



トポロジカルインデックスによる水道システム統合の位相強度への影響評価

岡本, 祐

鍬田, 泰子

(Citation)

土木学会論文集A1（構造・地震工学）, 68(4):I_940-I_949

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003281>



トポロジカルインデックスによる水道システム 統合の位相強度への影響評価

岡本 祐¹・鍬田 泰子²

¹学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)

E-mail: 111t113t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院工学研究科 准教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

市町村合併に伴い水道システムも統合させる動きがあるが、元々独立していた水道システム同士を統合し水源を一元化することは、システムの冗長性が極端に低い箇所をシステムの中に創出する可能性がある。適切なシステム設計のためにも、形状の強度、すなわち位相強度を評価できる指標が求められている。本研究ではシステムの位相強度の評価が可能なトポロジカルインデックスを用いて、水道系に適した新たな位相強度指標を提案した。さらに、実管路網を用いて本指標の適用性を確認するとともに、水道システムの統合を経験した管路網に対して水道システムの位相強度を地震動レベルごとに分析し、統合によってシステムの位相強度は必ずしも向上するとは限らないことを示した。

Key Words: *topological index, water pipeline network, system strength, system integration*

1. はじめに

地震時の断水被害を軽減するためには、水道システムの地震安全性を把握することが重要である。システムの安全性を評価する方法は大きく二つに分けることができる。一つは水道システムの構成要素となる構造物の耐震性を評価する方法であり、もう一つは水道システムの形状に基づいた強度、すなわち位相強度を評価する方法である。我が国における水道管路網の地震対策は、水道事業ガイドラインにおける業務指標 (PI)¹⁾に代表されるように敷設されている管路に対する耐震管路の比率で評価され、物理的な強度のみが重視されている。その原因の一つとして、精度よく簡便にシステムの位相強度を評価できる指標がなく、耐震管路の敷設延長という統計的に扱いやすい指標が汎用されていることが挙げられる。事業成果を耐震化率だけで評価しても、耐震管の敷設箇所によってシステム全体の位相強度は異なり、適切にシステム性能を評価したことにはならない。とくに、近年全国で市町村合併が盛んに行われ、個々の独立した小規模水道システムを統合させようとする動きがある²⁾。元々独立した水道システムを統合し水源を一元化することは、日常時の経営面で

は最適解であるのかもしれないが、災害時にはシステムの冗長性が極端に低い箇所をシステムの中に創出してしまう可能性がある。こうしたことから、適切なシステム設計のためにも構造物の強度だけでなくシステムの位相強度を評価できる指標が求められている。

水道管路網やその他のライフラインシステムの位相強度に関する指標についてはこれまで様々な研究がなされている。例えば、ライフラインネットワークの機能評価指標として Dueñas-Osorio et al.³⁾ によって提案されている Connectivity Loss (連結性損失, 以下 C_L) が挙げられる。これは起点ノードから終点ノードまでの連結程度を示したものである。Chang and Nojima⁴⁾ は、ネットワーク上のリンク切断によって、連結性が無くなったノード間の供給量によってシステムの影響度を評価することを示している。さらに、星谷・山本⁵⁾ はライフライン系やトラス構造物などの工学システムは、多くの要素から構成されており、構成要素の部分的な被害がシステム全体の破壊に直結するとは限らないとして、このようなシステムの有する保有耐力、いわゆる冗長性を情報エントロピーを用いて物理的に定義し、冗長性指数 (Redundancy index) を提案している。

表-1 TI と沸点の関係⁶⁾

N	Graph (G)	$p(G, k)$ ^{a)}				Z_G	$bp(^{\circ}C)$ ^{b)}
		$k=0$	1	2	3		
1	•	1	0	0	0	1	-161.7
2	—	1	1	0	0	2	-88.6
3	— —	1	2	0	0	3	-42.2
4	— —	1	3	0	0	4	-11.7
	— — —	1	3	1	0	5	-0.5
5	— —	1	4	0	0	5	9.5
	— — —	1	4	2	0	7	27.9
	— — — —	1	4	3	0	8	36.1
6	— — —	1	5	3	0	9	49.7
	— — —	1	5	4	0	10	57.9
	— — — —	1	5	5	0	11	60.2
	— — — —	1	5	5	1	12	63.5
	— — — — —	1	5	6	1	13	68.7

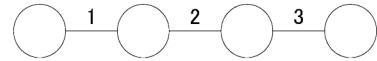
注) N: ノード数, $P(G, k)$: グラフ G において隣り合わないリンクを k 個選ぶときの組合せの数, Z_G : $TI(G)$, bp : 沸点.

既往の研究では情報エントロピーやノードの連結性を表す指標が用いられていたが、本研究ではシステムの位相強度評価が可能なトポロジカルインデックス (Topological Index, TI) を用いて、水道系に適した新たなシステムの位相強度指標を提案する。トポロジカルインデックスとは元々分子化学の知見であり、異性体の構造特性を用いて物性を評価した指標であるが、原子の分散・集中特性を表すことから様々なシステム評価にも汎用性の高い指標といえる。本研究では、提案するシステムの位相強度指標の適用性について確認するとともに、水道システムの統合を経験した実管路網に対して、現在と統合以前の水道システムの位相強度について地震動レベルごとに分析を試み、水道システム統合がシステムの位相強度に与える影響を明らかにする。なお、本研究で用いるシステムの位相特性は、ノードとリンクからなるシステムの分散・集中の度合いと定義する。また、位相強度は水道システムの位相特性に基づいた形状の強度と定義する。

2. トポロジカルインデックスの特徴

(1) トポロジカルインデックスの定義

トポロジカルインデックス、 TI は、分子化学の分野において異性体を分類する指標として Hosoya⁶⁾によって定義されたものである。具体的には、分子のトポロジカルなつながりを位相構造として捉えるこ

