

大規模噴火時の航空機避難に関する 空港処理能力

藏原 これほる¹・大西 正光²・Haris RAHADIANTO³

¹学生会員 京都大学大学院 情報学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail: kurahara.koreharu.85m@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 京都大学防災研究所巨大災害研究センター

(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

³非会員 京都大学大学院 情報学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

Email: haris.rahadianto.88n@st.kyoto-u.ac.jp

火山の大規模噴火による火山灰の拡散は、広範囲の空港に深刻な影響を及ぼす。これによる経済的な損失を軽減するためには、降灰の影響を受ける空港に駐機している航空機を他の安全な空港に避難させることが効果的である。本研究では、大規模噴火時の空港の避難に関する処理能力を評価する手法を提案する。火山灰拡散シナリオとして、PUFF モデルと過去の風向データに基づいて作成されたシミュレーションデータを用いて、影響の大きいシナリオを抽出した。この手法を、近年噴火リスクが高まっている桜島が1914年の大正大噴火と同規模の噴火を起こすというシナリオで、我が国の国内線航空交通ネットワークに適用した。結果は、羽田空港など大規模な空港が影響を受ける場合、ダイバート及び避難の需要が安全な空港の容量を上回る可能性があることを示唆した。

Key Words: volcanic hazard, civil aviation, aircraft evacuation, worst scenario, risk assessment

1. はじめに

噴火が発生し火山灰が空中に拡散すると、上空で火山灰に遭遇する航空機は深刻な影響を受ける。航空機が受ける影響は多岐にわたり、エンジンの損傷、窓の擦過傷、客室への火山灰の混入などが起きる¹⁾。1982年には、British Airways 航空の航空機が火山灰雲に遭遇し、4機のエンジン全てが破損し一時停止する事態に陥った。数分後にエンジンは再始動したが、フライトを中止して近隣の空港に緊急着陸した²⁾。他の事例では、1989年にKLM867便が火山灰雲に遭遇してエンジンに不調を来たし、すべてのエンジンの交換修理を余儀なくされ、甚大な損失を出した³⁾。

火山灰は巡航中の航空機に影響するだけではなく、空港の運用やその施設にも影響を及ぼす。一度火山灰が空港の滑走路に堆積すると、滑走路の標識等の視認性を悪化させることや離着陸時に航空機のエンジン内に混入することによって通常の空港運用が不可能になり、その影響は雨や雪と違い人為的に火山灰を除去するまで継続する⁴⁾。1991年のピナツボ火山の噴火では、7か所の空港

が降灰による運用中止と火山灰の清掃を余儀なくされた。その中の一つのニノイ・アキノ国際空港では1cmほどの火山灰の堆積を観測し、運用再開までに4日、通常通りの運用の再開までに半月を要した⁵⁾。

度重なる火山灰による航空輸送の障害を経て、国際民間航空機関(ICAO)は、火山灰が空中に存在するときには航空機は原則としてその空域を通過しないというルールを定めていた⁶⁾。しかし、2010年に起きたアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火では、火山灰が国境を越えて西ヨーロッパ全域に拡散し、甚大な航空ネットワーク障害を引き起こした。

当時、航空輸送業界及び関連業界への経済的な損失を回避すべく、ヨーロッパの民間航空事業者や空域管理者等のステークホルダーは、火山灰に汚染されている空域の基準値を定め、一定以下の濃度であれば航空機が通過できるようにルールを定めた⁷⁾。航空機が影響を受ける火山灰の量に関する知見は蓄積されておらず、この基準に科学的な根拠はないが、基準が設定されて以降航空機と火山灰の遭遇に関する深刻な事案は報告されていない。

2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火発生

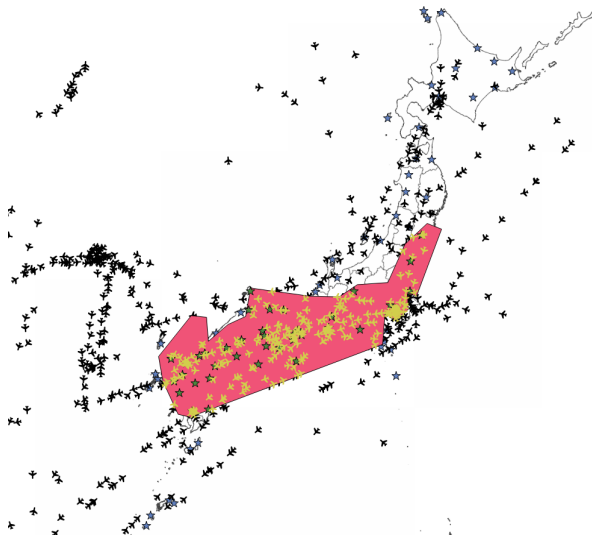


図-1 大正大噴火で降灰を観測した領域¹⁾と2019年2月4日の航空機の分布

以前は、火山灰による空域、空港、または航空機への影響を個別に評価する研究が多かった。一方で2010年の噴火発生後は、複数のステークホルダーの意思決定を含み、包括的な航空輸送ネットワークへの影響を分析する研究が盛んになってきている。

本研究の先行研究には二つの背景がある。ひとつは火山噴火が航空輸送に与えるリスクの評価（リスクアセスメント）であり、もう一つは噴火直後及び災害対応中の危機対応に関する研究（危機管理）である。

