

関東近郊の火山噴火に対する 道路網接続性評価

平井 勝浩¹・石倉 智樹²

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

E-mail:hirai-katsuhiko@ed.tmu.ac.jp

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

E-mail:iskr@tmu.ac.jp

大規模火山の噴火による火山灰の降灰は道路ネットワークに広範囲の途絶をもたらす。道路ネットワークの寸断によって、避難や救援物資の搬送ができない孤立地域が発生し、サプライチェーンが途切れることによる追加的な被害も引き起こす。

そこで、本稿では災害の中でも特に火山噴火による降灰に着目して、実際に関東近郊の火山が噴火した場合の降灰被害を想定し、接続脆弱性の観点から各ODペア間の非重複経路数を求め道路網の接続性を評価する。

Key Words : volcanic eruption, ash fall, network vulnerability, critical link, distinct paths

1. はじめに

火山大国である我が国には多数の活火山が存在し、それらが大規模噴火をすれば非常に広範囲に被害をもたらす可能性を秘めている。中でも火山灰の降灰は特に広域的かつ継続的な被害をもたらす危険性が高く、1707年に発生した富士山の宝永噴火では、降灰は16日間に渡り、その被害は千葉県や茨城県南部にまで渡ったとされている¹⁾。

道路網においては、降灰によって視界不良、スリップ、エンジン機器の故障などの被害が想定されるが、1日あたり5cm以上の降灰(雨天時は5mm以上)があった場合には道路は通行不能になる²⁾。しかし、1980年のセントヘレンズの噴火では6mm、1995年の桜島での噴火では7~8mmの降灰で高速道路が通行止めになる³⁾など、道路としての安全な機能を果たせないと判断された場合はこの限りではない。

これを考慮した上で、関東近郊の活火山の大規模噴火を想定すると、火山周辺にとどまらず、首都圏の主要道路ネットワークにも途絶が生じることは想像に難くない。広範囲に及ぶ道路網の途絶は緊急物資の搬送や被害の復旧に遅れをもたらす、孤立地域を発生させる。サプライチェーンの寸断による追加

的な損害も考慮に入れると被害はさらに甚大になる。このような被害を軽減するには、道路網全体において接続性に大きな影響を及ぼす優先的に復旧すべき場所を特定する必要がある。

火山の噴火は他の災害と比較して、災害の発生場所が決まっている分、被災する場所もある程度予測することができるが、噴火の被害から道路網の接続性の低下を分析した研究は過去になされていない。

そこで、本研究では関東近郊の活火山の内、富士山・浅間山の2火山の噴火について、噴火時の火山灰の降灰予想図から途絶するリンクを想定した上で、道路網の接続脆弱性の観点に着目して二拠点間の接続性を評価する非重複経路数とネットワーク全体の接続性に影響を及ぼす重要なリンクを求めることで、火山噴火時に孤立する可能性の高い地域と、ネットワーク全体により影響を与えるであろうリンクを特定することを目的とする。

2. 接続性の評価方法

(1) 概要

道路網の接続性を評価する際、一般的に連結信頼性の考え方をを用いて評価される。これは、道路ネット

トワークの要求機能のうちの随意性（可達性）にあたり、ノードペア間の移動が可能であるかを扱うもので、狭義では「ネットワークの構成要素がある確率をもって途絶する場合、あるノードペア間が連結されている確率」と定義される⁴⁾。この生起確率を算出するものであるが、不確実かつまれな事象である災害を取り上げると、その発生確率を精度良く予測することは困難であり、解に大きなばらつきが生じる可能性がある。

そこで、災害の発生確率に依存せず、その発生時の損失のみに着目して評価を行う接続脆弱性の考え方が提案されている。倉内⁵⁾は、この接続脆弱性を「二点間の接続性について、途絶確率を考慮せず途絶発生時の影響のみによるネットワークの弱さ」と定義付けている。瀬戸ら⁶⁾は、重複のないN本の経路が存在するネットワークにおいて、最大N-1本のリンクが途絶したとしてもOD間の接続性が確保されるというN-edge-connected network⁷⁾の概念を援用して非重複経路数算出モデルを構築し、途絶がネットワークの接続性に深刻な影響を及ぼすクリティカルリンクの特定方法を提案し、それを実際の京阪神道路ネットワークに適用し提案手法の妥当性を示した。また倉内ら⁸⁾は、これらの手法の活用例として台湾道路ネットワーク内の災害センターの最適配置を行った。

