

# 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

田畑 凌<sup>1</sup>・下谷 大<sup>2</sup>・ARREERAS Saharat<sup>3</sup>・有村 幹治<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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: 19041039@mmm.muroran-it.ac.jp

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> 正会員 室蘭工業大学 准教授 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火山噴火による混乱に直面してきた。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, 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。しかしこのモデルでは, 非常時の空港容量の一時的な緩和は考慮しておらず, 空港サイドの対応策を評価することができなかった。そこで本研究では空港容量の緩和を変数に入れた航空機避難モデルの構築を行った。航空機の位置については CARATS Open data を用いた。航空機の避難先の割り当てと空港容量の緩和レベルの組み合わせ最適化に遺伝的アルゴリズムを用いた。ケーススタディとして桜島の噴火を想定し, 分析を行った。

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

## 1. はじめに

航空輸送は経済の成長と繁栄を支えている。近年では, 航空輸送網がより大きく複雑になり, 天候状況や自然災害によっての被害はより甚大な影響を受ける。特に, 大規模火山噴火に関しては 2010 年, エイヤフィヤトラヨークトル (Eyjafjallajökull) やメラピ (Merapi) 火山の噴火が, ヨーロッパや東南アジアの航空輸送や経済を著しく混乱させた。大規模火山噴火のリスクとしては, 航空機のエンジンが火山灰を吸い込むと, 火山灰の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。このような火山噴火に関する航空機の事故としては, 例えば, 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) や KLM オランダ航空 867 便エンジン停止事故 (1989 年) が挙げられる。こうした事故は火山が多い我が国においても懸念される。

現在, 我が国では 2003 (平成 15) 年に火山噴火予知連絡会が「概ね過去 1 万年以内に噴火した火山及び現在

活発な噴気活動のある火山」を活火山と定義し, 111 の活火山が選定されている。また, 2014 (平成 26) 年には「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」として最終的に 50 の火山が選ばれている。こうした地理的な観点から, 大規模火山噴火のリスクは大きいといえる。

筆者らは, このような大規模火山噴火時の航空機避難に関する先行研究<sup>1)</sup>において, この航空機避難問題を定式化し, 空港容量 (空港に駐機できる最大数) を考慮して, 各航空機の総避難時間を最小化する最適化モデルを提案した。しかし, この既存研究では空港容量を超えないような航空機の避難先空港への割り当てのみを対象とし, 一時的に空港容量を緩和する (増加させる) ような変数が組み込まれていなかったため, 空港サイドの対応策を評価することができなかった。

そこで本研究では新たに, 一時的に空港容量を緩和するような変数を入れた航空機避難モデルの構築を行った。その際に, 国土交通省が提供する空港情報である AIS Japan<sup>2)</sup>や 2015 年 2 月から国土交通省航空局が提供開始し

た CARATS Open data<sup>3)</sup>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た。そのうえで航空機が避難先空港と降機可能容量数の緩和量の組み合わせ最適化問題を定式化した。

日本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いていることから、火山の東から北東側に火山灰が流れる。したがって、日本の西側に位置する火山は日本の広範囲に火山灰の影響をもたらす。複数の専門家らは、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<sup>4)</sup>。そこで本研究では最後に、ケーススタディとして桜島が噴火した場合を想定し、構築したモデルを遺伝的アルゴリズム（以下、GA）を適用することで解いた。

## 2. 既往研究のレビュー

飛行便のリスクスケジュールや災害に対する航空機避難問題に関する既存研究蓄積は多くはない。

飛行便のリスクスケジュールに関する研究には主に以下のものがある。A. Cardillo ら<sup>5)</sup>はヨーロッパの主要な空港間の航空交通網をネットワーク図に置き換え、一部の航空網の寸断による乗客の遅延を最小化するような飛行便のリスクスケジューリングを行った。別の既存研究<sup>6) 10)</sup>では、航空網の寸断が発生した場合、空港の収容能力が航空機と乗客の再輸送に大きな影響を与えることを明らかにした。これらの既存研究から、航空輸送の最適化問題を解決するためには、単に出発地と目的地それぞれの空港の近傍の領域だけでなく、その空港間の広い範囲における航空交通管理が必要である。

悪天候や自然災害条件に対する航空機の安全な避難のための飛行便のリスクスケジューリングやダイバート問題を解くための計算アルゴリズムは多く存在する。その中で P. K. Menon ら<sup>11)</sup>は、航空機のある空域内の飛行経路の競合問題を解決するためのアルゴリズムに GA を用いた。

航空交通およびその経路管理の重大な問題の1つは、特に出発地と目的地の間の空域にある人為的な混乱、悪天候および航空交通渋滞などの悪条件下で、航空機に適切な避難（飛行）経路を与えるものである。この問題を解決するために GA は効果的であるが、上記のような悪条件下における避難経路問題に対して、その影響範囲を設定せずに GA を適用すると局所的な最短経路が解の候補として最適解に混ざって、真に最適化された結果が得られないことが示されている<sup>12), 13)</sup>。したがって、混乱した影響範囲に対して最適化された解を GA によって求める場合には、影響範囲を考慮して正確に設定する必要がある。

