

火山噴火時の物流被害評価に関する 基礎的研究

尾山 梓¹・石倉 智樹²

¹非会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

²正会員 首都大学東京准教授 都市環境学部（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

E-mail: iskr@tmu.ac.jp

110の活火山をもつ我が国では、地震、水害と同様に火山噴火も甚大な被害をもたらす災害である。火山噴火時には噴出物による道路網の途絶に伴い地域間物流網に依存する多くの産業活動が影響を受けると想定され、こうした事態における物流被害評価を行うことは、災害に備えて適切な対策をとる上で重要であると考えられる。そこで本研究では、災害時の経済被害評価に関する既往研究と火山災害の特徴について整理した上で、火山噴火時の物流被害評価手法の検討と関東近郊の火山噴火時の被害推計を行うことを目的とする。

1. はじめに

日本は 110 の活火山を持つ火山大国であり、これらは数百年の周期で大規模な噴火活動を繰り返し、広域的な被害を与えてきた。例えば、1707年の富士山の宝永噴火は、火山噴出物により周辺の村々の農作地を農作不能の地に変え、江戸にまで数センチの火山灰を降らせた¹⁾。また浅間山の天明噴火においては、火山灰が江戸を含む関東地方の広い範囲に降り、噴出物によって発生した泥流が利根川を流下して河口の銚子や、分流して江戸にまで達したという事例がある²⁾。

江戸時代から現代へ、社会構造は大きく変化した。関東地方には人口や資産が集積し、高速道路網や鉄道網の整備によって、地域間の物流ネットワークは強力なものになった。現代の社会構造下において関東近郊の火山が噴火した場合には、火山災害により道路や鉄道のネットワークが途絶され、地域間取引に依存する農業や製造業等の企業活動は影響を受け、その被害は全国に波及すると想定される。地域間物流を基盤とする産業活動が火山噴火時に被る被害を評価することにより、災害時に重要となるリンクの特定や、それを考慮した産業界の対策立案等、多方面で火山災害の影響の軽減に寄与できると考えられる。

そこで本研究では、火山噴火時に想定される経済的被害

のうち、特に物流被害の評価手法について、現状を整理し、実際に関東近郊の火山噴火による物流被害を推計することを目的とする。

2. 既存研究と本研究の位置づけ

災害時の経済被害評価の手法については、既に多くの研究により様々なアプローチが提案されている。例えば地震災害時の被害評価手法については、地域経済モデルの一つである空間的一般均衡モデル（Spatial Computable General Equilibrium Model）を用いたもの³⁾、産業連関モデルと被災後の調査から間接被害を算出するもの⁴⁾がある。また梶谷⁵⁾は、複数の社会基盤が同時に被災した状況を対象に、産業部門間の交通量や道路混雑への影響を分析するためのアプローチとして、小さな空間スケールで整備された経済統計（小地域統計データ）と交通工学で用いられる経路選択モデルを活用した分析を行っている。

本研究で想定する災害発生時の道路ネットワークの途絶による経済被害評価に関する研究もいくつか蓄積されている。例えばKimら⁶⁾は産業連関モデルと利用者均衡配分モデルを統合したモデル（Integrated Input-Output and Transportation Network Model もしくはInterregional Commodity Flow Model：以下、ICFMと表現する）を構築し、経済被害評価の手法の検討及び災害時の被害想定を行っている。

ここではICFMを用いて、アメリカ全土の基幹交通のうち一部のリンクが途絶した際の地域別・産業部門毎の被害を推計している。梶谷ら⁷⁾はKimらのモデルに地域間移出入量と災害時の生産能力に関する制約式を加えた形で定式化し、阪神淡路大震災を対象としたケーススタディで実被害とモデルの推計値との比較からモデルの再現性について考察している。ICFMにより、地域間に波及するマクロな経済被害評価のみならず、地域間交通ネットワークのリンク一本ごとの性能が地域間の物流に与える影響を評価できるとしている。また土屋ら⁸⁾は、巨大東海地震発生時の地域間交通機能の損傷において発生する経済損失をSCGEモデルを用いて試算している。この研究では、交通機能の低下を迂回や混雑に伴う地域間交通費用の変化として表現し、その変化が財の価格水準等に及ぼす影響を計測するという手法を用いている。ICFMはモデルの構造上、短期から長期的な災害に対して適用できるのに対して、SCGEモデルは長期的な災害シナリオを前提としているという特徴がある。

