

(一財) 港湾空港総合技術センター  
令和 7 年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 令和 7 年 2 月 25 日付 第 15 - 8 号

研究開発項目 : ③港湾, 海岸及び空港における大規模災害対策に関するもの

大規模火山災害に対応した港湾, 空港の  
BCP に関する研究

令和 8 年 4 月 30 日

神戸大学大学院海事科学研究科

竹 林 幹 雄



# 目 次

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 1. はじめに.....                               | 1  |
| 2. 大規模噴火時における非難航空機の動的避難先割り当てに関する研究 ....    | 2  |
| 2.1 研究背景と本研究の位置づけ .....                    | 2  |
| 2.2 基本モデルの構造 .....                         | 2  |
| 2.3 動的割り当てによる拡張 .....                      | 4  |
| 2.4 動的割り当て問題の定式化 .....                     | 5  |
| 2.5 逐次割り当てアルゴリズム .....                     | 6  |
| 2.5.1 基本的な考え方 .....                        | 7  |
| 2.5.2 容量および航空機数の更新 .....                   | 7  |
| 2.5.3 未割り当て航空機の扱い .....                    | 7  |
| 2.6 計算結果 .....                             | 7  |
| 2.6.1 Case 1:降灰影響が九州域に限定される場合 .....        | 8  |
| 2.6.2 Case 2:降灰影響が関西・中部地方に及ぶ場合 .....       | 9  |
| 2.6.3 Case 3:降灰影響が首都圏にまで及ぶ場合 .....         | 9  |
| 2.7 空港別駐機状況の推移 .....                       | 9  |
| 2.7.1 Case 1:局所的影響下における駐機状況 .....          | 10 |
| 2.7.2 Case 2:中部・関西圏を含む影響下での集中傾向 .....      | 10 |
| 2.7.3 Case 3:首都圏影響下における容量逼迫と滞留 .....       | 11 |
| 2.8 航空ネットワーク上における避難フローと航路混雑 .....          | 12 |
| 2.8.1 Case 1:限定的な広域影響下における集中しない避難フロー ..... | 12 |
| 2.8.2 Case 2:広域化に伴う時間的分離と二峰性の混雑 .....      | 14 |
| 2.8.3 Case 3:全国的影響下におけるフローの集中と持続的混雑 .....  | 15 |
| 2.9 噴火開始時刻の変動に伴う航空機避難の推移 .....             | 16 |
| 2.9.1 噴火開始時刻と避難成否の関係 .....                 | 17 |
| 2.9.2 空港別に見た避難失敗機数の内訳 .....                | 18 |
| 2.9.3 羽田空港における避難需要構造の時間変化 .....            | 19 |
| 2.10 まとめ .....                             | 20 |
| 2.10.1 本研究で得られた知見の整理 .....                 | 20 |
| 2.10.2 政策的含意 .....                         | 21 |
| 3. 火山災害とVAAC 情報との関連性に関する分析 .....           | 24 |
| 3.1 概要 .....                               | 24 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.2 分析方法 .....                     | 26 |
| 3.3 分析結果と連携フローの検討.....             | 26 |
| 3.3.1 火山灰からの距離別運航状況.....           | 26 |
| 3.3.2 飛行ルート分類 .....                | 28 |
| 3.4 まとめ .....                      | 34 |
| 4. 海底火山噴出物による港湾閉塞の経済被害推計.....      | 36 |
| 4.1 概要 .....                       | 36 |
| 4.2 分析手法とデータ .....                 | 37 |
| 4.2.1 分析手法.....                    | 37 |
| 4.2.2 データ.....                     | 38 |
| 4.3 結果と考察 .....                    | 38 |
| 4.3.1 移輸出途絶によるサプライチェーン上流の経済被害..... | 38 |
| 4.3.2 移輸入途絶によるサプライチェーン下流の経済被害..... | 44 |
| 4.3.3 考察 .....                     | 45 |
| 5. 2年間の研究成果のまとめと今後の方針.....         | 47 |
| 5.1 まとめ .....                      | 47 |
| 5.2 政策的含意と今後の方向性.....              | 49 |

# 1. はじめに

火山噴火は常に航空輸送にとって重大な脅威となってきた。特に、2010 年にアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山が噴火したことは、航空安全対策のあり方において重要な転換点となった。この噴火により、ヨーロッパの空域は完全に閉鎖され、10 万便以上のフライトが運航停止に追い込まれた (IATA, 2010)。その後、ICAO は安全な飛行運用に関する改訂ガイドラインを発表した (ICAO, 2017) が、具体的な手順までは示さず、あくまで一般的な推奨事項にとどまった。

航空輸送だけではなく、火山噴火は海上輸送にも大きな影響を与えうることが、近年の事例から明らかとなった。2021 年 8 月に発生した福徳岡の場の海底火山噴火により、おびただしい量の軽石が噴出し、それらは同年 10 月には遙か西にある沖縄、奄美群島に大量に漂着した。この漂着があまりに大規模であった沖縄本島北部、ならびに与論島などの奄美地域では港内への軽石流入により、運航停止も発生するなど海上輸送に著しく影響が発生したことは記憶に新しい。このように航空輸送ならびに海上輸送においては、火山災害はひとたび大規模に発生すれば、その影響は広範囲に及ぶ一方で、それを対象とした輸送インフラの事業継続計画 (Business Continuity Plan/BCP) については、例えば空港については国から示された A2-BCP に基づき各所で設定はされているものの、より実効性の高い計画の策定が望まれている。

このように、火山災害に関する基本的な分析が、特に輸送インフラについては十分とはいえない。最も注目されている富士山噴火の影響でさえ、ここ数年でようやく深刻な問題であることが認識されたと言ってよい。前述のように、より実効性の高い BCP を策定する上で、その方法論の開発が急務であると言える。

本研究課題は、以上のような研究動機に基づき 2 年間の予定で実施された 2 年目の研究成果をまとめたものである。まず、最初に航空輸送への影響への影響を把握するための方法論として、動的な駐機機材の退避を新たに提案した研究成果を述べる。次に昨年度まで実施してきた観測された噴火の影響を把握するための方法論による新たな事例分析 (メキシコ・ポポカテペトル) での研究成果を述べる。続けて福徳岡の場で発生した軽石被害が本土に発生した場合の経済被害についての分析を第 4 章で述べる。最後に本研究の 2 年間の成果をまとめ、今後の方向性について述べる。

## 2. 大規模噴火時における非難航空機の動的避難先割り当てに関する研究

### 2.1 研究背景と本研究の位置づけ

前年度に開発した航空機の避難先割り当ては、火山灰との遭遇ポイントのみを考慮した静的な航空機避難割り当て手法であった。本年度はこの分析手法を拡張し、災害の時間的推移を明示的に考慮した動的割り当て分析を行うことを目的とする。

火山噴火時の実際の避難判断では、すべての空港が同時に避難対象となるわけではなく、警戒情報の更新や火山灰の到達に応じて、空港が段階的に避難対象（警戒度合い **Red**）へと移行する。また、先行して実施された避難により、避難先空港の駐機容量は逐次的に消費される。このような状況下では、航空機数や駐機容量、さらには避難対象空港の集合自体が時刻によって変化するため、前年度に開発した静的な定式化をそのまま適用することはできない。そこでここでは、避難開始時刻  $t$  を明示的に導入し、目的関数および制約条件を時刻依存型として再定義する。さらに、本章では実際の空港運用をより忠実に反映するため、静的分析では考慮していなかった追加的な制約条件を導入する。これらはモデルを恣意的に複雑化することを目的とするものではなく、動的な避難判断が求められる実際の災害対応状況を反映するために必要な要素である。本章では、これらの制約が避難割り当て結果に与える影響を明らかにし、静的分析との比較を通じて、動的・現実的条件下における航空機避難の困難性を検討する。

### 2.2 基本モデルの構造

まず、本研究で使用する集合および変数を以下のように定義する。

表 2.1 シミュレーションのパラメータと定義

| パラメータ        | 定義                                 |
|--------------|------------------------------------|
| $t$          | 噴火開始時刻を 0 たした時の時刻(5 分刻み)           |
| $I^{Red}(t)$ | 警戒区分が <b>Red</b> と判定された避難元空港の集合    |
| $i$          | 避難元空港の集合                           |
| $J$          | 避難先空港の集合                           |
| $j$          | 避難先空港                              |
| $V_i$        | 空港 $i \in I^{Red}$ に駐機している航空機数     |
| $C_j$        | 空港 $i \in I^{Red}$ における受け入れ可能な駐機容量 |
| $d_{ij}$     | 空港 $i$ から空港 $j$ までの距離              |
| $x_{ij}$     | 空港 $i \in I^{Red}$ から空港 $j$ までの距離  |

まず避難に伴う総移動距離の最小化を目的関数として以下のように設定する。

$$\text{Minimize to } \sum_{i \in I^{Red}} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (2-1)$$

本目的関数は、燃料消費量や飛行時間の増加を間接的に反映する指標として解釈できる。

各空港は時刻 $t$ において警戒度合い（緑、黄色、オレンジ、赤）のいずれかに分類される。本研究では、警戒度合いが赤と判定された空港のみを避難対象空港とする。この時、時刻 $t$ における避難対象空港集合を以下のように定義する。

$$I^{Red}(t) = \{i | \text{airport } i \text{ is classified as Red at time } t\} \quad (2-2)$$

次に静的割り当てに用いた制約条件を列挙する。

各避難元空港 $i$ において、割り当てられる航空機数の合計は、その空港に駐機している航空機数を超えない。

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq V_i \quad \forall i \in I^{Red} \quad (2-1)$$

この不等式は、すべての航空機が必ずしも避難できない可能性を許容するために導入している。各避難先空港 $j$ において、受け入れる航空機数は、その空港の駐機容量を超えてはならない。

$$\sum_{i \in I^{Red}} x_{ij} \leq C_j \quad \forall j \in J \quad (2-2)$$

かつ、割当数は非負でなければならない。

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I^{Red}, \forall j \in J \quad (2-3)$$

空港における駐機容量は、単純な航空機台数ではなく、航空機サイズとエプロン仕様との適合関係によって制約される。実際の空港では、エプロン（駐機場）は対応可能な航空機サイズに応じて区分されており、機体サイズと一致しないエプロンへの駐機は認められていない。

本研究ではこの関係を簡略化し、航空機サイズを小型（S）、中型（M）、大型（L）の三種類に分類する。同様に、各空港におけるエプロンも、対応可能な航空機サイズに基づき、S・M・Lの三区分に整理する。各空港におけるサイズ別エプロン数および対応可能な航空機容量については、平田ら（2023）が整理した資料を参照した。

各航空機は、自身のサイズと同等またはそれ以上のサイズに対応したエプロンにのみ駐機可能であり、機体サイズより小さいエプロンへの割当は認められないものとする。例えば、大型航空機は大型エプロンにのみ駐機可能であり、中型または小型エプロンへの割当は不可能である。また、中型航空機は中型または大型エプロンに駐機可能であるが、小型エプロンへの割当は認められない。

以上を踏まえ、避難先空港  $j$  におけるサイズ別航空機の受け入れ容量を

$$C_j^S, C_j^M, C_j^L \quad (2-4)$$

と定義する。

これらは、空港  $j$  において各サイズの航空機が同時に駐機可能な最大数を表す。

また、避難元空港  $i$  から避難先空港  $j$  へ割り当てられる、サイズ  $l \in \{S, M, L\}$  の航空機数を

$$x_{ij}^{(k),l}, \quad (2-5)$$

と表す。ここで、上付き文字  $(k)$  は割当段階を示す。

避難先空港における航空機割当には、エプロン容量を超過しないという制約を課す。すなわち、任意の避難先空港  $j$  および航空機サイズ  $l \in \{S, M, L\}$  に対して、割り当てられる航空機数の合計は、当該サイズの受入容量を上回らないものとする。

この条件は、以下のように定式化される。

$$\sum_i x_{ij}^{(k),l} \leq C_j^{(k),l} \quad \forall j, \forall l \in \{S, M, L\} \quad (2-6)$$

ここで  $C_j^{(k),l}$  は、割当段階  $k$  における空港  $j$  のサイズ  $l$  航空機に対する受け入れ容量を示す。

静的割り当てでは時刻によらず容量は一定である。

本研究では、サイズ別エプロン容量を「当該サイズの航空機が駐機可能なエプロンの総数」として定義する。すなわち、小型機の容量には小型・中型・大型エプロンをすべて含め、中型機の容量には中型・大型エプロンを含める一方、大型機の容量は大型エプロンのみに限定される。

## 2.3 動的割り当てによる拡張

動的割り当てに拡張するため、追加的に必要となる制約条件についてここでは検討する。

火山噴火時における航空機の避難行動は、単に距離や容量のみで決定されるものではなく、火山灰雲の広がり方向に対する心理的・物理的な制約を強く受ける。特に、噴火火口から見て火山灰雲が拡散している方向へ航空機を避難させることは、視程の悪化、機体の汚染・破損リスク、さらには操縦上の不確実性を伴うため、実務上も回避される傾向が強い。

本研究ではこの点を考慮し、火山灰雲が主として拡散している西側方向への避難を制限する制約を導入する。具体的には、噴火火口を基準とした方位角のうち、240度から300度の範囲に該当する方向への避難割当は行わないものとする。

この制約は、避難先空港が幾何学的には近距離に位置していたとしても、火山灰雲の進行方向に重なる場合には割当候補から除外されることを意味する。数式的には、避難元空港  $i$  から避難先空港  $j$  への方位角が当該範囲に含まれる場合、対応する割当変数はゼロに固定される。以上のことを定式化すると必要とされる条件は

$$\text{If } \theta_{ij} \in \left[ \frac{5}{6}\pi, \frac{7}{6}\pi \right], x_{ij}^{(k)} = 0 \quad (2-7)$$

となる．

次に空港の構造上の制約について検討する．空港ではエプロンのみならず，滑走路長の制約も航空機の駐機可否に影響を及ぼす．特に大型航空機については，滑走路長が不足する空港への避難は，着陸および再出発の観点から現実的ではない．

本研究では簡略化のため，以下の条件を導入する．

- ・大型航空機(L)は，
  - ・滑走路長が 2000m 未満の空港，
  - ・または避難元空港の滑走路長より短い空港
 には駐機できないものとする．
- ・中型機および小型機については，滑走路長による制約を課さない

空港 $j$ の滑走路長を $R_j[\text{m}]$ ，避難元空港 $i$ の滑走路長を $R_i[\text{m}]$ とする．

この時，大型機に関する滑走路長制約は以下のように定式化される．

滑走路長制約(大型機)

$$x_{ij}^L = 0 \quad \text{if } (R_j < 2000) \quad \text{or} \quad (R_j < R_i) \quad (2-8)$$

この制約により，大型機は十分な滑走路長を有する空港にのみ割り当てられることが保証される．

## 2.4 動的割り当て問題の定式化

火山噴火時には，警戒情報の更新に伴い，避難対象となる空港が時間とともに変化する．また，先行して実施された避難によって，避難先空港の駐機容量は逐次的に減少する．これらの要素を考慮するため，本研究では割当変数，航空機数，駐機容量をすべて時刻 $t$ 依存の量として扱う．

まず時刻 $t$ において，警戒度合いが Red に達し，航空機の避難が必要と判断される空港の集合を

$$\Omega^{RED}(t) \quad (2-9)$$

と定義する．本章では，この集合が時間と共に拡大していく状況を想定し，時刻ごとに避難割り当てを逐次的に実施する．

避難元空港 $i$ から避難先空港 $j$ へ，時刻 $t$ に割り当てられるサイズ $l \in \{S, M, L\}$ の航空機数を

$$x_{ij}^l(t) \quad (2-10)$$

と定義する．

また，時刻 $t$ において避難元空港 $i$ に残存するサイズ $l$ の航空機数を

$$V_i^l(t) \quad (2-11)$$

とし、避難先空港  $j$  におけるサイズ別の残存駐機容量を

$$C_j^l(t) \quad (2-12)$$

と表す。

以上のように考えると、時刻  $t$  における航空機避難割り当ての目的は、避難対象空港に駐機している航空機を、可能な限り近距離の空港へ避難させることである。この考え方は静的分析と同様であるが、本章では対象が時刻  $t$  ごとに変化する点が異なる。従って、時刻  $t$  における目的関数は時式で与えられる。

$$\text{minimize to } \sum_{i \in \Omega^{RED}(t)} \sum_j \sum_i d_{ij} x_{ij}^l(t) \quad (2-13)$$

制約条件としては前節で検討したものを含め、以下のように整理できる。

#### (1) 航空機数保存制約

避難元空港  $i$  において、時刻  $t$  に残存する航空機数を超えて避難を行うことはできない。この条件は以下の式で表せる。

$$\sum_j x_{ij}^l(t) \leq V_{ij}^l(t) \quad \forall i \in \Omega^{RED}(t), \forall l \quad (2-14)$$

#### (2) 駐機容量制約(サイズ別・時刻依存)

避難先空港  $j$  におけるサイズ別の駐機容量は、先行する避難によって逐次的に消費される。従って、時刻  $t$  における割り当ては残存容量を超えてはならない。

$$\sum_i x_{ij}^l(t) \leq C_j^l(t) \quad \forall j, \forall l \quad (2-15)$$

#### (3) 非負条件

$$x_{ij}^l(t) \geq 0 \quad \forall i, j, l, t \quad (2-16)$$

#### (4) 追加的制約

2.3 で示した避難方位制約および滑走路長に基づく航空機サイズ制約を併せて課す。これらの制約により、火山灰雲の拡散方向や空港設備条件と整合しない割当は排除される。

## 2.5 逐次割り当てアルゴリズム

前節で定式化した時刻依存型割当モデルを用い、本研究では航空機避難を逐次的に実施するアルゴリズムを導入する。このアルゴリズムは、警戒度の進展に応じて避難対象空港を更新し、その都度割当を確定させる点に特徴がある。

### 2.5.1 基本的な考え方

本研究における逐次的割当は、以下の考え方に基づく。

1. 時刻  $t$  において Red 状態となった空港のみを避難対象とする。
2. その時点で残存する航空機および駐機容量に基づき、割り当て問題を解く。
3. 割り当て結果を確定させ、避難元の航空機数および避難先の容量を更新する。
4. 次の時刻  $t + 1$  に進み、同様の手続きを繰り返す。

### 2.5.2 容量および航空機数の更新

時刻  $t$  において割り当てが確定した後、避難先空港  $j$  のサイズ別駐機容量は次式により更新される。

$$C_j^l(t+1) = C_j^l(t) - \sum_i x_{ij}^l(t) \quad (17)$$

同様に、避難元空港  $i$  における残存航空機数は

$$V_i^l(t+1) = V_i^l(t) - \sum_j x_{ij}^l(t) \quad (18)$$

と更新される。

### 2.5.3 未割り当て航空機の扱い

割当問題の結果として、制約条件を満たす避難先が存在しない航空機が生じる場合がある。これらの航空機は未割当として記録され、これらを避難に失敗した航空機とみなす。ここでは、動的条件下における避難困難性を評価する重要な指標として扱う。特に、大規模噴火時には、避難先空港の容量不足や追加制約の影響により、未割当航空機が時間とともに累積する可能性がある。本研究では、この点に着目し、静的分析との比較を通じて動的条件が与える影響を検討する。

## 2.6 計算結果

動的割り当ての結果を以下の図に示す。なお、2.6 から 2.8 で示す結果は全てのシナリオにおいて、噴火開始時刻を午前 6:00 に固定した時のものである。噴火開始時刻の噴火開始時刻を変化させた場合の結果は 2.9 に示す。

