慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	風速と悪視界条件を考慮した空飛ぶクルマの就航率向上に関する研究
Sub Title	A study on improving flight rate of flying car under the windy and poor visibility conditions
Author	石角, 圭佑(Ishizumi, Keisuke) 中野, 冠(Nakano, Masaru)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・ マネジメント研究科
Publication year	2020
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2020年度システムエンジニアリング学 第317号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002020-0019

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2020 年度

風速と悪視界条件を考慮した空飛ぶクルマの就航率向上に関する研究

石角 圭佑
（学籍番号：81933041）

指導教員　中野 冠

2021 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

論　　文　　要　　旨

学籍番号	81933041	氏　名	石角圭佑

論　文　題　目：

風速と悪視界条件を考慮した空飛ぶクルマの就航率向上に関する研究

（内容の要旨）

空飛ぶクルマの就航率を阻害する要因として、風と悪視界条件がある。悪視界条件で飛行を行うために、計器飛行方式があるが、管制に頼った飛行方式であり、フレキシブルな空の移動には適さないという課題がある。

本研究の目的は、計器を使った新しい有視界飛行方式について議論を行うためのツールを提案することである。議論のためのツールとして、リファレンスモデルを提案する。

リファレンスモデルの目的は、システムについての議論の促進と、開発目標を提示することである。

はじめに、就航率向上に必要な要素の特定として、空飛ぶクルマの就航が想定されているユースケースにおける風速と悪視界条件の発生率を分析する。従来の風の研究は特定の場所の詳細分析に特化しているため、べき則を使って任意の地点、高度における風速の発生率の算出式を導出する。

分析により、ユースケースごとに機体設計で考慮すべき風速が明らかとなった。また、どのユースケースで有視界飛行できないかが明らかとなった。

この結果に基づき、有視界飛行できないケースにおいて就航率を向上するためのリファレンスモデルを作成する。まず、リファレンスモデルのプロトタイプを作成して関係者と議論を行ったところ、テーマが絞れてないため議論が分散し、数値仕様がないため中身のある議論とならなかった。そこで、Object Process Methodology の規則に則ったシステムアーキテクチャと、概念図、数値仕様、を紐付け、さらに制約/前提条件に関する情報を１枚で表現したリファレンスモデルを考案する。

考案したリファレンスモデルを用いて関係者と議論を行ったところ、システムの要素、機能の妥当性に関する議論や数値仕様の実現手段に関する議論が生まれた。また、自動車用の LiDAR センサを開発するセンサーメーカーがリファレンスモデルについて高い関心を持ったため、本研究では、LiDAR センサの開発目標を提供するためにリファレンスモデルを使用した。その結果、LiDAR センサとして開発目標とすべき要求と、実現が困難な要求が明らかとなった。

本研究で提案する表記方法に従ったリファレンスモデルを使用することでシステムの構想についての議論が生まれることが期待できる。また、リファレンスモデルには機能として必要な仕様が提示されているため、企業の開発活動を促進にも利用できることが期待できる。

キーワード（5 語）

空飛ぶクルマ、就航率、リファレンスモデル、LiDAR、モデルベースシステムズエンジニアリング

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81933041	Name	Keisuke Ishizumi

Title

A Study on Improving Flight Rate of Flying Car under the Windy and Poor Visibility Conditions

Abstract

The major factors that inhibit the flight are windy and poor visibility conditions for flying car. Instrument flight rule is instructed by air traffic control and enables the flight under the poor visibility condition.

However , instrument flight rule is not suitable for air transportation that moves flexible between any points.

The purpose of this study is to propose the tool for discussion about the new visual flight rule that uses instruments. The author proposes the reference model as a tool for discussion. The purpose of reference model is to facilitate discussion and present development goals to the company trying to enter a new field of business.

As first, the author specializes the probability of gust and poor visibility conditions in the use cases flying cars are assumed to operate. Conventional research is limited to detailed analysis of the wind conditions at specific locations, so the author derives a calculation formula for the probability of wind speed at any point and altitude using exponential rule. The analysis clarified the wind speed to be considered in the airframe design cases and the use case are unlikely to allow VFR flights. Subsequently, the author creates a reference model. First, the author created prototype and assessed in a meeting with relevant people, where the requirements for the reference model were clarified, which are to narrow the subject and specify the requirement figures. Based on the result, the author improved reference model, which contains system architecture that follow the rule of Object Process Methodology, concept diagram, numerical specification, constraint and prerequisite. The improved reference model promoted the discussion about the detail of system.The author used the reference model to propose the target of development about LiDAR since a LiDAR sensor manufacturer had an interest in the reference model. The discussion through using refence model clarified that there two types of requirements, one is that could be development target, the other is that cannot be. The proposed reference model would make it possible to promote discussion about system to develop, and development activities of manufacturer.

Key Word(5 words)

Flying Car、Flight rate、Reference Model、LiDAR、Model Based Systems Engineering

目次

図目次 6

表目次 6

1. はじめに 8

1.1 研究背景 8
1.2 先行研究 11
1.2.1 悪視界条件における飛行方式について 11
1.2.2 新規事業参入への課題について 14
1.3 本研究の目的と意義 14
1.4 本研究の構成と研究方法 16
1.4.1 本研究の枠組み 16
1.4.2 リファレンスモデルを提案する理由 18

2. 風速と悪視界条件の発生率の特定 20

2.1 風速の見積もりに関する先行研究 20
2.2 風速の見積もり方法 22
2.3 突風風速の算出式 22
2.4 悪視界条件発生率の見積もり方法 24
2.5 風発生率の算出結果 25
2.5.1 関西空港-万博会場区間における風発生率 25
2.5.2 長崎空港-IR 施設区間における風発生率 27
2.5.3 中部国際空港-三重県市街地区間における風発生率 29
2.5.4 鳥取県市街地-岡山県市街地区間における風発生率 31
2.5.5 新千歳空港-ニセコ区間における風発生率 33
2.6 悪視界条件発生率の算出結果 35
2.6.1 関西空港-万博会場区間における悪視界条件発生率 35
2.6.2 長崎空港-IR 施設区間における悪視界条件発生率 36
2.6.3 中部国際空港-三重県市街地区間における悪視界条件発生率 37
2.6.4 鳥取県市街地-岡山県市街地区間における悪視界条件発生率 38
2.6.5 新千歳空港-ニセコ区間における悪視界条件発生率 40
2.7 就航率のまとめ 41

3. 議論のためのツールの表記方法 43

3.1 プロトタイプ 44
3.1.1 プロトタイプの説明 44
3.1.2 運航システムの説明 46
3.1.3 プロトタイプを使用した結果 49
3.1.4 LiDAR センサについての考察 52

3.2 ツールへのニーズ調査 52
3.3 プロトタイプの改良 55
3.3.1 OPM で表現した運航システム 57
3.3.2 OPM を利用したプロトタイプの説明 59
3.3.3 改良したプロトタイプを使用した結果 65
3.3.4　ユースケースの想定 75
3.4 本研究で提案するリファレンスモデルのまとめ 77
4.　就航率向上のための リファレンスモデルの提案 80
4.1　想定ケース１：中部国際空港–三重県志摩市間 80
4.2　想定ケース２：新千歳空港–ニセコ間 85
4.3　リファレンスモデルを使用した結果③ 90
4.4　リファレンスモデルを使用した結果④ 92
4.5　結果の考察 94
5.　結論 95
5.1　結論 95
5.2 今後の課題 100
謝　辞 103
参考文献 104
付　録 111
付録 1.機体メーカーへのヒアリング 111
付録 2.リファレンスモデルに対する OPL のまとめ 112

図目次

図 1-1 就航率の定義
図 1-2 ヘリコプタの就航実績
図 1-3 VFR の概念図
図 1-4 IFR の概念図
図 1-5 計器を使った新しい有視界飛行方式の概念図
図 1-6 本研究の枠組みと研究方法
図 1-7 リファレンスモデルの特徴
図 2-1 風速計算方法の概念図
図 2-2 関西空港周辺における風の発生率
図 2-3 万博会場周辺における風の発生率
図 2-4 長崎空港周辺における風の発生率
図 2-5 IR 施設周辺における風の発生率
図 2-6 中部国際空港周辺における風の発生率
図 2-7 三重県市街地周辺における風の発生率
図 2-8 鳥取県市街地周辺における風の発生率
図 2-9 岡山県市街地周辺における風の発生率
図 2-10 新千歳空港周辺における風の発生率
図 2-11 ニセコ周辺における風の発生率
図 2-12 関西空港周辺における悪視界条件の発生率
図 2-13 長崎空港周辺における悪視界条件の発生率
図 2-14 中部国際空港周辺における悪視界条件の発生率
図 2-15 鳥取空港周辺における悪視界条件の発生率
図 2-16 岡山空港周辺における悪視界条件の発生率
図 2-17 新千歳空港周辺における悪視界条件の発生率
図 3-1 プロトタイプとして作成したシステムアーキテクチャ
図 3-2 新千歳空港-ニセコ間の地図
図 3-3 OPM の基本ルール
図 3-4 OPM で記述した VFR
図 3-5 OPM で記述した IFR
図 3-6 OPM で記述した新しい飛行方式
図 3-8 新しい飛行方式の概念図
図 3-9 OPM で記述した新しい飛行方式の詳細
図 3-10 センサで検知する対象の詳細を示す概念図
図 3-11 議論のためのツールの階層概念図
図 3-12 改良した表記形式
図 3-13 改良した議論のためのツール
図 3-14 LiDAR の詳細について議論するためのツール
図 3-15 改良した表記形式②
図 4-1 中部国際空港-三重県志摩市間のシステム概念図
図 4-2 中部国際空港-三重県志摩市間のシステムのリファレンスモデル
図 4-3 中部国際空港-三重県志摩市間の LiDAR 検知対象詳細のリファレンスモデル
図 4-4 新千歳空港-ニセコ間のシステム概念図

図 4-5　新千歳空港-ニセコ間のシステムのリファレンスモデル
図 4-6　新千歳空港-ニセコ間の LiDAR 検知対象詳細のリファレンスモデル
図 5-1　リファレンスモデルによって達成したことの概念図

表目次

表 1-1 想定されるユースケース
表 1-2 空港平均風速データ
表 2-1 祖度区分ごとのパラメータ
表 2-2 考慮すべき風速と VFR できない確率
表 3-1 新千歳空港-ニセコ間の飛行条件
表 3-2 システム要求
表 3-3 飛行タイプと飛行フェーズの分類
表 3-4 議論の参加者属性
表 3-5 リファレンスモデルへの要求
表 3-6 新千歳空港–ニセコ間飛行におけるシステム要求
表 3-7 大阪ユースケースの運航条件
表 3-8 中部国際空港-三重県市街地間の運航条件
表 3-9 新千歳空港-ニセコ間の運航条件
表 3-10 リファレンスモデルに対する要求定義
表 4-1 議論の参加者属性

1.　はじめに

1.1　研究背景

自動車のような感覚で空の移動を行う「空の移動革命」構想が提案されている（経済産業省 2019)。「空の移動革命」構想では都市間での移動時間の短縮、離島や山間部での移動の利便性の向上や災害時の救急搬送などを目的として、空飛ぶクルマと称されるeVTOL などの飛行体の利用を計画されている。経済産業省（2018）によるロードマップでは、2020 年代半ばに田舎での人の移動、2030 年代には都市での人の移動が示されている。また、経済産業省は空飛ぶクルマの潜在需要として、人の移動の 4 割が空になるとの予想について言及しており、新たな産業やビジネスの誕生を期待している。

フレキシブルな空の移動を実現するための足がかりとして、空飛ぶクルマ研究ラボでは (2019)、現実的な技術面や需要から様々なユースケースについて検討を行っており、都市間での移動時間の短縮、離島や山間部での移動の利便性の向上や災害時の救急搬送などを挙げている。2020 年代の実用化について、大阪日日新聞（2020）によると、大阪府では、大阪・関西万博での導入が検討されており、空港から万博会場を海上で結んだ移動について検討されている。また、空の移動革命に向けた官民協議会　（2020）において、長崎県は、長崎空港と特定複合観光施設間の移動について検討を行っていると発表している。三重県雇用経済部によると（2020）三重県では、空飛ぶクルマを利用した未来の展望として、中部国際空港と三重県内の主要都市を結ぶ構想考えている。さらに、中野（2019）は、鳥取県から岡山県への移動や、北海道では新千年空港とニセコを結ぶ移動について、市場性およびビジネスモデルが検討されていると述べている。

表 1-1 は、空飛ぶクルマの利用として想定されている移動区間と直線距離、走行ルートの地形の特徴をまとめたものである。表 1-1 は、空飛ぶクルマの利用として想定されている移動区間と直線距離、走行ルートの地形の特徴をまとめたものである。これらの移動区間において、空飛ぶクルマの定期運航サービスやオンデマンドサービスを実現するために運航の信頼性が求められおり、ビジネス利用や観光利用として利用するためには高い就航率が必要である。図 1-1 は就航率の定義について説明する図であり、営業時間に対する運航可能時間の割合のことを運航率と定義する。

表 1-1　想定されるユースケース

ユースケース	距離	特徴
関西国際空港ー 万博会場	約30km	空港、海上、都市部
長崎空港ー IR施設	約40km	空港、海上
中部国際空港ー 三重県都市部	約30km	空港、海上、都市部
鳥取県都市部ー 岡山県都市部	約100km	都市部、山間部
新千歳空港ー ニセコ	約80km	空港、山間部

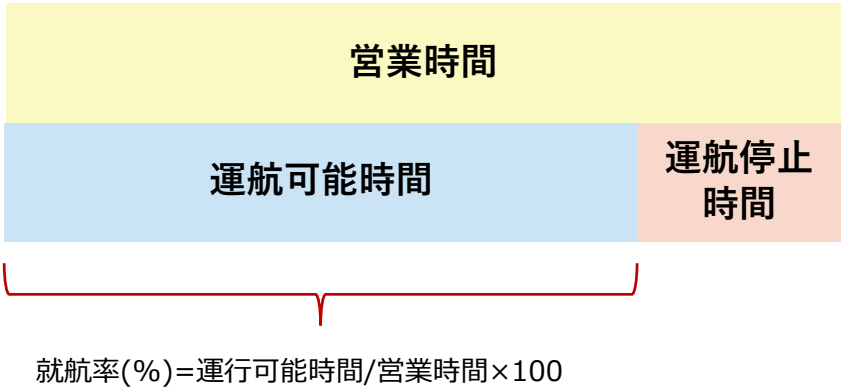


図 1-1 就航率の定義

国土交通省は、『国内空港整備について、資料２−２』の中で ICAO 勧告である、「航空機の望ましい就航率として、空港整備する際に就航率が 95%以上となるよう空港を整備すること」について言及しており、自動車感覚で空を移動するために、空飛ぶクルマに置いて達成すべき就航率の目標となる。

飛行体が欠航する要因として強風と視界不良がある。AIM-JAPAN 編纂協会（2018）によると、有視界飛行方式（以下 VFR）では、雲中に入った時の視界不良を防止するため、全天の 8 分の 5 以下の雲量でないと離陸ができないよう、運行制限がかけられている。また、風については、強風によって機体が煽られて事故となることを防止するため、離陸可能な風速制限が飛行体の種類や事業ごとに設定されており、想定する風速以下の環境において飛行を行わなければならない。

図 1-2 は、東京都港区にあるアークヒルズ(地上 37 階建て)の屋上ヘリポートと成田空港間をヘリコプタで結ぶ定期旅客輸送に関する就航率と欠航要因、千葉県北総病院におけるドクターヘリの就航率と欠航要因についてまとめた図である。奥野（2015）は、 東京都港区にあるアークヒルズ(地上 37 階建て)の屋上ヘリポートと成田空港間をヘリコプタで結ぶ定期旅客輸送では、就航率が 77%で、欠航理由の 16%が視程・雲底、7%が風によるものであったと言及している。また、北総病院ドクターヘリの就航率について、2018 年度、2019 年度のフライト記録を筆者がまとめたところ、就航率が 89%で、欠航理由の 8%が視程・雲底、2%が風によるものであり、10%以上もの確率で就航できていないという実績である。強風と視界不良要因による欠航は、ヘリコプタと同様空飛ぶクルマの就航における課題となり、フレキシブルな空の移動を実現する上で克服すべき課題である。

ユースケース	就航実績	欠航要因		
		視界不良	強風	その他
北総病院 ドクターヘリ	89%	8%	2%	1%
成田空港ー アークヒルズ[4]	77%	16%	7%	0%

図 1-2 ヘリコプタの就航率

1.2　先行研究

1.2.1 悪視界条件における飛行方式について

これらの課題について、風速については、飛行ルートにおいて想定される風速を鑑みて機体設計を行えばよい。しかし、視界不良については、パイロットの目視では周りが見えない環境において、機体外部の情報をどうやって取得するか、取得した情報をどう利用して目的地までの移動を円滑に行う方法や、衝突事故の防止の方法について考えなければならず、機体の設計だけでなく運航システムとして、どのようなシステムであるべきかを考える必要がある。

目視によって機外の環境を見て安全を保つ VFR は、有視界気象状態（VMC）に限りパイロットが航空機と建物、山などの障害物との間隔を確保する（村山 2018）。これに対し、悪視界条件における飛行を行うための飛行方式として、計器を使用した飛行方式である計器飛行方式(以下 IFR)がある。これは、計器にしたがって飛行を行う飛行方式であり、航空法第二条の十七では「国土交通大臣が与える指示に常時従って行う飛行の方式」と定められている。IFR は管制の指示の下で計器によって飛行する飛行方式である。管制の指示に従うことで、飛行体同士の衝突防止や飛行場における地上の障害物との衝突を防止できる。金田（2002）によると管制業務として、計器飛行中の航空機を対象とした各種指示、混雑する空港周辺における管制塔から見えない離着陸航空機の管制、離発着の指示などがある。これらの業務を円滑に進めるために飛行計画のチェック、航空機への指示やレーダーによる着陸誘導などを行うことで、衝突を防止する。

これらの管制業務は、航空交通管制区、航空交通管制圏として定められる空域に対して行われており、航空交通管制区は、管制区、進入管制区、特別管制区、洋上管制区、高高度管制区に分かれており、それぞれの管制区、および管制圏において管制の対象となる領域、高度が定められている。

また、航空法第二条の十七では「有視界飛行方式とは、計器飛行方式以外の飛行方式である」と定められており、悪視界条件における飛行は、現状の法律では IFR で行わなければならない。IFR は主に大型飛行機の運航に対して実施されているが、大林（2001）は、ヘリコプタが悪視界環境においても飛行するために GPS 誘導による航行と一部の補正操舵をコンピュータによる自動操舵とすることで操舵の容易化を測った ATIC システムを提案している。さらに、又吉（2007）はヘリコプタに GPS/MSAS を搭載した時の測位精度の評価試験結果について報告している。しかし、これらの提案は、悪視界条件においてパイロットの目視に頼らず飛行を行うことは可能であるが、飛行体同士の衝突を防止する観点については言及していない。また、奥野（2008）は従来の IFR が空港間を結ぶように設定されているのに対して、ヘリコプタに適した IFR 運航として、

GPS を使ったポイント・イン・スペース進入方式の開発について報告を行なっている。ポイント・イン・スペース方式では、進入復行点である MAPt を、着陸地点の方向に関わらず設定できる点において、飛行ルートの設計の自由度が高い運行方式であるが、特定の 2 点間に対する飛行方法に関する技術であり、フレキシブルな 2 点間の移動に対して適した方法とはなっていない。また、GPS を使った飛行において、どのように飛行体同士の衝突を防止するかについては言及していない。

図 1-3 は VFR の概念、図 1-4 は IFR の概念を示す図である。

VFR は、パイロットの目視で飛行を行うため、悪視界環境で飛行を行うことができず、就航率低下の原因となる。IFR は、計器を使って飛行を行うため、悪視界環境においても計器盤などの情報をもとに操縦することで飛行ができる。また、飛行中は常時管制官からの指示や情報を受けることで、飛行中や飛行場内での移動中の衝突を防止でき、IFR を実施することで悪視界環境における就航率は向上する。しかし、空飛ぶクルマにおいて IFR を実施する場合、以下の 3 つの点を考慮しなければならない。1 つ目は、管制空域内での飛行が必要であることである。定義された管制区、管制圏ごとに管制業務を実施する高度が異なり、特別管制区では高度 200m 以上、侵入管制区では高度 450m 以上、管制区では高度 1500m 以上での飛行が必要となるため、空飛ぶクルマが低高度で飛行を行う際の制約となる可能性がある。2 つ目は航空路が定められていることである。IFR では航空路が定められており、離陸から航空路に合流するための飛行場から航空路間においても、通過地点と高度が定められており、着陸時も同様である。これは、空飛ぶクルマの飛行高度や飛行ルートを設定する上で制約となる可能性がある。3 つ目は、管制官の数が有限であることである。IFR は主に大型飛行機に対して実施されているため、空飛ぶクルマの運航台数が少ない間は管制官による管制誘導によって、運航を行うことができる可能性があるが、空飛ぶクルマの運航本数が増加すると管制官の数が不足し、空飛ぶクルマに対して IFR を実施できない可能性がある。また、空港を起点としない区間で飛行を行う場合、管制区内の飛行とはならず、悪視界環境で飛行ができない可能性がある。

空飛ぶクルマにおいて気象要件に対する就航率を向上するための運航システムに対して、現行の IFR をベースとして提案されている飛行システムでは、フレキシブルな 2 点間を移動する空の移動革命の実現には適さない。

図 1-3 VFR の概念図

図 1-4 IFR の概念図

1.2.2 新規事業参入への課題について

空飛ぶクルマの潜在需要は大きいため、既存の航空業界以外の業界による参入への関心は高い。JAXA が主催する航空機電動化（ECLAIR）コンソーシアムの一般会員には、航空業業界のメーカーや研究機関だけでなく、自動車メーカーや、自動車部品を取り扱うメーカーも参加している。

これまでに無い新しいシステムを作るためには様々なイノベーションの誕生が期待される。イノベーションを促進するための手法として、コンソーシアム型の研究開発プロジェクトがある。加藤（2014）は、NEDO が実施したコンソーシアム型研究開発プロジェクトの評価分析を行い、参加企業の上市、製品化にどのような影響を及ぼしているか調査したところ、川上側企業が保有する技術について川下側企業の認知が低い場合に垂直連携効果が得られない可能性があることを述べている。

また、川上側企業は、どのような製品を上市すれば良いか分からないことが多い。電子デバイスを扱う様々な川上側企業は空飛ぶクルマ事業への参入に興味があり、情報収集に務めるが、それぞれの企業が保有する技術が空飛ぶクルマへの使用に足るものか分からず、足らない場合にどういうものを開発すべきであるか見えない。その結果、具体的な開発活動へと結びつかないケースが多い。

これらの企業を巻き込んでイノベーションを達成するためには開発目標となる指針を与えることが必要であると考えられる。

1.3　本研究の目的と意義

上記の問題意識のもと、本研究の目的は、空飛ぶクルマの就航率 95%以上の目標に向けて、計器を使った新しい有視界飛行システムについて議論するためのツールを提案することとする。図 1-5 は、計器を使った新しい有視界飛行システムの概念図である。悪視界環境においても管制に頼らず計器を使って飛行を行うことを特徴とする。

研究目的を達成するために、本研究では①クリアすべき要件を明確にし、②要件を鑑みて、就航率を向上できる運航システムについてリファレンスモデルを提案する。

まず、主な欠航要因である風と悪視界環境について、日本国内における要件を明らかにするために、表 1-1 で想定されるユースケースに対して風速と悪視界環境の発生率を明らかする。また悪視界環境においても飛行できる運航システムを構築するためのリファレンスモデルを提案し、空飛ぶクルマへの参入に興味を示す企業に対して開発の目標の提供を試みた。これらの取り組みによって空の移動革命の目標であるフレキシブルな

空の移動の実現に向けた開発活動の促進に貢献できることが本研究の意義と捉え、研究を実施した。

図 1-5 計器を使った新しい有視界飛行方式の概念図

1.4 本研究の構成と研究方法

1.4.1 本研究の枠組み

図 1-6 は、本研究の枠組みと研究方法を示す図である。

本研究では、第 1 フェーズとして気象要件の特定を行う。気象要件を特定するために、第 2 章では、気象庁のデータベースから気象データを抽出し、悪視界条件の分析と任意の地点、高度における風速計算方法の開発を行う。風速については、べき則を利用した風速の発生率を求めるための計算方法を導出し、想定ユースケースに当てはめた時の風速の発生率を求める。また、悪視界条件については、高度ごとの発生率を求め、ユースケースごとにクリアすべき要件をまとめる。第 2 フェーズではリファレンスモデルの提案を行う。計器を使った新しい有視界飛行方式を実現するためのシステムについての議論を行うための好適な手段としてリファレンスモデルを提案する。リファレンスモデルを提案するにあたり、図 1-6 に示す様々な関係者との議論を行った。

第 3 章では、リファレンスモデルの表記方法について説明する。システムの実現のためには、機体メーカーにおける開発を進めるだけでなく、機体性能以外に運航システムや搭載するセンサなど、考慮すべき要件が多数ある。これらの要件について、関係各社が共通の認識を持ってシステムのあるべき姿を議論でき、さらに開発の目標として参照できるようにするためのリファレンスモデルとする。また、リファレンスモデルを使用して関係各社と議論を行った結果として得られた運航システムの前提条件について説明する。第 4 章では、第 3 章で説明する表記方法を用いて、運航システムに対するリフ

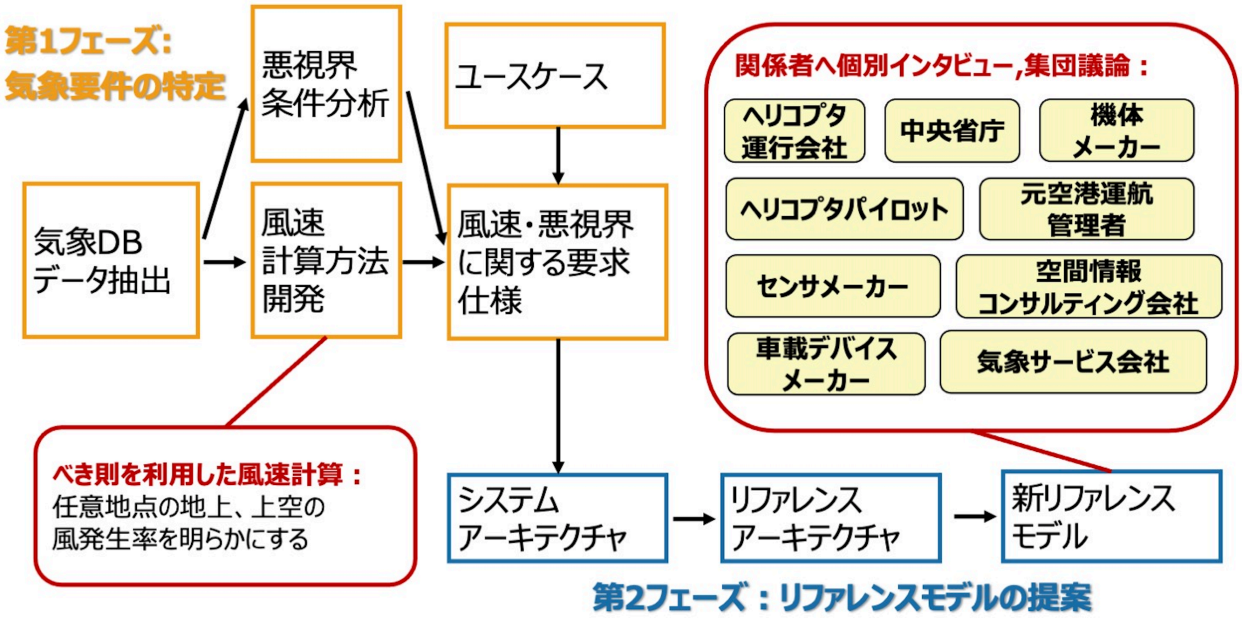


図 1-6 本研究の枠組みと研究方法

ァレンスモデルを提案し、関係各社と議論を行い、得られた結果について説明する。本研究では、計器を使った新しい有視界飛行方式を実現するための手段として、LiDAR に注目し、機体に搭載された設備によって悪視界条件を飛行するための、要求を明らかとし、その要求を満たす手段として LiDAR を使用することができるか、議論するためにリファレンスモデルを使用する。第 5 章では、本研究の得られた結果に対する結論と、今後の課題、展望について説明する。

1.4.2 リファレンスモデルを提案する理由

システムを設計する上で参照となるものとしてリファレンスアーキテクチャがある。Cloutier（2009）は、様々な組織で使われているリファレンスアーキテクチャの内容を分析し、コンセプトをまとめ、リファレンスアーキテクチャとは、将来の開発のためのガイダンスを提供するものでビジョンと戦略が組み込まれているものと述べている。リファレンスアーキテクチャの活用の例として、アメリカ合衆国運輸省（2020）は自動車の自動運転に対して、ARC-IT を発行しており、2020/11/30 にバージョン 9.0 が発行されている。ARC-IT は Enterprise、Functional、Physical、Communication の 4 つの view を設定しており、全部で 139 のサービスパッケージに対してそれぞれの view に対するアーキテクチャを定義している。これらを参照することで、企業は製品開発について検討を行い、開発目標を立てることになるが、システムアーキテクチャの定義、製品開発のための要求仕様については企業自身が定義しなければならず、空飛ぶクルマ事業に知見のない企業がリファレンスアーキテクチャだけで開発目標を立てて、開発活動を行うことは困難である。

一方、システムアーキテクチャはシステムの構成、動作原理を表したものあり、ISO/IEC/IEEE42010 によると、”fundamental concepts or properties of a system in its environment embodied in its elements relationships, and in the principles of its design and evolution”と定義されている。

また、Long（2011）は、”System architecture/synthesis is concerned with what physical structure offers the best balance-considering manufacturing, testing, support, and other factors-in answering the customer’s need for the system. At its heart is the realizability of the system and its physical complexity.”と表現している。

特定された気象要件をもとに、就航率 95%達成のためのシステムアーキテクチャを提案し、関係者間との議論によってその是非や、開発目標について議論を行うことができる。しかし、システムアーキテクチャは構成要素の関係性を示してはいるが、その仕様については明示されていないための、参入に興味がある企業にとっては、何を開発すれば良いかがわからず、システムの是非を議論することができない無味乾燥なものとなる。

上記のような理由から、空飛ぶクルマ事業への参入に興味のある企業が、開発目標を立てて、開発活動を実施するためには、システムコンセプトと数値仕様との関係性が明示されたモデルが必要であると考えた。プロセス全体が可視化された表記方法として、中野（2005）は Total Link System Chart（以下 TLSC）について言及している。TLSC は、ビジネスや生産プロセスにおいて、プロセス全体を表記したものであり、How/What/Why の繋がりを表記している。山本（2021 年確認）によると TLSC の使用例として、壁一面を利用してビジネスプロセスを表記することで業務改革を行うべき点

について議論を行いやすくしている。

このように、プロセス全体を表現することにTLSCの特徴があるが、Covid-19の影響で、オンラインでの会合が増えている昨今の事情を鑑みると、コンピュータの画面上にプロセス全体を表現することは現実的ではない。

そこで、本研究では、空飛ぶクルマ事業への参入に興味のある企業の保有する技術分野にテーマを絞り、就航率 95%を達成するための技術目標について議論を行うためのリファレンスモデルを提案する。図 1-7 に本研究で提案するリファレンスモデルの特徴を示す。ユースケースを設定することで、飛行システムに必要な要求仕様を明確とする。また、テーマを絞ったシステムコンセプトを提示することで、システム現実性について深い議論を行えるものとした。さらに、システムのコンセプトと、そのコンセプトを達成するための主要となる数値仕様をつなげることで、技術を使用することの現実性について議論を行い、開発目標を与えるリファレンスモデルを提案する。

