

被災道路の容量低下を考慮した道路ネットワークのリスク評価に関する基礎的検討

中島浩徳¹・本田利器²

¹学生会員 東京大学社会基盤学専攻 (〒 113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

²正会員 工博 東京大学国際協力学専攻 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

E-mail: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

災害対策においては、災害の不確実性を踏まえて低頻度だが巨大な損失をもたらす巨大損失事象のリスクを適切に評価する必要がある。加えて、近年では道路ネットワークの性能の確保が迅速な復旧に資することから、道路ネットワークの巨大損失事象の一つとして重要道路の途絶の影響を分析している研究が多い。一方で、道路の被害形態は主に部分的な損傷による交通容量の低下であり、広域災害が起これば多数の道路の交通容量が低下することも道路ネットワークの巨大損失事象となる恐れがあるが、そのような被害形態に着目した研究はなされていない。

そのため本研究では、格子ネットワークと四国の実道路ネットワークを用いて、多数の道路の交通容量の低下という被害形態に着目した際の道路ネットワーク性能の確率的特性を考察し、適切なリスク評価指標を検討した。その結果、多数の道路の交通容量が大きく低下する場合にはネットワーク性能の確率的特性が裾野の長い多峰形のリスクカーブとして表され、その場合には CVaR を用いることで VaR よりも適切にテイルリスクを評価できることが示された。また、多数の道路が被害を受けることを想定した際には、従来の一リンクのみの被害の影響を分析する手法から特定される重要リンクとは異なるリンクがネットワーク性能に大きな影響を与えていることが示された。

Key Words: road network, link capacity reduction, conditional value at risk, critical link

1. 序論

平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震では、これまでの想定をはるかに超える巨大な地震と津波により甚大な被害をもたらされた。これを受けて、今後の災害対策においては「あらゆる可能性を考慮した最大クラス」の巨大な災害を想定し検討することが求められている¹⁹⁾。つまり、災害の不確実性を踏まえて、低頻度だが巨大な損失をもたらす「巨大損失事象¹⁶⁾」のリスクの評価を適切に行う必要がある。

また、防災の分野ではレジリエンスという概念が大きな注目を集め、巨大な災害に対しても柔軟に影響を吸収できるシステムの構築が目指されている。東北地方太平洋沖地震の際には、津波の被災地域が甚大な被害を受けたものの、道路ネットワークの機能が迅速に復旧したことで、被災地の復旧活動に大きく貢献した例が見られた¹⁵⁾。そのため、レジリエンスの観点から災害時の道路ネットワークの機能の確保が重要であると多く指摘されている²¹⁾。

道路ネットワークの被害における巨大損失事象としては、重要な道路が途絶することが挙げられる。平成 28 年 4 月の熊本地震で阿蘇大橋が寸断したのがその一例である。そのため、現実の対策としても重要な道路

を特定し災害時の途絶を防ぐことが念頭に置かれている。しかし、ここで道路ネットワークの災害対策において新たに二つの視点を提示したい。

第一に、災害による道路の被害形態は途絶よりも部分的な損傷が圧倒的に多いことが過去の災害の経験から明らかになっている。東北地方太平洋沖地震による被災三県の橋梁の被害の内訳は、「通行不可」は 2 % であるのに対して、「通行注意」は 27 %、「その他損傷あり」は 32 % を占めている¹³⁾。これらの被害によって、通行自体は可能であるものの普段通りの通行はできなくなり、これは道路の交通容量が低下することに相当する。そのような被害例としては、代表的なものに橋台の背面段差があり、その他にも道路の亀裂や沿道建築物の倒壊、信号の停電、自動車の放置など様々なものが考えられる。

第二に、日本で考慮すべき災害の性質として被害の広域性が挙げられる。とりわけ近い将来に起こる確率が高いと言われている南海トラフ地震が起こると、地震動による道路の被害箇所だけでも約 3 万から 4 万にまでのぼることが想定されている²³⁾。また、複合災害の恐れなども指摘されており²⁰⁾、被害の広域性を考慮する必要性は大きい。

これらの二点を踏まえれば、災害により多数の道路

の交通容量が低下するということが道路ネットワークの巨大損失事象として検討する必要がある。被災地までのアクセス自体は確保されているものの、多くの道路の交通容量が低下していることで混雑が発生し迅速なアクセスが確保されない恐れがあるということである。リンクの途絶のみを考慮する場合にはネットワークの接続性の確保が重要になる。しかし、交通容量の低下も考慮する場合には、健全なリンクだけで到達できない状況においても、交通流が様々に変化するため、より複雑で詳細な検討が必要になることが考えられる。しかし、多数の道路の交通容量の低下という被害形態に注目した研究は限定的である。

そこで本研究では、多数の道路の交通容量の低下という被害形態を考慮したネットワーク性能の確率的特性を、格子ネットワークと四国の実道路ネットワークを用いた数値シミュレーションにより考察し、巨大損失事象の回避に資する適切なリスク評価手法を検討することを目的とする。

本稿の構成は以下のようになっている。2. では、道路ネットワークの防災の研究を概観する。3. では、格子ネットワークでの多数の道路の交通容量の低下によるネットワーク性能の確率的特性を、数値シミュレーションに基づき考察する。4. では 3. の結果を踏まえ、巨大損失事象の回避に資するリスク評価指標を検討する。5. では 3. と 4. に基づき、実際の四国の道路ネットワークにおいて、多数の道路の交通容量の低下による影響を考察し、そのような被害形態を考慮した場合の重要なリンクの特定手法を既存の手法と比較しつつ検討する。6. は本稿のまとめである。

2. 既往研究

道路ネットワーク防災の研究として、特定の災害シナリオの下での道路ネットワーク性能を評価し、最適な戦略を導出しているもの^{1),6),11),18)}がある。これらの研究では、災害時の各道路の被害程度は想定に基づき固定されていることが多い。しかし、災害は大きな不確実性を持つ事象であることから、特定のシナリオに固定するだけでなく、様々な被害状況の下での道路ネットワーク性能を考察することも必要である。ただ、Noyan⁸⁾は災害時の各道路の被害程度を確率分布として与え、ネットワーク全体の被害の VaR(Value at Risk)を最小化する戦略の導出方法を提案している。しかし、被害程度の確率分布は予め固定しているという意味で、不確実性の考慮は不十分である。

