

アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設計画モデル*

Road Network and Medical Facilities Planning Model Considering Accessibility and Connectivity*

近藤竜平**・塩見康博***・宇野伸宏****

By Ryuhei KONDO**・Yasuhiro SHIOMI***・Nobuhiro UNO****

1. はじめに

災害に対して脆弱な我が国では、仮に道路が途絶しても孤立地域が発生することなく、医療に代表される施設など種々の社会サービスを受容できるような道路・社会施設整備が重要となる。特に医療と道路網の關係に着目すると、近年では、道路特定財源の一般財源化の議論など、地方の道路整備には逆風が吹き、かつ、自治体財政の緊迫化、医師不足に伴い地方都市では公立病院の維持が困難となり統合・閉鎖が進んでいる。しかしながら、松坂ら¹⁾の指摘にあるように、災害直後の道路の寸断による移送手段の欠如、及び医療レベルの低下は多くの災害死を作り出す大きな要因となりうる。そのため、限られた予算制約の中でも、医療施設の維持、向上と都市間の連結性能を確保する道路整備の効果的な組み合わせを検討し、災害の発生に対しても頑健な道路ネットワークを形成することは緊要な課題であるといえる。

この課題を災害による道路の途絶リスクに対する道路ネットワークの頑健性評価の観点で捉えると、連結信頼性²⁾、冗長性³⁾、脆弱性⁴⁾といった道路ネットワークの評価指標がこれまでに提案されている。しかしながら、これらの研究は主にネットワークトポロジーと頑健性との關係が議論されているに留まっており、各地域において提供されている医療などの社会サービスとの関連性を扱う枠組みまでには拡張されていない。Taylor et al.⁵⁾は、アクセシビリティ指標に基づくネットワーク脆弱性評価手法を提案しているが、道路網・施設整備計画への拡張はなされていない。また、脆弱性によるネットワーク評価では複数のリンクが同時に途絶するような災害状況を想定することはできない。

一方、道路網と医療施設の整備という観点からもこれまでにいくつかの研究がなされている。例えば、加

* キーワード：交通網計画，施設計画，アクセシビリティ，連結信頼性，道路網

** 正会員，工修，首都高速道路株式会社

*** 正会員，工博，京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京大桂C-1-2-434，

TEL:075-383-3235，E-mail: shiomi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

**** 正会員，工博，京都大学経営管理大学院

賀屋ら⁶⁾は、交通サービスの改善や総合病院の施設配置案を、アクセシビリティの観点から評価する手法を提案している。喜多ら⁷⁾は、地域救急医療システムの改善を目的に、道路網整備と効率的な救急医療システムの整備計画を策定する方法論を提案している。南ら⁸⁾は拠点的な都市施設への輸送ルートの確保を目的とし、災害時などの異常時においても輸送機能低下の小さい道路整備計画法を立案している。また、佐々木ら⁹⁾は道路網の耐震化と医療施設の耐震化を総合的に比較して大規模地震直後の被災者搬送中の死亡リスクを最小化するような数値計画モデルを構築、実ネットワークに適用している。

しかしながら、災害による道路の途絶リスクを考慮した上で、医療施設などの都市機能へのアクセス性を評価した道路網・医療施設整備の方法論についての検討はなされていない。特に、地方部などの都市機能が相対的に乏しい地域では、周辺都市への結びつきを強固にし、確実に医療施設へアクセス可能であることが求められる。

そこで本研究では、地震などの自然災害に対しても、都市間連結性、及びアクセシビリティの維持を可能とする道路網・医療施設整備計画問題を構築する。具体的には、まず、道路（リンク）の途絶リスクと周辺都市（ノード）で享受可能なサービス機会数を考慮した新しい道路網評価指標を提案する。加えて、仮想ネットワークを対象とした数値実験に基づき、提案指標の特性を明らかにする。その上で、提案指標を目的関数とし、ある予算制約の下で新規道路、及び医療施設への最適な投資組み合わせを求める計画問題を構築する。さらに、構築した計画問題を京都府下の道路ネットワークへ適用し、その結果について考察する。

2. 道路網評価指標の構築

(1) 提案する評価指標の概要

道路ネットワークが災害に対して頑健であるためには、「任意の道路が途絶したとしても、出来る限り通常時と変わらず迅速かつ確実に医療などの公的サービスを受容可能であること」が求められる。この観点から道路ネットワークを捉えると、以下の4点が評価基準になると考えられる。

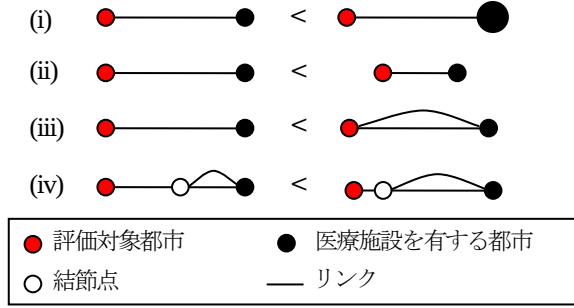


図-1 評価の基本概念図

- (i) サービス機会の多い都市に近接しているほど高評価。
- (ii) 都市間の経路長が短いほど高評価。
- (iii) 都市間の経路数が多いほど高評価。
- (iv) 都市間の経路の重複率が小さいほど高評価。

