

林道の災害時代替路機能の定量化 - 道路ネットワークトポロジーの観点からの評価 -

渡部優*・斎藤仁志*・白澤紘明**・植木達人***・古川邦明****・
白田寿生****・和多田友宏****

渡部優・斎藤仁志・白澤紘明・植木達人・古川邦明・白田寿生・和多田友宏：林道の災害時代替路機能の定量化—道路ネットワークトポロジーの観点からの評価—。森利誌 37 (1)：27 ~ 38, 2022。林道を災害時の代替路として見直す機運はあるものの、その機能の定量的評価手法は十分に確立されておらず、林道整備が中山間地域の防災基盤構築にどの程度効果的であるかは明らかでない。本研究では、林道の公益性評価を目的に、既往の接続脆弱性評価手法を改良した林道の代替路機能の定量化手法を考案し、岐阜県郡上市を対象に評価を行った。評価にあたり林道の代替路機能の概念的な整理を行い、代替路機能を有する林道を、避難起終点間の非重複経路数を最大化しつつ総所要時間が最小となる非重複経路集合（避難経路集合）に含まれる林道として定義した。そして避難経路集合は、起終点間の最小費用最大流問題の解として得られることを示した。対象地における避難起点（市内 225 か所の避難所）と避難終点（郡上市市役所）間のすべての避難経路集合を評価した結果、約 65% の避難所の避難経路集合に林道が含まれることが明らかとなった。提案手法は、正確な算定が困難な被災リスクによらず、ネットワークトポロジーの観点のみから林道の代替路機能の評価が可能である。評価結果は、代替路機能の観点から林道の開設・改良・維持管理事業を評価する際の支援情報になると考えられる。

キーワード：林道、災害時代替路、ネットワークトポロジー、接続脆弱性、非重複経路

Masaru Watanabe, Masashi Saito, Hiroaki Shirasawa, Tatsuhito Ueki, Kuniaki Furukawa, Hisao Usuda and Tomohiro Watada : **Quantification of forest road as an alternative route during disasters : Evaluation from the viewpoint of road network topology.** *J. Jpn. For. Eng. Soc.* **37(1): 27 – 38, 2022.** Although there is momentum to review forest roads as an alternative route during disasters, quantitative evaluation methods for their functions have not been sufficiently established. In mountainous regions, it is unclear how effective the role of forest road development is in building disaster prevention infrastructure. In this study, we developed a method to quantify the function of forest roads by improving the existing method for evaluating connection vulnerability to support the evaluation of public benefit from forest road projects. This study was conducted in Gujo City, Gifu Prefecture. Here, the function of alternative roads of forest roads was conceptually organized and a forest road with an alternative route function was defined as a forest road included in a set of non-overlapping routes (evacuation route set) that minimizes the time required while maximizing the number of non-overlapping routes between evacuation origins and destinations. Furthermore, the evacuation route set could be obtained as a solution to the minimum cost-maximum flow problem between the starting and ending points. As a result of evaluating all evacuation route sets between the origins (225 evacuation centers in the city) and the destination (Gujo City Hall) in the study site, forest roads were included in the evacuation route set for ~65% of the evacuation centers. Thus, the proposed method can evaluate the alternative route function of forest roads only from the perspective of network topology and not from the perspective of disaster risk.

Keywords : forest road, disaster alternative route, network topology, connection vulnerability, non-overlapping route

2021 年 8 月 30 日受付, 2021 年 12 月 22 日受理

連絡先 (Corresponding author) : 渡部優 (Masaru Watanabe) Email : mwatanab@iwate-u.ac.jp

* Masaru Watanabe, Masashi Saito 岩手大学農学部 Fac. Agric., Univ. of Iwate, Iwate 020-8550

** Hiroaki Shirasawa 森林総合研究所 For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687

*** Tatsuhito Ueki 信州大学大学院総合理工学研究科 Grad. Sch. of Sci. and Eng., Univ. of Shinshu, Nagano 399-4511

**** Kuniaki Furukawa, Hisao Usuda, Tomohiro Watada 岐阜県森林研究所 Gifu Prefectural Research Institute for Forests, Gifu 501-3714

1. はじめに

中山間地域に散在する集落の多くは、山腹斜面上および谷沿いに位置しているため、災害時に集落が孤立する可能性が高い(林ら 2010)。内閣府(2014)の調査では、59,282の農業集落のおよそ3割に、孤立可能性のリスクがあることが報告されている。災害時の集落孤立リスクを低減する手段には、集落へ至る経路の多重化や土砂災害危険箇所の危険防止対策などのハード面での防災基盤整備が挙げられる(宮本・北川 2009)。しかし、財政等の制約が厳しくなる近年は、社会資本整備の基本理念が従前の「国土の均衡ある発展」から「選択と集中」へと効率的な投資配分に転換しており(国総研 2009)、過疎化と高齢化が進行する中山間地域では、道路等の社会資本整備が一層困難になりつつある。

一方、中山間地域では普通車が走行可能な林道の整備が進められており、豪雨災害等の非常時には被災した公道の代替路として利用された事例も報告されている(林野庁 2020a)。例えば岩手県では、東日本大震災時に公道が寸断し多くの集落が孤立状態となったものの、林道10路線が緊急の輸送路や住民の避難路として活用され、孤立状態の早期解消に貢献したことが報告されている(岩手県 2013)。このような背景を受け、林野庁(2020b)は2021年度より「山村強靱化林道整備事業」を創設し、公道の代替路と位置付けられる林道の開設・改良を集中的に推進するとしている。

林道の代替路機能の評価手法として、林野庁(2020c)は災害時の代替路等確保便益の算定手法を提示している。しかし当手法のように均衡配分を用いた費用便益分析では、あるノードペア間が道路整備により新たに連結されることで発生する便益を十分に評価できないことが指摘されている(中山 2011)。これまでも林道のネットワーク特性を評価した研究例はあるが(例えば吉村・酒井 1998, 松本・北川 2000, 中澤ら 2007)、山村地域の道路網総体としての形態的・距離的・規模的特性の解明に主眼を置いたものであり、実際の避難経路を想定し林道の代替路機能の評価したものではない。近年になり国土交通省や農林水産省、7県、民間企業等で構成するグループが、国有林道や森林作業道を含む、通常地図に載らない多様な主体の道(異種の道)をGIS上で可視化し、災害時代替路の検討を行っているが(「多様な主体が管理する道活用」連絡会 2019)、定量的な評価根拠は示されていない。秦・西内(2019)は、高知県香美市において異種の道を作成し、土砂災害危険箇所と重複する道に対し、代替路となる林道の抽出を行っているが、評価手法は被災リスクの算定精度に大きく依存する仕様となっている。公道と林道という異なる道路種の被災リスクの正確な算定は、被災実績データの整備状況等を踏まえれば容易でないことが予想される。林道の代替路機能の評価にあたり、道路ネットワークの被災リスクと接続形態は分けて議論する必要があると考えられる。

以上のように、林道を災害時の代替路として見直す機運はあるものの、その効果の定量的評価手法は十分に確立されておらず、林道整備が中山間地域の防災基盤構築にどの程度効果的であるかは明らかでない。そこで本研究では、林道の公益性評価を目的に、林道の災害時代替路を道路ネットワークにおける接続形態(以下、トポロジー)の観点のみから評価できるよう、林道の災害時代替路機能の概念的な整理と、既往の道路ネットワーク評価手法の改良を行い、実際の道路網を対象に林道の災害時代替路機能定量化への適用を試みた。

