

道路ネットワークの接続脆弱性評価に基づく リダンダンシーの経済価値の計量化手法の検討

原田 剛志¹・倉内 文孝²・高木 朗義³

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: q3121025@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail: a_takagi@gifu-u.ac.jp

本研究では、数理最適化モデルを用いて、災害時に孤立する可能性のある地点や不通によって大きな影響をもたらす道路区間を把握する方法を構築した。到達可能性と近接性の2つの観点から発着地点間を評価し、一部区間の不通における指標の減少を分析することで、弱点を把握する。本研究の特徴は、従来行われている期待値に基づくリスク評価を行わず、確率以外の方法で到達可能性を評価する点にある。これにより低頻度で甚大な被害をもたらす事象を考慮することが可能となる。実ネットワークを用いた試算を行った結果、平常時に評価が高くとも、一部の不通によって大きな影響を受けるノードが発見された。これにより脆弱性分析の意義が確認できた。今後は、脆弱性概念に即した経済分析について考究し、予算制約を考慮した分析方法を構築する必要がある。

Key Words : *vulnerability, connectivity, accessibility, redundancy, road network*

1. はじめに

災害発生後の状況下では、重傷患者の搬送や復旧復興支援のための輸送などに使われるなど、平常時より増して道路の役割は重要になる。一方、道路ネットワークは必ずしも頑健とはいえない。我が国に頻発する地震災害や水害のたびに道路途絶の危険性が高まり、その一部区間の不通によって、悪影響がもたらされてきた。災害時を鑑みたネットワーク信頼性の研究は蓄積がある¹⁾²⁾。

道路ネットワークの評価指標は、一般にはリスクとして、事象の発生確率とその事象が生じた際の損失との積で表現される。このため損失の大きな事象であっても発生確率が小さい場合、リスクが小さく見積もられてしまう可能性がある。このような問題意識のもと被災確率を用いずに災害発生時の影響度のみに着目して分析する方法として、ネットワーク脆弱性の考え方が提案されている。Taylorら³⁾はリンクの被災によって、アクセシビリティが大幅に減少するノードを脆弱性の高いノードと定義している。Bell⁴⁾は総走行時間を最大化しようとする邪悪な存在とそれを避けようとするドライバーとの間のゲームの帰結として、ネットワークの総走行時間の増加に影響の大きなリンクを抽出する方法を提案している。

Kurauchiら⁵⁾はリンク途絶によってネットワーク容量の

減少が大きなものを重要なリンクとする容量脆弱性の考え方を提案している。一方、容量を考慮する場合、交通需要のインプットは不可欠であり、需要の大きさによって異なる結果となる可能性がある。また、非常時の交通需要は平常時とは大きく異なり、平常時のデータを用いて議論することは適切ではないと考えられる。一方、Kurauchiら⁶⁾は、原点に立ち返って、到達の可能性を評価する接続脆弱性の概念を提案している。二地点間のリンクを共有しない独立な経路（非重複経路）を数え上げることで、確率を扱わず被災時の到達の可能性を評価することができる。Kurauchiら⁷⁾は、この考え方を台湾道路ネットワークに適用し、ある接続性を確保する場合における全ての出発地と複数の災害対策センターとの走行時間の最小化問題を解き、施設配置問題に応用している。しかしながら、経路数のみに基づく方法では到達の可能性のみを評価しているに過ぎず、Taylorらが述べている影響度が評価されていない。そこで、本研究では先行研究の方法を拡張し、Taylorらの提案する考え方と合致する評価方法を構築した。さらに、予算制約を考慮して優先順位を決定するために、接続脆弱性概念に即した経済評価の方法の構築に向け検討を加えた結果を報告する。

2. 接続脆弱性評価の方法

(1) 概要

本章では、接続性評価の方法と脆弱性評価の方法を述べ、ネットワークの接続性に影響を与える弱点箇所の特定期間方法を述べる。接続性とは道路網に備わっているネットワーク機能の1つであり、リダンダンシーに基づく「接続の強さ」とアクセシビリティに基づく「接続の質」の観点から評価できる。接続が強いとは、多くの経路が存在し少数のリンク途絶が生じても経路が残り、到達の可能性が大きいことを意味する。接続の質が高いとは、比較的短い所要時間で到達できる、あるいは到達後に得られるサービスの水準が高いことを意味する。

ただし、通常のネットワークのみで評価する場合は、平常時の機能を評価しているにすぎない。災害による一部の道路区間の不通によって、経路がなくなる、あるいは長大な迂回を余儀なくされる場合も起こりうる。このような状況に陥れる因子、すなわち重要なリンクを特定することや、深刻な影響の生じるノードをあらかじめ知っておくことは重要である。被災した状態で発揮されるパフォーマンスを平常時と比べることで接続性に関する弱点箇所を抽出することができる。よって脆弱性評価では、接続性評価指標の減少率に着目しネットワークの弱点となりうるノードとリンクを特定する。

(2) 評価の考え方

a) 接続の強さに基づく接続性評価の考え方

出発地と到着地の間に存在する経路数が多いほど、代替経路の確保が容易であるため、経路数を接続性の評価指標とする。ただし、一般的な方法で経路を数える場合には評価指標にはできないため、本稿で述べる方法で数える必要がある。この理由を図-1、図-2、図-3を用いて説明する。図-1のネットワークでAからBへの移動を考える。AB間には循環経路を除けば図-3に示すように6通りの経路がある。しかし、図-2に示した一部の区間が不通となると到達可能な経路が無くなりAとBの間は途絶する。異なる経路同士でリンクが共有されたためである。経路数を指標とする場合は、リンクを共有しない経路（以降、非重複経路と記述する）を数える必要がある。

言い換えるならば、 k 本の非重複経路が存在するならば $k-1$ 本の途絶に対して必ず1本残ることを保証でき、到達の可能性を評価することができる。この考え方は通信ネットワークの分野で主要な考え方 **k-edge connectivity** の概念⁹⁾に基づいている。ただし、この考え方は経路数のみを示しており、図-3の経路6パターンのうち、どの経路を指して非重複経路と表現しているのかを明示的に表わすことができない。このためKurauchiら⁹⁾によって提案された最適化問題を解き、非重複経路構成するリンク群を一意に求める方法を提案している。

