

機関番号：12102

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20710140

研究課題名 (和文) ライフラインの地震時物理的被害に対する相互依存モデリングとその
創発的運用策の考案研究課題名 (英文) Modeling of interaction on seismic physical damage of lifelines and
its innovative implementation

研究代表者

庄司 学 (SHOJI GAKU)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：60282836

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、首都直下地震を想定し、首都圏に敷設・分布する道路・鉄道の交通インフラ、電力・都市ガスのエネルギー供給系システム、上・下水道の水処理系システム、並びに電信電話・インターネットの通信系システム等のライフラインを具体的に対象として取り上げ、これらの物理的連結性をノードとリンクにより構成されるネットワークでデジタルモデリングした上で、地震時の物理的被害とそれより波及するシステム機能への影響をネットワーク形態で数理的に表現し、全体ネットワークシステムの地震時脆弱性の定量的な評価手法を開発した。

研究成果の概要 (英文)：

Interaction on a physical induced failure of lifeline networks is evaluated in views of a seismic hazard. We select electric power supply systems, gas supply systems, and water supply systems distributed in Tokyo metropolitan area for analysis, and these related facilities and structural components are modeled as network nodes and links taking into account their functional interaction. To reveal the trend of network system reliability and analyze its variation, numerical simulation by using network parameters of average degree $\langle k \rangle$, characteristic path length L , clustering coefficient C , relative size of the largest cluster S , average size of the isolated clusters $\langle s \rangle$ and accessibility ratio R_a , is carried out for the cases that the nodes exposed to a high seismic hazard are affected in entire interactive lifeline networks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：災害リスク工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：ライフライン防災、地震災害、ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

(1) 現代社会における人々の社会・経済活動においては、エネルギー供給系（電力、都市ガス）、水処理系（上水道、下水道）、通信・情報系（固定通信、移動体通信、インターネット等）、及び、交通系（道路、鉄道等）の

ライフラインが不可欠な存在となっており、それらの地震災害による途絶が及ぼす影響は甚大なものとなる。特に、2011年3月の東北地方太平洋沖地震、2004年新潟県中越地震、1995年兵庫県南部地震によるライフライン被害が顕著な事例としてあげられる。

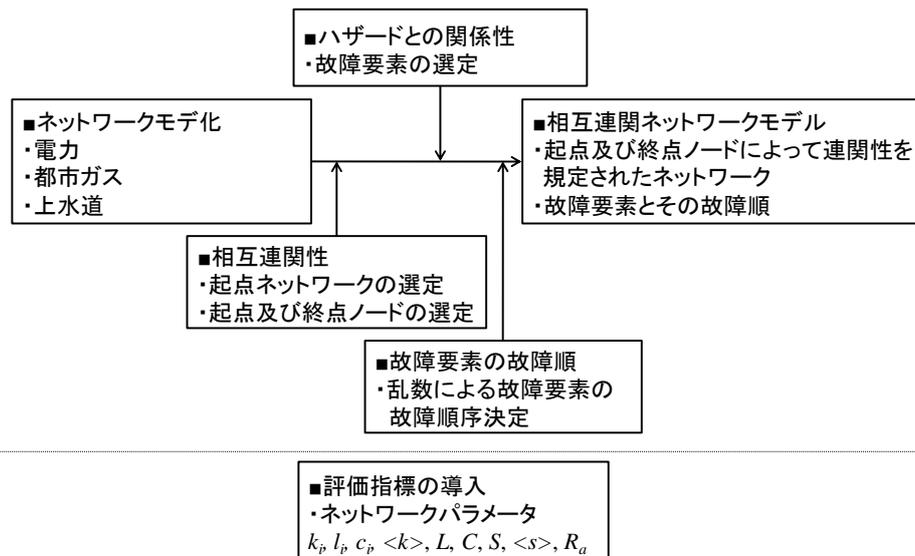


図1 評価手法の提案

今後、東海地震、東南海・南海地震や首都直下地震など、大規模な地震の発生が懸念されている中、地震時におけるライフラインの物理的被害を精度よく推計する技術は、国や自治体の防災計画や防災対策の立案の際に極めて重要となる。