2. 研究方法

2.1 林道の代替路機能の定義

2.1.1 林道の代替路機能の評価指標 ネットワークの質的水準を計量化する代表的な指標として、交通ネットワーク信頼性がある。信頼性とは、「遭遇する動作条件の下で、意図した期間、デバイスがその目的を十分に果たす確率」のことである(Pokharel and Ieda 2012)。一般に信頼性指標は、特定のイベントが発生する確率とそのイベントの結果の乗数で表されるが、イベントの発生確率の推定が不正確だと、信頼性の評価も不確かとなる(Kurauchi *et al.* 2009)。

そこで、イベントのリスクのうち発生確率に重きをおかず結果(損失)の影響の大きさの観点からネットワークの質を評価する脆弱性の概念が提案されている。脆弱性とは、「道路ネットワークのサービス性を大幅に低下させる可能性のあるインシデントに対する感受性」である(Berdica 2002)。脆弱性分析の目的は、ネットワークの堅牢性を維持するための重要なコンポーネントを特定することにある(D'Este and Taylor 2003)。具体的には、少数のリンクの被災によりその信頼性が大幅に減少するノード(脆弱ノード)や、欠損等が発生すると甚大な影響が生じる重大なリンク(クリティカルリンク)が該当する。

例えば図-1に示した道路ネットワークモデルにおいて、頂点 $O_1 \sim O_5$ からDへの接続の確保を考える。以下では、頂点 u, v を端点とする道路リンクを、単に $\{u, v\}$ と記述する。 O_1D 間の接続は、道路リンク $\{O_1, 4\}$ $\{O_1, 5\}$ $\{O_1, 6\}$ が同時に寸断した場合に失われる。一方、 O_2D 間の接続は、 O_2D 間の道路網がいかに密であったとしても、道路リンク $\{O_2, 6\}$ の寸断により接続が失われる。各リンクの寸断リスクが等しい場合、 O_2 は O_1 に対し相対的に脆弱なノードであると評価できる。また、頂点 O_3, O_4, O_5 とDの接続は、道路リンク $\{7, D\}$ の寸断により失われるが、その寸断により一度に3つの地点がDと非接続となるため、当リンクは相対的にクリティカルなリンクと評価できる。

脆弱性分析とは、このようなネットワークの弱点部を事前に特定し、優先的にFail-Safe(イベントの生起確率の低減、例えばリンクの補強)やSafe-Fail(イベントの

結果の低減、例えば代替路の確保)を施すことを指向する包括的な枠組みであり、信頼性はこれを確率の観点から補完するものと位置付けられる (Berdica 2002)。

脆弱性を評価する指標は様々あり、例えば総所要時間 (Jenelius *et al.* 2006) やアクセス性 (Taylor *et al.* 2006) などが挙げられる。Kurauchi *et al.* (2009) は、これらの指標ではリンクが寸断する確率の不確実性を回避できるものの、災害時におけるネットワークの需要を正確に測定する必要があることを指摘しており、トポロジーの観点のみから脆弱性を評価する指標として接続脆弱性を提案している。この概念は通信ネットワークにおける k -edge-connectivity の概念を交通ネットワークに拡張したものである。ある OD (Origin-Destination) ペアが k -edge-connected であるとは、 $k-1$ 個のリンクが切れていても OD ペアは接続されていることを意味する。Kurauchi *et al.* (2009) は OD-コネクティビティ (ODC) 指標を、2つの地域の重心間を許容可能な所要時間で接続する経路のうち、互いに経路を共有しない (非重複な) 経路の数、と定義している。例えば図-1では、所要時間を考慮しなければ、頂点 O_1D 間の ODC は 3 であり、頂点 O_2D 間の ODC は 1 である。ODC が低い OD ペアほど、イベントに対する感受性が高く、脆弱であると評価される。

公道と林道の統一的な被災リスクおよび被災時の交通需要量の算定が困難である現状を踏まえ、本研究における林道の代替路機能の評価指標には、OD 間の許容所要時間制約付きの非重複経路とその数 (ODC) に着目する接続脆弱性を用いることとした。

2.1.2 林道の代替路機能の定義 林道のトポロジーは、災害時の代替路の観点から見れば、表-1の4パターンに分類できると考えられる。図-2に、公道および林道からなる道路ネットワークの模式図を示す。パターン A の林道は ODC の増加に寄与しており、接続脆弱性の低下 (ネットワークの堅牢化) に貢献していると評価

できる。パターン B の林道は、迅速な避難が求められる非常時には、避難路としての活用が期待される。特に公道に対し大幅なショートカットを形成する場合は、ODC の確保に寄与するものとして評価できる。パターン C の林道は、並走する道路が寸断した場合に、ODC の確保に寄与するが、その評価はいずれの道路を寸断すると仮定するかで変動する。パターン D の林道は、いずれの場合でも OD 間の非重複経路に含まれない林道である。評価パターン A・B・C の林道は、意味合いが異なりながらも接続脆弱性の観点から代替路としてそれぞれ機能することが想定される。本研究では、トポロジーの観点のみから林道の代替路機能を評価することを目的とするため、パターン A・B のトポロジーをとる林道を指して代替路機能を有する林道として評価する。すなわち、OD 間のすべての経路集合の中で、非重複経路数を最大化しつつ総所要時間が最小となる非重複経路集合 (以下、避難経路集合と呼ぶ) に含まれる林道を、災害時の代替路機能を有する林道として定義する。ただし、後述するように、提案する評価手法はパターン C のトポロジーをもつ林道の評価にも適用可能なように工夫した。

表-1 代替路機能の観点からみた林道のトポロジーの分類

パターン	林道のトポロジーの特徴	図-2で該当する林道リンク ^{注)}
A	ODC の増加に寄与	{2, D}
B	OD 間の所要時間の短縮に寄与	{1, 5}
C	A,B に該当しないが、OD 間の非重複経路の形成に関与する道路の寸断時に代替路として寄与	{1, 3}, {4, 7}, {7, 5}
D	OD 間の非重複経路の構築に寄与しない	{2, 6}

注) 記号 $\{v, w\}$ は図-2における頂点 v, w を端点とする林道リンクを表す

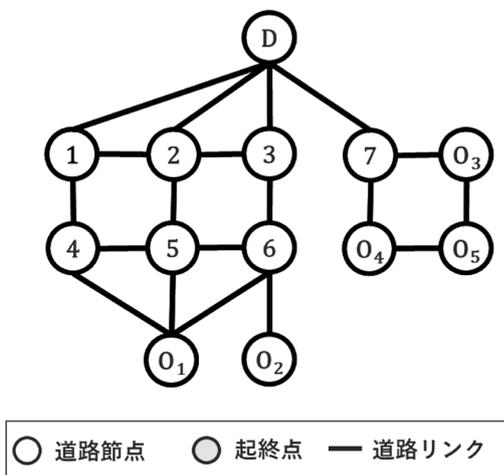


図-1 道路ネットワークモデル

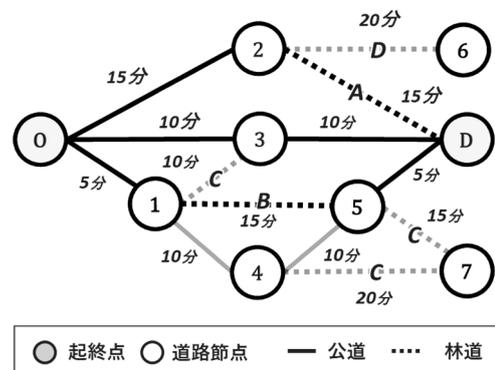


図-2 道路ネットワークにおける林道のトポロジーパターン

注1) リンクのラベルは、2地点間の所要時間を表す

注2) 起終点間を接続する濃色の線が、起終点間の非重複経路を表す

注3) 図中の A ~ D は、表-1のトポロジーパターン A ~ D に対応する

2.2 提案手法

2.2.1 代替路機能の有無の評価 接続脆弱性評価に関する既往研究(Kurauchi *et al.* 2009)では、ODCおよび非重複経路集合は、OD間の非重複経路数を最大化する最適化問題(P1)に、非重複経路集合の総所要時間を最小化する補助問題(P2)を組み込んだ、0-1整数計画問題の解として求められていた。しかし、整数計画問題はNP困難(NP-hard)と呼ばれるクラスに属する計算困難な組合せ最適化問題の一つであり、多項式時間アルゴリズムの存在が知られていない。この点に関し倉内ら(2010)は、より詳細な道路ネットワークを対象とした接続脆弱性評価にあたり、提案手法の計算効率性の向上が不可欠であることを指摘している。

