

災害科学と輸送科学の融合による巨大災害の国際貨客 輸送に与える影響評価モデルの構築と その適応に関する研究

令和 5 年 3 月

March, 2023

研究代表者 竹林幹雄

Coordinator Mikio TAKEBAYASHI

目次

第1章	はじめに	2
第2章	大規模噴火による降灰が航空輸送に与える影響分析	3
2.1	はじめに	3
2.2	事例分析 1 : Taal 山	3
2.3	事例分析 2 : Bezymianny 山	8
2.4	おわりに	11
第3章	火山噴火による軽石噴出の影響分析	12
3.1	概要	12
3.2	現地調査	12
3.3	大阪湾への軽石漂着の影響分析	18
第4章	おわりに	24
参考	軽石の成分分析（2021 年 11 月採取分に関する分析）	25

第1章 はじめに

気候変動に伴い、気象災害は今世紀に入ってより深刻さを増している。また、同じ災害規模であっても、資産蓄積に伴って災害ハザードの影響はこれまで以上に複雑化、多様化している。こ社会資本の防災・減災面での機能強化は喫緊の課題であるが、想定を超えた規模の被害の発生が関西空港や神戸港の被災をはじめとして毎年のように発生している。ゆえに防災・減災機能の強化の意味ではハードウェア面での強化はもとより、発災後できるだけ影響を小さくするためのマネジメント面での強化が必要不可欠である。

しかしながら、このマネジメント面での強化に関しては、災害の影響シナリオを実際の輸送ネットワークに即して検討することが不可欠である。特に火山性災害の特徴として、2010年4月の欧州でも火山灰による広範囲の航空輸送の停止等に示されるように、影響範囲が広くなるという特徴がある。特にわが国は、活火山に近接して社会経済活動を営んでいる一方で、大規模な噴火は滅多に起こる事象ではないために、実際に被災した経験を有する人が少ない、あるいは存在しないといった特徴もある。大規模な火山噴火は、何十年、何百年といった周期で生じることから、現在のように高度に近代化した時代では、まさに未曾有の災害となる。こうしたこのような特徴を有する災害への対応策を検討する上で、シミュレーションにより影響シナリオを具体化した上で、検討する必要があると考えた。また、希少性のある災害シナリオは、世間的にもほとんど認知されていない。そのため、シミュレーションによる影響シナリオを見える化することにより、稀少発生ハザードの社会におけるリスク認知を促すとともに、今後の防災教育の基礎資料として役立てることができる。

以上のような問題意識に則り、本研究では大規模災害のうち特に火山性災害に着目し、その特徴の把握と影響についての検討を理論的かつ実務的に行うことを目的とする。具体的には大規模噴火による火山灰による航空輸送への影響に関する分析と、海底火山噴火による軽石の噴出による影響について検討を試みる。

第2章 大規模噴火による降灰が航空輸送に与える影響分析

2.1 はじめに

火山性災害による輸送への影響は多岐にわたる。中でも、航空機による輸送はそのエンジンへの影響が極めて深刻であるため、運航停止を始め最悪の場合航空機事故など多大な影響を被ることが知られている。1982年には英国航空 009 便が Galunggung 山（ジャワ島）の噴火により、4 発全てのエンジンが停止するという事態に至った。幸い墜落には至らなかったものの、火山灰のエンジンへの影響が甚大であることを知らしめる事故として長く記憶されることとなった。1989年には Redoubt 山（アラスカ）噴火により KLM867 便が同様に全エンジン停止となり、緊急着陸を行っている。

歴史的に最も大きな航空輸送への影響として知られているものに 2010 年の Eyjafjallajökull 山（アイスランド）噴火であろう。この噴火により、欧州全域が数日間完全に運航停止となり、その後も復旧には数週間を要した。国際民間航空機関（ICAO）によれば、この影響は欧州にとどまらず、世界中に波及し 50 億ドルの損失をもたらしたと推定されている。

このように広範囲かつ大規模に影響を与えうる火山災害、とりわけ火山灰による影響に関してはわが国においても検討がされている。近年では Takebayashi ら（2021）による桜島噴火によるわが国周辺の航空輸送への影響がシミュレーションベースであるが検討されている。ここでは国土交通省航空局から提供される CARATS オープンデータに基づき、安永噴火レベルの噴火が発生した場合の影響について検討し、その際航空機の緊急避難に必要な追加の空港両々の試算を行っている。同様の問題意識で Arreeras and Arimura（2022）は箱根山の噴火による影響を分析するとともに、避難空港の特定を行っている。

このように極めて深刻な研究テーマであるにもかかわらず、防災分野での注目度はわが国ではまだまだ低いと言わざるを得ない。これはひとつには航空輸送と火山災害をつなげるための情報の整理が伴っていない、特に輸送経路に関する分析が、事象（すなわち航空輸送に影響を与えた噴火事例）の数が限られるためにあまり発達していなかったこともその一因と考えられる。

以上のような状況を鑑み、本章ではまず航空路への影響の分析を 2 つの噴火事例を取り上げ分析することとした。最初はフィリピンの Taal 山（2020 年 1 月に噴火）、もう一つはカムチャツカ半島の Bezymianny 山（2022 年 5 月に噴火）を取り上げる。前者はフィリピン首都のマニラ空港に近い位置での噴火であり、後者は航空貨物の主要路であるアンカレッジ便への影響が考えられるものである。

2.2 事例分析 1 : Taal 山

2.2.1 概要

2010 年 4 月 14 日に始まった Eyjafjallajökull 山（アイスランド）の噴火以降、ICAO では火山灰災害に関する安全性確保のためのガイドラインを作成している。手元で確認できる

Asia/Pacific 地区での最新版は 2017 年のものである。そこではフライトオペレーターは事案発災後、火山灰の影響がない（と予測される）位置への適切な誘導がリスクアセスメント（SRA）に基づき要求されているものの、その具体的な指示内容には触れていない。前出の Takebayasi ら（2021）や Arreeras and Arimura（2022）も基本的には「空港」というグランドサイドの問題として言及している。しかし、さらに本質的な問題としては、その安全な場所までどのように飛行・誘導するか、という問題が考えられる。これは航路設定の問題である。

航路設定の問題は Air Traffic Control の問題として比較的長い歴史がある。特に北米では悪天候の際の経路変更などに関する研究をはじめとして多くの研究事例がある(Yuan et al., 2016; Bosson and Nikoleris 2018; Olive and Basora 2019; Corrado et al., 2020; Olive et al., 2020; Olive and Basora 2020)。残念ながら、こういった研究では火山災害を取り上げた例は未だ存在しない。特に噴火前後で取られた経路が真に緊急的に取った経路であるのか、否か、といった判定は、今後の噴火時の緊急誘導のためのガイドライン作成には重要な情報となると考えられる。

本節では以上のような問題意識に則り、2020 年 1 月に噴火したフィリピン・Taal 山の事例を通じて飛行航路への影響を統計的に分析することとした。

2.2.2 Taal 山噴火の概略

2020 年 1 月 12 日、マニラ空港から 70km の距離にある活火山 Taal 山が噴火した。噴火雲の状況は気象観測衛星ひまわり 8 の衛星写真を元に描画したものを図-2.2.1 に示す。

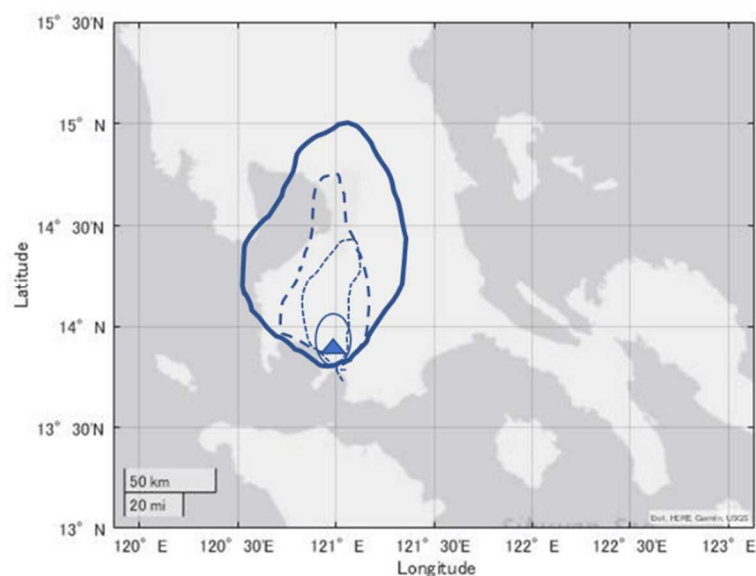


図-2.2.1 噴火雲の動き(January 12, 2020).

