

都市構造を考慮したトポロジカルインデックスによる道路網評価*

Evaluation of Road Network by Using Topological Index Urban Structure Considered *

榎原 弘之**, 梶谷 義雄***, 岡田 憲夫****, 片山 武*****, 古川 浩平*****

By Hiroyuki Sakakibara**, Yoshio Kajitani***, Norio Okada****, Takeshi Katayama*****, Kohei Furukawa*****

1. はじめに

都市の道路網を巨大災害時のパフォーマンスの観点から評価する場合、道路網全体の形態論的な指標が必要となると考えられる。著者らは以前、分子科学における同位体の分子構造を分類するための指標であるトポロジカルインデックス（以下TI）を道路網の構造評価に用いることを提案している¹⁾。

しかし、TIの値は都市構造の影響を受けることから、従来のTIを異なる都市の道路網の比較評価に適用することは困難である。本論文では、都市構造の違いを考慮した上でTIによる道路網評価を実施するための方法論を提案するとともに、その手法を実際の都市に適用し、分析を実施する。

2. TIによる道路網の形態論的評価

(1) TI の定義

TI は元来、分子化学において異性体を分類するための指標として Hosoya²⁾によって定義された。以下に TI の定義を示す。まずグラフ G は次のように定義される。

$$G = (X, A) \quad (1)$$

ここで X はノードの集合、 A はリンクの集合である。またノード数を n 、リンク数を l とする。グラフ G の中から、隣り合っていない k 本のリンクを選ぶ組み合わせの数を非隣接数と呼び、 $P(G, k)$ と表す。ただし、 $P(G, 0) = 1, P(G, 1) = l$ とする。 k として取りうる最

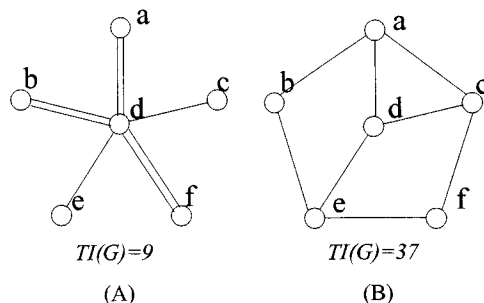


図-1 集中的道路網と分散的道路網

大の自然数 m は、ノード数 n が偶数の場合 $\frac{n}{2}$ 、奇数の場合は $\frac{n-1}{2}$ となる。このときグラフ G の TI の値 ($TI(G)$) は次式で定義される。

$$TI(G) = \sum_{k=0}^m P(G, k) \quad (2)$$

(2) TI と災害時の孤立回避性の関連性

阪神・淡路大震災においては、高速道路の倒壊や落橋、沿道の建物の倒壊に伴う街路閉塞などによって、道路網は機能麻痺に陥った。このような巨大災害により道路網が寸断された場合、医療機関へのアクセスや避難ルートの確保の観点から、近隣地区のいずれかへの連絡路が確保されることが重要である。すなわち、個々の地区が孤立することをできる限り回避し得る道路網ほど、巨大災害に対し総体的に頑健であると考えられる。

ノード数、リンク数が一定で、リンクが特定方向（例えば、中心都市から放射状）のみに集中している道路網と、環状方向も含めてリンクが分散的に存在する道路網を考える（図-1）。(A)の道路網は、リンクが密なノードと疎なノードが存在する。その結果、ノード c 、 e はリンクが1本しかないため、巨大災害が発生した場合、孤立する可能性が高い。一方(B)の道路網はリンクが比較的バランス良く配置されているため、ノードが孤立する可能性は低いと

*キーワード：防災計画、交通網計画、巨大災害

**正員、博（工）、山口大学工学部社会建設工学科
(山口県宇部市常盤台 2-16-1, Tel. 0836-85-9355,
Fax 0836-85-9301)

***学生員、修（工）、京都大学大学院工学研究科
(京都市左京区吉田本町, Tel. 075-753-5070)

****正員、工博、京都大学防災研究所
(京都府宇治市五ヶ庄, Tel. 0774-38-4035)

*****学生員、山口大学大学院理工学研究科
(山口県宇部市常盤台 2-16-1, Tel. 0836-85-9355)

*****正員、工博、山口大学工学部
(山口県宇部市常盤台 2-16-1, Tel. 0836-85-9327)

考えられる。従って巨大災害時においては、(B)のように分散的に整備された道路網の方が、(A)のように集中的に整備された道路網と比較してノードが孤立する可能性が低く、近隣のノード間の交通路が部分的に確保されやすい。

