

2 点間旅行距離を増大させるリンク集合特定手法の開発

Finding Method for Link Failure Combination Causing Huge Impact in Travel Time Between a Node Pair

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 佐々木颯馬 (Soma Sasaki)
北海道大学大学院工学研究院 正員 杉浦聡志 (Satoshi Sugiura)

1. はじめに

昨今、我が国では自然災害の発生件数が増加・激甚化しており¹⁾、それらの多くで交通ネットワーク上の複数地点が同時に被災するケースも見られる。これらに対応するための施策は多く展開され、道路新設においてネットワークの耐災化機能評価方法等も実務適用されている。ネットワークに被害が実際に発生した後も、以降の輸送に対する影響を小さくするために効果的な復旧計画を策定することが重要である。これらの災害発生によるネットワーク劣化をめぐる事前計画・復旧計画のためには、事前にネットワーク中のどのリンクが破損により大きな影響を与えるか把握することが必要となる。

ネットワークの構成物の破損による影響評価はネットワーク脆弱性分析として知見が蓄積されている。単独のリンクの故障とそれによる影響の評価を試みた例として、Taylor et al.²⁾がある。これは交通ネットワーク中のある単独リンクが故障した時の影響を所要時間の増加量で評価している。また大澤ら³⁾は、道路ネットワーク上でそれぞれのリンクが全体旅行距離に与える影響の大きい順からリンク故障を復旧する順位を定めることを考えている。また、Jenelius and Mattson⁴⁾は、ネットワーク上を格子状に区切ったグリッドを用いて、あるグリッド内とグリッドの境界を横切るリンクが故障した場合の影響を評価している。これは複数リンクを調べているともいえるが、グリッド内のあるノードの周りのリンクが故障した際の影響を調べているとも言え、単一要素の故障時の影響分析にとどまっている。これらのようにネットワークの構成物の被災による影響を検討した研究では、単独のリンクあるいはノードといったある一つの要素が破損した場合についての分析に基づいている。すなわち、複数のリンクが組合せられて破損する影響を考慮していない。単独の破損では周辺に迂回路があれば二点間の旅行時間への影響が小さい要素であっても、複数の要素が同時に破損することで大きな迂回を強いられ旅行時間へ甚大な影響を及ぼすものも存在する。そのため近年の状況と照らし合わせても、複数要素の組合せ破損が与える影響を評価する方法は交通ネットワークの脆弱性分析において重要であろう。しかし、破損する複数要素の組合せ数は膨大に存在することから、全て列挙しそれぞれについて脆弱性を評価することは、膨大な計算負荷を生じる。例えば、ネットワーク上のリンク集合を A として、リンクの数は $|A|$ であるとしたとき、2つの破損リンクの

組み合わせも考慮しようとすれば、 $|A|C_2$ $|A|C_3$ とリンクの数が大きくなれば組み合わせ数が膨大になる。

そこで本研究では、ある二点間において、破損時に迂回経路の旅行距離を増大させることが期待される複数リンクからなる集合を特定する方法を提供する。この方法はDialの確率的利用者均衡配分⁵⁾のノード・リンクの選択率を基に、破損時に最も影響を与えるリンク集合を特定する。そのため、組合せ列挙による比較を行わない事となることから、計算負荷の軽減を期待する。提案モデルと従来の単一リンク故障の影響を同時に考慮することで、事前防災計画や災害直後の復旧計画策定に向けて、効果的な情報を提供可能となることを期待する。