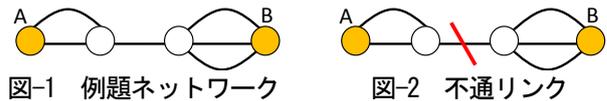


図-1 例題ネットワーク

図-2 不通リンク

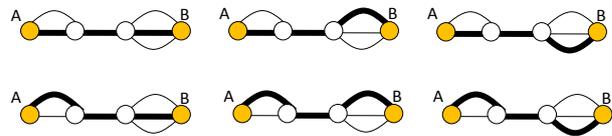


図-3 AB間の経路6パターン

b) 接続の質に基づく接続性評価の考え方

経路数だけでは、妥当な評価が難しい。たとえば、救急医療を考えてみると、施設によっては処置できない重傷もあり、到着地の規模や魅力を何らかの指標によって考慮すべきである。この問題に対し、D'Esteら³⁾は、Hansen⁸⁾のアクセシビリティ指標を用いた脆弱性分析を行っている。Hansenの指標は、ある都市から全都市の近接性を、都市の魅力度の大きさと都市間の移動時間を用いて表わしている^{9) 10)}。所要時間だけでなく到着地の機会を併せて評価できる指標であるため、接続の質を評価する指標として適していると考えられる。本研究でもHansenのアクセシビリティ指標を導入することとした。

c) 脆弱性評価の考え方

脆弱性評価の特徴は、被災確率には重きを置かず、影響度の大きさに基づく評価を行うことにある。このため、同様の考え方を示しているTaylorらの定義を援用する。ネットワークの弱点には「脆弱なノード」と「クリティカルリンク」がある。脆弱なノードとは、少数のリンク途絶により、アクセシビリティが著しく減少するノードを指す。クリティカルリンクとは、当該リンクの途絶によって、ネットワークまたは特定ノードのアクセシビリティが著しく減少させるリンクを指す。

(3) 定式化

a) 接続の強さ—非重複経路本数の算出方法の定式化

道路ネットワークを $G(A, I)$ の有向グラフとして表す。ただし、 A はリンク集合、 I はノード集合である。また、 x_e をbinary型の決定変数とし、あるリンクが非重複経路に含まれていれば1そうでなければ0とする。ODペア ij 間に存在する非重複経路の数を n_{ij} とすると次の3つの条件を満たしている。非重複経路を構成するリンク集合のうち、出発ノード i に接続している流出方向のリンク数と到着ノード j に接続している流入方向のリンク数はどちらも非重複経路数 n_{ij} に等しい。非重複経路を構成するリンク集合のうち、途中のノード e ($e \in I, e \neq i, j$)に接続する流入方向のリンク数と流出方向のリンク数は等しい（フローの保存）。出発ノード i へ流入するリンクと到着ノード

ドjから流出するリンクは経路を構成するリンク集合には含まれない。これら3つの条件を満たす、非重複経路の最大数を求めるため、以下の最適化問題を解く。

=P1=

$$\max_x n_{ij} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{a \in \text{out}(i)} x_a = n_{ij}, \quad \sum_{a \in \text{out}(j)} x_a = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{a \in \text{in}(i)} x_a = 0, \quad \sum_{a \in \text{in}(j)} x_a = n_{ij} \quad (3)$$

$$\sum_{a \in \text{in}(e)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(e)} x_a = 0 \quad (4)$$

$$x_a = \{0, 1\}, \quad e \in I, \quad e \neq i, j \quad (5)$$

ここで、 n_{ij} はODペア ij 間の非重複経路の本数、 $\text{out}(e)$ はノード e からの流入リンク集合、 $\text{in}(e)$ はノード e への流入リンク集合である。この問題は制御変数が 0-1 変数である線形計画問題であり、与えたネットワークの任意のODペアについて n_{ij} が一意に求まる。しかし、一般に制約条件のノード数より制御変数であるリンク数の方が多いため、 n_{ij} を満たす x_a の集合は不定である。そのためP1で非重複経路数 n_{ij} を求めた後、以下の補助問題 P2により、与件の n_{ij} を満たす x_a の集合のうち、総所要時間が最小となる経路を求めることとした。

=P2=

$$\min_x \sum_{a \in A} t_a x_a \quad (6)$$

subject to

$$\sum_{a \in \text{out}(i)} x_a = n_{ij}, \quad \sum_{a \in \text{out}(j)} x_a = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{a \in \text{in}(i)} x_a = 0, \quad \sum_{a \in \text{in}(j)} x_a = n_{ij} \quad (8)$$

$$\sum_{a \in \text{in}(e)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(e)} x_a = 0 \quad (9)$$

$$x_a = \{0, 1\}, \quad e \in I, \quad e \neq i, j \quad (10)$$

ここで、 t_a はリンク a の自由走行時の所要時間である。

この問題では、説明変数 x がリンクに基づいているため、各々の経路コストを明示的に求めることは困難である。そこで、得られた全ての経路の所要時間の和を n_{ij} で除算することにより、利用可能な非重複経路の平均所要時間を求めることとした(式11)。これにより非重複経路の平均所要時間が許容時間 α (分)を超えないような非重複経路の組み合わせを求めることができる。 α の値により、移動の緊急度を考慮できる。

$$\sum_{a \in A} t_a x_a / n_{ij} \leq \alpha \quad (11)$$

b) 接続の質—アクセシビリティの算出方法の定式化

Hansenのアクセシビリティ指標(式12)を導入する。

$$AI_i = \sum_{j=1}^m D_j f(c_{ij}) \quad (12)$$

ここで、 m はネットワーク内の施設のあるノードの総数、 D_j は到着ノード j で享受可能なサービスの魅力度、 c_{ij} はノード i からノード j までの移動コストである。交通抵抗関数 $f(c_{ij})$ はノード間の移動のしやすさを表しており、一般に移動コスト c_{ij} に対する単調減少関数として表される。 c_{ij} が小さいほど $f(c_{ij})$ は大きな値をとり、到着地で得られるサービス D_j をより多く享受できる。本研究では、移動目的の緊急度に合わせて、許容時間の重みを変更可能な交通抵抗関数(13)を用いて評価を行うこととした。

