

# 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

Construction of optimal aircraft evacuation model using CARATS open data and GA

|                    |      |                         |
|--------------------|------|-------------------------|
| 室蘭工業大学工学部建築社会基盤系学科 | ○学生員 | 田畑凌 (Ryo Tabata)        |
| 室蘭工業大学大学院工学研究科     | 学生員  | 下谷大 (Dai Shitaya)       |
| 室蘭工業大学大学院工学研究科     | 学生員  | Saharat ARREERAS        |
| 室蘭工業大学大学院工学研究科     | 正員   | 有村幹治 (Mikiharu Arimura) |

## 1. はじめに

航空輸送は経済の成長と繁栄を支えている。航空輸送網がより大きく複雑になるにつれて、天候状況や自然災害、例えば火山噴火のような事象への被害はより甚大となる。2010 年、エイヤフィヤトラヨークトルやメラピ火山の噴火がヨーロッパの航空輸送や経済を著しく混乱させた。

火山噴火時に航空機のエンジンが火山灰を吸い込むと、エンジンが停止して、航空機が墜落する恐れがある。『ブリティッシュ・エアウェイズ 9 便エンジン故障事故』や『KLM オランダ航空 867 便エンジン停止事故』の例のような、重大な事故につながりかねない。こうした事故はわが国においても懸念されるが、火山噴火時の航空機避難の方策はその議論が進んでいない。

そこで本研究では、特定の火山の噴火の際の最適航空機避難モデルの構築を目指す。その際に、国土交通省が提供する空港情報 (AIS) や CARATS オープンデータ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) により、航空機の避難に最適な空港を選択する。さらに、ケーススタディとして、桜島が噴火した場合を想定し、このモデルを実行した。

## 2. 使用データの概要

本研究で使用したデータを以下に示す。

### 2.1 CARATS オープンデータ

CARATS とは、国土交通省が提供している航空機の航跡データである。申請することにより、無料で利用できる。集計期間は 2013 年度から 2016 年度の奇数月の 1 週間が記録されている (計 30 週間)。含まれる便数は 2015 年度までで、のべ約 64 万便となる。データソースは、レーダーデータ、ADS-C データ等や飛行計画データからなる。対象範囲は日本が管轄する福岡 FIR (レーダー管制空域・全域)、対象便は計器飛行方式による定期便 (全体の約 93%) で、軍用機と自家用機などは対象外となる。そして、データ形式は約 10 秒間隔、時系列の CSV 形式である。

### 2.2 AIS japan

AIS japan<sup>1)</sup>とは登録することで誰でも無料で日本における航空情報を閲覧できるサイトである。国土交通省が、改訂作業の簡約化やあらゆる場所で随時情報の入手を可能とすることを目的として、2009 年 8 月に電子航空路誌の運用を開始し、2018 年 4 月には有料紙媒体の提供を終了して無料電子版に集約した。航空情報の中には航空路

誌、NOTAM や航空情報サーキュラーといったものがあり、航空機の運航に不可欠な情報が記載されている。

## 3. 手法

この章では、火山噴火時の最適航空機避難モデルと GA について説明する。

### 3.1 本研究の流れと仮定

本研究では、GA を実行するために、特定の火山とその火山灰雲の挙動、影響する面積、その範囲内外の空港や航空機のデータを集約し、数学モデルを問題の目的と制約に従って定式化、GA を用いて、数学モデルをコード化、実行し、その結果を分析した。

そして、火山噴火の際の航空機の避難に関しては、以下の仮定を行う。

- (1) ICAO の航空機エンジンの性能に対する火山灰の影響によると、全ての航空機はたとえいずれの密度レベルで火山噴火地域と火山灰雲空域の中を飛行したとしても、火山灰粒子と岩石との接触を避けなければならない。しかし、それは実際には不可能であるから、いかなる程度の火山噴火警告でもそれが出された地域の空域及び空港を避けて避難する。
- (2) 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。よって、影響を受ける地域内に避難先の空港を配置することはできず、影響を受ける地域内の空港に駐機する航空機は避難する対象とする。
- (3) 各避難先の空港には、避難要求に対応する能力に限界があり、それは航空機の数、航空機の型番と大きさ、滑走路の長さによる。

