

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18749

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）System development for estimation of large scale eruption on air transport

研究代表者

竹林 幹雄（Takebayashi, Mikio）

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：80236497

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：2020年のTaal山噴火および2022年のBezymianny山の噴火の影響について分析を行った。その結果Taal山に関してはフライトプランの変更パターンを分類することができた。両事例に関して火山灰拡散情報（VAAC）からの情報発出のタイミングと、経路変更との関係の明確化に努めた。両事例ともVAACの情報時期に大きく依存した行動となっていることがわかった。最後に桜島の大規模噴火時の航空交通の行動規範となるグループ毎のフローチャートを作成し、システムの構築を行い、噴火開始時刻を昼と夜に設定したシナリオによるシミュレーションを行った。その結果、提案したシステムが効果的に機能することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は現在まで詳細に検討されなかった火山噴火の航空輸送への影響をフライトプランとVAACの情報発出時期の関係に着目することで、プラン変更におけるVAACの情報発出時期及び精度の影響を明らかにすることができた。これは現在までほとんど触れられなかった点であり学術的に大きな成果であるとともに、現在頻発する火山噴火の影響をリスクを回避しつつできるだけ小さくするという合理性と安全性の両立と向上に資するものであると言える。また、空港での退避システムについても現在まで一般化した方法論がなかったことから学術的に大きな進歩であるとともに、今後の空港BCPの深化にも大いに資する成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the effects of the 2020 eruption of Mt. Taal in the Philippines and the eruption of Mt. Bezymianny in Russia in 2022. As a result, we were able to classify flight plan change patterns for Mt. Taal using HDBSCAN. For both cases, we clarified the relationship between the timing of information release from volcanic ash dispersion information (VAAC) and changes of flight plans. The results showed that in both cases, the behavior on flight plan change highly depended on the timing of VAAC information issue. Finally, we built a flowchart for each group that would serve as a code of conduct for air traffic in the event of a large-scale eruption of Mt. Sakurajima, proposed a system, and conducted a simulation using scenarios in which the eruption start time was set at daytime and nighttime. We confirmed that the proposed system functions effectively.

研究分野：国土計画

キーワード：航空輸送 火山噴火 BCP フライトプラン

1. 研究開始当初の背景

火山噴火による災害は、直接的な被害もさることながら現代では特に航空輸送に対して深刻な影響を与える危険性が高いことが2010年のアイスランド Eyjafjallajökull 火山の噴火での経験を踏まえ、指摘されている。このような大規模な火山による航空災害の発生は、現在まで極めて稀ではあるものの、ひとたび発災すれば極めて甚大な影響が発生することがわかる。わが国でも新たに空港 BCP (A2-BCP) を策定したが、これは空港単独での BCP であり、火山災害のようにネットワークを通じて拡散するリスクに対応したものはなっていない。火山災害による航空輸送への影響を最小限にとどめるには、このネットワークを通じたリスク拡散の構造的解析と、それを防ぐための空港システムとしての対応を考究することが急務といえるが、研究代表者の知る限りこういったアプローチは欧州の事例を含めても現在まで皆無であった。

2. 研究の目的

本研究は、活発な活動を続ける九州の活火山(主として桜島)を対象として、想定される航空輸送への影響を噴火シミュレーションとフライトデータとの連動により時空間レベルで把握し、噴火情報の更新に伴う最適フライトコントロール方法を海外の噴火事例とフライトコントロールデータとの解析から検討するとともに、航空機の被災回避行動と空港の処理能力との関連性についても考究し、安全性を担保したフライトキャンセルを含む最適フライトコントロールを行う上で望ましい空港整備・BCPの方向性について検討を加えることを目的とする。

