

トポロジカルインデックスを用いた都市圏道路ネットワーク のリダンダンシ評価に関する研究

岡田憲夫・梶谷義雄*・多々納裕一・梶原弘之*

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、都市圏道路網ネットワークに代表されるようなライフラインシステムを対象として、そのリダンダンシ特性の性能評価モデルを提案する。その際、阪神・淡路大震災のような同時多発型の広域的な災害リスクを想定する。この種の性能評価指標として、ネットワークの位相構造特性の分析モデルが有効であることを指摘するとともに、トポロジカルインデックスがその目的に適用可能な指標となることを明らかにする。

キーワード：リダンダンシ、道路網、ライフライン、トポロジカルインデックス

1. 研究の目的

阪神・淡路大震災で明らかになったように、都市圏における道路網ネットワークが総体的(ホーリスティック)な結び付きの構造(位相構造)として、同時多発型都市複合災害に対して、どの程度しなやかさを有しているかを性能性として評価しておくことが、社会基盤整備の計画や都市診断上きわめて重要である。本研究ではこのような観点から都市圏道路ネットワークの性能評価をするための指標を開発することを目的とする。なお、ここでいう「ネットワークの総体」としての「位相構造のしなやかさ(弾力的頑健性)」とは、ネットワークが各所で切断されても(ズタズタになっても)、全体的に粘り強く、「局所的・部分的に連結して機能している割合が相対的に高い程度」を指している。本研究では以下、これを道路網やその他のライフラインの安全質に関わる性能特性(パフォーマンス)として捉えるとともに、それを評価するためのモデル指標として、「トポロジカルインデックス」(TI)が有効であることを明らかにする。

2. ライフラインネットワークシステムのリダンダンシ特性

2.1 既存のネットワーク信頼性評価指標とリダンダンシ特性の定義

ライフラインのリダンダンシ特性の評価手法は一種の信頼性解析・ハザード解析手法として、主にORの部分で発展してきた(三根ら(1984)、依田(1972))。そこではライフラインなどのネットワークシステムをノードとリンクからなるグラフとしてモデル化する。信頼性解析・ハザード解析では「システムが故障(fail)すること」を、「システムを構成するユニット(コンポーネント)が故障すること」に対応づける。代表的なシステムの例としてFig. 1のような直列システムと並列システムを考えよう。

直列システムは任意のユニットの故障がシステム全体の故障につながるようなシステムである。並列システムは全て(または一部)のユニットに故障が発生したときのみシステム全体の故障につながる。従って、システムの信頼性(システム全体の故障が起らない確率)を高めるためにはできるだけ並列システムの形を取ることが要求される。このように並列性を備えたシステムを冗長性(リダンダンシ)のあ

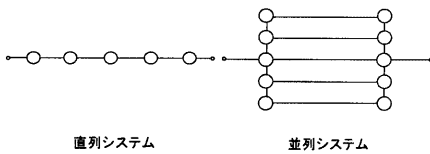


Fig. 1 Example of Tandem and Parallel Systems

るシステムと呼んでいる(例えば、河合ら(1984))。

この並列システムの形態論的な特徴をグラフ理論を用いて説明すると、部分グラフにループが多数形成されていることが指摘される。このことは本研究の以下の議論の展開上直観的かつ核心的な問題意識になっている。

2.2 ライフラインネットワークのリダンダンシ特性

岡田(1985)は社会基盤整備の観点から、道路網やその他のライフラインネットワークの性能評価に、リダンダンシ特性を勘案すべきであることを早くから指摘している。このようなリダンダンシ特性の重要性は阪神・淡路大震災の後、図らずも社会的に認知されるところとなり、例えば国土・地域管理の観点から、リダンダンシ特性を明確な性能指標の一部として取り上げるための概念的な整理や、評価(指標)モデルの開発の試みが始まっている(国土庁(1996))。