2つのグラフのTIを比較すると、(A)の集中型のグラフは $TI(G)=9$ であるのに対し、(B)の分散型のグラフは $TI(G)=37$ である。一般に、ノード数、リンク数が一定の道路網では、分散性が高いほどTIの値は大きくなる。以上より、巨大災害時の孤立回避性の基準となる道路網の分散性を定量的に評価する指標として、TIを用いることができる。

3. シミュレーションによる達成可能TI分布の生成

(1) 都市構造とTIの関連性

筆者らの既往研究¹⁾においては、主として同一の都市を対象として、異なった道路網の分散性・集中制を評価するための指標としてTIを用いている。一方異なった都市の道路網のTIを比較する場合は、各都市の都市構造の影響を考慮する必要がある。都市構造の構成要素としてはノード数とノードの地理的配置の2点が挙げられる。

本論文において、グラフの各ノードは面的な広がりを持った地区を代表している。各地区間の隣接関係を次のような行列で定義する。

$$A_C = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$a_{ij}=1$ (地区*i, j*が隣接している場合)

$a_{ij}=0$ (地区*i, j*が隣接していない場合)

この隣接関係は、地区を代表するノードによって構成されるグラフによって表現することも可能である。以下ではこのグラフを隣接関係グラフ G_A と呼び、実際の道路網を表すグラフ G_R と区別する。

G_A はグラフ理論における平面的グラフ³⁾であるため、平面上のグラフに関する四色定理³⁾が成立する。すなわち、 G_A 上で隣接するノードが同じ色にならないように彩色する場合、必要な色は最大で4色である。従って、ノードの集合*X*を、隣接したノードが同じ部分集合に含まれないように分割した場合、必

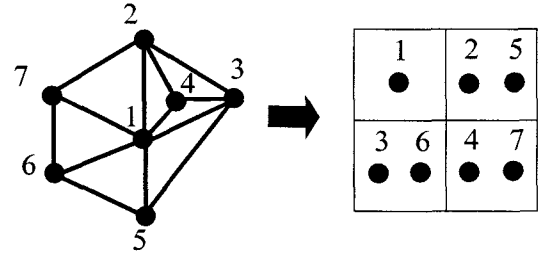


図-2 平面的グラフのノードの分割

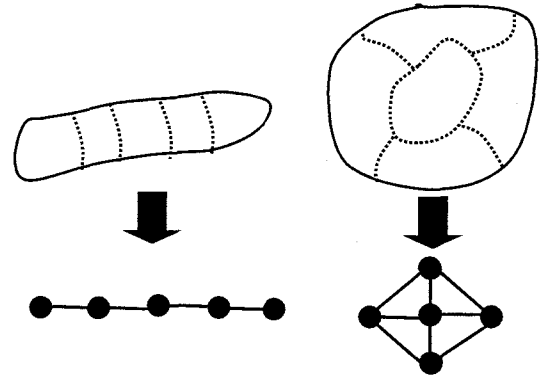


図-3 ノードの地理的配置による G_A の違い

要な分割の数は最大で4つである(図-2)。

ノード数*n*が等しい場合、4つの部分集合に属するノードの数の差が小さいほど、 G_A 上で隣接するノードのペア数(G_A のリンク数)は大きくなる。ノード数*n*が $n=4m+k$ として表されるとする(*m, k*は整数、 $k=0,1,2,3$)と、隣接するノードのペア数*p*が最大となるのは、*k*個の部分集合に*m+1*個のノードが分類され、 $(4-k)$ 個の部分集合に*m*個のノードが分類された場合である。従って*p*の上限は次式で与えられる。

