# 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

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

室蘭工業大学工学部建築社会基盤系学科 ○学 室蘭工業大学大学院工学研究科 学 室蘭工業大学大学院工学研究科 学 室蘭工業大学大学院工学研究科 正

〇学生員 千田大輔 (Daisuke Chida)
学生員 田畑凌 (Ryo Tabata)
学生員 Saharat ARREERAS
正 員 有村幹治 (Mikiharu Arimura)

#### 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、アイスランドで起きた火山噴火では、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.まだ、わ が国ではこのような航空関連の事故は起きていない.しか し、1914年の桜島大正大噴火では、約1000km あまり離れ た東北地方で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.

そこで本研究では、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際の火山灰の 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しての 研究では、GAを用いた大規模火山噴火時における航空機 避難問題に関しての先行研究で S.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<sup>11</sup>.また、 田畑らが、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た<sup>21</sup>.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 かった.

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<sup>3)</sup>.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<sup>4)</sup>等か ら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仮定した.

#### (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 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<sub>ik</sub>および着陸待ち時間を考慮する 値w<sub>ik</sub>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.

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

- (*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*∈*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* ∈ *J*

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

*t<sub>ijk</sub>*:避難先空港への各航空機の退避時間 [h]

*e<sub>ijk</sub>*: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

次に,制約条件を以下(2), (3)に示す.
$$\prod_{i\in I}^{I}\prod_{j\in J}^{J}\prod_{k\in K}^{K}e_{ijk} = 1 \qquad \forall j, k \quad (2)$$

 $E_{jk} \le c_{jk} \cdot MC_{jk} \cdot r_{jk}$   $\forall j, k$  (3) ここで、  $E_{ik}: 避難可能な各空港に割り当てられた航空機数$ 

MC<sub>ik</sub>: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  $0 < c_{jk} \le 1.0$  ( $c_{jk} + p_{ik} = 1.0$ )

r<sub>jk</sub>: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.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ことを、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.

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

ここで,

 $lpha_1$  ,  $lpha_2$  : 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

 $\beta$ :  $(c_{ik} \cdot MC_{ik} \cdot r_{ik})$ 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 $h_{ik}$ 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.

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

$$t_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{V_k} + \gamma_1 \tag{6} - 1$$

$$t_{ijk} = \frac{D_{ijk}}{V_k} + \gamma_2 \tag{6} - 2$$

ここで,

D<sub>ijk</sub>: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<sub>1</sub>, γ<sub>2</sub>: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<sub>k</sub>: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<sub>ik</sub>: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

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

#### (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.

#### 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<sup>5)</sup>.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<sup>6)</sup>,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 $c_{ik}$ : 60%, 個体数: 4000, 交叉率: 0.89, 突然



図-1 桜島噴火のパターン別火山灰影響範囲



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.図-1を見ると、パターン1やパターン2では、途中か ら海を含む範囲となっている. そのためパターン3やパタ ーン 4 と比べて避難すべき地上の航空機はあまり多くな く, 駐機容量に変化がないことがわかる. パターン3では, 500km の地点から避難すべき地上の航空機が増えた時に 総避難時間が大きく増加し, 駐機容量が大きく減少してい る. また, パターン 4 でも 900km の地点から避難すべき 地上の航空機が増えた時に総避難時間が大きく増加し, 駐 機容量が大きく減少している.このことから、比較的大き な空港が位置している範囲に火山灰が飛んだ場合に被害 は大きくなることが推測される. しかしながら, パターン 4 では、大きく海を含む範囲となっているがパターン1や パターン2とは違う結果になっている. それは,範囲内に 成田空港,羽田空港が入っているためだと考えられる.

# (2) 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 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



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)





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.

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を見ると、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.パターン1や パターン2では、総避難時間のピークに違いはあるが、午 前中から夜にかけて総避難時間が減少する傾向がみられ る.パターン3では、早朝や深夜を除いて時間帯を問わず、 総避難時間が大きい傾向がみられる.パターン4では、午 後や夜にかけて総避難時間が増加する傾向がみられる.こ れらの結果からパターン1やパターン2では、午前中に、 パターン3では、時間帯に関係なく、パターン4では、午 後や夜の時間帯に火山噴火が発生すると大きな被害をも たらすものと推測される.また、パターン3の範囲に火山 灰が飛んだ場合に最も総避難航空機数が多くなると推測 される.

## 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, その感度分析に対して考察を行った.

その結果,最も大きな被害をもたらす範囲はパターン3ということが確認された.また,全パターンにおいて比較的大きな空港が位置している範囲に火山灰が飛んだ場合,総避難航空機数が増加し,駐機容量の大幅な減少や総避難時間の大幅な増大につながることが確認された.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

- 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.
- 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
- 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.
- National catalogue of the active volcanoes in Japan (日本活火山総覧)・90 Sakurajima, Vol. 4, pp. 1319-1367, 2013.
- 5) ICAO : Aerodrome Design and Operations, Aerodrome reference code in Annex 14 volume 1, p.1-14
- 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: 2021/12/15)