3. 研究の方法

研究方法の概要は以下の通りである。本研究課題では3カ年の研究期間の中で以下の研究を遂行した。(i) 大規模噴火発生による航空機への影響把握のためのシミュレーションモデルの構築、(ii) 最適(ないしは次善)フライトコントロール策定のための潜在的フライトコントロール方法の推定、(iii) 最適(ないしは次善)フライトコントロール実施時に発生する危険回避行動の動的把握の3点を行う。具体的には、実際に発生した火山噴火(2020年1月のフィリピン・Taal山の噴火および2022年5月のロシア・Bezymianny山の噴火)による航空機のフライトプラン変更パターンを把握し、その変更パターンと変更同機となり得た火山灰拡散情報(Volcanic Ash Advisory Center/VAACによる発出。本研究では主としてTokyo VAACによる情報)との関連性を明らかにし、フライトプランの動的な変更の可能性について検討した。さらに最終的な検討対象である鹿児島県の桜島における噴火を対象として、駐機中の航空機への降灰を避けるため空港向けの危機対応システムの設計を行った。

4. 研究成果

主な研究成果3点について以下に示す。

(1)火山噴火によるフライトプラン変更パターンの把握

ここでは2020年1月12日に、フィリピン・ルソン島に位置する活火山Taal山での噴火の、フライトプランへ与えた影響について、空路変更パターンの類型化を試み、どのようなフライト変更があり得たのかについて検討した。Taal山はルソン島南部に位置し、フィリピンの基幹空港であるマニラ空港(MNL)から70kmの距離にある。このため、ひとたび噴火が起これば、MNLへの影響は避けられないが、噴火の規模が大きければ(10,000m以上の噴煙上昇であれば航空路への影響は避けられない)、噴火雲の移動により航路への影響が出る可能性が高い。ここでは、Taal山の噴火で影響を受けうる20,000フライトの中からランダムに120フライトを抽出し2020年1月1日~31日までの期間での空路変更の類型化を行った。

方法論としては、1つのフライトに関して複数の通常取り得る空路が設定されるため、フライトそれぞれに対してクラスター分析による分類を行った。ただし、通常のクラスター分析ではフライトの分類は難しいため、フライトパターン分析で標準的に用いられる方法のうち、分布密度を階層化して分類する hierarchical density-based spatial clustering of applications with noise (HDBSCAN)を適用することとした。また、このクラスタリングの評価指標は、毎フライトごとの軌跡それぞれに対して、軌跡間の距離を定義し、その距離の分布を採用した。ここで、軌跡に対する距離測定では Eiter and Mannila (1994)によって提案された Fréchet 距離を採用した。これは移動パターンの影響も組み込んだ距離定義となっているため、フライトの軌跡の分析には適した特性であるため、採用した。なお、データとしては商用データベースである Flight Radar 24 のデータを利用した。

120フライト全てについて分類を行うと、次のようなパターンに分けられることがわかった。

I: 11 - 15日まで不変, II: 12日にイレギュラーフライトプラン, 13日以降復旧, III: 13日にイレギュラーフライトプラン, 14日以降復旧, IV: 13日にイレギュラーフライトプラン, 15日まで継続, V: 12日, 13日にイレギュラーフライトプラン, 14日以降復旧, VI: 12日, 13日にイレギュラーフライトプラン, 15日まで継続, VII: 12日, 13日にイレギュラーフライトプランであ

るものの、通常取り得る経路を採用。

これらをまとめたものが表 1-1 である。これから次のようなことがわかる。120 フライトのうち 12 日、13 日に何らかの変更があったと評価されるものが 70% に上り、特に II と III は全体の 42% を占める。これは噴火による火山灰の影響は 1 日のみであり、それ以降に大幅な変更は不要と考えたプランである。一方、翌日以降も変更を維持した IV ~ VI も 28% を占めている。これらはよりリスク回避型のプランを採用していると考えられる。

表 1-1 分類結果

Category	No	Category	No	Category	No	Category	No
I	21	II	29	III	22	IV	4
V	20	VI	10	VII	14		