Tokyo VAAC によれば、噴火は現地時間 16:00 に開始し、噴火雲は風に乗り北に移動した。17:30 にはルソン島中央部に達し、その後も北上を続け、北緯 24.11，東経 126.35 まで達することとなった。この状況を鑑みれば、噴火雲近傍の航空機は速やかに飛行経路の変

更が必要となったはずである．あるいは当該エリアを飛行予定のフライトも経路変更を検討する（計画する）ないしはキャンセルを検討したと考えられる．

2.2.3 分析方法とデータ

本節では同一フライト番号によって取られた経路を分類し，その経路が特殊（すなわち退避を目的とした飛行経路）であるか否かを検討することで，上記目的を達成することを考えた．

データとしては飛行情報の商用データとして広く利用されている Flightradar 24 (FR24) から得られる 2020 年 1 月 1 日～1 月 31 日までの経路情報を利用することとした．しかし，火山灰の影響が考えられるエリアを飛行する航空機は，マニラ空港発着だけではなく，クアラルンプールやシンガポール，あるいはシドニー発着便等多岐にわたる．このため，飛行履歴の中からランダムに 120 フライト抽出し，分析に利用することとした．

分析方法としては，航空路の分類に利用される hierarchical density-based spatial clustering of applications with noise (HDBSCAN) という密度ベースのクラスタ分類法を適用する．HDBSCAN の利用は Yuan et al. (2016), Olive and Basora (2019) など実績がある．また，HDBSCAN 適用時に必要な距離については経路間の距離の定義は極めて特殊となるため，Fréchet 距離(Eiter and Mannila 1994)を採用することとした．

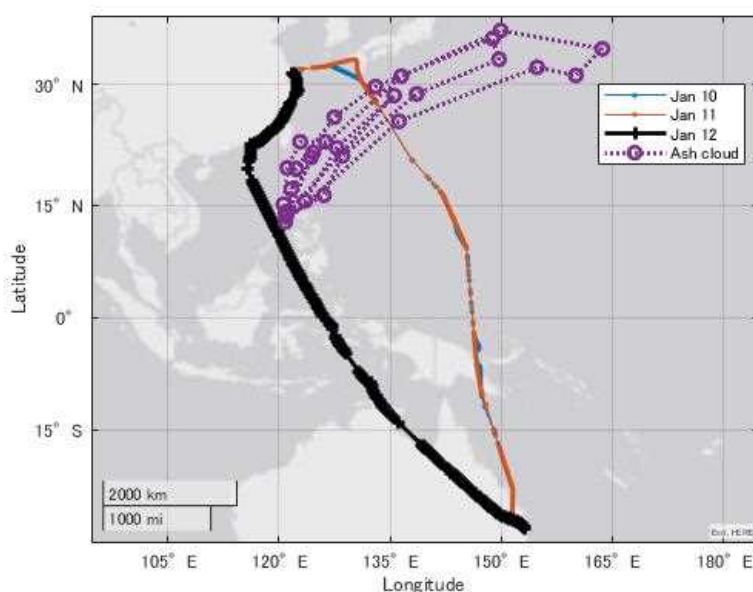


図-2.2.2 MU715 のルート分類（1 月 10 日～12 日，2020 年）

図-2.2.2 は上海発シドニー着の MU715 便のルート分類を示している．当該フライトの通常飛行経路（10，11 のもの）は破線で描かれた降灰エリアを通過している．当該フライトのスケジュールは噴火の 4 時間後であったため，降灰エリアを大きく迂回したと考えられる．このように視覚的には確認できるものの，それが実際にイレギュラーなものかどうかを統計的に判断することが必要であり，そのために HDBSCAN を導入することが有効であ

ると判断された。表-2.2.1 にサンプルデータの概要を示す。

表-2.2.1 データの概要.

Total	120	FSC	85	LCC	35
To/from Manila	49	To/from the Philippines	70	Intra-Asia	96
No. of cancellations (January 12, 13, and both 12 and 13)				32, 10, and 4	

注：FSC はフルサービスキャリア，LCC はローコストキャリアを指す。

このうち 30%は LCC に分類されるフライトである。航空コンサルタントの CAPA によればアジア太平洋地域での LCC のシェアは約 30%であるため，この比率はある程度市場の状況を反映したものであるといえる。

サンプルの大半はアジア内のフライトであり，うち 51%はマニラ空港発着である。ゆえにサンプルに含まれる多数のフライトは Taal 山噴火の影響を受けているものと推察できる。噴火当日の 1 月 12 日にキャンセルとなったものは 32 フライト，翌 13 日は 10 フライト，両日ともは 4 フライトであった。ここから，サンプルでは 27%が何らかの形でキャンセルを行っているというものである。

表-2.2.2 HDBSCAN による飛行経路のクラスタリング（一部）

	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th
LJ63	2	0	2	0	2	1	1	1	1	2	X	0	0
JL746	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
5J459	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	1	1

注：表中の 1, 2, 3... は各フライトで分類されたカテゴリーを表す。0 はノイズ（カテゴリーにあたらないうフライト），X はキャンセルを表す。

表-2.2.2 は HDBSCAN による飛行経路クラスタリングの一例である。ここでは LJ63 (Jin Air : LCC), JL746 (JAL : FSC) および 5J459 (Cebu Pacific : 近距離)である。この表でわかることは JL, 5J は噴火のあった 12 日ならびに翌 13 日においても通常飛行に利用するルートに変えて飛行している一方で，LCC の LJ はイレギュラーな経路を選択していることがわかる。

さてここで噴火前日の 11 日から噴火後 3 日経った 15 日までのフライトに顕著な傾向が認められたため，以下のような分類を試みた。

- I. 11 日～15 日までフライトに影響なし。
- II. 12 日にキャンセル（あるいはフライト計画なし）ないしはイレギュラーな経路を取っ

たが、13日には通常経路に復帰.

- III. 13日にキャンセル（あるいはフライト計画なし）ないしはイレギュラーな経路を取ったが、14日には通常経路に復帰.
- IV. 13日にキャンセル（あるいはフライト計画なし）ないしはイレギュラーな経路を取り15日まで継続.
- V. 12日、13日両日キャンセル（あるいはフライト計画なし）ないしはイレギュラーな経路を取ったが、14日には通常経路に復帰.
- VI. 12日、13日両日キャンセル（あるいはフライト計画なし）ないしはイレギュラーな経路を取り、15日まで継続.
- VII. 12日、13日とも前日までの経路と異なっているものの、通常取られている飛行ルート
の範囲内.

以上の7分類について整理したものが図-2.2.3である.

