

区間重複を考慮した地方都市部道路網の冗長性指標に関する一考察

A Study of Redundancy Index on Road Network in a Local City: Consideration of Overlap Section between Alternative Routes

土屋 哲¹, 岩田 千加良², 谷本 圭志¹

Satoshi TSUCHIYA¹, Chikara IWATA² and Keishi TANIMOTO¹

¹鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

Department of Social Systems and Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tottori University

²鳥取大学 技術部

Technical Department, Tottori University

Disruption of highway in a disaster time can be an obstacle for a search and rescue operation, refuge activity and a fire-fighting activity, which can prevent from quick recovery. Therefore, it is important to build road network with a certain level of redundancy for a region resilient against disasters. This study aims at showing an evaluation framework of road network redundancy by employing a concept of centrality from social network analysis. Comparing with existing studies, this approach can deal with overlap section between alternative routes, and a result of calculating the redundancy index shows a big difference whether or not overlap section has been considered.

Keywords: road network, redundancy index, overlap section of the alternative routes

1. はじめに

災害により道路交通網の途絶が生じれば、災害発生直後の救助活動や避難活動、消防活動等に支障をきたし、道路の復旧が遅れば、長期にわたって生活物資、復旧資材の輸送や、ひいては経済活動に甚大な影響が生じうる。ライフラインネットワークシステムは、その一部分が機能しなくなるだけでも時としてネットワーク全体に影響を与えることがあり、上下水道、ガス、電力ばかりでなく道路においてもそのような状況が見られる。震災後の交通機能の低下は各種活動に多大な影響を及ぼすことから、道路が寸断しても通常時と比較して影響を最小限にするようインフラ整備をすることは防災対策上重要な課題であると認識されてきた。

道路網は、経路の一部が途絶しても代替ルートが存在すればその目的地に到達できるというネットワークの特性を持つ。代替ルートの利用により途絶時においても平常時と同等の条件で目的地に到達できるなら途絶の影響は少ないといえる。したがって、道路整備計画の中で代替ルートの存在を考慮し、途絶時の迂回交通の処理、避難路の確保、医療・救急活動等の様々な道路交通機能に支障を生じないように、一定の冗長性をもつネットワークを構成することが必要と考えられる。このように、道路に途絶が生じるような災害時においても生活活動や都市機能を維持するには途絶道路をバックアップする代替ルートが不可欠であるとの認識に立ち、災害に強い地域づくりの観点から道路ネットワークを評価する方法について検討がなされてきた。

災害大国、特に大地震などでこうした被災状況に直面しやすいわが国においては、ネットワーク性を有するシステムの冗長性を確保する、高めるといった施策を実施していくために、計画情報として冗長性の評価が重要であることは論を待たない。その際、担当部署の自治体職員など防災・災害の実務に携わる人々にとって簡便な評価手法という視点は、実用的に意義がある。簡便なことで仮に厳密な評価とはならないとしても、簡便な評価で明らかに実施に値しない施策は、厳密な評価を行ってもやはり実施に値しない施策であることは明白だからである。

このような背景の下、本研究では、ある起終点間の連結性に関して道路ネットワークの冗長性を評価する方法について検討を行う。特に、経路と経路の間の区間重複に着目する。経路の重複の観点から先行研究を二つに大別し、簡便な手法の下で経路重複を考慮して冗長性を評価する方法について検討する。その上で、提案する指標を災害時に自治体実際に緊急輸送路線としての機能を想定している『防災幹線道路ネットワーク』を対象に適用し、その有効性や課題について整理する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 先行研究

道路途絶を想定した冗長性・代替性や連結性に関する研究は古くから行われてきており、数多くの蓄積がある。例えば若林ら¹⁾は、実際に起こったロマ・プリスタ地震

による通行不能箇所の発生を例に、走行の保証を表現する確率指標として連結信頼性を定義し、同様の被害が日本において起きた場合の実証的な分析を行っている。また、朝倉ら²⁾は、通行規制がしかれた場合の道路ネットワークの交通流から災害時における道路ネットワークの変化を考慮した連結度指標について指標化や実用化に対する信頼性評価の考察を行い、交通流の変化を記述できる交通量配分法を提案している。

柘谷³⁾は、道路の寸断を扱ったシミュレーションをもとに最短距離行列を作成し、道路網の分離度から災害時における孤立地域の発生を評価し、孤立をできるだけ防ぐためにいずれのリンクを対象に復旧対策を施すかを決定するための連結信頼度を求めて、復旧対象のリンクの選定を行う研究を行っている。

堀井⁴⁾は、代替機能を評価する指標として計量地理学で用いられる迂回度（各都市間の望ましいネットワーク上の距離と実際の距離との隔たりの大きさ）と近接度（ある都市から他の全ての都市への最短距離の合計）の概念を採用し、災害時の各都市の代替性を評価している。これにより、平常時および通行規制時に各都市間の最短時間がどのように変化しているのかを示し、東北地方の都市の中には、災害により道路網の代替性がかなり低下するものが存在するため強い道路整備の必要性があることを示している。