GA を用いた大規模火山噴火時における航空機避難問

題に関する既存研究では ARREERAS<sup>14)</sup> らが、空港や航空機の位置座標（緯度経度）を仮想二次元平面上に置き換え、距離を計算したうえで、航空機の総避難時間を最小化するモデルを構築した。しかしながら、このモデルでは、避難時における空港の空港容量（駐機可能数）を一時的に緩和する（増加させる）ような運用については考慮されていなかった。そこで本研究では、降機可能容量を変数として組み入れたモデルを再構築し、既往研究と同様のデータセットを用いて試算を行った。

## 3. 航空機避難モデルの構築

### (1) 火山噴火の影響範囲設定上の仮定

エイヤフィヤトラヨークトルの火山噴火が発生した当時、安全飛行のための空気中火山灰濃度規制がなく、各国航空当局が全ての航空機は火山噴火地域と火山灰雲の中を飛行する際、火山灰粒子の空気中の密度に関わらずその接触を避けなければならないと設定し、飛行禁止措置と空港閉鎖を行っていた<sup>15), 16)</sup>。現在では、エンジンに対する火山灰の影響に関して研究が進んでおり、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ほぼ損傷がないことが確認されている<sup>16)</sup>が、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空気中に存在すると想定される範囲を影響範囲として設定する。そして火山灰やその噴火の影響を受けると予想される範囲は、実際に降灰が予測される範囲として、この空域及び空港を避けて避難する。

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、影響を受ける範囲内にある空港は避難先として選ばない。そして、影響を受ける範囲内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

構築するモデルの目的は2つある。まず火山噴火時の航空機避難の場合、航空管制機関および関連当局は、影響を受ける飛行ルートを回避するために、各航空機の飛行範囲内で火山噴火の影響範囲外の十分な収容能力を備えた安全な空港への避難を航空会社および空港に比較的短時間で発信可能とすることを目的とする。

火山災害は、地滑り、洪水および地震などの他の自然災害とは異なり、通常は発生する前の数時間から数日に予兆がある場合も多い。よって、噴火の影響範囲を決定し、必要な避難計画を設定することは比較的容易だといえる。一方、火山噴火が発生してしまうと、その発生初期で火山砕屑物や灰雲の影響が、近くの空港や航空機に影響を及ぼす前の風の強さに依存して、噴火地点から数

～数百 km 離れた空中に 1 時間以内に広がる可能性が高い<sup>4),17)</sup>。そのため避難すべき航空機、特に火山噴火の影響範囲内の空港に駐機する航空機を、影響範囲外の安全な空港への迅速な退避させることをもう一つの目的とする。

以上より本研究では、事前に火山噴火の可能性を予知した段階または防災検討段階における、比較的短時間で航空機を安全な地域にある空港への速やかな避難経路を決定するため、各航空機の移動距離を基にした総避難（飛行）時間を目的関数として設定した。

### (3) 避難時間と空港容量の算出に関する仮定

避難時間を計算する際、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（地球における球面上の 2 点間の最短距離計算）の式に代入して求めた。航空機の数値に関して、飛行中の航空機の数値は、CARATS Open data から抜き出した該当航空機（飛行便）の情報の中の型番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、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、飛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て簡易であるが、高度の要素を加味した。

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、本研究では空港容量（空港に駐機可能な航空機の最大数）を考慮した。これは可能な限り降機を優先させてスポットへの誘導は行わずにエプロンに駐機させた場合を想定している。実際には、空港容量は発着枠（単位時間あたりの離着陸数）を意味する場合があるが、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、駐機可能な航空機の最大数とする。具体的な算出方法としては、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<sup>2)</sup> 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、中型機用、小型機用のスポットを大型機用のスポットとして換算し、そのすべての大型機用スポット数を空港容量とした。しかしながら、先行研究ではこの容量を緩和する（増加させて）ことは考慮されていなかったため、一定の確率で容量を 5-30% まで 5% 刻みで緩和して（増加させて）ペナルティ関数の加算判定を行った。

### (4) 定式化

上記の仮定に基づいて、航空機サイドの避難先空港選択と避難先空港サイドの空港容量（駐機可能数）を増加させる空港運用を同時に最適化するモデルを構築する。

火山噴火の影響を受ける範囲内の空港やその空域内のある点から避難先の空港までの飛行距離（時間）を目的関数として、最小化する。各航空機と避難先の空港までの退避は、地理座標（緯度と経度）を用いた空港と航空機の位置によって計算される球面上の 2 点間の最短距離を移動するものとする。

