

大規模噴火による航空交通網制御の危機対応に関する基礎的考察 —桜島大噴火を事例として—

Preliminary Study on the Emergency Response of Air Traffic Network Control under Large-Scale Eruption - Case of Mt. Sakurajima -

大西正光⁽¹⁾・藏原これほる⁽²⁾

Masamitsu ONISHI⁽¹⁾ and Koreharu KURAHARA⁽²⁾

(1) 京都大学防災研究所巨大災害研究センター

(2) 京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻

(1) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

(2) Graduate School of Informatics, Kyoto University, Japan

Synopsis

This manuscript discusses a methodology to estimate the impact of large-scale volcanic eruption on the necessity of emergency response of in-flight airplanes. We will discuss the effect of eruption prediction information issued before the eruption. The proposed methodology is applied to an expected case scenario of Mt. Sakurajima eruption to recognize the rough scale of necessity for diverting in-flight airplanes as emergency response actions in the domestic airline network.

キーワード: 大規模噴火, 航空交通, 危機管理, 噴火予知情報

Keywords: large-scale eruption, air traffic, emergency management, eruption prediction information

1. はじめに

2010年, アイスランド・エイヤフィラトラヨークトル火山が噴火した際, 航空機は火山灰が浮遊する空中を飛行することができない(下鶴ら, 1995)という技術的問題により, 世界的に深刻な航空交通網の麻痺が生じた(安田ら, 2011). わが国でも, 100年強の周期でVEI(火山爆発指数)4の大規模噴火を起こす桜島では, 1914年の大正噴火からすでに100年以上が経過しており, 近代的な航空交通網が発達して以降に経験したことがない未曾有の航空交通網の麻痺が生じると予想される. さらに, 桜島上空は, A1と呼ばれるアジアの主要幹線航空路が通っており, 桜島の大規模噴火が発生すれば, 航空網の麻痺は世界に波及する可能性も懸念される. しかし, こうし

たリスクの社会的認知は薄く, 対策も全く検討されてこなかった. 対策を講じないまま噴火が生じれば, 場当たりの航空交通制御により大混乱が生じ, 最悪の場合, 航空機事故も生じかねない.

Fig. 1は, 2019年2月4日14:51時点における日本上空に存在する航空機の位置と1914年に発生した桜島の大正噴火で降灰が観測された領域を重ね合わせたものである. 日本の管制領域に含まれる航空機が609機あり, うち211機が大正噴火の際に降灰が観測された領域に含まれる. 無論, 211機に影響を受ける航空機の数と考えるのは乱暴であるが, 噴火が起これば, 非常時のオペレーション対応が必要となる航空機の数, 数百機オーダーになることが推測できる.

本稿では, 大規模噴火時に航空機が緊急対応行動を必要とする事象の規模感を把握するための基礎的



Fig. 1 Location of airplanes flying over the territory of Japan at and the area where ash fall of was observed at the large-scale eruption of Mt. Sakurajima in the 1914 (see Ohmori, 1918)
Note: The location of airplanes was retrieved by Flightradar24 (www.flightradar24.com)

考察を行うために、ダイバートが必要となる航空機の数とダイバートによって生じる飛行時間損失を簡易的に推定するモデルを定式化する。さらに、提案したモデルに基づいて、桜島の大噴火が生じた際に、1) 緊急ダイバートを行う必要がある国内路線で航空機の数と、2) 噴火予知情報が利用可能なことによって、緊急ダイバートが必要な航空機数をどれだけ軽減できるかを推定する。なお、本稿が対象とする大規模噴火とは、VEI（火山爆発指数）が4の噴火であり、風向き次第で、火山灰が日本の管制領域の任意の場所に到達する程度の噴火規模を考える。

以下、2. では、大規模噴火時及び噴火予知情報が発出された時の航空機の緊急時対応に関する意思決定をモデル化する。3. では、2. で定式化したような意思決定にしたがって、航空機の緊急対応が行われる場合に航空網全体で、どれほどの規模の緊急対応が必要となるかを評価するモデルを定式化する。4. では、桜島で大規模噴火が発生した場合を適用事例として、ダイバートが必要となる航空機の数と噴火予知情報発令による影響の軽減効果を推計する。さらに、推計結果の考察と留保事項を示し、今後の課題を考察する。5. では、本研究の結論を示す。