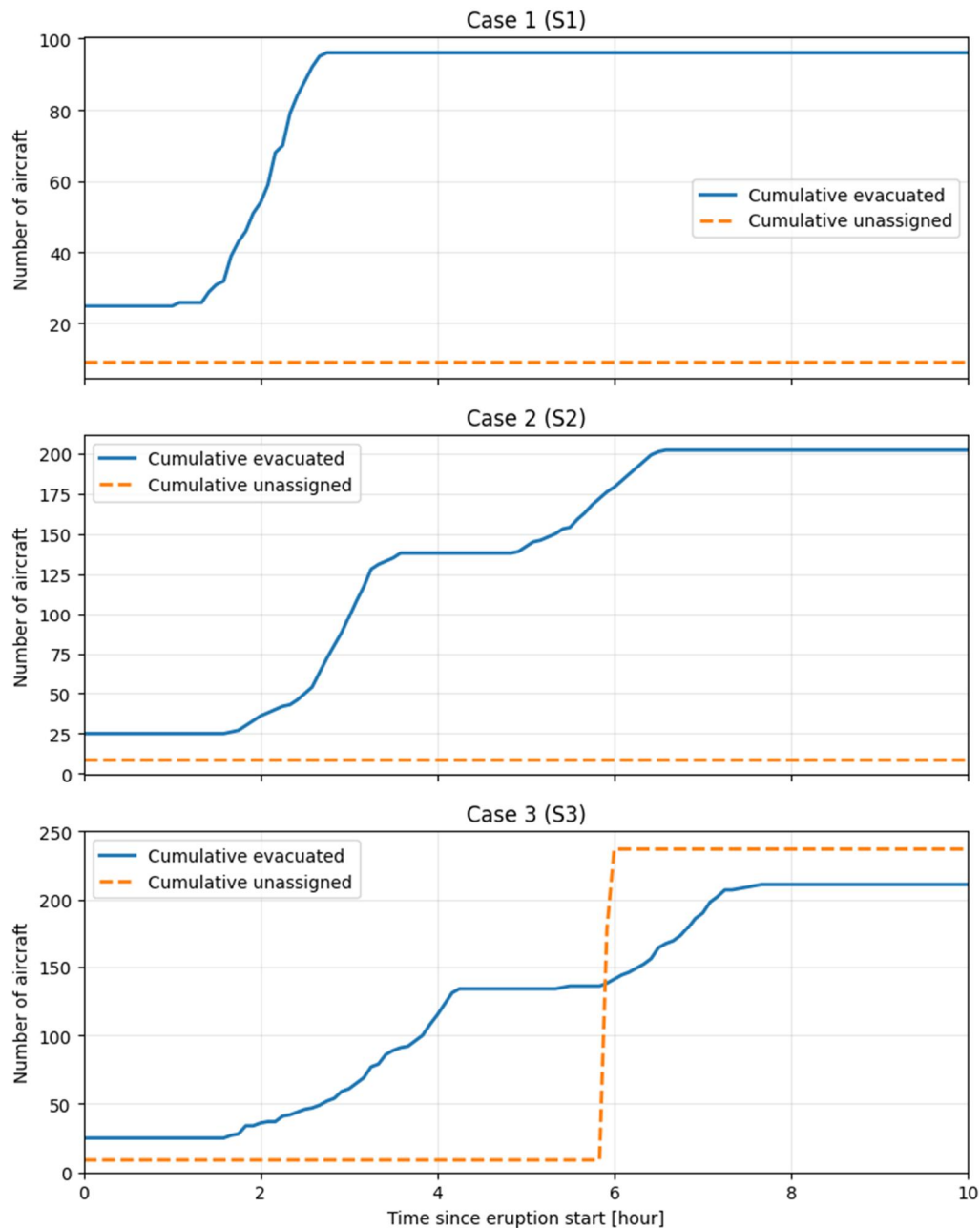


図 2.1 避難完了と避難失敗航空機数の推移

ここでは避難の進行過程と避難失敗の発生状況を把握するため、避難完了航空機数および未割当航空機数の時刻推移に着目する。

図 2.1 は、3 つの降灰シナリオ（Case 1～Case 3）それぞれについて、噴火開始時刻を基準とした経過時間に対する累積避難完了数および累積未割当数を示したものである。

### 2.6.1 Case 1：降灰影響が九州域に限定される場合

Case 1 では、降灰の影響が主として九州域にとどまるため、避難対象空港の数および避難航空機数はいずれも比較的限定的である。

図 2.1 上段に示すように、噴火開始後およそ 90 分前後から避難が本格化し、その後短時間のうちにすべての対象航空機が避難を完了している。未割当航空機数は発生していない。この結果は、前年度研究で示した静的割当結果と整合的であり、降灰影響が局所的である場合には、動的な制約条件を考慮しても航空機避難が成立することを示している。また、羽田、成田、新千歳といった大規模な空港の容量を使うことなく避難が完了しているため、通常運航に影響を及ぼさない範囲での二重避難や、一次避難の時点でのより遠方への避難の検討も考えられる。

### 2.6.2 Case 2：降灰影響が関西・中部地方に及ぶ場合

Case 2 では、降灰影響が西日本から中部地方に拡大し、避難対象となる空港および航空機数が増加する。

図 2.1（中段）より、避難は段階的に進行しており、噴火開始直後から急激に避難が進むのではなく、複数の時間帯に分かれて避難完了数が増加する特徴が確認できる。一方で、本シナリオにおいて未割当航空機数は大きく増加したが、最終的にはすべての対象航空機が割り当て可能であった。これは、避難先空港の地理的分散および容量的余裕が、動的条件下においても一定程度機能していることを示唆している。

### 2.6.3 Case 3：降灰影響が首都圏にまで及ぶ場合

Case 3 では前年度に示した静的状況と同じく他の 2 例とは状況が大きく異なる。

図 2.1（下段）に示すように、避難完了数は時間とともに増加するものの、噴火開始後およそ 5～6 時間付近を境として、未割当航空機数が急激に増加している。この時点以降、新たに避難対象となった航空機の一部が、いずれの空港にも割り当てられない状態に陥っていることが分かる。また、避難失敗が噴火直後から一貫して発生しているわけではなく、ある特定の時点以降に急激に顕在化している点が明らかになった。これは危機対応システムの適応に伴って空港の警戒度合い更新によって避難需要が一斉に発生したことによるものであり、動的割当分析によって初めて明確になった特徴である。

## 2.7 空港別駐機状況の推移

本節では、前節で示した避難完了数・未割当数の時刻推移を踏まえ、避難過程における空港別の駐機状況の変化に着目する。

図 2.2～2.4 は、各シナリオにおける空港別の駐機機数を時刻ごとに示したヒートマップであり、縦軸に空港、横軸に噴火開始からの経過時間、色の濃淡によって駐機機数を表している。

これらの図により、避難失敗が発生する以前の段階から、特定の空港に航空機が滞留・集中していく過程を視覚的に把握することが可能となる。

### 2.7.1 Case 1：局所的影響下における駐機状況

Case 1 では、避難対象となる空港が主として九州域に限定されており、避難先として南西諸島や西日本の複数空港が機能している。

図 2.2 に示すように、いずれの避難先空港においても駐機機数が増加し、高密度の駐機状態が継続する。避難航空機の少ない Case 1 においても未割当航空機が発生しなかった要因として、避難先空港が空間的に分散していることや各空港の容量が段階的な避難需要に対応できていることを示唆している。一方で避難が完了した後の避難先空港においては空港資本が圧迫され通常運航への悪影響が発生することもあると考えられるため、

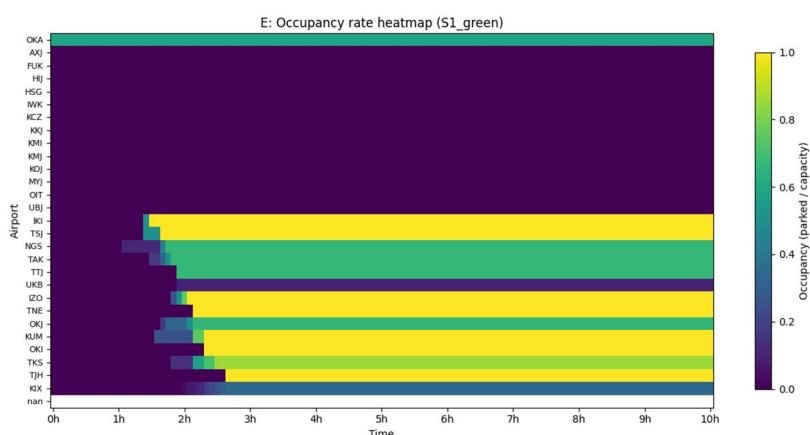


図 2.2 Case1 における避難先空港の占有率推移

### 2.7.2 Case 2：中部・関西圏を含む影響下での集中傾向

Case 2 では、避難対象が関西・中部地方に拡大することにより、避難先として首都圏や東北地方の空港が重要な役割を果たす。

図 2.3 では、特定の時間帯において、関西国際空港、中部国際空港、羽田空港といった主要空港で駐機機数が一時的に増加する様子が確認できる。

ただし、これらの空港では、その後の時間帯で駐機機数が減少しており、完全な容量飽和には至っていない。これは、避難が複数の時間帯に分散して進行したこと、および代替的な避難先空港が一定程度機能したことによるものと考えられる。

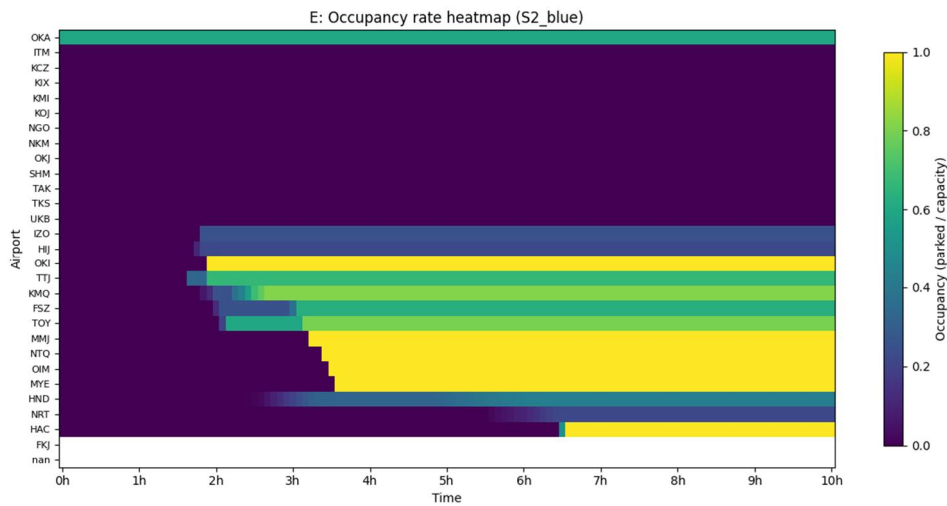


図 2.3 Case2 における避難先空港の占有率推移

### 2.7.3 Case 3：首都圏影響下における容量逼迫と滞留

Case 3 では、首都圏空港が降灰影響を受けることにより、避難先空港の選択肢が大幅に制限される。図 2.4 に示されるように、羽田空港および成田空港において、駐機機数が急激に増加し、高水準のまま推移する時間帯が存在する。特に、前節で未割当航空機数が急増した時点とほぼ同時刻に、これらの空港の駐機機数が容量上限付近に達していることが確認できる。このことは、避難失敗が単一の空港の問題ではなく、主要ハブ空港における容量逼迫が連鎖的に影響した結果であることを示している。

また、地方空港においても、一部の空港では駐機機数が高止まりする傾向が見られ、避難需要が局所的に集中する構造が存在することが明らかとなった。

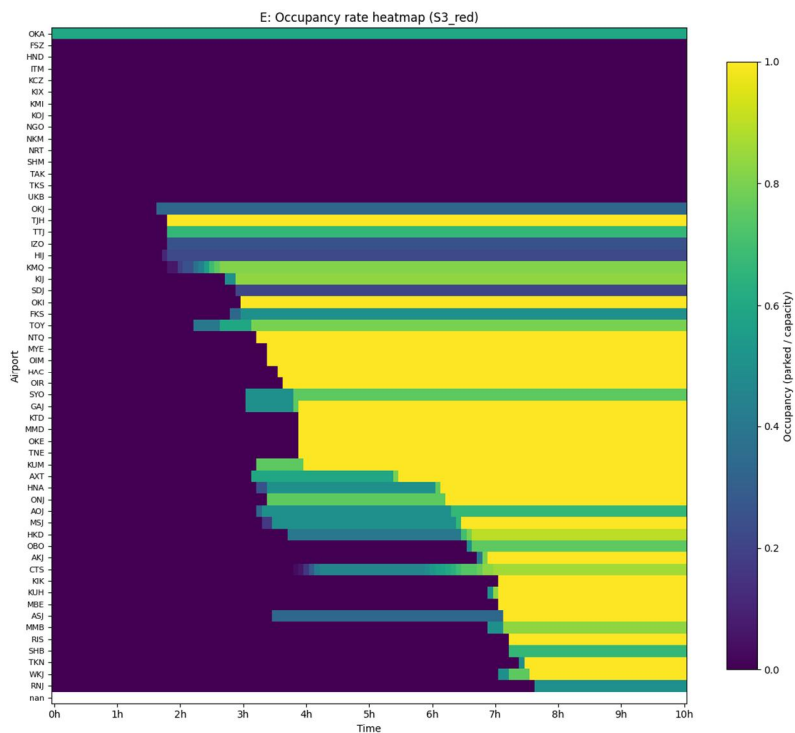


図 2.4 Case3 における避難先空港の占有率推移

以上の結果より、動的割当分析においては、単に総避難容量の大小だけでなく、

- ・どの空港が、どの時点で容量限界に達するのか
- ・その影響が他空港の避難可能性にどのように波及するのか

を把握することが重要であることが分かる。

特に **Case 3** では、羽田・成田といった中枢空港における駐機滞留が、避難割当全体の破綻を引き起こす主要因となっており、時間軸を考慮しない静的分析では把握できない構造的脆弱性が存在することが示された。

## 2.8 航空ネットワーク上における避難フローと航路混雑

本節では、前節までに示した避難割当結果を、航空ネットワーク上のフローおよび航路上の航空機数の推移という観点から整理する。図 2.5 から図 2.10 は、各シナリオにおける避難航空機の主な移動方向と、特定の主要回廊における飛行中航空機数の時間推移を示したものである。これらの図を用いることで、単に「どの空港に何機避難できたか」だけでなく、「いつ・どこで・どの程度の航空機が空域に集中したか」を可視化することができる。

### 2.8.1 Case 1：限定的な広域影響下における集中しない避難フロー

**Case 1** では、降灰の影響が主として九州域に限定されているため、避難航空機の移動は比較的短距離である（図 2.5）。フロー図からは、九州地方南部から南西諸島、九州地方北部や中国・四国地方から関西方向に向かう避難が中心であり、これらの航路における混雑が予期される。

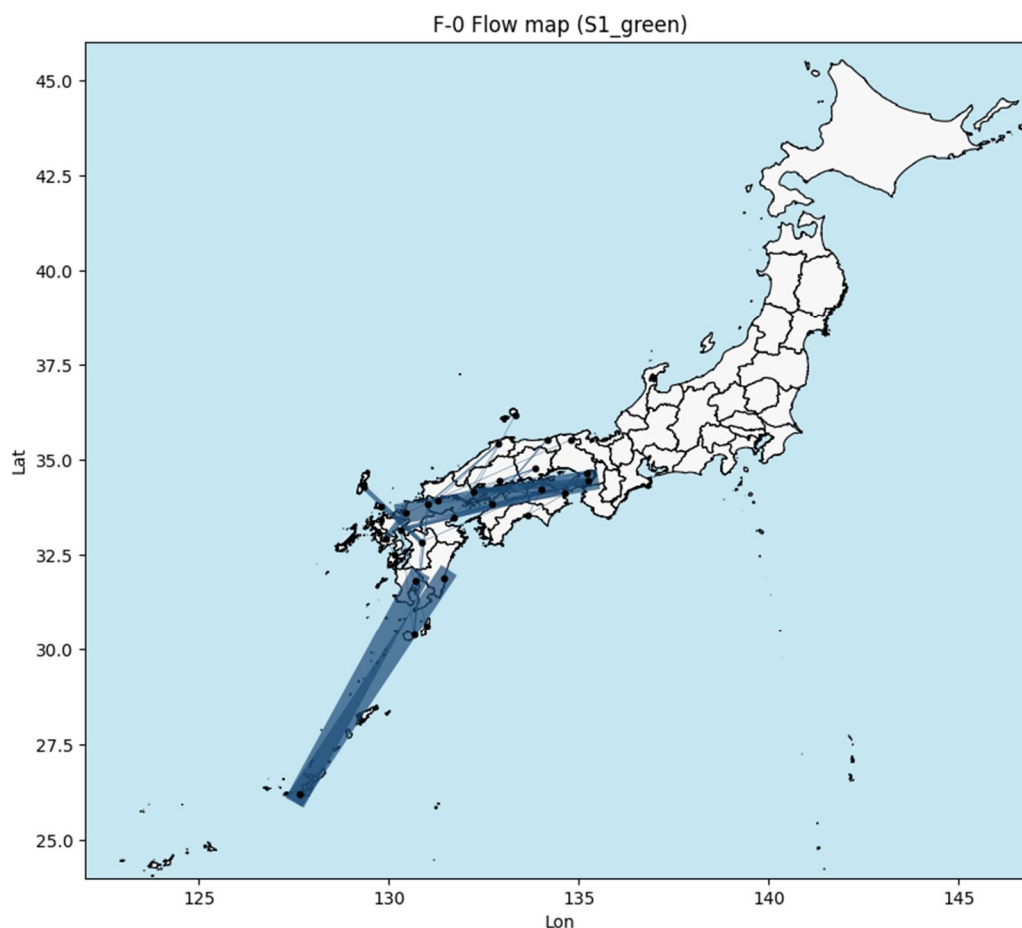


図 2.5 Case1 における航空機避難フロー

また、航路上航空機数の推移（図 2.6）を見ても、飛行中の避難航空機数は一時的に増加するものの、ピーク値は限定的であり、短時間で解消されている。これは、避難対象空港の数が比較的少なく、避難先の選択肢にも余裕があったため、空港容量制約および航路容量の双方が深刻なボトルネックとならなかったことを示している。

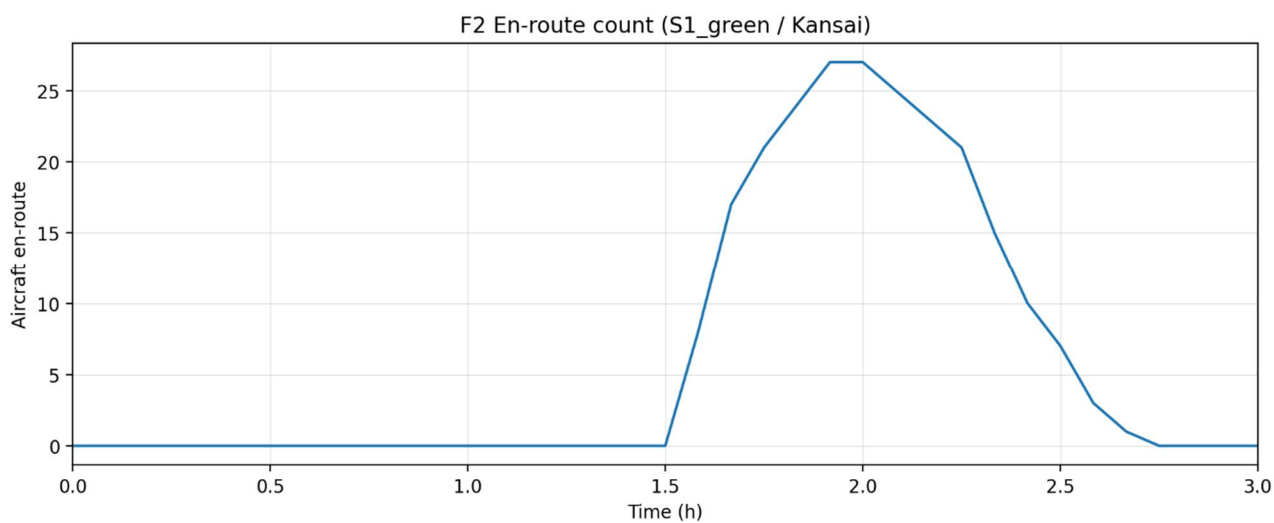


図 2.6 関西方面航路上航空機数の推移(Case1)