本研究では、阪神・淡路大震災のような同時多発型の広域的なライフラインシステムの機能不全(故障)の可能性に着目し、リダンダンシ特性の性能評価モデルの開発を試みる。実は、このようなタイプのシステムの機能不全は旧来の信頼性解析では、あまり想定していなかったといえる。すなわち、旧来型の問題では、次のような想定が一般的であった。

1. システムの機能不全は、一部のユニットのみに発生する可能性が高い。
2. 任意のユニットにおける機能不全の発生はランダムで、その確率分布は、ポアソン分布やアーラン分布などで確率的にモデル化できる。
3. 再起期間(リターンピリオド)は人間のライフサイクルの長さ(70～80年)と比較して、十分に短いか、たかだか同じ程度である。

これらの条件はもちろん相互に密接に関係してい

るが、全体として比較的高頻度で局所的なシステムの機能不全を想定していることは明らかである。このことは、台風や大雨などのタイプの災害によるライフラインシステムの局所的な機能不全については妥当な想定であるといえる。あるいは道路網の交通混雑や交通事故などによる部分的な機能不全を想定したシステムの信頼性解析には十分に充てはまる仮定であろう。

しかしながら、上述した阪神・淡路大震災では、道路網やその他のライフラインの機能不全は、次のような顕著な特徴を有していた。

i) 物理的故障であれ、非物理的故障であれ、それが同時多発的かつ広域的にシステム全体の機能不全につながった。

ii) 人間のライフサイクルからみてきわめてまれな(超低頻度の)災害リスクのマネジメントを要請するものであった。

iii) システム全体の機能不全(ズブズバに切断されること)が、甚大な社会・経済的被害を引き起こした。

以上のような理由から、この種のタイプの災害リスクを想定した、ライフライン・システムのマネジメントにあたっては、旧来型の信頼性解析手法の知見をそのまま適用することは適切ではないといえる。そこで、以下では、ライフラインシステムの全体的なリダンダンシ特性の性能を、ホーリスティック(総体的論的)に把握するとともに、細部(ディテール)の構造的違いを越えた、骨格(スケルトン)的な弾力的頑健性(しなやかさ)の評価を目的とする。その際、超低頻度の発生確率の評価は、あえて勘案しないことにする(この意味では、従来の信頼性評価(例えば、若村ら(1992)、南ら(1996))とは立場を異にした性能評価を扱う)。すなわち、ライフラインシステムの位相構造の違いが、システム全体の最低限の生き残りやすさ(ズブズバにはならず、コマ切れにしる機能していること)にどのように関わってくるかを分析し、その性能性を評価するモデルを提案する。

2.3 ライフライン・システムのリダンダンシ評価のための基礎特性の定義

位相構造論的な視点から、リダンダンシ性能を数学的にモデル化するにはあたり、その予備的な議論として、次のような基礎特性を定義しておくことにする。

定義 1

- ある全体グラフが与えられたとき、その部分グラフにループが形成されていれば当該の全体グラフはリダンダンシーを有するネットワークであるという。

定義 2-1

- 多重性(multiplicity): 2 個の隣接するノードに対して 2 本以上のリンクがお互いに直接連結することによってループが形成されることをいう。一般に P 本のリンクで結ばれているとき、 P 重リンクと呼ぶ。式で表すと、ノードの集合を X 、その要素を X_i, X_j としたとき、

$$\exists X_i, X_j (X_i \neq X_j) \in X$$

$$a_{ij} = a_{ji} = P$$

となる。ここに a_{ij} は隣接ノード X_i, X_j の間を直接結ぶリンク数 P を表す。ループを形成するには最低 2 個のノードと 2 本のリンクが必要である。

2 個のノードと 2 本のリンクだけで構成されているネットワークの中でこのような最小の多重性(二重性)を形成するネットワークを NMM(network with minimum multiplicity、最小多重性ネットワーク)と呼び、Fig. 2(left)に表す。

