道路網による空間分布乖離の補完効果の定量的評価に関する研究

オリエンタルコンサルタンツ　正会員　○片山　武　　山口大学工学部　正会員　榊原弘之

1．はじめに

巨大災害時においては，都市内の各地区が孤立することなく，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．本研究では，道路網構造を考慮した空間分布乖離指標と，その指標に基づいた道路リンクの貢献度評価指標を提案する．

2．空間分布乖離指標の提案

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のみでなくその需要量も併せて考慮しなければならない．需要と供給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．従って，災害時における都市の頑健性を評価するためには，空間分布の乖離を示す指標が必要となる．空間分布の乖離・重なり合いの評価指標としてニッチ重なり合い指標が提案されている[1]．しかし，これまでに提案されているニッチ指標では，領域間の隣接関係を考慮することはできない．そこで本研究では，ニッチ指標の基本的概念を考慮しつつ，道路網グラフ上の隣接関係を反映した空間分布乖離評価指標を提案する．

サービスの供給能力の分布をS，需要量の分布をDと表す．地区i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$i(i=1,2,\dots,n)$における供給と需要の相対アバンダンスはそれぞれ次式のように定義される．

$$p_S^i=\frac{s^i}{\sum_{i\in X}s^i},\quad p_D^i=\frac{d^i}{\sum_{i\in X}d^i} \tag{1}$$

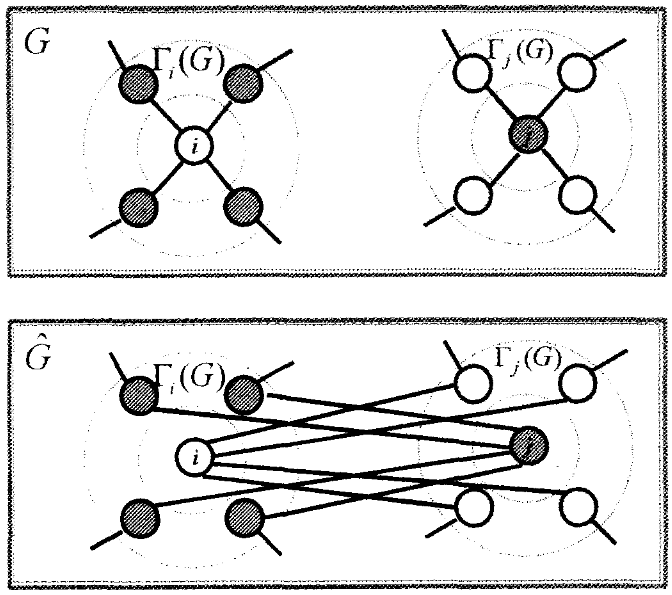
道路網グラフG上での空間分布S,Dの評価指標を$\phi(G,S,D)$と表す．$\phi(G,S,D)$は以下の(a)～(d)の性質を満足する必要があると考えられる．

(a)正規性

$\phi(G,S,D)$は-1以上1以下の値をとる．

(b)対称性

分布Sと分布Dを交換しても評価指標は等しい．



図－1　Gと$\hat{G}$の関係

(c)リンク数に対する非依存性

$\phi(G,S,D)$は地区ij間のリンクの本数に依存しない．

(d)相対アバンダンスに対する単調性（図－1参照）

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

- $\Gamma_i(G)$の方が$\Gamma_j(G)$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

- $\Gamma_i(G)$よりも$\Gamma_j(G)$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，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．

以上の性質は以下のように定式化することができる．

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

ここで

- $\Gamma_i(G)=\Gamma_j(\hat{G}),\Gamma_j(G)=\Gamma_i(\hat{G})$
- 地区xがiあるいはjではなく，また$\Gamma_i(G)$及び$\Gamma_j(G)$に含まれない$\Leftrightarrow\Gamma_x(G)=\Gamma_x(\hat{G})$　(2)

本研究では，グラフG上での空間分布S,Dの乖離評価指標$\phi(G,S,D)$を以下のように定式化する．

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

$$z_i=p_S^i-p_D^i,\quad z_j=p_S^j-p_D^j$$

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

γ：直接連結されたノードペア数　(3)

地区iとjがグラフ$G(=(X,A))$上で隣接している場合$\delta_{ij}(G)$は正となり，隣接していない場合 0 となる．$\phi(G,S,D)$は先の(a)～(d)の条件を満足する指標である．

空間分布の乖離が大きい場合，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 に近づく．空間分布の乖離が小さい場合は，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 に近づく．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．

(3)式の$\phi(G,S,D)$は，Moran の空間的自己相関の I 係数[2)]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．本研究では，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評価を目的とする点に相違が存在する．

3．道路リンクの貢献度評価

機能的孤立の発生回避という観点から重要な道路リンクを特定するためには，空間分布の乖離の補完に対する都市内における個別のリンクの貢献度を評価する必要がある．そこで 2．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の補完に対する貢献度を評価するための方法論を提案する．

(3)式に示したように，空間分布乖離指標は，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．

$$C(ij,G)=\phi(G\setminus\{ij\},S,D)-\phi(G,S,D)\quad(4)$$

$C(ij,G)$は少なくとも 1 本のリンクが存在するノードペアについて定義される．上式はノードiとjを結ぶリンクの貢献度がグラフGに依存して決定されることを示している．

$C(ij,G)$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が緩和されることになる．従って，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，$C(ij,G)$が一定値以上となるリンクのみ抽出することにより，都市全体の需要・供給の空間分布の乖離の補完に対する貢献度の高い道路リンクを示すことが可能である．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．

$$G_O(t)=(X,A_1),A_1=\{a_{ij}\mid a_{ij}\in A,C(ij,G)\geq t\}\quad(5)$$

閾値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．$G_O(t)$は総体的な評価指標であるため，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．実際の都市に対する指標の適用例の説明については講演時に譲る．

参考文献

1) 梶谷義雄，岡田憲夫，多々納裕一：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, 2002.
2) Haining, R: Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences, Cambridge University Press, 1990.