### 2.8.2 Case 2：広域化に伴う時間的分離と二峰性の混雑

Case 2 では、降灰の影響が関西・中部地方にまで及び、避難対象空港が大幅に増加する。その結果、避難フローは西日本から東日本へと長距離化し、主要幹線空港を経由する形で集中する傾向が顕著となる（図 2.7）。

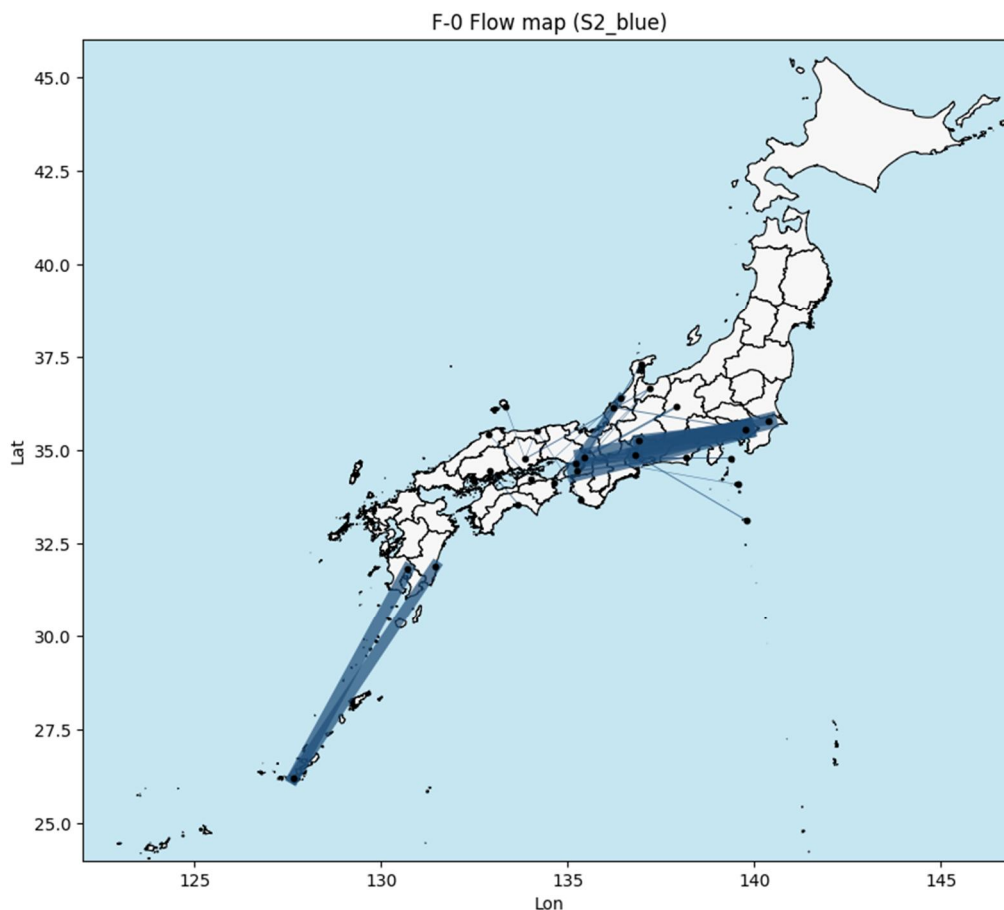


図 2.7 Case2 における航空機避難フロー

航路上航空機数の時間推移を見ると、避難開始直後に第一のピークが生じ、その後いったん減少したのち、再び増加する二峰性の構造が確認できる（図 2.8）。これは、警戒度の上昇が空港ごとに段階的に進行することにより、避難の発生時刻が時間的に分散する一方で、避難先が特定の地域・空港群に集中するためである。この結果は、空港容量制約だけでなく、時間帯によっては空域側の処理能力が実質的な制約となり得ることを示唆している。

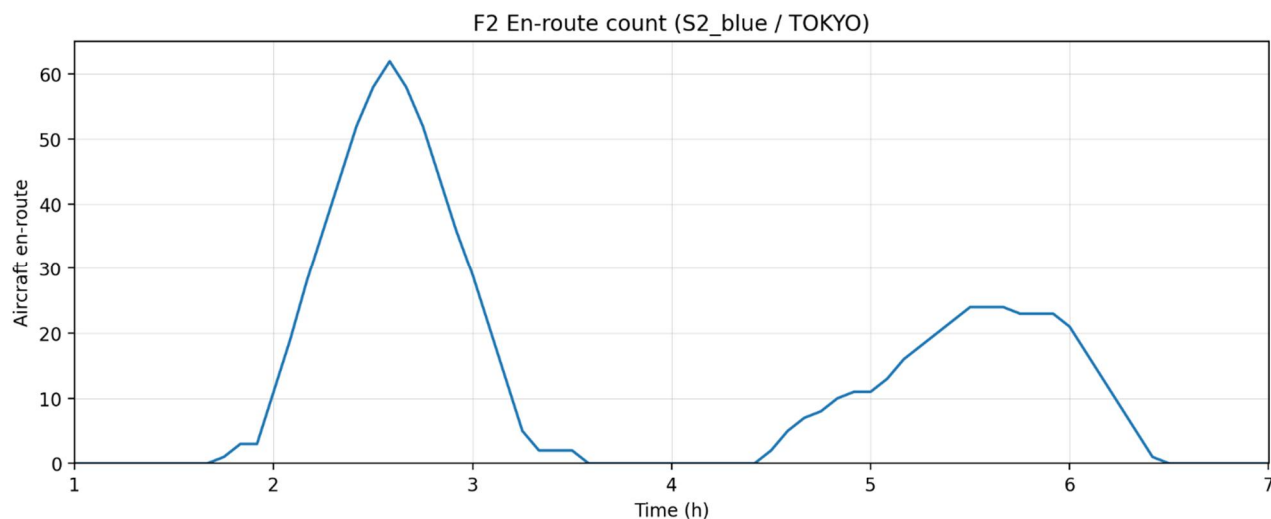


図 2.8 関東方面航路上航空機数の推移(Case2)

### 2.8.3 Case 3：全国的影響下におけるフローの集中と持続的混雑

Case 3 では、降灰の影響が首都圏にまで及び、日本の航空ネットワークの中核空港が同時に避難対象となる。フロー図（図 2.9）からは、西日本および関西圏から、東北・北海道方面へ向かう大規模かつ長距離の避難フローが発生していることが明確に読み取れる。

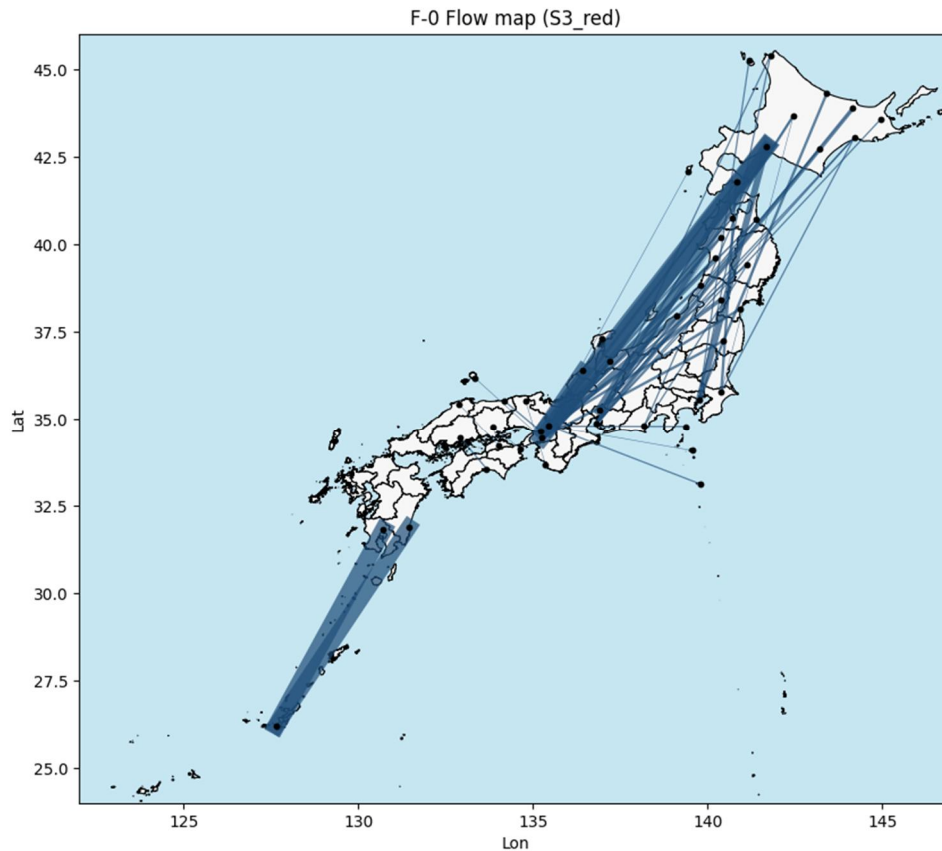


図 2.9 Case3 における航空機避難フロー

航路上航空機数の推移（図 2.10）では、高い水準の混雑が長時間にわたって継続しており、ピーク値も他のシナリオと比較して顕著に大きい。さらに、この混雑は単一の時間帯に集中するのではなく、複数の時間帯にわたって繰り返し発生している。これは、避難対象空港の拡大に伴い、新たな避難需要が次々と発生する一方で、避難先空港および航路の処理能力がそれに追いつかなくなるためである。このような状況では、空港における駐機容量不足だけでなく、空域全体が構造的に過負荷状態に陥る可能性が高いことが示唆される。

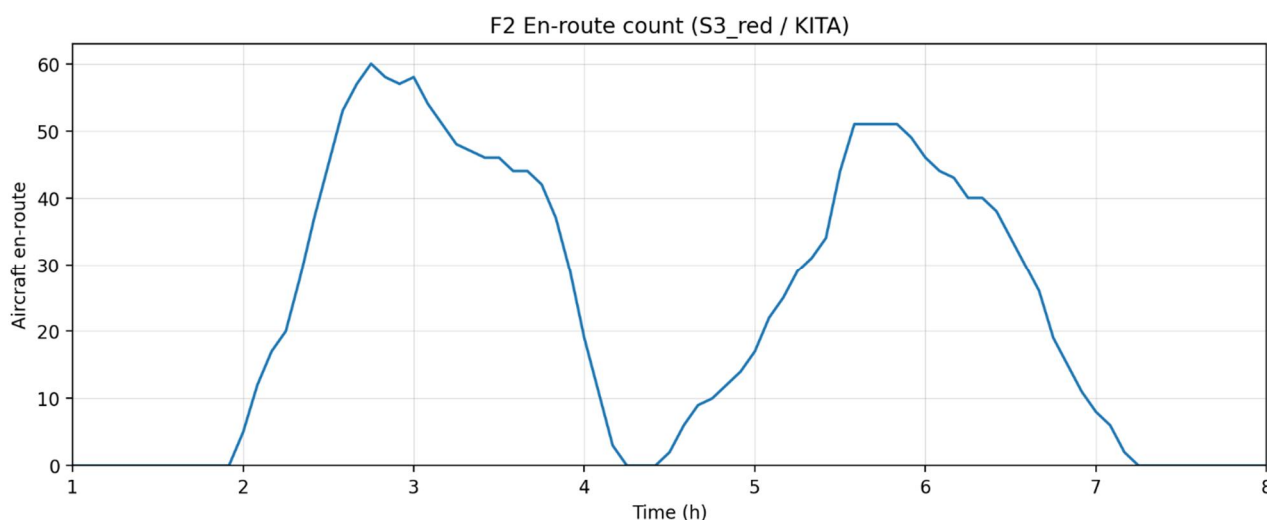


図 2.10 東北・北海道方面航路上航空機数の推移(Case3)

以上の結果から、動的割当分析により、静的分析では明示的に捉えることができなかった「航路上の混雑」および「時間的に変化するボトルネック」が顕在化することが確認された。特に、影響範囲が拡大するにつれて、避難の困難性は単なる受入容量不足ではなく、避難フローの集中とそれに伴う空域負荷の増大として現れる。

これらの知見は、災害時の航空機避難計画において、空港単体の受入能力だけでなく、航空ネットワーク全体を通じた時空間的な調整が不可欠であることを示している。次章では、これらの結果を踏まえ、実務的な示唆および今後の課題について考察を行う。

## 2.9 噴火開始時刻の変動に伴う航空機避難の推移

本節では、噴火開始時刻を変化させた場合の避難結果への影響を考察する。日本の主要空港では時間帯によって駐機航空機数が変動するため、噴火開始時刻の違いが避難結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで本節では、同一の避難ルールおよび制約条件のもとで、噴火開始時刻のみを一定間隔で変化させた分析を行い、避難完了数および未割当数の推移を比較する。

以下では、降灰範囲の異なる三つのシナリオについて、噴火開始時刻ごとの避難割り当て結果を整理

する。

### 2.9.1 噴火開始時刻と避難成否の関係

ここでは、噴火開始時刻の違いが航空機避難の成否にどのような影響を与えるかを確認するため、噴火開始時刻を一定間隔で変化させた動的割り当て分析の結果を示す。以下の図 2.11~2-13 は、シナリオごと、噴火開始時刻ごとに、累積避難対象航空機数(TOTAL)、累積避難完了数 (ARRIVED) および累積未割当数 (FAILED) の推移を示したものである。

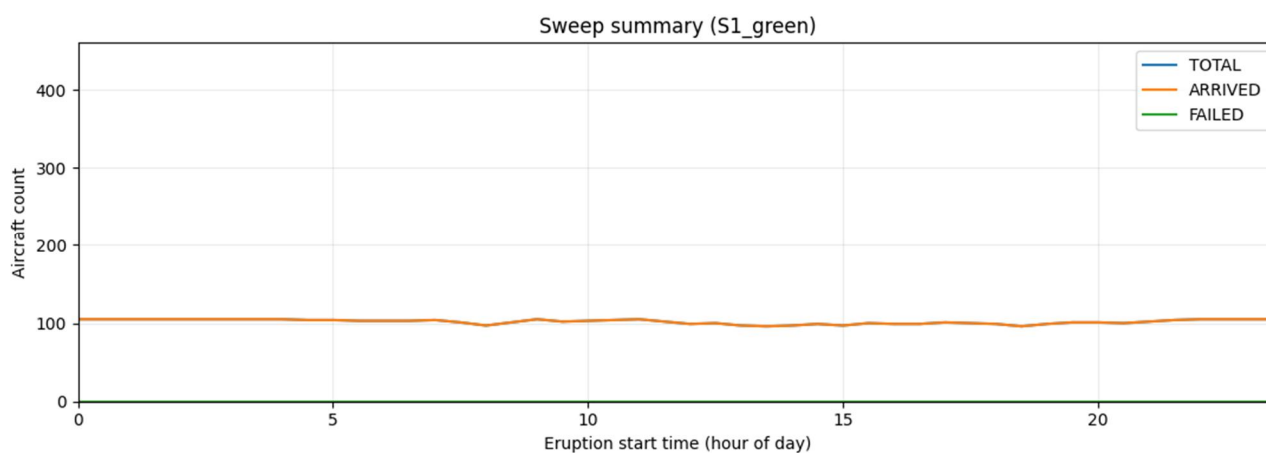


図 2.11 Case1 の噴火開始時刻ごとの避難航空機数推移

これらの図からわかるように、噴火開始時刻によって避難成否には明確な差が生じている。

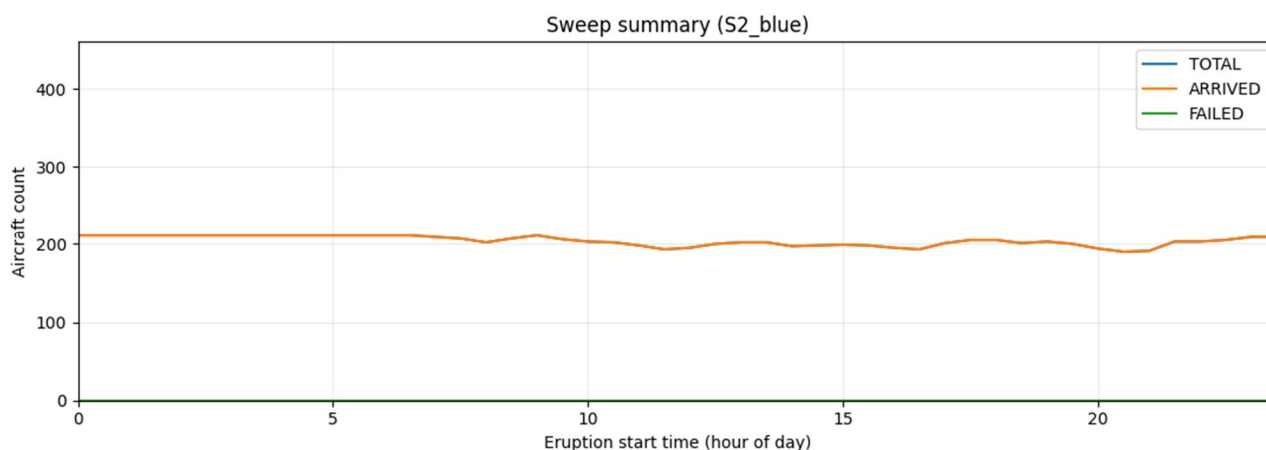


図 2.12 Case2 の噴火開始時刻ごとの避難航空機数推移

Case1, Case2 においてはいずれの時間帯に噴火が発生しても全ての避難対象航空機を避難先空港に避難させることができていることがわかる。時間帯によらず関西国際空港、中部国際空港付近までの火山灰拡散は空港容量的には十分に対応可能であることが示された。