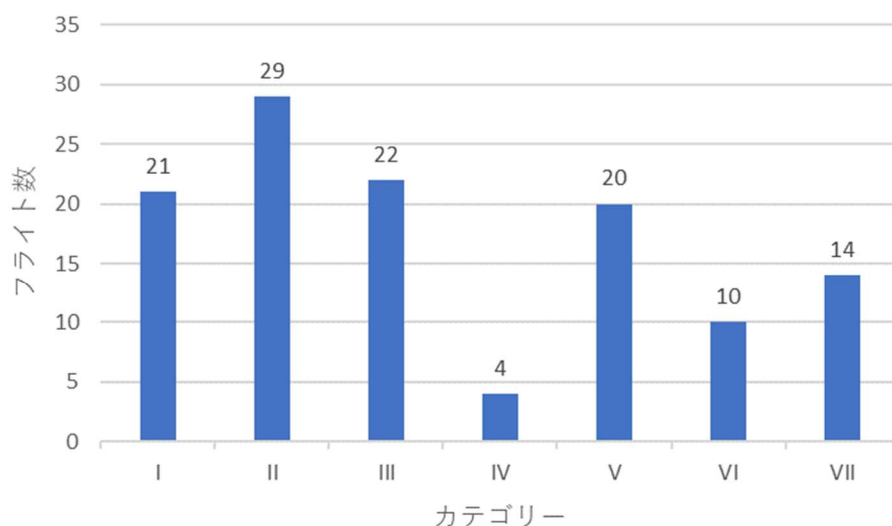


図-2.2.3 2020年1月12日～15日までのフライトの分類

カテゴリーIおよびVIIは、「通常通り」というカテゴリーである。これら以外は全て何らかの変更があったということであり、その割合はサンプル内の70%に達する。特に「1日だけ特別な経路（キャンセルを含む）を取った」というフライトは42.5%を占める。換言すれば、火山灰の影響を避けるためには1日だけの変更で十分である、という判断があったと考えることができる。

ここでアジア内のフライトについてみることにする。アジア内フライトは96フライトであるがそのうち66フライトがマニラ空港発着である。うち53フライトが12日ないしは13日、あるいはその両日イレギュラーな経路を取っていると判別された。このうち30フライト（56.6%）がカテゴリーIIとIII、すなわち「1日だけの特別経路」というオペレーションを取っており、残りは「両日とも特別経路」であった。この意味ではアジア内のフライトでの「1日だけの特別経路」オペレーションの比率とすべてのフライトにおける「1日

だけの特別経路」オペレーション比率では、大きな差がないことがわかる。

一方、長距離輸送にあたるフライトは23フライトある。うち17フライトが12日ないしは13日、あるいはその両日イレギュラーな経路を取っていると判別された。さらにその中で13フライトが「1日だけの特別経路」というオペレーションを取っていたと分類された。サンプルサイズが異なるものの、76.5%を占めるに至っている。図-2.2.4はソウル発シドニー着のKE112（大韓航空）の経路である。図から13日だけイレギュラーな経路を取っていることが容易に判別できる。そして翌日には通常経路に復帰している。これは通常経路にかかった（あるいはかかると推測された）噴火雲が通過するには1日で十分であるという判断があったと考えられる。この点、アジア内のフライトよりもある意味で「リスクを許容」したフライトスケジュールを組むようにも思われる。一方で、それだけVAACの噴火情報に信頼を置いていると取ることもできる。この傾向は、以下の分析事例2のBezmianny山噴火の事例でも見ることができる。

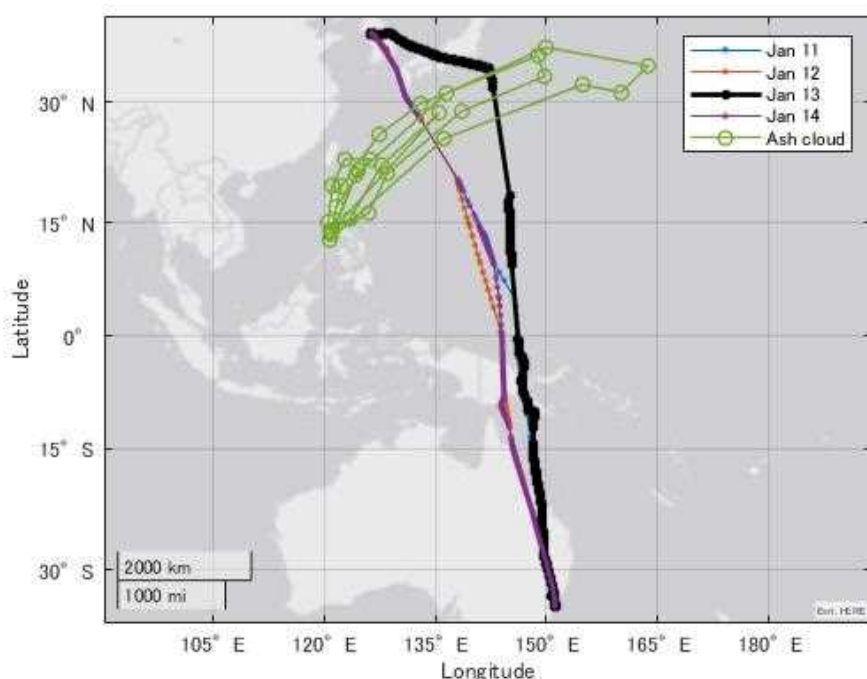


図-2.2.4 KE112 の2020年1月11日～14日の飛行経路

2.3 事例分析2：Bezmianny 山

2.3.1 概要

Bezmianny 山はカムチャツカ半島中部に位置する活火山であり、1955年の大爆発 VEI5 以降、VEI3 クラスの噴火が2010年まで20回発生していることが報じられている。この火山噴火は高緯度地域であり、アジアと北米（主として米国）を結ぶ多くの長距離路線が当該エリアを通過するだけでなく、物流路として極めて重要である。これは現在もアラスカ・アンカレッジを経由する貨物便が多数を占めているためである。このため、この火山の噴火が航空輸送、特に貨物輸送に与える影響は無視できないものと考えられる。ことさら

COVID-19 のパンデミックの影響により、2020 年～2022 年前半までは世界的に貨物便の需要が急増した時期であるため、その影響がある程度明確に出るものと考えられる。

以上のような問題意識に則り、本稿では 2022 年 5 月 28 日の発生した Bezymianny 山の噴火の影響についてデータ分析を中心に行い、その特徴について検討することを目的とする。

2.3.2 Bezymianny 山噴火（2022 年 5 月 28 日）

カムチャツカ半島中央部に位置する Bezymianny 山において 2022 年 5 月 23 日より噴火が始まっていたが、5 月 28 日午後 5 時過ぎ（日本時間）、噴煙高度 15,000 メートルに達する大規模噴火が発生した。高度 15,000 メートルは航空路への影響が憂慮される高度であり、特に降灰による影響が航空会社にとっては深刻な問題となる。特に、2.3.1 に述べたように、当該エリアはアジア～北米間の貨物便の主要空路となっていることから、貨物便のフライトキャンセル、ないしは経路変更（スケジュール変更も含む）が発生した可能性がある。Tokyo VAAC によれば噴火雲は最大で北緯 49.36 度、東経 176.43 度まで達したとされている。図-2.3.1 に Tokyo VAAC が発表した噴火雲の移動図を示す。この図から基本的に雲は南下する方向で移動したことがわかる。

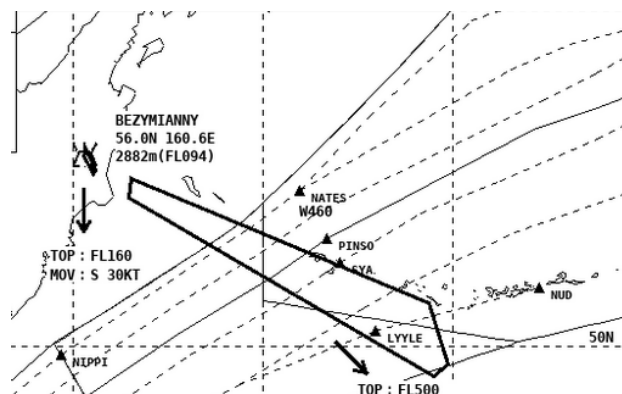


図-2.3.1 噴火雲の移動（Tokyo VAAC による）

（出典：気象庁 HP, https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html）

この雲の移動により、降灰エリアは東南方向に移動することになり、この範囲を通過するフライトはその影響下に入ることが予想される。このような状況に置いて、各航空会社の行動についてデータに基づき考察することとする。