一方、火山災害時の交通網途絶による経済被害評価の手法についても、既往研究もいくつか蓄積されている。糸井川ら⁹⁾は雲仙普賢岳噴火災害時の降灰被害により、「通勤通学に要する時間の増加」、「配送業務の遅れ」、「交通事故の発生」があると定性的に整理し、被害の連鎖構造分析を行っている。日野ら¹⁰⁾は、有珠山噴火に伴う鉄道貨物輸送不通時の輸送量の減少が地域経済に及ぼす影響を、地域間産業連関表を用いて定量的に分析している。この研究では平常時と災害時の鉄道貨物の輸送量変化率、鉄道貨物のシェア率を用いて生産と販売の変化率を求め、北海道と道外の2地域からなる地域間産業連関表より直接被害額を計測し、産業連関分析より間接被害を推計する手法を構築している。しかしこの手法は、災害発生後に輸送の減少量が既知の場合に適用できるものであり、災害前の経済被害評価には適用が難しい。また富士山火山防災協議会¹⁴⁾では、富士山噴火時の間接被害額について産業連関分析による推計が行われている。しかし、ここでは交通網途絶区間の詳細な条件設定が不明である、交通網の途絶に起因する地域別・産業部門別の被害評価は行われていないという点で研究の余地がある。

以上の現状を踏まえて、本研究では火山噴火時に発生する現象、交通網が途絶する区間・期間に関する文献調査を通して火山災害の特徴を明らかにし、その特徴に合うような物流被害評価の手法について検討する。

3. 火山噴火時の被害状況の整理

地震災害は地震動自体や斜面崩壊・液状化・津波によりほぼ同時に発生する一方、火山災害は溶岩流・降下火

砕物・火山ガス・空振など、媒体・移動様式・到達・継続時間が種別ごとに異なり、噴火ごとにこれらが複数に組み合わせる。さらに噴火により遠隔地に噴出物がもたらされ、それが残存し災害をより複雑にすると鈴木²⁾は指摘している。

これより、火山災害の発生現象の想定はその特殊性から有識者においても難解な課題であるため、本研究の被害シナリオ設定では既に検討された災害時のハザードマップや被害想定を踏襲することを念頭に文献調査を行った。また鈴木²⁾は、東京とその近郊に被害を与える危険性のある火山として、富士山、浅間山、箱根山、榛名山を挙げており、本研究でもこれを調査対象とした。まず4つの火山について、ハザードマップの整備状況と行政の取り組みを紹介する(表-1)。

表-1 関東近郊の火山の対策の現状

富士山	常時観測火山 ^{※1)} 。 ハザードマップあり ¹⁴⁾ 。 内閣府が立ち上げた委員会に火山工学の専門家が結集し作成。過去の災害実績が考慮されており被害想定まで行われている。作業工程が詳しく公開されている。 泥流等の山肌を流下する被害に対しては各地点において砂防事業が展開されている ¹⁵⁾ 。
浅間山	常時観測火山。 ハザードマップあり ¹⁶⁾ 。 作成手順は明らかにされておらず、富士山のそれよりも簡易的である。 富士山と同様、砂防事業が展開されている ¹⁷⁾ 。
箱根山	常時観測火山。 自治体(箱根町)が作成したハザードマップあり ¹⁸⁾ 。作成手順は明らかにされておらず、富士山のそれよりも簡易的である。
榛名山	活火山であるが、常時観測火山の指定はなし。 ハザードマップなし。