$$f(c_{ij}) = (1 + \exp(\beta c_{ij} - \theta))^{-1} \quad (13)$$

ここで、 β は関数の変化率を調整するパラメータ、 θ は関数の最大値を1に近づけるシフトパラメータである。

多重経路を考慮した評価を行う場合には、ノード ij 間のアクセシビリティは最短経路のコストだけでは不十分と考えられる。最短経路以外の経路が相当な迂回を強いられる場合、最短経路がどれだけ近かったとしても、許容時間内に到達できない危険にさらされている可能性があるといえる。このため複数存在する非重複経路の平均時間を求めることで非重複経路の本数を考慮する。また、アクセシビリティを比較する場合には、同じ非重複経路本数の場合で比較する必要がある。この理由は、非重複経路本数が少ないほど、平均所要時間が小さくなるためである。本研究の経路数え上げモデルでは、最短のリンク集合を求めるため、長大な経路は省かれる。例えば、非重複経路2本と3本のODペアでは、経路2本のアクセシビリティが高くなってしまう場合がある。このため、非重複経路本数が同じ場合のアクセシビリティを比較することとした。

任意のノードにおけるアクセシビリティ指標の算出モデルを最適化問題として記述する。本研究におけるアクセシビリティ指標は、到着地の魅力度を表わす項 D_j が定数であるため、アクセシビリティの最大値を求める問題は移動コストの最小化問題と等価であり、P2とよく似た問題として記述可能である。次に示すP3は、非重複経路 n 本を与件とした場合の非重複経路の総所要時間の最小化問題である。P3を用いて、所要時間を求めた後、ODペアごとにアクセシビリティ指標を算出する。

=P3=

$$\min T_{ijn} \quad (14)$$

subject to

$$T_{ijn} = \mathbf{t} \times \mathbf{y}_{ijn} \quad (15)$$

$$\mathbf{y}_{ijn} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_l) \quad (16)$$

subject to

$$\sum_{a \in \text{out}(i)} y_a = N, \quad \sum_{a \in \text{out}(j)} y_a = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{a \in \text{in}(i)} y_a = 0, \quad \sum_{a \in \text{in}(j)} y_a = N \quad (18)$$

$$\sum_{a \in \text{in}(e)} y_a - \sum_{a \in \text{out}(e)} y_a = 0 \quad (19)$$

$$y_a = \{0, 1\}, \quad e \in V, \quad e \neq i, j \quad (20)$$

ここで、 n はノード ij 間の非重複経路の本数、 N は全 OD ペアで与件とする非重複経路本数、 T_{ijn} は N 本の非重複経路が存在するときの総所要時間、 \mathbf{t} はリンク所要時間ベクトル、 \mathbf{y}_{ijn} は非重複経路が n 本存在するときの ij 間の経路構成集合を示すベクトル、 l はネットワークに存在するリンクの総数、 y_a はリンク a が非重複経路を構成するリンクであれば 1、そうでなければ 0 をとる決定変数である。アクセシビリティ指標の算出に用いる移動コスト c_{ijn} は非重複経路 N 本の平均所要時間とし、非重複経路の総所要時間 T_{ijn} を用いて次のように計算する。

$$c_{ijn} = T_{ijn} / N \quad (21)$$

全 OD ペアで与件とする M は、リダンダンシーの制約条件を意味している。OD ペアごとに存在する非重複経路本数を求め、非重複経路が N 本より少ない場合、最低限確保すべきリダンダンシーを満たさないとし、所要時間を無限大 (∞) とする。この結果アクセシビリティは 0 になる。また、非重複経路が N 本より多い、あるいは等しい場合、存在する非重複経路 n 本のうち、所要時間の短い順から N 本抽出したときの総走行時間 T_{ijn} を求めることになる。

(4) 計算アルゴリズム

a) 接続の強さ—非重複経路本数の算出方法

Kurauchi ら⁶⁾ が提案したアルゴリズムを用いて最適化問題を解く。このアルゴリズムの特徴は、まずはじめに OD ペア間の最大の非重複経路本数を求め、許容時間の制約を満たすまで、求めた非重複経路本数を減らしていくことにある。本数を減らすことにより長大な経路が省かれ平均所要時間が減少し、平均時間が許容時間内に収まる最大の非重複経路数を求めることができる。これにより、長大な経路を省いた状態での評価が可能となる。

この手順を図-4に示す。ノードリンク接続行列によりネットワーク形状を与えて P1 を解き、OD ペア間に存在する最大の非重複経路数を求める [1]。この時点では、許容時間を考慮していない。その後 P2 を解き、許容時間の制約である (式 11) を満たすまで、求めた非重複経路本数を減らしていく [2]。この [1][2] の手順により平常時の

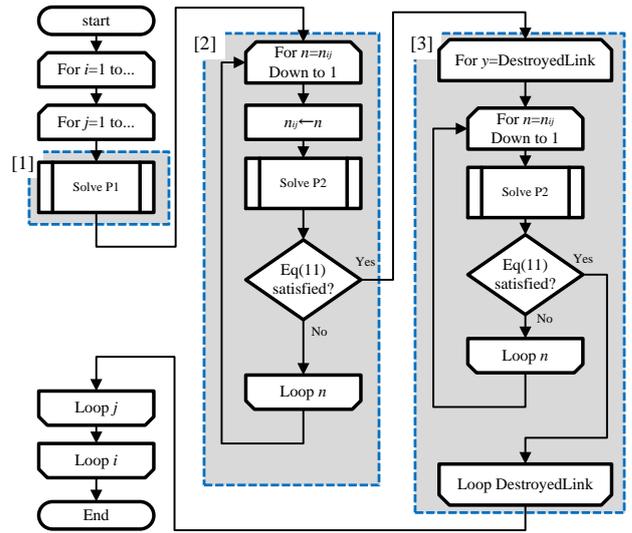


図-4 非重複経路本数の算出方法

値を得る。続いて、経路に選ばれた経路を1つずつ途絶させた状態で P2 を解く [3]。この結果求められた経路には迂回路が含まれている。迂回路を含んだ非重複経路の平均時間が許容時間の制約を満たさなければ経路を減らして新たな経路集合を求めることになる。このとき平常時に比べ OD ペア間の経路が減少したことになる。この [3] の手順は脆弱性評価のためのルーチンである。これらを設定した OD ペア ij 全てに対して行う。

