

シュタイナー木による緊急輸送道路ネットワークの構成に関する考察

外井 哲志¹ 大枝 良直²

¹正会員 九州大学大学院 工学研究院 (〒819-0395 福岡市東区元岡 744 番地)
E-mail:toi@doc.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学大学院 工学研究院 (〒819-0395 福岡市東区元岡 744 番地)
E-mail:oeda@doc.kyushu-u.ac.jp

自然災害発生直後には、救助・救援活動や緊急物資の輸送のための緊急輸送路の確保（連結性）が求められ、事前の対策として緊急輸送道路ネットワーク計画が策定され、緊急輸送道路の指定とその整備が実施されている。本研究では、防災拠点間の交通路が確保された状態を、救助・救援活動、支援物資輸送の機能が維持できる必要最低限の道路網が確保されている状態と考え、これを実現するため、緊急輸送道路ネットワークに求められる複数の防災拠点を同時に連結した状態を担保するために最低限求められる道路網をシュタイナー木の考え方をを用いて計画する方法を提案し、シュタイナー木の特性を分析するとともに、シュタイナー木の多重性について考察する。

Key Words: disaster prevention, earthquake, emergency road network, steiner tree

1. はじめに

自然災害発生から復興までの間、時間の経過とともに道路網に求められる機能は変化する。

自然災害発生直後には、救助・救援活動や緊急物資の輸送のための緊急輸送路が確保されていること（連結性）が求められるが、発災から一定の時間が経つと、通常時に近い所要時間で移動できること（時間信頼性）が求められるようになる。前者の場合、防災対策として、後述する緊急輸送道路ネットワーク計画が策定され、緊急輸送道路の指定とその整備が実施されている。

自然災害発生時の道路網の接続性の評価に関する研究が以前から多く行われてきた。従来の道路網の接続性評価に関する研究では、ノード間がつながっている確率、リンクが走行可能な確率を推定して、もしくは既知として理論を展開していたが、近年、災害発生確率や、被害の状況に依存しない手法として、非重複経路（多重性）の考え方をういた道路網そのものを評価する手法が提案されてきた。これらの道路網の接続性評価に関する既存の研究では、特定の OD 間の評価に関するものが多く、多くの防災拠点を同時に連結するための道路網全体のつながりの評価は OD 間の連結性の重ね合せとするものがほとんどであり、緊急輸送道路ネットワークに関する研究も見当たらない。

以上から、本研究では、連結性が求められる災害発生直後から応急復旧までを想定し、主要拠点間の交通路が確保された状態を、救助・救援活動、支援物資輸送の機能が維持できる必要最低限の道路網が確保されている状態と考え、この状態の確保の道路のつながりを、道路網全体の多重性の視点から評価する考え方を提案する。

2. 既存研究

災害発生時でも道路網が機能を発揮するためには、任意の発着点をつなぐ経路が確保されていることが必要である。特に 1995 年の阪神淡路大震災以降、道路網の接続性評価に関する多くの研究が行われ、多くの評価手法が提案されてきた。その内容は中山・朝倉¹⁾にまとめられている。

飯田らや若林らは、信頼性解析は、(1)システム全体の信頼度を求める問題と、(2)個々の部品の信頼度を推定する問題の 2 つから構成されており、道路網信頼性解析では、(1)としてリンク信頼度を与件としてノード間信頼度（道路網の任意の 2 点間で、円滑な走行移動が保証される確率）を効率的に求める方法を提案し²⁾、

(2)として交通量の確率の変動にもとづいてリンク信頼度を推定する方法を提案している³⁾。

また、以下のように、自然災害等によるリンクの途絶に対する道路網の代替性の評価手法に関わるものが多い。南ら⁴⁾は、2都市間の基準ルートに関して、経路数や所要時間を要因とした代替ルートの評価指標として、「経路代替性指数」を定義し、その実用的な計算アルゴリズムを提案している。堀井ら⁵⁾は、迂回度を用いて代替機能に着目した自然災害時の道路復旧の優先順位の設定方法を検討している。宇佐美ら⁶⁾は、道路の途絶のおきにくさの評価を、実際に道路維持・管理業務で用いられている指標である異常気象時通行規制区間数、過去の全面通行止め実績、要対策斜面数などを総合化して評価に組み込んでいる。

