

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

田畑 凌¹・ARREERAS Saharat²・有村 幹治³

¹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

² Member of JSCE, D. Eng. Candidate, Division of Sustainable and Environmental Engineering
(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)
E-mail: 19096002@mmm.muroran-it.ac.jp

³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

火山噴火時における航空機避難問題に関しては、我が国においてもその議論が進んできているが、未だ研究蓄積は少ない。筆者らは先行研究において、駐機容量（空港に駐機できる最大航空機数）を基準とする、大規模火山噴火時における航空機避難モデルを構築した。その中で、最適化手法に関しては遺伝的アルゴリズム（GA）を、主なデータセットとして CARATS Open Data を用いた。しかしながら、このモデルではアルゴリズムの特性上、最適化計算に時間がかかるため、噴火が発生した時点で最適化された避難経路結果を求める計算を開始しても実際の避難には間に合わないという問題点が指摘された。

そこで本研究では、このモデルの精緻化を行いながら、諸条件を詳細に設定、変化させてあらかじめ計算を行い、感度分析により駐機容量と避難航空機数の時空間的な関係やその傾向を事前予防的に掴むことを目的とした。

Key Words: *genetic algorithm, large-scale volcanic disasters, shelter airport selection*

1. はじめに

気象や自然災害によって、航空輸送は甚大な影響を受ける。特に、大規模火山噴火に関して、2010年の Eyjafjallajökull や Merapi 火山の噴火により、ヨーロッパや東南アジアの航空輸送や経済が著しい被害を受けた。その主な原因は、火山灰であった。

火山灰の被害は、地上・航行中の航空機や空港など多岐に及ぶ。特に、飛行中の航空機のエンジンが火山灰を吸い込むと、火山灰中のガラス成分が高温になって溶けてへばりつき、エンジンを停止させることで航空機が墜落する恐れがある。事例としては、ブリティッシュ・エアウェイズ 9 便エンジン故障事故（1982 年）などが挙げられ、こうした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 月を除いては上空で西から東に吹くことから、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、桜島の大規模火山噴火による航空路への多大な影響を指摘している¹⁾。そこで本研究におい

ては、桜島が噴火した場合をモデルケースとした。

我が国の航空防災の取り組みには、国土交通省航空局管制部が開発し、2016 年に運用を開始している「緊急ダイバート運航総合支援システム」がある²⁾。このシステムは、南海トラフ沖地震などの大規模地震により、主要国際空港（羽田・成田空港）が閉鎖される事態を想定し、両空港を目的地として飛行している航空機に対して、他空港へのダイバート（目的地の変更）の選定を支援するものである。しかしながら、大規模な火山噴火が起こると、かなり広範囲に火山灰が拡散され、多数の空港が閉鎖に追い込まれる。そのような状況では、航空機のダイバートおよび閉鎖される空港から避難先空港の選定支援は容易ではないため、新たなモデルの構築が必要となる。

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には以下のものがある。

藏原らは、国内線航空交通ネットワークにおいて、大

規模噴火時の空港避難処理能力を評価する手法を提案した。結果は、羽田空港など大規模な空港が影響を受ける場合、ダイバート及び避難の需要が安全な空港容量を上回る可能性があることを示唆した³⁾。

遺伝的アルゴリズム (以下, GA ; Genetic Algorithm) 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しての先行研究で ARREERAS⁴⁾ が, 空港や航空機の位置座標 (緯度経度) 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⁴⁾。その際には, 国土交通省が提供する空港情報である AIS japan⁵⁾, 2015 年から国土交通省航空局が提供開始した CARATS Open Data⁶⁾ を用いて, 避難する航空機数や避難先となる各空港の降機可能容量を算出していた。しかしながら, 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) を一時的に緩和する (増加させる) ような運用について, このモデルでは考慮されていなかった。

そこで筆者らは, 先行研究において駐機容量の緩和を考慮して, 航空機の避難先空港の組み合わせ最適化問題を再度定式化した⁷⁾。そして, 航空機の総避難時間を最小化する目的関数のもと, GA を用いて解く最適化モデルを提案した。しかしながら, GA の特性上, 計算に時間がかかり, 発災時点で最適化計算をしても遅いという問題点が指摘された。また, シナリオの想定が固定化されており, 複数のシナリオ設定に対して, 得られた最適解がどこまでの有効性を示すかは不透明であった。