b) 接続の質—アクセシビリティの算出方法

アクセシビリティは所要時間を用いて算出できるため、本項では所要時間の算出方法を示す。Kurauchi ら⁶⁾ が提案したアルゴリズムを変更して、非重複経路数 N を与件とした上で、非重複経路 N 本の最短の総所要時間を計算する。前項の方法と同様にして、ノードリンク接続行列によりネットワーク形状を与え、二値整数線形計画問題として最適化問題を解く。このアルゴリズムは以下の3つの特徴を持っている。あらかじめ決めた非重複経路本数の最大数 N を決めると、 $N, N-1, \dots, 1$ までのそれぞれの計算結果が得られる。これは分析する際に比較がしやすく弱点箇所の特定に有益である。また、与件の N より少ない場合に所要時間無限大 ($T=\infty$) を与える。これにより交通抵抗に使用している指数関数の特性上、アクセシビリティの値は 0 となり、計算後に手作業で場合分けをする必要がない。また、長大な OD ペア間の計算を省くことで計算を高速化している。

この計算手順を図-5に示す。まず始めにダイクストラ法を用いて最短経路の所要時間 d_{ij} を計算する。ダイクストラ法は最短経路の所要時間を求める最も効率的な方法とされている。もし、 d_{ij} が許容時間 α を上回るならば、その OD ペアを計算せず、次の OD ペアの計算に移る [1]。これにより、長大な OD ペア間の計算を省くことができる。その後、前項と同様に OD ペア間に存在しうる最大

の非重複経路数をP1により求める[2]。これは、与件の非重複経路本数 N を満たすかどうかの判定に使われる[3]。もし与件の N よりも、存在する非重複経路が少ないならば、所要時間が無限大として出力され、存在する非重複経路本数 n と等しくなるまで与件の N を減らすことになる。存在する非重複経路が N と等しい場合には、P3を計算し N 本の非重複経路の総所要時間を求める[4]。以上により平常時の値が得られる。続いて、経路に選ばれた経路を構成するリンクを1つずつ途絶させた状態でP1を解き、経路減少が起きていないかどうかを判定する[5]。経路減少が起きる場合は、解が求められないため、所要時間を無限大として次の計算[3]に移行する。経路減少が起こらない場合はP3を解き、リンク途絶時における、 N 本の非重複経路の総所要時間を求める。これらを設定したODペア ij 全てに対して行う。

(5) 評価指標

a) 接続強度(NC)

ODペアごとに求めた非重複経路を出発ノード i について総和を計算する。ここで、 $NC_{ia}(\alpha)$ はリンク a 途絶時に所要時間 α 分を閾値とした場合のノード i の接続の強さ、 n_{ija} はリンク a 途絶時に α 分以内に到達可能な ij 間の非重複経路本数 (P1の目的関数) である。なお $\alpha=0$ の場合は平常時の値を意味する。

$$NC_{ia}(\alpha) = \sum_j n_{ija}(\alpha) \quad (22)$$

b) アクセシビリティ指標 (AI)

ODペアごとに求めたアクセシビリティを出発地 i に関して総和を計算することで、ノード i の評価値を得る。比較を容易にするため、到着地の特性値の総和で除算することで $[0,1]$ に収まるよう基準化する。式(23)が最大値1をとる場合は、交通抵抗による低減が起これないとき、すなわち対象ネットワーク内の全施設が出発ノード i に存在する場合である。

$$AI_{in} = \sum_j D_j f(c_{ij}) / \sum_j D_j \quad (23)$$

c) ノードの脆弱性評価指標 (RA)

ノードの脆弱性では事態の深刻さを把握するため、アクセシビリティの減少率の最悪値を用いて評価する。ただし、 RA_{ia} はリンク a 途絶時のノード i のアクセシビリティ減少率、 AI_{ia} はリンク a 途絶時のアクセシビリティである。 $\alpha=0$ ならば平常時の値を意味する。

$$RA_{ian} = (AI_{i0n} - AI_{ian}) / AI_{i0n} \quad (24)$$

d) クリティカルリンク判別指標 (CRA)

ネットワーク内の重要なリンクは、最も多くのノードに大幅なアクセシビリティ低下を及ぼすリンクとする。ある閾値 λ を超えるようなアクセシビリティ減少率をもたらすノードの個数を数えることで評価する。ここで ε_{ia}

