡略化を図ることが狙いであり大いにその成果が期待されている。第二種機体認証やライセンスの手続きは国が直接的に実施するのではなく、国の指定を受けた民間機関による検査、試験、講習によつての実施が可能となる点は注目すべき点である。無人航空機はその性質から、新たな技術との親和性が高い。FBW（Fly By Wire）や電気推進はもとより、すでにマルチセンサや群制御、リモートドローン等の技術が現実的なものとなりつつ有り、デジタル・システムが追及されるなか5G環境を前提とすれば将来的には現在想定していなかったような技術の導入や用途の可能性は大いにありうる。それこそが無人航空機が有する可能性であるが、技術の革新の都度それぞれに合わせた認証の手法を細かく国が規定することは現実的に難しい。同時にまた耐空性審査においても検査方法自体が日々アップデートされていくため、その都度国が全ての審査方法を細かく規定することは現実的ではない。国としては確固たる基準は明確にする一方で、その基準を実現する手法についてはリスクによっては民間機関が主導するというパフォーマンススペースの考え方が重要となる。

もともと我が国の航空機の安全性基準は米国連邦規則に則って策定されものであり、すなわち元来1950年代前後の飛行運用や技術水準が前提となっていた基準といっても過言ではない。その後、機体性能、技術的な革新、社会的な枠組みの変化によりスペシャルコンディション、適用除外といった例外が増加してきたという経緯がある。従来の基準の記載はきわめて記述的であり自由度が許されていなかったことにより、曖

味性の排除には貢献するものの新たな試験方法を抑制してしまうというデメリットが存在していた。そのような背景のもと、2016年に米国連邦航空規則において小型機の規定（Part 23）がパフォーマンススペースに変更されたことに伴って、我が国も2021年に小型機（N類）の審査要領の改正がなされた。基準は明確にする一方で、その基準達成への手段は民間や申請側に委ねるというパフォーマンススペースの考え方が実装されることになる。この流れは、柔軟性を申請者に提供することで、安全性を高めるためのイノベーションを促進することが狙いであり、無人機の耐空性審査の方針に極めて大きな影響を与えるものである。

一方で我が国におけるパフォーマンス実装についての課題もある。欧米では、無人機の制度はもとより電動航空機やeVTOLに対する社会への理解が得られやすい土壌が存在している。ひとつには、いわゆるLSA（Light Sport Aircraft）を通して醸成されていた経緯が存在することに起因する可能性がある。LSA、UL（Ultralight aircraft）などは欧米では航空レジャーとして文化が醸成されていたため、整備やパイロットのライセンスの要求なども官民が一体となって早くから議論されてきた事実がある。欧米はパフォーマンススペースに至る前に、事実上LSA等がクッションとなって航空規格開発組織（SDO）による一定のルールメイキングがなされてきたといえる。実際、この規模の有人機の認証を多く出してきた経験があるからこそ、それらを無人航空機に適用調整することができるのであり、その背後には細かい調整も含めた蓄積が存在することが想定できる。我が国の場合、有人機のルールメイキングに関する実績が多くないこともあり無人航空機からその土壌を作らなければならない。従って文化的な観点においても航空利用／運送事業者と航空レジャー関係者の領域が欧米ほど近かったとは言い難い。特に省庁と航空レジャー関係者の間に有機的な連携の実績が十分とは言い難く、今後のその意味で我が国の産官の連携および国際的ハーモナイゼーションが一層重要となってくるであろう。

欧米ではSDOによって適合性証明手段が規格化されるように、民間非営利組織のプレゼンスが高い。一方で我が国ではそのような組織や動きにはまだ議論が始まったばかりともいえる。我が国では、官民協議会による議論を進めようとしているなかで民間自体が十分にまとまることもまた不可欠である。一般社団法人日本UAS産業振興協議会（JUIDA）などの民間操縦スクール管理団体はもとより、今後はより一層の民間非営利組織の積極的かつ総合的な連携活動が期待される。

4. ま と め

無人航空機の今後の活用の一つとして環境調査や災害時活用が大いに期待されている。2022年に予定されているレベル4の実現は、無人航空機業界はもとより地域社会にとってターニングポイントとなる可能性が大いにある。同時に、期待すべきではないがこれまで経験のなかった類の事故やハザードが発生してしまう可能性については無視できない。本文で述べたようにリスクをその頻度とその影響の兼ね合いにおいて客観的に把握することは必要最低限の安全管理策である。

本稿では2019年に制定された欧州の安全認証に関わる枠組みを参照しつつ我が国での今後の無人航空機制度についても考察した。EASAにおける仕組みは全体としても欧州らしさが垣間見え、特にSpecificカテゴリに高い柔軟性をもたせている点は特筆すべきである。すなわち、密集地域でのVLOSやそれを含むBVLOS運用などを含むあらゆる運用シナリオに対して、客観的に安全である（リスクが許容範囲内である）ということが提示できればそれを受け入れるという姿勢である。SORAにおいても、安全システム構築のための最終ガイドとして運用安全目標すなわちOperational Safety Objectives（OSO）の具体的な提示もあり、このようなEASAとしてのガイドが結果として無人航空機への参入障壁を下げることにもつながっている。参入障壁を下げイノベーションの促進を可能とする適切なリスクマネジメントのためにも、EASAのようなリスクに応じたカテゴリ分類のあり方は参考に値する。また、そのためには国がすべてを主導するだけでなく民間とのパートナーシップによるルールメイキングが一層重要になる。無論、さらにそれらを実現す

るには民間同士の連携は不可欠であろう。イノベーションのためには産官学はもとより国際的なハーモナイゼーションが必要だという声が上がって久しい。先行する規制のあり方を参照するとともに、日本の状況を世界に発信していくことも、よりレベルの高いハーモナイゼーションのためには必要となる。

技術の社会実装という言葉も市民権を得たが、技術を社会に実装するのではなく技術を社会と（ともに）実装するというのが適切な解釈であるべきであろう。異なる立場や文化に帰属する者同士が、同じ目標を向いていることを改めて意識することは、小型無人機の社会実装に推進に大きく寄与する。

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（JPNP17004）の結果得られたものである。また、本稿を構成する情報として EUROCAE が主催する“EUROCAE UAS Airworthiness and Safety training”による貢献が大きい。このトレーニングは欧州 UAS の耐空性認証における規則体系や認証手続きを含めたシステム認証の全貌を明確にするとともに、その根底とする安全性について UAS が持つリスクを明らかにしながら設計や運用での具体的対応手段の取り方と望ましいシステム構築の考え方を的確に把握しようとするものであった。EUROCAE および講師の Mr. Michael Allouche に謝意を示す。

投稿受付：2021 年 10 月 20 日

採録決定：2021 年 11 月 2 日

文 献

- [1] 航空法等の一部を改正する法律案, 衆議院 議案情報, 第 204 回国会 (常会), URL: <https://www.sangiin.go.jp/japanese/joho1/kousei/gian/204/meisai/m204080204060.htm>, 2021 年 10 月 8 日アクセス.
- [2] EASA, Civil Drones (Unmanned Aircraft), URL: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas>, 2021 年 10 月 8 日アクセス.
- [3] EASA, Concept of Operations for Drones: A risk based approach to regulation of unmanned aircraft, <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/concept-operations-drones>, 2021 年 10 月 8 日アクセス.
- [4] ISO/IEC GUIDE 51, Safety Aspects — Guidelines for their inclusion in standards, 2014.
- [5] EUROCAE, ER-19 UAS System Safety Assessment Objectives and Criteria Inputs to “AMC 1309,” 2018.
- [6] EUROCAE, SAE ARP4761: Guideline and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment, Society of Automotive Engineers, 1996.
- [7] EASA, ED-12C Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification, 2021.
- [8] EASA Rulemaking Directorate: Policy Statement Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft Systems (UAS), E.Y013-01, 25. August 2009.
- [9] ICAO Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation, Rules of the Air. November 2012.
- [10] RIGA Declaration on Remotely Piloted Aircraft (Drones) “Framing the Future of Aviation,” October 2015. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/default/files/modes/air/news/doc/2015-03-06-drones/2015-03-06-riga-declaration-drones.pdf>, 2021 年 10 月 8 日アクセス.
- [11] EASA, Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947, 2019.
- [12] EASA, Commission Notice — The ‘Blue Guide’ on the Implementation of EU Products Rules 2016, 2016.
- [13] EASA, Open Category — Civil Drones. URL: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/open-category-civil-drones>, 2021 年 10 月 8 日アクセス.
- [14] 中村裕子：無人航空機の目視外及び第三者上空等での飛行に関する情報提供, 無人航空機の目視外及び第三者上空等での飛行に関する検討会 (第 1 回), URL: https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk1_000058.html, 2021 年 10 月 8 日アクセス.
- [15] JURAS, JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA), Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems, JAR-DEL-WG6-D.04, JURAS, 2019, URL: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_

v2.0.pdf, 2021年10月8日アクセス。

- [16] EASA, Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and Regulation (EU) 2019/945), URL: <https://www.easa.europa.eu/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulation-eu>, 2021年10月8日アクセス。
- [17] 中村裕子：欧州のドローン運行管理システム研究開発動向から, *Technical Journal of Advanced Mobility*, Vol. 1, No. 1, pp. 14-23, 2020.
- [18] Certified Category — Civil Drones, EASA, 2021, URL: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones>, 2021年10月8日アクセス。



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。



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。



炭田潤一郎

元三菱重工業(株)航空機部担当部長。工学博士。西日本工業大学工学部機械システム工学科教授，(株)航空システム研究代表などを経て，現在は技術士事務所炭田航空宇宙企画代表。専門は飛行制御，落ちない飛行機。無人機関係では，QF-104事業取りまとめやテールシッタ小型無人機のサポイン開発などの実績。

騒音に励起されるストレスの評価のための 感性アナライザ適用可能性 ～空飛ぶクルマの社会受容性評価に向けて～

原 進^{*1}, 林 裕介^{*1}, 満倉 靖恵^{*2}, 上出 寛子^{*3}

名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻^{*1}

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科^{*2}

名古屋大学未来社会創造機構^{*3}

近年、空飛ぶクルマに関する技術が国内外で盛んに研究されている。しかし、空飛ぶクルマやドローンなどの社会受容性については、まだ十分に研究されていない。社会受容性に関する十分な検討を行っていないと、今後ドローンの産業利用や空飛ぶクルマの普及により到来する「空の産業革命」が健全に浸透せず、新たな社会問題が発生することも予想される。そこで、社会受容性評価の方法として二つのアプローチを組み合わせる方法を提案する。一つは感性アナライザを用いた脳波測定によるリアルタイム評価であり、もう一つはアンケートによる社会心理学的評価である。しかし現段階では、感性アナライザは社会受容性評価へ適用可能かどうかについての十分な知見が得られていない。そこで本研究では、感性アナライザの適用可能性を明らかにするための騒音の影響に関する基礎実験を行った。この実験では、感性アナライザを装着した被験者に騒音を聞かせ、同時にアンケートも実施した。そして騒音には4種類の音と3段階の音量を用意した。結論として、騒音に対するストレスの有無を判定するために感性アナライザを適用可能であることが確認された。また、両手法の結果の違いについても明らかにした。

Keywords: 空の産業革命, 脳波測定, 空飛ぶクルマ, 感性アナライザ, 騒音, アンケート調査, 社会受容性

Applicability of Kansei Analyzer for Noise-Induced Stress Assessment — Toward Social Acceptability Survey of Flying Cars —

Susumu Hara^{*1}, Yusuke Hayashi^{*1}, Yasue Mitsukura^{*2}, Hiroko Kamide^{*3}

Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University^{*1}

Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University^{*2}

Institute of Innovation for Future Society, Nagoya University^{*3}

In recent years, flying car (Urban Air Mobility, UAM) technologies have been actively studied in Japan and other countries. However, the social acceptability of flying vehicles such as UAM and drones (Unmanned Aircraft Systems, UAS) has not been extensively investigated. Social issues often arise when social acceptance is neglected. Thus, novel issues are expected to arise upon the advent of the so-called Aerial Industrial Revolution because of the industrial use of drones and the commercialization of flying cars. To overcome these issues, herein, the social acceptability of this revolution may be evaluated by two different approaches: real-time evaluation by electroencephalograph (EEG) measurement using a Kansei analyzer and social-psychological evaluation by using a questionnaire. However, at this stage, the applicability of the Kansei analyzer for the evaluation has not yet been fully addressed. Thus, in this study, an experiment was conducted

to verify the applicability of the Kansei analyzer. In this experiment, subjects answered a questionnaire after hearing some noises. The effects of four types of sounds and three levels of volume on the noise-induced stress levels were investigated. This study described the results and consideration about the experiment to evaluate noise-induced stress among participants and confirmed that the Kansei analyzer is applicable for such stress detection. Moreover, the differences of results in both approaches were revealed.

