

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和 6 年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 令和 6 年 2 月 21 日付 第 18-6 号

研究開発項目 : ③港湾, 海岸及び空港における大規模災害対策に関するもの

大規模火山災害に対応した港湾, 空港
の BCP に関する研究

令和 7 年 4 月 30 日

神戸大学大学院海事科学研究科

竹 林 幹 雄

目 次

1. はじめに	1
1.1 輸送インフラマネジメントにおける火山災害の位置づけ	1
1.2 研究の位置づけ	2
2. 大規模噴火時における空路変更に関する分析	5
2.1 研究背景と本研究の位置づけ	5
2.2 2020 年フィリピン・タール山噴火について	5
2.3 アジア便 (intra-Asia) ならびに長距離便 (long-haul flight) への影響	10
2.4 分析結果	10
2.5 まとめ：フライトルート変更の意思決定	13
3. シミュレーション分析に基づく空港における大規模噴火を対象とした危機対応	15
3.1 概要	15
3.2 空港向けの火山灰リスク警報システム	15
3.3 火山灰危機対応システムの設計	18
3.4 桜島噴火に対するシステムの適用	22
3.5 桜島における大規模噴火が空港でのオペレーションに与える影響分析	27
3.6 桜大規模噴火と空港 BCP	32
3.7 おわりに	34
4. 今年度のまとめ	36

1. はじめに

1.1 輸送インフラマネジメントにおける火山災害の位置づけ

火山噴火は常に航空輸送にとって重大な脅威となってきた。その主な原因は、火山灰 (VA) がジェットエンジンに及ぼす有害な影響である。初期の顕著な事例として、1989 年のレダウト山の噴火が挙げられる。1989 年 12 月 15 日、アラスカ州のレダウト山が噴火し、KLM が運航するボーイング 747 が火山灰雲の中を飛行し、4 基のエンジンすべてが一時的に停止する事態となった (Casadevall, 1994)。幸い、この事故は致命的な結果には至らなかったが、火山噴火時の航空機の安全性向上を目的とした大規模な研究が促されるきっかけとなった。

国際民間航空機関 (ICAO) は、安全な飛行運用のためのガイドラインを積極的に策定してきた。しかし、2010 年にアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山が噴火したことは、航空安全対策のあり方において重要な転換点となった。この噴火により、ヨーロッパの空域は完全に閉鎖され、10 万便以上のフライトが運航停止に追い込まれた (IATA, 2010)。その後、ICAO は安全な飛行運用に関する改訂ガイドラインを発表した (ICAO, 2017) が、具体的な手順までは示さず、あくまで一般的な推奨事項にとどまった。

航空輸送だけではなく、火山噴火は海上輸送にも大きな影響を与えうることは、近年の事例から明らかとなった。2021 年 8 月に発生した福徳岡の場の海底火山噴火により、おびただしい量の軽石が噴出し、それらは同年 10 月には遙か西にある沖縄、奄美群島に大量に漂着した。この漂着があまりに大規模であった沖縄本島北部、ならびに与論島などの奄美地域では港内への軽石流入により、運航停止も発生するなど海上輸送に著しく影響が発生したことは記憶に新しい。このように航空輸送ならびに海上輸送においては、火山災害はひとたび大規模に発生すれば、その影響は広範囲に及ぶ一方で、それを対象とした輸送インフラの事業継続計画 (Business Continuity Plan/BCP) については、例えば空港については国から示された A2-BCP に基づき各所で設定はされているものの、より実効性の高い計画の策定が望まれている。

このように、火山災害に関する基本的な分析が、特に輸送インフラについては十分とはいえない。最も注目されている富士山噴火の影響でさえ、ここ数年でようやく深刻な問題であることが認識されたと言ってもよい。前述のように、より実効性の高い BCP を策定する上で、その方法論の開発が急務であると言える。

本研究課題は、申請者が先行的に実施した科学研究費助成金（挑戦的研究・萌芽「大規模火山噴火による航空輸送への影響把握のための予測システムの開発」課題番号 21K18749）による成果をさらに拡張し、実際への適用を想定した 2 カ年の研究である。本年度は研究初年度であることから、基礎分析に当たる避難航路に関する分析をより詳細に行うこと、既開発の空港における危機管理システムを改善・援用して桜島における噴火の影響をシミュレーションし、政策課題の抽出を行う、という 2 点について報告を行う。

1.2 研究の位置づけ

火山噴火、特に火山灰は、商業航空サービスの開始以来、航空輸送業界にとって重大な脅威となってきた。火山灰は長い間、航空輸送に対する潜在的な危険要因として認識されてきたが、その深刻な危険性が強く認識される契機となったのが、1982 年のジャワ島・ガルングン山の事故（Gourgaud et al., 2000）および 1989 年のアラスカ・レダウト山の事故（Casadevall, 1994; Przedpelski and Casadevall, 1991）である。特にレダウト山の事例は、「全 4 基のエンジン停止」事故として知られており、幸いにも致命的な事故には至らなかった。

レダウト山の事故以降も、火山噴火に起因する航空事故はいくつか発生したものの、2010 年のアイスランド・エイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火によって、火山灰が航空輸送に及ぼす脅威の深刻さが世界的に広く認識されることとなった。

エイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火は、さまざまな視点から広範に研究されてきた（IATA, 2010; Gislason et al., 2011; Petersen et al., 2012; Gudmundsson et al., 2012）。Figueiredo (2017) は、ヨーロッパの航空交通に関する詳細なデータを基に、その影響を分析し、8 日間で 10 万便以上のフライトが欠航し、約 1,000 万人の乗客に影響を及ぼしたことを明らかにした。この事象は、火山噴火による史上最大規模の空域閉鎖を引き起こし、ICAO が複数の地域における火山灰による事故防止のためのガイドラインを改訂する契機となった（ICAO, 2021; ICAO, 2012a; ICAO, 2012b）。

Reichardt et al. (2018) は、大規模噴火に伴うリスクを軽減するうえで、リスク・コミュニケーションの重要性を強調し、関係者間の知識共有やコミュニケーションツールの開発が必要であると指摘している。また、Reichardt et al. (2019) は、航空輸送業界のレジリエンス（回復力）を強化するために、長期的な緊急対策計画を実施することの重要性を強調した。彼らの研究は、火山噴火に関連する航空業界のリスク・コミュニケーションに着目した先駆的な研究として評価されている。

このような知識の共有は重要であるものの、致命的な事故などの潜在的な危険を防ぐためには、実際の運用への応用が不可欠である。さらに、ICAO のガイドラインは、各関係者の責任について概略を示すものとなっている。

火山灰のリスクはヨーロッパに限られるものではなく、特に多くの活火山を抱える環太平洋地域にも影響を及ぼしている。例えば、2020 年にフィリピンのタール火山が噴火した際には、火山に近接するマニラ空港の運用が一時的に停止された (Solodova et al., 2022)。同様に、2022 年にトンガのフンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山が噴火した際には、島の空港を含む広範囲にわたる被害が発生した (World Bank, 2022)。

日本では、桜島が国内で最も頻繁に噴火する火山として知られている。桜島の火山灰リスクに関する研究は多数行われており、火山灰の移動予測手法も開発されている (Iguchi et al., 2020; Iguchi et al., 2022; Tanaka et al., 2022)。さらに、アジア太平洋地域の航空輸送にとって重要な航路である A-1 をはじめ、複数の主要航空路が桜島の近くを通過している。そのため、桜島の大規模噴火は航空輸送の運用に深刻な影響を及ぼす可能性がある (Takebayashi et al., 2021)。

これらの研究成果に基づくと、桜島の噴火活動を監視することは、航空輸送に対する火山灰の潜在的なリスクを評価するうえで有効な手段であると考えられる。

他方、航空輸送ならびに空港に関連する課題に関しては、火山噴火時の航空機避難のための容量設計に焦点を当てた研究がいくつか行われている。Arreeras and Arimura (2022) は、東京首都圏近郊の箱根山が大規模噴火を起こした場合の避難フライトのための代替空港の選定について議論した。Takebayashi et al. (2021) は、九州南部の桜島が大規模噴火を起こした際に、避難フライトを受け入れる際の収容能力の不足について、シミュレーションを用いて検証した。

これらの研究はいずれも、大規模噴火が航空セクターに及ぼす影響が従来の想定を超える可能性を強調している。これらの研究は、安全な飛行を確保するための貴重な提案を提供しているものの、主に飛行中の航空機に焦点を当てており、空港に駐機中の航空機の避難については扱っていない。

火山噴火が発生すると、火山灰の影響を受ける空港は大きな混乱を経験する可能性がある。Leonard et al. (2005) は、2002 年にエクアドルのエル・レベントドル火山が噴火した際に発生した経済的損害を明らかにした。この噴火では、火山灰にさらされたジェット機の清掃に 1 機あたり 10~15 分を要し、キトのマリスカル・スクレ国際空港の滑走路および

誘導路の清掃には 500 人の作業員が 7 日間必要とされた。この事例は、航空サービスを維持するためには、空港施設の清掃だけでなく、駐機中の航空機の避難も重要であることを示している。

この問題に対処する鍵となるのがリスク・コミュニケーションの概念である。空港における火山灰のリスクに関する知識を共有することで、適切なリスク・コミュニケーションシステムを構築し、航空機避難のための空港の収容能力を向上させることが可能となる。

さらに、航空機の避難行動の構造分析が必要なことは Solodova et al. (2022) でも言及されているものの、十分な構造分析がなされているとは言い難い状況である。