様々な被害状況に対してネットワーク性能を評価している研究は、被害の割合と程度、つまり、被害を受けるリンクの本数とそれぞれのリンクの被害の大きさの二

つの観点から整理することができる。Jun-qiang et al³⁾や Luatthep et al⁵⁾, Scott et al⁹⁾, Sullivan et al¹⁰⁾, はネットワーク内の一つのリンクが途絶または容量低下した際のネットワーク性能を被害前後の総旅行時間の変化によって評価している。これらの研究はネットワーク内の重要なリンクを特定することに大きく貢献している。しかし、実際の災害による被害は一つのリンクだけでなく複数のリンクが被害を受けることが当然予想される。複数のリンクが被害を受けるときにはネットワーク性能は大きく低下する上に、ネットワーク内の重要なリンクが変化することも考えられる。

ネットワーク内の複数のリンクが被害を受ける際のネットワーク性能を評価している研究は、パーコレーション理論に基づいているものが多い。理論の詳しい内容はいくつかの文献^{17),24)}に記載されているが、パーコレーション理論では格子ネットワークで 50 % のリンクが途絶すると、確率的に任意のノード間の接続性が大きく低下することが示されている。久貝ら²⁶⁾や諸星²⁵⁾は地区の道路網を格子ネットワークに見立てることによって、道路閉塞等によるリンクの途絶の影響を考察している。また、Li et al⁴⁾では道路ネットワーク上の実際の交通流を踏まえて、交通量の多いリンクを順次途絶とみなしパーコレーション理論を用いることによって、交通流を効率的に改善する道路を特定している。一方で、パーコレーション理論に依らないものとして、Jenelius et al²⁾は道路ネットワークを地区ごとに分割し、各地区内でリンクが全て途絶した場合のネットワーク性能の変化を定量化し、重要なエリアを特定している。これらの研究はいずれも各リンクの被害の程度として途絶のみを扱っており、交通容量の低下による影響は考察されていない。

ネットワーク内で複数のリンクの交通容量が低下した際のネットワーク性能を評価している研究は、単純なものに限られている。Nagurney et al⁷⁾は 2 つのノード間の 2 つのリンクの交通容量が変化した際のネットワーク性能の変化を、ノード間の到達時間の変化から考察している。この研究では交通容量の低下度合いが増え、ネットワーク性能が急激に低下する場合がみられることが示されている。しかし、ネットワークが現実の道路ネットワークのように複雑になった場合のネットワーク性能の変化は考察されていない。

3. 格子型ネットワーク性能の確率的特性

格子ネットワークにおいて、複数のリンクの交通容量が低下した際のネットワーク性能の確率的特性を考察する。まず、ネットワークの被害モデルを示し、被害のパラメータに対するネットワーク性能の確率的特

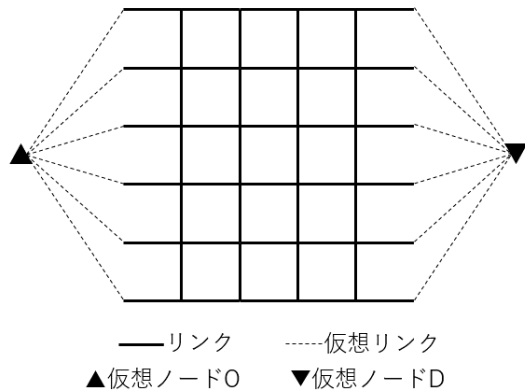


図-1 格子型ネットワークモデル

性を数値シミュレーションにより分析する。次に、ネットワーク性能とネットワークの被害状況の関係を分析する。

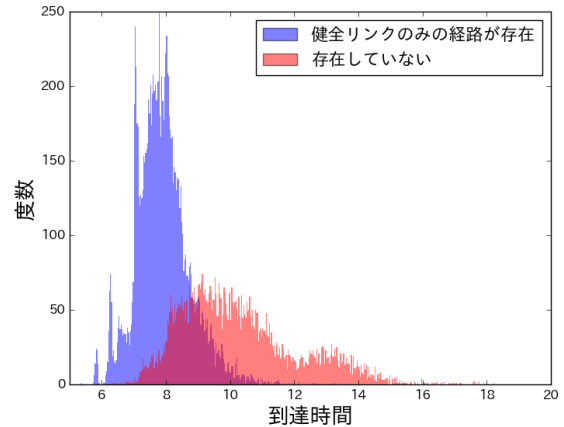
(1) ネットワークの被害のモデル

図-1に示すような、ノード数 6×6 の格子ネットワークを対象とする。ネットワーク性能としてネットワークの左端ノードから右端ノードまでの到達時間を評価する。これは、被災後には被災地域と復旧拠点地域との間の迅速なアクセスの確保が最重要課題になるということに鑑みたモデルである。図-1のように距離0の仮想リンクを用いて、仮想ノードOから仮想ノードDまでのODとしてみるができる。到達時間は確定利用者均衡配分により算出する。各リンクのコスト関数は一般的に用いられているBPR関数を用いる。BPR関数はリンクの交通量とリンクの所要時間の関係を示す関数であり、以下の式で表される。

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{z_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

ここで、 t_a はリンク a の所要時間、 t_{a0} は自由旅行時間、 z_a は交通量、 c_a は交通容量、 α と β は BPR 関数のパラメータである。今回は単純化の為に全てのリンクにおいて $t_{a0} = 1$ 、 $c_a = 1$ とする。それに基づき、仮想ノード OD 間の交通需要を $d = 3$ とする。また BPR 関数のパラメータは一般的に使用されている $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 4$ という値を採用する。

次にネットワークの被害をモデル化する。被害としてはネットワーク内でランダムに選択したリンクの交通容量が一定値低下する状況を想定する。このとき、被害に関するパラメータとして、被害割合 p と被害程度 q を定める。被害割合 p は被害を受けるリンクの本数の割合であり、被害程度 q は各被害リンクの交通容量の低下率である。つまり、今回の格子ネットワークにおい