2.3.3 データ分析および結果

本節ではフライトの航路を記録したデータを用いることになる。日本の空域であれば国土交通省航空局が提供する CARATS Open Data を用いることが可能であるが、本稿の対象地域はその域外であるため、商用データである FR24 からデータ供給を受け、分析を行うこととした。対象時期は 2022 年 5 月 21 日（大規模噴火の 1 週間前）～2022 年 6 月 20 日の 31 日間である。ただし、本稿では貨物機中心の分析を行うため、大規模噴火が発生した

5月28日前後に確定したフライトをもち、なおかつ基本的にデイリーないしバイデイリーのスケジュールフライトを持つ便の行動に限定して分析を行った。このため、5月21日～6月4日のうちの28日を含む5日のフライトに限定して分析を行った。その中から29サンプルについての結果を示す。

表-2.3.1 Fréchet 距離測定 (5X61 便)

	27	28	29	30	31
27	0.00	46.75	119.74	0.54	1.12
28	46.75	0.00	166.49	47.09	46.01
29	119.74	166.49	0.00	119.40	120.47
30	0.54	47.09	119.40	0.00	1.08
31	1.12	46.01	120.47	1.08	0.00

表-2.3.1 はコールサイン 5X61 便 (UPS61 便, 台北発アンカレッジ行き) の5月27日～31日のフライトの軌道に関して、任意の飛行軌道間の Fréchet 距離を測定したものである。Fréchet 距離は2つの曲線間の類似度を示す指標であり、Fréchet 距離の値が小さいほど、類似した軌道を取っているということになる。当該フライトはデイリー運航されており、噴火の期間でもフライトを行っていることが確認されている。ただし、噴火が発生した28日およびよく29日には明らかに通常と異なる軌道を取っていると考えられ、明確に異なると判断できるのは29日のフライトである。このことから、当該フライトは29日の時点で何らかの回避行動をフライト前に決定していた可能性がある。

このような通常と異なるフライト (キャンセルも含む) を取ったフライトは29フライト中20フライトに上り、うち4フライトは30日発のフライトにも通常と異なる軌跡であるという結果を得た。

表-2.3.2 30日発のフライトにも影響があった場合 (DL295)

	25-26	27-28	28-29	30-31	1-2
25-26	0.00	5.88	23.37	22.75	6.13
27-28	5.88	0.00	17.48	17.58	5.21
28-29	23.37	17.48	0.00	13.39	17.30
30-31	22.75	17.58	13.39	0.00	22.63
1-2	6.13	5.21	17.30	22.63	0.00

表-2.3.2 は2日間にわたってフライトの変更が観測された便に関する分析結果である。DL295 便は発地がアンカレッジではなく、アトランタであり、旅客便である。長距離便のため発時刻がアンカレッジ便よりも早いことが影響している可能性がある。筆者らの研究

成果（3）の場合とは異なり，長距離便の方が近距離便よりもよりリスクを回避するようなフライト計画を立てた可能性がある．また DL295 便は旅客便であるため，より高いリスク管理が要求されている可能性もある．この点については今後さらに検討が必要である．

2.4 おわりに

本稿では 2020 年 1 月 12 日に発生したフィリピン Taal さんの噴火，ならびに 2022 年 5 月 28 日の発生した Bezymianny 山の噴火の影響についてデータ分析を中心に行い，その特徴について検討を加えた．その結果，大規模噴火発生時点以降，24 時間以上回避行動などへの影響があったことがわかった．

第3章 火山噴火による軽石噴出の影響分析

3.1 概要

広域に及ぶ火山性災害のもう一つの例として、軽石の大量噴出を上げることができる。これは水蒸気爆発により、軽石が生成・放出され、海上ないしは海中で漂うというものである。軽石漂着の影響は従来それほど注目されていなかったが、2021年10月に沖縄、奄美群島で大規模な軽石漂着が発生し、船舶の航行・接岸に多大な悪影響を及ぼしたことから一般にその影響が認知されることとなった。これは遡ること2ヶ月前に小笠原諸島に近接する海底火山「福德岡の場」での噴火に由来するもので、遥か2000km彼方の火山噴火が影響したために、火山災害の広域性を示す例となったと言える。ここではその軽石漂着の現状を把握するために行った現地調査報告に加え、実際にわが国の拠点港湾で沖縄のような現象が仮に発生した場合、どのような事態になり得るのか、を把握するためにシミュレーション分析を行った。

3.2 現地調査

ここでは2021年10月より沖縄、奄美群島で確認された福德岡の場由来の軽石漂着の状態を把握するため、現地視察を行った。調査は11月3日～4日と12月1日～3日で行ったが、後者は補足的なものであるため、前者の調査について簡単に整理したものを以下に示す。

3.2.1 軽石の性状

- 軽石は漂流の間の摩耗によって小さくなっており、大部分の大きさは米粒程度(写真 3.2.1)。中には、栗くらいの大きさのものもある(写真 3.2.2)。



写真 3.2.1



写真 3.2.2

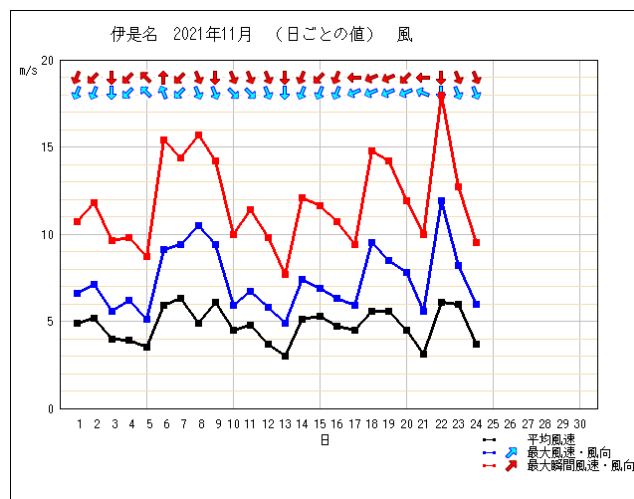
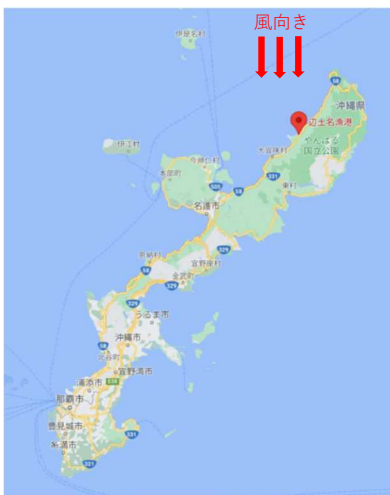
- 海岸に打ち上げられた軽石は、そのまま滞留する(写真 3.2.3)



写真 3.2.3 海岸のようす(大宜味村・津波海岸)

3.2.2 影響を受けた港の様子(11月3,4日@辺土名漁港)

- 軽石漂着は、沖縄県北部・国頭村の漁港で観測された。
- 調査した時期は、北風が吹いており、辺土名漁港では、海から風が吹き付ける形になっていた。
- フェンスを張ることによって、港湾内への軽石流入を防ぐことができる。ただし、完全には防ぐことができない。
- 漁船のエンジンの冷却水として、海水を利用している。フィルターがついていないエンジンの場合、軽石の吸い込みは致命的となる。フィルターがついている漁船はある程度の量であれば動かせるが、フェンスに溜まっている大量の軽石のため、漁港の外に出ることができない。