本研究では、研究の初段階として、航空機の避難行動の構造化に関してより詳細に分析するとともに、空港向けの火山灰リスク警報システムを提案し、桜島の大規模噴火時に避難航空機を受け入れるために必要な空港収容能力あるいはその課題について、シミュレーションを通じて検討する。本研究は、大規模な火山灰事象の際に安全な航空運航を確保するための新たなアプローチを提示するだけでなく、緊急時の空港容量設計に関する貴重な知見を提供するものである。Takebayashi et al. (2021) とは異なり、本研究の新規性は、緊急避難時の混雑問題を考慮し、時間的要素を分析に組み込んでいる点にある。

2. 大規模噴火時における空路変更に関する分析

2.1 研究背景と本研究の位置づけ

航空輸送における火山灰による運航への影響を軽減するには、フライトの効率を維持しながら飛行ルートを最適化することが求められる。これについては多くの研究が行われており、特に典型的な着陸および離陸パターンを識別するための軌道分類手法(trajjectory clustering technology)が用いられてきた (Bosson and Nikoleris, 2018; Corrado et al., 2020; Olive and Basora, 2019, 2020; Olive et al., 2020)。これらの研究では、軌道クラスタリング技術を含むさまざまな方法論が導入されており、標準運用のためのルート設計を向上させるとともに、緊急時のリスク軽減に関する重要な知見を提供している。

先述のとおり、2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火のように、大規模な火山噴火は広範囲にわたる空輸に影響を及ぼす可能性がある。火山灰に関連するリスクを最小限に抑えるには、火山灰の拡散に関する正確かつ迅速な情報が不可欠であり、航空会社は運航判断を行う際にこのデータに大きく依存している (Reichardt et al., 2019)。しかし、これまでの研究では、火山灰の拡散データと航空会社の意思決定との関連性について十分に検討されてこなかった。

本研究は、火山灰情報センター (VAAC) が提供する火山灰拡散情報が航空機の運航判断や飛行経路の変更に与える影響を評価することを目的とする。特に、火山噴火時の飛行軌道の変更に焦点を当て、VAACの情報伝達と航空会社の行動との関係を主に分析する。本研究の結果は、大規模な火山噴火後の火山灰拡散に関するVAACの発出情報が、航空会社やその他の関係者の意思決定プロセスにどのような影響を与えるかについての知見を提供する。なお、本章では特にアジアにおける事例に焦点を絞ることとする。

2.2 2020年フィリピン・タール山噴火について

2020年1月12日、マニラ・ニノイ・アキノ国際空港 (MNL) から約70kmの位置にあるタール火山が噴火し、周辺地域の航空便が運航停止となった。図-1は、ひまわり8号衛星のデータに基づく画像であり、フィリピン上空の空域を覆い、急速に北東へ移動する火山灰雲の様子を示している (NICT, 2021)。

噴火は協定世界時 (UTC) の 07:01 に始まり、北へ移動しながら火山灰雲が拡大した。

08:30 (UTC) までに、火山灰雲はルソン島の中心部に到達した。その後も移動を続け、最終的には北緯 24.11°、東経 126.35°の地点に到達した (VAAC, 2020)。東京 VAAC は 3 時間ごとに警報を発出しており、タール火山の噴火に関する警報の時系列を表-1 に示す。

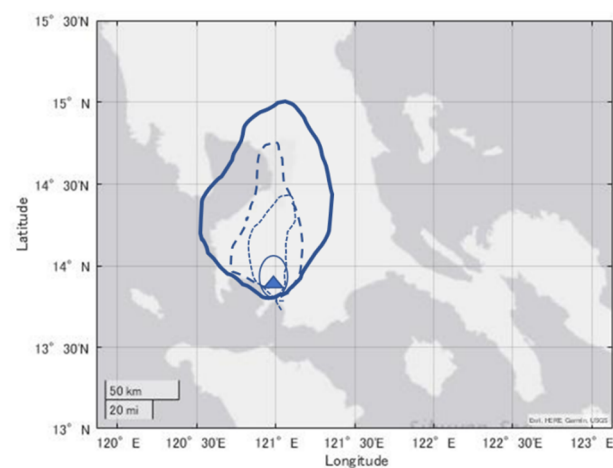
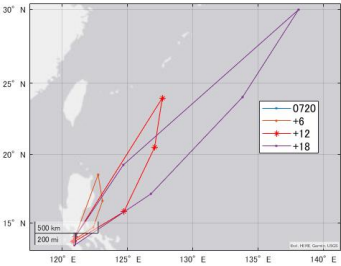
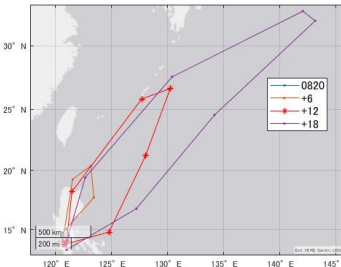


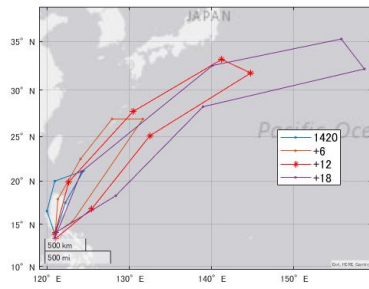
図-1 タール山噴火による噴火雲の状況（2020 年 1 月 12 日）

表-1 VAAC によるタール山噴火の情報発出状況

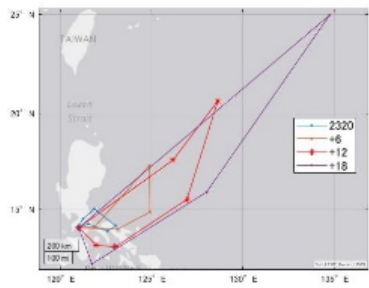
Date/time (UTC)	Information (summary)
20200112/0719	First alert for Mt. Taal's eruption No detailed information.
20200112/0754	 FL550
20200112/0900	

	FL550
20200112/1200	
	FL550-560
20200112/1500	
	FL550-560
20200112/1800	
	FL550-560
20200112/2100	
	FL550-560

20200113/0000

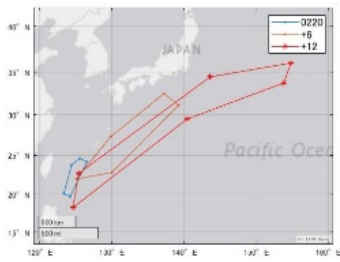


FL560

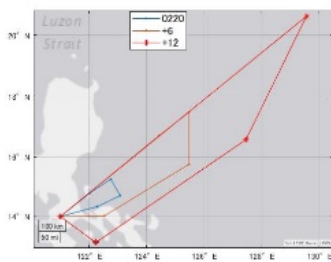


FL360

20200113/0300



FL550-560



FL360

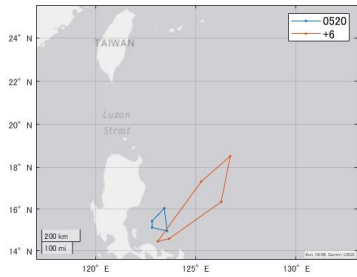
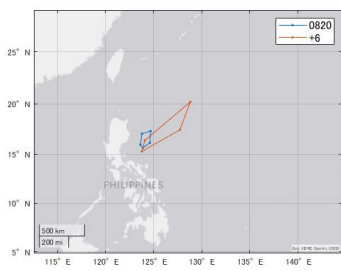
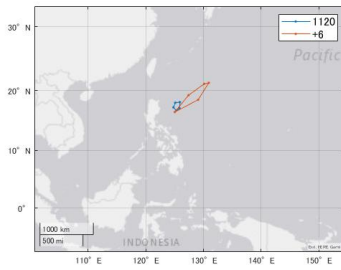
20200113/0558	 FL360 (no cloud identified at FL 550)
20200113/0900	 FL360 (eruption observed)
20200113/1200	 FL360 (Eruption observed)
20200113/1450	VA dissipated on satellite imagery

表-1 によると、特定の時点で気象雲の影響により火山灰雲を確認できない場合があることがわかる。2020 年 1 月 13 日 05:58 (UTC) の更新時点では、FL550¹において火山灰雲は検出されなくなっていた。その直後、新たな 2 回の噴火に関する警報が発出され、FL360 で火山灰雲が観測され、航空便に影響を及ぼす可能性があった。最終的に、2020 年 1 月 13 日 14:50 (UTC) の時点で、VAAC は衛星画像上で火山灰雲が消滅したと報告し、それ以上の航空便への影響はないことを示した。これに応じて、航空会社は VAAC の情報に基づき

¹ 航空輸送においては飛行高度 (altitude/flight level) を表す場合 100 フィート単位での表示を行う場合がある。例えば FL500 は 50,000 フィート (15,000 メートル) の高さにあることを意味する。

飛行計画を調整したと考えられる。

火山灰雲の移動を考慮すると、火山灰を含む空域の近くを運航する航空機は、飛行ルートを変更するか、運航を中止する必要がある。そのため、大規模な噴火時に航空機の安全を確保する方法を検討するには、フライトルートの特性を理解することが不可欠である。次項ではアジア便ならびに長距離路線への影響に焦点を当てて分析することとする。

2.3 アジア便 (intra-Asia) ならびに長距離便 (long-haul flight) への影響

ここでは intra-Asia 便と長距離便への影響に絞って検討を加える。表-2 は分析対象としたデータの内訳である。Intra-Asia にはキャンセル便も多く含まれるマニラならびにフィリピン発着のもの 80 便も含まれていることに注意が必要である。Irregular Flights は通常とは大きく異なるフライトルートを噴火後に採用したもの、ないしはキャンセルされたフライトの数を合計したものである。一見して高いフライト変更（キャンセルを含む）が確認できる。

以降の分析ではマニラ、ならびにフィリピン発着のフライト以外のフライト（すなわち、当該エリアを通過するフライト）について分析する。

表-2 データの概要

Flight Type	Selected Flight	Cancel/no Flight/Change Route	Ratio of Irregular Flights (%)
Intra-Asia	126	106	84
Long-haul flights (except MNLflights)	24	11	46

