

大規模火山噴火時の風向きによる降灰影響範囲に応じた航空機避難パターンに関する感度分析

千田 大輔¹・田畑 凌²・ARREERAS Saharat³・有村 幹治⁴

¹学生会員 室蘭工業大学 工学部建築社会基盤系学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: 17021070@mmm.muroran-it.ac.jp

²学生会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: 20041051@mmm.muroran-it.ac.jp

³正会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: 19096002@mmm.muroran-it.ac.jp

⁴正会員 室蘭工業大学 教授 大学院工学研究科 もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: arimura@mmm.muroran-it.ac.jp

近年、ヨーロッパ諸国の航空輸送産業や経済は、大規模火山噴火による混乱が度々生じた。我が国においても活火山は数多く存在しており、大規模火山噴火により甚大な影響を受けることが予想されている。筆者らは先行研究において、大規模火山噴火リスクに対する航空機避難問題を定式化し、駐機容量の緩和を変数に入れつつ、各航空機避難時間の総和を最小化する最適化モデルを提案した。しかし、噴火シナリオの違いによる感度分析はおこなっていなかった。本研究では桜島をモデルケースとし北から東の向きに風向きが変化した場合の火山灰影響範囲を4つに分け、各パターンの総避難時間の変化を把握する。

Key Words: *genetic algorithm, large-scale volcanic disasters, shelter airport selection, Sensitivity analysis, Wind direction*

1. はじめに

年々、航空業界への火山災害の影響が激甚化している。2010年のエイヤフィヤトラヨークトル(Eyjafjallajökull)火山噴火では、火山灰が国境を越えて西ヨーロッパ全域に拡散し、甚大な航空ネットワーク障害を引き起こした。1982年のブリティッシュエアウィズ9便エンジン故障事故では、火山噴火により発生した火山灰により航空機のエンジンが停止した。こうした火山災害や事故は我が国においても懸念される。

我が国における火山噴火は、偏西風が7月から9月を除いて、上空で西から東の向きに吹くことから、概ね火山の東から北東側に火山灰が流れる。したがって、我が国の西部に位置する火山は広範囲に火山灰の影響をもたらす。複数の専門家からは、桜島の大規模噴火による航空路への多大な影響を指摘している¹⁾。実際に、1914年に起きた桜島大正大噴火では、西日本全域や約1000kmあまり離れた東北地方南部でも火山灰が観測された。このような大規模噴火が現代で起きれば、航空ネットワーク障害のみならず、

エンジン故障事故など甚大な事故につながりかねない。そのため、事前に対策することが必要である。

筆者らは先行研究において、桜島が噴火した場合をモデルケースとして避難時における空港の駐機容量の緩和を考慮し、最適航空機避難モデルを構築し、感度分析を行った。しかしながら、噴火した際の風向きによる影響範囲の変化を想定したシナリオ設定が考慮されていなかった。そこで本研究では、先行研究同様、桜島が噴火した場合をモデルケースとして、北から東の向きに風向きが変化した場合の火山灰の影響範囲を4パターンに分類し、最適航空機避難モデルを構築、適用した。その際に、国土交通省が提供する空港情報(AIS japan)やCARATS Open Dataを用いて避難されるべき航空機の数や空港の容量を算出し、それらを基に遺伝的アルゴリズム(以下、GA; Genetic Algorithm)により、航空機の避難に最適な空港を選択する。

2. 先行研究レビューと本研究の位置づけ

航空防災の中でも、火山噴火時のダイバートに関する研究では、GA を用いた大規模火山噴火時における航空機避難問題に関する先行研究で ARREERAS らが、空港や航空機の位置情報を基に計算された距離から、航空機の総避難時間を最小化するモデルを構築した²⁾。

田畑らは、桜島が噴火した場合をモデルケースとして避難時における空港の駐機容量（空港に駐機できる最大数）の緩和（増加）を考慮して、航空機の避難先空港組み合わせ最適化問題を再度定式化した。そして、噴火開始想定時間、火山灰の影響範囲、各空港の駐機緩和量を外生変数として設定し、感度分析を行い、航空機の総避難時間を最小化するモデルを構築し、感度分析を行っていた³⁾。しかしながら、噴火した際の風向きによる影響範囲の変化を想定したシナリオ設定が、このモデルでは考慮されていない。

以上を踏まえて本研究では、噴火開始想定時間・火山灰の影響範囲・各空港の駐機緩和量・噴火した際の風向きを外生変数として設定し、感度分析を行う。さらに、シナリオの変化に伴う避難時間の変化と傾向を、災害発災前に把握することを目的とした。