※1 活火山^{※2)}のうち今後100年程度の中長期的な噴火の可能性及び社会的影響を踏まえ、火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある火山。日本で50火山指定されている¹⁹⁾

※2 概ね過去1万年以内に噴火した火山及び現在活発な噴気活動のある火山¹⁹⁾

上記より、富士山については火山噴火現象の想定やハザードマップが最も緻密に検討されていることから、この時の報告書¹⁴⁾を主に参考にとすることとし、以下に火山災害時の発生現象とネットワークの途絶期間・区間を整理する。

(1) 火山噴火時の発生現象

火山噴火時の発生現象の詳細は表-2の通りである。

表-2 火山噴火時の発生現象について

現象	現象発生要因	※
溶岩流	マグマの地表流出	1
噴石, 降下火山灰	マグマの破碎, 火口周辺物質の飛散	1
火砕流	溶岩流, 噴煙柱の崩壊等	1
火砕サージ	火砕流に伴う希薄流の発生	1
水蒸気爆発	溶岩流の湿地への流入等	2
岩屑なだれ	山体膨張等	1
融雪型火山泥流	積雪地への火砕流流入	1
噴火に伴う土石流	降灰地域への降雨	1
噴火に伴う洪水	火山灰等の流出等	2
火山性地震	マグマの地下貫入等	2
津波	岩屑なだれの湖水への突入	2
空振	爆発的噴火による空気の圧縮	2
火山ガス	硫化水素等の放出	2

※火山防災マップでの取り扱い

1: 可能性マップとして表現

2: 範囲を特定できないため文章で表現

出典: 富士山火山防災協議会(2004)¹⁴を元に作成

先述の通り, 火山災害は複数の現象が組み合わさり発生する。災害時のマップが作成されたものうち, 降下火山灰(以下, 降灰と表現する。)は被災範囲が県間をまたぐような広域的なもの, 土石流は発生範囲は局所的であるが降灰範囲内の複数箇所が発生するもの, それ以外の溶岩流, 噴石, 火砕流, 火砕サージ, 岩屑なだれ, 融雪型火山泥流は火山付近の局所的な被害になるものと分かった。

本研究では地域間物流への被害推計を目的とするため, まずは広域的な影響を与える降灰と土石流を発生現象とする。

(2) 火山噴火によるネットワークの途絶期間・区間

降灰被害に伴う道路の途絶については, 過去に他の火山で実績がある。例えば, 1980年のセントヘレンズ山(アメリカ)での噴火では, 高速道路の5日間完全停止(降灰厚さ7.5cm), 市内交通の5日間の規制(降灰厚さ1.3cm)が報告されている¹¹。また1974年の新潟焼岳の噴火では1-2mmの降灰でも徐行運転になったという報告がある¹²。

表-3 火山噴火時のネットワークの途絶期間について

噴火の継続時間	16日間(宝永噴火の継続時間)
道路(降雨なし)	降灰が5cm/日以上で除灰不可能となり不通。不通の割合は1日目100%, 2日目50%, 3日目25%, 4日目0%と減少する。
道路(降雨あり)	降雨時は除灰作業車が動けず除灰できないとし, 5mm/日以上降灰で不通(有珠山の事例より)

出典: 富士山火山防災協議会(2004)¹⁴



図-1 火山噴火時の降灰範囲マップ

出典: 富士山火山防災協議会(2004)¹⁴

富士山については過去最大規模のものでデータの入手が可能である宝永噴火と同等の噴火が発生した場合を想定し, メーカー・施設の管理者・学識者等多数のヒアリング調査より表-3のような被害が想定されている。なお, 降雨がある場合の不通の割合の設定方法は不明であるため今後検討が必要である。

次に, 富士山噴火時のネットワークの途絶区間については, 図-1のような降灰範囲マップと表-3の被害想定を勘案することにより把握できる。この降灰マップは噴火の時期, 火口位置等の様々な要因を加味し被害が最も大きくなる場合のものである。なお, 他の火山での降灰被害の実績や降灰被害に伴う途絶期間や区間に関しては, 降灰予報の高度化に向けた検討会¹¹や玉置ら¹³に詳しい。