ところで、非重複経路数を最大化しつつ総所要時間が最小となる非重複経路集合を求める問題は、以下に示すように最小費用最大流問題として一般化することができる。そして、最小費用最大流問題であればグラフ理論に基づく専用のアルゴリズムの使用により多項式時間で求解が可能である。林道の代替路機能の検証は、林道や市町村道などの地域の低規格な道路種を含む詳細道路ネットワークを対象に行う必要があるため、より高速なアルゴリズムを導入することは実用上重要と考えられる。また「フロー」という具体概念を用いるため、解析手法の説明および応用のしやすさにも優れると考えられる。そこで本研究では、OD間の最小費用最大フローを求めることで、避難経路集合とその経路数(ODC)を把握することとした。

まず、最大フローと非重複経路の関係について説明する。フローとは、各リンクに容量が設定された重み付き有向グラフ(フローネットワーク)において各リンクを通過する流量である。各リンクのフローはその容量を超えることができない。そして最大フローは、フローネットワークにおいて、起点から終点へ流すことができる流

量の最大値または、このとき流量が非負となるリンクの集合である。例えば、図-3(a)のフローネットワークでは、OD間の最大フローは5であり、濃く強調したリンクの集合がこのときの最大フローに相当する。一般に、すべてのリンクの容量が1の場合の最大フローは、互いに辺素なパス(辺が重複しないパス、すなわち非重複経路)の和として表すことができ、さらにそのパスの数は最大フローと等しいことが知られている。例えば、図-3(b)のフローネットワークでは、OD間の最大フローは3であり、濃く強調したリンクの集合がこのときの最大フローに相当する。図-3(b)で示したパス以外にも、最大フローを与えるパスの組合せは存在するが、その最大数は3を超えないことが確認できる。従って、すべてのリンク容量が1のフローネットワークにおける最大フローを計算することで、非重複経路集合とその数(ODC)を求めることができる。最大フローの計算量は、フォード・ファルカーソンのアルゴリズムの場合、 $O(fE)$ (f は最大フロー、 E はフローネットワークのリンク数)である。

次に、最小費用最大フローと避難経路集合の関係を説明する。最小費用最大フローとは、OD間の最大フローのうち総費用が最小となるフローである。図-4に、すべてのリンクの容量が1に設定された、公道と林道からなるフローネットワークを示す。図-4(a)は、OD間の最大フローを計算した結果である。OD間のフローは3であり、OD間のフローを最大化するために、トポロジーパターンAの林道リンク {2, D} が非重複経路集合に含まれる。ただし最大フローでは、リンクの重み(所要時間)を考慮することができない。そこで、得られた最大フローに対し総所要時間が最小となるフローを、OD間の最小費用流問題を解くことで求める。図-4(b)はその結果であり、公道リンク {1, 4} {4, 5} に代わり、トポロジーパターンBの林道リンク {1, 5} が非重複経路集合に含まれる。最小費用フローの計算量は、ダイク

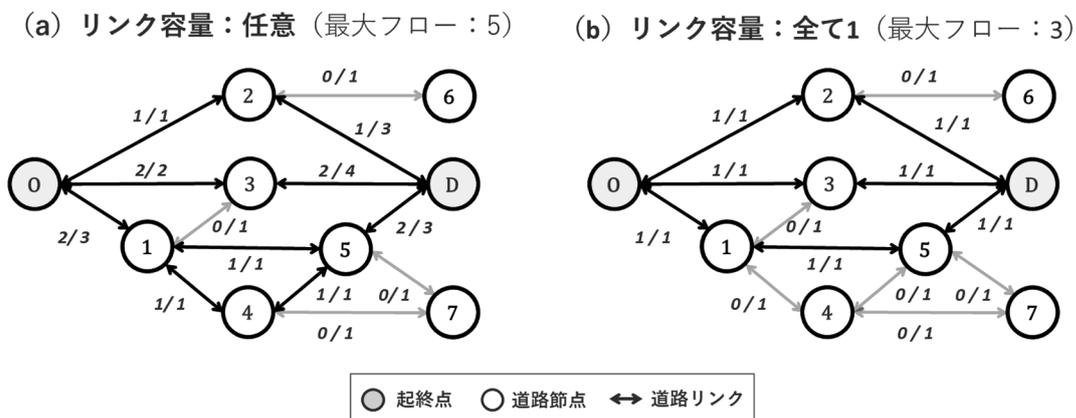


図-3 最大フローと非重複経路の関係

注1) リンクのラベルは、左から流量、容量を表す
 注2) 濃色のリンクは、流量が非負のリンクを表す。

ストラ法を用いた最短路反復法によるアルゴリズムの場合、 $O(k|V|E)$ (k は要求するフロー、 V と E はフローネットワークのノード数およびリンク数) となる。

以上のように、すべてのリンクの容量を1としたフローネットワークにおいて、OD間の最小費用最大フロー問題を解くことで、総所要時間が最小となる非重複経路集合を抽出することができる。OD間の最大フローの求解は、Kurauchi *et al.* (2009) におけるP1問題の求解に相当し、最小費用最大フローの求解は、Kurauchi *et al.* (2009) におけるP2問題の求解に相当する。グラフ理論にもとづく算出アルゴリズムを用いることで、多項式オーダー ($O(f|E|)+O(k|V|E)$) での求解が可能となる。そして、ある林道リンクが最小費用最大フローに含まれる場合、当該林道リンクはOD間の避難経路において代替路機能を有する林道リンクであると評価できる。避難経路集合から個別のパスを抽出するには、避難経路集合に対しOD間の経路探索を行い、得られたパスを順次削除する処理を繰り返せばよい。

ここまでは、許容可能な所要時間について考慮していないが、あまりに長大な経路は避難経路として利用されないことが予想される(倉内ら 2010)。これには、最小費用フローを求める過程で、許容所要時間を超える経路を排除する処理を追加することで対応する。具体的には、最小費用フロー問題の代表的なアルゴリズムである最短路反復法において、得られた経路の所要時間が許容時間を超えた場合に処理を停止する条件を追加する。許容可能な所要時間には、ある値(例えば60分)や最小OD所要時間の定数倍などが考えられるが、基本的には評価実行者が、評価対象路線が避難活動のいずれのフェーズで使用されるかを勘案しこれを決定することが妥当と思われる。

2.2.2 代替路機能の優劣の評価 代替路機能を有す

る林道が複数存在する場合、それらの林道に対し機能の優劣を評価することで、対策優先順位の検討が可能となる。脆弱性分析の枠組みでは、脆弱ノードに対し代替路を形成する林道やクリティカルリンクに相当する林道を指して、代替路機能の高い林道と評価することが可能である。

