

道路網による空間分布乖離補償効果の 定量的評価に関する研究

榊原 弘之*・岡田 憲夫・古川 浩平*・片山 武**

*山口大学工学部社会建設工学科

**オリエンタルコンサルタンツ

要 旨

巨大災害時には、サービスの需要量と供給能力の空間分布の乖離は都市のリスク要因となり得る。一方、道路網が適切に設計されることにより、需要・供給能力の空間分布の乖離をある程度緩和することができる。本論文では、このような空間分布と道路網の補完性を考慮して都市の災害時の頑健性を評価するために、空間分布乖離指標を提案するとともに、道路網の形態による乖離補償効果の差異を定量化する。さらに、本手法を実際の都市に適用する。

キーワード：都市の頑健性評価，空間分布乖離，補償効果

1. はじめに

現在の都市は、個人、組織の役割が機能的に特化され、互いに依存しあう複雑な構造となっている。また、自動車交通への依存度が高く、特に地方都市においては中心機能が空間的に拡散した構造となっていることが多い。そのような都市の構造が、災害時における避難や救助活動の障害となる可能性がある。したがって、都市直下型地震のような広域的な災害に対しては、構造物の耐震性の強化等の個別の対策のみでなく、都市の構造全体を都市計画的に頑健性の高いものへと整備していかなければならない。本論文では、広域的な災害によって、平常時における個人間、組織間の相互依存関係が実効力を失った状況においても、個々の市民や組織が必要最小限のサービスを受けることができることを、都市構造の災害に対する頑健性として定義する。

阪神・淡路大震災のような広域的な巨大災害では、同時多発的に構造物の破壊や損傷が発生する可能性が大きい。その結果、都市の道路網は各所で寸断・閉鎖され、道路網全体が通常通り機能することは非常に困難である。このような緊急時には、道路網が近隣地域との間で部分的に機能し、各地区が孤立しないことが望ましい。すなわち、近隣地区間

で必要最小限のサービス（医療機関や避難場所等）が確保されることが重要である。都市の道路網を考えた場合、中心部から放射状にのみ整備された場合と、環状方向も含めて分散的に整備された場合では、後者の方が災害によって破壊された場合に、地区が孤立しにくく、道路網が部分的に機能する可能性が高い。すなわち、巨大災害時には分散性の高い道路網ほど、全体としては機能しなくとも、部分的・局所的に連結して機能する可能性が高いと考えられる。

しかし、道路網が分散的で近隣地区へのいずれかへ連絡路が確保されたとしても、移動先に十分なサービスの供給能力がなければ災害時の当該連絡路の有効性は低いものとなる。したがって、災害時に必要なサービスの需要量と供給能力の空間分布の乖離は都市のリスク要因になり得ると考えられる。さらに、道路網が適切に設計されることにより、需要・供給能力の空間分布の乖離をある程度緩和することができると考えられる。逆に、道路網の形態を考慮した上でサービス供給施設を配置すれば、災害時に機能的観点からの孤立発生の可能性小さくすることができる。本論文では、このような施設配置と道路網の関係を「空間分布と道路網の補完性」と呼ぶこととする。例えば医療サービスを考えた場合、人口

と比較して病院数や医師数が不足している地区と、比較的充足している地区が道路で結合されることにより、不足地区の負傷者を充足地区に搬送することが比較的容易になると考えられる。都市計画上の観点からは、道路網によって空間分布の乖離がどの程度緩和され得るかを評価する必要がある。

本論文では、空間分布と道路網の補完性を考慮して都市の災害時の頑健性を評価するために、空間分布乖離指標を提案するとともに、道路網の形態による乖離補償効果の差異を定量化する。さらに、本手法を実際の都市に適用する。

2. 道路網構造を考慮した空間分布乖離指標

2.1 空間分布乖離とニッチ重なり合い指標

道路網によって地区の孤立が回避されていても、残存道路リンクによって結ばれた地区においてともに対象サービスの供給量が不足している場合、地区間の移動によってサービス供給不足が解消されることはない。すなわち、これらの地区は機能的に孤立した状況であるといえる。サービス供給能力の不足する地区と充足する地区が互いに隣り合う（道路リンクによって結合される）ことで、必要最小限のサービスの確保という観点からの道路網の意義が生じ、機能的孤立を回避することができる。

災害時に必要なサービスの分布を考慮した都市の頑健性評価を行う場合、対象サービスの供給量だけでなくその需要量も併せて考慮しなければならない。例として医療機関を考えた場合、ある地区において病院が数多く立地していたとしても、当該地区の負傷者発生数（人口に比例すると仮定）が非常に多く、病院 1 ヶ所当たりの負傷者数が病院の供給能力を超過するような場合、その地区はサービスの供給量が充足しているとはいえない。一方病院数が少ない地区であっても、人口が極端に少なければサービスの供給量は充足している可能性がある。したがって、サービスの分布を考慮するためには需要と供給の 2 種類の空間分布が必要となる。また、災害時において被害者の多数を占めるであろう高齢者と、その高齢者を助けることのできる可能性の高い若者の分布なども対象とすることができる。この場合は、高齢者人口が救助サービスにおける需要を代表し、若者人口が供給を代表していると考えられる。

これら 2 種類の空間分布が都市内で乖離している場合、サービス供給能力が不足する地区や、供給能力が活用されない地区が生じる可能性がある。この場合、需要側主体または供給側主体が移動することによってはじめてサービス確保が可能となる。このように都市における空間分布の乖離は、災害時においてリスク要因となり得る。