上述の評価概念を図-1に図示する。評価基準 (i), (ii) についてはポテンシャル型アクセシビリティ¹⁰⁾の概念が、(iii), (iv)については連結信頼性²⁾の概念による評価がこれまでに提案されている。

ポテンシャル型アクセシビリティ指標とは、ある都市におけるサービス機会への近接性を示す指標であり、周辺ノードで提供されているサービス機会数が交通抵抗によって低減されて評価される重力モデル型の構造を取っている。具体的には式(1)のように表される。

$$A_i = \sum_{j=1} D_j \cdot f(c_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 A_i : ノード i のポテンシャル型アクセシビリティ、 D_j : ノード j のサービス機会数、 c_{ij} : ノード ij 間の移動に関する交通抵抗値を表す。また、 $f(\cdot)$ はノード ij 間の近接性を表す関数であり、交通抵抗に関する単調減少関数である。

一方、連結信頼性とはリンクの途絶確率が与えられた上で、出発地から目的地まで途絶なく到達できる確率と定義される。すなわち、ポテンシャル型アクセシビリティ指標中の、交通抵抗項においてノード間の連結信頼性を反映させることにより、上述の(i)~(iv)の評価基準を満足する指標を構築することが可能となる。

そこで本研究では、災害による道路（リンク）の途絶リスクと都市（ノード）にて享受できるサービス機会の両方を明示的に考慮した道路ネットワークの新たな評価指標として、連結信頼性を考慮したポテンシャル型アクセシビリティ指標（Connective-Potential Accessibility Index : CPAI）を提案する。

(2) 評価指標の定式化

まず、1OD2 経路のネットワークを考え、各経路にはそれぞれ交通抵抗値 c_1, c_2 、及び信頼度 p_1, p_2 が与えられ

ているとする。ただし、信頼度とはある事象に対してリンクが途絶することなく、正常に機能する確率として定義される。

このとき、各経路の途絶リスクを考慮した上での OD 間の交通抵抗項 $f(c)$ の期待値 $E[f(c)]$ は式(2)として表される。

$$E[f(c)] = p_1(1-p_2)f(c_1) + (1-p_1)p_2f(c_2) + (1-p_1)(1-p_2)f(\infty) + p_1p_2f(\min(c_1, c_2)) \quad (2)$$

式(2)中、第1項は経路1のみ、第2項は経路2のみがOD間を接続している状況、そして第3項は両経路とも接続していない状況、第4項が両経路とも接続している状況を表している。ただし、両経路が接続している場合はOD間の交通抵抗値として最小抵抗値を用いている。また、交通抵抗を算出するに当たっては、被災後の状況を想定しているため交通需要による影響は考慮しないものとする。

上述の概念を一般化すると、任意のノード ij 間の交通抵抗項の期待値 R_{ij} はネットワークを構成するリンクの交通抵抗値、及びリンク信頼度を所与とすると、式(3)のように記述される。

$$R_{ij} = E[f(c_{ij})] = \sum_{a_{ij} \in 2^{A_{ij}}} P(a_{ij}) \cdot \left\{ f\left(\min_{k \in a_{ij}} c_{ij,k}\right) \right\} \quad (3)$$

ただし、

- A_{ij} : ノード ij 間の全経路集合
- $2^{A_{ij}}$: A_{ij} の部分集合を全て集めた集合
- a_{ij} : 集合 $2^{A_{ij}}$ を構成する要素
- $P(a_{ij})$: 経路集合 a_{ij} のみが機能する確率
- $c_{ij,k}$: ノード ij 間の経路 k の交通抵抗値（ただし、 ij 間途絶時は $c_{ij,k} = \infty$ 、 $i=j$ の時は $c_{ij,k} = 0$ とする）

このノード ij 間の交通抵抗の期待値 R_{ij} を式(1)の交通抵抗項に代入することで、ノード i についての連結信頼性を考慮したポテンシャル型アクセシビリティ指標 $CPAI_i$ を式(4)の様に定義する。

$$CPAI_i = \sum_j D_j \cdot R_{ij} \quad (4)$$

さらに、ネットワーク全体の評価指標として、ネットワーク内全ノードの $CPAI_i$ の総和 $TCPAI$ (Total Connective-Potential Accessibility Index) を式(5)にて定義する。

$$TCPAI = \sum_i CPAI_i \quad (5)$$

(3) リンク信頼度及び交通抵抗関数の定義

元来、リンク信頼度は想定する災害の規模、道路構造、道路の周辺環境によって定義されるべき変数である。しかしながら、そのすべての要因を考慮して厳密にリンク信頼度を算定するのは難しい。そこで、本研究ではリンクが長くなるほど途絶するリスクは高まると考える。すなわち、単位距離当りのリンク信頼度 r を所与とし、距離 l のリンクの信頼度 $p(l)$ を式(6)によって定義する。

$$p(l) = r^l \quad (6)$$

r は想定する災害強度、及び道路の耐震化構造の有無などの構造条件によって決定される変数である。 $r = 1.0$ を想定する場合、道路は途絶することなく接続する状況を意味するため、従来のポテンシャル型アクセシビリティ指標と同様に平時のアクセシビリティを評価するのと同じ。一方、 $r < 1.0$ とする場合は当該道路の途絶確率を考慮したアクセシビリティが評価されることとなり、 r に小さい値を想定するほど、災害によって道路が途絶しやすい状況を想定していることを意味する。