多くのリスク評価に関する研究は、特定の火山噴火を対象にして航空輸送への影響を評価している。Kim(2019)は、韓国にある白頭山の噴火が国際航空ネットワークに与える影響を分析し、アジア圏の航空ネットワークが6週間にわたって影響を受けるという予測を行った⁸⁾。Volentikら(2015)はリスク管理の研究として、既存の国際空港と新造の国際空港の火山噴火による降灰を受ける確率を求め、新造する国際空港の方が既存の空港よりもリスクが小さいことを示した⁹⁾。

危機管理に関する研究では、ステークホルダー間の調整の手法の研究や、それらの複数ステークホルダーが協同して対応する危機対応システムを提案する研究が行われている。Scaini(2013)は、GIS技術に基づいた火山噴火のリスク評価手法を開発し、2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火に適用して検証した¹⁰⁾。この研究では、火山灰拡散シミュレーションと航空輸送管理をGISによって結び付けている。Reichardt(2019)らは、航空輸送のステークホルダー及び有識者を招いたワークショップを開催し、2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火をベースシナリオとした危機管理計画の作成を試み

た¹¹⁾。

火山の近傍を利用する航空輸送ネットワークは、噴火によってその運用を中断させられるリスクを常に抱えている。2010年のエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火はVEI(Volcanic Explosion Index)スケールで4という大規模な噴火であり、その影響は国境を超えて国際的な範囲に及んだ。このリスクは我が国の火山においても存在し、例えば鹿児島県に位置する桜島は現在も活発に噴火活動を行う火山であり、VEIスケール4程度の大規模な噴火を100年から150年周期で起こしている。1914年の大正大噴火による大規模噴火の火山灰は、桜島から1,000kmあまり離れた東北地方でも観測された¹²⁾。現代において再び同規模の噴火が発生した場合、図-1に示すように我が国の航空交通網は広範囲に火山灰に覆われる。しかし大正大噴火以降桜島は大規模噴火を起こしておらず、日本国内の航空輸送はこのような大規模噴火による火山灰の影響を経験していない。ゆえに桜島大規模噴火を対象とした航空輸送の危機管理体制を構築することは急務である。

民間航空事業者が大規模噴火を察知、または噴火直前の情報を受け取ると、彼らは航空機の運用に関して非常時の行動を実行する。それは巡航中の航空機の安全を確保するだけでなく、降灰の影響を受けると予想される空港に駐機している航空機を、安全な空港に移動させる対応も含まれる。それぞれの空港の安全性は火山灰の拡散シナリオによるが、より重要な問題は安全な空港全体のキャパシティが、予想しうる最悪シナリオにおいてもすべての航空機を受け入れるのに十分かどうかという問題である。火山灰の影響を受けない利用可能な空港の分布は、火山噴出物の量及び上空の風向きによって計算される拡散シミュレーションによって決定される。実際の噴火発生前に空港への影響を予測することは困難であるが、我が国全体の空港の航空機の受け入れ容量を、計算しうる火山灰拡散の最悪シナリオに基づいて評価することは可能である。

1章では、本研究の背景と意義について述べる。2章では空港容量の評価手法について述べる。3章では、2章で提案した手法に基づいてシミュレーションを行う。4章で考察を行い、本研究の今後の課題を述べる。

2. 基本的な考え方

(1) 意思決定モデル

大規模噴火に直面した際、民間航空事業者の緊急対応の方針は、火山灰に遭遇する航空機の数をも最小化することとなる。巡航中の航空機のみならず、駐機中の航空機にとっても火山灰の降灰は有害であり、もし駐機中に降

灰を受けた場合、滑走路から灰が除去されるまで機体は使用不能になるだけでなく、エンジンや空調設備等の点検が必要になることとなる。点検や検査は一定の時間を要し、さらに精密な検査ができる空港は国内でも限られているため、降灰を受けた場合その機体の利用再開までには多大な費用及び時間がかかる。このことから、最善の対応は、駐機中の航空機をも安全な空港へ移動させることとなる。

本研究では、巡航中の航空機が着陸する飛行場を変更することをダイバート、駐機中の航空機が旅客輸送をせず、他の安全な空港に移動することをエヴァキュエーション（避難）と呼称する。ダイバート及びエヴァキュエーションのためには、移動先の火山灰の影響を受けない空港の航空機の受け入れ容量が空いていることが必要である。

この受け入れ容量への火山灰の影響を評価する枠組みは、火山灰拡散シナリオ、航空意思決定モデル、航空機の運航状態のスナップショットの3点で構成される。

本研究で使用する火山灰拡散シナリオは、最終的にその地点にどれだけの火山灰が降灰するかという情報が必要である。そのため、噴火発生から一定時間後の地表への降灰量を計算したデータを使用する。これは火山灰拡散の時間発展を考慮する必要がない。