ニッチ重なり合い指標は、元来生態学における個別の種の生息域の分布の重なり合いを評価するために提案された。例えば、Pianka (1973) は以下のような指標 α_{12} を提案している。

$$\alpha_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n p_1^i p_2^i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_1^i)^2 (p_2^i)^2}} \quad p_1^i = \frac{d_1^i}{\sum_{i=1}^n d_1^i}, p_2^i = \frac{d_2^i}{\sum_{i=1}^n d_2^i} \quad (1)$$

ここで $i=1, \dots, n$ は個別の領域を表し、 d_1^i, d_2^i はそれぞれ領域 i における種 1, 2 の個体数を意味する。また p_1^i, p_2^i はそれぞれ d_1^i, d_2^i の総数に対する割合を表す。以下では p_1^i, p_2^i を相対アバンダンスと呼ぶこととする。2 種類の種の生息領域の重複部分が多いほど α_{12} は 1 に近づき、重複部分が小さいほど 0 に近づく。

式(1)で定義されるニッチ重なり合い指標は、都市内の 2 種類の空間分布の重複・乖離の定量的評価にも拡張可能である。その際、 i で示される生息領域は都市内の各地区、種 1, 2 の分布は人口、生産活動、施設等の空間分布にそれぞれ対応する。前川・岡田 (1996) は、災害に対する脆弱性評価の観点から、年齢別の人口分布の重複及び乖離を時間帯別に比較している。具体的には、地域コミュニティにおいて老人、若者を別の生物種として捉え、その重なり度合いをニッチ指数によって指標化し、重なり度合いと活動リスクとの関連性を議論している。また、梶谷ら (2002) は阪神淡路大震災で大きな被害を受けた神戸市長田区を対象に、復興の進展状況と 3 種の年齢層空間分布（高齢人口、幼齢人口、生産年齢人口）ニッチ重なり合い指標の相関に関する分析を行っている。

しかしながら、式(1)で示される定義からも明らかのように、これまでに提案されているニッチ重なり合い指標では、全体としての空間分布の乖離は表せるものの、領域間の隣接関係を考慮することはできない。そこで、次節以降ではニッチの指標に基づいてグラフ上の隣接関係を反映した空間分布乖離評価指標の提案を行う。

2.2 道路網による空間分布乖離補完

2.1 で述べたように、ニッチ重なり合い指標は相対アバンダンスの重なり合い・乖離は評価されているが、地区間の隣接関係は考慮されていない。そこで本節では、ニッチ重なり合い指標における空間分布の重複・乖離の考え方を援用しつつも、道路網によって規定される各地区間の隣接関係を考慮した評価手法の提案を行う。

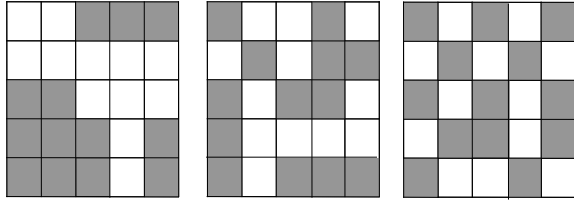


Fig.1 Examples of Spatial Autocorrelation

Positive (Left), No Correlation (Center), Negative(Right)

道路網による乖離補完性を考慮する場合、対象とする2種類の空間分布は、それぞれあるサービスに対する需要及び供給能力の分布であることが必要である。例えば、災害時に必要なサービスとして医療を考えた場合、医療サービスに対する需要（負傷者発生数）予測の根拠となる人口と、サービス供給能力を示す病院数、病床数、医師数等の空間分布の乖離が、道路網によってどの程度緩和され得るかを評価する必要がある。人口と比較して病院数や医師数が不足している地区と、比較的充足している地区が道路で結合されることにより、不足地区の負傷者を充足地区に搬送することが比較的容易になると考えられる。このように対象とするサービスの供給が相対的に充足している地区が、他の地区の不足分を補完することが可能となることを、道路網による空間分布乖離の補完性と呼ぶこととする。

但し、道路網整備が一定の水準に達した現在の我が国においては、都市内の任意の地区間には必ず1つ以上の自動車の通行が可能な経路が存在すると考えられる。その点で、道路網による乖離補完性は常に存在する。そこで本章では、道路網の存在する状況と存在しない状況における空間分布の重複・乖離を比較するのではなく、道路網の形態による乖離補完性の差異を定量化することを目的とする。

次に乖離補完性の評価の基準として、空間統計学における空間的自己相関の概念を援用する (Haining, 1990)。Fig. 1に空間における正の自己相関、無相関及び負の自己相関を模式的に示す。充足地区同士、不足地区同士がグラフ上で隣接する傾向にある地区配置を「正の自己相関が高い」と呼び、充足地区と不足地区が互いに隣接する傾向にある地区配置を「負の自己相関が高い」と呼ぶこととする。正の自己相関、負の自己相関のいずれも見出せないような地区配置は無相関である。

2.3 グラフ構造を考慮した空間分布乖離指標

本節では、グラフ上の各地区の隣接関係が反映されるような空間分布の乖離の評価指標を提案する。まず、都市内における地区の集合を X 、地区の総数を n で表し、サービスの供給能力の分布を S 、需要