### 3.2 GA の概要と定式化への準備

GA はコンピューターのプログラミングにおいて生物の遺伝子や自然淘汰を模することにより最適解を導く手法である。GA は一般に次のような手順で計算される。

- (A) 個体数  $n$  個が入る配列を 2 つ用意し、この 2 つの集合をそれぞれ「現世代」、「次世代」とする
- (B) 現世代に  $n$  個の個体をランダムに生成する
- (C) 評価関数により現世代の各個体の適応度を計算する
- (D) ある確率で次の 3 つの動作のどれかを行い、その結果を次世代に保存する
  - a) 個体を二つ選択し交叉を行う
  - b) 個体を一つ選択し突然変異を行う
  - c) 個体を一つ選択しそのままコピーする
- (E) 次世代の個体数が  $n$  個になるまで上記の動作を行い、 $n$  個になったら次世代の内容を全て現世代に移す

(F) (D), (E)の動作を最大世代数  $k$  回まで繰り返し、「現世代」の中で最も適応度の高い個体が解となる

避難モデルでは、応答距離および時間の観点から総移動コストによって避難の効率を測定する。火山の噴火次第ではあるが影響範囲は予測可能であり、通常は噴火の数時間から数日前までには散見される。しかし、噴火すると火山砕屑物（火山灰や火山礫など）の影響は、近くの地域だけでなく噴火地点から数キロから数百キロ離れた空中に1時間以内に拡散する可能性があり、それは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する。ゆえに、航空機を安全な地域に避難させるのに十分な時間を確保する必要がある。したがって、最初の目的関数は、移動距離を基にした時間を最小化させる。

火山噴火時の避難航空機の割り当てと避難先の空港選択を解決するための制約として以下を考慮する。

- (1) 空港容量：空港が収容できる航空機の数
- (2) 滑走路長：航空機を特定のサイズに制限する滑走路の長さ
- (3) 航空機に関する制限
  - 1) 航空機の型と大きさ：避難航空機の着陸、駐機、出発に空港が対応可能かどうか
  - 2) 航空機の旅程：最適化計算のために影響を受けると推定される、つまり避難が必要な航空機の設定

### 3.3 定式化と提案モデル

避難所の空港選択と避難計画のために計算アルゴリズムを提案する。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時間の総計を最小化することをモデルの目的とする。それは、地理座標（緯度と経度）を使用して、空港と航空機の位置によって計算される。なお、計算の際には、各避難先の空港の収容能力や空中、および地上避難航空機の影響範囲外の空港への割り当てが考慮されるアルゴリズムとした。

初めに、目的関数(1)を以下に表す。

$$\text{Min} \sum_i \sum_j T_{ij} \cdot E_{ij} \quad (1)$$

ここで、

( $i, I$ )：噴火や火山灰の影響範囲内、すなわち運用不可能な空港  $i$  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  $J$ ； $j \in J$

$T_{ij}$ ：避難可能な空港への各航空機の飛行時間(h)

$E_{ij}$ ：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

であり、 $I, J$ は添字集合、 $T_{ij}$ ， $E_{ij}$ は決定変数である。

次に、制約条件(2)および(3)を以下に示す。

$$X_j \notin F_{ij} \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} E_{ij} \leq c_j \cdot MC_j \quad \forall j \quad (3)$$

ここで、

$X_j$ ：避難可能な空港が選択されている場合1，そうでない場合0

$F_{ij}$ ：この集合の要素は避難可能な空港と運用不可能な空港が合致する場合の個体である

$MC_j$ ：避難可能な空港の最大航空機容量

$c_j$ ： $MC_j$ に対する受け入れ可能な割合；定数

$$c_j = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$$

であり、 $F_{ij}$ ， $MC_j$ ， $c_j$ はパラメータ、 $X_i$ は決定変数である。全ての避難可能な空港について、式(2)は3.1節の(2)項の仮定と等価の意味で、避難可能な空港は火山噴火の影響を受けない地域にあることを、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、受け入れ可能な最大航空機容量を超えてはならないことをそれぞれ示している。