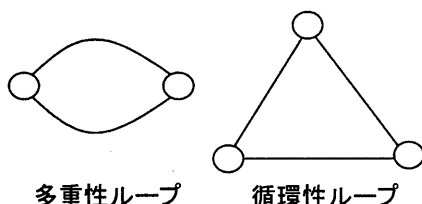


Fig. 2 Illustration of a NMM(right) and NML(left)

定義 2-2

- 循環性(loop): n ($n \geq 3$) 個のノードを介して、 $n+1$ 本のリンクでループが形成されることを循環性という。一般に式で表すと、

$$\exists X_i, X_j, X_k \dots \in X$$

$$L_i(n) = \overbrace{(i, j, \dots, k, i)}^{n \text{ 重}}$$

or

$$\exists X_i, X_j, X_k \dots \in X$$

$$a_{ij} = 1, a_{jk} = 1, \dots, a_{ki} = 1$$

ただし、ノード X_i 以外は同じノードを通過しないとす。このようなループを形成するには最低 3 個のノードと 3 本のリンクが必要である。このような最小のループを形成するネットワークを NML(network with minimum loop、最

小ループネットワーク)と呼び、Fig. 2(right)に示す。

既存のライフラインネットワークに新たに任意のライフラインリンクを 1 本付け加えると必ずループが付加的に形成される。このことと、定義 2-1、定義 2-2 から次の定理が導かれる。

定理 2-3

既存のライフラインネットワークに新たに任意のリンクを一本付け加えるとリダンダンシーが増加する。このときの増大したリダンダンシーの基本特性は

- 循環性を満たすリダンダンシーの増加
- 多重性を満たすリダンダンシーの増加
- 循環性、多重性両方を満たすリダンダンシーの増加

の 3通りのいずれかである。

3. ライフラインネットワークシステムの性能評価指標としてみたトポロジカルインデックス

3.1 TI の定義と既往の知見—分子化学的アプローチ

本研究で取り上げるトポロジカルインデックスは、もともと分子化学の専門家の細谷により定義された指標である。すなわち、本指標は化学の分野において分子のトポロジカルな繋がりを表し、沸点、エントロピー、生成熱などの物性的な特性値と相関があることが示されている。その後、トポロジカルインデックスとしては細谷により定義されたもの以外に、種々のインデックスが提案されている。現在では細谷によるインデックスは Z -インデックスと呼び、これらのインデックスの総称としてのトポロジカルインデックスと区別するのが一般である(高木(1992))。しかしここでは Z -インデックスのみをとりあげるの、これを単にトポロジカルインデックス (TI) と呼ぶことにする。

分子のなかのトポロジカルな繋がりを表したものは化学構造式である。この構造を原子をノード、結合をリンクと表すことによってグラフ理論におけるグラフ理論によりモデル化することができる。

一般に、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合せの数を非隣接数と呼び、 $P(G, k)$ と表す。ただし、 $P(G, 0) = 1$ とする。

このとき TI の値 Z_G は次式で定義される。

$$Z_G = \sum_{k=0}^m P(G, k) \quad (m \text{ は最大の } k) \quad (1)$$

Fig. 3は7つの分子から成る炭化水素の異性体の図

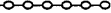
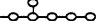
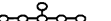
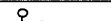
ケフ	K60	1	2	3	Zg	bp	
1		1	6	10	4	21	98.4
2		1	6	9	4	20	93.4
3		1	6	9	3	19	91.9
4		1	6	9	2	18	90.0
5		1	6	8	2	17	88.7
6		1	6	7	2	16	86.0
7		1	6	8	8	15	80.5
8		1	6	7	7	14	79.2
9		1	6	6	0	13	80.9

Fig. 3 Isomers of Hydrocarbons and Their Topological/Physical Properties

である。下方のグラフに移るほど枝分かれが変化し、それとともにTIが小さくなる。すなわち1から13へ一つずつ減少していくことがわかる。化学の分野ではこのような異性体の構造の違いと物性の関係に主に焦点を当てて研究している。