しかし、道路網信頼性解析に用いるリンク信頼度のような事象発生確率は推定するのが容易ではない。また、事象発生確率が不確かであれば、解析結果は不確実性を持つという考えから、倉内ら⁷⁾や瀬戸ら⁸⁾は道路網の接続性に着目して、災害発生確率や、リンク途絶確率などの不確実性を排除した非重複経路(多重性)の考え方を採用して、道路網そのものを評価する手法を提案した。

本研究ではリンク信頼度に関しては直接取り扱わない。

3. 緊急輸送道路ネットワークと防災拠点

(1)自然災害時に備えるべき道路網の特性

古くから道路網の強さを表現として、代替性、冗長性、多重性(redundancy)などの概念が使われてきた。阪神淡路大震災以降、道路網の強靱性という表現が使われ始め、頑健性(Robustness: ロバストネス)、脆弱性(vulnerability)などの表現も用いられている。東日本大震災後は地域復興のイメージを重ねて、レジリエンシー(resiliency: 弾力性、回復力)という表現が盛んに使われているが、人工物である道路網の備えるべき性質としては、回復という概念を含めることは適切ではなく、むしろ構造物としての頑健性: robustness と網としての代替性: redundancy, 脆弱性: vulnerability を問題にすべきである。

(2)緊急輸送道路ネットワーク

緊急輸送道路ネットワーク計画(建設省道防発第四号、平成八年五月一〇日道路局企画課道路防災対策室長通知)は、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防災拠点を相互に連絡する道路網の計画であり、3段階に分けて策定される。

①第1次緊急輸送道路ネットワーク(県庁所在地、地方中心都市及び重要港湾、空港等を連絡する道路)、

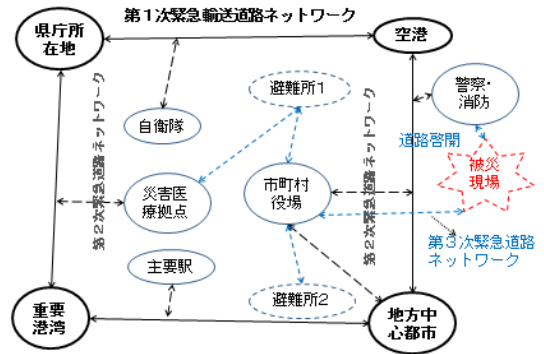


図-1 緊急輸送道路ネットワークのイメージ

②第2次緊急輸送道路ネットワーク(第1次緊急輸送道路と市区町村役場、主要な防災拠点(行政機関、公共機関、主要駅、港湾、ヘリポート、災害医療拠点、自衛隊等)を連絡する道路)、

③第3次緊急輸送道路ネットワーク(その他の道路)。

そして、第1次、第2次ネットワークでは、多重化、代替性を確保することとされている。図-1は、緊急輸送道路ネットワークの概念図である。

(3)防災拠点(指定拠点)

緊急輸送道路ネットワークにおける指定拠点は、都道府県知事が定める防災拠点である。防災拠点には、広域供給拠点である空港、駅、高速道路インターチェンジ、港湾など、指令的拠点である地方整備局、県庁、市町村役場、区役所等の災害対策本部、県警本部などと、実動的拠点である地整工事事務所、県土木事務所、警察署、消防署、自衛隊、救急医療機関、道の駅、支援物資集積所、地域拠点である避難場所などのランクがある。

拠点間の道路の連結は、災害の発生状況に応じた、災害対策本部からの連絡(指令)、実動的拠点から被災現場、避難場所等への要員(部隊)の派遣・応援、機材や緊急支援物資の運搬と実動拠点相互の物資・機材等の融通のために必要である。

4. ツリー構造による道路網の多重性の考察

(1)防災拠点間の同時連結の必要性

防災拠点間の道路の連結は、災害対策本部からの連絡(指令)、実動的拠点から被災現場、避難所等への要員(部隊)の派遣・応援、機材や物資の運搬と実動拠点相互の物資・機材等の融通のために必要となる。