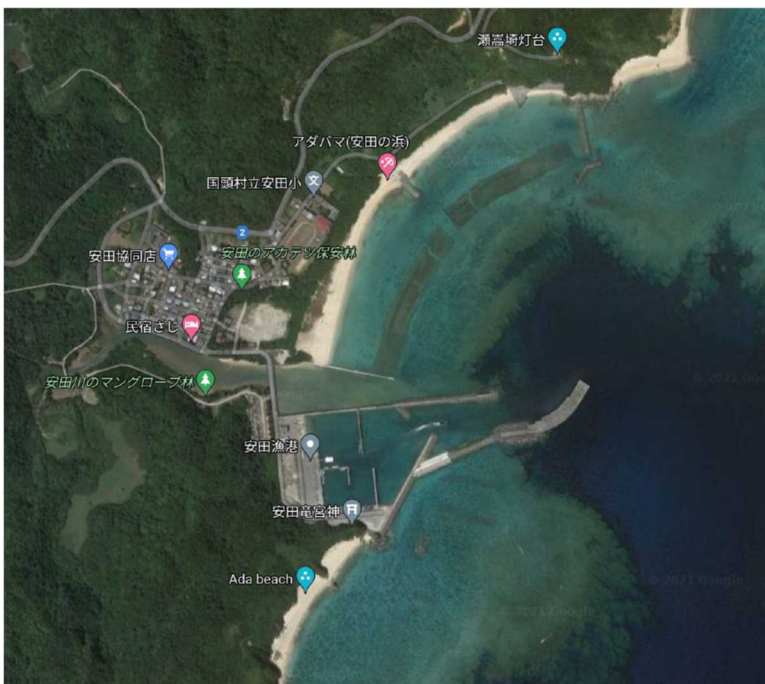
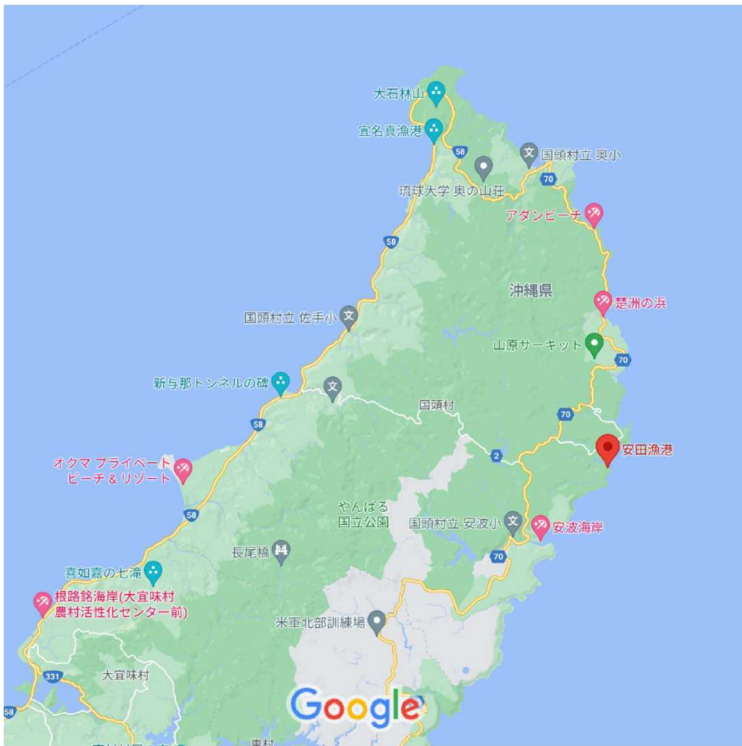


● フェンス



3.2.3 対策工事の様子(11月3日@国頭村・安田(あだ)漁港)

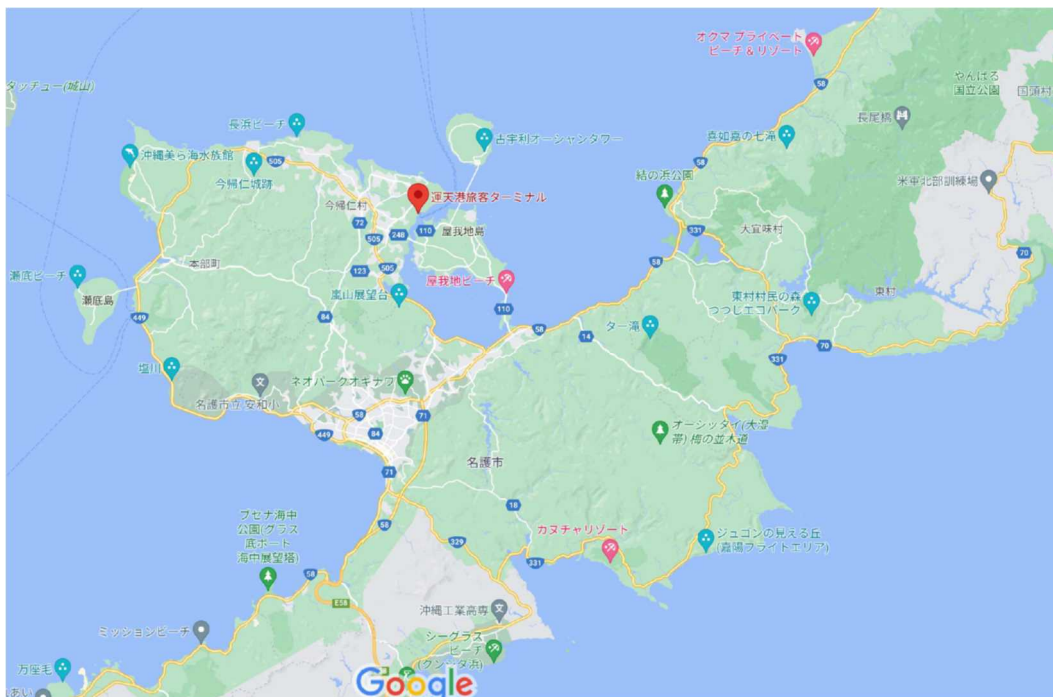
- フェンスで岸の方に軽石を集め、船の陸揚げ場から、油圧ショベルカーですくいだす形で除去している。
- 集められた軽石層の厚みは数センチほど。
- 軽石は、港湾施設敷地内の空き地に集められている。





3.2.4 フェリーターミナル@運天港

- 運天港は、伊是名島、伊平屋島と沖縄本島を結ぶフェリーのターミナル。
- フェリー会社の事務職員の話によれば、岸壁の沖には、軽石が漂流している。問題がないわけではないが、軽石が沖にある場合は、フェリーを動かすことができるが、岸壁にまで軽石が漂着した場合は、動かすことが難しいとのこと。
- 岸壁に漂着するかどうかは、潮の流れによる。





3.2.5 考察

今回の調査に関する簡単な考察を以下に整理する。

- 港湾への漂着の発生は、海流と風向き、漁港の出入り口の向きが、主要要因と推察される。
- いったん、漁港の中に軽石が入ってしまうと、風が逆向きに吹いても、外に出にくい構造となっている。
- 船舶への影響は、冷却水の取水によるものであり、喫水の浅い船では影響は大きい。
- フェンスで大量に滞留している箇所の厚みは、数センチほどに達する。
- ただし、水中に浮遊している軽石も存在するため、喫水が深い船舶でも、軽石を取り込んでしまう可能性はある。
- 1924 年の西表島近海海底火山噴火では、日本列島全体に軽石が行き渡った事例が存在す

る。エンジンを動力とした船舶が普及した今日までに、経験したことがない災害ハザードとなりうる。したがって、今回の漂着事象は、さらに大きな影響が出る事象のヒヤリハット事例として、将来の大規模事象に備えるが必要ある。

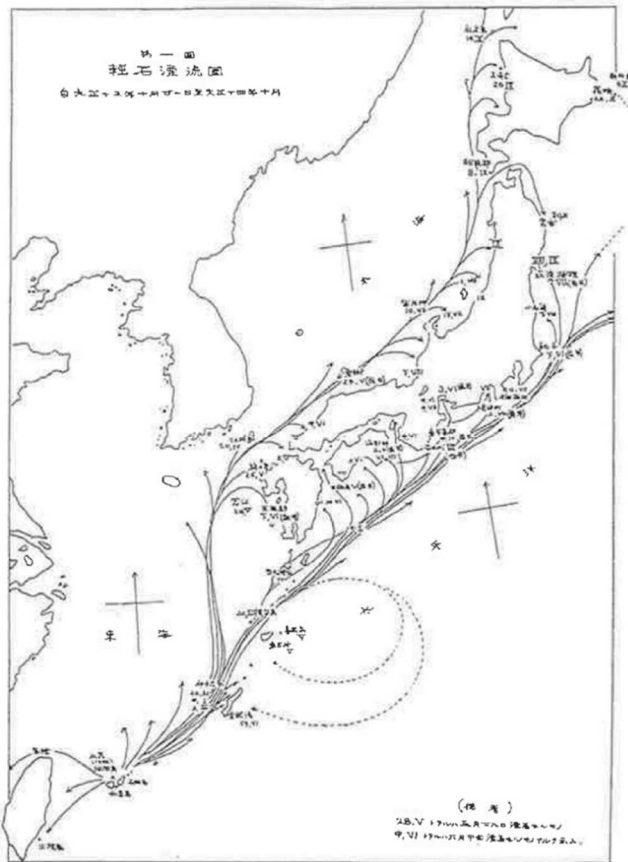


図 3.2.?