この他、トポロジカルインデックスに関する興味ある特性として、細谷は次のような定理を示している(Hosoya(1971))。

定理 3-1

与えられたグラフGに対してTIの値(Z_G)は

$$Z_G = (\text{あるリンクをカットすることによって生まれる部分グラフ } G_1 \text{ と } G_2 \text{ の } Z \text{ の積}) + (\text{あるリンクとそれに繋がるリンクを全てカットしたときに生まれる部分グラフ } G_1, G_2, \dots, G_n \text{ の } Z \text{ の積}) \quad (2)$$

しかし、分子構造を分析するアプローチとライフライン構造を分析するアプローチとではTIの具体的な意味づけや適用の目的が異なっており当然であろう。次節以降では道路網も含めたライフラインの位相分析の指標としてTIが適用可能であることを示すとともに、その意味づけを検討する。

3.2 ライフラインネットワークシステムの集中性・分散性の定義と大規模災害時における孤立ノードの出現性との関連性

本研究では、ノード、リンクの数が同じとき、TIの値のより大きなグラフを分散性の高い(分散的)グラフ、TIの値のより小さなグラフを集中性の高い

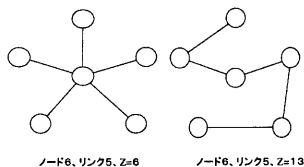


Fig. 4 Illustration of Relatively Concentrated and Distributed Graphs

(集中的)グラフと呼ぶことにする。そこで次のような定義を導入する。

定義 3-1

- ノード数とリンク数が同じグラフを比較したとき、TIの値が大きいほど分散的なグラフといい、TIの値が小さいほど集中的なグラフという。

ここで、ネットワークが集中的か、分散的かを表す指数として以下のように δ を定義する。

$$\delta = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (3)$$

(ノード、リンク数一定)

δ が1に近づくほど分散的なグラフで、0に近づくほど集中的なグラフであるといえる。 $\delta=1$ のときグラフは「分散性が飽和している」といい、 $\delta=0$ のとき「集中性が飽和している」という。Fig. 5に δ 値の例を示す。

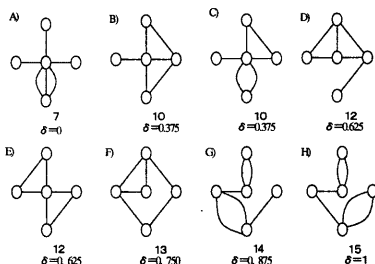


Fig. 5 Calculation of δ for Graph with 5 Nodes and 6 Links

ここでFig. 6 (left) のような両端のノードに他のリンクが接続していないリンクを単位リンク(Unit Link)と呼び、Fig. 6 (right) のように両端のノード

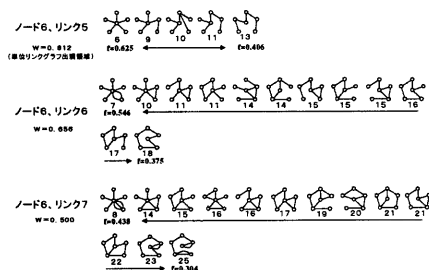


Fig. 7 Calculation of f Value for Graphs with 6 Nodes

Fig. 7はノード6、リンク5、6、7のそれぞれのグラフにおける単位リンク構成グラフ出現領域ならびにfの領域を調べたものであるが、リンクが増加すればするほど(単位リンク構成グラフ出現領域の全領域に占める割合が減少すればするほど)、また、TIが増加すればするほど(TIIが減少すればするほど)、単位リンク構成グラフ出現領域は減少していくことが判る。孤立ノードの発生を、どこからの物質の供給も避難も不可能な危険地域の発生という「リスク」として捉えたとしよう。TIIを導入することによって、fの値が小さければ小さいほど、TIIの領域が狭くなることを意味するので、ネットワークのリスク処理性能は向上するといえる。