2. 大規模噴火時の航空機対応モデル

2.1 モデルの前提条件

噴火情報ないし噴火予知情報発令の時点で、1) 出発前の航空機が出発するか欠航するか、2) 航行中の航空機が目的地空港にそのまま向かうか代替空港に向かう（ダイバートを行う）かを決定するモデルを

定式化し、どのような条件に基づいて、欠航やダイバートの判断が下されるかを明らかにする。モデル化にあたり、以下の前提条件を設定する。

- 1) 火山が噴火した事実は、瞬時にすべての関係者に情報が共有される。
- 2) 火山灰が拡散する領域は、事前に共有されたハザードマップのような情報に基づいて行われる。ハザードマップ情報では、事前に風向きが分からないため、さまざまなシナリオの重ね合わせたものとなっており、火口を中心とした円状の領域となっている。また、火山灰の拡散速度は一定と考える。すなわち、意思決定者は、火口を中心とした円状の領域が時間とともに拡大するような拡散領域を想定する。
- 3) 噴火予知情報は、噴火時刻より τ だけ早い時刻に発令される。噴火予知は完全に予見可能である。
- 4) 航空機は出発地空港のある地点から目的地空港のある地点まで定速で移動する。
- 5) 航空機の手数は、火山灰の拡散速度よりも速い。
- 6) 日本列島のように細長い地形が対象地域の場合の近似として、火山は航空機の航路の直下であり、代替的な航路が存在しないと考える。
- 7) 航空機が目的地空港に着陸できない場合は、出発地空港に瞬時に引き返す。
- 8) 航路上及び空港での混雑を考慮しない。
- 9) 対象とするすべてのODにおいて、24時間一定の頻度で運航されている。
- 10) 到着地空港で、航空機に火山灰が降り積もるリスクは考慮に入れない。

以上の前提条件は、非現実的であることは言うまでもない。しかし、本稿は、特定の噴火シナリオによらない、あくまでも「簡易的推定」として、影響の規模感の把握を目的とすれば、非現実的な前提条件でも、一定の実務的意義を有すると考えている。

2.2 離陸前の航空機への対応

(1) 航路上に火山がない場合

(a) 噴火予知情報が利用できない場合

まず、目的地空港が火山より手前にあり、航路上に火山がない場合を考える。さらに、噴火予知情報が利用できず、噴火が観測された時点において、離陸する前の段階である航空機への対応を考える。

空港 i から空港 j に向けて離陸する予定の航空機 n は、目的地空港に火山灰が到達する前の時間帯に到着可能であれば、出発が許可されると考える。航空機 n は、次の条件を満たすとき、火山灰が空港 j に到達する前に到着できる。

$$T_0 + l_j > D^n + s_{ij}^n \quad (1)$$

ここに、

T_0 : 噴火時刻

l_j : 空港 j に火山灰が到達する前の余裕時間

D^n : 航空機 n の出発時間

s_{ij}^n : 航空機 n が空港 i から空港 j に向かう所要時間

であり、式(1)の左辺は、火山灰が空港 j に到達する時刻を、右辺は航空機 n が空港 j に到着する時刻を表す。したがって、空港 i では、時刻 $T_0 + l_j - s_{ij}^n$ までの空港 j に向かう出発便が出発を認められる。また、噴火時刻 T_0 において、 $l_j - s_{ij}^n < 0$ である航空機 n は欠航となる。さもないければ、噴火後 $l_j - s_{ij}^n (\geq 0)$ までの出発が認められる。

(b) 噴火予知情報が利用できる場合

次に、噴火予知情報が利用可能であり、噴火が始まる時刻より τ だけ前の時刻に、離陸する前の段階における航空機の対応を考える。噴火予知情報が利用できる場合には、火山灰が到達する前の余裕時間が l_j から $l_j + \tau$ に増加する。したがって、航空機 n は、噴火予知情報の発出時刻 T_w において、次の条件を満たせば、火山灰が空港 j に到達する前に到着できる。

$$T_w + l_j + \tau > D^n + s_{ij}^n \quad (2)$$

すなわち、噴火時刻 T_w において、 $l_j + \tau - s_{ij}^n < 0$ である航空機 n は欠航となる。さもないければ、噴火後 $l_j + \tau - s_{ij}^n (\geq 0)$ までの時間は出発が認められる。

