

# 非重複経路を考慮したアクセシビリティ評価指標に基づく医師配置計画\*

Physician Allocation Planning Model Based on Accessibility Index Considering Non-overlapping Paths\*

瀬戸裕美子\*\*・宇野伸宏\*\*\*・塩見康博\*\*\*\*

By Yumiko SETO\*\*・Nobuhiro UNO \*\*\*・Yasuhiro SHIOMI\*\*\*\*

## 1. はじめに

災害の多いわが国では、道路に途絶が生じた場合にも確実かつ迅速に被災者を病院へ搬送でき、適切な手当を享受できるような道路網整備が望まれている。そのため必要条件として、いくつかの道路が途絶された場合でも、任意の発着地間をつなぐ経路が確保されていることが求められる。しかしながら、道路はその目的地において某かの活動、サービスを受けるための移動を支える社会インフラであることを考えると、ただ経路が確保されているのみでは十分ではない。すなわち、目的地側で享受できる機会の多寡も道路網の性能を考える上で重要な要素と言える。特に、医師の不足や偏在が問題となっている昨今では、医療サービスの配置の適正性を評価することも必要である。

このような視点に基づき、先行研究<sup>1)</sup>では、道路網の形状に基づく都市間の連結性と、都市にて享受できる機会の大小を併せて定量的に評価する道路網評価指標を構築した。これは、いくつかの道路の途絶を想定し、それがネットワーク全体へ及ぼす影響を評価する「ネットワーク脆弱性」の概念を、活動機会への近接性を評価するアクセシビリティ指標<sup>2)</sup>に適用したものである。

本稿では、先行研究で構築した道路網評価指標に基づき、総医師数・都市間の公平性などの制約を考慮した上で、各都市に対して最適に医師を配置する計画モデルを構築する。さらに、構築したモデルを京都府北部の丹後医療圏の道路ネットワークに適用し、現状の医師配置におけるアクセシビリティ評価を行うと共に、都市間の公平性を保ちつつ、医療圏としてのアクセシビリティを向上させる医師配置パターンについて検討する。

## 2. 非重複経路を考慮したアクセシビリティ評価指標

### (1) ネットワーク脆弱性と $N$ -Edge-connected Network

\* キーワード：計画手法論，道路計画，医師配置計画

\*\* 正会員，工修，神戸市（神戸市中央区加納町6-5-1，Tel:078-322-6648，FAX:078-322-6095）

\*\*\* 正員，博士（工学），京都大学経営管理大学院

\*\*\*\* 正員，博士（工学），京都大学大学院工学研究科

ネットワークにおける脆弱性分析とは、ネットワークを構成するいくつかの要素の機能停止がネットワーク全体へ及ぼす影響を評価する手法である。従来提案されているネットワークの連結信頼性<sup>3)</sup>との大きな差異は、特定することが困難なリンクの途絶確率を用いるのではなく、途絶による影響を対象とする点にある。本研究では、この手法に合致する  $N$ -edge-connected network の概念<sup>4)</sup>を用いる。これは全ての OD ペアについて、非重複経路が最低  $N$  本存在するようなネットワークを意味し、最大  $N-1$  本のリンクが途絶したとしても全ての OD ペアの連結性が保たれるネットワークを表す。言い換えると、いかなる  $N-1$  本のリンクが途絶したとしても全 OD ペア間の連結性は少なくとも維持され、ネットワーク全体の機能が大きく低下することはないと言える。

### (2) ネットワーク評価基準

災害時の道路網にとっては、いくつかの道路が途絶した場合にも、確実に目的地まで到達できることが重要となる。本研究では上述の  $N$ -edge-connected network の概念に基づき、非重複経路本数が多い OD ペアほど頑強に連結され、確実に目的地へ到達可能であると考えられる。また、救急医療においては、病院までの患者の搬送時間が短いほど救命率は高くなる。よって、OD 間の所要時間が小さい経路ほど高い評価が得られるべきである。さらに、搬送先の病院での医療サービスの享受機会が大きいほど、充実したサービスが享受可能であると考えられる。