以上を踏まえて, 本研究では, モデルの精緻化を行いつつ, 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, 感度分析を行う。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。

2. 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, 空気中火山灰濃度がごく少量であればエンジンに対してはほぼ影響がないことが研究で確認されている⁸⁾。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, 文献⁹⁾等から実際に降灰が予測される範囲とし, この範囲内の空港は避難先空港候補から除外する。影響範囲内にある空港に駐機しているか, 影響範囲内の空域を航行中の航空機は, 火山灰の影響を受けない他の空港に避難させるものとした。

(2) 目的関数の設定に関する仮定

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入れ込むことによって, 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, 避難距離に関しては, 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に関しては, 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。地上の航空機に関しては, 型番の情報がないため, 主要な型番の平均航行速度をランダムに割り当てた。さらに, 地上の駐機航空機であれば 35 分 (離陸時間 15 分と着陸時間 20 分の合計) を, 航行中の航空機であれば着陸時間 (20 分) のみを各避難時間に加算し, 簡易であるが高度を考慮した。

(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。

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} e_{ijk} \neq 0 \quad \forall j, k \quad (2)$$

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

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
 $0 < c_{jk} \leq 1.0$ ($c_{jk} + p_{ik} = 1.0$)
 r_{jk} : ある一定の確率でランダムに駐機容量を緩和する
 定数 (値 : 選択される確率)

である. 全ての避難可能な空港, 割り当てられた各航空機について, 式(2)は避難可能な空港が火山灰の影響範囲外にあるということ, 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(6) - 1, 2 を用いた.

$$t_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{V_k} + \gamma_1 \quad (6) - 1$$

$$t_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{V_k} + \gamma_2 \quad (6) - 2$$

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(6) - 1 を, 航行中の航空機であれば式(6) - 2 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

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

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

(5) GA の設計

GA の遺伝子 (個体) と呼ばれる解候補の設計方法によって, モデルのパラメータ設定等が大きく変わる. 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つの部分を結合して 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。

3. 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、本研究では駐機容量を考慮した。これは可能な限り降機を優先させた場合を想定している。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¹⁰⁾。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、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¹¹⁾、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 10 分刻みで想定した。ただし、結果に関してはまとめる際には 1 時間ピッチで示す。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 のように設定した。これは、

- 1, 桜島の周囲 50km の範囲
- 2, 桜島と以下の 4 点を頂点とする五角形の範囲

桜島から東に 400km の地点で南北に 400km の 2 点
桜島から東に 1200km の地点で南北に 900km の 2 点の 2 つを含む範囲である。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。

そして、駐機容量の緩和を感度分析する場合には、緩和しない場合と限度を 5, 10, 15, 20% のいずれかとして、0 からそれぞれの限度の範囲を一様分布で各駐機容量に対して緩和させる場合を想定した。それ以外を感度

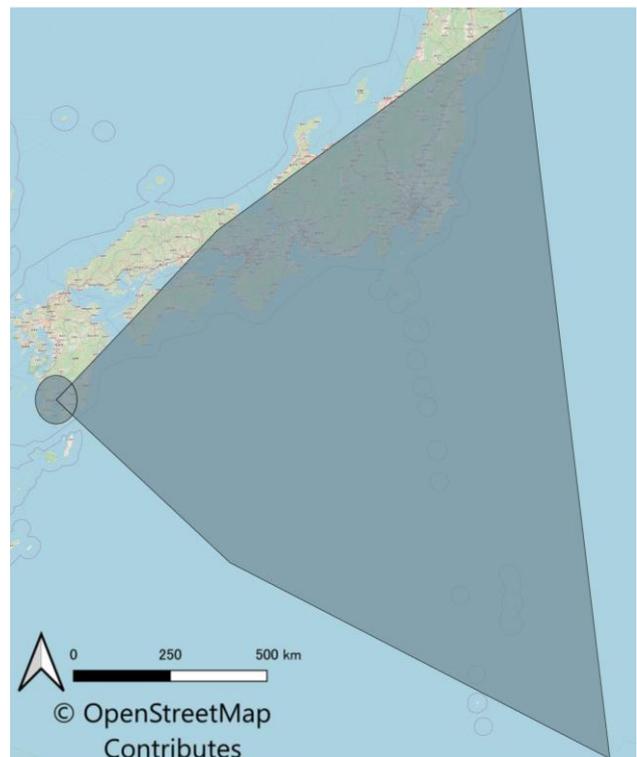


図-1 本研究における桜島噴火の火山灰影響範囲

分析する場合、緩和率はすべての空港の駐機容量に対して一括で 10%、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。

