

大規模火山災害に対応した港湾，空港のBCPに関する研究

竹林幹雄

神戸大学

内容

- 研究の背景と目的
- 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

背景と目的

- 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。
- 火山噴火は海上輸送にも大きな影響を与える。
 - 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。
- 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もよい。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。

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

研究目的

- 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。

アラートシステム（昨年度報告書より）

Alert type (Image Color)	内容	望まれる対応
Red	避難	離着陸に制限を設け、避難警報 を発令する
Orange	到着制限	離陸前の便に対して到着の制 限を指示
Yellow	注意	状況を注視し、警報の変化に備 える
Green	安全	

定式化の概要

- 目的関数：避難に伴う総移動距離の最小化
- 制約条件
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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。

定式化（動的割り当てによる拡張）

- 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.
- 各時間帯ごとでの制約条件を考慮した最適化問題に変更.
 - 例えば，時間 t での状態を考慮した目的関数は次の形式になる.
 - minimize to $\sum_{i \in \Omega^{RED}(t)} \sum_j \sum_l d_{ij} x_{ij}^l(t)$
 - このとき，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，という制約は次の形式になる.
 - $\sum_j x_{ij}^l(t) \leq V_{ij}^l(t) \forall i \in \Omega^{RED}(t), \forall l$

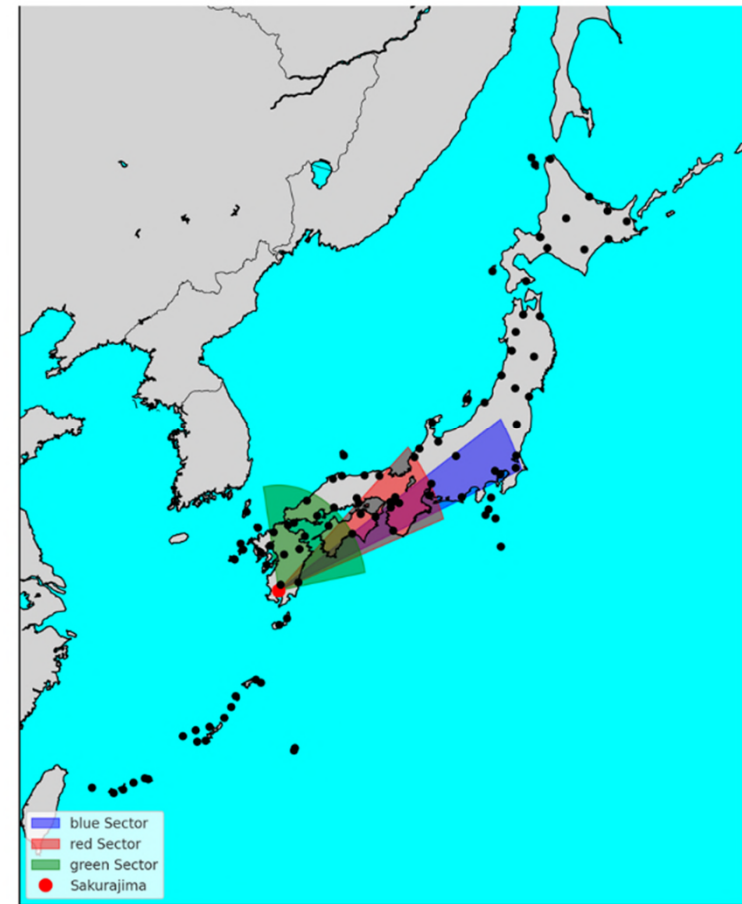
動的割り当て

- 逐次割り当てを行う
- 手順
 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.
- 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
 - $C_j^l(t + 1) = C_j^l(t) - \sum_i x_{ij}^l(t)$
- 避難元空港 i における残存航空機数は以下のようなになる
 - $V_i^l(t + 1) = V_i^l(t) - \sum_j x_{ij}^l(t)$
- 注意
 - 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.