(2) このようなライフライン地震防災の枠組みの中で、ライフラインの物理的被害による被害波及（相互連関）が大きな問題となっている。例えば、道路の構造被害による上・下水道や電力・ガスの添架管及び添架線の被害や、停電による上・下水道ポンプ施設や通信設備の機能麻痺などの機能的被害があげられる。このようなライフライン相互連関による被害は国や自治体等の被害想定の中で検討はなされているものの、定性的な検討に留まっており、相互連関を定量的に評価するモデルが必ずしも十分に明らかとはなっていない。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では相互連関を考慮したライフラインネットワークのシステム信頼性評価の枠組みの提案を行うとともに、相互連関の有無がシステム信頼性に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、首都直下地震相当の地震ハザードを想定した上で、関東圏に敷設された電力、ガス及び上水道ネットワークを取り上げ、ノード要素及びリンク要素をランダムに故障させることでシステム信頼性の評価を行なう。また、相互連関の有無による違いを比較することで、相互連関によって被害が新たに生じるケース及び被害波及が早期化するケースがあることを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 相互連関を考慮したライフラインネットワークのシステム信頼性評価の枠組みを図1のように考案した。本手法を構成する大きな要素として、ネットワークモデル及びその相互連関性、地震ハザード、故障要素、評価指標があげられる。

(2) システム信頼性評価のための計算アルゴリズムを図2に示す。本手法は、初期データの入力、ランダム故障、孤立ノード除去、相互連関による故障、隣接行列の生成、ネットワークパラメータ算出を繰り返すことでシステム信頼性の評価を行う。故障要素はノード及びリンクとする。また、一回のランダム故障からネットワークパラメータ算出までを1ステップと呼び、全故障要素を故障させるまでを1ループと呼ぶ。ステップは故障要素数に等しく、解析の設定条件毎に一定である。ループについては、故障要素の故障順が故障要素数の階乗通り存在するため、全故障順とするのは計算負荷の観点から現実的ではない。このため、故障要素数や算出値のばらつき等を考慮し、適宜設定を行う。

(3) 対象とするライフラインに対して、それらを構成する施設や管路の結節点をノード、管路をリンクとしてデジタルネットワークを構築する。相互連関のモデル化に際しては、あるライフラインの地震時物理的被害を基点とした他ライフラインの直接的及び機能的な被害波及に焦点を絞る。具体的なモデル化に当たっては、影響を与える要素及び影響

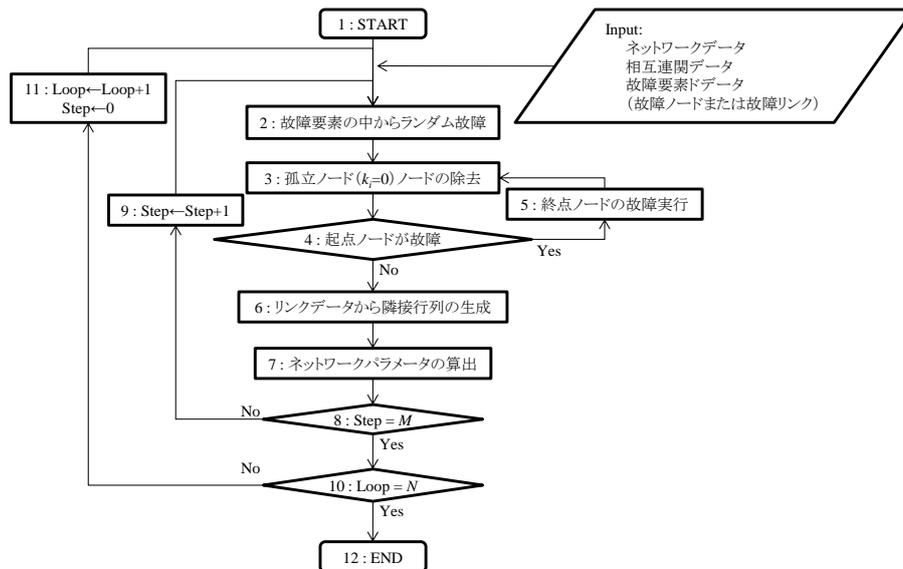


図2 システム信頼性評価に係わる計算アルゴリズム

を受ける要素をノードとして定義した上で、影響を与えるノード（起点ノード）が故障時に対応する影響を与えられるノード（終点ノード）を故障させるものとする。ここでは、起点ノードと終点ノードを合わせて相互関連ノードと呼ぶ。1つの起点ノードに1つの終点ノードが対応するとは限らず、複数ノード存在することや複数のネットワークにまたがって存在することがある。起点ノード故障時に故障対象となる終点ノードが単一でない場合は、それら全てが故障すると仮定する。また、ある相互関連の終点ノードが他の相互関連の起点ノードとなることもあり、対応する終点ノードが全てなくなるまで順次故障を実行する。