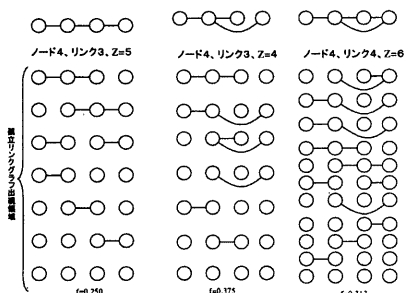


Fig. 8 Comparison of Graphs with 4 Nodes and 3 to 4 Links

Fig. 8はノード4、リンク3、における相対的な意味での集中的グラフ(Z=4)と分散的グラフ(Z=6)ならびにその中間のグラフ(Z=5)の例である。fの値はそれぞれ0.375と0.313、0.250となっており、孤立ノードが最も少ない部分グラフの組み合わせの数の割合は中央のグラフが最も大きくなっている。

3.3 ネットワークのリダンダンシー特性とTIとの関連性

これまでの高分子の位相構造に関わる研究ではグラフのループ構造についてはそのことを明確に取り上げたものは少ないが、細谷(1988)は、「点の数と枝分かれの状況が同じような場合は、環の数が増すにつれてTIは大きくなる」ことを示している。ここでいう「環」とはループのことを意味するので、これは先に定義したリダンダンシー特性と関係があることが推察される。ただし、分子化学の分野では多重リンクを考慮していない。

そこで以下では循環性や多重性を含んだグラフを考え、リダンダンシー特性の性能評価指標としてみたTIの意味づけについて検討してみよう。

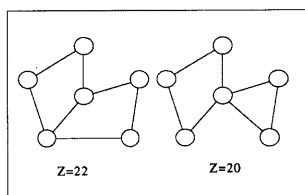


Fig. 9 Comparison of Redundant Graphs with 6 Nodes and 7 Links

Fig. 9はノード数が6、リンク数が7の場合で分散的なグラフにおいてループが形成されているグラフと集中的なグラフにおいてループが形成されている例である。直観的に両者ともループ数が2つで同一であるにもかかわらず、左側のネットワークの方が右側よりも集中性が強いと判断されよう。このことは、左側のネットワークの方が孤立ノードが生成する場合数が少ないという意味で、それがTIの値に反映されていると解釈できる。つまりノード数が同じで、リンク数も同じネットワークで、かつループの数も同じであっても、TIの値が大きい方がより分散性の高いリダンダンシー特性を有していると評価できるのである。

Fig. 10はノード数6、リンク数7であるが、多重性が2組み生じているネットワークについてTI値を比較したものである。この場合も、TI値の大きな方を(より)分散性の高いネットワーク(右側)と呼ぶことにする。

3.4 リンクの増加によるTIの変化

あるライフラインネットワークが与えられたときにリダンダンシー特性の向上(増加)の程度の評価を、

ドに他のリンクが接続しているリンク同士をリンク系列 (Link Series) と呼ぶことにする。TI の値が非隣接数 $P(G, k)$ の足し合わせであるが、 $P(G, K)$ はリンク数が K 本の単位リンクのみで構成されている部分グラフの組み合わせの数と考えることができる。

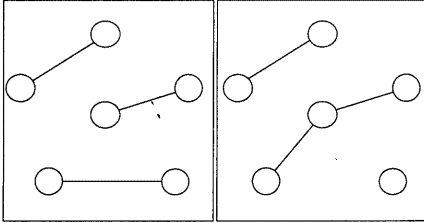


Fig. 6 Illustration of Unit Links and Link Series

どのリンクにも接続していないノードを孤立ノードと呼ぶとすると、グラフ (右) はグラフ (左) に比べて孤立ノードの数が 1 つ多くなっていることがわかる。一般に、次の関係式が成立する。