災害の発生場所や規模によって、中心的に実動する拠点の組み合わせ(実動体制)は災害によって異なり、それを発災前に知ることは不可能といえる。したがって、災害の状況に応じた体制を短時間のうちに整え、機能さ

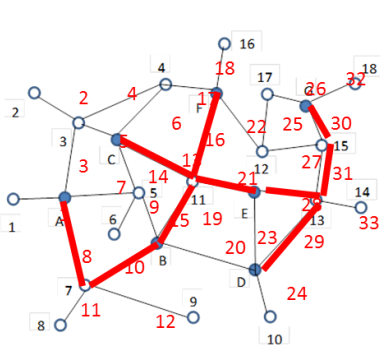


図-2 ネットワークとシュタイナー木

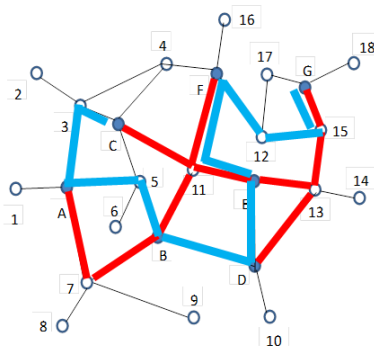


図-3 互いに共通なリンクを持つ2つのシュタイナー木

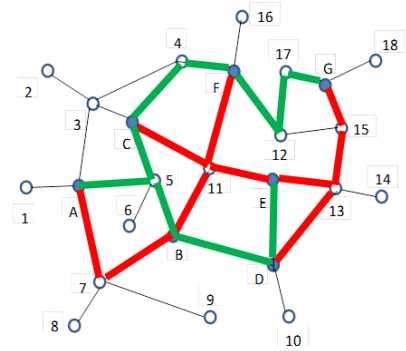


図-4 互いに辺素な2つのシュタイナー木

せるためには、防災拠点相互が道路で同時に連結されていることが必要になる。

(2)災害時の道路網分析におけるツリーの重要性

災害時の道路網の役割を考えると、発災直後は、防災拠点相互と防災拠点から被災地への緊急車(消防・救急・警察・自衛隊など)のアクセスができることが重要である。対象とする道路網上のすべてのノードをつなぐために必要な最低限の道路網は、ツリー状の道路網である。したがって、災害時の道路網の連結性の基本にあるのはツリー構造であり、代替性、多重性は、あくまで必要なノードを連結したツリーにリンクを加えることで高まる。代替性、多重性による道路網形状の評価は、ツリーによる最低限の連結性の評価を基礎として成立すると考えられる。

(3) 全域木とシュタイナー木

ネットワーク内のすべてのノードをつなぐツリーを**全域木**という。また、すべてのノードの中から選ばれた**特定ノード**群をつなぐツリーを**シュタイナー木**という。シュタイナー木を構成するノードには、特定ノード以外の**一般ノード**も含まれる。図-2は道路網における1つのシュタイナー木を表したものである。図中の青○印は特定ノード、その他の白○ノードが一般ノード、赤い線がシュタイナー木を構成するリンク群である。1つの道路網には複数のシュタイナー木が存在する。図-3、図-4は2本のシュタイナー木の組合せを表したものである。図-3のように共通なリンクを持つシュタイナー木の組み合わせ(赤と青)が一般であるが、これに対して、図-4のように共通でないリンクで結ばれたシュタイナー木の組み合わせ(赤と緑)を**互いに辺素な**シュタイナー木という。互いに辺素なシュタイナー木は、共通ノードを持つ可能性はあるもののリンクに関しては相互に完全な代替性を持つため、道路網の多重性の分析に有効である。