図-2 $p=0.5$, $q=0.8$ での到達時間のヒストグラム

てはリンク数が50本で各リンクの健全時の交通容量は1なので、被災により全体の $50p$ 本の被害リンクの交通容量が $c = 1(1 - q)$ にまで低下し、 $50(1 - p)$ 本の健全リンクの交通容量は $c = 1$ のままということである。

(2) 被害状況に対するネットワーク性能の確率的特性

被害程度 q を $q = 0.8, 0.85, 0.9$ で固定し、被害割合 p をそれぞれ $0 \leq p \leq 0.5$ で変化させた。ただ、被害に関する二つのパラメータを固定しても、被害を受けるリンクはネットワーク内からランダムに選択されるため、ネットワークの被害状況は異なりネットワーク性能は同一ではない。そのため、被害割合と被害程度に対するネットワーク性能の確率的特性を考察するために、同一の (p, q) に対してモンテカルロシミュレーションを20,000回行った。例として、 $p = 0.5$, $q = 0.8$ の場合と、 $p = 0.5$, $q = 0.9$ の場合で、健全リンクのみで到達できる経路が存在している場合と存在していない場合の到達時間のヒストグラムを図-2,3にそれぞれ示す。

このリスクカーブの形状の特徴として、いずれの場合も健全リンクの経路が存在していない場合には到達時間が大きくなる傾向が見られる上に、分布としても横に広いものになっている。また、図-2の $q = 0.8$ の時にはリスクカーブ全体は、ほぼ単峰形となっているが、図-3の $q = 0.9$ の時には裾野が広くかつ多峰形の分布になっていることが分かる。これは、健全リンクのみの経路が存在していないとき、つまり、被害箇所によってネットワークが分断されている被害状況の中でも段階的にフェーズが分かれており、比較的健全な被害状況と脆弱な被害状況があることを示している。この違いはリンクの途絶のみを考慮する場合には見られないものである。このように、ネットワーク性能の確率的特性は被害程度に対しても異なるものになっている。

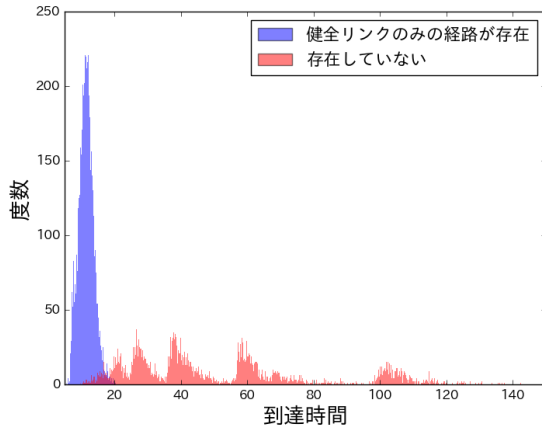


図-3 $p=0.5, q=0.9$ での到達時間のヒストグラム (健全リンクのみの経路の存在で区分)

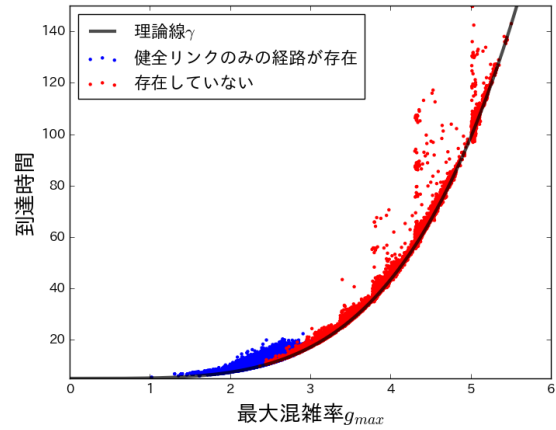


図-4 $p = 0.5, q = 0.9$ での最大混雑率 g_{max} と到達時間の関係

(3) ネットワーク性能の分布特性の影響要因

上記のようにネットワーク性能が段階的に分布している要因を考察するために、交通配分後の各リンクの混雑率を分析する。リンク a の混雑率 g_a は、交通容量 c_a と交通量 z_a を用いて、次式のように表される。

$$g_a = \frac{z_a}{c_a} \quad (2)$$

そして、ネットワークの交通状況特徴づけるものとして、最大混雑率 g_{max} を定める。

$$g_{max} = \max_a g_a \quad (3)$$

被害状況に関するパラメータを $p = 0.5, q = 0.9$ に固定した際の、最大混雑率 g_{max} と到達時間との関係を図-4に示す。この図から二つのことが指摘できる。第一には、最大混雑率 g_{max} に対して到達時間の下限は一経路において一つのリンクでの混雑率が高くなり他のリンクでの混雑率は無視できるとした場合の理論値 γ に一致している。第二には、いくつかの最大混雑率の値の箇所で到達時間の立ち上がりが見られるということである。具体的には $g_{max} = 5.0, 4.2, 3.8$ の箇所である。

ここで、ネットワークが図-5のような被害状況を考える。この場合、健全リンクのクラスターが被害箇所によって分断され、クラスター間を接続する被害リンクは6本ある。被害リンクでの所要時間が健全リンクでの所要時間に比べて十分に大きい時には、交通配分後の各被害リンクの所要時間は等しくなり、そのため交通量も等しくなる。そのとき、各被害リンクに交通需要 d の $\frac{1}{6}$ ずつが配分され、混雑率は $g = \frac{d/6}{q} = 5.0$ となる。次に、被害状況が図-6のときには各被害リンクの交通量は交通需要 d の $\frac{1}{7}$ となり、混雑率は $g = \frac{d/7}{q} = 4.2$ となる。同様に健全リンクのクラスター間を接続する被災リンク数が8本になれば $g = 3.8$ である。これら