南ら^{5),6)}は、災害時のリダンダントな代替ルートの道路構成方法について研究を行っており、途絶発生時に任意の代替ルートが存在するということは途絶の被害を軽減することが可能であることを示し、経路数や移動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て、実証分析を行っている。ただし、これらの研究では、道路網の経路を網羅する際の重複や迂回距離の上限といった制約的条件に言及しながらも、それらを具体的に組み込んだ評価にはなっていない。

これに対して、瀬戸ら⁷⁾は、アクセシビリティ指標に基づき医療施設の最適配置を検討する際に、非重複経路を考慮して道路網の形状に基づく都市間連結性の評価を行っている。また、原田ら⁸⁾も同様に非重複経路を数え上げて OD ペア間の接続性を評価するアクセシビリティ指標を定式化し、これと道路途絶の影響を評価しうる接続脆弱性を合わせた総合的な評価体系から、実証分析を通じて脆弱なノードや途絶影響度の大きいリンクを明らかにしている。

都市圏道路ネットワークの冗長性評価に関しては、ネットワークの位相構造特性に着目した岡田ら⁹⁾の研究もある。これは、他の研究^{5)・8)}と比較すると、より都市システム全体からの視座を提供するものと言えよう。

(2) 本研究の位置づけ

本研究では、先に述べた道路ネットワークの冗長性評価の重要性に鑑み、実用的な冗長性指標について検討する。先行研究をふまえると、冗長性指標の検討に有力なアプローチは南ら⁶⁾のように経路長の調和平均を基礎に冗長性を評価する方法、または瀬戸ら⁷⁾や原田ら⁸⁾のように非重複経路を考慮し、アクセシビリティとして冗長性を評価する方法、の二つに大別できる。このうち後者は、技術的には高度な手法と言えるが、評価・計算の考え方がやや複雑であり、またアクセシビリティに係る距離減衰パラメータの設定が容易ではないと考えられる。これに対して前者は、評価・計算の考え方が簡便で実用性が高いこと、道路ネットワーク情報と評価対象となる

起終点情報のみで冗長性を計算でき、しきい値以外のパラメータは必要ないことが特徴である。そこで本研究では、計算の簡便性、実用性に重きをおき、前者のアプローチをとる。ただし、南ら⁶⁾の計算方法においては経路の重複が評価指標に反映されるしくみにはなっていないため、本研究ではこの点を改善した冗長性指標の検討を行う。経路重複の問題に対しては、先行研究にあげられているように「非重複経路を数え上げる」ことで冗長性指標の算出に用いられる経路を特定するとの立場が考えられる。こうした方法も一つの解決法であるが、本研究では、別の視点から検討する。すなわち、「冗長性指標の算出に経路の重複を許容するが、もし経路重複がある場合には、その分だけ冗長性が下がるような指標を検討する」との立場をとる。次章にて、簡単な道路ネットワークを用いた算出例とともに本研究で提案する冗長性指標の考え方を説明する。その際、経路重複の扱いの有無が指標に大きく影響することを指摘する。

3. 冗長性指標のモデル化

(1) 頂点对の冗長性指標

ここでは、シンプルなネットワークの例を用いて、冗長性算出の考え方について記す。図 1 に示す道路ネットワークは、ノード S を起点、G を終点と想定したもので、これを指標算出例のためのネットワークとする。いずれも地点 S と G を起終点とするネットワークである。また、図中の数字は、ノード間の道路距離を表す。

本章では、社会ネットワーク分析における情報中心性概念を援用したネットワークの評価手法を道路ネットワークの冗長性評価に援用できることを説明する^{10)・12)}。情報中心性は、ネットワークに含まれる頂点間の最短経路以外の経路や、経路の長さも考慮した中心性指標である。そこでは、頂点間のすべての経路が、その長さに応じて（短いほど高く評価されるように）重みづけされる。具体的には、経路の長さの逆数を用いて重みづけする。

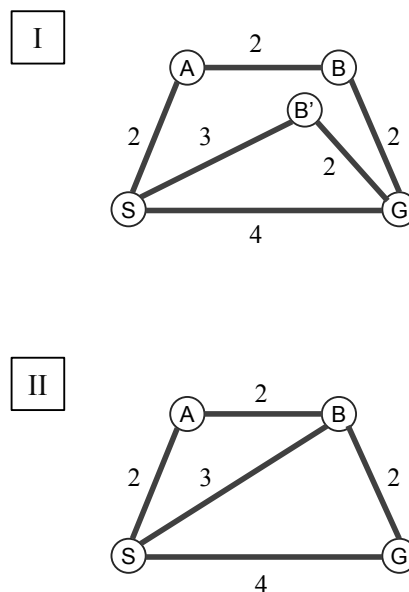


図 1 冗長性指標算出例のためのネットワーク

この考えを図 1-I のネットワークに応用してみると、端的には数え上げられる経路に関する調和平均をとることとなる。ただし、ネットワークの規模による影響をなくすため、調和平均を最短経路距離の逆数で除す。すなわち、

$$\frac{1}{1/4} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} \right) = 2.47 \quad [1]$$

