

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用できるような道路・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。そのため、限られた予算制約の中で医療施設の維持、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することは、多くの地域で緊要な課題となっている。

道路網と医療施設の整備という観点からは、これまでもいくつかの研究がなされている。例えば、加賀屋ら¹⁾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²⁾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³⁾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、奥村ら⁴⁾は道路網の耐震化と医療施設の耐震化を統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が最小化するような数理計画モデルを構築、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シビリティを評価した道路網・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を想定し、

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。その上で、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モデルを構築する。さらに、構築した計画モデルを京都府下の道路ネットワークへ適用し、その特性を把握する。

2. 道路網評価指標の構築

2.1 評価指標の概要

災害による道路の途絶リスクを考慮した上で、医療に代表される公的サービス施設の配置、及び道路網を評価する上では、以下の4点が評価の基本的な考え方を示している。なお、図1に評価の基本概念を図示する。

- (i) 施設数の多い都市に近接しているほど評価が高い。
- (ii) 都市間の経路長が短いほど評価が高い。
- (iii) 都市間の経路数が多いほど評価が高い。
- (iv) 都市間の経路の重複率が小さいほど評価が高い。

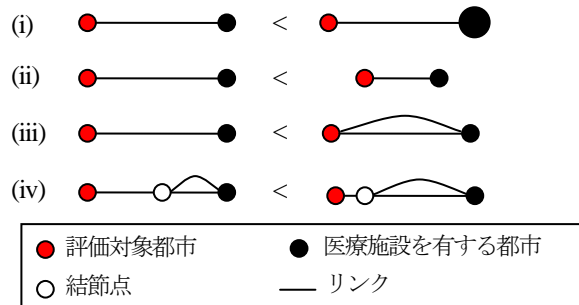


図1 評価の基本概念図

上述の評価の基本概念に関して、(i)、(ii)についてはポテンシャル型アクセシビリティ⁵⁾の概念が、(iii)、(iv)については連結信頼性⁶⁾の概念による評価がこれまでに提案されている。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し、連結信頼性とは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。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。

2.2 評価指標の定式化

あるノード*i*のポテンシャル型アクセシビリティ A_i は、

* キーワーズ：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

**** 正会員，工博，京都大学経営管理大学院

（京都市西京区京都大学桂C-1-2-438，

TEL 075-383-3237，FAX 075-383-3236）

一般に、周辺ノード数を n 、ノード j のサービス機会を D_j 、ノード ij 間の移動に関する交通抵抗値 c_{ij} を用いて、式(1)のように記述される。ただし、 $f(c_{ij})$ 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とする。

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

本研究では、式(1)中 $f(c_{ij})$ の項に連結信頼性の概念を導入する。すなわち、ネットワークを形成する各リンクに対し、災害発生時にリンクが途絶することなく機能する確率をリンク信頼度として付与する。このとき、任意の2地点間に存在する各経路が機能する確率と経路の交通抵抗から期待交通抵抗値を求めることにより、途絶リスクを考慮した交通抵抗の評価が可能となる。

具体的には、各リンクのリンク信頼度を所与とした上で、式(2)によりノード ij 間の交通抵抗項の期待値 R_{ij} を算出する。

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

ただし、

- A_{ij} : ノード ij 間の全経路集合 ($i \neq j$)
- $2^{A_{ij}}$: 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 $c_{ij,k} = \infty$ とする)

式(2)の右辺でノード ij 間の近接性を表す関数の最大値を用いているのは、利用可能な経路集合の内、最も交通抵抗の小さい経路でノード間の近接性を評価することを意味する。

このノード ij 間の交通抵抗の期待値 R_{ij} を用いて式(3)にて、ノード i に関する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 $CPAI_i$ を定義する。

$$CPAI_i = \sum_j D_j \cdot R_{ij} \quad (3)$$

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 $CPAI_i$ の総和を $TCPAI$ (Total Connective-Potential Accessibility Index) と定義する。