初めに、目的関数(1)を表す。

$$E(t) = \min \sum_{k=1}^K \sum_i \sum_j (t_{ijk} \cdot e_{ijk} + h_{ijk}) \quad (1)$$

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  $K$  ;  $k \in K$

$E(t)$ : 総飛行時間とペナルティ値の和の最小値 [h]

$t_{ijk}$ : 避難可能な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

$h_{ijk}$ : 空港容量制限を超えた解に対してその程度に応じて加算されるペナルティ値 [h]

次に、制約条件(2)および(3)を以下に示す。

$$\sum_k \sum_j e_{ijk} \neq 0 \quad \forall j, k \quad (2)$$

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

ここで、

$E_{jk}$ : 避難可能な各空港に割り当てられた全航空機数

$MC_{jk}$ : 避難可能な各空港の最大空港容量

$c_{jk}$ :  $MC_{jk}$  に対する受け入れ可能な割合 ; 定数

$$0 < c_j \leq 1.0$$

$r_{jk}$ : ある一定の確率でランダムに最大空港容量を緩和する（増加させる）定数（値：選択される確率）

$$r_{ij} = 1.00: \frac{1}{3}, 1.05: \frac{1}{4}, 1.10: \frac{5}{28}, 1.15: \frac{5}{42}, 1.20: \frac{1}{14}, 1.25: \frac{1}{28}, 1.30: \frac{1}{84} \quad (4)$$

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)はすべての避難可能な空港は火山噴火の影響を受けることのない範囲にあるということ、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空港容量を超えないことをそれぞれ示している。また、空港容量の一時的な増加を行う場合、その過大な増加を抑えるため、式(4)を用いた。

以上の制約条件に加えて、GA は制約のない最適化手法であるため、制約付き GA を適用するために次のペナ



ルティ関数(5)を用いた.

$$h_{ijk} = \frac{\alpha}{1000} + \sum_{k=1}^K \left\{ \alpha \left( \sum_k \sum_j E_{jk} - \beta \right)^2 \right\} \quad (5)$$

ここで,

$\alpha$  : 制約違反に応じた定数, 本研究の設定値は 10,000.

$\beta$  :  $(c_{jk} \cdot MC_{jk})$  の整数部分

である. ペナルティ関数は緩和した空港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, 空港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値  $h_{ijk}$  を実現不可能な解候補 (空港容量を超過した割り当て) の飛行時間に加算した.

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.

$$t_{ij} = \frac{D_{ij}}{V} + \frac{35(15 + 20)}{60} \quad (6) - 1$$

$$t_{ij} = \frac{D_{ij}}{V} + \frac{20}{60} \quad (6) - 2$$

ここで,

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

$V$  : 各型番における平均航行速度 [km/h] (表-1)

である. 上式(6)の第二項目は地上の駐機航空機であれ

ば式(6) - 1 を用いて, 離陸時間 (15 分) と着陸時間 (20 分) を, 飛行中の航空機であれば式(6) - 2 を用いて, 着陸時間 (20 分) のみを各飛行時間に加算した.

最後に, モデルの中で用いられ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空港容量, すなわち避難すべき地上の最大航空機数

$p_i$  :  $P_i$  に対して避難する必要がある航空機の割合; 定数  $0 < p_i \leq 1.0$

### (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に大きな影響を与える. 本研究において, GA の計算時に空港および航空機の緯度経度は変わらないので航空機から避難可能な各空港までの大圏距離および, 式(6)に基づいて飛行 (避難) 時間を先に計算しておく. これによって, (避難すべき航空機数)  $\times$  (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 (割り当て) 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, 空港容量を式(4)に基づいてランダムに緩和したリストを作った. このリストの緩和空港容量に基づいて, 制約条件(3)を満たさない解候補に対してペナルティ値を加算する. 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関数とした.

## 4. ケーススタディ

### (1) 桜島の噴火による影響範囲の決定

日本中部の浅間山と桜島の降灰観測から 2009 - 2015 年の間に噴火のパターンが発見されており<sup>4)</sup>, 爆発の典型的な噴煙柱の高さは 2 - 5 km, 活動期間の終わりの総降灰量のうち 50% が火口から 4.2 km 以内に堆積し, 99% が 23.3 km 内に堆積したが, 火山灰の痕跡は火口から数百キロメートルまで離れた場所でも確認された. その観測では降灰の方向と分布が非常に不均一であり, 季節風の影響を受けていた.