さらに、フライトの出発時間も加味した分析を行った結果、以下の考察結果を得た。

- 1) 航空会社は噴火発生直後から 24 時間経過まではフライトをキャンセルするか、ないしは経路変更を行うか、という意味決定を行う。
- 2) 24 時間経過後、航空会社は「(1)でとった行動の継続」ないしは「通常フライトに戻す」の 2 つからの選択になる。
- 3) 27 時間経過後、航空会社はイレギュラーフライトを大幅に減少させ、通常フライトに戻す傾向にある。

これらは Taal 山のケースで見られた傾向であるが、少なくとも VAAC (ここでは Tokyo VAAC) が発出する情報に大きく左右されている可能性があり、VAAC 情報との関連性の把握が重要であることがわかった。

(2) VAAC の情報発出とフライトプラン変更に関する分析

(1)の研究成果に基づき、フライトプランの変更と VAAC の情報発出との関連を中心に分析を行った。対象としては(1)と同様に Taal 山噴火事例を取り上げることに加え、2022 年 5 月に発生したカムチャッカ半島の Bezymianny 山噴火事例を取り上げた。後者はアジアと北米の航空貨物輸送での主力空路であることから、取り上げることとした。

最初に Taal 山噴火についてのフライトプラン変更についての詳細な分析を、FR24 データを用いて実施した。MNL 発着に関しては大半が空港閉鎖のため、キャンセルされたものの、表 2-1 に示すように、一部のフライトは発着を行っている。出発が認められたものは噴火直後のものであり VAAC 発出の火山灰拡散情報がかなり限定的で、噴火から 6 時間以内であればある程度の出発は可能であると空港および航空会社双方が判断した可能性があることがわかった。ただし、この判断は航空会社さらには出発方面に依存すると言える。一方、着陸に関しては近距離にある Clark 空港への退避が可能な場合は退避を行っているものの、それが難しい場合は着陸を認めていると推察された。一方、アジア域内および長距離フライトについては、VAAC 情報に基づき大幅な経路変更、ないしはフライトキャンセルが大半を占め、VAAC 情報に基づく経路変更が優越していた可能性があることがわかった。

表 2-1 噴火中に MNL への発着が認められたフライト一覧 (部分) 日時は UTC 表記

Flight No.	From	To	Description
a	Manila	Iloilo (Phil.)	Departure: 9:00 on Jan 12
b	Bacolod City (Phil.)	Manila	Departure: 9:00 on Jan 12
c	Los Angeles	Manila	Arrival: 10:00 on Jan 12
d	Manila	Toronto	Departure: 8:30 on Jan 12
e	Tokyo	Manila	Departure: 6:00 on Jan 12 (Divert to Clark)
f	Bangkok	Manila	Departure: 7:00 on Jan 12

また、Bezymianny 山噴火については表 2-2 に示すように、VAAC の発出タイミングにより、退避パターンに有意な差が認められた。噴火収束後も一部フライトに退避のパターンが認められるが、これはカムチャッカ西方に寒冷渦の発生が見られ、その退避の可能性があることがわかった。一方、噴火初期では行動にばらつきが見られるものの、噴火継続中には 200 マイル程度の退避が認められた。

表 2-2 Bezymianny 山噴火での平均退避ポジションの比較 (部分)

	9:04	12:00	15:00	18:00	21:04	23:01	3:39	9:27	14:45	20:30
	/2:50									
A	47.46	44.15	45.12	42.28	42.31	40.28	47.34	43.5	48.44	54.23
B	50.5	51.1	49.08	46.51	47.29	-	-	-	-	-
C	4	11	2	7	2	2	2	2	2	4

注：A= E170 での平均緯度，B=推定 VA 位置 (南端)，C=該当フライト数

両方の事例の分析から，火山噴火時における課題を 2 つ上げることができた．ひとつは退避空港の確保とその容量の確保の重要性であり，これらが十分でない場合，降灰の状態を判断するとは言え，被災空港での着陸を受け入れるというリスクを受け入れなければならないという点で改善の余地があるといえる．もう一つは VAAC の発出情報の精度の問題である．Bezymianny 山での分析，および Taal さんのマニラ発着以外に関しては，FL500 での情報が重要であり，この情報を元にフライトプランを立案していると考えられた．これに関する情報はかなりの精度であり信頼性は高いと考えられていると言える．一方，Taal 山のマニラ空港発着の事例分析から，FL500 レベルだけではなく FL200 レベルでの情報も発着には大きく関わるため，安全性を確保した上で発着，特に着陸可能性をエアラインが判断できる 3 次元的な広がりを持つ発出情報とすることができれば，航空会社の判断のばらつきをより小さくできると考えられた．

