

非常時における緊急輸送道路ネットワークの信頼性分析

柴瀬 憲治¹・大澤 脩司²・中山 晶一郎³・高山 純一⁴・藤生 慎⁵

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: like_base_ball_0504@yahoo.co.jp

²学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: s.osawa.ku.sed@gmail.com

³正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

⁴フェロー 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

⁵正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp

東日本大震災以降我が国は地震活動期に入ったと言われている。そこで、非常時における交通機能がいかんして確保し、速やかな社会回復を図るか、ということは重要な課題といえる。しかし、地震後の緊急輸送を想定した広域的な道路ネットワークを対象とした信頼性の分析は行われていない。本研究では、非常時における道路網の連結性能を評価する信頼度の計算を行い、広域的な道路網の信頼性分析を行う。また、地震、浸水、土砂災害について緊急輸送道路が被災するリスクについても分析を行い、地震に伴って発生する複合災害についても分析を行い、災害時にリンクが通行可能かどうかの精度の向上を示す。今後の課題としては、計算の効率化、リンクの信頼度と関わりのあるリンクの重要度についての考慮などが挙げられる。

Key Words : Reliability, a major earthquake, wide-area road network, emergency transportation road network, GIS

1. はじめに

道路は、生活を営む上で最も基本的な活動基盤の1つである。交通機能が麻痺すれば社会活動、産業活動に混乱を引き起こし、社会生活に大きな影響を与える。交通機能が麻痺する原因としては、非常時の場合、地震、豪雪、水害などシステム外部からの影響によって、交通機能が低下する場合が存在する。非常時における交通機能をいかんして確保し、速やかな社会回復を図るか、ということは重要な課題といえる。

1995年に発生した阪神・淡路大震災では、狭い地域に交通システムが集中していたために、そのほとんどすべてが利用不能となった。交通システムの冗長性が事前に十分確保されていないと、大都市圏においても交通システムが麻痺してしまう可能性が認識された。また、2011年の東日本大震災や、首都直下地震の東海・東南海地震など、大規模な地震災害の発生が懸念される我が国にお

いて、地震災害が発生した時の被害や影響を想定しておくことには大きな意義があると言える。

これを踏まえて、地震などの大災害が発生した時（非常時）の広域的な道路網の信頼性を分析する必要がある。本研究では、非常時における道路網の連結性能を評価する信頼度の計算方法を提案し、広域的な道路網の信頼性分析を行う。分析で得られた結果を用い、広域的な道路網における連結信頼性が低い箇所と高い箇所を明確にすることを目的とする。

2. 既存研究と本研究の位置付け

(1) 信頼性評価の既存研究

2点間信頼度を求める代表的な手段としては、最小パス法 (Minimal-Pathset Method)、最小カット法 (Minimal-Cutset Method) が挙げられる。最小パス法¹⁾とは、対象とする2点間を枝列で結ぶ経路であるパスをすべて求め、

それらのパスのうち少なくとも1本のパスが発生している確率を計算し、2点間の連結確率を求める方法である。最小カット法²⁾とは、それに属する枝を取り除くと、対象とする2点間が連結不能となる切断状態であるカットをすべて求め、それらのカットが1本も発生しない確率を計算し、2点間の連結確率を求める方法である。これらの特徴としては、各経路において通過するリンクが重複すると厳密解と離れた結果となる事、ネットワーク規模が大きくなると膨大な計算が必要になる事等が特徴として挙げられる。

ここで、ミニマムパス法を基本的な考えとしてここで、ミニマムパス法を基本的な考えとして、以下の式を用いる。

$$\phi_i = \prod_{s=1}^P x_a$$

$\phi_i(x_a)$: i 番目のOD間の連結確立を表すシステム構造関数

x_a : a 番目のリンクの連結確立を表すシステム構造関数

この方法では、乱数を発生させて、各リンクについて発生した乱数がリンク信頼度より小さい場合はそのリンクは通行可能とし x_a を1、リンク信頼度を超えている場合はリンクは通行不可能とし x_a を0として $\phi_i(x_a)$ を算出する。この結果、 $\phi_i(x_a)$ は1か0で表現され、1であれば連結、0ならば途絶しているという事になる。この方法は、従来の方法と比較して計算時間とメモリー量がきわめて少なく済み、大規模ネットワークにも適用が可能である事がメリットとして挙げられる。