この意思決定モデルでは、噴火の発生時刻を t とする。噴火が発生すると、各ステークホルダーはその直後からそれぞれの対応を開始する。本研究では各対応にかかる時間は考慮しない。大規模噴火が発生すると、火山の気象観測担当者は火山灰の降灰分布の予報を発出する。空港管理者は、降灰の予報をもとに自分の空港が降灰の影響を受けるか受けないかを判断する。もし降灰の影響を受けると判断した場合、空港管理者は直ちに通常業務を停止し、降灰対策を開始する。まず関係各所に降灰によって数時間後に空港を閉鎖することを連絡する。そして火山灰が到達する前に、これから着陸する航空機の受け入れを停止し、現在駐機中である航空機に避難するように指示を出す。民間航空事業者は、気象担当者からの降灰予測と空港管理者からの情報をもとに、巡航中の航空機で影響を受けるものに対してダイバートの調整と指示を行う。本研究では、ダイバート先の空港との調整は考慮しない。ダイバートの手配が終わったのちに、影響を受ける空港に駐機している航空機に対して避難の調整と指示を行う。避難よりもダイバートが優先されるのは、巡航中の航空機の燃料等の関係で、着陸する空港を選定する作業が避難オペレーションよりも切迫するためである。避難先を調整した結果、万が一安全な空港の容量がすべて埋まってしまった場合、影響を受ける空港に駐機している航空機の中で、安全な空港に避難できない航空機が発生する。その場合、避難できない航空機は次善の

策として機体をシートで被うなどの対策を現地で講じる。

(2) 空港容量の定義

空港が降灰予報によって閉鎖を判断すると、巡航中の航空機でその空港に着陸予定だったものは、他の空港に着陸するように計画を変更しなければならない。これをダイバートという。さらにその空港に駐機していた航空機は、他の火山灰の影響を受けない空港に避難しなければならない。この際、安全な空港にすべての着陸需要を満たすほどの容量があるかどうかが問題となる。もし容量がすでにいっぱいであった場合、その空港に航空機は新たに着陸できないこととなる。

空港の容量の空き具合を評価するために、本研究では“占有率”という指標を導入する。これは空港ごとに規定されている容量に対して、何機の航空機が利用しているかという込み具合を割合で数値化するものである。

まず初めに、各地点の火山灰の降灰量を示すシナリオ群 D の中から一つのシナリオ D_i を考える。ある地点 (x, y) において、シナリオ D_i における火山灰の堆積量は $D_{i,(x,y)}$ で表される。ある空港 A_j の位置が (x_j, y_j) で表されるとき、シナリオ D_i において火山灰が堆積する厚さは $D_{i,(x_j,y_j)}$ となる。ここで空港の閉鎖を判断する火山灰の堆積量を δ とすると、閉鎖を判断する空港の集合は、式のように表現される。

$$A_{i,affected} = \{A_j \mid D_{i,(x_j,y_j)} \geq \delta\} \quad (1)$$

それぞれの空港の容量は C_j で表現される。本研究では、空港容量の大きさは空港の駐機スポットの数に等しいとみなす。日本の空港容量の総量、影響を受ける容量、安全な空港の容量の総和は式(2)(3)(4)の様に定義される。

$$C_{total} = \sum_j C_j \quad (2)$$

$$C_{i,affected} = \sum_j C_j \text{ s.t. } A_j \in A_{i,affected} \quad (3)$$

$$C_{i,safe} = C_{total} - C_{i,affected} \quad (4)$$

(3) フライトの種類による事業者の対応ルール

巡航中の航空機が実行しているフライトと、駐機中の航空機がスケジュールされているフライトには、国内線と国際線の2種類のフライトがある。航空機の対応ルールも、それぞれが従事しているフライトの種類によって異なると考えられる。本研究では、フライトを以下の4種類に分類する。

表-1 フライトの種類による対応の違い

種類	迂回	国内空港の利用	国外空港の利用
Domestic	○	○	×
International-in	○	○	○
International-out	○	×	○
International-pass	○	×	×

- **国内線 (doms)** 出発空港も到着空港も日本国内にある。
- **入国国際線 (intl-in)** 出発空港は日本国外にあり、到着空港は日本の空港である。
- **出国国際線 (intl-out)** 出発空港は日本国内にあり、到着空港は日本国外にある。
- **通過国際線 (intl-pass)** 出発空港も到着空港も日本国外にあり、日本の空域を通過する。

フライトの種類による、実行しうる対応の違いを表-1に示す。

時刻 t において日本の空域を巡航している航空機の数と、日本の空港に駐機している航空機の数それぞれ $F_{t,all}$ と $L_{t,all}$ と表す。これらの変数は式 (5)(6) を満たす。

$$F_{t,all} = F_{t,doms} + F_{t,intl-in} + F_{t,intl-out} + F_{t,intl-pass} + F_{t,nodata} \quad (5)$$

$$L_{t,all} = L_{t,doms} + L_{t,intl-out} + L_{t,nodata} \quad (6)$$

さらに国内線の機体運用に限れば、 $F_{t,doms}$ と $L_{t,doms}$ は式(7)を満たす。

$$\Delta F_{t,doms} = -\Delta L_{t,doms} \quad (7)$$

これは、国内航空交通で使用される航空機の数がある一定であることを示す。そして夜間に国内線は運航していないので、国内航空交通に使用されている航空機の総数は、夜間駐機中の航空機で、国内線フライトがスケジュールされている航空機の数に等しくなる。このことを、 $L * doms$ を用いて式(8)のように表す。

$$\forall t, F_{t,doms} + L_{t,doms} = L * doms \quad (8)$$

4 種類のフライトの分類によって、民間航空事業者の対応ルールを複数案考えることができる。これらのルールは、どのタイプのフライトに従事する航空機まで考慮に入れるかという問題を示している。