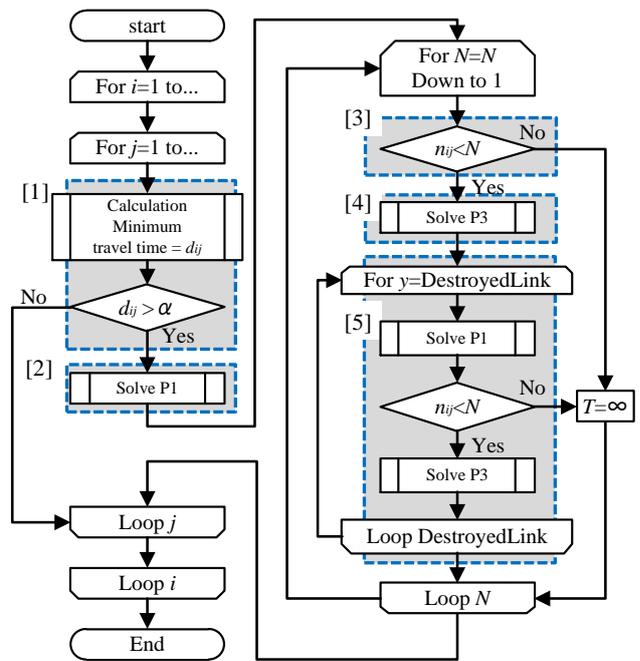


図-5 総所要時間の算出方法

はノード i の脆弱性評価指標 RA が閾値 λ より大きい場合に1、そうでない場合に0をとるダミー変数である。

$$CRA_{an}(\lambda) = \sum_i \varepsilon_{ia}(\lambda) \quad (25)$$

(6) ノードの接続脆弱性評価の方法

本稿で提案する方法では、接続性評価と脆弱性評価は別プロセスで評価されるため、接続性と脆弱性の関係を整理するために総合評価を行うこととした。表-1では最もよい評価がAであり、最も悪い評価がFとなっている。平常時に接続性の高いノード (ABC) と接続性の低いノード (DE) と経路が存在しないノード (F) の3種類がある。また、最悪の場合に経路が無くなるノード (C)、脆弱性の高いノード (BE)、脆弱性の低いノード (AD) の3種類が存在している。総合評価において、B以下は対策を要すると判断できる。ただし、B、C、Dでは、接続性評価指標の大小によっては必ずしも $B > C > D$ という関係が成立するとは限らないため、本稿で提案する方法だけでは、優先順位の決定は難しい。得られた結果を理解するために、総合評価を行うこととする。

評価指標を算出後、図-6に示すようにノードを分類する。平常時のアクセシビリティが閾値 s より大きいならば、平常時の評価が高いノードといえる[1]。本稿では全ノードのアクセシビリティに格差が大きいことから中央値を閾値 s として分類する。次に非常時のアクセシビリティが0の場合は最も評価の悪いノードといえる[2]。続いて、脆弱性評価の値に着目する。平常時の評価も悪く、脆弱性も高い場合は、Eとなる[3]。平常時からアクセスが悪いが深刻な機能低下が起これないノードDも判別される。続いて、平常時の評価が高いノードに着目す

る。あるリンクの不通によって、アクセシビリティが全てなくなってしまう場合は、脆弱性が高くCに分類される[4]。次にアクセシビリティ減少率に着目することで、対策をしなくてよいノードAと対策の必要なノードBを判別できる[5]。これにより見つかったB, C, D, E, Fは、何等かの対策が必要とわかる。

3. 岐阜県ネットワークでの試算

(1) ケーススタディ概要

本稿で提案する方法を岐阜県の道路ネットワークに適用した。図-7は道路交通センサスの2005年データに基づいており、リンク数12094本、ノード数4017個からなる道路網である。岐阜県と隣接する県（愛知、三重、長野、富山、石川、福井、滋賀）の一部を含んでいる。

災害直後に重傷患者を大規模病院へ搬送する場合を想定し、163の県内全セントロイドと表-2に示した12の医療施設とのアクセシビリティを試算した結果を報告する。

岐阜県の医療救護計画¹¹⁾では災害拠点病院に指定されている11の医療施設に加えて、災害拠点病院化を目指している下呂温泉病院を加えている。医療のサービス機会は病床数で表現することとし、2010年10月の値を使用した。なお、出発地に施設がある場合、ODが同一ノードとなるケースがある。このときは距離による魅力度の減衰が生じないと考え、 $f(c_{ij})$ の値を1とした。本ケーススタディにおける許容時間の目安として30分と60分の2ケースを考える。アクセシビリティ指標のパラメータは、カーラーの救命曲線を参考にした。本稿で提案したアクセシビリティ指標は、所要時間が t 分である場合に平常時の半分の値として計算されるように調整が可能である。これにより許容時間を考慮することができる。このときの t を「アクセシビリティ半減時間」（以降HTと表記する）と呼ぶこととする。HTが30分と60分の場合のパラメータはそれぞれ、 $(\beta=0.230, \theta=6.91)$ 、 $(\beta=0.115, \theta=6.91)$ を用いた。与件とする非重複経路(M)は1本と2本の場合（以降、 $N=1$ と $N=2$ と表記する）を考え、非重複経路を複数考慮することの意義を確かめる。

(2) 接続性評価

図-8では、横軸に示したノードの接続性AIを確保しているノードの累積比率を示したものである。左上にプロットされるほど、より高いAI値のノードの比率が高いといえ、評価が高くなる。当然であるが、HTが30分と60分では60分の方が高い評価となっており、より許容される時間が長ければ、ノードのアクセシビリティ評価は相対的に高くなる。また、 $N=2$ の方が $N=1$ と比べて評価が低く、厳しい制約となっていることがわかる。これは、最短経路が途絶したことで迂回が生じているだけでなく、