(3) 大規模噴火切迫時における航空交通の危機対応システムの設計

桜島はおよそ 80~100 年周期で大規模噴火を繰り返しており，最後の噴火である『大正の大噴火』(1914 年)より 100 年が経過しているため，大正の大噴火，あるいはそれを超える『安永の大噴火』(1779 年)クラスの大噴火が発生するリスクが高まっていると指摘されている．日本上空には常に偏西風が吹いているため，桜島で大規模な噴火が発生すると，最悪の場合火山灰が偏西風に乗って日本全土を覆い尽くし日本の航空交通網に甚大な影響，最悪の場合航空機のエンジンストールによる墜落事故が大規模に起こるなど，大きな被害を与える可能性がある．こうした被害を防ぐため，航空機が降灰の影響から逃れるために，降灰の心配がない安全な空港へ避難する体制を整備しておく必要があるものの，残念ながらわが国をはじめとして多くの国・地域で大規模噴火時の航空交通の避難体制の構築に関する研究はあまりなされていない．そこで，ここでは大規模噴火切迫時より機能する危機対応システムを作成し，空港ごとの対応行動を定めることを目的とする．具体的には，では，航空機を降灰の被害から逃れさせる設計する危機対応システムの構築を目指すこととする．

ここで想定する火山噴火のプロセスに関しては，先行研究(井口，2019)に従い，火山性地震や山体膨張などの予兆 噴火警戒レベル 4 噴火警戒レベル 5 噴火開始と段階的に進んでいくという想定のもと行うこととした．図 3-1 は噴火プロセスを図化したものである．

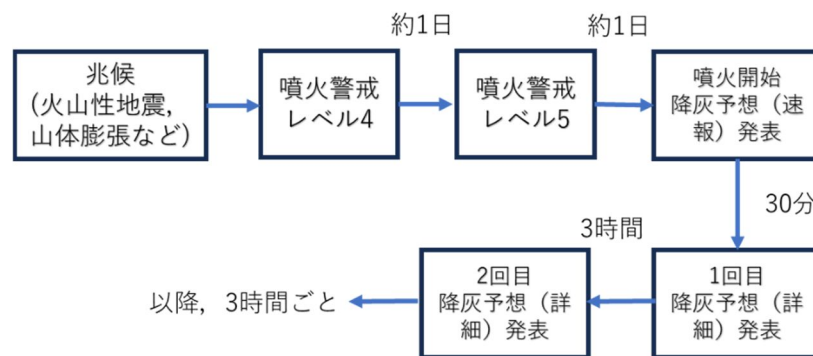


図 3-1 噴火プロセス

ここで設計する危機対応システムとは，桜島火山噴火切迫時から噴火開始，収束までにおいて，降灰の危機に対して各種予測情報(噴火警戒レベル，降灰予報，風予測)から，空港ごとの警戒度合いと推奨される対応行動を決定するための判断の枠組みである．警戒度合いを 4 色で表現し，各色に対応する推奨行動を定義している．すなわち空港に駐機している航空機の避難に至るまでの意思決定の支援になるものを設計することとする．

噴火開始よりも前に避難開始する必要があるかどうか，夜間に待機する必要があるかどうか，

降灰の確率が3%を超えるかどうかに応じて日本の空港を上で設定した変数の大小に応じて4つのグループA, B, C, Dに分類した(図 3-2)。さらにグループBについては噴火開始後30分で利用可能になる1回目の降灰予報(詳細)を待ってから避難を開始できるか, 噴火開始後3.5時間で利用可能になる2回目の降灰予報(詳細)を待ってから避難を開始できるか, によってさらに3つのサブグループB1, B2, B3に分類した。