を D とする。地区 $i(i \in X)$ における供給能力を s^i 、需要量を d^i とした場合、 S 及び D はそれぞれ $S = \{s^1, s^2, \dots, s^n\}$ 、 $D = \{d^1, d^2, \dots, d^n\}$ として示すことができる。また、地区 i における供給と需要の相対アバンダンスは次式のように定義される。

供給能力の相対アバンダンス

$$p_s^i = \frac{s^i}{\sum_{i \in X} s^i} \quad (2)$$

需要の相対アバンダンス

$$p_d^i = \frac{d^i}{\sum_{i \in X} d^i} \quad (3)$$

グラフ G 上での空間分布 S, D の評価指標を $\phi(G, S, D)$ と表す。 S と D の乖離を定量化するために、 $\phi(G, S, D)$ は以下の性質を満足する必要があると考えられる。

①対称性

分布 S と分布 D を交換しても評価指標は等しい。すなわち

$$\phi(G, S, D) = \phi(G, D, S) \quad (4)$$

②リンク数に対する非依存性

グラフ G からリンク k を除去したグラフを $G \setminus k$ と表す。グラフ G において地区 ij 間に複数のリンクが存在する場合、 $\phi(G, S, D)$ はリンクの本数に依存しない。すなわち

$$\phi(G, S, D) = \phi(G \setminus k, D, S) \quad (5)$$

③相対アバンダンスに対する単調性

地区の組 (i, j) において、グラフ G 上で i に接続された地区の集合を $\Gamma_i(G)$ 、 j に接続された地区の集合を $\Gamma_j(G)$ と表す。ここで以下の条件が満足されるとする。

サービスの供給能力について

- $\Gamma_i(G)$ に属する地区の方が $\Gamma_j(G)$ に属する地区よりも大きい

- j の方が i よりも大きい

サービスの需要について

- $\Gamma_i(G)$ に属する地区よりも $\Gamma_j(G)$ に属する地区の方が小さい

- i の方が j よりも大きい

このとき、グラフ G 上で i に接続するノードを j に接続し、 j に接続するノードを i に接続したグラフを $\hat{G}$ とすると、(Fig.2 参照) $\phi(G, S, D) < \phi(\hat{G}, S, D)$ となる。

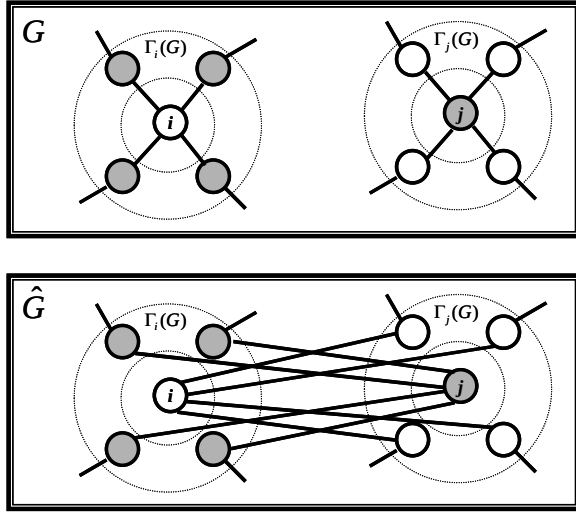


Fig.2 Graphs G and $\hat{G}$

一方,

サービスの供給能力について

- $\Gamma_j(G)$ に属する地区の方が $\Gamma_i(G)$ に属する地区よりも大きい
- i の方が j よりも大きい
- サービスの需要について
- $\Gamma_j(G)$ に属する地区よりも $\Gamma_i(G)$ に属する地区の方が小さい
- j の方が i よりも大きい

このとき、グラフ G 上で i に接続するノードを j に接続し、 j に接続するノードを i に接続したグラフを $\hat{G}$ とすると、 $\phi(G, S, D) < \phi(\hat{G}, S, D)$ となる。

相対アバンダンスに対する単調性の条件は以下のよう

$$\sum_{k \in \Gamma_i(G)} s^k > \sum_{l \in \Gamma_j(G)} s^l, \sum_{k \in \Gamma_i(G)} d^k < \sum_{l \in \Gamma_j(G)} d^l, s^i < s^j, d^i > d^j$$

$$\Rightarrow \phi(G, S, D) < \phi(\hat{G}, S, D)$$

$$\sum_{k \in \Gamma_i(G)} s^k < \sum_{l \in \Gamma_j(G)} s^l, \sum_{k \in \Gamma_i(G)} d^k > \sum_{l \in \Gamma_j(G)} d^l, s^i > s^j, d^i < d^j$$

$$\Rightarrow \phi(G, S, D) > \phi(\hat{G}, S, D)$$

$$\hat{G} : \Gamma_i(G) = \Gamma_j(\hat{G}), \Gamma_j(G) = \Gamma_i(\hat{G})$$

$x \in X$ が i あるいは j ではなく、また $\Gamma_i(G)$ 及び

$$\Gamma_j(G) \text{ に含まれない場合 } \Leftrightarrow \Gamma_x(G) = \Gamma_x(\hat{G}) \quad (6)$$

本論文では、以下のように $\phi(G, S, D)$ を定式化する。

$$\phi(G, S, D) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in X, j \neq i} \delta_{ij}(G) z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2}$$

$$x_i = p_S^i - p_D^i, x_j = p_S^j - p_D^j$$

$$z_i = x_i - \bar{x}$$

$$\delta_{ij}(G) = \begin{cases} n/2\gamma(ij \in A) \\ 0(ij \notin A) \end{cases}$$

γ : 直接連結されたノードペア数

(7)