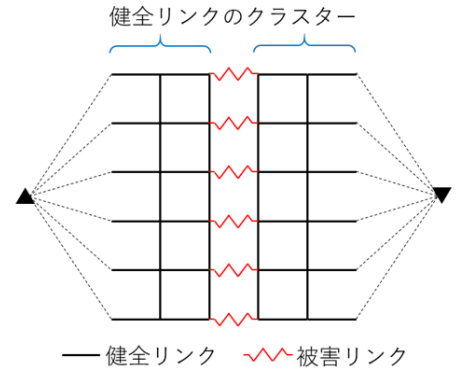


図-5 健全リンクのクラスター間を接続する被害リンクが6本になる被害状況例

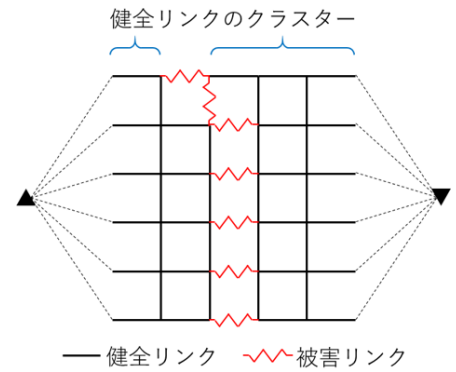


図-6 健全リンクのクラスター間を接続する被害リンクが7本になる被害状況例

の数値が図-4で到達時間が立ち上がっている最大混雑率の数値に一致している。

これを踏まえて、健全リンクのみで到達できる経路がない、つまり健全リンクのクラスターが被害箇所によって分断されているときに、クラスター間を接続す

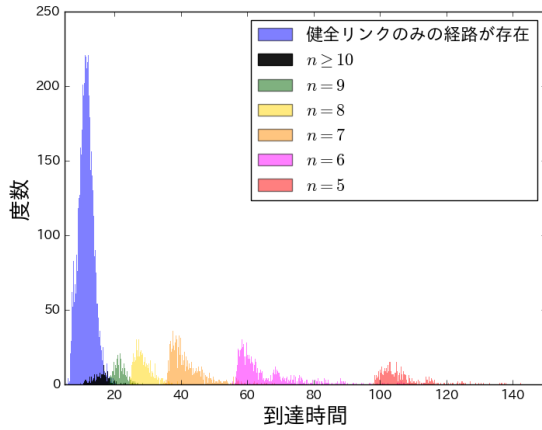


図-7 $p=0.5, q=0.9$ での到達時間のヒストグラム (健全リンクのクラスター間を接続する被害リンクの経路数 n で区分)

る被害リンクの経路数を n と定義する。健全リンクのクラスターが図-5 のように直線的に分断されていれば n は小さくなり、逆に入り組んだ形状をしていれば n は大きくなる。図-3 で示した、 $p = 0.5, q = 0.9$ のときの到達時間のヒストグラムを、この n の値ごとに図-7 に示す。すると到達時間のヒストグラムの峰は n の値に対応していることが分かる。つまりネットワークポロジの複雑さがネットワーク性能に影響し、段階的な変化の要因となっている。

以上より、ネットワーク内の多数のリンクの交通容量が低下する場合には、ネットワーク性能の確率的特性は裾野の長いリスクカーブとして表され、被害程度が大きい時には多峰形となることが分かった。格子ネットワークにおける段階的なフェーズの要因としては、被害箇所によってネットワークがクラスターに分断されている時のネットワークポロジの複雑さが考えられた。これらの知見はリンクの途絶だけを考慮した場合には得られないものである。

4. 巨大損失事象の回避に資するリスク指標の考察

3. により、被害程度が大きいときには、ネットワーク性能の確率的特性は裾野の広い多峰形のリスクカーブとして表されることが分かった。それを踏まえて、多数のリンクの交通容量が低下する場合のネットワーク性能の適切なリスク評価手法を考察する。

(1) 期待値による評価とテイルリスク

災害対策においては冒頭でも述べたように、想定しうる最大クラスの被害を考慮することが求められており、テイルリスクを適切に評価することが巨大損失事

表-1 2つの被害状況での到達時間の期待値と VaR

	$p = 0.32, q = 0.9$	$p = 0.5, q = 0.8$
期待値	8.1	8.8
$\text{VaR}_{0.99}$	25.0	14.2

象の回避には必要である。確率的特性の評価値で一般的なものに期待値があるが、期待値では当然テイルリスクを十分に考慮することはできない。さらに、ネットワーク内の多数のリンクの交通容量が低下する際には、ネットワーク性能の確率的特性は裾野の広いリスクカーブを示すため、テイルリスクの評価が一層重要となる。

例えば、被害のパラメータが $p = 0.34, q = 0.9$ と $p = 0.5, q = 0.8$ の二つの場合を比較する。それぞれの場合の期待値と $\text{VaR}_{0.99}$ (信頼水準 0.99 の Value at Risk) を表-1 に示す。ここで、VaR はテイルリスクに着目したリスク指標であり、信頼水準 α の VaR_α は確率 α で発生する最大損失として評価される。損失 $L (\geq 0)$ が確率密度関数 $f(L)$ に従うとすると、以下のように定義される。

$$\text{VaR}_\alpha = \min \left\{ \beta : \int_{-\infty}^{\beta} f(L) dL \geq \alpha \right\} \quad (4)$$

表-1 を見ると、 $p = 0.32, q = 0.9$ のときにはテイルリスクの大きな確率的特性を示しているが、期待値ではそのことを評価できていない。つまり、期待値による評価とテイルリスクに着目した評価は整合的ではないことが分かる。

(2) テイルリスク評価指標の比較

VaR を用いたテイルリスクの評価では、定められた信頼水準に対しての評価値が与えられる。しかし、VaR は信頼水準に相当する確率の一点のみを評価しているため、信頼水準をさらに超えるような、さらに小さい確率の巨大損失事象は見逃されてしまう。とりわけ、多数のリンクの交通容量が低下する際のネットワーク性能の確率的特性は、裾野が広いだけでなく多峰形のリスクカーブとして表される。つまり、いくつかのフェーズに分かれているため、VaR ではさらに危険なフェーズがあることを見逃す可能性がある。

ここで、テイルリスクをより適切に評価できる CVaR (Conditional Value at Risk) を用いる。CVaR は VaR を超える損失の期待値をとったものである。損失 $L (\geq 0)$ が確率密度関数 $f(L)$ に従うとすると、 CVaR_α は以下のように定義される。

$$\text{CVaR}_\alpha = \frac{1}{1 - \alpha} \int_{\text{VaR}_\alpha}^{\infty} L f(L) dL \quad (5)$$