3. 計算上の仮定と航空機避難モデル

(1) 火山噴火の影響範囲設定に関する仮定

現在では、研究により空気中火山灰濃度がごく少量の場合エンジンに対してほぼ影響がないことが確認されている⁴⁾。ただし、本研究においては、空気中火山灰濃度に関わらず、火山灰が拡散される範囲を影響範囲と仮定した。そしてその影響範囲は、九州地方での風向きと文献⁵⁾等から降灰が予測される範囲とし、この範囲内にある空港に駐機している航空機及び空域を航行中の航空機は避難させる。また、火山灰粒子は航空機のエンジンに深刻な損傷を与える可能性があるため、降灰範囲内の空港は避難先空港候補から除外し、その空港に駐機している航空機は火山灰の影響を受けない他の空港に避難するものと仮定した。

(2) 目的関数の設定に関する仮定

火山噴火が発生した場合、その発生初期で火山砕屑物や灰雲の影響が、噴火地点から数～数百 km 離れた空中に、風の強さに依存するが 1 時間以内に広がる可能性が高い^{1), 6)}。そこで本研究では、避難すべき航空機を火山灰影響範囲外にある空港へ迅速に避難させる経路を決定するため、総避難時間を基本的な目的関数値として設定した。ただし、GA は制約のない最適化手法であるため、ペナルティー関数による駐機容量の制約と、特定の空港への過剰な割り当ての集中によって発生する着陸待ち時間を制約として目的関数値に加算し、制約付き最適化を行った。

(3) 避難時間の算出に関して

避難時間を計算する際、避難距離は、空港の緯度経度と CARATS Open Data から抜き出した航空機の緯度経度を基に、大圏距離（地球面上の 2 点間の最短距離）を求めた。航行中の航空機の速度は、CARATS Open Data から抜き出した型番情報に応じた平均航行速度を用いた。地上の航空機は、型番の情報がないため、主要な型番の平均航行速度（表-1）をランダムに割り当てた。さらに、地上の駐機航空機の場合は 35 分（離陸時間 15 分と着陸時間 20 分の合計）を、航行中の航空機の場合は着陸時間（20 分）のみを各避難時間に加算した。

(4) 定式化

上記の仮定に基づき、各航空機の避難先空港選択の最適化と、避難先空港における駐機容量を増加させる空港運用の探索を同時に行うモデルを構築する。火山灰影響範囲内の空港やその空域内のある点から、避難先空港までの避難時間、ペナルティー値 h_{ik} および着陸待ち時間を考慮する値 w_{jk} の総和を目的関数として最小化する。

初めに、目的関数 $E(t)$ [h] を(1)に示す。

$$E(t) = \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (t_{ijk} \cdot e_{ijk} + h_{ik} + w_{jk}) \quad (1)$$

ここで、

(i, I) : 噴火や火山灰の影響範囲内、すなわち使用不可能な空港 i およびその集合 I ; $i \in I$

(j, J) : 噴火や火山灰の影響範囲外、すなわち避難可能な空港 j およびその集合 J ; $j \in J$

(k, K) : 避難すべき各航空機 k , その集合 K ; $k \in K$

t_{ijk} : 避難先空港への各航空機の退避時間 [h]

e_{ijk} : 各航空機が避難可能な空港に配置される場合 1, そうでない場合 0

である。

次に、制約条件を以下(2), (3)に示す。

$$\prod_{i \in I} \prod_{j \in J} \prod_{k \in K} e_{ijk} = 1 \quad \forall j, k \quad (2)$$

$$E_{jk} \leq c_{jk} \cdot MC_{jk} \cdot r_{jk} \quad \forall j, k \quad (3)$$

ここで、

E_{jk} : 避難可能な各空港に割り当てられた航空機数

MC_{jk} : 避難可能な各空港の駐機容量

c_{jk} : 空き容量率 (MC_{jk} に対する受入可能割合) ; 定数

$$0 < c_{jk} \leq 1.0 \quad (c_{jk} + p_{ik} = 1.0)$$

r_{jk} : ある一定の確率で駐機容量を緩和する定数

である。式(2)は、すべての航空機に関して、避難可能ないずれか 1 つの空港に必ず避難するというのを、式(3)は、避難可能な空港に割り当てられた航空機の総数が、緩和した受け入れ可能な駐機容量を超えないことをそれぞれ示している。

以上の制約条件のもと、制約付き GA とするために次のペナルティー関数(4)を用いた。

$$h_{ik} = \begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2(E_{ik} - \beta)^2 & E_{ik} - \beta > 0 \\ 0 & E_{ik} - \beta \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、

α_1, α_2 : 制約違反に応じた定数 [h]

本研究の設定値はそれぞれ 10 : 10,000

β : $(c_{ik} \cdot MC_{ik} \cdot r_{ik})$ の整数部分

である。ペナルティー関数は緩和した駐機容量を基準に加算するか判定されるため、GA の内部処理では、その容量を超過した数に応じて適合度が落ちるよう、ペナルティー値 h_{ijk} を実現不可能な解候補に加算した。

