

クロス・インパクト法による ライフライン系の地震時相互連関のモデル化

能島 暢呂・亀田 弘行

A FUNDAMENTAL MODEL OF LIFELINE DISASTER INTERACTION USING CROSS IMPACT METHOD

By Nobuto NOJIMA and Hiroyuki KAMEDA

Synopsis

A probabilistic model to evaluate the seismic risk of urban lifeline network systems is developed with emphasis on the interactive aspects of lifeline earthquake disaster. First, the outline of interaction-related problems in lifeline earthquake disaster is compiled in a comprehensive table. Next, with the understanding that functional dependence among lifelines causes a significant interaction in the event of earthquake, focus is placed on two network systems model in the light of functional dependence of a lifeline system on the other. The probability of system malfunction caused by damage interaction in addition to the damage to the system itself is assessed. Through this, system interaction is quantified on a probabilistic basis as a single parameter, in terms of the "cross impact factor". Besides, incorporating a hazard curve method, the effectiveness of back-up facilities has been evaluated. The method of fault tree analysis is conveniently used in the process of probabilistic calculation. An illustrative numerical example is presented.

1. 序 論

1.1 はじめに

都市震害の特徴は、災害の波及性・複合性・同時多発性にある。ライフライン地震災害は、社会全体への被害波及の原点となるものであると同時に、それぞれのシステムの被害自体が上の特徴をみだしており、都市震害の典型的な側面といえる。またライフライン系は相互依存性・相互補完性を持つため、地震時には種々の悪影響を及ぼしあうことが知られており、総合的都市地震防災対策を講じるためには、個々のシステムの地震時信頼性向上を図るのみならず、ライフライン系間のハード・ソフトの両面におけるインターフェースの効率の改善を行うことが不可欠である。

筆者らはこれまで、ライフライン系の地震被害・地震防災対策をシステム論的に分析したうえで¹⁾、個々のシステムの空間的・機能的な結びつき（システムリンク）によって連結された全体系のシステムを「ライフライン都市ネットワーク」と規定し、都市機能をサポートする基盤施設として総合的な耐震化を図る必要性を論じてきた²⁾。都市防災問題を扱ううえでは、ライフライン地震災害が都市機能低下に及ぼす影響を総合的に分析することが重要であるが、本研究ではそのような広範な波及構造を対象とする前に、ライフラインの地震時相互連関を解明し、都市ネットワーク内部で生じる種々の悪影響を除去することが

重要と考えている。以上の観点から本研究は、システム間の相互影響を考慮したライフラインの地震時信頼性・機能性を評価するリスク分析を構築して、ライフライン全体系における被害最小化と地震防災対策の最適化を考えてゆくための基礎資料とすることを最終的な目標とするものである。

1.2 従来の研究と本研究の概要

複数のライフラインの地震防災問題を対象としている研究をみると、まず佐藤・伯野³⁾がライフライン・システム相互の影響連関を表にまとめ、相互依存関係にある2システムの簡単なモデルを対象とした信頼性解析を行っている。和泉ら⁴⁾は、ガス・電力・上水道システムの被震時機能低下と回復過程を表現するシステムダイナミクス・モデル (SD モデル) を構築し、都市の供給システムの復旧過程の同時シミュレーションによって都市機能の回復を総合的に表現した。ここでは道路システムの地震被害による復旧支障としてのライフライン相互連関を含んでいるが、ガス・電力・水道システム間の直接の相互連関は考慮されていない。また星谷・大野は、FSM (fuzzy structural modeling) を用いてライフライン機能被害の相互連鎖を定性的に構造化し^{5), 7)}、システム間の相互連関を反映した復旧予測・機能評価法を提案した。さらに、電力・上水道の供給網を対象とするSDモデルを構築し、道路被害に伴う復旧支障を考慮して、同時シミュレーションを行い、両システムの復旧過程の予測を行った^{6), 7)}。

このように、システム相互連関の問題に取り組んだ研究は近年みられるようになってきているが、問題点として以下の点が挙げられる。

- ① システム間の相互影響は、地震の規模や都市の特徴、システム特性に大きく左右されと考えられるが、相互連関による地震被害波及リスクがどの程度になるのかをまず考察する必要がある。
- ② ライフライン事業者が、他のライフライン機能喪失に備えて整備している防災対策としての「バックアップ」が考慮されていない。従ってバックアップ設備の信頼性や有効性を取り扱ったものがみられない。