(2) 航路上に火山がある場合

(a) 噴火予知情報が利用できない場合

航路上に火山がある場合、目的地空港に到着するためには、必ず火山がある地点の上空を通過する必要がある。噴火予知情報を利用できない場合、航路上に火山がある離陸する前の段階のすべての航空機は噴火が発生した時点で欠航となる。

(b) 噴火予知情報が利用できる場合

噴火予知情報が利用可能な場合には、火山が噴火する前に火山上空を通過すれば、火山灰の影響を受けずに目的地空港に到着可能である。航空機 n は、噴火予知情報の発出時刻 T_w において、次の条件を満たせば、目的地空港 j に到達する前に到着できる。

$$T_w + \tau > D^n + \phi_i^n \quad (3)$$

ただし、 ϕ_i^n は空港 i から火山上空まで到達するのに要する時間である。すなわち、噴火予知情報が発出された時点で、 $\phi_i^n < \tau$ となる航空機は出発が認められ、さもないければ欠航となる。

2.3 航行中の航空機の対応

(1) 航路上に火山がない場合

(a) 噴火予知情報が利用できない場合

2.2では、離陸前の航空機が火山噴火時あるいは噴

火予知情報が発出された時の緊急対応行動を定義した。本節では、航空機が、目的地空港に向けてすでに離陸しており、航行中に火山噴火が発生した場合、あるいは噴火予知情報が発出された場合の緊急対応行動を定義する。

まず、目的地空港が火山より手前にあり、航路上に火山がない場合を考える。さらに、噴火予知情報が利用できず、噴火が観測された時点における航行中の航空機の対応を行う場合を考える。噴火時に空港 j に向けて航行中の航空機 n は、次の条件を満たすとき、火山灰が空港 j に到達する前に到着できる。

$$T_0 + l_j > T_0 + q_{ij}^n \quad (4)$$

ここに、

q_{ij}^n : 航空機 n が空港 j に到着するに要する時間

であり、式(4)の左辺は、火山灰が空港 j に到達する時刻を、右辺は航空機 n が空港 j に到着する時刻を表す。したがって、噴火時刻 T_0 において、 $l_j - q_{ij}^n < 0$ である航空機 n は欠航となる。さもないければ、噴火後 $l_j - q_{ij}^n (\geq 0)$ までの出発が認められる。

(b) 噴火予知情報が利用できる場合

噴火予知情報が利用できれば、噴火が始まる時刻より τ だけ前の時刻に、緊張対応行動に関する意思決定を行える。航空機 n は、噴火予知情報の発出時刻 T_w において、次の条件を満たせば、火山灰が空港 j に到達する前に到着できる。

$$T_w + l_j + \tau > T_w + q_{ij}^n \quad (5)$$

すなわち、噴火時刻 T_w において、 $l_j + \tau - q_{ij}^n < 0$ である航空機 n は欠航となる。さもないければ、噴火後 $l_j + \tau - q_{ij}^n (\geq 0)$ の時間は出発が認められる。

(2) 航路上に火山がある場合

(a) 噴火予知情報が利用できない場合

航路上に火山がある場合、噴火した時点で、火山上空を通過した後であれば、そのまま目的地空港に到着できる。一方、火山上空を通過する前であれば、即座に出発地空港に引き返す。

(b) 噴火予知情報が利用できる場合

噴火予知情報が利用可能な場合を考える。空港 i から空港 j に向けて航行中の航空機 n は、噴火予知情報の発出時刻 T_w において、次の条件を満たせば、目的地空港 j に到達する前に到着できる。

$$T_w + \tau > T_w + \psi_i^n \quad (6)$$

ただし、 ψ_i^n は噴火予知情報の発出時刻 T_w において、火山上空まで到達するのに要する時間である。すなわち、噴火予知情報が発出された時点で、 $\psi_i^n < \tau$ となる航空機は目的地空港へそのまま航行し、さもないければ出発地空港へ即座に引き返す。