(4)互いに辺素なシュタイナー木の性質

表-1 特定ノード間の経路上のノード番号

特定ノード		B	C	D	E	F	G
A	赤	7	7,B	7,B,11,E,13	7,B,11	7,B,11	7,B,11,E,15
	緑	5	5	5,B	5,B,D	5,C,4	5,C,4,F,12,17
B	赤		11	11,E	11	11	11,E,13,15
	緑		5	—	D	5,C,4	5,C,4,F,12,17
C	赤			11,E,13	11	11	11,E,13,15
	緑			5,B	5,B,D	4	4,F,12,17
D	赤				13	13,E,11	13,15
	緑				—	B,5,C,4	B,5,C,4,F,12,17
E	赤					11	13,15
	緑					D,B,5,C,4	D,B,5,C,4,F,12,17
F	赤						11,E,13,15
	緑						12,17

上段：図-4の赤のシュタイナー木における特定ノード間の経路上のノード(両端点を除く)
 下段：図-4の緑のシュタイナー木における特定ノード間の経路上のノード(両端点を除く)

ここで、互いに辺素なシュタイナー木とそれぞれから抽出された経路の関係を見てみよう。

1組のシュタイナー木(A)は、それに含まれる任意のノード間(i,j)に必ず1本の経路を有する。これを r_{Aj} とする。(A)と互いに辺素なシュタイナー木(B)にも同様に(i,j)間に唯一の経路 r_{Bj} が存在する。経路 r_{Aj} と経路 r_{Bj} とは、互いに辺素なシュタイナー木(A)と(B)から抽出されていることから、互いに辺素でなければならない。すなわち、互いに辺素なシュタイナー木から抽出された(i,j)間の2本の経路は互いに辺素であるといえる。

次に、経路 r_{Aj} と経路 r_{Bj} が互いに内素の関係にあるかを図-4の2つのシュタイナー木を用いて調べよう。内素とは両端点以外に共通のノードを持たない関係である。

まず、シュタイナー木(A)と(B)の共通ノードはすべて特定ノードとなっているが、(A)と(B)が交差することによって共有となるノードは特定ノードBのみであり、他の共通ノードはいずれも一方のシュタイナー木の端点となっている。これらの端点が2つのシュタイナー木の共通ノードになるのは定義上自明であり、端点以外の共通ノードBの存在がシュタイナー木から抽出された2本の経路が内素であるか否かにどのように影響するか注目する。

表-1は道路網上の特定ノードAからGまでの7つのノード相互間の経路をシュタイナー木(A)と(B)からそれ

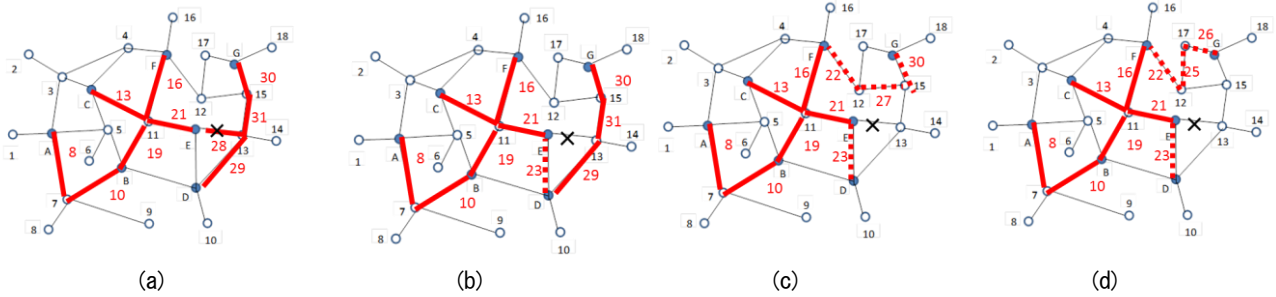


図-5 シュタイナー木の変化(その1)

ぞれ抽出し、経路の端点以外のノードを比べたものである。各セルの上段と下段でノード B のみが共通しており、ほかには共通ノードは存在しない。すなわち、端点以外のノードでシュタイナー木が交差する場合、シュタイナー木から抽出された 2 経路が共通のノードを持つ可能性があるといえる。このことは、2 組のシュタイナー木が端点以外に共通ノードを持たなければ(すなわち、シュタイナー木が互いに内素であれば)、それぞれのシュタイナー木から抽出される(i,j)間の経路は互いに内素であることを示すものである。