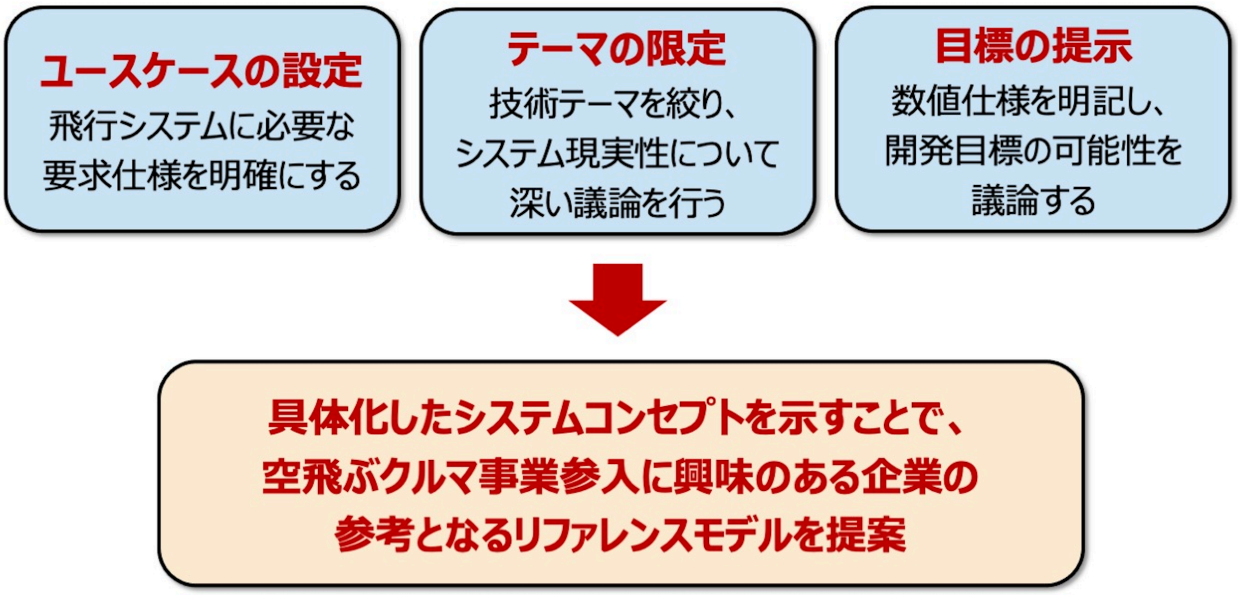


図 1-7 リファレンスモデルの特徴

2.　風速と悪視界条件の発生率の特定

表 1-1 のユースケースにおける走行ルートは、空港、海上、都市部、山間部など様々な地形の上を走行することが想定される。海上の飛行においては、霧や風の発生、都市部ではビル風の影響、山間部では雲や霧の発生が想定され、これらの気象条件に対して就航率を向上させるための方法を考えなければならない。また、空飛ぶクルマの飛行高度における風速の発生率や雲、霧などによる悪視界条件の発生率を考慮しなければならない。本章では、表 1-1 のユースケースについて、風速と悪視界条件の発生率を明らかにする。

2.1　風速の見積もりに関する先行研究

表 1-2 は、気象庁が提供する航空気象情報を参考にして、平均風速について空港の風速ごとの発生率をまとめたものである。表 1-1 で示すユースケースにおける発生率についてまとめた。また、鳥取県都市部と岡山県都市部の移動については、鳥取空港と岡山空港のデータを代表データとして示している。

表 1-2 によると、いずれの空港においても 13.4m/s 以上の風速の発現率は、5%以下である。しかし、空飛ぶクルマに必要な耐風性を考慮するためにはビル風などの突風や、上空の風速の発生率をもとに検討を行う必要がある。

表 1-2　空港平均風速データ

風速(m/s)	0-2.6	3.1-5.1	5.7-7.7	8.2-10.3	10.8-12.9	13.4-15.4	15.9-18.0	18.5-20.6	21.1-23.1	23.7-25.7
	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)	発現率(%)
新千歳空港	39	32	19	7	2	0	0	0	0	0
中部国際空港	24	33	20	13	7	3	1	0	0	0
関西国際空港	35	36	19	7	2	0	0	0	0	0
鳥取空港	28	41	16	9	4	1	0	0	0	0
岡山空港	64	28	4	0	0	0	0	0	0	0
長崎空港	42	31	17	7	2	0	0	0	0	0

風速を調査する先行研究として、片岡（2012）は、風速の高度分布について東京湾臨海部における平均風速鉛直分布の結果から、べき指数を予測する式の提案を行なっているが、実測地点において詳細化された式の提案であり、その他の地域に展開できるものとはなっていない。ビル風など、複雑な地形における突風の風速について竹見（2019）は、2018 年 9 月に近畿地方を縦断した台風 21 号について、都市域での突風率が空港などよりも高いことを示した。突風の評価について、池谷（2015）は外的要因のない単純都市形状により形成される乱流場を数値計算によって再現することで非常な稀な突風の発生頻度は粗度の配列によって異なる事を示したが、実際の地形において、どのよ

うな風速で突風が吹くかについては言及していない。また、奥野（1995）は風洞内に実際のビル群のミニスケールを再現した風洞実験を行い、ヘリコプタの安定性に直接影響を及ぼすのは乱れの強さと突風指数であることを示した。しかし、実際の地形に対する突風の発生率がについて言及していない。さらに、小寺（2008）は平均風速と粗度長のデータから突風率を算出し、実測との相関が高いことを示している。しかし、平均風速データが得られない地点では突風率を算出できないため、突風の風速を求めることができない。

先行研究では、特定の土地を対象として風速の高度分布や突風の発生率を明らかにするために、風洞実験や風速の実測を行い、結果を元にべき則や突風率などの算出を行なっている。

しかし、空飛ぶクルマにおいては、機体に求める耐風性や必要な設備を考察するために、離発着場の候補となる地点における風速の発生確率を知ることが重要である。そこで、本章では任意の地点、高度における風速の発生率を算出するための方法を導く。

図 2-1 は任意の地点、高度における風速計算の概念図である。風速観測地点(a)のデータを元に、上空の地点(b),(c)の風速、また、観測地点とは異なる地上(d)の風速を求める風速計算方法を開発する。

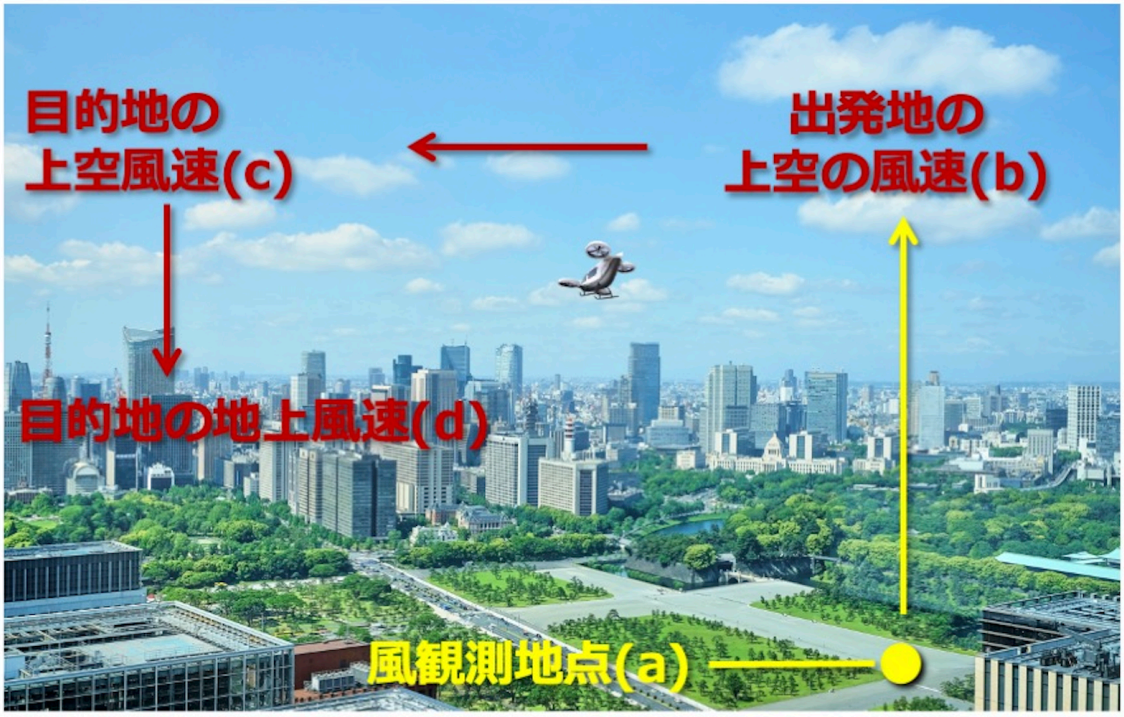


図 2-1 風速計算方法の概念図

2.2　風速の見積もり方法

本節では、風速の発生率の見積もり方法について説明する。95%以上の就航率を達成するための空飛ぶクルマの耐風性を見積もるためには、飛行区間において想定される飛行高度での突風の発生率を知る必要がある。

風速の発生率を求めるための統計データとして、気象庁が提供する地域気象観測システム(AMeDAS)の風速データは提供されている地点が限られており、任意の地点におけるデータがない。また、ほとんどの地点で地上 10m 付近の測定データであり、飛行高度における風速データが得られない。

また、突風に関する既往研究では、著者が注目する特定の地点において発生する風速についての詳細検討が行われており、それらの地点において、実測データの取得や、地形の詳細に基づいた CDF 解析などが実施されていた。このため、風速の発生率を見積もるためには長期間のデータ測定が必要であり、任意の地点、任意の高度において、風速ごとの発生率を求めることができなかった。

本節では、これらの状況を鑑みて、ユースケースとして想定されている離発着場付近の平均風速データから、高度ごとの突風の風速発生率を求める算出式を提案し、風速の発生率を求める。 計算に使用する平均風速データとして、離発着場付近の空港で測定された 10 分間平均風速データを使用する。空港の測定データを使用する理由は、空港敷地内は風を阻害する建築物、および樹木が少ないこと、年間を通して確実に風速データが取得されていることである。建築物、および樹木の影響として、これらの摩擦による風速の減少が考えられる。このため、建築物、および樹木が少なく、広大な平地を有する空港で取得される風速データは、上空の風速を算出するには適していると考えた。

本節では、表 1-1 のユースケースにおいて、空港が起点となる区間においては、空港の 10min 平均風速データを利用する。鳥取県都市部と岡山県都市部の区間については、鳥取県都市部の風速発生率を求めるために、鳥取空港の 10 分間平均風速データを使用し、岡山県都市部の風速発生率を求めるために、岡山空港の 10 分間平均風速データを使用する。10 分間平均風速データは、2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日までのデータを使用する。10 分間平均風速データを基に離発着場それぞれの突風の風速を算出し、発生率を求める。

2.3　突風風速の算出式

本節ではべき法則を利用し、平均風速データが得られる空港地点における上空の平均風速を算出し、同じくべき法則を適応することで任意の地点において想定される平均風

速の算出式を導出する。さらにピークファクター、乱れの強さを考慮して、平均風速から突風の風速の算出式を導出することで、任意の地点における突風の風速を算出する。本節では、空港の平均風速データから大気安定層の上空風速を求め、得られた上空風速を元に任意の地点の平均風速と突風率を求めることで、到着地における突風の風速発生率を算出する。 尚、鳥取県都市部と岡山県都市部の移動については、鳥取空港の平均風速データから鳥取市街地の風速発生率を算出し、岡山空港の平均風速データから岡山市街地の風速発生率を算出する。

建築物荷重指針・同解説（2015）によると大気安定層の上空の平均風速$u(z_1)$はべき法則により

$$u(z_1) = u(z_0) \times (z_1/z_0)^{\alpha_0} \qquad （1）$$

と書ける。 ここでz_1は大気安定層高度、z_0は風速観測する地点の高度であり、α_0はべき乗数であり第 3 表に示す粗度区分ごとに定義される定数である。また、$u(z_0)$は風速を観測する地点の平均風速を表している。本稿ではz_1を 1000m として、風速の算出を行う。中立大気中における平均風速値は一定であるとの仮定のもと、（1）式で求めた上空風速に対して、さらにべき法則を適応した（2）式によって、任意の地点の任意の高度における風速を算出する。

$$u(z_2) = u(z_1) \times (z_2/z_1)^{\alpha_2} \qquad （2）$$

ここで、z_2は風速を算出したい任意地点の高度、α_2は任意地点のべき乗数であり、風速を算出する地点の粗度区分に応じて第 3 表に示す値が適応される。建築物荷重指針・同解説（2015）では、平均風速に対して突風の風速$u_g(z_0)$を、

$$u_g(z_2) = u(z_2) \times (1 + \mathrm{gl}) \qquad （3）$$

で算出できるとしている。ここで、gはピークファクター、lは乱れの強さである。
植松（2006）の研究に基づき、本節ではgの値を 3 とする。

建築物荷重指針・同解説(2015)[22]によると乱れの強さは、主に地表面との摩擦に影響する。乱れの強さは平均風速の鉛直分布と同様に、地表面の粗さに影響し、風速の鉛直分布を決めるパラメータであるα_0、Z_g、Z_b、を用いて(4)式により算出される。α_0、Z_g、Z_b、は算出する地点の粗度区分に応じて、第 3 表の値を用いる。

$$I_{rZ} = \begin{cases} 0.1(Z/Z_G)^{-\alpha-0.05} & Z_b < Z \leqq Z_G \\ 0.1(Z_b/Z_G)^{-\alpha-0.05} & Z \leqq Z_b \end{cases} \qquad (4)$$

表 2-1　粗度区分ごとのパラメータ

粗度区分	α	z_b	z_g
Ⅰ	0.1	3	250
Ⅱ	0.15	5	350
Ⅲ	0.20	10	450
Ⅳ	0.27	20	550
Ⅴ	0.35	30	650

2.4　悪視界条件発生率の見積もり方法

表 1-1 で示すユースケースにおいて考慮すべき悪視界条件の発生率として、気象庁が提供する航空気象情報を利用する。航空気象情報として提供されているデータの内、モデル B の悪視程の発現頻度とモデル C の低い雲の発現頻度を利用する。高度ごとにこれらの条件の合計値を算出し、悪視程条件の発生率とする。航空気象情報として提供されているデータは 2012 年から 2016 年までの 5 年間の年間平均値である。尚、悪視程の発現頻度としては、視程距離が 5000m 以下の発生率について合計値の算出を行う。また、日中時間における悪視界条件の発生率を見積もるため、8:00 から 17:00 までのデータを利用する。

2.5　風発生率の算出結果

2.5.1 関西空港−万博会場区間における風発生率

図 2-1 は関西空港における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。空港の周辺にはほとんど障害物がないため粗度区分を I として突風の風速を算出する。 図 2-1 は、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における発生率が最も高く、高度 10m においては合計で 77%であるが、高度上昇と共に 0m/s≦x<5m/s の発生率が減少するが、5m/s<x≦10m/s はほぼ横ばいであり、高度 1000m においては合計の発生率は 64%となる。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 10m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 17%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 4%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 1%であるのに対し、高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 20%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 10%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 3%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 1%、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 20%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 11%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 4%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 1%である。図 2-2 は大阪/関西万博会場における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。万博会場は、緯度が 34.39°、経度が 135.23°付近であり、中層建築物が主となると仮定し、粗度区分をⅣとして突風の風速を算出する。 図 2-2 は、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における発生率が最も高く、高度 10m においては合計で 96%であるが、高度上昇と共に 0m/s≦x<5m/s の発生率が減少する。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 10m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 4%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 0%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 0%であるのに対し、高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 20%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 8%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 2%となる。

空飛ぶクルマはヘリコプタ比べて機体サイズが小さく、騒音が少ない可能性がある。その場合、ヘリコプタに対して低い高度で飛行できる可能性があるため、飛行高度として上限 500m を想定した場合、図 2-1、図 2-2 の結果により、関西空港と万博会場間の移動において、就航率が 95%以上となるのは、高度 500m 以下で飛行するのであれば、耐風性が 20m/s 以上の機体である。また、本節の区間が航空交通管制区であることを考慮すると、関西空港から万博会場までの距離は、約 30km 以内であれば、管制飛行を行う飛行体は高度 200m 以上、距離が 36km より長い場合は高度 300m 以上で飛行す

る。管制飛行を行う飛行体との接触を防止するために、管制下限高度以下の高度で飛行を想定する場合、300m、もしくは 200m 以下での飛行が想定される。図 2-1、図 2-2 の

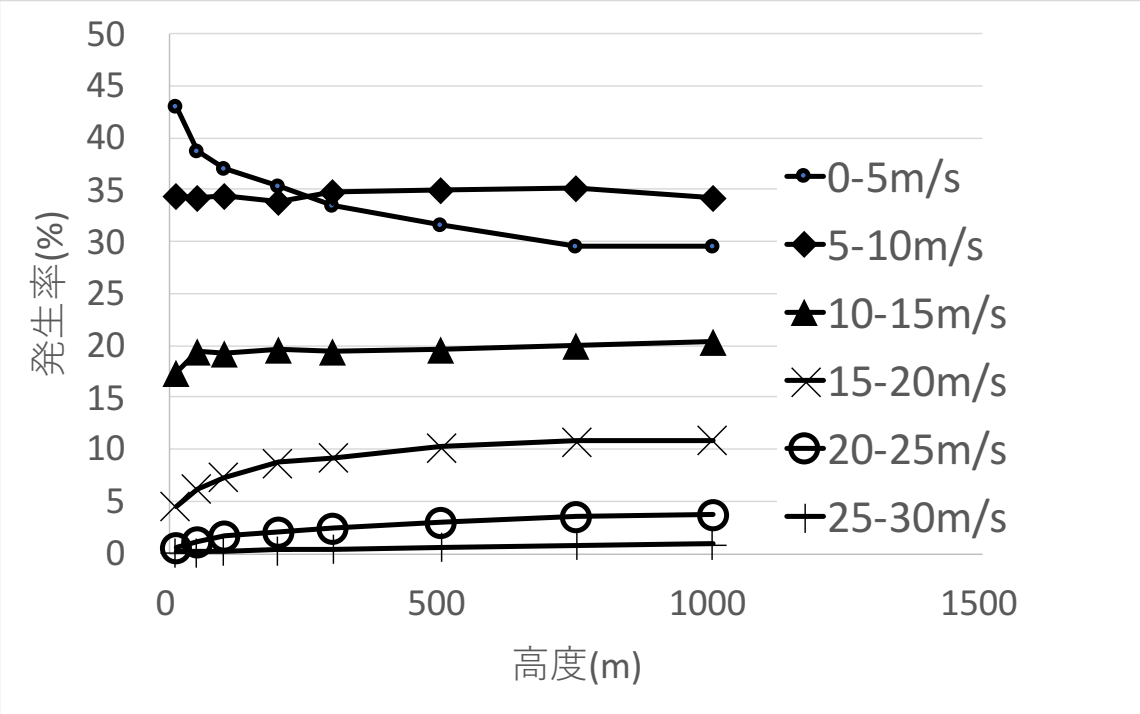


図 2-2 関西空港周辺における風の発生率

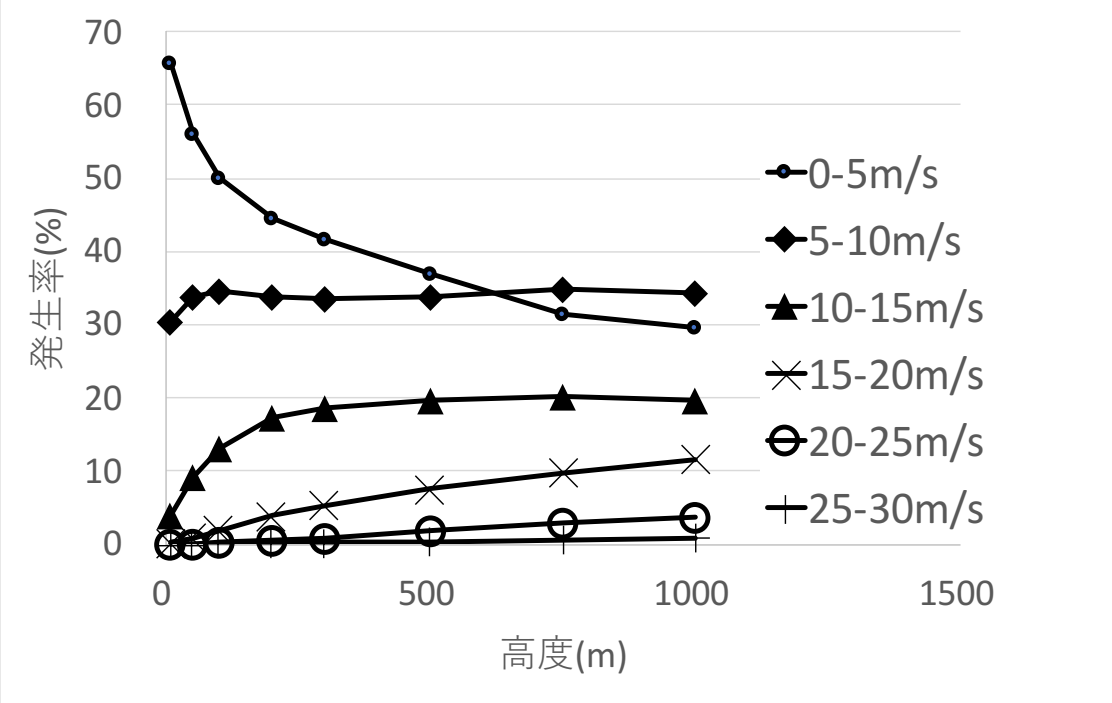


図 2-3 万博会場周辺における風の発生率

結果により、高度 200m 以下で飛行するのであれば就航率が 95%以上となるのは、耐風性が 15m/s 以上の機体となる。

2.5.2 長崎空港–IR 施設区間における風発生率

図 2-3 は、長崎空港における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。空港は洋上に位置しており、周辺に風の障害となる建築物もほとんどないため、粗度区分を I として突風の風速を算出する。図 2-3 は、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における発生率が最も高く、高度 1000m において合計の発生率は 73%となる。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 17%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 6%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 1%であるのに対し、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 18%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 6%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 2%である。

図 2-4 は、IR 施設予定地における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。IR 施設予定地として、緯度が 33.05°、経度が 129.47°付近周辺であると仮定する。洋上に面した山間部の平野であり、低層建築物が多数存在すると仮定して粗度区分をⅢとして突風の風速を算出する。

図 2-3 と同様、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における発生率が最も高い。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 10m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 4%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 0%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 0%であるのに対し、高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 16%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 4%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 1%、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 18%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 7%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 1%となり、高度が上がるにつれ、風速が大きくなる傾向がある。長崎空港と IR 施設間は、主に洋上を移動するため、騒音について心配する可能性が低い。このため、高度 500m で飛行した場合、図 2-3、図 2-4 の結果により、就航率が 95%以上となるのは、耐風性が 20m/s 以上の機体であることがわかる。

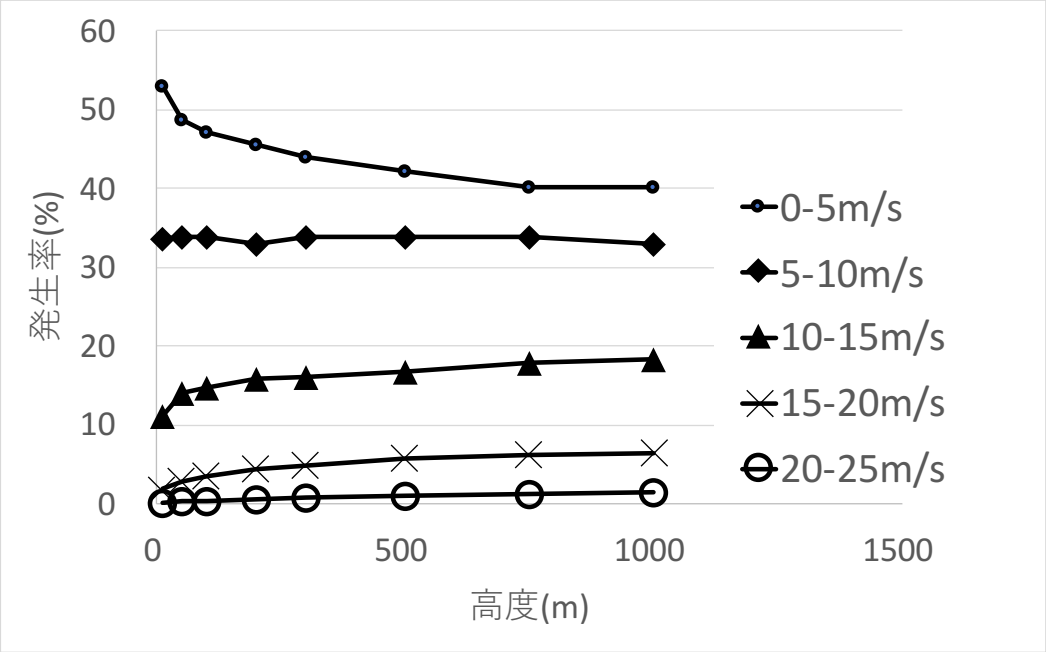


図 2-4 長崎空港周辺における風の発生率

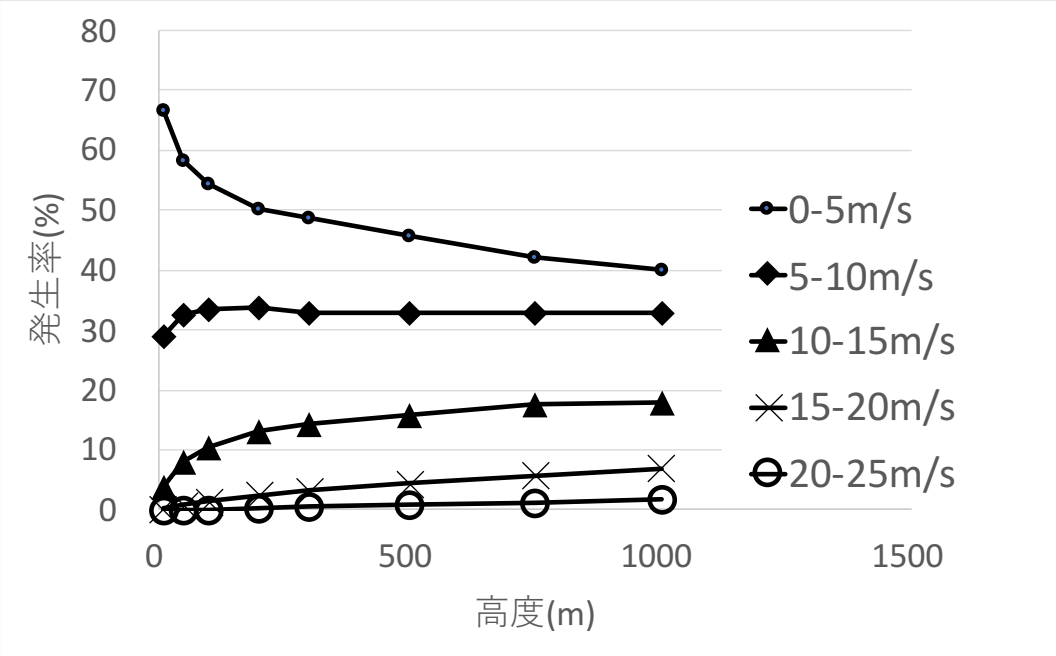


図 2-5 IR 施設周辺における風の発生率

2.5.3 中部国際空港−三重県市街地区間における風発生率

図 2-5 は、中部国際空港における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。中部国際空港は洋上に位置しており、周辺に風の障害となる建築物もほとんどないため、粗度区分をⅠとして突風の風速を算出する。

図 2-5 は、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における発生率が最も高く、高度 1000m において合計の発生率は 54%となる。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 19%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 13%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 8%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 2%であるのに対し、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 20%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 13%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 9%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 3%である。

図 2-6 は、三重県市街地における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。 三重県市街地として、津市周辺を想定し、緯度が 34.32°、経度が 136.30°周辺での風速を算出する。中層建築物が密集した地域であるため粗度区分をⅣとして突風の風速を算出する。

図 2-5 と同様、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における発生率が最も高い。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 10m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 10%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 1%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 0%であるのに対し、高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 19%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 13%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 5%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 1%であり、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 14%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 9%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 3%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 3%となり、高度が上がるにつれ、風速が大きくなる傾向がある。

中部国際空港から三重県市街地までの距離は、約 30km 以内でああるため、管制飛行を行う飛行体は高度 200m 以上、あるいは高度 300m 以上で飛行する。管制飛行を行う飛行体との接触を防止するために、管制下限高度以下の高度で飛行を想定する場合、300m、もしくは 200m 以下での飛行が想定される。図 2-5、図 2-6 の結果により、中部国際空港と三重県市街地の移動において、就航率が 95%以上となるのは高度 1000m 以下で飛行するのであれば、耐風性が 25m/s 以上の機体であり、高度 300m 以下であっても耐風性が 25m/s 以上の機体が必要となる。

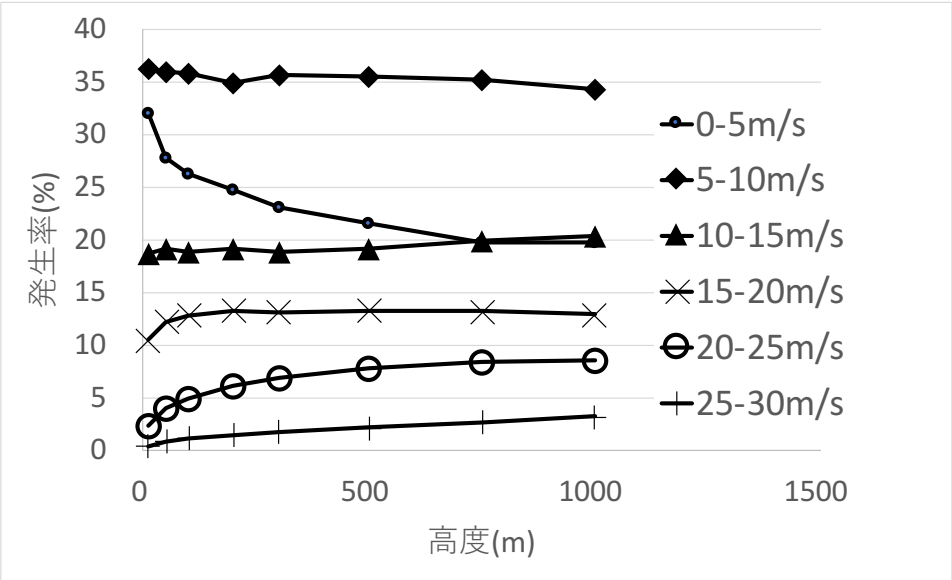


図 2-6 中部空港周辺における風の発生率

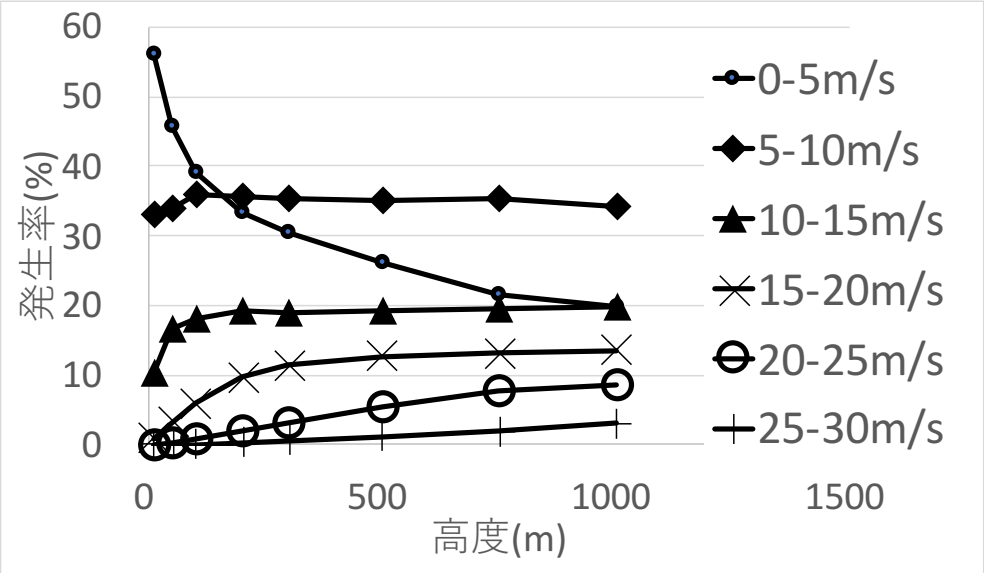


図 2-7 三重県市街地(((周辺における風の発生率

2.5.4 鳥取県市街地−岡山県市街地区間における風発生率

図 2-5 は、鳥取県市街地における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。鳥取県市街地として、鳥取市周辺を想定し、緯度が 35.29°、経度が 134.14° 周辺での風速を算出する。鳥取空港の平均風速データを基に、鳥取市街地における突風の風速発生率を求める。鳥取市街地は中層建築物が密集した地域であるため、粗度区分をⅣとして突風の風速を算出する。

図 2-7 は、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における合計の発生率が高度 1000m において 71%となる。一方、10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s、25m/s<x≦30m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 14%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 6%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 2%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 0%であるのに対し、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 16%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 8%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 3%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 1%である。

図 2-8 は、岡山県市街地における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。 岡山市街地として、岡山市周辺を想定し、緯度が 34.39°、経度が 133.55° 周辺での風速を算出する。岡山空港の平均風速データを基に、岡山市街地における突風の風速発生率を求める。10 階建以上の高層建築物が密集した地域であるため粗度区分をⅤとして突風の風速を算出する。風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s の発生率がいずれの高度においても 60%以上であり、15m/s<x≦20m/s の発生率はほぼ 0%である。本節の区間は、標高 1000m 前後の山々を有する中国山脈を通過する経路であり、空飛ぶクルマの飛行高度としても 1000m 前後であると想定される。図 2-7、図 2-8 の結果により、鳥取市街地と岡山市街地の移動において、高度 1000m 以下で飛行を行ったとすると、風に関して就航率が 95%以上となる耐風性は 20m/s 以上の機体である。