(2) 非重複経路数

脆弱性の観点から道路ネットワークを評価するにあたって、最も一般的な指標が非重複経路数算出モデルである。これは、あるODペア間について、リンク重複のない経路の本数を示す。最悪のケースを想定する脆弱性解析においては非重複経路数がN本のODペア内で、N-1本のリンクが途絶したとしてもネットワークの接続性は確保されるという評価になる。

非重複経路算出モデルの定式化するにあたって、まず、ネットワークを $G(V, E)$ の有向グラフとして表す。ただし、 V はノード集合、 E はリンク集合である。また、 x_a をあるリンクが非重複経路を構成する場合は1、そうでなければ0を示すbinary型の決定変数とする。ここで、ODペア rs 間に n_{rs} 本の非重複経路があるとする。この時、出発地 r からの非重複経路を構成するリンク数と到着地 s への非重複経路を構成するリンク数は、非重複経路数 n_{rs} に等しい。逆に、出発地 r への経路構成リンク数、到着地 s からの経路構成リンク数は共に0となる。また、ネットワーク中のノード $i(i \in V, i \neq r, s)$ に流入する経路構成リンク数と流出する経路構成リンク数は等しくなる。これらの条件か

ら、以下の混合線形整数計画問題を解くことであるODペア間についてリンク重複のない経路の本数を求める事ができる。

$$\begin{aligned} & \max n_{rs} & (1) \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{a \in \text{out}(r)} x_a = \sum_{a \in \text{in}(s)} x_a = n_{rs} \\ & \sum_{a \in \text{in}(r)} x_a = \sum_{a \in \text{out}(s)} x_a = 0 \\ & \sum_{a \in \text{in}(i)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(i)} x_a = 0 \\ & \quad \forall i \in V, i \neq r, s \\ & \quad x_a = \{0,1\} \end{aligned}$$

ここで、

n_{rs} : rs 間の非重複経路数

$\text{in}(i)$: ノード i に流入するリンクの集合

$\text{out}(i)$: ノード i から流出するリンクの集合

この式を解くことで各ODペアにおけるリンク重複のない経路数を算出することができる。ただし、目的関数である非重複経路数の唯一性は確保されているが、決定変数である x_a の値は一意には決まらない場合がある。それをもっともらしい値にするために、総所要時間を最小にする x_a を次の式で求める。

$$\begin{aligned} & \min_x \sum_{a \in \text{out}(r)} c_a x_a & (2) \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{a \in \text{out}(r)} x_a = \sum_{a \in \text{in}(s)} x_a = n_{rs} \\ & \sum_{a \in \text{in}(r)} x_a = \sum_{a \in \text{out}(s)} x_a = 0 \\ & \sum_{a \in \text{in}(i)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(i)} x_a = 0 \\ & \quad \forall i \in V, i \neq r, s \\ & \quad x_a = \{0,1\} \end{aligned}$$

ここで、

c_a :リンク a の所要時間

これによって、決定変数 x_a の値が一意に決まる。

算出された非重複経路数が比較的少ないODペアが脆弱性が高いと言える。

(3) リンク重要度

非重複経路数の算出方法を用いてリンク重要度を求める。対象となるリンクを途絶させるという条件

($x_a=0$)を加えて非重複経路算出モデルを再度計算して、得られるリンク a 途絶後の n_{rs} を用いてリンク重要度 LCI を以下の式のように求める。

$$LCI_a = \sum_{rs} \left(1 - \frac{\text{リンク}a\text{途絶後の}n_{rs}}{\text{リンク}a\text{途絶前の}n_{rs}}\right) \quad (2)$$