図-1 $TI(G) = 5$ のグラフ

とにより、異性体の構造特性から沸点、エントロピー、生成熱などの物性を示す指標として TI は提案された。表-1 は Hosoya によって示された異性体の TI (表中の Z_G) と沸点を比較したものである。ノード数、リンク数が同じでもシステムが分散し TI が大きくなるにつれて、沸点が上昇し、分子のつながりが強くなることを示している。理論的には TI はグラフ理論を用いて説明され、グラフ G において隣り合わないリンクを k 個選ぶときの組合せの数 $P(G, k)$ の合計として式 (1) で表わされる。

$$TI(G) = \sum_{k=0}^m P(G, k) \quad (1)$$

m はリンクの選択数であるため、グラフ G のノード数が偶数で n の場合は $m=n/2$ 、奇数の場合は $m=n/2+1$ となる。また、前提条件として $P(G, 0)=1$, $P(G, 1)=l$ (リンク数) とする。

図-1 に示す単純なグラフを用いて、具体的に TI の算出方法を説明する。ノード数は 4 つで偶数であるためリンクの選択数 m は 2 となる。前提条件の $P(G, k)$ の値は $P(G, 0)=1$, $P(G, 1)=3$ であり、隣り合わないリンクを 2 つ選ぶ場合の組み合わせはリンク 1 とリンク 3 の一組みだけであるので、 $P(G, 2)=1$ となる。組み合わせ $P(G, k)$ の和が $TI(G)$ であるので、このグラフは $TI(G)=5$ と算出できる。基本的にはノード数が増えれば TI は増加し、リンクがあるノードに集中して連結している場合は隣り合わないリンクが減るために TI は小さくなる。

(2) TI の定理

Hosoya はグラフ理論に基づいて種々の TI の定理を示している。本研究では後述で樹系状の水道システムの位相強度評価を行うために、利用しやすい定理を紹介する。この他にノードがループ状のグラフも TI で評価できることが例示されている。

a) 定理 1

グラフが直列の場合、ノードが $1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ と増えるごとに TI は $1, 2, 3, 5, 8, 13, \dots$ と増加していく。この数列は n 項目が $n-1$ 項目と $n-2$ 項目の足し合わせになる、隣接三項間漸化式となる。この漸化式の一般項はフィボナッチ数列によって式 (2) で示される。 n にノード数を代入すれば、ノードが n 個の直線のグラフの TI を容易に求められる。

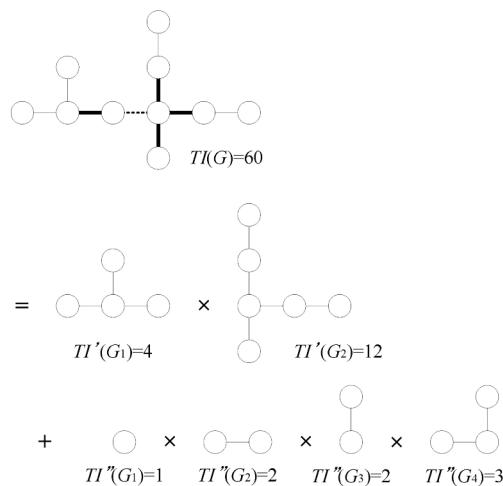


図-2 部分グラフと全体グラフとの TI の関係

$$TI(G) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} \right\} \quad (2)$$

b) 定理 2

あるリンクをカットしてできる部分グラフの TI によって、グラフ全体の TI を求めることができる。

$$TI(G) = TI'(G) + TI''(G) \quad (3)$$

ここで、 $TI'(G)$: 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 と G_2 の TI の積、 $TI''(G)$: あるリンクとその両端のノードにつな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 の TI の積。

これらのグラフは図-2に例示する通りである。なお、点線で示すリンクが $TI'(G)$ においてカットするリンク、太線で示すリンクが $TI''(G)$ においてカットするリンクである。

これらの定理を用いることで、大規模なグラフの TI を求める際にも任意のリンクでグラフを分割し、部分グラフの TI の積和で全体グラフの TI を計算することが可能である。

(3) TI を用いた既往の研究

TI の基本的な特性を応用させることで他のネットワーク特性指標として利用することができる。岡田ら⁷⁾は道路網の地震時の安全性に関わる位相強度が道路網の集中・分散の位相特性と関連付けられるとの仮定の下に、 TI の集中・分散性を用いた道路網のリダンダンシィ（冗長性）の評価指標の有効性を明らかにしている。 TI は隣り合わないリンク数の組み合わせ数であり、リンクが増加するにつれて指数的に増加するため、リンク数が非常に多い異なる二つ以上のグラフの分散性について相対的に評価する目

的で、 TI を基準化した指標が提案されている。これは隣り合わないリンクの組み合わせの最大と最小値を用いて相対的な位相強度を示したものである。下式は、岡田らによる基準化トポロジカルインデックス $\delta(G)$ である。

$$\delta(G) = \frac{TI(G) - TI_{\min}(n, l)}{TI_{\max}(n, l) - TI_{\min}(n, l)} \quad (4)$$

ここで、 $TI_{\max}(n, l)$: ノード数 n 、リンク数 l のグラフ中での TI の最大値、 $TI_{\min}(n, l)$: ノード数 n 、リンク数 l のグラフ中での TI の最小値、 $TI_{\max}(n, l)$ は定理 1 のフィボナッチ数列で表わされる直線の TI 、 $TI_{\min}(n, l)$ は $1 + l$ で表わされる。

3. トポロジカルインデックスを援用したシステムの位相強度指標の提案

TI は無向グラフの位相強度評価指標として扱われるが、水道システムのように流れが存在するネットワークを評価する上で、グラフの方向性と始点・終点の位置づけは非常に重要である。本研究では、リンクの多さでネットワークの強さが決定されるという性質を踏まえ、あるリンクが切断された場合に断水していない水源側の残余グラフの TI を用いて、リンクが切断されることによる全体のネットワークに与える影響を TI 損失率(Loss rate of Topological Index, LTI) として評価する方法を提案する。