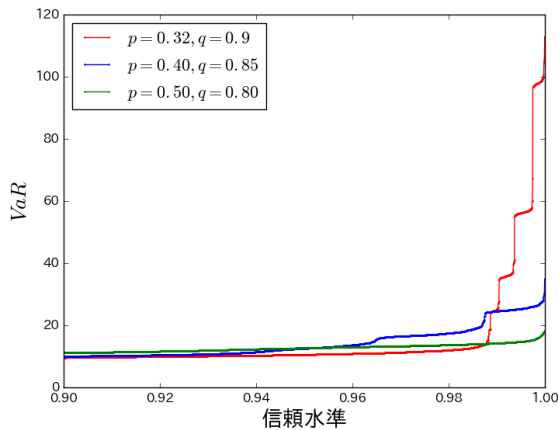


図-8 3つの被害状況での信頼水準と VaR

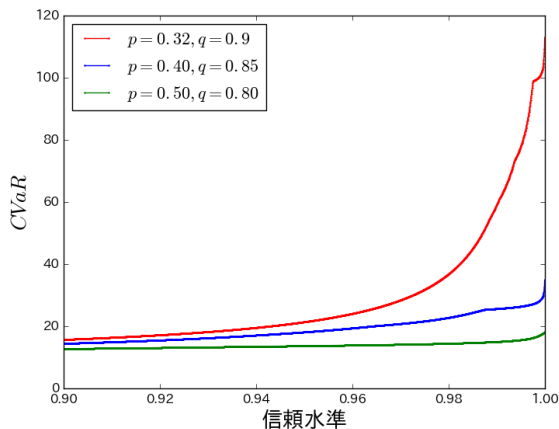


図-9 3つの被害状況での信頼水準と CVaR

例として、被害状況のパラメータが $p = 0.32, q = 0.9$ と $p = 0.4, q = 0.85$ と $p = 0.5, q = 0.8$ と 3つの場合での、信頼水準 α と VaR_α , $CVaR_\alpha$ の関係を図-8,9にそれぞれ示す。VaR では信頼水準を変えるとネットワーク性能の優劣が変化するのに対して、CVaR の場合には信頼水準に対して頑健な結果が得られている。つまり、CVaR を用いることによって、さらに小さい確率の巨大損失事象を含めてリスクを評価できていることが分かる。

また、信頼水準の変化に対して VaR は急激に変化している箇所がいくつかみられる一方で、CVaR は比較的滑らかに変化している。これは、VaR では一つの信頼水準のみの評価では、それより少し確率の小さいところに急激に悪化するフェーズが存在している可能性が常にあることを意味している。そのため、VaR は実際のリスク評価の場面に適しているとは言えない。一方で、そのような急激な変化が存在しないという意味で、CVaR では一つの信頼水準に対して信頼性の高い

評価を行うことができる。

多数のリンクの交通容量が低下する際のネットワーク性能の確率的特性の評価は、段階的なネットワーク性能の低下を考慮する必要がある。CVaR が信頼水準の変化に対して頑健であり、さらに小さな確率の巨大損失事象も捕捉できるため、VaR よりも適していることが示された。

5. 四国の道路ネットワークへの適用

本章では、3. と 4. で得られた知見に基づき、四国の実際の道路ネットワークにおいて多数のリンクの交通容量が低下した際のネットワーク性能の確率的特性を考察する。さらにそのように多数のリンクの交通容量が低下することを想定し、ネットワーク内の重要リンクを特定する手法を既存の手法と比較しつつ検討する。

(1) ネットワーク性能の確率的特性

日本では、近い将来に南海トラフ地震が起こる確率が高いといわれている。南海トラフ地震が起こった際には日本の広範囲が被災するが、とりわけ四国では甚大な被害が生じる可能性が高い。特に太平洋に面した沿岸部では 30 m の津波が押し寄せる想定がされており²²⁾、復旧期や復興期において本州や四国の北部地域から南部地域への交通アクセスを確保することは重要な課題である。しかし、内陸部では強い地震動が生じることに加えて、広範囲にわたって地滑りが起こる可能性も指摘されている。これにより、多数の道路が被害を受けて交通容量が低下することが考えられる。

そのため、四国の多数の道路の交通容量が低下した際の、本州から四国南部までの到達時間を対象としたネットワーク性能の確率的特性を数値シミュレーションにより分析する。対象道路は図-10に示す通りであり、構成ノード数は 3774 でリンク数は 6137 である。各リンクの健全時の交通容量は道路の交通容量¹⁴⁾に従い、 $c = \text{車線数} \cdot 1100 \text{pcu/h}$ とする。ここで pcu (passenger car unit) は乗用車換算台数である。また、各リンクの自由旅行時間は松井ら¹²⁾を参考に、高速道路では $t_0 = 1.0 \text{分/km}$ 、一般道路では $t_0 = 2.0 \text{分/km}$ とする。交通 OD は実際の道路啓開計画「おうぎ形作戦」²²⁾を参考に、図の O1・O2・O3 のいずれかから、D1・D2 にそれぞれ向かう 2つのものとして、交通需要はともに $d = 2000 \text{pcu/h}$ とする。被害のモデルは 3. と同様に、被害割合 p と被害程度 q を定め、被害を受けるリンクはネットワーク内からランダムに選択する。同一の (p, q) に対してモンテカルロシミュレーションを 10,000 回行った。