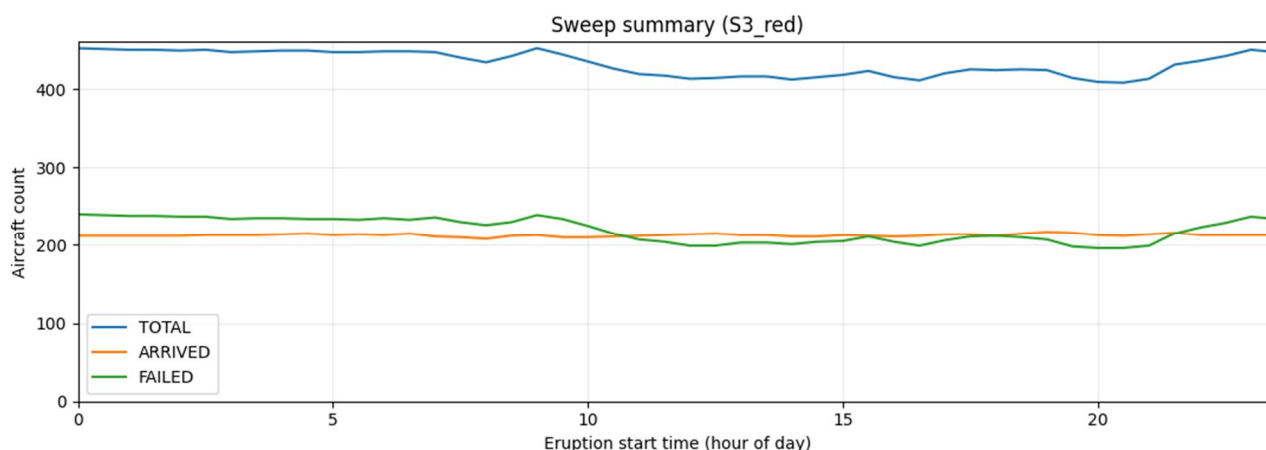


図 2.13 Case3 の噴火開始時刻ごとの避難航空機数推移

一方、避難航空機数の数が多い Case3 では昼間時間帯に噴火が開始した場合には、未割当数が相対的に小さくなり、避難失敗率が低下する傾向が確認される。一方で、夜間や早朝に噴火が開始したケースでは、未割当数が増加し、避難が成立しにくい状況が生じている。ここで、噴火開始時刻が異なっても、累積避難完了数(ARRIVED)はほぼ一定の水準で推移している。すなわち、昼間時間帯において避難失敗率が低下しているのは、より多くの航空機が避難に成功したためではなく、避難対象となった航空機のうち、未割当となる機体数が減少したことによるものである。

この結果は、昼間の方が避難が夜間に比して円滑に進むように見える現象が、必ずしも避難プロセスそのものの改善を意味しないことを示唆している。噴火開始時刻による避難成否の違いは、避難完了数の増減では説明できず、未割当数の変動、すなわち避難需要側の変化によって生じている可能性が高い。

## 2.9.2 空港別に見た避難失敗機数の内訳

本節では、特に Case3 に着目し、未割当数の変動がどの空港に起因するものであるのかを明らかにするため、空港別に避難失敗数を集計し、噴火開始時刻との関係を詳細に分析する。

噴火開始時刻ごとに避難失敗数を以下の表 6 に空港別に整理した結果、避難失敗数の規模および時間帯による変動幅のいずれにおいても、羽田空港が支配的な寄与を示していることが確認された。特に、噴火開始時刻を変化させた場合の避難失敗数の増減は、ほぼ羽田空港における失敗数の変動によって説明されており、その他の主要空港では失敗数自体が小さく、時間帯による変化も限定的であった。

成田空港、中部国際空港他のハブ空港においても一定数の避難失敗は確認されるものの、その規模は羽田空港と比較して小さく、噴火開始時刻の違いによる変動幅も相対的に小さい。地方空港に至っては、避難失敗数はほとんど発生しておらず、時間帯による差もほぼ見られない。

表 2.2 避難失敗機数の噴火開始時間ごと差分

| origin | FAILED_MIN | FAILED_MAX | TOTAL_MEAN | FAILED_RANGE |
|--------|------------|------------|------------|--------------|
| HND    | 135        | 175        | 178.083333 | 40           |
| NGO    | 0          | 24         | 31.416667  | 24           |
| NRT    | 46         | 55         | 52.3125    | 9            |
| NKM    | 0          | 7          | 28.9375    | 7            |
| FSZ    | 0          | 2          | 4          | 2            |
| ITM    | 0          | 0          | 41.395833  | 0            |
| KMI    | 0          | 0          | 15.770833  | 0            |
| KIX    | 0          | 0          | 40.75      | 0            |
| KCZ    | 0          | 0          | 1.895833   | 0            |
| KOJ    | 0          | 0          | 17.479167  | 0            |

これらの結果から、噴火開始時刻による避難失敗率の変動は、日本全体の航空ネットワークに様に生じている現象ではなく、特定の空港、とりわけ羽田空港に強く依存した現象であることが明らかとなった。

### 2.9.3 羽田空港における避難需要構造の時間変化

ここでは、この羽田空港における避難失敗数の変動が、どのような要因によって生じているのかを明らかにする。

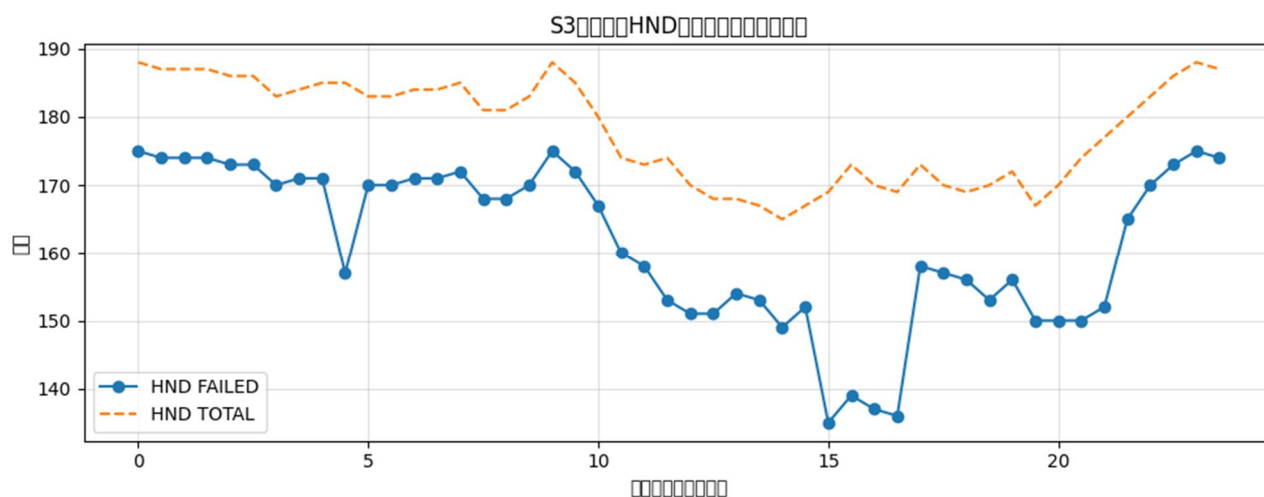


図 2.14 HND における噴火開始時刻ごとの駐機数および避難失敗数

図 2.14 は、噴火開始時刻ごとの羽田空港における駐機機数 (TOTAL) および避難失敗数 (FAILED) の推移を示したものである。図より、噴火開始時刻が昼間時間帯に設定された場合、羽田空港の駐機機数が明確に減少していることが確認できる。この駐機機数の減少に伴い、避難失敗数もほぼ比例的に減

少していることが確認される。一方で、本研究において設定した避難先空港の受入容量、エプロン容量、機体サイズ制約、および避難方位制約などの条件は、噴火開始時刻によって変化していない。また、避難失敗理由は、全て空き容量無しに分類されており、時間帯による失敗数の変動は、容量や制約条件の変化ではなく、避難需要量そのものの変動によって説明される。

以上の結果から、噴火開始時刻による避難成否の違いは、避難アルゴリズムの性能差や意思決定の巧拙によって生じているのではなく、主要ハブ空港、特に羽田空港に集中する避難需要量が時間帯によって変動することによって説明できることが明らかとなった。

## 2.10 まとめ

### 2.10.1 本研究で得られた知見の整理

本研究の分析結果は、日本の航空ネットワークが有する構造的特性が、大規模噴火時の航空機避難に大きな影響を及ぼすことを示している。日本の航空ネットワークは、首都圏および関西圏に需要と路線が集中するハブ集中型の構造を有しており、地方空港間を直接結ぶ路線は限定的である。

このような構造のもとでは、平常時に運航実績のある主要ハブ空港が、非常時においても避難先として優先的に選択されやすい。一方で、地方空港間には通常時の定期便が存在しない場合が多く、災害時に即座に避難ルートとして活用することは、運航経験、乗員配置、整備体制、さらには管制運用の観点からも容易ではない。

本研究の結果においても、多くの地方空港が物理的には余剰駐機容量を有しているにもかかわらず、避難先として十分に活用されない状況が確認された。これは、平常時のネットワーク構造が非常時の選択肢を事実上制約していることを示唆しており、日本の航空ネットワークが災害時に対して構造的な脆弱性を抱えている可能性を示しているといえる。

動的割り当て分析の結果、大規模噴火時には、一部空港の機能低下が航空ネットワーク全体へ連鎖的に波及する過程が明確に確認された。具体的には、特定の空港が警戒度の上昇により避難対象となることで、その空港からの避難需要が周辺空港や主要ハブ空港へ集中し、これらの空港の駐機容量や運用能力を圧迫する。

さらに、避難先空港の容量制約が顕在化すると、飛行中の航空機が着陸先を確保できず、空域内に滞留する状況が生じる。このような空域混雑は、単に避難対象空港周辺にとどまらず、広域的に航空交通の流れを阻害する要因となる。

この構造は、2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火において観測された、局所的な火山噴火が航空ネットワークを通じてヨーロッパ全域に影響を及ぼした事例と共通する特徴を有している。すなわち、大規模火山噴火は、地理的には局所的な災害であっても、航空ネットワークを介して広域的な機能低下を引き起こす潜在性を持つ。

本研究の結果は、日本においても同様に、単一火山の噴火が全国規模の航空交通へ波及し得ることを

示しており、航空機避難を個別空港の問題としてではなく、ネットワーク全体の問題として捉える必要性を強く示唆している。

空港別に避難失敗数を整理した結果、噴火開始時刻による避難失敗数の変動は、ほぼ羽田空港における挙動によって説明できることが明らかとなった。成田空港や中部国際空港においても一定数の避難失敗は発生するものの、その規模および時間帯による変動幅は限定的であり、全体の変動を支配する要因とはなっていない。

羽田空港に着目すると、昼間時間帯において駐機航空機数（すなわち避難需要）が明確に減少しており、これにほぼ比例する形で避難失敗数も減少している。また、同時帯にて多く避難先として選ばれていた北海道や東北地方の空港の空き容量が増加していた。一方、本研究で設定した機体サイズ制約、滑走路長制約、および避難方位制約は、噴火開始時刻によって変化していない。また、避難失敗理由の大半は 空き容量不足によるものであり、制約条件が時間帯によって緩和されたわけではない。

以上より、噴火開始時刻による避難成否の差は、制約条件や避難ルールの変化によって生じているのではなく、主要ハブ空港、特に羽田空港に集中する避難需要量と受け入れ先となりうる空港の空き容量が、時間帯によって変動することによって生じていると解釈できる。

## 2.10.2 政策的含意

本研究で得られた結果から、日本の航空ネットワークにおいては、大規模噴火時に避難航空機の受入先が特定の空港に集中する傾向が一貫して確認された。降灰影響が限定的なシナリオにおいても、関西国際空港や羽田空港といった主要ハブ空港が西日本からの避難航空機を受け入れる必要があり、影響が首都圏まで及ぶ悲観的なシナリオでは、東北地方・北海道の空港や九州北部の空港が大量の避難需要を担うことが示された。これらの結果は、竹林ら（Takebayashi, et al., 2021）が指摘したように、南西諸島の空港（特に那覇空港や奄美空港）や北海道の空港が避難過程において重要な役割を果たす点と整合的である。一方で、本研究の動的分析では、これらの空港において駐機容量が急速に逼迫し、時間の経過とともに避難が破綻する様子が明確に示された。

特に、大型航空機に対応可能なエプロンの絶対数が限られていることが、避難失敗の主要因となっており、単純な総機数ベースの容量評価では実態を十分に捉えられないことが明らかとなった。

以上より、容量計画は、単純な「総機数ベースの駐機枠」ではなく、

- (i) 機体サイズ別の受入可能性（大型機対応スポットの希少性）
- (ii) 短時間集中に耐える地上運用（牽引・リモート駐機・スポット転用の可否）
- (iii) 複数回の避難波（段階的 Red 移行）に対する余裕

を明示して設計する必要がある。具体的には、

- ・北日本および南西諸島地域の空港における駐機容量の拡充、
- ・特に大型航空機に対応可能なエプロンの計画的整備、

・平常時には使用頻度が低い区域（誘導路・滑走路等）を非常時に柔軟に活用する運用ルールの明確化といった対応が、平時は使わないが非常時に使える容量の増加につながり航空ネットワーク全体のレジリエンス向上に資すると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 竹林幹雄, 大西正光 井口正人, “Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 97, p. ID102136, 2021.
- 2) 国土交通省 空港の地震・津波対策における今後の方向性  
<https://www.mlit.go.jp/common/001257559.pdf>, 令和 8 年 1 月 12 日時点
- 3) Gudmundsson, M. T. et al., “Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland,” *Scientific Reports*, vol. 2, p. 2572, 2012.
- 4) Solodova, A., 竹林幹雄, 大西正光, 井口正人., “Flight trajectory analysis: The case of 2020 Mt. Taal,” *The 25th International Conference of ATRS*, Antwerp, Belgium, 2020.
- 5) Reichardt, U., Ulfarsson, G. F., and Pétursdóttir, G., “Volcanic ash and aviation: Recommendations to improve preparedness for extreme events,” *Transportation Research Part A*, vol. 113, pp. 101–113, 2018.
- 6) Reichardt, U., Ulfarsson, G. F., and Pétursdóttir, G., “Developing scenarios to explore impacts and weaknesses in aviation response exercises for volcanic ash eruptions in Europe,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 79, pp. 1–10, 101684, 2019.
- 7) Arreeras, A. and Arimura, K., “A study on shelter airport selection during large-scale volcanic disasters using CARATS open dataset,” *Transportation Research Part C*, vol. 129, pp. 103263, 2022.
- 8) Liu, Z., “Developing an airport-specific volcanic early warning system for managing aircraft evacuation under large eruptions,” 京都大学大学院情報学研究科修士論文, 2021.
- 9) 噴火警戒レベルの説明, 気象庁  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/level\\_toha/level\\_toha.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/level_toha/level_toha.html), 令和 8 年 1 月 12 日時点.
- 10) 降灰予報の説明, 気象庁  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/qvaf/qvaf\\_guide.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/qvaf/qvaf_guide.html), 令和 8 年 1 月 12 日時点.
- 11) GPV 気象予報,<https://weather-gpv.info/>, 令和 8 年 1 月 12 日時点.
- 12) Rahadiano, H., “Volcanic Ashfall Risk Assessment for Early Warning and Evacuation Planning during Large Eruptions,” *Master’s Thesis, Graduate School of Informatics, Kyoto University*, 2020.
- 13) Kurahara, K., “Evaluation of accommodation capacity for aircraft evacuation under a large

eruption using various volcanic ash dispersion scenarios,” Master’s Thesis, 京都大学大学院情報学研究科修士論文, 2021.

- 14) 平田輝満, 永沼宏太, 渡邊大樹, “大規模台風時の航空避難の実態と空港の臨時駐機容量に関する研究”, 土木学会論文集, Vol79, No.1,22-00062, 2023.
- 15) World Bank, “The January 15, 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption and tsunami, Tonga,” GRADE Report, 2022.
- 16) Tanaka, L. H. et al., “Applying the particle filter to the volcanic ash tracking PUFF model for assimilating multi-parameter radar observation,” Journal of Disaster Research, vol. 17, no. 5, pp. 791–804, 2022.
- 17) Khoury, E. E., “Report of ICAO Wake Turbulence Group (WTG),” ICAO, 2023.
- 18) Ayumu Kumaoka, Masamitsu Onishi, Masato Iguchi, Mikio Takebayashi: Designing Airport Capacity for the Evacuation of Parked Aircraft During a Large-Scale Eruption, Journal of Disaster Research Vol.20 No.3, 269-280, 2025 (<https://doi.org/10.20965/jdr.2025.p0269>).

### 3. 火山災害と VAAC 情報との関連性に関する分析

#### 3.1 概要

Aircraft Operator は運航方針を決定する上で、ここでは Volcanic Ash Advisory (VAA)について着目する。VAA は上空の火山灰の拡散範囲に関する情報を含み、Aircraft Operator はこの情報を参考にして飛行ルートを選択すると考えられる。本章では実際の火山噴火時のフライトを対象にして、Aircraft Operator が飛行ルートを選択する際に VAA が与える影響を分析する。

本研究では 2023 年 5 月に発生したメキシコ・ポポカテペトル山の噴火を対象とする。本火山の噴火は主に中南米地域の空路に大きな影響を及ぼす。また、ワシントン VAAC からポポカテペトル山を対象とした VAA が定期的に発出されており、データが入手可能であったことから、本事例を分析の対象とした。

具体的には、火山灰影響下における運航判断を定量的に分析したうえで、火山灰を回避する運航ルートの選択をフライトごとに観察する。これにより、Aircraft Operator の運航方針の性質を実証的に確認する。本分析の目的は、VAAC の発出する VAA が Aircraft Operator の意思決定に与える影響を確認することで、ガイドラインや文書等では不明だった火山噴火時の航空交通調整における Aircraft Operator のガバナンス構造を解明することである。

本研究で対象とするポポカテペトル山はメキシコの首都であるメキシコシティから南東に約 70km の位置に存在する活火山である。メキシコシティには中南米屈指のハブ空港としての機能を持つメキシコシティ国際空港 (MEX) があり、ポポカテペトル山が噴火すると中南米の航空交通に大きな混乱が生じる。

ポポカテペトル山の一連の活動について表 に示す。世界の活火山の火山活動を記録しているスミソニアン協会の Global Volcanism Program によると、2023 年 5 月 16 日よりポポカテペトル山の活動が活発になり、20 日にはメキシコシティ国際空港が協定世界時 (UTC) で 10:25 から 16:00 まで降灰の影響で空港閉鎖された。また、20 日以降はさらに火山活動が活発になり、ワシントン VAAC は 20 日 20:53 (UTC) に大規模で高密度の火山灰の放出が確認されたと発表した。メキシコ国内で DMA にあたる CENAPRED が発出する噴火警戒レベルである Semáforo de alerta volcánica は 21 日に 7 段階中 5 番目に深刻な Yellow, Phase 3 に引き上げられ、近隣地域で降灰や地元住民への避難の準備が呼びかけられた。

ワシントン VAAC はポポカテペトル山の噴火に関しておよそ 6 時間ごとに VAA を発出している<sup>エラフ!</sup>  
参照元が見つかりません。。火山灰の放出が活発になる前の 5 月 19 日 17:23 (UTC) と活発になった後の 5 月 22 日 02:55 (UTC) に発出された VAA のグラフィック形式である VAG を図 , 図 にそれぞれ示す。ここで、VAG は現況の火山灰拡散範囲を左上に、6, 12, 18 時間後の拡散範囲の予測をそれぞれ右上, 左下, 右下に示している。また火山灰が存在する高度の上下限も記載されており、SFC は地表面 (Surface) を、FL はフライトレベルを表している。例えば FL300 とは 30000 フィート (約 9000m) を表し、”VA

FM SFC/FL300”と記載されている場合は火山灰が地表面から高度 30000 フィートまで存在することを表している。また, ”NO VA EXP”と記載されている場合は, 火山灰が観測されていない, もしくは消滅すると予測されていることを表す。

フライトデータは FlightRadar24 から入手した。UTC で 2023 年 5 月 19 日から 22 日にメキシコ上空で記録された計 28073 便のフライトの便名, 高度, 方位, 緯度, 経度, 速度, 時刻等の基本データを用いる。

表 3.1 2023 年におけるポポカテペトル山噴火の影響<sup>1)</sup>

| 日時 (UTC)      | 事象                                                   |
|---------------|------------------------------------------------------|
| 05/16         | 高周波地震の増加                                             |
| 05/20 00:00 頃 | 火山活動の活発化, 各地で降灰を確認                                   |
| 05/20 10:30   | メキシコシティ国際空港滑走路閉鎖                                     |
| 05/20 20:53   | ワシントン VAAC が活動激化を報告                                  |
| 05/21         | Semáforo de alerta volcánica を Yellow, Phase 3 に引き上げ |
| 06/06         | 活動の沈静化に伴い Yellow, Phase 2 に引き下げ                      |