4. 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は以下である。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) 駐機容量の緩和率による影響

まずは、シナリオを固定して駐機容量の緩和率による影響を見た。シナリオは、影響範囲を 0 - 800 km、噴火開始想定時間を 12 時とした。緩和率は、3 章 3 節に基づいて、一様乱数で各駐機容量を緩和するため、その組み合わせはほぼ無限にある。よって、500 回の試行（シミュレーション）をし、結果として駐機容量を違反した解を含むか除外するかを場合分けして結果を示す。ただし、示す総避難時間の値の中に、ペナルティー値は含まない。

緩和率を一様分布で発生させ、シミュレーションを行った場合の総避難時間の分布を図-2 に示す。また、駐機容量違反解を含むすべての場合の解分布を図-3 に示す。緩和率の限度が 20% を超えると、総避難時間の平均が大きく減少していることがわかる。しかしながら同時に、駐機容量制限を違反する解の個数も増加している。また、緩和率の幅が 0 - 15% の場合においては、総避難時間の平均が緩和しない場合の平均を超えてしまっているが、総避難時間が短縮された解も存在している。これは駐機容量の緩和によって、解の選択肢が増大することに対して、ハイパーパラメータが固定されており、十分な最適化が行われなかった、もしくは解の探索がうまく行われなかった可能性がある。

(2) 火山灰影響範囲による影響

次に、すべての空港での緩和率を一律 10%として、火山灰影響範囲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見る。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 10、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-4 に示す。また、避難すべき地上の駐機航空機数や、閉鎖空港に関してその具体的な内訳を表-2 に示す。影響範囲が広がるにつれて閉鎖空港が多くなり、600km を超えると関西国際空港や大阪国際空港が、1000km を超えると羽田空港が閉鎖に追い込まれるため、航空機数が急激に増える。それに対して、避難先空港全体の駐機容量（合計空き容量）は、影響範囲が拡大するにつれて