国内線ダイバートのみ この対応ルールでは、航空事

業者はすでに巡航中の国内線フライトに従事している航空機のみ考慮する。巡航中の航空機で、従事しているフライトの目的飛行場が火山灰の影響を受けると判明した場合、他の安全な国内の空港にダイバートする必要がある。駐機中の航空機で火山灰の影響を受けるものの避難は考慮せず、シートで機体を覆うなどの対応を現地で実行する。出国、入国を問わず国際線フライトに従事するフライトで火山灰の影響を受けるものは、直ちに日本国外に移動するものとする。

$$F_t = F_{t,doms} \quad (9)$$

$$L_t = 0 \quad (10)$$

国内線ダイバートと避難 この対応ルールでは、民間航空事業者は巡航中及び駐機中の国内航空交通に用いられる航空機を扱う。A と同様に巡航中で到着空港が火山灰の影響を受けると判明した航空機はダイバートを行う。また駐機中の航空機は、その空港が火山灰の影響を受けると判明した場合に他の安全な空港に避難する。この際どの空港に避難するかという割り当ての問題は本研究では考慮しない。国際線フライトに従事する航空機は、入国、出国を問わず国内から国外へ退避するものとみなす。

$$F_t = F_{t,doms} \quad (11)$$

$$L_t = L_{t,doms} + L_{t,nodata} \quad (12)$$

国内線及び国際線のダイバートと国内線の避難 このルールで民間航空事業者は、巡航中で国内の空港に着陸する国内線と国際線のフライトに従事している航空機と、国内線で利用される駐機中の航空機を扱う。国内線に従事する航空機の扱いはBと同じだが、国内の空港に着陸する予定の国際線フライトで、到着飛行場が火山灰の影響を受けると判明した場合、そのフライトに従事している航空機は他の国内の安全な空港にダイバートする。国際線フライトがダイバートできる空港は限られていると考えられるが、本研究ではダイバートの割り当てまでは考察しない。また出国する国際線フライトに従事する航空機は、出発空港が火山灰の影響を受ける場合は出発時刻を早める等の手段で国外へ退避する。

$$F_t = F_{t,doms} + F_{t,intl-in} \quad (13)$$

$$L_t = L_{t,doms} + L_{t,nodata} \quad (14)$$

すべての航空機のダイバートと避難 このルールでは、民間航空事業者は国内の空港を利用するすべての航空機を対象に緊急対応を行う。巡航中の航空機で、従事するフライトの到着空港が火山灰の影響を受ける場合、それが国内線であっても国際線であっても、国内の安全な空港へダイバートする。さらに国内の空港に駐機しているすべての航空機も、駐機している空港が降灰の影響を受

表-2 航空機の分類

	Safe airport	Affected airport
In-flight	$F_{i,t,n}$	$F_{i,t,div}$
On ground	$L_{i,t,n}$	$L_{i,t,evac}$

表-3 噴火パラメータ

Mean Estimated Eruption Mass ($\times 10^{10}kg$)	1.1
Horizontal Diffusion Coefficient (m^2/s)	150
Vertical Diffusion Coefficient (m^2/s)	1.5
Log-Scale Mean Grain Size(mm)	1.0

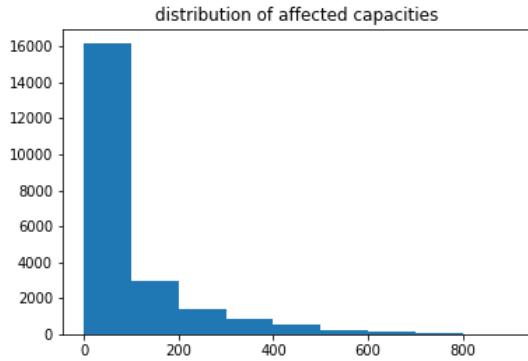


図-2 全シナリオにおける影響を受ける空港容量の分布

けると判明した場合、他の国内の安全な空港に避難する。国際線に従事する航空機に関しては、もし出発空港が影響を受けるとしても、定刻の出発時刻が火山灰が到達する前である可能性があり、これは噴火が発生してから火山灰が空港に到達するまでに残された時間に依存する。

$$F_t = F_{t,doms} + F_{t,intl-in} \quad (15)$$

$$L_t = L_{t,doms} + L_{t,intl-out} + L_{t,nodata} \quad (16)$$

(4) 占有率の導出

本研究では、空港の航空機受け入れ容量は空港のスポット数である。そして、事業者が対応する航空機は、自国 t における航空機の状態と関係する空港の状態で 4 つの状態に分類される。時刻 t における巡航中の航空機の数および駐機中の航空機は F_t, L_t で表されるが、あるシナリオ I において、巡航中の航空機のうち、安全にフライトを実行できる航空機の数 $F_{i,t,n}$ と表し、到着飛行場が火山灰の影響を受けるためにダイバートを実行しなければならない航空機の数

$F_{i,t,div}$ と表す。駐機中の航空機においては、シナリオ I において影響を受けない空港に駐機している航空機数を $L_{i,t,n}$ と表し、駐機している空港が火山灰の影響を受けるために避難しなければならない航空機数を $L_{i,t,evac}$ と表す。これらの航空機の関係を表-2 に示す。