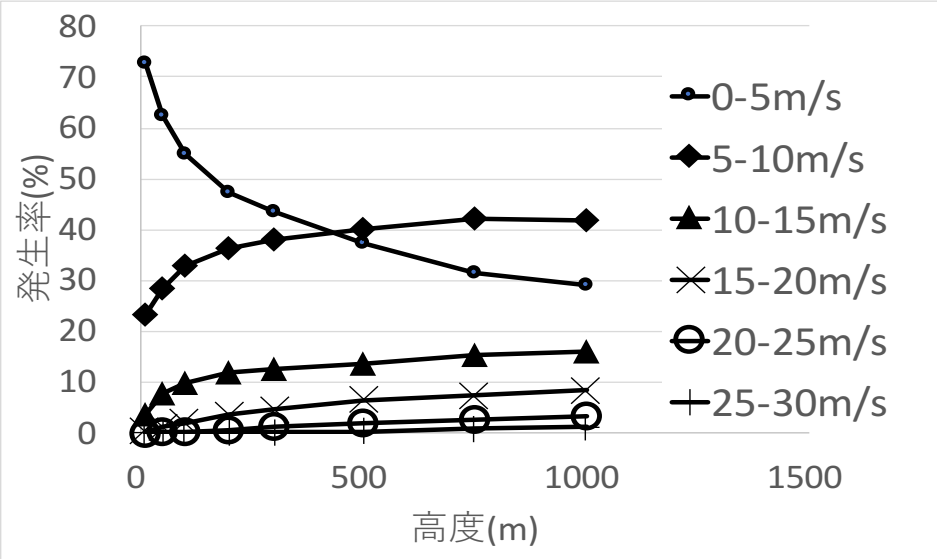


図 2-8 鳥取県市街地周辺における風の発生率

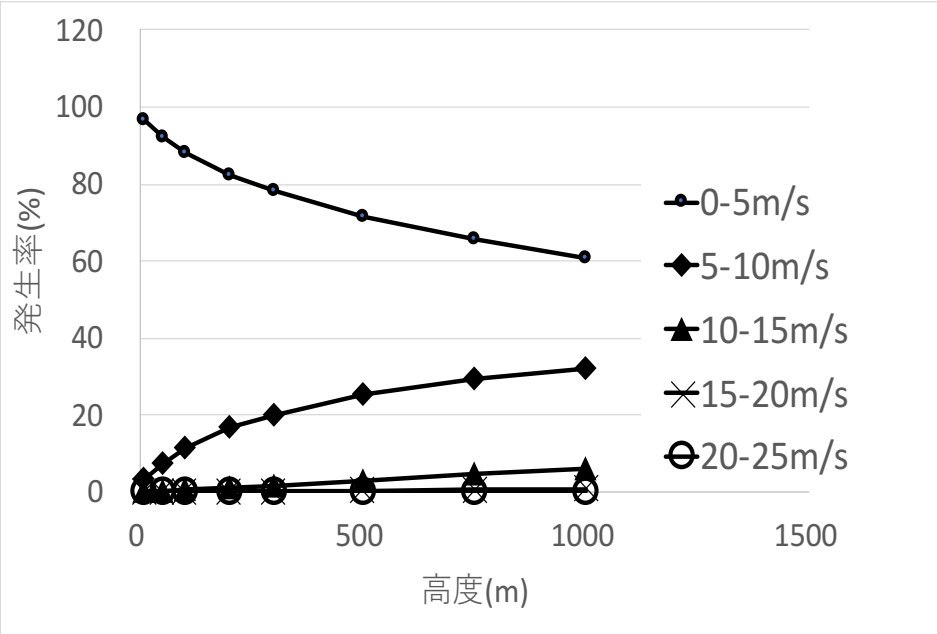


図 2-9 岡山県市街地周辺における風の発生率

2.5.5 新千歳空港−ニセコ区間における風発生率

図 2-9 は、新千歳空港における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。

空港の周辺にはほとんど障害物がないため粗度区分をⅠとして突風の風速を算出する。

図 2-9 は、風速の範囲が 0m/s≦x<5m/s、5m/s<x≦10m/s における合計の発生率が高度 1000m において 69%となる。10m/s<x≦15m/s、15m/s<x≦20m/s、20m/s<x≦25m/s、25m/s<x≦30m/s の範囲においては、高度上昇ともに発生率が上昇し高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 20%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 6%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 1%、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 22%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 7%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 3%、25m/s<x≦30m/s の発生率が 2%である。

図 2-10 は、ニセコ地域における高度ごとの突風の風速の発生率を 5m/s 間隔ごとに示したグラフである。 ニセコ地域として、緯度が 42.48°、経度が 140.41°周辺での風速を算出する。樹木・低層建築物が多数存在する地域であるため粗度区分をⅢとして突風の風速を算出する。高度 500m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 19%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 4%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 1%、高度 1000m では 10m/s<x≦15m/s の発生率が 22%、15m/s<x≦20m/s の発生率が 7%、20m/s<x≦25m/s の発生率が 2%、である。

本節の区間は、標高 1898m の羊蹄山をはじめ、標高 1000m 前後の山脈を通過する経路であり、標高の高い山々を迂回したルートを飛行したとしても、飛行高度は 1000m 前後になると想定される。図 2-9、図 2-10 の結果により、高度 1000m 以下で飛行するのであれば、耐風性が 20m/s 以上の機体であれば、風に関して就航率が 95%以上となることがわかる。

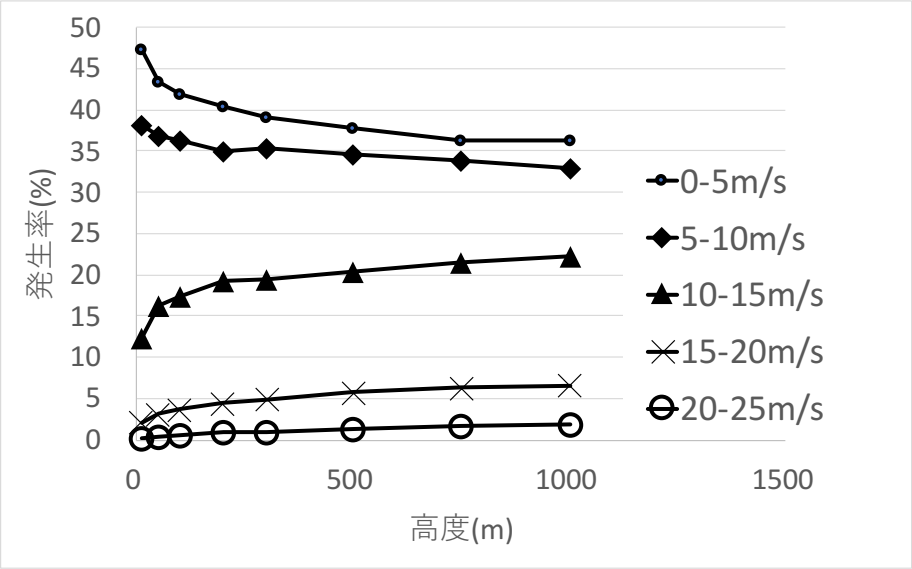


図 2-10 新千歳空港周辺における風の発生率

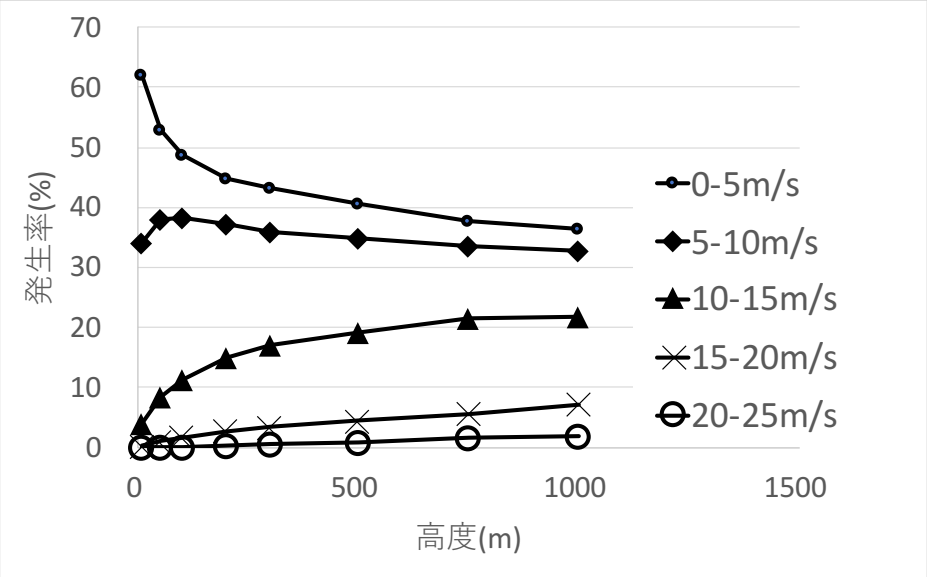


図 2-11 ニセコ周辺における風の発生率

2.6　悪視界条件発生率の算出結果

本章では、2.4 章で説明した方法に従って表 1-1 のユースケースに対する悪視界条件の発生率を明らかにする。

2.6.1 関西空港−万博会場区間における悪視界条件発生率

図 2-11 は、関西空港における高度ごとの悪視程条件の発生確率である。悪視界条件の発生率は高度によらずほぼ横這いで 3.5%程度の発生率である。 図 2-11 のプロットについて、線形近似を行うことで算出される高度 500m における悪視界条件の発生率は 3.1%となり、視界条件に関する就航率は 95%以上であると想定される。

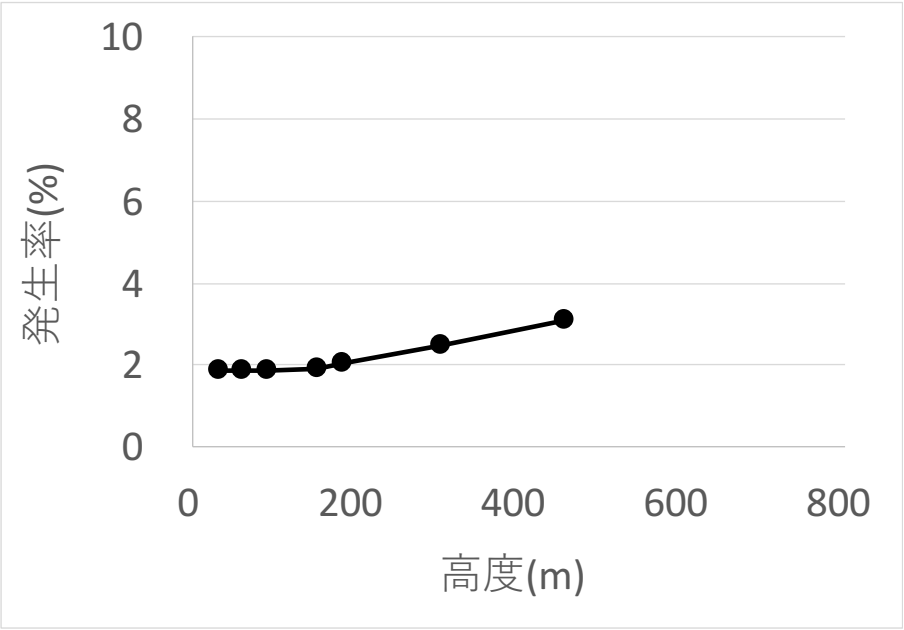


図 2-12 関西空港周辺における悪視界条件の発生率

2.6.2 長崎空港-IR 施設区間における悪視界条件発生率

図 2-12 は、長崎空港における高度ごとの悪視程条件の発生確率である。悪視界条件の発生率は高度に対して正の相関を持っており、高度 183m で 0.3%、457m で 1.3%である。図 2-12 のプロットに対して線形近似を行うと、高度 500m にける悪視界条件の発生率は 1.3%であると想定され、VFR でも 95%の就航率を満たせると想定される。

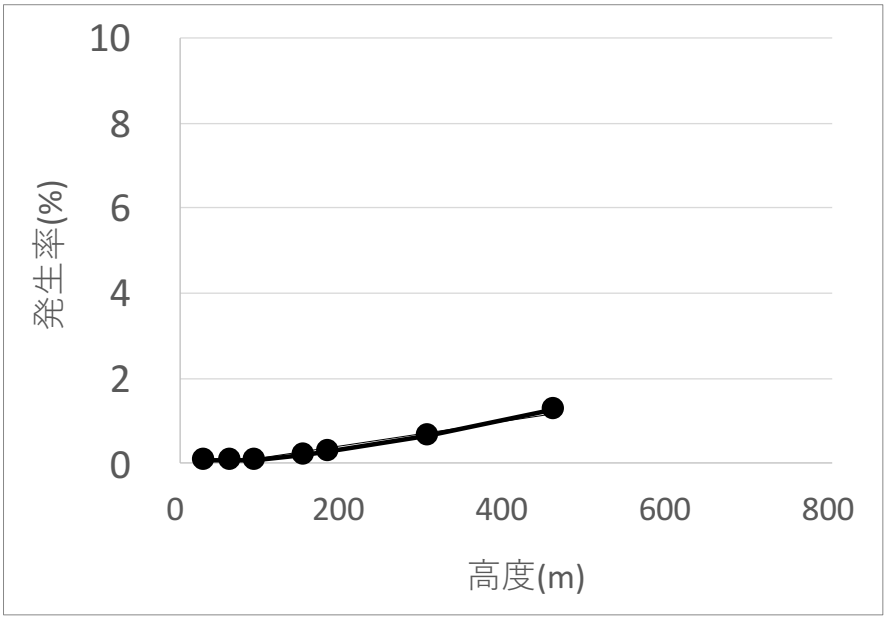


図 2-13 長崎空港周辺における風の発生率

2.6.3 中部国際空港−三重県市街地区間における悪視界条件発生率

図 2-13 は、中部国際空港における高度ごとの悪視程条件の発生確率である。悪視界条件の発生率は高度 183m 以上で正の相関を持っており、高度 183m で 4.1%、457m で 6.8%である。図 2-13 のプロットについて線形近似を行うと、高度 500m における悪視界条件の発生率は 7.0%となり、高度 300m でも 5.3%である。VFR では 95%の就航率を満たせないと示唆される。

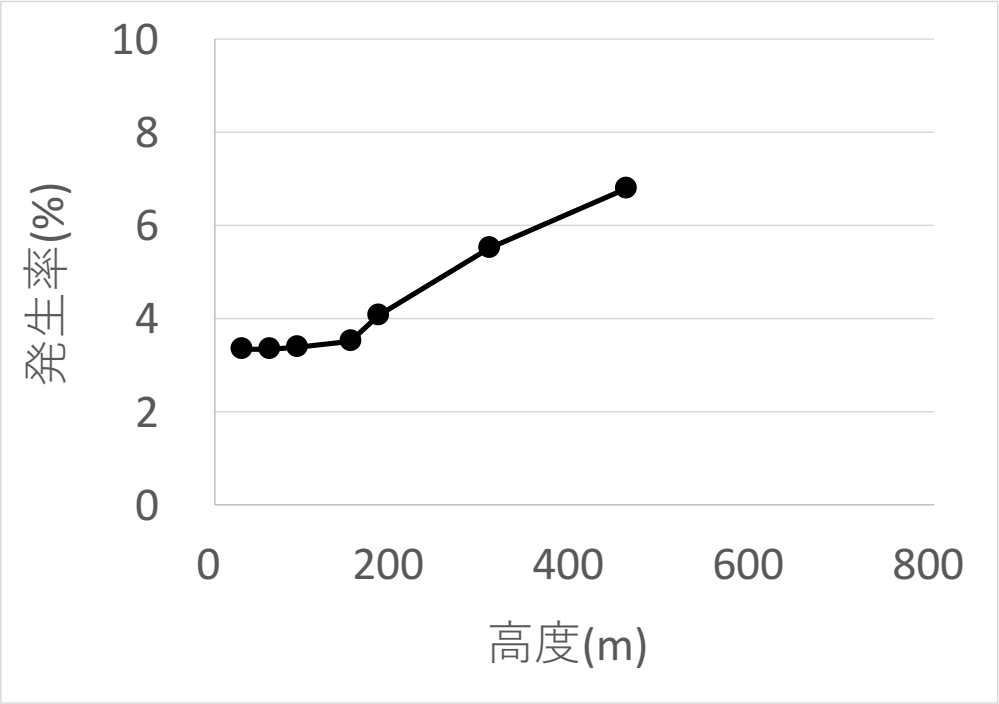


図 2-14 中部国際空港周辺における悪視界条件の発生率

2.6.4 鳥取県市街地−岡山県市街地区間における悪視界条件発生率

図 2-14 は、鳥取空港における高度ごとの悪視程条件の発生確率である。悪視界条件の発生率は高度によらずほぼ横這いであり、高度 183m で 1.2%、457m で 1.5%である。図 2-14 のプロットについて、線形近似を行うことで算出される高度 1000m における悪視界条件の発生率は 1.9%であり、高度 1000m 以下の飛行では、VFR では 95%の就航率を満たせることが想定される。

また、図 2-15 は、岡山空港における高度ごとの悪視程条件の発生確率である。悪視界条件の発生率は高度によって微増しており、高度 183m で 1.8%、457m で 2.7%である。図 2-15 のプロットについて、線形近似を行うことで算出される高度 1000m における悪視界条件の発生率は 5.7%であると想定され、高度 1000m を超えると、VFR では 95%の就航率を満たせないことが想定される。

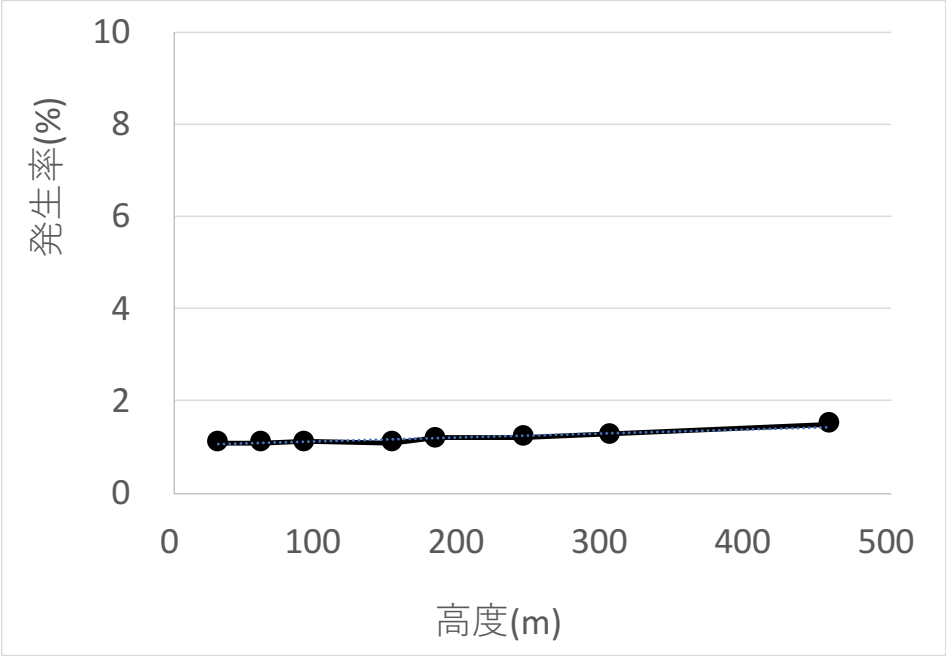


図 2-15 鳥取空港周辺における悪視界条件の発生率

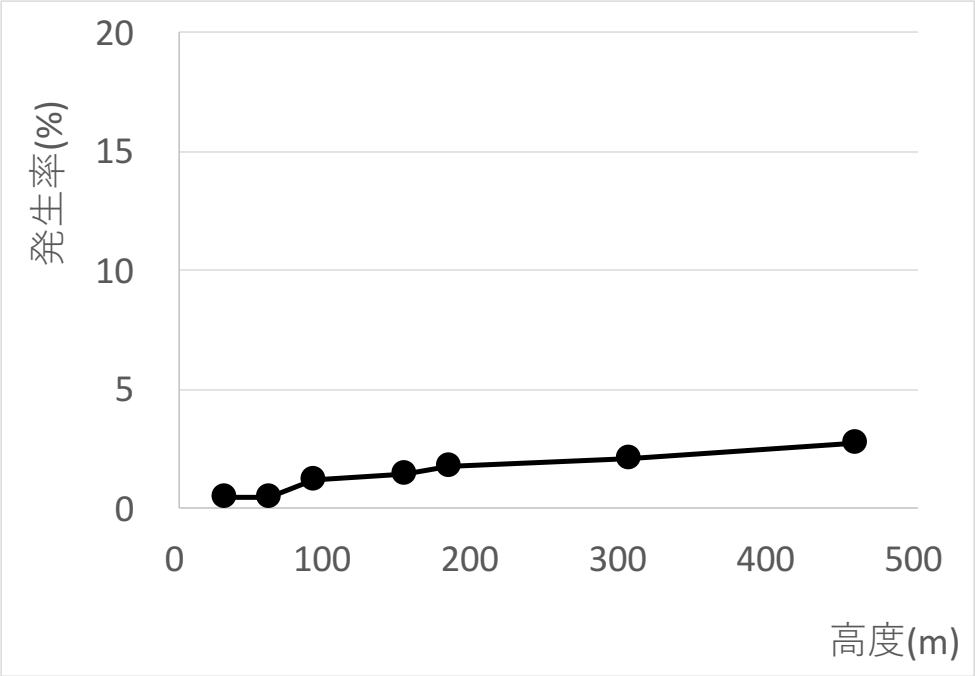


図 2-16 岡山空港周辺における風の発生率

2.6.5 新千歳空港–ニセコ区間における悪視界条件発生率

図 2-15 は、新千歳空港における高度ごとの悪視程条件の発生確率である。悪視界条件の発生率は高度に応じて高くなり、高度 91m で 13.9%、457m では 28.4%となる。本区間においては、いずれの高度で飛行しても VFR では 95%の就航率を満たせないと想定される。

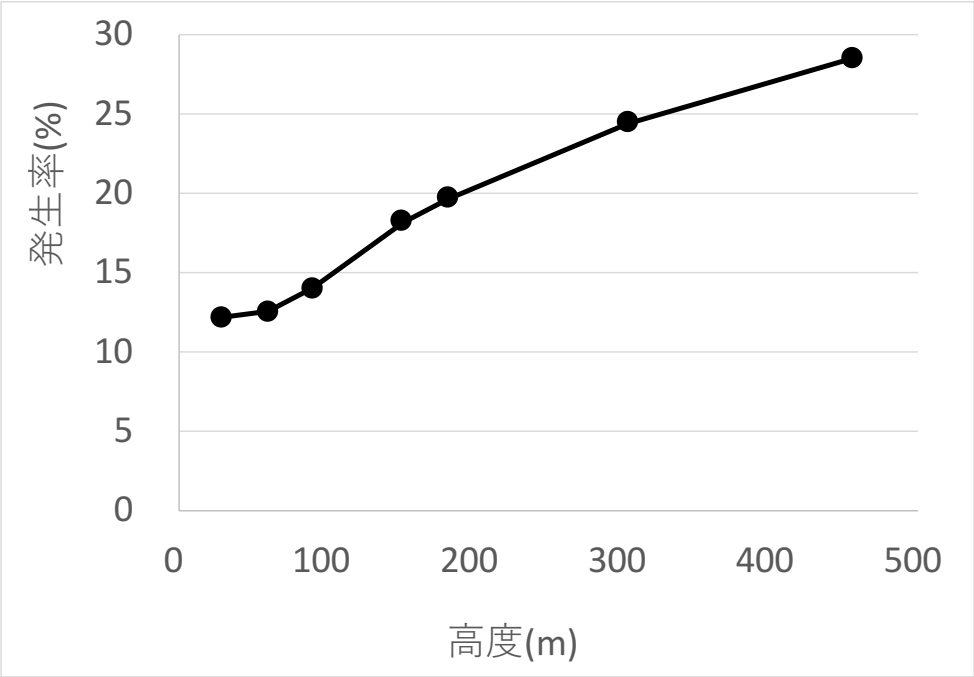


図 2-17 新千歳空港周辺における悪視界条件の発生率

2.7　就航率のまとめ

2.4 節、2.5 節の結果より、風と悪視界条件、それぞれについて就航率を 95%以上とするために必要な要件は、表 1-1 に示すユースケースに対して以下の通りとなる。

関西国際空港–万博会場

高度 500m 以下で飛行するのであれば、耐風性が 20m/s 以上の機体であれば、風による就航率を 95%以上とできる。また、管制圏外の飛行として高度 200m 以下で飛行するのであれば耐風性が 15m/s 以上であれば良い。また、VFR でも、95%以上の就航率となる。

長崎空港–IR 会場

高度 500m 以下で飛行するのであれば、耐風性が 20m/s 以上の機体であれば、風による就航率を 95%以上とできる。また、VFR でも、95%以上の就航率となる。

中部国際空港–三重県市街地

管制圏外の飛行として高度 300m 以下で飛行しても、就航率 95%となる耐風性は 25m/s 以上である。また、高度 300m であっても、VFR ができない確率は 5.3%であり、悪視界条件においても飛行できる有視界に頼らない飛行方式が必要である。

鳥取県市街地–岡山県市街地

高度 1000m で飛行した場合、就航率 95%となる耐風性は 20m/s 以上である。また、高度 1000m における VFR ができない確率は 5.7%であり、悪視界条件においても飛行できる有視界に頼らない飛行方式が必要である。

新千歳空港–ニセコ

高度 1000m で飛行した場合、就航率 95%となる耐風性は 20m/s 以上である。また、高度 1000m における VFR ができない確率は 51.6%であり、悪視界条件においても飛行できる有視界に頼らない飛行方式が必要である。

表 2-1 は、表 1-1 に示すユースケースにおいて、就航率 95%以上のために考慮すべき風速と、VFR ができない確率を飛行高度が 500m と 1000m の場合に対してまとめた表である。中部国際空港と三重県都市部の移動の場合は 25m/s までを考慮する必要があるが、その他のユースケースはいずれも 20m/s までを考慮すれば良い。また、考慮すべき風速以上の風が発生する場合について、離陸、もしくは着陸動作を見合わせるかどうか、風速の検知を行う必要があるかを考える必要がある。

VFR ができない確率については、飛行高度が 500m の場合、中部国際空港と三重県都市部間の航路、新千歳空港とニセコ間の航路において 5%以上の確率となり、高度 1000m の場合においては、中部国際空港と三重県都市部間の航路、新千歳空港とニセ

コ間の航路、鳥取県都市部と岡山県都市部間の航路において 5%以上となる。以上の結果より、全てのユースケースにおいても ICAO 勧告である就航率 95%以上を達成するためには機体要件として 25m/s 以上の耐風性が必要である。また、悪視界条件の発生率が 5%以上となるユースケースが存在するため、そのような地域では VFR によって就航率 95%以上を達成することは困難であり、悪視界条件においても飛行できる飛行システムを構築する必要がある。

以上の結果により、風と悪視界条件に対する要求はユースケースごとに様々であり、就航率を向上するための技術要件にレベル差があることが明らかとなった。風速については、目標とする就航率を達成することを鑑みて、機体耐風性を考慮した設計する必要がある。また、VFR では就航率向上が困難なケースについて悪視界飛行を行うための運航システムとしての構築が必要となる。

表 2-2　考慮すべき風速と VFR できない確率

	飛行高度500m		飛行高度1000m	
	就航率95%以上のために考慮すべき風速(m/s)	有視界飛行できない確率(%)	就航率95%以上のために考慮すべき風速(m/s)	有視界飛行できない確率(%)
関西国際空港ー万博会場	20m/s以上	3.1%	20m/s以上	4.6%
長崎空港ーIR施設	20m/s以上	1.3%	20m/s以上	2.7%
中部国際空港ー三重県都市部	25m/s以上	7.0%	25m/s以上	11.4%
鳥取県都市部ー岡山県都市部	20m/s以上	3.1%	20m/s以上	5.7%
新千歳空港ーニセコ	20m/s以上	31.3%	20m/s以上	51.6%

3.　議論のためのツールの表記方法

本章では、1.4.2 で定義したリファレンスモデルへと至るまでに作成したプロトタイプから、議論を行うツールとして必要な要件を抽出し、新しいリファレンスモデルの表記方法へと至った経緯について説明する。

3.1 節では、リファレンスモデルのプロトタイプ形式について説明し、空飛ぶクルマ事業への参入に興味のある関係者との議論を行った結果について説明する。3.2 節では、3.1 節で提案したリファレンスモデルの改良のために、追加で関係各社と個別に議論を行った結果と、改良のポイントについて考察を行った結果について説明する。3.3 節では、3.2 節で明らかとしたリファレンスモデルの改良のポイントを踏まえて、Object Process Methodology の表記方法を利用したリファレンスモデルを提案し、関係者と議論を行った結果について説明する。3.4 節では、3.3 節までの結果を踏まえて、本研究として提案するリファレンスモデルの表記方法について説明する。

3.1 プロトタイプ

3.1.1 プロトタイプの説明

図 3-1 は、プロトタイプの全体象を示す図である。プロトタイプとして、システムアーキテクチャを記述した。以下に議論を行いやすくするために実施した工夫を説明する。

エクセルを使用

エクセルを使用してプロトタイプを作成した。

表記方法として、１つのシート上に定義した要求とシステムアーキテクチャを記述した。エクセルに記述した理由は、エクセルに記述することでシステムの修正や、追加を行う場合でも個々の要素を小さくすることなく、シートを広げることで対応できるためである。また、シート上の画面をスクロールし、該当箇所のズームイン、ズームアウトを容易に行うことで、議論のポイントに応じて、システムの俯瞰と詳細の確認を容易に行うことができ、議論の活性化につながると考えた。

要求定義とシステムアーキテクチャを併記

システムアーキテクチャと要求定義を併記することで、システムアーキテクチャとして記載した個々の要素とそれらの関係性について、根拠を即座に確認できると考えた。また、議論の対象は風速と悪視界条件に対応したシステムに対してであるが、これらの項目以外について、トレードオフ関係が生じるリスクを低減するために記述した。

設備の分類ごとに色分け

システムアーキテクチャの要素がどの設備に該当するかを色分けすることで、当該の専門家が速やかにシステムの特徴、妥当性について検討できるようにした。図 3-1 では、空飛ぶクルマ機体、離発着場である vertiport、目的地の vertiport、vertiport 以外の地上設備に分類した。

システムアーキテクチャの要素への記載内容

要求とのトレーサビリティを取りやすくするため、定義した要求に番号を振り、システムアーキテクチャの要素に記載した。また、機能に対応する物理要素として、候補となり得る測定器を記載した。候補となる測定器を明示することで、測定器の開発に関わるメーカーの積極的な発言が期待でき、システムの実現性について議論が促進されると考えた。

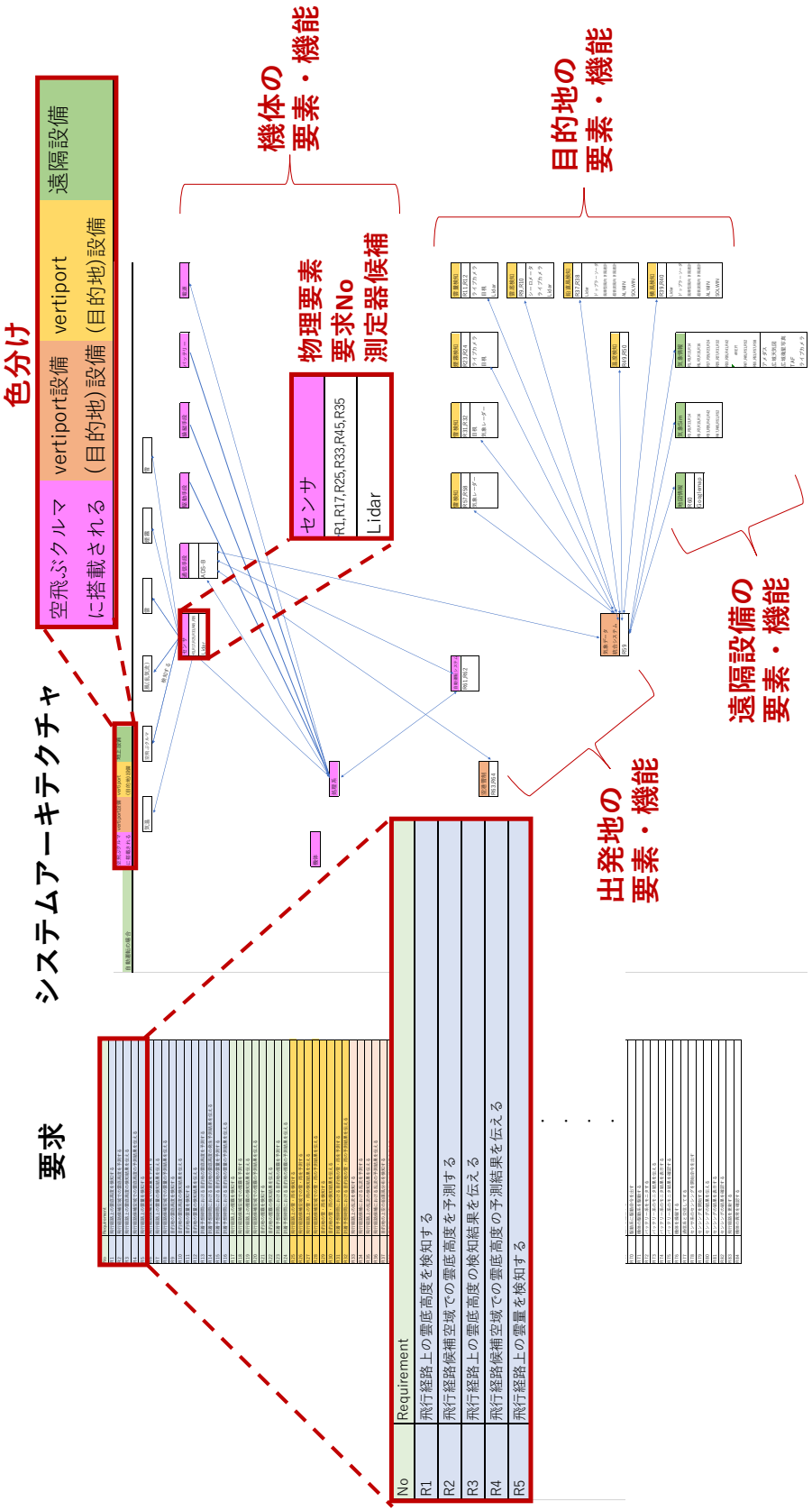


図 3-1　プロトタイプとして作成したシステムアーキテクチャ

3.1.2 運航システムの説明

本章では、表 1-1 に示す新千歳空港–ニセコ間をユースケースとして運航システムのプロトタイプを作成した。図 3-3 は新千歳空港–ニセコ間周辺の地図である。また、表 3-1 は本区間における主な飛行条件をまとめた表である。

