

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22429

研究課題名(和文)形状論アプローチによる災害時を見据えた道路ネットワーク脆弱性評価手法の確立

研究課題名(英文)Evaluation method of road network vulnerability for disaster by topological approach

研究代表者

安藤 宏恵(Ando, Hiroe)

熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・助教

研究者番号：00880056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：災害発生時に深刻な機能不全を引き起こさない道路ネットワークを構築することを目的に、脆弱性の要因となり得る形状的特徴を見出すための分析を行った。規則的なネットワークと道路ネットワークに対し空間的・平面的接続性指標に基づく比較、整理をおこない、道路特有の性質をもつネットワークに有効な指標を明らかにした。

そのなかでも道路ネットワーク接続性指標として最大固有値に着目し、接続性向上のためのリンク増強案を最大固有値最大化によって提案した。さらに接続性の観点から脆弱性評価をおこない、部分的欠損による影響を分析した結果、道路ネットワークにおいて媒介中心性による欠損の影響が最も大きいことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネットワークの形状的特徴を表現可能なNetwork Science指標は計算が非常に簡便であり、ネットワーク規模や詳細度の制限も持たないため、あらゆる対象地域に適用可能であること、多くの既存指標が研究されているなどの利点を持つ。しかし、道路ネットワークは交差点に接続する道路の本数が限られることや地理的特徴などの空間的制約が存在する特殊なネットワークであり、これら特有の性質を考慮する必要がある。そのため、一般的な道路ネットワーク位相生成モデルを活用し、格子、ツリー、車輪といった規則的なネットワークと比較したうえで脆弱性に影響を及ぼす因子を明らかにしたことは意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to construct road networks that do not cause serious degradation on a disaster. The topological characteristics that may contribute to vulnerability are analysed. Comparison and Organisation based on spatial and planar connectivity indices for regular and road networks revealed effective indices for networks with road-specific characteristics.

Focusing on the largest eigenvalues as a road network connectivity indicator, link enhancement plans for improving connectivity was proposed by maximising the largest eigenvalue. The impact of partial failures was analysed by vulnerability evaluation considering connectivity, the results showed that the impact of failures based on the betweenness centrality is the largest in the road networks.

研究分野：交通ネットワーク

キーワード：道路ネットワーク 脆弱性 頑健性 媒介中心性 最大固有値

1. 研究開始当初の背景

甚大な被害をもたらす災害が頻発している我が国において、災害に強い社会形成は非常に重要であり、予め災害を見据えたインフラシステムを整備しておく必要がある。とりわけ移動・輸送機能を備える交通システム、特に道路が担う役割は大きく、非常時に深刻な機能低下に陥り救援物資輸送や人命救助、住民避難等が滞ることのない道路ネットワークの構築が求められる。災害発生を見越し脆弱区間を特定する手法が多く提案されるなか、本研究ではネットワークの繋がり方の特性を分析することで形状的特徴の変化が脆弱性評価に及ぼす影響を定量化することを試みた。つまり、道路特有の性質を持つネットワークにおいて、このような脆弱性評価の要因となり得る形状的特徴を見出すことが可能であるかという点が本課題の問いであった。これは道路の新設、増設、廃止といったあらゆる変容をもたらす施策に対し、脆弱でない道路ネットワーク実現のためにはどこにどのような整備を施す必要があるのか、既に十分なシステムが備わっており維持管理の整備に重点をおくべきなのか、といった指針の確立に繋がる。

2. 研究の目的

災害発生時に深刻な機能不全を引き起こしづらい道路ネットワークが持つ形状的特徴を明らかにし、具体的に求められる道路整備を提案可能な方法論を確立することを目的とする。脆弱性評価に起因するネットワーク形状の潜在的かつ普遍的な特徴を探求し、あらゆる規模や対象範囲の道路ネットワークに共通する脆弱でないシステム整備実現を見据える。