3. 緊急対応規模の評価方法

3.1 ダイバートが必要な航空機の数

対象とする航空網において、空港*i*と空港*j*を結ぶODの交通密度(単位時間あたりの便数)を f_{ij} と表す。噴火予知情報が利用できず、噴火発生タイミングで緊急対応行動を実施した場合に、航空網全体でダイバートが必要となる航空機の数 $L_{\#}^{wo}$ は

$$L_{\#}^{wo} = \sum_{i,j} f_{ij} \max[s_{ij} - l_j, 0] \quad (7)$$

と表される。一方、噴火予知情報が利用可能なとき、ダイバートが必要となる航空機の数 $L_{\#}^w$ は

$$L_{\#}^w = \sum_{i,j} f_{ij} \max[s_{ij} - l_j + \tau, 0] \quad (8)$$

と表される。

噴火予知情報のおかげで、削減できるダイバートに必要な航空機数は、次の通りである。

$$B_{\#} = L_{\#}^{wo} - L_{\#}^w \quad (9)$$

3.2 ダイバートによる飛行時間損失

ダイバートが生じれば、結果として必要とされた交通サービスを提供できず、無駄に飛行する時間を生み出すこととなる。噴火予知情報を利用できず、噴火時点で緊急対応行動を実施する場合、ダイバートによって生じる飛行時間損失 L_d^{wo} は、

$$L_d^{wo} = \sum_{i,j} \int_0^{s_{ij}-l_j} f_{ij}(2q) dq \quad (10)$$

for all i, j where $s_{ij} - l_j \geq 0$ satisfies

と表される。一方、噴火予知情報が利用できるとき、航空網全体でダイバートによって生じる飛行時間損失 L_d^w は、

$$L_d^w = \sum_{i,j} \int_0^{s_{ij}-(l_j+\tau)} f_{ij}(2q) dq \quad (11)$$

for all i, j where $s_{ij} - (l_j + \tau) \geq 0$ satisfies

と表される。

噴火予知情報のおかげで、削減できるダイバートによって生じる飛行時間損失は、次の通りである。

$$B_d = L_d^{wo} - L_d^w \quad (12)$$

4. 桜島大規模噴火を対象とした影響評価

以上で定式化した大規模噴火時の航空機緊急対応行動に及ぼす影響評価モデルを、桜島の大規模噴火を対象として適用し、航空輸送統計がカバーする国内96空港を結ぶすべての国内定期路線518路線に及ぼす影響の評価を行う。

Table. 1 The number of diverted airplanes and the total wasted flight time caused by diversion

	噴火予知 情報なし	噴火予知 情報あり
影響路線数	144	0
期待ダイバート便数	34.2	0
期待飛行時間損失 (時間)	38.6	0

4.1 パラメーターの設定

(1) 火山灰到達までの余裕時間 (l_j)

噴出した火山灰は、時速200km/hで我が国全ての飛行場に到達し、火山灰が到達した飛行場は閉鎖されることとした。したがって、噴火発生後、空港*j*に火山灰が到達するまでの余裕時間 l_j は、

$$\frac{\text{桜島と空港}j\text{の距離 (km)}}{\text{火山灰の移動速度 (200km/h)}}$$

として定義する。

(2) 空港間の飛行時間 (s_{ij})

空港*i*と空港*j*の間の飛行時間 s_{ij} は、

$$\frac{\text{空港}i\text{と空港}j\text{の間の1年間の総飛行時間}}{\text{空港}i\text{と空港}j\text{の1年間の総飛行便数}}$$

と定義した。総飛行時間と総飛行便数は、平成29年度航空輸送統計を用いた。

(3) 交通密度 (f_{ij})

空港*i*と空港*j*を結ぶODの交通密度 f_{ij} は、

$$\frac{\text{空港}i\text{と空港}j\text{の1年間の総飛行便数}}{365(\text{days}) \times 24(\text{hours})}$$

として定義した。平成29年度航空輸送統計を用いた。

(4) 噴火予知情報の発出タイミング (τ)

現在、確実な噴火予知技術が確立されたという段階まで来ているとまでは言えないが、予知技術が目指す射程として、半日から数時間というオーダーが一つの目安となる。本稿では、噴火予知情報が噴火の3時間前に発出される場合を考える。

4.2 影響評価結果

以上の前提条件の下で計算した桜島大噴火により、航空機のダイバートが必要となる路線数の数と、ダイバートによって生じる飛行時間損失の結果をTable. 1に示す。ダイバートが必要となる路線数は、噴火予知情報がなく、噴火が生じた後に緊急対応行動を実施する場合には、全518路線のうち、約28%に相当する144路線でダイバートが必要となる。一方、