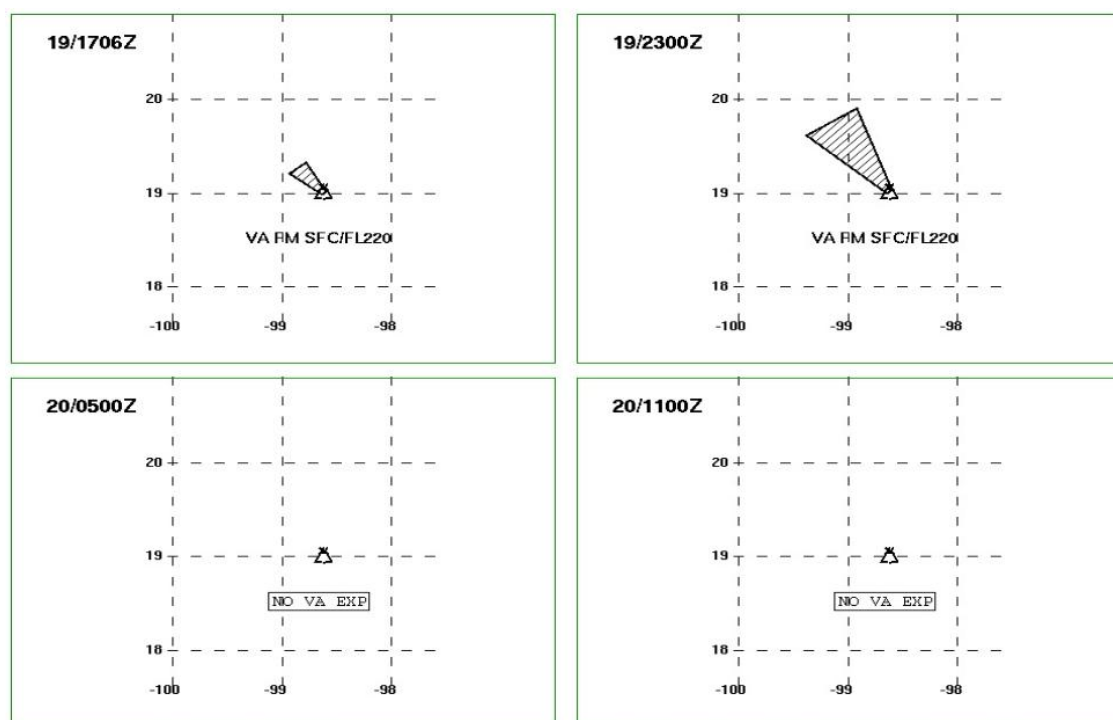


図 3.1 2023/05/19 17:23(UTC)のポポカテペトル山の VAG エラー! 参照元が見つかりません。

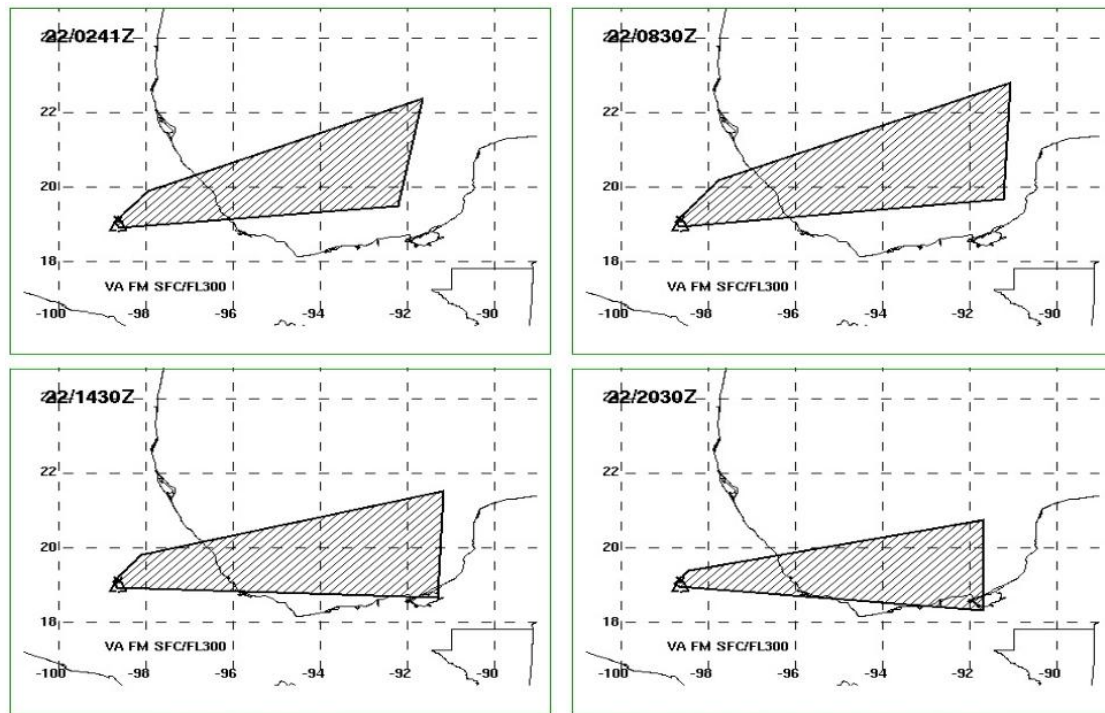


図 3.2 2023/05/22 02:55(UTC)のポポカテペトル山の VAG エラー! 参照元が見つかりません。

## 3.2 分析方法

本分析では、ポポカテペトル山の噴火活動がより活発となった 5 月 21 日 00:00 (UTC) 以降のフライトを火山灰の影響を受けた可能性のあるフライトと定義した。5 月 19 日と 20 日の両日ともに同一の便名で飛行し、それぞれのフライトデータの開始時刻が 30 分以内であるフライトを定期便とし、この条件を満たす計 1623 便を分析対象とした。定期便において火山灰雲の影響を受けていない 5 月 19 日と 20 日の両日の飛行ルートの平均を基準飛行ルートと定義し、5 月 21 日以降の飛行ルートと比較することで変化を評価した。

火山灰の拡散範囲は VAA に含まれる現況と 6, 12 時間後の予測値を使用した。VAA のテキスト情報として記載される火山灰雲の存在する座標と高度の情報をを用いることで、飛行ルートとの関係性を分析した。

## 3.3 分析結果と連携フローの検討

### 3.3.1 火山灰からの距離別運航状況

5 月 21 日と 22 日において、基準時刻・基準飛行ルートで飛行していた場合の火山灰拡散領域の境界からの最短距離別の運航状況について表 3.1 に示す。ここで、運航状況は基準飛行ルートより軌跡間の平均距離が 25km 以上離れていれば迂回とした。この 25km という閾値は過去の噴火時における迂回の観測事例に基づいて設定された暫定的な値である。また、通常運用において頻繁に発生しうる小規模な遅延を除くため、基準時刻より 60 分以内に飛行したフライトは定刻とし、60 分以上異なる場合は遅延便として区別している。また、表に記載されている割合は火山灰境界からの最短距離ごとに含まれる

すべてのフライトを基準としたものである。

表 3.2 5 月 21 日の運航状況

| 火山灰境界からの<br>最短距離 | 欠航               | 迂回<br>定刻         | 迂回<br>遅延       | 変更なし<br>定刻       | 変更なし<br>遅延     |
|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| ~50km            | 26 便<br>(34.2%)  | 27 便<br>(35.5%)  | 3 便<br>(3.9%)  | 17 便<br>(22.4%)  | 3 便<br>(3.9%)  |
| 50~100km         | 18 便<br>(35.3%)  | 12 便<br>(23.5%)  | 6 便<br>(11.8%) | 9 便<br>(17.6%)   | 6 便<br>(11.8%) |
| 100~300km        | 4 便<br>(10.0%)   | 16 便<br>(40.0%)  | 1 便<br>(2.5%)  | 16 便<br>(40.0%)  | 3 便<br>(7.5%)  |
| 300~500km        | 7 便<br>(11.5%)   | 20 便<br>(32.8%)  | 3 便<br>(4.9%)  | 29 便<br>(47.5%)  | 2 便<br>(3.3%)  |
| 500km~           | 191 便<br>(13.7%) | 458 便<br>(32.8%) | 54 便<br>(3.9%) | 645 便<br>(46.2%) | 47 便<br>(3.4%) |

表 3.3 5 月 22 日の運航状況

| 火山灰境界からの<br>最短距離 | 欠航               | 迂回<br>定刻         | 迂回<br>遅延       | 変更なし<br>定刻       | 変更なし<br>遅延     |
|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| ~50km            | 18 便<br>(17.8%)  | 46 便<br>(45.5%)  | 5 便<br>(5.0%)  | 26 便<br>(25.7%)  | 6 便<br>(5.9%)  |
| 50~100km         | 10 便<br>(15.6%)  | 23 便<br>(35.9%)  | 6 便<br>(9.4%)  | 22 便<br>(34.4%)  | 3 便<br>(4.7%)  |
| 100~300km        | 7 便<br>(8.9%)    | 32 便<br>(40.5%)  | 1 便<br>(1.3%)  | 37 便<br>(46.8%)  | 2 便<br>(2.5%)  |
| 300~500km        | 17 便<br>(13.4%)  | 58 便<br>(45.7%)  | 7 便<br>(5.5%)  | 41 便<br>(32.3%)  | 4 便<br>(3.1%)  |
| 500km~           | 136 便<br>(10.9%) | 418 便<br>(33.4%) | 58 便<br>(4.6%) | 610 便<br>(48.7%) | 30 便<br>(2.4%) |

分析の結果判明した Aircraft Operator における運航判断の詳細について考察する。

はじめに火山灰境界からの最短距離別の運航状況について、表 より 5 月 21 日は火山灰雲から 100km 未満を飛行するフライトについては欠航した便が 35%程度となっており、100km 以上離れているフライトと比較すると非常に高い割合となっている。また、基準時刻の 60 分後以内に飛行したフライトも火山灰雲から 50km 以上 100km 未満を飛行するものが 40%ほどしかなく、欠航や遅延といった通常ではない運航スケジュールを強いられたことが分かる。飛行ルートについても、火山灰雲から 100km 未満を飛行するフライトは基準飛行ルートから変更のないフライトの割合が 30%程度であり、100km 以上を飛行するフライトが 50%程度であることを考慮すると比較的低い水準である。迂回ルートを飛行するフライトの割合は火山灰雲からの距離にかかわらず 30%から 40%であることを考慮すると、火山灰

雲に近接する可能性のあるフライトは 5 月 21 日には欠航という運航判断を選択したものが多いということが考えられる。

一方で、表 より 5 月 22 日には欠航便が火山灰雲からの距離にかかわらず 10%程度になっており、21 日と比較すると大幅に減少していることが分かる。基準時刻の 60 分後までに飛行したフライトも 70%以上に回復し、21 日より通常運航に戻る動きが見られる。特に基準時刻付近に運航し迂回ルートを行飛行したフライトの割合が 21 日より増加していることから、22 日には飛行ルートを事前に策定できたケースが増えたことが考えられる。

以上の結果より、火山活動が活性化し火山灰雲の領域が拡大し始めた 5 月 21 日より 5 月 22 日の方が欠航するフライトの割合が低く、Aircraft Operator（フライトプラン立案担当）は火山灰拡散範囲が拡大してから 1 日が経過すると通常のスケジュールで運航することが可能になるフライトが多いことが示唆される。Solodova et al. (2022) によると、2020 年のフィリピン・タール山の事例では航空会社は大規模噴火後 24 時間はリスクを回避するため欠航や迂回をするのに対し、24 時間経過後は航空会社や経路の特性により運航方針を決定したとされており、本分析についても運航判断には火山活動の状況が大きく変化してから 1 日程度を要することが示された。

一方で、火山灰雲から離れた飛行ルートを運航するフライトでも迂回ルートを選択する割合が高くなっていることから、多くの Aircraft Operator は VAA の情報をもとにより安全な飛行ルートを選択する傾向にあることが示される。

### 3.3.2 飛行ルートの分類

次に基準飛行ルートで火山灰雲に突入するフライトが選択した飛行ルートの詳細な内訳を日付ごとに表、表 にまとめる。

表 3.4 5 月 21 日の飛行ルート内訳

| 飛行ルート     | フライト数<br>(割合)   |
|-----------|-----------------|
| 欠航        | 15 便<br>(30.6%) |
| 50km 以上回避 | 11 便<br>(22.4%) |
| 50km 未満回避 | 6 便<br>(12.2%)  |
| 回避        | 32 便<br>(65.3%) |
| 突入        | 17 便<br>(34.7%) |

表 3.5 5 月 22 日の飛行ルート内訳

| 飛行ルート     | フライト数<br>(割合)   |
|-----------|-----------------|
| 欠航        | 16 便<br>(20.5%) |
| 50km 以上回避 | 16 便<br>(20.5%) |
| 50km 未満回避 | 12 便<br>(15.4%) |
| 回避        | 44 便<br>(56.4%) |
| 突入        | 34 便<br>(43.6%) |

5 月 21 日、22 日ともに 60%程度のフライトが欠航や火山灰雲のある空域を避けて飛行するといった回避行動を行った一方で、40%程度のフライトは火山灰領域内を通過するような飛行ルートを選択している。火山灰雲を水平回避しないフライトが数多く存在する原因はいくつか考えられる。VAAC の発出する VAA を適切に受信できていない可能性や、VAA ではない別の情報を参照して運航判断を行うといった、VAA に依存していない意思決定を行った可能性もあるが、VAA には高度の情報も含まれているため、火山灰雲の存在する上限の高度よりも高い位置を飛行する垂直回避を行っている可能性も考えられる。そのため、このような火山灰雲に突入している可能性のあるフライトについて個別に分析する。

定期便の中で、5 月 21 日と 22 日の少なくとも一日において基準飛行ルートが火山灰雲の存在する地域を通過するフライトは計 81 便あった。このうち MEX や MEX から 80km 以内に存在するトルーカ国際空港 (TLC)、プエブラ国際空港 (PBC)、フェリペ・アンヘレス国際空港 (NLU) といったポポカテペトル山に近接する空港を発着するフライトが合計で 33 便あり、4 割以上を占めている。MEX を発着する 11 便の国際線を除くと、これらはすべてメキシコ国内の空港を結ぶ国内線となっており、特にカンクン国際空港 (CUN) やメリダ国際空港 (MID) をはじめとしたメキシコシティよりも西側にある空港を結ぶフライトが火山灰による影響を受けている。火山灰雲の影響により飛行ルートを変更したフライトの例として、MEX 発 CUN 着の AM536 便 (アエロメヒコ航空) の飛行ルートとその時点での火山灰拡散領域の 6 時間後予測を図 に示す。5 月 19 日の飛行ルートに比べて 5 月 20 日はより北側を通過するルートを選択しているが、火山灰雲の拡散範囲がより拡大すると予測された 5 月 21 日はさらに回避するようなルートを選択している。また、5 月 22 日は北側に回避したルートにも火山灰雲が影響すると予測されたため、南側に回避するように飛行している。このフライトの例は Aircraft Operator が VAAC の発出する VAA を参照し飛行ルートを計画したことを示すと考えられる。このような回避をしたフライトはいくつか確認された。

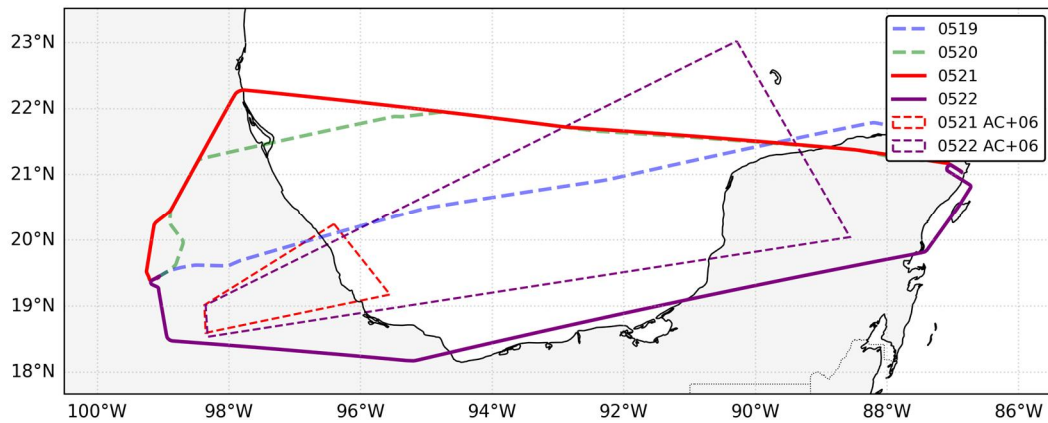


図 3.3 AM536 便の飛行ルートと火山灰拡散領域

一方で、火山灰雲を回避せず通常通りの飛行ルートを選択したフライトも存在する。一例として MEX 発 MID 着の VB1108 便（ビバアエロブス）の飛行ルートを図に示す。火山灰雲が従来よりも拡散した 5 月 22 日は通常の飛行ルートに火山灰雲が重なるようになっているが、飛行ルートは変更していない。ただ、5 月 22 日のフライトの離陸時点での最新情報であった 02:55 に発出された VAA によると、火山灰雲は地表から高度 30000 フィートまでに存在するとされていた。VB1108 便は当該地域を 35000 フィート程度で飛行していたため、火山灰雲の内部は回避できたと考えられる。このフライトは VAA に含まれる火山灰雲の高度の情報も加味した飛行ルートの計画を実施しているケースがあることを示しているといえる。このフライトと同様に通常の飛行ルートから変更することなく、火山灰雲が存在する領域よりも高い位置を飛行することで回避するフライトも多数確認された。

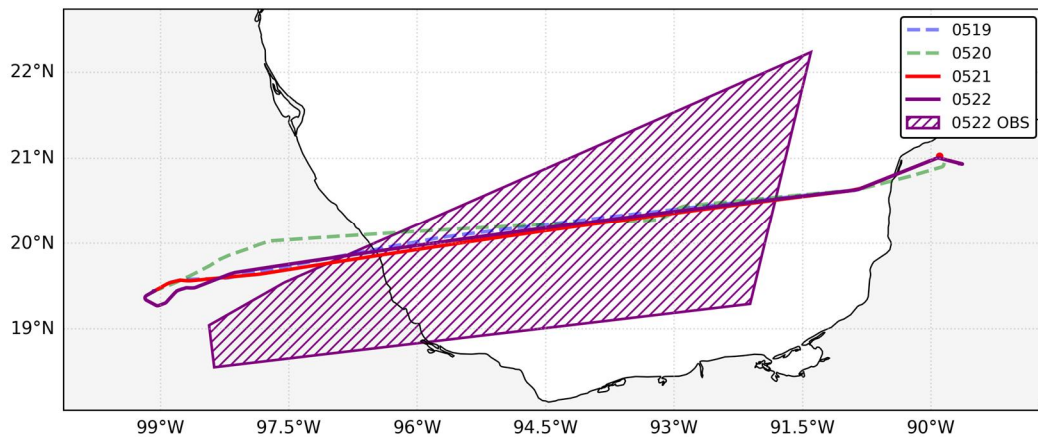


図 3.4 VB1108 便の飛行ルートと火山灰拡散領域

以上のフライトはメキシコ国内線に限定していたが、MEX とメキシコ国外の空港とを結ぶ国際線のフライトについても分析する。フランス・パリ発 MEX 着の AF174 便（エールフランス航空）の飛行ルートを図に示す。通常の飛行ルートと比較して、5 月 21 日は火山灰雲の影響で迂回したルートを選択しているが、5 月 22 日は火山灰雲の拡散範囲がやや南へ移動したことから再び従来のルートに近いルートを飛行したことが分かる。国際線に関してはほとんどのフライトが現況の火山灰雲の範囲を回避す