この値が大きいと、そのリンクが途絶した場合の非重複経路の減少数が多く、クリティカルなリンクであるといえる。

以上のアルゴリズム計算手順を図-1に示す。

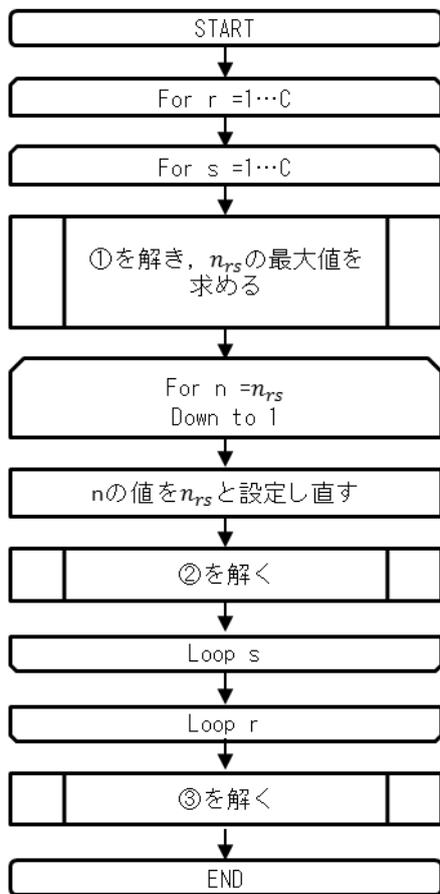


図-1 アルゴリズム計算手順

3. ネットワーク

(1) 用いるネットワーク

非重複経路数の算出に用いるネットワークは、沖縄県を除く46の都道府県庁が位置する場所をノードとし、隣接県間にリンクを配置したネットワークである¹⁰。つまり、都道府県をノード、県境をリンクとする粗いネットワークを用いること

で、広範囲に及ぶ降灰特有の途絶シナリオに適しているといえる。ネットワークは有向グラフであるが、逆方向でも同様となるように設定しているので、ODを入れ替えても経路に違いは生じないようにになっている。

(2) 接続リンク本数

途絶前の46ノードが、それぞれ接続しているリンクの数を以下の表-1に示した。2-(2)より、非重複経路数は出発地 r から流出する非重複経路を構成するリンク数と到着地 s へ流入する非重複経路を構成するリンク数に等しいので、それぞれのノードをODに含む場合、その接続リンク数を上回る非重複経路が存在することはない。

表より、北海道・長崎県の接続リンク数が1本と最も少なくなっており、岐阜県の接続リンク数が7本と最も多くなっている。このことから、北海道、長崎県ではどの都道府県と経路を作る場合でも非重複経路数は多くて1本となり、岐阜県は7本の非重複経路を結ぶことが可能だが、他の都道府県の接続リンク数は多くても5本なので非重複経路数は最大でも5本となる。

表-1 都道府県名と接続リンク本数

都道府県名	接続リンク数	都道府県名	接続リンク数
北海道	1	三重県	5
青森県	3	滋賀県	5
岩手県	3	京都府	5
宮城県	4	大阪府	4
秋田県	4	兵庫県	5
山形県	4	奈良県	5
福島県	5	和歌山県	3
茨城県	4	鳥取県	4
栃木県	3	島根県	3
群馬県	4	岡山県	4
埼玉県	5	広島県	5
千葉県	4	山口県	4
東京都	4	徳島県	4
神奈川県	4	香川県	3
新潟県	5	愛媛県	5
富山県	3	高知県	2
石川県	3	福岡県	4
福井県	4	佐賀県	2
山梨県	5	長崎県	1
長野県	5	熊本県	4
岐阜県	7	大分県	3
静岡県	3	宮崎県	3
愛知県	4	鹿児島県	2

(3) 非重複経路数

まず、リンク途絶がない場合の非重複経路数を算出した。非重複経路数を算出する OD ペアは $46 \times 45 = 2070$ 通りある。全ての非重複経路数の合計は 4634 本あった。したがって経路毎の平均は 2.24 本となり、各都道府県の平均は 100.74 本となる。