- (1) 形状的特徴の観点から道路ネットワーク整備において効果的な区間や必要な程度を示す指針を確立することを目的とし、複数のネットワーク間を比較可能な形状論に基づく脆弱性評価方法を確立する。ノードやリンクに対する評価だけではなくネットワーク全体としての一つの評価値を定める指標を考案し、形状的特徴を示す指標との関連性を分析する。
- (2) インフラシステムの一つである道路に対し、部分的な損傷が発生したとしても機能不全に陥らないネットワーク構築への貢献を見据え、まずは道路ネットワークの性質とノード除去による頑健性評価の関係性を検証する。次数分布が所与であるモデル的ネットワークにおいては、部分的な損傷がネットワークに及ぼす影響に関する理論が構築されているが、道路ネットワークのように、1つの交差点に接続する道路本数が制限されており、特異的な接続構造と考えられるネットワークにおける現象を説明する研究は多くない。頑健性の評価観点として、最大連結成分のみではなく、残存するネットワーク内の接続性を加味した頑健性評価指標を提案する。

3. 研究の方法

- (1) 推定が困難な災害時の需要パターンや事象の生起確率を必要とせず、簡便な計算アルゴリズムによって評価可能であるという観点から、**Network Science** の知見を援用した道路ネットワーク評価手法も多く研究され始めている。各リンクに重みを与えることができる **Network Science** 指標の性質を生かし、評価目的に応じた項目の影響を加味した形状論アプローチに基づく評価をおこなう。安藤ら¹⁾は道路整備による経年的なネットワークの変化に対して、交通容量を重みとする固有ベクトル中心性により道路ネットワークの接続性が評価可能であることを示した。固有ベクトル中心性は重要なノードと接続しているノードと多く隣接している場合に中心性が高くなるという指標であり、重要度の高いノードと接続することでより重要度が増すという性質を持つ。隣接ノードだけではなく周辺ノードからもたらされる伝播的な影響を考慮可能である利点がある一方、ネットワーク内の相対的な評価にとどまるため、リンクやノードの欠損または追加等の影響を評価しづらいという欠点を持つ。そのため本研究では、固有ベクトル中心性の基となり、対象とするネットワークに唯一である最大固有値の指標に着目し、道路ネットワーク接続性評価の可能性について検証する。
- (2) ネットワークの部分的欠損が及ぼす影響や大きな影響を与えるためのノード除去方法に関する研究の多くは、古典的パーコレーション理論を基にしている。パーコレーション理論とは、ネットワーク内にノードやリンクを追加した際に起きる現象を繋がりの特徴や性質によって説明する理論である。この理論を逆手に取り、ある割合のノードが取り除かれた時に巨大連結成分が消滅する閾値によってネットワークの頑健性を評価する。²⁾ノード除去方法には、ネットワーク内のノードを無作為に抽出するランダム攻撃と、何らかのルールに則って抽出する標的型攻撃がある。標的型攻撃ではノードを除去するごとに標的を再検討する逐次標的型攻撃と、最初の状態をもとにあらかじめ除去の順番を定める同時標的型攻撃に分類される。本研究では、インフラネットワークの一部が災害等の影響により使用不可となることを想定するため、同時被災などの状況も踏まえ同時標的型攻撃を前提とする。

4. 研究成果

(1)

- i. 重み付き有向グラフにおける最大固有値について、ネットワークが強連結であるとき、新規リンクの追加または既存リンクへの重みの追加を行ったネットワークの最大固有値は元のネットワークの最大固有値よりも必ず大きくなることを証明した。
- ii. 上記の性質を持つ重み付き有向グラフの最大固有値について、既存または新規のリンクに重みを追加する際にどのような挙動を示すのか、図-1 に示す簡単なテストネットワークを用いて検証した。複数の既存リンクへ同時に重みを追加した際の最大固有値の挙動として、10本の既存リンクの中から3本を選択し、それぞれ100ずつの重みを追加したとき最大固有値が大きくなる上位5パターンの結果を表-1 に示す。各リンク番号の括弧内の数字は、各リンク1本ずつに重みを追加した際の最大固有値の順位を示す。これにより必ずしも1本ずつ重みを追加した際の順位通りの組み合わせではなく、同時に追加することの相乗効果により最大固有値が大きくなるリンクの組み合わせが存在することがわかった。また、重みを持つ新規リンクの追加により、総追加重み値は同じでも組み合わせ内の重み分布によって最大固有値は変化することが確認できた。