表 3-1　新千歳空港-ニセコ間の飛行条件

飛行高度	1000m
風発生率(≦20m/s)	95%
悪視界条件発生率	51.60%
飛行速度	200km/h
運行本数	1～2本/h
ルート上の飛行体	空飛ぶクルマ、鳥

図 3-2　新千歳空港-ニセコ間の地図

本区間は、直線距離が約 80km であるが、目的地であるニセコ近辺に標高 1898m の羊蹄山を有するなど、ルート上に標高 1000m 前後の山間部が存在するため、1000m 前後の高度での飛行が想定される。飛行高度が 1000m の場合、表 3-1 より、風速が 20m/s 以下の発生率は 95%であり、耐風性は 20m/s 以上が必要である。また、悪視界条件の発生率は 51.6%であるため VFR では、就航率 95%以上の目標を達成することはできない。

飛行速度については、ヘリコプタの巡航速度である 200km/h、運行本数としては事業成立性を鑑みて 1 時間に 1～2 本と仮定した。

本区間における悪視界条件の発生率は表 1-1 におけるユースケースの中で最も高いものである。また、飛行高度、飛行距離も表 1-1 のユースケースの中では大きい。日本国内のフレキシブルな任意の 2 点間の移動の実現するためのシステムについて議論を行うために、想定されるユースケースの中で最も厳しい条件を対象として、本章では新千歳空港–ニセコ間に対してプロトタイプを作成した。

表 3-2 は、システム要求定義をまとめた表である。

R0.0 として、表 3-1 に示す条件を記述し、対応する要求を R1.0 以降に記述した。

R3.1.1～R3.1.7 までの物体検知について、物体検知を行う距離については、新エネルギー・産業技術総合開発機構（2019）が、行った実験に基づき、空飛ぶクルマにおいても同様の機体応答性であると仮定して、相対速度が 100km/h に対して 500m 手前から検知が必要であるとした。

要求定義を行う前に、ヘリコプタパイロットに対して、フライト前のブリーフィングについてヒアリングを行ったところ、悪視界条件の原因となる雲の発生について、飛行ルート周辺のライブカメラや、天気図などの情報を元に飛行ルートを想定し、フライトの可否を判断するとの意見を得られたため、表 3-2 には、風や悪視界条件の発生の予測の必要性について関係者との議論を行うため、要求定義として記述した。

将来的に完全自動運転が行われることを想定し、リファレンスモデルとしてパイロットによる操縦と自動運転の場合について作成した。自動運転については自律飛行による自動運転、遠隔操作による自動運転の２つのパターンについて作成した。また、飛行中と飛行中以外の状況において、システムに必要な要件が異なる可能性があるため、運航フェーズとして、離陸前/離陸中、水平飛行中、着陸中の 3 つのフェーズについて考察を行い、表 3-3 に示す合計９つのリファレンスモデルを作成した。

表 3-2　システム要求

Name	Text
R0.0 Original Statement	風速と悪視界条件について、就航率95%を達成するためのシステムを記述する ー20m/sまでの風速を考慮する ー悪視界条件は51.6%である ー飛行高度は1000mである ー飛行速度は200km/hである ー運航は1～2台/hである ー飛行ルート上に鳥やドローンが存在する場合がある
R1.0 wind resistance	機体耐風性は20m/s以上である
R2.0 wind detect	20m/sより大きい風速の風を知る
R2.1 Before Landing	離陸時に20m/s以上の風が吹くかどうかが分かる
R2.1.1 Wind Detect Before Landing	離陸前に、離陸地上空の20m/s以上の風を検知する (本当に必要か)
R2.1.2 Wind Predict Before Landing	離陸前に、着陸地上空の20m/s以上の風を予測する(本当に必要か)
R2.2 Before Take off	着陸時に20m/s以上の風が吹くかどうかが分かる
R2.2.1 Wind Detect Before Take off	着陸前に、着陸地上空の20m/s以上の風を検知する(本当に必要か)
R2.2.2 Wind Predict Before Take off	着陸前に、着陸地上空の20m/s以上の風を予測する(本当に必要か)
R3.0 poor visibility	悪視界環境においても飛行可能である
R3.1 Detect Obstacle	雲、霧環境下で機体外部の物体を検知する
R3.1.1 Flying car Detect	雲、霧環境下で2000m以上手前から対向の空飛ぶクルマを検知する
R3.1.2 Vertiport Detect	雲、霧環境下で5000m以上手前からvertiportを検知する
R3.1.3 Helicopter Detect	雲、霧環境下で2000m以上手前から対向のヘリコプタを検知する
R3.1.4 Bird Detect	雲、霧環境下で500m以上手前から対向の鳥を検知する
R3.1.5 Detect Building	雲、霧環境下で500m以上手前から建築物を検知する
R3.1.6 Detect Mountain	雲、霧環境下で500m以上手前から山を検知する
R3.1.7 Detect Ground	雲、霧環境下で300m以上下方の地上を検知する
R3.2 Detect ObRtacle	飛行中に悪視界条件が発生するかどうか予測する(本当に必要か)

表 3-3 飛行タイプと飛行フェーズの分類

操縦者	離陸前/離陸	飛行中	着陸
パイロット	1	2	3
地上遠隔	4	5	6
自律飛行	7	8	9

3.1.3 プロトタイプを使用した結果

表 3-4 は、プロトタイプを使用して議論を行った際の、参加者の属性を表す。それぞれの参加者に対して、議論を期待した点は以下である。

センサーメーカー社員 悪視界条件で LiDAR センサを使用することの可能性について、現行技術と開発の発展性についての議論を行う。

ヘリコプタパイロット 運航システムの構想の実現可能性について、パイロットの視点から見た感覚について意見を引き出し、システムのあるべき姿について議論を行う。

気象サービス会社社員 運航システムの構想として提案する気象サービスに対して、実現可能性について議論を行う。

ヘリコプタ運航会社社員 運航システムの構想全般に対して、現行のヘリコプタ事業と比較した時にシステムの破綻などがないかどうか議論を行う。

機体システムメーカー社員 運航システムの構想について、空飛ぶクルマ機体仕様の観点から、必要な要素の追加、修正について議論を行う。

元空港運行管理者 運航システムの構想全般に対して、構想の実現性、今後考慮すべき項目について議論を行う。

表 3-4 議論への参加者属性

ID	属性
1a	センサメーカー 社員
2a	ヘリコプタパイロット
3a	気象サービス会社 社員
4a	ヘリコプタ運航会社 社員
5a	機体システムメーカー 社員
6a	元空港運行管理者

これらの対象者に対して、図 3-1 のプロトタイプを使用して議論を促したところ、以下の成果が得られた。

全体的な議論の結果

活発な議論の誘発、関係者にとって開発の参考となるようなモデルとはならず、参加者からの積極的な議論や代替案などのコメントは得られなかった。システム全体に対し

て、大まかな方針について意見が出てきたに留まった。

しかし、会議後にセンサメーカーからは、「LiDAR 技術について言及されているという点で興味深く、より具体的な課題設定に落とし込んで欲しい。」というコメントがあり、リファレンスモデルに対して一定のニーズがあることが明らかとなった。

システム全体の俯瞰とテーマの絞り込みが必要

図 3-1 のプロトタイプでは、提案するシステム全体像が情報としては表現されているが、情報量が多すぎて細かいため参加者が一瞥でシステムの理解が追いつかず個別の要素について議論を生むことができなかった。システムの理解ができないため、要求の妥当性についても議論ができずに終わった。また、表 3-2 に示す分類ごとに図 3-1 のようなリファレンスモデルを 9 つ作成したため、参加者は、何についてコメントをすれば良いか分からず混乱を生む結果となった。全体俯瞰をしつつ、議論したいテーマについて明確にする必要があり、テーマを絞る必要があることが明らかとなった。

具体例を示す必要がある

プロトタイプには飛行高度、検知条件などが数値化されていないため、システムの有効性を判断する材料が何もなく、無味乾燥な議論となった。また、プロトタイプを提示する前の事前説明では、図 3-2 に示す飛行区間についてのみ説明を行い、飛行ルートの詳細について説明を行わなかったため、気象サービス会社にとっては、気象サービスに対してコメントのやりようがない議論となった。

以上の結果より、改良点として以下のポイントがあると考えた。

① 一枚でそのページの話したいテーマについて全ての情報をみることができる
② 全体俯瞰と詳細の確認を一つのダイヤグラムでまとめても、議論の際に行き来はできないため、システムレベルとサブシステムレベルを分けて表記する。
③ 議論の際に別々に分かれた要求とシステムアーキテクチャとのトレーサビリティを取る時間はほとんどないため、同じ画面に表示する必要はない。
④ 具体的な困りごとを解決する必要がある。今回の議論では、センサーメーカーが開発する LiDAR センサを使って空飛ぶクルマ事業への参入に興味があるが、どのようなセンサを開発すれば良いか分からなくて困っていることが分かった。この結果を受けて、センサーメーカーにとって意味のあるリツールを作り展開することで、他のステークホルダーに対しても意味のあるツールへと発展させることができると考えられる。

運航システムに対しての考察

また、図 3-1 のプロトタイプによる議論によって、運航システムについては以下の点を考慮する必要があることが明らかになった。

① パイロット操縦、自動運転など、全てのケースを記述しても議論が追いつかないため、事前検討を行いどのケースについて議論を行うべきかを決めておく。

② ①と同じく、限られた時間で有効な議論を行うためには気象検知の仕組みついてもある程度候補を絞り込んでおく必要がある。

参加者より得られたコメントは以下である。

プロトタイプに対する参加者からのコメント

1a センサメーカー社員

センサに要求する明確な仕様が知りたい。

悪視界条件の飛行において、エアロゾルの検知は可能。LiDAR は光の粒子、サイズ、受発光、反応性などを検知できる。

システム成立性の知見が欲しい。ヘリコプタを製造する重工系の会社に聞けば要求仕様について情報が得られるのではないか。

(打ち合わせ後)システムの構想として、LiDAR の可能性検討が含まれているのは大きな前進だった。より具体的な課題設定に落とし込めるよう継続して議論したい。

2a ヘリコプタパイロット

空飛ぶクルマにセンサを搭載した場合、性能の話をする前にペイロード（重量）が気になる。どこまで小型化できるのか。

3a 気象サービス会社社員

気象条件を明確にするために、民間の気象測定も利用すべき。

国道沿いの飛行ルートを設定し、カメラを利用するのが良いのではないか。

GUI を整備した気象情報の統合システムを作れる可能性はある。

4a ヘリコプタ運航会社社員

システム提案の目的が自動運転か就航率向上かを明確にした方が良い。

就航率向上だけが目的であるなら、 IFR 技術がある。空飛ぶクルマとして新規の課題があるのではないか。

5a 機体システムメーカー社員

重工系などのメーカーに問い合わせてもセンサ仕様に関する情報が出てくることはまずない。LiDar などの使い方が軍需産業で特別進んでいるわけではない。

6a 元空港運航管理者

ルート間の気象状況について詳細を知る必要がある。そのために、機器が設置されたところを飛ぶ必要がある。このため、道路に沿った飛行経路が良いと思う。

3.1.4 LiDAR センサについての考察

本項では、悪視界条件における空飛ぶクルマの飛行において、LiDAR(Light Detection and Ranging)センサを活用することについて考察を行う。LiDAR 技術は、短波長レーザーを光源とする光学センサであり、測距センサとして使用されるだけでなく、分解能に優れていることから空間情報の検知にも使用できる。

悪視界環境において、パイロットの目視に頼ることなく飛行を行うためには、機体外部の状況を検知し、パイロットの目の代わりとなる手段が必要であり、LiDAR センサを活用することで目的を達成できる可能性がある。林（2018）は、自動車、二輪車への適用を目的として LiDAR による物体観測点群情報をもとに、低性能の計算機環境下においても自動車、二輪車、人物の特徴量を抽出して物体の誤認識を防止する方法について提案している。加藤（2020）は一つの光源で広い視野角の検知が可能な MEMS ミラー型 LiDAR の特徴に合わせた車両の自己位置推定技術について報告している。

空飛ぶクルマにおいても、悪視界条件において、パイロットの目として LiDAR 技術を活用することで、計器を使った新しい有視界飛行方式を実現できる可能性があるが、具体的にどのような運航システムのもと、どのような要求が必要か明確でなく、システムを実現するために何を作れば良いか明確ではないため、LiDAR センサの開発を行うセンサメーカーは空飛ぶクルマ事業への参入に興味があるものの、開発を実施できない状況にある。

本研究では、計器を使った新しい飛行方式の手段として LiDAR を使用した場合のシステムについて議論するためのツールを提案する。

3.2 ツールへのニーズ調査

3.2 節の結果を踏まえて、議論を行うためのツールとしてあるべき姿のニーズを調査するため、気象サービス会社社員（3a）、ヘリコプタパイロット（2a）、センサメーカー社員（1a）と議論を行い、システムの前提について考察を行った。それぞれの参加者に対して、議論を期待した点は以下である。

気象サービス会社社員 新千歳空港–ニセコ間の飛行ルートにおいて、風速、悪視界条件の検知手段として利用できる民間の気象サービスとしてどのようなものがあるか、気象サービス会社として、気象情報の分析・提供サービスを行い、就航率向上に寄与するためにはどうすれば良いかを議論する。

ヘリコプタパイロット 悪視界条件下でのパイロットによる操縦を想定した場合、気象データの検知結果をパイロットにどう伝えると有効に機能し、悪視界条件下での操縦に役立つか、物体の検知が物体からどの位手前で行えている必要があるかを議論する。
センサーメーカー社員　空飛ぶクルマ事業に参入するにあたって具体的にどのような壁があるのかを議論する。

気象サービス会社社員（3a）議論の結果

議論の結果、利用できる気象サービスについては、新千歳空港–ニセコ間で悪視界条件を検知できるようなサービスは提供されていないことが明らかになった。また、飛行ルート上の気象条件の詳細を分析するために、湿度のなどの気象データと悪視界条件の相関式を作ることで、VFR に適した飛行ルートを検討できる可能性が示された。また、気象サービス会社としては、飛行ルートが決まっていたとしても設備を導入する立場にはなく、インフラが配備されないことにはサービスのやりようがない事が明らかになった。

新千歳空港-ニセコ間のルートは、気象観測地点が少なく、直接の気象検知ができない。気象庁が提供する METAR 情報から、気象状況を判断するしかありません。ルート間の気象条件を見積もるためには、雲底情報や、卓越視程情報と最大湿度との関係から相関式が作れるかもしれません。最大湿度については、飛行ルートによっては多くの地点でデータを取得できます。最大湿度データから、悪視界条件を見積もることで、VFR でもより就航率を向上できる飛行ルートを検討できる可能性があります。

候補となる飛行ルート上にいかにインフラを付けられるかに尽きます。気象サービス会社としては情報が取れないことにはどうしようもありません。

飛行ルート上の気象情報を取得するアイデアとして、ドローンや航空機からデータを取得するという方法があります。特に航空機ではエーカースと呼ばれる気象情報取得システムがあり、これは着陸体制の飛行機から風速データを取得するものです。悪視界条件についても同様のシステムを作れると良いと思います。また、ドローンについては、ドローン会社は鉄塔に測定器をつける例もあり、こちらも類似のシステムを作れると良いと思います。

上記の結果より、飛行ルートが定まっていない段階で、気象情報サービスを提供するためのインフラ整備は困難であることが明らかになった。また、航空機を利用した気象情報取得システムは、航空機の運航間隔、運航ルートに依存した情報の取得となり、空飛ぶクルマの飛行ルートの制約となる可能性が高い。また、新型コロナウイルス Covid-

19 が流行により航空機の運航本数が激減している現状では、十分なデータを得られない可能性があり、今後の航空機の運航についても不透明な状況が続くと想定される。

一方、ドローンの利用については、山間部においてドローンが飛行する可能性は低く、測定器の設置についても可能性は不透明であると考えられる。

このため、本区間において、飛行ルート上全域において、気象情報を取得し、気象サービスを提供するという手法は現時点で現実的ではなく、機体にセンサに搭載し、センサでは達成できない要求に対して、ポイントを絞った気象情報の提供が可能かどうか考察するのが妥当であると考えた。

ヘリコプタパイロット（2a）議論の結果

議論の結果、そもそもパイロット操縦で悪視界条件を飛行すること自体が困難であることが明らかとなった。

悪視界条件で、衝突の心配がある状況で飛行することがないので何 m 手前で検知できている必要があるか検討がつきません。VFR は、パイロットが目視で周囲の環境を確認することで、物体との衝突を回避できるようにします。IFR は、パイロットが目視で周囲の環境を確認できない代わりに航空交通管制の指示に従って飛行することで、衝突の心配がないという保障を得た状態における飛行方式です。

仮に、LiDAR 技術や気象サービスで飛行ルート上の悪視界条件が検知できたとして、ディスプレイ上に機体周囲の環境が見えたとしても、それによって衝突回避の操縦ができるかどうかは自信がありません。自動車で例えるなら、ドライブレコーダーの画面を見ながら運転を行えますか？と問われているのと等価です。仮にそのような操縦が可能とするためには、パイロットは相当な訓練が必要となると思います。

空飛ぶクルマを普及させるためには、パイロットのワークロードを低減し、簡易操作、もしくは自動運転を行うことによって、容易に飛行可能なシステムへと発展させる必要があると考えられる。このような事情を鑑みるとヘリコプタパイロット以上の操縦訓練を行い、操縦技術を熟練させることは困難であると考えられる。

上記のヒアリング結果を鑑みて、本研究では悪視界条件における飛行を可能とするために機体に搭載したセンサにより、悪視界環境下においても周囲の物体を検知し、検知結果をパイロットへとフィードバックせず、運転補助機能にフィードバックさせる運航システムであることを前提にツールを作成する。センサとして LiDAR センサの搭載可能性について検討を行う。

センサーメーカー社員（1a）議論の結果

議論の結果、センサメーカーは空飛ぶクルマ事業への参入に興味はあるものの、必要なスペックに関する情報がどこからも出てこず、利用方法も分からないため、開発目標が立てられないことが悩みであることが明らかになった。開発目標に対する確約を得たいことが明らかになった。

センサーメーカーの立場からすると、センサのスペックに特化した議論ができるのが一番良いです。しかし、機体メーカーなどの他のステークホルダーから、スペックの妥当性についての確認も取りたいと考えています。 現状の LiDAR の開発試作品レベルが、空飛ぶクルマの実証実験に行う価値があるものであるかどうかを判断したいです。実験を行い、改善ポイントを明確にしたいです。まずは、気象について要求スペックの分解能を挙げていただきたいです。性能として達成可能かどうかを確認し、それが、重量、コストの観点で妥当かどうか検討を行いたいです。

以上の議論の結果より、運航システムの前提条件として以下のポイントを考慮する。

① 気象条件の検知を気象サービスに頼らなくともできるよう、機体に搭載したセンサで行う。センサとして LiDAR センサの搭載について、実現性を検討する。
② LiDAR センサの開発目標と、その根拠を与えるものとする。
③ 全ての操縦をパイロットによる操縦とはしない。自動運転による運転補助を前提とする。

3.3 プロトタイプの改良

表 3-5 は 3.3.3 項、3.4 節の調査結果をもとにまとめたツールへの要求である。表 3-5 内の要求 S0.0 に、3.3.3 項、3.4 節の考察から得た結果を Original Statement としてまとめた。Original Statement の中の 1 つである、「1 枚で情報が完結する」について具体的な表記方法として「OPM を利用する」を S2.0 として定義した。本節では、OPM

表 3-5　議論を行うためのツールへの要求

Name	Text
S0.0 Original Statement	議論を促進できる表記である ー1枚で情報が完結する ー具体的な困りごとを解決する ー運航システムの前提条件を入れる
S0.1 Expression	1枚で情報が完結する
S2.0 Expression	OPMを利用する
S0.2 Prerequisites	運航システムの前提条件を入れる
S3.0 Autonomous	自動運転による運転補助を前提とした表記にする
S4.0 Sensing	機体に搭載したLiDARセンサによる物体検知を前提とした表記にする
S0.3 Target	具体的な困りごとを解決する
S5.0 Target	LiDARセンサを扱うセンサーメーカーの困りごとを解決できるものとする
S5.1 Mission1	LiDARセンサの開発目標を与えるものとする
S5.2 Mission2	LiDARセンサ搭載の現実性が明らかとなる

によって記述した運航システムについて説明する。OPM は Object Process Methodology の略であり、Dori（2006）が提案する技術システムコンセプトの表現方法である。SysML などと同じく、モデルベースシステムズエンジニアリングの一種であり、簡易な表現方法で技術コンセプトを表現できることが特徴である。OMP は、Object Process Diagram（以下 OPD）と Object Process Language（以下 OPL）から成る。OPD は、オブジェクトとプロセスの関係性を表記できる表記方法であり、機能とそれに対応する物（以下物理）との関係を 1 枚の図で捉えることができる。このような特徴を持つ表現方法であるため、表 3-5 の S0.0 にある「1 枚で情報が完結する」に適した表記方法であると考えた。図 3-3 は、本研究で使用する OPM の基本的な表記方法である。図 3-3 の長方形で示す要素が物理（オブジェクト）を表す。物理には複数の状態があり、例えば Input、Outoput と表現される。また、楕円で表す要素がプロセスを表し機能となる。図 3-4(a)は、プロセス A と物体 B を直線で結び、A 側の直線の先端が白抜きの○で結ばれている。これは OPL で表すと A は B を要求する（A requires B）という意味である。また、図 3-4(b)はプロセス A と物体 B を直線で結び、A 側の直線の先端が黒丸●で結ばれている。これは、B は A を操作する（B handles A）という意味である。図 3-4(c)はプロセス A と物体 B を直線で結び、それぞれの直線の両端が矢印となっている。これは、A は B に影響する（A affects B）という意味である。図 3-3(d)は C に対して D、E が結合しており黒塗りの三角▲で結ばれている。これは、C は D と E から構成されている（C consists D、E）という意味である。

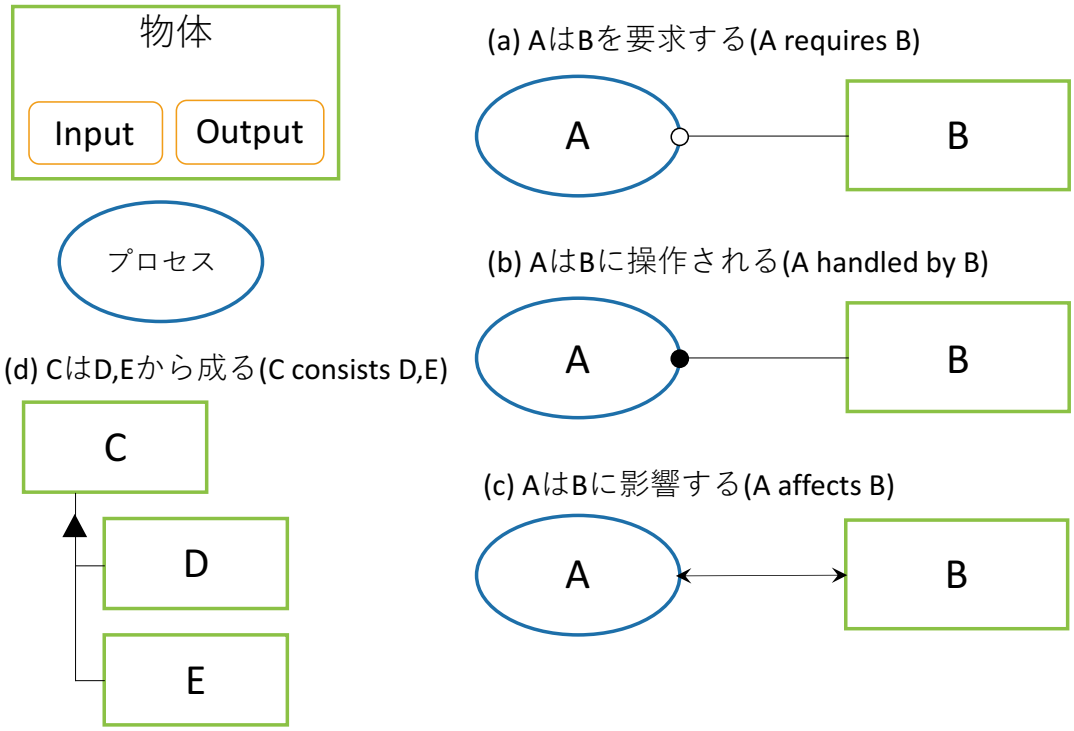


図 3-3 OPM の基本ルール

3.3.1 OPM で表現した運航システム

図 3-4 は、OPM で記述した VFR である。Operating によって、位置の状態が出発値から目的値へと遷移する。Operating はパイロットが操作するが、機体の応答性、管制の影響、地上設備の影響を受ける。機体の応答性の性能によって、パイロットが操縦桿を操作するタイミングに影響がある。また、VFR は、管制に従った飛行ではないが、管制圏内の飛行であるか否かによって飛行ルートが変わる。また、地上設備の影響としてはレーダーなどの情報がある。これらの影響を考慮しつつ、パイロットによる操作で Operating を行い、目的地へと到達するのが VFR であると表現できる。

次に図 3-5 に OPM で記述した IFR を示す。図 3-4 と同じく Operating によって、位置の状態が出発地から目的地へと遷移する。図 3-4 に対してプロセスとして interacting が加わり、パイロットは interacting の影響を受けること、機体は IFR 用機材を構成することが特徴である。パイロットによる操作で Operating が行われるが、機体、地上設備、管制の影響をうける。管制は interacting を操作することで、機体の飛行経路を制御し、個々の機体同士が衝突しないようにコントロールを行う。パイロットは interacting に従い（影響を受ける）、operating を行う。IFR は悪視界条件下でも飛行

できる飛行方式であり、機体は IFR を行うために専用の設備を備えている。ジャイロ式姿勢指示器、方向指示器、旋回計、すべり計、精密高度計、昇降計などを備えている。

図 3-6 は、表 3-5 の S3.0「自動運転による運転補助を前提とする」を鑑みて記述した空飛ぶクルマの運航システムを、OPM で記述したものである。Operating によって、位置の状態が出発値から目的値へと遷移し、Operating はパイロットが操作する。また、パイロットだけでなく、機体も operating を操作することが特徴であり、自動運転による運転補助を表している。機体は、操縦補助と検知機構とから構成されている。Operating にはセンサによる物体検知プロセスも含まれている。

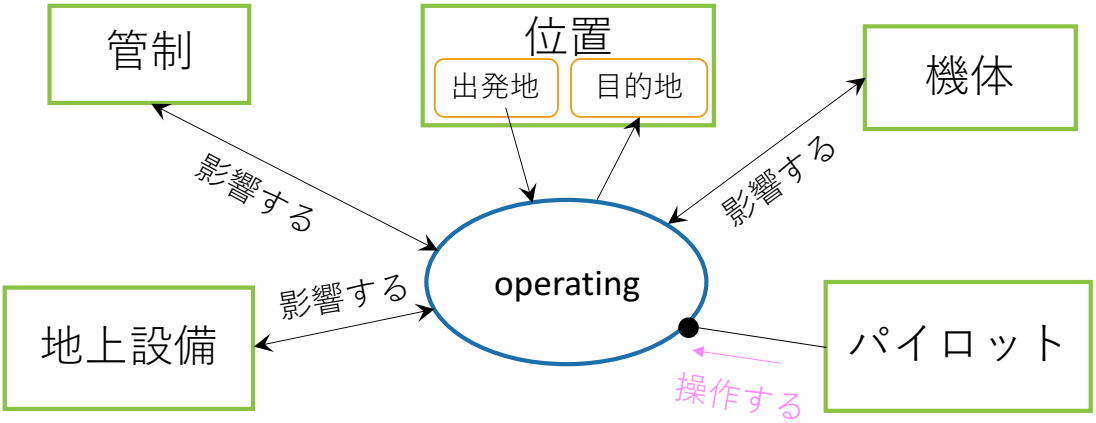


図 3-4 OPM で記述した VFR

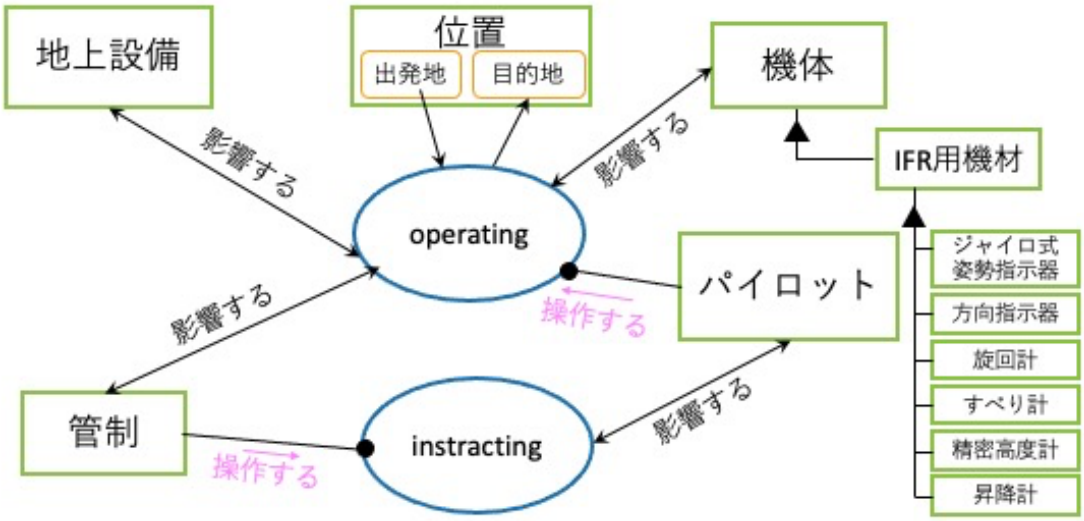


図 3-5 OPM で記述した IFR

3.3.2 OPM を利用したプロトタイプの説明

本項では、新千歳空港–ニセコ間のユースケースにおける運航システムについて、改良したプロトタイプについて説明する。表 3-6 はシステム要求である。表 3-6 の R0.0 : Original Statement では、表 3-2 に対して、自動運転に運転補助と、機体外部の物体検知として LiDAR センサで検知することを追記として記述している。

また、R2.0 の風速検知において、表 3-2 では、着陸前、離陸前に分けて要求を立てていたが、表 3-6 ではそれらの区別をなくした。また、風速の予測についても要求として削除している。