着陸待ち時間を考慮する関数は以下(5)である。

$$w_{jk} = \frac{1}{2} E_{jk} (E_{jk} + 1) \cdot \frac{1}{60} \quad (5)$$

上式(5)は、各空港において割り当てられた航空機の数だけ累積で加算していく関数である。

そして、各航空機における避難（飛行）時間の計算には次の式(6a), (6b) を用いた。

$$t_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{V_k} + \gamma_1 \quad (6a)$$

$$t_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{V_k} + \gamma_2 \quad (6b)$$

ここで、

D_{ijk} : 影響を受ける空港から避難先の空港の候補までの大圏距離 [km]

γ_1, γ_2 : 離着陸時間に関する定数[h]

本研究の設定値はそれぞれ 35 / 60 : 15 / 60

V_k : 型番に応じた平均航行速度 [km/h] (表-1)

である。上式(6)は、駐機中の航空機であれば式(6a)を、航行中の航空機であれば式(6b)を用いて各飛行時間に 2 章 3 節の仮定に基づいた時間を加算する。

最後に、モデルの中で用いた値のうち上記で述べられなかったものを次にまとめる。

MC_{ik} : 使用不可能な各空港の最大駐機容量、すなわち避難すべき地上の最大航空機数

p_{ik} : 占有率 (MC_{ik} に対する駐機航空機の割合) ; 定数

$$0 < p_{ik} \leq 1.0, c_{jk} + p_{ik} = 1.0$$

(5) GA の設計

モデルのパラメータ設定等は GA の遺伝子（個体）と呼ばれる解候補の設計方法によって大きく変わる。本研究において、GA の計算時には、ある時間断面を想定して空港および航空機の緯度経度を取得するため、航空機から避難可能な各空港までの大圏距離、式(6)に基づく避難時間を先に計算しておく。これによって（避難する航空機数）×（避難可能な空港数）の飛行時間行列が作られる。GA の各遺伝子（個体）には 2 つの部分があり、1 つは各航空機がどの空港に避難するかを、避難可能な空港に割り当てられた番号によって識別する部分である。先に計算しておいた避難時間行列の行番号と割り当てのインデックス番号を対応させることで、割り当てられた番号から避難時間を参照でき、目的関数が計算される。そしてもう 1 つの部分には、駐機容量に関する

表-1 航空機の各型番における平均航行速度

Model	Velocity [km/h]	Model	Velocity [km/h]
A20N	840	B763	953
A21N	963	B764	988
A306	975	B772	1000
A310	850	B773	1000
A319	828	B777	1000
A320	863	B77L	1000
A321	863	B77W	1000
A330	1013	B787	1012
A332	977	B788	1012
A333	977	B789	1012
A343	977	BLCF	878
A345	1012	C130	704
A346	989	CRJ1	881
A359	1050	CRJ2	881
A380	1050	CRJ7	917
A388	1050	D228	434
AT43	494	DC10	1012
AT46	556	DH8A	484
B732	889	DH8B	573
B733	913	DH8C	528
B734	887	DH8D	650
B735	887	E170	929
B737	935	E190	963
B738	935	E75L	926
B739	935	E75S	926
B742	1025	MD11	876
B744	1012	MD83	938
B748	1018	MD90	938
B74D	1050	SF34	522
B752	953	SU95	963
B762	953	T204	975

るリストを作った。駐機容量を緩和する場合には、緩和を行った後のリストの駐機容量に基づいて、ペナルティー値などを加算する。この 2 つの部分の結合して 1 つの大きなリストとしたものを遺伝子（解候補）として設計した。交叉・突然変異に関しては、各航空機の空港の割り当てを表す部分のみに対して行われる設計とした。

4. 各種値の算出方法・シナリオ条件整理

(1) 駐機容量の算出・各空港の選定に関して

大規模火山噴火時に、航空機が避難すべき空港選択問題を解決するための基本的な制約として、本研究では可能な限り降機を優先させた場合を想定して駐機容量を考慮した。実際には、発着枠（単位時間あたりの離着陸数）を考慮する場合もあるが、本研

究においては、非常時における空港の活用を想定するため使用しない。駐機容量の具体的な算出方法は、まず大型機用、中型機用および小型機用でそれぞれスポット数を、AIS japan に掲載されている各空港の 2.8 APRONS, TAXIWAYS AND CHECK LOCATIONS DATA から数え上げた。その後、大型機用・中型機用スポットの合計数を各空港における駐機容量とした。

ただし、ICAO（国際民間航空機関）の第一巻・付録 14 の飛行場参照コードによると、各航空機は翼幅と特定の滑走路長での離着陸能力に関連する A~F の 6 つのグループに分類されている⁷⁾。これに基づいて、非常時において最低限の大きさの航空機を避難させられるようにするため、飛行場参照コードが A, B の空港に関して、本研究では使用しない。

(2) 避難航空機数の算出に関して

CARATS Open Data には 6 つの情報（時刻、仮想便名、緯度、経度、高度、型式）が記録されている。しかしながら、便ごとの発着地の情報はない。そこで、2017 年度の CARATS Open Data に付属された出発・到着空港推定ツール「MakeApt」のアルゴリズムを参考にし⁸⁾、出発地と目的地を推定した。そして、国内線および国内の空港に到着する航空機のデータのみ使用した。