式に示す x_i の定義において、 x_i の和及び平均値 $\bar{x}$ は 0..となる。したがって、任意の $\forall_i \in X$ について $z_i = x_i$ が成立する。式(7)に定式化される $\phi(G, S, D)$ は、正規性、対称性、リンク数に対する非依存性、相対アバンダンスに対する単調性を満足する(証明は付録に譲る)。また、地区 i と j がグラフ G 上で隣接している場合 δ_{ij} は正となり、隣接していない場合 0..となる。

$\phi(G, S, D)$ は正の自己相関が高い場合、隣接する地区同士の z_i が同符号であることが多いため、 $\delta_{ij}(G)z_i z_j$ は正となる可能性が高まる。その結果、 $\phi(G, S, D)$ の値は大きくなり 1 に近づき空間分布の乖離は大きい。一方負の自己相関が高い場合は、隣接する地区の z_i が異符号となる可能性が高く、 $\delta_{ij}(G)z_i z_j$ は負となるために、 $\phi(G, S, D)$ の値は -1 に近づき空間分布の乖離は小さい。以上のように、 $\phi(G, S, D)$ は道路網のグラフ構造を考慮した総体的な空間分布乖離指標と考えることができる。

式(7)の $\phi(G, S, D)$ は、Moran の空間的自己相関の I 係数に一致している。 I 係数は、多数の標本を有する 1 種類の空間分布における自己相関の有無を検定するための統計量として提案された。田中 (2000) は都市活動の空間分布に関して、拡散型等の非等方的な自己相関仮説の検定を I 係数を用いて実施している。一方本論文では、地区総数、隣接地区数がともに少数のケースを対象としており、空間的自己相関の検定ではなく、自己相関により定義される 2 種類の空間分布の乖離の評価を目的としている点に相違が存在する。

2.4 近隣地区を考慮した空間分布乖離指標の拡張

2.3 の空間分布乖離指標の定義(式(7))において、 δ_{ij} が正となるのは、グラフ G 上で地区 j が地区 i と隣接している(地区 i と地区 j が道路リンクで直接結

合されている) 場合に限定されている。これは、地区間での補完機能が、道路網上で隣接した地区間に限定されていることを意味する。しかし、機能補完の範囲を隣接地以外の近隣地区に拡張する場合、空間分布の乖離指標の定義をそれぞれ以下のように修正する必要がある。

$$\phi(G, S, D) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in X, j \neq i} \delta_{ij}(G) z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2}$$

$$x_i = p_S^i - p_D^i, x_j = p_S^j - p_D^j$$

$$z_i = x_i - \bar{x}$$

$$\delta_{ij}(G) = \begin{cases} 1/|N_i| & (j \in N_i) \\ 0 & (j \notin N_i) \end{cases}$$

N_i : 地区 i の近隣地区集合 (8)

極端なケースとして、 $N_i = X \setminus \{i\}$ (i 以外のすべての地区が i の近隣地区集合に含まれる) を想定する。このとき $\delta_{ij}(G)$ は次式のように与えられる。

$$\delta_{ij}(G) = \frac{1}{|N_i|} = \frac{1}{n-1} \quad \forall j = i \quad (9)$$

このとき総体的空間分布乖離指標 $\phi(G, S, D)$ は

$$\phi(G, S, D) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in X, j \neq i} z_i z_j}{(n-1) \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (10)$$

となる。このとき $\phi(G, S, D)$ はグラフ G の構造に依存しない。

Cliff and Ord (1973) は、 I 係数を用いた空間自己相関検定において前提とする標本抽出方法として、normalization と randomization の 2 種類を提示している。このうち randomization では、同一領域上で x_i をランダムに並びかえたと仮定する。このとき I 係数 ($\phi(G, S, D)$) の実現値の期待値は $-1/(n-1)$ となる。一方 $N_i = X \setminus \{i\}$ の場合、 $\phi(G, S, D)$ はグラフ G 上での値の並び替えに関わらず常に式(10)で与えられるため、期待値に関して以下の関係が成立する。

$$E[\phi] = \frac{n! \phi(G, S, D)}{n!} = -\frac{1}{n-1} \quad (11)$$

したがって、空間分布に関わらず $\phi(G, S, D) =$

$-1/(n-1)$ となる。式(11)は、他のすべての地区が近隣地区集合に含まれることにより、 $\phi(G, S, D)$ はグラフ構造及び相対アバンダンスに依存せず一定値となることを示している。

3. 道路リンクの空間分布乖離補正に対する貢献度指標

3.1 空間分布乖離補正に対する貢献度指標

巨大災害時には、人の活動と都市機能の空間的な乖離が被害の程度を大きく左右する可能性がある。例えば、都市内の医療機関の分布と人口の分布に大きな乖離が存在する場合、災害時において負傷者の搬送の障害となり得る。このとき、医療サービスの供給の不足する地区と充足する近隣地区が接続されていれば、市民が医療機関まで私的交通手段により負傷者を搬送できる可能性が高いと考えられる。このように、道路網は空間的分布の乖離を補完し、災害時における被害を最小限にとどめる役割が求められると考えられる。