また、交通抵抗関数 $f(\cdot)$ は単調減少関数とし、式(7)にて与える。

$$f(c) = \exp[-\alpha \cdot c] \quad (7)$$

ここで、 α は距離に対する感度を表すパラメータである。この値が大きいくほど、単位距離当りの交通抵抗が大きく評価されることとなり、重傷患者の搬送など緊急を要する状況を想定する場合には大きく、そうでない状況では小さく設定するなど、想定する状況に応じて適切に設定する必要がある。

(4) CPAI値の近似解法

対象とするネットワーク規模が大きくなると、全経路集合を特定するのが困難となり、式(3)を厳密に計算するのは困難となる。連結信頼性の近似解法については、これまでも多くの手法が提案されているが、本研究ではその中でもCrude Sampling Monte Carlo法¹¹⁾を援用し、近似解法を算出する。

具体的には以下の手順により計算を行う。

Step1 統計的独立な $[0,1]$ の一樣乱数 $\hat{U}_{nj}$ ($n=1, \dots, N$, $j=1, \dots, m$)を $N \cdot m$ 個発生させ、 N 個のベクトル $\mathbf{x}^n = (x_1^n, \dots, x_m^n)$, $n=1, \dots, N$ を式(8)に従って生成する。

$$x_j^n = \begin{cases} 1 & (\text{if } \hat{U}_{nj} \leq p_j) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 m はネットワークを構成するリンク数を、 p_j はリンク j のリンク信頼度を表す。

Step2 式(9)に従い再構成したネットワーク M_n を生成する。

$$M_n = \{h \mid x_h^n = 1, h=1, \dots, m\}, n=1, \dots, N \quad (9)$$

Step3 それぞれのネットワーク M_n , $n=1, \dots, N$ に対して、任意のノードペア ij 間の最短経路長 $\hat{l}_{\min}^{ij,n}$, $n=1, \dots, N$ を得る。

Step4 式(10)により $CPAI_i$ の近似値を得る。

$$CPAI_i \approx N^{-1} \sum_{n=1}^N \sum_j D_j \cdot \exp[-\alpha \cdot \hat{l}_{\min}^{ij,n}] \quad (10)$$

すなわち、上述の手法では、各リンクに対して統計的独立な $[0,1]$ の乱数を発生させ、それとリンク信頼度の大きさを比較し、与えた乱数がリンク信頼度を上回る場合にそのリンクをネットワークから除去することで、各試行回におけるネットワークを再構成している。それぞれの再構成されたネットワークに対してポテンシャル型アクセシビリティ指標を算出し、全試行回数 N に対してその平均を取ることで、近似的に $CPAI$ 値が算出される。

3. 仮想ネットワークによる道路網評価指標特性の把握

本稿で提案した連結信頼性を考慮したポテンシャル型アクセシビリティ指標の特性を把握するため、仮想ネットワークを用いた数値実験を行い、ネットワーク形状と想定する災害強度、リンクの耐震化構造の有無、及び都市におけるサービス機会の偏在に対する提案指標の変動特性を把握する。

(1) 数値実験時の条件設定

仮想ネットワークは9つのノードで構成されるとし、格子状にリンクが配置されたネットワークを「(1) 基本ネットワーク」とし、それに対して中心のノードから放射状のリンクが整備された「(2) 放射ネットワーク」、環状のリンクが整備された「(3) 環状ネットワーク」、及び放射リンク・環状リンク共に整備された「(4) 放射環状ネットワーク」の4つの形状(図-2参照)を考慮する。ただし、各ノードに記載されている数字は各ノードを識別する番号を表す。

本分析では、ネットワーク形状による $CPAI$ 値、及び $TCPAI$ 値の差異に着眼点を置くため、放射リンク、及び環状リンクは基本ネットワークを構成するリンクに対して2倍の長さを持つとする。すなわち、いずれのネットワーク形状に対してもノード間の最短経路長は等しくなるように設定する。具体的には、格子を構成するリンクのリンク長を10、放射、及び環状リンクのリンク長を20とした。また距離に対する感度パラメータ α は0.05とす

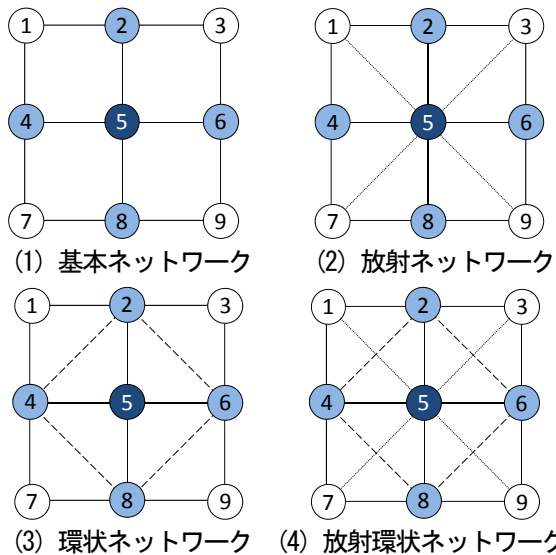


図-2 仮想ネットワーク概略図

る。また、初期設定として各ノードはそれぞれ等しく100のサービス機会を有するとし、Crude Sampling Monte Carlo法における繰り返し計算回数 N は1,000として計算を実行した。