このようにして求められた非重複経路数からリンク重要度を求める。

(4) リンク重要度

3(3)によって求められた非重複経路数から、リンク重要度を算出する。

途絶リンクを含む関東近郊の 17 リンクのリンク重要度を算出したところ、下の表-2 のようになった。これを見ると、17 リンクの重要度の合計値が 239.12 であり、リンク毎の平均は 14.07 となった。これより、リンク重要度が 20 を超えている神奈川-静岡、茨城-栃木、群馬-栃木のリンクが他のリンクと比較してもかなり大きい値であるので、クリティカルリンクであるといえる。

表-2 関東近郊リンクのリンク重要度

リンク	リンク重要度	リンク	リンク重要度
神奈川-静岡	25.83	神奈川-山梨	9.7
東京-山梨	9.7	群馬-長野	9.7
東京-神奈川	16.5	千葉-神奈川	16.5
埼玉-東京	9.7	千葉-東京	16.5
茨城-埼玉	10.5	茨城-千葉	18.1
茨城-栃木	27.43	群馬-埼玉	10.5
群馬-栃木	25.83	埼玉-山梨	2.0
埼玉-千葉	9.7	長野-山梨	2.4
静岡-山梨	18.53		

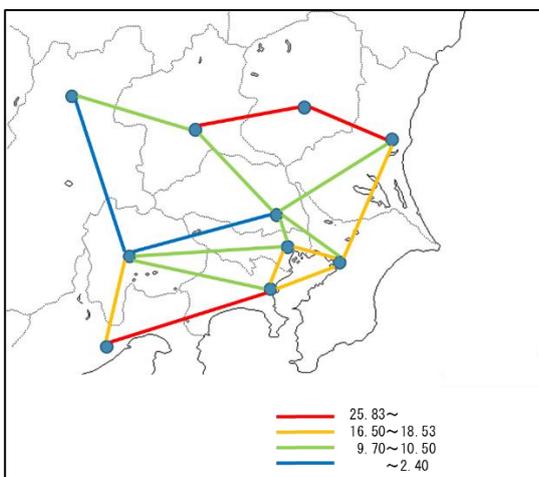


図-2 関東近郊リンクのリンク重要度

4. 比較結果

(1) シナリオ設定

今回は関東近郊の火山の内、想定される噴火の規模や降灰予想がなされているかなどを考慮して、富士山と浅間山を被害想定の対象とする。富士山の降灰予想マップ²⁾より通常時の途絶リンクと雨天時の途絶リンクを設定する。また、浅間山の降灰予想マップ¹⁾には降灰量に関する具体的な記述がないので途絶リンクは通常時のみに留めた。途絶するリンクは表-3 に示すとおりになる。それぞれのシナリオにおいて、これらのリンクが途絶したとして再度非重複経路数を算出した。

表-3 想定される途絶リンク

火山	途絶リンク
富士山 (通常時)	東京-山梨
	神奈川-山梨
	神奈川-静岡
富士山(雨天時)	埼玉-東京
	千葉-東京
	千葉-神奈川
	東京-山梨
	東京-神奈川
	神奈川-山梨
	神奈川-静岡
山梨-静岡	
浅間山	群馬-長野

(2) 富士山噴火(通常時)

富士山の通常時の噴火を想定して、神奈川-静岡、神奈川-山梨、東京-山梨のリンクを途絶させた。計算方法としては、対象のリンクのデータを消し、再度非重複経路数の計算を行う。このようにして計算を行った結果、合計119本の経路減少が見られ、そのうち神奈川県とつながる経路が最も多く43本減少していた。次いで、静岡県で26本、山梨県で22本、東京都・千葉県で19本の経路減少が見られた。さらに、神奈川県や山梨県とつながる20のODでは2経路減少しているところも見られた。経路が減少していたODの多くは途絶リンクに接続している神奈川・静岡・山梨・東京につながっているが、千葉-埼玉など上記4都県とつながっていない経路が17本減少している。また、途絶によって複数あった経路が1本以下になったODは見られなかった。これらの結果から、神奈川県が脆弱なノードで