本研究では, 2016 年 3 月 13 日の 9 - 10 時の CARATS Open data を使用している. National catalogue of the active volcanoes in Japan の桜島の項<sup>18)</sup>で, 2009 年 4 月 9 日の昭和火

表-1 航空機の各型番における平均航行速度

型番	平均航行速度 [km/h]	型番	平均航行速度 [km/h]
A310	850	B763	953
A319	828	B772	1,000
A320	863	B773	1,000
A321	863	B77L	1,000
A332	977	B77W	1,000
A333	977	B788	1,012
A343	977	B789	1,012
A346	989	CRJ1	881
A388	910	CRJ2	881
B734	887	CRJ7	917
B735	887	DH8A	484
B737	935	DH8B	573
B738	935	DH8C	528
B739	935	DH8D	650
B744	1,012	E170	929
B748	1,018	MD11	876
B752	953	SF34	522
B762	953		



図-1 2009年4月の噴火で観測，推測された火山灰の飛距離  
National catalogue of the active volcanoes in Japan より

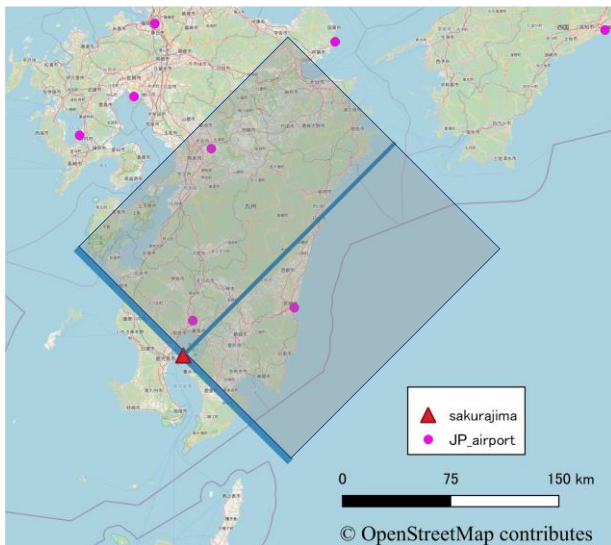


図-2 本研究における桜島噴火の影響範囲

口の爆発的噴火による火山灰落下分布とその予測エリアから、桜島噴火の場合の平均的な噴煙柱の高さは海面から約 4-5 km，火山灰は西南西の方向に少なくとも 160 km の距離まで拡散されると予測可能である。(図-1)

本研究においては、桜島の火山噴火によって影響を受ける範囲を桜島の火口から半径 100km の範囲、この時期の偏西風の影響を考慮して北東に向かって 200km の圏内とした。(図-2)

(2) 影響範囲内の空港と空域，避難航空機数の抽出

避難すべき航空機には以下の 2 パターンあり，その合計を全避難航空機数とした。

a) 火山噴火の影響範囲内の駐機航空機

火山噴火の影響を受ける範囲内(図-2)には 3 空港、鹿児島空港(最大駐機可能数 35 機)、宮崎空港(8 機)および熊本空港(16 機)があり、合計で 59 機が駐機可能である。ただし、この 3 空港全てに空港容量が限界になるまで駐機していることは現実的ではない。よって、地上の避難すべき航空機は、合計の約 8 割(それぞれの最大駐機可能数に 0.8 を

かけた値の整数部分の合計)である 46 機とした。

b) 火山噴火の影響範囲内およびその周辺を飛行している航空機

CARATS Open data (2016年3月13日)より、9-10 時の間に 27,000ft 以上の高度で飛行しているのは 374 便である。そのうち、各便における緯度経度の平均値がおおよそ九州上(緯度が 30 以上 35 以下、経度が 129 以上 132 以下)である航空機を抽出すると、25 機であった。避難距離の算出に関して、CARATS Open data から抜き出したこれらの航空機の緯度経度は、上記の平均値を用いた。

以上より、避難すべき航空機の総数は 71 機となる。

(3) 避難先の空港の絞り込みと選択基準

避難先の空港の選択基準は、それぞれの避難する航空機に関連している。国土交通省の日本民間航空局 JCAB によると、政府、民間部門、日本の自衛隊が運営する 98 の空港がある。本研究では、避難空港の絞り込みに次の 3 つの事項が考慮され、44 の空港まで避難空港候補を絞り込んだ。(次項図-3)

a) 火山噴火の影響範囲と避難先の空港の位置関係

避難先の空港の位置は、仮定に基づいて桜島の火口から半径 100km、この時期の偏西風の影響を考慮して北東に向かって 200km の圏外に位置するが、他の空港への過度の影響を回避し、通常の航空交通とフライト管理への影響を軽減するために、目的地が影響を受ける空港である空中の航空機は、元の目的地(影響を受ける空港)の近くにある空港に避難させることで、追加の燃料を必要としないなどの効果が期待できる。

b) 航空機のサイズ等による滑走路制限と収容能力

選択される避難空港は、それぞれ避難中および災害からの復帰中に離着陸するために、滑走路が十分に長ければならない。ICAO 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 6 つのグループに分類されている。各空港に着陸する航空機のフライト情報を抜き出してみると、そのおおよそ 98% の航空機は、コードグループ C,E,D に属し、着陸と離陸を実行するために 1,200 m から 3,000 m 以上の滑走路長を必要とする。一方 AIS japan によると、掲載されている 94 の空港のうち 82 空港(日本のすべての空港の 88.3%)が C から F のコード文字を持つ航空機を収容でき、その各空港の最大空港容量の合計 1,877 機の航空機を処理できる。したがって本研究では、以上の 82 空港のうちいくらか大規模火山噴