表-1 接続脆弱性の総合評価

総合評価	接続性評価	脆弱性評価
A	○	○
B※	○	×
C※	○	経路なし
D※	×	○
E	×	×
F	経路なし	—

【凡例】○：良い ×：悪い —：計算できない
経路なし：存在経路が与件を満たさない。
※優先順位は必ずしもD>C>Bとはならない。

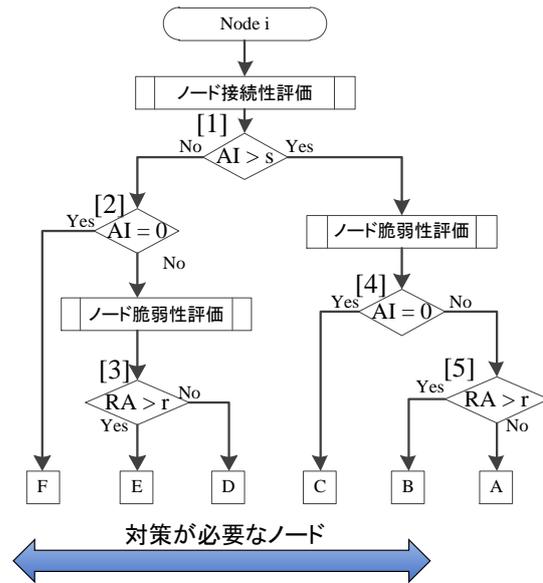


図-6 総所要時間の算出方法

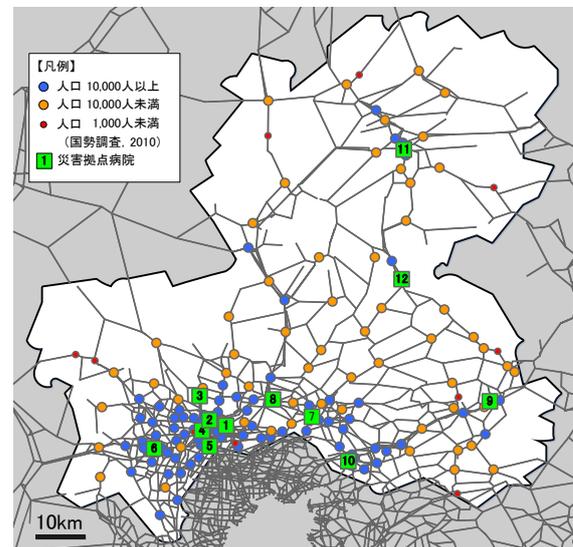


図-7 計算ネットワーク

表-2 医療施設名¹¹⁾と病床数

ID	施設名	床数	ID	施設名	床数
1	岐阜県総合医療C	590	7	木沢記念病院	452
2	岐阜赤十字病院	300	8	中濃厚生病院	383
3	岐阜大附属病院	606	9	中津川市民病院	360
4	岐阜市民病院	609	10	県立多治見病院	627
5	松波総合病院	432	11	高山赤十字病院	506
6	大垣市民病院	888	12	県立下呂温泉病院	230

与件の非重複経路本数を確保できなかったことでアクセシビリティが0となっていることも影響している。1本の経路なら存在しているものの2本は存在しないODペアが多く存在しているためである。

アクセシビリティは、アクセシビリティ半減時間の違いによるパラメータによる影響の方が非重複経路の本数の違いよりも影響が大きく、移動目的の許容時間に応じて適切なパラメータを選ぶ必要があることがわかる。

(3) 脆弱性評価

図-9では、アクセシビリティ減少率 (RA) に関するノードの累積分布をグラフとして示している。前項と同様、左上にプロットされるほど評価が高い。N=2とN=1では半減時間によらずN=2の方が評価は低く、非重複経路を複数確保する場合に評価が低くなるといえる。N=2の場合には、0.9から1までの区間における直線傾きが大きく、RAが0.9以上のノードが多く存在していることがわかる。この結果から、与件とする非重複経路本数Nの値によって、脆弱ノードの分布が異なるといえる。また、アクセシビリティ半減時間よりも非重複経路本数の方がRAに与える影響が大きいことがわかる。

(4) クリティカルリンクの特定

図-10は異なるNおよびHTの際のクリティカルリンクの位置を示している。HTとNの違いによって抽出されるクリティカルリンクが異なっている。N=1でHT=30のときは、許容時間内に到達可能な経路が絶たれることが大きく影響している。特に、東海北陸自動車道が不通となることで郡上地区の5つのノードのアクセシビリティが9割以上低下する。一方、N=1でHT=60のときのクリティカルリンクは東海北陸自動車道ではない。この理由は、許容時間が大きくなったことで、半減時間30分のときに深刻と評価された迂回が深刻ではなくなったことを意味している。クリティカルリンクが3本抽出されているが、それぞれ2つのノードのアクセシビリティを9割以上低下させる要因となるリンクである。

N=2の場合は、経路の多重性を重視した評価である。HT=30で抽出されたリンクは下呂の医療施設に接続するリンクである。2本しかないため、片方が不通となることで、下呂温泉病院へのアクセスは与件を満たさなくなる。このような評価結果は多重経路の存在を厳しく評価していると解釈できる。災害時には1本の不通だけでは限らない。2本以上不通となる可能性まで含めて、評価しているといえる。今回の計算のように1本の経路の途絶だけで、多重性を評価できるならば、すべての途絶パターンを計算する必要が無くなるため、計算時間の短縮につながる。一方、HT=60のとき、N=1、HT=30と同様に東海北陸自動車道がクリティカルになっている。この理由は、許容時間の制約が緩くなったことで、他の病院とのアクセスが評価され、下呂温泉病院へのアクセスが

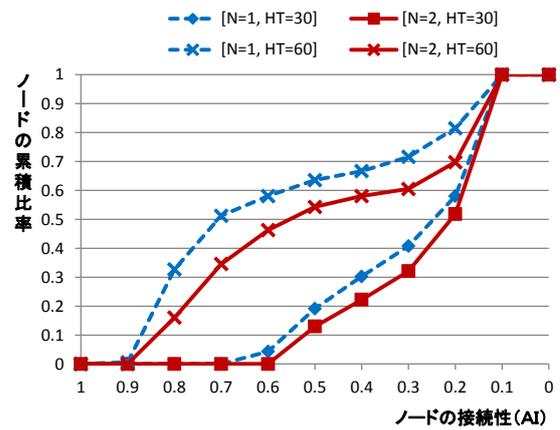


図-8 ノードの接続性評価

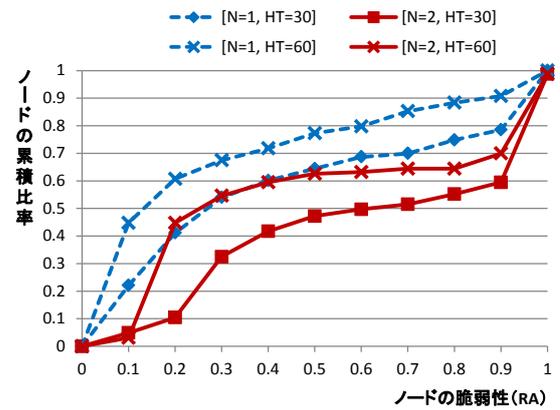


図-9 ノードの脆弱性評価

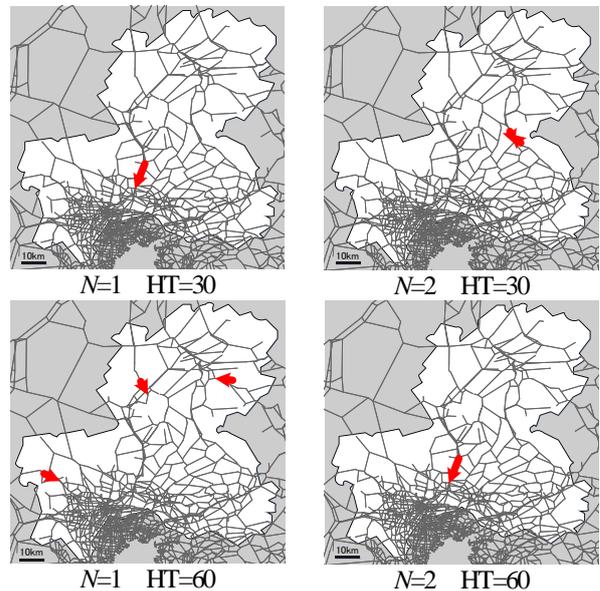


図-10 クリティカルリンクの位置

深刻ではなくなったことを意味している。図-10の結果から、アクセシビリティ半減時間を大きくすると、遠い医療施設の移動も評価に含まれることとなる。最短経路では発見できない潜在的な弱点箇所を抽出しており、多重性を考慮する場合は非重複経路2本を考慮することに意味があるだろう。