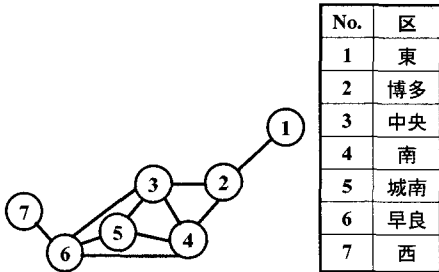
$$p \leq (m+1)^2_k C_2 + (m+1)m(4-k)k + m^2_{4-k} C_2 \quad (3)$$

(3)式は、ノード数が与えられた場合における G_A のリンク数の上限を示す。ただし平面的グラフに関するクラトウスキーの定理³⁾の存在により、(3)式の右辺に等しいリンク数の平面的グラフ G_A が存在するとは限らない。

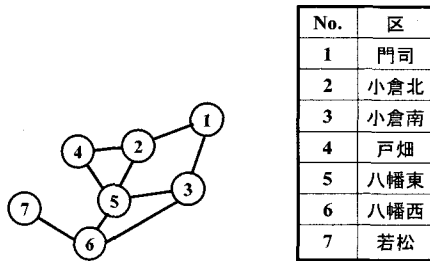
(3)式の右辺は*m*に対して単調増加であることから、ノード数が多くなるほど G_A 上で隣接するノード(都市内で平面的に隣接する地区)のペア数が増加する傾向にある。その結果、道路網のグラフ G_R のリンク総数が増加し、TIの値も大きくなる傾向が存在する。

表－1 各都市の達成可能TI分布の比較

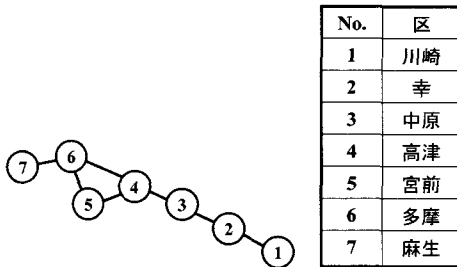
都市名	福岡市	北九州市	広島市	神戸市	京都市	川崎市	千葉市	仙台市	札幌市
ノード(区)の数	7	7	8	9	11	7	6	5	10
平均	41.50	42.78	123.91	179.14	1250.26	23.70	28.15	14.78	533.63
標準偏差	21.98	22.93	72.55	117.25	783.90	14.62	14.26	6.90	336.51



図－4 福岡市の G_A



図－5 北九州市の G_A



図－6 川崎市の G_A

ノード数が同数の場合でも、ノードの地理的配置によって G_A 上の隣接ノードペア数は変化する。図－3の例においては、左側の線状の都市と、右側の塊状の都市では G_A が異なり、実現可能な道路網の形態も異なる。この場合、左右の都市が元来有している TI のポテンシャルが異なると考えることができる。

(2) シミュレーションによる達成可能TI分布の生成

(1) において説明したように、TI の値にはノー

ド数及び地形による制約が存在する。そこで、 G_A において隣接している（リンクによって連結されている）ノード間のみ、 G_R 上でリンクが設定されうとを考え、都市が潜在的に達成し得る TI の分布を生成させる。具体的には以下の手順に従う。

- ① ノードによって代表される地区の隣接関係をグラフ G_A により表す。
- ② ①のグラフ G_A において連結されている（互いに隣接している）ノードの各ペアについて、リンクの有無（あるいはリンクの本数）を乱数により決定する。
- ③ ②で得られたグラフについて TI を計算する。
- ④ ①～③のプロセスを繰り返し、当該都市の TI の分布を得る。

シミュレーションの結果得られる分布を達成可能 TI 分布と呼ぶこととする。

表－1は、政令指定都市のうち、人口が 200 万人以上の東京、横浜市、名古屋市、大阪市を除いた 9 都市について、達成可能 TI 分布の平均と標準偏差を示したものである。各都市においては区をノードとして定義している。また隣接ノード間の可能リンク数を 0 本、1 本、2 本の等確率とし、試行回数は 1000 回とした。図－4～図－6は、ノード（区）が同数の福岡市、北九州市及び川崎市の隣接関係グラフ G_A を示している。これらの結果より、以下の考察が可能である。