調査より, 降灰による被害は広域的かつ短期的な被害を与えることがわかった。一方土石流による被害は, 報告書¹⁴でも想定されておらず他の既往研究も未だ見つけられないことから, 現段階では対象としないこととする。

4. 固定効果重力モデルによる基礎分析

降灰被害後の各地域間の物流取引量の変化を概算し,

影響が大きそうな地域間を把握するための簡易的な回帰分析を行った。ここでは、都道府県間の移動所要時間と各都道府県のダミー変数から成る固定効果重力モデルを用いた。パラメータ推計したモデル式は式(1)の通りである。

$$\ln Y_{ij} = \alpha + \beta_1 odmy_1 + \dots + \beta_{47} odmy_{47} + \beta_{48} ddm_1 + \dots + \beta_{94} odmy_{47} + \beta_{95} \ln X_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

ここで、 Y_{ij} ：都道府県*ij*間の物流取引量、 α, β ：パラメータ、 X_{ij} ：都道府県*ij*間の移動所要時間、 ε_{ij} ：誤差項、 $odmy$ ：発都道府県ダミー、 ddm ：着都道府県ダミーである。また各変数のデータは表-4のように設定している。

表4 変数の設定について

県間物流量	都道府県間流動量（トン／日）（物流センサスより）
都道府県間所要時間	Google mapのルート検索機能より隣接県間の所要時間を調べ、隣接行列を作成した。（この時各都道府県のノードは県庁所在地とした。）これを用いて最短経路探索のダイクストラ法により算出した。

推計されたモデルのパラメータを表-5に示す。

表-5 パラメータ推定結果

		[t値]
α	28.284	76.46
β_{95}	-1.871	-48.78
R^2	0.785	

次に、災害時の降灰被害により静岡—神奈川県間、神奈川—東京都間のリンクが途絶した場合の全都道府県間所要時間を計算し、推計した固定効果重力モデルに代入することで災害時の全都道府県間の物流取引量を算出した。

結果を図-2と表-6に示す。2070の県間（46×45、各県間両方向、沖縄県と県内間データは除いている）のうち274の県間で物流量の減少が推計された。図-2には物流量の減少があった県間のみプロットしている。災害時に県間所要時間が多くなると物流取引量が減ると仮定モデルを構築しており、表-6のように減少率別に当該県間をまとめると、被害の大きい順に、南関東圏と神奈川県間、次に福島や愛知等と被災した県間、続いて愛知・兵庫—東京・神奈川の取引の順になることが分かる。以上より、神奈川—静岡、神奈川—東京間のリンクが途絶す

ることにより、途絶した県間のみならず南関東圏間や日本の東西間における産業活動に影響があることが示唆された。

この分析結果は災害時のネットワークの混雑や生産能力の変化を考慮しないという大胆な仮定を置いたものだが、物流への影響が大きいと予想される地域についても通しを得ることが出来た。