2. 提案手法の定式化

2.1 提案手法で用いる記号定義

本稿で用いる記号を以下に整理する。

N : ネットワーク中のノード n の集合。

A : ネットワーク中のリンク (i, j) の集合。

(o, d) : ネットワーク中の2点ペア。 $o, d \in N$ である。

$c_{(i,j)}$: リンク (i, j) の所要コスト。

p_n^{od} : (o, d) 間経路において、ノード n を通過する確率

α : 第一のカットで閾値として用いる値。 $p_n^{od} \leq \alpha$ となるノード n を通る経路は所要時間が長いとみなす。

σ : Dialのアルゴリズム⁵⁾の分散パラメータ。値が大きいほど最短経路に近い部分が選択されやすくなる。

F : 第一のカットにより特定される最短経路に近い所要時間経路で経由するノードの集合。 $F \subset N$ である。

B : 第一のカットにより特定される F に含まれないノード。すなわち、 $B = N - F$ である。

A_F : F に含まれるノードを相互に接続するリンクの集合。

x_i : ノード $i \in N$ が F に含まれる時1、 B に含まれる時0をとる関数。

δ_F : F の中心点を示す仮想ノード。

δ_B : B の中心点を示す仮想ノード。

2.2 提案手法の概説

提案手法ではある2点間における所要時間を検討するため、まずネットワーク上で対象とするODペアを特定

組み合わせは $|A|C_2$ であり、これにさらに3つの破損リン

する．ネットワーク中のリンクは通常時を想定し，その所要時間は既知として与えられていることとする．提案手法では2点間のネットワークに2つのカットを与えることで所要時間を著しく増大させるリンクの組合せを導出する．2つのカットは図1のような関係にある．まず第一のカットは，OD間の最短経路，およびそれに近い所要時間の経路が通過するノードの集合である F と，その全集合の差集合である B を特定するカットである．図中では低と書き込まれたノードの集合が B であり，それ以外が F である． B は所要時間が大きな経路でしか経由しないノードの集合であるといえる． B を経由せざるを得なくなるようにネットワークが破損すれば，必ずOD間の所要時間は大きくなる．この着想に基づいて，第二のカットは F のみを取り出した部分グラフ $G(F, A_F)$ において，OD間を非連結とするようなカットを考える．第二のカット上のリンクが破損した場合，OD間には B を通過する経路のみが残されることとなる．すなわち，第二のカットを考えることにより，破損した場合所要時間を著しく増大させるリンクの集合が特定できる．

2.3 第一のカットの定式化

第一のカットでは F と B が特定されるようなカットを探索する．この探索には，画像を前景と背景のラベルに分割するエッジ検出に用いられる手法のうち，グラフカットを用いた方法(Boykov and Jolly⁶⁾，Li et al⁷⁾)を援用する．これらの論文では，画像上のピクセルをネットワークとして表現し，前景と背景の境界となるカット断面を求めている．各ピクセルをノードとして表現し，隣接するピクセル間にリンクを張り，隣接ピクセル間の色の近さを重みとして与えた．このようなネットワーク上で(1)式のように設定したエネルギー関数が最小化されるノードのラベルの与え方(カット)を考えている．

$$E(x) = \sum_{i \in V} \theta_i(x_i) + \lambda \sum_{(i,j) \in E} \theta_{ij}(x_i, x_j) \quad (1)$$

ここで θ_i は対象のノード i が前景と背景のどちらに近いかを表している． θ_{ij} は隣接するピクセルの色の近さを表しており，ノード i, j が同じラベルである場合エネルギーは0，異なる場合エネルギーを生じるような関数が与えられる． x_i は対象のノード i に付けるラベルであり，前景なら1，背景なら0を与える．このように与えたエネルギー関数を最小化するラベル，すなわちカット断面は，ネットワークを加工することにより，最大流問題として求解できる手法を提供している．本稿ではこれを援用した手法を提案する．

本稿ではネットワーク中の各ノードがOD間の最短経路またはそれに近い所要時間で到達可能な経路に含まれやすいノードであれば F ，そうでなければ B と判別する．この判別には確率的利用者均衡配分で利用される2点間経路におけるノードの選択率を用いる．所要時間が短い経路に含まれるノードである場合高い選択率を持つため，ノードの重みとして適切と考えた．一方でノード間の近さ，すなわちリンクの重みは距離の逆数で与えることとする．エネルギー関数は(1)式を採用することとして $\theta_i(x_i)$ ， $\theta_{ij}(x_i, x_j)$ を以下で特定する． x_i はノード i が F に