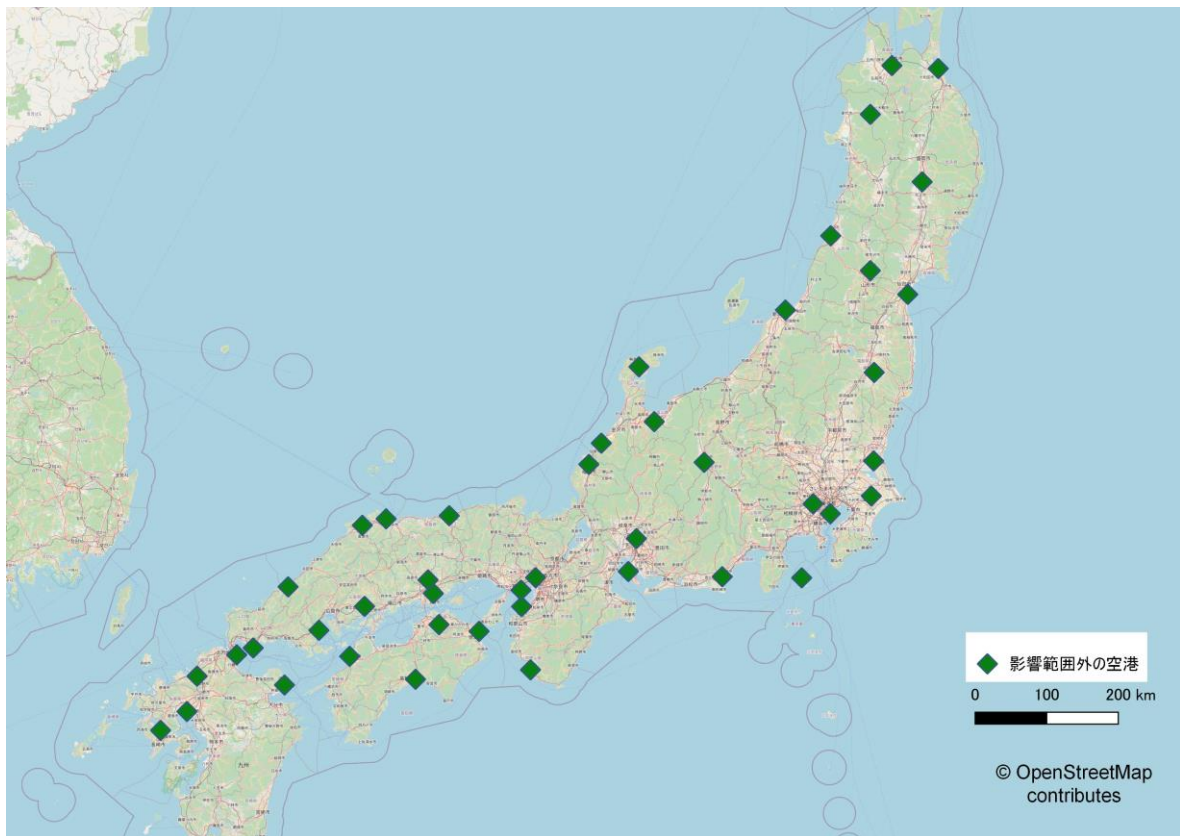


図-3 火山噴火の影響範囲外の44の避難候補空港

火時に使用不可になったとしても、全ての避難航空機を収容するのに十分な能力と容量を持つことができると判断した。

#### c) 接続性

使用可能な空港の数、特定のサイズの避難航空機を保護する容量と能力、影響を受ける乗組員、および乗客の移動能力を考慮することに加えて、避難空港の接続性が高いと判断される機能を持つ空港が選択される必要がある。それは例えば、影響を受ける乗組員と乗客の宿泊施設への移動、発着地の変更のため近くの別の空港への移動および最終目的地に到達するために航空機以外の方法への変更が容易になる機能である。5つの影響を受ける空港を除外して、そのような機能がある避難先候補の空港を本研究では、82の空港のうちの本州を中心とした44の空港とした。