(2) 災害強度に対する評価指標値の関係

本節では災害強度に対するTCPAI値の変動特性についてネットワーク形状毎に比較する。災害強度は、式(6)中の単位距離当りのリンク信頼度により表現可能である。ここでは、 $r=1.0, 0.99, 0.95, 0.90$ について各ネットワーク形状におけるTCPAI値を算出した。ただし、 $r=1.0$ とした場合、CPAI値は式(1)で表されるポテンシャル型アクセシビリティ指標に一致する。図-3に各計算結果を示す。

これより、リンク信頼度が低下するにつれてTCPAI値も低下する傾向にあることが分かる。また、リンク信頼度毎にネットワーク形状間でのTCPAI値の差異に着目すると、道路の途絶リスクを一切考慮しない $r=1.0$ のときにはネットワーク形状によらず同一の値を取っているのに対し、 $r=0.95$ のように途絶リスクを明示的に考慮した場合、基本ネットワークより放射、もしくは環状リンクを整備したネットワークの方が高いTCPAI値を示すことが読み取れる。すなわち、従来の道路の途絶リスクを考慮しないポテンシャル型アクセシビリティ指標では、最短経路長が不変であればネットワーク形状によらずその評価値は同一の値を取る。それに対し、本提案手法では、道路の途絶リスクを考慮することにより、放射リンク・環状リンクを整備することによるネットワーク頑健性が向上し、その効果が定量化され評価値の優劣に反映されていると言える。

これより、提案指標により、従来のアクセシビリティ指標では表現できなかった、経路が複数化されることによるネットワークの頑健性向上効果を的確に表現でき

ていることが分かる。

(3) 耐震化による評価指標値への影響

ここでは、道路ネットワーク中のリンクに耐震化構造を採用した場合の、TCPAI値に与える影響を把握する。各ネットワーク中の放射リンク、及び環状リンクを十分に耐震化された高規格道路と位置づけ、常に $r=0.999$ を維持すると仮定する。このときのネットワーク形状毎のTCPAI値を図-4に示す。

これより、耐震化したネットワークでは、単位距離当りの道路の途絶リスクが高まったとしても、耐震化していないネットワークとの比較でTCPAI値が高い値を維持していることが読み取れる。また、 $r=0.90$ 時に着目すると、基本ネットワークと放射・環状ネットワークとのTCPAI値の乖離が大きく、本指標を用いることで耐震化による道路ネットワークの頑健性向上効果を定量的に計測することが可能であると言える。

(4) ノード間でのCPAI値の比較

次に、より詳細に提案指標と道路ネットワーク形状の関係を把握するために、各ノードにおけるCPAI値をネットワーク形状毎に整理する。ただし、対象とする仮想ネットワークはいずれも対称形となっているため、全ノードを、ネットワークの角に位置するノード（ノード

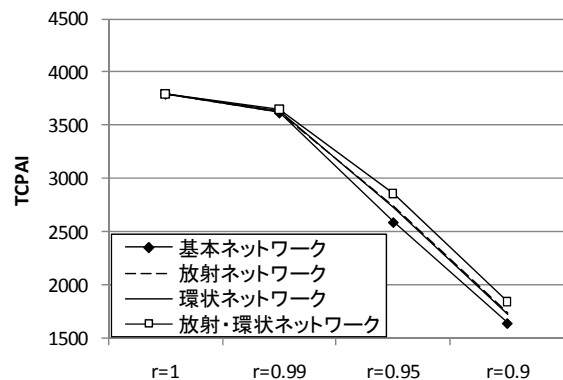


図-3 ネットワーク形状毎のTCPAI値

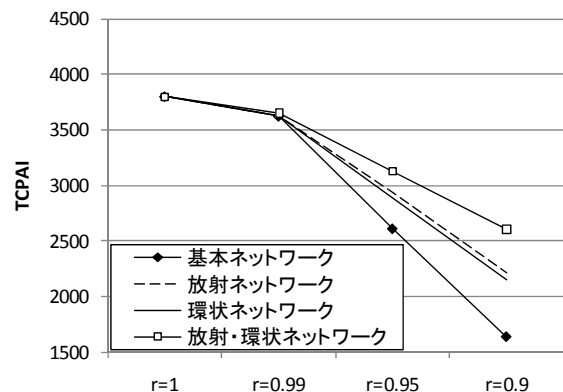


図-4 耐震化ネットワークのTCPAI値

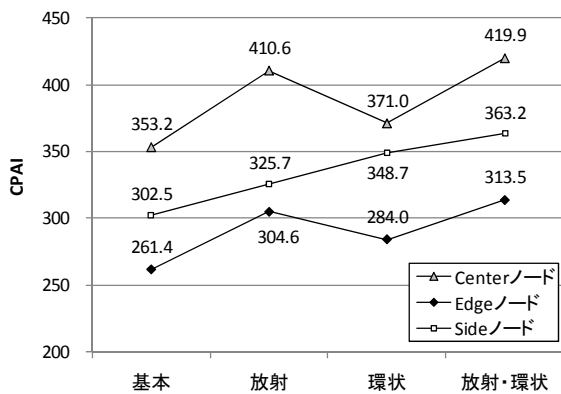


図-5 ノード毎のCPAI値のネットワーク形状間比較
(放射・環状リンクに耐震化構造を仮定)

1, 3, 7, 9, 以降, Edgeノードと称する), 外周リンクに位置するノード(ノード2, 4, 6, 8, 以降, Sideノードと称する), ネットワークの中心に位置するノード(ノード1, 以降, Centerノードと称する)に分類し, それぞれを代表とするノードのCPAI値に着目する. 図-5に対象ノード毎に, それぞれの道路ネットワーク形状におけるCPAI値を示す. ただし, $r = 0.95$ とし, 放射・環状リンクは耐震化されているとする. これより, いずれのネットワーク形状であってもCenterノードが最も高いCPAI値を取ることが確認できる. また, 放射ネットワークと環状ネットワークで比較をすると, CenterノードとEdgeノードに関しては放射ネットワークの方が高いCPAI値を示すのに対し, Sideノードでは環状ネットワークの方が高い評価値を得ている. これより, あるリンクがネットワークに追加された場合, そのリンクに直接接続するノードほど, リンク整備効果が高くなることが提案指標により示される.