最終的に、シナリオ I の下で、時刻 t に噴火が発生した場合の占有率は、ダイバートのみを考慮した場合の占有率 $\rho_{i,t,div}$ と避難も考慮した占有率 $\rho_{i,t,evac}$ を用いて以下の様に表される。

$$\rho_{i,t,div} = \frac{F_{i,t,n} + L_{i,t,n} + F_{i,t,div}}{C_{i,safe}} \quad (17)$$

$$\rho_{i,t,evac} = \frac{F_{i,t,n} + L_{i,t,n} + F_{i,t,div} + L_{i,t,evac}}{C_{i,safe}} \quad (18a)$$

$$= \frac{F_t + L_t}{C_{i,safe}} \quad (18b)$$

$\rho_{i,t,evac}$ が 1.0 を上回る場合、ダイバート及び避難の需要が安全な空港容量の供給を上回っている。その場合、安全な空港に移動できない航空機が発生するが、その数は $L_{i,t,covered}$ を用いて以下の様に表される。

$$L_{i,t,covered} = F_{i,t,n} + L_{i,t,n} + F_{i,t,div} + L_{i,t,evac} - C_{i,safe} \quad (19)$$

3. モデルの適用

(1) データソース

a) 噴火シナリオ

本研究では、Haris ら (2020) が PUFF モデルを用いて火山灰の拡散を計算したデータセットを用いる¹³⁾。このデータセットは、噴火パラメータを 1914 年の桜島大正大噴火に準えて設定し、風向きデータとして気象庁の JRA-55 再解析データを用いている。設定された噴火パラメータを表-3 に示す。これらの入力データをもとに、噴火発生から 96 時間後の火山灰の地表への降灰量の分布を計算している。このデータセットは 1958 年 4 月 1 日から 2019 年 9 月 30 日までの日本上空の風の再解析データを用いて計算しており、22462 通りのデータが入っている。これらのデータセットを用いて、1 日を 1 シナリオとしてシナリオごとに影響を受ける空港容量の数を求めた。全シナリオにおける影響を受ける空港容量の分布を図-2 に示す。このデータセットの中から、最も影響を受

表-4 鹿児島空港の火山灰降灰量に対する対応

Amount (mm)	visibility	event	response
0.1~0.2	Visible accumulated ash	Staff can see the ash soars	Confirm operation status
0.2~0.4	Difficult to recognize the marking	Brake doesn't work well	Sprinkle water Start coordination
0.4~2	Not able to recognize the marking	Brake doesn't work Risk of engine failure	Sprinkle water Consider removing ash
2~5	Full visibility is gray	Hard to land and takeoff Risk of engine failure	Remove ash Difficult to land and take-off
5~	Full visibility is gray	Landing aircraft is affected	Remove ash Protect on-ground facilities
More than 10~	Not able to recognize even contour	Severe impact on not only airline	Call for SDF

ける空港容量が大きかった 10 個のシナリオを抽出し、本研究における火山灰拡散シナリオとした。

b) 空港容量

本研究では、空港容量は空港のスポット数のことであるとみなしている。しかしながらスポット数を数える手法は一定ではなく、また航空機の大きさにもよることは留意しなければならない。

空港のスポット数を提供しているデータソースは AIS Japan が提供するデータ¹⁴⁾と OOH Airport Media¹⁵⁾が提供するデータの 2 種類があり、スポット数を数える手法は 3 つ存在する。AIS Japan は国土交通省が航空輸送に関する情報を発信するウェブサービスであり、OOH Airport Media は空港広告を展開する私企業の情報サービスである。これらのデータソースを用いてスポット数を数える手法は以下の通りである。

Method 1 AIS Japan から得られる INS Checkpoint を数える

Method 2 AIS Japan から得られる AD Chart からスポット数を読み取る。

Method 3 OOH Airport Media のウェブサイトから情報を

得る。

3 つ列挙した手法のうち、いずれも一つの手法ですべての空港のスポット数を正確に入手することはできず、本研究では 3 つの手法を組み合わせることでスポット数を計算した。計算の結果、日本の空港には総数で 1,300 か所以上のスポットがあることが明らかになった。一般に国内の空港を利用している航空機の総数は 700~800 機程度であるから、噴火による空港への影響がなければ、普通の運用には問題がないことが分かる。一方でこの計算は民間空港及び軍用空港を区別せず計算している。さらに各スポットの大きさを考慮していないので、ジェット機などの大型の航空機が着陸できるスポット数はより少ないと考えられる。

c) 航空機の運航状態のスナップショット

本研究は、ある時刻における航空機の運航状態のデータが必要である。このデータは、ある時刻において巡航中の航空機の分布と、日本の空港に駐機中の航空機の分布のデータが必要である。

国土交通省航空局は、日本の空域を利用した航空機の航跡データを収集しており、“CARATS open data” という形式で提供している¹⁶⁾。“CARATS”とは、“Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems”の略称である¹⁶⁾。このデータセットは日本の管制空域を通過した航空機の航跡データを提供するが、航空機の登録番号などの機体に関連する情報が省かれている。本研究は航空機の扱いに焦点を当てた研究であるため、CARATS open data を用いる場合は、提供される航跡データと航空機の情報を、他の手段を用いて紐づける必要がある。

一方で、航空機の運航状態を提供する他のサービスとして、“flightradar24 Flight Tracker”というウェブサービスがある¹⁷⁾。これは航空機が発出する ADS-B 信号を受信し、リアルタイムにマッピングするサービスであり、指定した空域や空港に存在する航空機の情報や、航空機が従事しているフライトの情報を十分に入手することができる¹⁷⁾。一方で航空機が信号を発していない場合は航空機を監視することができず、また信号を発出している場合でも、フライトや機体番号が分からないなどの不完全な機体も存在する。