るような飛行ルートを選択していた。

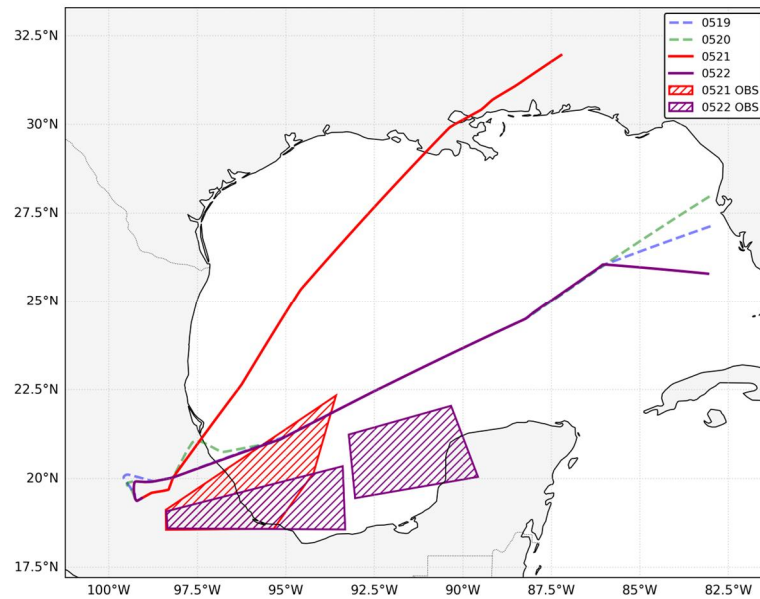


図 3.5 AF174 便の飛行ルートと火山灰拡散領域

次に、ポポカテペトル山上空を通過するフライトについて飛行ルートを分析する。アメリカと中南米とを結ぶフライトで火山灰雲の影響を受けるものは計 21 便存在した。コスタリカ・リベリアからアメリカ・ロサンゼルスを運航した AS1331 便（アラスカ航空）の飛行ルートを図 に示す。通常の飛行ルートに比べて 5 月 21 日と 22 日は大幅に迂回したルートを選択していることが分かる。また、エルサルバドル・サンサルバドルからアメリカ・ヒューストンを運航した UA1130 便（ユナイテッド航空）の飛行ルートを図 に示す。UA1130 便における通常の飛行ルートでは 5 月 21 日は火山灰雲の影響を受けないとされていたもののやや迂回するルートで運航しており、22 日には火山灰雲の拡散範囲がより拡大するという予測を受けてさらに東側へ迂回するルートを選択している。以上のような火山灰雲の存在する領域を縦断するようなフライトに関しては VAA を参照して大幅に迂回する飛行ルートを選択する傾向にあると考えられる。

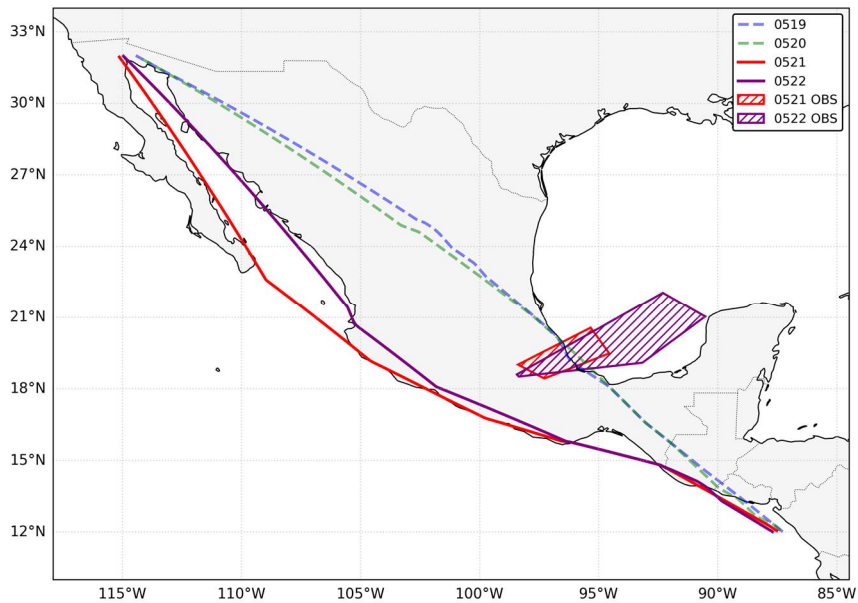


図 3.6 AS1331 便の飛行ルートと火山灰拡散領域

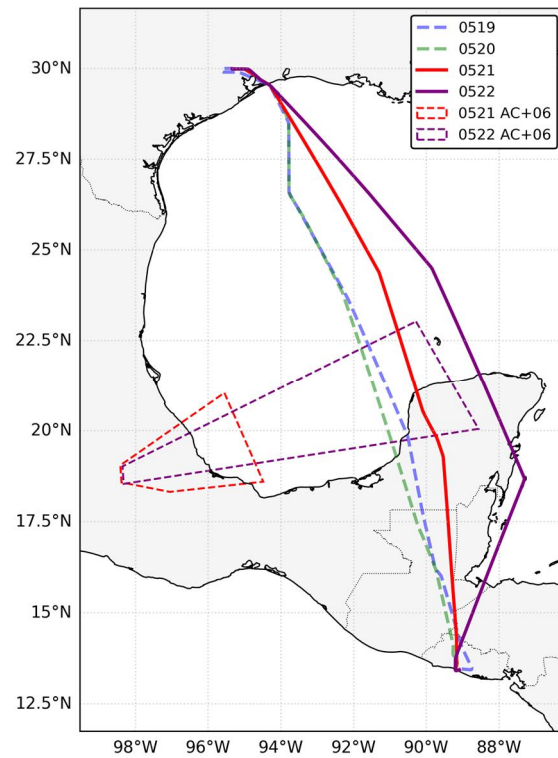


図 3.7 UA1130 便の飛行ルートと火山灰拡散領域

これまでに挙げたフライトは多くが火山灰雲を回避するような飛行ルートを選択しており、通常の飛行ルートをとる場合であっても高度の情報を踏まえている可能性が高いことが示されている。その一方で、VAA に反した運航を実施したフライトもわずかながら確認された。ポボカテペトル山から東へ 250km 程度離れたベラクルス国際空港は 5 月 21 日 10:09 (UTC) に発出された VAA において火山灰の拡散領域内に入っているが、モンテレイ発 VER 着の VB4162 便は定刻の 13:45 (UTC) ごろに着陸している(図)。VB4162 便はメキシコ現地時間では朝のフライトであるため、前日 20 日 22:22 (UTC)

に発出された VAA の 12 時間後予測を参照して飛行計画を立てた可能性がある。5 月 22 日に関しても 12 時間後予測を参照したうえで迂回ルートを選択した可能性が考えられる。ビバエアロブスのフライトは VB4162 便に代表されるように 5 月 21 日以降も飛行しているフライトが多数を占める一方で、VER を発着するユナイテッド航空のフライトは 5 月 21 日、22 日ともに運航を取り止めており、航空会社によって独自の運航判断をしていることが示される。

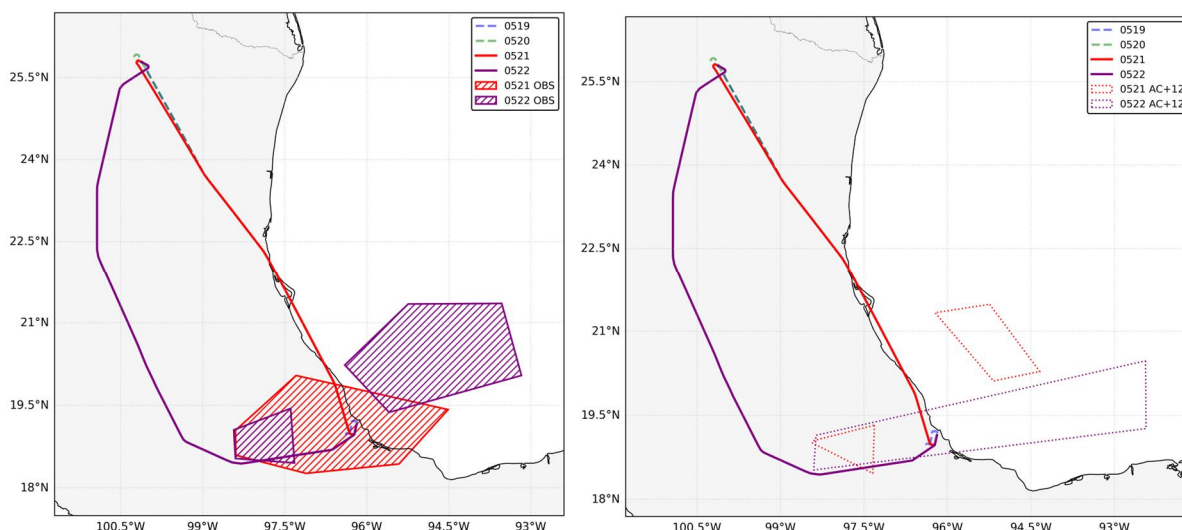


図 3.8 VB4162 便の飛行ルートと火山灰拡散領域

ここまで火山灰雲の影響を受ける可能性のあるフライトについて飛行ルートの分析を実施してきたが、VAAC の発出する VAA と飛行ルートとの関連性について以下のような結果が得られた。

第一に、火山灰雲の影響を受ける可能性のあるフライトの多くは VAA を参照して飛行計画を立てたと考えられる。特にフライトの出発時刻の時点で発出されている最新の VAA の現況情報、あるいはそのひとつ前の VAA の 6 時間後予測情報を参考にして飛行ルートを選択しているフライトが多い。また、通常の飛行ルートを選択したフライトについても火山灰雲の上空を通過することで回避できているものが多数あり、欠航を判断したフライトも含めて VAA が機能していることが分かる。

第二に、飛行ルートの選択はフライトの特性により異なる傾向を示す可能性がある。MEX に代表されるポポカテペトル山近辺の空港を発着する国内線のフライトは火山灰雲の拡散範囲が拡大した後も飛行ルートを変更せずに運航するものも比較的存在したのに対し、ポポカテペトル山上空付近を通過する国際線のフライトは飛行ルートを変更して回避したものが多数を占めた。この違いから、飛行ルートにおいて火山灰雲の影響を受ける割合が高いフライトは火山灰雲を回避する上での制約が多く、よりリスクの高い運航判断を迫られている可能性がある。

第三に、飛行ルートの選択をはじめとした運航計画は Aircraft Operator (フライトプラン立案担当) に委ねられる部分が多いことが考えられる。火山灰雲が存在するとされている空域に突入していると考えられるフライトもわずかに確認され、これは各 Aircraft Operator が VAA 以外の様々な情報を総合的に判断した運航であることを示している。Aircraft Operator によって VAA の解釈やリスク許容度が

異なることが示唆される。

### 3.4 まとめ

フライトデータ分析により、Aircraft Operator は航空機を運航する時点での最新版、あるいはその 6 時間程度前に発出される VAA を参考に行っている可能性が高いことが明らかになったが、この内容は連携フローでは示されていない。この結果から、少なくともポポカテペトル山の事例においては VAA の受信から Aircraft Operator の運航判断に至るまでの連携が一定程度スムーズに機能していることが分かる。

一方で、Aircraft Operator の実施する運航判断についての詳細な内容はここではあくすることができなかった。本研究では VAA を受信後、Aircraft Operator は様々な評価基準をもって運航方針を定めていると仮定している。データ分析からも運航方針の違いが見られ、Aircraft Operator によって異なる評価のもと運航判断が実施されていることが明らかとなった。このことから、連携フローでは意思決定の主体や情報の流れといった構造を捉えるうえでは有効であるが、最終的な運航判断の詳細については十分に表現できていないことが示される。

さらに、本研究におけるフライトデータ分析では大幅な遅延やダイバートの必要のあるフライトについての考慮がなされていないため、既往研究で指摘されているような大規模噴火時特有のガバナンスに関する問題点については十分に検討することができなかった。ただ、同一空港を発着するフライトであっても飛行ルートを含めた運航方針が異なるケースが存在したため、全体の意思決定を統括するような機関は存在せず、Aircraft Operator がそれぞれ独自の判断を行っているという問題点があることが確認された。

最後に、本分析により、運航計画が Aircraft Operator により異なるケースがあるという結果が確認された。本分析は中規模程度の噴火事例を対象にしており、このような機関ごとの意思決定の分散が航空機運航に致命的な支障をきたす可能性は低いと考えられる。ただ、現状のガバナンス構造が維持された場合、大規模噴火時のより長期的・大規模な混乱を想定した際に、構造全体の調整不全が生じる可能性が考えられる。

#### 参考文献

- 1) Global Volcanism Program, 2023. Report on Popocatepetl (Mexico) (Sennert, S, ed.). *Weekly Volcanic Activity Report*, 17 May-23 May 2023. Smithsonian Institution and US Geological Survey.
- 2) Kumaoka, A., Onishi, M., Iguchi, M., Takebayashi, M., 2025. Designing airport capacity for the evacuation of parked aircraft during a large-scale eruption, *Journal of Disaster Research* Vol.20-3, 269-280.

- 3) Takebayashi, M., Onishi, M., Iguchi, M., 2021. Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan, *Journal of Air Transport Management* 97 (ID102136).
- 4) Takebayashi, M., Onishi, M., Tobita, K., Iguchi, M., 2025. Impact of Volcanic Eruptions on Flight Routing, *Case Studies on Transport Policy* 20, 101432.

## 4. 海底火山噴出物による港湾閉塞の経済被害推計

### 4.1 概要

日本列島は、世界の活火山の約 7%が集中する有数の火山大国であり、有史以来、幾多の噴火災害に見舞われてきた。そのため、陸上の主要な火山に関しては、詳細なハザードマップの整備や降灰シミュレーション、避難計画の策定など、防災・減災に向けた研究が長年にわたり蓄積されてきた。しかしながら、四方を海に囲まれた日本において、その周辺海域に多数存在する海底火山の活動が、現代の高度な社会経済システムに及ぼす影響については、陸上火山と比較して研究事例が極めて少なく、そのリスク評価は十分になされていないのが現状である。特に、噴火地点から離れた沿岸部や港湾機能への間接的な影響は、従来の防災計画においても想定外の領域とされてきた。この未知のリスクが顕在化した象徴的な事例が、2021 年 8 月に発生した小笠原諸島・福徳岡ノ場の海底火山噴火である。この噴火によって放出された大量の軽石は、海流に乗って 1,000km 以上離れた沖縄・奄美地方をはじめとする南西諸島や、さらに遠く離れた関東・東海地方の沿岸部にまで漂着した。この事例で特筆すべきは、軽石が港湾内に大量に流入・堆積した結果、船舶のエンジン冷却水を取り込む取水口が閉塞するトラブルが多発し、多くの船舶が航行不能に陥った。さらに、火力発電所や原子力の冷却水取水設備においてもフィルター詰まりのリスクが高まり、出力抑制を余儀なくされるなど、エネルギー供給の根幹さえも脅かされた。これは、海底火山災害が単なる自然現象に留まらず、インフラ機能を麻痺させる複合災害であることを強く印象付けた。

現代の産業活動は、原材料や製品を効率的に輸送する海運に深く依存している。特に、資源の大部分を海外からの輸入に頼り、加工した工業製品を輸出する貿易立国である日本にとって、港湾はまさに経済活動の生命線である。また、国内製造業の多くはジャスト・イン・タイム方式を採用しており、極限まで在庫を削減しているため、物流の寸断に対する許容力が極めて低い。ひとたび重要港湾が軽石や火山灰によって閉鎖されれば、原材料の供給途絶や製品の出荷停止が即座に発生し、その影響は当該地域に留まらず、サプライチェーンを通じて国全体の産業活動に甚大な波及効果をもたらす危険性がある。特に、重化学工業や自動車産業が集積する沿岸部工業地帯において港湾機能が停止することは、日本経済にとって致命的な打撃となり得る。しかしながら、既存の港湾 BCP（事業継続計画）や経済被害想定も多くは、発生頻度の高い地震や津波、台風高潮を主対象としており、海底火山由来の浮遊物による長期的な港湾閉鎖リスクは、ほとんど考慮されていない。また、港湾機能停止による経済被害の推計に関しても、過去の研究は建物被害などのストック（資産）評価に偏重しており、物流停止が生産活動（フロー）に与える波及効果を定量的に分析した事例は乏しい。したがって、発生確率は低くとも甚大な被害をもたらす低頻度・高影響事象としての海底火山災害リスクを可視化し、具体的な経済被害規模を明らかにすることは、将来の災害に対する社会の回復力を高める上で、緊急かつ不可欠な課題である。

ここでは、海底火山噴出物である軽石による港湾閉鎖が地域経済に及ぼす波及効果を、産業連関分析を用いて定量的に推計することを目的とする。具体的には、以下の 3 点を明らかにすることを目指す。

まず、港湾機能の停止による経済被害額の推計である。過去の災害研究では、建物被害などのストック被害に焦点が当てられることが多かったが、本研究では物流停止によるフローへの影響に着目する。大規模な海底火山噴火がもたらす影響は甚大で、数多くの港湾が影響を受けることが予想される。中でも、軽石が内海域である瀬戸内海に流入すると、海流や潮流によって軽石が再び域外に流出することが期待できず、啓開には長い時間を必要とする。ここでは瀬戸内海港湾のうち、徳山下松港を対象として、山口県の産業連関表を用い港湾閉鎖に伴う供給制約および需要蒸発がもたらす生産減少額を算出する。さらに、産業構造を考慮した被害波及メカニズムの解明を行う。上流産業の供給停止が下流へ波及する前方連関効果と、下流産業の操業停止が上流へ波及する後方連関効果の違いを比較することで、港湾の特性に応じた経済被害の現れ方を明らかにする。また、分析結果に基づき港湾 BCP への示唆を得る。推計された被害構造に基づき、重点的に対策を講じるべき産業分野や、サプライチェーンの強靱化に向けた代替輸送ルート確保の重要性について考察を行う。なお、ここで推計する経済被害は港湾が1年間閉塞され、なおかつ代替輸送が行われず、備蓄もないと仮定している。

## 4.2 分析手法とデータ

### 4.2.1 分析手法

#### (1) 移輸出途絶によるサプライチェーン上流の経済被害

まず直接効果（被害）として、移輸出減少分がそのまま生産減少をもたらすと仮定する。これは代替輸送が全く行われなかったことを想定していることであり、非常に厳しい仮定を置いていることになる。代替輸送の経済効果を推計する際の基準となる最悪のケースとしての位置づけである。つづいて、同一県内への間接的波及効果（被害）として、県内自給率（ $1 - \text{移輸入率}$ ）を考慮した移輸入控除型の投入係数行列を用いて、直接効果がもたらす第1次波及効果から第4次波及効果までを求めた。これはある産業の生産の減少が、中間投入（原材料や部品）の調達量の減少をもたらす、それら中間投入財を生産する産業の生産量を減少させてしまうこと、さらにそれがサプライチェーン上流に連鎖していく構造を考慮している。産業連関分析においては逆行列係数を用いて無限に連鎖する波及効果の合計を求めることも多いが、ここでは波及プロセスにも着目することを考慮して、段階的な波及をそれぞれ算出することとした。経済波及効果は段階を追うごとに減衰する。両対象地域において、直接効果と第4次波及効果までの間接効果の合計額は、逆行列係数を用いて算出した額の97%以上に相当しているため、第4次までの考慮で十分であると見なした。