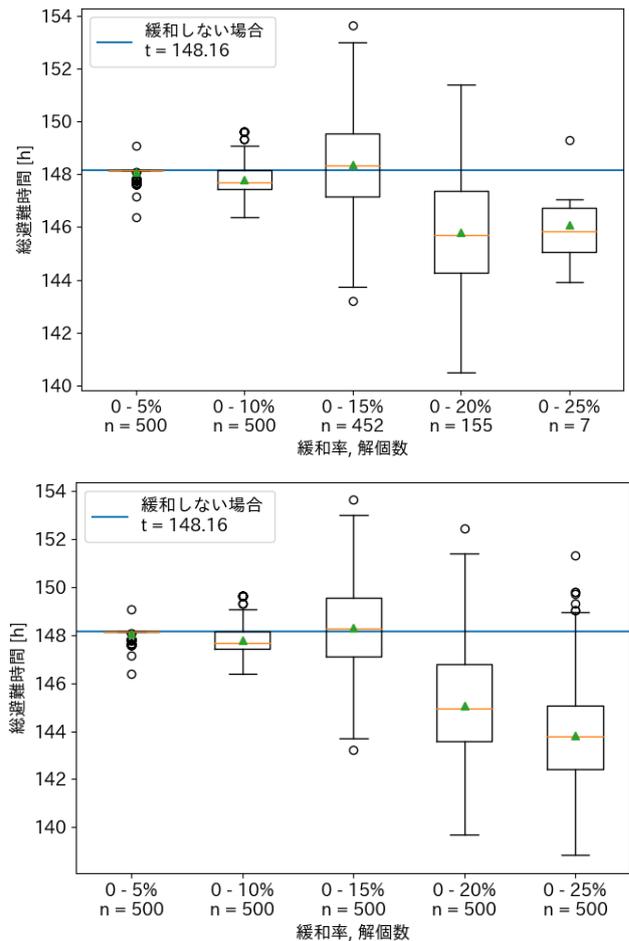


図-2 緩和率を一様分布で発生させた場合の総避難時間

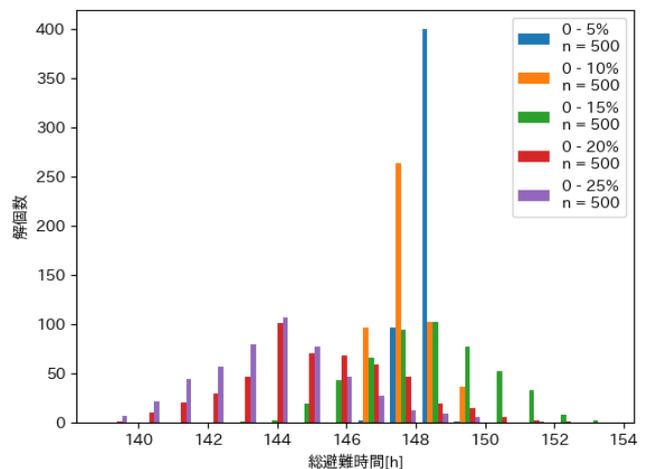


図-3 駐機容量違反解を含むすべての場合の解分布

減少する。また、計算の特性上、駐機容量を緩和する場合には、大きな空港がより災害時に航空機を受け入れられる、すなわち駐機容量を緩和できるとみなして計算しているため、避難先空港として大きな空港が使用出来ない状態である、火山灰影響範囲が 1000km 以上の場合には、避難先の駐機容量に対してより大きな緩和率を掛けなければ、その影響は微々たるものになる。このことは、そもそも駐機容量が大きくない空港に対してもいえる。

また、総避難航空機数は、噴火開始想定時刻や、各避難先空港の空き容量率、各閉鎖空港の占有率および影響範囲によって左右されるものの、駐機容量の緩和を一切考慮しない場合には概ね 1000km 以上の場合に、総避難

航空機数が、避難先空港の総空き容量を超えてしまう可能性が高いことが示唆される。

(3) 時系列（噴火開始想定時間）による影響

ここでは、2 節と同様にすべての空港での緩和率を一律 10%として、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見る。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。ただし、これらは火山灰影響範囲と噴火開始想定時間の 2 軸によって変化するため、最後の 4 節でも改めて 2 軸の影響を考慮し説明する。

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-5 に示す。総避難航空機数に応じて、総避難時間も同じように変化していることがわかる。総避難時間のピークは 18 時になっており、8、13、20 時にも総避難時間が増大している。このことから、この時間帯に発生する火山噴火はより大きな被害をもたらすものと推測される。

表-2 火山灰影響範囲による駐機中の避難航空機数

影響距離	閉鎖空港	避難航空機数	累積
0-100km	宮崎	6	10
	鹿児島	4	
-400km	高知	2	12
-500km	徳島飛行場	1	16
	南紀白浜	1	
	高松	2	
-600km	関西国際	22	66
	神戸	4	
	大阪国際	24	
-700km	中部国際	29	95
-800km	静岡	2	99
	名古屋飛行場	2	
-900km	八丈島	1	102
	大島	1	
	松本	1	
-1000km	羽田	88	190
-1100km	福島	2	227
	成田	34	
	茨城	1	