以上の制約条件に加えて、GAは目的に対して重みのない最適化手法であるため、重み付きGAを適用するために次のペナルティ関数(4)を用いた。

$$h_{ij} = a * \left( \sum_{j \in J} E_{ij} - c_j \cdot MC_j \right)^2 \quad a \geq 1 \quad (4)$$

ここで、

$h_{ij}$ ：GAを制御するための容量制限として避難可能な空港に割り当てられたペナルティ値

$a$ ：制約違反の程度に応じた定数；

航空機の最低所要時間65分(乗客や貨物の乗降とエンジンの最小冷却時間の35分間、地上滑走と方向転換時間の25分間、離陸の5分間)に対応する

であり、 $h_{ij}$ ， $a$ はパラメータである。制約違反の程度（最大空港収容能力違反の数）に依存したそれぞれの実行不可能な解に追加の飛行時間を与えることで、避難可能な各空港に割り当てられた航空機の数に最大収容能力を超えないように制御した。これは、制約違反の程度に応じて適合度が落ちるように定数  $h_{ij}$  をその飛行時間に加算することで実行できる。

最後に、モデルの中で使用したパラメータ、決定変数のうち上記で述べられなかったものを次にまとめて記す。

(パラメータ)

$P_i$ ：使用不可能な空港に駐機する航空機の母集団

$p_i$ ： $P_i$ に対して避難する必要がある航空機の割合；定数

$$p_i = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$$

$D_{ij}$ ：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)

(決定変数)

$TP_i$ ：影響を受ける空港の総母集団

$Z_{ij}$ ：影響を受ける空港から避難先の候補の空港へ割り当てられた航空機の数

### 4. ケーススタディ

以上の提案モデルを実際に特定の火山の噴火を対象にして適用するケーススタディを示す。本研究においては、その特定の火山を桜島とする。

#### 4.1 桜島の噴火による影響範囲の決定

日本中部の浅間山と日本の南の桜島の降灰観測から2009年から2015年の間に噴火のパターンが発見されており、典型的な噴煙柱の高さは2-5 km、活動の終期の総降灰量のうち50%が火口から4.2 km以内に、99%が23.3 km以内に堆積したが、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ると判明した。

本研究では、2016年3月13日のCARATSオープンデータを1時間区切りにしたものを基にしている。この時期の九州南部の風の方向は主に南西であるが、分布としては太平洋側に北東から南にかけて流れている。また、日本活火山総覧の桜島の項<sup>2)</sup>で、2009年4月9日の昭和火口の爆発的噴火による火山灰の落下分布とその予測域から、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かけて少なくとも160 kmの距離まで拡散されると推測できる。(図-1) 以上より、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200 kmの円内とした。(図-2)