(5) 脆弱ノードの判別

図-11では総合評価がBと判定されたノード，すなわち平常時のアクセシビリティが高く，あるリンク不通時のアクセシビリティ減少率が50%以上（ $RA \geq 0.5$ ）の脆弱なノードの位置を示している．赤い点が $RA=1$ のノードであり，最悪の場合に1本のリンクの不通で経路減少が起き，アクセシビリティが完全になくなる．オレンジ色の点は減少率が50%~99%のノードを示しており，迂回によってアクセシビリティが減少するノード，もしくは経路減少が起きるものの自都市に医療施設があるノードを示している．これらのノードは，完全にアクセシビリティがなくなるわけではないため区別した．HTが大きいほど，許容時間が長いため，脆弱ノードも少なくなる．また与件とする非重複経路の本数 N によって，弱点として抽出されるノードに違いがある． $N=1$ の場合は，経路減少が起こりにくいため，赤色の点はほとんどないが $N=2$ の場合は赤い点が多くなっている．この結果は，最短経路の分析のみでは潜在的に脆弱なノードを抽出しきれず，リダンダンシーを確保するために，非重複経路を複数確保すべきノードを示しているといえる．

(6) 接続脆弱性評価

図-12では接続脆弱性の総合評価の結果を示している．総合評価がBのノードは平常時にアクセシビリティが相対的に高い一方で，あるリンク1本の不通によって，アクセシビリティが半分以上失われるノードである．また，D，Eは平常時から接続性が相対的に高くないノードを示している．このうちEのノードは，リンクの不通によって，アクセシビリティの半分以上が失われてしまうノードであり，平常時から評価が低いにも関わらず，非常時にはわずかなアクセシビリティも無くなってしまう．対象ネットワークの接続性がよくないといえる．与件とする非重複経路の本数とアクセシビリティ半減時間の違いによる差はみられないが，HT=30の場合における $N=2$ と $N=1$ を比較すると差がみられる． $N=2$ の場合は，Dのノードが少なく，Fのノードが多くなっている．これは，非重複経路を複数とすることで，多くのノードの評価が悪くなったことを意味している． $N=2$ のときはリダンダンシーのないノードを分類できる．

4. 経済価値の計量化方法の検討

前章までに，接続性評価とその脆弱性評価方法について述べた．本章では，本稿の考え方に即した経済評価方法を検討するために，論点を整理する．

本稿で示した評価手法では，最悪の場合を想定し影響の大きな事象に着目するため，対策コストも場合によっては巨額となる可能性がある．現実の問題として扱うためには，具体的な施策を明示し，予算制約を考慮した上で，

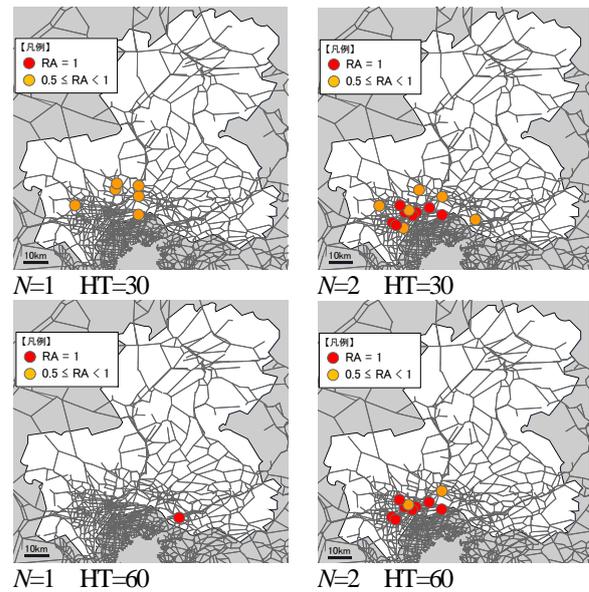


図-11 脆弱ノード [B] の位置

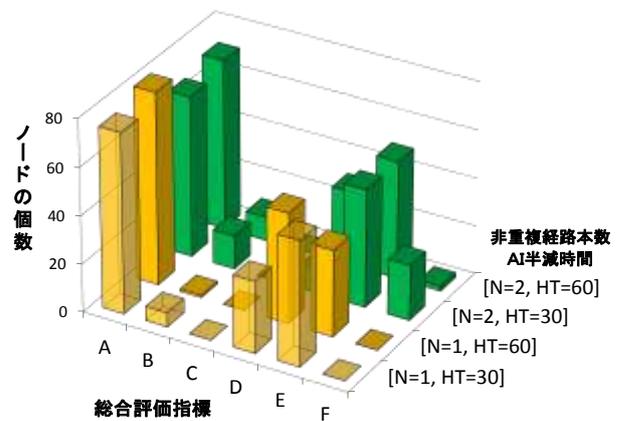


図-12 総合評価結果

投資効率の観点から対策箇所の組み合わせを決める必要がある．また，防災に費用を投じる背景には，何らかの効果に対する価値を見出していると考えられる．この価値を理論的基盤に基づいて計量する必要がある．