## 5. 試算結果

### (1) 試算の諸条件とパラメータ設定、最適解に関して

試算時のパラメータなどの設定は次のとおりである。

個体数：3,000、世代数：250、各世代における交叉率：0.86、各世代における突然変異率：0.09、実行回数：100

GAの計算において、最初の各個体は適当な航空機の

避難の割り当てと緩和した空港容量を1セットとしたものが設定した個体数分作られる。その際、空港容量は式(4)を基にランダムに緩和されるが、突然変異などの進化計算の過程において変化しない。したがって、最初の個体の多様性が結果的な総飛行時間の最小化の探索に有効であると推測する。よって、最初に作成する個体数を多く設定することが望ましい。また、本研究においては、広く解の結果を得て分析を行うためにGAの処理(実行)を複数回行った。そのため、世代数を増やし厳密解に近づける処理は行っていない。代わりに交叉率と突然変異率を比較的高めに設定し、解探索の速度を高めた。このようなパラメータチューニングは避難計画時などにおける総避難時間の算出には効果的だが、実際の発災時の簡易的な避難時間の測定の際には、世代数を増やして実行回数を減らし、短時間で適応度の高い結果を得るほうが現実的である。

なお、本研究において得られる解の個数はGAの実行回数分だけあるが、その中で最適解として次の2つを選び出した。

#### a) 解A

どの空港においても割り当てられた航空機数に対して空港容量を超えない解の中で、最も目的関数値が小さい、すなわち総避難時間が短いもの。

#### b) 解B

一部の空港において割り当てられた航空機の数



空港容量を超えてしまうが、そのペナルティ値を加算せずに最も総避難時間が短いもの。

(2) 結果と考察

各航空機の割り当ては、表-2のとおりである。また、それぞれの航空機の割り当てを避難経路として可視化した。(図-4,5) 解 B に関しては、佐賀空港で 1 機、長崎空港で 3 機が空港容量を超えて割り当てられた。解 A よりも解 B は若干避難経路が短いように割り当てられているため、航空機の避難経路が同じ場合が多い。これに関してはデメリットもあり、その空路の混雑が予想され、

航空交通の制御が難しくなる。

時間に関して、100 回の実行結果のうち、平均の総避難時間は 48 時間 33 分 20 秒、解 A が 48 時間 14 分 48 秒、解 B が 47 時間 59 分 11 秒であった。また、各航空機の割り当てから一機ずつのデータが取り出せる。各航空機の避難時間の中で、解 A,B ともに最長避難時間は約 57 分 18 秒、平均避難時間は約 40 分ほどであった(解 A : 約 40 分 46 秒、解 B : 約 40 分 33 秒)。

基本的に複数回 GA を実行することで、解 A と解 B の両方が得られる場合と、解 A, B のうちどちらか一方しか得られない場合があり、それはパラメータの設定に依

表-2 航空機の割り当て

	最大 空港容量	解A		解B	
		避難航空機数	残容量	避難航空機数	残容量 (負値は超過)
岩国飛行場 (基地) / 岩国錦帯橋空港	76	1	75	1	75
石見空港	3	1	2	1	2
大分空港	11	11	0	11	0
山口宇部空港	6	1	5	2	4
北九州空港	11	2	9	2	9
福岡空港	67	26	41	21	46
佐賀空港	10	10	0	11	-1
長崎空港	19	19	0	22	-3