となる。

しかし、図 1-II のネットワークのように、異なる経路に共通の辺がある場合には、上のように単純には計算できない。ここでは、第 1 経路（最短経路）である S-G のほかに、第 2 経路 S-B-G と第 3 経路 S-A-B-G という、全部で 3 つの経路があるが、第 2 経路と第 3 経路には B-G という重複区間が含まれている。このように重複区間のあるネットワークの場合、以下のようにして冗長性指標を算出する¹²⁾。

まず、これらの 3 つの経路を行項目および列項目にもつ 3×3 正方行列 D をつくる。このとき、 D の i 行 j 列成分は、第 i 経路と第 j 経路の間で重複する区間の長さとし、対角成分はそれぞれの経路の長さとする。図 1 の例では、1 行 1 列、2 行 2 列、3 行 3 列の対角成分はそれぞれ第 1 経路距離 4、第 2 経路距離 5、第 3 経路距離 6 となる。第 1 経路は他の 2 経路との重複区間が無いいため、1 行 j 列および i 行 1 列成分の値は 0、第 2 経路と第 3 経路の間では長さ 2 の区間 B-G が重複しているため、2 行 3 列および 3 行 2 列成分の値は 2 となる。すなわち、行列 D は次のようになる。

$$D = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 2 \\ 0 & 2 & 6 \end{pmatrix} \quad [2]$$

この行列の逆行列 D^{-1} は

$$D^{-1} = \begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.23 & -0.077 \\ 0 & -0.077 & 0.19 \end{pmatrix} \quad [3]$$

と計算される。式[3]の各要素を全て足し合わせると 0.519 となり、これを評価対象のネットワーク規模によるスケールを無くすために最短経路距離 4 の逆数で除すと、最終的に 2.08 という値が得られる。すなわち、第 1 経路（最短経路）の長さを R_s 、式[3]の行列 D^{-1} の i 行 j 列要素を b_{ij} とすれば、

$$RI = R_s \cdot \sum_i \sum_j b_{ij} = 2.08 \quad [4]$$

で表される RI が、図 1 の例で経路重複を考慮した起終点 SG 間の冗長性指標 (RI: Redundancy Index) の値となる。

(2) 頂点の冗長性指標

(1) で求めた指標は、1 組の頂点对または起終点 (図 1 の例では SG) がもつ冗長性の値である。冗長性は、終点に相当するノードが複数あり、どのノードに辿り着いても目的を果たしうるような場合にも同様の考え方で求めることができる。例えば、「ある集落から安全な場所

への避難のしやすさ」という観点で道路ネットワークの冗長性を通して集落を評価する場合を考えよう。起点を各集落、終点を地震時に生じる緊急輸送を円滑に行うための緊急輸送道路であるとすれば、終点となる頂点は複数 (安全とみなされる緊急輸送道路上の任意のノードが該当) ありうる。この場合、すべての起終点ペアに対して経路を求め、冗長性指標算出のための経路距離行列を作成する。それ以降の計算は式[3]～式[4]に示す通りであるが、上の例で算出される値は、起終点ではなく起点、すなわち集落の評価指標となる。このように、冗長性指標は道路ネットワークの冗長性に基づく集落評価・地区診断にも適用可能である。

(3) 既往指標との関係

(1) の方法による指標の算出を、図 1-I のネットワークのように、経路距離情報が同一であるが全く重複区間の無いケースで行ってみよう。この場合、経路距離行列は、式[2]の代わりに

$$D = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{pmatrix} \quad [5]$$

となり、以下、式[3]～式[4]と同様に計算すると、冗長性の値として 2.47 を得る。この値は、南ら⁶⁾の提案する指標と同じ結果となっている。また、重複がある場合、上記に示したように指標の値が南らのものより小さくなり、この結果は評価したいネットワーク特性により適したものと考えられる。南らの指標では、区間重複がある場合の冗長性は、重複がまったくない場合の冗長性と同じ値をとり、2 つのネットワークの区別ができない。これは、本来重複区間をもつ経路を重複が無いものとして RI を算出すると、冗長性が過大に評価されることを意味する。

このことを、(1) で考えた経路距離行列 D を用いて、2 行 2 列の例で一般的に論じてみる。第 1 経路距離、第 2 経路距離をそれぞれ d_1 、 d_2 、経路間の区間重複距離を a で表すと、 D は次のように記される。

$$D = \begin{pmatrix} d_1 & a \\ a & d_2 \end{pmatrix} \quad [6]$$

この行列の逆行列 D^{-1} は、

$$D^{-1} = \frac{1}{d_1 d_2 - a^2} \begin{pmatrix} d_2 & -a \\ -a & d_1 \end{pmatrix} \quad [7]$$

