

令和元年6月3日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12828

研究課題名（和文）火山噴火時における避難施設の適正な配置計画に関する数理モデルの開発とその応用

研究課題名（英文）Mathematical models for shelter site selection in the event of volcanic eruption and their applications

研究代表者

田中 健一（Tanaka, Ken-ichi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：90408724

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：火山噴火の際に、登山者や周辺住民が安全に避難するための避難施設の配置方法を決定する数理モデルを構築した。特に、噴火時にランダムに飛来する噴石を、確率モデルを用いて表現し、登山者が退避壕に安全に避難する経路を求めるための問題を定式化した。その上で、避難者が最も安全な経路を選択した場合に、期待避難者数を最大化する配置問題、避難困難地点の避難確率を最大化する問題、一定の避難確率を保証する条件下で最小の施設数を求める問題等を構築し、最適解の特徴を比較した。さらに噴石の飛来の密度が噴火口からの距離と時間に依存して変化することに着目し、時空間ネットワークを用いた拡張モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実際の現場において退避壕の具体的な配置計画を立てる際には、火山の特性、登山者や周辺住民の人口分布、予算総額などの、各事例に特化した様々な要因を考慮する必要がある。一方で、基礎となる数理モデルを構築した上で、最適な計画案を導くための枠組みを整備することも重要な課題であるが、こうした試みはこれまで十分になされてこなかった。本研究は、オペレーションズ・リサーチの分野で古くから研究されてきた、施設配置問題の枠組みを土台として、退避壕を適切に整備するための新しい問題を構築し、火山防災対策に資するための基礎となる数理モデル構築を行った。

研究成果の概要（英文）：In Japan, attention has been paid to the installation of shelters to protect people from rocks flying out of the crater when a volcanic eruption occurs. We propose optimization models to decide shelter site for protecting people from flying rocks in a mountain trail. First, the maximax and maximin models are presented, where the former maximizes the expected number of people to be safely reach a shelter while the latter maximizes the smallest probability to be safely reach a shelter. We also present the set covering formulation that finds the minimum number of shelters by ensuring that every location receives a given level of safe evacuation. Furthermore, we propose dynamic site selection models that explicitly incorporate the fact that the risk to pass through each link of a network varies depending on the distance from the crater and the time elapsed from volcanic eruption.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：施設配置問題 数理最適化 避難モデル 退避壕 火山災害

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本は、数多くの活火山を有する世界有数の火山国である。2014年9月には、長野・岐阜県境にある御嶽山が噴火し、多数の死者・行方不明者が出た。これに伴い火山防災対策に関する議論が活発になされているが、噴火時に飛来する噴石から身を守るための退避壕(シェルター)の整備には、大きな関心が寄せられている(文献 )。

実際の現場において退避壕の具体的な配置計画を立てる際には、火山の特性、登山者や周辺住民の人口分布、予算総額などの、各事例に特化した様々な要因を考慮する必要がある。一方で、基礎となる数理モデルを構築した上で、計画案を定量的に評価したり、最適な計画案を導くための枠組みを整備したりすることも重要な課題であるが、こうした試みはこれまで十分に なされてこなかった。本研究は、オペレーションズ・リサーチの分野で古くから研究されてきた施設配置問題の枠組みを土台として、退避壕を適切に整備するための新しい問題を構築し、火山防災対策に資することを目的とする。

### 2. 研究の目的

火山噴火の際に、登山者や周辺住民が安全に避難するための施設を適切に配置するための数理モデルを構築し、火山防災対策に資することを目的とする。特に、噴火時の噴石から身を守るための退避壕(シェルター)に着目し、退避壕の新設という選択肢に加え、山小屋等の既存施設の機能強化を選択肢として導入し、予算制約の下で最適な計画案を導くための数理最適化問題を提案する。退避壕の配置候補地や避難者の分布、および避難者の退避行動をネットワーク上でモデル化し、最適計画案の基本特性を把握する。さらに、標高や山道・周辺道路網等の地理データを用いて実空間に適用し、有益な知見を提示することを目指す。