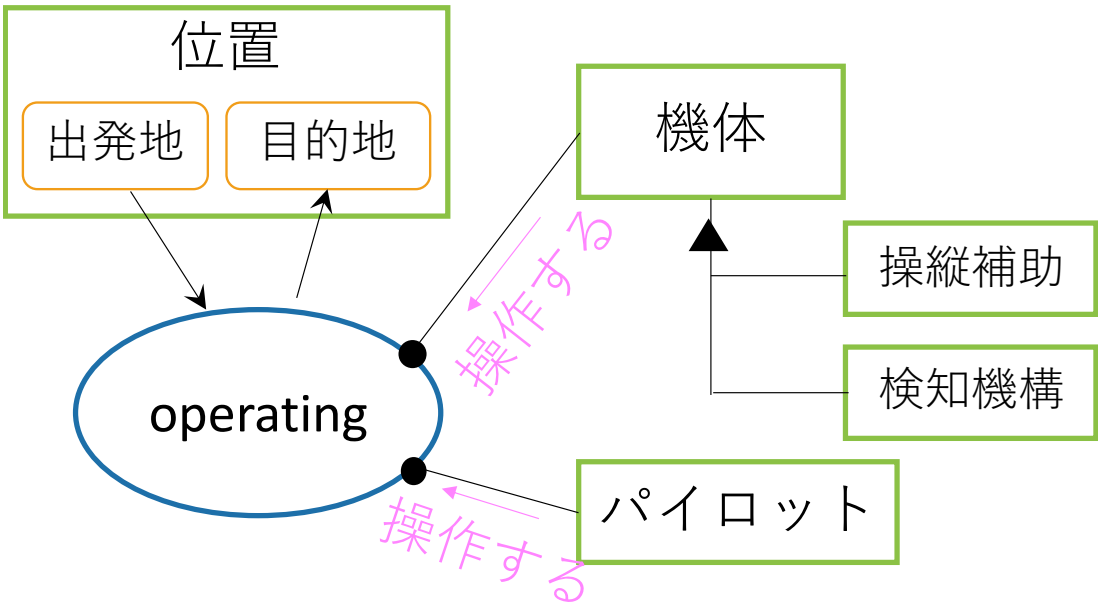


図 3-6 OPM で記述した新しい飛行方式

図 2-9、図 2-10 より考慮すべき風速は 20m/s、図 2-16 より悪視界条件の発生率は 51.6%である。また、飛行速度としてヘリコプタ同等レベルの 200km/s 年、空飛ぶクルマの運航は 1～2 台/h とした。また、飛行ルート上には空飛ぶクルマ以外に鳥が存在する可能性があるとした。さらに、表 3-5 で言及した自動運転による運転補助とセンサによる物体検知を記述している。さらに、表 3-2 で R3.2 として記述している悪視界条件の予測についても削除している。これは、自動運転による運転補助を前提としているため、VFR による飛行を想定する必要がなくなったためである。また、悪視界条件下での飛行であるため、機体の位置検知が必要であると考え、R3.3 として位置検知を加えた。

図 3-7 は、表 3-6 を元に作成した運航システムの概念図である。機体自身が、空飛ぶクルマなどの飛行体、山などの障害物、地上からの距離、vertiport、風を検知することを表している。また、飛行位置については GPS による検知とした。

悪視界環境においてこれらのものを検知することで、衝突回避動作をとることができる。また、飛行ルート上から vertiport を検知することで着陸地を見失うことなく飛行できる。図 3-7 のシステムコンセプトは、管制からの影響を排除した図であるため、管制圏外の低空飛行をとれるよう、地上からの距離を検知する。さらに、衛星からの情報により飛行地点を把握することで、周囲の状況がわからない悪視界環境においても飛行

できるようにする。

図 3-8 は、図 3-6 で記述した運航システムの operation を詳細化したものであり、図 3-7 で表現した概念図に記述されている機能を記述した図である。図 3-9 は図 3-7 で示した Operating の内部を詳述したものであり、各種検知機能、機体操作機能、構成要素から成る。特に、物体を検知と衝突回避動作について詳細を記述している。

以下、それぞれの項目について説明する。

表 3-6　新千歳空港–ニセコ間飛行におけるシステム要求

Name	Text
R0.0 Original Statement OPM	風速と悪視界条件について、就航率95%を達成するためのシステムを記述する ー20m/sまでの風速を考慮する ー悪視界条件は51.6%である ー飛行高度は1000mである ー飛行速度は200km/hである ー運航は1～2台/hである ー飛行ルート上に鳥やドローンが存在する場合がある ー自動運転による運転補助を前提とする ー機体外部の物体検知としてLiDARセンサを使用する
R1.0 wind resistance	機体耐風性は20m/s以上である
R2.0 wind detect	20m/sより大きい風速の風を検知する
R3.0 poor visibility	悪視界環境においても飛行可能である
R3.1 Detect Obstacle	雲、霧環境下で機体外部の物体を機体に搭載されたLiDARセンサで検知する
R3.1.1 Flying car Detect	雲、霧環境下で2000m以上手前から対向の空飛ぶクルマを検知する
R3.1.2 Vertiport Detect	雲、霧環境下で5000m以上手前からvertiportを検知する
R3.1.3 Helicopter Detect	雲、霧環境下で2000m以上手前から対向のヘリコプタを検知する
R3.1.4 Bird Detect	雲、霧環境下で500m以上手前から対向の鳥を検知する
R3.1.5 Detect Building	雲、霧環境下で500m以上手前から建築物を検知する
R3.1.6 Detect Mountain	雲、霧環境下で500m以上手前から山を検知する
R3.1.7 Detect Ground	雲、霧環境下で300m以上下方の地上を検知する
R3.2 Automatic Avoidance	機体進行方向に物体を検知した場合、自動で回避動作を行う
R3.3 Position Detecting	飛行位置を検知する

パイロットは Operating の中の機体操作を操作するが、操縦優先切り替え機の影響を受ける。操縦優先切り替え機は、パイロット操作と機体による操縦補助機構による操作のうち、どちら優先して受け付けるかを切り替える機構である。先に述べた操縦補助は、後述する衝突回避動作の必要性が生じた場合に自動衝突回避動作を操作する。自動衝突回避動作は、物体との衝突を回避するプロセスである。旋回機は、操舵によって機体の向きを変更する機構であり、機体の方向転換を行う。旋回機は機体操作、あるいは自動衝突回避動作を要求する。また、物体、着陸地、地上の検知を要求する。操縦優先切り替え機は、パイロット操縦と機体による操縦補助のうち、優先する方に切り替える機構であり、物体、着陸地、地上の検知、座標検知結果に影響を受ける。物体検知、離着地

検知、地上検知は物体センサを要求する。また、風検知も物体センサを要求する。座標検知は座標検知システムを要求する。座標検知システムは座標位置情報を受信する信号受信機と、機体外部である衛星によって構成される。OPM は、オブジェクトとプロセスの関係が 1 つの図で表示されるが、図 3-8 のようなダイヤグラムを関係者間で議論するためのツールとするには不十分である。

不十分である理由としては、表 3-5 の S5.1：LiDAR センサの開発目標を与えるものとする、に応えたものではないためである。また、S0.0：1 枚で情報が完結する、に対しても、OPM のダイヤグラムだけでは、OPM の初見の関係者ではシステムの理解が困難であると考えられる。黒岩（2012）は、自動車生産の生産システム/プロセスを 1 枚の紙で鳥瞰、俯瞰できる方法として Total Link System Chart（以下 TLSC）について言及している。本研究では、関係者の議論と理解の促進を目的としているため、TLSC を参考に運航システムについて、システムの情報を 1 枚に記述する。

そこで、図 3-8 の概念図と、図 3-9 の OPM で記述したダイヤグラム、表 3-6 に記述する数値仕様を紐つけたツールを作成した。図 3-10 はシステム情報と概念図、数値仕様の関係を紐付けたツールである。図 3-8 の概念図を機能ごとに分解した画像と対応する OPM のプロセスとを赤色線で紐付けた。また、プロセスと、プロセスに要求する仕様を桃色線で紐付けた。

図 3-7 新しい飛行方式の概念図

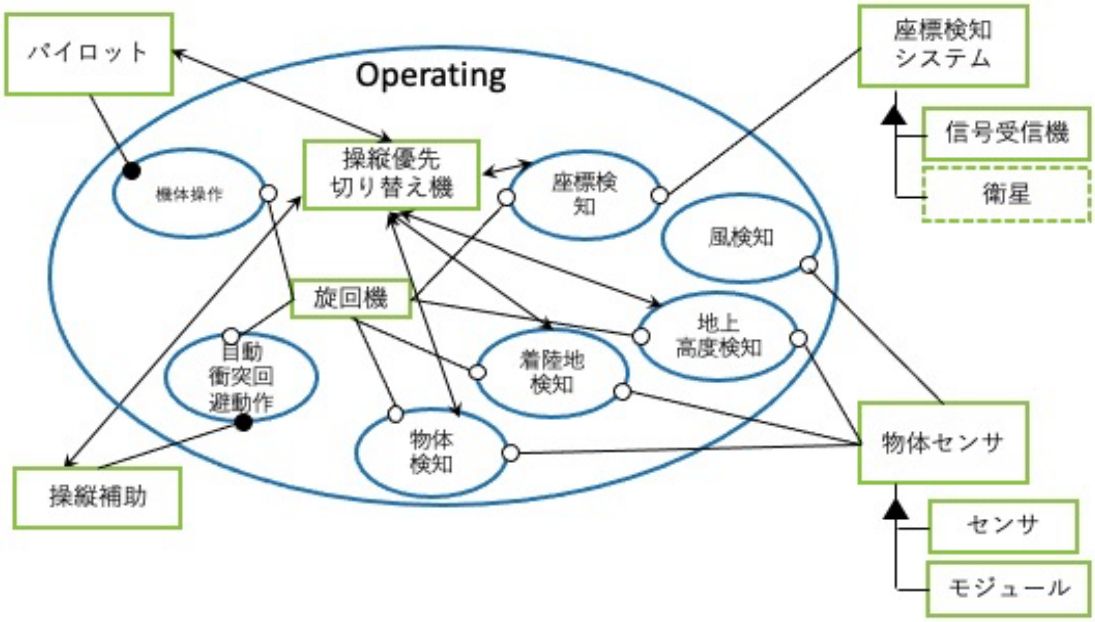


図 3-8 OPM で記述した新しい飛行方式の詳細

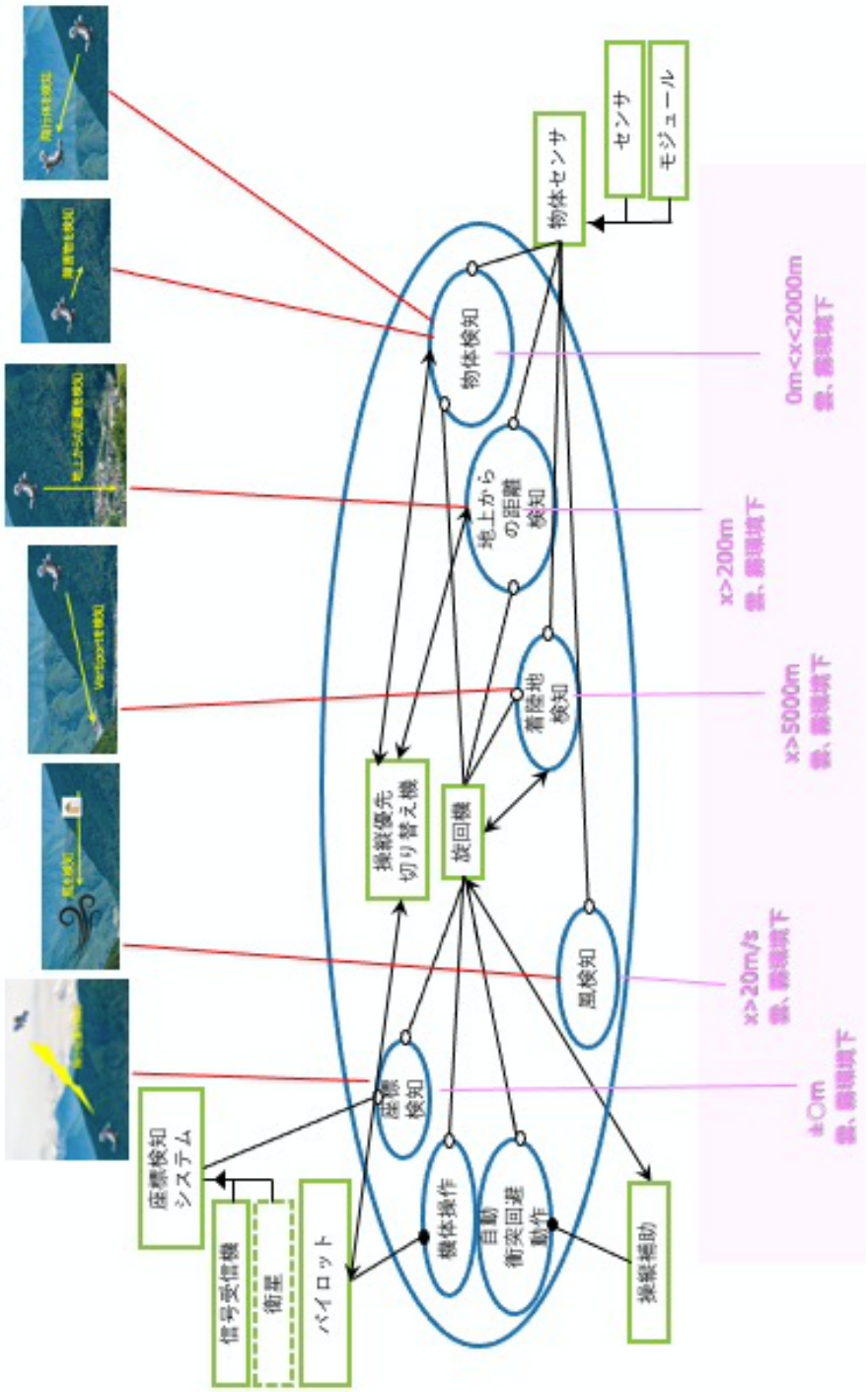


図 3-9　OPM を利用した新しい飛行方式を議論するためのツール

3.3.3 改良したプロトタイプを使用した結果

本項では、図 3-9 のツールについてヘリコプタパイロット 2 名、センサーメーカー社員と個別に議論を行った結果について説明する。それぞれの参加者に対して、議論を期待した点は以下である。

ヘリコプタパイロット(2a、4b) 自動運転補助として想定した運航システムの構想がパイロットの視点から見て妥当か。妥当な数値仕様であるか。システムの前提として加えるべき項目に漏れがあるかどうか。提示するリファレンモデルが理解できるか。

センサーメーカー社員（1a） 提示するリファレンスモデルが、開発目標を立てる上で役に立つものとなっているか。

ヘリコプタパイロット（2a）議論の結果

図 3-9 のプロトタイプについて、パイロットの視点から見たシステムと数値仕様に対する現実性について議論を行った。

議論の結果、センサの検知結果をパイロットが確認することなく、機体自身が利用し、自動で衝突回避動作を実施することは、パイロットの操縦負荷を鑑みると悪視界条件における LiDAR センサの利用方法として適していることが明らかになった。また、プロトタイプに示されている数値仕様について妥当な数字であることが明らかになった。

センサの検知結果を、パイロットが利用するのではなく、機体が利用するという点については、パイロットのワークロードの負荷軽減という点で良いと思います。また、将来的に完全自動運転を鑑みても理にかなっていると思います。数値仕様については、自動運転に関する最新の情報や、航空法で規定されている視程距離などを使うのが妥当だと思います。 ペイロード（重量）の観点からもセンサの検知結果をパイロットが利用しないのは理にかなっていると思います。パイロットが利用する場合、検知結果を基に画像処理を行い、その結果をディスプレイに表示するなどの処理が必要となり、センサの重量がとても重くなることが懸念されます。

ヘリコプタパイロット（4b）議論の結果

パイロットの視点から見たシステムの妥当性について更に確認を行うために、追加でヘリコプタパイロットと議論を行い、プロトタイプに対して議論を行った。

議論の結果、運航システムの構想、数値仕様に関してはテストパイロット(2a)へのヒアリング同様、妥当なものであるとの意見を得た。一方、懸念としてセンサへの要求レベ

ルが高く実現性に対する疑問が投げかけられ、高スペックのセンサを搭載することにペイロードへの影響を考慮する必要があることが明らかになった。また、プロトタイプについて、少なくとも、システムの内容と数値仕様について理解できる程度には可読性が良いことが明らかとなったが、センサ仕様の詳細について議論ができるほどではないことが明らかになった。

LiDAR センサに要求する数値仕様としては妥当だと思います。しかし、かなり高スペックであり、本当にそのようなセンサが開発できるのかどうか疑問に思います。検知機能だけを考えるのであれば、機体の前後左右上下にセンサが配置されているのが理想ですがその分重量が増えることが懸念されます。条件を精査して、最低限の数のセンサで済むようにすることも重要だと思います。運航システムの理解はできました。ただしセンサの詳細については描かれていないため、概念的な図と捉えて見ました。 センサについて別で詳細が描かれていればより分かりやすいと思います。

ヘリコプタパイロットとの議論により、図 3-9 のプロトタイプにはセンサの必要な個数と重量が必要であることが明らかとなった。このことは、センサーメーカーが見ても開発の上で参考となるツールとなっていない可能性が高いことを示唆する。そこで、システム全体像と LiDAR センサの利用に特化したダイヤグラムとに分けた記述とする。

図 3-10 は、センサで検知する対象の詳細を表す概念図であり、検知対象の分解と検知方向について記している。

飛行体の検知　飛行体の検知については、空飛ぶクルマの他、ヘリコプタ、鳥の検知を加えた。機体の進行方向におけるこれらの物体を検知する必要があるため、機体前方、サイド方向、上方、下方に対して検知する必要があるとした。

障害物の検知　障害物の検知については、山、建築物がある。機体の進行方向におけるこれらの物体を検知する必要があるため、機体前方、サイド方向に対して検知する必要があるとした。

vertiport の検知　vertiport の検知については、vertiport への進行途中に検知する必要があるため、機体前方、下方、後方に対して検知する必要があるとした。

地上物体の検知　地上物体、家屋、地面、樹木、電線などを検知する必要があり、機体下方に対して検知する必要があるとした。また、これらの下方物体に対して、機体との距離を測距する必要がある。

図 3-11 は、ツールを階層化した際の概念図を表している。システムとシステムの一部についての詳細に分けて、それぞれに対してツールを記述することで、システム全体像の議論と、詳細についての議論が可能となると考えた。本章において、システムとは、

飛行方式レベルのシステムであり、詳細とはセンサの詳細を記述したものである。

図 3-12 は、可読性を向上するために改良した議論のためのツールの表記形式であり、概念図、物理、機能、数値仕様の 4 階層からなる。概念図は、図 3-7 のような概念図を個別の要素ごとに分解したものであり、物理と機能は OPM のオブジェクトとプロセスに対応する。仕様はプロセスに必要な仕様を詳細化したものであり、開発者にとっては開発目標となるものである。

図 3-13、図 3-14 は図 3-11 のシステム、詳細に対応した表記である。図 3-13 の内容は、図 3-9 と同じであるが、図 3-12 に従った形式で表記することで可読性を向上させている。図 3-14 は、図 3-10 の概念図を元に作成したものであり、センサに対する検知対象と仕様を記述している。サイド方向、前方、上方、下方、後方それぞれのセンサに対して検知対象と、仕様を紐付けて記述している。

サイドセンサ　サイドセンサでは自機以外の空飛ぶクルマ、鳥、ヘリコプタを 2000m 以上手前から検知する。また、建築物、山を 1000m 以上手前から検知する。いずれの検知も霧・雲環境下で行うことができるものとする。

前方センサ　前方センサでは自機以外の空飛ぶクルマ、鳥、ヘリコプタを 2000m 以上手前から検知する。建築物、山を 1000m 以上手前から検知する。Vertiport を 5000m 以上手前から検知する。いずれの検知も霧・雲環境下で行うことができるものとする。

上方センサ　上方センサでは自機以外の空飛ぶクルマ、鳥、ヘリコプタを 2000m 以上手前から検知する。いずれの検知も霧・雲環境下で行うことができるものとする。

下方センサ　下方センサでは自機以外の空飛ぶクルマ、鳥、ヘリコプタを 2000m 以上手前から検知する。建築物、山を 1000m 以上手前から検知する。Vertiport を 5000m 以上手前から検知する。300m 以上下方の樹木、家、地面、電線を検知する。いずれの検知も霧・雲環境下で行うことができるものとする。

後方センサ　後方センサでは Vertiport を 5000m 以上手前から検知する。いずれの検知も霧・雲環境下で行うことができるものとする。

センサメーカー社員（1a）　議論の結果

図 3-13、図 3-14 について、センサとして LiDAR センサを利用した場合、数値仕様が現実的な開発目標となり得るのかどうかについてセンサメーカー社員(1a)と議論を行った。

議論のためのツールに対する考察

議論の結果、ツールの表記方法として以下の 2 点を考慮する必要があることが明らかとなった。

① 光源、モジュールについての前提条件を記載する
② 要求する仕様のロードマップを作る

まず①について、センサメーカーとしては、光を受光するに当たって、レーザーの波長特性に合わせたセンサーを開発する必要がある。LiDAR センサとしてレーザーを発光する光源を開発するのは別のメーカーとなるため、数値仕様の要求を満たすセンサの開発を行うためには、指定された光源の制約の元で開発を行う必要があることが明らかとなった。また、センサとして受光部の面積などについて検討するために、レーザーの走査方法を規定するモジュールについて考慮する必要がある。また、②について、図 3-13 に示すツールは LiDAR センサへの要求として高すぎる可能性があり、開発目標とするためには、現実的でない可能性があることが明らかとなった。このことを踏まえて、センサーメーカーからは、ユースケースと合わせて段階的な数値仕様を提示して欲しいとの声があった。図 3-15 は上記結果を踏まえて改良した表記形式であり、最下部に制約条件を付け加えた。

上記 2 点を考慮した表記形式とすることで、センサーメーカーとして、開発目標を立てるために参考となるモデルとなると考えられる。

図 3-15 に示す 5 階層からなる表記形式のものを、本研究ではリファレンスモデルと定義する。

センサのスペックとして、かなりの高スペックが要求されていることが分かりました。自動車の自動運転に対する要求を遥かに超えたスペック要求です。センサ開発の立場からは、仕様として距離だけでなく、物体を点で検知するか面で検知するかによって開発の方向性が大きく変わってきます。面で検知する場合、センサとして相応の装備が必要となります。

センサの重量について、数 km 先を検知するためには現行の技術では数 10kg レベルのセンサとなる可能性が高いです。自動車の自動運転で使用する LiDAR センサは点検知で数 10m 先を見るために数 100g レベルのデバイスとなります。数 100m 先を検知できるレベルのセンサがあるならば、それはかなり開発が進んでいると感じます。

センサの要求に対して考慮すべきはデバイス性能、重量に加えて電力があります。機体に搭載される電源でセンサ駆動に必要な電力を賄えるかどうかが気になります。センサの重量と電力を決める要素として大きいのは、モジュールと光源です。センサメーカーとしては、与えられたモジュールと光源に対して、仕様を満たせるようにセンサを開発することになります。数値仕様に加えてこれらの制約条件を加えていただけると助か

ります。モジュールと光源については自動車部品などを取り扱うメーカーが情報を持っていると思います。

今回のモデルについては、ニーズとしての最終ゴールが示されていると捉えました。センサメーカーとしては、ニーズの流れを知り、センサ仕様に対して確約を得たいです。技術ロードマップを作って、フェーズごとにセンサに必要な必達目標を示してくれると嬉しいです。