$p = 0.4$ で $q = 0.8, 0.9$ としたときの D2 までの到

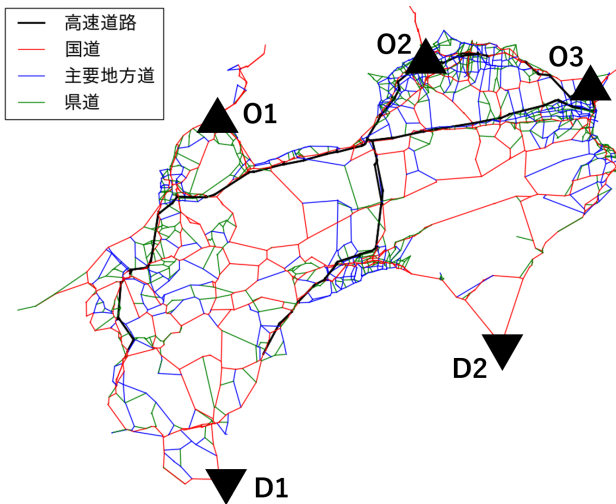


図-10 シミュレーションの対象とした四国の道路ネットワーク

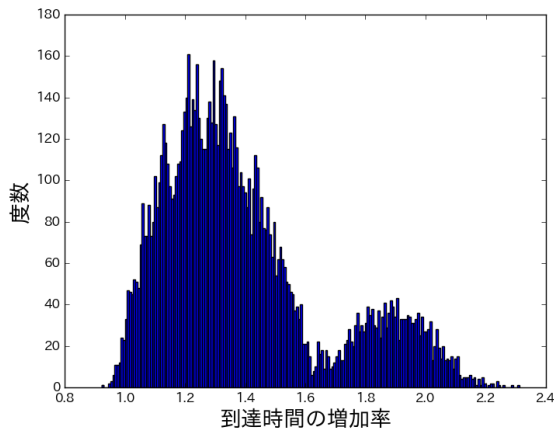


図-11 $p = 0.4, q = 0.8$ での D2 までの到達時間の増加率

達時間の健全時に対する増加率のヒストグラムを図-11,12にそれぞれ示す。 $q = 0.8$ のときにはリスクカーブの裾野はそれほど長くないのに対して、 $q = 0.9$ と被害割合が増加すると多峰形で裾野の長い形状に変化している。この $p = 0.4, q = 0.9$ において、リスクカーブのテイルリスクを VaR と CVaR により評価した結果を図-13に示す。多峰形のリスクカーブに対しては VaR は信頼水準に対して急激な変化がみられるものの、CVaR では滑らかに変化している。CVaR を用いることで、さらに低い確率の事象も踏まえて、より適切にリスクを評価できていることが分かる。

以上より、実際の道路ネットワークにおいても 3. や 4. と同様に、多数のリンクの交通容量が低下する際のネットワーク性能は裾野の長い多峰形のリスクカーブとして表され、そのように段階的に性能が低下する場合のリスク評価としては CVaR が VaR よりも適切であることが示された。

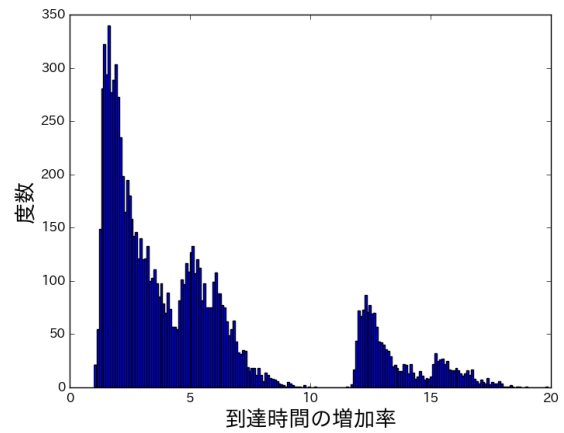


図-12 $p = 0.4, q = 0.9$ での D2 までの到達時間の増加率

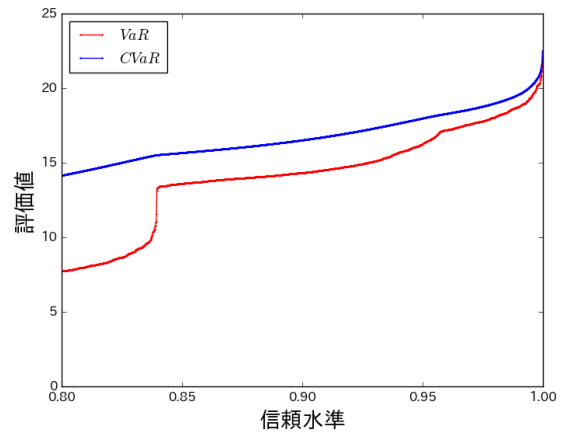


図-13 $p = 0.4, q = 0.9$ での到達時間の増加率のテイルリスクの評価

(2) 重要リンクのリスク評価

実際の道路ネットワークにおいて、被害を受けたときに多大な影響を与えるリンクを特定することの意義は大きい。そのため、ネットワーク内の各リンクの重要度を既存の手法と比較しつつ検討する。

Scott et al⁹⁾ は一つのリンクが被害を受けるという被害形態において、各リンクの重要度を測る指標として、次式で表される NRI(Network Robustness Index)を提案した。

$$NRI_a = \sum_{i \in I/a} t_i^a x_i^a - \sum_{i \in I} t_i x_i \quad (6)$$

NRI_a はリンク a の NRI で、 I はネットワーク上のリンクの集合、 t_i, x_i は平常時のリンク i の旅行時間と交通量、 t_i^a, x_i^a はリンク a が途絶した時の再交通配分で得られるリンク i の旅行時間と交通量である。

Sullivan et al¹⁰⁾ は、これをリンクの交通容量の低下

にも拡張した.

$$\text{NRI}_{a_q} = \sum_{i \in I/a} t_i^{a_q} x_i^{a_q} - \sum_{i \in I} t_i x_i \quad (7)$$

NRI_{a_q} はリンク a の交通容量が割合にして q 低下した場合の評価値であり, $t_i^{a_q}, x_i^{a_q}$ はその場合の再交通配分で得られるリンク i の旅行時間と交通量である. ただ, この指標は一つのリンクのみが被害を受けた場合を評価しているので, 多くのリンクが被害を受ける状況ではリンクの重要度が変化するということが考えられる.

そのため, 本研究は多数のリンクが被害を受けた場合にも拡張することを試みる. 多数のリンクの交通容量が低下する被害形態における各リンクの重要度を以下のように表す.

$$\text{NRI}_{a(p,q)} = N_{a \in P(p,q)} - N_{a \notin P(p,q)} \quad (8)$$

ここで, p と q は被害のパラメータであり, P を被害リンクの集合とする. N は被害のパラメータが p, q で表されるときネットワーク性能である. つまり, $\text{NRI}_{a(p,q)}$ は多数のリンクの交通容量が減ったときに, a の交通容量も減っている時と減っていないときのネットワーク性能の差として与えられる. ネットワーク性能のリスク評価には到達時間の増加率の期待値・VaR・CVaRを用いる.