Keywords: Aerial industrial revolution, EEG measurement, Flying car, Kansei analyzer, Noise, Questionnaire, Social acceptability

1. Introduction

Currently, drones (Unmanned Aircraft Systems, UAS) have been adopted for several purposes: from observation, inspection, and logistics to leisure applications. Moreover, the broad-scale application scope of systems other than drones has been investigated; various companies, including aircraft and car manufacturers in Japan and other countries, are conducting extensive research on the flying capability and safety of cars as new mobile infrastructures (Urban Air Mobility, UAM, e.g., SkyDrive and CityAirbus) [1, 2]. Based on these advances, a phenomenon called the Aerial Industrial Revolution is expected to occur in the near future, with industrial drones and flying cars implemented and being used in the society. However, although there are many studies on the implementation of this revolution, its social acceptability has not been widely studied. Social acceptability, in this context, can be evaluated by determining how the emerging infrastructure (e.g., sound, wind, landscape changes, and psychological effect of having a heavy object flying right above the head) is accepted by the society in general, even if the performance and safety of flying cars are guaranteed. Therefore, the merits and demerits of the Aerial Industrial Revolution and its social acceptability should be addressed to develop standards and legal systems concerning the technical development and introduction of new infrastructures.

This study is focused on a candidate method for social acceptability evaluation that involves the use of a Kansei analyzer, which uses brain waves to evaluate Kansei in real time (developed by Dentsu ScienceJam Inc.) [3]. In addition, this method is combined with socio-psychological evaluations designed to acquire knowledge on habituation and convenience through questionnaires and its performance is evaluated. However, at this point, it is not clear whether the application of a Kansei analyzer is an appropriate means to evaluate the social acceptability of the Aerial Industrial Revolution. Therefore, this initial stage of research was focused on the social acceptability of a new flying mobile infrastructure. A study was conducted to evaluate whether a Kansei analyzer based on brain wave measurement is applicable to evaluate noises. The noise regulation for drones/UAS has been investigated as the European unified standard so far [4]. Moreover, the sentence evaluation of drones/UAS has been mainly studied by NASA. Its comparative study with vehicle traffic noise is well-known [5]. However, such an evaluation for UAM has not yet fully considered except for a few examples [6]. The final goal of this research is to develop a simulator for the social acceptability evaluation of flying mobile infrastructures. The purpose of this simulator is to combine sound and wind with images of flying cars, shown in Fig. 1, to reproduce the conditions wherein the new flying infrastructure is being implemented as a part of the Aerial Industrial Revolution. This simulator would, thus, facilitate a comprehensive evaluation of its social acceptability by brain wave measurement and through questionnaires and identify the issues that must be addressed to the achieve its implementation.

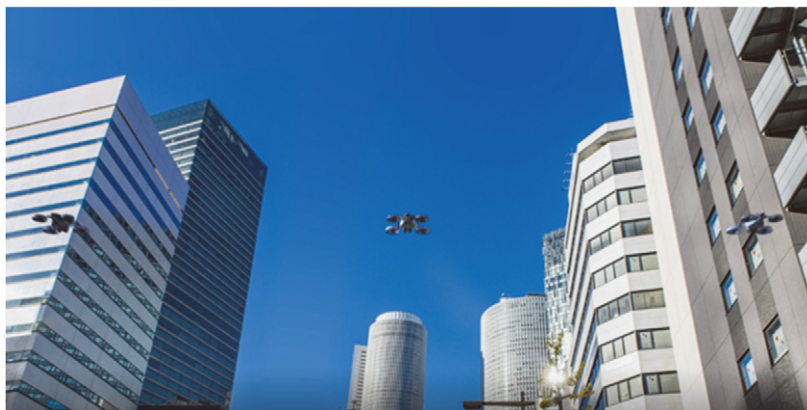


Fig. 1 Image of flying cars.

This study provides an overview of a Kansei analyzer and discusses the results of an experiment designed to evaluate noise-induced stress.

2. Kansei analyzer

2-1 Overview of Kansei analyzer

A Kansei analyzer is a simple brain wave meter that detects the level of five types of emotion: stress, concentration, preference, calmness, and interest, and it follows a common standard derivation method[7]. Conventional brain wave meters are not so easy to use because of various issues: they are typically expensive, large, cannot be used outdoors, require a considerable time to attach multiple electrodes, require the application of an electrolyte gel, and their application stresses the subject. However, the Kansei analyzer used in this study, which is a simple brain wave meter, has overcome many of these issues and has the following advantages:

- It is compact;
- It only requires one electrode to be attached to Fp1 of the international 10-20 system[7], which takes only approximately 30 s (the conventional type takes 30 to 45 min) ;
- It can be used by a single person anytime and anywhere;
- It does not require gel application;
- It can minimize the level of unnecessary stress on the subject while measuring brain waves.

Because of these advantages, Kansei analyzers have been used to evaluate various types of Kansei, such as the interior decoration of restaurants, choices on food menus, and level of comfort in cars[8, 9]. **Figure 2** shows the external appearance of a Kansei analyzer.

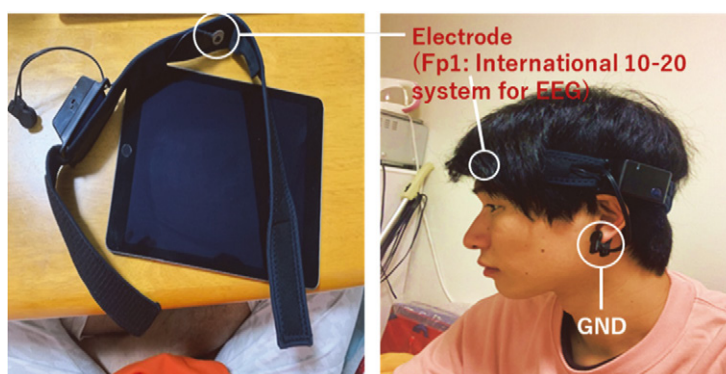


Fig. 2 Kansei analyzer (left: components; right: application on a subject) (EEG: electroencephalograph).

2-2 Internal systems of Kansei analyzers

A Kansei analyzer analyzes brain waves following three basic steps, as shown in Fig. 3.

(1) Filtering

A Kalman filter estimates and removes the noise. In addition, before the measurement starts, there is a calibration time of approximately 15 s, during which the data that exceed three times the standard deviation of the data is removed without being measured (in Fig. 6, the part of the graph where the line is broken corresponds to this).

(2) Feature amount extraction

The brain wave data obtained are subjected to signal processing techniques such as fast Fourier transform, and features such as the power spectrum are extracted.

(3) Pattern recognition

The extracted features are applied to internal data to calculate the Kansei index value. Here, “internal data” refers to data linking the volume of hormones caused by emotions and brain wave feature patterns, evidenced by both “Hormone amount → Brain wave pattern” and “Brain wave pattern → Hormone amount.”

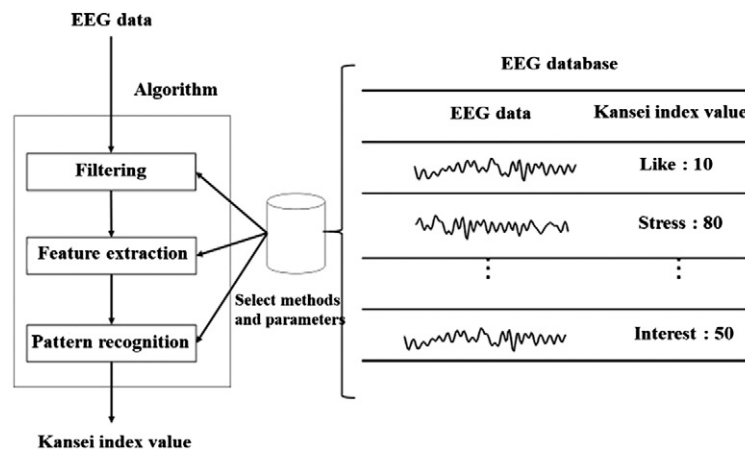


Fig. 3 Internal systems of the Kansei analyzer.

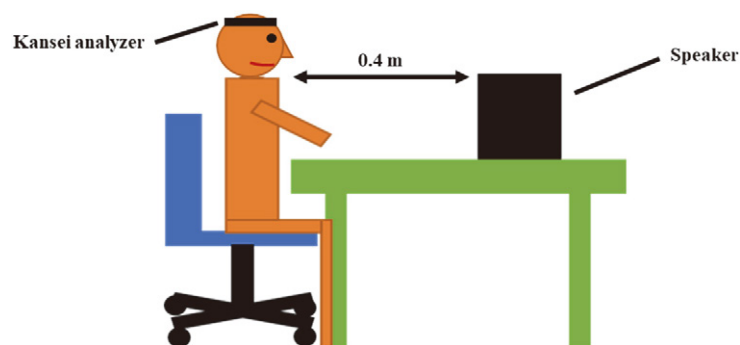


Fig. 4 Experimental environment.

3. Experiment to evaluate noise-induced stress

3-1 Purpose and method

The experiment described in this section aimed to investigate whether the Kansei analyzer could capture changes in the stress level due to noise and if the stress level changed differently according to the noise volume, sound quality, and habituation. In addition, a questionnaire survey was simultaneously conducted to

analyze conscious stress level changes and investigate differences between unconscious and conscious stress level changes.

The experimental environment illustrated in **Fig. 4** was prepared. In the experiment, the subject wearing a Kansei analyzer heard three levels of sound (high: 90 dB; medium: 80 dB; low: 70 dB), with intervals of 5 to 10 min played, from a speaker for 15 s in no particular order. Thus, their Kansei was measured by the Kansei analyzer, while they were asked to answer a questionnaire concerning the sound that had just been played. The subjects were five men of approximately 20 years old. Four types of sounds were played, each sound was submitted to frequency analysis in advance, and the output of ③ was adjusted to a specific frequency. The sounds played were the following:

- ① Flight sound of a helicopter (steady sound);
- ② Metallic alarm (unsteady sound);
- ③ Sound of ① adjusted to sound like ② (steady sound);
- ④ Rotor sound of a propeller (steady sound).