連結信頼性の厳密解を求める場合には、ネットワーク規模の増大にともなう計算回数、計算時間の増加が問題となり、信頼性の近似解を求める場合にはその精度が問題となっている。道路網の信頼性解析を行う場合、どの程度の誤差まで許容できるのかを確認したうえで、短時間で計算が終わる近似解法が適当であると言える。本研究では上記での計算方法を用いて連結信頼性を評価する。

(2) リンク信頼度の既存研究

リンク信頼度の計算方法は今まであまり行われてきていない現状である。その原因は、リンクとなる道路の途絶が地震などの災害の大きさや、道路周辺の構造物、地盤の強さ、道路の長さ、幅員、車線数や構造といった様々な要因によって成り立っているためである。また、リンクの特性値というものとは定量的に得ることが困難なことも挙げられる。しかし、道路ネットワークの連結信頼性を計算するに当たっては、リンク信頼度の存在はきわめて大きく、リンク信頼度を定義することによって計算でき、また、リンク信頼度の数値によって連結信頼性の結果に大きく影響を及ぼす。

塚口ら³⁾の研究では、京都市における地震災害時のリンクの通行可能確率を道路幅員に加え、沿道建物の状況を考慮して通行可能確率を計算している。ここで、道路機能障害に影響する諸要因を幅員に焦点を当て表 1 に

表 1 通行可能確率に影響する諸要因

沿道建物条件	<ul style="list-style-type: none"> ・建物の構造 ・当該道路区間沿道の建物数 ・建物の倒壊確率 ・建物倒壊のうち道路内に倒壊する建物の割合 ・倒壊建物の倒壊幅の分布
建物条件	<ul style="list-style-type: none"> ・道路幅員 ・官民境界線から建物までの距離

示す。

廣瀬ら⁴⁾の研究では、橋梁を除く全道路リンクに対して、3つの指標を用いた指数分布に基づく信頼度判定モデルを構築し、モンテカルロシミュレーションによる信頼度解析を行っている。ここでは、リンク長、幅員、地盤特性値を道路リンクの被災に関わる評価指標として用いているとしている。リンク長に関しては、リンクの長さが長くなるほど道路構造破壊の危険が高くなるという考え方、道路幅員については、幅員が狭くなるほど道路閉塞の危険が高まるという考え方である。これらのモデルには地震動を入力変数に用いている。また、地盤特性値に関しては、地盤条件が悪いほど道路本体、および沿道構造物の破壊危険度が高いという考え方である。

塚口らの研究では対象道路ネットワークが京都市、廣瀬らの研究では対象道路ネットワークが徳島県となっている。実際に地震が発生した際、物資の輸送のための道路ネットワークは発生地点のみではなく、隣接県、人口の多い都市であったり、また、それらの都道府県と発生地点を繋ぐ都道府県など、非常に広域的な道路ネットワークとなっているが、これらのような広域的な場合での連結信頼性の評価は行われていない現状である。

3. 道路ネットワークの作成

(1) 緊急輸送道路について

非常時の連結信頼性を分析するため、緊急輸送道路データを基に道路ネットワークの構築を行った。緊急輸送道路とは、阪神淡路大震災での教訓を踏まえ、地震直後から発生する緊急輸送を円滑に行うため、高速自動車国道、一般国道及びこれらを連絡する幹線道路と知事が指定する防災拠点と相互に連絡する道路で、都道府県毎に第1次～第3次まで設定されている⁵⁾。名称、選定基準ともに若干違いが見られるが基本的には1次道路が高速道路、一般国道などの幹線道路によって広域的な道路網を確保する。次に、2次、3次が1次道路と役場、防災拠点とを