(4) サービス機会の偏在に対する評価指標値への影響

これまでの分析では, サービス機会は各ノードに対して均等に100ずつ付与されている状況を想定している. 本節では, サービス機会がノード間で偏在している状況を想定し, 各ネットワーク形状によるTCPAI値, 及び各ノードのCPAI値の差異を確認する.

サービス機会の偏在パターンとしては, 均等に100ずつ配置された「Baseパターン」, Centerノードに集中的に配置された「Centerパターン」, Sideノードに集中的に配置された「Sideパターン」, 及びEdgeノードに集中的に配置された「Edge」パターンを想定する. ただし, 各パターンについても全ノードのサービス機会の合計は900とする. 具体的な各パターンにおけるノードのサービス機会数を表-1に整理する.

それぞれのサービス機会偏在パターンを所与とした時の, 各ネットワーク形状におけるそれぞれのノードの

CPAI値, 及びネットワーク全体のTCPAI値を表-2に整理する. ただし, $r = 0.95$ とした.

ここでは, TCPAI値を最大化するサービス機会パターン, ネットワーク形状の組み合わせに着目すると共に, 都市間の公平性の観点から, 各組み合わせ内での最小CPAI値を取るノードにも着目する. 表中, 薄い網がけをしたセルは, ネットワーク形状, 及びサービス機会パターンを所与とした時, Edge, Side, Centerノードの中での最小CPAI値を, 濃い網がけを施したセルはネットワーク形状を所与としたときに各サービス機会パターンにおける最小CPAI値の中での最大値を表している.

まず, 最大TCPAI値を与えるサービス機会偏在パターンに着目すると, いずれのネットワーク形状においても「Centerパターン」となっていることが読み取れる. すなわち, いずれのノードからもアクセスしやすく, 多くのリンクが接続しているネットワークの中心となるノードに集中的にサービス機会を配置することで, ネットワ

表-1 サービス機会の偏在パターン

ノード	ノード種別	サービス機会の偏在パターン			
		Base	Center	Side	Edge
1	Edge	100	0	0	180
2	Side	100	0	180	0
3	Edge	100	0	0	180
4	Side	100	0	180	0
5	Center	100	900	180	180
6	Side	100	0	180	0
7	Edge	100	0	0	180
8	Side	100	0	180	0
9	Edge	100	0	0	180
Sum		900	900	900	900

表-2 サービス機会パターン・ネットワーク形状毎のCPAI値・TCPAI値 ($r=0.95$)

サービス機会偏在パターン	ノード種別	ネットワーク形状			
		基本ネットワーク	放射ネットワーク	環状ネットワーク	放射環状ネットワーク
Base	Edge	261.4	304.6	284.0	313.5
	Side	302.5	325.7	348.7	363.2
	Center	353.2	410.6	371.0	419.9
	TCPAI	2609.9	2934.8	2883.3	3124.7
Center	Edge	202.5	310.5	212.1	313.0
	Side	360.9	392.6	381.6	402.5
	Center	900.0	900.0	900.0	900.0
	TCPAI	3162.7 *	3674.9 *	3306.6 *	3770.5 *
Side	Edge	218.5	270.1	241.7	291.2
	Side	365.2	382.5	419.4	424.1
	Center	465.4	494.0	491.3	502.5
	TCPAI	2810.5	3106.8	3161.1	3353.6
Edge	Edge	286.7	335.2	301.1	342.1
	Side	252.8	288.6	286.8	303.8
	Center	341.8	426.1	355.5	429.4
	TCPAI	2490.6	2915.4	2695.2	3015.2

ネットワーク形状・サービス機会パターンを所与とした時の最小CPAI値
 ネットワーク形状を所与とした時の最小CPAI値の最大値
 * ネットワーク形状を所与としたときの最大TCPAI値

ーク全体としてのアクセス性を最大限に向上させることができると考えられる。しかしながら、各ネットワーク形状における最小CPAI値の最大値を与えるサービス機会偏在パターンは、必ずしもCenterパターンになるとは限らないことが読み取れる。特に、基本ネットワーク、及び環状ネットワークにおいては、Centerパターン時に最大のTCPAI値を取るものの、ノード間の最小値については全サービス機会偏在パターン内で最も小さく、都市間でアクセシビリティの格差が大きいと言える。

すなわち、サービス機会の配置を考える際にはネットワーク形状の特性を考慮し、TCPAI値を向上させるとともに、都市間でのアクセシビリティの格差を小さくし、公平性が保たれるようなネットワーク整備計画および施設配置計画を講じることが重要であると考えられる。