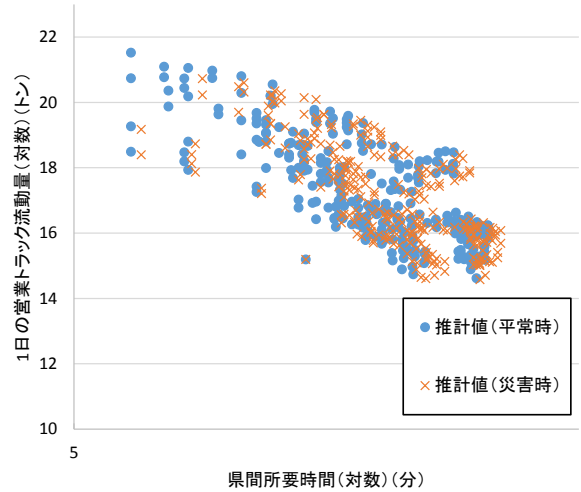


図-2 県間所要時間と県間物流取引量の関係

表-6 減少率と当該県間

減少率(平常時比)	当該県間
90%以上	東京・埼玉・千葉↔神奈川
70-79%	茨城・静岡↔神奈川
60-69%	東京↔静岡, 群馬・栃木↔神奈川
50-59%	福島・愛知↔神奈川, 千葉・埼玉↔静岡
40-49%	宮城・岐阜↔神奈川, 愛知・岐阜↔東京・千葉, 茨城↔静岡 等
30-39%	千葉↔三重, 兵庫・大阪↔神奈川・東京 等

5. 火山噴火時の経済被害評価へのICFMの適用

(1) ICFMの紹介

前述の広域的かつ短期的であるという火山災害の特徴を踏まえ、本研究では、Kimら⁹⁾と梶谷ら⁷⁾によるICFMを踏襲して物流被害評価を行うこととし、以下でICFMを紹介する。

前節でも述べたように、ICFMはエントロピー型分布・利用者均衡配分統合モデルに地域間産業連関構造の制約式を加えた形で表される。

まず各リンクの交通量を以下のように定式化する。

$$\sum_m \sum_{ijr} h_{ijr}^m \phi_{ijr}^a = f_a \quad (2)$$

ここで、 h_{ijr}^m ：経路 r を利用した、産業部門 m の地域 i から地域 j への交易量（トン/年）， f_a ：リンク a の交通量（トン）， ϕ_{ijr}^a ：リンク a を利用する場合は1，利用しない場合は0である．この時，ICFMで想定する目的関数と制約式は次の式で表される．

$$\min Z(h,x)=\sum_a \int_0^{f_a} d_a(\omega) d\omega + \sum_m \sum_{ij} d_{ij} \frac{x_{ij}^m}{g^m} + \sum_m \frac{1}{\beta^m g^m} \sum_{ij} x_{ij}^m \ln(x_{ij}^m) \quad (3)$$

$$\sum_i (x_{ij}^m) = \sum_n a^{mn} \left(\sum_k x_{jk}^n \right) + y_j^m + E_j^m - M_j^m \quad (4)$$

$$\sum_r h_{ijr}^m = \frac{x_{ij}^m}{g^m} \quad (5)$$

$$h_{ijr}^m \geq 0 \quad (6)$$

ここで目的関数について、 $d_a(\omega)$ ：リンクパフォーマンス関数、 x_{ij}^m ：産業部門 m の地域 i から地域 j への交易额（円/年）、 β^m ：費用感度パラメータである．また、制約式 (4) から (6) の変数について、 a^{mn} ：投入係数、 y_j^m ：産業部門 m の地域 j における域内最終需要（円）、 E_j^m ：産業部門 m の（被災）地域外 j への移出額（円/年）、 M_j^m ：産業部門 m の（被災）地域外 j からの移入額（円/年）、 g^m ：交通量（トン）と交易额（円）の変換係数である．式 (4) は地域間産業連関構造を示す式、式 (5) は交通量と交易额の変換式、式 (6) は全リンクの交通量の和は負数にならないことから、非負条件を表す制約式である．

モデルの特徴は、地域間の金銭的取引量を実際の交通ネットワーク上で配分するという点にある．これにより、災害時に交通コストが急激に変化したような場合に、産業連関構造を満たしながら取引量に変化する様子を描写することが可能となる．

次にモデル適用に際して、前提条件を以下に示す．

- ・外生変数として投入係数 a^{mn} 、最終需要 y 、移出量 E 、移入量 M 、変換係数 g を設定する．
- ・物流以外の一般の交通量については考慮しない．
- ・地域間輸送は全て道路によって行われる設定である．（輸送機関別の分担率を導入することで対応が可能）
- ・平常時と災害時の両ケースにおいて、同じ費用感度パラメータ β^m を用いる．