連絡する形を取っている。地方毎で緊急輸送道路が定められているケースも見られ、救援・救護活動や人員・物資の緊急輸送を迅速に行うため、広域的な緊急輸送道路の確保に向けた検討を地方規模でも行っている。以上より、県境も連結していると判断できるため、緊急輸送道路を基に道路ネットワークの構築を行うものとする。参考に、北海道、沖縄県を除いた本州の国道、高速道路ネットワーク図と緊急輸送道路の中で広域的な道路網の形成の役割を担っている1次道路を図1, 2に示す。



図1 本州の国道、高速道路ネットワーク図



図2 1次緊急輸送道路

(2) 広域的なネットワークを対象としたリンク・ノードの作成

対象とする道路ネットワークの作成を、ArcGIS（地理情報を収集、整理、管理、解析、伝達、および配布するための包括的なシステム）⁹を用いて行った。緊急輸送道路のデータは、国土交通省・国土数値情報⁷のデータを使用した。対象道路ネットワークは、終点となる石川県とし、物資を送る都道府県として発地を東京都、愛知県、大阪府、岡山県を選定し、発地と石川県庁を結ぶ都道府県として新潟県、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県、

岐阜県、富山県、福井、滋賀県、京都府、兵庫県、鳥取県を併せたネットワークとなっている。発地を東京都、愛知県、大阪府とした理由は人口の多い都市からの支援を想定したためである。また、石油確保も想定し、石油精製所が存在する岡山県も発地に選定した。このデータはリンク・ノードによって属性が分けられておらず、1次、2次、3次各々で道路種毎に属性が分かれている。本研究は上記のような属性に分けられた道路データをリンク・ノード毎で属性分けを行った。その結果、ノード数15800、リンク数15752のデータが作成された。作成後の道路ネットワークを図3に示す。



図3 作業後の石川県道路ネットワーク

4. 連結信頼性の計算と分析

(1) 信頼性の計算手順

OD間の連結確率の算出及びリンクの連結信頼性の分析を行うにあたり、本研究に用いる計算方法の妥当性を確認するため、対象を北陸地方(図4)に限定して計算を行った。分析対象区間は石川県庁(ノード番号218)と富山県庁(ノード番号1064)の相互間で、連結確率を計算した。ここで、ODを各都道府県庁舎においた理由は、災害時の対策本部、救援物資の管理などを都道府県庁で行うことが通常であるからである。リンク信頼度の値は、今回の道路ネットワークでは0.95として計算する。本研究では、緊急車両の通過や避難といった緊急を有する事象を対象とするために、OD間を結ぶ経路は遠回りをせず最短経路を通過することを考えた。そこでダイクストラ法を用いて最短経路を探索した。また、連結確率の計算手順のフローを図5に示す。

道路データの情報を複雑にすると計算時間が膨大となるため、各リンクの自由旅行時間、交通容量の値を一定の範囲内で任意の数字を入力した。以上の条件から、乱数毎に変わる最短経路での各リンク毎の連結・途絶を求め、システム構成関数からOD間の連結確率を求めた。以上の計算を1,000回行い、平均を取った結果、富山県庁か