定理 3-2

ノード数が同じで、同リンク数も同じ二種類のグラフ (A), (B) において、グラフ (A) は単位リンクのみ、グラフ (B) は単位リンクとリンク系列で構成されているとする。グラフ (A) の単位リンクの数を H 個、グラフ (B) の単位リンクの数を L 個、リンク系列の数を M 個としたとき、孤立ノード数の差 I は

$$I = H - (L + M) \quad (4)$$

$$H \geq 0, L \geq 0, M \geq 0$$

となり、グラフ (B) はグラフ (A) に比べて I 個だけ孤立ノードが多くなる。

このとき、明らかに

$$H \geq (L + M) \quad (5)$$

(等号成立は $M = 0$ の時)

が成立するので、 $I \geq 0$ である。

また、ノードの数を N 個とすると、

$$0 \leq H \leq \frac{N}{2} \quad (6)$$

となる。このとき、 H がとり得る最大の値は TI における非隣接数 k の最大値 m に一致する。同様に、 $P(G, k)$ はグラフ G の、リンク数が k 本であるような部分グラフのうち孤立ノード数が最も少ない部分グラフ (単位リンクグラフ) のパターン数と解釈

することができる。逆にリンク数が $k (k \leq m)$ 本であるような部分グラフのうち単位リンクグラフ以外の部分グラフ (リンク系列を含む部分グラフ) のパターン数は、 $rC_k - P(G, k)$ として表される。

リンク数が $\frac{N}{2}$ より小さい領域においては、単位リンクのみから構成されるグラフが必ず存在する。この領域を単位リンク構成グラフ出現領域と呼ぶことにする。

単位リンク構成グラフ出現領域におけるリンク系列を含む部分グラフは、同リンク数の単位リンクのみで構成されている部分グラフに比べて、孤立ノード数が必ず多くなることは、前述より明らかである。本研究ではこのような関係にある部分グラフの組み合わせの数をリスク処理性能性のバロメーターとして用いることにする。そこで、単位リンク形成グラフ出現領域におけるリンク系列を含む部分グラフの組み合わせの数を **TII (Topological Inverse Index, 逆トポロジカル指標)** と呼ぶ。また、この値を $W(r)$ と表現し、以下のように定義する。

$$W(r) = \sum_{k=0}^m rC_k - P(G, k) = \sum_{k=0}^m rC_k - Z \quad (7)$$

TI によるグラフ同士の比較は、同ノード数、同リンク数を持つグラフ同士の比較であったが、TII はノード数は同じで、リンク数が異なるグラフ同士を比較することができる。

今、ノード数 n 、リンク数 r のグラフを考える。このグラフのすべての部分グラフの数 (ネットワークの部分的機能不全のパターンの数と解釈可能) は、 2^r 通りである。部分グラフのうち、リンク数が m 以下 (単位リンクグラフ形成出現領域) のグラフの割合は、次式の w で表される。

$$w = \frac{\sum_{k=0}^m rC_k}{2^r} \quad (8)$$

また、リンク数が m 以下の部分グラフのうち、リンク系列を含む部分グラフの組み合わせの数は、

$$s = \frac{\sum_{k=0}^m rC_k - Z}{\sum_{k=0}^m rC_k} \quad (9)$$

となる。

従って、部分グラフの総数に対する、リンク数が m 以下でリンク系列を含む部分グラフ (孤立ノードを必ず含む) の組み合わせの数の割合は、次式の f により表される。

$$f = w \cdot s = \frac{\sum_{k=0}^m rC_k}{2^r} \frac{\sum_{k=0}^m rC_k - Z}{\sum_{k=0}^m rC_k} \quad (10)$$

$$= \frac{W(r)}{2^r} = \frac{w}{2^r} \quad (11)$$

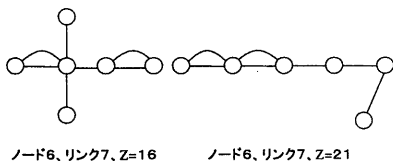


Fig. 10 リダンダンシーが集中的であるグラフ(左)と分散的であるグラフ(右)の例外

そこに新たなリンクを整備する場合に対応づけて意味づけよう。Fig. 11のケース1はTIの値が小さくなるようにリンクを整備していく過程を示したものである。最初のうちこそループは少ないが、ある程