2.4 分析結果

分析の結果、対象としたフライトは大きく 3 つのパターンに分けられることがわかった。これらをタイプ 1～3 として、以降議論することとする。

タイプ 1 の動きは、VAAC の発する情報に従い、飛行経路の変更を行うパターンのものである。図-2 (左) は、ソウルからインドネシアのデンパサールへ運航された GA871 便（ガルーダ・インドネシア航空）の軌跡を示している。このフライトは典型的な経路変更パターンを示していると考えられる。当該フライトは、西側のルートを選択し、通常の飛行経路上

に火山灰があることを示す東京 VAAC の情報に基づいて火山灰を回避したと考えられる。この主の変更は、データでは多く見られた。図-2 は GA871 便が 1 月 13 日 03:00~03:30 UTC の間に予定されていた出発に際し、その時点で最新の情報であった 1 月 13 日 00:00 UTC に発行された VAAC 情報を参照し、通常の飛行ルートを継続するリスクを評価したと考えられることを示している。一方で、1 月 12 日のフライトでは火山灰のリスクがなく、そのため標準の飛行計画に従って飛行したと考えられる。

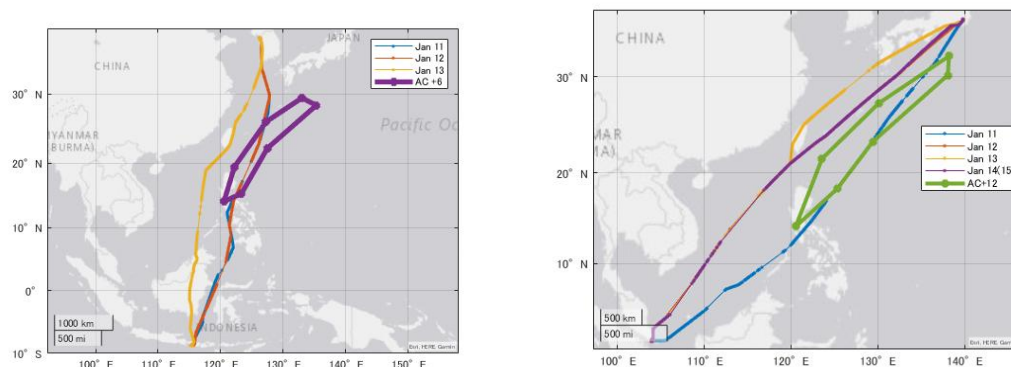


図-2 GA871 (左図) と JL35 (右図) のフライトルート

注：紫太線（左），緑太線（右）は噴火雲の位置（8 時間後（左），12 時間後（右）予測）を示す。

タイプ 2 は、東京からシンガポールへ運航される JL35 便（図-2 右）において観察された。JL35 便の予定出発時刻は 15:15~15:30 UTC であった。このフライトは、1 月 11 日と 12 日で異なる軌跡をたどった。1 月 13 日には、JL35 便はよりリスク回避的なルートを選択し、通常の経路から大きく迂回している。1 月 14 日には、JL35 便は 1 月 12 日に採用したルートに戻ったことが確認できる。

他方、タイプ 2 の事例として、マレーシアのクアラルンプールと東京を結ぶ MH88 便（マレーシア航空：図-3 左）でも観察された。MH88 便の予定出発時刻は 15:30~15:45 UTC であった。1 月 13 日には、MH88 便は通常の飛行ルートから大きく迂回し、推定される火山灰雲の端を避ける経路を選択している。しかし、翌日から MH88 便は通常の飛行ルートに戻ったことがわかる。

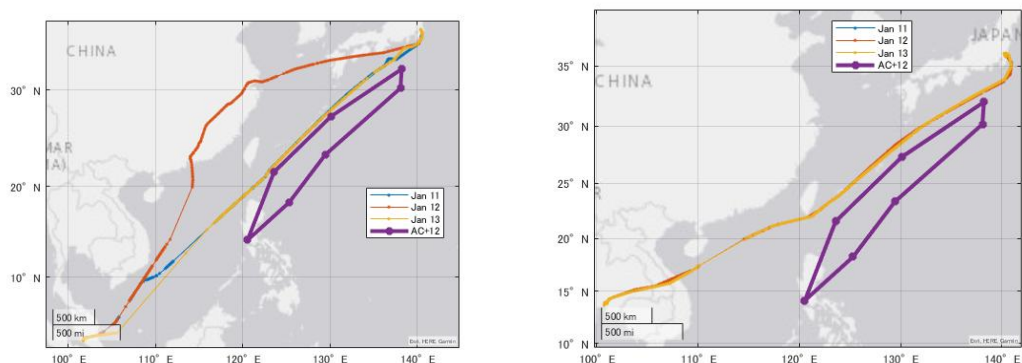


図-3 MH 88 (左図) と TG677 (右図) のフライトルート

注：紫太線は噴火雲の位置（12 時間後予測）を示す。

タイプ 3 の動きは、図-3 (右) に示されているように、経路を変更せず通常のルートを持続したフライトを指す。東京からバンコクへ運航される TG677 便(タイ国際航空)は、09:00 UTC に出発し、1 月 11 日から 13 日まで軌道を変更せずに飛行した。図 3 (右) と図 2 (右) を比較すると、東京から台湾南部へ向かう TG677 便のルートは、1 月 14 日および 15 日の JL35 便のルートと酷似していることがわかる。

一方、長距離路線の飛行パターンは、一般的にタイプ 1 のアジア域内移動に近いことがわかる。図-4 は、長距離フライトの軌跡において観察された典型的な回避パターンを示している。

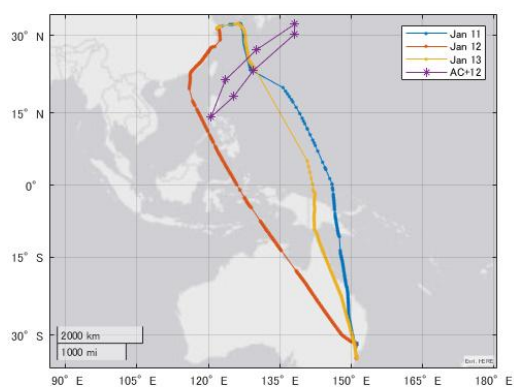


図-4 QF130 のフライトルート

注：紫太線は噴火雲の位置（12 時間後予測）を示す。

QF130 便（カンタス航空）は、中国・上海からオーストラリア・シドニーへ運航され、予定出発時刻は 12:00~12:30 UTC であった。1 月 11 日と 13 日には、通常の飛行ルートとは大きく異なる回避ルートを選択したことがわかる。1 月 12 日、QF130 便は東京 VAAC の 09:00 UTC のアラートを受け、それに応じて前日と比較して大幅に変更されたルートで飛行したと考えられる。

1 月 13 日、05:58 UTC の最新情報では、気象雲の影響で火山灰雲が特定できないか、または FL550（高度 55,000 フィート）で消散したと報告されていた。しかし、09:00 UTC の勧告では、FL360（高度 36,000 フィート）に火山灰の存在が確認されたものの、QF130 便は 1 月 11 日の軌跡に近いルートへ戻っている。QF130 便が長距離便であることを考慮すると、1 月 12 日はリスク回避的なアプローチを取り、通常のルートから大きく離れた経路を選択した可能性が高い。一方で、1 月 13 日には、09:00 UTC の勧告（FL360 の火山灰情報）を運航上の重大な懸念とは判断せず、1 月 11 日と類似したルートを選択したと考えられる。

アジアと北米を結ぶ太平洋横断路線を含むほとんどの長距離フライトも、同様のルート調整パターンを示していた。

2.5 まとめ：フライトルート変更の意思決定

前節に示した分析結果から、ほとんどの航空便が VAAC の勧告を適切に受信していたことがわかった。しかし、大規模噴火の初期段階（火山噴煙が FL500 などの高高度に達した時）および最終段階（噴煙が消散し始めた時）において、一部の航空便は通常のルートを飛行できなかったことも把握できた。すなわち初期段階では、一部の航空便が予測された火山灰雲の端（予測されたエッジ）に近い代替ルートを指定され、また別の便は元のルートから数百マイル離れた変更後のルートを飛行した。これは別途分析を行ったロシア・ベズニアミヤンの 2022 年 5 月の噴火の事例においても確認されたことがらである。

このことは VAAC の情報の「信頼性」が強く反映されていると考えられる。今回示したタール山のケースでも、intra-Asia 便や長距離便の多くの航空便がリスク回避のルートを採用したことが把握されている。別途分析を行ったベズニアニ山の事例でも、ほとんどの

航空便がリスク回避のルートを選択したことがわかっている。したがって、航空会社は VAAC による火山灰拡散推定を機上での判断において信頼できるものとみなし、VAAC のアラートに基づいて、回避ルートを取るか、運航を中止するか、あるいは元のルートを維持するかを慎重に決定したと考えられる。その結果、図-2 および図-3 に示す飛行計画には、大幅な迂回を含むさまざまな変化が見られたと考えられる。

本分析から得られた知見は以下の通りである。

- 1) 大規模な噴火が発生した場合、航空会社は VAAC のアラートに基づいて慎重に飛行計画を決定していると考えられる。
- 2) 飛行中のケースでは、およそ FL500 における火山灰拡散情報が重要である。現在の VAAC による火山灰拡散に関するアラートは、一般的に飛行計画の立案において信頼性が高いと判断される。

これらから VAAC の火山灰拡散発出情報に基づいて飛行計画が決定されることがわかる。換言すると、VAAC の発出情報の信頼性が高くなれば、その分だけより合理的な飛行計画立案が可能となる可能性がある。図-2 および 3 で示されたような大幅な回避は、燃料の消費も多い。可能な限り安全性を確保できる合理的な飛行計画立案には VAAC の発出情報の改善が非常に重要であると言える。現在、火山灰拡散に関しては 3 次元情報化するという方向性もあり、今後の改善が期待される。