避難すべき航空機は主に 2 パターンある。一つ目は CARATS Open Data の航路データを参照し、噴火開始想定時間の直後に観測された位置情報が影響範囲内にあるデータである。これを航行中の避難すべき航空機とした。二つ目は、火山灰の影響範囲内にある閉鎖予定空港に駐機している航空機である。閉鎖予定空港の駐機容量に占有率を掛け合わせたものが地上の避難航空機数となる。以上の合計を総避難航空機数とした。

(3) シナリオ設定

計算アルゴリズム上、最適化計算に時間がかかってしまうため、本研究においては、シナリオを細かく設定して各パターンをあらかじめ計算した。また、噴火する特定の火山は桜島とした。主なシナリオパターンは、噴火開始想定時間、火山灰の影響範囲、緩和量、噴火した際の風向きを細かく設定し決定する。

噴火開始時間は 6 時台から 23 時台まで 1 時間刻みで想定した。対象日時は、更新された CARATS Open Data に記録されている日時の中で一番新しい 2018 年 3 月 4 日である。このデータで、噴火開始想定時間における航空機の位置座標を逐次取得することによって、航行中の避難航空機数が算出される。

また、本研究における火山灰の想定最大拡散範囲は、図-1 のような北から東の向きを 4 分割にした範囲である。その影響範囲内において、桜島からの影響範囲を 100km から 1100km まで 100km ずつ拡大した場合の各パターンを異なるシナリオとした。

緩和率はすべての空港の駐機容量に対して一括で

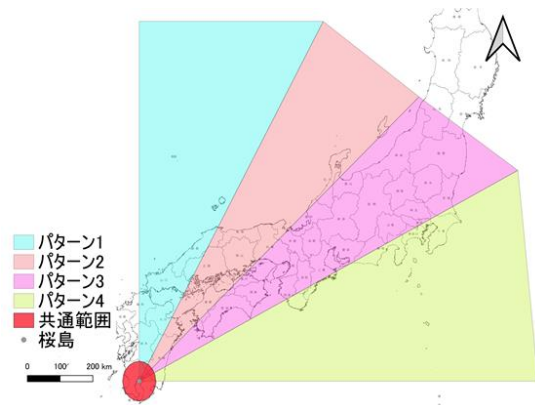


図-1 桜島噴火のパターン別火山灰影響範囲

5, 10, 15, 20%を掛け合わせて緩和した。

以上、本研究においては日時、影響範囲、緩和パターンを分け、それぞれのある組み合わせを 1 シナリオとして設定することで、時空間的で空港容量の緩和を考慮した事前予防的な避難シミュレーションを行った。

5. 感度分析

本研究の計算における諸条件のうち、すべての場合において値を固定している変数を次に示す。占有率 p_{ik} : 40%, 空き容量率 c_{jk} : 60%, 個体数 : 4000, 交叉率 : 0.89, 突然変異率 : 0.0089, 世代数 : 180 と設定した。

(1) 火山灰影響範囲による影響

まずは、すべての空港での緩和率を一律 5%として、風向き（パターン 1 からパターン 4）ごとの火山灰影響範囲の拡大による総避難時間の変化を見る。シミュレーションは、乱数を固定し各シナリオに対して 1 回のみ行った。ただし、時系列の影響を省くため、全時刻の平均としての総避難時間をこの節では着目した。影響範囲の変化によって影響を受ける要素は、総避難時間、駐機中の避難航空機数および駐機容量である。

影響範囲によってのみ左右される数値、駐機容量（緩和しない場合、一括で 5, 10, 15, 20%緩和した場合）、避難すべき駐機中の航空機数および全時刻平均における総避難時間を図-2 に示す。図-2 から避難すべき地上の航空機の数によって総避難時間と駐機容量が変化するのがわかる。総避難時間に着目すると、パターン 1, パターン 2 とパターン 3, パターン 4 で大きく違うことがわかる。これは航行中の航空機や地上に駐機している航空機数が大きく違うということが考えられる。つまり閉鎖空港の規模によって総避難時間や駐機容量が大きく変わるといえる。また、地上の航空機数が比較的少ないパターン 1 やパターン 2 では桜島から 600~700km の範囲においては総避難時間が 14 時間前後に及ぶことがわかる。