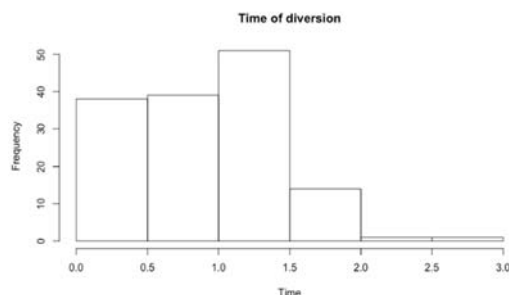


Fig. 2 The distribution of time of diversion

ダイバートが必要となる期待便数は約34.2便、またダイバートに伴う期待時間損失は、約38.6時間となった。一方、噴火の3時間前に発出される噴火予知情報が利用可能な場合には、国内路線に限って言えば、すべての航空便において、噴火予知情報が発出された時点で離陸前に欠航とすることにより航行中の緊急対応行動であるダイバートを完全に回避できる。

ダイバートが必要な144路線のうち、94路線が鹿児島以北と鹿児島以南を結ぶ路線であり、鹿児島以南の島嶼部路線のすべてが影響を受ける可能性があることが分かった。Fig. 2は、噴火予知情報が利用できない場合において、ダイバート必要路線のダイバート時間の分布を示す。この中でダイバートに必要な時間が最も大きくなる路線は、新千歳―那覇便の2.67時間であった。ダイバートに2時間以上を要する航空路線は2路線のみであり、2時間前の噴火予知情報があればダイバート発生の予防に有効である可能性を示唆している。なお、本稿はあくまでもダイバートが必要な航空機が影響評価の対象であるが、実際には、他にも離陸前の欠航により多くの航空機が影響を受けることは念のため注意されたい。

4.3 留保事項

本稿では、大規模噴火時の航空機緊急対応行動に関する規模感を得るために、特定の噴火シナリオによらない、あくまでも「簡易的推定」を行うことを目的とした方法論を提示した。本分析結果を見る限り、大規模噴火に直面した際の影響も限定的であるようにも解釈できる。しかしながら、2.1に示したように、多くの一見非現実的な前提条件の下での推定結果であり、実際、実務的には考慮すべき重要な点が考慮されていない点について注意すべきである。以下、今後検討が必要な留保事項について整理しておこう。

第一に、本稿では緊急対応行動として航行中のダイバートに注目した。このとき、降灰が予想される空港への着陸も可能であるという状況を想定した。しかし、空港において航空機に降灰すれば、その後

のジェットエンジンの検査や補修、それに伴う営業損失は無視できないほど大きく、降灰が予想される空港への着陸は行わないのみならず、航空機の緊急避難を実施するといった対応が必要となる可能性が高い。第二に、緊急対応行動の規模は、季節、時間帯によっても異なりうる。第三に、実際の火山灰拡散予測は円状の拡散ではなく、風向きを考慮したものである一方、より先の時間の予測となるほど不確実性も高くなる。以上の留保事項を考慮すれば、本稿の影響評価結果は総じて過小評価であると考えられるものの、今後の検討に向けたベンチマークとして意義があるものとする。

5. おわりに

本稿では、大規模噴火時に航空機が緊急対応行動を必要とする事象の規模感を把握するための基礎的考察を行うために、ダイバートが必要となる航空機の数とダイバートによって生じる飛行時間損失を簡易的に推定するモデルを定式化した。さらに、桜島大噴火を対象とした適用事例を示した。到着地空港での降灰を許容する限りにおいては、大規模噴火時にダイバートの緊急対応行動の規模は限定的であるが、今後、本モデルを拡張することにより、より現実的な想定での評価を行う必要がある。

謝 辞

本稿で示した研究は、平成30年度京都大学防災研究所共同研究拠点研究（特別推進）の助成を受けており、ここに感謝の意を表す。また、本共同研究事業の参加メンバーとの議論を通じて有益な知識やコメントを得ており、ここに御礼申し上げる。ただし、本稿の内容に関わる一切の責任は著者に帰することを申し添えておく。

参考文献

- 大森房吉（1918）：第九章噴灰砂ノ降下、鳴響區域（日本噴火志下編）、震災豫防調査會告、Vol.87, pp.67-73.
- 下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明（1995）：火山の事典、朝倉書店。
- 安田成夫・梶谷義雄・多々納裕一・小野寺三朗（2011）：アイスランドにおける火山噴火と航空関連の大混乱、京都大学防災研究所年報.A, Vol.54, No.A, pp.59-65.

（論文受理日：2019年6月17日）