3. シミュレーション分析に基づく空港における大規模噴火を対象とした危機対応

3.1 概要

大規模火山噴火は空路への影響もさることながら、空港への発着の制限や、駐機されている機材の避難など様々な対応が必要となる。現在までに、大規模な火山噴火による全国的な影響はわが国では発生していない。しかし、2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火による欧州における空路封鎖、航空機の大規模な退避行動を見ると、わが国でも今後こういったことがらに対処すべく BCP の高度化が要求されると考えて良い。

本章では、大規模火山噴火が発生した際に、空港側でまず対応すべき駐機機材の避難に焦点を当て、シミュレーションを通じて政策的課題に言及する。

3.2 空港向けの火山灰リスク警報システム

本研究で提案する空港向けの火山灰警報システムは、火山警戒レベル、火山灰予報、風予報に関する情報を空港側に提供することで、意思決定プロセスの強化を目的とする為に設計されている。特に駐機中の航空機の避難を円滑にすることに今回のシステム設計は重点を置いていることが特徴である。

このようなシステムの導入は火山噴火時の空港運営を効果的に管理するためには不可欠であるといえる。日本には 100 を超える活火山が存在し、そのうち 50 の火山が「噴火による災害リスクを軽減するために適切な監視が必要な火山」に分類されている。しかし、現在の航空会社の行動計画は主に局地的な影響に対応するものであり、火山爆発指数 4 (VEI-4) の噴火のような大規模噴火による影響には対応しきれていないのが実情である。VEI-4 規模の噴火が発生した場合、アイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル噴火の事例と同様に、航空交通が深刻な影響を受ける可能性が十分にある。こういった事象に対応するため、本モデルは VEI-4 規模の噴火を想定して設計されている。

なお、本モデルは Liu の早期警報システム (Liu, 2021) に着想を得ており、従来の研究が噴火開始時間を固定して仮定していたのに対し、噴火のタイミングに関する不確実性を考慮している点が特徴である。システムは、大規模噴火発生時の空港分類と推奨される対応策の 2 つの主要な要素で構成される。

3.2.1 空港の分類

火山灰による危険を軽減するための適切な空港の分類は、システムを効果的に設計する上で重要である。分類は、表-1 に示された要素を参照して行った。これらの要素を用いて、空港を表-2 に示された手順に基づき分類した。

表-1 空港分類における評価要素一覧

要素	項目 (単位)
d_i	火山から対象となる空港 i までの距離[km]
s	火山灰拡散速度 [km/h]
a_i	火山灰が空港 i へ最短で到達する時間[h]であり、これは以下の式で表される： $a_i = d_i/s$
n_i	空港 i での駐機数
w_i	空港 i での滑走路数
y_i	航空機の避難を開始から完了まで行うのに必要な時間[h]であり、以下の式で表される： $y_i = n_i/20*w_i$
p_i	パイロットの次のフライトまでの準備時間 [h]
dt_i	空港 i での空港運営終了時刻[h]
r	警戒情報発出の時間間隔 [h]
μ	警報の発令から利用可能になるまでの時間差[h]

表-2 空港分類とその基準

分類 (Group)	内容	数理表現
D	火山灰効果の確率が 3%未満	
A	噴火前の避難が必要	$a_i \leq y_i + p_i$
B	火山灰警戒情報発令前に避難 が必要	$a_i \leq y_i + p_i + dt_i$
C	上記いずれでもなし	$a_i > y_i + p_i + dt_i$

各分類は互いに重複しないように設計されている。例えば、空港*i*がグループBに分類されている場合、火山灰の降灰確率は3%を超えており、 a_i は $y_i + p_i < a_i \leq y_i + p_i + dt_i$ を満足することとなる。

さらにグループBは以下のように細分化される。

B-1: 火山灰警戒情報発令前に避難が必要 ($a_i \leq y_i + p_i + \mu$).

B-2: 2回目の火山灰警戒情報発令前に避難が必要 ($a_i \leq y_i + p_i + \mu + r$).

B-3: 夜間待機の必要はあるが2回目の警戒情報を待つて避難 ($y_i + p_i + \mu + r < a_i \leq y_i + p_i + dt_i$).

空港は、大正噴火 [23] の条件と類似した基準に基づいて分類することとした。

各空港の分類結果は図-1 に示すとおりである。各空港グループの特徴は次のように要約される。

- **グループ A** : これらの空港は九州南部に位置しており、火山地域に近いため、噴火に先立って避難プロトコルを確立する必要がある。
- **グループ B1** : これらの空港は九州北部に位置し、噴火後すぐに運用に関する判断を下す必要がある。
- **グループ B2** : 福岡、広島、関西を含むこれらの空港は西日本に位置し、第二警報の発令前に運用方針を決定しなければならない。
- **グループ B3** : このグループの空港は、噴火後に対応計画を立てるための十分な時間が

あるが、準備は夜間に行う必要がある可能性がある。なお、このグループに分類された空港はなかった。

- **グループ C**：中部や羽田を含む、中央および東日本に位置する空港。避難準備のための夜間運用は不要である。
- **グループ D**：噴火時に「安全」と見なされ、影響を受けることがないと想定される空港。

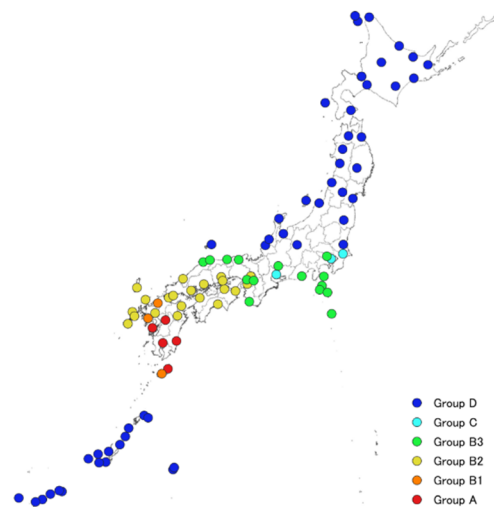


図-1 空港分類結果

3.3 火山灰危機対応システムの設計

ここでは、火山灰に対する危機対応システムの概要を示す。提案するシステムは、噴火情報セクションと風情報セクションの2つの主要な要素で構成されていることが特徴である。

3.3.1 噴火情報

火山警報レベルは5段階で構成されており、「火山活動により警戒が必要な区域」と「住民の行動または防災機関の対応」に関する情報を組み合わせて決定される。この警報レベルは気象庁によって承認され、地方自治体によって実施されることとなる。

桜島は通常、レベル3の火山に分類される。桜島に対してレベル4または5が指定された場合、2つのシナリオが考えられる。1つは、1914年の大正噴火と比較してより大規模な噴火が発生するケース、もう1つは、火山礫の飛散範囲が拡大し、住民に脅威を及ぼすほ

ど著しく活発な噴火が発生するケースである。ここでは、レベル 4 が発令されたと仮定することとした。

火山灰の拡散予測に関しては、気象庁が 2015 年から正式に 3 つの方法で情報を発信している。これには、3 時間ごとに発表される定期更新、噴火直後に発表される速報、より詳細なデータを含む詳細火山灰予報が含まれる。ここでは、対象空港が火山灰汚染地域に含まれるかを評価するために、次節で示す意思決定マトリックスを用い、詳細火山灰予報を使用する。詳細火山灰予報は噴火後に発表され、噴火発生から最大 6 時間先までの火山灰拡散予測を 1 時間ごとに提供する。本分析では、詳細火山灰予報が 3 時間ごとに発表されると仮定し、定期更新と整合性を持たせるように設計した。

3.3.2 風速・風向きなど風関係の情報 (Grid Point Value)

ここでは Grid point Value (以下 GPV) と呼ばれる方法を採用した。GPV とは、気温、風、水蒸気、日射量などの将来予測を提供する、スーパーコンピュータによって生成される全球規模の 3 次元予報であり、格子間隔は約 13 km である。この予報は 6 時間ごとに更新される。本分析では、地上および高度 300 hPa (対流圏上層高度) における予測風の値を用いて、予測風速および風向を特定するものである。

火山灰の拡散に対する風の影響を考慮する際、本研究では空港に火山灰が影響を及ぼす可能性を高める「望ましくない風向」という概念を次のように定義する。

桜島周辺地域を、火山を中心として 8 つの区画に分割し、それらを時計回りに 1~8 と区分するようにした (図-2 参照)。この区分に基づき、風が空港の所在区画またはその隣接区画を通過すると予測される場合を「望ましくない風向」と定義した。「望ましくない風向」を考慮する際の風情報の活用は 2 種類に分類される。すなわち、空港がグループ A または B1 に分類される場合は、地上および 300 hPa の両方の高度における風情報を参照し、それ以外の空港については 300 hPa の高度の風情報のみを参照する。この区別を設けた理由は、火山灰が火口上空に噴煙を形成するためであり、グループ B2 以降の空港のように火口から遠くに位置する空港では、地上における影響が通常は生じないと考えられるためである。