Here, the helicopter and the metallic alarm sounds are obtained from the sound source site ([10] and [11], respectively). The rotor sound is obtained by using the multicopter propeller in **Fig. 5** and corresponds to the sound when the same four propellers rotate at 2500 rpm simultaneously. The speaker volume is adjusted so that the average noise level is almost set to 70, 80, or 90 dB by using a noise meter in the subject position in **Fig. 4**. The 1/3 octave analysis results of the frequency of the four types of sound are shown in **Fig. 6**. The graphs on the left represent the results of the 1/3 octave analysis of the time average of the sounds, with the frequency [Hz] on the horizontal axis and the noise level (dB) on the vertical axis. The colored graphs on the right show the time history of the frequency and noise level, with time [s] on the horizontal axis, the frequency [Hz] on the vertical axis, and the noise level (dB) expressed with colors.

The analysis results indicate that the flight sound of a helicopter contains many sounds mixed other than the rotating sound of the propeller, and the difference in the noise level between frequency bands is small. Moreover, the alarm is a sound in which only the frequency peak is prominent, and the rotor sound of the propeller yields a gentle mountain-shaped spectrum with the peak frequency as the apex.

Furthermore, the items of the questionnaire were as follows:

1. I became surprised when I heard the sound;
2. I could not calm down while the sound was playing;
3. I felt stressed because of the sound while it was playing;
4. I felt stressed because of a factor other than the sound;
5. What factor other than the sound? (Free comment);

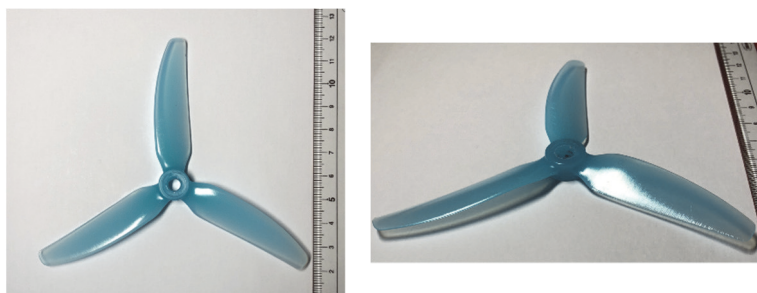


Fig. 5 The propeller for the rotor sound.

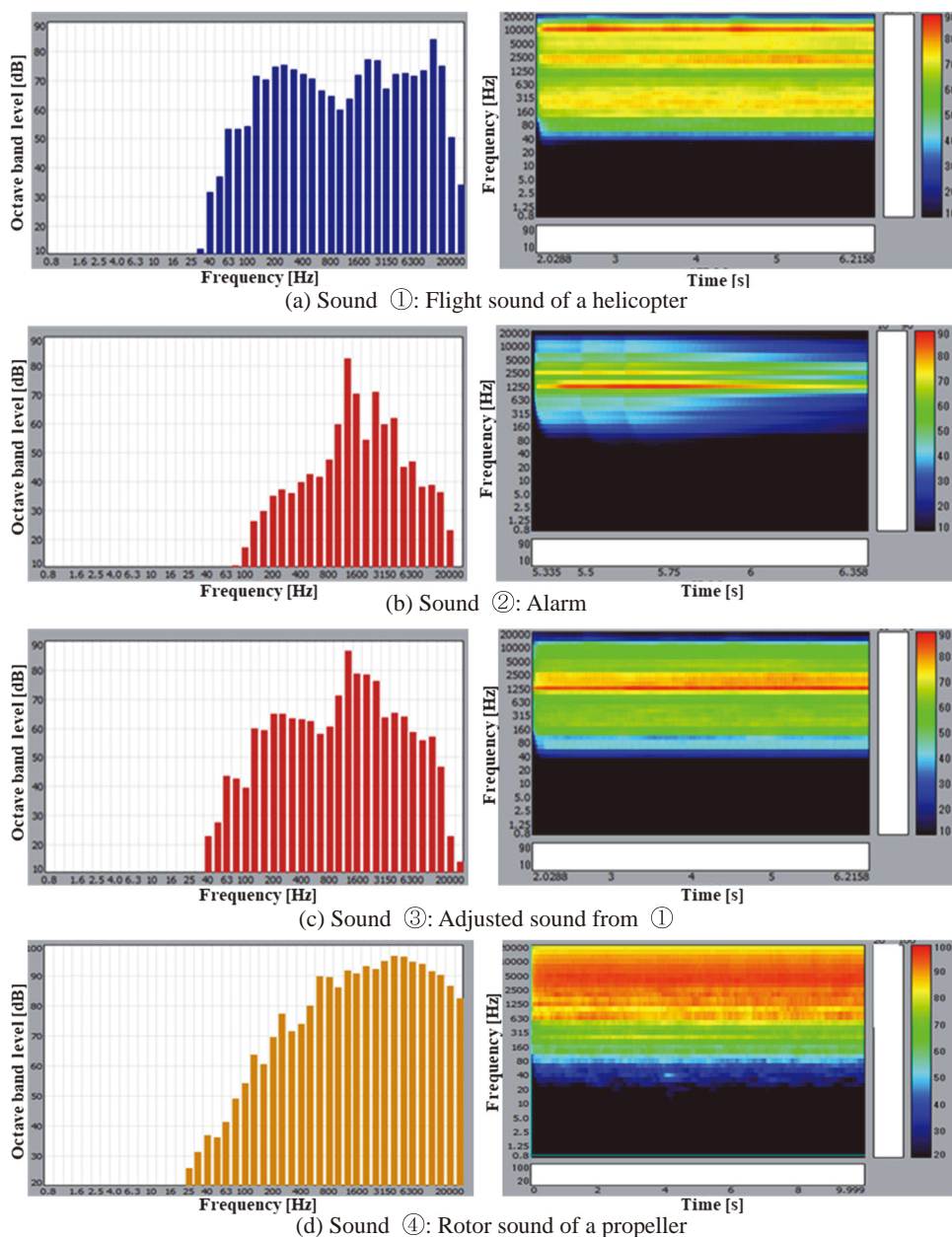


Fig.6 1/3 octave analysis results.

6. Suppose this sound is going to be played for 15 s. How long do you think you can tolerate it ? ;

7. Feel free to write your impressions and questions (free comment).

3-2 Results and considerations

• Results of Kansei analyzer

A part of the Kansei analyzer data obtained with this experiment is shown in Fig.7. The vertical and horizontal axes of the graph represent the stress index value, and time, respectively. The sounds were played for 15 s from the black dot on the graph, which comprises data of 1 min in total, including 30 s before and after the sound was played.

For the next step of the analysis, we chose the stress index value data with a clear reaction after the sound was played, as shown in the two graphs of Fig.7, and counted the number of reactions. However, as absolute stress index value was subjected to personal differences, it was necessary to evaluate the stress index value

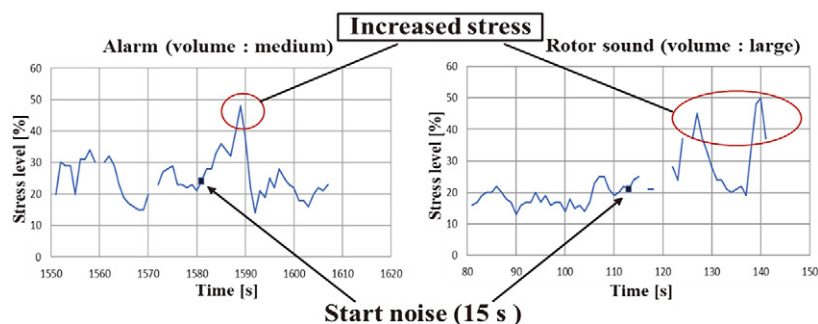


Fig. 7 Stress level data from Kansei analyzer.

before and after the sound in a relative manner. To determine whether there was a reaction or not, we compared the peaks before and after the sound and those that exceeded the stress index value level by 6% or more were considered as reactions. This threshold of 6% was set on the basis of previous experience. The experiment results obtained by the Kansei analyzer are summarized in Tables 1-3.

Regarding the types of sounds, Table 1 shows that the total number of reactions was higher for the alarm, followed by the rotor sound, helicopter sound, and the adjusted helicopter sound. The first question arises from

Table 1 Number of stress reactions (volume and sound).

	Number of stress reactions			
	Large (90 dB)	Medium (80 dB)	Small (70 dB)	Total
Alarm	4	3	2	9
Helicopter sound	3	2	1	6
Adjusted sound	2	1	1	4
Rotor sound	3	2	2	7
Total	12	8	6	26

Table 2 Number of stress reactions (order and sound).

	Number of stress reactions			
	First	Second	Third	Total
Alarm	4	3	2	9
Helicopter sound	5	0	1	6
Adjusted sound	3	0	1	4
Rotor sound	3	2	2	7
Total	15	5	6	26

Table 3 Number of stress reactions (volume and order).

	Number of stress reactions			
	Large (90 dB)	Medium (80 dB)	Small (70 dB)	Total
First	6	5	4	15
Second	2	2	1	5
Third	4	1	1	6
Total	12	8	6	26

the opposing results of the alarm and the adjusted helicopter sound. As shown in **Figs.6** (a) and (c), the two sounds have similar peak frequencies and roughly the same frequency band. Therefore, whether the sound is steady or unsteady may have caused this difference. The alarm is an unsteady sound, whereas the adjusted helicopter sound and other studied sounds are steady. Thus, the first observation is that “(I) **people feel more easily stressed with unsteady sounds than with steady sounds.**”

Considering the sound volume, **Table 1** clearly shows that the volume and the number of reactions have a positive correlation. Based on this, the second observation is that “(II) **people feel more easily stressed with higher volumes, at least in the range between 70 dB and 90 dB.**”

In addition, **Table 2** shows that the total number of reactions to the first sound was approximately three times larger than the second and third sounds. Furthermore, the highest number of reactions was also observed for the first time each sound was played. From **Table 3**, the same observation was applicable for the volume: the highest number of reactions was obtained the first time the sound was played. Based on this, the third observation is that “(III) **noise-induced stress is reduced by short-time habituation.**”

These results demonstrate that although people adapted to a sound, some stress reactions occurred even in the second and third times the sounds were played (**Tables 2 and 3**). In **Table 2**, the stress reduction effect due to short-time habituation seems weaker with the alarm and rotor sounds; this trend is also observed for the high volume in **Table 3**. In the case of the alarm, it may be due to the fact that it is an unsteady sound, and in the case of the rotor sound, some characteristics of its frequency may have influenced the number of stress reactions. Regarding the volume, we considered that the stress reduction effect due to habituation would be lower with “Low volume → High volume” than with “High volume → Low volume”. Thus, the fourth observation is that “(IV) **with unsteady sounds, sounds with some type of frequency-related characteristics (rotor sound), and sounds from small to high volume, the stress reduction effect due to short-time habituation is weakened.**” Note that the relationship between sound spectrum and stress should be more studied as a future subject.