通常グラフ G は、ノードの集合 X とリンクの集合 A で $G = (X, A)$ と定義される。このグラフ G に対して、あるリンク集合 A_e ($A_e \subseteq A$) を除いた場合グラフ G は k_e 個のグラフに分割される。このとき、始点(水源)ノード x_0 を含むグラフを G_0 ($G_0 = (X_0, A_0)$, $x_0 \in X_0$) とし、それ以外のグラフを $\overline{G}_{01}, \dots, \overline{G}_{0k_e}$ とする。ここで水源側の生き残ったグラフ G_0 の $TI(G_0)$ を残余トポロジカルインデックスとする。

グラフ G において一つのリンク a ($a \in A, a \notin A_0$) が損傷したとき、リンク a が全体のグラフに与える位相強度の弱化の度合いとして TI 損失率は以下で表される。

$$LTI(a) = 1 - \frac{TI(G_0)}{TI(G)} \quad (5)$$

LTI が 1 に近づくほどリンク a はグラフ全体に位相強度低下の影響を与えるリンクといえ、あるグラフにおいて 1 に近い LTI を示すリンクが多ければそのグラフの形状の持つ位相強度は低いということができる。

次に、グラフ G の持つ全てのリンクにおける TI

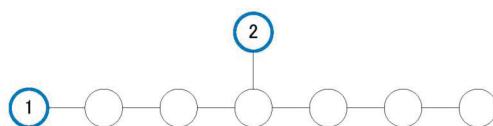


図-3 簡易グラフと水源ノードの位置

損失率の平均を、グラフ G 全体の位相強度として平均 TI 損失率 (Mean loss rate of Topological Index, $MLTI$) を以下で表す。

$$MLTI = \frac{1}{L} \sum_A LTI(a) \quad (6)$$

ここで、 L ：リンク総数、 A ：リンクの集合

さらに、 LTI はあるグラフにおいて一つのリンクが損傷したときの位相強度の弱化の度合いであるが、実際の地震動を考えた時管路網における複数の箇所が損傷することが考えられる。計測震度 I の地震の揺れに対して複数のリンクが損傷したときの水源ノードを含む残余グラフである $TI(G_0|I)$ の、元のグラフ G に対する位相強度の弱化の度合いとして、地震時 TI 損失率 (Seismic loss rate of Topological Index, STI) を以下に示す。

$$STI(I) = 1 - \frac{TI(G_0|I)}{TI(G)} \quad (7)$$

前述した基準化 TI 、 δ と本研究で提案する式 (5) から (7) に示した指標はいずれもシステムの位相強度を推定するための指標であるが、本研究で提案する指標はシステムの位相特性だけではなくグラフ内の水源ノードの位置にも左右される。例として、図-3 のようなグラフを考える。水源となるノードが 1 の場合と 2 の場合によって δ と $MLTI$ を算出したものを表-2 に示す。 δ は水源ノードがいずれであろうと変化しないが、 $MLTI$ はノード 1 が水源であった場合には 0.69、ノード 2 が水源であった場合には 0.63 となり、ノード 2 の場合の $MLTI$ は小さくなることからも、連結性との相対関係も符合する。本研究で提案する指標はこれまでの分散/集中の位相特性だけでなく、あるリンクが切断された時の水の供給可能範囲を考慮した位相強度評価指標として利用できる。

4. システムの位相強度指標の実水管路網への適用

(1) 石川県輪島市門前町の水道システムの概要

システムの位相強度指標の適用例として石川県輪島市門前町の水道システムを対象とする。旧門前町

表-2 水源ノード位置による簡易グラフの δ と $MLTI$

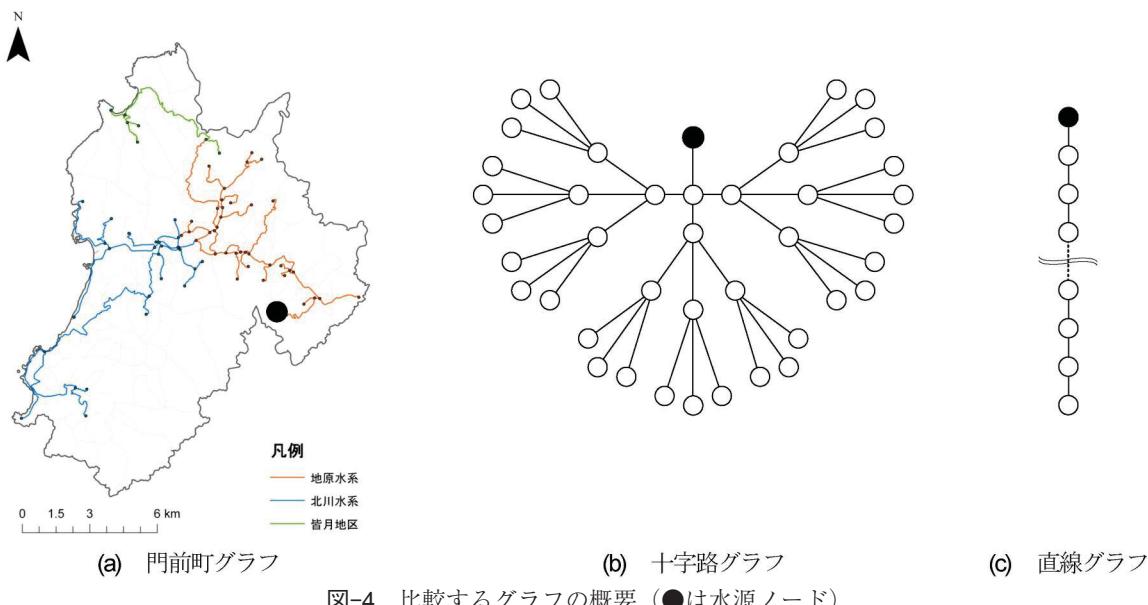
水源ノード	δ	$MLTI$
1	0.902	0.690
2	0.902	0.633