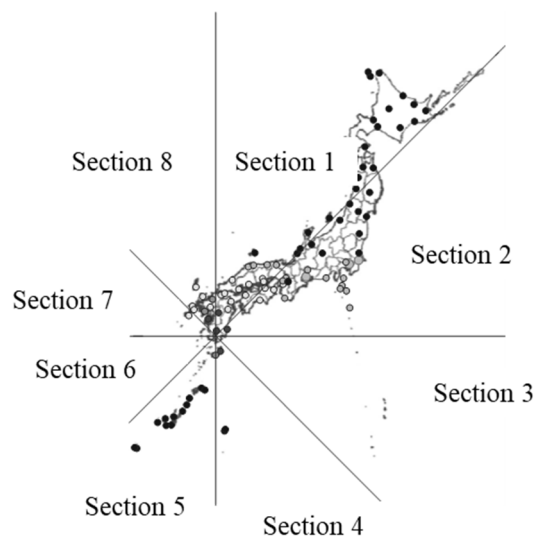


図-2 「望ましくない風向き」による空間分割と空港の位置

3.3.3 火山灰危機対応システムの概要

ここでは、空港当局に対して警報が発令された際に推奨される対応行動の分類に基づいて設計された、VA に対する危機対応体制の概要を示す。

まず Liu（2021）によって提案された分類を、表-3 に示す。

表-3 アラート別危機対応表

Alert type (Image Color)	内容	望まれる対応
Red	避難	離着陸に制限を設け、避難警報を発令する
Orange	到着制限	離陸前の便に対して到着の制限を指示
Yellow	注意	状況を注視し、警報の変化に備える
Green	安全	

この分類に基づき、前小節で述べた各空港グループに対する意思決定マトリクスを提案

する（表-4 に示す）。推奨される対応行動は、視認性を高めるために色分けされている。

表-4 空港グループごとの意思決定マトリクス

Group Status	A	B1				
		VAA	UWD	NP		
Level 4		-				
Level 5		-				
Eruption		-				
1 st issue of VAF						
2 nd issue of VAF						
...						
	B2			B3, C		
	VAA	UWD	NP	VAA	UWD	NP
Lvl.4	-			-		
Lvl.5	-			-		
Erup.	-			-		
1 st						
2 nd						
...						

Note 1: VAF は volcanic ash forecast (詳細な火山灰予測)

Note 2: VAA は可能な VAF を意味する; UWD は望ましくない風向きを意味する; NP は風向きに問題なしを意味する。

ここでは例として B1 グループに対するマトリクスを説明する。ステータスがレベル 4 (Lvl. 4) に達し、噴火の可能性が高いと判断された場合、意思決定の主な要因は風向である。風向が「望ましくない」と判断された場合、取るべき対応は「黄色（注意）」で示される。黄色フェーズでは、夜間対応の準備が必要であり、関係者は必要な手順を実行する必要がある。

ステータスがレベル 5 (Lvl. 5) に上昇した場合、最初の対応は風向によって決定される。「望ましくない」と分類された場合は「オレンジ」対応を実施し、それ以外の場合は「黄色」対応が適切である。この段階では夜間対応の必要性が検討され、関係者は今後の飛行計画や避難場所について協議する必要がある。

噴火が発生した場合、空港当局は地上および 300 hPa の風向の両方を考慮しなければな

らない。いずれかの風向が「望ましくない」と判断された場合、ステータスは「赤」に変更されることになる。この場合、空港当局は到着便の迂回・引き返し・欠航の指示を出すとともに、駐機中の航空機すべてを退避させる必要がある。風向が「望ましくない」と分類されない場合、ステータスは「オレンジ」に変更される。

噴火発生から 30 分後には、最初の火山灰予報（VAF）が発表され、6 時間先までの火山灰の拡散が予測される。予報により、火山灰を含む空気が空港周辺に到達すると判断された場合、ステータスは「赤」に変更されることになる。一方、そうでない場合は風向に応じて「オレンジ」または「黄色」に変更される。VAF は通常 3 時間ごとに更新されるため、それに応じてステータスも更新されるべきと考えられる。

3.4 桜島噴火に対するシステムの適用

ここではシナリオシミュレーションを実施し、火山灰によって日本の空港が直面しうる課題について検討を加えた。具体的には、シミュレーションは、火山灰に汚染された空気が空港に到達する前に、すべての駐機航空機を退避させることが可能かどうかを検討する。シミュレーションは、1779 年の安永大噴火（津久井, 2011）を参照し、シナリオを作成し実施した。

3.4.1 シナリオの設定

まずシミュレーション実施における、仮定および数値条件の設定について示す。ここではシステムの有効性を大規模噴火下で検証する目的で、安永大噴火のような事例を想定し、火山爆発指数（VEI）4 の噴火を仮定した。火山灰の噴煙柱は高度 15,000 m に達すると想定し、地上および 300 hPa の両高度における風向の考慮が火山灰の移動において重要であるところでは考えることとした。

火山灰の移動に関しては、以下の 3 つのシナリオを設定した：(1) 火山灰が限定的な地域にのみ到達する、(2) 火山灰が関西・中部地方に到達する、(3) 火山灰が首都圏に到達する（図-3 参照）。

次に火山灰の移動に影響を及ぼす重要な要素としての風向および風速があるが、それらについては以下のように考えた。影響を受ける空港にとって最も厳しいシナリオを再現するため、風向を適切に調整し、3 つのパターンが生じるように風速を設定した。本研究では、火山灰予報が極めて高精度であると仮定し、図-3 に示すシナリオと一致するようにした。

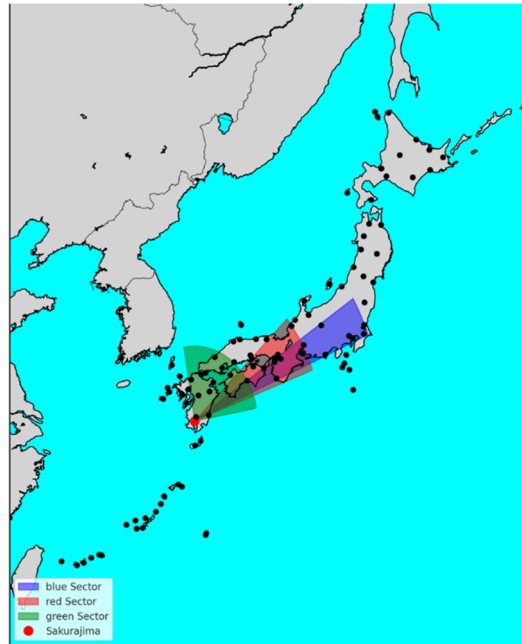


図-3 シナリオ別降灰予測範囲

ケース 1（図-3 でグリーンで表される範囲に降灰）は

- 風速: 80 km/h
- 火山灰拡散半径: 400 km
- 拡散の中心角度: $\pi/2$
- 発生確率²: 85%

と設定した。

ケース 1 は九州全域、中国・四国の一部に降灰するもので、九州の拠点空港である福岡空港に大きな影響が出るケースである。

ケース 2（図中の赤で示される範囲に降灰）は

- 風速: 100 km/h
- 火山灰拡散半径: 800 km
- 拡散の中心角度: $\pi/8$
- 発生確率: 10%

と設定した。

ケース 2 では、九州南部および四国・関西の一部に火山灰が到達し、中国地方は影響を受

² この発生確率は Kurahara（2021）による。

けないことを想定している。この場合、関西（関西空港および大阪空港）および中部（中部空港）の主要空港が降灰の影響を受けることとなる。

ケース 3（図中の青で示された範囲に降灰）は

- 風速: 120 km/h
- 火山灰拡散半径: 1,200 km
- 拡散の中心角度: $\pi/18$
- 発生確率: 1%

と設定した。

ケース 3 では、火山灰が関西および中部の大部分、さらに首都圏南部にまで到達することを想定している。この場合、関西（関西空港および大阪空港）、中部（中部空港）、および首都圏（羽田空港および成田空港）の主要空港が影響を受けることとなる。首都圏の交通量の多さを考えると最も深刻なケースであるといえる。

各シナリオは航空輸送に対して異なる影響を与える。ケース 1 で考えられる影響範囲は九州地域に限定されるが、ケース 3 では全国的に影響が及ぶため、ケース 1 よりもはるかに深刻である。

対象フライトの一般的な設定は以下のとおりである：

- A) 設定は Flightradar24 が提供したデータに基づいている。
- B) 各空港に駐機している航空機の数、2023 年 12 月 12 日 13 時時点のデータに基づいて決定した。
- C) 飛行中の航空機の避難は考慮していない。
- D) 各空港はすべての航空機タイプの避難を受け入れ可能であると仮定している。
- E) 通常の飛行ルートは Flightradar24 のデータに基づいている。
- F) 避難便の受け入れ能力は、公式の駐機能力と利用可能なエプロンの数の合計として定義している。
- G) 駐機機数の動的な変化は考慮していない。

ここで用いている Flightradar24 (<https://www.flightradar24.com>) は、過去のデータを含む商用のフライト情報プラットフォームであり、飛行経路を含むフライト情報の収集に広く用いられている。

設定 B に関しては、複数の時点における体系的な比較は行っていないが、一般的に航空交通が活発である日中の代表的な時刻として 13 時をここでは設定することとした。航空

交通の一般的なパターンおよび運航スケジュールの特性に基づけば、選定時刻によって結果の質的傾向が大きく変化することはないと考えている。

設定 C については実際の状況を考慮すれば非常に厳しい条件である。しかし本研究では、空港における火山灰アラートシステムの実行可能性の評価に焦点を当てており、飛行中の航空機の避難は分析対象から除外している。この厳しい条件は今後の研究において緩和することが望ましいと考えられるが、これに関しては本稿の結論部分で言及している。

設定 F に関しては、誘導路および滑走路は避難便の駐機には使用できないという前提を置いている。なお、格納庫については避難用途には使用しないものと仮定している。これはたとえば HND（羽田空港）において航空会社が整備目的で運用している格納庫などは、使用可能なスペースの数が不明であるためである。

設定 G は、空港が避難便の受け入れ先として選定されなかった場合、その空港の駐機能力は変化しないことを意味している。

3.4.2 対象空港からの駐機機材の避難

空港を避難先として選定することは、空港における効果的な危機対応システムを構築する上で重要な要素である。本研究では、特に桜島に近接する空港の閉鎖が段階的に深刻化していくことを考慮し、“first in, first out”ルールが合理的であると仮定している。ここで、“first in, first out”ルールとは、桜島に最も近い空港から順に航空機の避難を優先するというものである。このルールに基づき、避難先空港の選定は、避難対象となる航空機の総移動距離を最小化する最適化問題として定式化できる。本問題は以下のように表現される。

$$Obj: \min Z(x_{ij}) = \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_i x_{ij} \leq C_j \text{ for } \forall j \in \Omega^A \quad (2)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq V_i \text{ for } \forall i \in \Omega^T \quad (3)$$

$$\text{If } r_{ij} = 1, 0 \leq x_{ij}; \text{ otherwise } 0 = x_{ij}, \text{ for } \forall i \in \Omega^T, j \in \Omega^A \quad (4)$$

$$\text{If } V_a > \sum_{i=1}^{a-1} \sum_j (C_j - x_{ij}), \sum_j x_{aj} = \sum_{i=1}^{a-1} \sum_j (C_j - x_{ij}), \text{ for } \forall a \in \Omega^T \quad (5)$$

式 (1) は目的関数を表しており, x_{ij} は空港 i から空港 j へ移動する航空機の数, d_{ij} は空港 i と空港 j 間の距離を示している. 避難プロセスの逐次的な性質を考慮すると, 空港に駐機している航空機の避難の緊急度は桜島からの距離に依存すると考えられる. そのため, 空港 i および j は, 桜島に最も近い空港から順に割り当てている.