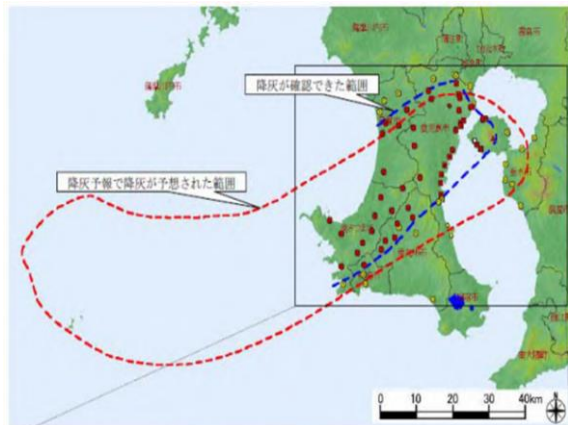


図-1 2009年4月の噴火で予測された火山灰の飛距離

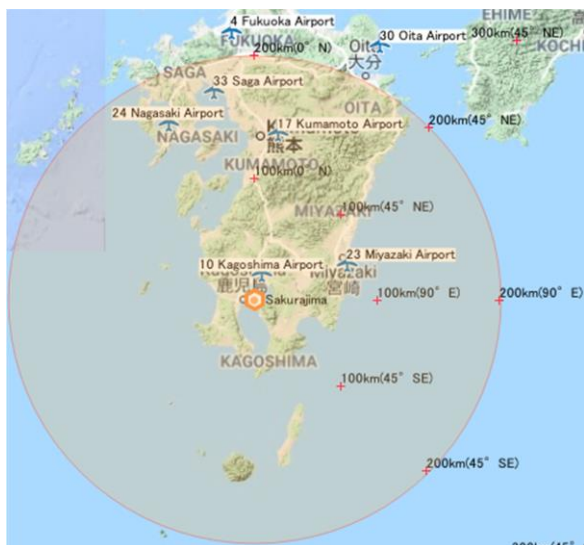


図-2 桜島噴火の影響範囲

#### 4.2 影響範囲内の空港と避難すべき航空機数の抽出

火山噴火の影響を受ける範囲内の空港は、鹿児島空港、宮崎空港、熊本空港、長崎空港、佐賀空港の5つである。この5つの空港容量の合計88機を避難すべき最大地上航空機数とした。また、CARATS オープンデータの最新のデータ(2016年3月13日)より、一日当たり2,860機が影響する範囲内を飛行している。その高度、および軌跡から実際に避難すべき飛行中の航空機を絞り込み、それを1時間当たりのデータ数にすると、26機が抽出された。よって、避難すべき航空機の総数は114機となる。

#### 4.3 空港の対応能力による避難候補の選択とその基準

国土交通省の日本民間航空局によると、政府、民間部門そして自衛隊が運営する空港が計98ある。3.2節の避難先の空港の選択基準に基づいて本研究ではその基準のうち、次の大きな要因から避難空港候補を絞り込んだ。

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、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。以上より、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って選択されるべき避難先の空港を本研究においては、94の空港のうち本州および四国の42の空港とした。

#### 5. 計算結果

この章では、GAによる数値計算および避難すべき航空機の割り当て結果を示す。なお、比較対象として最近傍検索の結果も示す。

##### 5.1 最近傍検索

表-1 最近傍検索結果

| ICAO<br>コード | 最大容量 | 割り当て<br>られた<br>航空機数 | 割り当て<br>られた<br>航空機の<br>割合 | 残りの<br>容量 |
|-------------|------|---------------------|---------------------------|-----------|
| RJBK        | 64   | 1                   | 0.9%                      | 63        |
| RJFF        | 67   | 78                  | 68.4%                     | (11)      |
| RJFO        | 11   | 22                  | 19.3%                     | (11)      |
| RJFR        | 11   | 2                   | 1.8%                      | 9         |
| RJOC        | 10   | 1                   | 0.9%                      | 9         |
| RJOI        | 76   | 1                   | 0.9%                      | 75        |
| RJOK        | 18   | 2                   | 1.8%                      | 16        |
| RJOM        | 23   | 3                   | 2.6%                      | 20        |
| RJOR        | 21   | 1                   | 0.9%                      | 20        |
| RJOW        | 3    | 3                   | 2.6%                      | 0         |
|             |      | 114                 | 100.0%                    |           |

最近傍検索は、最も近い 10 の避難先の候補の空港を選択した。ただし、最近傍検索では避難空港の収容能力を考慮しないため、各避難空港で割り当てられた航空機は偏りが大きい。影響を受ける空港と航空機のほとんどが ICAO コード RJFF の福岡空港と RJFO の大分空港の近くに位置しているため、影響を受ける航空機の 87.7 % がこれらの空港に割り当てられ、それらの空港の最大能力をそれぞれ 11 機超過した。(表-1)