#### (2) 移輸入途絶によるサプライチェーン下流の経済被害

港湾を経由した移輸入の減少は、その地域に立地する産業において、中間投入財の調達難に直面することを意味する。産業連関表および産業連関分析が想定する投入係数をここでも想定する。産業連関分析においては、様々な中間投入財が産業固有の投入係数にしたがってすべて揃ってはじめて生産が可能

となると想定する。たった一つの品目であっても調達がゼロになれば、たとえ他の原材料や部品がすべて揃っていたとしても生産が止まることを想定している。中間投入財によって投入量減少率が異なる場合、最も減少率が高い投入財がボトルネックとなり、その最も高い減少率分だけ生産も減少せざるを得ないとする。ここでは、対象港湾を通した移輸入が県内需要に占める割合（港湾輸入依存度）を品目別に求める。移輸入額については、港湾統計から得られる品目別移輸入量に、貿易統計から得られる重量当たり金額を乗じることで対象港湾経由の移輸入額を推計した。県内需要は産業連関表における県内生産額から移輸入額を除いたものとした。サプライチェーン下流への分析については間接的な波及効果を求めることが難しいため、より正確には産業連関分析では非常に厳しすぎる仮定を置かざるを得ないため、ここでは直接効果（被害）である各産業の生産減少額のみを求めた。

## 4.2.2 データ

使用したデータは以下の通りである。産業連関表および港湾統計についてはこれらが研究実施時における最新のものであった。

- ・平成 27 年山口県産業連関表（107 部門表）
- ・港湾統計年報（令和 5 年）
- ・貿易統計（令和 5 年）

## 4.3 結果と考察

### 4.3.1 移輸出途絶によるサプライチェーン上流の経済被害

徳山下松港の港湾機能停止に伴う直接被害額（移輸出の停止による最終需要の喪失額）を推計する。港湾統計（令和 5 年）に基づく同港の移輸出合計重量は年間約 1,739 万トンであり、そのうち上位 11 品目で全体の約 90%を占めることが確認された。本研究では、これら上位品目を分析対象とし、貿易統計から算出したトンあたり単価を乗じることで、品目ごとの被害額（直接効果）を推計した（表 4.1）。

被害額の算出方法と単価設定の根拠に関して、各品目の直接被害額は、港湾統計から得られた重量（トン）に、貿易統計等から算出した平均単価（円/トン）を乗じることで推計した。具体的な算出例として、順位 2 位の化学薬品を示す。港湾統計における当該品目の年間移輸出重量は 4,674,108 トンである。一方、貿易統計（徳山・下松合算）における同品目（有機化合物および無機化合物）の輸出実績は、金額 2,293 億円に対し数量 126 万トンであり、ここから導かれる平均単価は 約 181,490 円/トン となる。したがって、この単価を全体の重量に適用し、8,483 億円が推計された。

なお、単価の算出にあたっては、原則として当該港における外国貿易（輸出）の実績値を採用したが、輸出実績が存在しない品目については代替指標を用いた。例えば石炭については、徳山下松港からの輸出実績がないため、同港における輸入単価（35,700 円/トン）を国内移出分の評価額として準用した。ま

た、鉄鋼については、特殊鋼やステンレス鋼などの高付加価値製品が含まれるため、貿易統計の品目分類に基づき、より実態に近い高単価（約 584 万円/トン）を採用している。推計の結果、分析対象とした 11 品目の直接被害総額は約 4 兆 7,814 億円に達した。特に注目すべきは、鉄鋼（約 3 兆円）および鋼材（約 7,120 億円）、化学薬品（約 8,483 億円）の突出した金額規模である。重量ベースでは石炭やセメントも大きな割合を占めるが、金額換算を行うことで高付加価値製品である鉄鋼（特殊鋼・ステンレス等）の経済的ウェイトが極めて大きいことが明らかとなった。これは、徳山下松港が単なる原材料の受入港ではなく、周南コンビナートで生産された高付加価値な素材・中間財を国内外へ供給する、極めて重要な拠点であることを示唆している。

表 4.1 徳山下松港における移輸出停止被害額の推計（上位 11 品目）

| 順位 | 港湾統計品目名  | 移輸出重量<br>(トン) | 推計単価<br>(円/トン) | 直接被害額<br>(百万円) | 産業連関表 対応部門 |
|----|----------|---------------|----------------|----------------|------------|
| 1  | 鉄鋼       | 507,422       | 5,843,050      | 2,964,890      | 銑鉄・粗鋼      |
| 2  | 化学薬品     | 4,674,108     | 181,490        | 848,312        | 有機化学工業製品   |
| 3  | 鋼材       | 779,193       | 913,820        | 712,041        | 鋼材         |
| 4  | 石炭       | 3,236,590     | 35,700         | 115,546        | 石炭・原油・天然ガス |
| 5  | 揮発油      | 489,250       | 115,660        | 56,585         | 石油製品       |
| 6  | セメント     | 3,952,081     | 10,370         | 41,000         | セメント・製品    |
| 7  | 重油       | 333,269       | 85,000         | 28,327         | 石油製品       |
| 8  | 他化学工業品   | 685,200       | 10,140         | 6,950          | 化学最終製品     |
| 9  | 薪・炭      | 287,947       | 20,460         | 5,891          | 林業         |
| 10 | 化窯業品     | 451,187       | 3,020          | 1,360          | その他の窯業製品   |
| 11 | 砂利・砂     | 425,857       | 1,250          | 532            | その他の鉱業     |
| 合計 | 上位 11 品目 | 15,822,104    | -              | 4,781,439      | -          |

推計された直接被害額（約 4.8 兆円）を山口県産業連関表の県内投入係数行列に入力し、第 4 次波及までの生産誘発額を段階的に計算した結果のうち、「直接被害額＋第 1 次波及＋第 2 次波及＋第 3 次波及＋第 4 次波及の合計値」が大きい順に抽出した上位 10 部門を表 4.2 に示す。

特徴は第 1 次波及の段階で発生する巨大な誘発額である。直接被害（約 4.8 兆円）に対し、第 1 次波及では約 1 兆 1,825 億円もの生産減が誘発されているが、その内訳を見ると電力が約 4,741 億円と、全産業の中で最大（直接被害部門を除く）となっている。これは、直接被害の主体である化学工業や鉄鋼業が、極めてエネルギー集約的な装置産業であることに起因する。コンビナートの操業停止は、直ちに巨大な電力需要の消失を意味し、その影響額は他のあらゆる原材料への波及を凌駕する規模となる。つまり、徳山下松港の機能停止は、単なる物流の問題を超え、地域エネルギー産業の存立基盤を揺るがすインパクトを持つと言える。

表 4.2 徳山下松港における生産波及効果の推計結果（波及総額の上位 10 部門）

| 順位 | 産業部門名      | 直接効果      | 第 1 次波及   | 第 2 次波及 | 第 3 次波及 | 第 4 次波及 | 総額        |
|----|------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| 1  | 銑鉄・粗鋼      | 2,964,890 | 168,459   | 8,908   | 457     | 24      | 3,142,738 |
| 2  | 有機化学工業製品   | 848,312   | 72,362    | 6,915   | 724     | 90      | 928,403   |
| 3  | 鋼材         | 712,042   | 18,646    | 554     | 55      | 13      | 731,311   |
| 4  | 電力         | 0         | 474,121   | 75,584  | 10,487  | 1,518   | 561,710   |
| 5  | 石油製品       | 84,913    | 6,702     | 25,156  | 5,353   | 872     | 122,996   |
| 6  | 石炭・原油・天然ガス | 115,546   | 0         | 0       | 0       | 0       | 115,546   |
| 7  | 石油化学系基礎製品  | 0         | 79,750    | 12,859  | 1,635   | 198     | 94,442    |
| 8  | 商業         | 0         | 65,640    | 16,512  | 3,778   | 788     | 86,718    |
| 9  | 建設補修       | 0         | 48,646    | 10,248  | 1,671   | 287     | 60,852    |
| 10 | 自動車整備・機械修理 | 0         | 31,387    | 13,608  | 3,470   | 714     | 49,179    |
| 参考 | 全産業合計      | 4,781,439 | 1,182,450 | 280,501 | 574,54  | 11,343  | 6,356,116 |

（単位：百万円）

本推計結果において注目すべき点は、一部の産業部門で第 1 次波及よりも第 2 次波及の誘発額が大きく跳ね上がる逆転現象が確認されたことである。特に石油製品においては、第 1 次波及額 6,702 百万円に対し、第 2 次波及額が 25,156 百万円 と約 3.7 倍となっている。このメカニズムについて、山口県産業連関表（2015 年）の投入係数を用いた構造分析を行う（表 4.3）。

この数値の逆転は、生産工程における石油製品の役割の転換に起因している。まず第 1 次波及の段階では、燃料としての補助的消費の側面が強いと考える。直接被害の主体である輸出産業（有機化学工業製品）に対し、石油製品が直接投入される割合（投入係数）は 0.013 に過ぎない。これは、製品 1 単位の生産コストのうち、石油製品（重油や軽油等）が占める割合が約 1.3%程度であることを意味しており、主として工場のボイラー燃料や洗浄溶剤といった補助財として消費されていることが伺える。その結果、第 1 次波及における誘発額は限定的なものとなる。

次に第 2 次波及の段階では状況が一変し、主原料（ナフサ）としての投入が行われることが推察される。輸出製品（有機化学工業製品）を生産するためには、まずその原料となる石油化学系基礎製品（エチレン・プロピレン等）が必要となる（投入係数：0.244）。そして、この基礎製品を製造するための工程において、石油製品（ナフサ等）は投入係数 0.616 という極めて高い比率で投入される。これは、基礎製品の生産額の約 6 割以上が原材料費で構成されていることを示しており、ここでは石油製品が主原料として不可欠な役割を果たしている。

第 1 次波及段階での低数値は燃料消費を、第 2 次波及段階での急増は中間原料製造における主原料投入を反映したものである。0.013（補助）対 0.616（主力）という約 50 倍もの係数格差は、徳山下松コンビナートにおいて、最終製品の輸出が、川上部門（基礎原料製造）における巨大な生産活動によって支えられているという重層的なサプライチェーン構造を示すものである。

表 4.3 石油製品に関連する主要な投入係数（生産構造の比較）

| 波及段階                | 投入構造                                | 投入係数     | 係数の解釈             |
|---------------------|-------------------------------------|----------|-------------------|
| 第 1 次段階             | [211] 石油製品<br>→ [204] 有機化学工業製品      | 0.012831 | 補助的投入<br>(燃料・溶剤等) |
| 第 2 次段階<br>(プロセス A) | [203] 石油化学系基礎製品<br>→ [204] 有機化学工業製品 | 0.243986 | 中間原料需要<br>(エチレン等) |
| 第 2 次段階<br>(プロセス B) | [211] 石油製品<br>→ [203] 石油化学系基礎製品     | 0.615580 | 主原料投入<br>(ナフサ等)   |

以上の石油製品を例とした原材料の連鎖に加え、工場の稼働維持に伴うメンテナンス需要が、第 2 次波及において特定の部品・部材産業の数値を押し上げる現象が確認された。具体的には、建設用・建築用金属製品（第 1 次波及: 0.9 百万円 → 第 2 次波及: 1,241 百万円）および自動車部品・同附属品（第 1 次波及: 0 → 第 2 次波及: 1,389 百万円）の 2 部門である。これらが第 1 次段階ではほぼ無反応であるにも関わらず、第 2 次段階で大きな値となる要因は、第 1 次波及で発生した保守・修理サービスへの投入構造にある（表 4.4）。

まず、建設用・建築用金属製品の需要が第 2 次段階で約 1,300 倍（0.9 → 1,241）に跳ね上がる主因は、第 1 次波及で約 486 億円もの巨大な需要が発生した建設補修部門にある。化学プラントや製鉄所が稼働する際、その設備のメンテナンスは不可欠な工程となる。山口県産業連関表の投入係数を確認すると、建設補修部門に対し、建設用金属製品は係数 0.098 で投入されている。これは、メンテナンス費用の約 1 割が、ボルト、ナット、配管といった金属部材の調達に充てられていることを意味する。すなわち、第 1 次波及で工事（コト）が発生した瞬間に、その裏側で必然的に部材（モノ）への第 2 次波及需要が喚起される構造となっている。

次に、自動車部品・同附属品が第 2 次段階で出現（0 → 1,389 百万円）する背景には、自動車整備・機械修理部門の存在がある。港湾物流の活性化はトラック輸送の増加を招き、工場の稼働は機械設備の損耗を伴うため、第 1 次波及において自動車・機械修理には約 314 億円の需要が発生している。ここで重要なのが、投入係数 0.183 という数値である。修理・整備業の売上の約 18%は、交換用部品の仕入れコストが占めている。そのため、自動車部品そのものが直接輸出されていなくても、地域の整備工場や機械修理業者の仕事が忙しくなることで、間接的に地場の部品サプライヤーへの発注（第 2 次波及）が強力に誘発されるのである。

以上の分析から、徳山下松港における経済波及効果は、単なるモノ作りの連鎖に留まらず、工場の稼働が地域の維持・修理サービス需要を生み、それがさらに部材・部品供給を必要とするという、サービス業と製造業が密接に連携した産業クラスター構造を有していることが明らかとなった。これは、港湾機能の停止が、輸出企業の売上減少を引き起こすだけでなく、メンテナンス等を通じて共存共栄している地域の建設業者や部品商の経営基盤をも、連鎖的に脅かすことを示唆している。

表 4.4 メンテナンス・サービス部門を媒介とした波及構造

| 波及段階              | 誘発メカニズム             | 投入係数     | 経済的解釈                             |
|-------------------|---------------------|----------|-----------------------------------|
| 第 1 次段階<br>(需要発生) | 建設補修<br>← コンビナート稼働  | -        | 設備の維持・補修需要の発生<br>(誘発額：48,646 百万円) |
| 第 2 次段階<br>(部材調達) | 建設用金属製品<br>→ 建設補修   | 0.098132 | 補修工事に伴う金属部材<br>(ボルト・鋼管等) の投入      |
| 第 1 次段階<br>(需要発生) | 自動車・機械修理<br>← 物流・稼働 | -        | 輸送・機械の整備需要の発生<br>(誘発額：31,387 百万円) |
| 第 2 次段階<br>(部材調達) | 自動車部品<br>→ 自動車・機械修理 | 0.183295 | 修理・整備に伴う交換部品<br>(パーツ類) の投入        |

多段階の波及計算において、第 4 次波及の段階でもなお、生産誘発額が相対的に高く維持されている産業部門に着目する（表 4.5）。素材型産業に由来する波及効果の多くは、原材料の輸入依存により第 2 次・第 3 次段階で急速に減少する傾向にある。しかし、その中で表 4.5 に示される産業群は、第 4 次波及に至っても一定の波及規模を保ち続けている。波及が進行した後の第 4 次波及において、特定のサービス産業の数値が上位に大きく残存している点も特徴である。第 4 次波及において数値が大きい上位部門を確認すると、素材産業の姿は消え、代わってサービス業など第三次産業が多く上位を占めている。その他の対事業所サービスには、警備、清掃、設備メンテナンス、労働者派遣などの業務が含まれる。機械修理や商業も上位にいることも注目に値する。化学コンビナートや製鉄所といった巨大装置産業が、単に原料を加工するだけでなく、その稼働維持のために膨大な周辺業務を必要としていることを示唆している。工場が稼働する（第 1 次・第 2 次）に従い、その裏側では設備の保守点検、構内の警備、輸送車両の整備、管理部門の事務代行といった多様なサービス需要が、サプライチェーンの深層（第 3 次・第 4 次）まで連鎖的に発生しているのである。つまり、これらは、工場が稼働する限り常に必要とされるメンテナンス需要や、従業員の活動を支える流通サービスであり、輸入に置き換えることができない地場密着型インフラである。素材産業（鉄・化学）への波及は早い段階で減衰してしまうが、地域のサービス産業への需要は大きく残り続けると結論づけられる。

また、上位の電力、商業、対事業所サービス、輸送、不動産といった部門は、いずれも「非貿易財」としての性格が強い。原油や鉄鉱石といったモノ（貿易財）への需要は、輸入率が高いため波及効果が県外・海外へ漏出しやすい。対照的に、地域のインフラやサービスへの需要は、輸入で代替することが困難であり、必然的に県内企業への発注として循環し続ける特性を持つ。第 4 次波及でこれらの部門が上位を独占している事実は、輸出によって獲得された外貨（直接効果）が、幾重もの取引を経て、最終的には地域のサービス事業者やインフラ企業の所得として定着・蓄積されていることを実証するものである。逆に言えば、港湾機能の長期停止は、この地域経済の循環を止めることを意味し、直接的な貿易に関与しない地場の中小サービス産業に対しても、深刻な経済的打撃を与えることが予想される。

表 4.5 第 4 次波及効果における上位 10 部門（徳山下松港）

| 順位 | 産業部門名          | 第 4 次波及額 |
|----|----------------|----------|
| 1  | その他の対事業所サービス   | 1,641    |
| 2  | 電力             | 1,519    |
| 3  | 石油製品           | 872      |
| 4  | 商業             | 788      |
| 5  | 自動車整備・機械修理     | 714      |
| 6  | 金融・保険          | 707      |
| 7  | 自家輸送           | 391      |
| 8  | 道路輸送（自家輸送を除く．） | 377      |
| 9  | 不動産仲介及び賃貸      | 374      |
| 10 | 通信             | 364      |

（単位：百万円）

表 4.2 で示した波及総額の上位 10 部門において、投入における付加価値率を考慮することにより県内総生産（GRP）減少額を推計した（表 4.6）．生産額ベースでの被害（約 6.3 兆円）に対し、実質的な経済損失である付加価値減少額は約 1.7 兆円と推計された．特に注目すべきは、電力や商業といったサービス・インフラ部門である．これらの産業は、製造業と比較して付加価値率が高い傾向（一般に 40%～60%程度）にある．そのため、生産額ベースの減少以上に、地域所得へのマイナスインパクトが大きく現れる特徴がある．この結果は、港湾機能の停止が、企業の売上減少に留まらず、地域住民の所得減や企業の利益消失という形で、県経済の基礎体力を甚大に毀損することを示唆している．

表 4.6 徳山下松港における付加価値減少額の推計（上位部門）

| 順位 | 産業部門名      | 波及総額<br>(生産額) | 付加価値率(%) | 付加価値減少額<br>(実質損失) |
|----|------------|---------------|----------|-------------------|
| 1  | 鉄鉄・粗鋼      | 3,142,738     | 0.3080   | 967,963           |
| 2  | 有機化学工業製品   | 928,403       | 0.2380   | 220,960           |
| 3  | 鋼材         | 731,311       | 0.2790   | 204,036           |
| 4  | 電力         | 561,710       | 0.3660   | 205,586           |
| 5  | 石油製品       | 122,996       | 0.2670   | 32,840            |
| 6  | 石炭・原油・天然ガス | 115,546       | 0.0000   | 0                 |
| 7  | 石油化学系基礎製品  | 94,442        | 0.0000   | 0                 |
| 8  | 商業         | 86,718        | 0.7140   | 61,917            |
| 9  | 建設補修       | 60,852        | 0.4450   | 27,079            |
| 10 | 自動車整備・機械修理 | 49,179        | 0.4310   | 21,196            |
| 合計 | 全産業合計      | 6,356,116     | -        | 1,741,577         |