Therefore, the evaluation using the Kansei analyzer demonstrates that there is a somewhat direct relationship between noise-induced stress and the manner the noise is presented.

• Results of questionnaire

Questions 1-4 were evaluated on a five-point scale ranging from “Completely disagree” (1) to “Completely agree” (5), and only Question 6 was evaluated with eight alternatives: “≤30 s, After 1 min, After 5 min, After 15 min, After 30 min, After 1 h, After 3 h, and ‘I cannot tolerate it.’” Then, the average result of each question was calculated. The experimental results obtained by the questionnaire are summarized in **Tables 4-7**. “Large, Medium, and Small” refer to the volume, and “First, Second, and Third” are the order the noises were played.

Table 4 Results of the questionnaire (Alarm).

Alarm	Average points					
	Large	Medium	Small	First	Second	Third
1	5	4	3	4	3.6	4.4
2	4	3.8	2.8	3.2	3.6	3.8
3	3.8	2.8	2	2.8	2.8	3
4	2	2	1.6	2	1.6	2
6	7.2	6	4.6	6	6	6.6

Table 5 Results of the questionnaire (Helicopter sound).

Helicopter sound	Average points					
Question number	Large	Medium	Small	First	Second	Third
1	5	4.6	4.4	5	4.6	4.4
2	4.8	3.8	2.6	4.2	3.6	3.6
3	4.8	3.4	2	3.8	3	3.4
4	1.6	2.4	2	1.8	2	2.4
6	7.6	6.2	4.8	6.4	6	6.2

Table 6 Results of the questionnaire (Adjusted sound).

Adjusted sound	Average points					
Question number	Large	Medium	Small	First	Second	Third
1	4.8	4.2	4	4.4	4.2	4.4
2	4.2	3	2.8	3	3.2	3.8
3	4	2.6	2.2	3	2.6	3.4
4	1.6	1.2	1.2	1.4	1.2	1.4
6	7.4	5.6	5.4	5.8	6.2	6.4

Table 7 Results of the questionnaire (Rotor sound).

Rotor sound	Average points					
Question number	Large	Medium	Small	First	Second	Third
1	5	4.4	4.2	4.8	4.2	4.6
2	4.6	4	3.2	4.2	3.8	3.8
3	4.4	3.8	3	3.8	3.4	3.8
4	2	2	2	2	2	2
6	7.4	6.6	6.2	6.8	6.6	6.8

By comparing the questions and the answer results, it was observed that all sounds had a positive correlation between volume and stress, but no correlation was observed between the order the sounds were played and the level of stress. In addition, when the sound volume was small, the average answer points for questions 2 and 3, except the rotor sound, were lower than 3. This indicates that when the volume was approximately 70 dB, except for the rotor sound, the subjects did not consciously experience considerable stress. In contrast, when the volume was 80 dB or higher, they reported being at least somewhat annoyed with all sounds. Thus, it is possible to argue that “(A) when people consciously experience stress, the volume is important, and the impact of short-time habituation is small” and that “(B) some sounds have frequency-related characteristics that can induce stress even at a low volume.”

The above-mentioned considerations revealed that the way people experience stress is different according to the two types of evaluation methods. Unconsciously, people tend to adapt to the noise and feel less stressed from it. However, consciously, the impact of adapting to a sound is small, and they tend to feel stressed whenever there is a loud noise around them.

4. Conclusion

A basic study designed to evaluate the social acceptability concerning the Aerial Industrial Revolution was performed. Initially, an overview of the application of Kansei analyzer was provided, followed by a discussion of the results of an experiment conducted to evaluate noise-induced stress using the analyzer. This real-time evaluation using a Kansei analyzer indicated a relatively direct relationship between the level of noise-induced stress and the way the noise is presented. Moreover, a conscious evaluation based on a questionnaire was performed, and the differences between experiencing stress in unconscious and conscious manners were discussed. As demonstrated in this study, each method of evaluation has its own characteristics. Thus, when evaluating the social acceptability of the imminent Aerial Industrial Revolution, it is important to conduct a comprehensive evaluation using multiple methods, as shown in this study. In the experiment performed herein, changes were made to the way the noises were presented; however, an analysis in which changes were made to the situation of the listeners was provided in a separate oral presentation by the authors[12].

Acknowledgment

The authors would like to thank Prof. Shigeru SUNADA from Nagoya University and his laboratory members for their valuable suggestions to this project. This study is supported in part by “FY2020 Innovation for Future Society Fund of Nagoya University” and the Foundation for the Fusion of Science and Technology (FOST).

Received: November 4, 2021

Accepted: November 29, 2021

References

- [1] <https://skydrive2020.com/>
- [2] <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html>
- [3] <https://www.dentsusciencejam.com/Kansei-analyzer/>
- [4] <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas>
- [5] <https://www.theverge.com/2017/7/18/15988248/nasa-study-buzz-drones-annoying-cars>
- [6] <https://www.easa.europa.eu/domains/urban-air-mobility-uam>
- [7] T. Hitomi and A. Ikeda: “Basic knowledge of EEG”, *Japanese Journal of Clinical Neurophysiology*, Vol. 4, No. 6, pp. 365–370, 2014.
- [8] Y. Mitsukura: “KANSEI detection and its application using the EEG—Widespread of KANSEI research in society”, *The IEICE Engineering Sciences Society Fundamentals Review*, Vol. 13, No. 3, pp. 180–186, 2020.
- [9] Y. Mitsukura, B. Sumali, T. Asano, H. Watanabe, Y. Tazawa, T. Kishimoto, K. Fukunaga and M. Mimura: “Simple stress quantitative evaluation for healthcare using daily KANSEI detection with EEG device—Relation between stress and healthcare”, *Modern Environmental Science and Engineering*, Vol. 5, No. 5, pp. 345–350, 2019.
- [10] <https://soundeffect-lab.info/sound/search.php?s=ヘリコプター飛行中>
- [11] <https://soundeffect-lab.info/sound/search.php?s=警告音1>
- [12] S. Hara, Y. Hayashi, Y. Mitsukura and H. Kamide: “Examination of applicability of Kansei analyzer to stress assessment for noise”, *Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 2P2–I08, 2021.

**原 進**

1996年9月慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻後期博士課程修了、博士（工学）。日本学術振興会特別研究員、カリフォルニア大学バークレー校訪問研究員、豊田工業大学工学部助手・助教を経て2008年から名古屋大学大学院工学研究科。現在同航空宇宙工学専攻教授・専攻長。

E-mail: haras@nuae.nagoya-u.ac.jp

Susumu Hara

Susumu Hara

He 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.

E-mail: haras@nuae.nagoya-u.ac.jp

**満倉 靖恵**

博士（工学）・博士（医学）1999年4月徳島大学工学部知能情報工学科助手、2001年岡山大学専任講師などを経て2011年4月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科准教授。2018年4月より同教授。2019年4月より同医学部兼任教授。生体信号解析、脳神経科学、精神疾患の研究に従事。IEEE、日本高次脳機能障害学会などの正会員。

E-mail: haras@nuae.nagoya-u.ac.jp

Yasue Mitsukura

Yasue Mitsukura received Dr. Eng. and Dr. Med. from the University of Tokushima and Keio University Japan. From 2007 to 2010, she was an associate professor at the Tokyo University of Agriculture and Technology. Since 2011, she has been an associate professor, and is currently a professor at Keio University, Kanagawa, Japan. Her research interests are bio-signal analysis (EEG, EMG, EOG, ECG, GSR, and fMRI) and brain-computer interfaces. She is a member of SICE, IEEJ, RISP, and IEEE.

**林 裕介**

2021年名古屋大学工学部機械・航空宇宙工学科を卒業。現在は名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻に所属。

Yusuke Hayashi

Graduated from Nagoya University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, in 2021. Currently a member of the Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University

**上出 寛子**

2008年に大阪大学大学院人間科学研究科にて博士（人間科学）。現在は、名古屋大学未来社会創造機構にて特任准教授として、社会心理学的な観点から先進技術の社会的受容に関する研究に従事。

Hiroko Kamide

She received Ph.D. Degree in Human Sciences from Osaka University, Japan, in 2008 and is a designated associate professor of Institute of Innovation for Future Society in Nagoya University. Her current research topic is social acceptance of innovative technology from a social psychological approach.

無人航空機運航リスクアセスメント手法 SORA の 国内実証実験への適用 ～ケーススタディ：新上五島町での無人ヘリコプター物流～

中村 裕子^{*1}, 坂本 修^{*2},
佐藤 一郎^{*3}, 中島 徳顕^{*3}, 高田 淳一^{*3}, 石井 啓吾^{*3}, 田中 秀治^{*3}, 久根崎将人^{*3}
東京大学^{*1}
ヤマハ発動機株式会社^{*2}
日本航空株式会社^{*3}

無人航空機のパイロットと運航許可を与える規制局の間で、その運航が社会が許容できるレベルにリスクが抑制されていると適切に確認し合うコミュニケーションツールを目指して、欧米等の航空局が参加するJARUS (Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems) は、SORA (Specific Operation Risk Assessment) のガイドラインを2017年に発行した。欧米でその利用が始まっている中、そのガイドラインの理解を深め、また無人航空機の社会実装に有益な示唆を期待して、ケーススタディを行った。具体的には、2020年に行った無人地帯補助者なしBVLOS (Beyond Visual Line of Site) の物流飛行実証にSORAを適用した。実証段階から本格的な社会実装に向けて軽減策の必要なリスクを抽出することができたとともに、実装に向けて必要な環境整備に関する示唆も得ることができた。

Keywords: リスクアセスメント, SORA, ドローンの運航管理, BVLOS

Application of Specific Operation Risk Assessment (SORA) to a Japanese UAS Delivery Demonstration

Hiroko Nakamura^{*1}, Osamu Sakamoto^{*2}, Ichiro Sato^{*3}, Tokuaki Nakajima^{*3},
Junichi Takada^{*3}, Keigo Ishii^{*3}, Shuji Tanaka^{*3}, Masato Kunizaki^{*3}
University of Tokyo^{*1}
Yamaha Motors Co., Ltd.^{*2}
Japan Airlines Co., Ltd.^{*3}

The Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems (JARUS), a group of aviation authorities from the United States, Europe, Japan, and other countries, has published SORA (Specific Operation Risk Assessment) in 2017, with the aim of providing a communication tool for operators of unmanned aircraft systems (UAS) and regulators. SORA is to facilitate them to confirm that risks are controlled to an acceptable level of society. We applied SORA to an already permitted UAS delivery demonstration at BVLOS (Beyond Visual Line of Site) approach in Japan in order to deepen the understanding of the SORA and to obtain useful suggestions. SORA highlighted risks that need to be mitigated from the demonstration phase to the full-scale social implementation of UAS, and also necessary improvements for the operational environment in Japan.