4. 道路網・医療施設計画モデル

本章では、上述の評価指標を用いた道路網・医療施設計画モデルを構築する。

ここで、ある対象地域における道路ネットワークを考える。ネットワークは無向リンクとノードで構成されており、都市（セントロイド）を表すノード i には都市の人口、及び都市医療施設の情報を持つとする。本モデルはこのような既存の道路ネットワークに対し、種々の制約の下で、新規建設道路候補集合 V 、及び投資対象都市候補集合 U の中から、最も効果的な道路・都市の組み合わせを決定する。具体的には、式(11)～(14)のように記述される。

Max	目的関数	(11)
s.t.	予算制約	(12)
	都市規模制約	(13)
	都市間の公平性に関する制約	(14)

ただし、本モデルの決定変数は、投資対象リンク i に関する0-1変数ベクトル $\mathbf{x}=[x_j] (j \in V)$ と、投資対象都市 j に関する0-1変数ベクトル $\mathbf{y}=[y_k] (k \in U)$ とする。以下では、目的関数、各制約条件について詳述する。

(1) 目的関数

投資対象リンクベクトル $\mathbf{x}$ 、投資対象都市ベクトル $\mathbf{y}$ を所与とした場合の、都市 i におけるポテンシャル型アクセシビリティ指標を $CPAI_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ と定義する。その上でこの指標を対象ネットワーク内の全都市について足し合わせた以下の指標を目的関数とする。

$$TCPAI(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_i CPAI_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (15)$$

(2) 制約条件

a) 予算制約

新規建設道路、及び投資対象都市への投資額はそれぞれ所与であるとし、新規道路の予算と都市の予算の和が予め設定された予算制約 TC 以下に収まるよう投資計画を策定する。

$$TC \geq \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{c}_V + \mathbf{y}^T \cdot \mathbf{c}_U \quad (16)$$

$\mathbf{c}_V$: 新規道路建設に係る予算ベクトル

$\mathbf{c}_U$: 対象都市の医療施設向上に係る予算ベクトル

b) 都市規模制約

都市の医療施設を整備する場合、人口規模に見合わない過度な医療サービス水準にすると、それを維持するのが困難になることが予想される。言い換えると、その都市が平時において維持可能な程度の医療サービスの水準を設定し、それを超越しない範囲で医療設備の充実化を図る必要がある。そこで本研究では、都市の規模に対して医療施設整備水準に関する制約を設ける。

具体的には、本研究では医療施設の規模、及び医療サービス水準を表す指標として病床数を用いる。その上で、まず、人口1,000人当たりの病床数の全国平均が約10床である¹²⁾に基づき、都市 i の医療設備充実度 e_i (= 都市 i の総病床数/都市 i の人口 [千人]) が10以下の都市を投資対象都市とする。また、都市 i に投資を行うと決定された際には、各都市の最大医療設備充実度 e_i^* までの範囲内で設備投資を行うとする。すなわち、投資対象都市ベクトル $\mathbf{y}$ が所与である場合の都市 i の医療設備充実度を $e_i(\mathbf{y})$ と定義し、式(17)の制約を設ける。

$$e_i(\mathbf{y}) \leq e_i^* \quad (\forall i \in U, U = \{j | e_j \leq 10\}) \quad (17)$$

c) 都市間の公平性

本モデルでは各都市のCPAI値の総和を目的関数に設定している。そのため、場合によっては大都市に投資が集中する可能性があり、都市間の不平等が懸念される。

そこで、都市間の格差を是正するため、都市 i の $CPAI_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ を各都市の人口で割った値 W_i に対するジニ係数 $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ により都市間の公平性を考える。ジニ係数は式(18)で算出される。

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 2 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^i \frac{W_j}{n\mu} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{W_j}{n\mu} \right) \right\} \quad (18)$$

n : 対象ネットワーク内の全都市ノード数

μ : 対象ネットワーク内のCPAI値の平均値

ジニ係数は一般的には、0.5以上ならば格差の是正が必要だとされている。そこで本研究においては、ジニ係数の制約値を0.5とし式(19)の制約条件を設定する。

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0.5 \quad (19)$$

(3) 道路網・医療施設計画モデルの定式化

以上より、本道路網・医療施設計画モデルは次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max \quad & TCPAI(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_i CPAI_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t.} \quad & TC \geq \mathbf{x} \cdot \mathbf{c}_V + \mathbf{y} \cdot \mathbf{c}_U \\ & e_i(\mathbf{y}) \leq e_i^* \quad (\forall i \in U) \\ & G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0.5 \end{aligned}$$

5. 京都府ネットワークを対象としたケーススタディ

(1) ケーススタディのシナリオ

対象ネットワークは図-6 に示す京都府近郊の高速道路及び一般国道からなるネットワークとする。図中、番号付きの小さいノードは結節点を表し、1~15 までの番号付きの大きいノードは都市を表す。

ケーススタディの対象地域を京都府全域としたのは以下の理由による。すなわち、本研究では考慮していないが災害発生時には病院自体が機能しなくなる可能性も存在するため、確実に医療機会を享受するためには遠方