避難先空港 j における容量制約は式 (2) により定義されており, C_j は駐機容量を示し, Ω^A は避難先として利用可能な空港の集合を表している.

式 (3) は, 空港 i において避難が必要な航空機の総数を維持するための制約を示しており, V_i は空港 i から避難すべき航空機の数を表す. また, Ω^T は避難対象空港の集合である.

式 (4) は制御変数に関する非負条件である. これへの追加の条件として, 空港 i と j の間の運航が通常利用されている場合 (r_{ij} により示され, 1 を採る場合に通常利用あり, それ以外はゼロ), 機材の移動を示す x_{ij} は正の値を取る.

式 (5) は, "first in, first out" ルールに基づく航空機の割り当てに関する制約である. すなわちより早い段階での空港からの割り当てによって避難先空港の容量が上限に達した場合, 現在の避難対象空港 a から割り当て可能な航空機の最大数 ($\sum_j x_{aj}$) は制限される.

この設定はアドホックなものではあるものの, 本分析では航空機の避難の緊急度が時系列的な枠組みに依存すると仮定しているため, 航空機の割り当てを体系的に行うためにこのような厳しい条件を与えることとしている.

3.5 桜島における大規模噴火が空港でのオペレーションに与える影響分析

シミュレーション結果を以下に示す．図4～6は各ケースで発生する避難機材の動きである．

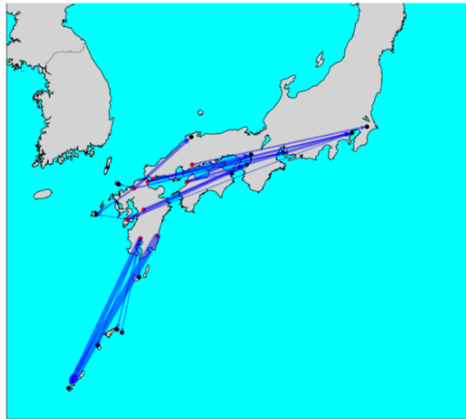


図-4 避難機材の動き (Case 1)

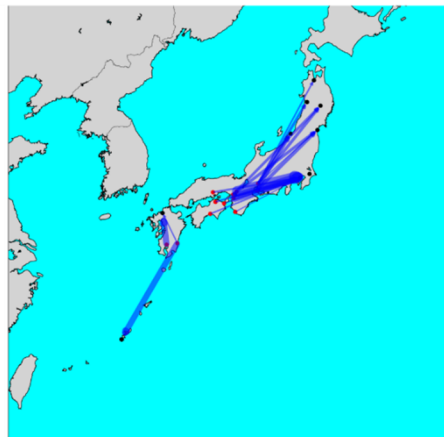


図-5 避難機材の動き (Case 2)

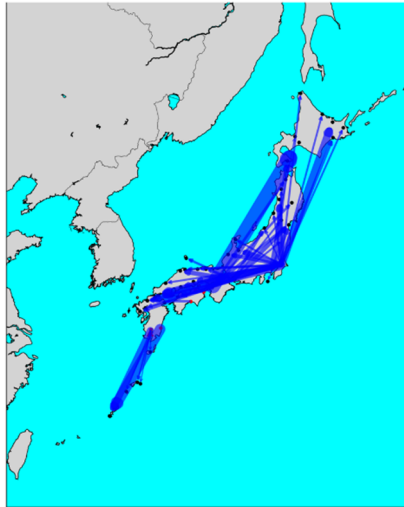


図-6 避難機材の動き (Case 3)

ケース 1 では影響を受けた地域が限定的であった。得られた示唆は以下の通りである. :

- (i) 鹿児島および宮崎に駐機している航空機は、那覇や奄美大島など南方の空港へ移動する.
- (ii) B1 および B2 に分類される空港に駐機している航空機は、主に関西または羽田へ移動し、一部は他の地方空港へ移動する可能性がある.
- (iii) すべての航空機は避難可能である.

詳細な情報は表-5 に示している.

ケース 2 では、火山活動は関西に移動し、福岡は影響を受けなかった。得られた示唆は以下の通りである. :

- (i) 鹿児島および宮崎に駐機している航空機は、主に南方へ移動すべきであり、一部は福岡へ移動する可能性がある.
- (ii) B2 および B3 に分類される空港に駐機している航空機は、主に成田または羽田へ移動し、残りの航空機は仙台など東北地方の他の地方空港へ移動する必要がある.
- (iii) すべての航空機は避難可能である.

詳細な情報は表-6 に示している.

表-5 機材の避難先一覧 (Case 1)

移動元	移動先 (移動数)	残り機 材数
鹿児島 (A)	那覇 (15), 屋久島 (1), 奄美 (3), 喜界 (1), 徳之島 (2)	
宮崎 (A)	那覇 (23)	
天草 (A)	福江 (1)	
熊本 (A)	関西 (11)	
佐賀 (B2)	羽田 (1)	
大分(B2)	壱岐 (1)	
福岡 (B1)	関西 (7), 出雲 (9), 福江 (4), 徳島 (2)	
大分 (B2)	大阪 (8)	
北九州 (B2)	羽田 (6)	
山口 (B2)	羽田 (1)	
松山 (B2)	中部 (4), 大阪 (4)	
岩国(B2)	羽田 (8)	
高知 (B2)	中部 (4)	
広島(B2)	成田 (4)	

表-6 機材の避難先一覧 (Case2)

移動元	移動先 (移動数)	残り機材数
鹿児島 (A)	福岡 (21)	
宮崎 (A)	福岡 (3), 那覇 (20)	
高知 (B2)	羽田 (4)	
高松 (B2)	羽田 (5)	
岡山 (B2)	羽田 (5)	
徳島 (B2)	羽田 (2)	
福岡 (B1)	関西 (7), 出雲 (9), 福江 (4), 徳島 (2)	
南 紀 白 浜 (B3)	成田 (31), 羽田 (16)	
関西 (B2)	羽田 (6)	
神戸 (B3)	仙台(1)	
大阪 (B2)	成田 (38)	
中部 (C)	仙台 (11), 秋田 (12)	
小牧 (B3)	仙台 (2), 新潟 (8), 青森 (5), 花巻 (4), 出雲 (9)	

両ケースにおいて、避難に必要な空港の総容量は対象航空機の数を上回っており、想定された条件下では容量の拡張は特に必要ではないことが示された。しかし、ケース3では異なる状況が発生した。

- (i) 多数の航空機が避難先空港に割り当てられない。

(ii) 特に、羽田および成田に駐機している多くの航空機が、いずれの空港にも割り当てられなかった。

ケース 3 における航空機の割り当て状況を表-7 にまとめている。

割り当てプロセスは”first in, first out”ルールに従っている。このため桜島に近い空港に駐機している航空機は、候補となる避難先空港への定期運航路線が利用可能であり、かつその空港の容量が飽和していない場合に割り当てが可能である。しかし、高松、南紀白浜、小牧といった小規模空港に駐機している一部の航空機については、定期運航の利用可能性が限られていることから、割り当てができないケースが生じていることになる。

表-7 機材の避難先一覧 (Case 3)

移動元	移動先 (移動数)	残り機材数
鹿児島 (A)	那覇 (15), 屋久島 (1), 奄美 (3), 喜界 (1), 徳之島 (2)	
宮崎 (A)	那覇 (23),	
高知 (B2)	福岡 (4)	
高松 (B2)		5
徳島 (B2)	福岡 (2)	
南紀白浜 (B3)		2
関西 (B2)	新千歳 (34), 仙台 (6), 松山 (8), 長崎 (7)	
神戸 (B3)	仙台 (8), 青森 (5), 花巻 (4)	
大阪 (B2)	新潟 (6), 大分 (2), 山形 (3), 福 島 (3), 隠岐 (4), 出雲 (9), 但馬 (3)	
中部 (C)	函館 (9), 福岡 (14)	

小牧 (B3)	仙台 (8), 新潟 (2), 福岡 (4)	14
静岡 (B3)	札幌丘珠 (1)	
松本 (D)		
羽田 (C)	稚内 (3), 釧路 (6), 広島 (8), 北九州 (21), 秋田 (12), 山口 (12), 中標津 (3), 紋別 (3), 女満別 (16), 能代 (3), 庄内 (3), 大島 (1), 富山 (11), 能登 (3), 鳥取 (4), 石見 (3), 岡山 (8), 佐賀 (4), 小松 (7), 美保 (4)	56
成田 (C)		87
茨城 (D)		2