本研究は、以上のような問題点を鑑み、ライフライン都市ネットワークのリスク分析モデルの第一段階として、ライフライン間の機能的被害波及を考慮したリスク分析を行う手法の基礎的考察を試みるものである。まず、地震災害におけるライフライン系間の相互連関の様相を体系的に整理し、過去の地震で実際にみられた種々の相互連関の特徴をまとめる。さらに、そこで提示される多面的な相互連関の様相の中から、特に重要な側面と考えられる、ライフラインの機能的相互依存に起因する被害波及に焦点を絞り、依存関係にある2つのシステムを対象として、地震時に生じる被害連関の度合いをクロス・インパクト係数という単一のパラメータで確率論的に評価するための基礎的な考え方を示す。

2. ライフライン地震災害におけるシステム間相互連関

2.1 システム相互連関の全貌

Table 1 は、相互連関に起因する被害の具体的な様相をまとめたものであり、既往地震でみられた相互連関を参考に、発生が予想される連関を併せて示している。このような多面的な相互連関の様相を類型化すると、以下の4点に要約されよう。

(a) ライフライン間での機能的被害波及

個々のライフラインは独自に機能するのではなく、ライフラインそのものが他のライフラインの機能に依存しつつ、都市基盤施設としての役割を果たしている。その依存体系が地震によって破壊され、システム機能障害が生じることがある。例えば停電による動力喪失や、情報通信機能マヒによる、系統管理・集中制御機能等の中枢機能喪失などである。

(b) 復旧段階におけるシステム間での相互影響

Table 1. Features of interactions among lifeline systems in earthquake disaster

	electric power supply	gas supply	water supply	sewage disposal	waste & garbage disposal	transportation		telephone	computer communication
						road traffic	urban railways		
electric power supply	* excessive use as alternatives	malfunction of plants, gas holders, pressure devices	malfunction of filtration plants & pumping engines	malfunction of disposal plants & pumping engines	malfunction of disposal plants	traffic signal disorder	loss of power, malfunction of block signal	malfunction of tel. offices	malfunction of online service loss of data
gas supply	excessive use as alternatives	* recovery work complications, scramble for machinery	recovery work complications, scramble for machinery	recovery work complications, scramble for machinery	malfunction of disposal plants	no passing owing to repair work	no illumination		
water supply	recovery work complications, scramble for machinery lack of coolant	* recovery work complications, scramble for machinery	recovery work complications, scramble for machinery	recovery work complications, scramble for machinery		no passing owing to repair work, flooding		lack of coolant for switchboard	lack of coolant for computers
sewage disposal	inundation of underground pipes and cables	recovery work complications, scramble for machinery		*		no passing owing to repair work, flooding			
waste disposal	inundation of underground pipes and cables				*	accumulation of waste on road			
road traffic	battery cars unavailable	water wagons unavailable			no transp. of waste & garbage	*	excessive use as alternatives	excessive use due to jam	
urban railways	delay in recovery work, (collecting workers & operators, recovery materials, and machinery, transportation of restoration party) no commuting, no transportation of materials and fuel					excessive use as alternatives	*	excessive use due to transportation delay	
telephone	malfunction of centralized control systems, no communication for recovery work					no passing owing to repair work		*	tel. circuits unavailable
computer communication	malfunction of centralized control systems, (collecting workers & operators, directing restoration party, answering damage report from users, publicity to users, communicating with government office)					no passing owing to repair work			*

functional disaster propagation due to inter-dependence ○
physical disaster propagation ●
recovery hindrance △
influences alternative systems □

地震が発生すると、平常には行われない活動が新たに必要となる。そのような場面では、全てのライフラインが被災状況下で一斉に活動を始めるため、種々の相互影響が発生する。限定された情報および資源のもとでの復旧活動における資機材の競合や、交通機能マヒによる復旧機動力喪失、復旧作業の錯綜、復旧情報（復旧戦略策定・実行の意思決定に必要な情報／復旧状況に関する情報）伝達困難、二次災害防止のための復旧作業実施の猶予、などである。