(5)シュタイナー木による道路網の多重性と評価方法

シュタイナー木による道路網の多重性は、様々な指標で表現される。

その一つは、互いに辺素な(あるいは内素な)シュタイナー木の最大数である。また、あるリンクの途絶によって対象道路網にシュタイナー木が存在しなくなる場合を考えると、そのリンクは道路網にとって不可欠なリンクとなる。この場合、**不可欠リンク数**も多重性の指標といえる。

さらに、次のようなシュタイナー木の変化(自由度)も多重性の評価指標といえる。たとえば、図-5の(a)においてリンク 28 が途絶した場合、(b), (c), (d)の 3 本の代替シュタイナー木が存在する。したがって、シュタイナー木(a)はリンク 28 の途絶に対して自由度 3 である。また、図-5の(a)で、リンク 28, 29, 30, 31 の右側一体のリンクが途絶した場合にも、図-6のような代替シュタイナー木が存在する。したがって、シュタイナー木(a)は 4 本のリンクの途絶に対して自由度 2 の代替性を持つ。

(6) 最小全域木、最小シュタイナー木の求め方

リンク長の総和が最小である全域木を最小全域木(あるいは最適木)という。その求め方としてクラスカル法(kruscal's algorithm)、プリム法(prim's algorithm)がある⁹⁾。

最小シュタイナー木を求める問題は、シュタイナー(木)問題と呼ばれ、通信ネットワーク、電力供給網において顧客を結ぶネットワーク上の問題や施設配置問題などの子問題として多くの応用例を有する。この問題は

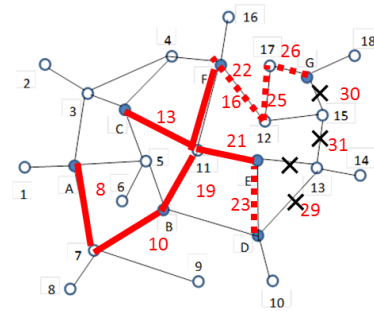


図-6 シュタイナー木の変化(その2)

ネットワーク設計問題の1つに位置づけられる NP 困難な問題であり、動的計画法を応用した Dreyfus-Wagner 法が代表的な解法とされている¹⁰⁾。

最も単純な方法として、次の数え上げ法でも求めることができる。

まず、ネットワークに 1 本でもリンクが残っている場合の組み合わせを全て出し(総リンク数 L 本のネットワークの場合、 $2^L - 1$ 通り)、条件から外れる組み合わせを消去していく。最後まで残ったものが、特定ノードを全て含むシュタイナー木であり、その中で総延長が最小のものが最小シュタイナー木である。

条件は、(1)連結であること、(2)ノード数-リンク数=1(オイラーの公式)であること、(3)特定ノードを全て含むこと、(4)次数 1 (接続するリンクの数が 1) のノードが全て重要ノードであることである。

条件(1)は連結グラフであるための条件、(2)は連結グラフが木であるための条件、(3)はシュタイナー木であるための条件、(4)は不要なリンクを含まないための条件である。

また、最小シュタイナー木上の任意の 2 拠点間の経路が、全道路網における 2 拠点間の最短経路の α 倍(迂回率 α) 以下であることを制約条件として含めることによって、現実の緊急輸送道路ネットワークを求めることができる。

5. 実在道路網におけるシュタイナー木

実在する道路網における防災拠点とそれらを結ぶシュタイナー木の関係を分析する。なお、この章は現実の道路網におけるシュタイナー木の姿を示すことを目的とするものであり、分析結果そのものに特別な意味を見出そうとするものではない。

(1) 対象道路網と防災拠点

本研究では福岡市の指定する幹線市道以上の道路から成る道路網を対象とした。この道路網のノード数は1012、リンク数は1730である。仮定の防災拠点として道路網の中から指令拠点、広域交通拠点、実働的拠点、主要地域等の地域拠点を網羅するよう主要20ノードを抽出した。図-7は対象道路網（赤線は都市高速道路）と主要ノードを示す。