3.3 大阪湾への軽石漂着の影響分析

3.3.1 火山性災害の影響

海上輸送における火山性災害の代表例として、2021年10月より沖縄地方および奄美群島を中心として発生した「軽石漂着」を取り上げる。当該事案は2021年8月に小笠原諸島の海底火山である「福徳岡の場」が噴火し、大量の軽石を発生させたものが2ヶ月以上経過して沖縄から奄美群島を経て本州にまで達したものである。国土交通省の報告によると、沖縄県下においては港湾として管轄される41港のうち29港において漂着が確認されている。これは後に38港にまで拡大する（国土交通省港湾局資料（2022年3月3日）による）。これらの港では例えば地域の交通に欠かせない離島交通をささえる連絡船が数日にわたって欠航ないしは運航に影響がある状態が続いた（運天港、中城港など）。沖縄県下だけで2万トンの漂着が観測されている。また、与論島では生活物資である油の輸送がタンカーが接岸できないために島内の生活に大きく影響したと報告されている。

この事案は本土への影響としてはほとんどなかったものの、軽石の海上輸送に対する影響は無視できないことを示す事例であると言える。これは軽石はタグボートなど浅い場所

に取水口がある船舶では、冷却水の補給の際、一緒に吸い込み、エンジンに不具合を生じさせるためである。わが国の主要港湾では、大型船入出港に対しては水先が不可欠であり、そのためのパイロット船の運航が不可欠である。同時に曳航時にはタグボートが要請されることが多くない。これらの船が運航できなければ、コンテナ船をはじめとする大型船の運航はほぼ不可能と考えられる。ここではコンテナ輸送に限定して、その影響の大きさを検討するものである。

3.3.2 大阪湾への影響

2021 年の福徳岡の場噴火では本土への影響はほとんど見られなかった。これは拠点港湾が存在する大阪湾などへの漂着がなかったためである。しかし、歴史的には 1924 年の西表海底火山の噴火によって、瀬戸内海をはじめとする日本各地に軽石が漂着したことが当時の気象庁の報告に見られる。当時の被害状況は記されていないものの、当時とは比較にならない規模・頻度でわが国周辺では海上輸送が行われており、特に 3 大湾への輸送が集中している。

大阪湾は国際コンテナ戦略港湾として指定された阪神港（神戸港，大阪港）に加えて，堺泉北港なども有し，特にアジアとのつながりが強い地域であると認識されている。大阪湾において，先の福徳岡の場事案での与論島のような状態が発生した場合，どのような影響があり得るのか，最新のコンテナ流動調査である平成 30 年度全国輸出入コンテナ貨物流動調査のデータを用いて分析を試みた。

3.3.2.1 輸出入貨物の動向

表 2.1 大阪湾利用輸入貨物の背後地（単位：％）

	中国	ASEAN	韓国	台湾
滋賀	56.4	48.5	74.9	60.8
京都	87.1	93.3	79.2	78.6
大阪	98.9	99.5	92.4	97.9
兵庫	97.9	99.2	98.2	99.4
奈良	99.1	99.8	99.0	100.0
和歌山	99.5	99.5	98.1	95.1
鳥取	49.7	7.5	2.9	100.0
島根	40.7	24.5	30.4	67.6
岡山	34.4	39.8	12.4	39.3
広島	11.8	46.9	2.9	27.8
山口	1.4	15.8	0.5	16.2
徳島	44.4	46.8	43.6	100.0
香川	41.2	43.2	21.1	99.3
愛媛	26.6	21.7	1.5	79.1

高知	16.2	1.0	12.0	100.0
----	------	-----	------	-------

表 2.1 は大阪湾を利用する輸入貨物（フレートトンベース）が当該府県の全輸入量に対して占める割合（依存度）を取引国・地域別に整理したものである。表から明らかなように、大阪湾の直背後地にあたる近畿圏は滋賀県を除いて大阪湾の港湾への依存度が極めて高い。これはいずれの国・地域においても距離的に近い大阪湾からの輸送が頻度・キャパシティともに充実しているため、利用割合が突出しているといえる。例外の滋賀県は伊勢湾方面への輸送も十分に利便性が高いため、韓国を除いては他の府県と比較して低いと言える。一方、中国地方では鳥取、島根が中国、台湾方面での依存度が高い。これは ASEAN に関しては広島港が、また韓国に関しては自地域の港湾が十分なサービスを提供しているためであると言える。一方、四国の香川、徳島では大阪湾への依存度が高い傾向にあると言える。特に徳島では韓国方面に関しても大阪湾への依存度が高いことがわかる。地理的に大阪湾に近い、大阪湾からトラックによるフィーダー輸送で輸送する方が自地域内の港湾を利用する場合と便益的にあまり差がないためであると考えられる。

表 2.2 大阪湾利用輸出貨物の背後地（単位：％）

	中 国	ASEAN	韓国	台湾
滋賀	51.3	38.8	42.5	37.9
京都	74.4	75.3	80.3	92.4
大阪	96.1	91.9	94.4	95.6
兵庫	97.0	95.6	93.1	95.7
奈良	90.0	97.1	94.1	95.6
和歌山	91.8	95.9	97.8	85.6
鳥取	5.7	31.7	6.2	22.1
島根	63.8	71.3	19.1	7.5
岡山	39.6	53.7	15.9	29.1
広島	9.6	79.5	5.6	14.0
山口	28.8	26.7	2.2	22.4
徳島	77.4	79.8	49.2	93.8
香川	15.3	46.4	15.7	98.1
愛媛	40.5	65.8	7.6	82.0
高知	21.0	74.4	25.8	97.9

表 2.2 は表 2.1 と同様に大阪湾を利用する輸出貨物（フレートトンベース）が当該府県の全輸入量に対して占める割合（依存度）を取引国・地域別に整理したものである。表から明らかなように、輸入貨物の場合と同様に、大阪湾の直背後地にあたる近畿圏は滋賀県を除いて大阪湾の港湾への依存度が極めて高いものの、京都は輸出の場合と比べて大阪湾

への依存が低くなっている。これは若狭湾の港湾（京都舞鶴港など）の利用が活発なためである。

このように見ていくと、大阪湾での軽石による航行不能は西日本の広いエリアにその影響を与える可能性が高いと言える。

最も大きなものとしては関西の貨物の港湾選択の変化である。これは阪神港が利用不可能となった場合、他の利用可能な港湾へ貨物がシフトすることが考えられる。阪神港が利用不可能となった場合、軽石の漂着の状況によっては伊勢湾も同様に利用が難しくなると考えられる。このような状況が発生した場合、他の港湾への貨物の集中が発生し、場合によっては輸送が不可能な貨物も多く発生すると考えられる。