本研究では、航空機の運航状態を入手するデータソースとして“flightradar24 Flight Tracker”が提供するデータを使用する。一部データの不完全な航空機もあるが、全体で 1,000 機近い航空機が存在する中で、データの不完全な航空機は数十機ほどであり、分析への影響は小さい。

(2) パラメーター設定

a) 航空輸送オペレーション

空港管理者は、火山灰の降灰による空港の閉鎖を判断

表-5 閾値 0.2mm 対応における各シナリオの占有率の最大値

D_i	t^*	$F_{i,t^*,n}$	$L_{i,t^*,n}$	$F_{i,t^*,div}$	$L_{i,t^*,evac}$	$C_{i, safe}$	$\rho_{i,t^*,n}$	$\rho_{i,t^*,div}$	$\rho_{i,t^*,evac}$
1959-09-16	20	27	126	73	439	534	0.29	0.42	1.24
1965-07-16	20	13	109	87	456	501	0.24	0.42	1.32
1972-06-16	20	13	105	87	460	510	0.23	0.40	1.30
1973-04-23	20	16	125	84	440	502	0.28	0.45	1.32
1976-01-02	20	19	145	81	420	546	0.30	0.45	1.22
1977-09-21	20	13	112	87	453	531	0.23	0.40	1.25
1980-11-27	20	15	113	85	452	537	0.24	0.40	1.24
1990-05-17	20	14	117	86	448	538	0.24	0.40	1.24
1990-05-31	20	15	152	85	413	544	0.30	0.46	1.22
2008-12-07	20	15	117	85	448	537	0.25	0.41	1.26

表-6 閾値による占有率の違い

D_i	$\rho_{i,t^*,evac}$ ($\delta = 0.2 \text{ mm}$)	$\rho_{i,t^*,evac}$ ($\delta = 2 \text{ mm}$)
1959-09-16	1.24	0.52
1965-07-16	1.32	0.51
1972-06-16	1.30	0.51
1973-04-23	1.32	0.51
1976-01-02	1.22	0.51
1977-09-21	1.25	0.52
1980-11-27	1.24	0.51
1990-05-17	1.24	0.52
1990-05-31	1.22	0.51
2008-12-07	1.26	0.51

しなくてはならない。そこで空港管理者は空港施設や滑走路への火山灰堆積量の閾値を定め、その閾値によって空港の閉鎖を判断することとなる。火山灰の堆積量に関する国際的な基準は存在しないが、桜島の噴火による降灰の影響をよく受ける鹿児島空港では、火山灰の堆積量に関する独自の基準を作り、対応に当たっている。鹿児島空港の火山灰対応の目安を表-4 に示す¹⁸⁾。

この対応基準をもととして、本研究では火山灰による空港閉鎖の閾値を 0.2mm と 2mm の二つのパターンに設定した。本研究では 0.2mm の閾値で対応するケースを悲観的なケース、2mm の閾値で対応するケースを楽観的なケースと設定した。

フライトにもとづく航空機の対応ルールは、国内線ダイバートのみのルールと国内線ダイバートと避難ルールを採用した。国内線ダイバートのみのルールは、これらのルールの中で最も航空輸送への負担が少ない対応であり、もしこのルールで対応に失敗するケースが見つかった場合、その影響は実際にはさらに大きくなることが示唆される。国内線ダイバートおよび避難を実装するルールは、4つのルールのなかで最も現実的であり、ステークホルダー間の調整も比較的容易である。国際線に従事

するフライトに対応するルールでは、海外の空港との調整を行う必要が生じるほか、フライトの事業者の拠点が海外にあることも考えられ、考慮する要因が複雑になるため今回は採用しない。

b) 航空機の運航状態のスナップショット

巡行中および駐機中の航空機の状態は、“flightradar24 Flight Tracker” から提供されている。本研究では日本上空の航空機の運航状態を取得した。時間帯によって運航状態は異なるため、2020年7月4日の0時0分から同日の23時50分にかけて、10分おきに航空機の運航状態を取得した。よって144通りの航空機の運航状態のスナップショットが用意された。

本研究で求める占有率は、火山灰拡散シナリオと航空機の運航状態と航空オペレーションの対応ルールによって求められる。今回10通りの火山灰拡散シナリオと、144通りのスナップショットと、2通りの対応ルールを用いて分析するため、合計2880通りの占有率が計算される。しかしスナップショットの記録には誤差があり、スナップショット同士の比較で状態にむらがある。本研究では、それぞれの占有率をスナップショットを記録した時刻で整理し、6ケースごとに平均した。一つのシナリオと一つの対応ルールごとに144ケースのスナップショットに基づいて144通りの占有率が計算されるが、これを6ケースごとに平均化して24ケースに圧縮した。結果として、480通りの占有率を計算することとなった。

(3) 結果

a) 火山灰拡散シナリオによる比較

計算された占有率のうち、閾値を 0.2mm とした悲観的対応で、それぞれのシナリオにおいて最も高い占有率となったスナップショットの記録を表-5 に示す。選択された10の深刻シナリオの中では、最も高い占有率となったのは1973年4月23日の風向きシナリオと20時台のス