四国の道路ネットワークにおいて, $p = 0.4, q = 0.9$ で D2 に向かう交通 OD での NRI_{a_q} と $\text{NRI}_{a(p,q)}$ に関して, 重要度の高いものから順に 5 本のリンクを表-2 に示し, それぞれのリンクの地図上の位置を図-14 に示す. 表から, NRI_{a_q} と $\text{NRI}_{a(p,q)}$ のリンクの重要度は一致していないことが分かる. ここで, NRI_{a_q} が重要なリンクと示しているリンク番号 539 のリンクと, $\text{NRI}_{a(p,q)}$ が重要なリンクと示しているリンク番号 307 のリンクの比較を行う. $p = 0.4, q = 0.9$ での到達時間の増加率のヒストグラムを, 当該リンクが被害を受けているものと受けていないもので分けて図-15,16 に示す. すると図-15 では両者に差はほとんど生じていないが, 図-16 では被害を受けているものと受けていないものの間で明確な差がみられる. これは, 従来の指標である NRI_{a_q} は被害リンクの数が増えた場合には適切な指標とならないことを示している. 一方で, $\text{NRI}_{a(p,q)}$ を用いることによって, 多数のリンクの交通容量が低下する際にネットワーク性能に大きな影響を与えるリンクを特定できている.

また, $\text{NRI}_{a(p,q)}$ で VaR と CVaR を比較すると, $\text{VaR}_{0.9}$ と $\text{VaR}_{0.99}$ は重要度の順位の相違がみられるが, $\text{CVaR}_{0.9}$ と $\text{CVaR}_{0.99}$ では同一の結果が得られている. これは VaR が図-8 でみられたような信頼水準に対する不整合性を示しているからである. 一方, CVaR は図-9 でみられたように, さらに低い確率の巨大損失事象を含めてリスクを評価できていることを示している.

表-2 各評価指標に基づく重要なリンク ($p = 0.4, q = 0.9$)

評価指標		重要度の高いリンク
NRI_{a_q}		539, 547, 576, 586, 172
$\text{NRI}_{a(p,q)}$	平均値	307, 547, 179, 586, 576
	$\text{VaR}_{0.9}$	307, 547, 586, 576, 179
	$\text{VaR}_{0.99}$	307, 547, 179, 586, 576
	$\text{CVaR}_{0.9}$	307, 547, 179, 586, 576
	$\text{CVaR}_{0.99}$	307, 547, 179, 586, 576

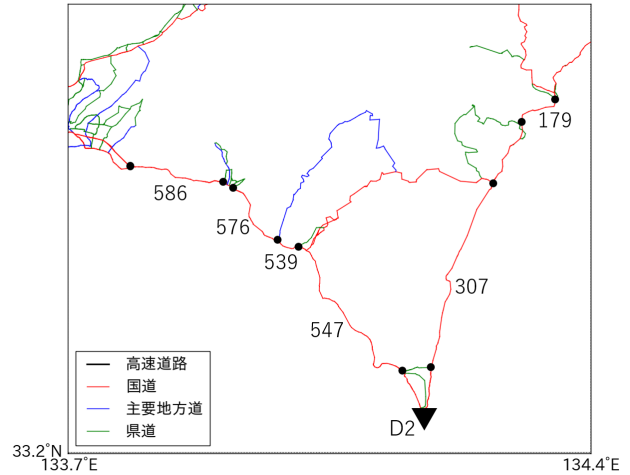


図-14 D2 周辺の詳細地図と各リンクの位置

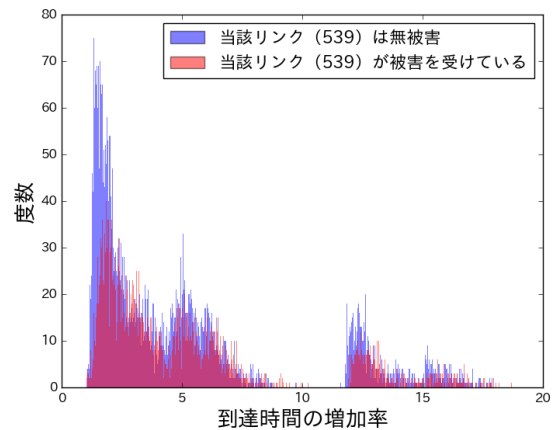


図-15 $p = 0.4, q = 0.9$ でのリンク 539 の被害の有無と到達時間の増加率

以上より, ネットワーク内の多数のリンクの交通容量が低下する際には, 一つのリンクのみの被害に基づいた従来の手法では重要なリンクを適切に特定できないことが示された. また, その場合のリンクの重要度を評価するためには, 当該リンクが被害を受けている場合と被害を受けていない場合でのネットワーク性能を比較することが有効であり, その場合には CVaR を

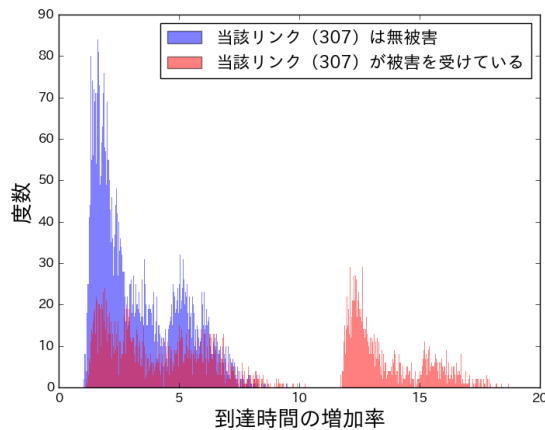


図-16 $p = 0, 4, q = 0.9$ でのリンク 307 の被害の有無と到達時間の増加率

用いることで巨大損失事象の回避に資する重要リンクを適切に特定できることが示された。

6. 結論

近年の災害対策においては、災害の不確実性を踏まえて、低頻度だが巨大な損失をもたらす巨大損失事象のリスクを適切に評価する必要がある。また、道路のネットワーク性能の確保が迅速な復旧に資することから、道路ネットワークの巨大損失事象を回避する必要性は大きい。道路ネットワークの巨大損失事象の一つとして重要な道路が途絶することが挙げられ、その影響を分析している研究は多い。一方で、災害時の道路の被害形態は主に部分的損傷による交通容量の低下であり、広域災害時には多数の道路の交通容量が低下することも巨大損失事象となる恐れがある。しかし、そのような被害形態に着目した研究はなされていない。