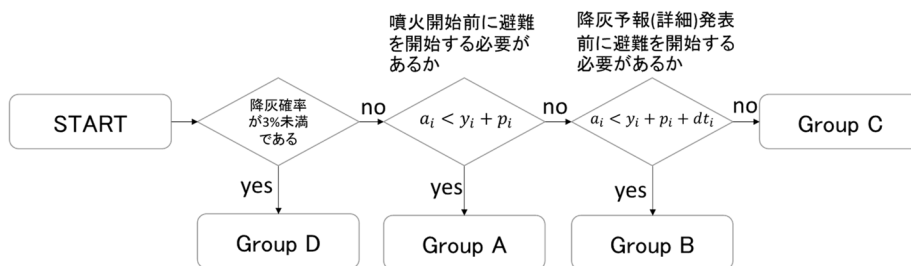


図 3-2 グループ化の概要

このグループ化を元に空港向け危機対応システムの設計を行った 表 3-1 にその概略を示す。

表 3-1 危機対応システムの概略

空港向け危機対応システム		
警戒度合い	意味	推奨される対応行動
赤	避難	航空機の出発・到着に制限あり, 避難勧告
オレンジ	到着制限	離陸前の飛行機の到着に関して制限あり 飛行中の飛行機に関しては到着制限なし
黄色	注意	注意の必要あり, 夜間には待機が必要
緑	安全	注意の必要がなく安全

さらに, このシステムを各グループに特化してフローチャート化した。図 3-3 はグループ A に関するフローチャートである。概略を説明すると以下ようになる。

桜島の噴火警戒レベルが4になり, 大規模噴火が切迫していると発表された段階で自動的にレベルオレンジ(到着制限)に移行することとなる。桜島の噴火警戒レベルが5になった段階で, グループAの空港はレベル赤(避難)に移行し, 航空会社に対し速やかに駐機している航空機の避難を開始するよう勧告する。到着便について, まだ離陸していないものはキャンセル, 離陸しているものについては迂回や帰還を勧告する。



図 3-3 グループ A のフローチャート

以上のようなシステムを設計し, シミュレーションを行った。シナリオは噴火開始時刻の異なる2種類を用意した。その結果, 避難完了後から火山灰が空港を覆うまでの時間が特に短い空港が存在することを示した。2つのシナリオの検証結果で共通して, 九州地方のグループB1およびB2に属する空港で, 猶予時間が1時間未満となるものが複数確認された。猶予時間が短いと, 少しの判断の遅れによって避難開始が遅れてしまった場合に航空機の避難完了よりも先に降灰が始まってしまう恐れがある。

このようにシステムを適用した結果, 本システムが十分機能する可能性があることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Solodova, A., Takebayashi, M., Onishi, M., Iguchi, M.
2. 発表標題 Flight trajectory analysis: the case of 2020 Mt. Taal
3. 学会等名 25th International Conference of ATRS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西正光
2. 発表標題 長期的視野のリスクコミュニケーション：桜島大規模噴火に備える地域との協働活動の現在位置
3. 学会等名 2022年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masamitsu Onishi
2. 発表標題 Designing the Collaborative Process between Residents and Experts for Risk Governance: A Case Study on the Construction of a Wide-Area Evacuation System for the Sakurajima Large-Scale Eruption
3. 学会等名 IDRim 2022 - The 12th International Conference of the International Society for the INTEGRATED DISASTER RISK MANAGEMENT (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹林幹雄
2. 発表標題 航空輸送におけるパラダイムシフトと 航空政策：研究レビュー
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会・秋大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊岡歩, 大西正光, 井口正人, 竹林幹雄
2. 発表標題 大規模噴火切迫時における航空交通の危機対応システムの設計に関する研究
3. 学会等名 第69回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大西 正光 (Onishi Masamitsu) (10402968)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	井口 正人 (Iguchi Masato) (60144391)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------