は旧輪島市と市町村合併して現在は輪島市となっているが、水道システムは地原ダムを主水源として、八ヶ川沿いや海岸沿いなど広域に配水管路が埋設された独立したシステムになっている⁸⁾。また、図-4 (a) に示すように元々 3 つの区域に水源と小規模システムが形成されていたが、地原ダムの建設により、統合された水道システムである。

統合以前の旧門前町における皆月地区は中山間地域に位置しており、地区内の水供給を深井戸を水源とする皆月簡易水道のみで賄っていた。統合に際して皆月簡易水道の揚水・浄水施設は閉鎖され、現在は使用できない。統合後の 2007 年 3 月 25 日に発生した能登半島沖を震源とする地震では、地震直後に 2,500 戸全戸が断水し、断水解消までに 2 週間程度を要している。断水が長引いた原因は、管路被害件数が多かったこと、配水池の破損により貯水能力を喪失した地域があったことなどが挙げられる。統合後の皆月地区は水道システムの末端に位置しており、システムの上流側の被害の影響を直接的に受けたことに加えて、市街地から皆月地区への配水管が山間部を通るため、復旧時には起伏の激しい管路内の空気抜き作業で復旧に支障を来たした。そのため、皆月地区は門前町の中で最も断水復旧に時間を要した⁹⁾。被害報告⁸⁾によると、配水管延長 167 km に対して 55 件の管路損傷が確認されており、管路被害率は 0.33 件/km となる。この管路被害率は本地震で被災した水道事業体の中でも最も高い値を示している。

(2) 門前町の水道システムの位相強度評価

門前町における配水管の水道システムの位相強度評価に TI を適用するにあたり、リンクの延長やノード座標を読み取るために管路網のデータベースの構築を ArcGIS (ESRI 社) を用いて行った。道路網の数値地図¹⁰⁾を加工し、門前町の水管路網の紙地図¹¹⁾をデジタル化した。リンクは分岐から分岐までを一続きを一リンクとした。これは TI の評価において延長によるリンク付加よりも形状の特徴を強調するためである。基本的に樹系モデルとし、水管路網全体のノード数は 348、リンク数は 347 となった。本研究ではシステムの概略的な特徴を知るため、本管にあたるリンクについてのみ計算する。リンク延長が短くシステム全体の構造を変化させない程度に



リンクを割愛し, ノード数 72, リンク数 71 としたグラフを基本モデルとした.

さらに, 門前町の水道システムの他に二つのグラフを考慮した. 一つは, 水源のノードから徐々に十字に分岐する, より集中した十字路グラフとし, もう一つは, 最も分散し地震災害時に孤立するノード数が多い直線グラフとする. 図-4に門前全体の水道システムと他の二グラフを示す. 直線グラフも十字路グラフも実際の水道システムでは存在しない分散と集中の限界モデルであり, 実際の水道システムはそれらのグラフ特性の間に位置すると考えられるため, 分散と集中の中間に位置する門前町水道システムのグラフ特性を評価することで本指標の適用性についても検討できる. 十字路グラフ, 直線グラフのノード数およびリンク数については, 門前町水道システムのグラフと同じくノード数 72, リンク数 71 とする. 門前町の水道システムが樹系であるため, 直線グラフ, 十字路グラフともに樹系のグラフとした.

門前町グラフ, 十字路グラフ, 直線グラフにおけるそれぞれのリンクが示す LTI の頻度分布を図-5に示す. 1 に近い値の LTI の比率が多いほどグラフの位相強度は低く, 0 に近い値の LTI の比率が多いほどグラフの位相強度は高いが, 門前町グラフではリンクの LTI が 0.2 から 1.0 の間に分散しており, また, 十字路グラフでは 0.2 から 0.25 の LTI を持つリンクが多く占めることができる. これは, ネットワークの中で下位の枝に当たるリンクが多く, それらのリンクが除かれてもシステムの位相強度にそれほど影響がないことを示している. 直線グラフでは, 0.95 から 1.0 の LTI をもつリンクが多く, リンク損傷が全体のシステムに影響を与えるリンクが多く

いことを示している.

次に, 表-3 にグラフに含まれる全リンクの LTI を平均した MLTI を示す. MLTI は, 門前町グラフでは 0.61, 十字路グラフでは 0.43, 直線グラフでは 0.98 であり, 十字路グラフは三つのグラフの中で MLTI が最も低く, 水源を考えたときの位相強度が優れていることが分かる. 逆に直線グラフは三つのグラフの中で MLTI が最も高く, 位相強度は劣っている. 門前町の水道システムの MLTI は二つのグラフの中間の値を示しており, 集中したグラフは強固で直線のグラフは脆弱という一般的な水道システムの位相強度の知見と一致する. また, 本研究ではグラフの一例として特徴的な十字路グラフと直線グラフを扱ったが, これらの分析から一般の水道システムの MLTI は概ね 0.4 から 1.0 の間に含まれると考えられる. また, 基準化 TI は [0, 1] の範囲の中で限界値を強調して示す一方で, MLTI は幅をもって分散するが, 各グラフの指標の順は δ も MLTI も同じである.