そこで、本研究では以下3点の評価基準（図1参照）を満たすネットワーク評価指標を構築する。

- (i) 非重複経路本数
- (ii) 経路の所要時間
- (iii) 目的地におけるサービス機会数

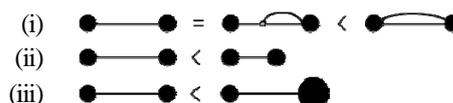


図1 評価基準の考え方

(3) 非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標の構築  
都市にて提供されるサービス機会数と OD 間の交通抵抗を同時に評価するアクセシビリティ指標としては、ポ

テンシャル型アクセシビリティ指標<sup>2)</sup>がこれまでに提案されている。これは、都市*i*から見た全*N*都市の機会への近接性を示し、都市*j*の機会の大きさ*D<sub>j</sub>*と都市*i*から都市*j*までの交通抵抗項*F(C<sub>ij</sub>)*を用いることにより、一般的に式(1)のように表現される。

$$A_i = \sum_{j=1}^N D_j \cdot F(C_{ij}) \quad (1)$$

交通抵抗項*F(C<sub>ij</sub>)*は都市間の移動しやすさを表す項であり、一般に移動コスト*C<sub>ij</sub>*に対する単調減少関数として表される。*C<sub>ij</sub>*が小さいほど抵抗関数は大きくなり(移動しやすい状況を表し)、移動コスト制約を考慮した場合、機会*D<sub>j</sub>*をより多く享受できる可能性が生じる。以下では、式(1)の交通抵抗項において非重複経路本数を考慮した新しい指標を構築するための基本的な考え方を整理する。

#### a) 非重複経路を考慮した交通抵抗の考え方

*N*-edge-connected network の概念に基づくと、ODペア間の非重複経路本数が多いほどネットワークの連結性は高いと考える。しかし、多くの経路を確保することにより、比例的に利便性が増加するわけではない。想定する災害の規模、あるいは政策を行う側の意図によって、必要十分な非重複経路本数は異なるはずである。そこで、抵抗関数に複数経路確保の重要度を考慮するパラメータを加え、式(2)により非重複経路本数を評価する。

$$G(n) = 1 - \exp(-\alpha n) \quad (2)$$

ただし、

*G(n)* : 非重複経路本数*n*の評価関数

*α* : 複数経路確保の重要度を表すパラメータ

具体的な非重複経路本数*n*とその評価関数*G(n)*の関係を図2に示す。パラメータ*α*の値が小さい時には*G(n)*は*n*の増加に対して緩やかに増加し、最終的に1の値を取るに至る。一方で、*α*の値を大きくすると*n*に対する増加率が大きくなり、比較的少ない非重複経路本数でも評価関数は1、すなわち最大値を取るようになることが読み取れる。つまり、*α*を小さく設定すると経路本数の複数確保が評価値に敏感に反映されるため、リンク途絶が想定される災害時のように複数の非重複経路の確保が重要視される場合の連結性評価に適している。一方、*α*を大きく設定すると、経路本数はODペア間に1本存在するかどうかの評価に重きを置くことになり、複数経路の確保を重視しない場合の道路網評価に適している。

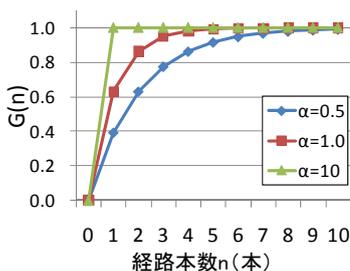


図2 非重複経路数の評価関数

#### b) 経路所要時間に対する考え方

上述の非重複経路数の評価では、経路のコストを考慮できていない。例えば、電気回路・通信網等の場合は、本来の経路が利用不能の際に相当な迂回経路も許可されるが、特に救急医療を対象とする場合の道路網では、長時間の搬送は救命率の低下につながるため、経路コストも適切に評価しなくてはならない。