脆弱ノードやクリティカルリンクの定義は、評価者が様々設定できる。本研究では脆弱ノードを、公道のみからなるネットワークにおける避難所と避難目的地間のODC(以下、 ODC_{public})が1である避難所として定義する。また、相対的に多くの避難所の避難経路集合に含まれる林道をクリティカルリンクとみなし、代替路機能の高い林道として評価する。クリティカルリンクの評価には、林道リンクごとに算出するリンク・クリティカルティー(LC)を用いる。LCは次のように計算する。避難経路を検討するすべての避難所で、目的地間の避難経路集合を記録し、これらの全体集合を求める林道リンクごとに、避難経路集合の全体集合における頻度としてLCを求める。LCは、ある林道リンクが避難所と避難目的地間の避難経路集合に含まれる回数に相当する。ある林道リンクのLCが1以上であれば、当該林道リンクは代替路機能を有すると評価できる。

避難所ごとの接続脆弱性評価にはODCを、林道ごとの代替路機能の評価にはLCをそれぞれ指標として使用する。なおLCは、林道の代替路機能の相対的優劣を評価するために導入する指標であり、その定義は一意でない。LCの定義指標には、接続する避難所の防災上の重要性(例えば収容人数の大小など)や寸断による脆弱ノードの増加感度等、様々考えられるが、いずれの指標が正しいかは評価実行者に委ねられると考えられる。本研究ではLCの定義指標として、計算が単純でありかつ定義が明快な「ある林道リンクの避難経路集合への採用回

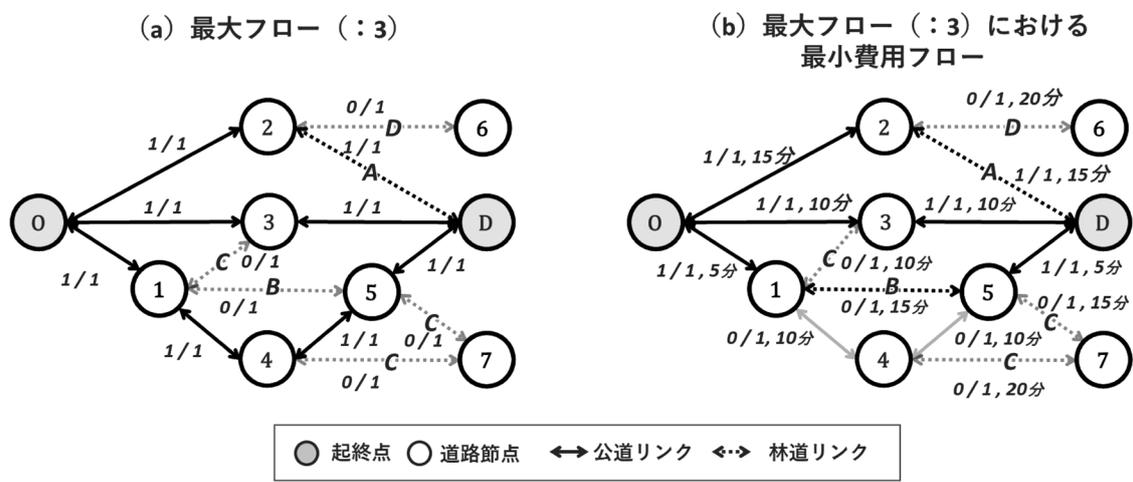


図-4 最小費用最大フローと避難経路集合の関係

注1) リンクのラベルは、左から流量、容量、所要時間を表す

注2) 図中のA~Dは、表-1のトポロジーパターンA~Dに対応する

数」を使用することとした。

2.3 適用

2.3.1 解析対象地 林道の代替路効果の評価は、岐阜県郡上市を対象に行った。岐阜県では、岐阜県森林研究所 (2016) により、公道、林道および作業道間の位相関係が確保された森林路網ベクタデータが整備されており、これらを対象としたネットワーク解析を行う条件が整っている。また岐阜県では、平成 30 年 7 月豪雨の際に孤立集落が多数発生しており、災害時に孤立するおそれがある集落が中山間地を中心に多数存在している (岐阜県 2019)。このうち郡上市は、市内の約 9 割を山林が占め、可住地は 1 割にも満たない典型的な山間地に位置する市町村であり、その面積は 1000 km² 以上と県下では隣接する高山市に次いで広大である。

解析対象とした道路種は、公道 (自動車道, 一般国道, 都道府県道, 市町村道) および林道とした。作業道は、自動車の常時通行を前提とした構造や維持管理体制でないことが予想されるため、解析の対象外とした。自動車道は、森林路網ベクタデータの地物として存在しなかったため、郡上市内にインターチェンジがある区間に限り、自動車道地物を作成した。

2.3.2 避難経路の起終点の設定 林道の代替路機能の評価にあたり、避難経路の起終点を設定する必要がある。対象地には、指定緊急避難場所、指定避難所、および市独自指定の一時避難所が設けられている。避難勧告などの発令時には、指定緊急避難場所または一時避難所に一時的に避難し、自宅での居住の安全が確保されない場合は、さらに指定避難所へ移動し一定期間の避難生活を行うこととなっている。ただし、指定避難所に指定された施設であっても、道路の途絶による孤立が続きライフラインの回復に時間がかかる場合は開設されないこともあり (内閣府 2019)、これらの避難所が必ずしも被災時の最終的な安全地帯になるとは限らない。一方、非常時には、地方自治体により災害対応の中核となる災害対策本部が設置され、対象地では郡上市役所に設置されることとなっている (郡上市 2020)。本研究では評価の単純化を図り、市内の避難所を避難の起点に、郡上市役所 (以下、市町村役場) を避難の終点に設定した。避難所のポイントデータは、国土数値情報 (国土交通省) や県域統合型 GIS ぎふ (岐阜県) で公開されている避難施設データを参考に作成した。解析対象とする避難所は、市町村役場を除く 241 か所とした。

なお、郡上市内の林道であっても、市内から隣接する市町村の避難所へ避難する際の代替路として使用されるケースが想定される。このようなケースも含め、林道の代替路機能の評価するには、郡上市に隣接する市町村の任意の地点を最終避難地点として指定した解析が必要になる。本研究で最終避難地点として郡上市役所のみ指定した理由として、まずデータセット確保の問題がある。岐阜県内においては、公道と林内路網の接続性が確保さ

れた道路網ベクタデータが整備されているものの、郡上市西部に隣接する福井県 (大野市) には該当するデータが存在しない。また、提案手法を応用することで、最終避難地点を複数指定した場合の解析にも対応できると考えられるが、手法および得られる結果の解釈が複雑化することや、最終避難地点の設定次第で結果が変動することも考慮し、本研究では最終避難地点を単一とした解析を行った。

2.3.3 グラフの構築 最小費用最大フロー問題の解法に、グラフ理論に基づくアルゴリズムを用いるため、森林路網ベクタデータより重み付き無向グラフ $G(V, E, w, c)$ を構築した。ここで

- V : 森林路網ベクタデータの端点および交点からなるノード集合
- E : V を端点とするリンク集合
- w : リンクの重み
- c : リンクの容量

である。リンクの重みには、森林路網ベクタデータの属性データであるリンクの通行速度 (km/時) とリンク長 (m) より算出した所要時間 (分) を使用した。リンク容量は、一律に 1 で初期化した。