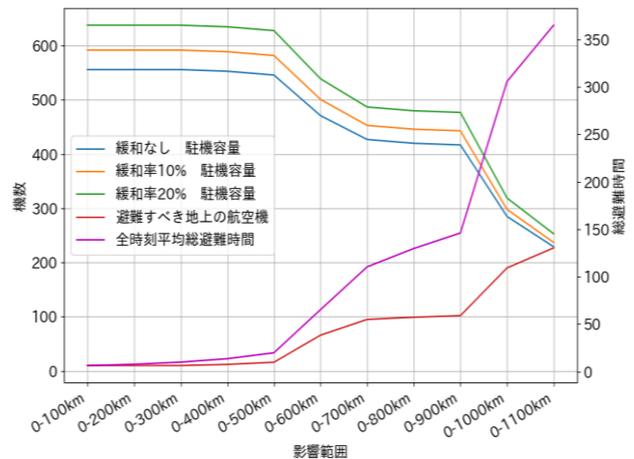


図-4 影響範囲にのみ依存する数値データ

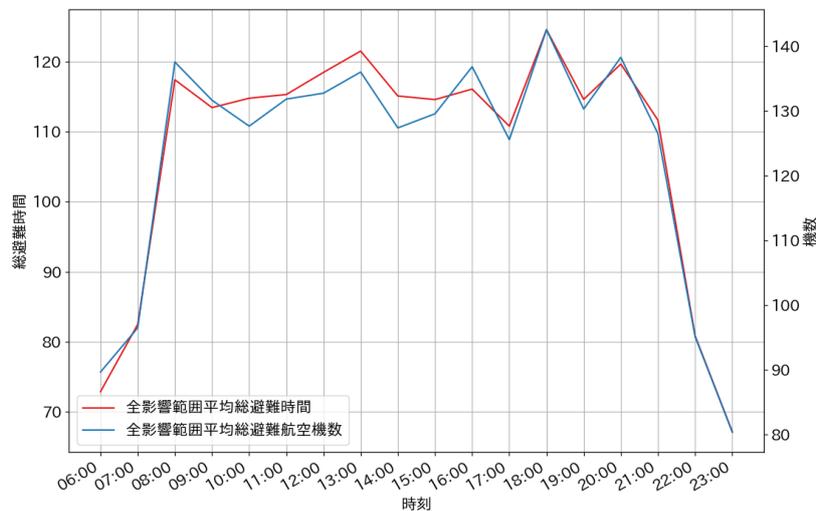


図-5 時刻にのみ依存する数値データ

(4) 火山灰影響範囲と噴火開始想定時間の影響

最後に、2, 3 節と同様にすべての空港での緩和率を一律 10%として、火山灰影響範囲と噴火開始想定時間の 2 軸によって総避難時間等がどのように変化するかを見る。影響範囲別・噴火開始想定時刻別の、総避難時間を表-3に、それに対応する駐機容量制限違反数を表-4に、総避難航空機数を表-5に、全避難先空港の合計緩和駐機容量から総避難航空機数を引いた合計空きスロット数を

表-6にそれぞれ示した。

表-3 から、これまでの 2, 3 節で見てきたような特徴が見て取れる。18 時にピークを迎えていたり、火山灰影響範囲が 600km, 1000km を超えると急激に総避難時間が増大している。

表-4 から、火山灰の影響範囲が 1000km 以上に及ぶ場合、駐機容量制限違反を超えて割り当てがされている。この原因について表-6が示しており、そもそも割り当て

表-3 影響範囲・噴火開始想定時刻別の総避難時間[h]

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	6.3	8.6	13.2	45.1	70.3	74.8	82.0	207.5	284.0
7:00:00	4.9	4.9	6.2	8.7	10.8	43.9	75.3	86.5	97.8	249.7	318.4
8:00:00	6.2	9.0	14.0	18.8	23.8	71.4	124.2	155.5	179.0	303.0	386.6
9:00:00	8.1	9.6	11.7	14.5	21.2	69.4	117.6	143.8	157.8	308.9	385.3
10:00:00	6.3	7.7	9.1	12.3	20.8	67.8	114.6	134.4	162.3	350.9	376.4
11:00:00	7.2	8.1	10.0	13.1	22.3	73.2	121.5	147.3	163.0	316.7	386.0
12:00:00	7.2	9.1	12.1	16.2	23.4	70.8	120.7	149.5	161.5	353.9	378.8
13:00:00	7.6	9.0	12.4	18.4	26.2	78.2	132.0	145.6	166.9	360.9	379.5
14:00:00	4.8	6.7	8.8	11.0	20.5	67.9	113.7	143.0	151.7	350.4	387.6
15:00:00	8.1	10.0	12.4	16.4	21.5	68.6	116.4	136.5	150.0	337.3	383.3
16:00:00	6.7	9.1	12.6	18.3	22.7	72.9	131.7	145.8	167.1	292.7	397.3
17:00:00	7.7	8.1	12.7	16.2	21.3	67.2	107.1	128.0	140.7	336.6	373.0
18:00:00	6.7	8.6	10.5	15.1	25.2	77.2	136.1	163.1	191.7	318.6	417.6
19:00:00	7.2	8.2	10.5	12.4	19.4	72.9	125.4	139.0	158.5	322.7	384.6
20:00:00	6.7	7.6	10.4	16.3	22.7	76.4	130.4	154.8	180.5	312.4	398.1
21:00:00	6.7	9.6	11.5	16.3	23.0	67.4	112.9	133.7	148.1	337.8	361.0
22:00:00	4.4	4.4	4.8	7.2	11.7	48.2	75.9	87.1	95.4	249.2	300.7
23:00:00	4.4	4.4	4.4	5.2	7.8	36.9	61.7	67.0	75.5	195.0	275.6