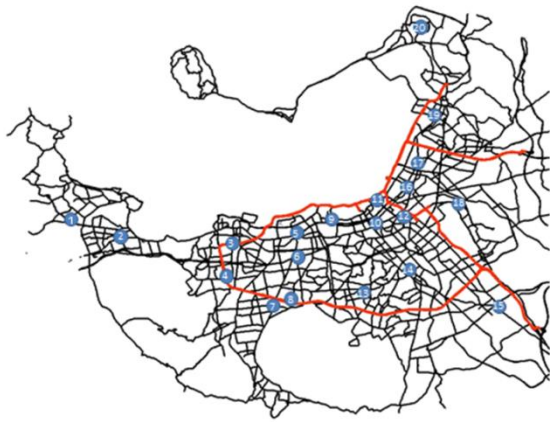


図-7 対象道路網と主要拠点

表-2 福岡市の主要拠点

① 元岡	⑪ 博多港
② 九大学研都市	⑫ 博多駅
③ 姪浜	⑬ 長住
④ 橋本	⑭ 大橋
⑤ 西新	⑮ 雑餉隈
⑥ 別府	⑯ 九大病院
⑦ 野芥	⑰ 箱崎
⑧ 福大病院	⑱ 福岡空港
⑨ 大濠公園	⑲ 千早
⑩ 福岡市役所	⑳ 和白



図-8 通行不能リンク

(2) 分析方法

北部九州圏パーソントリップ調査におけるCゾーンベースの自動車OD交通量を交通量配分し、道路網条件毎にリンクの所要時間を求めた。次に主要拠点20か所の拠点相互の最短経路をダイクストラ法で計算し、実距離と所要時間の2通りについて拠点間最短経路を重ね合わせたリンク集合を作成した。このリンク集合からプリム



図-9(a) 通常時の道路網と防災拠点に対応するシュタイナー木①



図-9(b) ①と非重複なシュタイナー木②

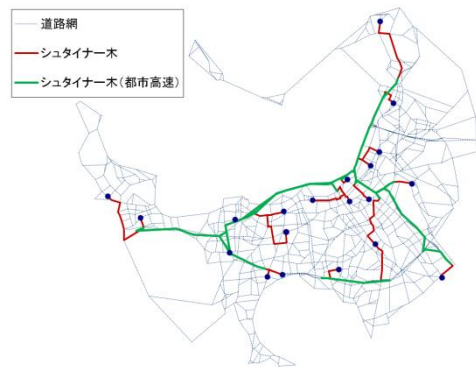


図-10 通行不能リンクに対するシュタイナー木③

表-3 シュタイナー木の総主要時間・距離

分析ケース	総所要時間(分)	総延長(km)
通常時	122.52	88.24
通行不能区間の存在(災害発生)時	133.17	90.32

法³⁾で最小全域木を求めた。この際に、主要拠点間の最短経路を求める段階で各リンクが重複して利用された回数 n を各リンクの重みとして用いた。最後に最小全域木のうち拠点以外のノードで次数 1 のノードに接続するリンクを除去することでシュタイナー木の解を求めた。

(3) 分析結果

設定した 20ヶ所の主要ノードを含むシュタイナー木について、①通常時と②浸水と渋滞が同時発生した場合の 2パターン分析した。

ここで図-8には現実には発生した浸水時と渋滞時における通行不可リンクを示す。本研究では、②のケースを災害によって道路が通行止めとなった場合に見立てて分析を進めた。図-9(a)は通常時のシュタイナー木を示し、図-9(b)は、道路網から図-9(a)のシュタイナー木を構成するリンク群を除いた道路網について上記の方法で再度シュタイナー木を求めたものであり、図-9(a)のシュタイナー木とは互いに辺素な関係にある。さらに、道路網から図-9(a), (b)のシュタイナー木を除外した残りのリンク群からさらなるシュタイナー木の抽出を試みたが不成功であった。すなわち、本研究では、福岡市の幹線市道以上の道路網は表-2の拠点を連結する互いに辺素なシュタイナー木を 2組見つけることができた。