(c) ライフラインの要素構造物相互の被害波及

ライフラインの埋設管は、原則として道路地下を占有して敷設されている。地震に起因する種々の外力が、あらゆるライフライン・システムに広域かつ同時に作用することによって、近接したライフライン要素構造物の相互間で物理的被害波及が生じる。

(d) 代替システムに及ぼす影響

交通機能を担う道路と鉄道、あるいはエネルギー供給を使命とする電力とガス、これらのシステムにおいては、どちらか一方が機能しなくなったとき、他方が失われた機能を補填できる場合がある。このようなライフライン相互の補完性が、地震時に需要増加等の現象として表面化する。

Table 1 では、地震発生から復旧完了に至るまでの相互連関を一括してまとめたが、実際には、各システムが他に及ぼすインパクトの強さは地震発生後時間的に変動する。このことには、①平常時・緊急対応・復旧期において不可欠となるシステムが変化（電力・情報通信・道路交通が、動力源・情報収集伝達・復旧作業のうえでそれぞれ重要）することが関与しているとともに、②一般的に電力・水道・ガスの順に早いとされる機能回復の早さや、③ライフライン優先復旧の実行の有無などが複合的に関連していると考えられる。このようなダイナミックな側面は重要であるが、本論では扱わないものとする。

2.2 既往地震におけるライフライン相互連関

2.1 の議論は特定の地震に関するものではないが、既往地震の被害調査報告（1923 年関東大地震、1978 年宮城県沖地震、1983 年日本海中部地震、1989 年 Loma Prieta 地震など）を調べてみると、相互連関の影響は、(1) それぞれの都市におけるライフライン系の構成条件、(2) ライフライン系の被害の程度、(3) 地震防災体制、などの条件に左右され、表面化する相互連関の様相は地震によってかなり違いがみられる。(1) に関しては、システム規模の違い、システム間の相互依存関係、施設配置のなされ方の相違などが相互連関の発生を規定する。また(2) について簡単にまとめると、中程度の地震では、個々のシステムの被害が小さくても相互連関が生じるとサービス継続や復旧活動に支障をきたす一方、ライフラインの被害が全体的に甚大である場合、地震直後には相互連関は表面化しないが、回復が遅れたシステムが他のシステムに長期的に影響を及ぼす。また(3) について、関東大地震の震害調査報告で当時の技術者・研究者が、バックアップ設備や地震後の情報通信の重要性など、相互連関の影響を視野にいれた防災対策に関するコメントを残し、その後の教訓となっている点は特筆すべきことである。

次に、相互連関の実例を示す。Table 2 は、1989 年 Loma Prieta 地震におけるライフライン相互連関を被害調査報告書^(8), 9)などを参考にし、Table 1 に対応させてまとめたものである。ここではこの地震における顕著な相互連関を要約しておく。ただし、被害の詳細については上に掲げた調査報告書を参照されたい。

まず、停電被害が上水道と情報通信システムの機能存続に大きな支障を及ぼしたことが特徴的である。上水道では、ポンプ圧送地域であってかつバックアップ電源設備が被害を受けた地域で断水が生じた例が報告されている。バックアップ電源が有効に働いた場合、もしくは迂回経路を使って電力が供給された場合には、相互連関による悪影響は免れている。また自然流下地域において流送には影響はなかったものの、下水管の破損によって汚水が流出し、地下水汚染のおそれが生じたため、ガスで沸騰させて使うよう広報を行ったが、ガスが停止していたためにそうできなかった、という多重連関のケースも報告されている。情報通信システムにおいては、非常用発電機や蓄電池等のバックアップが整備されていたにもかかわらず、