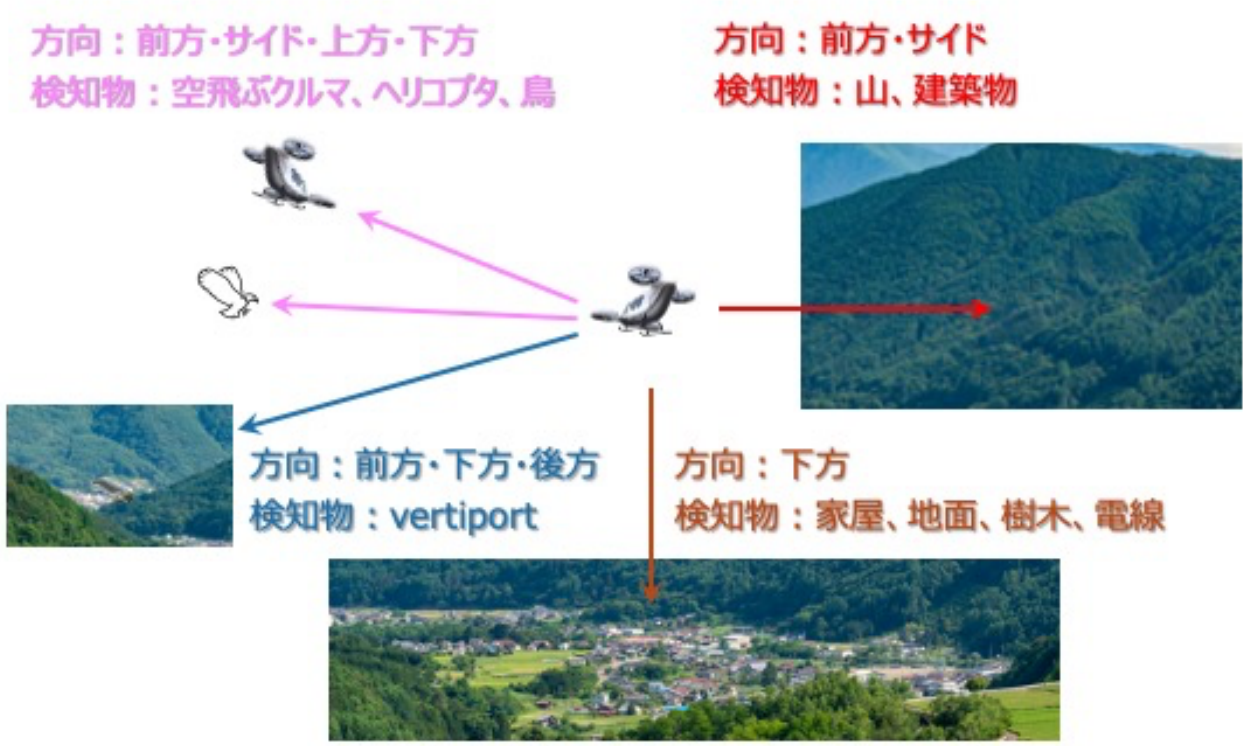


図 3-10 LiDAR で検知する対象の詳細を示す概念図

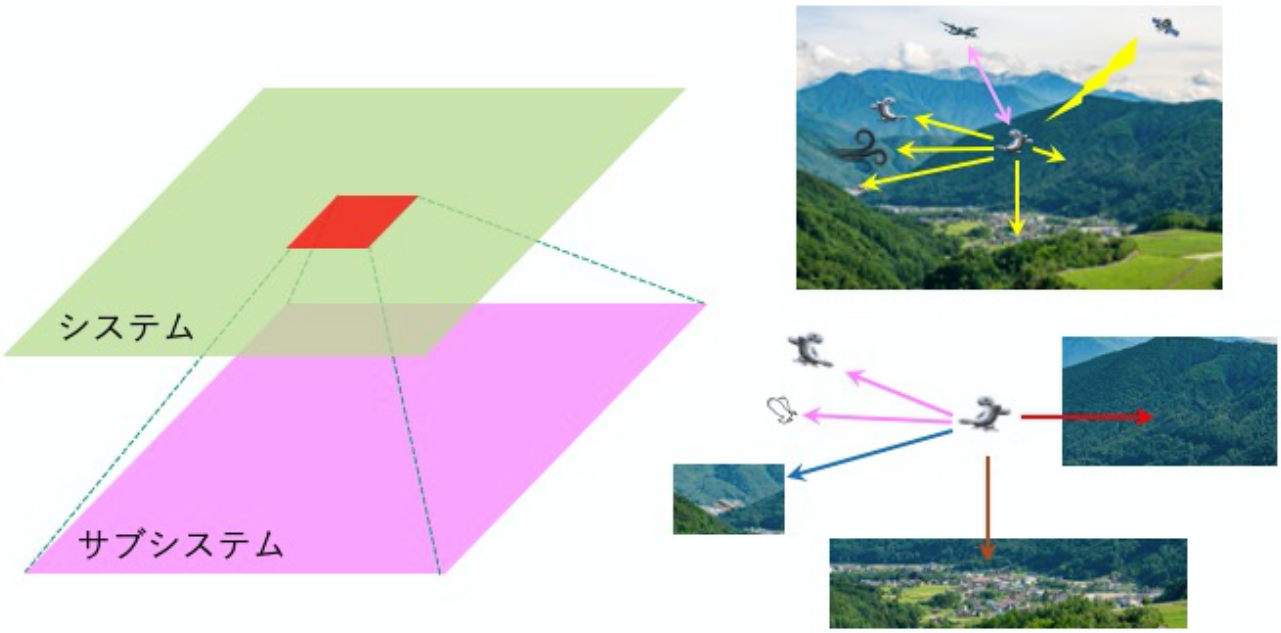


図 3-11 議論のためのツールの階層概念図

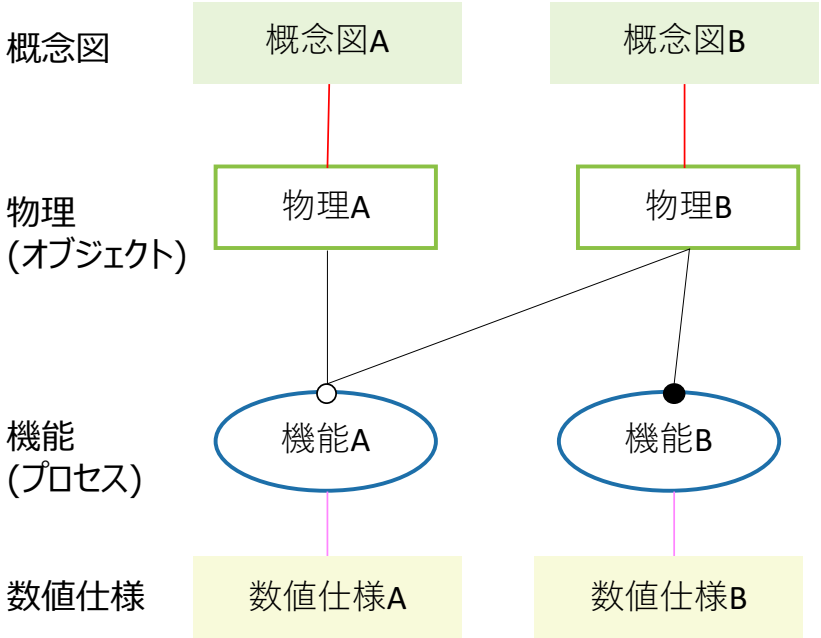


図 3-12 改良した表記形式

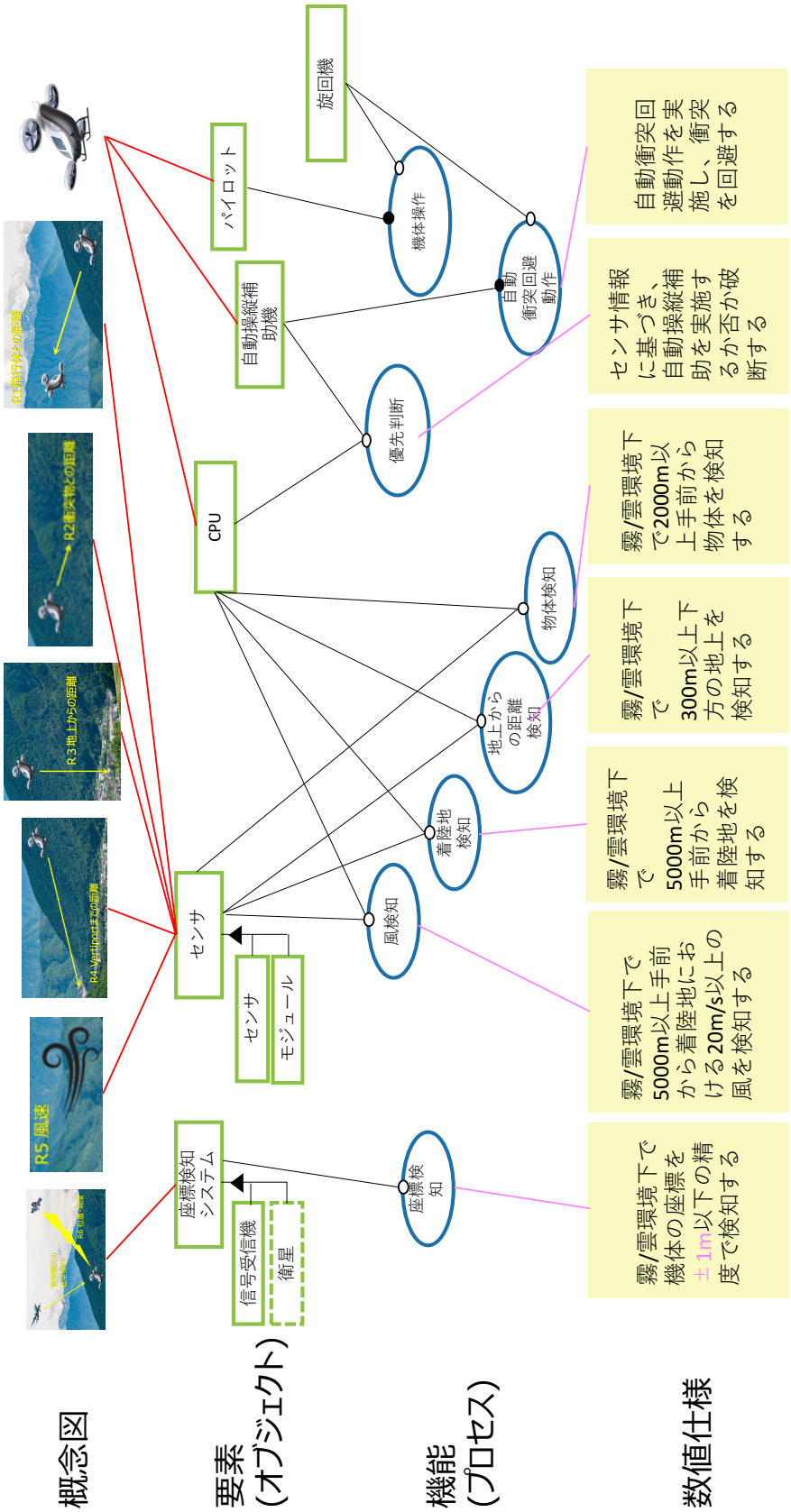


図 3-13 改良した議論のためのツール

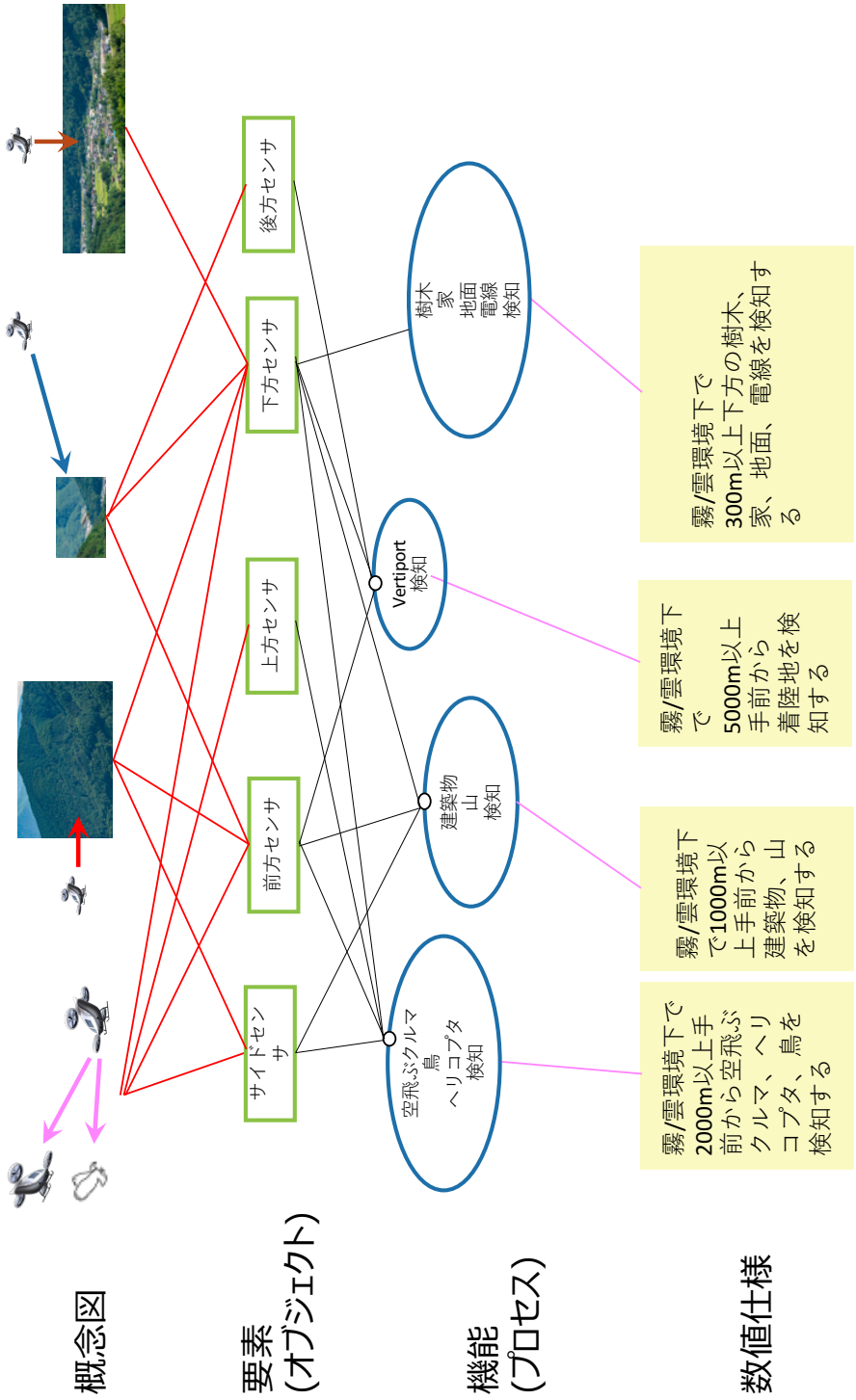


図 3-14 LiDAR の詳細について議論するためのツール

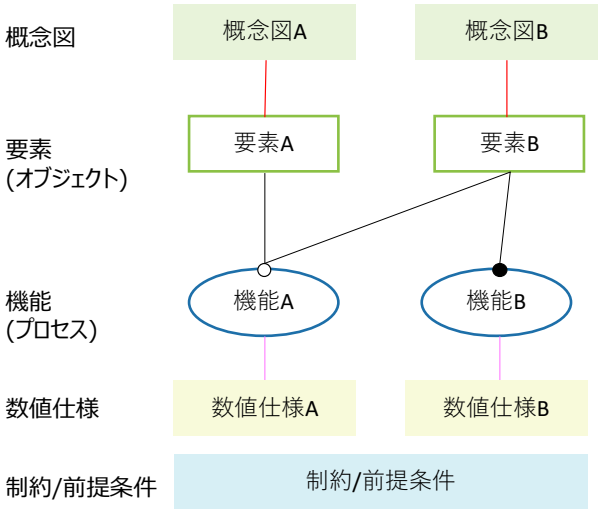


図 3-15 改良した表記形式②

3.3.4　ユースケースの想定

第一のユースケース

3.3.3 項の結果を受けて、本研究では 2 つのユースケースを想定し、それらのユースケースにおける運航システム、および、センサへの仕様について考察する。

経済産業省（2018）による空の移動革命に向けたロードマップでは、2020 年代半ばから地方での人の移動が開始され、2030 年代には都会での人の移動が開始されるとまとめており、今後数年以内に空飛ぶクルマによる人の移動を目的とした事業が開始されることが示唆される。人の移動に対する具体的な時期について、大阪府は 2025 年に開催される大阪万博において、関西空港と万博開催予定地である夢洲間に対して空飛ぶクルマを就航し、人の移動を実行することを明言している（大阪日日新聞 2020）。

表 3-7 は JAXA(2020)によるユースケース調査を元にまとめた運航条件である。

飛行高度　飛行高度として、300m 以上、500m 以下の海上空域に空飛ぶクルマ専用の空路としてコリドーが設定される可能性が有力である。

風発生率　図 2-1、図 2-2 から飛行高度 500m における 20m/s 以下の風の発生率は 96%であるため、機体耐風性が 20m/s 以上であれば風に対する就航率は 96%となる。

悪視界条件発生率　図 2-11 より飛行高度 500m における悪視界条件の発生率は 3.1%である。

飛行高度　飛行速度は、小型ヘリコプタである R22 を eVTOL 用に改造した R22e を使用した場合は 178km/h、もしくは Vectored Trust、または Lift+Cruise を使用した場合は 270km/h としている。

運行本数　運行本数は事業性を鑑みると最低でも 1～2 本/h、vertiport の設置箇所が増えた場合は最大 20 本/h 等想定する。

自動化レベル　機体運航の自動化レベルとしては、自動車の自動運転におけるレベル 1 相当の自動化レベルを想定する。

表 3-7 に示す大阪ユースケースでは悪視界条件の発生率が 3.1%と低いため、VFR での飛行が可能となる。

空飛ぶクルマの事業化については、バッテリー寿命の観点から、事業化開始当初は低高度飛行で飛行距離が短いユースケースから順に実施される可能性が高いと考えられる。また、機体騒音の影響を鑑みると騒音が課題となりにくい海上ルートの飛行が 2025 年の大阪ユースケースに続いて事業化に有力であると考えられている。表 1-1 のユースケースのうち、類似のユースケースとして長崎空港–IR 施設間、中部国際空港–三重県市街地間がある。ANA ホールディングス株式会社（2021）は、中部国際空港と三重県志摩市間の空飛ぶクルマの活用を目的として、ヘリコプターを活用した代替実験を行うことを発表しており、空飛ぶクルマの就航としては早い時期に事業化されると想定され

る。中部国際空港−三重県市街地間は、飛行高度 500m の場合に VFR で飛行できない確率が 7.0%であり、3.5 章で論じた新しい飛行方式での飛行が必要となる区間である。また、図 2-5、図 2-6 より飛行高度 500m における 25m/s 以下の風の発生率は 98%であり、20m/s 以下の風の発生率は 90%であるため、機体耐風性として 25m/s 以上であれば風に対する就航率は 95%以上となる。

表 3-8 は、大阪ユースケースを元に作成した中部国際空港−三重県市街地間の就航に対する運航条件である。自動運転レベル 1 を想定している。また、機体間のすれ違いは生じない状況での運行と仮定する。

第二のユースケース

表 1-1 に示すユースケースの中で、鳥取県市街地−岡山県市街地間と新千歳空港−ニセコ間は、山間部の飛行となり高度 1000m 前後での飛行となり、飛行距離も他の 3 ケースと比較して長いことが想定されるため、バッテリー寿命の観点から、表 1-1 の他の 3 ケースと比較して就航のタイミングが遅くなることが想定される。表 3-9 は、新千歳空港−ニセコ間の就航を想定した運航条件である。新千歳空港−ニセコ間は悪視界環境以外に、冬季期間における機体凍結も課題となるため、関西空港−万博会場間や、中部国際空港−三重県市街地間より事業化の実施が遅くなる可能性が高い。そのため、機体の自動運転レベルが促進されていると想定し、自動運転レベル 2 とした。本研究では、悪視界環境において就航率を向上するために、IFR ではない新しい計器飛行による運航システムとして、中部国際空港−三重県市街地間、新千歳空港−ニセコ間の飛行を、それぞれの就航に対する運航システムのリファレンスモデルを作成する。

表 3-7　大阪ユースケースの運航条件

飛行高度	最大500m
風発生率(≦20m/s)	96%
悪視界条件発生率	3.10%
飛行速度	178km/h～270km/h
運行本数	1～2本/h (vertiport次第では10～20本/h)
ルート上の飛行体	空飛ぶクルマ、鳥、ドローン
自動運転レベル	レベル 1 相当

表 3-8　中部国際空港–三重県市街地間の運航条件

飛行高度	最大500m
風発生率(≦25m/s)	98%
悪視界条件発生率	7.00%
飛行速度	178km/h～270km/h
運行本数	1～2本/h (vertiport次第では10～20本/h)
ルート上の飛行体	鳥、ドローン
自動運転レベル	レベル１相当

表 3-9　新千歳空港–ニセコ間の運航条件

飛行高度	1000m
風発生率(≦20m/s)	95%
悪視界条件発生率	51.60%
飛行速度	200km/h
運行本数	1～2本/h
ルート上の飛行体	空飛ぶクルマ、鳥
自動運転レベル	レベル2相当

3.4 本研究で提案するリファレンスモデルのまとめ

表 3-10 は、前章までの議論の結果をうけて変更したリファレンスモデルの表記に対する要求定義図である。表 3-5 に対して S2.1、S2.2、S2.3 を追記した。

表 3-10　リファレンスモデルに対する要求定義

Name	Text
S0.0 Original Statement	議論を促進できる表記である ー1枚で情報が完結する ー具体的な困りごとを解決する ー運航システムの前提条件を入れる
S0.1 Expression	1枚で情報が完結する
S2.0 Expression	OPMをベースとする
S2.1 Expression2	数値仕様が記載されている
S2.2 Expression3	システムの概要がひと目でわかる
S2.3 Expression4	制約/前提条件が記載されている
S0.2 Prerequisites	運航システムの前提条件を入れる
S3.0 Autonomous	自動運転による運転補助を前提とした表記にする
S4.0 Sensing	機体に搭載したLiDARセンサによる物体検知を前提とした表記にする
S0.3 Target	具体的な困りごとを解決する
S5.0 Target	LiDARセンサを扱うセンサーメーカーの困りごとを解決できるものとする
S5.1 Mission1	LiDARセンサの開発目標を与えるものとする
S5.2 Mission2	LiDARセンサ搭載の現実性が明らかとなる

図 3-15 は本研究で提案するリファレンスモデルの表記形式である。

図 3-15 の表記形式は、S2.0～S2.3 を満たした表記形式である。1 枚のダイヤグララムとして、システムレベル、サブシステムレベルを分けて記述することで S0.1 を満たす。

また、自動運転レベルを前提としたダイヤグラムとすることで S3.0 を満たし、LiDAR センサによる検知を含めることで S4.0 を満たし、S0.2 で言及している前提条件を入れていることとなる。また、図 3-16 の数値仕様には LiDAR センサとして検知する距離が記述され、制約/前提条件として光源、モジュールの仕様を記述し、さらに、3.5.4 章で説明した 2 つのユースケースを想定して、リファレンスモデルを記述することで S5.1、S5.2 が満たされる。

制約/前提条件は S0.3 を考慮してセンサーメーカーとセンサ仕様について議論を行う場合には光源、モジュールの記述が適切であるが、議論の相手、テーマによって記述内容は異なる。例として、運航システムについて議論を行う場合は、制約条件として自動運転化レベルや、パイロットが行うべき行為について制約/前提条件を設定する方が議論に使用するリファレンスモデルとしては適切である。

本章では、風速と悪視界条件に関する空飛ぶクルマの就航率を向上させることができる運航システムを構想するために、様々な分野の専門家同士が議論を行う上で参照するためのツールとして、リファレンスモデルの表記方法を提案した。

リファレンスモデルの表記方法として、図 3-1 で説明したプロトタイプを土台として、関係者と議論を繰り返し行い、可読性の高い表記形式とした。TLSC を参考に概念図、構成要素、機能、機能の数値仕様、制約/前提条件が一体となり、それぞれの関係性

が明示されているものを提案した。

図 3-15 に示す表記方法は 5 階層に分かれており、以下の特徴を有する。

① 要素ごとに分解した概念図とシステムの要素を紐付けて表示することで、概念図に示す機能を実現するために使用する要素が一目で分かる。

② Object Process Methodology の表記ルールに従ってオブジェクトとプロセスの関係を表記することでシステム（技術コンセプト）の理解が容易になる。

③ プロセスと、そのプロセスの達成に必要な主要となる仕様を記述する。
主要となる仕様はオブジェクトを開発するメーカーにとって、最も関心の高い事項であり、記述されている内容がメーカーの保有している技術で実現できるか、また、開発目標として目指すことのできる指標であるかを判断するための材料となる。

④ システムの前提条件を記述することで、認識のズレを軽減し、建設的な議論を行いやすくする。

⑤ 上記の表記方法に従って提案するリファレンスモデルとして、テーマを絞った記述とする。本研究では、LiDAR の使用に焦点を当てて議論を行うため、LiDAR については詳細を記述し、システムのその他については技術コンセプトが伝わる程度のラフな記述とする。

上記の表記方法に従ったリファレンスモデルを提案する上で、テーマを絞り込むべく、関係者との議論を行った。その結果として、機体に LiDAR センサを搭載することで悪視界環境における物体検知を行い、検知結果を自動運転による運転補助手段に行わせることを前提条件とした。

システム、LiDAR の詳細についてリファレンスモデルを記述することで、システム全体の俯瞰と詳細について議論をフォーカスできるようにする。

4.　就航率向上のための
リファレンスモデルの提案

4.1　想定ケース１：中部国際空港−三重県志摩市間

本節では、中部国際空港−三重県志摩市間の飛行について、表 3-8 に示す飛行条件におけるリファレンスモデルについて説明する。

国土交通省は自動車における自動運転についてレベル１を、システムが前後・左右のいずれかの車両制御を実施、と定義しており、運転支援として自動で止まる、前のクルマに付いて走る、車線からはみ出さない、などと定義している。

空飛ぶクルマに対しての自動運転レベル１の動作として、自動停止を行うものとして、リファレンスモデルを作成する。

図 4-1 はシステム概念図であり、vertiport へ向かって飛行中の様子を表している。

飛行位置検知　上空の衛星から飛行位置を検知することで機体がどこを飛行しているか、目的地までどの程度の距離があるかを把握する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

風検知　機体前方の風を検知する　機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

静止物体　機体前方、もしくは下方にある静止物体を検知する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

Vertiport 検知　機体前方、もしくは下方にある vertiport を検知する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

図 4-2 はシステムのリファレンスモデルである。以下、詳細を説明する。概念図に示す風検知、高さ検知、静止物体検知、vertiport 検知を行うのはセンサである。センサは、光源とモジュールから構成される。センサが実施する機能は風速検知、高度検知、静止物体検知、vertiport 検知である。センサは、風速検知、高度検知を操作する。風速として 25m/s 以上の風を点で検知する。どの程度手前から風速を検知する必要があるか、リファレンスモデル作成時点でわからなかったため、風速の検知を〇〇m 以上手前とすることで、関係者との議論を行う時に、必要な数字についての意見を得ようと考えた。また、高度検知では、数値仕様として 500m 以上下方の地上を点で検知し、距離を測定するとした。飛行高度を知ることが目的であるため、点による測距で良いと考えた。次

に、静止物体検知では、500m 以上手前から静止物体を検知するとした。500m 以上手前とした理由は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（2019）による自動操縦ヘリコプタの衝突回避実験において、相対速度差が 100km/h であった場合に 500m 手前から衝突回避動作を実施したところ衝突回避ができたという結果に基づき、相対速度が 100km/h につき 500m 手前での検知が必要であるとした。次に、vertiport 検知は 1200m 以上手前から検知するとしているが、これは、vertiport に IFR における進入灯相当のライトが点灯されていることを想定した時の、IFR における最低気象条件を参考に設定した。

風速検知、高度検知、Vertiport 検知を要求するのは CPU である。CPU はこれらの検知結果をもとに、優先判断を操作する。CPU は機体に搭載されていることを示すために、空飛ぶクルマ機体の概念図と結びつけた。優先判断の仕様は、センサ情報に基づき、自動操縦補助を実施するか否かを判断すること、である。次に、優先判断を要求するのは操縦補助機である。操縦補助機は優先判断の結果を元に、自動停止動作を行う。自動停止動作の仕様は、自動で停止動作を実施し、上空待機する、ことである。次に、パイロットは機体操縦と飛行高度調整を操作する。パイロットの機体操縦によって機体は目的地へと進行する。機体操縦としての仕様は、パイロットがヘリコプターパイロットと同等の操縦技量を有することである。また、飛行高度調整の仕様は、定められた高度に飛行高度を調整することである。パイロットは vertiport 検知結果を要求し、機体操縦、飛行高度調整を行う。また、高度検知結果の影響を受けて飛行高度を調整する。パイロットと静止物体との間に関係が結ばれてないのは、衝突リスクのある物体検知に関しては、パイロット操縦として反映させず、自動運転で回避するためである。また、パイロットは座標検知を要求することで、機体の位置を判断する。座標検知システムは、座標検知を操作し、機体の位置を測量する衛星と測量結果を受信する信号受信機から成る。座標検知の仕様は、機体の座標を検知することである。

システムの制約/前提条件として、①vertiport に IFR における Full 相当の進入灯が配置されていること、②自動停止を行うことができる自動運転であること、③空飛ぶクルマ同士のすれ違いはないこと、を挙げている。

次に、サブシステムのリファレンスモデルについて説明する。図 4-3 はセンサ検知対象についての詳細を記述したものである。

センサは、機体前方に設置する前方センサ、機体底部に設置する下方センサからなり、それぞれのセンサは光源とモジュールから構成される。前方センサは、風速検知、ドローン/鳥検知、vertiport 検知を行う。下方センサは、vertiport 検知、建築物/海/森林検知を行う。本ユースケースでは空飛ぶクルマ同士のすれ違いはないとしたが、ドローンや鳥とすれ違う可能性はあるため、検知対象として含めた。既存の飛行体においてドローンや鳥の回避についはルールが定められていないため、これらの飛行速度は考慮せず、

1000m 以上手前から面で検知することを仕様とした。

次に、vertiport 検知は前方センサと下方センサで行う。前方センサでは 1200m 以上手前から点で vertiport を検知するとし、下方センサでは 500m 以上下方の vertiport を点で検知し、地上からの距離を測定するとした。地上からの距離を測定することで、パイロットによる下方への着陸動作が可能となると考えた。また、下方センサでは建築物/海/森林を検知し、その仕様は 500m 以上下方の建築物/海/森林を点で検知し、地上からの距離を測定する、としている。図 4-3 のサブシステムは、制約/前提条件として、①検知センサは、前方、下方センサの２つであること、②上述の検知を雲、霧環境下で検知することとしている。

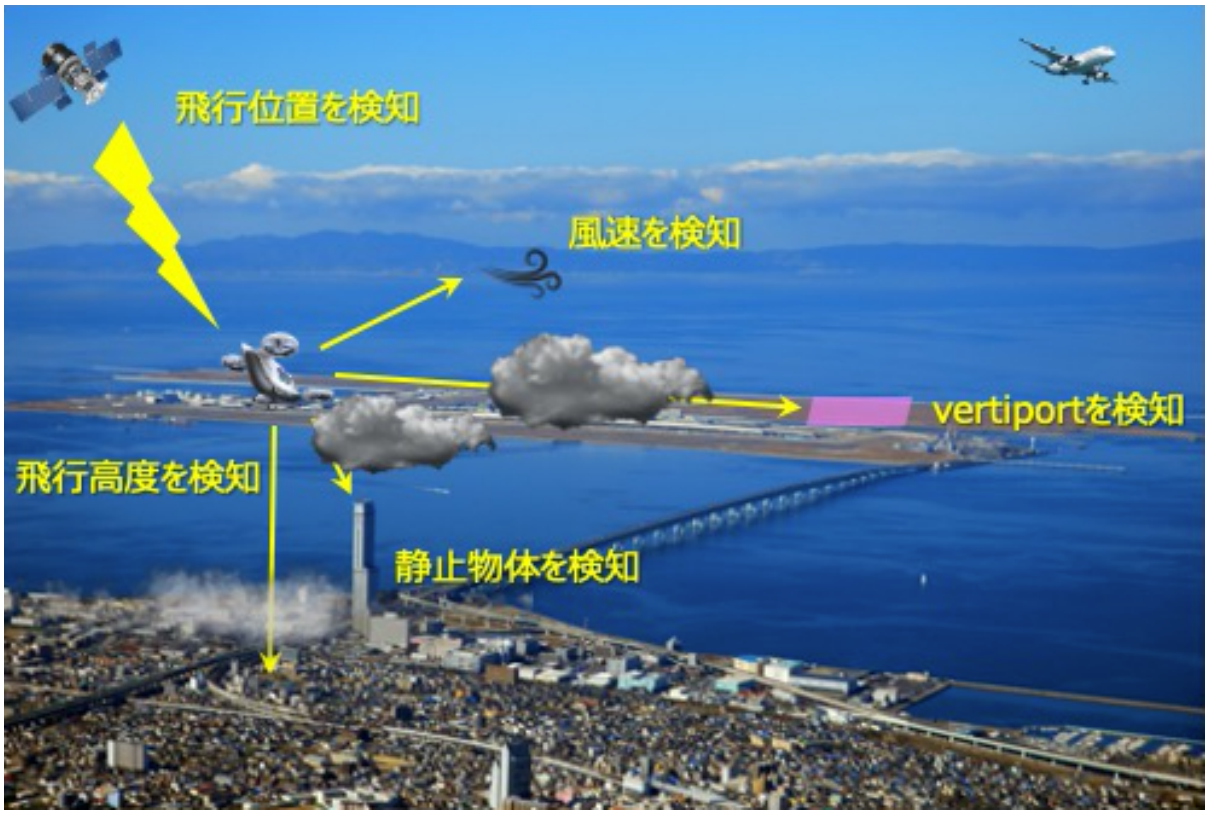


図 4-1 中部国際空港–三重県志摩市間飛行のシステム概念図

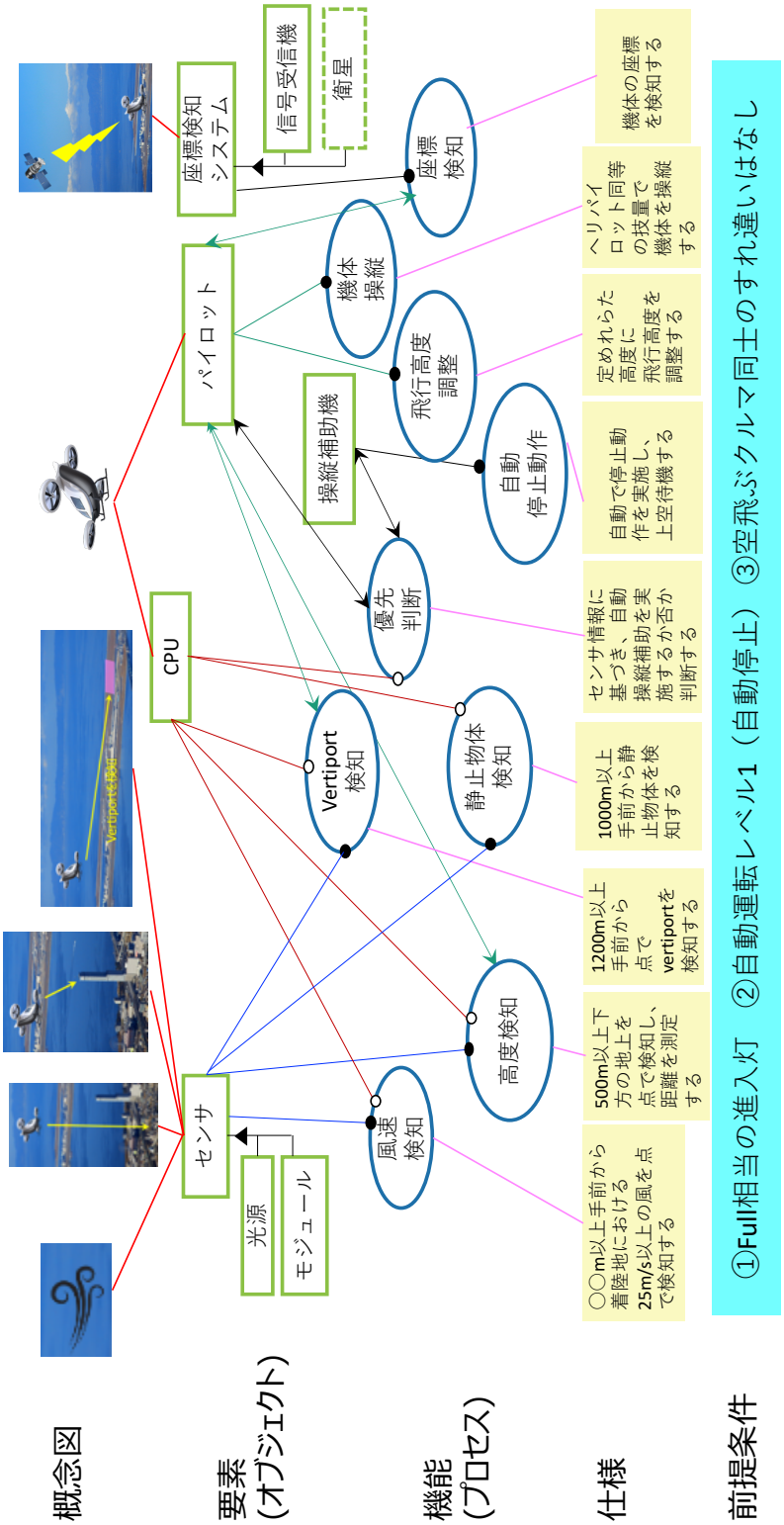


図 4-2 中部国際空港–三重県市街地間飛行のシステムのリファレンスモデル

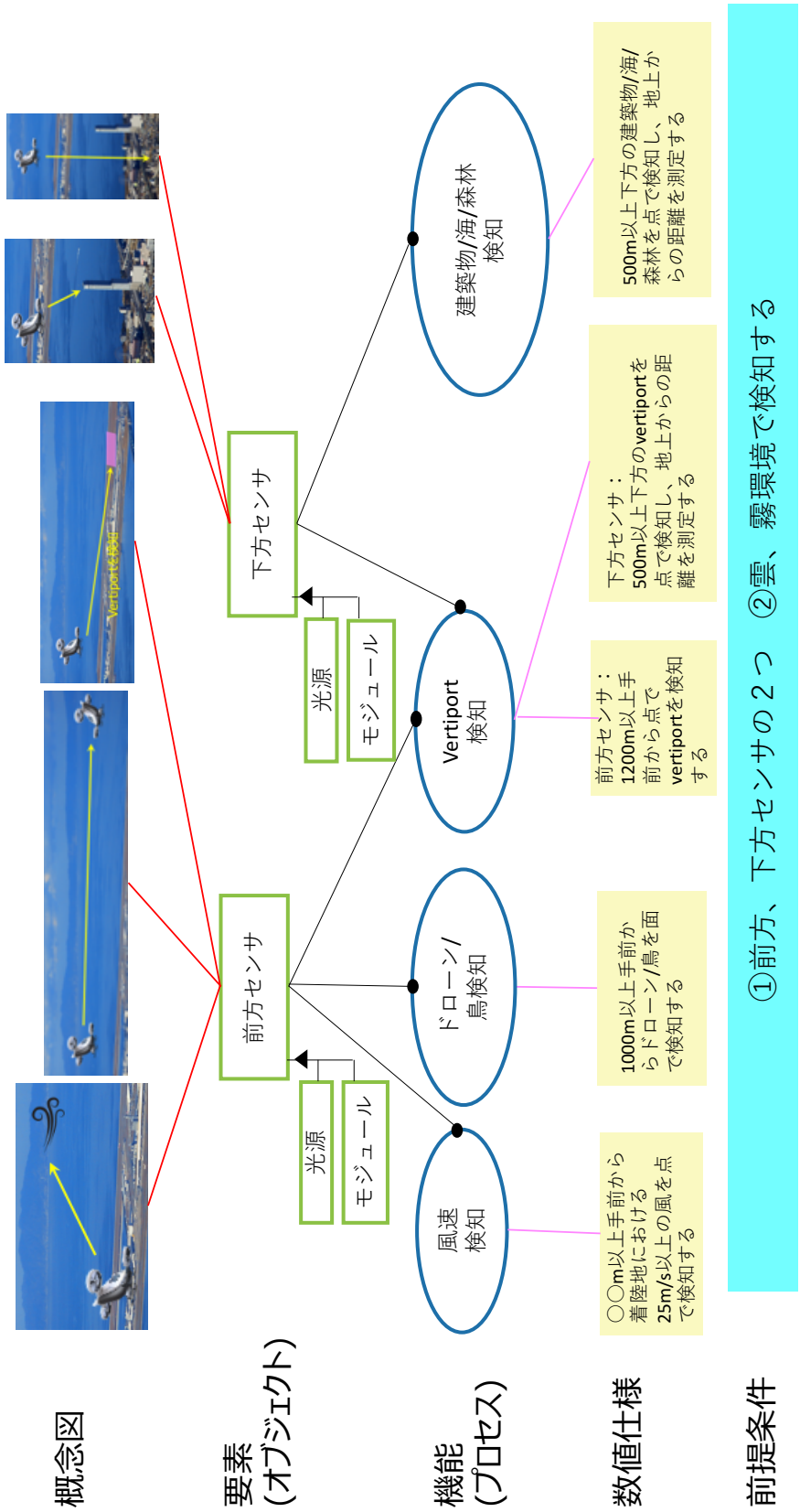


図 4-3 中部国際空港–三重県市街地間の LiDAR 検知対象詳細のリファレンスモデル

4.2　想定ケース２：新千歳空港–ニセコ間

本節では、新千歳空港–ニセコ間の飛行について、表 3-9 に示す飛行条件におけるリファレンスモデルについて説明する。

国土交通省は自動車における自動運転についてレベル２を、特定条件下での自動運転機能を有し、例として高速道路における分合流、遅いクルマの追い越しを自動で行うことができるレベルであると定義している。

空飛ぶクルマに対しての自動運転レベル２の動作として、本研究では、衝突回避動作を自動で行うものとして、リファレンスモデルを作成する。

図 4-4 はシステム概念図であり、vertiport へ向かって飛行中の様子を表している。

飛行位置検知　上空の衛星から飛行位置を検知することで機体がどこを飛行しているか、目的地までどの程度の距離があるかを把握する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

風検知　機体前方の風を検知する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

静止物体　機体前方、もしくは下方にある静止物体を検知する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