(4) 故障要素の判定するため、前述のネットワークと地震ハザードを地理的に重ね合わせる。これより、各ネットワークのノード及びリンクに地震ハザードの数値を対応付け、それらを各要素の故障判定値と呼ぶ。この時、各ノード及びリンクは一意的故障判定値を有するものとする。また、リンク要素については、1リンクが複数のメッシュにまたがっていることがあるが、リンクの敷設経路中の最もハザードが高いメッシュの値を故障判定値として採用する。以上より、各要素の故障判定値が任意に定める故障境界値を越えるノード及びリンクを故障の対象要素として選定する。この故障境界値は、一般的に対象とするハザードに基づき適宜設定する値であり、信頼性評価の意味合いを決定づける重要な指標となる。

(5) Albert et al. (2000)の研究を参考に、システム信頼性評価に活用するネットワーク

パラメータを定義した。これらの中でも、平均次数 $\langle k \rangle$ 、平均頂点間距離 L 及びクラスター係数 C はネットワークの基本的な性質を表現するパラメータである。故障が生じた後のネットワークに生じる変化を定量化するパラメータとして、最大クラスターサイズ S 、平均クラスターサイズ $\langle s \rangle$ 、可到達率 R_a をそれぞれ定義した。

4. 研究成果

(1) 提案手法の適用事例として、関東圏に位置する電力、ガス及び上水道ネットワークを取り上げた。電力のモデル化に当たっては、火力・水力・原子力発電所、変電所、開閉所、周波数変換所の施設及び送電線の結節点をノードとし、送電線をリンクとすることで、170ノード及び246リンクの無向グラフとしてモデル化した。なお、275kV以上の送電線のみを扱っているため、上記の変電所とは全て超高压変電所を指している。ガスのモデル化に当たっては、工場・製造所、GS、BS・VS・BVS、整圧所等の施設及び各導管の結節点をノードとし、高压・中圧A・中圧B導管をリンクとすることで、683ノード及び977リンクの無向グラフとしてモデル化した。上水道のモデル化に当たっては、東京都水道局が管理する主要送配水管及び施設を対象とし、浄水場、給水所、増圧ポンプ所、配水所の施設及び配水管の結節点を201のノード、配水管を290のリンクとしてそれぞれモデル化した。

(2) 相互関連性としては、システム間の機能的な被害波及の一例である、停電による被害波及を対象とした。具体的には、電力ネット

表1 対象とするネットワークの概要

ネットワーク	ノード数	リンク数	ノード故障		リンク故障	
			選定数	選定率	選定数	選定率
電力	170	246	54	0.318	131	0.533
ガス	683	977	348	0.510	756	0.774
上水道	201	290	67	0.333	160	0.552

表2 対象とするネットワークの平均次数 $\langle k \rangle$, 平均頂点間距離 L 及びクラスター係数 C

ネットワーク	$\langle k \rangle$			L			C		
	$\eta(0)$	$\eta_N(\text{end})$	$\eta_L(\text{end})$	$\eta(0)$	$\eta_N(\text{end})$	$\eta_L(\text{end})$	$\eta(0)$	$\eta_N(\text{end})$	$\eta_L(\text{end})$
電力	2.894	2.619	2.584	6.994	6.905	6.657	0.096	0.090	0.111
ガス	2.861	2.107	1.804	18.169	9.877	4.620	0.094	0.074	0.074
上水道	2.886	2.358	2.149	10.137	10.807	5.506	0.092	0.060	0.093

ワークの変電所に生じた故障が近隣のガス及び上水道ネットワークの施設に及ぼす被害を対象とする。従って、電力ネットワークの変電所を起点ノード、ガス及び上水道ネットワークの施設を終点ノードと定義した。1終点ノードに対して1起点ノードを対応させることとし、距離的に最も近い起点ノードと相互連関の関係で連結されるとした。ただし、最も近い起点ノードとの直線距離が10kmを越える場合、該当ノードは終点ノードから除外した。これにより、電力・ガスネットワーク間の相互連関ノードは起点ノード数31、終点ノード数108、電力・上水道ネットワーク間の相互連関ノードは起点ノード数23、終点ノード数82となった。

(3) 対象とする地震ハザードとしては、防災科学技術研究所によって公表されている確率論的地震動予測地図を用いた。具体的には、2010年1月1日を起点として今後30年間で震度6弱以上の揺れに見舞われる確率を参考に、発生確率26%以上のハザードに対応するノード及びリンクを故障ノード及び故障リンクとして選定した。以上より、上述した起点ノードの中で、故障ノードとして選定されるノードは、電力・ガスネットワーク間で18ノード、電力・上水道ネットワーク間で12ノードである。また、故障ノードに選定される起点ノードに対応する終点ノードは、電力・ガスネットワーク間で71ノード、電力・上水道ネットワーク間で28ノードである。