Keywords: Risk assessment, UAS, Drone delivery, BVLOS

1. はじめに

無人航空機については、日々進化する機体やシステムを背景に、様々な運航環境や運航目的での活用が期待されている。そうした無人航空機の活用を、安全で安心に、さらに低コストおよび短時間で社会に実装していくため、従来の有人航空機の機体認証という時間とコストのかかる枠組みの延長での無人航空機耐空性基準の開発だけでなく、リスクを制限した運航、あるいは、その運航の総合リスクに応じた安全運航体制をオペレーターに求めることによって比較的短期間低コストでの付与が期待される運航許可の仕組みの構築が、諸外国で行われている。そこで、オペレーターと、許可を与える規制当局の間で、その無人航空機の運航が、社会が許容できるレベルにリスクが抑制されていると適切に確認し合うコミュニケーションツールの作成を目指して、欧米日等の航空局が参加する JARUS（無人航空機システムの規則に関する航空当局間会議、Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems）は、SORA（特定運航リスクアセスメント、Specific Operation Risk Assessment）のガイドラインを作成した。2016年から作成作業を開始し、2017年に第一版が発行され、2021年現在までに第二版が発行されている[1, 2]。

SORAは、総合的なシステム安全リスクの評価モデルをベースとしていて、念頭にある無人航空機の運航の地上および空中の第三者へのリスクレベルの評価を定性的に行えるマトリクス等を提供する[3]。その上で、該当するリスクレベルを許容範囲¹に収めるために、どのような運航体制や機体の性能、装備品・地上装置をどのような保証方法で実装することが求められるのかのガイドラインを提供する。オペレーターは、ガイドラインに従って要求を満たす、あるいは運航環境や方法をリスクの低い方向へ適宜修正することを行い、最終的にその運航が許容範囲なりリスクまで低減されたことを、当局との間で確認する。

欧州では2019年に発行された Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947の中で、Article 11が求める運航リスクアセスメントについて、SORAを Acceptable Means of Compliance (AMC) として同年に発行された文章の中で紹介している[4]。その他、海外では、オーストラリアの航空局などで、事故調査などでも利用されている[5]。また、ASTM International や EUROCAE など無人航空機の社会実装に向けて重要な産業規格を提供している国際標準企画団体[6]における規格作成の場でも、SORAを意識した規格の作成が行われている（例えば、ASTM International のパラシュートの規格[7]や EUROCAE での FHA 規格など[8]）。国内では、SORAは運航の許認可を求める際に必要な手法ではないが、SORAの理解は国内産業の国際競争力樹立にも重要だと考えられ、また、様々なバックグラウンドを持ったメーカーやオペレーターから構成されている国内の無人航空機産業において、運航のリスクの理解やしかるべき対策のあり方の標準化は必要であり、SORAから有益な示唆を得られるのであれば部分的でも活用が望まれる。そこで、SORAのケーススタディを実施し、その手法の理解を深め、また日本での無人航空機活用拡大に向けての考察を行うこととした。

2. SORA の概要

2-1 SORA に関わる諸条件

SORAの適用範囲は以下のように原文で指示されている[1]：

- あらゆるクラスとサイズの無人航空機の運航、および、あらゆるタイプの運航（実験、研究開発、試験を含む）に伴うリスクを判定することを意図したものである。特に、脅威やリスクの評価が求められるが、耐空性証明は必要としないリスクカテゴリー（Specific カテゴリー）の運航への適用に適しているが、それだけに限定されるものではない。

¹ SORAでは、1飛行時間あたりの致死率を 1×10^{-6} レベルに抑えることを念頭に、ただし定量的な手法の実施は、幅広いバックグラウンドのオペレーターなどを考慮すると、ハードルが高いと判断し、定性的に扱える指標を提供している。附属書で、定性的なアプローチへの批判もあるが、附属書にて考え方を明示しており[2]、運用される国で調整ができるようになっている。

- 無人航空機同士の衝突に関わるリスクは、今後の改定版で含まれる予定である。
- 空中衝突の末のさらなる第三者への影響や、人員の輸送、武器などの搭載物に伴う脅威は SORA のスコープから除外されている。
- 耐空性に関わらない限りは、例えば、違法な電磁干渉からの保護など、セキュリティに関する側面は、SORA 手法の適用範囲外である。
- プライバシーやファイナンスの側面は、SORA 手法の適用範囲外である。
- 運航に伴うリスクが許容可能な範囲まで抑制された形で運航できると示せたのであれば、運航要件の一部免除などに SORA 手法を利用することができる。
- SORA に加えて、オペレーターは SORA 手法が必ずしも対応していない他の関連する規制要件に準拠する必要がある。

SORA ではリスクを、SAE ARP 4754A [9] に定義されているように、ある損害 (harm) の発生頻度 (the frequency of an occurrence) と深刻さ (Severity) の組み合わせとしている。そして、SORA では、注目する損害は、

- 地上第三者への致命的な傷害
- 空中の第三者への致命的な傷害
- 重要施設への損害

といった、一時的なもので命に関わるものとし、長期間にわたって毒性のものを排出するような慢性的な損害は評価から除いている。ただし、地域社会の分断や環境への損害など、新たな損害を評価の対象として含むようアレンジを加えることは可能である。

2-2 SORA ステップ

SORA 原文で紹介されている図 1 の SORA 手順全体像のように SORA には 10 段階の作業ステップがあるが、SORA を解説するオーストラリアの研究者のまとめた概要図 (図 2) [10] を合わせて見ることで、その全体像の把握がしやすいと考え、ここに紹介する。

SORA では Step #1 で運航コンセプト (ConOps) を整理し、その運航に関わる地上および空中第三者リスククラス (それぞれ GRC [Ground Risk Class], ARC [Air Risk Class]) を Step #2 および #4 で、マトリクスを利用して評価する。この段階で判断されるリスククラスは初期 GRC および初期 ARC とされ、その定性的な評価が、実際の運航と異なる場合に、オペレーターは Step #3 および Step #5-6 にて、その調整を行い、意図する運航の最終的な GRC および ARC を特定する。具体的な例は、ケーススタディの中で説明する。

Step #7 では、Step #6 までで特定された、意図する運航の第三者へのリスククラスから、求められる安全の保証と整合性のレベル (SAIL: Specific Assurance and Integrity Levels) を導く。Step #8 では、特定された

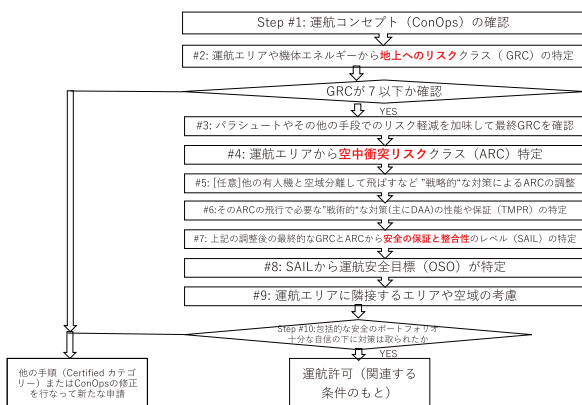


図 1 SORA の手順 [1]

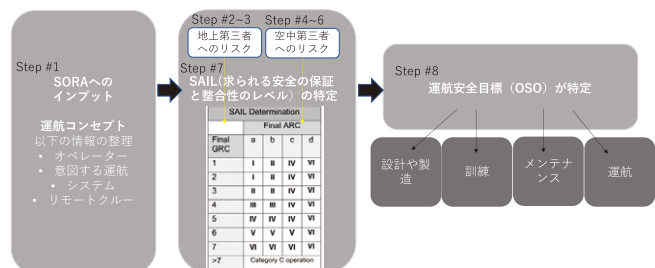


図 2 SORA の手順の概要図 [10]

SAIL に応じて運航安全目標（OSO:Operational Safety Objectives）が設定される。オペレーターは、そこで指定される、設計や製造、訓練、メンテナンス、および運航に関わる安全活動とそのロバスト性に対応する。対応が難しい場合には、オペレーターは運航コンセプトを見直して再度 Step を回していくこととなる。具体的な例は、ケーススタディの中で説明する。

Step #9 では、無人航空機あるいは外部システムに、隣接する地上エリアや空域に悪影響を及ぼすような空域の逸脱を発生させるような不具合の可能性がないことを確認する。Step #10 では、Step #9 までの SORA 活動を、その中で求められたエビデンス等も合わせて、取りまとめる段階である。その取りまとめを通して、オペレーター自身、あるいは当局や管制機関と、その運航の安全性について確認する。

2-2 ロバスト性

SORA で一番特徴的なものは、ロバスト性のコンセプトだ。SORA の手順の中では、特定されたりリスクに対する軽減策について、求められるロバスト性が指定され、具体的な策については自由度を持って提案できるようになっている。指定されるロバスト性は、具体的には、その軽減策により“どれだけ安全性が高まるか”を表す 3 段階の整合性（integrity）レベルと、その“安全性の向上はどれくらい確かなのか”を表す 3 段階の保証（assurance）レベルから構成される（表 1）。

指定された整合性レベルを得るために必要な活動についての詳細はここでは割愛する。保証レベルについては、簡単に表現すれば、

- 低レベル：オペレーターが“必要とされる安全性は得られた”と宣言する。
- 中レベル：オペレーターが、テスト結果や経験の証明書など、安全性は得られたと支持する証拠を準備する。
- 高レベル：然るべき第三者が、その整合性の達成を確認している。

といった活動が求められる。できるだけ当局の関与を減らし、自分たちでの安全管理が推奨されるアプローチともいえる。なお、対応する産業規格の準備など進まない分野があれば、ロバスト性を決定するプロセスを当局が定義すべきだと SORA 原文では述べられている。

表 1 ロバスト性の決定

	低保証	中保証	高保証
低整合性	低ロバスト	低ロバスト	低ロバスト
中整合性	低ロバスト	中ロバスト	中ロバスト
高整合性	低ロバスト	中ロバスト	高ロバスト

3. ケーススタディ

3-1 目的

国内で飛行許可の得られた運航コンセプトに対して、SORA であれば、運航者に対しどのような要求を導くのか。本章では、SORA の理解を深めるため、現在国内各地で進められている物流用途での無人航空機の飛行実証実験の 1 例に対して SORA のステップを適用する。

3-2 ケース概要

筆者らは、2020 年 11 月に長崎県において、無人ヘリコプター（表 2、図 3）を利用した補助者なし目視外飛行を伴う物流実証実験を計画および実施した。島内物流、離島間物流、本土間物流の 3 ルートを設定（図 4）し、島内／離島間ではコロナウイルス検査で用いられる検査手法に基づく検体と日用品、本土間では輸血用血液と鮮魚の輸送を行うため、危険物輸送の許可も取得した。離陸時、着陸時は現地で目視内での操作だが、巡航時は、衛星通信を利用して東京より遠隔操作を実施するため、補助者なし BVLOS（目視外

表2 使用機体

製造者	ヤマハ発動機株式会社
名称	FAZER R G2
全長	3.6 m × 0.7 m × 1.2 m
メインローター径	3.1 m
機体本体重量	80 kg
ペイロード	35 kg (燃料 6 L)
航続距離	90 km (衛星通信使用時)
航続時間	100 分
最高速度	72 km/h
燃料	レギュラーガソリン

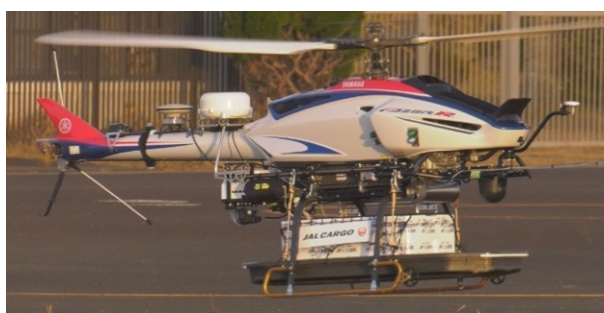


図3 使用機材



図4 運航ルート (出典：地理院地図)