最も深刻な課題が発生しているのは、羽田および成田空港である。特に成田空港は、国際線が主なため、国内線での定期運航先が限られていることに加え、候補となる避難先空港の容量飽和により、十分な避難経路を確保できていないことがわかる。

羽田空港は多数の避難先を確保できるものの、羽田がハブであることによる駐機機数の多さおよび避難先空港の容量の制約により、約 30%の駐機航空機が割り当て不能となっている。

3.6 桜大規模噴火と空港 BCP

前節で示された結果は、桜島の大規模噴火が発生した場合に日本の空港が直面する深刻な課題を浮き彫りにしているといえる。影響が局所的にとどまるという最も楽観的なシナリオであっても、関西空港や羽田空港といった主要空港は、西日本からの避難航空機を受け入れる必要があることがわかる。一方で、影響が首都圏にまで及ぶという最も深刻なシナリオ

においては、東北地方や北海道などの北日本、ならびに福岡や北九州といった南日本の空港が、多数の避難航空機を受け入れる必要が生じる。

本研究では、避難シナリオの動的な性質に踏み込んで分析を行ったが、Takebayashi et al. (2021) によって指摘された深刻な状況は、本研究の結果とも密接に一致している。那覇や奄美などの南日本の空港は、避難プロセスにおいて重要な役割を果たしており、これらの空港における限られた航空機駐機容量は、依然として大きな懸念事項である。

さらに、空域においても深刻な問題が発生する可能性がある古都がシミュレーションにより明らかにされた。すなわち、図 4~6 で示された状態は、那覇（ケース 1~3）、大阪（ケース 1）、羽田（ケース 1~2）、成田（ケース 1~2）、および新千歳（ケース 3）への空路が、高頻度の飛行により混雑する可能性が示されている。

ICAO (Khoury, 2023) による最新の安全ガイドラインでは、着陸準備において 4~8 海里 (NM) の間隔を確保することが求められている。しかし、図 4~6 に示されたシナリオでは、特に羽田（ケース 2）、新千歳（ケース 3）、および那覇において混雑の可能性が見受けられる。加えて、首都圏が影響を受けるシナリオでは、受け入れる機材数に対する容量が不足することにより、一部の航空機が避難先として割り当てられない事態も発生しうることがわかった。

さらに、ケース 3 においては空域の混雑が一層深刻化する可能性が高い。本研究では、飛行中の航空機におけるフライトプランの変更を考慮していない。そのため、ケース 3 のように羽田および成田の両空港が火山灰の影響を受ける場合、飛行中の航空機は経路変更を余儀なくされ、空域の混雑はさらに悪化することが想定される。このような状況下では、羽田空港に駐機中の航空機の避難が、空域の混雑をさらに助長する可能性がある。

これらの深刻な状況を踏まえ、以下のような政策的示唆が得られる：

(i) 空港の容量および上空容量（ならびにスロット数）の拡充

政府は、北海道ならびに東北における北日本の空港における駐機容量を拡大し、避難航空機の受け入れ体制を強化する必要がある。また、羽田、那覇、大阪といった主要空港における利用可能な発着枠（スロット）の拡充も、避難便の円滑な運用のために不可欠である。

(ii) 航空交通管制および運用ルールの強化

火山噴火による深刻な空域混雑に対応するためには、航空交通管制およびその運用ルールの強化が求められる。複雑な航空交通シナリオに対応可能な高度な航空交通管理ルー

ルの策定と実施が必要である。

(i) は文字通り物理的な問題点を示している。Takebayashi et al. (2021) が議論した状況と比較すると、本研究の結果はさらに深刻な事態が発生しうることを示しており、特に那覇空港がいずれのシナリオにおいても極めて重要な役割を担っている点が浮き彫りとなった。

(ii)は、新たな政策的示唆を提示するものであり、現行の航空交通管理システムの大きな限界を明らかにしている。特に、本研究で想定された条件下では、空港が航空便を十分に処理できない可能性がある。たとえば羽田空港は、最大で1時間あたり90回の離着陸処理が可能とされており（MLIT, 2024）、これは約45秒に1便の頻度に相当する。しかし前述のとおり、飛行中の航空機のフライトプラン変更を考慮すると、羽田空港（および当然ながら成田空港）に関連する空域の混雑はさらに深刻化する。

したがって、このような厳しい状況下で、どのような航空交通管制および運用ルールを適用すべきかについて検討することが重要であるが、この点については、次年度以降の研究課題としたい。

3.7 おわりに

本研究では、空港における火山灰リスクアラートシステムを提案し、桜島の大規模噴火時における避難航空機の受け入れに必要な空港容量について、シミュレーションに基づいて検討した。提案したシステムを用いたシナリオベースのシミュレーションを通じて、避難便を受け入れる空港における容量不足や、非常時に大量の航空機を管理するための航空交通管制システムの強化の必要性といった、重大な課題が明らかとなった。

本研究では桜島に着目したが、同様の深刻なシナリオは、西日本の他の火山——たとえば新燃岳、雲仙・普賢岳、阿蘇山——の噴火によっても発生する可能性がある。これらの火山は、日本の航空輸送に対して潜在的なリスクをもたらす存在である。

本研究では空港容量および航空交通管制に関する課題に焦点を当てたが、他にも解決すべき課題は存在する。たとえば、空港・航空会社・VAACといった関係者間のリスク・コミュニケーションに関する問題には触れていない。本研究では、予測の精度が完全であり、関係者が提案システムによるアラートに確実に従うという前提を置いているが、このような前提はやや楽観的である可能性がある。こうしたコミュニケーションに関する課題に対応することが、今後の研究における重要な焦点となる。

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、シナリオシミュレーションにおいて簡略化された条件を採用したため、火山灰の移動パターンも過度に単純化されたものとなっている。実際の噴火時における火山灰の動きは非常に複雑であり、こうした複雑性が本研究で用いた簡略化されたシナリオと比較して避難計画にどの程度の影響を及ぼすかを評価することが重要である。

第二に、前述のとおり、本研究では航空機の飛行経路の変更や緊急着陸といった要素を考慮していない。しかし、Arreras and Arimura (2022)、および Takebayashiet al. (2021) の研究では、このような事態が避難計画に与える影響の大きさが指摘されている。今後の研究では、飛行中の予期せぬ事態にも対応可能なよう、提案システムの高度化を図る予定である。

最後に、先に述べたコミュニケーションの課題にも取り組む。Reichardt et al. (2019) が提案するようなシミュレーション訓練を実施することは、空港・航空会社・VAAC などの主要関係者間における情報伝達の強化において、極めて有効であると考えられる。

4. 今年度のまとめ

本研究は、2 年計画の研究の初段階として、航空機の避難行動の構造化に関してより詳細に分析するとともに、空港向けの火山灰リスク警報システムを提案し、桜島の大規模噴火時に避難航空機を受け入れるために必要な空港収容能力について、シミュレーションを通じて検討した。得られた示唆は以下の通りである。

フィリピン・タール山における飛行軌道分析（アジア便（intra-Asia）ならびに長距離便（long-haul flight））

- 1) アジア便ならびに長距離便については、3 タイプに大きく大別されることがわかった。これは火山灰の影響がどの程度持続するかについてのリスク判断に基づくものと考えられる。
- 2) 大規模な噴火が発生した場合、航空会社は VAAC のアラートに基づいて慎重に飛行計画を決定しているにとらえることができる。
- 3) 飛行中のケースでは、およそ FL500 における火山灰拡散情報が重要である。現在の VAAC による火山灰拡散に関するアラートは、一般的に飛行計画の立案において信頼性が高いと判断される。

桜島噴火における駐機機材の避難シミュレーション

- 1) 空港の容量および上空容量（ならびにスロット数）の拡充
シミュレーションの結果から、最も影響範囲の小さなケースにおいても那覇、羽田、伊丹、関西といった主要空港への受入が多くなることがわかり、関西圏、首都圏と言ったより便数の多い空港が影響を受ける場合、受入が集中する空港は北上することになる。このことから、北海道ならびに東北における北日本の空港における駐機容量を拡大し、避難航空機の受け入れ体制を強化する必要がある。また、前述のように、比較的被害範囲が限定されている場合を想定しても、羽田、那覇、大阪といった主要空港への集中が顕著なことから、このような拠点空港における利用可能な発着枠（スロット）の拡充も、避難便の円滑な運用のために不可欠であるといえる。
- 2) 航空交通管制および運用ルールの強化
火山噴火による深刻な空域混雑に対応するためには、航空交通管制およびその運用ルールの強化が求められる。特に、上空の制御も考慮した場合、現在シミュレーションで

想定されている状態よりもより混雑した状況が生まれうる。このため複雑な航空交通シナリオに対応可能な高度な航空交通管理ルールの策定と実施が必要である。

次年度ではここで得られた知見に加え、手法の一般性をより高めるため、既に中南米空路において重要なメキシコ・ポポカテペトル山に関するデータを入手し、現在分析が続けている。そして上空制御も考慮した空港 BCP のあり方の検討を行うに加え、今年度は準備にとどまった海上輸送への影響について検討を加え、総合的な輸送インフラの BCP のあり方についてまとめる予定である。