であり、(1) に記した手順で算出される頂点对の冗長性指標の値は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} RI &= R_s \frac{d_1 + d_2 - 2a}{d_1 d_2 - a^2} \\ &= R_s \frac{d_1(1-k_1) + d_2(1-k_2)}{d_1 d_2 (1-k_1 k_2)} \\ &= R_s \left(\frac{1}{d_1} \frac{1-k_2}{1-k_1 k_2} + \frac{1}{d_2} \frac{1-k_1}{1-k_1 k_2} \right) \end{aligned} \quad [8]$$

ただし、 k_1 , k_2 は、それぞれ経路間区間重複距離の第 1 経路距離、第 2 経路距離に対する割合である。式[8]を見ると分かるように、重複がなければ k_1 , k_2 はゼロであるから、冗長性の値は $1/d_1+1/d_2$ となり、これは、南ら⁶⁾と同じ評価式が残ることになる。区間重複を考慮する場合、その割合に応じて $1/d_1+1/d_2$ の値が割り引かれ、重複割合が大きいほど割引も大きくなるため冗長性指標の値が小さくなるのがわかる。これは、「もし経路重複がある場合には、その分だけ冗長性が下がるような指標」という前提に沿うものである。すなわち、(1), (2)の検討より、経路重複を考慮した冗長性指標へと考え方を拡張する際に、社会ネットワーク分析からの知見^{10)・12)}が適用可能であると言える。

このように、本研究で提案する冗長性指標の算出には、経路の数上げ・経路距離の算出と、経路距離行列の逆行列計算さえできれば良いので、考え方・計算の簡便さという点で実用的である。ただし、経路の重複をどの程度認めるかは逆行列計算に影響するので注意が必要である。重複に対して寛容すぎると経路距離行列が正則性を満たさず逆行列、ひいては冗長性が求まらなくなってしまう。この問題が起こらないようにするには、経路の重複区間がなるべく短くなるようにしなければならないということが言えるのみである。本研究では、実証分析を行う際に感度分析で確認する。

4. 起終点指標に係る実証分析

(1) 鳥取市における防災幹線道路ネットワーク

本章では、3. で定式化した冗長性指標の考え方を、鳥取県において緊急輸送路線と位置づけられた主要国道・県道により形成される防災幹線道路ネットワークに適用し、鳥取市内の主要施設・防災拠点間の冗長性を算出して、実用上の有用性について考察する。

防災幹線道路ネットワークは、災害発生直後からの緊急対応時における災害対策本部、主要防災施設、総合支所および広域防災拠点としての機能を有する広域避難場所の間における物資・人員等の輸送を確保することが主要な役割であり、一定の冗長性を有することが望ましいと考えられる。

図 2 に、鳥取市の範囲にある防災幹線道路ネットワークを示す。図中に示される路線(赤)が防災幹線道路ネットワークを形成する国道・県道であり、冗長性評価の

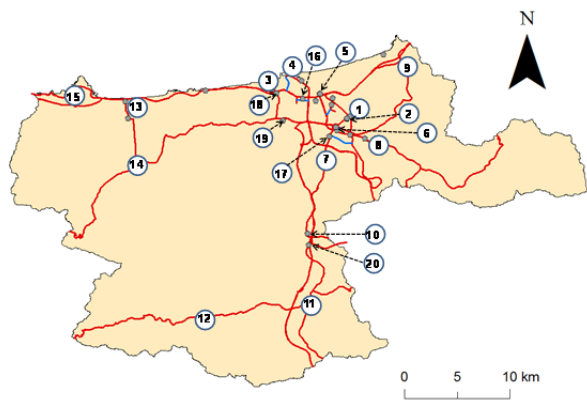


図 2 鳥取市における防災幹線道路ネットワーク

表 1 評価対象とする施設・拠点の一覧

番号	施設・拠点名	番号	施設・拠点名
①	鳥取県庁	21	鳥取県警察本部
②	鳥取市役所(本庁舎)	22	東部総合事務所
③	鳥取空港	23	東部福祉保健事務所
④	鳥取港	24	鳥取河川国道事務所
⑤	県立中央病院	25	中国運輸局鳥取運輸支局
⑥	鳥取市役所駅南庁舎	26	大阪管区気象台鳥取地方気象台
⑦	鳥取市水道局	27	浜村警察署
⑧	鳥取市役所国府町総合支所	28	東部広域行政管理組合
⑨	鳥取市役所福部町総合支所	29	気高消防署
⑩	鳥取市役所河原町総合支所	30	第八管区海上保安本部鳥取海上保安署
⑪	鳥取市役所用瀬町総合支所	31	JR 鳥取駅広場
⑫	鳥取市役所佐治町総合支所	32	神話の里 白うさぎ
⑬	鳥取市役所気高町総合支所	33	防災資機材倉庫
⑭	鳥取市役所鹿野町総合支所	34	旧鳥取空港建設事務所
⑮	鳥取市役所青谷町総合支所	35	鳥取赤十字病院
⑯	鳥取警察署	36	福部砂丘温泉ふれあい会館
⑰	鳥取消防署	37	河原町中央公民館
⑱	湖山消防署	38	用瀬町民会館
⑲	コココーラウエストパーク(備蓄基地)	39	佐治町中央公民館
⑳	清流茶屋 かわはら	40	ゆうゆう健康館気高