飛行、Beyond Visual Line of Site) の許可も取得した。2020年11月3日から12日まで、1日最大2ルート6便で計42便を計画し、就航率79%、総飛行距離1,216 km、総飛行時間28時間27分を記録した。

3-3 SORA 分析

3-3-1 SORA Step #1

運航コンセプトをまとめるにあたり、SORAのAnnex A1)を利用して、対象機に関わる運航関連情報と技術関連情報を、マニュアルの情報などを参考に整理した。ここでは紙面の都合上割愛する。

3-3-2 SORA Step #2

初期GRCを表3から特定した。太字で記載されているGRCが今回の運航に該当するものであるが、異なる運航シナリオを含むフライトの場合、最も高いGRCを選ぶこととなり、ここでは、海上でのBVLOS

表3 無人航空機の初期GRCの特定[1]

最大の直径→	1 m	3 m	8 m	8 m 以上
典型的な運動エネルギー	< 700 J	< 34 kJ	< 1084 kJ	> 1084 kJ
運航シナリオ				
VLOS/BVLOS で管理グラウンドエリア上空	1	2	3	4
VLOS, まばらに人が住んでいる地域	2	3	4	5
BVLOS, まばらに人が住んでいる地域	3	4	5	6
VLOS, 有人地帯	4	5	6	7
BVLOS, 有人地帯	5	6	8	10
VLOS, 集会の上空	7	NA	NA	NA
BVLOS, 集会の上空	8	NA	NA	NA

飛行を含むため、GRC=4 と評価した。

3-3-3 SORA Step #3

Step #2 のマトリクスは、飛行時間あたりの故障率をどこまで下げべきか（GRC が高ければ高いほど、故障率を避ける必要がある）を簡易に求めようとするものであり、1 飛行時間あたりの致死率を 1×10^{-6} に固定し、落下エリアの人口と投影面積から、それを求めようとしている[10]。厳密には、落下する無人航空機に晒される曝露確率と衝撃を受けて死にいたる致死率も運航コンセプトごとに変わるはずである。SORA では表 4 が Step #3 で用意され、GRC を調整することができる。本ケースでは、飛行ルートから飛行高度である 150 m 以上の距離を、漁船を含む第三者から水平方向に取る。SORA では飛行高度と同じ距離を離すことをデフォルトとしており、M1 ではロバスト性無し (0) となる。同じく、パラシュート等は搭載していないため M2 は無し (0) に、そして、航空局のガイドラインに則った緊急対応策を万が一の際は取ることであり M3 は中ロバスト性 (0) になり、その結果 Step #3 では GRC は変化しなかった。

表 4 無人航空機の初期 GRC の調整[1]

ロバスト性			
地上へのリスクの軽減策	低/無し	中	高
M1—地上のリスクを抑制する戦略的軽減策 (危険にさらされている人の数を減らす手段)	<u>0</u> : 無し -1: 低い	-2	-4
M2—地上への衝突の衝撃軽減策 (衝突時に人が吸収するエネルギーを減らす手段)	<u>0</u>	-1	-2
M3—オペレーターが検証し、有効な状況の緊急対応策 (ERP) の実行	1	<u>0</u>	-1

3-3-4 SORA Step #4

Step #4 では、図 5 より、計画する運航環境より初期 ARC を特定する。この表は、有人航空機との遭遇率の考慮を容易に行うために作成されており、厳密な調整は Step #5 や Step #6 だけでなく、航空局と実際の空域利用データを利用して討議することが必要とされている。今回のケースでは非都市上空非管制空域での運航で ARC-b と特定した (3-3-5 も参照のこと)。

3-3-5 SORA Step #5

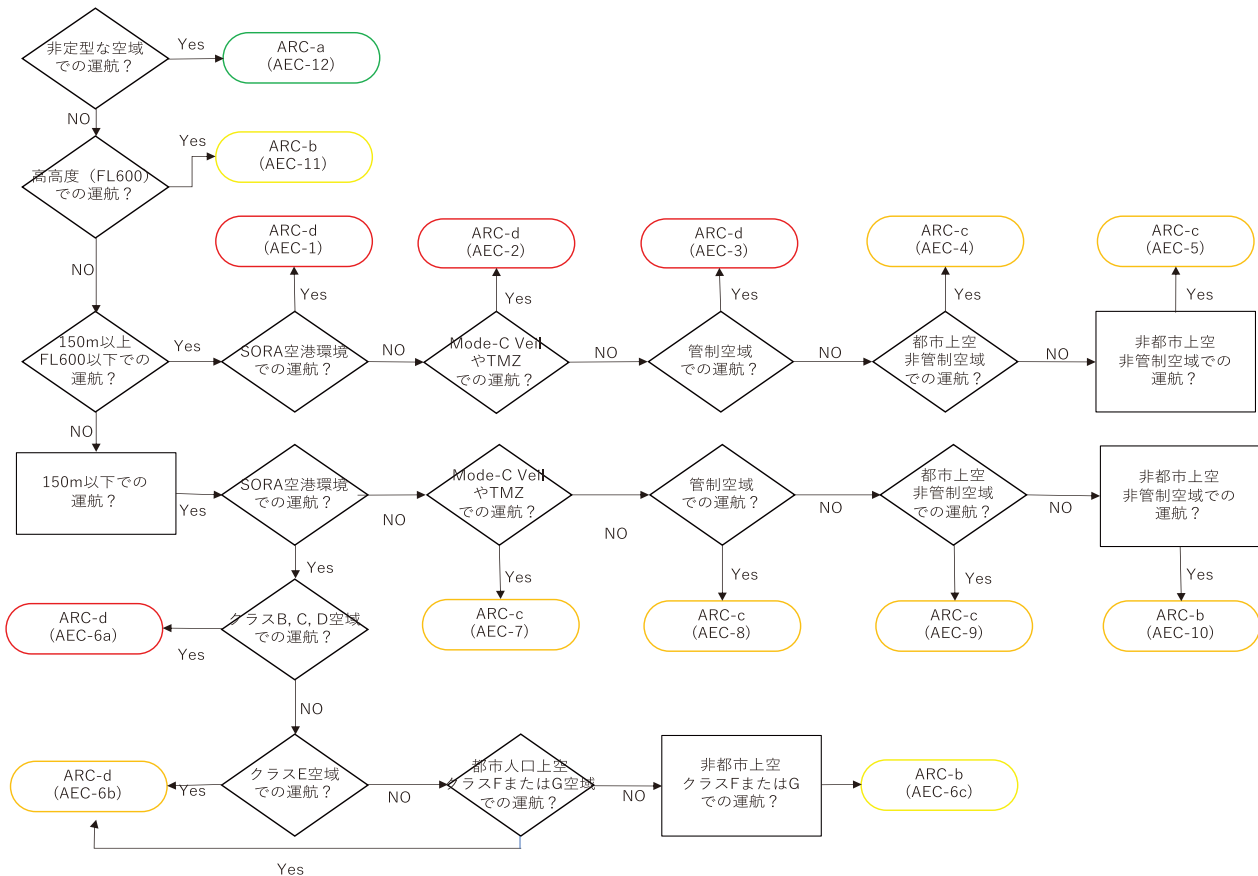
図 5 の分類が実態を表していない、不適切と考える場合には、Step #5 を行う。これは任意の手順である。オペレーター、当局、および管制業務提供機関が適宜連携して、ARC を調整する。JARUS[1]によれば、ICAO 第二附属書セクション 3.2[11]や各国国内法において、有人航空機および無人航空機は、他の有人航空機から「十分に離れて衝突を回避する (remain clear and avoid collision)」ことが要求されており、無人航空機を有人航空機と同じ空域で運航するには、

- 航空域で安全に運航ができることを保証する安全要件
- 上記の見張り義務を遵守する要件

両者を満たす必要があるという。詳細な記述は割愛するが、今回、4 つ用意された離発着上の一つは小値賀空港だが、定期便の利用がなく運航頻度が極端に低い空港であり、さらに事前に小値賀空港だけでなく長崎空港や海上保安庁、警察、消防、地元自治体と調整を行っており、実証期間中に有人航空機と遭遇確率は極めて低い (ARC-b クラス以下) と判断した。

3-3-6 SORA Step #6

Step #6 では、ドローンが離陸後に取れる、ドローンの有人航空機との衝突リスクを下げる“戦術的な”軽減策を検討する。戦術的軽減策は、次の 2 つのアプローチに分類できる。

図5 無人航空機の初期 ARC の特定[1]²

- VLOS (目視内飛行, Visual Line of Sight) アプローチ: 遠隔操縦者および/または監視者が人間の視覚を使用して航空機を検出し, 十分な距離を保ち, 他の航空機からの衝突を回避するための行動をとる。
- BVLOS (目視外飛行, Beyond Visual Line of Sight) アプローチ: 人間の目を代替する手段を利用して, 他の航空機との距離を保ち, また衝突を回避する。

オペレーターは, 状況認識を高めるための追加の手段を検討することはより好ましいが, SORA では, VLOS は, すべての ARC レベルの衝突リスクを許容可能レベルまで抑制できる軽減策と見なしている。今回は離発着場を除き, BVLOS 飛行を行う。SORA では, BVLOS 飛行を行うにあたり, その ARC に対応した衝突リスクを許容可能レベルまで抑制するための戦術的対策に求められる性能 (TMPR, Tactic Mitigation Performance Requirement) を提示している。表 5 は ARC-b に対応する TMPR であり, 低ロバスト性³での達成を要求している。

3-3-7 SORA Step #7

これまでに特定した GRC および ARC から, 表 6 を用いて SAIL を導く。今回のフライトは SAIL=III になった。

² Mode-C Veil: ADS-B out (従来のレーダーよりも高い精度で自機の位置情報を外部に発信するシステム) を搭載した航空機がほとんどとなる混雑空港 (クラス B 相当) の半径 30 NM (約 55.6 km), 高度 10,000 feet (約 30,500 m) の空域。

TMZ: トランスポンダーの装備が義務化されている空域。

³ 整合性について, 1 飛行時間あたりの有人航空機との接近確率を 10^{-2} を目安に設定しており, その保証のあり方を自己宣言で十分としている。

表 5 ARC-b クラスの運航に求められている衝突回避機能と TMPR[1]

検知	<p>検知対象の空域にある航空機のおおよそ 50% をオペレーターが検知できると期待する。申請者は、次の方法などを利用して、飛行を予定する空域を航行する可能性のある航空機のほとんどを把握している必要がある：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ リアルタイムの航空機追跡サービスの利用 ➤ 低価格の航空機追跡システムの利用 ➤ 航空無線の視聴ほか
意思決定	<p>オペレーターは、衝突回避のスキームの書類を作成し、どのような手段を利用して航空機を検知し、回避のための意思決定にどのような手順を踏むのかを明確にする。遠隔操縦者が、他の検知情報に頼るのであれば、言葉の定義 (phraseology) も記載しなくてはならない。例えば、</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ オペレーターは、航空機が 3.7 km (2 NM) 先を横切り、300 m 以下を運航しているのであれば、直ちに降下を開始する。 ➤ 監視要員は、航空機を見つけた場合に“降ろせ！降ろせ！降ろせ！”という言葉を使用する。
指示	<p>C2 リンクの遅延、つまり、遠隔操縦者がコマンドを送り、機体が発行するまでに必要な時間が 5 秒を超えない。</p>
実行	<p>機体が近くの木や建物、インフラ、または地上より 60 m 以下程度まで降下すれば十分と考えられる。機体が、運航高度からこうした高度まで 1 分以内に降下できなければならない。</p>
フィードバックループ	<p>遠隔操縦者が、航空機の検知に電子的手段を利用する場合、その航空機の情報 (たとえば、位置、速度、高度、トラック) の遅延や更新間隔の情報も提供されること。5.5 km (3 NM) の距離を閾値とした場合、5 秒の更新間隔と 10 秒の遅延程度であれば良いと考えられる。</p>