ら石川県庁までの連結確率は約0.44となった。ただし、ここでは必要な情報を任意で入力しているので実際の値ではなく、前述した条件で計算が行えたことを確認出来た。



図4 北陸地方ネットワーク

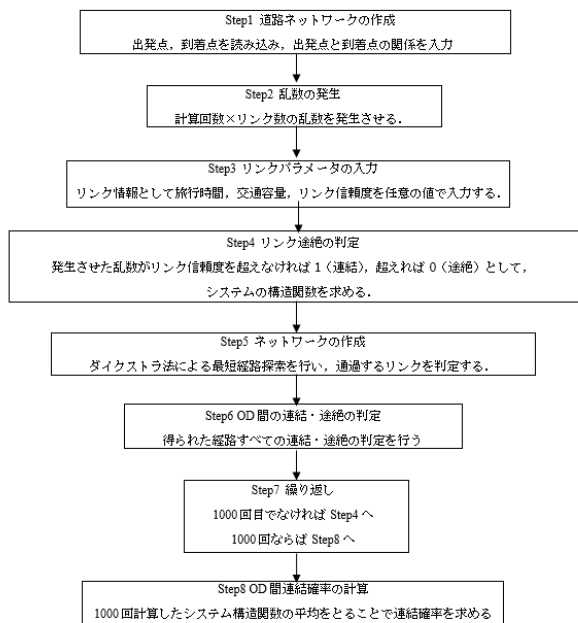


図5 OD間連結確率計算のフロー

(2) 信頼性の分析

(1)の方法で得られた結果を用いてリンク毎の信頼性を分析し、分析結果をArcGISによって可視化させた。分析の方法としては、1000回の計算のうちOD間が途絶した場合のみについて考え、(最短経路に選択されている経路中の途絶リンク)÷(全途絶リンク)で途絶率とした。これにより、どのリンクがOD間の途絶に影響しているかを調査することが出来る。この調査を全ての計算回数において行い集計をすることでOD間の途絶に影響

しているリンクの中でも特に影響回数の多かったものを抽出することが出来る。抽出されたリンクを図6, 7に示す。分析結果より、任意の値の場合は始点となる石川県庁と終点となる富山県庁を最短で結ぶようなリンクの途絶回数が多かった。これは、各計算毎で毎回最短経路探索を行っており、その度に経路は変わるがリンク信頼度を一律で設定しており、リンク途絶を判定するための地震の強さも今回は乱数を全てのリンクに同じ条件で発生させているため、OD間の全ての経路が途絶している場合は、始点と終点を最短で結ぶようなリンクがダイクストラ法で選択される確率が高くなり、ODの途絶に起因しやすくなっていることが考察される。

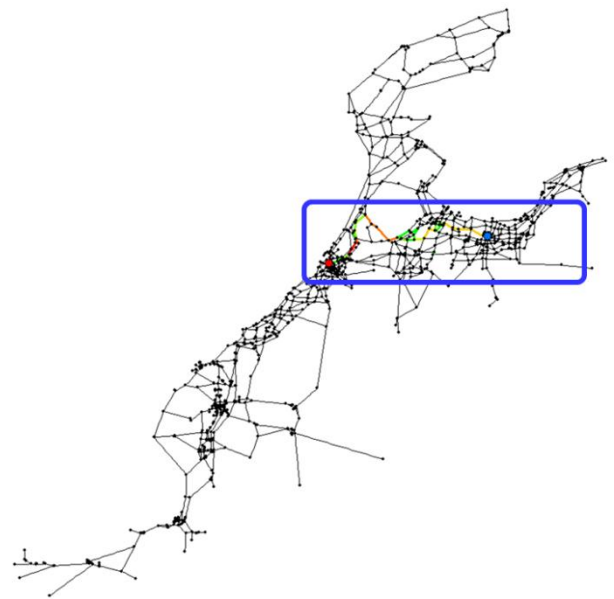


図6 ArcGISによる可視化(全体図)

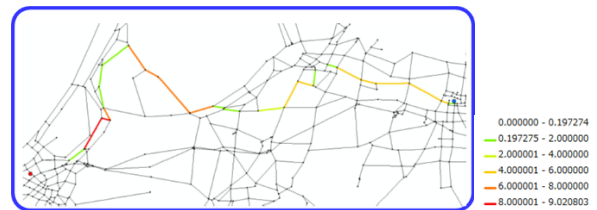


図7 拡大図

5. 各種ハザードにおける緊急輸送道路の被災リスクについて

これまで地震が発生した際のリンクの信頼性について述べたが、わが国では地震や噴火などの大規模低頻度の災害だけでなく、ゲリラ豪雨や豪雨に伴う土砂災害や浸水など小規模多頻度災害も頻発している。緊急輸送道路に指定された道路は災害時に輸送を行うため地震によって道路が破壊されないよう補修や耐震が施されるが、地震発生に伴い津波や土砂災害が複合災害として発生するため、これらのハザードも考慮しなければならない。本