参考文献

第1章

- A. Arreeras and M. Arimura, “A study on shelter airport selection during large-scale volcanic disasters using CARATS open dataset,” *Transportation Research Part C*, vol. 129, pp. 103263, 2022.
- T. J. Casadevall, “The 1989–1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 62, pp. 301–316, 1994.
- S. R. Gislason, T. Hassenkam, S. Nedelb, N. Bovet, E. S. Eiríksdóttir, H. A. Alfredsson, C. P. Hem, Z. I. Balogh, K. Dideriksen, N. Oskarsson, B. Sigfusson, G. Larsen, and S. L. S. Stipp, “Characterization of Eyjafjallajökull volcanic ash particles and a protocol for rapid risk assessment,” *PNAS*, vol. 108, pp. 7307–7312, 2011. (doi:10.1073/pnas.1015053108).
- A. Gourgaud, J.-C. Thouret, and J.-L. Bourdier, “Stratigraphy and textural characteristics of the 1982–83 tephra of Galunggung volcano (Indonesia): Implications for volcanic hazards,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 104, pp. 169–186, 2000.
- M. T. Gudmundsson, T. Thordarson, Á. Höskuldsson, G. Larsen, H. Björnsson, F. J. Prata, C. Figueiredo, “Ash-cloud of April and May 2010: Impact on air traffic Eyjafjallajökull volcano, Iceland,” *Regional Volcanic Ash Contingency Plan Workshop*, 2017.
- IATA, “IATA economic briefing: ‘The impact of Eyjafjallajökull’s volcanic ash plume’,” May 2010. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/impact-of-ash-plume/>. [May 10, 2021].
- ICAO Asia and Pacific Office, “Asia/Pacific Region ATM contingency plan, Version 2.0,” 2017. [Online]. Available: <https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/Asia%20Pacific%20Regional%20ATM%20Contingency%20Plan.pdf>. [May 10, 2021].
- ICAO, “Volcanic ash contingency plan-AFI region,” APIRG/19 WP/14 Appendix 3.2J, 2012a. [Online]. Available: https://www.icao.int/ESAF/Documents/APIRG/APIRG19/Docs/APIRG19_WP14_App3.2_J_AFI%20VACP.pdf [Aug. 22, 2021].
- ICAO, “Air traffic management volcanic ash contingency procedures for the NAM/CAR regions,” First Edition, 2012b. [Online]. Available: <https://www.icao.int/NACC/Documents/eDOCS/ATM/ATM%20Volcanic%20Ash%20Contingency%20Plan%20EN.pdf> [Aug. 22, 2021].
- M. Iguchi, H. Nakamichi, and T. Tameguri, “Integrated study on forecasting volcanic hazards of Sakurajima volcano, Japan,” *Journal of Disaster Research*, vol. 15, no. 2, pp. 174–186, 2020.
- M. Iguchi, H. Nakamichi, K. Takishita, and A. P. Poulidis, “Continuously operable simulator and forecasting the deposition of volcanic ash from prolonged eruptions at Sakurajima volcano, Japan,” *Journal of Disaster Research*, vol. 17, no. 5, pp. 805–817, 2022.
- G. S. Leonard, D. M. Johnston, S. Williams, J. W. Cole, K. Finnis, and S. Barnard, “Impacts and management of recent volcanic eruptions in Ecuador: lessons for New

Zealand,” Institute of Geological & Nuclear Sciences Limited, 2005.

B. Oddsson, E. Magnússon, T. Högnadóttir, G. N. Petersen, C. L. Hayward, J. A. Stevenson, and I. Jónsdóttir, “Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland,” *Scientific Reports*, vol. 2, p. 2572, 2012. (doi:10.1038/srep00572).

Z. J. Przedpelski and T. J. Casadevall, “Impact of volcanic ash from 15 December 1989 Redoubt Volcano eruption on GE CF6-80C2 turbofan engines,” *Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, U.S. Geological Survey Bulletin 2047, pp. 129–135, 1991.

G. N. Petersen, H. Björnsson, and P. Arason, “The impact of the atmosphere on the Eyjafjallajökull 2010 eruption plume,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, D00U07, 2012. (doi:10.1029/2011JD016762).

U. Reichardt, G. F. Ulfarsson, and G. Pétursdóttir, “Volcanic ash and aviation: Recommendations to improve preparedness for extreme events,” *Transportation Research Part A*, vol. 113, pp. 101–113, 2018.

U. Reichardt, G. F. Ulfarsson, and G. Pétursdóttir, “Developing scenarios to explore impacts and weaknesses in aviation response exercises for volcanic ash eruptions in Europe,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 79, pp. 1–10, 101684, 2019.

A. Solodova, M. Takebayashi, M. Onishi, and M. Iguchi, “Flight trajectory analysis: The case of 2020 Mt. Taal,” *The 25th International Conference of ATRS*, Antwerp, Belgium, 2022.

M. Takebayashi, M. Onishi, and M. Iguchi, “Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 97, p. ID102136, 2021.

L. H. Tanaka, H. Nakamichi, K. Kondo, S. Akami, and M. Iguchi, “Applying the particle filter to the volcanic ash tracking PUFF model for assimilating multi-parameter radar observation,” *Journal of Disaster Research*, vol. 17, no. 5, pp. 791–804, 2022.

World Bank, “The January 15, 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption and tsunami, Tonga,” *Global Rapid Post Disaster Damage Estimation (GRADE) Report*, 2022. [Online]. Available: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/b69af83e486aa652d4232276ad698c7b-0070062022/original/GRADE-Report-Tonga-Volcanic-Eruption.pdf> [Sep. 13, 2024].

第2章

A. Arreeras and M. Arimura, “A study on shelter airport selection during large-scale volcanic disasters using CARATS open dataset”, *Transp. Res. Part C*, Vol.129, 103263, 2022.

C. S. Bosson, and T. Nikoleris, “Supervised learning applied to air traffic trajectory classification”, *AIAA*, 2018.
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180000801/downloads/20180000801.pdf>.

CAPA, 2019. LCCs in Asia Pacific: two decades of steady market share gains. (<https://centreforaviation.com/analysis/reports/lccs-in-asia-pacific-two-decades-of-steady-market-share-gains-456096>.) [accessed Aug. 5, 2021]

S. J. Corrado, T. G. Puranik, O. J. Pinon, and D.N. Mavris, “Trajectory clustering within the terminal airspace utilizing a weighted distance function”, *MDPI Proc.*, Vol.59, 2020.

(<https://doi.org/10.3390/proceedings2020059007>)

M. F.P. Del Castillo, P.M.J. Paraiso, M.C.M.T. Vincente, M.L.P. Jamero, and G. T. Narisma, “Impacts of Taal Volcano Phreatic Eruption (12 January 2020) on the Environment and Population: Satellite-Based Observations Compared with Historical Records”, Manila Observatory Report III, March 13, 2020.

IATA, 2010. IATA economic briefing: 'The impact of Eyjafjallajökull's volcanic ash plume', May 2010. (<https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/impact-of-ash-plume/>) [accessed Sep. 22, 2021]

ICAO Asia and Pacific Office, 2017. Asia/Pacific Region ATM contingency plan, Version 2.0.

(<https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/Asia%20Pacific%20Regional%20ATM%20Contingency%20Plan.pdf>) [accessed August 5, 2021]

C. G. Newhall and S. Self, “The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism”, J. Geophys. Res., Vol.87, No. C2, 1231–1238, 1982.

NICT Science Cloud Japan Himawari-8 Real-time Web, 2021 (<https://sc-web.nict.go.jp/himawari/himawari-archive.html>) [accessed August 5, 2021].

X. Olive and L. Basora, “Identifying anomalies in past en-route trajectories with clustering and anomaly detection methods”, Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar 2019, 2019 (ATM2019) (<https://www.researchgate.net/publication/333671170>) [accessed May 10, 2021]

X. Olive, and L. Basora, “Detection and identification of significant events in historical aircraft trajectory data”, Transp. Res. Part C, Vol.119, 102737, 2020.

X. Olive, J. Sun, A. Lafage, and L. Basora, “Detecting events in aircraft trajectories: Rule-based and data-driven approaches”, 8th Open Sky Symposium, 2020. (<https://doi.org/10.3390/proceedings2020059008>) [accessed May 10, 2021]

U. Reichardt, G.F. Ulfarsson, G. Pétursdóttir, “Developing scenarios to explore impacts and weaknesses in aviation response exercises for volcanic ash eruptions in Europe”, Journal of Air Transport Management, 79, 101684 (1-10), 2019.

A. Solodova, M. Takebayashi, M. Onishi, and M. Iguchi, “Flight trajectory analysis: the case of 2020 Mt. Taal”, the 25th International Conference of ATRS, Antwerp, Belgium (paper ID: 274), 2022.

M. Takebayashi, M. Onishi, M. Iguchi, “Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan”, Journal of Air Transport Management 97 (ID102136), 2021.

第3章

A. Arreeras and M. Arimura, “A study on shelter airport selection during large-scale volcanic disasters using CARATS open dataset,” Transportation Research Part C, vol. 129, pp. 103263, 2022.

E. E. Khoury, “Report of ICAO Wake Turbulence Group (WTG),” ICAO, 2023. [Online]. Available:

<https://www.icao.int/APAC/Meetings/2023%20RECAT%20Webinar/1.ICAO%20Wake%20Turbulence%20Groups.pdf> [Dec. 6, 2024].

K. Kurahara, “Evaluation of accommodation capacity for aircraft evacuation under a large eruption using various volcanic ash dispersion scenarios,” Master’s Thesis,

Graduate School of Informatics, Kyoto University, 2021.

Z. Liu, “Developing an airport-specific volcanic early warning system for managing aircraft evacuation under large eruptions,” Master’s Thesis, Graduate School of Informatics, Kyoto University, 2021.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), “Haneda Airport FAQ,” [Online]. Available: <https://www.mlit.go.jp/koku/haneda/archive/faq/pdf/06.pdf> [Dec. 17, 2024].

U. Reichardt, G. F. Ulfarsson, and G. Pétursdóttir, “Developing scenarios to explore impacts and weaknesses in aviation response exercises for volcanic ash eruptions in Europe,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 79, pp. 1–10, 101684, 2019.

M. Takebayashi, M. Onishi, and M. Iguchi, “Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 97, p. ID102136, 2021.

津久井雅志. 史料にもとづく桜島火山 1779 年安永噴火の降灰分布, 火山 2011 年 56 巻 2-3 号, 89-94, 2011.