Table 2. Lifeline interactions in 1989 Loma Prieta earthquake

	electric power supply	gas supply	water supply	sewage disposal	transportation		telephone
					road traffic	urban railway	
electric power supply		Santa Cruz: gas explosion due to electricity coaback (spark ignition) recovery work arrangement with electric power supply system *	Watsonville: pump stopped due to loss of power(no battery) Santa Cruz: pump stopped for 18hrs (gravitative flow area survived; no water in pump-based supply area) S.F.: power failure due to gas leak inspection, no water in pump-based supply area and Marina district no power for repair work EBMUD: short-term loss of power at Lafayette filtration plant, Oakland Control Center power loss, no service	S.F. and Santa Cruz: power failure at pump station	S.F.: traffic jam due to malfunction of traffic signal	BART omitted stops at some stations to save electricity	capacity diminished due to use of storage cell PBX with no battery, malfunction Pacific Bell: Bush/Pine Office(S.F.) no coolant trouble no service for 3 hrs Hollister Office generator failure no service for 3 hrs GTE: Monte Bello Office (Los Gatos) failure of fuel tank of generator malfunction(6-7hrs)
gas supply	S.F.: gas leak inspection before recovering electricity	*	Santa Cruz: no home treatment		closed due to propane fire (Rte. 80 WB Central Ave.)		
water supply	Santa Cruz: recovery work arrangement with water supply system		*	Santa Cruz: damage detection by analogy	Marina: road failure due to water leakage		
sewage disposal			Santa Cruz: underground water contamination due to outflow of crude sewage from pipeline	*			
road traffic			Santa Cruz: no transporting machinery due to damage to bridge	Santa Cruz: damage detection by analogy	*	BART riders increased due to Bay Br. closure (Oct.23 : *40%)	
urban railway						*	
telephone			S.F. and Santa Cruz: overload				*

地震によってそれらが損傷を受けて使用不能になったり、人為的ミスで活用できなかつたりしたために、結果としてバックアップの有効性が発揮されなかった例が多数報告されている。

次に、2.1の分類(d)の例として興味深い現象が、サンフランシスコにおいて、ハイウェイ・システムと、地下鉄(BART)の間でみられた¹⁰⁾。サンフランシスコ・ベイブリッジの不通の影響は、ハイウェイ自体の交通流体系の変化として現れただけでなく、無被害に近かったBARTの湾横断交通量の増加という形の相互連関として表面化した。都市交通を担う異種のシステムが、普段は認識されていないとしても、相互にバックアップする機能を持つことを示唆しているとともに、双方の“共倒れ”を回避できたおかげで、サンフランシスコ湾岸地域の都市交通機能が維持されたという教訓を導き出すことができる。なお、サンフランシスコ側の運行施設で停電が発生したが、冗長性を利用してオークランド側から通電がなされたため、影響はごく軽微なものにとどまった。

他の地震についても同様の表を作成したが、これについては文献11)に詳しく考察されているので、ここでは割愛する。

2.3 本研究で対象とする相互連関

Table 1にみられるような多面的な地震時相互連関のなかで、ライフライン地震防災対策を考えて行くうえで特に重要な点として、(a)に関するシステム間の相互依存体系の破壊による被害波及、および(b)の復旧活動支障、の2点が挙げられる。

(b)については、各システムの被害状況・復旧状況を時間的に表現し、相互に及ぼす影響の定量的尺度を提供する動学モデルを構築する必要がある。そこでは、道路網被害・情報通信網被害がライフラインの復旧活動に及ぼす影響を評価するための基準や、個別のシステムにおける対応行動・組織運営の意思決定方式などの前提条件が不可欠となる。

一方(a)については、被害波及の発生の有無そのものがまず問題となり、それは各システムの被害の程度と、相互依存の状況、およびバックアップをはじめとする地震防災体制、の三者によってほぼ規定され、復旧戦略的な要素はあまり入ってこない。このことから、システム分析的手法を用いて相互連関の発生の原因を分析しておけば、確率論的な扱いによるリスク評価が可能であると考えられる。本研究では、第1段階として(a)のみを扱うこととし、依存関係が存在する2つのネットワーク・システムを対象として相互連関の発生条件をシステム論的に整理し、相互影響の度合いをリスク分析的に評価する方法を示す。具体的には、クロス・インパクト分析の概念を参考にして、一方のシステムの機能喪失が他方のシステムの機能喪失に与える影響を「クロス・インパクト係数」という単一のパラメータで表現し、これに基づいて、地震規模の違いによるインパクトの変化や、バックアップ設備の有効性などについての議論を行うものである。なおライフラインの地震時信頼性解析の主要部分をなす連結性・機能性解析のステップは与件として扱い、ここでは省略する。

3. クロス・インパクト分析

3.1 クロス・インパクト分析の考え方

クロス・インパクト分析^{12),13)}は、相互に発生因果関係を持つ複数事象の、将来時点における生起確率を求めるためのシステム手法である。多数の事象が複雑に相互作用するために不確定性の高い問題、例えば地域計画の作成や、社会学の分野における将来予測などを扱うのに有効な手法である。以下にその手順を簡単に示す。