対象となる道路ネットワークである。本章で評価する冗長性に係る道路はこれらの国道・県道のみであり、緊急輸送路線に指定されていない道路は一切考えない。また、災害時における物資・人員等の輸送元/輸送先として、表 1 に示す 40 の施設・拠点を想定し、これらを冗長性評価に係る起終点とする。また、表記の都合上、一部の場所①~⑳のみを図 2 の地図中に示す。これら 40 の施設・拠点は、県の防災計画における重要拠点として、鳥取市内において 1 次拠点および 2 次拠点に指定されている 54 の施設・拠点のうち、防災幹線道路ネットワークの形状や施設・拠点の立地場所・重要性を考慮に入れて選び出したものである。

(2) 冗長性指標の算出手順

冗長性指標を算出する際、どのような条件を満たす経路を 1 つの代替経路とみなして計算に考慮するかが結果に影響し、それは i) 経路距離(迂回をどの程度まで考慮するか)、ii) 代替経路間の重複の程度、にまとめられる。本研究では、南ら⁶⁾による評価式との対比を念頭に、特に ii) にフォーカスする。これをふまえ、本研究における冗長性指標の算出手順は次の通りである。

①対象道路ネットワークデータの入力

②各起終点ペアにおいてこれらを結ぶ経路の探索

重要施設・防災拠点として先述の 40 か所を想定し、これらを結ぶ任意の起終点(全 780 通り)について以下の作業・計算を行う。

- ・最短経路および最短経路距離の探索。
- ・迂回経路および当該迂回経路距離の探索。ただし、迂回の程度について、ここでは当該迂回経路距離が最短経路距離の 2 倍以下のものを認めると仮定する。

上記の経路探索には、数値計算ソフト *Mathematica* の FindShortestPath 関数および FindPath 関数を用いた。計算対象の道路ネットワークを g 、起点を s 、終点を t とするとき、*Mathematica* では起終点ペア (s, t) の最短経路を

FindShortestPath[g, s, t]

で求めることができる。その結果を用いて、最短経路距離 l^* を算出する。次に、起終点ペア (s, t) の迂回経路を

FindPath[g, s, t, k]

で求め、各迂回経路の距離を最短経路距離と同様に算出する。ここに、 k の部分は探索する経路の長さの上限を指定する入力であり、ここでは、最短経路距離の 2 倍を上限、すなわち $k = 2 * l^*$ として、この条件を満たすすべての経路を求めることを意味している。

③経路間の区間重複条件を満たす代替経路の抽出

- ・探索された経路を長さの短い順に並べ替える。
- ・ j 番目経路 ($j = 2, \dots$) について、 $1 \sim j-1$ 番目経路との区間重複割合を算出し、そのすべてがあらかじめ分析者が設定するしきい値 λ 以下であれば、重複条件を満たすがゆえに代替経路として抽出し、 $j+1$ 番目経路 (以降、最後の経路まで) を同じようにして評価する。

④冗長性指標の算出

- ・③で抽出された代替経路から経路距離行列 D を作成し、式[3]~[4]より冗長性を算出する。もし D の判別式が 0、または極めて 0 に近い値をとり、確かな D^{-1} の値が得られない場合、 λ の値を小さく設定し直して再度②~④の手順で計算を行うこととなる。
- ・比較のため、重複を考慮しない場合の指標も合わせて算出する。

(3) 算出結果

上の方針のもとで探索・計算を行った結果を示す。まず、現行の防災幹線道路ネットワークの下で、評価対象とした 40 施設の任意の 2 点間を結ぶ最短経路距離を整理する。その一部を表 2 に示す。全施設・拠点間の最短距離を見ると、ほとんど同じ場所に立地する組み合わせであれば (例えば表 2 で県庁~市役所本庁舎間は約 400m である)、約 50km 離れている組み合わせもある (⑫佐治町総合支所~⑮青谷町総合支所)。

次に、②~③の手順で経路間の区間重複条件を満たす代替経路を抽出する。表 3 に、表 2 と同じ起終点間に対して条件を満たす代替経路の本数を示す (紙面の都合上、後の表 4、表 6、表 7 においても同様に、40 施設の任意の組み合わせで計算を行ったうち、各表に示す特定の 6 つについての組み合わせの結果を示す)。起終点の組み合わせにより、経路が 1 つしかないものもあれば、5 本数え上げられるものもある。なお、 $\lambda = 0.6$ となると 18 本に増加する起終点もみられた。