## 5.2 GA

GA による計算は、3.2 節の手順に沿って実行されるが、最初に、それぞれ適当に交叉率 30 %、突然変異率 1 % として、最初の個体数を 300 生成し、100 世代まで計算させたところ、31 の空港が選択され、ペナルティー関数によってそのどれもが航空機の最大容量を超過していないことが確認された。(図-3) このとき、目的関数の値、つまり避難すべき航空機の総飛行時間は 60.659 時間と算出された。

ここで、どの確率で個体の交叉や突然変異を実行すると飛行時間が短縮されるかを調べるために(最初の個体数を 300、1000 世代目まで繰り返す条件のもとで)感度分析を行った結果、突然変異率が低く交叉率が高いほど総飛行時間は減少する。よって、突然変異率を 1 % (突然変異率は確率が過度に低いと局所最適解に陥る可能性が高いため)、交叉率を 100 % とした。この条件の下、避難すべき航空機の割り当てを GA で 100 世代目まで繰り返

し再度計算した結果、21 の空港が選択され、分布がより影響を受ける範囲に向かって縮小した。(図-3,4) さらに、避難すべき航空機の総飛行時間は 42.651 時間に短縮された。なお、いずれの場合においても目的関数の値は収束した。

## 6. おわりに

提案したモデルによって、航空機の概念的な避難を可能とした。ケーススタディでは桜島の例を取り上げたが、ある火山に対して噴火の予測から影響範囲を推定し、CARATS オープンデータからその範囲の航空機を抽出できれば、その計算は容易である。また、火山の噴火の予測精度は年々高度化しているため、より迅速に、そして正確に範囲を指定することが推測される。

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、距離と空港の容量制限を考慮し、GA を用いて最適航空機避難モデルを構築したが、現実の航空交通管理に照合させてみれば、考慮されるべき事項は未だ数多く残っている。例えば、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。

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(ペナルティー関数)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。

## 参考文献

- 1) AIS japan: <https://aisjapan.mlit.go.jp>(2019/12/4)
- 2) 日本活火山総覧(第4版)・90.sakurajima, pp1-44, 2013
- 3) ICAO, Aerodrome Design and Operations, Aerodrome reference code in Annex 14, volume 1

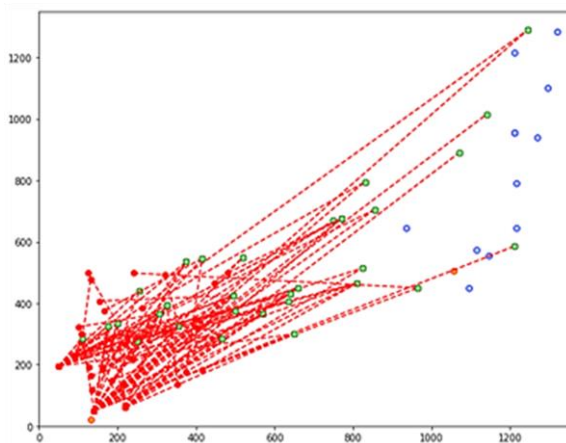


図-3 交叉率 30%, 突然変異率 1%の航空機の軌跡

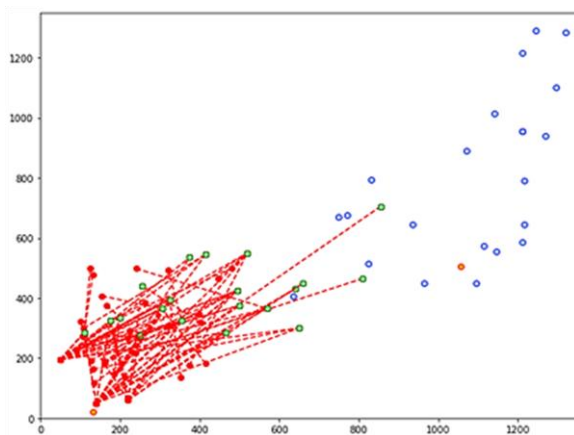


図-4 交叉率 100%, 突然変異率 1%の航空機の軌跡