①まず、扱っている問題に関して将来起こり得ると思われる事象をすべて抽出する。

②全ての事象*i*について、それぞれが単独に生起すると考えられる確率 $P(i)$ をデルファイ調査などか

ら決定する。

③事象間の関連の度合い、つまり、ある事象 j の生起が他の事象 i の生起を促進 (enhance) するか抑制 (inhibit) するか、そしてその影響はどの程度のものかについて議論し、 $-1 \sim 1$ の数値 a_{ji} もしくは正の数値 r_{ji} に代表させる。ここで、 a_{ji} においては正符号は促進を、負符号は抑制をそれぞれ表し、 r_{ji} においては、 $r_{ji} > 1$ が促進を、 $0 < r_{ji} < 1$ が抑制を表す。

④事象を行と列とする正方行列を作成し、その要素として③で得られた数値を書き入れる (クロス・インパクト行列)。

⑤クロス・インパクト行列を用いて、②の確率 $P(i)$ を条件付確率 $P(i | j)$ に変換する。

クロス・インパクト分析による条件付確率への変換式としては、以下の2式が挙げられる。

$$P(i | j) = P(i) + P(i) \cdot \{1 - P(i)\} \cdot a_{ji} \quad (\text{放物線型}) \quad (1)$$

$$P(i | j) = r_{ji} \cdot P(i) / \{1 + (r_{ji} - 1) \cdot P(i)\} \quad (\text{双曲線型}) \quad (2)$$

上述の2式を用いた場合の条件付確率を Fig. 1 (a), (b) に示す。ここで、いずれの式においても、クロス・インパクト行列の

要素は、③に示した値の範囲内で任意に定められるため、ベイズの定理が満足される保証はない。また“ j が発生しない”という事象が i の発生に与える影響は表現されないし、 j の発生確率に関係なく条件付確率 $P(i | j)$ が算出されることになる。これらの確率変換法では、事象間の複雑な因果関係が将来の事象の生起確率に及ぼす影響はどの程度のものなのか、ということに関する主観的判断を定量化すること主目的とするため、確率論的な意味合いや整合性をある程度犠牲にしているといわざるを得ない。