あり、被災地とは離れた地域でも接続性に影響を及ぼすことが分かる。

また、リンク単位で見えていくと、今回途絶したリンクの中で神奈川ー静岡がクリティカルリンクであるので、途絶した3リンクの内、よりネットワークに大きな影響を及ぼしたリンクは神奈川ー静岡であり、優先的に復旧をすべきリンクだと分かる。

表4 非重複経路数が2本減少した経路

神奈川ー福島	神奈川ー茨城
神奈川ー群馬	神奈川ー埼玉
神奈川ー千葉	神奈川ー東京
神奈川ー新潟	神奈川ー福井
神奈川ー山梨	神奈川ー長野
神奈川ー岐阜	神奈川ー愛知
神奈川ー三重	神奈川ー滋賀
神奈川ー京都	神奈川ー大阪
神奈川ー奈良	山梨ー埼玉
山梨ー新潟	山梨ー長野

表5 途絶リンクとつながらない減少経路

埼玉ー新潟	埼玉ー長野
千葉ー福島	千葉ー茨城
千葉ー群馬	千葉ー埼玉
千葉ー新潟	千葉ー福井
千葉ー長野	千葉ー岐阜
千葉ー愛知	千葉ー三重
千葉ー滋賀	千葉ー京都
千葉ー大阪	千葉ー奈良
新潟ー長野	

(3) 富士山噴火(雨天時)

次に、富士山の雨天時の噴火を想定して、埼玉ー千葉、埼玉ー東京、千葉ー東京、千葉ー神奈川、東京ー山梨、東京ー神奈川、神奈川ー山梨、神奈川ー静岡、山梨ー静岡のリンクを途絶させ、非重複経路数を算出した。途絶なしの場合と比較して、合計966本の減少が見られた。中でも、東京都と神奈川県は接続リンクのすべてが途絶したことにより、全都道府県との非重複経路数が0、すなわち孤立する結果となった。2都県に次いで、千葉県が82本、静岡県が65本、山梨県が52本と、非常に多くの経路が減少した。OD毎に見ると、東京都や神奈川県で4本減少した経路が見られたほか、千葉ー群馬、山梨ー長野など東京都・神奈川県以外でも3本の減少があった経路が18本見られた。また、途絶リンクに

接続している神奈川県、静岡県、東京都、山梨県、千葉県、埼玉県をODに含まない経路が52本減少した。このことから、雨天時に富士山が噴火すると、東京都・神奈川県の都心部を中心に非常に広範囲に甚大な被害が波及すると予想される。

リンク毎に見ると、4(2)でも挙げていたクリティカルリンクである神奈川ー静岡に加え、千葉ー東京、千葉ー神奈川、東京ー神奈川、山梨ー静岡の4リンクも比較的リンク重要度が高くなっており、今回の多大な経路減少はこれらのリンクが途絶したことが原因の一つとして考えられる。

表6 東京・神奈川を除き3本減少した経路

埼玉ー千葉	埼玉ー山梨	千葉ー福島
千葉ー茨城	千葉ー群馬	千葉ー新潟
千葉ー福井	千葉ー山梨	千葉ー長野
千葉ー岐阜	千葉ー愛知	千葉ー三重
千葉ー滋賀	千葉ー京都	千葉ー大阪
千葉ー奈良	新潟ー山梨	山梨ー長野

表7 途絶リンクとつながらない減少経路

福島ー茨城	福島ー福井	福島ー岐阜	福島ー愛知
福島ー三重	福島ー滋賀	福島ー京都	福島ー大阪
福島ー奈良	茨城ー群馬	茨城ー新潟	茨城ー福井
茨城ー長野	茨城ー岐阜	茨城ー愛知	茨城ー三重
茨城ー滋賀	茨城ー京都	茨城ー大阪	茨城ー奈良
群馬ー福井	群馬ー岐阜	群馬ー愛知	群馬ー三重
群馬ー滋賀	群馬ー京都	群馬ー奈良	新潟ー福井
新潟ー長野	新潟ー岐阜	新潟ー愛知	新潟ー三重
新潟ー滋賀	新潟ー京都	新潟ー大阪	新潟ー奈良
福井ー長野	福井ー愛知	長野ー岐阜	長野ー愛知
長野ー三重	長野ー滋賀	長野ー京都	長野ー大阪
長野ー奈良	岐阜ー愛知	愛知ー三重	愛知ー滋賀
愛知ー京都	愛知ー大阪	愛知ー奈良	