表 6 SAIL の特定[1]

最終 ARC				
最終 GRC	ARC-a	ARC-b	ARC-c	ARC-d
1	I	II	IV	VI
2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
> 7	機体認証プロセスの必要な運航 (Certified カテゴリー)			

3-3-8 SORA Step #8

3-3-7 で特定した SAIL を用いて、安全運航のために取られるべき活動と、求められるロバスト性を特定する。

表 7 は、SAIL III に対応する、SORA の提供する、無人航空機の安全な運航のために有益な、これまで使用されてきた一般的な活動のリストで、多くの専門家の経験を収集したものだという[1]。この表では、それぞれの活動に対し、O は任意、L は低ロバスト性での実施、M は中程度のロバスト性での実施、H は高ロバスト性での実施を推奨している。SORA ではさらに、各 OSO に対して、各ロバスト性に対応するための要件を設けているがここでは紙面の都合上割愛する。

3-3-9 SORA Step #9

このステップでは、無人航空機が制御不能な状態に陥った際に、隣接する地上エリアおよび／または空域にもたらされるリスクへの対処を考える。隣接する地上エリア、空域が運航する地上エリアや空域より高い

表7 SAIL III の運航に推奨される運航安全目標 (OSOs) [1]

	無人航空機に関する技術的な問題	
#01	オペレーターが適切な能力を有している, または能力が証明されている	M
#02	能力のある, または承認された事業者により無人航空機が製造されている	L
#03	能力のある, または承認された事業者により無人航空機が整備されている	M
#04	当局が認定した設計規格に従って無人航空機が開発されている	O
#05	システムの安全と信頼性を考慮して無人航空機が設計されている	L
#06	運航に適した C3 リンク性能を有している	L
#07	運航コンセプトとの整合性を保証するための無人航空機検査 (製品検査) が行われている	M
#08	運航手順が定められ, その妥当性が確認され遵守されている	H
#09	フライトクルーの訓練が行われて技量が維持されていて, 異常事態にも対処できる	M
#10	技術的問題からの安全なリカバリーができる	M
	無人航空機運航を支援する外部システムの機能低下	
#11	無人航空機運航を支援する外部システムの機能低下に対処するための手順が定められている	H
#12	無人航空機運航を支援する外部システムの機能低下に対処できるように無人航空機が設計されている	M
#13	無人航空機の運航を支援する外部サービスが運航に適したものになっている	M
	ヒューマンエラー	
#14	運航手順が定められ, その妥当性が確認され遵守されている。	H
#15	リモートフライトクルーの訓練が行われて技量が維持され, 異常事態にも対処できる	M
#16	複数クルー間の調整がうまくできる	M
#17	リモートフライトクルーは運航するに適した状態だ	M
#18	ヒューマンエラーからの飛行エンベロープの自動保護	L
#19	ヒューマンエラーからの安全なリカバリーができる	L
#20	ヒューマンファクター判定を実施済みで, HMI (Human Machine Interface) がミッションに適したものであることが確認されている	L
	運航に不利な条件	
#21	運航手順が定められ, その妥当性が確認され遵守されている	H
#22	リモートフライトクルーが, クリティカルな環境条件を識別して, それを避けるように訓練されている	M
#23	安全運航のための環境条件が定められていて, 定量化可能な状態になっていて, 遵守されている	M
#24	悪い環境条件を想定して無人航空機が設計され, 相応しい (qualified) と評価されている	M

GRC や ARC を持ちうるかどうかに応じて, 無人航空機あるいは外部システムに, 運航空間を逸脱させるような故障確率やソフトウェアやハードウェアに関する設計要件が追加されるが, 今回は対象ではない。

3-3-10 SORA Step #10

最後のステップでは, 前節までで検討を行ってきた

- 初期 GRC を抑制するための対策 (Step #3)
- 初期 ARC を抑制するための戦略的軽減策 (Step #5)
- 最終 ARC に対応する戦術的軽減策 (Step #6)
- OSOs (Step #8)
- 隣接するエリア/空域の考慮事項 (Step #9)

を資料として取りまとめ, オペレーター内, また当局や管制機関との対話を行う。

4. 議論

4-1 特定された OSO と当該実証実験体制との比較

2-2 や 3-3-8 で述べたように、SORA では、特定された SAIL に応じて、使用する機体の設計や製造、操縦者や補助者に関わるクルーの訓練、メンテナンス等の管理体制、そして運航時の各種環境変化に関する体制などについて、細かくガイドラインが提示されている。筆者らは、今回の実証に向けて計画した運航体制等が特定された各 OSO のガイドラインを満たしているのか、満たしていない場合に今回の実証に潜在的な危険があるのかどうかの検証を行った。

要求事項をそのまま満たせない OSO はいくつかあった。例えば、表 8 の OSO#3 で“メンテナンスプログラムは、当局が適切であると考えている標準に照らし合わせて、あるいは／また、当局が認める方法に従って開発されている。”といった要求があるが、いち早く SORA を導入している欧州でさえ、公に認めた民間標準はなく、個別に判断しているようである。今回の検証では、公認ではなくても、日本産業用無人航空機工業会（JUAV）の認定した工場での整備など準ずる対策をとっているものがあれば、それは満たしていると解釈することにした。

各 OSO の要求されるロバスト性と、今回の運航体制の比較結果は表 9 の通りである。その結果、以下の項目以外では筆者らの実証は SORA の要求を満たしているとの結果を得たが、ヒューマンエラーに関わる OSO#14, #16, #17, #21 について、SORA が指摘するクルーリソースマネジメント（CRM）注 4）に関するトレーニングや、クルー間での信頼性が高く効果的な通信手段の確保、疲労管理などが、OSO の要求を満たしていないと分析された。

次に、この要求と現状の差について、今回の実証を振り返る。今回の実証では、1日最大6便で、各離発着場に操縦者および直接操縦に関わるクルーが2名から4名、遠隔操縦室では操縦者が3名おり（図 6, 7）、国内の物流実証の中では比較的長い運航ではあったが、手厚い監視体制とバックアップ体制で、ヒューマンエラーを防げる環境を保持できていた。さらに、現在のドローン業界では一般的ではないが、一部の遠隔操縦室の操縦者が CRM のトレーニングを受けており、ノンテクニカルスキルと言われる認知力・判断力・コミュニケーション力を積極的に生かし[12]、飛行前後および飛行中は絶えず計器情報や現地や機体カメラの映像から状況を認識・予測し、メンバーとコミュニケーションしながら意思決定・判断を行い、その結果を遠隔操縦コンソールに設定・入力を慎重に行っていた。また、積荷は、東京およびバンコクへと輸送される計画で、航空機のスケジュールに合わせるプレッシャーはあったが、そのルートで発生した衛星通信の不具合や天候の急な悪化の際には、無理な飛行はせず、輸送のキャンセル（3回）をし、危険な事象は期間中起きなかった。

今回抽出された OSO の要求と現状の体制の差については、現状の実証的な運航からスケール化（定期運航など運航の拡大）に向かう中で検討すべき項目だと考えられる。スケール化に向けては、クルー体制の縮小や、就航率の向上が事業性確保に重要になり、ヒューマンエラーが起きやすい環境となる懸念がある。ヒューマンエラー回避はもちろん、業務の優先順位付けへの取り組みや、関係者とのチーム形成など疲労管理にも関わる CRM の重要性や、無人航空機運航に係る疲労の科学と、ヒューマンエラー回避のための自動化が重要になってくることは確かである。

CRM については、民間航空機における CRM の無人航空機産業への適用が必要であり、クルーやリソースの範囲も無人航空機用に再検討が必要になるかもしれない。今回、離発着場の操縦者と遠隔操縦室の操縦者をともにクルーと考えると、クルー間での通信手段は携帯電話に限られ、電話が通じない場合なども起こり得て、通信手段の見直しも必要になると考えられる。また、疲労管理にあたっては、長時間の飛行管理に適した作業環境、休憩方法、勤務時間・パターンなどの検討と、また、業務に従事できる状態かどうか、勤務開始前のアルコール、体調、疲労に関する確認プロセスについての検討、さらにヒューマンエラーからの

表9 SAIL III の運航に推奨される運航安全目標 (OSOs) [1]と今回の実証体制の比較

	無人航空機に関する技術的な問題	SORA	実証
#01	オペレーターが適切な能力を有している、または能力が証明されている	M	H
#02	能力のある、または承認された事業者により無人航空機が製造されている	L	M
#03	能力のある、または承認された事業者により無人航空機が整備されている	M	M
#04	当局が認定した設計規格に従って無人航空機が開発されている	O	M
#05	システムの安全と信頼性を考慮して無人航空機が設計されている	L	M
#06	運航に適した C3 リンク性能を有している	L	M
#07	運航コンセプトとの整合性を保証するための無人航空機検査（製品検査）が行われている	M	M
#08	運航手順が定められ、その妥当性が確認され遵守されている	H	H
#09	フライトクルーの訓練が行われて技量が維持されていて、異常事態にも対処できる	M	M
#10	技術的問題からの安全なりカバーリーができる	M	M
	無人航空機運航を支援する外部システムの機能低下		
#11	無人航空機運航を支援する外部システムの機能低下に対処するための手順が定められている	H	H
#12	無人航空機運航を支援する外部システムの機能低下に対処できるように無人航空機が設計されている	M	M
#13	無人航空機の運航を支援する外部サービスが運航に適したものになっている	M	M
	ヒューマンエラー		
#14	運航手順が定められ、その妥当性が確認され遵守されている。	H	M
#15	リモートフライトクルーの訓練が行われて技量が維持され、異常事態にも対処できる	M	M
#16	複数クルー間の調整がうまくできる	M	L
#17	リモートフライトクルーは運航するに適した状態だ	M	L
#18	ヒューマンエラーからの飛行エンベロープの自動保護	L	L
#19	ヒューマンエラーからの安全なりカバーリーができる	L	M
#20	ヒューマンファクター判定を実施済みで、HMI (Human Machine Interface) がミッションに適したものであることが確認されている	L	M
	運航に不利な条件		
#21	運航手順が定められ、その妥当性が確認され遵守されている	H	M
#22	リモートフライトクルーが、クリティカルな環境条件を識別して、それを避けるように訓練されている	M	M
#23	安全運航のための環境条件が定められていて、定量化可能な状態になっていて、遵守されている	M	M
#24	悪い環境条件を想定して無人航空機が設計され、相応しい (qualified) と評価されている	M	M