(2) ICFMの推計結果

ICFMの推計結果と物流被害に関する分析結果については講演時に譲る．

参考文献

- 1) 国立歴史民俗博物館：ドキュメント災害史 1703-2003，東京印書館，2003
- 2) 鈴木毅彦：東京とその周辺における火山災害の歴史と将来，*Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*,122(6) 1088-1098,2013
- 3) 小池淳司，上田孝行，秋吉盛司：社会資本ストック崩壊による経済的被害の空間的把握—空間的応用一般均衡モデルによる計量厚生分析—，*土木計画学研究・論文集*，Vol.21,2004,pp.367-374
- 4) 梶谷義雄，山野紀彦，多々納裕一：2004年新潟中越地震による地域経済への影響と今後の課題，*土木計画学研究・講演集*,Vol31,2005,182頁
- 5) 梶谷義雄：地震災害時におけるライフライン被害の産業部門への影響評価—小地域メッシュ統計を活用した2004年新潟県中越地震時の交通分析，*日本地震工学会論文集*，第10巻，第2号，2010
- 6) Tschangh John Kim, Heejoo Ham, David E. Boyce: Economic impacts of transportation network changes—Implementation of a combined transportation network and input-output model,2002,papers in Regional Science, Vol81,pp223-246
- 7) 梶谷義雄，水上裕治，皆川勝，吉田郁政：交通ネットワーク上の貨物流動予測モデルを用いた自然災害の経済的影響に関する基礎的研究，*土木計画学研究・論文集* vol.26 no.1, 2009
- 8) 土屋哲，多々納裕一，岡田憲夫：巨大地震災害時の交通施設の機能低下に起因する社会経済損失の計量化に関する研究，*京都大学防災研究所年報*，第47号B，2004
- 9) 糸井川栄一，熊谷良雄，村尾修，岡本直久，小田淳一，菅原康司：都市域における火山噴火による降灰被害の連鎖構造に関する研究，*地域安全学会梗概集*，No.12, 2002
- 10) 日野智，武村謙，岸邦宏，東本靖史，佐藤馨一：地域間産業連関表を用いた鉄道貨物不通時における経済的影響の計測，*土木計画学研究・講演集(CD-ROM)*，vol.30,2004
- 11) 国土交通省気象庁：降灰予報の高度化に向けた検討会（第1回）の概要について「参考資料2：降灰の影響及び対策」，2012
- 12) 須藤茂：降下火山灰災害—新聞報道資料から得られる情報，*地質ニュース*，No.604, pp41-65,2004
- 13) 玉置哲也，多々納裕一：降下火山灰による道路機能障害評価とその復旧順序決定手法の提案，*自然災害科学 JJSNDS33 特別号* 165-175, 2014
- 14) 富士山火山防災協議会：富士山ハザードマップ検討委員会報告書，内閣府，2004

- 15) 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所, 富士山砂防事業, <http://www.cbr.mlit.go.jp/fujisabo/jigyousabo/jigyoutop.html>, 2017年7月18日参照
- 16) 国土交通省利根川水系砂防事務所, 浅間山火山防災マップ, <http://www.ktr.mlit.go.jp/tonesui/tonesui00017.html>, 2017年7月18日参照
- 17) 平成24年度火山砂防事業評価検討委員会, 資料2火山砂防事業について, http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h24_kazansabo_hyoka.html, 2017年7月18日参照
- 18) 箱根町, 火山防災マップ全域図, <https://www.town.hakone.kanagawa.jp/index.cfm/10,1218,46,167.html>, 2017年7月18日参照
- 19) 国土交通省気象庁, 活火山とは, http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html, 2017年7月18日参照
- 20) 土木学会土木計画学研究委員会: 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 社団法人土木学会, 2000
- 21) 井出眞弘: Excelによる産業連関分析入門, 産能大学出版部, 2003
- 22) Wilson, A.G.: Entropy in urban and regional modeling. London, Pion, 1970