2.3 評価指標の近似解法

ネットワーク規模が大きくなると、集合 $2^{A_{ij}}$ が膨大となり、提案評価指標を厳密に算出するのは困難となる。そこで、本研究ではモンテカルロ法を用いて近似的に $CPAI$ 値を算出する。以下に算出過程を詳述する。

Step1 ネットワークを構成する m 本の全リンクに対し、

統計的独立な $[0,1]$ の一様乱数 u_h^k ($h=1, \dots, m, k$: 繰り返し回数) を発生させ、リンク h の信頼度 p_h との関係で $u_h^k > p_h$ となるリンク h をネットワーク上から消去する。

Step 2 Step1 で与えられたネットワーク上でノード ij 間の最短経路探索を行い、最小交通抵抗値 c_{ij}^k を得る。

Step 3 Step1~2 の所作を N 回繰り返し、式(4)により、近似的な $CPAI_i$ を算出する。

$$CPAI_i = N^{-1} \sum_{k=1}^N \sum_j D_j \cdot f(c_{ij}^k) \quad (4)$$

3. 道路網・医療施設計画モデル

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(5)~(8)のように記述される。

$$\text{Max} \quad \text{目的関数} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \text{予算制約} \quad (6)$$

$$\text{都市規模制約} \quad (7)$$

$$\text{都市間の公平性に関する制約} \quad (8)$$

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。

3.1 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あわせた以下の指標を目的関数とする。

$$TCPAI(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_i CPAI_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (9)$$

3.2 制約条件

(1) 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。

$$TC \geq \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{c}_V + \mathbf{y}^T \cdot \mathbf{c}_U \quad (10)$$

\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

(2) 都市規模制約

都市の医療施設を整備する場合、その都市が平時において維持可能な程度の規模に設定する必要がある。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、まず、人口 1000 人当たりの病床数の全国平均が約 10 床である⁷⁾ことに基づき、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(11)の制約を設ける。

$$e_i(\mathbf{y}) \leq e_i^* \quad (\forall i \in U, U = \{j | e_j \leq 10\}) \quad (11)$$

(3) 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 $CPAI(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 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(12)で算出される。

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 2 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^i \frac{W_j}{n\mu} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{W_i}{n\mu} \right) \right\} \quad (12)$$

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(13)の制約条件を設定する。

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0.5 \quad (13)$$

3.3 道路網・医療施設計画モデルの定式化

以上をまとめると、本道路網・医療施設計画モデルは式(14)式(17)のように定式化される。

$$\max TCPAI(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_i CPAI(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (14)$$

$$\text{s.t. } TC \geq \mathbf{x} \cdot \mathbf{c}_V + \mathbf{y} \cdot \mathbf{c}_U \quad (15)$$

$$e_i(\mathbf{y}) \leq e_i^* \quad (\forall i \in U) \quad (16)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0.5 \quad (16)$$

4. 京都府ネットワークへのモデルの適用

本章では、第3章で構築した道路網・医療施設計画モデルを京都府下の道路ネットワークに適用し、その結果について考察する。

4.1 ケーススタディのシナリオ

対象ネットワークは図 2 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。各都市の人口、及び病床数、医療施設充実度は表 1 のように与えられてい

るとする。このとき、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 2 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(綾部-丹波)、2: 京都第二環状道路(伏木-大山崎)、3: 第二名神自動車道(城陽-八幡)) とする。