図6 離発着場の様子



図7 遠隔操縦室の様子

リカバリー機能として各種ウォーニング機能や自動対応機能の開発とそれぞれの標準化に取り組んでいきたいと考えている。

4-2 BVLSO 運航時の空中リスクへの対応について

今回の運航では BVLOS 飛行を行っている。今回の機体にはカメラが搭載されており、その画像は、衛星通信を通じて遠隔操縦者に伝えられているが、その画像の利用は、概ね、経路下の船舶の監視で、地上の第三者上空飛行を避けるために利用されている。

空中衝突リスクへの対応としては、NOTAM (Notice to Airman) による運航計画の通知、航空局より提供される関連有人航空機団体の連絡先への運航計画と緊急連絡先の通知といった戦略的対策と、航空局の提供しているドクターヘリコプターの位置情報が表示される飛行情報共有システムや、トランスポンダー等を搭載した航空機の位置情報が表示される Flightrader 24 といった航空機追跡サービス等の利用による戦術的対策をとっている。この運航は日程が限られた実証であり、関係者への事前の周知と 150 m 以下の基本的に有人航空機の運航しない高度の利用、さらに、BVLOS が海上であることなどから空中衝突リスクへの対応としては妥当と判断され、許可が降りていると考えられる。しかしながら、これが定期的な運航となる場合に、NOTAM やメールやホームページによる運航計画の関係者の通知で十分であろうか。機体の 150 m を超える高度逸脱の可能性は、機体の不具合だけでなく、何らかの原因で危険を回避するために高高度の飛行を選択する場合もあると考えられる。そのため、SORA Step #6 の TMPR の指標から、無人航空機の利用のスケール化において有益な示唆はないか議論する。

検知について、ARC-b クラスにおいては 50% の有人航空機の検知が期待されていて、このレベルが国内でも期待された場合に、いかなる環境整備が必要だろうか。飛行情報共有システムに掲載されるドクターヘリコプターの位置情報と Flightrader24 に掲載される航空機の情報がその閾値を満たすかを確認するデータが存在していない。つまり、その空域を飛行しうる有人機の総量に対して、利用する航空機追跡サービスが捉えうる有人機と、その精度や間隔に関する情報が整理されていない。特に、フィードバックループにおいて、検知に利用する航空機情報の 5 秒の更新間隔と 10 秒の遅延程度という要件があるが、少なくとも飛行情報共有システムが表示するドクターヘリコプターについては、予算の都合上位置情報発信間隔を最小限にしているためそれを達成できていない[13]。追跡可能な機体を増やす対策の 1 つとして、機上やエンルート上に、航空機の接近を検知するレーダー等の設置が求められるが、高コストとなる。有人航空機の追跡情報の拡充、例えば、飛行情報共有システムに掲載される有人航空機の情報が、ドクターヘリコプター以外にも対応したり、更新や遅延についての情報の提供も望まれる。さらには、更新や遅延についての改善は、有人航空機と無人航空機の衝突回避への対応を考える上で、無人航空機側としては期待することではあるが、有人航空機にとって、位置情報発信装置の設置や発信自体のコスト、さらにプライバシー等の観点から、総合的な政策が必要になる。有人航空機と無人航空機の安全な空域の共有のために、そのリスクの把握、空域の有人航空機の利用データの整備が課題であると筆者らは考えた。

次に、衝突回避の意思決定や指示、実行について、今回の運航では、航空機追跡サービス等の情報、あるいは、緊急連絡先に入ってくる情報で有人航空機の接近が確認された場合には、遠隔操縦者により、衛星通信を介してホバリングや降下等のコマンドが送られることになっていた。今後の課題として、衛星通信のみである現況に対して、信頼性確保と損失時のリカバリー体制構築のため、LTE 導入など複数のバックアップ体制の確立や、通信遅延時間を最小化するような通信モードのマネジメントシステムの開発が必要と考えている。

5. おわりに

欧米で使われ始めている SORA のケーススタディを行い、その手法の理解を深めるとともに、SORA が導

くガイドラインと現状の体制の差分から、無人航空機活用のスケール化に向けて有益な示唆を得ることができると検証した。長崎での離島物流実証実験をケースに SORA を実施したところ、ヒューマンエラーに対応する体制や機体システム設計の開発の必要性を、また、BVLOS 運航を行う際の空中衝突リスク軽減に関しては、そのリスクを正しく測るためのその空域を利用する有人航空機情報、検知や衝突回避の手段の拡充が、定期的な運航を安全に行うには重要ではとの示唆を SORA を利用して確認することができた。

SORA は、許容範囲にその運航のリスクを収めることが目的であり、リスクの許容範囲は社会やその技術のフェーズによって異なってくる。本格的な無人航空機の社会実装の際に、その運航のリスクの適切な評価とリスクベースドな性能要求を求める際に、SORA を参考にできるところは多いと結論づけられる一方で、我が国の求めるリスク軽減や、航空機遭遇率に関するデータなどの拡充が、SORA を正しく機能させるためには必要である。

今回、無人地帯での運航と、限られたリスクでのケーススタディの実施であったが、今後、有人地帯などより高いリスクに対して検討を進め、我が国でとるべき体制や環境整備に関する議論を深めていきたい。

投稿受付：2021 年 11 月 15 日

採録決定：2021 年 11 月 29 日

謝 辞

この研究の一部は、国土交通省「令和 2 年度 スマートアイランド推進実証調査」の一貫で行われました。また、日本航空株式会社の山中知宏様、清水俊宏様、長安信哉様、佐藤洋輔様、荒木真帆子様、長崎県新上五島町の伊賀剛様をはじめ、研究遂行のため多くの方にご協力をいただきました。ここに感謝を申し上げます。

文 献

- [1] JARUS: "SORA package and standard scenario", JAR doc 06, <http://jarus-rpas.org/content/jar-doc-06-sora-package>, 2019.
- [2] 中村裕子, 鈴木真二: "米国初の航空運送事業認定に至る協議から我が国でのドローン宅配実現に向けての考察", 運輸政策研究, Vol. 23, pp. 48-55, 2021.
- [3] F. Nikodem, et al: "The new specific operations risk assessment approach for UAS regulation compared to common civil aviation risk assessment", German Aerospace Center (DLR), https://elib.dlr.de/121660/1/SORA_DLRK_final.pdf, 2021.
- [4] EASA: "Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947", Annex I to ED Decision 2019/021/R, p1-130, 2019.
- [5] ATSB: "In-flight break-up involving Airbus Zephyr unmanned aerial vehicle", ATSB Transport Safety Report, AO-2019-056, p1-11, 2020.
- [6] 中村裕子, 鈴木真二: "「空の産業革命」「空の移動革命」のキーワード「自動化」「自律化」の認証の壁と実現に向けた世界の取り組み", 日本航空宇宙学会誌, Vol. 68, No. 1, pp. 8-14, 2020.
- [7] ASTM International: "Standard Specification for Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Parachutes", ASTM F3322-19, 2020.
- [8] EUROCAE: "ED-279 - Generic Functional Hazard Assessment (FHA) for UAS and RPAS", EUROCAE, ED-279, 2020.
- [9] SAE International: "Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems", ARP 4754A, 2010.
- [10] Martin, T: "Overview of the JARUS Specific Operations Risk Assessment Process", <https://www.slideshare.net/terrymartin2805826/overview-of-the-jarus-specific-operations-risk-assessment-process>, 2017.
- [11] ICAO: "Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation", https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/an02_cons%5B1%5D.pdf, 2005.
- [12] 日本航空株式会社 運航本部運航訓練審査企画部定期訓練室: "JAL Non-Technical Skills [Standard] 教材テキスト", 1.6 版, JAL Air Mobility Operation Academy, pp. 1-60, 2021.

- [13] H. Nakamura, Y Matsumoto and S Suzuki: "Flight demonstration for information sharing to avoid collisions between small unmanned aerial systems (sUASs) and manned helicopters", *Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 62, pp. 75-85, 2019.



中村 裕子

東京大学スカイフロンティア社会連携講座特任准教授。国内自動車会社を経て、東京大学（航空イノベーション総括寄付講座）へ。2013年、工学博士（東京大学）取得、2017年8月より特任准教授。

2019年2月現職。イノベーションマネジメント、ドローンリスク管理、低高度空域運航管理（UTM）、国際標準規格化の研究に従事。JUIDA 参与、日本無人機運行管理コンソーシアム事務局次長、ASTM International/SAE International/EUROCAE_会員。

E-mail : techhn@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp



坂本 修

ヤマハ発動機株式会社 UMS 事業推進部 主管。1992年より主に無人ヘリコプター（RMAX, FAZER シリーズ）の研究・商品開発に従事。現在は、ドローン全般の事業開拓に従事している。（一社）日本産業用無人航空機工業会、常務理事等を歴任。

E-mail : sakamotoo@yamaha-motor.co.jp



佐藤 一郎

日本航空株式会社デジタルイノベーション本部エアモビリティ創造部マネジャー。エアラインの運航管理・オペレーションコントロール・運航基準業務、およびビジネスジェット・ヘリ運航業務に従事。

現在は主にドローン、空飛ぶクルマの安全管理担当。

E-mail : ichiro.s53t@jal.com



中島 徳顕

日本航空株式会社航空安全研究部マネジャー。宇宙航空研究開発機構航空安全イノベーションハブ主幹研究開発員、電子航法研究所航空交通管理領域客員研究員、法政大学大学院理工学研究科客員教授。次世代運航システム DREAMS（2008～）。航空交通管理の研究（2015～）。次世代航空モビリティの研究（2017～）。有人・無人航空機の安全技術の研究（2020～）。スマートフライト（高度判断支援）技術の研究（2021～）。

次世代運航システム DREAMS（2008～）。航空交通管理の研究（2015～）。次世代航空モビリティの研究（2017～）。有人・無人航空機の安全技術の研究（2020～）。スマートフライト（高度判断支援）技術の研究（2021～）。

E-mail : nakajima.y95r@jal.com



高田 淳一

日本航空株式会社デジタルイノベーション本部エアモビリティ創造部マネジャー。パイロット訓練ノウハウを活かした無人航空機オペレーター人財育成プログラムとして、運航乗務員の必須スキルとなる認知力や判断力、コミュニケーション能力といった「ノンテクニカルスキル」を講習する「JAL Air Mobility Operation Academy (JAMOA, ジャモア)」の企画・運営に従事。

E-mail : takada.6vn2@jal.com



石井 啓吾

日本航空株式会社デジタルイノベーション本部エアモビリティ創造部アシスタントマネジャー。航空機使用事業での航空写真撮影業務並びにドローンを活用した撮影、点検業務に従事。現在は主にドローン物流事業での POC 企画、及び実証に関する申請、実施、検証を管理。

E-mail : ishii.kta6@jal.com



田中 秀治

日本航空株式会社デジタルイノベーション本部エアモビリティ創造部マネジャー。エアラインの運航管理、運航基準、管理会計、財務会計に従事。現在は主にドローンを活用した物流事業、空飛ぶクルマ

を活用したエアタクシー事業の企画を担当。

E-mail : shuji.ha4q@jal.com



久根崎将人

日本航空株式会社デジタルイノベーション本部エアモビリティ創造部統括マネジャー。航空貨物事業企画・運営、新規事業開発業務に従事。現在は主にドローンを活用した物流事業、空飛ぶクルマ

を活用したエアタクシー事業の企画を統括。

E-mail : kunezaki.kpwn@jal.com

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 2 号

発行日 : 2021 年 7 月 21 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

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