(4) 浅間山噴火

次に、浅間山の噴火を想定して群馬ー長野のリンクを途絶させた場合の非重複経路数を求めた。富士山の噴火と比較して経路の減少数が20本と少ない。しかし、そのうちの17本が群馬県につながる経路である事から、群馬県の接続性に影響を与えていることがわかる。また、減少しているすべての経路が途絶リンクに接続している群馬県か長野県につながる経路である。このことから、浅間山の噴火では、富士山のケースとは対照的に接続性の低下が被災地に集中していると考えられる。

途絶リンクである群馬ー長野については、リンク重要度が9.70と比較的小さい値となっているので、そ

の結果、被害があまり広範囲に波及しない結果となったのではないかと考えられる。

表-8 非重複経路数減少経路

群馬－福島	群馬－茨城	群馬－埼玉
群馬－千葉	群馬－東京	群馬－神奈川
群馬－新潟	群馬－福井	群馬－山梨
群馬－長野	群馬－岐阜	群馬－愛知
群馬－三重	群馬－滋賀	群馬－京都
群馬－大阪	群馬－奈良	長野－埼玉
長野－新潟	長野－山梨	

5. まとめ

(1) まとめ

本研究では、実際の火山の噴火を想定して、噴火前と噴火後のネットワークの変化から波及する被害について評価・分析を行った。それにあたって、手法として接続脆弱性の観点から非重複経路数とリンク重要度の2つの指標を用いて評価することによって、定量的に分析することができた。富士山の噴火を想定した際、神奈川県が脆弱なノードであり、特に神奈川県と静岡県を結ぶリンクがネットワークの冗長性を下げていることが分かった。また、浅間山噴火の際は、群馬県の接続性の低下が比較的大きい一方で、被災地から離れた地域にはあまり波及しないことが分かった。

(2) 今後の展望

本研究では、脆弱性から火山噴火時のネットワークの評価を行うことができたが、あくまで経路がつながっているかに重点を置いて評価を行ったため、リンク毎の所要時間や容量を考慮していない。したがって、実際にネットワークを利用してOD間の移動を行うにあたって、あまりにも長大な迂回を強いられたり、一つのリンクに交通量が集中して渋滞を起こしてしまう可能性もはらんでいる。そのため、最短経路と比較して所要時間があまりに長い経路は非重複経路から外したり、ネットワークの交通容量を考慮した評価が行えるとより現実的な評価に近づいていくと考えている。

参考文献

- 1) 内閣府：広域的な火山防災対策に係る検討会「大規模火山災害対策への提言」参考資料，2013.
- 2) 内閣府：富士山ハザードマップ検討委員会報告書，2004.
- 3) 気象庁：降灰予報の高度化に向けた検討会「参考資料2：降灰の影響及び対策」，2012.
- 4) 中山昌一朗，朝倉康夫：道路交通の信頼性評価，コロナ社，2014.
- 5) 倉内文孝：Network Science を援用した交通ネットワーク信頼性分析の可能性，2017.
- 6) 瀬戸裕美子・倉内文孝・宇野伸宏：脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.37，CD-ROM，2008.
- 7) Grötschel, M: Design of survivable networks. Hand-book in Operations Research and Management Science, 7, pp.617-672, 1995.
- 8) 倉内文孝・宇野伸宏・夏皓清・葉光毅：台湾道路ネットワークにおける接続脆弱性解析とその活用，土木計画学研究・講演集，Vol.42，CD-ROM，2010.
- 9) 定金 乾一郎，古市 英士：接続脆弱性分析手法を用いた災害時の道路ネットワーク評価，近畿地方整備局研究発表会論文集，2013
- 10) 尾山梓：火山噴火時の物流被害評価に関する基礎的研究，修士論文，2018
- 11) 国土交通省：浅間山火山防災マップ，2003