の病院への搬送も考慮する必要がある。一方で、搬送に時間が掛かりすぎると、負傷者の致死率が高くなるなどの弊害も大きい。そのため、前者の点を勘案して広い範囲のネットワークを対象としつつ、かつ、後者の点に関しては式(7)中の距離に対する感度パラメータを導入することで、遠方への搬送に対して低く評価されるよう考慮している。各都市の人口、及び病床数、医療施設充実度は表-3 のように与えられているとする。このとき、4. (2) で示した投資対象都市の基準に基づく、対象ネットワークにおける投資対象都市は亀岡市、綾部市、福知山市、宮津市、京丹後市、向日市、八幡市、京田辺市の 8 都市となる。また、投資対象新規道路は図-6 中赤色破線で示した 3 つの現在事業中の高速道路 (1: 京都縦貫自動車道、2: 京都第二環状道路、3: 第二名神自動車道) とする。

本ケーススタディでは、対象ネットワーク内において予算 100 億円以内の医療投資を行うことを考える。予算 100 億円は病床数 500 に相当するとし、対象ネットワーク内において、① どの都市にも投資しない場合、② 1 都市に 500 病床を新設する場合、③ 2 都市に 250 病床ずつを新設する場合、の 3 パターンで都市への投資を行



図-6 京都府道路ネットワーク

表-3 各都市の人口・病床数

番号	地名	病床数 (床)	人口 (千人)	医療設備充実度 (床/千人)
1	京都市	14,966	1,467	10.2
2	亀岡市	408	93	4.4
3	南丹市	624	36	17.3
4	綾部市	301	37	8.1
5	福知山市	587	80	7.3
6	舞鶴市	1,178	91	12.9
7	宮津市	27	22	1.2
8	京丹後市	520	63	8.3
9	向日市	201	55	3.7
10	長岡京市	1,358	75	18.1
11	八幡市	548	74	7.4
12	京田辺市	569	65	8.8
13	城陽市	908	81	11.2
14	宇治市	2,769	165	16.8
15	小浜市	490	31	15.8

うとする。新規道路に関しては、① 現況を維持した場合（3本とも開通されない場合）、② いずれか1本のみ開通した場合、③ 2本のみ開通した場合、を考え、道路と医療施設への最適な投資組み合わせを求める。

(2) ケーススタディの条件設定

本ケーススタディでは、道路の途絶リスクを考慮しない状況として一般国道、高速道路とも $r=1.0$ と設定した場合（ケース 1）、及び一般国道を $r=0.95$ 、高速道路は十分耐震化されているとして $r=1.0$ を想定した場合（ケース 2）の 2 ケースについて本モデルを適用し、算出結果を比較する。また、距離に対する感度を表すパラメータ α は 0.1 とする。さらに、都市の最大医療設備充実度 e_i^* は全都市一律で 15[床/千人]とした。

(3) 各投資組み合わせにおける目的関数増加率

上述の設定の下、新規道路に関する全 7 つの投資パターン毎に、最適な投資対象都市を算出した。道路・都市への投資による目的関数値 $TCPAI$ 値増加率を昇順に整理した結果を表-4、表-5 に示す。

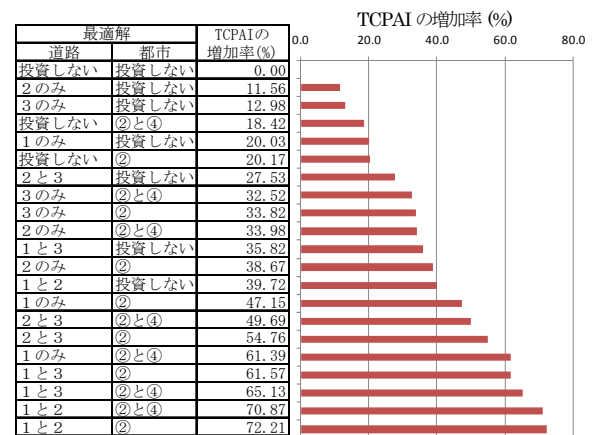
表-4 に着目すると、道路の途絶リスクを考慮しない場合、道路へ投資するよりも医療施設へ投資する方が高い $TCPAI$ 値が算定されることが分かる。また、都市へ投資しないパターンのみを着目すると、「1 のみ<3 のみ<2 のみ<1 と 3<1 と 2<2 と 3」の順に $TCPAI$ 値増加率が高く、都市の機会が集中している京都南部に接続する高速道路を建設する効果が高く評価されている。一方、医療施設に関しては②亀岡市と④綾部市が投資対象都市となることが読み取れる。また、2 都市に分散して投資するより、1 都市へ集中して投資する方が $TCPAI$ は高くなるとの結果を得た。

一方、道路の途絶リスクを考慮した場合（表-5 参照）、考慮しない場合とは対照的に、「道路 1 と 2 に投

表-4 道路の途絶リスクを考慮しない場合（ケース 1）



表-5 道路の途絶リスクを考慮する場合（ケース 2）



資し、医療施設に投資しない」パターンの方が、「都市②と④に分散して投資して、道路に投資しない」パターン、及び「都市②に集中して投資し、道路に投資しない」パターンより $TCPAI$ 値の増加率が高くなる結果を得た。すなわち、道路の途絶リスクを考慮した場合、道路を整備することにより確実に医療施設へアクセス可能となる、との効果を定量的に評価していることが示唆される。また、道路への投資に関しても、リスクを考慮しない場合とは異なり、「道路 1 と 2」への投資組合せが高く評価されている。これは、都市の機会が高い京都南部と都市の機会が低い京都北部が道路 1 と 2 で繋がることにより、連結性能が高くなるためだと考えられる。