次に, ノード数を増減させた門前町グラフ, 直線グラフおよび十字路グラフに対しても同様な MLTI の特性を持つことを別途検討した. 表-4 は全体の構造を変化させない程度にリンクを剪定し, ノード数を半分 ($n=36$) にした門前町グラフ, 直線グラフ, 十字路グラフに対して MLTI の計算を行った結果を示している. 門前町グラフの MLTI は 0.61, 十字路グラフの MLTI は 0.42, 直線グラフの MLTI は 0.95 となり, 共にノード数が二倍のグラフとほぼ同じ値となった. 以上のことから, どのようなグラフにおいても MLTI は 0.4 から 1.0 の間に該当し, さらにノード数が変化しても MLTI は敏感に変動しないことがわかる.

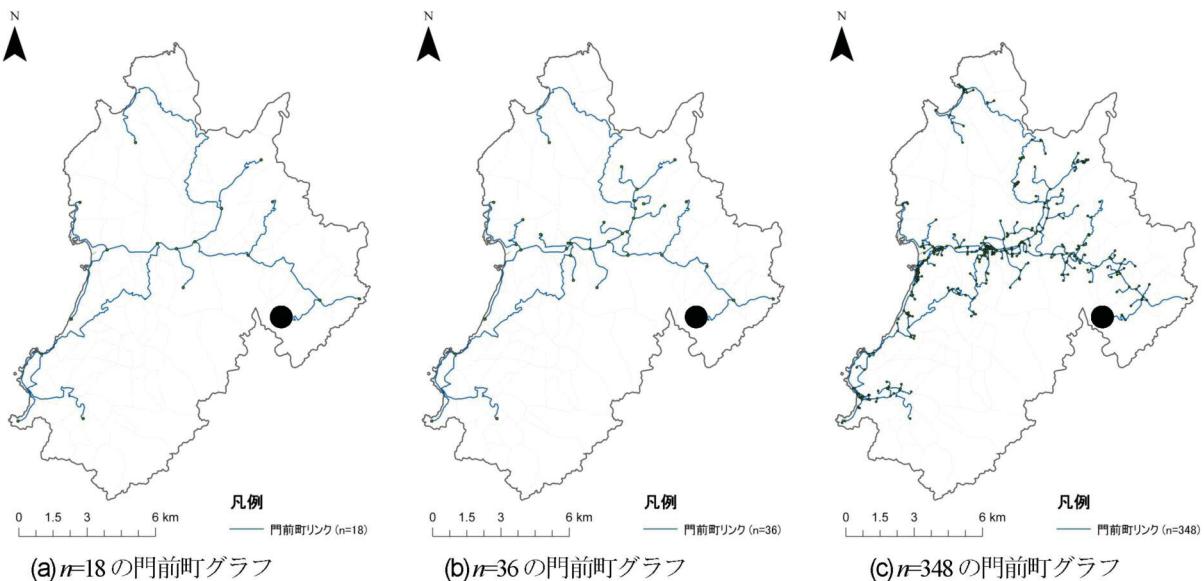


図-6 ノード数を増減させた門前町グラフ (●は水源ノード)

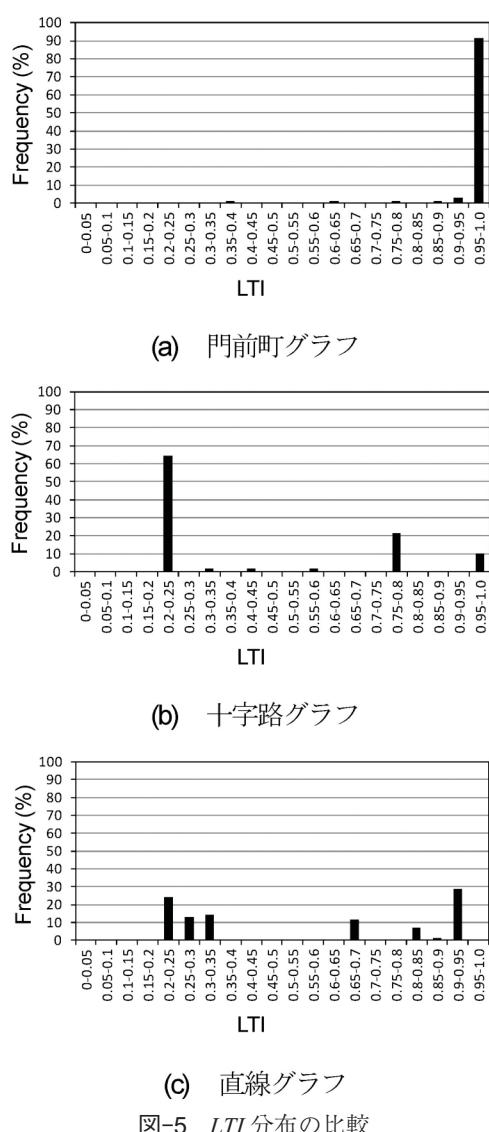


図-5 LTI 分布の比較

さらに、元の門前町グラフ ($n=72$) と比べてリンク

表-3 各グラフの $TI(G)$, 基準化 $TI: \delta(G)$, 平均 TI 損失率: $MLTI$, $(n, l) = (72, 71)$

グラフ	$TI(G)$	$\delta(G)$	$MLTI$
(a) 門前町グラフ	3.21×10^{13}	0.04	0.61
(b) 十字路グラフ	9.74×10^{11}	0.00	0.43
(c) 直線グラフ	8.06×10^{14}	1.00	0.98

表-4 ノード数を半分とした場合の各グラフの $TI(G)$, $\delta(G)$, $MLTI$, $(n, l) = (36, 35)$

グラフ	$TI(G)$	$\delta(G)$	$MLTI$
門前町グラフ	4.23×10^6	0.18	0.61
十字路グラフ	9.68×10^5	0.04	0.42
直線グラフ	2.42×10^7	1.00	0.95