避難所と市町村役場は、最近傍にある G のノードに設定した。計算負荷を低減するために、 G に対し次数が 1 のノード (避難所, 市町村役場を除く) とこれに接続するリンクを除去する圧縮処理を繰り返した。フローの計算には有向グラフを与える必要がある。そこで、 G に各リンクの逆辺を追加することで、重み付き有向グラフとして公道・林道網グラフ H を作成した。以上の前処理を行った結果、 H のノード数は 5367、リンク数は 13,338 となった。

2.3.4 起終点ノード周辺リンクの容量の調整 ODC の上限値は、起終点ノードへのリンクの入出力数により決定される。市町村道や林道を含む詳細道路ネットワークでは、ノードとリンクの構成が非常に細くなるため、避難所を単純に最近傍の H のノードに設定すると、リンク入出力数が過剰に制約される場合がある。例えば道路が密に整備されている場所に配置されている避難所であっても、指定されたノードの次数が 2 であれば、非重複経路数の上限は 2 に制限されてしまう。そこで、避難所近傍の道路区間は被災により寸断が生じないと仮定し、各避難所を中心とする半径 300 m の円形バッファを発生させ、バッファ内に含まれるすべてのリンクの容量 c を ∞ とした (図-5 (a))。容量 c が ∞ のリンクは、フローの制約とならないことを意味する。なお、容量が ∞ のリンクは、非重複経路集合に重複して含まれることがある。この場合の非重複経路集合は、厳密な意味での非重複経路集合ではないが、本研究では例外的にこれを非重複経路集合として認めることとする。

また、市町村役場を含む市の中心部では、道路が密に整備されているため、市の中心部に到達できれば、市町

村役場にも辿り着けることが予想される。そこで、1920年当時の旧八幡町内にあるすべてのリンクの容量 c を ∞ とした(図-5(b))。これらの処理により、旧八幡町内およびその近傍に位置する16の避難所は、リンク容量 c が ∞ のリンクで市町村役場と接続された。そのため、当該16の避難所の ODC は ∞ とした。これらの避難所では、被災時においても公道網における市町村役場までのアクセスが失われないと判断し、林道は災害時代替路として機能していないと評価した。なお、当該16の避難所では、避難経路集合の取得は行わなかった。

2.3.5 評価内容 対象地における林道の代替路機能の評価内容を以下にまとめる。まず、公道・林道網グラフ H において、市町村役場とリンク容量 c が ∞ のリンクで接続された16の避難所を除いた225か所の避難所と市町村役場間のすべての避難経路集合を、OD間の最小費用最大流問題を解くことで求めた。次に、各避難経路集合を構成するパスの数を調べることで、各避難所の接続脆弱性(ODC)を計算した。また、林道を避難経路として使用することにより、各避難所の接続脆弱性がどの程度改善されるかを調べるために、 H より公道リンクのみからなる部分グラフ(公道網グラフ)を抽出し、同様に各避難所の接続脆弱性(ODC_{public})を計算した。さらに、避難経路に対する所要時間の制約が結果に与える影響を調べるために、評価は、避難経路として許容する所要時間を設けない場合と設けた場合の2パターンで行った。最後に、各林道の代替路機能を定量化するために、避難経路集合の全体集合より各林道の LC を計算した。

3. 結果

図-6に、対象地における林道の災害時代替路機能の評価結果を示す。結果は、許容所要時間を ∞ とした場合のものである。図中のラインは G のリンクであり、実線

は公道リンクを、点線は林道リンクを表す。代替路機能が認められた林道は、 LC に応じて色分けしてある。各マーカーは避難所を表し、 ODC_{public} に応じて記号分けされている。白抜きのマーカーは、市町村役場間の避難経路集合に林道が含まれている避難所を表す。

避難経路集合に林道が含まれていた避難所は、全体の約65%(157か所)であった。また、林道の使用により ODC が増加した避難所は、全体の約50%(121か所)であった。林道の代替路機能は、広範に確認できたが、市町村境に位置する避難所では、林道が避難経路集合に含まれていなかった。隣接する市町村にも避難の終点を設定することで、これらの避難所の評価も変わる可能性がある。

図-7に、 ODC の累積分布を示す。道路構成種・許容所要時間の条件別に4つのプロットを作成した。まず、許容所要時間を ∞ とした場合の結果(黒色のプロット)について述べる。脆弱ノード(横軸の ODC が1)の数は、公道網グラフ(点線のプロット)では全避難所の14%(33か所)存在したが、公道・林道網グラフ(実線のプロット)では全避難所の5%(11か所)へ減少した。林道の使用により脆弱ノードの数が約1/3に減少する結果となった。また、例えば ODC が3以上となる避難所の割合は、公道網グラフでは53%(127か所)であったが、公道・林道網では69%(165か所)に増加した。

次に、避難経路に対する所要時間の制約が、各避難所の ODC に与える影響について示す。図-8に、許容所要時間を ∞ とした場合の公道・林道網グラフにおける避難経路の所要時間の分布を示す。所要時間の中央値は、公道のみからなる避難経路では32分であり、公道と林道からなる避難経路では94分であった。許容所要時間を94分とした場合の ODC の累積分布(図-7の灰色のプロット)について述べる。許容所要時間の制約を受け

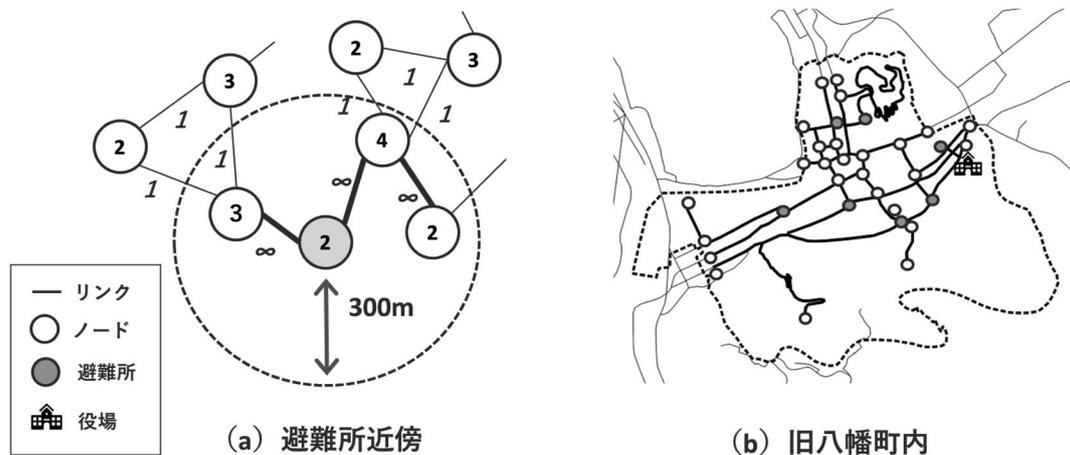


図-5 避難所近傍リンクの容量の調整

注1) 濃色で強調したリンクの容量を ∞ に調整した

注2) ノードのラベルはノード次数を、リンクのラベルはリンク容量を表す

るほど、累積分布はグラフの左上方向にシフトする。公道・林道網グラフでは、特にODCが大きい避難所ほど許容所要時間による避難経路数の制約を受ける傾向が認められた。避難経路の所要時間をどこまで許容するかに関して、一律の判断は難しいが、林道を含む避難経路の所要時間は、公道のみからなる避難経路に対し、中央値