最後に、式[3]~式[4]に基づき、抽出された代替経路から冗長性の値を算出した結果を表 4 に示す。なお、比較のため、南ら⁶⁾の方法による値も合わせて算出することとし、これは③の段階までは上と同様の手順をとり、④の段階で、逆行列の計算を行わずに、 D の対角成分のみを取り上げて冗長性を計算する。これ以降、このようにして算出された冗長性を『重複を (計算に) 考慮しない冗長性指標』と呼び、(2)の手順で求めた冗長性を『重複を (計算に) 考慮した冗長性指標』と呼ぶこととする。

表 4 を見ると、区間重複分を割り引いて指標化する場合とそうでない場合とで、大きく異なっていることがわかる。南らの評価式では冗長性指標に関する絶対量の意味がとらえやすく、冗長性がある値をとっている起終点ペアに、新たに最短経路距離の 2 倍の距離を持つ迂回路が加わったとすると、指標値の増加分は 0.5 である。この感覚をもって表 4 を見ると、重複を考慮する場合とし

表 2 起終点間の最短経路距離

単位 : km

	1	2	3	4	5	6
1 鳥取県庁	—	0.44	7.83	7.13	5.77	13.65
2 市役所本庁舎	—	—	8.21	0.51	5.50	13.39
3 鳥取空港	—	—	—	6.46	3.90	17.76
4 鳥取港	—	—	—	—	7.31	17.82
5 コカコーラウェストパーク	—	—	—	—	—	13.90
6 清流茶屋かわはら	—	—	—	—	—	—

表 3 起終点間の経路本数

	1	2	3	4	5	6
1 鳥取県庁	—	1	3	4	3	5
2 市役所本庁舎	—	—	4	3	3	3
3 鳥取空港	—	—	—	1	1	5
4 鳥取港	—	—	—	—	2	4
5 コカコーラウェストパーク	—	—	—	—	—	3
6 清流茶屋かわはら	—	—	—	—	—	—

(迂回は最短経路距離の 2 倍以内で、 $\lambda = 0.5$ の場合)

表 4 起終点間の冗長性

	1	2	3	4	5	6
1 鳥取県庁	—	1.00	1.69	1.46	1.45	1.97
2 市役所本庁舎	1.00	—	1.88	1.50	1.41	1.66
3 鳥取空港	2.63	3.55	—	1.00	1.00	1.98
4 鳥取港	3.06	2.65	1.00	—	1.35	1.67
5 コカコーラウェストパーク	2.27	2.20	1.00	1.83	—	1.68
6 清流茶屋かわはら	3.94	2.66	4.35	3.47	2.58	—

(右上 : 本研究で示した算出法—区間重複を考慮—による冗長性, 左下 : 区間重複を考慮しない冗長性)

ない場合とでは相当大きな乖離があると言える。これより、本研究で示した、重複を考慮する指標算出法には大きな意義がある。

(4) 感度分析

経路の区間重複をどの程度許容するか、すなわち λ については決め方があるわけではないので、感度分析を行い、本分析の道路ネットワークでどの程度大きい値をとれるのかを明らかにする。ここでは、 $\lambda = 0.30$ から 0.05 刻みで 0.70 まで変化させていき、各 λ の下で冗長性を 2 通り算出した。

図 3 は、鳥取港~市役所本庁舎を起終点とするケースを例に、冗長性の値が経路の区間重複割合に応じてどのように変化するかを示したグラフである。なお、冗長性計算の対象となる経路の本数は、 $\lambda = 0.30$ の場合から順に 1 本、2 本、3 本、3 本、3 本、4 本、5 本、6 本、7 本である。この図から、重複を考慮しない冗長性指標では、経路本数の増加とともに冗長性の値が増加しているが、重複を考慮した冗長性指標では、区間重複分が割り引かれるため、経路本数が増えても必ずしも冗長性に大きな変化がみられるわけではないことがわかる。なお、本起終点ペアにおいては、 $\lambda = 0.70$ 以上のケースでは経路距離行列の判別式が極めて 0 に近い値をとり、算出された冗長性の値は信頼できるものではなかった。

表5 候補となる市道の情報

記号	路線名	路線・区間長(km)
A	賀露幹線	1.397
B	湖山商栄線	0.929
C	西品治田園線	0.603
D	永楽富安線・富安大路線	0.577
E	雲山吉成線	1.819