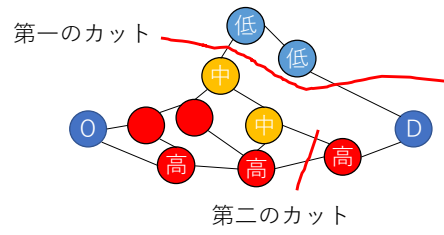


図-1 第一のカットと第二のカットの例

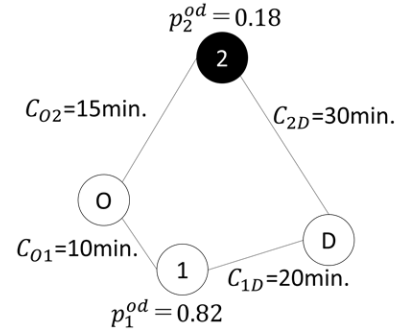


図-2 例題ネットワークと p_i^{od}

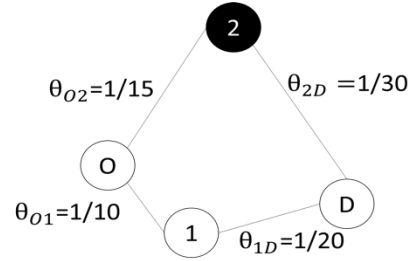


図-3 リンクの重みを付与した例題ネットワーク

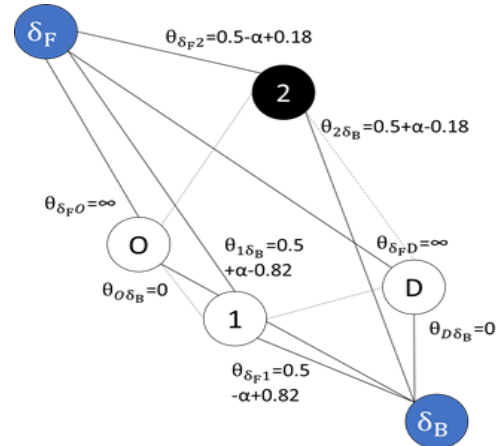


図-4 ノードの重みを付与した例題ネットワーク

含まれるとき1，そうでなければ0をとる．

$$\theta_i(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_i = 1 \\ \infty & \text{if } x_i = 0 \end{cases} \quad \forall i \in f \quad (2)$$

$$\theta_{ij}(x_i) = \begin{cases} 0.5 + \alpha - p_i^{od} & \text{if } x_i = 1, p_i^{od} \leq 0.5 + \alpha \\ 0.5 - \alpha + p_i^{od} & \text{if } x_i = 0, p_i^{od} \leq 0.5 + \alpha \\ 0 & \text{if } x_i = 1, p_i^{od} > 0.5 + \alpha \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in N - f \quad (3)$$

$$\theta_{ij}(x_i, x_j) = |x_i - x_j| \frac{1}{c_{(i,j)}} \quad (4)$$

ここで f は事前に分析者が与える F に含まれるべきノードの集合である。ここでは、OD のペアの起終点ノードを f とする。対象とする道路ネットワークに対し、エネルギー関数を定義するための重みの与え方、およびネットワークの分割を最大流問題として記述するための操作を概説する。例題として図-2に示すネットワークの操作とともに手順を説明する。まず、ノードの重みを Dial のアルゴリズム⁵⁾により対象 (o, d) 間におけるノード n の選択率 p_n^{od} として与える。図中ではノード1が $p_1^{od} = 0.82$ である。次にリンクの重みを(4)式に基づいて与え、図-3のネットワークが得られる。以上のようにノード・リンクの重みを与えたネットワークに対して、 F と B の中心点を示す仮想ノード δ_F と δ_B を付与する。元の道路ネットワーク内の全ノードと、 δ_F および δ_B をそれぞれ仮想的なリンクにより接続する。接続した仮想リンクには、(2),(3),(4) 式に示したノードの重み関数の値を付与する。すなわち、ノードが F 、 B のどちらに近いかをリンクの重みとして表現する。以上の手順で構築したネットワークにおいて δ_F と δ_B 間の最大流問題を求解すると、最大フロー最小カットの定理から δ_F と δ_B 間の最小カットが導出される。リンクへの重みの与え方から、この最小カットは F と B に分割するカットを示している。例えば図-4の例題ネットワークでは、起点 o と δ_F を接続するリンクの重みは ∞ であり、起点 o と δ_B を接続するリンクの重みは0である。これは、最小カットを考える際に起点 o と δ_F 間においてカットされず、起点 o が F に含まれるような結果を生じるためのものである。一方でノード1と δ_F の重みは(3)式にしたがった値を重みとして与えられている。

3. テストネットワークにおける挙動確認

本章では、第一のカットを Siouxfalls⁸⁾のテストネットワークに適用した結果を示す。ネットワークの概形は図-5のように示され、ノード数は24、リンク数は無向リンクで38である。ここでは左上の0番ノードから右下の19番ノードに向かうODペアを対象とした。Dialの分散パラメータは $\sigma = 0.1, 0.2, 0.3$ の3つのケースを試算する。3ケースの結果はそれぞれ図-5、図-6、図-7である。赤色のノードが F 、それ以外が B に属するノードである。図中ノード上の数字はそれぞれ(ノード番号, ノード選択率)である。式(3)の閾値はいずれも $\alpha = 0.2$ としている。ノードの重みが0.2より大きい部分が F 、0.2以下の部分が B に分割されていることが分かる。分散パラメータを小さくとした図-5では F に最短経路上のノードに加え、所要時間が近い経路上のノードも属する結果が得られた。これに対し図-6、図-7の順に σ を大きくすると、最短経路上以外のノードの選択率が減少し、 F より除外されていく結果が得られた。以上の結果から第一のカットは、OD間の最短経路、およびそれに近い所要時間の経路が通過するノードの集合を導出出来ていると考えられる。ただし、 α と σ の組合せによって結果は変わらうため、実装の際にはネットワークごとに使用者に