にして3倍近く長くなったことには留意が必要である。

図-9に、代替路機能を有する林道のLCの分布を示す。LCが1以上となり、代替路機能が認められた林道は、64路線であった。LCの最小値は1であり、最大値は55であった。LCが相対的に高い路線（図-6中で暖色系の着色がされている林道リンク）は、クリティカルリンクとして評価できる。なお、LC=38の路線は郡上市和良町鹿倉から郡上市明宝畑佐を連絡するふるさと林道（和良～明宝線）であり、その公益性の度合いを定量的に示すことができた。

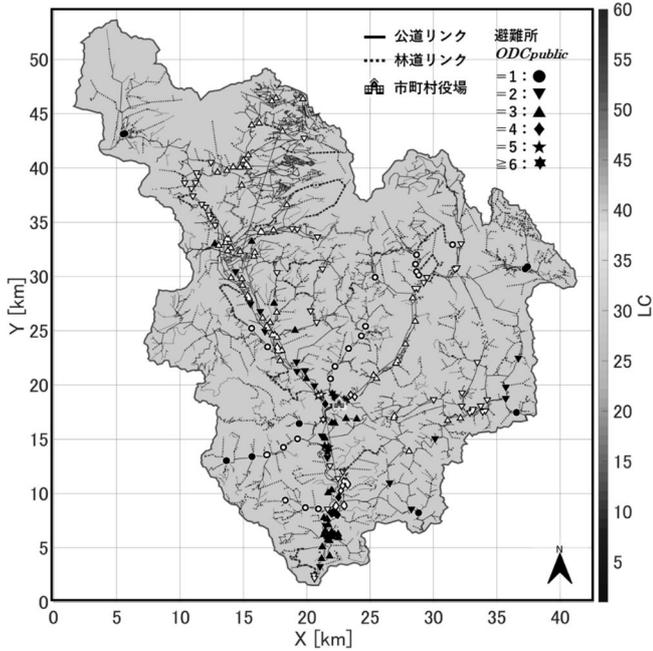


図-6 林道の災害時代替路機能の評価結果

注) 各マーカーは避難所を表し、白抜きのは市町村役場間の避難経路集合に林道が含まれた避難所を表す

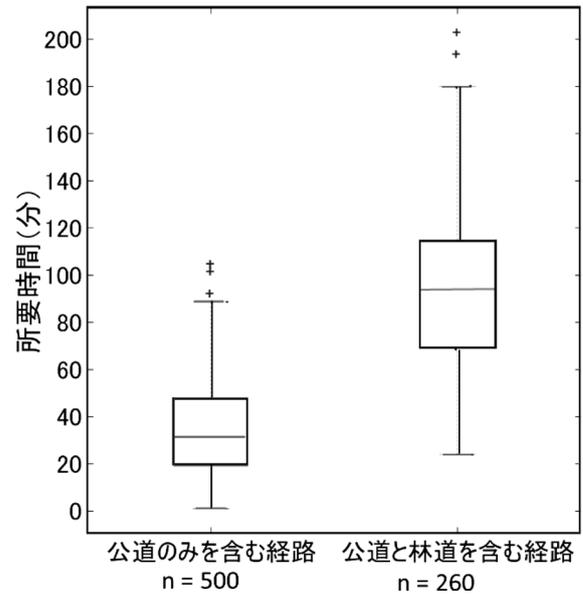


図-8 避難経路の所要時間の分布

注) 箱ひげは、最小値、第一四分位、中央値、第三四分位、最大値、外れ値を表す

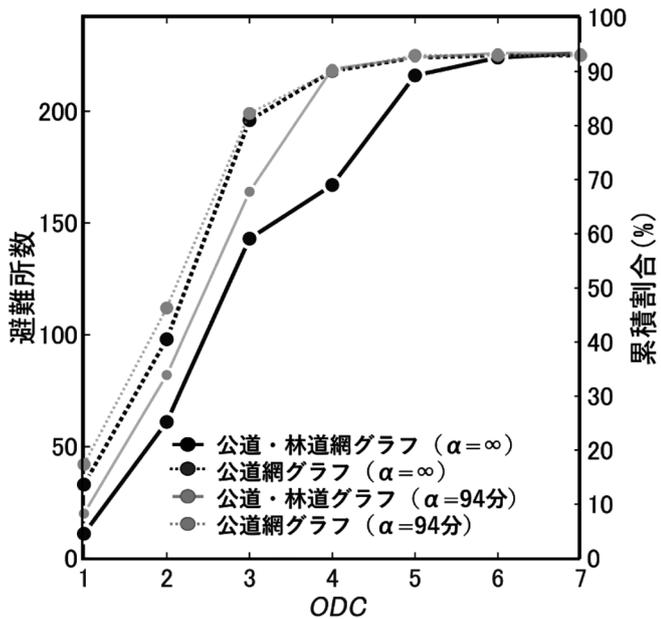


図-7 道路構成種・許容所要時間ごとのODCの累積分布

注1) α は許容する所要時間(分)を表す
注2) $ODC = \infty$ となる避難所が16か所あるが、本図ではODCが1から7の範囲で図示する

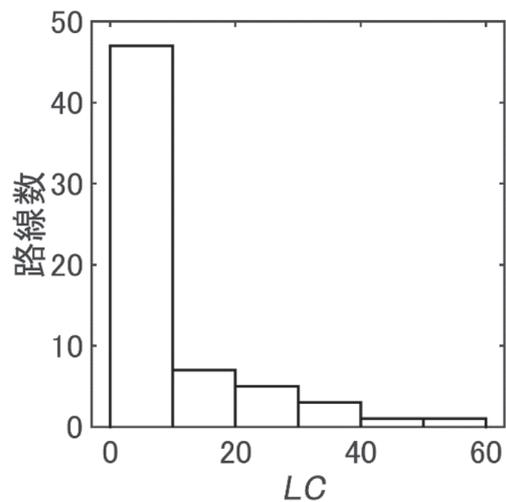


図-9 代替路機能を有する林道のLCの分布

注) 縦軸の路線数は、行政上の林道の数ではなく、トポロジーの観点より林道リンク集合として定義された林道の数を表す

4. 考察

4.1 脆弱ノードの代替路となる林道のトポロジーの例

脆弱ノードの代替路となる林道のトポロジーの例として、図-10に旧奥明方村内の9か所の脆弱ノードのうち、林道によりODCが増加した7か所の脆弱ノードと市町村役場間の避難経路集合を示す。図中の白線は、1920年当時の旧市町村境を表す。互いに近接する一部の避難所は、同一のノードに設定されている。マーカー内には、ODCを付記してある。ODC_{public}で記号分けされたマーカーと見比べることで、林道によるODCの増分を把握することができる。

図-10に示した脆弱ノードのうち4つの脆弱ノードは、公道から奥まった場所にある集落に位置している。集落から南方の国道へ至るアクセス道は短距離ではあるものの一本のみであるため、当リンクが寸断するとこれらの集落は孤立する。これに対し集落から東西に延伸する林道が、村内の公道と接続する形で非重複経路を構成している。この結果、これらの脆弱ノードの非重複経路数は1から3へ増加している。当集落から南方の国道へのアクセス道の被災リスクの捉え方次第ではあるが、これらの林道を重点的な維持管理事業等の対象とすることで、地域の防災基盤の効果的な整備が行えると考えられる。