本研究では、搬送に要する時間が長いほど患者の死亡確率が高くなると考え、経路所要時間に対応する重みづけとしてカーラーの救命曲線の考え方を適用する<sup>3)</sup>。これは1981年にフランスの救急専門医であるM.Caraが心臓停止、呼吸停止、多量出血からの経過時間と死亡率の関係をまとめたものである(図3)。ここでは所要時間の短い経路を高く評価する重みづけとして多量出血に対する救命率(「1-死亡率」と定義する)*q(t)*を用いる。具体的には、経過時間レベル毎に区分を設け、各区分に対して表1に示す救命率により経路の重み付けを行う。

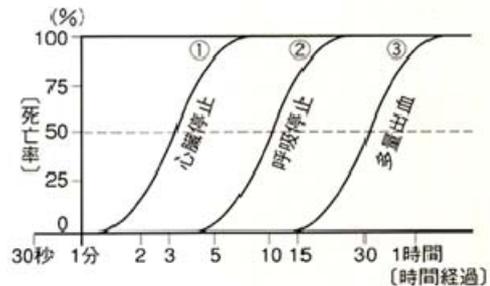


図3 カーラーの救命曲線

表1 経過時間に対する救命率

<i>t</i> [min]	0 ≤ <i>t</i> ≤ 10	10 < <i>t</i> ≤ 20	20 < <i>t</i> ≤ 30
<i>q(t)</i>	1	0.92	0.50
<i>t</i> [min]	30 < <i>t</i> ≤ 40	40 < <i>t</i> ≤ 50	50 < <i>t</i> ≤ 60
<i>q(t)</i>	0.31	0.17	0.07
<i>t</i> [min]	60 < <i>t</i>		
<i>q(t)</i>	0		

#### c) 都市の機会に対する考え方

本研究では、各都市にて勤務する医師の人数が、それぞれの都市の医療機会の大きさを表す指標になると考える。すなわち、提案するアクセシビリティ指標では都市の医師数を都市間の非重複経路数の評価、及び所要時間に関する評価によって重み付けし、その値を指標値とする。言い換えると、提案指標値は「重み付けされた医師数」を表すことになる。

#### d) 評価指標の定式化

以上を踏まえて、提案する非重複経路を考慮した、ネットワーク内都市*i*のアクセシビリティ指標*A<sub>i</sub>*を以下のように定式化する。

$$A_i = \sum_j A_{ij} \quad (3)$$

Where

$AI_{ij} =$

$$\begin{cases} D_j \cdot \sum_{l=1} [q(t_l) \cdot \{G(n_{ij}(t_l)) - G(n_{ij}(t_{l-1}))\}] \\ \quad \text{if } i \neq j (i, j \in V) \\ D_j \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ただし、

$D_j$  : 都市  $j$  の医師数 (人)

$\alpha$  : 複数経路確保の重要度を表すパラメータ

$n_{ij}(t_l)$  : OD ペア  $ij$  間における所要時間  $t_l$  分以内の非重複経路本数 (本)

$t_l$  : 経路所要時間 (分)  
(ただし、 $t_l = 10 \cdot l$ )

$V$  : 対象ネットワーク内の都市ノード集合

式(3)中、 $AI_{ij}$  は都市  $ij$  間の連結性・医療サービスへのアクセス性の強さを表し、これを全ての周辺都市  $j$  に関して足し併せることで都市  $i$  のアクセシビリティ  $AI_i$  を定義する。 $AI_{ij}$  の算出に際しては、OD ペア間の所要時間に関して表 1 に示すように 10 分毎の水準を設け、各所定の時間水準以内の非重複経路数を評価し、それをカーラーの救命率、及び目的地ノードの医師数によって重み付けをする構造となっている。