このことから、駐機容量や避難航空機数のみに着

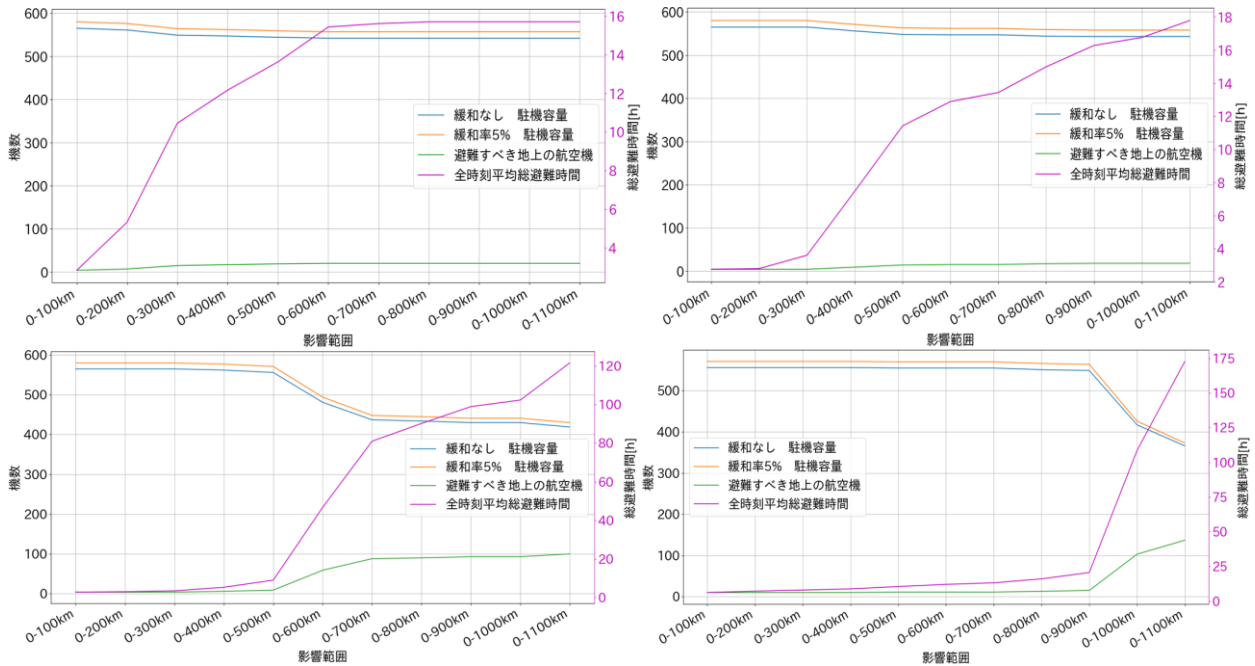
目した場合、パターン 3 とパターン 4 の範囲が危険であるだろう。しかし、総避難時間に着目すると桜島から 600~700km 付近においてはどのパターンにおいても非常に大きくなっているため、やはり事前の対策が必要だろう。

(2) 時系列 (噴火開始想定時間) による影響

ここでは、5.1 節と同様にすべての空港での緩和率を一律 5% として、風向き (パターン 1 からパターン 4) ごとの総避難時間の変化を見る。シミュレーションは、乱数を固定し各シナリオに対して 1 回の

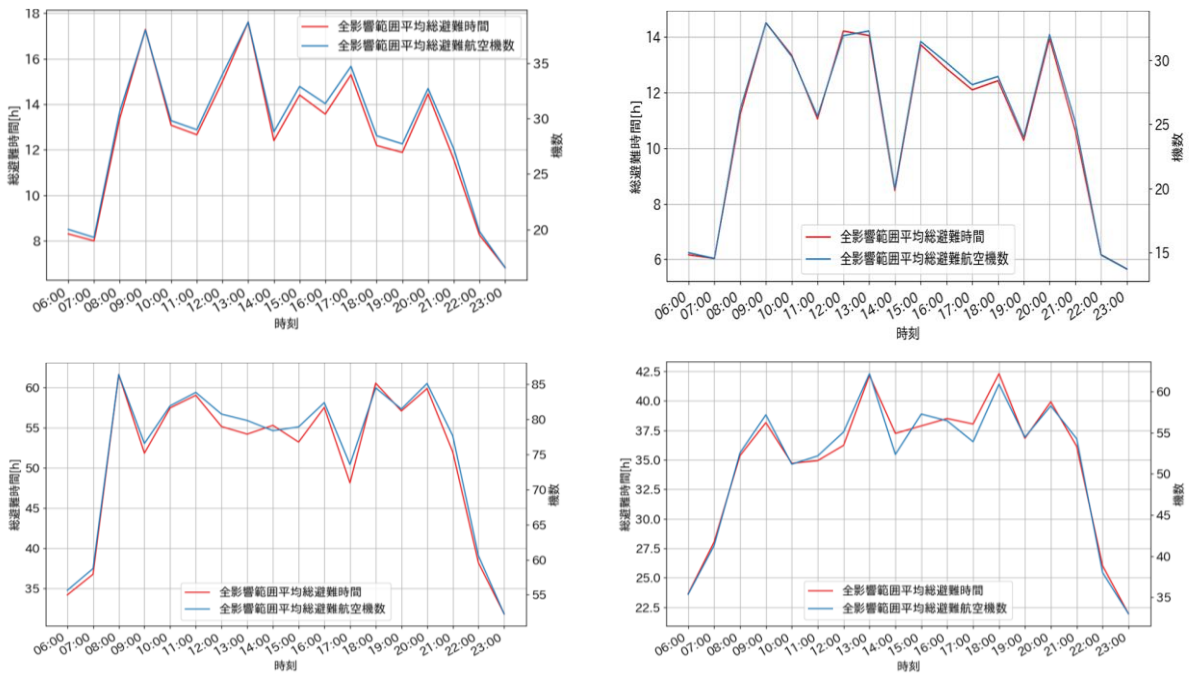
み行った。ただし、影響範囲の変化を省くため、全影響範囲の平均としての総避難時間をこの節では着目した。噴火開始想定時間の変化によって影響を受ける要素は、総避難時間、航行中の避難航空機数および総避難航空機数である。