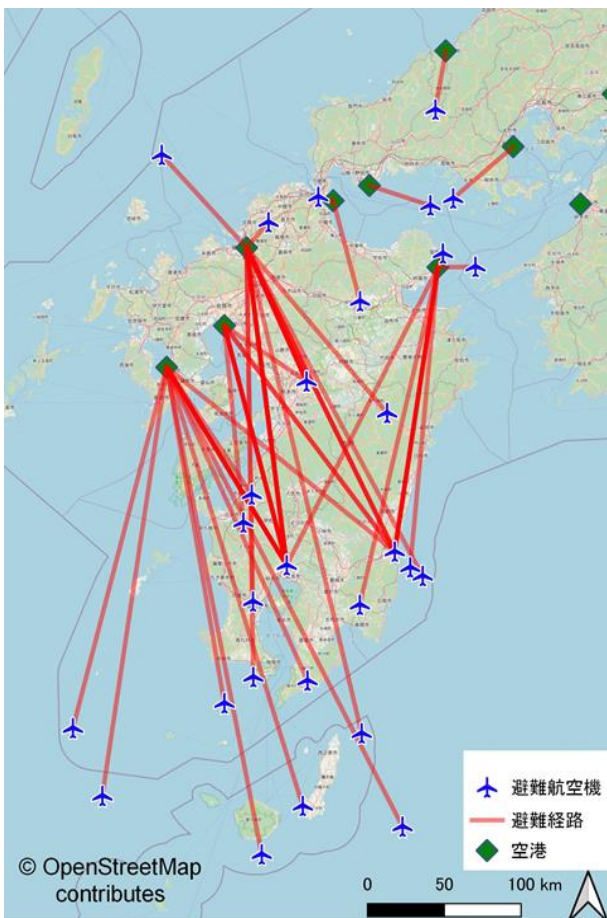


図-4 解 A の避難経路

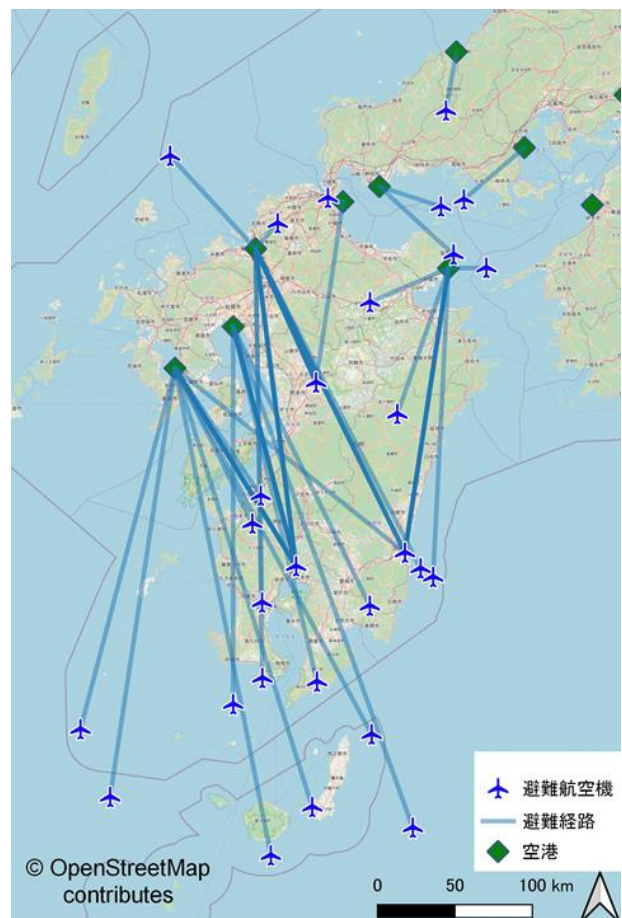


図-5 解 B の避難経路

存している。解 A のみが得られた場合は問題がないが、設定として空港容量を緩和して計算する以上、解 B のみ得られる可能性もある。したがって、得られた解 B の取り扱いについては、使用者の判断に委ねられる。先に述べたデメリットのほか、一般に空港容量を緩和させると、航空交通や離着陸の制御の労力の増加をはじめとしたコストが空港容量を超過した分かかる。これと避難の時間短縮のベネフィットとを比較する必要がある。具体的な取扱いの方策としては、この費用対効果を計算してどちらを使用するかを決定したり、そもそも解 A が発見されるまで GA を実行をしてその結果を用いたり、解 B の超過した空港の割り当てを手動で最適化するなどである。

## 6. おわりに

提案したモデルによって、空港容量の一時的な緩和を考慮した際の航空機の概念的な避難経路の最適化を可能とした。火山の噴火や火山灰の拡散の予測精度は年々高度化しているため、より迅速で正確に範囲を指定できるだろう。

このモデルの GA は総飛行時間（距離）を最短にする目的関数のもとで計算を行っているため、その結果は空港の容量の制約を考慮する最近傍検索に近い。しかし、交叉率や突然変異率を変化させることで、避難先の選択、各空港に割り当てられる航空機の数、および避難空港選択分布に違いが現れるため、様々な状況に対してより柔軟な検討をする余地がある。さらにこの最適航空機避難モデルでは、避難する必要がある航空機の数や空港容量に対して受け入れ可能な割合を定数として組み込んでいるため、実際の空港の運用状況に合わせて結果の出力が可能である。以上より、このモデルでは避難先の空港の対応能力および運用状況を考慮し、避難先の空港選択を制御することで、より最適な航空機避難が可能である。

本研究においては、距離と空港容量制限を考慮し、GA を用いて最適航空機避難モデルを構築したが、実際の航空交通管理に照らし合わせてみると、考慮されるべき事項は未だ数多く残っている。例えば、実際の発着枠や着陸回数の実績を考慮した空港容量設定、ある 1 つの空港への割り当ての集中が引き起こす空域の混雑や着陸時間の増加、型番に応じた離陸時間、高度を考慮した三次元空間上における距離、航空機の残燃料による飛行距離制限、直線的ではない飛行経路の選択、避難した後の復旧性の考慮などがある。また、GA はハイパーパラメータを含むため、そのチューニングについて検討する必要がある。

大規模火山噴火時の避難空港選択に関して最適航空機

避難モデルのさらなる運用には、より多くの目的関数を設定する必要がある、また効果的な制約条件および重み付け（ペナルティ関数）の設定によって、避難の開始から復旧までのさらに現実的な選択が可能であろう。