広域的な災害時には、残存道路網によって到達可能な近隣地区に、十分なサービスが存在しないような状況を避けなければならない。したがって、機能的孤立を回避するために重要な道路リンクを特定することは防災上有効である。すなわち、空間分布の乖離の補完性に対する都市内におけるそれぞれのリンクの貢献度を評価する必要がある。防災上有効なリンクをあらかじめ特定することができれば、都市内の道路網においてどの地区間の道路をより優先的に整備・補修すべきかを決定する際の指標となり得る。また、重要なリンクのみで構成された道路網に、第2章で示した TI による頑健性評価を実施することで、より信頼度の高い評価が可能となる。そこで、本章では第3章において提案した空間分布乖離指標を基に、個別の道路リンクの空間分布乖離補完性に対する貢献度を評価するための方法論を提案する。

式(7)に示したように、空間分布乖離指標 $\phi(G, S, D)$ は、グラフ構造を考慮した個々のノードペアごとの自己相関項を集計している。そこで、現状の道路網においてリンクが存在するノードペアについて、リンクが全く存在しない場合の空間分布乖離指標と、現状における指標 $\phi(G, S, D)$ の差によって当該ノード間のリンクの貢献度を定義する。

グラフ G からノード i と j を結ぶ全てのリンクを取り除いたグラフを $G \setminus \{ij\}$ と表す。 i, j を連結するリンクの空間分布乖離の補完性に対する貢献度 $C(ij, G)$ を以下のように定式化する。

$$C(ij, G) = \phi(G \setminus \{ij\}, S, D) - \phi(G, S, D) \quad (12)$$

$C(ij, G)$ は少なくとも 1 本のリンクが存在するそれぞれのノードのペアによって定義される。上式はノード i と j を結ぶリンクの貢献度がグラフ G によって異なりうることを示している。

$C(ij, G)$ はグラフ G の構成段階においてノード i と j を結ぶリンクが最後に加えられると仮定した場合の貢献度である。 $C(ij, G)$ が正の値をとる場合、 ij 間のリンクを加えることによって空間分布の乖離を和らげることになる。したがって、 i と j を結ぶリンクは災害時において補完性が高く有効であるといえる。一方、 $C(ij, G)$ が負の値をとる場合は、空間分布の乖離はさらに増すこととなり、防災上の観点からは i と j を結ぶリンクは有効性が低いといえる。

グラフ G 上において $C(ij, G)$ の値が大きいリンクのみ抽出することで、重要なリンクのみで形成された道路網を示すことが可能である。すなわち、 $C(ij, G)$ が一定の値以上となるリンクのみから形成されるグラフは、都市全体の需要・供給の空間分布の乖離の補完性に対する貢献度の高い道路リンクを示している。ここで以下のように総体的有効グラフ $G_O(t)$ を定義する。

$G_O(t) = (X, A_t), A_t = \{a_{ij} \mid a_{ij} \in A, C(ij, G) \geq t\}$ (13)
 t の値が大きくなるほど $G_O(t)$ のリンク数は減少する。また、 $t \leq \min C(ij, G)$ であれば $G_O(t)$ は元の道路網グラフ G に一致する。

3.2 貢献度の相対評価

3.1 においては、空間分布の乖離の補完性に対する道路リンクの貢献度 $C(ij, G)$ を提案した。 $C(ij, G)$ の値は、各道路リンクの乖離補完性の程度を示す指標であり、値が大きいほど災害時における重要度が高いといえる。 $C(ij, G)$ はグラフ G の構成段階においてノード i と j を結ぶリンクが最後に加えられると仮定した場合の貢献度である。すなわち、災害時においても道路網の大半が維持されていることが前提となっている。したがって、貢献度の高いリンクのみで構成された総体的有効グラフ $G_O(t)$ は総体的な絶対評価であるため、都市全体においてどの地区間の道路をより優先的・重点的に整備すべきか決定する指標として有効であると考えられる。

実際の巨大災害時においては、道路網が各所で寸断・閉鎖されていることが予想される。しかしながら、定義上 $C(ij, G)$ の値は道路網が通常通り機能すると想定した場合のリンクの貢献度である。そのため、グラフ G 上において $C(ij, G)$ の値が大きいリンクのみを抽出したグラフによる総体的な絶対評価は、災害直後に関してはその信頼度は低いと考えられる。しかし、事前に破壊後の道路ネットワークの形態を予測することは困難である。そこで、 $C(ij, G)$ を基に個別のノードに対する貢献度が高いリンクを抽出す

ることによって、局所的な相対評価手法を以下に 2 つ提案する。

- ① 各ノードにおいて、 $C(ij, G)$ の値が上位 k 番目以内のリンクのみをそれぞれ抽出し、それらのリンクのみで構成されたグラフを作成する。このグラフを局所的有効グラフ 1 と呼ぶこととし、 G_{L1} と表記する。
- ② 各ノードについて、 $C(ij, G)$ の値が最小のリンク同士で接続されたペア以外を取り除いたグラフを評価する。すなわち、あるノードに接続されているリンクの内、当該ノードに対する貢献度の最も低いリンクが、隣接したノードにおいても貢献度が最も低い場合、そのリンクは災害時における重要度が低いと判断し、そのリンクを取り除いたグラフを作成する。このグラフを局所的有効グラフ 2 と呼ぶこととし、 G_{L2} と表記する。