噴火開始想定時間によってのみ左右される数値、全影響範囲平均における総避難時間と総避難航空機数を図-3 に示す。図-3 から、どのパターンも総避難航空機数に応じて総避難時間が変化し、総避難航空機数は早朝や深夜で少なく日中で多くなっていることがわかる。総避難時間に着目したところ、図-2



(左上:パターン 1, 右上:パターン 2, 左下:パターン 3, 右下:パターン 4)

図-2 時間に依存しない数値データ



(左上:パターン 1, 右上:パターン 2, 左下:パターン 3, 右下:パターン 4)

図-3 影響範囲を考慮しない数値データ

から、パターン 1 では、9 時、13 時、パターン 2 では、9 時、13 時、20 時、パターン 3 では、8 時、11 時、18 時、20 時、パターン 4 では、13 時、18 時の場合にそれぞれ総避難時間が増大していることがわかる。

このことからパターン 3、4 に比べて総避難時間や総避難航空機数の少ないパターン 1、2 は共通して 9 時、13 時に総避難時間が増大している。そのため、パターン 1、2 においてこの時間帯に火山噴火が発生した場合より大きな被害をもたらすものと推測される。

パターン 3、4 においては、パターン 1、2 と比べそもそもの避難航空機の数に違いがあり、早朝や深夜において総避難時間が大きくなっている。そのため総避難時間が増大している時間帯だけでなく早朝や深夜に火山噴火が発生した場合でも大きな被害をもたらすものと推測される。

(3) 火山灰影響範囲と噴火開始想定時間の影響

最後に、5.1、5.2 節と同様にすべての空港での緩和率を一律 5%として、火山灰影響範囲と噴火開始

表-2 影響範囲・噴火開始想定時刻別の総避難時間[h]

(a)パターン 1											
時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	2.4	4.1	7.4	8.3	9.1	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
7:00:00	2.0	3.6	7.4	8.4	9.1	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
8:00:00	2.5	4.9	10.6	13.4	15.2	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
9:00:00	3.3	6.2	13.2	15.7	18.3	21.7	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3
10:00:00	2.5	5.7	10.1	11.1	12.7	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
11:00:00	2.9	6.1	10.6	11.6	13.3	15.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
12:00:00	3.3	5.8	13.3	14.9	16.1	18.3	18.3	18.8	18.8	18.8	18.8
13:00:00	4.1	7.4	13.3	15.2	17.5	22.3	22.3	22.9	22.9	22.9	22.9
14:00:00	2.0	4.9	9.6	12.4	13.7	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
15:00:00	4.2	6.3	13.3	15.3	16.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2	17.2
16:00:00	3.3	6.2	11.0	12.3	14.9	16.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
17:00:00	3.8	6.7	12.4	14.3	15.9	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2
18:00:00	2.9	5.3	9.6	11.9	14.2	14.6	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1
19:00:00	2.5	5.3	10.1	12.0	12.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
20:00:00	3.3	7.0	12.4	14.3	15.2	17.4	17.4	18.0	18.0	18.0	18.0
21:00:00	2.8	4.5	10.1	12.0	13.7	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1
22:00:00	1.6	3.2	7.5	8.8	9.6	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
23:00:00	1.6	2.8	6.1	7.1	7.8	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3