冗長性

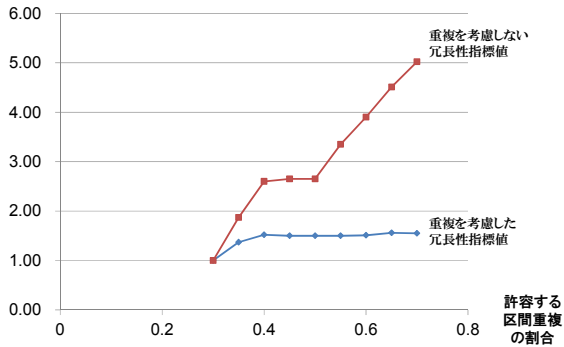


図3 感度分析の例（鳥取港～市役所本庁舎の冗長性）

(5) 道路整備による冗長性の変化

ここでは、冗長性指標を政策評価に利用する例として、仮想的な道路整備シナリオの下で、起終点間の経路本数や冗長性がどのように変化するかを見る。想定するシナリオは鳥取市道路課へのヒアリングから得たものであり、現行の防災幹線道路ネットワークを補完する市道を緊急輸送補助路線として適切に設定し、防災幹線道路ネットワークに組み込み、より冗長性の高い道路ネットワークを効果的に形成して、災害発生直後からの緊急対応時における重要施設・防災拠点間における物資・人員等の輸送をより円滑に進めることが可能になるというものである。緊急輸送補助路線を指定し、災害時に上記のような役割を果たすよう整備することで、防災道路幹線ネットワークの一部として、災害による危機への高い耐性と回復力（レジリエンス）を持たせることが可能となる。

設定候補となるのは、図2に青で示される路線・区間である。図2を拡大したものが図4であり、候補路線にA～Eのラベルを付ける。また、各候補路線に関する情報を表5に整理する。これらの候補路線が防災幹線道路ネットワークに加わった場合に、代替経路数や冗長性がどのくらい変化するかを(2)の手順により算出し、整備前と比較することで整備の効果を把握するとともに、効果的な補助路線の設定について検討する。なお、代替経路間の区間重複割合に関する条件は、 $\lambda=0.50$ とする。

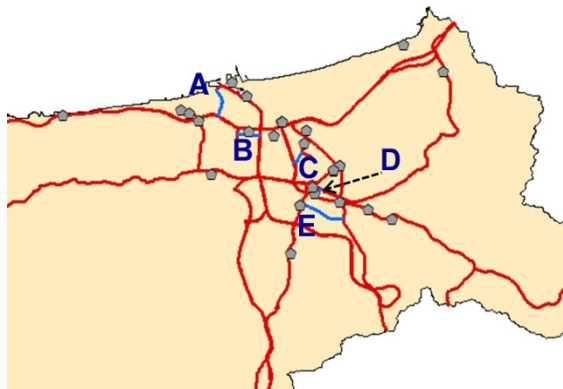


図4 緊急補助路線の設定候補

まず、候補路線が全て整備された場合の効果を把握する。表6には、道路整備後の各起終点間経路本数、および、道路整備前との変化量に関する結果を整理している。これより、特に鳥取港を起終点の一つとするケースでは、ほぼすべてのケースで経路数が増加していることが判る。道路整備前の鳥取港は、防災幹線道路ネットワークが行き止まりのような形状となっていたが、路線Aの整備により周辺道路が環状をなすようになり、2方面に行けるようになったことから経路数の増加につながったと考えられる。

次に、表7には、道路整備後の各起終点間冗長性、および、道路整備前との変化量に関する結果を整理している。鳥取港～鳥取空港、鳥取港～清流茶屋かわはら、の変化量が相対的に大きく、災害時に県外から救援物資を受け入れる際の備蓄拠点間の連結性の向上を示唆するものであると言える。

以上は、候補路線A～Eがすべて整備された場合に鳥取市の防災幹線道路ネットワークがどのくらい冗長性を増すのか、また、どの起終点のつながりが良くなるのかを分析した結果であった。実際には、道路は少しずつ整備され、そのたびにネットワークの冗長性が高まっていく。よって、複数の候補からどのような順番で道路を整備すればよいか、冗長性指標を用いて検討することができる。本研究では、その第一歩として、「どの路線の整備がより有効か」を有無比較により評価する。すなわち、

表6 道路整備後の起終点間経路数

	1	2	3	4	5	6
1 鳥取県庁	—	1	4	6	3	7
2 市役所本庁舎	0	—	7	4	3	3
3 鳥取空港	+1	+3	—	2	1	5
4 鳥取港	+2	+1	+1	—	2	7
5 コカコーラウエストパーク	0	0	0	0	—	4
6 清流茶屋かわはら	+2	0	0	+3	+1	—

(右上:道路整備後の経路数, 左下:道路整備前との変化量)

表7 道路整備後の起終点間冗長性

	1	2	3	4	5	6
1 鳥取県庁	—	1.00	1.81	1.68	1.45	1.98
2 市役所本庁舎	0	—	2.08	1.56	1.41	1.78
3 鳥取空港	+0.12	+0.21	—	1.38	1.00	2.11
4 鳥取港	+0.21	+0.06	+0.38	—	1.58	2.00
5 コカコーラウエストパーク	0	0	0	+0.24	—	1.80
6 清流茶屋かわはら	+0.01	+0.12	+0.13	+0.33	+0.11	—

(右上:道路整備後の冗長性, 左下:道路整備前との変化量)