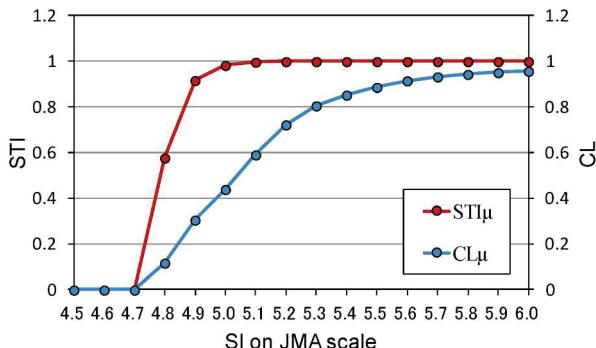
表-5 ノード数を増減させた門前町グラフの $TI(G)$, $\delta(G)$, $MLTI$, $(n, l) = (n, n-1)$

n	$TI(G)$	δ	$MLTI$
18	1.76×10^3	0.42	0.57
36	4.23×10^6	0.18	0.61
72	3.21×10^{13}	0.04	0.61
348	1.75×10^{43}	0.00	0.61

数の増減によるグラフの $MLTI$ の収束過程を調べるために、ノード数をある程度増減させて検討を行った。検討する門前町グラフの全ノード数は 18, 36, 72, 348 とした。全体の構造を変化させない程度にリンクを剪定し、各ノード数に調整した門前町のグラフを図-6 に示す。また、それぞれのグラフについて $MLTI$ の計算を行った結果を表-5 に示す。ノード数が 36 を超えると $MLTI$ は 0.61 に収束していることがわかる。このことから、ノード数が 36 以上でグラフの TI が 103 以上あれば概ね収束した $MLTI$ を得ることができる。

表-6 管径に関する補正係数: C_d ¹³⁾

管径	係数値 C_d
$\phi 75$	1.6
$\phi 100 \sim 150$	1.0
$\phi 200 \sim 450$	0.8
$\phi 500 \sim 800$	0.5

図-8 C_L と STI の平均値の関係

(3) 震度に対する TI システム特性

地震時におけるシステムの位相強度評価への適用性を明らかにするため、図-4 (a) の門前の管路モデルを用いて検討を行う。前述までの分析では、一つのリンクが損傷するか否かの事象のシステム特性を検討していたが、地震時には数ヶ所の被害が同時に発生し、それによって管路網がいくつかに分断される。そこで、モンテカルロ法によって無作為に損傷リンクが与えられた場合の TI 損失率を算出し、計測震度ごとの位相強度評価を行う。モンテカルロ法とは乱数を用いて十分な回数の計算を行うことにより、解析的に求めることができない問題でも近似的に解を求める計算手法であり、本手法を用いて異なる損傷パターンにおいても STI の平均とそのばらつきが明らかになり、水管路網全体の位相強度評価を行うことができる。管路リンクの損傷パターンの組み合わせは、まず式(8)に示す翠川ら¹²⁾の式によって計測震度に対する最大速度を算定する。

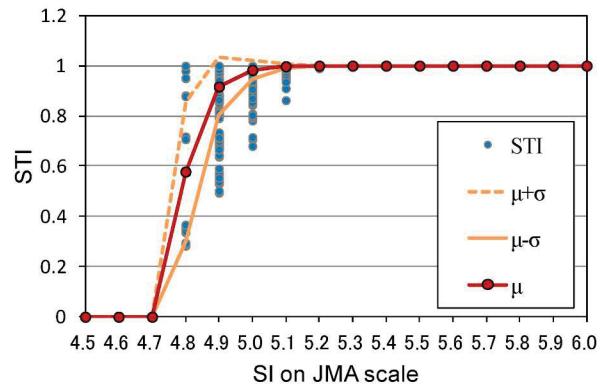
$$I = 2.68 + 1.72 \log v \quad (8)$$

ここで、 I : 計測震度、 v : 地震動の最大速度 (cm/sec)

さらに、式(9)、(10)に示す日本水道協会¹³⁾の最大速度 v に対する標準管路被害率 $R(v)$ 及び管路被害率 $R_m(v)$ の関係式から管路被害率を求める。

$$R(v) = 3.11 \times 10^{-3} \times (v - 15)^{1.30} \quad (9)$$

ここで、 $R(v)$: 最大速度 v に対する標準管路被害率(件/km)、 v : 地震動の最大速度 (cm/sec)

図-7 STI とその平均及び標準偏差

$$R_m(v) = C_p C_d C_g C_l R(v) \quad (10)$$

ここで、 $R_m(v)$: 最大速度 v に対する管路被害率(件/km)、 C_p : 管種に関する補正係数、 C_d : 管径に関する補正係数、 C_g : 地形・地盤に関する補正係数、 C_l : 液状化に関する補正係数

本研究ではデータの有無の関係から、管径による補正のみを行うこととする。管径に関する補正係数は表-6に示す通りである。管径は門前町上水道事業による能登半島沖地震の被災復旧箇所位置図¹¹⁾から得た。標準管路被害率に管路総延長を乗ずることによって計測震度ごとの被害件数を推定した。さらに管路総延長に対する各リンク長の比率を被害発生リンクの生起確率として、重みをあたえて損傷リンクを抽出した。そして、計測震度 I の地震動に対して複数のリンクが損傷したときの STI を求めた。

計測震度 0.1 ごとに試行を 1,000 回行い、 STI 及びその平均と標準偏差を求めた。その解析結果を図-7 に示す。計測震度が 5.0 を超えると STI は 1.0 に収束する。門前の管路モデルにおいて管路被害が 5 箇所以上出ると管路網の位相強度はほとんど失うことが示された。能登半島沖地震において門前町では波形は残されていないものの最大計測震度 6.4 が観測され⁹⁾、門前町の全戸において断水が確認されている。計測震度が 5.0 前後の STI が変動する範囲については検討が必要であるが、計測震度が 6.0 の場合の STI は 1.0 に収束しており、 STI の数値は過去の地震被害と整合する。