(b)パターン 2											
時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	2.0	2.0	2.8	4.9	6.9	7.4	7.4	8.2	8.7	8.7	8.7
7:00:00	2.0	2.0	2.0	4.5	6.5	7.0	7.0	8.3	8.8	8.8	9.3
8:00:00	2.5	2.5	3.2	8.3	12.3	14.7	14.7	15.9	16.4	16.4	16.4
9:00:00	3.3	3.3	4.1	8.3	13.5	16.8	19.4	20.7	22.7	22.7	24.6
10:00:00	2.5	2.5	3.2	8.7	14.6	16.6	16.6	18.5	19.7	20.7	23.0
11:00:00	2.9	2.9	2.9	6.6	11.8	12.7	13.1	15.0	16.6	17.7	19.3
12:00:00	3.3	3.3	3.7	9.6	13.1	15.0	16.5	19.9	22.8	24.3	24.6
13:00:00	3.7	4.1	6.0	9.1	13.6	15.8	16.8	18.2	21.1	21.3	24.7
14:00:00	2.0	2.0	2.0	4.9	9.1	10.0	10.0	11.4	12.9	13.4	15.4
15:00:00	4.2	4.2	4.9	10.4	14.5	15.4	15.9	17.6	18.9	20.7	24.1
16:00:00	2.9	3.3	4.8	9.1	13.5	15.4	16.4	17.3	18.4	20.0	20.4
17:00:00	3.8	3.8	4.5	7.9	12.6	14.5	14.5	15.8	18.6	18.6	18.6
18:00:00	2.9	2.9	3.6	9.1	13.6	15.1	15.6	17.5	18.4	18.4	19.5
19:00:00	2.5	2.5	3.2	7.0	10.5	12.8	12.8	14.7	15.2	15.7	16.2
20:00:00	3.3	3.3	5.3	9.5	14.0	15.4	17.7	20.3	20.8	21.3	22.3
21:00:00	2.4	2.4	4.4	8.2	12.6	13.1	13.1	14.4	15.4	15.4	15.4
22:00:00	1.6	1.6	2.0	4.5	6.9	7.4	7.4	8.3	9.3	9.3	9.3
23:00:00	1.6	1.6	2.0	4.1	6.1	7.0	7.0	7.8	8.3	8.3	8.3

(c) パターン 3

時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	2.0	2.0	2.0	3.3	6.6	35.9	59.4	61.7	65.3	65.3	72.7
7:00:00	2.0	2.0	2.4	3.3	4.5	34.2	59.5	66.0	70.9	74.5	85.0
8:00:00	2.5	3.3	4.6	7.6	11.2	52.0	92.4	112.0	122.7	122.4	146.8
9:00:00	3.3	3.3	4.2	5.8	8.7	43.1	79.2	92.5	98.6	105.1	126.3
10:00:00	2.5	2.5	3.3	5.0	9.7	50.5	90.8	99.5	113.8	115.0	139.3
11:00:00	2.9	2.9	3.3	5.4	11.0	53.5	92.2	101.7	114.0	117.7	144.4
12:00:00	3.3	3.3	3.7	5.8	10.9	49.6	85.1	95.2	107.3	112.3	129.7
13:00:00	3.7	4.1	4.5	6.6	10.0	51.6	86.2	94.4	102.9	105.5	126.4
14:00:00	2.0	2.9	2.9	4.1	9.6	50.8	84.5	96.6	103.6	107.4	143.6
15:00:00	4.2	5.1	5.1	6.7	9.7	45.4	84.2	90.5	99.8	105.9	128.6
16:00:00	2.9	2.9	3.7	7.1	9.3	50.8	92.2	98.6	111.2	114.4	139.3
17:00:00	3.8	4.2	4.6	5.8	9.1	44.3	75.2	83.5	89.2	96.5	113.1
18:00:00	2.9	2.9	2.9	4.5	10.5	51.5	92.7	103.1	116.1	125.8	152.8
19:00:00	2.5	2.5	3.3	4.6	9.2	52.7	90.0	100.8	115.0	116.4	130.7
20:00:00	3.3	3.3	3.7	7.1	11.0	52.9	89.0	105.4	115.2	123.1	144.2
21:00:00	3.3	3.7	4.1	7.0	10.8	49.5	83.8	94.0	99.9	99.0	116.4
22:00:00	1.6	1.6	2.0	3.3	6.1	40.6	66.8	69.6	73.5	73.8	80.9
23:00:00	1.6	1.6	1.6	2.5	4.0	32.5	55.2	58.4	62.2	62.2	68.2

(d) パターン 4

時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	4.8	4.8	4.8	4.8	5.3	6.2	6.2	7.1	9.7	75.2	131.1
7:00:00	4.9	4.9	5.3	5.7	6.6	8.0	8.5	10.8	12.9	89.8	150.9
8:00:00	6.2	8.1	9.0	9.9	10.8	11.2	12.1	16.0	20.9	112.1	172.5
9:00:00	7.6	8.6	9.5	10.4	12.6	15.4	16.3	19.8	24.2	113.1	182.1
10:00:00	6.3	7.7	7.7	9.1	11.3	11.8	12.3	14.6	20.5	110.1	170.4
11:00:00	6.7	7.2	8.1	9.0	11.2	12.6	12.6	16.9	20.3	108.2	171.6
12:00:00	6.7	8.6	9.5	10.0	11.3	13.6	15.4	18.9	22.0	111.1	171.5
13:00:00	7.6	8.6	10.4	12.8	15.8	17.7	19.2	21.2	28.9	128.1	193.5
14:00:00	4.8	5.8	6.2	7.2	10.0	11.5	13.0	17.0	22.6	122.4	189.3
15:00:00	7.7	8.6	10.5	10.9	12.7	16.1	16.6	19.0	23.4	108.1	183.2
16:00:00	5.8	8.2	9.1	10.0	11.9	13.3	16.2	19.3	25.0	114.4	190.5
17:00:00	7.7	7.7	8.1	9.0	9.9	12.9	14.2	16.6	21.2	120.3	190.9
18:00:00	6.2	8.1	9.1	10.8	13.5	15.4	17.8	20.9	28.5	127.2	207.7
19:00:00	7.2	8.2	9.6	9.6	10.9	13.3	14.2	17.1	21.4	112.3	181.4
20:00:00	6.7	7.6	9.0	10.8	12.2	14.7	16.6	19.6	25.2	126.3	190.6
21:00:00	5.8	8.2	9.1	10.0	12.3	12.7	14.3	18.3	23.2	110.6	173.2
22:00:00	4.4	4.4	4.4	4.4	5.9	5.9	6.3	9.1	12.8	90.5	138.1
23:00:00	4.4	4.4	4.4	4.4	5.3	5.3	5.3	6.2	8.2	73.7	119.9