（単位：百万円）

### 4.3.2 移輸入途絶によるサプライチェーン下流の経済被害

山口県におけるの徳山下松港依存度（港湾依存度）の高い部門を表 4.7 に示す。特に鉱物資源（62%）とエネルギー資源（57%）において極めて高い依存度が確認された。また、石油製品や鋼材、基礎化学品といった中間財についても一定の依存度（17%～29%）が示されており、同港が原燃料だけでなく、地域産業の多様な部材供給を支えていることが分かる。

表 4.7 徳山下松港における主要移輸入資材の港湾依存度（上位 6 品目）

| 順位 | 産業連関表部門    | 港湾統計品目         | 移輸入重量<br>(t) | 推定単価<br>(万円/t) | 推計移輸入額   | 県内需要合計    | 港湾依存度 |
|----|------------|----------------|--------------|----------------|----------|-----------|-------|
| 1  | その他の鉱業     | 石灰石            | 5,842,267    | 0.5            | 292 億円   | 465 億円    | 62.0% |
| 2  | 石炭・原油・天然ガス | 石炭             | 7,855,104    | 6.4            | 5,027 億円 | 8,766 億円  | 57.0% |
| 3  | 林業         | 薪炭             | 841,700      | 0.7            | 59 億円    | 155 億円    | 38.0% |
| 4  | 石油製品       | 揮発油, その他<br>石油 | 4,867,576    | 8.3<br>8.5     | 4,060 億円 | 13,763 億円 | 29.0% |
| 5  | 鋼材         | 鋼材             | 912,111      | 13.4           | 1,222 億円 | 72,74 億円  | 17.0% |
| 6  | 有機化学工業製品   | 化学薬品           | 1,047,108    | 19.2           | 2,010 億円 | 12,068 億円 | 17.0% |

#### ① 鉱物資源（その他の鉱業）の供給制約

港湾依存度が最も高いその他の鉱業（依存度 62%）について、その波及効果を分析した。表 4.8 は、同部門を原材料として投入している産業部門を抽出し、供給制約による生産減少額を推計したものである（上位抜粋）。推計の結果、化学工業（有機・無機・医薬品）や建設業（建築・公共事業）を中心に、全 36 部門において合計約 2 兆 5,735 億円の生産減少が生じることが明らかとなった。特に、第 1 位の有機化学工業製品や第 5 位の無機化学工業製品への被害は甚大であり、工業用塩の供給停止がコンビナートの基幹製造工程を直撃する構造が浮き彫りとなっている。

表 4.8 その他の鉱業の供給制約（62%減）による主な被害産業

| 順位 | 産業部門名     | 投入額    | 県内生産額   | 生産減少額     |
|----|-----------|--------|---------|-----------|
| 1  | 有機化学工業製品  | 123    | 915,479 | 567,597   |
| 2  | 公務        | 3      | 402,778 | 249,722   |
| 3  | 建築        | 683    | 304,644 | 188,879   |
| 4  | 医薬品       | 18     | 265,732 | 164,754   |
| 5  | 無機化学工業製品  | 4,716  | 243,221 | 150,797   |
| 6  | ゴム製品      | 39     | 188,908 | 117,123   |
| 9  | 公共事業      | 2,415  | 150,318 | 93,197    |
| 10 | セメント・製品   | 7,207  | 116,413 | 72,176    |
| 23 | 非鉄金属製錬・精製 | 10,469 | 44,028  | 27,297    |
| -  | 使用部門 合計   | 31,058 | -       | 2,573,515 |

（単位：百万円）

## ② エネルギーおよびその他の供給制約

上記 36 部門以外で石炭・原油・天然ガスを使用する産業について同様の計算を行ったところ、石油製品や電力など 47 部門が抽出され、その被害額は約 4 兆 5,642 億円に達した。さらに、林業および石油製品の供給制約を加えることで、船舶製造や運輸・通信業など 20 部門への波及が確認された。

## ③ 中間財（鋼材・化学製品）の検証

港湾依存度の上位には鋼材（17%）および有機化学工業製品（17%）も含まれているが、これらの供給制約による追加的な被害部門は発生しなかった。これは、鋼材を使用する産業（自動車、造船、建設等）や化学製品を使用する産業（プラスチック、繊維等）が、すでに上流のエネルギーや鉱物資源の制約段階ですべて抽出されていたためである。本研究の推計が二重計上を回避しつつ、サプライチェーンのボトルネックを網羅的に捉えている結果である。

以上の段階的推計を統合した最終結果を表 4.9 に示す。分析の結果、徳山下松港における主要物資の輸入停止は、県内全 107 部門のうち 103 部門（96.3%）に波及し、その生産減少額の合計は約 7 兆 4,933 億円に達すると推計された。この数値は、山口県の県内生産額（約 13.3 兆円）の過半に相当する規模であり、同港の供給機能が停止した場合、県経済が壊滅的な打撃を受けることを示唆している。

表 4.9 供給制約による生産減少額の推計結果（総括表）

| 制約要因<br>(主要輸入品目) | 港湾依存度 | 影響を受ける主な産業          | 対象部門数  | 生産減少額<br>(百万円) |
|------------------|-------|---------------------|--------|----------------|
| その他の鉱業           | 62.0% | 化学、建設、セメント、<br>非鉄金属 | 36 部門  | 2,573,515      |
| 石炭・原油・天然ガス       | 57.0% | 石油製品、電力、ガス、<br>化学繊維 | 47 部門  | 4,564,162      |
| 林業               | 38.0% | 船舶、農業、家具            | 4 部門   | 64,813         |
| 石油製品             | 29.0% | 運輸（自家輸送）、通信、<br>水道  | 16 部門  | 290,807        |
| 鋼材               | 17.0% |                     | 0 部門   | 0              |
| 有機化学工業製品         | 17.0% |                     | 0 部門   | 0              |
| 合計               | -     | -                   | 103 部門 | 7,493,297      |

### 4.3.3 考察

本章における分析の最大の発見は、港湾機能停止に伴う経済被害において、移輸出停止による需要ショック（約 6.3 兆円）よりも、移輸入停止による供給ショック（約 7.5 兆円）の方が深刻であるという非対称性が確認された点にある。通常、港湾は製品を輸出する場所として認識されがちであるが、徳山下松港に関しては、その機能の本質が原材料とエネルギーを受け入れる場所にあることを、この数値の乖離は示唆している。需要ショックは製品在庫の積み増し等で一時的な緩和が可能であるが、供給ショ

ック（特にエネルギー欠乏）は、生産活動そのものを物理的に不可能にするため、経済への打撃はより即時的かつ致命的となる。

次に、供給ショックが全産業の96%に波及した主たる要因は、石炭・原油・天然ガスの港湾依存度が57%に達している点にある。山口県の産業構造は、石油精製や化学、電力といった素材・エネルギー転換部門に特化している。これらの産業は、海外からの資源輸入なしには成立し得ない。徳山下松港の機能停止は、単なる物流の寸断ではなく、県内経済に電力を供給する火力発電所や、燃料を供給する製油所の稼働停止を意味する。すなわち、同港は山口県経済にとっての心臓部（エネルギー供給源）であり、その停止は産業の血液の循環不全を招き、製造業のみならずサービス業や医療・福祉を含む全県的な経済麻痺を引き起こす構造的脆弱性を有している。

徳山下松港は、単なる地方港湾の一つではなく、日本の西瀬戸地域における代替不可能な資源供給拠点であると結論付けられる。これら資源は重量貨物であり、トラック輸送による代替が現実的に困難である。近隣港湾（宇部港や広島港）への代替も、専用岸壁や貯蔵施設の制約から極めて困難である。したがって、同港における海底火山災害等のリスクは、山口県一県の経済問題に留まらず、同港から素材供給を受ける西日本全域のサプライチェーンを脅かす広域的な経済安全保障上の課題として認識されるべきである。港湾機能の喪失は即座に全産業のエネルギー危機に直結するため、石油・石炭等の戦略的備蓄の強化や、日本海側港湾からの代替輸送ルートの確保を最優先課題とすべきである。

## 5. 2年間の研究成果のまとめと今後の方針

### 5.1 まとめ

本研究は、2年計画の研究の成果として、噴火時の航空機の避難行動に関する分析ならびに空港での駐機機材の避難シミュレーションを初年度に行った。最終年度の本年では駐機機材の退避を動的に割り当てる方法を構築するとともに、フライトプラン変更に関する実際の状況に基づき VAAC 情報とフライトプラン変更に関する関係の分析を行った。さらに、海底火山噴火による海上輸送への影響を国民経済的な見地から分析を試みた。以下、2年間のまとめである。

#### [2025 年度]

フィリピン・タール山における飛行軌道分析（アジア便（intra-Asia）ならびに長距離便（long-haul flight））

- 1) アジア便ならびに長距離便については、3 タイプに大きく大別されることがわかった。これは火山灰の影響がどの程度持続するかについてのリスク判断に基づくものと考えられる。
- 2) 大規模な噴火が発生した場合、航空会社は VAAC のアラートに基づいて慎重に飛行計画を決定しているととらえることができる。
- 3) 飛行中のケースでは、およそ FL500 における火山灰拡散情報が重要である。現在の VAAC による火山灰拡散に関するアラートは、一般的に飛行計画の立案において信頼性が高いと判断される。

#### 桜島噴火における駐機機材の避難シミュレーション

##### 1) 空港の容量および上空容量（ならびにスロット数）の拡充

シミュレーションの結果から、最も影響範囲の小さなケースにおいても那覇、羽田、伊丹、関西といった主要空港への受入が多くなることがわかり、関西圏、首都圏と言ったより便数の多い空港が影響を受ける場合、受入が集中する空港は北上することになる。このことから、北海道ならびに東北における北日本の空港における駐機容量を拡大し、避難航空機の受け入れ体制を強化する必要がある。また、前述のように、比較的被害範囲が限定されている場合を想定しても、羽田、那覇、大阪といった主要空港への集中が顕著なことから、このような拠点空港における利用可能な発着枠（スロット）の拡充も、避難便の円滑な運用のために不可欠であるといえる。

##### 2) 航空交通管制および運用ルールの強化

火山噴火による深刻な空域混雑に対応するためには、航空交通管制およびその運用ルールの強化が求められる。特に、上空の制御も考慮した場合、現在シミュレーションで想定されている状態よりもより混雑した状況が生まれうる。このため複雑な航空交通シナリオに対応可能な高度な航空交通管理ルールの策定と実施が必要である。

## [2026 年度]

### 大規模噴火時における非難航空機の動的避難先割り当て問題

- 1) 2025 年度に開発した空港での火山灰警戒システムをもとに、駐機機材の退避を動的に行うことができるように割り当てを逐次割り当て方式とした方法論を構築した。
- 2) Case 1～3 については静的な割り当てとほぼ同傾向の結果を得ることができた。しかし、時間経過を見ると、火山灰の拡散範囲が広くなるほどに、航空経路上の混雑のピークの数が増え、また Case 3 ではそれが長時間持続する傾向にあることがわかった。これは、避難対象空港の拡大に伴い、新たな避難需要が次々と発生する一方で、避難先空港および航路の処理能力がそれに追いつかなくなるためである。このような状況では、空港における駐機容量不足だけでなく、空域全体が構造的に過負荷状態に陥る可能性が高いことが示唆されるといえる。
- 3) 結果として影響範囲が拡大するにつれて、避難の困難性は単なる受入容量不足ではなく、避難フローの集中とそれに伴う空域負荷の増大として現れることがわかった。

### 火山災害と VAAC 情報との関連性に関する分析

- 1) 2023 年 5 月 20 日 (UTC) よりメキシコシティ空港が閉鎖されるなどの被害が出たポポカテペトル山の噴火を取り上げ、FR24 により全日の 9 日から噴火がある程度沈静化した 22 日までの計 28073 便のフライトについて、どのような行動を取ったかについて欠航、迂回したが定刻運航、迂回ラビに遅延運航、通常経路で定刻運航、通常経路だが遅延運航、という 5 分類を設定し分析を行った。
- 2) 分析の結果、火山灰雲から離れた飛行ルートを運航するフライトでも迂回ルートを選択する割合が高くなっていることから、多くの Aircraft Operator (フライトプラン立案担当者) は VAA の情報をもとにより安全な飛行ルートを選択する傾向にあることがわかった。ポポカテペトル山近辺の空港を発着する国内線のフライトは火山灰雲の拡散範囲が拡大した後も飛行ルートを変更せずに運航するものも比較的存在したのに対し、ポポカテペトル山上空付近を通過する国際線のフライトは飛行ルートを変更して回避したものが多数を占めた。この違いから、飛行ルートにおいて火山灰雲の影響を受ける割合が高いフライトは火山灰雲を回避する上での制約が多く、よりリスクの高い運航判断を迫られている可能性があるといえる。
- 3) 飛行ルートの選択をはじめとした運航計画は Aircraft Operator に委ねられる部分が多いことが考えられる。火山灰雲が存在するとされている空域に突入していると考えられるフライトもわずかに確認され、これは各 Aircraft Operator が VAA 以外の様々な情報を総合的に判断した運航であることを示している。ゆえに Aircraft Operator によって VAA の解釈やリスク許容度が異なると推察された。

### 海底火山噴出物による港湾閉塞の経済被害推計

- 1) 徳山下松港が軽石によって 1 年間の閉塞を余儀なくされた場合、山口県経済に与える影響は、移輸出停止による経済影響が約 6.3 兆円、移輸入停止による経済影響が約 7.5 兆円と推計された。徳山下松港に関しては、その機能の本質が原材料とエネルギーを受け入れる場所であることをこの結果は示唆している。とくに移輸入が途絶えることによる供給ショック（特にエネルギー欠乏）は、生産活動そのものを物理的に不可能にするため、経済への打撃はより即時的かつ致命的となる。
- 2) 供給ショックは全産業の 96%に波及した。この主たる要因は、石炭・原油・天然ガスの港湾依存度が 57%に達している点にある。山口県の産業構造は、石油精製や化学、電力といった素材・エネルギー転換部門に特化している。これらの産業は、海外からの資源輸入なしには成立し得ない。徳山下松港の機能停止は、単なる物流の寸断ではなく、県内経済に電力を供給する火力発電所や、燃料を供給する製油所の稼働停止を意味する。すなわち、同港は山口県経済にとっての心臓部であり、その停止は産業の血液の循環不全を招き、製造業のみならずサービス業や医療・福祉を含む全県的な経済麻痺を引き起こす構造的脆弱性を有している。

## 5.2 政策的含意と今後の方向性

2 年間の研究成果から、どのような政策的含意を得ることができるか、についてここでは包括的に述べることとする。

まず、航空輸送への影響を軽減するためのシステムの開発に関する研究からは、関係者間、特に VAAC とエアライン、ないしはフライトプラン立案担当（Aircraft Operator）との円滑な情報共有の重要性である。Takebayashi et al. (2021) で指摘されているように、噴火警戒情報の共有は円滑な航空機の誘導には不可欠である。ポポカテペトル山の分析でも把握されたが、通常の規模の噴火であれば、関係者間の情報共有と特に VAAC の火山灰拡散情報は有効に機能していると考えられた。しかし、本年度の動的割り当てで示したように、羽田など駐機数が多数であり、他空港では完全に賄いきれないほどに機数が膨れ上がった状態では、この円滑な情報共有が実現し続けるかどうかは不透明である。特に、本研究では言及しなかったサービス中の機材の避難も同時に行わなければならない場合、各主体間でのコンフリクトの可能性は否定できない。例えば、各エアラインは自己の機材を安全に避難させたいと考え、それは他のエアラインとのコンフリクトを生じさせかねない。同時に受入側の空港でも、本年度の動的割合で言及したように、滑走路まで使用した避難を検討する場合、どのように調整すべきか、を限られた時間内で行うことは容易ではないと考えられ、空港間でのトレードオフが起こりうると懸念される。現行の A2-BCP では各空港レベルでの対応を中心に BCP 立案を要求しているが、それは台風のようにある程度対応するまでに時間的余裕がある災害には有効であると考えられる。しかし、火山災害のように予見が極めて難しく、また一旦発災すれば短期間に対応が迫られ、それが広域に影響する『ネットワーク型災害』であることを考えると、現行の A2-BCP で求められている計画レベルでは十分とは言い難い。広域連携をより深化させることが減災のためには極めて重要であると言える。

ひとつの可能性として、VAAC 情報の精緻化によるコンフリクト発生の軽減が考えられる。これは現在 ICAO が導入を検討している新しい火山灰拡散情報提供方法に基づいた議論である。新しい新しい火山灰拡散情報提供方法は **Quantitative Volcanic Ash (QVA) Concentration Information** と呼ばれるものであり、従来からある水平 2 次元に加えて、高度方向と時間方向を持つ情報として提供する考え方に基づく情報提供方法である。具体的には水平方向に加え、鉛直方向には 平均海拔 から **FL600** までを **5,000 ft** 刻みのフライトレベル帯ごと、また時間については **0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24** 時間先の 3 時間刻みで扱うというものである。さらに、従来の **VAA/VAG** が 6 時間刻み中心なのに対し、**QVA** は 3 時間刻みの予測位置を与えることで、より現実的な灰雲表現を目指すというものになる。制度そのものも向上するに加えて、その情報の更新間隔も短縮されることで、より実際の運用に即したものとなることが期待される。この **QVA** は本研究で提案されている警戒システムの時間間隔とも一致するため、**QVA** の情報に基づく予測精度が向上した場合、例えば 12 時間以上先の状態を前提としてリスク回避型の行動を取ることが可能になる。この状態をもとに、広域的な非常時の避難容量確保を設計できる可能性があるが、これは同時に主体間のコンフリクトを早期に軽減することで実現すると言える。ゆえに、今後の研究方向の第一番目として、コンフリクト軽減と情報精度の向上の関係を明らかにすることを挙げることにした。

次に、海底火山噴出物による港湾閉塞の経済被害に関する研究からは、戦略的備蓄の強化や、代替輸送ルートの確保の重要性が示唆された。例えば、今回研究対象とした徳山下松港は、単なる地方港湾の一つではなく、日本の西瀬戸地域における代替不可能な資源供給拠点であると結論付けられる。これら資源は重量貨物であり、トラック輸送による代替が現実的に困難である。近隣港湾（宇部港や広島港）への代替も、専用岸壁や貯蔵施設の制約から極めて困難である。したがって、同港における海底火山災害等のリスクは、山口県一県の経済問題に留まらず、同港から素材供給を受ける西日本全域のサプライチェーンを脅かす広域的な経済安全保障上の課題として認識されるべきである。港湾機能の喪失は即座に全産業のエネルギー危機に直結するため、平時からの備えと被災時の臨機応変な対応が重要であるといえる。

本研究からは以上のような空港ならびに港湾における **BCP** 立案における政策的示唆を得ることができた。しかし、本研究が対象としている火山災害は火山灰および軽石に限定されている。実際には火山弾、溶岩流など本研究では触れなかった事象が存在する。これらの事象に対しては波及する範囲も時間・空間的にも異なると考えられる。特に溶岩流については局所的な破壊とはなるものの、非常に長期間の機能不全が発生すると考えられるため、中長期的な影響を考慮した研究アプローチが必要になると考えられる。

最後に、本研究で得られた成果が、今後のわが国の空港・港湾における **BCP** 立案の一助となることを願って本研究を締めくくる次第である。

## 参考文献

- 1) International Civil Aviation Organization (ICAO), 2022. Quantitative Volcanic Ash (QVA) Concentration Information, first edition, 2022. (<https://www.icao.int/sites/default/files/METP/Documents/QVA-Concentration-Information-Flyer-1stEd-rev21JUN2024.pdf>) .