- iii. リンク増強のための指標として最大固有値を扱う場合、同時に複数リンクを対象にそれぞれ異なる程度の増強を施したときの効果を考える必要があるといえる。追加される重みの総量が定まっている状況で最大固有値を最大化するために、どのリンクにどの程度の重みを追加するべきなのかを明らかにする最大固有値最大化問題を定式化し、簡易なネットワークに適用した。総追加重み量、各リンクの追加重み量を制約条件に最大固有値最大化とする隣接行列を求める問題は次のように記述される。

$$\max_{\mathbf{B}} \lambda^* \tag{1}$$

subject to

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{x} = \lambda^*\mathbf{x} \tag{2}$$

$$\|\mathbf{x}\| = 1 \tag{3}$$

$$\sum \mathbf{B}_{ij} \leq Y \tag{4}$$

$$\mathbf{B}_{ij} \leq y_{ij} \tag{5}$$

$$\mathbf{B}_{ij} = 0 \quad \forall i = j \tag{6}$$

ただし、 λ^* は最大固有値、 \mathbf{x} は対応する固有ベクトル、 \mathbf{A} は既存の重み付き隣接行列、 \mathbf{B} は追加する重みを表す隣接行列、 Y は総重み追加量の上限值、 y_{ij} はノード*i*からノード*j*へ接続するリンクが持つことができる重みの上限値とする。目的関数を満たす行列 \mathbf{B} を求めることでリンク補強プランを導く。この問題は、 \mathbf{x} がデザイン変数 \mathbf{B} により内生的に決まる非線形計画問題となっている。

- iv. 図-1 に示すテストネットワークに対する隣接行列 \mathbf{A} を既存の状態として、総重み追加量の制約 Y を500, 600, 700, 800とした場合の既存リンクへの重み追加量、新規リンクの追

表-1 最大固有値上位5パターンの組み合わせ

順位	最大固有値	リンク A	リンク B	リンク C
1	257.070	1 (1)	6 (2)	7 (3)
2	253.791	1 (1)	4 (5)	6 (2)
3	252.294	1 (1)	6 (2)	8 (4)
4	249.977	1 (1)	4 (5)	8 (4)
5	247.401	4 (5)	6 (2)	8 (4)