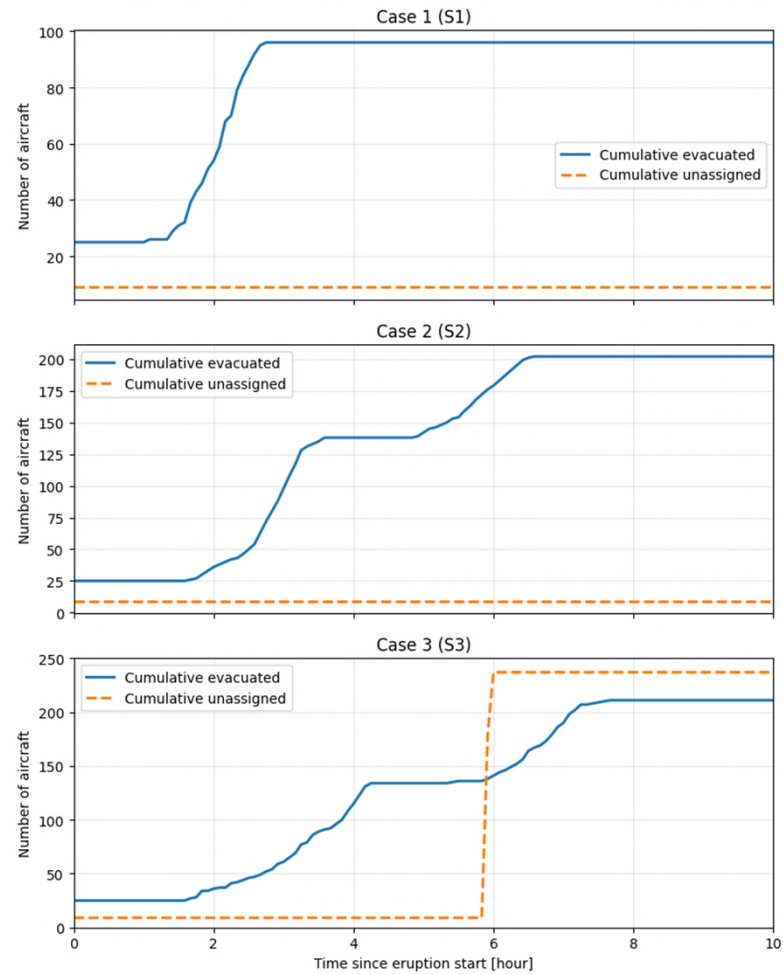
ケース設定

- Case 1：降灰影響が九州域に限定される場合
- Case 2：降灰影響が関西・中部地方に及ぶ場合
- Case 3：降灰影響が首都圏にまで及ぶ場合

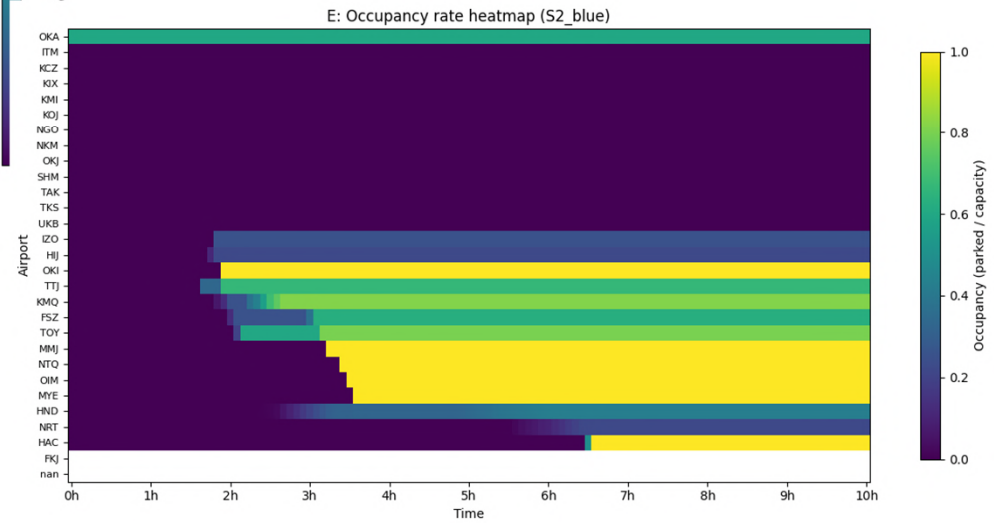
