

道路ネットワークの冗長性指標に関する一考察

土屋 哲¹

¹鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻.

災害時の道路途絶は救助活動、避難活動、消防活動等に支障をきたし、復旧を遅らせる要因となる。また、迂回路の存在は道路途絶の影響を緩和することから、一定の冗長性をもつ道路ネットワークの形成は災害に強い地域づくりの観点から重要である。本研究では、起終点間の連結性に係る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。その際、既往研究で提案された指標の改良として経路の重複に着目し、簡便な手法の下で経路の区間重複を考慮した冗長性指標を提案する¹⁾。

キーワード：道路ネットワーク，冗長性指標，区間重複

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。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。

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。

このような背景の下、本研究では、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。その際、経路と経路の間の区間重複に着目し、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。

2. 本研究の考え方

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。例えば堀井²⁾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と近接度の概念を採用し、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^{3,4)}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⁵⁾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⁶⁾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。

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。特に、計算の簡便性、実用性に重きをおき、南ら⁴⁾のように経路長の調和平均を基礎に冗長性を評価するアプローチをとる。ただし、そこで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を検討する。具体的には、「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。

3. 冗長性指標のモデル化

図1に示す道路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述べる。ここに、ノードSは起点、Gは終点であり、図中の数字は各リンクの道路距離を表す。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⁷⁾。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。ここでは、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。この考えを図1-Iのネットワークに適用すると、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(式(1))。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。

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

しかし、図1-IIのネットワークのように、異なる経路に共通部分がある場合には、上のように単純には計算できない。ここには、第1経路（最短経路）であるS-Gのほか、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。まず、これらの3つの経路を行項目および列項目にもつ正方行列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ので、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。

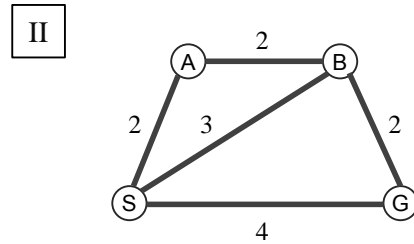
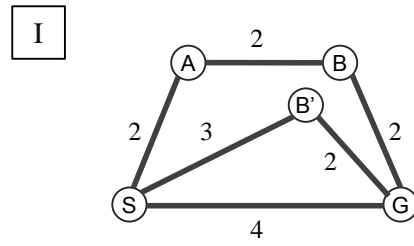


図1 冗長性指標算出例のためのネットワーク

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

この逆行列は

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

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という値を得る。すなわち、第1経路（最短経路）の長さを R_s 、式(3)の行列の*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。

本稿で提案する冗長性指標の算出は、経路の数え上げ・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りうる。この問題が起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試算する。

図2に、対象となる防災幹線道路ネットワークを示す。ここでの評価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。表記の都合上、一部の場所①～⑩のみを図2の地図中に示す。

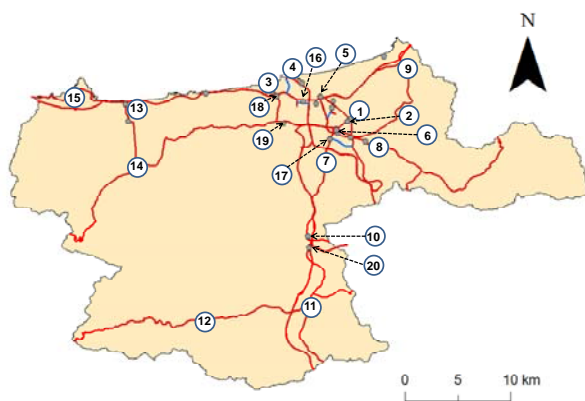


図2 鳥取市における防災幹線道路ネットワーク

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

(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。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つなぐ経路の探索
 - ・最短経路および最短経路距離の探索。
 - ・迂回経路および迂回経路距離の探索。
- 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。
 - ・番目経路(j=2, 3, ...)について、1~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)を同様に評価する。
- 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。

(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点間をつなぐ最短経路距離を整理する。その一部を表2に示す。

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。

表2 起終点間の最短経路距離

	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 コカコーラウエストパーク	—	—	—	—	—	13.90
6 清流茶屋かわはら	—	—	—	—	—	—

(単位: km)

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 コカコーラウエストパーク	—	—	—	—	—	3
6 清流茶屋かわはら	—	—	—	—	—	—

(迂回の対象は最短経路距離の2倍以内で、λ=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)

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⁴⁾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、本稿で提案する冗長性を『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、値が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ない場合と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 の設定については決め方があるわけではないので、どの程度大きい値をとれるのかを感度分析によって明らかにする。ここでは、 $\lambda = 0.30$ から0.05刻みで0.70まで変化させ、各 λ の下で冗長性を算出した。

図3は、鳥取港～市役所本庁舎の起終点ペアにおいて、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本であった。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、経路本数が増えても冗長性に大きな変化が見られないことが判る。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。

冗長性

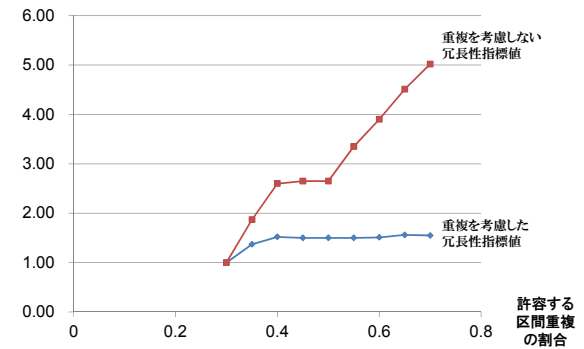


図3 感度分析の例（鳥取港～市役所本庁舎の冗長性）

5. おわりに

本稿では、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のうち、考え方や計算方法の簡便なものを実務に適用することを念頭におき、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。次に、提案指標を鳥取市の防災幹線道路ネットワークに適用し、いくつかの起終点ペアについて冗長性指標を試算した。なお、詳細については文献¹⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) 土屋哲, 岩田千加良, 谷本圭志: 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, 地域安全学会論文集, 30 (電子ジャーナル論文), 7pp, 2017. http://issj.jp.net/?page_id=1095.
- 2) 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, 769-774, 1996.
- 3) 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, 13, 733-742, 1996.
- 4) 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. 530IV-30, 67-77, 1996.
- 5) 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), 67, 5, 1_57-1_68, 2011.
- 6) 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), 70, 5, 1_76-1_87, 2014.
- 7) 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.