稿では、緊急輸送道路の被災リスクの分析を地震、浸水、土砂災害の各種ハザードについて行った。

(1)地震の被災リスク

地震については、J-SHIS®のデータを利用し、震度毎の被災確率と計測震度別の被災想定2パターンで分析を行った。それぞれのパターンを図8, 9に示す。様々な場合での被災リスクがあるが、どの場合でも太平洋側が危険な値を示している。また、図9では、太平洋側だけでなく断層付近の道路も危険な数値が示されている。

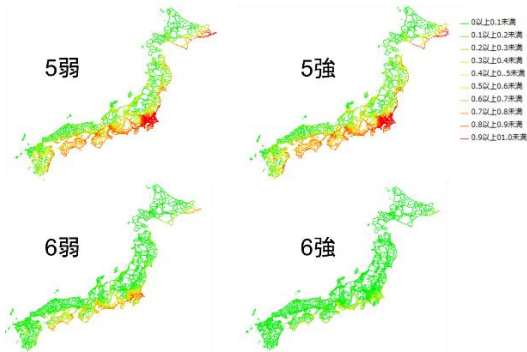


図8 30年以内に震度5弱～6強以上となる確率

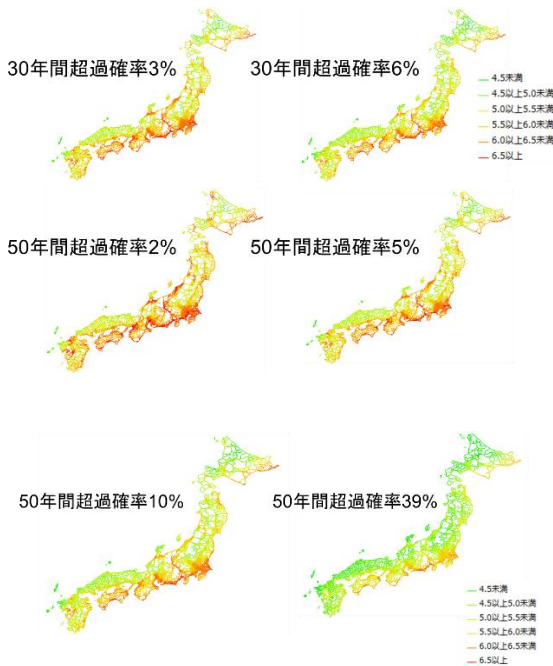


図9 計測震度別被災想定

(2)浸水の被災リスク

浸水については国土数値情報の浸水想定区域データを用い、浸水が想定されている区域に緊急輸送道路が重複している割合を都道府県毎に評価した。このデータは、0m～5mの浸水深を5段階と7段階でランク分けされているが、自動車での輸送を想定した場合、0.5mの場合でも5mの場合でも同様に通行不可となるため、0m～5mの全

てを含めたトータルの重複確率で評価した。1次、2次、3次それぞれの重複割合を図10, 11, 12に示す。道路ランク毎の違いは特に見られず、割合が高くなっている都道府県には、河川の氾濫が想定されているので、河川の付近の道路が緊急輸送道路に指定されていることが考えられる。ハザードマップとの相関に着目すると、割合が高くなっている都道府県の各市町村については、浸水ハザードマップが低い県と比較して整備されており災害対策がなされていた。3次については、指定しない都道府県があるので、重複率が0%の都道府県が多く存在している。