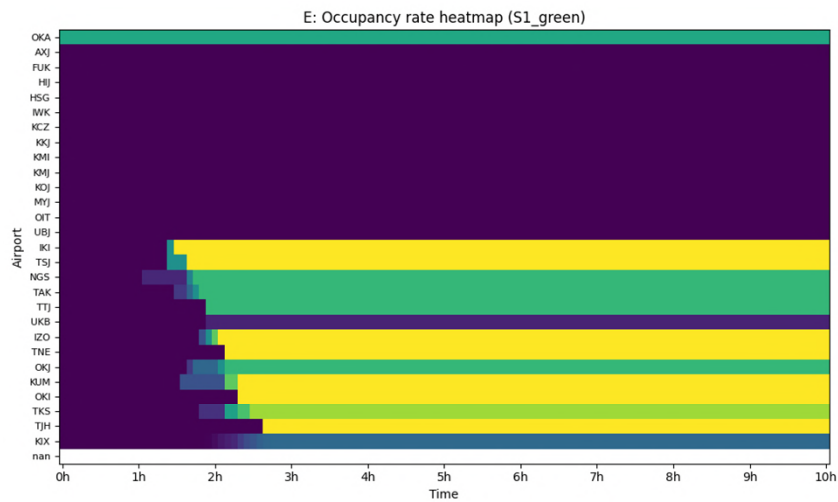
シナリオ（昨年度報告書より）



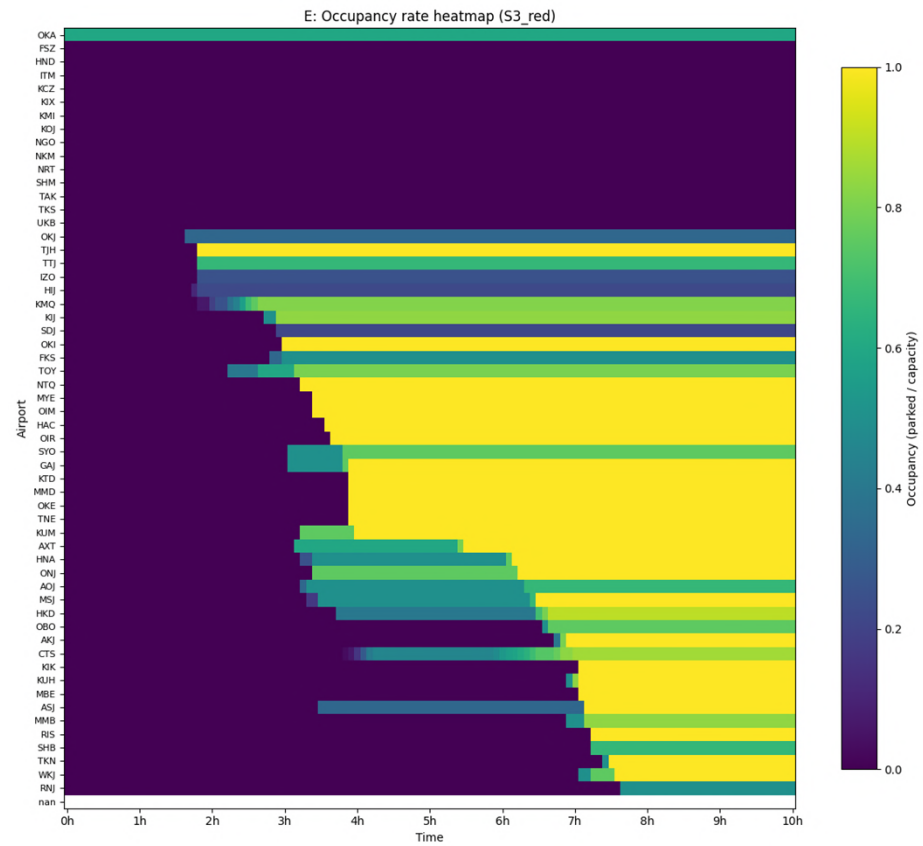
避難完了と避難失敗航空機数の推移



空港別駐機状況の推移 (Case 1/2)