3.3.3 阪神港への軽石漂着がもたらす影響：シミュレーションによる

前節で検討した阪神港への軽石漂着による影響について、ここではシミュレーションベースによる分析を試みた。すなわち、阪神港において軽石漂着による水先等の実行不可が発生し、大型コンテナ船の運航が停止した場合の影響について検討する。対象範囲は表 2.1-2.2 に示した府県に加え、アジアとの結びつきが強い北部九州（福岡、佐賀、長崎）を加えた形で検討することとした。また、全発着貨物を対象とするには計算規模が大きくなりすぎるため、影響の発生の程度を把握するために、ASEAN、特に近年サプライチェーンでの位置づけが非常に重要となっているベトナム発着貨物（ハイフォン、ダナン、ホーチミン・カイメップ）を対象とする。OD 貨物量は平成 30 年コンテナ流動調査に記載されているフレートトンによる貨物量を 1TEU あたり 18 トン積載として換算した値を用いた。

モデルについては、既に木俣・竹林（2019）等で適用実績をもつ Bilevel 型最適化モデルを用いることとした。モデルの詳細は参考文献に詳しいため、ここでは概略だけを示す。船社（複数）は輸送頻度を制御変数として寡占競争を行うものと仮定する。モデルでは 1 ヶ月の運行回数（片道）とする。運賃は簡単のため固定値とする。このとき、各船社は荷主の選択する輸送経路を予測できるものとし、その最適行動を元に輸送頻度競争を行うものとする。荷主は船社の示した輸送メニュー（頻度と運賃）に加えてフィーダー輸送にかかる費用なども勘案し、輸送経路を決定するものとする。なお、ここでは荷主の行動はコンテナ船の輸送容量を考慮したロジット型配分（確率的利用者均衡配分）とする。パラメータ値は値が安定していることから木俣・竹林（2019）を利用することとした。船社の構成なども木俣・竹林（2019）の設定を用いることとした。なお、海外トランシップに関しても既往研究に倣い、輸送実績のある釜山港、高雄港、深圳港の 3 港で可能とした。

シミュレーションでは(i)平時と(ii)阪神港利用不能時、の 2 ケースの比較を行った。

表 2.3 計算結果の概要（with/without 比較）

伸び率%	Out	In
水島	605	747

広島	60	84
北部九州	100	92
釜山	76	101

表 2.4 計算結果の概要（輸送量の変化）

海外トランシップの割合		輸送不可能（ないしは西日本では補いきれない）貨物の割合（対 without 時）
Without	With	35.8%
21.8%	51.2%	

注：海外トランシップは釜山，深圳，高雄での積み替えを指す

表 2.3 は大阪湾が利用不能となった場合の，西日本でベトナム航路を有する国際港湾での取扱貨物量，および釜山トランシップ貨物量の変化率を表している．表から明らかなように，大阪湾に近接する水島港での伸びが著しい．しかし，通常の 6～7 倍もの貨物が集中するというのは周辺の道路状況などから考えてもあまりに負荷が大きく，また施設の制約も大きいことから実現することは難しいと考えられる．一方，広島，北部九州でももとの取り扱い個数が多いことを考えるとかなりの集中が見られると言って良い．一方，釜山における海外トランシップもほぼ倍の量になることがわかる．輸送量総量から考えると（表 2.4 参照），阪神港が利用不能になることにより約 36%の貨物が輸送できなくなるという結果を得た．同時に海外トランシップの占める割合は 21%から 51%にまで跳ね上がると推計された．

以上の結果から，大阪湾における機能不全は西日本の主要港での取り扱いではとても補いきれず，釜山港などでの海外トランシップに頼らざるを得ない現実を示すものである．これはリスク管理の観点からは二つのことがらを意味する．一つは現行のままでは非常時に海外との連携が必要である可能性が高いこと，もう一つは西日本においてさらに ASEAN 方面への輸送能力を増強するとともに，積み出し港へのフィーダー輸送（この場合は陸送となる）の増強が不可欠である，ということである．

3.3.4 おわりに

本研究では海底火山噴火などによる軽石噴出の国際コンテナ貨物輸送に与える影響を ASEAN 貿易，特に近年発展著しいベトナム航路に注目して分析を行った．その結果，大阪湾発着の輸送に滋賀を除く関西の 2 府 3 県は著しく依存していることがわかり，リスク分散の意味でも輸送の多様化を検討することが望ましいと考えられた．また，シミュレーション分析の結果，西日本の他の港で機能を代替する場合，全体的な輸送能力が落ちることに加え，海外トランシップに大きく依存するという結果を得た．

第4章 おわりに

本研究では大規模災害のうち特に火山性災害に着目し、その特徴の把握と影響についての検討を理論的かつ実務的に行うことを目的とする。具体的には巨大噴火による火山灰による航空輸送への影響に関する分析と、海底火山噴火による軽石の噴出による影響について検討を試みた。火山灰災害に関しては航空輸送に着目し、その退避行動の実際を航路の変化を統計的に評価する方法論を提案し、その有効性を明らかにした。また、軽石漂着の海上交通に与える影響については、実態調査を行うことにより、災害の実態を明らかにするとともに、平成30年コンテナ流動調査データに基づき、西日本発着のベトナム方面の貨物への影響から、発生しうる不便益について数理的に明らかにした。

これらの成果は今後のわが国ならびに世界の防災科学を進展させる上で有益な情報となるとともに、わが国の防災政策を考える上でも一つの支援情報になると言える。例えば、Taal 山、Bezymianny 山に関する分析から、火山灰に対する回避行動は長くても48時間程度であり、これはVAACの発信する情報に大きく依存した結果であると言える。VAACの噴火情報ならびにその予測方法の向上がこの退避行動の減免に大きく寄与する可能性を示すものである。また大阪湾における軽石漂着に関する分析では、西日本の港湾では大阪湾で取り扱う貨物の相当量が海外トランシップに頼らざるを得ない、という厳しい現実を示す結果となった。これは今後のわが国の経済安全保障を考える上でも非常に大きな問題であり、軽石漂着災害を超え、広くわが国の港湾における「広域的な代替機能の確立」の必要性を示すものと言える。

なお、本研究は災害と輸送に関する研究の第一段階に相当するものであり、今後はシミュレーション規模の拡大などさらに実務的に必要とされる支援情報の提供ができるよう研究を進める予定である。

参考 軽石の成分分析(2021 年 11 月採取分に関する分析)

1. サンプル

識別 記号	重量	採取場所	採取方式	備考
A	1.23 kg	[辺土名漁港] 撤去された軽石の一時集積所	袋で直接すくう. 表面 5cm ほどか.	漁港から重機ですくいだされて撤去されたもの. 袋ごと計量.
B	0.30 kg	[安田 (あだ) 漁港]船だまり	0.2m×0.2m の面積内をミカン網 (メッシュサイズ: 2 mm) ですくう.	軽石層厚み 2 cm (井口先生の撮影写真あり). 袋ごと計量.
C	1.60 kg	[辺土名漁港]最奥部浮棧橋と岸壁の間の水面	たも網 (メッシュサイズ: 2 mm, 口径 36 cm) で水面をすくう	袋ごと計量.
D	21 g	[辺土名漁港]浮棧橋から西の海底	水中ドローンにミカン網 (メッシュサイズ: 2 mm) をつけてドレッジ	D-1~D-4 の小分けあり. D-1~D-3 は正味計量, D-4 は袋ごと計量. これらを合計して重量表示.
E	1.04 kg	[辺土名漁港]漁港突堤先端のメ切フェンス外側	水中ドローンに付着したものを採取	現地採集の他に, ドローン清掃時の回収物もあり. 袋ごと計量.

いずれも現地で採取後, チャック付きビニール袋で密閉して持ち帰る.

2. 見掛け密度

安田 (あだ) 漁港 漂遊軽石を 20cm×20cm サンプリング (サンプル B) 0.30kg
面積あたり質量 7.5 kg/平米
(井口さん撮影画像 IMG_20211103_164602.jpg より厚さ 2cm とする)
見掛け密度 0.375kg/m³

3. 海底簡易ドレッジで得られた軽石の密度

サンプル D1a -D3 総質量 2.0311 g, 総体積 2.00ml. 平均密度 1.02 g/ml

海水の密度とほぼ同じ.