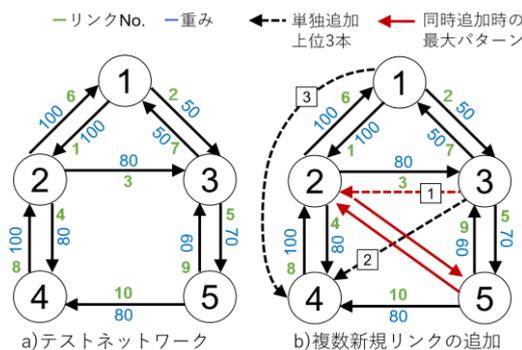


図-1 試算に使用したネットワークと計算結果

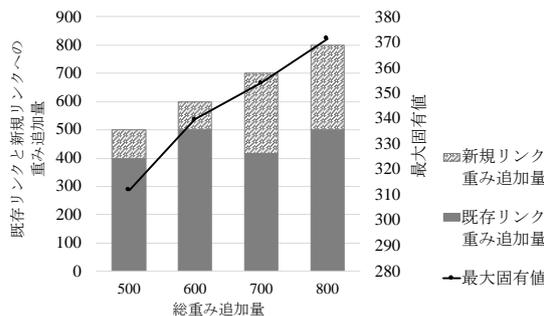


図-2 総重み追加量と最大固有値

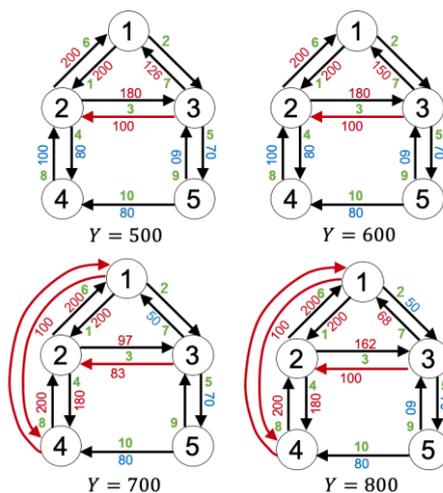


図-3 試算に使用したネットワークと計算結果

加状況を図-2, 図-3 に示す. なお, 各リンクの重みの上限 y_{ij} は既存リンク, 新規リンクどちらも 100 とし, 既存ネットワークの総重み量は 770 である. 図-2 より, 総重み追加量の制約が大きくなるにつれて最大固有値も単調に増加している. それぞれのリンクに対する重みの追加量 (図-3) では, Y が 500 から 600 に増加する変化においては, 重みが追加されるリンクの構成は変わらず, ノード 1, 2, 3 の接続を強固にする解となっている. Y が 700 となると, 新たなリンクとしてノード 1, 4 を接続する両方向のリンクが新設され, Y を 800 とした場合においても同じリンク集合を対象にさらなる重みの追加をおこなう結果となった. 与えられた総重み追加量の制限のもと最大固有値最大化のためのリンク補強箇所について, 既存リンク, 新規リンクを組み合わせた重み配分が可能であることが確認できた.

(2)

- i. ノード除去に対するネットワークの頑健性を評価する方法として, 最大連結成分サイズに基づくネットワーク全体の頑健性指標 ³⁾ **Robustness Index** がある. 最大連結成分サイズに基づく指標の場合, ネットワークが疎であっても連結成分が大きければ機能が維持されると評価される. しかしながら, 道路ネットワークを扱う際には連結成分のサイズのみではなく, ノード除去後の連結成分の接続性も考慮する必要がある. ここでは, ネットワーク内により強固な部分が存在するほど値が大きくなる隣接行列の最大固有値を接続性指標として活用した. 表-2 に示すように, 同様の性質を持つネットワークではサイズが大きくなるほど最大固有値も大きくなることがわかった. また, 定理と証明の部分で後述するように同じノード数である場合, リンク数が増加するほど最大固有値も増加することがわかっている. そのため, 最大固有値に基づく評価では残存するネットワークサイズと接続性を併せた評価が可能であると考えた.

- ii. ノード除去が進行するといくつかのサブネットワークに分割されるが, その際の最大連結成分ではなく, 最も大きな最大固有値を持つサブネットワークに着目する. ノード除去前の最大固有値に対する最大固有値減少割合によって頑健性を評価する **Connectivity Robustness Index** を以下のように定める.

$$CR = \frac{1}{N} \sum_{q=\frac{1}{N}}^1 E(q) \quad (7)$$

$E(q)$ はノード除去率 q に対する最大固有値の割合である. 接続形態によってはノード数が多く疎なネットワークとノード数が少なく密なネットワークでは, 小さくて密なネットワークの接続性が強い場合がある.

- iii. 道路ネットワークは, 前述したスケールフリー性やランダム性, 規則性等の性質を持たないというえに, 交差点に接続する道路の本数は限られるなどの空間的な制約が存在する特殊なネットワーク形状である. ここでは, O' Hara et al. ⁵⁾ によって示された一般的な道路ネットワークの位相生成モデルを活用し, 試算用の道路ネットワークデータ 25km^2 エリア内に (ノード数 $N: 100$, リンク数 $M: 200$), ($N: 100$, $M: 250$) の平均次数 4, 5 となるネットワークを各 100 ケースずつ作成した. 道路ネットワークモデルにおいて, 次数に関する指標である次数相関, 次数エントロピーと最大固有値の関係性を図-4, 図-5 に示す. 次数相関とは, 次数が高いノード同士, 低いノード同士が接続される時に高くなる指標であり, 正の相関では似た次数のノードが接続しやすく, 負の相関では異なる次数のノードが接続しやすい. リンク数が多い, つまり平均次数が大きいほど最大固有値は大きくなることがわかる. さらに, 次数相関, 次数エントロピーともに最大固有値と正の相関がある. 最大固有値の特性として, 似たノード同士が接続するネットワークであり, かつ均等であるほど値が大きくなる傾向がある. また, 最大固有値はリンク数に応じて値に明確な差があるが, 次数相関と次数エントロピーはリンク数が多いネットワークほど指標値が大きくなる