(4) 表1には、本研究で対象とするライフラインネットワークのノード数・リンク数、故障要素として選定されたノード数・リンク数、及びそれらの選定率を示す。表2には、各ネットワークの特徴を前章で説明したネットワークパラメータを用いて示す。ここで、

$\eta(0)$ は初期状態、 $\eta_N(\text{end})$ はノード故障解析で全故障ステップ終了時、 $\eta_L(\text{end})$ はリンク故障解析で全故障ステップ終了時の故障率をそれぞれ表す。表1によれば、電力では170ノード中54ノードが故障ノードとして選定され、246リンク中131リンクが故障リンクとして選定される。その結果、全ノード及び全リンク中に占める割合はそれぞれ0.318及び0.533である。表2によれば、故障ノードの全故障時には平均次数 $\langle k \rangle = 2.619$ 、平均頂点間距離 $L = 6.905$ 及びクラスター係数 $C = 0.090$ であり、故障リンクの全故障時には $\langle k \rangle = 2.584$ 、 $L = 6.657$ 及び $C = 0.111$ である。また、ガスに対しては、683ノード中348ノードが故障ノードとして選定され、977リンク中756リンクが故障リンクとして選定される。全ノード及び全リンク中に占める割合はそれぞれ0.510及び0.774である。表2によれば、故障ノードの全故障時には $\langle k \rangle = 2.107$ 、 $L = 9.877$ 及び $C = 0.074$ であり、故障リンクの全故障時には $\langle k \rangle = 1.804$ 、 $L = 4.620$ 及び $C = 0.074$ である。さらに、上水道では、201ノード中67ノードが故障ノードとして選定され、290リンク中160リンクが故障リンクとして選定される。全ノード及び全リンク中に占める割合はそれぞれ0.333及び0.552である。故障ノードの全故障時には $\langle k \rangle = 2.358$ 、 $L = 10.807$ 及び $C = 0.060$ であり、故障リンクの全故障時には $\langle k \rangle = 2.149$ 、 $L = 5.506$ 及び $C = 0.093$ である。

(5) 相互連関を考慮したノード及びリンク故障解析により、相互連関を考慮したライフラインネットワークのシステム信頼性の評価を行なった。図3には、相互連関の影響を受けるガスネットワークのネットワークパラメータの変動を示す。電力については、相

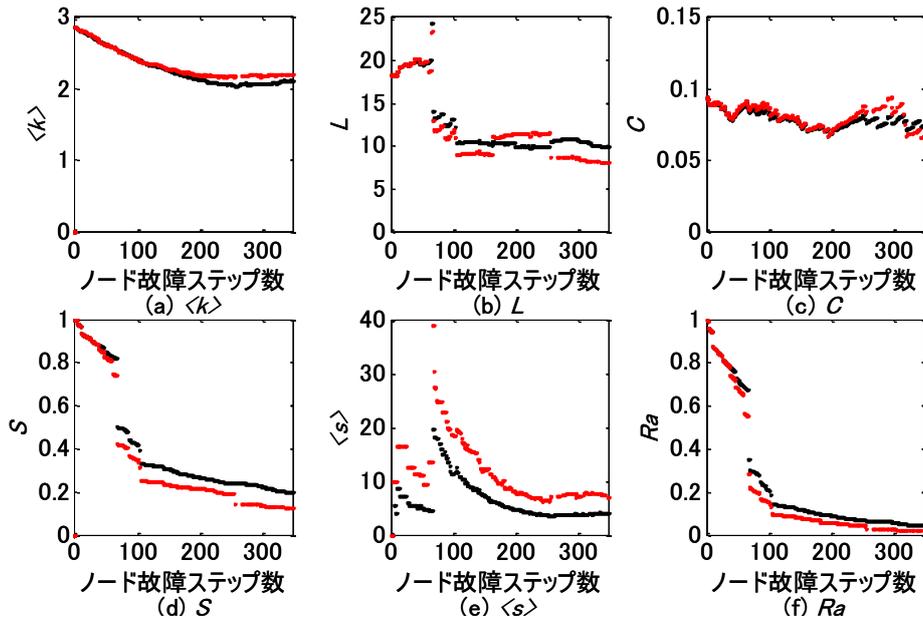


図3 相互連関を影響を受けるガスネットワークのネットワークパラメータの変動 ($\langle k \rangle$ 平均算出値が最小パターンとなる場合)