図-10は②の場合のシュタイナー木を示しており、災害等で一部のリンクが通行不能になっても主要拠点を結ぶ新たなシュタイナー木が形成されているというように読むことができる。また表-3はシュタイナー木を構成するリンクの総所要時間・総距離を表している。通行不能区間の出現によって迂回を強いられ、やや緊急輸送路としての機能が低下しているが、全体として特に大きな差ではないと判断できる。

6. 結論と今後の課題

本稿では、まず前半で、自然災害の被災地区の救助救援のための緊急輸送道路ネットワークの在り方を述べ、緊急輸送のための道路網の連結状況分析にツリーが有効であること、シュタイナー木を用いることで、道路網上の特定のノード群を最終的に連結するネットワークの在り方と互いに辺素な代替シュタイナー木の考え方を導入することで、緊急輸送道路ネットワークにおける多重性の考察が可能になること、辺素(内素)なシュタイナー木からは辺素(内素)な代替経路を抽出できること、シュタイナー木を用いた道路網の多重性の評価法、全域木・シュタイナー木の求め方などを述べた。

後半では、福岡市の幹線市道以上の道路網と主要拠点を対象として、シュタイナー木が具体的な形状と相互に

辺素なシュタイナー木を抽出した。また、過去の浸水での通行止めや渋滞等での通行不可となったリンクを災害時の通行止め区間に見立てて、シュタイナー木の変化を分析し、対象とした通行止めの条件下において、シュタイナー木の連結性に特に重大な機能低下は認められないことなどとの結果を得た。これらは、実在道路網上でのシュタイナー木の性質を見るために、仮想の拠点設定と通行止めの想定に基づいた結果であり、具体的な施策提言を目的としたものではない。

今後は、シュタイナー木を用いた 1次～3次までの段階的な緊急輸送道路ネットワークの形成の方法について研究を進めたい。

参考文献

- 1) 中山昌一朗, 朝倉康夫: 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 2014.9
- 2) 飯田恭敬, 若林拓史, 福島博: 「道路網信頼性の近似解析方法の比較研究」, 土木学会論文集, 第 407 号/IV-11, 107-116, 1989
- 3) 若林拓史, 飯田恭敬, 井上陽一: 「シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法」, 土木学会論文集, No458/IV-18, 35-44, 1993.1
- 4) 南正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一: 「道路網における代替ルート整備水準の一評価法に関する研究」, 土木学会論文集, No.530/IV-30, 66-77, 1996.1
- 5) 堀井雅史: 「代替機能を考慮した自然災害時における道路網復旧優先順位設定方法に関する基礎的研究」, 土木計画学研究・論文集, No15, 337-344, 1998.9
- 6) 宇佐美誠史, 寺内義典, 川上洋司, 本多義明: 「災害時の道路網評価における道路の強靱性に関する研究」, 土木計画学研究・論文集, No15, 713-720, 1998.9
- 7) 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」, 第 42 回土木計画学研究発表会・講演集, 2010
- 8) 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」, 第 37 回土木計画学研究・講演集, 2008
- 9) 船曳信生・渡邊敏正・内田智之・神保秀司・中西透 (2012) 『未来へつなぐデジタルシリーズ 14 グラフ理論の基礎と応用』 共立出版
- 10) B.コルテ, J.フィーゲン: 組合せ最適化(第2版)理論とアルゴリズム, 丸善出版, 2012

(2018.7.31 受付)

STUDY ON CONSTRUCTION OF EMERGENCY TRANSPORTATION ROAD NETWORK BY STEINER TREE

Satoshi TOI, Yoshinao OEDA

Securement of emergent transport route for rescue operation and transportation of urgent goods is required just after the occurrence of a natural disaster. And an emergency transportation road network plan is settled on as a preliminary measure, and the designation on the emergency transportation road and the maintenance have been put into effect.

In this study a method is considered to ensure the state where all the important nodes of disaster prevention node are connected at the same time. And a method to plan the emergency transportation road network using the thought of Steiner tree is proposed. And then, the characteristics of Steiner tree and redundancy of Steiner tree are thought.