表-2 グラフ種類別のネットワークサイズと最大固有値

	ノード数	リンク数	最大固有値
格子グラフ	25	40	3.464
	100	180	3.838
	225	420	3.923
ツリーグラフ	25	48	6.000
	100	196	6.059
	225	441	6.059
車輪グラフ	25	24	2.687
	100	99	2.973
	225	224	3.682

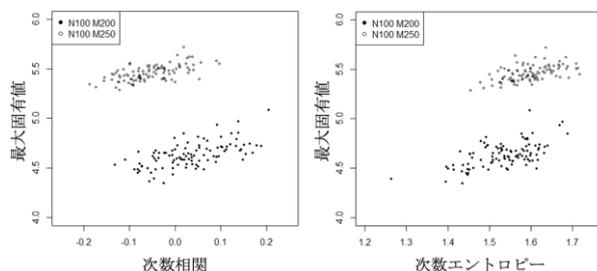


図-4 次数相関と LEV 図-5 次数エントロピーと LEV

ような傾向はみられなかった。

- iv. 生成した道路ネットワーク 2 パターンを 100 ケースずつに加えて、比較対象として格子ネットワークと車輪型ネットワーク（いずれも $N=100$ ）を用いて、Robustness Index, Connectivity Robustness Index について、ランダム、次数 (Degree), 媒介中心性 (BC) をもとにしたノード除去による影響を評価した。道路ネットワークを対象にする場合、最大連結成分サイズ、最大固有値に基づく Robustness Index, Connectivity Robustness Index どちらにおいても次数順のノード除去が最も効果的であることがわかった。特に媒介中心性順のノード除去は他のネットワークよりも道路ネットワークに対する効果が大きいことがわかった。さらに、提案した接続頑健性評価指標と従来の頑健性指標の関係性では、次数順、媒介中心性順においてどちらかの指標のみ極端に頑健性が高いまたは低いネットワークは少ないものの、強い相関はみられなかった。これは、サブネットワークの大きさのみならずネットワークの密度、より強固に接続する部分の存在など最大固有値によって接続性の観点を加味した結果であるといえる。

Reference

- 1) 安藤宏恵, 倉内文孝, Network Topology 指標による道路ネットワーク整備の効果検証に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画), 75 (6), pp.445-454, 2020.
- 2) Barabasi, A, Network Science, Cambridge Univ Pr, 2016.
- 3) Schneider C, Moreira A, Andrade Jr J, Havlin S, Herrmann H, Mitigation of malicious attacks on networks, Proceedings of the National Academy of Sciences 108: 3838–3841, 2011.
- 4) O'Hare S, Connors R, Waltling D, Using Ensemble Analysis to study the effects of Network Topology on Performance in Urban Road Networks, arXiv preprint arXiv:2011.11121, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 ANDO Hiroe, KURAUCHI Fumitaka	4. 巻 76
2. 論文標題 IDENTIFICATION OF ROAD NETWORK FUNCTIONAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS BY EIGENVECTOR CENTRALITY ANALYSIS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	6. 最初と最後の頁 364 ~ 376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.76.4_364	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安藤宏恵, 倉内文孝, 朝倉康夫, 中西航
2. 発表標題 最大固有値を用いた道路ネットワーク接続性向上に関する研究
3. 学会等名 第62回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤宏恵
2. 発表標題 接続性の概念に基づく道路ネットワーク頑健性評価手法の検討
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------