互連関の終点ノードを持っておらず、相互連関を考慮しないモデルの場合と等しい結果となる。ガス及び上水道に関しては、単純なノードの故障に加えて、電力ノードの故障による被害波及の様相を捉えることが重要なため、100 パターンの繰り返し計算の結果に加え、特徴的な故障パターンを抽出し、相互連関を考慮しないノード故障及びリンク故障の場合と比較した結果を検討した。相互連関モデルでは、解析ステップ毎にいずれかのネットワークの中から1ノードずつ故障させる。このため、解析ステップ番号と各ネットワークに対する故障の発生するステップ数が必ずしも一致しないため、ガスネットワークのノードに故障が発生したステップ数をガスノード故障ステップ数とし、解析ステップ数と使い分けて表現した。

(6) 図3には、 $\langle k \rangle$ 、 L 、 C 、 S 、 $\langle s \rangle$ 及び R_a の算出値の平均が最小な故障パターン（平均算出値最小パターン）となる場合の結果を示す。図中の赤線は相互連関を考慮した場合の算出結果を、黒線は同故障パターンで相互連関を考慮しない場合の算出結果をそれぞれ示している。また、横軸のノード故障ステップ数は先述したガスノード故障ステップ数を表す。これによれば、 $\langle k \rangle$ 、 L 、 C については相互連関の考慮の有無にかかわらずほぼ同様の変動を示す。一方、 S 、 R_a については、ステップが進むごとに相互連関を考慮した場合の算出値が相互連関を考慮しない場合に比べて低い値をとり、 $\langle s \rangle$ は高い値で推移する。これは、相互連関によるノードの故障が影響しているためである。これらの解析結果をネットワークの空間情報と対応させ

て分析すると、相互連関によって神奈川県東部のノードがガスネットワークから分断されることが明らかとなった。また、 S 、 R_a が大きく減少するのは、京葉ガスと東京ガスの導管の結節点の故障によりガスネットワーク全体が大きく分断されるためであることが明らかとなった。

(7) このように、関東圏に敷設された電力、ガス、上水道のライフラインを対象とした相互連関モデルに対するシステム信頼性評価を通じて、相互連関がライフラインネットワークのシステム信頼性に及ぼす一般的傾向を明らかにした。これより、相互連関により新たにネットワークに分断が発生すること、新たな分断ではないが分断の発生が早期化することが明らかになった。また、相互連関によるノード故障がこれらの分断発生 of 直接的な原因になる場合と間接的な原因になる場合があり、それらは故障パターンに依存することが明らかとなった。具体的には、ノード故障解析においては、ガスネットワークの神奈川南東部や上水道ネットワークの町田市、多摩市及び稲城市のネットワークが、リンク故障解析においては、ガスネットワークの千葉県北部のネットワークが新たに分断されることが明らかとなった。さらに、ノード故障解析におけるガスネットワークの千葉県北西部及び埼玉・栃木方面のネットワーク、リンク故障における上水道ネットワークの日野市及び八王子市東部、東京都区部と多摩地区の分断が早期化することが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Shoji, G., Tabata, M., Evaluation of System Reliability of Lifeline Networks in views of a Seismic Hazard, Proceedings of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Hong Kong, China, 2011.1, 査読有.

[学会発表] (計5件)

- ① 田端雅史, 庄司学, 相互連関を考慮したライフラインネットワークのシステム信頼性解析, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集 (CD-ROM), pp.1744-1751, 2010.11.19
- ② 田端雅史, 庄司学, エネルギー供給ネットワークの地震ハザードに対するシステム信頼性評価, 電気学会研究会資料, 新エネルギー・環境研究会, pp.61-66, 2010.3.10
- ③ Shoji, G., Tabata, M., Modeling of Interdependency associated with a System Failure of Critical Infrastructure Networks in views of a Seismic Disaster Risk, Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, International Urban Earthquake Engineering Center for Mitigating Seismic Mega Risk, Tokyo Institute of Technology, pp.95-100, Tokyo, Japan, 2009.3.3
- ④ Shoji, G., Tabata, M., Clarification of Interdependency associated with a System Failure of Critical Infrastructure Networks in views of a Seismic Risk, SRA 2008 Annual Meeting, Boston, USA, 2008.12.9
- ⑤ 庄司学, 伊藤頭子, 田端雅史, ライフラインネットワークの地震ハザードに対する俯瞰的システム信頼性評価, 日本地震工学会大会—2008 梗概集, pp.290-291, 2008.11.3

[図書] (計1件)

- ① 遠藤靖典編著, リスク工学の基礎, コロナ社, 2008.9 (6章「リスクプロファイルによるリスクの計量化」, p.112-130, 分担)

[その他]

特になし

6. 研究組織

○研究代表者

庄司 学 (SHOJI GAKU)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：60282836