想定時間の 2 軸による、風向き（パターン 1 からパターン 4）ごとの総避難時間の変化に着目した。影響範囲・噴火開始想定時刻別の総避難時間を表-2 に示す。

表-2 から、火山灰影響範囲については 5.1 節で見

てきたような特徴が見て取れる。パターン 1 においては、600km 以上では総避難時間が変わらないこと、パターン 3 においては、600km から、パターン 4 においては、1000km から急激に総避難時間が増大している。

噴火開始想定時刻についてみるとパターン 1 やパターン 2 は、早朝や深夜を除いて、突出した総避難時間は見られず、どの時間帯においても危険なことが分かる。またパターン 3、パターン 4 においてはピークは 18 時となっている。

パターン 1 では、300km 以降急激に総避難時間が増大している。そのため比較的小規模な噴火でも被害が大きくなる可能性がある。

6. おわりに

本研究では、構築したモデルに対して、緩和率、影響範囲、時系列、風向きの要素をシナリオとして場合分けをし、その感度分析を行った。

その結果、閉鎖空港の規模によって、総避難時間、駐機容量に大きな影響を及ぼすことが確認された。また、パターン 3、パターン 4 において総避難時間、総避難航空機数ともに大きいため、その範囲を問題視されるが、パターン 1、パターン 2 においても総避難航空機数に対する総避難時間は大きいことが結果からわかるため対策していくことが必要と考える。しかしながら、本研究で適用、構築した最適航空機避難モデルは風向きを一定方向に固定しているため風向きの変化には対応できない、そのため実際に大規模火山噴火が起こった場合には、より大きな被害をもたらされると予測される。

今後は、過去の桜島噴火の影響範囲や文献などを基に、あらゆる風向きの変化に対応した最適航空機避難モデルを構築していくことが重要課題だろう。また、現在は COVID-19 により、通常時の航空輸送や空港運用がなされていないため、その状況下を考慮することも必要になってくるであろう。

謝辞：本研究は国土交通省航空局が提供する CARATS Open Data を用いた。また、京都大学防災研究所「大規模噴火時の航空輸送の危機管理体制に関する研究」研究会における議論を参考にさせて頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) ANA ホールディングス株式会社：ていくおふ、No.157, pp. 5-15, 2019
- 2) Saharat ARREERAS, 下谷大, 有村幹治：A Study on Shelter Airport Selection during Large-scale Volcanic Disasters using CARATS Open Dataset, 土木計画学研究・講演集, Vol. 60, No. 35-08, 2019.
- 3) 田畑凌, Saharat ARREERAS, 有村幹治：大規模火山噴火時の降灰影響範囲に応じた航空機避難パターンに関する感度分析 土木計画学研究・公演集, Vol. 64, No. 10-05, 2021
- 4) 吉谷純一, 安田成夫, Jonas ELIASSON, 味喜大介, 井口正人：火山噴火航空機事故防止の取組と大気火山灰濃度の航空機観測研究, エアロゾル研究 (*Journal of Aerosol Research*), Vol.30, No.3, pp. 161-167, 2015.
- 5) National catalogue of the active volcanoes in Japan (日本活火山総覧)・90 Sakurajima, Vol. 4, pp. 1319-1367, 2013.
- 6) 新堀敏基, 相川百合, 福井敬一, 橋本明弘, 清野直子, 山里平：火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測—2009 年浅間山噴火の事例—, 気象研究所研究報告, Vol. 60, No. 35-08, 2019.
- 7) ICAO : Aerodrome Design and Operations, Aerodrome reference code in Annex 14 - volume 1, p.1-14
- 8) 国土交通省：CARATS オープンデータの概要説明 <https://www.mlit.go.jp/common/001321736.pdf> (最終閲覧日：2022/3/6)

Sensitivity analysis of aircraft evacuation patterns according to the range of ash fall effect due to wind direction during a large-scale volcanic eruption

Daisuke Chida, Ryo TBATA, Saharat ARREERAS and Mikiharu ARIMURA