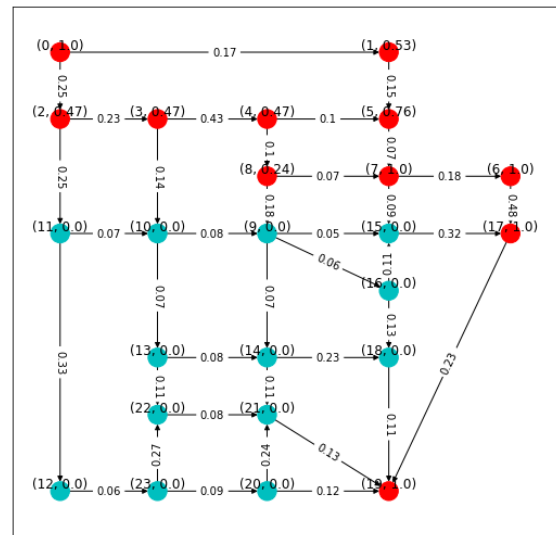


図-5 第一のカットの算出例($\sigma = 0.1$)

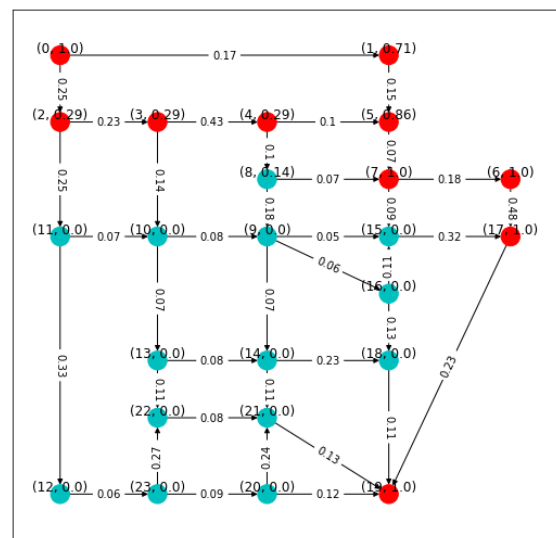


図-6 第一のカットの算出例($\sigma = 0.2$)

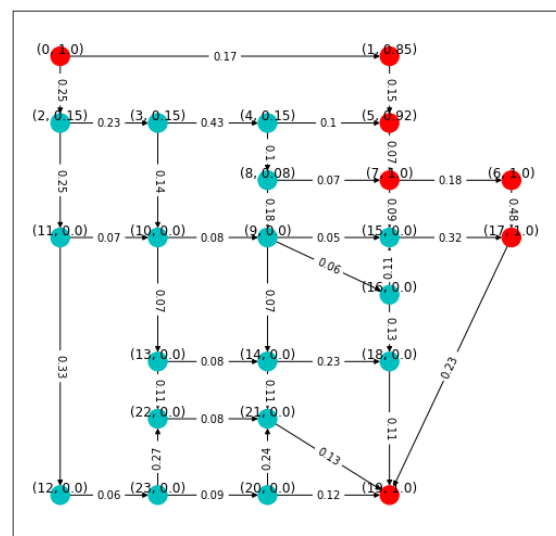


図-7 第一のカットの算出例($\sigma = 0.3$)

よる調整が必要であると考えられる。

4. おわりに

本稿では第一のカットの導出法およびテストネットワークでの試算結果を示した。第二のカットの手法や提案手法全体の結果については講演時に示す。

参考文献

- 1) 令和二年国土交通白書, 国土交通省, pp.71-75,2020
- 2) Michael A. P. Taylor & Somenahalli V. C. Sekhar & Glen M. D’Este: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks, *Networks and Spatial Economics*, Vol.6, pp 267-291, 2006.
- 3) 大澤 脩司・中山 晶一郎・藤生 慎・高山 純一・溝上 章志: アクセシビリティ指標を用いた自然災害時の道路網の復旧順位設定手法に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.5, pp281-289, 2017.
- 4) Erik Jenelius, Lars-Göran Mattsson: Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.46, pp746-760, 2012.
- 5) R. B. Dial: A probabilistic multipath traffic assignment which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol.5, pp. 83-111, 1971.
- 6) Y.Y. Boykov., M. Jolly: Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in N-D images., *Proceedings of ICCV*, pp.105-112, vol.1, 2001.
- 7) LI, Y., SUN, J., TANG, C. K., SHUM, H. Y.: Lazys-napping, *Proc. of ACM SIGGRAPH '04*, pp.303–308, 2004.
- 8) Leblanc, L. J., Morlok, E. K., Pierskalla, W. P.: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, *Transportation Research*, Vol.9, pp.309-318, 1975.