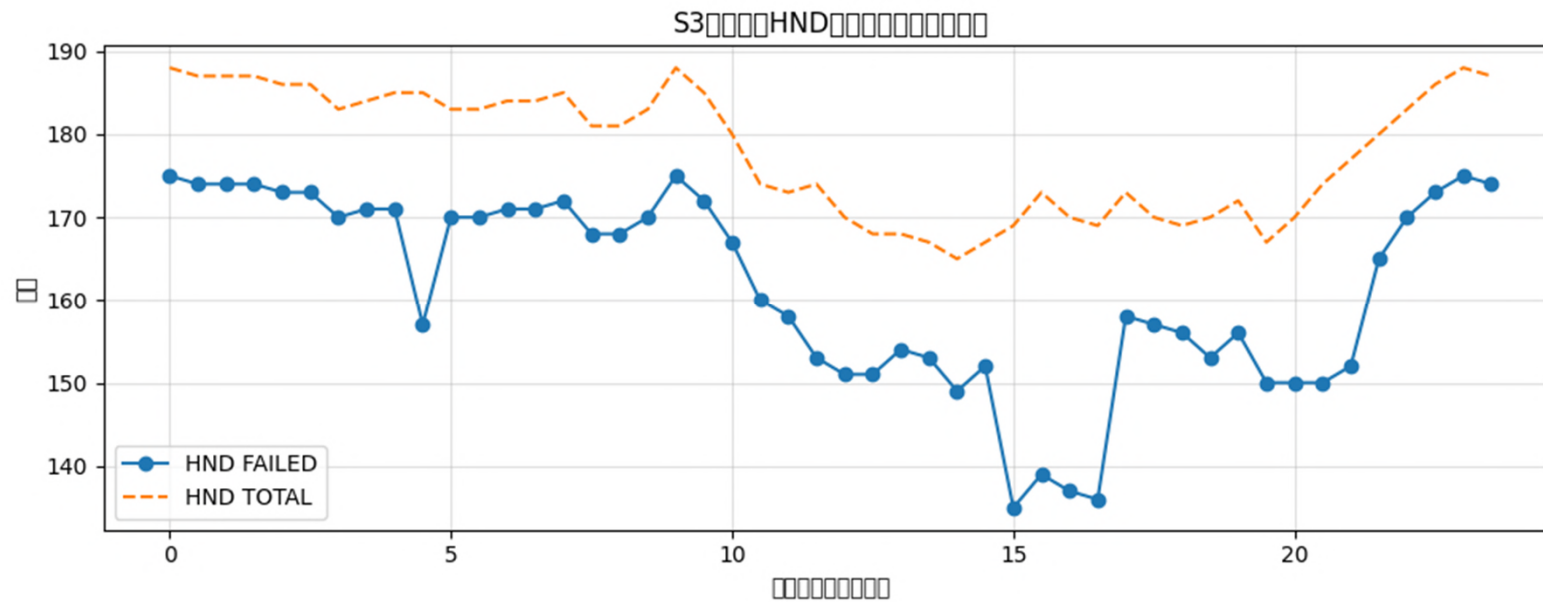
Case 3



動的割り当てによるまとめ1

- Case 1および2では関西，ないしは首都圏の空港への退避が可能であり，完全な飽和には至っていない．
- 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．

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



HNDにおける退避行動

- 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。
 - 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。

全体のまとめと政策への示唆

- 本集研中得るが、結果から、認定された航空機の運用に、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。

今年度の他2研究の概要

- [illegible]

つづき

- 海底火山噴出物による港湾閉塞の経済被害推計
 - 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カ年の研究から得られた政策への示唆

- 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。
 - 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いえない。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。
- 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、代替輸送ルート確保の重要性が示唆された。
 - 徳山下松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。

以上です.

ご清聴ありがとうございました