STI の特徴をさらに考察するために、既往の他ネットワーク強度指標との比較を行う。比較には前出の Dueñas-Osorio et al.³⁾が提案した連結性損失、 C_L を用いる。ちなみに、 C_L はライフラインネットワークの機能評価指標として起点ノードから総終点ノードまでの連結程度を示すもので、式(11) のように表される。

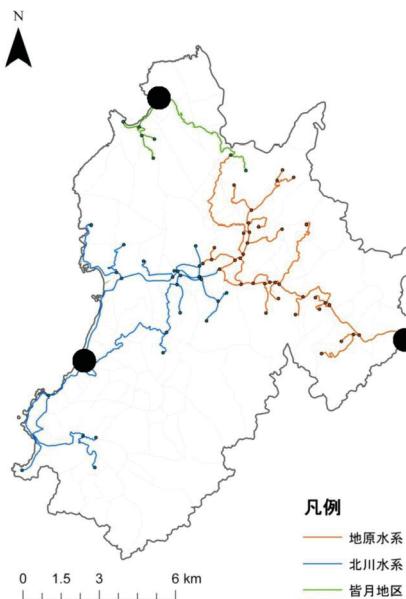


図-9 門前町の持つ水系の概要

$$C_L = 1 - \frac{1}{n_D} \sum_{i=1}^{n_D} \frac{n_G^i}{n_G} \quad (11)$$

ここで, n_D :すべての終点ノードの数, n_G :任意の終点ノードに対しての全ての起点ノードからの接続数, n_G^i : k 個のノードを除いた後に第 i の終点ノードに供給することができる始点ノード数

STI を算出する過程で同時に C_L も算出し, STI と同様に C_L の平均値と標準偏差を算出した. 計測震度4.5以上における C_L と STI の平均値の関係を図-8に示す. C_L の平均値は直線的に変化しているが, STI よりも勾配が緩やかである. 門前町の水道システムは円環状部分がなく樹系状であるため, 起点ノードから終点ノードへの接続数がそれぞれ一つしかない. そのため C_L の計算式が $1 - (\text{残存ノード数}/\text{ノード数})$ となってしまい, 残存ノード数が直接影響していることが直線的な変化の原因と考えられる. また, STI がこのように極端に変化しているのも, 円環状部分がないために水道システムがより集中しているためと考えられる. 円環状のある水道システムであれば, 2つの指標はより漸近してくると考えられる. また, STI はグラフの位相強度評価指標である TI がベースとなる指標であり, ノード同士の接続数から算出される C_L とは全く別の意味を持っている. システムの位相強度はある損傷箇所を超えると損傷前の位相強度を保有していないことを示している.

表-7 現在と統合以前の門前町における $MLTI$ の比較

グラフ	管路総延長(km)	(n,l)	MLTI
現門前町	102.8	(72, 71)	0.61
地原水系	43.8	(45, 44)	0.63
北川水系	47.8	(28, 27)	0.56
皆月地区	11.2	(7, 6)	0.54

5. システム統合による位相強度の変化

昨今の全国における市町村合併にともない, 市町村が持つ水道システムも統合させようとする動きが高まっている. 日常時の維持管理の簡便さやコスト縮減のみを求めた水道システムの統合が行われがちであり, 統合による位相強度の変化が考えられていないのが現状である. 前述した石川県輪島市門前町も元々3つの区域に水源と小規模システムが形成されていたが, 地原ダムの建設により統合された水道システムである. 事例分析として, 以前の小規模水道システムについて位相強度を評価し, 現在の統合された水道システムの位相強度と比較を行うことで, 水道システムの統合がシステムの位相強度に与える影響を調べる. 過去の門前町の水道システムには, 門前町の持つ2つの水系(地原水系と北川水系)と, 統合前に湧水供給を行っていた皆月地区にあたる3つの範囲において分割したグラフを用いた. 図-9に水系の範囲と水源ノードの位置を●で示す. 水源ノードはそれぞれの浄水場の位置とした. 3つのグラフについて $MLTI$ 及び STI を適用し, グラフの位相強度評価を行った. $MLTI$ の結果を表-7に示す. 現在の門前町の $MLTI$ が0.61であるのに対し, 地原水系の $MLTI$ が0.63と現在の門前町の $MLTI$ を上回り, 対して北川水系の $MLTI$ が0.56, 皆月地区の $MLTI$ が0.54と現在の門前町の $MLTI$ を下回っている. これは現在の門前町の水道システムが, 統合以前の北川水系と皆月地区の水道システムに位相強度では劣っていることを示す.

さらに, STI を用いて計測震度ごとの水道管路網の位相強度評価を行った. 解析は4.(3)で行った解析と同じ条件を用いて行い, 計測震度 I の地震動に対して複数のリンクが損傷したときの STI を求めた. 計測震度0.1ごとに試行を1,000回行い, STI 及びその平均を求めた. 図-10, 図-11に計測震度ごとの被害件数と STI の解析結果を示す. 被害件数はグラフごとの管路総延長に対して漸増しているのに対し, STI の平均値はグラフごとに単調増加ではあるが上に凸の曲線を描いている. とくに, 被害件数が1ないし2のときに位相強度のばらつきが大きくなることがわかる. また, 統合前の水道システムは現門前町の水道システムに比べ, 管路の総延長が短