4. 粒子解析, 形状分析

画像解析手順

フリーソフトウェア ImageJ を用いた簡易画像解析

デジカメ画像→グレースケール化→二値化→Watershed 処理→粒子解析.

ただし, Watershed 処理は接触した粒子像を分離する処理.

サンプルは 1 回真水に泳がせた後, キッチンペーパー上で数時間乾燥させたものを撮影の対象とした.

解析結果の総括

いずれのサンプルでも 0.1~0.4 cm 径の粒子が卓越している.

アスペクト比は 1.4~2.0. 一番目立つ 0.2cm 前後の粒で 1.5 付近の値を取る.

参考) コシヒカリ米粒 アスペクト比 1.44. 確かに米粒とよく似ている.

個別の解析結果

Sample A (辺土名漁港除去軽石置き場で採取) 8mm 以上の粒を取り除いた中からとりわけたもの (Unfiltered, Watershed 処理画像); 全 2128 粒

階級 (直径 cm)	粒数	%	アスペクト比 (長軸/短軸)
0.4-0.8	295	13.8	1.43
0.2-0.4	829	39.0	1.45
0.1-0.2	494	23.2	1.50
0.05-0.1	197	9.3	1.61
0.025-0.05	123	5.8	1.78
0.0125-0.025	80	3.8	2.02
0.0125 以下	110	5.2	計測不能

全量 1.23 kg の 31.3% (重量比) が 8mm 以上の大粒であった. 上表はその残りの粒径分布を代表するもの. 他の B, C, E に比べて 0.2cm 以上の粒の割合が多い傾向がある.

Sample B (安田 (あだ) 港で 0.04 平米から採取) とりわけ後 全 641 粒 生画像

階級 (直径 cm)	粒数	%	アスペクト比 (長軸/短軸)
0.8-1.6	8	1.2	1.52
0.4-0.8	32	5.0	1.67
0.2-0.4	95	14.8	1.64
0.1-0.2	109	17.0	1.67
0.05-0.1	53	8.3	2.07

0.025-0.05	66	10.3	2.05
0.0125-0.025	142	22.15	2.00
0.0125 以下	136	21.21	計測不能

ミカン網（2mm 目）で採取。撮影時の個々の粒子の分離が良かったので、生画像で分析を行った。安田港で採取したものは 0.1-0.4mm 径の間で一つのピークがあり、辺土名漁港採取のものと同じ傾向がある。また、辺土名漁港採取のものに比べて、細粒が卓越する傾向がある。また、アスペクト比が辺土名漁港のものに比べて若干大きい傾向がある。

Sample C（辺土名漁港奥で採取） 全 670 粒 （Watershed 処理画像）

階級（直径 cm）	粒数	%	アスペクト比 （長軸／短軸）
0.8-1.6	1	0.2	1.34
0.4-0.8	31	4.6	1.43
0.2-0.4	209	31.2	1.47
0.1-0.2	323	48.2	1.45
0.05-0.1	65	9.7	1.56
0.025-0.05	10	1.5	1.69
0.0125-0.025	16	2.4	1.85
0.0125 以下	15	2.2	計測不能

たも網（2mm 目，口径 36cm）で採取。

Sample E（辺土名漁港フェンス外側で採取） Watershed 処理画像：全 2019 粒

階級（直径 cm）	粒数	%	アスペクト比 （長軸／短軸）
0.8-1.6	3	0.1	1.48
0.4-0.8-	53	2.6	1.48
0.2-0.4	456	22.6	1.45
0.1-0.2	1142	56.6	1.47
0.05-0.1	267	13.2	1.47
0.025-0.05	39	1.9	1.62
0.0125-0.025	24	1.2	1.55
0.0125 以下	35	1.7	計測不能

水中ドローンに付着したものを水揚げ直後に採取。

画像解析の検証

ふるいわけの結果を画像解析したものを下記に示す。傾向は画像解析の結果と調和的。

Sample A 0.2-0.4cm の階級（ふるいわけ）：アスペクト比=1.54

Sample A 0.2cm 以下の階級（ふるいわけ）：アスペクト比=1.66

なお、ふるいわけ結果の観察でも、Sample A では粒子サイズが 0.4cm 以下になるとアスペクト比が増加する傾向はある

5. 簡易顕微鏡観察

試料を乾燥せずにそのまま観察した。表面張力による粒子の凝集が著しい。



Sample B . USB 顕微鏡 (MJ-ICT16 型) 使用. 倍率 50 倍. 背景の目盛りは 1mm. 2mm 以下の粒でも微小なわれ目の入っているものがある.



Sample E USB 顕微鏡 (MJ-ICT16 型) 使用. 倍率 50 倍. 背景の目盛りは 1mm. 2mm 以下の粒でも微小なわれ目の入っているものがある. 表面の透明な粒は海水由来の食塩の結晶と思われる.

顕微鏡で観察した結果ではアスペクト比が 2 以上のものが目立つ。顕微鏡観察時には表面張力による凝集により、最小面積側が見えていると考えられる。一方、先述の画像解析では乾燥させた上で紙の上に散布したものを観察しており、安定して定置された状態の最大面積側から観察した結果と考えられる。したがって先述の画像解析結果の最頻アスペクト比の 1.4~1.6 は最大軸とその次の軸の比率を代表していると考えられる。

6. 含水率

測定手順：

1. 観測所到着日に、現地で密封した各サンプルのうち D 以外をチャック付き袋に小分け計量し、密封.
2. 小分けしたサンプルをガラスシャーレに移し、計量の後乾燥機で 80℃72 時間の乾燥を実施. ガラスシャーレはサンプルを移し替える前に質量を計測した.
3. 72 時間後に計量.
4. 計量後、さらに 100℃で 24 時間乾燥を実施.
5. 100℃24 時間乾燥後、再計量.
6. 再計量結果の正味分と 3.の計量結果の正味分からもとめた質量変化が 1%以内であることを確認し、乾燥作業を終了した.
7. 再計量結果の正味分と 1.の計量結果から含水率を算出した.

結果：

- サンプル A (辺土名漁港軽石堆積場で採取 39.6g を処理)： 12 %
- サンプル B (安田 (あだ) 漁港水面で採取 36.8g を処理)： 49%
- サンプル C (辺土名漁港岸壁水面で採取 42.3g を処理)： 40%
- サンプル E (辺土名漁港入り口フェンス外側水面で採取 46.2g を処理)： 42%

空隙がすべて海水で飽和しておりかつ基質の密度を 2.5g/ml と仮定した場合、含水率 40%の場合の空げき率は 62.5%以上と思われる。飽和度が低かった場合には空げき率はもっと高い値を取り得る。

参考文献

- Arreeras, A., Arimura, M. ,2022. A study on shelter airport selection during large-scale volcanic disasters using CARATS open dataset. Transp. Res. Part C 129: 103263.
- Eiter T., Mannila, H., 1994. Computing discrete Fréchet distance. CD-TR 94/64. <http://www.kr.tuwien.ac.at/staff/eiter/et-archive/cdtr9464.pdf>.
- Olive, X., Basora, L. ,2019. Identifying anomalies in past en-route trajectories with clustering and anomaly detection methods. Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019). <https://www.researchgate.net/publication/333671170>.
- Newhall, C.G., Self, S., 1982. The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. J. Geophys. Res. 87, No. C2: 1231-1238.
- Olive, X., Basora, L., 2020. Detection and identification of significant events in historical aircraft trajectory data, Transp. Res. Part C 119: 102737.
- Olive, X., Sun, J., Lafage, A., Basora, L., 2020. Detecting events in aircraft trajectories: Rule-based and data-driven approaches, 8th Open Sky Symposium. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020059008>).
- Takebayashi, M., Onishi, M., Iguchi, M., 2021. Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan, J. Air Transp. Manag. 97: ID102136.

木俣順, 竹林幹雄, 2019. 東南アジア航路の国内寄港地集約に関するネットワーク分析, 運輸政策研究, 1-14 (J-STAGE 早期公開版, 2019 年 4 月 18 日) .