表-4 影響範囲・噴火開始想定時刻別の駐機容量制限違反数

時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
7:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
8:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	135
9:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	129
10:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	122
11:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	130
12:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	125
13:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	131
14:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	132
15:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	128
16:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	145
17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	114
18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	163
19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	127
20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	144
21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	109
22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46
23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11

表-5 影響範囲・噴火開始想定時刻別の総避難航空機数

時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	11	11	14	19	29	82	111	115	121	213	260
7:00:00	11	11	14	19	24	80	114	126	133	240	289
8:00:00	14	20	30	40	50	118	164	189	205	319	364
9:00:00	18	21	26	32	46	114	159	179	191	304	358
10:00:00	14	17	20	27	45	112	157	170	189	302	351
11:00:00	16	18	22	29	48	119	161	180	193	305	359
12:00:00	16	20	26	35	50	117	162	180	194	306	354
13:00:00	17	20	27	39	54	125	168	179	196	311	360
14:00:00	11	15	19	24	44	112	153	173	186	303	361
15:00:00	18	22	27	35	46	113	158	170	184	295	357
16:00:00	15	20	27	39	48	119	170	182	199	312	374
17:00:00	17	18	27	34	45	112	151	165	176	293	343
18:00:00	15	19	23	33	54	124	174	190	211	333	392
19:00:00	16	18	23	27	42	118	161	174	191	307	356
20:00:00	15	17	23	36	49	122	168	187	205	326	373
21:00:00	15	21	25	35	49	112	154	170	182	290	338
22:00:00	10	10	11	16	26	85	117	126	134	236	275
23:00:00	10	10	10	12	18	69	99	104	110	202	240

表-6 影響範囲・噴火開始想定時刻別の合計空きスロット数

時刻	影響範囲										
	0-100km	-200km	-300km	-400km	-500km	-600km	-700km	-800km	-900km	-1000km	-1100km
6:00:00	581	581	578	570	553	419	342	331	322	85	-23
7:00:00	581	581	578	570	558	421	339	320	310	58	-52
8:00:00	578	572	562	549	532	383	289	257	238	-21	-127
9:00:00	574	571	566	557	536	387	294	267	252	-6	-121
10:00:00	578	575	572	562	537	389	296	276	254	-4	-114
11:00:00	576	574	570	560	534	382	292	266	250	-7	-122
12:00:00	576	572	566	554	532	384	291	266	249	-8	-117
13:00:00	575	572	565	550	528	376	285	267	247	-13	-123
14:00:00	581	577	573	565	538	389	300	273	257	-5	-124
15:00:00	574	570	565	554	536	388	295	276	259	3	-120
16:00:00	577	572	565	550	534	382	283	264	244	-14	-137
17:00:00	575	574	565	555	537	389	302	281	267	5	-106
18:00:00	577	573	569	556	528	377	279	256	232	-35	-155
19:00:00	576	574	569	562	540	383	292	272	252	-9	-119
20:00:00	577	575	569	553	533	379	285	259	238	-28	-136
21:00:00	577	571	567	554	533	389	299	276	261	8	-101
22:00:00	582	582	581	573	556	416	336	320	309	62	-38
23:00:00	582	582	582	577	564	432	354	342	333	96	-3