ある候補路線に対して、

- ・その路線を含めた道路ネットワークのもとでの起終点間経路数および経路距離
- ・その路線が無い道路ネットワークのもとでの起終点間経路数および経路距離

をそれぞれ求め、両者を比較する。

計算結果のまとめを表 8 に示す。ここに総経路数の増加分とは、当該路線の有無による道路ネットワークのもとで、各起終点ペアを結ぶ経路数がどれだけ増えたかを集計した値である。これらの変化は 780 通りある起終点ペアの一つ一つに表れうるが、ここでは、これらを単純に集計した値を用いて補助路線の有無による道路ネットワークの様相の変化を捉えることとする。表 8 を見ると、総経路数の増加分や総冗長性指標の増加分では路線 A、B が他よりも効果的であると言える。ただし、もし単位路線長あたりの数値で比較すると、見方も少し変わってくる。この場合、B、C、D が有効であると解釈でき、その一方で路線 E は相対的に防災幹線道路ネットワークの多重化に寄与していないことが判る。これらの結果には、起終点となる重要施設・防災拠点の立地分布状況が影響しており、市の中心部にこうした施設が多くあるのに対し、路線 E を通るような起終点の組み合わせがあまり多くないことを意味している。したがって、効果的な道路の整備は、どんな施設・拠点を起終点と想定するかによって変わらう。

また、こうした検討の延長上に、「どのような順番で道路を整備すればよいか」との問いに対する答えがあるが、整備の優先順位を検討する問題は別の機会に委ねることとしたい。

表 8 各路線のみを整備した場合の変化

記号	路線・区間長(km)①	総経路数の増加分	総冗長性指標の増加分②	②/①
A	1.397	+33	+12.54	8.98
B	0.929	+32	+16.61	17.88
C	0.603	+8	+7.91	13.12
D	0.577	+21	+9.24	16.01
E	1.819	+11	+4.22	2.32

5. おわりに

本研究では、既往研究で複数提案されている道路ネットワークの冗長性指標に対し、考え方や計算方法の簡便な南らの指標を実務に適用することを念頭に、実用性を高めるために経路重複に関する課題の解決を検討した。まず、「冗長性指標の算出に経路の重複を許容するが、もし経路重複がある場合には、その分だけ冗長性が下がるような指標」が妥当であるとの前提の下で、経路重複を考慮した冗長性指標へと考え方を拡張する方法として社会ネットワーク分析からの知見^{10)・12)}が有用かつ適用可能であることを示した。次に、鳥取市の防災幹線道路ネットワークにおいて災害時に物資や人員の輸送を想定し、冗長性指標を算出するとともに、仮想的な道路整備

シナリオにおける冗長性指標の変化を試算した。また、どの程度まで経路の区間重複を許容するかについて感度分析を行った。その結果、経路の区間重複を考慮する場合としない場合とでは、冗長性指標の値が大きく変わることが示され、南ら⁶⁾のものと比較して本研究で提案する指標の意義が示された。今後は、起終点間の冗長性評価のみならず、ある頂点(例:起点)への評価にも適用し、指標の有用性を高めていきたい。

また、本アプローチの課題としては、現実の(複雑な)道路ネットワーク上で起終点の数が増えた場合に、多大な計算時間を要する点があげられる。特に、重複条件を満たす代替経路抽出の計算である。この点の技術的改善を行い、その上で道路整備の優先順位の検討することを今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 若林拓史, 亀田弘行: ロマ・プリスタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の交通サービスの被害分析及交通運用策の評価, 土木計画学研究論文集, No.10, 1992.
- 2) 朝倉康夫, 柏谷増男, 為広哲也: 災害時における交通処理能力の低下を考慮した信頼性評価モデル, 土木計画学研究論文集, No.12, pp.475-483, 1995.
- 3) 梶谷有三: 震災時における道路交通システムの連結性能の評価法, 苫小牧工業高等専門学校紀要, pp.127-132, 1986.
- 4) 堀井雅史: 迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法, 日本都市計画学会学術研究論文集, 31, pp.769-774, 1996.
- 5) 南正昭, 高野信栄, 佐藤馨一: リダンダントな道路網の構成方法に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.733-742, 1996.
- 6) 南正昭, 高野信栄, 佐藤馨一: 道路網における代替ルートの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, pp. 67-77, 1996.
- 7) 瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博: 非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医療施設配置計画, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, I_57-I_68, 2011.
- 8) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの接続脆弱性評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, I_76-I_87, 2014.
- 9) 岡田憲夫, 梶谷義雄, 多々納裕一, 榊原弘之: トポロジカルインデックスを用いた都市圏道路ネットワークのリダンダンシー評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報第 41 号 B-2, pp.1-9, 1998.
- 10) Stephenson, K., and Zelen, M.: Rethinking Centrality: Methods and Examples, *Social Networks*, Vol. 11, pp. 1-34, 1989.
- 11) 金光 淳: 社会ネットワーク分析の基礎 社会的関係資本論にむけて, 勁草書房, 2003.
- 12) 金明哲編・鈴木 努著: R で学ぶデータサイエンス 第 8 巻 ネットワーク分析, 共立出版, 2009.

(原稿受付 2016.05.28)

(登載決定 2017.01.21)