Vertiport 検知　機体前方、もしくは下方にある vertiport を検知する。機体は雲や霧の中を飛行している場合がある。

図 4-5 はシステムのリファレンスモデルである。以下、詳細を説明する。

概念図に示す風検知、飛行体検知、高さ検知、静止物体検知、vertiport 検知を行うのはセンサである。センサは、光源とモジュールから構成される。センサが実施する機能は風速検知、高度検知、静止物体検知、飛行体検知、vertiport 検知である。センサは、これらの検知を操作する。仕様として、風速 20m/s 以上の風を点で検知する。どの程度手前から風速を検知する必要があるか、リファレンスモデル作成時点でわからなかったため、風速の検知を〇〇m 以上手前とすることで、関係者との議論を行う時に、必要な数字についての意見を得ようと考えた。また、高度検知では、数値仕様として 500m 以上下方の地上を点で検知し、距離を測定するとした。飛行高度を知ることが目的であるため、点による測距で良いと考えた。次に、静止物体検知では、500m 以上手前から静止物体を検知するとした。500m 以上手前とした理由は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（2019）による自動操縦ヘリコプタの衝突回避実験において、相対速度差が 100km/h であった場合に 500m 手前から衝突回避動作を実施したところ衝突回避ができたという結果に基づき、相対速度が 100km/h につき 500m 手前での検知が必要であるとした。次に、飛行体検知として、2000m 以上手前から面で飛行体を検知するとした。これは、空飛ぶクルマ同士のすれ違いを考慮して、相対速度が最大 400km/h と考えて設定した。次に、vertiport 検知は 1500m 以上手

前から検知するとしているが、これは、vertiport に IFR における進入灯相当のライトがないことを想定した時の、IFR における最低気象条件を参考に設定した。
風速検知、高度検知、飛行体検知、Vertiport 検知を要求するのは CPU である。CPU はこれらの検知結果をもとに、優先判断を操作する。CPU は機体に搭載されていることを示すために、空飛ぶクルマ機体の概念図と結びつけた。優先判断の仕様は、センサ情報に基づき、自動操縦補助を実施するか否かを判断すること、である。次に、優先判断を要求するのは操縦補助機である。操縦補助機は優先判断の結果を元に、自動衝突回避動作を行う。自動衝突回避動作の仕様は、そのまま進行した場合に衝突の恐れがある場合に、自動で衝突回避動作を実施することである。次に、パイロットは機体操縦と飛行高度調整を操作する。パイロットの機体操縦によって機体は目的地へと進行する。機体操縦としての仕様は、パイロットがヘリコプターパイロットと同等の操縦技量を有することである。また、飛行高度調整の仕様は、定められた高度に飛行高度を調整することである。パイロットは vertiport 検知結果を要求し、機体操縦、飛行高度調整を行う。また、高度検知結果の影響を受けて飛行高度を調整する。パイロットと静止物体との間に関係が結ばれてないのは、衝突リスクのある物体検知に関しては、パイロット操縦として反映させず、自動運転で回避するためである。また、パイロットは座標検知を要求することで、機体の位置を判断する。座標検知システムは、座標検知を操作し、機体の位置を測量する衛星と測量結果を受信する信号受信機から成る。座標検知の仕様は、機体の座標を検知することである。
システムの制約/前提条件として、①vertiport に進入灯は配置されていないこと、②自動衝突回避動作を行うことができる自動運転であること、③空飛ぶクルマ同士のすれ違いがあること、を挙げている。
　次に、サブシステムのリファレンスモデルについて説明する。図 4-6 は LiDAR 検知対象についての詳細を記述したものである。
センサは、機体前方に設置する前方センサ、機体底部に設置する下方センサからなり、それぞれのセンサは光源とモジュールから構成される。前方センサは、風速検知、ドローン/鳥検知、空飛ぶクルマ検知、vertiport 検知を行う。下方センサは、vertiport 検知、建築物/海/森林検知を行う。ドローン/鳥検知は、前章同様 1000m 以上手前から面で検知することを仕様とした。
　次に、vertiport 検知は前方センサと下方センサで行う。前方センサでは 1500m 以上手前から点で vertiport を検知するとし、下方センサでは 500m 以上下方の vertiport を点で検知し、地上からの距離を測定する。地上からの距離を測定することで、パイロットによる下方への着陸動作が可能となると考えた。また、下方センサでは建築物/海/森林を検知し、その仕様は 500m 以上下方の建築物/海/森林を点で検知し、地上からの

距離を測定する、としている。図 4-6 は、制約条件として、①検知センサは、前方、下方センサの２つであること、②上述の検知を雲、霧環境下で検知することとしている。

図 4-4 新千歳空港−ニセコ間飛行のシステム概念図

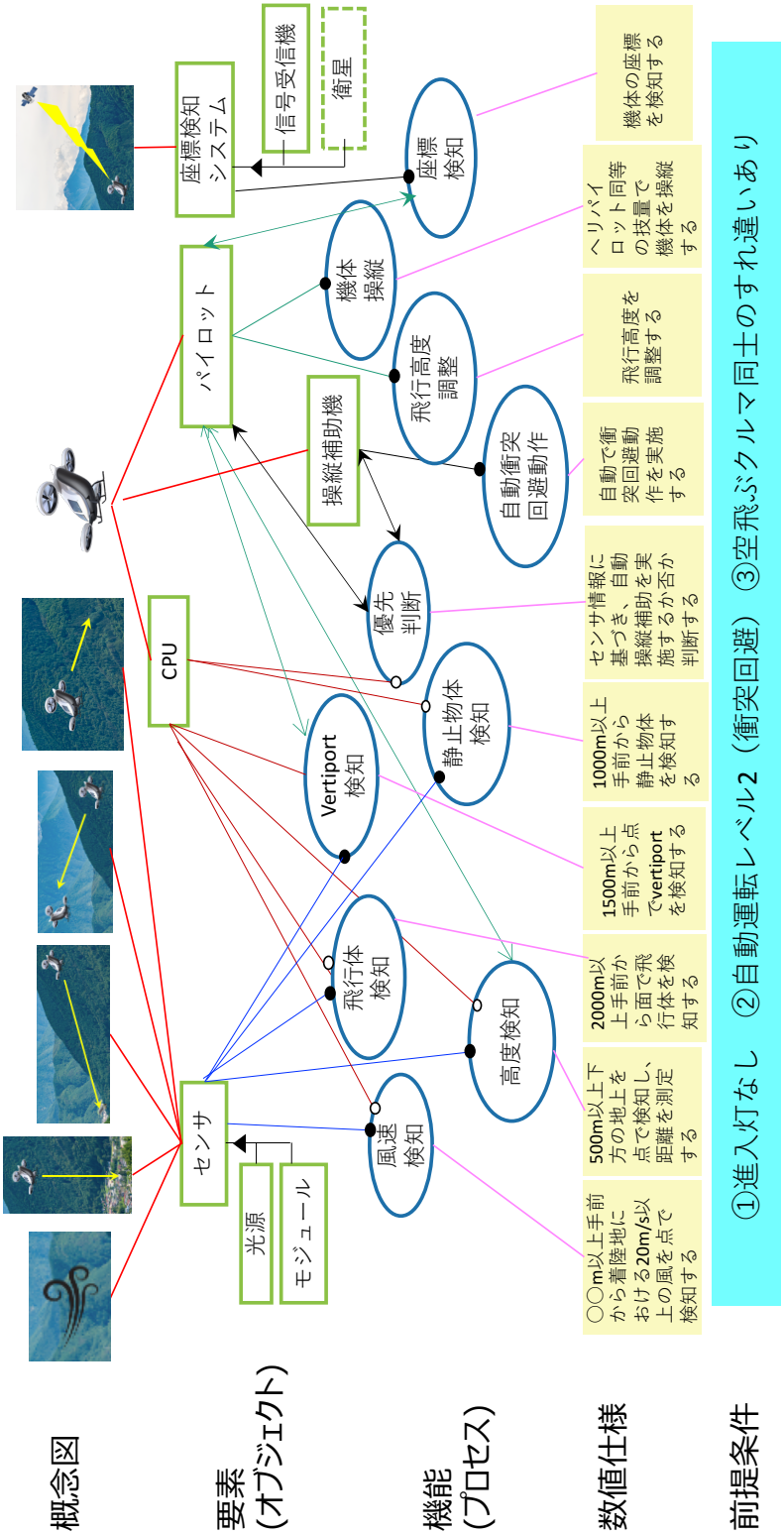


図 4-5 新千歳空港–ニセコ間のシステムのリファレンスモデル

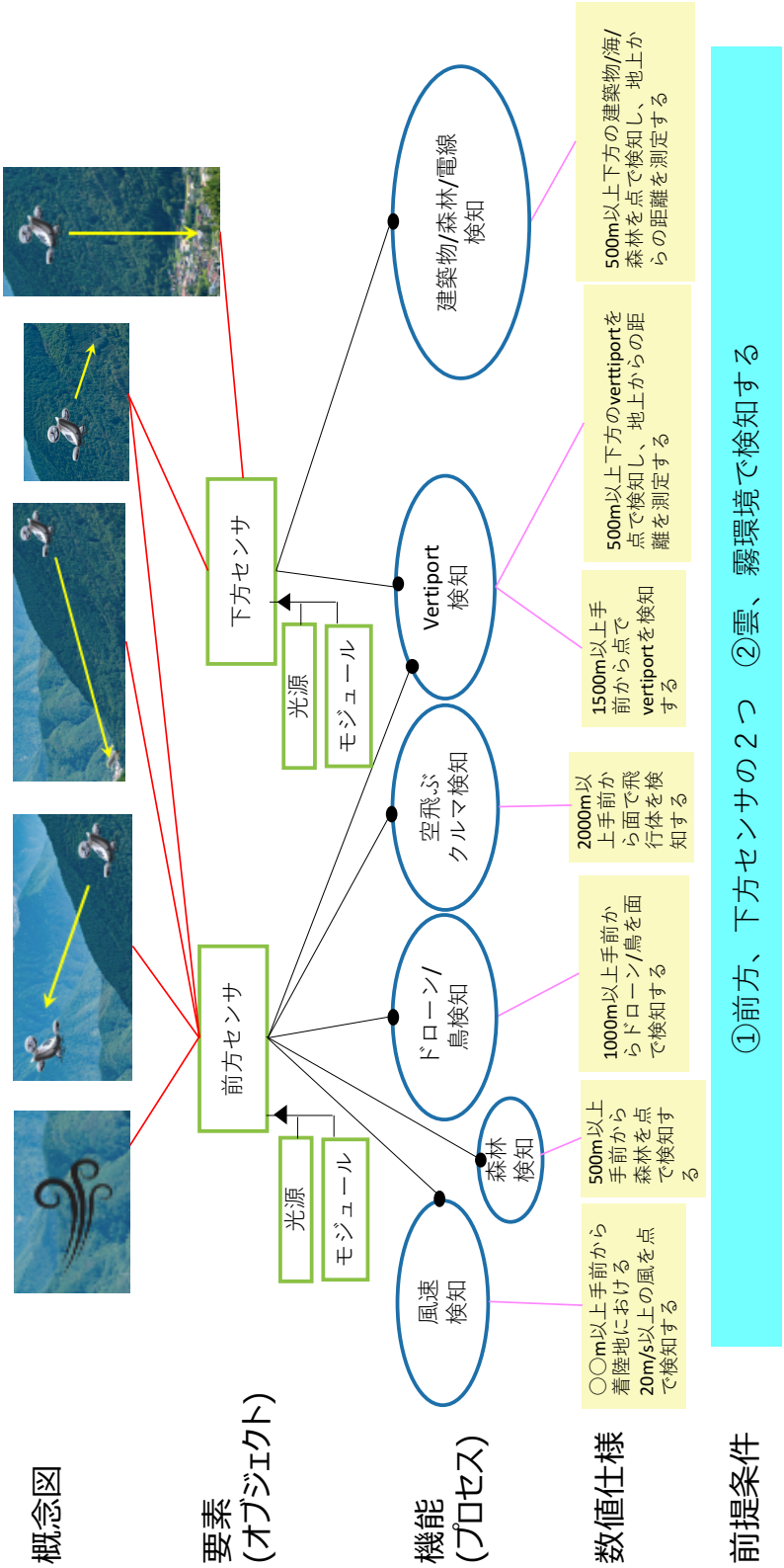


図 4-6 新千歳空港–ニセコ間の LiDAR 検知対象詳細のリファレンスモデル

4.3　リファレンスモデルを使用した結果③

表 4-1 は、リファレンスモデルを使用して議論を行った際の、参加者の属性を表す。それぞれの参加者に対して、議論を期待した点は以下である

表 4-1　議論の参加者属性

ID	属性
1a	センサメーカー 社員
4c	ヘリコプタ運航会社 社員
7a	空間情報コンサルティング会社 社員
6b	国家公務員
8a	空飛ぶクルマラボ 研究員

センサーメーカー社員 LiDAR センサの活用の提案内容について、実現性と目標となるポイントについて議論を行う。

ヘリコプタ運航会社社員 運航システムの構想に対して、表記もれや改善点について議論を行う。

空間情報コンサルティング会社社員　LiDAR センサの最適な活用方法について議論を行う。

国家公務員 運航システムの構想に対して、表記もれや改善点について議論を行う。

これらの対象者に対して、図 4-2,4-3,4-5,4-6 のリファレンスモデルを使用して議論を行ったところ、以下の成果が得られた。

システムに対して

システムの改良点としては、風速の検知は乱気流が必要であることが明らかとなった。また、鳥やドローンの検知について現行の法律上は明確な規定はなく、必検知して回避すべき対象では必ずしもないことが明らかとなった。また、センサの検知結果を使用して着陸誘導をどのように行うかを明記しないと違和感があることが明らかとなった。

LiDAR センサの利用に対して

全ての検知を LiDAR センサで行うには無理がある可能性があることが明らかとなった。また、LiDAR センサの利用方法としては飛行全般をカバーするのではなく、局所

的な条件を設定して利用するのが良い可能性があり、スペックに合わせて使い方を精査する必要性があることが明らかとなった。km レベルの検知は、やはり自動車での利用の延長線上にはないスペックであり、独自の開発が必要となることが明らかとなった。しかし、空間認識ではなく、点検知として測距利用であれば現実的な目標となりうる可能性があること、500m レベルであれば面検知の空間認識も自動車利用の延長線上と捉えられる可能性があることが明らかとなった。

リファレンスモデルに対して

図 3-1 を使用した時と比較して、提案するシステムの内容に踏み込んだ議論を行うことができた。図 4-2、図 4-5 に記載されているシステムのリファレンスモデルに対して、Vertiport 検知結果の扱いや、風として検知すべきものの対象、物体検知として鳥やドローンなどの検知対象についても言及があった。モデルに記載されているセンサ検知について全てを LiDAR センサで行うことへの違和感が伝わった。飛行中から着陸までを想定したリファレンスモデルであることも伝わった議論となった。

参加者より得られたコメントは以下である。

運航システムに対する参加者からのコメント

1a センサメーカー 社員

システムで要求されている数値ついて、自動車に対して大きな開きがあり、自動車用の LiDAR センサの開発延長線上にはない数値となっている。km レベル先のものを検知するためには長距離計を使う事となるが、消費電力、サイズ、光源、コストが課題となる。いかに小型化できるかであるが、ニッチ市場であるため、開発する上で目標となるかどうかは分からない。一方、500m レベルの検知であれば、自動車使用の延長線上と捉えられるかもしれない。また、検知範囲が点であれば現実的な利用として考えることもできるかもしれない。

4c ヘリコプタ運航会社 社員

LiDAR センサの使用方法として、衝突回避への使用については理解できる。ヘリコプタについて IFR では衝突回避の対象としてヘリコプタや飛行機に対しては管制の指示のもとで衝突を回避しなければならない。しかし、鳥やドローンについては規定がない。

今回の提案は、ILS カテゴリーキャット 1 である視程 550m を LiDAR センサで検知するものと理解した。しかし、LiDAR センサで検知した結果を着陸誘導に対してどう使うか理解ができなかった。パイロットがホバリング動作を行って着陸を行う際、計器飛行条件では、準天頂衛星を利用して、地形や障害物を探知し、パイロットはその情報に従ってホバリングを行う。LiDAR センサで地上だけを検知してどうやってホバリングを行うのかがイメージつかない。レーダー誘導であれば、衝突の責任は管制官にある

が、GNSS などを利用するのであれば飛行機をどう考慮するかなどが気になる。
風については離陸してしまえば風向きの方向に流されるだけなので、どのような強さであっても関係がない。平均風速については離陸時の風速が重要。飛行中において気にすべきは乱気流、空飛ぶクルマは低高度を飛行するためヘリコプタに対して乱気流の影響を強く受ける。機体前方の気流の乱れを確認することは有効。

7c 空間情報コンサルティング会社 社員

LiDAR センサで検知した結果を着陸誘導に対してどう使うか理解できないことに対して同意見。弊社はドローンを飛行させ、3 次元地図を作成するために測量として LiDAR を利用している。閉鎖環境や、障害物がある状況で LiDAR を上手く活かせるというイメージを持っている。空中でどう機能するかは、飛行中、離発着、非常時など局所的な使い方に絞った方が良いのではないかと思った。

6b 国家公務員 職員

資料にある機体耐風性とはどういう意味か。風速の発生率から見積もった結果で、ただ考慮すべき風速というのであれば耐風性と書くべきではない。この場には様々な分野の専門家が集まっているため、言葉の定義には注意した方がよい。
今回の発表のような内容について、アメリカの文献も調べてみるべき。LiDAR について今後重量についても考察を進めていくべき。

8a 元重工系エンジニア

風速の 25m/s という数値について、現実的に今の空飛ぶクルマが耐えうるものなのか。自動車の自動運転では、センサとして光学カメラ、ミリ波、LiDAR と使い分けている。空飛ぶクルマにおいて、全ての検知を LiDAR に行わせる必要はないのではないか。また、LiDAR は雨、霧に弱いため自動車ではミリ波を使い、遠方はカメラを利用する。

4.4 リファレンスモデルを使用した結果④

本節では、図 4-2,4-3,4-5,4-6 のリファレンスモデルについて LiDAR 使用の現実性について、さらなる考察を行うため、自動車用のデバイス開発メーカー社員と議論を行った結果について説明する。

システムに対して

現行の LiDAR 性能を鑑みると、GPS と機体検知の他に空間マップを組み合わせて、総合的にシステムの構築を検討する必要性があることが示唆された。

LiDAR センサの利用に対して

光源、モジュールの考え方について、知見が得られた。自動車に搭載するセンサの流用ではスペックに乗らず、図 4-2,4-3,4-5,4-6 で示すシステムへの利用に対しては新規開発を行う必要があることが明らかとなった。ドローン、鳥について、サイズが小さいため検知を行いづらいとのコメントを得られた。また、電線の検知も自動車に搭載するセンサの流用では困難であることが明らかとなった。また、リファレンスモデルの表記方法について、エンジニアリングの視点から見ると、動作フローが明記されている方が分かりやすいとのコメントが得られた。

リファレンスモデルに対して

図 4-3、4-6 で示すサブシステムに対して前方センサだけでなく、側面側の検知も行うべきではないかとの指摘があり、そこから距離と視野角についてのトレードオフの話へとつながった。

コメント

9a デバイス開発メーカー 社員

自動車用の LiDAR で検知する距離はせいぜい 100m。それ以上になるとミリ波となる。ヘリコプタ用のもので 1000m レベルを検知するものもあるがコストが高い。

自動車の場合は、前だけにセンサを付ければよいが、空飛ぶクルマの場合は側面の検知も必要ではないか。その場合、センサの視野を広げる必要があるが、広げると距離が短くなる。そこを調整すると光源、電力が変わってくる。

500m でも自動車のスペックには乗ってこない。自動車では 1kg 以下のセンサを使用する。重量にとって一番影響があるのは光学系。レンズの重量が重く遠くまで光を飛ばそうとするほど複雑な光学系となり重くなる。波長について、クルマでは eye safe の観点で選ばれている。視野角を広げるためにモジュールとして自動車利用では通常、半導体を使う。技術的にはメカ機構を搭載することも可能だが、サイズが大きくなり、機械であるため故障リスクがある。空飛ぶクルマに対して LiDAR を利用する場合、一般的に考えられているのは着陸に対して。機体メーカーは飛行中の仕様については考えていない。30m くらいの距離を検知する LiDAR の搭載を考えている。

飛行中の衝突防止は空間マップと GPS を利用するのが良いと思う。あるいは、レーダーを利用した方が安全ではないか。

航空機用の LiDAR は 20kg レベルだが、堅牢性を高めるために重くなっている。LiDAR はもともと航空業界で使われていたものを自動車業界に持ってきた。航空業界と同様のスペックのものを小型するのは難しいと思う。

LiDAR で検知できる距離は見たいものの大きさで変わる。小さいほど、分解能が得られないため、遠くにいると検知ができない。電線の検知は厳しいと思う。

また、LiDAR の弱点として雨霧に弱い。だから自動車ではミリ波レーダーを搭載する。散乱光処理を行って使いこなすよりは、カメラの方が良いのではないかと思う。ステレオのカメラであれば測距もできる。

リファレンスモデルについては、エンジニアリング的な目線で考えるとステップを考えてしまう。どの順序でどの処理が行われているのかが分かると良い。

4.5 結果の考察

本章では、図 3-15 の表記方法にしたがって 2 つのユースケースに対してリファレンスモデルを作成し、関係者と議論を行った。

リファレンスモデルを用いた議論を行うことでシステムの詳細に踏み込んだ議論を行うことができ、検知対象や検知結果の利用方法についての意見を得ることができた。また、検知手段として LiDAR センサを利用した場合の技術的ハードルについて議論ができ、LiDAR センサだけを使用するのではなく、ミリ波センサやカメラなど、様々なセンサを組み合わせる必要があり、それらの最適な組み合わせを検証する必要があることが明らかとなった。

リファレンスモデルを使用した議論を通して、LiDAR センサの弱点としては、検知距離が短い、水滴に弱いなどが挙げられた。

検知距離が短いという弱点に対して、ミリ波レーダーの場合、長距離の測距手段として有効であるが、対象物を面で捉えることができないため、衝突回避動作として本当に利用できるかどうか検証を行う必要がある。

また、水滴に弱いという弱点に対して、カメラを利用した場合、そもそも悪視界環境では周囲の状況を捉えることができない。悪視界環境における物体検知として、地上レーダーの利用も考えることができるが、飛行ルート上を全てカバーできるようにレーダーを設置する必要が生じる。また、空間マップや GPS を利用した飛行によって衝突回避を行う場合、定められたルートに従わない飛行体に対する衝突回避動作をどうすべきであるかを考慮する必要がある。

上述のように、既存技術の組み合わせだけでは、それぞれに対して課題があるため、それぞれの技術水準を向上させることが、システムを成立させるためには重要な要素となると考えられる。

5.　結論

5.1　結論

本研究の目的は、空飛ぶクルマの就航率向上に関して、①クリアすべき気象要件を明確にし、②要件を鑑みて、就航率を向上できる運航システムについてリファレンスモデルを提案することであった。

運航システムとして、飛ぶクルマへの参入に興味を示す企業に対して開発の目標を提供するという観点で、LiDAR センサを利用したリファレンスモデルを提案し、提案したシステムの現実性や開発目標について議論を行った。

空飛ぶクルマの就航は空の移動革命と言われており日本国内において 2020 年代には事業化が開始され、田舎での人の移動、都会での人の移動、離島での人の移動が順次開始されていくと想定されている（経済産業省 2018）。日本国内での事業化に向けて、様々な区間におけるユースケースが想定され、ニーズの視点、事業の視点から運航条件が検討されている。

空における人の移動を自動車の様な感覚で行うためには、高い就航率での飛行を安全にできなければならないが、技術主導の開発では就航率向上に必要な要件を見落とした開発が行われる可能性もある。また、新しい産業の誕生を事業拡大の機会と捉えて参入を検討している企業も多いが、多くの場合は調査止まりでそれぞれの企業が保有する技術が展開できるレベルのものなのか見出せずに足踏みを行うケースも多い。

これらの問題意識を背景に、具体的なユースケースに対して運航システムを提案し、システムが要求する機能や仕様を明確にすることで、新規参入を検討する企業に対して開発目標を提示し、空の移動革命の実現に貢献することを本研究の意義としてきた。

（1）気象要件の特定の結論

最初に、就航率を向上するために、風速と悪視界条件に対してどのような条件をクリアすべきであるか探索した。

風速の発生率の算出では、気象庁が提供する過去の天気情報の風速データをもとに、べき法則と、突風の算出式により、任意高度、地点における風速の発生率を算出した。その結果、想定されている 5 つのユースケースに対して、就航率の観点で必要な機体耐風性を提示することができた。全部で 5 つのユースケースに対して、vertiport 上空における風速の発生率を求めたところ、高度 1000m 以下の飛行において、中部国際空港–三重県市街地間の区間以外の 4 つの区間においては 20m/s 以上の風速を考慮することが就航率を目標である 95%以上とするために必要であることが示され、中部国際空港–

三重県市街地間については 25m/s 以上を考慮する必要があることが示された。本結果によって導かれるのは風速の発生率であり、これによって機体設計上考慮すべき風速を与えることができたが、それぞれの風速がいつ吹くかについては導かれていない。このため、要件として機体耐風性以上の風速を検知する必要があることを導くことができた。

悪視界条件の発生率の算出では、航空気象情報のうち、雲底、卓越視程情報を分析することで、高度ごとの悪視界条件の発生率を算出することができた。その結果、高度 500m 以下の飛行の場合、5 つのユースケースのうち 2 つのユースケースで、VFR では就航率 95%以上を達成できず、高度 1000m 以下の飛行の場合、3 つのユースケースで達成できないことを明らかにした。以上の分析から、ユースケースごとに機体および運航システムに対して以下の要求を明確にできた。

① 機体設計上考慮すべき風速
② 機体設計上考慮すべき風速以上の風速を検知する
③ 悪視界条件でも飛行できる飛行方式の実施の必要性

これらの要求を満たす機体、並びに運航システムを構築することで気象要件に対して、目標となる就航率 95%以上を達成することができると示唆される。

（2）リファレンスモデルの提案の結論

本研究では、フレキシブルな空の移動を実現するために、計器を使った新しい有視界飛行方式についてリファレンスモデルを提案した。

計器を使った有視界飛行方式のための前提条件

ヘリコプタパイロットとの議論により、悪視界条件において飛行を行う場合、物体検知の結果をパイロットが確認して操縦を行い、衝突回避動作を行うことは、従来のパイロットのワークロードを超える負荷となることが分かった。また、パイロットが物体を確認できる形でセンサによる検知データを処理することはセンサ重量の観点から懸念が大きいことが明らかとなった。

気象サービス会社との議論では、悪視界条件の発生を地上設備から検知する場合、飛行ルート上にライブカメラやシーロメータなどを設置する必要があるが、新千歳空港–ニセコ間のような山間部を飛行するルートの場合、これらの設備が整っていないため、気象サービス会社としてはサービスの検討を行いようがないことが明らかとなった。

空飛ぶクルマ専用の利用として、これらの設備を導入したシステムを構想するのは現状の段階では困難だと判断し、悪視界条件における飛行として、機体に搭載するセンサ

による物体検知を第一に考え、以下の特徴を持つリファレンスモデルを作成することとした。

① 悪視界条件における機体外部の物体を機体に搭載したセンサで検知する
② センサの検知によって、自動運転のレベルに応じた運転補助を行う
③ センサとして、LiDAR センサに注目し、センサ開発に必要な数値仕様を明確にする

LiDAR に注目した理由は、測距センサとしてパイロットの目の代わりとして機能できる可能性があることと、センサメーカーが空飛ぶクルマ事業への参入に興味があったため、LiDAR 利用の現実性を議論し、開発目標となる数値を提示するためのであった。

議論のためのツールの表記形式

気象要件のうち、風速の検知と悪視界条件での飛行は機体として設備を持たせた上で、どのような飛行を行い、どのような仕様が必要か議論する必要がある。

UA M に対して、コンセプトペーパーレベルのシステム構想しかない中で、日本国内での事業化のために、空飛ぶクルマへの参入に興味を持つ企業がどのような形で貢献できるか、何を目標として開発を行えば良いかを明らかにするために就航率を向上するためのシステムについて、議論を行うためのツールを提案した。

ツールの開発当初は、特定した気象要件をもとにシステムアーキテクチャを提案し、提案の良し悪しについて関係者との議論を行い、システムの是非を議論するのが良いと考えた。

ヘリコプタパイロット、ヘリコプタ運航会社、機体システム開発メーカー、センサ開発メーカー、気象サービス会社など、空飛ぶクルマへの参入に興味を持つ様々な企業の社員と議論を行ったところ、システムアーキテクチャだけでは生産性のある議論はできないことが明らかとなった。様々な企業と議論を行っている中で、センサなどの部品メーカーは空飛ぶクルマ事業への参入に興味はあるものの、空飛ぶクルマの運航について知見がなく、何を開発すれば良いかわからず、開発などの具体的な行動に動き出せない現実があることが明らかになった。これらの企業にとって必要なのはシステムの理解ではなく、数値仕様であり、それがないと議論が活性化せず、無味乾燥なもとなる。さらに、システムアーキテクチャだけでは参加者の理解が追いつかないことが明らかとなった。そこでこれらを踏まえ、可読性の高い表記形式のツールとして、以下の特徴を有するリファレンスモデルを提案した。

① 要素と機能はOPMに則った記述とする
② 概念図とOPMのオブジェクトを紐付ける
③ OPMのプロセスと数値仕様を紐付ける
④ 制約条件を明示する
⑤ テーマを絞り込む

以上の表記形式を満たすものをリファレンスモデルと定義した。

概念図によりシステム全体像の理解が高まり、実現のために何のオブジェクトを割り付けるかが明確になる。また、OPMをベースとすることで、オブジェクトとプロセスの関係が明確となり、プロセスと数値仕様が紐づいていることで、オブジェクトを開発する企業は、システム全体像を理解しつつ、目標としてどのようなオブジェクトを開発すれば良いかかが理解できる。さらに、制約条件については議論の主題によって適切な表現とすることで、議論への参加者がシステムについてよりクリアに理解でき、開発目標が明確となる。例として、多くの分野の参加者の下、システムレベルの議論を行う場合は自動運転レベルの前提、パイロットがなすべきことの前提を明記することでシステムについての議論ができる。また、個別でセンサメーカーと議論する場合は、センサの制約として、光源やモジュールを明記することでどのようなセンサを開発すれば良いかが明確となる。

本研究で提案するリファレンスモデルを用いて関係者と議論を行ったところ、システムの詳細に踏み込んだ議論を行うことができた。また、リファレンスモデルに示す数値仕様や機能に対しての必要性についても議論ができ、これらの仕様を開発目標として提示することができた。

リファレンスモデルを使用して議論を行った結果

２つのユースケースに対してリファレンスモデルを提案し、それぞれのユースケースに対して、LiDARセンサとして目標となる数値仕様を提示した。

議論の結果、以下の知見を得ることができた。

運航システムについて

① 本研究で想定する自動運転相当では誘導着陸動作が困難であり、空間情報を利用したさらに上位の自動運転補助が必要である。
② 風速ではなく乱気流の検知が必要。乱気流の仕様を明確にする必要がある。
③ センサの個数について、前方と下方2つのセンサだけで良いか、側面をどこまで考慮すべきかを考察する必要がある。
④ センサだけなく、空間マップなど他の手法も考慮して、総合的な検証が必要であ

る。

LiDAR センサの開発目標について

① 現状の自動車用の LiDAR センサでは空飛ぶクルマへの利用に対して能力が不足する。航空機用の LiDAR センサについては、能力はあるが重い。軽量化が必要となる。

② km レベルの面検知は技術的ハードルがかなり高い。しかし、測距としての点検地、500m レベルの面検知であれば開発目標となる可能性がある。

③ 重量を考慮するためには光学系に対して検証が必要

自動車利用からくる LiDAR への要求は、せいぜい 100m 程度先の物体の検知であり、空飛ぶクルマでの要求仕様は自動車と比べてハードルが高い。その中でも、センサーメーカーからは 500m 先の検知について開発目標となるかもしれないとの見解が得られた。また、センサメーカーからは、空飛ぶクルマとして目指す姿のイメージがついたとのコメントが得られ、空飛ぶクルマ事業への参入について、具体的な検討項目を提示することができた。

5.2 今後の課題

本研究は、気象要因に関する空飛ぶクルマの就航率について、風速と悪視界条件の発生率の分析を行い、就航率として 95%以上を達成するための要件をユースケースごとに与えた。

特定した要件に対して就航率を向上するためのシステムを構想し、構想したシステムの現実性と参入に興味を示す企業の開発目標を示すためにリファレンスモデルを作成した。本研究の今後として、以下の課題や発展が考えられる。