さらに、ネットワーク全域でのアクセシビリティを評価する指標  $AAI$  を全都市ノードの  $AI$  値の平均として以下のように定義する。

$$AAI = \sum_i AI_i / N \quad (5)$$

ただし、 $N$  は対象ネットワーク内に存在する全都市ノード数を表す。

### 3. 医師配置計画モデルの構築

本章では、2.で構築した非重複経路数を考慮したアクセシビリティ指標に基づき、対象道路ネットワーク内に存在する都市ノードに最適に医師を配置するための計画モデルを構築する。

本研究で提案するモデルは次のように定式化される。

Max	目的関数	(6)
s.t.	総医師数制約	(7)
	都市のアクセシビリティの最小値保障	(8)
	需要の分散	(9)

ここで、決定変数は各都市に配置する医師数とする。目的関数にはネットワーク全体のアクセシビリティ  $AAI$  を用い、目的関数を最大化する最適な医師配置が決定される。制約条件として、式(7)ではネットワーク内に配置される総医師数を定め、式(8)では、都市間の公平性の観点から、全都市のアクセシビリティの最小値を保障する。さらに式(9)では、一都市に需要が過度に集中しすぎない

よう制約を設ける。

以下、各項目について詳説する。

#### (1) 決定変数

ネットワークに対して最適な医師配置を求めるため、以下に示す都市の配置医師数  $\mathbf{D}$  を決定変数とする。

$$\mathbf{D} = [D_j] \quad (j \in V) \quad (10)$$

ここで、

$V$  : 対象ネットワーク内の都市ノード集合

$D_j$  : 都市  $j$  に配置される医師数

$\mathbf{D}$  :  $D_j$  の決定変数ベクトル

である。 $D_j$  は先に提案した非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標における都市の機会項であり、全都市について  $D_j$  を決定することにより目的関数の値を最大化する。

#### (2) 目的関数

計画モデルの目的関数には、式(5)で表される  $AAI$  を用いる。 $AAI$  はネットワーク内の全都市ノードに対する  $AI_i$  の平均値として定義される。式(4)中、右辺の  $\Sigma$  以降の部分はネットワークトポロジー、及びリンクコストによって決定される値であり、都市ノードの医師数  $\mathbf{D}$  には依存しない。この点に注意すると、式(4)は式(11)のように書き換えられる。

$$AI_{ij} = \varphi_{ij} \cdot D_j \quad (11)$$

where

$\varphi_{ij}$

$$= \begin{cases} \sum_{l=1} [q(t_l) \cdot \{G(n_{ij}(t_l)) - G(n_{ij}(t_{l-1}))\}] & \text{(if } i \neq j) \\ 1 & \text{(otherwise)} \end{cases}$$

これより、 $AAI$  は式(12)のように表記でき、提案する計画モデルの目的関数は都市ノードの医師数  $D_j$  に関する線形関数であることが分かる。

$$AAI = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j \varphi_{ij} \cdot D_j \quad (12)$$

#### (3) 制約条件

本モデルでは、ネットワーク総医師数、都市の最小アクセシビリティの保障、および需要集中に対する制約を考える。

##### a) 総医師数制約

ネットワーク内に配置可能な医師数は限られるため、都市に配置される医師の総数を以下の制約条件により定める。

$$\sum_j D_j = D_{total} \quad (13)$$

ただし、 $D_{total}$  は対象ネットワーク内の総医師数を表す。

b) 都市の最小アクセシビリティの保障制約

目的関数AAIは、各都市のアクセシビリティ $AI_i$ の平均であり、目的関数が最大化された状況でも、例えばある都市に医師数が一極集中する場合、都市によっては $AI_i$ の値が極めて小さくなることも考えられる。そこで、 $AI_i$ の最小値に関する制約を設けることで、ネットワーク内の全都市に対して最小限のアクセシビリティを保障するよう考慮する。よって、以下の式を制約条件とする。