以上より、道路の途絶リスクを考慮する場合としな場合では、投資する道路と医療施設の最適な組合せが異なることが明らかになった。

6. おわりに

本研究では、災害による道路の途絶リスクと都市の公的サービスの享受の機会を考慮した評価指標として、「連結信頼性を考慮したポテンシャル型アクセシビリティ

ィ指標」を提案し、この指標を用いた道路網・医療施設計画モデルの構築した。その上で、まず、提案指標の特性を把握するため、仮想ネットワークに適用し、本指標がリンクの追加による都市間断絶リスクの軽減効果を的確に表現可能であることを確認した。さらに、構築した道路網・医療施設計画モデルを京都近郊ネットワークに適用した結果、道路の途絶リスクを考慮しない場合とする場合では、最適な道路と医療施設への投資組合せが異なること、そして、途絶を考慮する場合は道路整備効果が高く評価されることが分かった。

ただし、この結果は直ちに医療施設へ投資効果と道路への投資効果の優劣を論じるものではなく、災害に対する医療施設へのアクセシビリティの頑健性を考える場合、医療施設整備に併せて、道路網を整備することが頑健性の向上に大きく寄与することを主張するものである。言い換えると、限られた予算内で道路整備・医療施設の整備をバランス良く検討することが重要であることを示唆している。

以下、今後の検討課題を整理する。

- (1) 本モデルでは都市間の連結信頼性とアクセス性のみに着目して道路網の評価を行っている。しかし、現状では都市間の需要を想定していないため交通容量や都市の機会の容量制約を考慮できていない。特に、災害時には道路の渋滞により、被災者の搬送が滞ったとの報告⁹⁾もなされていることから、今後は都市間の需要を考慮したモデルに発展させることにより、より現実の問題を考慮したモデルへの展開が課題となる。
- (2) 本提案の評価指標 *CPAI* は、全経路集合を特定する必要があり、計算負荷が高い。今後は、より効率的な計算アルゴリズムを構築する必要がある。さらに、近似解法適用時の推定精度についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松坂正訓, 甲斐達朗, 太田宗夫: 災害死のケーススタディー阪神淡路大震災一, 日本集団災害医学会誌, Vol.1, No.1, pp.31-35, 1996.
- 2) Wakabayashi, H. and Iida, Y.: Upper and lower bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with Boolean algebra. *Journal of Natural Disaster Science*, 14(1), 29-44, 1992.
- 3) 岡田憲夫, 梶谷義雄, 榊原弘之, 多々納裕一: 直下型地震の発生を想定した都市圏道路網の分散・集中特性の性能評価モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.632/IV-45, pp.93-104, 1999.

- 4) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y.: Network evaluation based on connectivity vulnerability. *Proceedings of the 18th ISTTT*, 637-649, 2009.
- 5) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Network Spatial Economics*, 6, 267-291, 2006.
- 6) 加賀谷誠一, 三木正之: アクセシビリティを考慮した医療施設利用者改善への地理情報システムの適用, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.209-216, 1996.
- 7) 喜多秀行, 瀧本貴仁: 地方生活圏における救急医療システムの整備計画手法に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.196-200, 1996.
- 8) 南正昭, 高野伸栄, 加賀屋誠一, 佐藤馨一: 拠点的医療施設へのアクセスを2系統で保障する道路ネットワーク構造, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.679-686, 1997.
- 9) 佐々木和寛, 奥村誠, 堀内智司: 地震重傷者搬送における道路ネットワーク維持の効果分析, 土木計画学研究・講演集, No.39, CDROM, 2009.
- 10) Bhat, C., Handy, S., Kockelman, K., Mahmassani, H., Chen, Q. and Weston, L.: Development of an urban accessibility index: literature review, Texas Department of Transportation Technical Report, TX-01/7-4938-1, 2000.
- 11) Ball, M., Magnanti, T.L., Monma, C.L. and Nemhauser, G.L.: *Handbooks in Operations research and management science Vol.7 Network models*. North-Holland, 1995.
- 12) 厚生労働省: 平成19年医療施設(動態)調査・病院報告の概要, 2008.

アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設計画モデル*

近藤竜平**・塩見康博***・宇野伸宏****

災害に対して脆弱な我が国では、道路途絶が生じて孤立地域が発生することなく確実に機能する道路網整備が重要となる。そこで本稿では、地震等の災害の発生を想定した道路網整備・医療施設配置を決定するモデルを構築した。まず、道路の途絶リスクと各都市のサービス機会数を考慮した道路網評価指標を新たに提案し、仮想ネットワークに適用することでその特性を把握した。その上で、提案指標を用いた道路網・医療施設計画モデルを策定した。最後に、本モデルを京都府の道路ネットワークに適用した結果、道路の途絶リスクを考慮する場合としない場合とでは、投資する道路と医療施設の最適な組合せが異なることが示された。

Road Network and Medical Facilities Planning Model Considering Accessibility and Connectivity*

By Ryuhei KONDO**・Yasuhiro SHIOMI***・Nobuhiro UNO****

This study aims at establishing a planning model to improving the robustness of road network against the risk of link destruction in terms of both network topology and the arrangement of medical facilities. A new measure for evaluating network robustness is first established, by applying the concepts of connectivity reliability and accessibility. By using the measure, a planning model, which identifies the optimal combination of road network topology and opportunity arrangement ensuring the robustness, is developed. Finally, the model is applied to Kyoto Prefecture road network and it reveals that the risk of link degradation significantly affect the optimal solution.