そのため本研究ではまず、格子ネットワークにおいて多数の道路の交通容量が低下するときのネットワーク性能の確率的特性を数値シミュレーションにより分析した。その結果、被害道路の交通容量の低下度合いが大きい場合には、ネットワーク性能の確率的特性は裾野の長い多峰形のリスクカーブとしてあらわされることが示された。このとき、リスク指標として VaR を用いると信頼水準に対しての不整合性がみられるが、CVaR を用いることでさらに低い確率の巨大損失事象まで踏まえて適切にテイルリスクを評価できることが示された。

次に、四国の実道路ネットワークにおいても同様の数値シミュレーションを行った。格子ネットワークの場合と同様に、ネットワーク性能の確率的特性は裾野の長い多峰形のリスクカーブとしてあらわされ、CVaR により適切にリスク評価できることが示された。加えて、

多数の道路の交通容量の低下を想定した際のネットワーク内の重要リンクを特定する手法を検討した。その結果、従来の一リンクのみの被害の影響を分析する手法から特定される重要リンクとは異なるリンクがネットワーク性能に大きな影響を与えていることが示された。

参考文献

- 1) Paolo Bocchini and Dan M. Frangopol. Restoration of bridge networks after an earthquake: Multicriteria intervention optimization. *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. 2, pp. 426–455, 2012.
- 2) Erik Jenelius and Lars-Goran Mattsson. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 5, pp. 746 – 760, 2012. Network vulnerability in large-scale transport networks.
- 3) Leng Jun-qiang, Yang Long-hai, Wei-yi Liu, and Lin Zhao. Measuring road network vulnerability with sensitivity analysis. *PLOS ONE*, Vol. 12, No. 1, pp. 1–11, 01 2017.
- 4) Daqing Li, Bowen Fu, Yunpeng Wang, Guangquan Lu, Yehiel Berezin, H. Eugene Stanley, and Shlomo Havlin. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 112, No. 3, pp. 669–672, 2015.
- 5) Paramet Luatthep, Agachai Sumalee, H. W. Ho, and Fumitaka Kurauchi. Large-scale road network vulnerability analysis: a sensitivity analysis based approach. *Transportation*, Vol. 38, No. 5, pp. 799–817, 2011.
- 6) Elise Miller-Hooks, Xiaodong Zhang, and Reza Fatourchi. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 7, pp. 1633 – 1643, 2012.
- 7) A. Nagurney and Q. Qiang. Robustness of transportation networks subject to degradable links. *EPL (Europhysics Letters)*, Vol. 80, No. 6, p. 68001, 2007.
- 8) Nilay Noyan. Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 3, pp. 541 – 559, 2012.
- 9) Darren M. Scott, David C. Novak, Lisa Aultman-Hall, and Feng Guo. Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, Vol. 14, No. 3, pp. 215 – 227, 2006.
- 10) J.L. Sullivan, D.C. Novak, L. Aultman-Hall, and D.M. Scott. Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 44, No. 5, pp. 323 – 336, 2010.
- 11) Agachai Sumalee and Fumitaka Kurauchi. Network capacity reliability analysis considering traffic regulation after a major disaster. *Networks and Spatial Economics*, Vol. 6, No. 3, pp. 205–219, 2006.
- 12) 松井寛, 山田周治. 道路交通センサデータに基づく bpr 関数の設定. *交通工学*, Vol. 33, No. 6, pp. 9–16, nov 1998.

- 13) 公益社団法人土木学会, 地震工学委員会, 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会. 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書, 2015.
- 14) 国土交通省. 可能交通容量の算出. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0317pdf/ks0317005.pdf>. (2017 年 1 月アクセス).
- 15) 国土交通省東北地方整備局道路部道路計画第一課. 道路被害と復旧(くしの歯作戦)(特集 災害から学ぶこれからの交通工学: 東日本大震災の教訓を踏まえて). 交通工学, Vol. 46, No. 5, pp. 29-32, nov 2011.
- 16) 池田三郎. 「低頻度・巨大損失事象」に係わるリスク学(分析)の課題: 巨大複合災害(大地震動+巨大津波+福島原子炉溶融事故)としての東日本大震災から学ぶ(特集 確率論とリスク論の悩ましき関係). 行動計量学 = The Japanese journal of behaviormetrics, Vol. 43, No. 1, pp. 21-34, mar 2016.
- 17) 西森秀稔. パーコレーションの科学, 第 4 巻. 裳華房, 1994.
- 18) 家田仁, 柳沼秀樹, 堤啓. 新たな「道路の防災機能評価手法」の開発とその適用事例(特集震災から 5 年 復興道路・復興支援道路の全体像と現在). 土木施工, Vol. 57, No. 5, pp. 17-20, may 2016.
- 19) 中央防災会議. 大規模地震防災・減災対策大綱(案). http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/34/pdf/34_siryo3-2.pdf. (2017 年 1 月アクセス).
- 20) 中央防災会議, 防災対策推進検討会議. 防災対策推進検討会議 最終報告 ~ゆるぎない日本の再構築を目指して~. http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/suishinkaigi/pdf/saishuu_hontai.pdf. (2017 年 1 月アクセス).
- 21) 東北研広域地方計画協議会. 東日本大震災教訓集「広域大災害に備えて」~国民の安全・安心確保に向けて準備すべき 29 の要点~. <http://www.mlit.go.jp/common/000213788.pdf>. (2017 年 1 月アクセス).
- 22) 国土交通省 四国地方整備局道路部. 「四国広域道路啓開計画」を策定しました~南海トラフ地震の大規模災害に備えて~. <https://www.skr.mlit.go.jp/pres/h27backnum/douro/160324/160324-1.pdf>. (2017 年 1 月アクセス).
- 23) 内閣府. 南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告). http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo2_2.pdf. (2017 年 1 月アクセス).
- 24) 樋口保成. パーコレーションちよっと変わった確率論入門. 遊星社, 2011.
- 25) 諸星穂積. 格子道路網での到達可能性の分析. 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp. 174-175, 2013.
- 26) 久貝壽之, 加藤孝明, 小出治. パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究. 日本建築学会計画系論文集, No. 549, pp. 231-237, nov 2001.

(2017.4.28 受付)