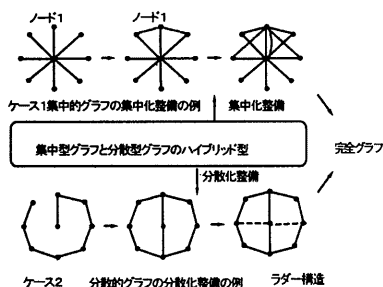


Fig. 11 Comparison of Link-Multiplicity-Redundant Graphs with 6 Nodes and 7 Links

度リンクが増すにつれて、ループが多数形成され、リダンダンシーを有する構造になっていく。ケース1では「整備の核」となるノード1が存在し、そのノードへリンクを次第に集中させることでそのノードを構成要素としたループが多数形成されるようになる。整備の核となっているノード1が他の全てのノードとリンクで結ばれると、さらに別のノードが新たな整備の核となり、ループ数を増大させながら、完全グラフに近づいていく。

これに対してケース2は準環状型のグラフにおいてTIが大きく増えるように整備していく過程を示したものである。リンクが増すにつれてケース1と同様にループが多数形成されているが、各ループを構成しているノードの種類に同じノードばかりが含

まれていることがなく、各ノードが万遍なくどれかのループに含まれている。そこで、次のような定義をする。

定義 3-3

- 同一のノード数、同一のリンク数のグラフにおいてTIの値の増加が相対的に大きいような整備(リンク数の付加)を、「分散化(に寄与する)整備」、TIの値の増加が相対的に小さいような整備を「集中化整備」という。(ただし、分散化整備か集中化整備かは同一ノード数、同一リンク数のグラフをTI値について2つ以上比較した時に相対的に定まるものである。)ライフラインシステムのリンクの付加によるリダンダンシーの性能水準の向上をTI値と関連付けて評価する上で、以下の定義が重要である。

定理 3-3

- リンク N 本のグラフのTIを $Z_G(N)$ とするとそれに任意の1本のリンクを加えたグラフの $Z_G(N+1)$ は以下になる。

$$Z_G(N+1) = \alpha Z_G(N) \quad (1 < \alpha \leq 2) \quad (12)$$

ノードの数が一定のまま、より集中化に寄与するようにリンクを接続すると α は順次1に近づき、より分散化に寄与するように接続すると α は順次2に近づく。

α はこのようにどの程度リダンダンシーが増加したかを表わす係数で、増殖度係数 (proliferation factor) と呼ぶ。以下では「PL係数」と略する。

PL係数は増加するリダンダンシーが集中化に寄与するの分散化に寄与するのを表す指標として利用できる。ただし α を0から1を域値とするように基準化しておく方が便利である。そこで $\hat{\alpha} = \alpha - 1$ ($0 \leq \hat{\alpha} \leq 1$) として、 $\hat{\alpha}$ を「PL指数(PL index)」と呼ぶことにする。このとき $\hat{\alpha}$ が1に近くなればなるほど、リダンダンシーの増加は分散化に寄与しているのに対して、逆に $\hat{\alpha}$ が0に近くなればなるほど、リダンダンシーの増加は、集中化に寄与していると判定できる。

Fig-12はこのことを例示したものである。パターン1のネットワークを基準に、これに各々の隣接ノード間でリンクを1つ追加した場合の $\hat{\alpha}$ の値を示したのがパターン2である。これよりパターン1のネットワークにおいて周縁部のアーチ状のルートを形成するようにリンクを追加したときの $\hat{\alpha}$ の値が相対的に大きく、この意味で、リダンダンシーの向上は分散化に寄与していると判定できる。