$$AI_i \geq AI_{min} \quad \forall i \in V \quad (14)$$

ここで、

$AI_{min}$  : 全都市のアクセシビリティの保障値

c) 需要集中に関する制約

各都市の最小アクセシビリティが保障されたとしても、医師の配置された都市が多く都市にとってアクセスしやすい都市であれば、需要が集中し、結果として患者一人あたりの医師数が不足するケースも想定される。そこで、ある都市に配置された医師と、その都市へ医療機会を求めて集まる人口との関係を制約条件として加える。

$$\frac{D_j}{\sum_i M_i \times P_{ij}} \geq D_{min} \quad (15)$$

ここで、

$D_j$  : 都市 $j$ に配置される医師

$M_i$  : 都市 $i$ の人口

$P_{ij}$  : 都市 $i$ の住民が医療を享受する際にネットワーク内の都市 $j$ を選ぶ確率

$D_{min}$  : 人口一人当たりの医師数の最小保障値

災害規模や想定する状況によって患者数は異なるため、本モデルでは都市の人口を用いて、医師のいる都市に集まる人口一人当たりの医師数に関する制約を設ける。ネットワークに医師を配置することにより、都市の住民はまずネットワーク内のどの都市で受診するかを選択する。それぞれの選択確率に従って医師のいる都市に全都市の人口を分配することで、各都市に集まった人口一人当たりの医師数を算出することができる。

本研究で提案したアクセシビリティ指標は、機会の大きさおよび機会へのたどりつきやすさを考慮したものであるが、実際に災害時の救急搬送においては、病院は規模およびたどりつきやすさによって選択されていることが報告されている<sup>9)</sup>。そこで、都市 $i$ の住民が都市 $j$ へ受診しに行く確率をアクセシビリティ指標に基づき、式(16)と定める。

$$P_{ij} = \frac{AI_{ij}}{\sum_k AI_{ik}} = \frac{\varphi_{ij} \cdot D_j}{\sum_k (\varphi_{ik} \cdot D_k)} \quad (16)$$

ここでは単純に、都市 $i$ の住民が都市 $j$ の病院を選ぶ確率 $P_{ij}$ は $AI_{ij}$ に比例すると仮定している。

(4) モデルの定式化

以上より、次のようにモデルを定式化する。

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & AAI = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j \varphi_{ij} \cdot D_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in EV} D_j = D_{total} \\ & AI_i = \sum_j \varphi_{ij} \cdot D_j \geq AI_{min} \quad (\forall i \in V) \\ & \frac{D_j}{\sum_i M_i \cdot P_{ij}} \geq D_{min} \quad (\forall j \in V) \end{aligned}$$

目的関数、総医師数制約、都市の最小アクセシビリティの保障制約は決定変数 $\mathbf{D}$ に関する線形関数である。また、需要集中に関する制約についても決定変数 $\mathbf{D}$ に関して凸性を持つことが確認されている。以上より、本モデルは凸計画問題となっており、目的関数を最大化する各都市への医師配置を一意に決定することができる。

#### 4. 実ネットワークへの適用

ここでは、本研究で提案した非重複経路数を考慮したアクセシビリティ指標を用いて実ネットワークにてアクセシビリティ評価を行った後、医師配置モデルを適用し、最適な医師配置パターンについて検討を行う。

##### (1) ネットワークの設定

日本における救急医療体制は、医療法に基づき、都道府県が作成する医療計画に則って原則的には二次医療圏毎に計画が講じられている。そこで本研究では、京都府北部に位置する二次医療圏である丹後医療圏を対象とする。