表-3 航空機が割り当てられなかった空港

	最大 空港容量
三沢飛行場/三沢空港	24
花巻空港	10
仙台空港	47
青森空港	19
福島空港	14
百里飛行場/茨城空港	81
成田国際空港	240
大館能代空港	8
山形空港	5
庄内空港	11
東京国際空港/羽田空港	228
東京都調布飛行場/調布空港	24
大島空港	13
新潟空港	24
静岡空港	17
松本空港	14
富山空港	18
能登空港	4
名古屋飛行場/小牧空港	92
中部国際空港/セントレア	80
小松飛行場/小松空港	8
福井空港	1
大阪国際空港/伊丹空港	60
南紀白浜空港	9
関西国際空港（関空）	67
神戸空港	10
徳島飛行場/徳島空港	14
鳥取空港	21
高松空港	25
岡南飛行場（旧岡山空港）	64
岡山空港	13
高知空港	18
美保飛行場/米子空港	5
広島空港	12
出雲空港	10
松山空港	23



## 付録

44 の避難空港候補のうち、今回の GA による割り当ての結果、割り当てられなかった空港およびその最大空港容量を前項の表-3 に示す。今回の使用不可能な 3 空港と合わせて 47 の空港を日本の避難候補空港とし、全ての火山における噴火において、大規模小規模関わらず、その中である特定の火山噴火の影響を受ける空港と受けない空港を決定することで、おおよその避難時間の算出が可能である。

## 参考文献

- 1) 田畑 凌, 下谷 大, Saharat ARREERAS, 有村 幹治 : CARATS オープンデータと GA を用いた最適航空機避難モデルの構築”, 土木学会北海道支部令和元年度論文報告集, Vol. 76, No. D-26, 2020.
- 2) AIS japan : <https://aisjapan.mlit.go.jp/> (最終閲覧日 : 2020/10/02)
- 3) 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 : 2020/10/02)
- 4) ANA ホールディングス株式会社 : ていくおふ, No.157, pp. 5-15, 2019.
- 5) A. Cardillo, M. Zanin, J. Gómez-Gardeñes, M. Romance, A. J. García del Amo, and S. Boccaletti : Modeling the multi-layer nature of the European Air Transport Network: Resilience and passengers rescheduling under random failures, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2013.
- 6) European Commission, : Horizon 2020 - Smart, Green and Integrated transport, *Imporan Not sccond Horiz.*
- 7) M. A. Madas and K. G. Zografos : Airport slot allocation: A time for change? , *Transp. Policy*, Vol. 17, No. 4, pp. 274-285, 2010.
- 8) A. Reggiani : Network resilience for transport security: Some methodological considerations, *Transp. Policy*, Vol. 28, pp. 63-68, 2013.
- 9) J. Wang, H. Mo, F. Wang, and F. Jin : Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach, *J. Transp. Geogr.*, Vol. 19, No. 4, pp. 712-721, 2011.
- 10) X. ZENG, X. TANG, and K. JIANG : Empirical Study of Chinese Airline Network Structure Based on Complex Network Theory, *J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol.*, Vol. 11, No. 6, pp. 175-181, 2011.
- 11) P. K. Menon, G. D. Sweriduk, and B. Sridhar : Optimal Strategies for Free-Flight Air Traffic Conflict Resolution, *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 22, no. 2, pp. 202-211, 1999.
- 12) P. Fleming and R. Purshouse : Evolutionary algorithms in control systems engineering: a survey, *Control Eng. Pract.*, Vol. 10, No. 11, pp. 1223-1241, 2002.
- 13) V. Krukhmalev and V. Pshikhopov : Genetic Algorithms Path Planning, in *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, Elsevier, 2 pp. 137-184, 2017.
- 14) 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.
- 15) 安田 成夫, 梶谷 義雄, 多々納 裕, 小野寺 三朗 : アイスランドにおける火山噴火と航空関連の大混乱, 京都大学防災研究所年報, Vol. 54A, pp. 59-65. 2011.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) National catalogue of the active volcanoes in Japan (日本活火山総覧), 90 Sakurajima (最終閲覧日 : 2020/10/02)

(??)

(??)

## CONSTRUCTION OF AN AIRCRAFT EVACUATION MODEL CONSIDERING THE RELAXATION OF AIRPORT CAPACITY CONSTRAINTS DURING A LARGE-SCALE VOLCANIC ERUPTION

Ryo TABATA, Dai SHITAYA, Saharat ARREERAS and Mikiharu ARIMURA

In recent years, the air transport industry and economies of European countries had encountered disruption significantly from a volcanic eruption. In Japan, there are many active volcanoes, and it is expected that large-scale volcanic eruptions will have a great impact. In the previous research, the authors formulated the aircraft evacuation problem for the risk of large-scale volcanic eruption and proposed an optimization model that minimizes the total evacuation time of each aircraft. However, this model did not consider temporary mitigation of airport capacity in an emergency and could not evaluate airport-side countermeasures. Therefore, we constructed an aircraft evacuation model including the relaxation of airport capacity as a variable in this study. In that case, we used CARATS Open data for the position of the aircraft, and the genetic algorithm to optimize the combination of aircraft evacuation destination allocation and airport capacity mitigation levels. As a case study, we assumed the eruption of Sakurajima and analyzed it.