総体的有効グラフ $G_O(t)$ が、都市全体の効率性を考慮した道路網計画の中での優先順位の決定が可能であるのに対し、①で提案した局所的有効グラフ 1 G_{L1} は、地区間の公平性を考慮した道路網計画において有効であると考えられる。また、②で提案した局所的有効グラフ 2 G_{L2} は、TI 計算用のグラフの定義として有効であると考えられる。 G_{L2} は災害時に地区の孤立が回避できたとしても補完性の小さいリンクを除いているため、 G_{L2} を対象に算出した TI は、現存するすべてのリンクを対象としたグラフ G の TI よりも、より信頼度の高い都市の頑健性評価が可能と考えられる。したがって、これら 3 種のグラフは目的に応じて使い分けが可能であると考えられる。

4. 空間分布乖離指標と貢献度指標の適用例

4.1 山口県宇部市への適用

本章では、2. 及び 3. で提案したこれらの手法を、山口県宇部市（及び阿知須町）に実際に適用し、本論文で提案した災害時における都市の頑健性評価手法の妥当性を検討する。空間分布の乖離の評価対象とするサービスとして、災害時において最も重要な機能の 1 つである医療サービスに着目する。また、医療サービスの供給能力としては病院数を、需要としては人口を対象とする。人口分布については、夜間人口、昼間人口、高齢者人口の 3 種類について相互比較を試みる。

人口、病院数のデータは、平成 7 年の国勢調査データと平成 8 年の事業所・企業統計を組み合わせた地域メッシュ統計リンク結果（以下地域メッシュ統

計)を使用した。道路リンクについては、宇部市内の国道・県道・主要地方道・幅員13m以上の道路を対象とした。

Fig.3は、宇部市の実際の道路網をノードとリンクによって構成されるグラフにモデル化したものである。

4.2 適用結果及び考察

以下では、各人口データに関して、式(7)の空間分布乖離指標及び式(12)の貢献度指標を示す。まず、夜間人口を対象とした場合、各地区の相対アバンダンス及び z_i の値をTable 1に示す。空間分布乖離指標 $\phi(G, S, D)$ の値は0.053である。また個別のリンクの貢献度 $C(ij, G)$ をFig.4に示す。この結果より、地区⑤と地区⑧、地区⑭と地区⑮を結ぶリンクの貢献度が高いことが明らかとなった。すなわち、これらのリンクは空間分布の乖離を補完する機能が高いと考えられる。一方、地区⑯、地区①、地区②を結ぶリンクと、地区④、地区⑤、地区⑥を結ぶリンクの $C(ij, G)$ の値は小さい。これは、前者は医療サービスの充足する地区同士、後者は不足する地区同士が接続されているため、空間分布乖離の補完に対する貢献度が低くなったと考えられる。

次に、昼間人口を対象とした場合の各地区の相対アバンダンス及び z_i の値をTable 2に示す。 $\phi(G, S, D)$ の値は0.3962となり、夜間人口における $\phi(G, S, D)$ の値(0.053)より大きい。したがって、夜間よりも昼間の方が空間分布の乖離が大きいといえる。これは、通勤、通学によって、比較的病院の充足した地区の人口が、病院の不足する地区へと大きく移動しているためであると考えられる。

また、各道路リンクの $C(ij, G)$ の算出結果をFig.5に示す。夜間人口と比較すると、昼間時、地区①、地区②からは多くの人口が流出しており、両地区のサービス供給能力の余剰を拡大する結果となっている。また、昼間における地区⑦への人口の移入が大きいため、夜間は充足していた($z = -0.0122$)サービスが不足する($z = 0.0757$)状態となり、同じく不足する地区④と接続するリンクの補完に対する貢献度は低いものとなったと考えられる。

最後に、高齢者人口を対象とした場合、各地区の相対アバンダンス及び z_i の値はTable 3のようになり、 $\phi(G, S, D)$ の値は-0.0626となった。したがって、夜間人口(総人口)を対象とした場合と比較して、空間分布の乖離は小さいと考えられる。これは、高齢者が病院の立地の多い地区の近隣に比較的多く居住していることによるものと考えられる。また、各道路リンクの $C(ij, G)$ の算出結果をFig.6に示す。貢献度の高い道路リンク、低い道路リンクの組み合わせは、Fig.4の夜間人口の場合と類似している。

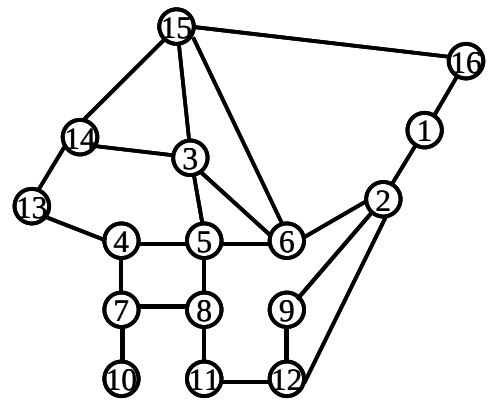


Fig.3 Road Network in Ube City

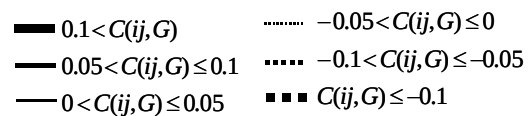
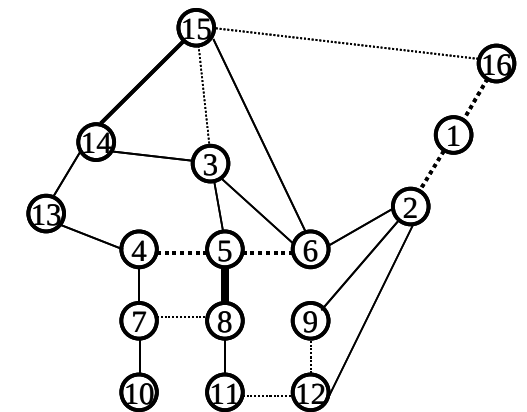