##### a) 道路ネットワークの設定

図4に示す対象ネットワークは、丹後医療圏および丹後医療圏に隣接するセンサスBゾーンの高速道路、一般国道、府道、主要地方道からなる実際に即したネットワークである。隣接Bゾーンの道路までを含めているのは、搬送に関しては医療圏境界で移動が完全に分断されるのは非現実的であり、医療圏外の道路を用いることも十分に考えられるためである。図4において、影で示す地域が丹後医療圏に相当する。作成したネットワークには、リンクが494本、ノードが158個含まれている。ただし、各リンクは有向グラフとして表されている。ノードは交差点を表しており、そのうち丹後医療圏の各センサスBゾーンを代表する13ノードをセントロイドに設定している。これらセントロイドに対し、人口および医師を設定する。また、それぞれのリンクの所要時間は、リンク長および道路構造等の要因に基づいて設定される自由流速から算出する。

##### b) 都市の設定

それぞれのセンサスBゾーンを代表する13箇所のセントロイドのBゾーン名、常住人口(H17国勢調査によ

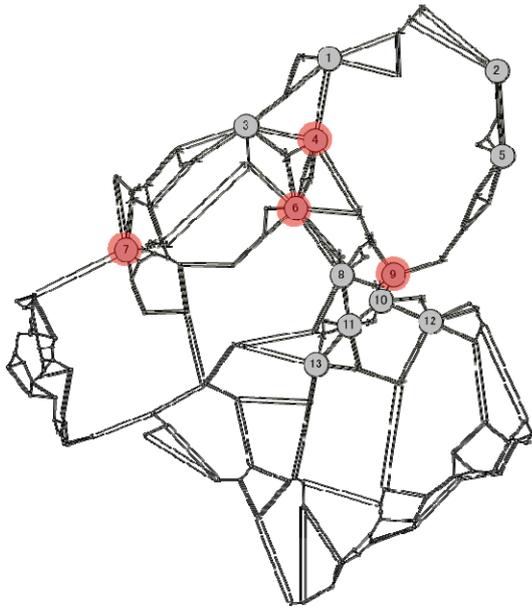


図4 丹後医療圏ネットワーク  
表2 セントロイドの設定

No.	セントロイド名	常住人口(人)	外科医師数(人)
1	京丹後市4区	6,545	0
2	与謝郡伊根町	2,718	0
3	京丹後市3区	15,361	0
4	京丹後市5区	5,705	3
5	宮津市1区	2,344	0
6	京丹後市1区	13,258	4
7	京丹後市6区	11,097	3
8	京丹後市2区	10,757	0
9	与謝郡岩滝町	6,539	9
10	宮津市2区	3,926	0
11	与謝郡野田川町	10,841	0
12	宮津市3区	15,242	0
13	与謝郡加悦町	7,526	0

る), 外科医師数を表2に示す. なおここでは, 病院は救急病院として第二次救急医療病院および第三次救急医療病院のみを対象とし, 医師数は災害時に発生する重症患者を想定し各病院の外科担当医を本研究では医師数として数えている. 医師が存在するのは都市4, 6, 7, 9のみであり, 総医師数は19人である.

(2) 提案指標によるアクセシビリティ評価

a) 非重複経路コストの算出アルゴリズム

本研究で提案するアクセシビリティ指標を算出するためには, ネットワーク上の任意の2地点間に存在する非重複経路を特定し, その経路コストを算出する必要がある. 以下, その算出アルゴリズムを述べる. ただし対象ネットワークのリンク集合を  $S$ , ノード集合  $V$  をとする.  
Step 1 先行研究で構築されたアルゴリズム<sup>9)</sup>を用いて対象ネットワークの OD ペア  $rs$  間の非重複経路数

$n_{rs}$  を特定する. また,  $i=1, \Theta_i=S$  とする.

Step 2 リンク集合  $\Theta_i$ , ノード集合  $V$  で構成されるネットワークを対象に, Dijkstra 法により OD ペア  $rs$  間の最短経路を特定, そのリンク集合  $\Pi_i$ , 及び経路所要時間  $t_i$  を記録する.