まず、気象要因の特定として風速の発生率では 10min 平均風速のデータを元に突風の風速を算出し、求めた突風の風速を 10min の代表値として風速の発生率を算出したが、実際には 10min の中で突風の風速が吹く時間は 10min より少ない。これについては、風速変化による機体の応答性によっては、過剰な発生率の見積もりである可能性があり、より精緻な見積もりが必要となる可能性がある。また、風速の方向については考慮せず、全ての方向の風速を足し合わせて風速の発生率を見積もったが、機体形状や着陸、離陸方式によっては、特定の方向に対しての考慮が必要である可能性もあり、全方向での見積もりでは機体設計において風速を考慮する上で不十分である可能性がある。

次に、リファレンスモデルについては、LiDAR センサについて悪視界環境における物体検知に関する仕様について数値仕様を明確にできたが、乱気流の検知仕様について明らかにする必要がある。また、リファレンスモデルの表記内容について、機体による検知と他の手段との併用について検証する必要がある。

また、センサの目標値については提示ができたが、機体に搭載する上で重要なパラメータである重量や電力については、詳細の検討を行うまでには至らなかった。

本研究ではリファレンスモデルを、センサメーカーにとっての開発目標となるものであることを目指し、数値仕様を含めたリファレンスモデルを提供できた。センサのような部品メーカーで、特に航空業界以外からの参入を検討している川上側メーカーにとっては、本研究のアプローチが有効に機能する可能性があることを示すことができた。

一方、本研究のアプローチは、機体メーカーのような川下側メーカーに対して開発目標となるものとまではいかなかった。機体動作は複雑であるため、どこまでをリファレンスモデルとして記載すべきか見極めが困難であること、機体仕様は開発各社の技術戦略上、重要な機密情報ともなるためであると考えられる。どこまでを関係者間でシェア、標準化し、機体メーカーにとっても役に立つリファレンスモデルとすべきかを考察することは今後の課題である。また、リファレンスモデルの検証については、本研究では空飛ぶクルマへの参入に興味のある企業に対して行なったが、現状興味のない企業に対して、その企業が開発への興味を持てるように巻き込めるかどうかは検証ができていない。

今後、新しい参入プレーヤーを巻き込むためにも、それらの企業に対して通用するリファレンスモデルへと発展させることが必要である。

また、リファレンスモデルをそのまま設計に利用するためには、表記内容について動作フローなどを記述する必要がある。動作フローについては、OPL で記述することで表現を行うことも可能であるが、具体的な設計利用に対して、本研究で提案したリファレンスモデルはどのように利用できるかどうか検証を行うことも今後の課題となる。また、本研究で提案したリファレンスモデルは数値仕様を明記した技術コンセプトであるため、今後、開発行為を実施するためには詳細についてシステム設計を行う必要があり、リファレンスモデルとシステム設計との関係をどのように結びつけることが有効であるかを考察することも必要である。

本研究では、図 5-1 に示すように空の移動革命という構想に対して、計器を使った新しい有視界飛行方式を実現するためのシステムが必要であると考え、構想とシステムの橋渡しとしてリファレンスモデルを提案した。

最後に、リファレンスモデルについて、本研究では空飛ぶクルマの運航システムについてモデルを作ったが、空飛ぶクルマ以外においても新規産業、新規事業を行う場合に事業アイデアに対して、エンジニアリングの観点でどのようなものを、どのような数値要求のもとで作るべきか情報が不足している場合は多くある。特にセンサなどのデバイスを開発する川上側企業は自社の保有技術と市場要求との差分を明らかにし、開発目標を明らかにしたい場合が多くあると考えられる。本研究で提案したリファレンスモデルの表記形式は事業アイデアと詳細のシステム設計との間の橋渡しとして有益な手法となることを念頭に研究を進めてきた。今後は、空飛ぶクルマの運航システムの構想に対してだけでなく、リファレンスモデルに関してもさらなる研究の質の向上を行い、日本企業のイノベーションの促進に貢献したいと考えている。

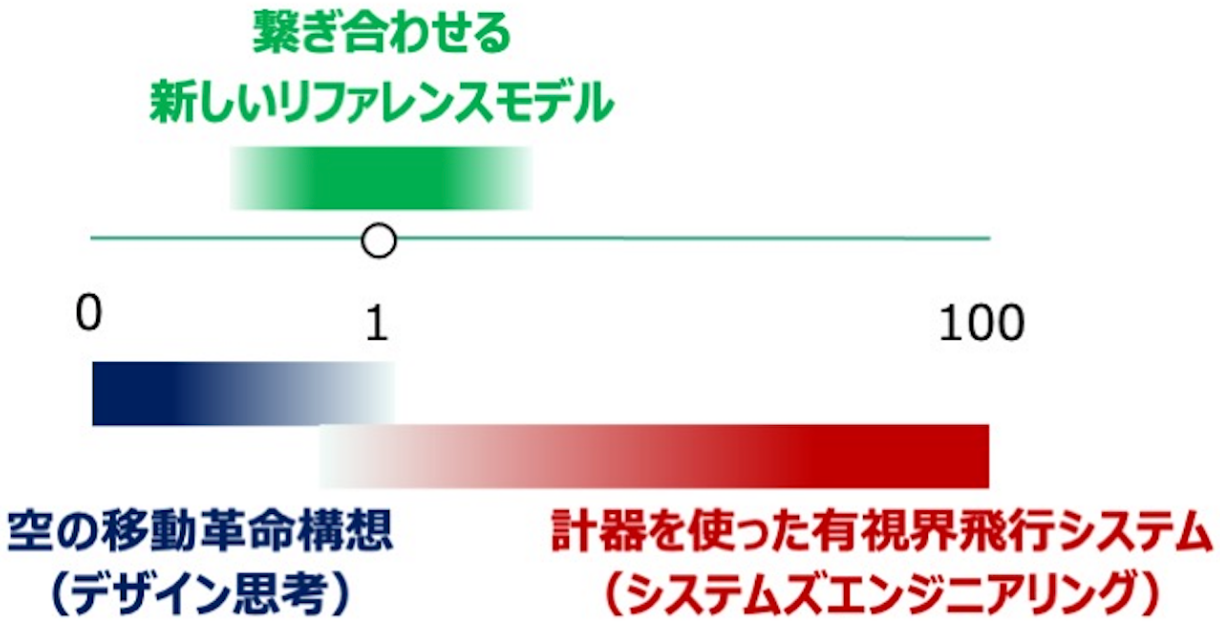


図 5-1 リファレンスモデルで達成できたことの概念図

謝　　辞

本研究を行うにあたり、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の又吉直樹様には、気象条件に関するアドバイス、並びに計算手法についてご助言をいただきました。浜松ホトニクス株式会社の岡野淳司様には、リファレンスモデルの表現方法を開発するにあたり、様々な助言と LiDAR 利用に関する有益なアドバイスをいただきました。Bell Helicopter の嵯峨根創様、朝日航洋株式会社の宮田貴資様には、パイロットの視点から空飛ぶクルマで遭遇すると想定される気象条件の影響についてアドバイスをいただきました。ウェザーニューズ株式会社の高森様には、気象インフラの現状についてアドバイスをいただきました。デンソー株式会社宮田学様には、LiDAR 技術についての基本事項と、空飛ぶクルマへ利用する上で注意すべき事柄についてアドバイスをいただきました。

空飛ぶクルマ研究会の皆様には、提案するシステムおよび、リファレンスモデルについて様々な示唆に富んだご意見をいただき、改良するきっかけをいただきました。

メソドロジーラボの皆様、ビジネスエンジニアリングラボの皆様には研究の進め方に対して多くの視点をいただきました。

ビジネスエンジニアリングラボの同級生である、太田泰嗣様、岡村衣里子様、柿沼佳寿子様、杉田昂士様、日辻大貴様、福井有香様には研究の進捗についてサポートをし合い、お互いを磨き合える関係として充実した学生生活を過ごさせていただきました。

デザインプロジェクト、ミラノサローネで同じチームとして共に活動した伊藤佳美様、木田勇輝様、シクラ駿様、高野雄一様、本橋萌様には学生生活全般にわたり、彩りのある 2 年間を与えていただきました。

空飛ぶクルマラボの中本亜紀先生には、研究の進め方についてのアドバイスだけなく、空飛ぶクルマについて最新の情報を数多く提供いただき、様々な関係者との接触をサポートいただきました。

副査の神武直彦先生には、研究のオリジナリティ、成果として考えられるポイント、修士論文審査会での伝え方など、修士研究のまとめ方についてアドバイスをいただきました。

最後に、主査の中野冠先生には約 2 週間に 1 回の割合で研究相談の時間を設けていただき、研究の進め方、論文の書き方だけでなく研究者としてあるべき姿について親身にご指導いただきました。

本研究は多くの方々のご協力により進めることができました。皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

＜英文文献＞

Angelov.S、Grefen.P：An e-contracting Reference Architecture、The Journal of Systems and Software、Vol.81、2008

Angelov.S、Grefen.P and Greefhorst.D：A Classification of Software Reference Architectures Analyzing Their Success and Effectiveness、Joint Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture & European Conference on Software Architecture、2009

Barrado.C、Boyero.M、Brucculeri.L、Ferrara.G、Hately.A、Hullah.P、Marrero.D、Pastor.E、Rushton.A and Volkert.A：U-Space Concept of Operation a Key Enabler for Opening Airspace to Emerging Low-Altitude Operations、Aerospace、Vol.7、No.24、2019

Binder.C、Neureiter.C、Uslar.M and Lieber.P：Towards a Standards-Based Domain Specific Language for Industry 4.0 Architectures、Complex Systems Design & Management、2018

Carces.L：A Reference Architecture for Healthcare Supportive Home Systems Missions Establishment and Validation、Sao Paulo University Doctoral Dissertation、2017

Cloutier.R、Muller.G、Verma.D、Nilchiani.R、Hole.E and Bone.M：The Concept of Reference Architecture、Systems Engineering、Vol.13、No.1、2010

Cotton.W：Adaptive Autonomous Separation for UAM in Mixed Operations、Integrated Communication Navigation and Surveillance Conference、2019

Cristina.B、Mario.B et al：U-Space Concept of Operations:A Key Enabler for Opening Airspace to Emerging Low-Altitude Operations、Aerospace、2019

DeLaurentis.D、Pfaender.H、Mavris.D and Schrage.D：A Probabilistic Methodology for the Treatment of System-of-Systems Problems and Application to Future Air Transportation Architectures、ICAS Congress、2002

Dobrica.L、Niemela.E：An Approach to Reference Architecture Design for Different Domains of Embedded Systems、International Conference on Software Engineering Research & Practice、2008

Dori.D：Model-Based Systems Engineering with OPM and SysML、Springer、2016

Dori.D、Sillitto.H、Griego.R、McKinney.D、Arnold.E、Godfrey.P、Martin.J、Jackson.S and Krob.D：System Definition System Worldviews and Systemness Characteristics、IEEE Systems Journal、2019

Feary.M：A Decomposition Framework for Describing Advanced Air Mobility Mission Functions、AIAA Aviation Forum、2020

Federal Aviation Administration: Urban Air Mobility Concept of Operations v1.0、https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf、2020、閲覧日 2020 年 9 月 13 日

Garces.L、Nakagawa.E：A Process to Establis, Model and Validate Missions of Systems-of-Systems in Reference Architectures、Symposium on Applied Computing、2017

Geister.D、Korn.B：Density Based Management Concept for Urban Air Traffic、IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference、2018

Graydon.M、Neogi.N and Wasson.K：Guidance for Designing Safety into Urban Air Mobility Hazard Analysis Techniques、AIAA SciTech Forum、2020

Greefhorst.D、Koning.H and Vliet.H：The Many Faces of Architectural Descriptions、Information Systems Frontiers、Vol.8、2006

Guessi.M、Oquendo.F and Nakagawa.E：Variability Viewpoint to Describe Reference Architectures、Proceedings of the WICSA、2014

Heikkila.S：Mobility as a Service -A Proposal for Action for the Public Administration、Aalto University Master's Thesis、2014

IEEE Std 1471-2000：IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems、2000

Ippolito.C、Krishnakumar.K、Stepanyan.V、Chakrabarty.A and Baculi.J：SAFE50 Reference Design Study for Large-Scale High-Density Low-Altitude UAS Operations in Urban Areas、https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190032259/downloads/20190032259.pdf、閲覧日 2020 年 12 月 27 日

ISO/IEC/IEEE International Standard 42010：Systems and Software Engineering-Architecture Description、2011

Kleinbekman.I、Mitici.M and Wei.P：eVTOL Arrival Sequencing and Scheduling for On-Demand Urban Air Mobility、IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference、2018

Lana.C、Guessi.M、Antonino.P、Rombach.D and Nakagawa.E：A Systematic Identification of Formal and Semi-Formal Languages and Techniques for Software-Intensive Systems-of-Systems Requirements Modeling、IEEE Systems Journal、Vol.13、No.3、2019

Long.D、Scott.Z：A primer For Model-Based Systems Engineering 2nd Edition、Vitech、2011

Maheshwari.A、Mudumba.S、Sells.B、DeLaurentis.D and Crossley.W：Identifying and Analyzing Operational Limits for Passenger-Carrying Urban Air Mobility Missions、AIAA Aviation Forum、2020

Maier.M：Architecting Principles for Systems-of-Systems、Systems Engineering、Vol1、No.4、1998

Mordecai.Y、Somekh.J and Dori.D：Presence-Awareness：A Conceptual Model-Based Systems Biology Approach、IEEE International Conference on Systems、2014

Morkevicius.A、Bisikiskiene.L and Bleakley.G：Using a Systems of Systems Modeling Approach for Developing Industrial of Things Applications、12th Systems of Systems Engineering Conference、2017

Nakagawa.E、et al :Software Architecture and Reference Architecture of Software-intensive Systems and Systems-of-Systems Contributions to the State of the Art、the 11th European Conference 、2017

Nakagawa.E 、 Feitosa.D and Oquendo.F : Consolidating a Process for the Design Representation and Evaluation of Reference Architectures、IEEE/IFIP Conference on Software Architecture、2014

Nakagawa.E、Oquend.F : Perspectives and Challenges of Reference Architectures in Multi Software Product Line、Proceedings of the 17th International Software Product Line Conference Co-Located Workshops、2013

Nakagawa.E、Oquendo.F、Avgeriou.P、Cuesta.C、Drira.K、Maldonado.J and Zisman.A : Foreword Towads Reference Architectures for Systems-of-Systems 、 IEEE/ACM 3rd International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems、2015

Nakagawa.E 、 Oquendo.F and Becker.M : RAModel : A Reference Model for Reference Architectures 、 Joint Working Confence on Software Architecture & 6th European Conference on Software Architecture、2012

Nakano.M、Kubota.F、Sato.S、Roser.C and Aaraki.M : Holistic Methodology for Business Process Reengineering 、 Proceeding of the 1st Conference on Changeable Agile Reconfigurable and Virtual Production、2005

Oliveira.M、Pereira.J : Extensible Virtual Environment Systems Using System of Systems Engineering Approach 、 17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence、2007

Pelliccione.P、Knauss.E、Agren.S、Heldal.R、Bergenhem.G、Vinel.A and Brunnegard.O : Beyond Connected Cars A System of Systems Perspective 、 Science of Computer Programming、Vol.191、2020

Tarafdar.S、Rimjha.M、Hinze.N、Hotle.S and Trani.A : Urban Air Mobility Regional Landing Site Feasibility and Fare Model Analysis in the Greater Northern California Region、Integrated Communication Navigation and Surveillance Conference、2019

Tuchen.S : Role of Aviation in Seamless End-to-End Mobility、IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference、2018

United States Department of Transportation : ARC-IT version 9.0 、 2020 、 http://local.iteris.com/arc-it/html/whatsnew/whatsnew.html、閲覧日 2021 年 1 月 17 日

Vascik.P、Hansman.R : Scaling Constraints for Urban Air Mobility Operations Air Traffic Contorol Ground Infrastructure and Noise、AIAA Aviation Technology、2018

Volpato.T、Oliveria.R、Garces.L、Capilla.R and Nakagawa.E : Two Perspectives on Reference Architecture Sustainability 、 Proceedings of 11th European Conference on Software Architecture、2017

Wahab.A、Mamat.R and Shamsudin.S : The Effectiveness of Pole Placement Mesthod in

Control System Design for an Autonomous Helicopter Model in Hovering Flight、International Journal of Integrated Engineering、Vol.3、No.3、2009

＜和文文献＞

朝賀泰男、西垣英一、青井一郎、杉浦豪軌、槙野浩司：標準化部材をモジュール構成とした車体構造設計の研究、日本機械学会論文集、Vol.83、No.853、2017

ANA：三重県で「空飛ぶクルマ」のルート策定に向けた実証実験を実施します、ANA Group 企業情報、2021、https://www.anahd.co.jp/group/pr/202101/20210106.html、閲覧日 2021 年 1 月 10 日

池谷直樹、池田恭彰、萩島理、谷本潤:単純都市形状を対象とした地表面近傍表面に関する統計的性質と突風の評価、2015

伊藤芳樹、林泰一、小林文明、内藤玄一：ドップラーソーダによる風速の鉛直プロファイルの測定、第 21 回風力エネルギー利用シンポジウム、1999

植松康、飯泉江梨、セオドルスタトポラス：独立上屋の風荷重に関する研究　その 2　構造骨組用風力係数、日本風工学会、Vol.31、No.2、2006

植松康、飯泉江梨、セオドルスタトポラス：独立上屋の風荷重に関する研究　その 3　提案した風力係数の妥当性と適用性、日本風工学会、Vol.31、No.4、2006

Weather-Eye コンソーシアム：Weather-Eye ビジョン -特殊気象から航空機を守る技術の開発と展望-、Weather-Eye コンソーシアム、2019

AIM-JAPAN 編纂協会：AIM-J、 日本航空機操縦士協会、2018

大阪日日新聞：空飛ぶクルマ大阪で 23 年実用化へ気勢、2020、https://www.nnn.co.jp/dainichi/news/201118/20201118035.html、閲覧日 2020 年 11 月 28 日

大林秀彦：ATIC におけるヘリコプタ技術研究について、日本航空宇宙学会、2001

岡啓、当麻哲哉：OPM と Scorecarding 法の組合せによるシステム開発手法の評価、除法システム学会　第 5 回全国大会・研究発表大会論文集、2009

奥野善則、 赤松重樹、 斎藤茂、 原田正志：風洞実験による高層ビル周辺の風の測定、宇宙航空研究開発機構研究開発資、 TM685 、1995

奥野善則、小林啓二、冨尾武、又吉直樹:　ヘリコプタに適した計器飛行方式(IFR)運航の研究、日本航空宇宙学会、2008

奥野善則、 又吉直樹、 石井寛一、 小林啓二：実験用ヘリコプタ MuPAL-ε 活用実績概要、宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA RM-15-001 、 2015

片岡浩人、田村哲郎：LES による実在市街地上空風の鉛直分布と地表面粗度との関係に関する研究、日本建築学会構造系論文集、2012

加藤知彦、柴山創太郎、馬場靖憲：コンソーシアム型研究開発プロジェクトの政策評価 NEDO 追跡調査の事例分析、Japan Society for Research Policy and Innovation Management、Vol.29、No.4、2014

加藤正浩、岩井智昭、小山和紀、鈴木雅美：MEMS ミラー型 LiDAR を用いた自己位置推定技術の開発、自動車技術会論文集、Vol.51、No.1、2020
金田直樹：航空管制の概要　航空管制入門の入門、独立行政法人　電子航法研究所　管制システム部、2002
https://www.enri.go.jp/~kanada/lib/2002/kanseiohp.pdf?fbclid=IwAR1aU5I6HjTlVyYOTmkDVSUE2pHM8yJXLNZkQC9ScqdOqYNOOSt1faHcauw、閲覧日 2021 年 1 月 10 日
木村英紀：システム科学技術とイノベーション、横幹、Vol.5、No.1、2011
気象庁：過去の気象データ検索、
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=51&block_no=1555&year=&month=&day=16&view=、閲覧日 2020 年 9 月 13 日
気象庁：航空気象情報、
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/koku/kikohyo/kikohyomain.html?fbclid=IwAR3AchCZER9ninysRjR4d-cX8iqBz4nPImHvHbVqvCc3mtHwgJHtieh23nY、閲覧日 2020 年 9 月 13
小条昌範、内山賢治：固定翼 UAV における遷移飛行の制御系設計、2012
経済産業省：政策特集/空の移動革命がもたらす未来、2019、https://meti-journal.jp/p/5367-2/、閲覧日 2021 年 1 月 10 日
経済産業省：空の移動革命に向けた官民協議会について、2018、
https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181220007/20181220007_01.pdf 、
閲覧日 2020 年 9 月 13 日
黒岩恵：トヨタ生産方式（TPS）の本質と IT を活用したグローバルでのモノづくり、企業研究会講演資料、2012、https://www.esd21.jp/news/4 月 19 日講演資料（企業研究会）.pdf
閲覧日 2021 年 1 月 3 日
小泉俊雄、川崎英明、澤野靖幸：任意地点の地表の風向・風速の推定 平地を対象とした空間内挿法、日本火災学会論文集、Vol.59、No.1、2009
国土交通省：国内空港整備について、資料２－２、
https://www.mlit.go.jp/singikai/koutusin/koku/seibi/5/images/shiryou2_2.pdf、
閲覧日 2020 年 9 月 14 日
国土交通省：自動運転のレベル分けについて
https://www.mlit.go.jp/common/001226541.pdf
閲覧日 2021 年 1 月 16 日
小寺裕之、 佐藤悦信、 金森祥一：地表面粗度長を用いた瞬間風速に関する量的予報プロダクトの開発、ournal of Meteorological Research Vol.61、 Nos.1-3、2008
後藤暁、大塚清敏：小型ドップラーライダー観測に基づく東京上空の風の鉛直分布特性、第 22 回 風工学シンポジウム、2012
小林信行、大場正昭、村上周三：実測に基づく市街地の風環境の評価、東京工芸大学紀要、Vol.8、No.1、1985
近藤純正：地表面に近い大気の科学 理解と応用、東京大学出版会、2010

佐々木亮治、大竹和夫、後藤暁、松井正宏、松山哲雄、宮下康一：風の観測結果に基づく乱れの強さと乱れのスケールの鉛直分布、日本建築学会技術報告集、Vol.21、No.48、2015
佐藤昌之、村岡浩治：Quad Tilt Wing 無人航空機の飛行制御、日本航空宇宙学会論文集、2013
十二村佳樹、渡辺浩文：海風の夏季都市気温緩和効果に関する研究 気温の長期多点同時測定と観測風データに基づく分析、日本建築学会環境系論文集、Vol.73、No.623、2008
JAXA：2025 年大阪ユースケースでの運行管理（公開待ち文書）、2020
JAXA：航空機電動化（ECLAIR）コンソーシアム、https://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/ 閲覧日 2021 年 2 月 7 日
神忠久、山田常圭：煙の中でのものの見え方(その 3) -煙の刺激性の影響-、照明学会誌、Vol.70、No.1、1986
新エネルギー・産業技術総合開発機構：世界初、相対速度 100km/h での無人航空機の衝突回避試験を実施–搭載した各種センサーで有人ヘリコプターを探知し自律的に衝突を回避–、2019、https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101167.html、閲覧日 2020 年 12 月 28 日
空飛ぶクルマ研究ラボ： 空飛ぶクルマのしくみ、 日刊工業新聞社、2019
空の移動革命に向けた官民協議会：長崎県の特定複合観光施設(IR)における空飛ぶクルマの活用案、2020 https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/air_mobility/pdf/005_01_08_02.pdf、 閲覧日 2020 年 11 月 28 日
高倉秀一、赤林伸一、須山喜美：音波を利用した市街地上空の風の実測、日本風工学会誌、Vol.64、1994
竹中翔、葛西真寿、南條宏肇：風況精査における「べき法則」型風速予測式の有効性、風力エネルギー、Vol.30、No.1、2006
竹見哲也、石川裕彦： 2018 年台風 21 号による暴風の解析、京都大学防災研究所年報、2019
高橋団吉：新幹線をつくった男 島秀雄物語、小学館、2004
中野冠：いま世界ではトヨタ生産方式がどのように進化しているのか！、日刊工業新聞社、2017
中野冠：空飛ぶクルマのビジネスモデルについて、ÉCLAIR オープンフォーラム、 2019
日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015)、丸善出版株式会社、2015
又吉直樹、奥野善則：ヘリコプタによる GPS/MSAS 測位精度評価、日本航空宇宙学会、2007
又吉直樹、田村哲郎：ドップラーライダ、ヘリコプタを用いた都市境界層の風観測、第 23 回 風工学シンポジウム、2014
光田寧、藤谷徳之助、加藤晶子：評価時間と評価距離を考慮した突風率の表現について、京都大学防災研究所年報、Vol.17、1974
三重県雇用経済部：「空飛ぶクルマ」の社会実装に向けた三重県の取組、2020、https://www.pref.mie.lg.jp/common/content/000901775.pdf、 閲覧日 2020 年 11 月 28 日
宮下康一、赤星明紀、佐々木亮治、中村修、植松康：地表面粗度の状況が異なる地点における地表面近傍の風の性状、日本風工学会論文集、Vol.38、No.1、2013

村山哲也：クローズアップ！航空管制官 航空安全の守護神、その実像に迫る！、イカロス出版、2018

山本行雄：【連載：世界一の品質を取り戻す 49】検証・日本の品質力：今こそ求められるホワイトカラー・イノベーション–トヨタの全社的品質管理「自工程完結」活動から–、株式会社新技術開発センターホームページ、テクノビジョンダイジェスト、http://www.techno-con.co.jp/info/back9_1212a.html、閲覧日 2021 年 2 月 7 日

山本由美、山本秀男：創薬プログラムのプラットフォームマネジメントの構想、Journal of the International Association of P2M、Vol.10、No.2、2016

林 振渝、橋本雅文、滝川健太、高橋和彦：レーザスキャナによる機械学習に基づくビークルと人物の認識、日本機械学会論文集、Vol.84、No.868、2018

和中真之介、稗方和夫、満行泰河：R&D プロジェクト初期段階における意思決定プラットフォームの開発　海事産業におけるケーススタディ、人工知能学会研究会資料、2018

付　録

付録 1.機体メーカーへのヒアリング

LiDAR センサによる物体検知において、数値仕様を考察するために、付録図 1 のダイヤグラムを作成し、それぞれの検知ついて何 m 手前から物体を検知する必要があるのか、機体メーカーへメールによるヒアリングを行った。

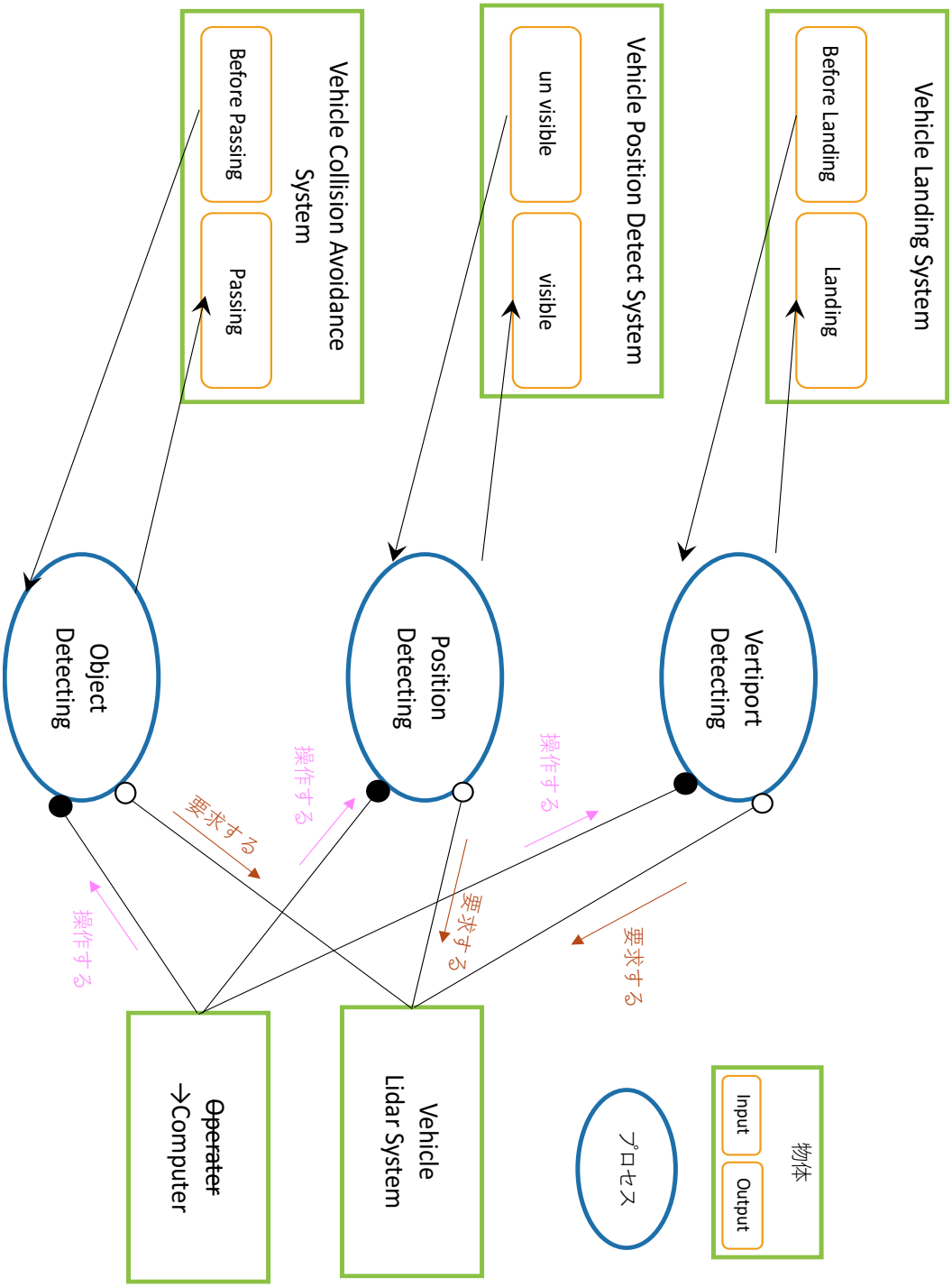
機体システムメーカー（5a）　ヒアリングの結果

機体設計の観点からは、センサのフィードバック機構は、単一のセンサで決まるものではなく複雑なものであり、LiDAR センサに関してのみ記述をしても、何の参考にもならないことが明らかになった。また、別のメーカーに問い合わせたところ、開発技術戦略に関わる件となるため応えられないと回答があった。

本研究で提案するリファレンスモデルを、機体開発メーカーにとって意味のあるものとするためには、LiDAR センサをはじめとして、その他のセンサについて情報を整理したのち、どのようなシステムであるべきかを議論し、リファレンスモデルへと反映させる必要があることが明らかとなった。また、どこまでをオープンにしてリファレンスモデルとして反映されるかについて、技術標準化も鑑みた活動が必要があることが明らかになった。

LiDAR を、センサとしての性能とその用途に応じた使い方で整理しようとしている点は理解できるのですが、各用途は他のセンサとの複合利用/センサ信号とのフュージョンが前提と思われるため、このような整理ではきれいにまとめられない気がします。

例えば機体間の「衝突回避」を想定した場合でも、ある距離までは相手を「質点」として考えれば良いが、ある距離からは「剛体として」考慮する必要があり、それに応じて自機側も機体ダイナミクスを陽に考えなければ行けなくなるはずです。これら一連の連続動作を、LiDAR 単体とだけ関連づけるようなやり方は、むしろ問題を難しくするのではないでしょうか。



付録図 1 OPM で表現した LiDAR センサによる検知システム

付録 2.リファレンスモデルに対する OPL のまとめ

本章では、本研究で記述したリファレンスモデルにおける OPL をまとめる。

図 3-5 OPM で表現した VFR に対する OPL

位置 can be 出発地 or 目的地

Operating changes 位置 from 出発地 to 目的地

パイロット handles Operating

Operating affects 地上設備、管制 and 機体

図 3-6 OPM で表現した IFR に対する OPL

位置 can be 出発地 or 目的地

Operating changes 位置 from 出発地 to 目的地

パイロット handles Operating

Operating affects 地上設備、管制 and 機体

IFR 機材 consists of ジャイロ式姿勢指示器、方向指示器、旋回計、すべり計、精密高度計 and 昇降計

機体 consists of IFR 機材

機体 affects operating

管制 handles instructing

Instracting affects パイロット

図 3-7 OPM で表現した新しい飛行方式に対する OPL

位置 can be 出発地 or 目的地

Operating changes 位置 from 出発地 to 目的地

パイロット handles Operating

機体 and パイロット handles Operating

図 4-2 のリファレンスモデルに対する OPL

センサ consists of センサ and Module

衛星 is environmental

座標検知システム consists of 信号受信機 and 衛星

センサ handles Vertiport 検知

Vertiport 検知 requires CPU

Vertiport 検知 affects Pilot

センサ handles 自動停止動作

自動停止動作 requires CPU

優先判断 requires CPU

優先判断 affects 操縦補助機 and パイロット

操縦補助機 handles 自動停止動作

パイロット handles 飛行高度調整

パイロット handles 機体操縦

座標検知システム handles 座標検知

座標検知 affects パイロット