ナップショットの平均による 1.32 となった。次いで高い占有率を示したシナリオは、1965 年 7 月 16 日の風向きシナリオだった。いずれの 10 の深刻シナリオにおいても、空港閉鎖の閾値が 0.2mm のケースでは占有率が 1.0 を上回った。これは、ダイバートと避難を合わせた安全な空港への着陸需要が、残された安全な空港の容量を上回っているということである。

b) 空港閉鎖判断の閾値による比較

本研究では二つの空港閉鎖判断の閾値を設けて占有率を計算した。悲観的な対応として 0.2mm を設定し、楽観的な対応として 2mm を設定した。それぞれの対応で占有率を計算した結果を表-6 に示す。悲観的な対応をした際は、10 の深刻シナリオの全てにおいて占有率が 1.0 を上回ったが、楽観的な対応ではすべてのシナリオで占有率が 1.0 に届かなかった。また、悲観的な対応では占有率が 1.24 から 1.32 までの値を取ったのに対して、楽観的な対応では 0.51 から 0.52 までの値にとどまった。

4. 考察と今後の課題

(1) 考察

10 の深刻シナリオでは、悲観的な対応で航空機のダイバートと避難をした際の占有率が 1 を上回った。それぞれのシナリオで、火山灰の分布とそれによって閉鎖される空港の分布は異なったが、いずれも共通して羽田空港と成田空港が火山灰の影響を受けている。これらの空港はハブ空港であり、一般の空港が数か所から十数か所のスポットしか持たないのに対して、100 から 200 のスポットを持ち、スポット数がほかの空港と比べて極めて多い。よって空港容量の分析では、これらのハブ空港への影響が重要な役割を持つことが考えられる。

占有率が 1.0 を上回っている場合、航空事業者は一定数の航空機が安全な空港に移動できないという判断を下すことを求められる。この際、航空事業者は安全な空港に移動させる航空機と移動させない航空機の優先順位をつけることが求められる。そして、空港の職員と協力して、安全な空港に移動できない航空機に対してシートで覆うなどの火山灰対策を行う必要がある。

本研究では空港容量は空港のスポット数であるとみなし、また火山灰の影響を受けない航空機は特別な対応を取らないこととしているが、空港容量を増やすためにはこの前提を吟味する必要がある。以下にいくつかの空港容量を増加させる手法を提案する。

海外の機体を移動させる 安全な空港に駐機している航空機のうち、国際線フライトにスケジュールされている航空機を国外に移動させる。これはその航空機及びスケジュールされているフライトそのものに火山灰の影響

はないにも関わらず、フライトをキャンセルさせる可能性があることを含んでいる。この方策は、燃料の問題並びに利用者への説明などの問題が発生する。

スポットエリア外の領域に駐機する 航空機を空港に駐機させる際、スポットエリアにこだわらず、エプロンエリアや誘導路にまで航空機を駐機させる。これにより、安全な空港にそのスポット数以上の航空機を駐機させられるようになる。その一方で、スポットエリア外に駐機すると、空港本来の離着陸のオペレーションに支障が出たり、燃料の補給や点検などにも困難が生じる。誘導路や滑走路に駐機させる場合その滑走路を用いたオペレーションそのものができなくなるので、実行するときには空港管理者は慎重にオペレーションの制限と回復プランを考えなければならない。

軍用の空港を利用する 民間航空用の空港の他にも、我が国には航空自衛隊や米軍が空港を設置、運用しており、緊急時にはこれらの空港を使用できる可能性がある。一方で軍用の空港の地上施設は民間の空港と比べて十分ではなく、航空事業者の代理店が空港内に存在しないなどのデメリットがあるので、可能であれば軍用空港は利用しないことが望ましい。

(2) 今後の課題

本研究では影響を受ける航空機の数求めたが、ダイバート及び避難を行う航空機が、どの空港に割り当てられるかという分析までは行っていない。これは個々の空港の空港容量の問題であるほかに、航空機の燃料による航続距離などの制約も考えて航空機の移動先を決定しなければならない。現状の航空オペレーションにおいて、ダイバート及び避難が一斉に起こるといった状況は想定されておらず、今後解決すべき課題となっている。

本研究で求めた影響を受ける航空機数は、降灰の影響を受ける空港を基準としている。しかし、これは大気中への火山灰の拡散による航空路への影響を考慮できていない。そのため、航空路への火山灰の汚染によるフライトの迂回や、空港自体に影響はないとしても航空路が火山灰によって影響を受けたためフライトを取りやめるというような事例を扱っていない。

この事例を扱うためには、本研究で用いている火山灰拡散シナリオでは不十分である。本研究の拡散シナリオは、噴火発生から一定時間後の地表の火山灰の降灰量しか示しておらず、空中の火山灰の密度に関する情報は入手できない。さらに火山灰の空中分布に関しては、火山灰の存在高度が低い場合には航空機は火山灰雲の上を飛ぶことが可能になる場合があるので、高度による火山灰の分布の違いに関する情報もオペレーションのためには必要である。

また本研究では、すべての空港が 24 時間にわたって

営業していると仮定して分析を行っているが、実際にはすべての空港が夜間も営業を続けているとは限らない。噴火が夜間に発生した場合には、営業時間外の空港に駐機している航空機が何の対策も取ることができず、降灰を受けて甚大な影響が発生する可能性がある。また夜間のダイバート及び避難に関しても、時間帯によって利用できる空港が変化する可能性がある。この問題を考えるためには、火山灰の拡散の時間発展を考慮する必要がある。現在の火山灰拡散シナリオでは限界がある。