(1) 防災投資の経済評価に関する既往研究

不確実性下の便益評価における理論的基盤については上田¹²⁾，多々納¹³⁾，小林ら¹⁴⁾が詳細に検討している．不確実性下における理論的に正確な便益評価は，等価オプション価格あるいは等価オプション価格に基づくオプション価値によって評価が可能である¹⁵⁾．等価オプション価格は，防災投資の実施前後における効用の期待値が等しくなる事前の支払意思額として一意に求められる．

一方，オプション価値とは，オプション価格から期待消費者余剰を差し引いた額として定義される．ここで用いる期待消費者余剰は期待被害軽減額のことであり，支払意思額から防災投資によって得られる期待値を差し引くことを意味する．これにより消費者余剰の変分の期待値が算出できる．ただし，オプション価格やオプション

価値を求める場合には、各状態の生起確率が設定されている必要がある。

(2) 本研究における経済評価の方向性

脆弱性概念の特徴は、被災確率の大きさに左右されず、事態の深刻さに基づいて議論ができる点である。従来のリスクの期待値に基づく評価の限界を鑑みて提案された経緯がある。このため、状態の生起確率を設定することは本研究で扱う脆弱性の考え方とは整合的ではない。よって、接続脆弱性の考え方だけで便益を計量することは難しい。そこで、以下で示す2つの考え方があるだろう。

a) 確率を用いるが、確率以外の指標に重きを置く

確率を扱う考え方、すなわち信頼性の考え方を取り入れ、脆弱性と信頼性の両面から評価することにより、便益評価が可能と考えられる。もし2つの観点から同時に評価できるならば、起こりやすさの議論だけにとどまらず、重大な被害をもたらす事象にも考慮した便益評価が可能となる。数あるネットワーク信頼性の中でも連結信頼性はリンクの被災確率を扱う考え方であり、オプション価値を計算できる可能性がある。

b) 確率は使用しない

あくまで脆弱性の観点にこだわり、費用と脆弱性の軽減効果に関連づける。便益評価は行わず、予算制約を考慮した優先順位付けの方法を構築することになる。ある予算制約のもとリダンダンシーの地域格差を最小化するように最適化問題を構築すれば可能となる。これは最も効率的な整備レベルの質（重厚な策を講じるか、安易な策を講じるか）の組み合わせを求めるアプローチとなる。

以上、a)とb)2つの考え方を述べたが、まだ構想段階にあり具体性を欠く。今後、考究していきたいと考えている。

(3) 活用可能な評価指標

本稿で提案した評価指標には、ノードに着目する指標（NC, AI, RA）とリンクに着目する指標（CRA）がある。これらのうち、評価の目的によって活用すべき指標が異なる。ノードに着目する指標は、道路整備や拠点整備の整備効果を計算する際に活用できる。整備による評価指標の改善度合いに着目することで整備効果を計算できる。一方、リンクに着目する指標は、斜面の落石対策や橋梁の耐震補強等のリンクの耐災性を向上させるような整備を検討する際に活用できる。ネットワークにおける重要度を判定することで、防災性能を高める意義があるかどうかを確認できる。

5. おわりに

本研究では、拡張した接続脆弱性の評価方法を述べ、実ネットワークに適用し、モデルの挙動を確かめた。感

度分析を行い、非重複経路の本数とアクセシビリティ半減時間それぞれで評価が異なり、パラメータに十分配慮して評価を行う必要があることを述べた。評価方法の改良は必要であるが、実用化に向けて対策費用と効果の関連付けは必須と考えられる。確率を扱わない特色を活かすために、脆弱性概念の中では便益を計量化しないこと、信頼性の概念を用いてオプション価値の計量化を検討すること、接続脆弱性と連結信頼性の両面から評価を行う方向性があることを考察した。今後は具体的に検討したいと考えている。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)「脆弱性の概念によるロバストな道路ネットワークデザイン手法の開発とその実用性検証」（課題番号：23360221，期間：平成23～25年，研究代表者：倉内文孝）として実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡田憲夫, 若林拓史, 多々納裕一: 社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ, 土木学会論文集, No.464/IV-19, pp.33-42, 1993
- 2) 倉内文孝, 宇野伸宏, 嶋本寛, 山崎浩気: 交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向, 土木計画学研究・論文集, Vol.35, 2007
- 3) Taylor, M., Sekhar, S. and D'Este, G.: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks, Network and Spatial Economics, Vol.6, No.3-4, pp.267-291, 2006
- 4) Bell M.G.H. A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks, Transportation Research B, 34, pp.533-545, 2000
- 5) Kurauchi, F., Sumalee, A., Tamura, H. and Uno, N., Bi-level Programming Problem for Analysing Capacity Vulnerability in a Transportation Network under Limited Damage, the Third INSTR, 2007
- 6) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y. Network Evaluation Based on Connectivity Vulnerability, Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, pp.637-649, 2009.
- 7) 倉内文孝, 宇野伸宏, 夏皓清, 葉光毅: 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 Vol.42, 2010
- 8) W.G.Hansen, How Accessibility Shapes Land Use, Journal of the American Institute of Planners Association, 25:2, pp.73-76, 1959
- 9) RIVM, Accessibility measures: review and application, RIVM report 408505006, 2001
- 10) 加知範康, 岑貴志, 加藤博和, 大島茂, 林良嗣: ポテンシャル型アクセシビリティに基づく交通利便性評価指標群とその地方都市への適用, 土木計画学研究・論文集 No.23, no.3, pp.675-686, 2006

- 11) 岐阜県：岐阜県地震災害等医療救護計画，2011
- 12) 上田孝行：防災投資の便益評価－不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて－，土木計画学研究・論文集，Vol.14，pp.17-34，1997
- 13) 多々納裕一：不確実性下のプロジェクト評価：課題と展望，土木計画学研究・論文集，Vol.15，pp.19-30，1998
- 14) 小林潔司，横松宗太：災害リスクマネジメントと経済評価，土木計画学研究・論文集，Vol.19，pp.1-12，2002
- 15) 多々納裕一，高木朗義：防災の経済分析－リスクマネジメントの施策と評価，勁草書房，2005
(2012.5.7 提出)

Network Evaluation Based on Connectivity Vulnerability
Considering Potential Accessibility and its Application to Gifu's Road Network

Tsuyoshi HARADA, Fumitaka KURAUCHI and Akiyohi TAKAGI