- ・ ノードの数が大きい都市ほど、達成可能 TI 分布の平均値が大きくなる傾向が存在する。これは、先述したように、一般にノード数が多くなるほど G_A 上で隣接するノードのペアが増加することによる。
- ・ ノード数がともに 7 個の 3 都市のうち、川崎市は平均値が非常に小さく、ノード数 6 の千葉市をも下回っている。これは、川崎市が潜在的に達成し得る TI の水準が他の都市よりも低いことを意味

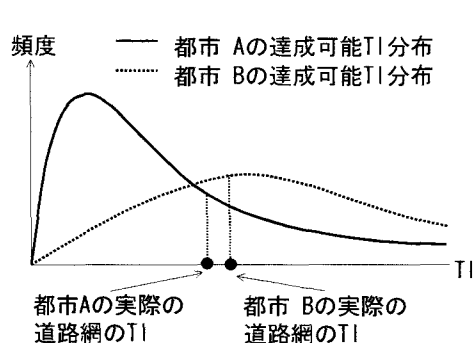


図-7 達成可能 TI 分布を考慮した TI の評価

している。このような差異が生じる理由は、川崎市の地理的形状に起因している。図-6に示すように、川崎市は各区が带状に分布しており、隣接ノードペア数が少ない。一般に TI の値は、ノードが塊状に分布する都市では大きく、带状に分布する都市においては小さくなる。

4. 都市間の TI 達成水準の比較

3. において生成させた達成可能 TI 分布に対する実際の TI の超過確率を求めることにより、都市のポテンシャルに対する実際の道路網の達成水準を知ることができる。図-7の例においては、都市 B の達成可能 TI 分布の方が平均値が大きい。これは、都市 B は潜在的に都市 A よりも高い TI を実現し得ることを意味している。一方実際の道路網の TI に対する超過確率を比較すると、都市 A の方が小さい。この結果、都市 B の方が TI の値が大きいにも関わらず、都市 A の方が都市のポテンシャルに対する達成水準は高いと考えられる。

図-8、図-9、図-10は、例として、福岡市、広島市、仙台市的高速道路、国道から構成される道路網 G_R を示している。道路網の TI の値は、図中に示すように、それぞれ48、78、31となり、広島市の TI が最も大きい。一方各都市の達成可能 TI 分布から求めた超過確率は32.3%（福岡市）、68.3%（広島市）、1.4%（仙台市）となる。仙台市は超過確率が非常に小さく、既に高い達成水準を実現している。一方広島市は、高いポテンシャルに対して現時点における達成水準が比較的小さいため、今後の道路網整備に

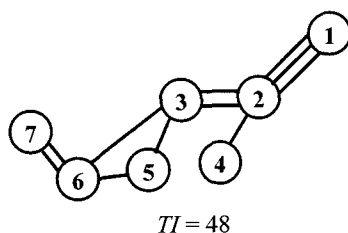


図-8 福岡市の G_R

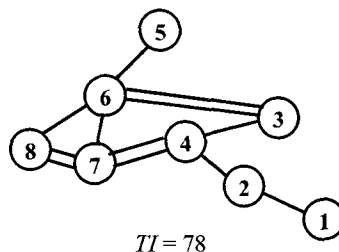


図-9 広島市の G_R

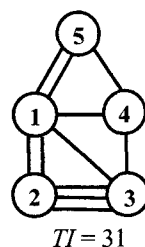


図-10 仙台市の G_R

より TI が改善される余地が大きいといえよう。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Hosoya, H.: Topological Index. A Newly Proposed Quantity Characterizing the Topological Nature of Structural Isomers of Saturated Hydrocarbons, Bulletin of Chemical Society of Japan, Vol.44, pp.2332-2339, 1971.
- 3) Diestel, R.: Graph Theory, Springer-Verlag, 1997 (ディーステル, R.: グラフ理論, 根上生也, 太田克弘訳, シュプリンガー・フェアラーク, 2000) .