4.2 提案手法の応用方法

本研究では、被災リスクによらず代替路機能を評価す

るために、表-1に示したトポロジーパターンのうち、特にパターンA・Bのトポロジーをとる林道を代替路として機能する林道と定義し、その効果を評価した。提案手法は、フローネットワークHにおけるリンク容量cを調整することで、トポロジーパターンCの林道を含め、対象地の特性に合わせた柔軟な評価が可能である。具体的には、リンク容量を(1)式のように調整する。

$$c(e) = \begin{cases} \infty & e \in E^+ \text{ のとき} \\ 0 & e \in E^- \text{ のとき} \\ 1 & \text{その他} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、E⁺は被災による寸断を仮定しない道路リンク集合を、E⁻は被災により寸断すると仮定した道路リンク集合を表す。リンクe容量c(e)を0にすることは、リンクeにフローを流さないことを意味する。一方、リンクeの容量c(e)を∞にすることは、リンクeにフローを無制限に流せることを意味する。

フローネットワークにおける容量の調整が、代替路機能の評価結果に与える影響の例を図-11に示す。図-11(a)が容量調整前の避難経路集合である。対して図-11(b)は、公道リンク{4, 5}をE⁻ c(e)=0に、公道リンク{3, D}をE⁺ c(e)=∞に割り当てた場合の避難経路集合を表す。この結果、公道リンク{4, 5}に対し代替路となる林道リンク{4, 7} {7, 5}が避難経路集合に

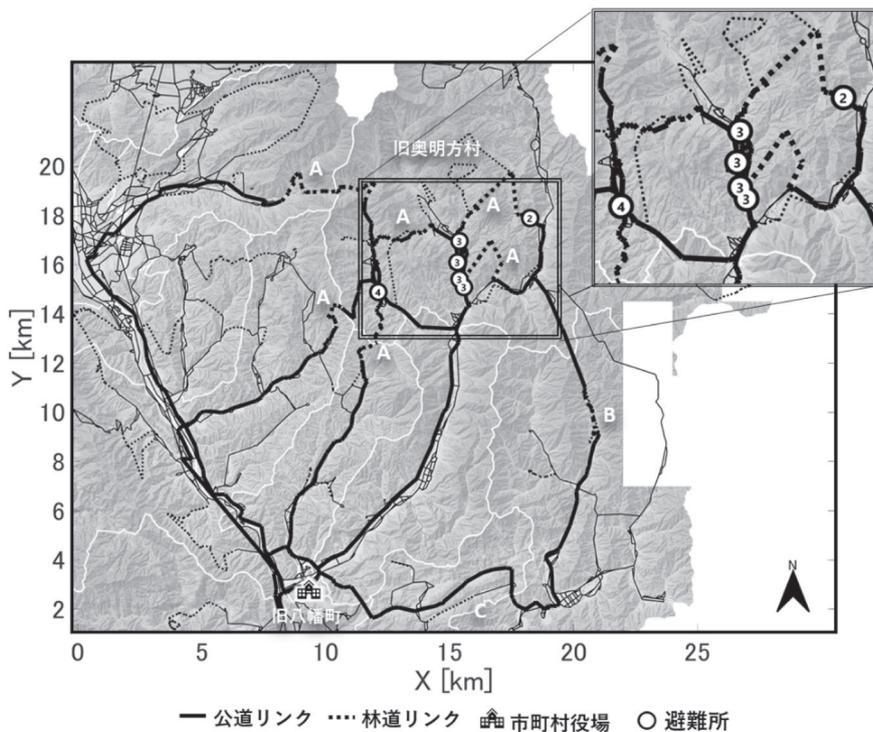


図-10 脆弱ノードの避難経路集合に含まれる林道のトポロジー
 注1) 太線で強調されたリンクは、避難経路集合を表す
 注2) マーカー中の数字は、各避難所のODCを表す
 注3) 図中のA~Cは、表-1のトポロジーパターンに対応する

含まれた（これらはトポロジーパターンCの林道に相当する）。一方、公道リンク {3, D} は寸断を仮定しないため、林道リンク {2, D} は評価対象から外れ、代わりにより所要時間の少ない公道リンク {2, 3} {3, D} が避難経路集合に含まれる。

このように、 $c(e)=0$ の道路リンクに対し代替路となるトポロジーをとる林道は、その代替路機能が認められ、 $c(e)=\infty$ の道路リンクに対し代替路となるトポロジーをとる林道は、代替路機能の評価対象から外れる。個々のリンクごとに容量を調整することで、真に対策を講じるべき路線に対し、代替路となる林道を抽出し対策を検討することが可能となる。各リンクの E^+ , E^- , その他への割り当ては、例えばリンクごとに算出した被災リスクを参照することで機械的に行うことも可能であるが、評価実行者が現地の状況や過去の被災履歴等を勘案し、個々の路線ごとに割り当てることも可能であるため、対象地の特性に合わせた柔軟な評価が行えると考えられる。

5. おわりに

本研究では、林道の公益性評価を目的に、林道の災害時代替路機能の概念的な整理と、既往の接続脆弱性評価手法を改良した林道の代替路機能の定量化手法を考案した。提案手法を岐阜県郡上市に適用し、避難起点（市内225か所の避難所）と避難終点（郡上市市役所）間のすべての避難経路集合を評価した結果、約65%の避難所の避難経路集合に林道が含まれたことが明らかとなった。また、全体の約50%（121か所）の避難所でODCが増加するとともに、脆弱ノードの数は約1/3に減少することが示され、対象地における林道の災害時代替路効果を定量化することができた。

本研究は、Kurauchi *et al.* (2009) が提案した接続脆弱性評価手法を改良し、林道の災害時代替路機能の評価へ適

用を試みたものである。提案手法ではOD間の非重複経路の算出を、計算効率および評価手法の解釈しやすさの観点から、整数計画問題ではなく最小費用流問題として記述した。また、非重複経路の算出上不要なグラフのリンクとノードの削減を行った。林内路網や市町村道などを含む実際の詳細道路ネットワークへ適用し、現計算時間上問題ないことを確認した。これまでの接続脆弱性分析では、主にOD間の非重複経路数（ODC）に着目し評価がなされていたが、ある林道が非重複経路集合に含まれるか否かに着目することで、接続脆弱性分析を林道の災害時の代替路機能の評価に応用できることを示した。提案手法は、ネットワークトポロジーに重点を置き林道の代替路機能およびその効果を評価する仕様であるため、被災リスクの精緻な予測が行えなくとも、トポロジーの観点から妥当な評価が行える上に、被災リスクも選択的に組み込むことで評価の妥当性を向上させることが可能である。

提案手法の適用により、林道の代替路機能とその優劣を、客観的かつ省力的に行える。既にいくつかの県（例えば香川県（2021））では、代替路として活用可能な林道のリストが公表されているが、提案手法を用いることで、これらの選定路線に対しトポロジーの観点から客観的な選定根拠を供することや、路線間の機能の優劣を示すことも可能である。代替路機能の高い林道に対し、日常的な維持管理の実行や災害耐性を強化する改良または災害復旧を行うことで、防災基盤整備の観点から費用対効果の高い投資ができると考えられる。なお、代替路機能が認められた林道に対し、林野庁（2020c）の評価手法を適用することで、代替路機能を金銭ベースの便益に換算することが期待できる。