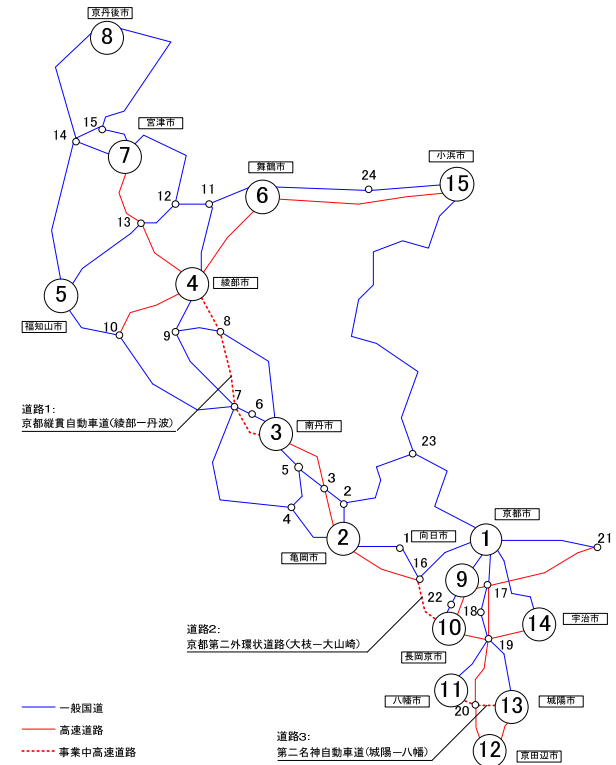


図 2 京都近郊ネットワーク

表 1 各都市の人口・病床数

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

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。

4.2 ケーススタディの条件設定

本モデルの評価指標である各都市のCPAI値の算出に当り、任意のリンク h の信頼度 p_h は、リンク長が大きくなるほど途絶するリスクが高まるとの考えから単位距離あたりのリンク信頼度 r を所与とし、リンク長 l_h との関係で $p_h = r^{l_h}$ として与える。ただし、単位距離当りのリンク信頼度 r は、本来、沿道状況、耐震化状況、及び想定する災害規模の大きさによって決定されるべき変数である。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、ノード j 間 k 番目経路の交通抵抗 $c_{ij,k}$ は当該経路の経路長 $l_{ij,k}$ で表されるとし、 $f(c_{ij,k}) = \exp[-0.01 \cdot l_{ij,k}]$ とする。

また、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。

4.3 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2、表3に示す。

表2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。また、医療施設に関しては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ほうが、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3参照）、考慮しない場合とは対照的に、「道路1と2に投資し、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市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い場合では、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。

表2 道路の途絶リスクを考慮しない場合（ケース1）

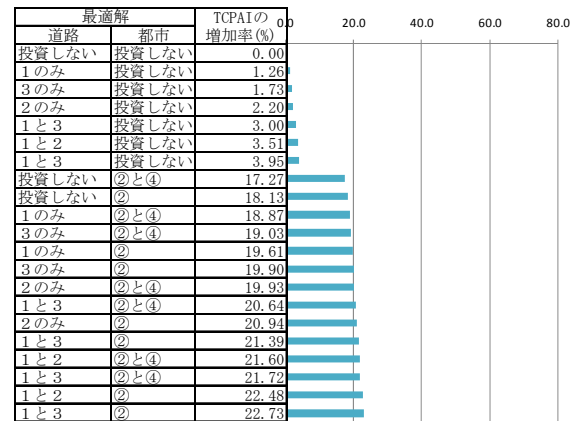
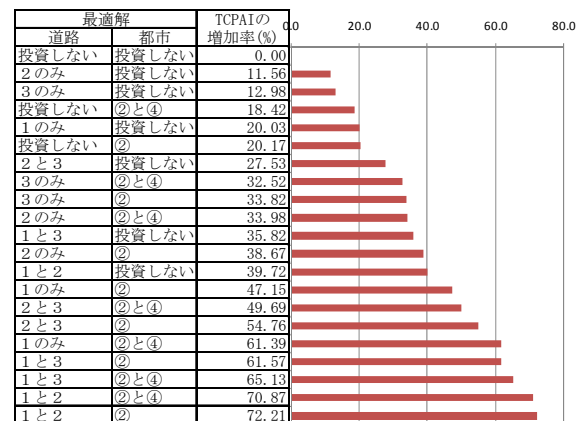


表3 道路の途絶リスクを考慮する場合（ケース2）



4. 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。そして、構築した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。

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。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。また、本提案の評価指標 *CPIA* 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) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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 vol.23，2006.
- 6) 飯田恭敬，若林拓史，福島博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究，土木学会論文集，No.407/IV-11，pp.107-116，1989.
- 7) 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.