一方、パターン3のネットワークは、パターン1のネットワークのリンクの1つを切除したときそこが(機能

不全に陥ったとき)について、 α の値がどれくらい低下するかを示したものである。これからも周縁部のアーチ状のルートを形成するリンクの機能不全の影響が(分散化がその分低下するという意味で)大きいことが判る。

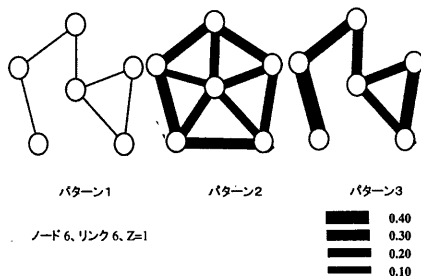


Fig. 12 Evaluation of Redundant Graphs by PI Index

4. おわりに

以上、本論文では、都市圏における道路網に代表されるライフラインシステムを取り上げ、その総体的(ホーリスティック)な位相構造特性の指標化という観点からリダンダンシの性能評価モデルを提案した。トポロジカルインデックスはもともと分子化学の分野で開発された位相構造特性解析のモデル指標であるが、本論文では同時多発型の広域災害リスクに対するライフラインシステムの頑健性の評価指標としても活用できることを示した。本論文はそのための基礎的な考察とモデル分析を行ったものである。

最後に、今後の課題を列挙すれば以下のようである。

1. トポロジカルインデックスを補整または拡張することにより、本論文で想定したような同時多発型の広域災害リスクに対するライフラインシステムの性

能評価指標として、よりの確で、緻密なモデルを開発する。

2. 超低頻度の災害リスクという視点を明示的に踏まえて、確率論的な裏付けを行った位相構造論的信頼性解析技法へと発展させる。

3. 都市圏の道路網ネットワークとしての特殊性や固有性を内部化したモデル指標へと拡張を図る。

4. 京阪神都市圏などを対象に実証分析を行う。

なお、これらの課題については現在、研究を進展させつつあり、一定の成果を得ているが、機会を改めて発表する予定である。

参考文献

- 依田浩(1972): 信頼性理論入門, 朝倉書店
- 岡田憲夫(1985): 災害リスクの分析的見方, 「土と防災」講習会テキスト, 土と構造物委員会, 土木学会, 土と構造物委員会.
- 梶谷義雄・前川和彦・岡田憲夫・多々納裕一(1997): 災害リスクを考慮した都市ライフラインネットワークの性能解析法の開発—トポロジカルインデックスによる, 日本リスク研究学会論文集, 第10回研究発表会論文集.
- 国土庁計画・調整局総合交通課(1996): 交通システムの信頼性向上に関する調査—調査報告書, 野村総合研究所受託調査.
- 高木隆司(1992): 形の数理: 朝倉書店.
- 細谷治夫(1998): 分子のトポロジカル構造と諸物性との関連の研究, 科研費報告書, pp.41-46.
- 三根久・河合一(1984): 信頼性・安全性の基礎数理, 日科技連.
- H.Hosoya(1971): Topological Index. A newly Proposed Quantity Characterizing the Topological Nature of Structural Isomers of Saturated Hydrocarbons, Bull.Chem.Soc.Jpn., Vol.44, pp.2332-2339.

Modelling of Performance Criteria for Metropolitan Highway Networks by Use of Topological Index

Norio OKADA, Yoshio KAJITANI*, Hirokazu TATANO, and Hiroyuki SAKAKIBARA***

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

With a focus on areawide, simultaneous failures of a metropolitan transportation network system as caused by the Great Hanshin Awaji Earthquake, this study proposes a performance index of the network system against such disaster risks. It is shown that the topological index developed by the Hosoda for the analysis of topological properties of polymers serves as an appropriate indicator for evaluating the overall performance of a lifeline network. This paper concludes by assessing the potential and limit this proposed indicator for evaluating real-world lifeline systems.

Keywords : *Redundancy, Highway Network, Lifeline, Topological Index*