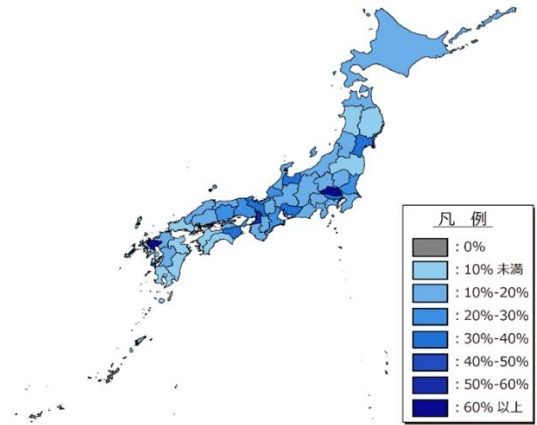


図10 1次道路と浸水想定地域との重複率

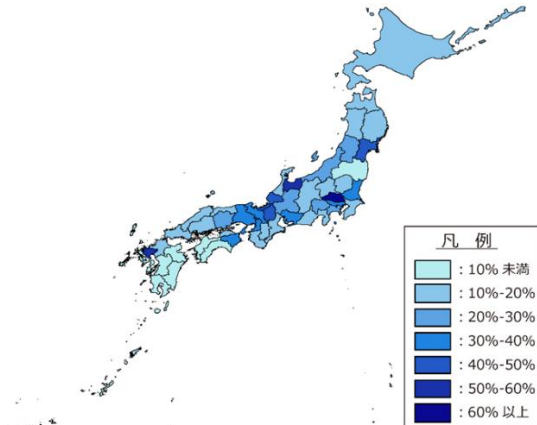


図11 2次道路と浸水想定地域との重複率

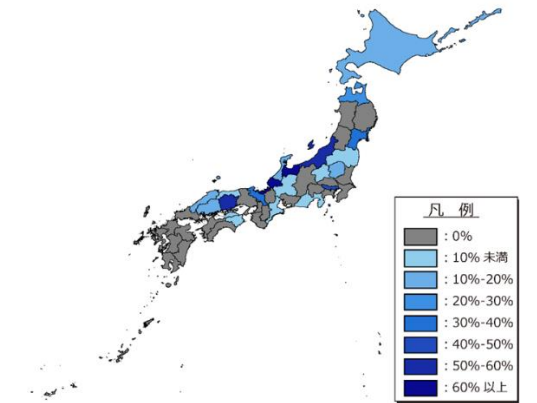


図12 3次道路と浸水想定地域との重複率

(3)土砂災害の被災リスク

土砂災害についても浸水と同じ手法で評価した。土砂災害は急斜地崩壊、雪崩、地すべり、土石流などのデータで分別されていたが、浸水深ランクの場合と同様に、全ての災害トータルの重複確率で評価した。1次、2次、3次それぞれの重複割合を図13、14、15に示す。斜面崩落の災害を考えると、山間部を通行する道路がある都道府県は重複確率が高くなっている。また、山間部は道路自体も少ないため、重複割合が高い都道府県は緊急輸送道路が被災して通行不可となった場合の代替性が低い都道府県であることを示している。