Fig.4 Contribution Index in the Case of Nighttime Population

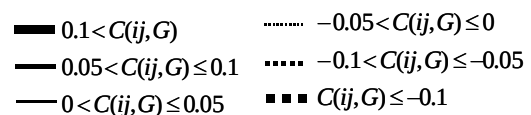
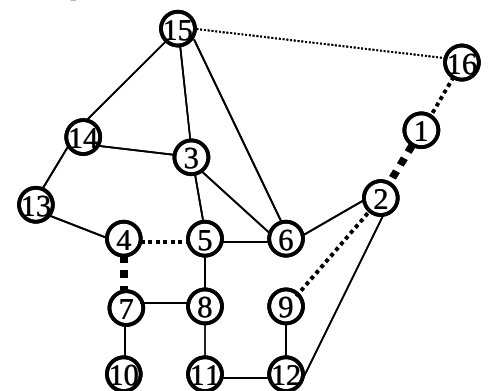


Fig.5 Contribution Index in the Case of Daytime Population

Table 1 Relative Abundance and Z_i in the Case of Nighttime Population

District	Nighttime Population	P_D	Number of Hospitals	P_S	Z_i
①	9013	0.0525	3	0.1429	-0.0904
②	16675	0.0971	3	0.1429	-0.0458
③	5981	0.0348	1	0.0476	-0.0128
④	12626	0.0735	0	0.0000	0.0735
⑤	13572	0.0790	0	0.0000	0.0790
⑥	6777	0.0394	0	0.0000	0.0394
⑦	6091	0.0355	1	0.0476	-0.0122
⑧	19738	0.1149	4	0.1905	-0.0756
⑨	9240	0.0538	1	0.0476	0.0062
⑩	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
⑪	18426	0.1073	2	0.0952	0.0120
⑫	6553	0.0381	0	0.0000	0.0381
⑬	16263	0.0947	2	0.0952	-0.0006
⑭	22409	0.1304	1	0.0476	0.0828
⑮	1498	0.0087	1	0.0476	-0.0389
⑯	6926	0.0403	2	0.0952	-0.0549
Summation	171788	1	21	1	0

Table 2 Relative Abundance and Z_i in the Case of Daytime Population

District	Daytime Population	P_D	Number of Hospitals	P_S	Z_i
①	6535	0.0380	3	0.1429	-0.1049
②	12130	0.0705	3	0.1429	-0.0723
③	5007	0.0291	1	0.0476	-0.0185
④	15203	0.0884	0	0.0000	0.0884
⑤	9746	0.0566	0	0.0000	0.0566
⑥	2635	0.0153	0	0.0000	0.0153
⑦	21215	0.1233	1	0.0476	0.0757
⑧	30357	0.1765	4	0.1905	-0.0140
⑨	6990	0.0406	1	0.0476	-0.0070
⑩	2310	0.0134	0	0.0000	0.0134
⑪	16567	0.0963	2	0.0952	0.0011
⑫	3706	0.0215	0	0.0000	0.0215
⑬	15002	0.0872	2	0.0952	-0.0080
⑭	16130	0.0938	1	0.0476	0.0461
⑮	1942	0.0113	1	0.0476	-0.0363
⑯	6564	0.0382	2	0.0952	-0.0571
Summation	172039	1	21	1	0

Table 3 Relative Abundance and Z_i in the Case of Elderly Population

District	Elderly Population	P_D	Number of Hospitals	P_S	Z_i
①	1421	0.0502	3	0.1429	-0.0926
②	3396	0.1201	3	0.1429	-0.0228
③	578	0.0204	1	0.0476	-0.0272
④	2192	0.0775	0	0.0000	0.0775
⑤	2000	0.0707	0	0.0000	0.0707
⑥	800	0.0283	0	0.0000	0.0283
⑦	1542	0.0545	1	0.0476	0.0069
⑧	3409	0.1205	4	0.1905	-0.0700
⑨	1371	0.0485	1	0.0476	0.0009
⑩	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
⑪	3538	0.1251	2	0.0952	0.0298
⑫	1173	0.0415	0	0.0000	0.0415
⑬	1931	0.0683	2	0.0952	-0.0270
⑭	2976	0.1052	1	0.0476	0.0576
⑮	267	0.0094	1	0.0476	-0.0382
⑯	1691	0.0598	2	0.0952	-0.0355
Summation	28285	1	21	1	0

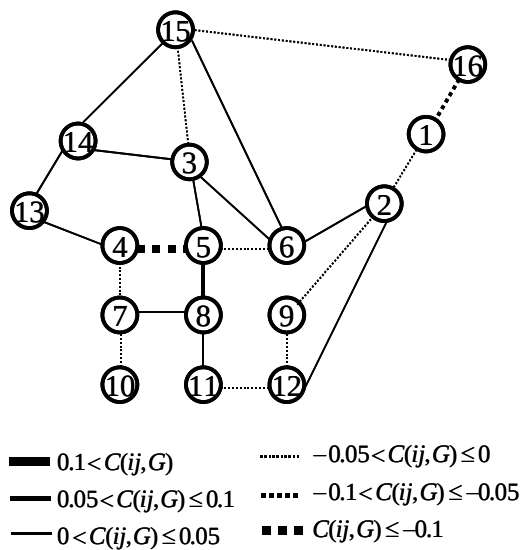


Fig.6 Contribution Index in the Case of Elderly Population

5. おわりに

以上、本論文では、人口活動や医療機関等の空間分布の乖離に対する、道路網の形態による補完性を考慮した都市の災害時頑健性評価手法を提案した。まず、機能的孤立の発生回避という観点から、道路網上での地区の隣接関係を反映した総体的な空間分布乖離指標 $\phi(G, S, D)$ を提案した。その上で、現状の道