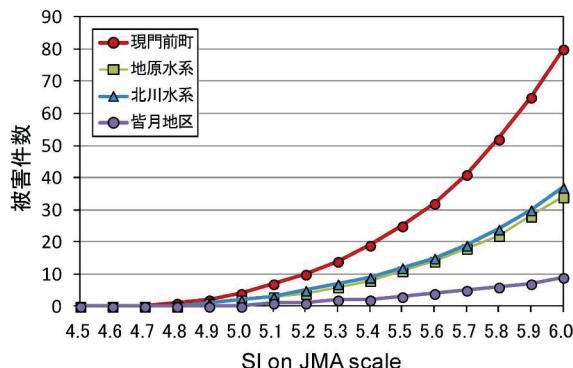


図-10 現在と統合以前の門前町における推定被害件数

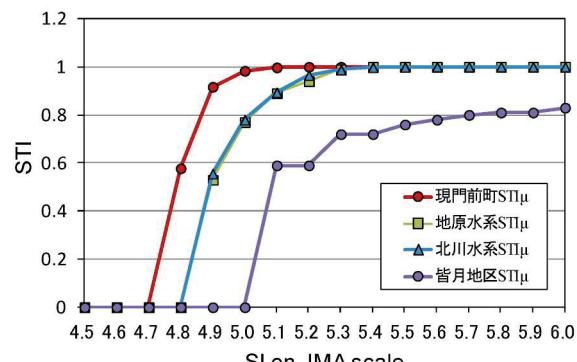
いために被害が出始める計測震度が地原水系と北川水系で 0.1, 皆月地区では 0.3 高くなった。地震時の現門前町における水道システムは統合前の水道システム比べて位相強度は低下していると評価できる。

実際の水道システムを例にして, TI を適用してシステム統合によるシステムの位相強度の変化を示すことができた。地原水系の $MLTI$ が現在の門前町の $MLTI$ を上回っているが, これは $MLTI$ がグラフ G における全てのリンクの延長による重みを考えない, リンクの繋がり方を評価する指標であるためと考えられる。グラフ G におけるそれぞれのリンクについての重みを考えた指標 STI を用いて, システムの統合により必ずしもシステムが頑強になるとは限らないことが示された。水道システムを管路の耐震化率だけではなく, 位相強度も合わせて考慮することが重要である。本研究で示した指標はシステム特性を表す指標の一つに過ぎないが, STI のようなシステム特性を考慮できる指標を用いた適切な評価によって, 地震時の水道システムにおける位相強度の低下を最小限に抑える検討を踏まえたシステムの統合が望ましい。

6. 結論

本研究は分子化の知見に基づいた TI を援用し, 配水管水道管路網の位相強度を評価する指標を提案するとともに実管路網の形状や規模に対する適用性を確認した。さらに, システム統合によるシステムの位相強度の変化を検討した。本研究の結論は以下にまとめられる。

- 1) リンクが損傷した場合に水源側の残余システムの位相強度の損失変化を評価できる指標, LTI 及び $MLTI$ を用いて TI を援用した指標が実際の

図-11 現在と統合以前の門前町における STI の比較

水道管路網に対して適用できることを確認した。一般的な樹系モデルの場合, $MLTI$ は 0.4 から 1.0 の間に収束することがわかった。また, リンク数が増減しても形状が変わらない限り, $MLTI$ は変動せず, 既往の基準化 TI , δ よりも適用性がある。

- 2) 地震時 TI 損失率, STI は既往の連結性確率よりもシステムの位相強度の低下に敏感に反応する指標であることが確認できた。
- 3) 実際の水道システムを例にして, STI を適用してシステム統合によるシステムの位相強度の変化を示すことができた。システムの統合により必ずしもシステムが頑強になるとは限らないことが示された。

今後の研究として, 本研究で適用した水道システムは門前町のもののみであったが, 都市域の複雑な形状の水道システムへの適用性の検討を行い, システム統合による位相強度への影響を評価していくことが望まれる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり, 輪島市より貴重な資料を提供していただいた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) (社)日本水道協会: 水道事業ガイドライン, 2005.
- 2) (社)日本水道協会: 市町村合併に伴う水道事業統合の手引, 2004.
- 3) Dueñas-Osorio, L., Craig, J. I. and Goodno, B. J.: Seismic response of critical interdependent networks, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol. 36, pp. 285-306, 2007.
- 4) Chang, S. E. and Nojima, N.: Mesuring post-disaster transportation system performance, the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research*, Pt. A, Vol. 35, pp. 475-494, 2001.
- 5) 星谷勝, 山本欣弥: 情報エントロピーを用いたシステムの信頼性と冗長性の検討, 土木学会論文集 I/No.

- 654, pp. 355-366, 2000.
- 6) Hosoya, H. : 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, 1971.
- 7) 岡田憲夫, 梶谷義雄, 植原弘之, 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・集中特性の性能モデルに関する研究, 土木学会論文集 IV/ No. 632, pp93-103, 1999.
- 8) 鍬田泰子, 高田至郎, 上野淳一, 高士直哉 : 水道管路の地震被害に関する要因分析, 建設工学研究所論文報告集, 49号, pp. 141-152, 2007.
- 9) 鍬田泰子, 高田至郎, 安井裕一 : 水道事業体の地震時緊急対応と市町村合併による課題, 建設工学研究所論文報告集, 49号, pp. 153-162, 2007.
- 10) 国土地理院 : 数値地図 25000 (空間データ基盤) 石川県, 2005.
- 11) 門前町上水道事業 : 被災復旧箇所 位置図, 2007.
- 12) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄 : 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol. 1, pp. 51-56, 1999.
- 13) (社)日本水道協会 : 地震による水道管路の被害予測, 1999.

(2011. 12. 12受付, 2012. 5. 21修正, 2012. 5. 22受理)

EFFECT OF WATER SUPPLY SYSTEM INTEGRATION TO TOPOLOGICAL STRENGTH USING TOPOLOGICAL INDEX

Tasuku OKAMOTO and Yasuko KUWATA

This study proposes a new system strength index by using the topological index based on graph theory and clarifies its applicability to the real water pipeline network. Moreover, this study analyzes the system strength of water supply system under the seismic intensity level with regard of integrated system and prior-independent systems and clarifies that the integration of water pipeline network does not always improve topological strength of the system.