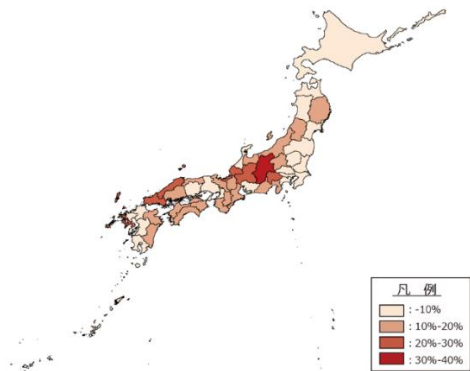


図13 1次道路と土砂災害危険箇所との重複率

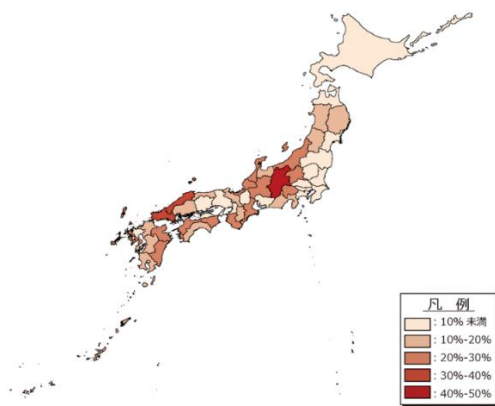


図14 2次道路と土砂災害危険箇所との重複率

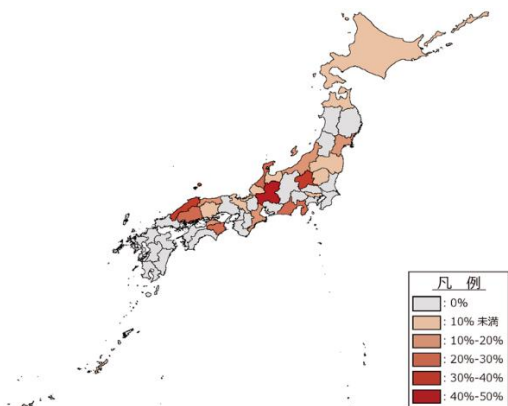


図15 3次道路と土砂災害危険箇所との重複率

6. おわりに

本研究では、道路ネットワークの作成と計算方法の妥当性、またリンクの信頼性分析の手法について述べた。また、緊急輸送道路が地震に伴い発生する複合災害の各ハザードについて被災する可能性を示唆した。OD連結確率についてはダイクストラ法を用いて経路を探索し計算を行うことが出来たため、更に広域的な道路ネットワークを対象にした場合でも同様の計算方法を行う。その際、計算にあまり寄与しないリンクについてはノードの集約を行ってリンクをまとめ計算時間の短縮に努めるなどの計算方法の工夫を行う必要がある。また、緊急輸送道路の分析は、地震や浸水・土砂災害について行った。地震の場合は今後数十年という単位で考えると特に太平洋側では本研究で想定しているような大地震に見舞われる可能性が高いことを示しており、浸水・土砂災害については、緊急輸送道路の総延長に対する重複している総延長の割合を示しているの、単に通行不可となる危険性を表しているだけではなく、通行不可となった場合の代替道路の確保が行えない危険性も備えている。このように、緊急輸送道路の密・疎になっている箇所をリンクの重要度として今後の課題である計算精度の向上に関連付ける予定である。また、計算精度の向上については、本稿ではリンク信頼度を一律で設定しており、リンクの途絶を判定する値は乱数を採用しているが、この地震の強さを表す乱数が全てのリンクについて同様の条件で与えられている。発地も終点も同じ条件で与えられているので、この条件で更に広域的な道路ネットワークを対称にすると本来ならば地震の被害を被らないようなリンクが途絶してしまう可能性が考えられる。この課題に対する方針としては、本研究で想定する規模の地震の震度分布から震源からの距離でリンク信頼度を設定し、乱数を発生させた時に通行可能・不可の精度を高いものにする予定である。また、地震のみの分析が行えたら、地震と浸水、地震と土砂災害定といった複合災害の場合での信頼性の分析を行いたい。

7. 参考文献

- 1) 井上紘一，稲垣敏之：大規模システムの信頼性解析へのグラフ理論の応用，システムと制御，Vol.20，No.12，pp.641～648，1976年。
- 2) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼性解析法に関する研究，第15回日本都市計画学会学術研究発表会論文集，pp.385～390，1980年11月。
- 3) 塚口博司，小川圭一，田中耕太，本郷伸和：歴史都市における道路機能障害の推定，歴史都市防災論文集，Vol.3，2009年6月。

- 4) 綾貴穂, 近藤光男, 廣瀬義伸, 山根丈: 地震防災のための道路網および緊急施設整備計画に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, 1998年9月.
<http://resources.arcgis.com/ja/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- 5) 耐震ポータルサイト
<http://www.taishin.metro.tokyo.jp/yuso/index.html>
- 6) ArcGIS とは? | ArcGIS Resource Center
- 7) 国土交通省HP
<http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudojoho.html>
- 8) J-SHIS 地震ハザードステーション
<http://www.j-shis.bosai.go.jp>