路網においてリンクが存在するノードペアについて、リンクが全く存在しない場合の空間分布乖離指標と、現状における指標 $\phi(G, S, D)$ の差によって、当該ノード間のリンクの貢献度 $C(ij, G)$ を提案した。さらにこれらの評価指標を山口県宇部市に適用し、都市の災害に対する頑健性を評価する上での知見を導出した。

本論文で提案した都市の頑健性評価手法は、都市における今後の社会基盤整備の方向性を決定する上で有用なツールとなり得ると考えられる。

謝 辞

本論文は、京都大学防災研究所共同研究（平成 13 年度－14 年度）の補助を受けて行った研究の成果を含んでいる。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 梶谷義雄・岡田憲夫・多々納裕一（2002）：災害復興過程における人間活動分布の時空間分析に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.19, No.2, pp.305-312.
- 田中和子（2000）：都市空間分析，古今書院。
- 前川和彦・岡田憲夫（1997）：「ニッチ重なり合い」を考慮した都市災害リスクの評価法に関する基礎的考察，土木計画学研究・論文集，Vol.14, pp.341-352.
- Cliff A. D. and Ord J. K.（1973）：Spatial Autocorre-

lation, Pion.

Haining, R. (1990) : Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences, Cambridge University Press.

Pianka, E. R. (1973) : The Structure of Lizard Communities, Ann. Rev. Ecol. Syst., Vol.4, pp.53-74.

付 録

対称性の証明

式(7)において z_i^2 及び $z_i z_j$ は, 空間分布 S と D を互いに入れ替えても変化しない。したがって, 対称性は満足される。

リンク数に対する非依存性の証明

式(7)によって定義される $\phi(G, S, D)$ は, グラフ G 上での隣接地区数に依存するが, リンクの本数には依存しない。したがって, リンク数に対する非依存性は満足される。

相対アバンダンスに対する単調性の証明

$$\begin{aligned} \phi(G, S, D) &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in X, j \neq i} \delta_{ij}(G) z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k \in \Gamma_i(G)} \frac{n(p_S^i - p_D^i)(p_S^k - p_D^k)}{2\gamma}}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)} \quad (\text{A.1}) \end{aligned}$$

(s^i, d^i) と (s^j, d^j) を入れ替えても式(A.1)の分母は変化しないため, $\phi(G, S, D)$ と $\phi(\hat{G}, S, D)$ の差は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} &\phi(\hat{G}, S, D) - \phi(G, S, D) \\ &= \frac{\sum_{k \in \Gamma_i(G)} \frac{n(p_S^j - p_D^j - p_S^i + p_D^i)(p_S^k - p_D^k)}{2\gamma}}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)^2} \\ &\quad + \frac{\sum_{k \in \Gamma_i(G)} \frac{n(p_S^k - p_D^k)(p_S^j - p_D^j - p_S^i + p_D^i)}{2\gamma}}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)^2} \\ &\quad + \frac{\sum_{l \in \Gamma_j(G)} \frac{n(p_S^i - p_D^i - p_S^j + p_D^j)(p_S^l - p_D^l)}{2\gamma}}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)^2} \\ &\quad + \frac{\sum_{l \in \Gamma_j(G)} \frac{n(p_S^l - p_D^l)(p_S^i - p_D^i - p_S^j + p_D^j)}{2\gamma}}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)^2} \\ &= \frac{n}{\gamma} \frac{(-p_S^i + p_S^j + p_D^i - p_D^j) \left(\sum_{k \in \Gamma_i(G)} p_S^k - \sum_{l \in \Gamma_j(G)} p_S^l \right)}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)^2} \\ &\quad + \frac{n}{\gamma} \frac{(-p_S^i + p_S^j + p_D^i - p_D^j) \left(- \sum_{k \in \Gamma_i(G)} p_D^k + \sum_{l \in \Gamma_j(G)} p_D^l \right)}{\sum_{i=1}^n (p_S^i - p_D^i)^2} \quad (\text{A.2}) \end{aligned}$$

式(6)の条件を満足するとき, 式(A.2)は正となる。したがって, $\phi(\hat{G}, S, D)$ は $\phi(G, S, D)$ よりも大きく, 相対アバンダンスに対する単調性は満足される。

A Study on Quantitative Evaluation of Compensation Effect for Polarization of Spatial Distributions by Road Network

Hiroyuki Sakakibara*, Norio Okada, Kohei Furukawa* and Takeshi Katayama**

* Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University

** Oriental Consultants

Synopsis

In catastrophic disasters, polarization of spatial distributions of demand and supply of a necessary service can become a risk factor of a city. On the other hand, well-designed road network can mitigate such polarization. In order to evaluate robustness of a city against disasters taking compensation effect of road network into account, we propose the index for polarization of spatial distributions, and quantify the difference of compensation effect depending on the design of a network. The proposed methodology is applied to an actual city.

Keywords: Robustness of a City, Polarization of Spatial Distributions, Compensation Effect