### 3. 研究の方法

火山噴火時に飛来する噴石から身を守る避難壕の配置問題の構築とその応用を中心課題に据えて研究を行った。噴石の飛来はランダムな事象と考えられる。そのため、確率モデルを構築して、登山者の避難方法や避難壕の配置に関する分析を行った。この状況を表現するために、登山道を表現するネットワークを構築し、ネットワークの各リンク(枝)において一定速度で避難する登山者が、噴石に衝突してしまう確率がポアソン分布に従うと仮定した(図1)。一般に、避難開始場所から避難先の退避壕へは複数の経路が存在する。そのなかで、避難者は最も安全な経路を選択すると仮定した。この仮定は、避難を最も効率的に行うことができる状況に対応し、退避壕の効果を最大限享受できた場合の基本ケースに位置付けられる。この条件の下で経路を求める問題が、最短経路問題に帰着されることを示した。その際に、各リンクのコストととしては、各リンクにおけるポアソン分布の平均値を与えればよい。この点は、実用的に優れているだけでなく、数理モデル構築の際の基本特性として分かり易い性質である。

上記の仮定の下で、退避壕の最適配置を求める施設配置問題を構築した。状況設定として、登山ネットワーク上の避難対象者の位置情報と、退避壕の配置候補地が予め設定されているものとする(図2)。さらに、任意の避難場所から任意の退避壕へ最も安全な経路を利用して避難する際に、退避壕まで安全に辿りつける確率が入力データとして整備されている。このデータは、上述した最短経路問題を解くことによって具体的に設定することができ、これは避難開始地点から避難先の退避壕まで、一度も噴石に衝突することなくたどり着ける確率を意味する。以上の想定の下で、いくつかの施設を配置する際に、設定した評価基準を最も望ましく実現する配置方法(各施設の配置場所)を求める数理モデルを構築した。具体的には、(1)期待避難者数を最大化するために指定個数の退避壕を配置する問題、(2)最も避難が困難な場所の避難確率を最大化するために指定個数の退避壕を配置する問題、(3)任意の地点において一定の期待避難確率を保証した上で配置する退避壕の個数を最小化する問題、を施設配置問題(文献 )として定式化した。これらは、配置場所と退避壕への割当てを意思決定の変数とする整数計画問題として記述することができるため、数理最適化ソルバーを用いて最適な計画案を導くことができる汎用性の高い枠組みである。そのため、様々な状況設定に応じた代替案を比較検討することが可能である。ここで状況設定として、登山者が登山道にどのように分布するか、噴火の規模や噴石が飛来する範囲はどの程度かといった情報を任意に与えることができる点は、本手法

の大きな特徴である。

先述した施設配置モデルでは、噴石の飛来する密度は、火山の噴火口からの距離のみに依存し、時間変化はない状況を考えて。しかし実際には、噴火後に最初に噴石が飛来するまでの時間や、最初の噴石飛来以降の噴石密度は、位置や時間経過に伴って変化する。このことを実現するために、時空間ネットワーク上の最適化問題として定式化を拡張した。時空間ネットワークとは、物理的なネットワークに時間軸を導入し、位置と時刻の情報を同時に扱うことを可能にしたネットワークのことである。時空間ネットワークの導入により、同一のリンク（登山道の一部区間）において、噴火時から噴石が最初に飛来するまでの間は噴石密度をゼロと設定し、最初に飛来してからの時間経過に伴って変化する密度を与えることで、より現実的な状況を扱うことができる。時間変化に伴って噴石の飛来密度が変化する状況において、退避壕までの最も安全な経路を選択する問題は、先のモデルと同様に最短経路問題として定式化することができる。さらに、空間的な側面のみに着目した施設配置問題を時間軸上で定式化する方法を構築した。