林道を含む中山間地域の道路網に対しネットワーク解析を行うには、道路間の位相関係が確保されたデータ

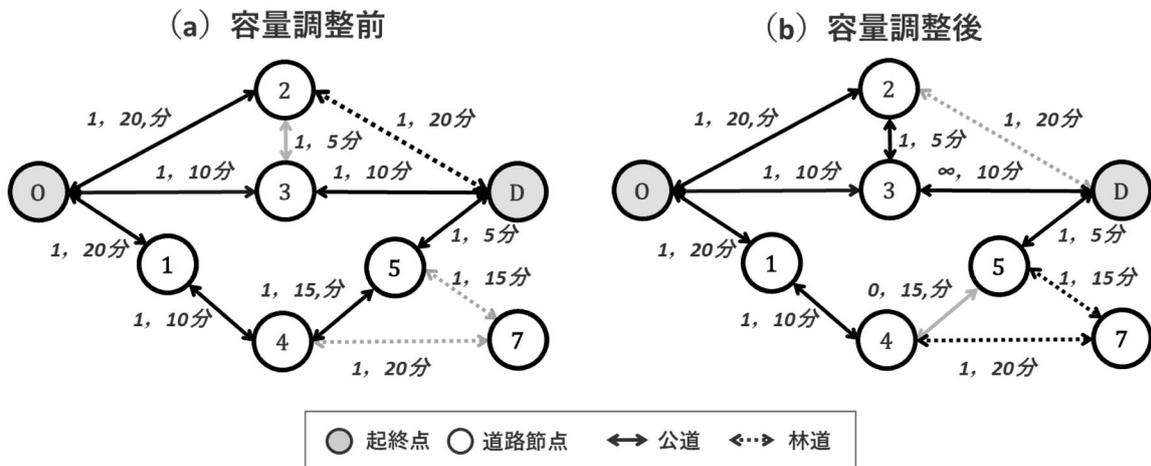


図-11 リンク容量の調整による提案手法の応用
 注1) リンクのラベルは、左から容量、所要時間を表す
 注2) 濃色のリンクは、避難経路集合を表す

セットが必要となる。近年、林内路網のベクタデータが整備されつつあるが、公道との接続性が担保されたデータの整備は未だ不十分と考えられる。一方、「多様な主体が管理する道活用」連絡会（2019）のように、官民連携し中山間地の多様な主体が所有する道路データを一元化する動きもある。これらの動きとも呼応しつつ、トポロジーの担保された道路網ベクタデータを整備することが、今後、林道整備の費用対効果を定量的に評価していく上で一つの重要な課題になると考えられる。

本研究は JSPS 科研費 19H02991, 21H03672, 21K05665 および農林水産省委託プロジェクト「山地災害リスクを低減する技術の開発」の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Berdica, K. (2002) An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy* 9(2):117-127.
- D'Este, G. M. and Taylor, M. A. P. (2003) Network Vulnerability: An Approach to Reliability Analysis at the Level of National strategic Transport Networks. online, (<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/9781786359544-002/full/html>). Accessed August 1, 2021.
- 岐阜県森林研究所 (2016) 県全域の森林路網図を作成しました。森林のたより 756.
- 岐阜県 (2019) 岐阜県孤立集落対策指針. オンライン, (<https://www.pref.gifu.lg.jp/kurashi/bosai/bosai-taisaku/11115/koritsusuyuraku.data/koritusisin.pdf>). 2021年8月1日参照.
- 岐阜県. 県域統合型 GIS ぎふ. オンライン, (<https://gis.gifu.jp/gifu/portal>). 2021年8月1日参照.
- 郡上市 (2020) 2章 災害応急対策計画. オンライン, (https://www.city.gujo.gifu.jp/life/docs/regional_disaODer_prevention_plan_2-2.pdf). 2021年8月1日参照.
- 秦啓・西内裕晶 (2019) 高知県香美市を対象とした異種交通ネットワークの構築と集落に着目した避難経路の把握と評価. *土木学会論文集 F6(安全問題)* 75(2): 83~92.
- 林宏年・長谷川修一・野々村敦子・山中稔・佐藤知紀 (2010) 中山間地における土砂災害に対して安全な一時避難場所の選定方法. *自然災害科学* 29(1): 73~81.
- 岩手県 (2013) 3.11 記憶, そして未来へ〜 東日本大震災林道の被害と復旧の記録. オンライン, (https://www.pref.iwate.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/008/429/daisinsaikirokusi.pdf). 2021年8月1日参照.
- Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L. G. (2006) Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40(7): 537-560.
- 香川県 (2021) 代替路 (避難路) として活用可能な林道. オンライン, (<https://www.pref.kagawa.lg.jp/midoriseibi/tisan/daitairo.html>). 2021年8月1日参照.
- 国土交通省. 国土数値情報ダウンロード避難施設. オンライン, (<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P20.html#prefecture21>). 2021年8月1日参照.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2009) 受益者の効用に着目した社会資本水準の評価に関する研究. *国総研プロジェクト研究報告* 23: 3.
- Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y. (2009) NetWork Evaluation Based on Connectivity Vulnerability. online, (https://www.academia.edu/11953470/Network_Evaluation_Based_on_Connectivity_Vulnerability). Accessed August 1, 2021.
- 倉内文孝・宇野伸宏・HSIA Hao-Ching・YEH Kuang-Yih (2010) 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. *土木計画学研究・講演集* 42: 1~4.
- 松本武・北川勝弘 (2000) 山間地域における道路網の配置構造解析と評価指標の検討. *日林誌* 82(2): 154~162.
- 宮本英輝・北川慶子 (2009) 中出開地域集落の出地災害リスクの評価. *佐賀大学教育学部研究論文集* 14(1): 261~271.
- 内閣府 (2014) 中山間地等の集落散在地域における孤立集落発生の可能性に関する状況調査 (都道府県アンケート調査) 調査結果. オンライン, (<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/koritsushuraku.pdf>). 2021年8月1日参照.
- 内閣府 (2019) 避難所について. オンライン, (<https://www.mhlw.go.jp/content/12201000/000484805.pdf>). 2021年8月1日参照.
- 中澤昌彦・鈴木秀典・岡勝・田中良明・吉田智佳史・近藤耕次・松本武 (2007) ネットワーク分析を用いた山村地域における道路網の発達過程に関する研究. *森利誌* 22(1): 15~20.
- 中山晶一郎 (2011) ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察. *土木学会論文集 D3(土木計画学)* 67(2): 147~166.
- Pokharel, R. and Ieda, H. (2012) Reliability and Vulnerability of Road Network: A Research Review from Practicability Perspective. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers* 45.
- Taylor, M. A. P., Sekhar, S. V. C. and D'Este, G. M. (2006)

Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks. *Networks and Spatial Economics* 6 : 267-291.

「多様な主体が管理する道活用」連絡会 (2019) 多様な主体が管理する道活用の手引き. オンライン, (<https://www.mlit.go.jp/common/001281435.pdf>). 2021年8月1日参照.

林野庁 (2020a) 今後の路網整備のあり方検討会. オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sagyoudo/attach/pdf/kentokai-20.pdf>). 2021年8月1日参照.

林野庁 (2020b) 整備課関係予算の概要. オンライン, (<https://okashinrin.jp/wp/wp-content/>

[uploads/2020/12/R3%E6%A6%82%E7%AE%97%E6%B1%BA%E5%AE%9A%EF%BC%88%E6%A3%AE%E6%9E%97%E6%95%B4%E5%82%99%E4%BA%8B%E6%A5%AD%EF%BC%89.pdf](https://okashinrin.jp/wp/wp-content/uploads/2020/12/R3%E6%A6%82%E7%AE%97%E6%B1%BA%E5%AE%9A%EF%BC%88%E6%A3%AE%E6%9E%97%E6%95%B4%E5%82%99%E4%BA%8B%E6%A5%AD%EF%BC%89.pdf)). 2021年8月1日参照.

林野庁 (2020c) 林野公共事業における費用対効果分析について (概要). オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/sekou/hyouka/attach/pdf/21hyouka-9.pdf>). 2021年8月1日参照.

吉村哲彦・酒井徹朗 (1998) ネットワーク分析を用いた山間部における道路網の評価. *森利誌* 13 (3) : 193 ~ 200.