Step 3 Step2 で特定した最短経路に属するリンク集合を, ネットワークを構成するリンク集合  $\Theta_i$  から除去し, 新しいネットワークを構成する. 具体的には, 新しいリンク集合  $\Theta_{i+1}$  を式(17)により定義する.

$$\Theta_{i+1} := \{\sigma | \sigma \in (\Theta_i - \Pi_i)\} \quad (17)$$

Step 4  $i = i+1$  と更新し,  $i = n_{rs}$  となるまで, Step2-Step3 を繰り返す.

b) 各都市のアクセシビリティ評価

丹後医療圏を対象に, 複数経路確保の重要度パラメータ  $\alpha$  を 0.5, 1.0, 10 の3段階設定し, それぞれについて各都市のアクセシビリティ指標値  $AI_i$  を算出した. その結果を図5に示す. これより, ネットワークの中で, 都市2(与謝郡伊根町)は  $\alpha$  の値によらず, 常に評価値が低いことが読み取れる. この傾向をより詳細に検証するために, 都市2と評価値の高い都市8から, 医師の存在する都市4,6,7,9への所要時間毎の非重複経路本数を表3に示す. これより, 都市8では, 所要時間10分以内に医師の存在する都市への非重複経路が複数存在するのに対し, 都市2からは20分以内で到達可能な経路は存在せず, また最大でも2本しか経路が確保できないために, 低い評価がなされていると考えられる.

また, 都市1と5については,  $\alpha=0.5, 1$  では  $AI_1 > AI_5$  であるが,  $\alpha=10$  では  $AI_1 < AI_5$  であり,  $\alpha$  によって順位が入れ替わることが読み取れる. この要因を分析するため, 都市1, 5から医師の存在する都市4,6,7,9への経路本数を整理した(表4). これに基づくと, 複数経路の確保が重要視される  $\alpha=0.5, 1$  の場合, 比較的短い所要時間内での非重複経路本数が, 都市5より都市1で多いため, 都市1の方が高い評価値を得ていることが分かる. 一方, 存在医師数が最も多い都市9への経路に着目すると, 都市5のみに20分以内で到達可能な経路が存在すること分かる. 都市1から20分以内で到達可能な都市に存在する医師数は, 都市9に存在する医師数よりも少ないため, 経路の有無のみが評価され, 非重複経路の存在が評価されない  $\alpha=10$  では, 都市1より都市5の方が高い評価値を得たと考えられる.

(3) 医師配置計画モデルの適用

a) 設定条件

医師配置計画モデルを適用するに当たり, 制約条件を表5の通りに設定する. ただし, 複数経路確保の重要度パラメータ  $\alpha$  は 0.5 とする.

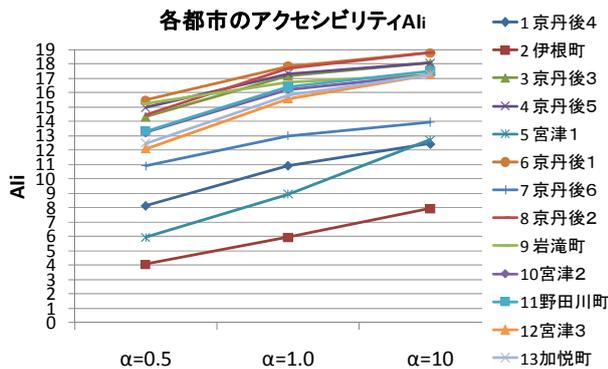


図5 丹後医療圏における各都市の AI 値

表3 都市2・都市8からのt分以内の経路本数

起点ノード	終点ノード	所要時間 t [min]						
		10	20	30	40	50	60	70
2	4	0	0	0	2	2	2	2
2	6	0	0	1	2	2	2	2
2	7	0	0	0	0	1	2	2
2	9	0	0	1	1	2	2	2
8	4	2	3	3	3	3	5	5
8	6	3	3	3	3	4	4	5
8	7	0	2	2	3	4	4	5
8	9	3	3	3	3	3	4	4