さらに、本研究では火山灰の拡散予報が噴火発生の直後に発出されると仮定しており、さらにダイバート及び避難の実行にかかる時間を考慮していない。実際のところ、噴火発生から火山灰の拡散予報の発出には一定の時間がかかると考えられ、そこからまた事業者が対応を開始し、完了するまでにはまた数時間ほどの時間がかかると考えられる。最悪のケースとして、予報の発出前に火山灰の降灰が始まったり、対応が火山灰の到達前に完了しないというような事態が考えられる。このことを考慮するには、火山灰の拡散の時間発展に関する情報が必要であり、これも現在使用している火山灰拡散モデルでは不可能である。

今後、本研究はこれらの課題を解消していくことを方針とする。そのためには、より多くの情報を持つ火山灰拡散シナリオが必要になる。

参考文献

- 1) Casadevall, T. J. : Volcanic Ash and Aviation Safety. *U.S. Geological Survey Bulletin*, vol. 2047, 1994
- 2) Witham, C., Webster, H., Hort, M., Jones, A. and Thomson, D. : Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions, *Atmospheric Environment*, vol. 48, pp. 219-229, 2012
- 3) Casadevall, T. J. : The 1989–1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 62, no. 1-4, pp. 301-316, 1994
- 4) Guffanti, M., Mayberry, G. C., Casadevall, T. J. and Wunderman, R. : Volcanic hazards to airports, *Natural Hazards*, vol. 51, no. 2, pp. 287-302, 2009
- 5) Casadevall, T. J., Reyes, P. D. and Schneider, D. J. : The 1991 Pinatubo eruptions and their effects on aircraft operations, *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, pp. 625-636, 1996
- 6) ICAO, Flight Safety and Volcanic Ash, ICAO Doc 9974, 2012
- 7) Yasuda, N., Kajitani, Y., Tatano, H. and Onodera, S., The Economic Influence on the Civil Aviation by the Large-scale Eruption in Iceland, *Disaster Prevention Research Institute Annuals. A*, vol. 54, A, pp. 59-65, 2011
- 8) Kim, S., Lee, J., Oh, S. and Yoon, Y. : Assessment of the volcanic hazard of Mt. Paektu explosion to international air traffic using South Korean airspace, *Natural Hazards*, vol. 96, no. 2, pp. 647-667, 2019
- 9) Volentik, A. C. M. and Houghton, B. F., : Tephra fallout hazards at Quito International Airport (Ecuador), *Bulletin of Volcanology*, vol. 77, no. 6, p. 50, 2015
- 10) Scaini, C., Folch, A., Bolic, T. and Castelli, L. : A GIS-based tool to support air traffic management during explosive volcanic eruptions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 49, pp. 19-31, 2014
- 11) 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, p. 101684, 2019
- 12) 大森房吉 : 第九章 噴灰砂ノ降下、鳴響區域(日本噴火志下編), 震災豫防調査會報告, vol. 87, pp. 67-73, 1918.
- 13) Rahadiano, H. and Tatano, H. : 62 Years Simulated Sakurajima Taisho Eruption Ashfall Deposit Data (1958-2019). *DesignSafe-CI*, 2020.
- 14) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism : AIS JAPAN - Japan Aeronautical Information Service Center. <https://aisjapan.mlit.go.jp/> (accessed 2020/4/6, 2020)
- 15) Tokyu Agency Inc : 全国空港概要 | OOH AIRPORT MEDIA. http://airport.tokyu-agc.co.jp/airport_1.html (accessed 2020/6/25).
- 16) 岡恵 : CARATS オープンデータの概要説明. <https://www.mlit.go.jp/common/001231892.pdf>
- 17) Flightradar24 AB : Flightradar24: Live Flight Tracker - Real-Time Flight Tracker Map, <https://www.flightradar24.com/> (accessed 2020/7/6)
- 18) 鹿児島空港事務所 : 鹿児島空港降灰対策実施要領.2018

Capacity of Airports for Aircrafts Evacuation under Large Volcanic Eruption

Koreharu KURAHARA, Masamitsu ONISHI and Haris RAHADIANTO

Volcanic ash is very harmful to aircraft equipment and airport facilities. When volcanic ash disperses widely, air transportation is severely affected such as the Iceland E2010 eruption. In Japan, there is a high risk of large eruption of Mt. Sakurajima, and impact estimation of Mt. Sakurajima eruption on air transportation is necessary. There are many aspects and factors in countermeasures of air traffic to volcanic ash hazards. This study simulates an apron capacity when an eruption happens and several airports are found to be affected by volcanic ash deposition. The purpose of this estimation is to assess whether the safe capacity is enough to conduct countermeasures for volcanic hazards: aircraft diversion and evacuation. This is the first step in assessing the air traffic operation capacity. This estimation can be more precise than counting affected flight because this study deal with individual aircraft from aircraft tracking record. For this simulation air traffic operation framework for diagnosing danger airport and selecting aircraft which needs diversion and evacuation is developed. This framework consists of ash disperse simulation scenario, aircraft distribution real-time snapshot, and air airline decision-making rule. And for assessing the apron capacity quantitatively the value named "occupancy rate" is introduced. As a result, it indicates that the impact on total airport capacity depends on some hub airports. If they are affected the capacity of the safe airport gets such severe as they cannot receive all of the affected aircraft. Moreover, it is found that the apron capacity is enough to receive all diversion aircraft although the demand for diversion is higher in daytime eruption than a nighttime eruption. Based on this study, considering nighttime aviation operation when eruption happens at night or allocation problem of affected aircraft would be possible.