ることのできる駐機容量の残りがなく、避難先空港全体の処理能力を超えてしまっていることが理由であり、このモデルによる最適化計算に問題はないということを示している。この場合には、航空機を格納庫に収容するなど、ダイバートではない方法で航空機を火山灰の影響を受けないようにしなければならない。

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、時系列の要素をシナリオとして場合分けをし、その感度分析に対して考察を行った。結果は、噴火開始想定時間が 8, 18, 20 時の場合、火山灰影響範囲が 600km, 1000km 以上広がった場合には総避難時間が増大するこ

とが推測される。緩和率に関しては、その平均値の推移をみると、一様分布乱数の条件下においては、緩和率の限度が 20%以上になれば急激に総避難時間が短縮され、安全に避難させることが可能になることが示された。ただし、本研究においては、緩和率、影響範囲および噴火開始想定時間の 3 要素について、より純粋な影響を調べるため、その他のパラメータを固定する必要があった。しかし、実際の運用時には、各シナリオに応じたハイパーパラメータの調整や、実際の空港運用に合わせた各空港の空き容量率と占有率の設定、そしてより長い期間を対象として解析することによって得られる、噴火開始時刻による傾向把握によって、実際の発災時にはより詳細なパターン分けによる適切な避難計画の提示が可能になるであろう。

本研究の課題としては、噴火する特定の火山を桜島に固定しているため、その他の火山噴火の発生を考慮できていない点、風向きを固定しているために、火山灰の影響範囲が、季節の影響を考慮できていない点などが挙げられる。また、COVID-19 の感染状況下においては、国内の移動が制限され、通常時の航空輸送および空港運用がなされていないため、その状況下を考慮する必要があるだろう。

謝辞：本研究は国土交通省航空局が提供する CARATS OpenData 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) 国土交通省航空局管制部：「緊急ダイバート運航総合支援システム」の運用開始～大規模災害発生時においても、更に安全かつ効率的な着陸を実現～，<https://www.mlit.go.jp/common/001135097.pdf> (最終閲覧日：2021/10/01)
- 3) 藏原これほる，大西正光，Haris RAHADIANTO：大規模噴火時の航空機避難に関する空港処理能力，土木計画学研究・講演集，Vol. 62, No. 2-07, 2020.
- 4) 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.
- 5) AIS japan： <https://aisjapan.mlit.go.jp/> (最終閲覧日：2021/10/01)
- 6) 国土交通省：CARATS オープンデータの概要説明 <https://www.mlit.go.jp/common/001231892.pdf> (最終閲覧日：2021/10/01)
- 7) 田畑凌，下谷大，Saharat ARREERAS, 有村幹治：大規模火山噴火時における空港容量制約緩和を考慮した航空機避難モデルの構築，土木計画学研究・講演集, Vol. 62, No. 2-06, 2020.
- 8) 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.
- 9) National catalogue of the active volcanoes in Japan (日本活火山総覧)・90 Sakurajima, Vol. 4, pp. 1319-1367, 2013.
- 10) ICAO：Aerodrome Design and Operations, Aerodrome reference code in Annex 14 - volume 1, p.1-14

SENSITIVITY ANALYSIS OF AIRCRAFT EVACUATION PATTERNS ACCORDING TO THE RANGE OF ASHFALL IMPACT DURING A LARGE-SCALE VOLCANIC ERUPTION

Ryo TABATA, Saharat ARREERAS and Mikiharu ARIMURA

Regarding the aircraft evacuation problem at the time of a volcanic eruption, discussions are progressing in Japan, but the amount of research accumulated is still low. In a previous paper, the authors constructed an aircraft evacuation model during a large-scale volcanic eruption based on the parking capacity (maximum number of aircraft that can park at the airport). We used a genetic algorithm (GA) for the optimization technique, and the CARATS Open Data was the prime data set. However, in this model, the optimization calculation takes time due to the characteristics of the algorithm, so there is a problem that even if the simulation for the optimized evacuation route result starts when the eruption occurs, it will not be in time for the actual evacuation.

Therefore, in this study, we brushed up this model and calculated it in advance by setting and changing various conditions in detail. The purpose of this sensitivity analysis was to grasp its tendency and the spatiotemporal relationship between the parked capacity and the number of evacuation aircraft proactively.