表4 都市1・都市5からのt分以内の経路本数

起点ノード	終点ノード	所要時間 t [min]						
		10	20	30	40	50	60	70
1	4	0	2	2	2	2	3	3
1	6	0	2	2	2	2	3	3
1	7	0	0	2	2	2	2	2
1	9	0	0	2	2	3	3	3
5	4	0	0	1	2	2	2	2
5	6	0	0	1	2	2	2	2
5	7	0	0	0	1	1	2	2
5	9	0	1	1	1	2	2	2

表5 医師配置計画の制約条件

総医師数	19人
最小 $AI_i$ 値	$AI_{min}=0$ から 0.1 刻みで実行可能解が存在しなくなるまで増加させる。
需要分散	$D_{min}=8.49 \times 10^{-5}$ (全人口に対する総医師数の50%に相当)とする。

## b)結果と考察

各都市に対して保障する最小 AI 値毎に、本提案モデルで算出された各都市への配置医師数、及び AAI 値の関係を図6に示す。これより、 $AI_{min}$ が小さい時には都市8に集中的に医師を配置することで目的関数であるAAIが最高値13.3をとることが分かる。一方、 $AI_{min}$ を増加させるにつれ、都市8に配置された医師数は減少し、都市6への集中配置を経て、都市2, 5, 6, 11へと分散的に配置されていくことが読み取れる。すなわち、ネットワーク全体でのアクセシビリティ評価値AAIを最大にするためには、ネットワーク中央部に集中的に医師を配置する必要がある一方、都市間の公平性を重視する場合は、他の都市とのアクセス性が悪い対象地域周辺部に位置する都市にも医師を分散して配置する必要があることが伺える。また、現況の丹後医療圏ネットワークにおいて

AAI値はおよそ11.9であり、最小 $AI_i$ 値は都市2の $AI_2=4.06$ である。本計画モデルの結果、AAI値を11.9に維持した場合でも、医師配置を最適化することにより、最小 $AI_i$ 値をおよそ7.3まで増加させられることが確認できる。

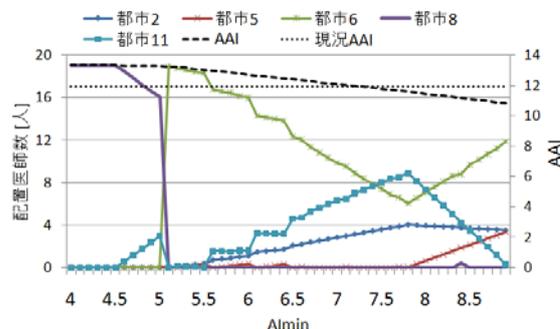


図6 目的関数 AAI および決定変数 D

## 5. おわりに

本研究では、道路ネットワークの形状による都市間連結性と、都市で享受できる機会を併せて定量的に把握するため、非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標を提案した。また同指標を用いて、限られた医師人員を最適に配置する計画モデルを構築した。さらにこれらを京都府丹後医療圏ネットワークに適用し、ネットワークのアクセシビリティ平均を現状維持した場合にもさらにネットワーク内の最小アクセシビリティ値を高める医師配置が可能であることを確認した。今後は、より現実的な制約を想定し、モデルの改善・拡張を図る必要がある。

最後に、本研究を行うにあたり、株式会社地域未来研究所の中川真治様、田中久光様には多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博: 非重複経路を考慮したアクセシビリティ評価指標の構築, 土木計画学研究・講演集 CD-ROM, Vol. 42, 2010.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Grötschel, M.: Design of survivable networks. Handbook in Operations Research and Management Science, 7, pp.617-672, 1995.
- 5) 奥村誠, 塚井誠人, 安村勇亮: 大規模地震による重傷者の搬送計画モデル, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.26, pp.903-912, 2006.
- 6) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y.: Network evaluation based on connectivity vulnerability. Proceedings of the 18th ISTTT, 637-649, 2009.
- 7) 倉林重利, 熊谷良雄: 大震災時における重傷者搬送に関する研究, 地域安全学会梗概集, No.12, 2002.