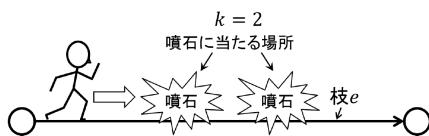


図 1: リンクを通過中に噴石に当たる確率

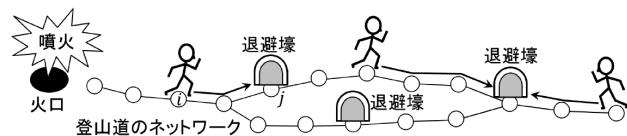


図 2: 退避壕への避難の様子

#### 4. 研究成果

火山噴火の際に飛来する噴石から身を守るための避難壕の配置は大きな関心を集めている。噴石の飛来はランダムな事象であり、確率モデルを構築して避難の安全性を記述する必要がある。これを、山道ネットワークの通過するリンク上のポアソン分布としてモデル化し、最も安全な経路が最短経路問題になることを示した。これをもとに、既存の施設配置問題と類似のアプローチにより、退避壕の最適配置問題を数理最適化問題として記述したことは一つの成果である。構築したモデルをもとに、浅間山などの現実の火山における山道をネットワーク表現し、噴火口からの距離に応じて噴石密度を変化させた場合に、期待避難者数を最大化するために指定個数の退避壕を配置する問題と最も避難が困難な場所の避難確率を最大化するために指定個数の退避壕を配置する問題の最適解を比較した結果、後者の方が火口付近により多くの施設が配置される傾向などが確認された。さらに、これらを噴石の飛来密度の時間変化を記述するための時空間ネットワークモデルへと拡張した。こうしたアプローチにより、噴石の飛来の仕方、登山者の分布、退避壕の配置可能な場所等を指定することにより、最適な計画案を導くことができる数理モデルを構築したことは意義のある結果であると考えられる。

さらに、本研究の成果は、災害時の避難方法や安全な避難経路を求める問題などに広く展開可能であると考えられる。例えば、山道ネットワークを通過する途中で噴石に衝突してしまう事象を記述する確率モデルは、地震が起きた際に道路の各区間に沿って陥没が起きたり、建築物などの倒壊によって閉塞が生じたりする事象とみなすことも可能である。避難施設の配置をその場所へのアクセスが確率的に困難になるような状況を考慮して検討する際にも、本アプローチは有効であろう。

一方で、これらの具体的な設定に応じて最適な配置案は大きく異なる。噴火時刻により登山者の分布は大きく異なるし、そもそも噴火規模や噴石の飛来の様子を事前に予想することは現段階では困難であろう。また、評価尺度としてどのような基準を採用すべきかという問題や、さらには、火山災害の対策のための予算のうち、退避壕の設置にどれだけを負担すべきか、といった社会的問題も関わってくる。実際の現場に本研究の成果を適用する上では、火山学の専門家や自治体の担当者等と連携し、モデルの適用方法について詳細な検討を重ねる必要がある。本研究の枠組みは、解決すべき状況設定に対する最適計画案を提示するための基本モデルとして、様々な局面で役立つものと考えられる。

<引用文献>

中央防災会議，防災対策実行会議「火山防災対策推進ワーキンググループ」：御嶽山噴火を踏まえた今後の火山防災対策の推進について：  
<http://www.bousai.go.jp/kazan/suishinworking/>, 2015.

M. S. Daskin: *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*, Second Edition, Wiley, 2013.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Ken-ichi Tanaka, Ryuhei Miyashiro and Yuichiro Miyamoto: A layered network formulation for the safe walking route design problem, *Journal of Adv Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications* anced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 12, Issue 3, 2018, JAMDSM0065 (11 pages). 査読有

〔学会発表〕(計2件)

Ken-ichi Tanaka and Shigeki Toriumi: Optimization models for shelter site location in the event of volcanic eruption, International Symposium on Scheduling 2019 (2019年7月，松江).

田中 健一，鳥海 重喜: 噴石シェルターの適正な配置計画に関する数理モデル，日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018 年春季研究発表会 (2018 年 3 月，東京).

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：鳥海 重喜

ローマ字氏名：TORIUMI Shigeki

所属研究機関名：中央大学

部局名：理工学部

職名：准教授

研究者番号(8桁): 60455441

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。