3.2 本研究における クロス・インパクト分析の応用

本研究ではクロス・インパクト分析の概念を応用して、ライフライン系

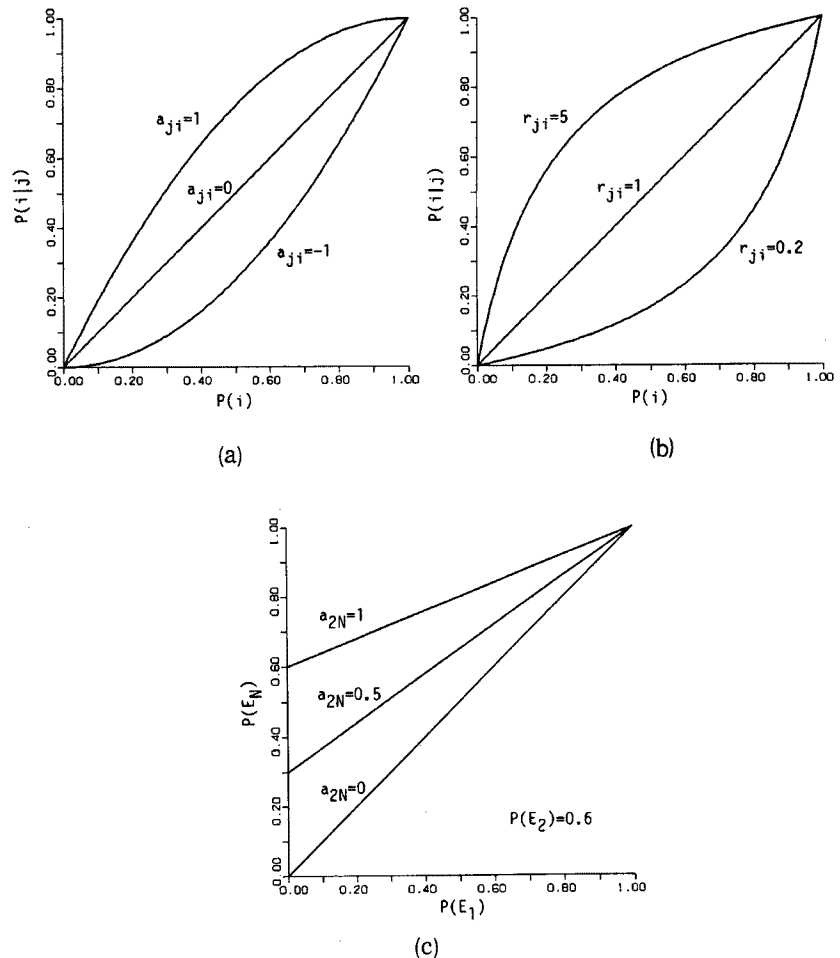


Fig. 1. Probability conversion using cross impact factor.

- (a) Eq. (1)
- (b) Eq. (2)
- (c) Eq. (3) (adopted in this study)

の地震時相互連関のインパクトを確率論的に表現する。ただしここでは問題を単純化するため、連関の重要な側面である復旧期の相互支障や相互連関の時間変動性は考慮せず、ごく簡単な2システムを対象として、機能的依存状態が破壊された場合にどの程度被害波及が生ずるかについてのみ扱うこととした。

このようなライフライン相互連関を扱う場合、システム間の影響度合いは、2.3で述べたように、それぞれのライフラインのシステム特性と被害の程度、および地震防災体制によって大部分が規定されるため、影響を受ける事象の発生確率の増減はある程度システム論的に記述できると考えられる。そこで本研究では、確率論的意味が明確な変換式を採用すると共に、インパクトの度合いをできる限り工学的なやり方で求め、主観的判断を最小限に抑える方針をとった。以下にその考え方を示す。

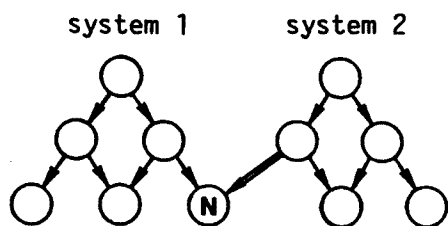


Fig. 2. Functionally interactive network systems.

いま、2つのシステム①、②を考え、システム①がノードNでシステム②の機能に依存しているとする（Fig. 2）。システム①自体の障害によるノードNの機能喪失を事象 E_1 、システム②の機能がノードNで満たされない事象を E_2 とする。被害連関を考慮した場合、ノードNの機能喪失は事象 $E_N = E_1 \cup E_2$ となる。しかしライフラインは依存するシステムに対するバックアップを備えていることから、事象 E_2 の発生は、必ずしも事象 E_N の発生に結び付かない。そこで事象 E_N の発生確率を次のように表す。

$$P(E_N) = P(E_1) + \{1 - P(E_1)\} \cdot P(E_2) \cdot a_{2N} \dots\dots\dots (3)$$

ここに $P(\cdot)$ は確率を意味し、 a_{2N} は $0 \leq a_{2N} \leq 1$ を満たす係数であるが、本研究では式(1)との類似から「クロス・インパクト係数」と呼ぶ。この係数は、システム①のシステム②に対する機能的依存度や、バックアップ系の有無といったシステム特性・防災体制の他に、バックアップ系の地震時信頼性、システム②の機能マヒの継続時間等を反映するもので、システム②のシステム①へのインパクトの度合いを表現することが可能である。式(3)による $P(E_N)$ の計算例をFig. 1(c)に示す。式(1)や式(2)が、基本的に「事象間の相関」を前提にしているのに対し、式(3)では、「同種の結果をもたらす異なる事象間の独立性」を前提としている点で大きく異なっているが、機能的被害波及を扱ううえでは、式(3)の方がより現実に即していると考えられる。

実際のライフライン・ネットワークをモデル化し、 $P(E_N)$ を定式化しておけば、地震規模によって相互影響がどの程度表面化するかがわかる。また $P(E_N)$ の効率的低減のための、耐震化方策の感度・効果についての分析、ひいては、地震防災対策の最適化の方法の基礎資料とすることが可能である。例えば、式(3)とライフライン地震防災対策の関係を簡単にまとめると、以下のようになるであろう。

- | | |
|------------------------|---------------|
| (i) システム①の設備改善 | |
| 供給ルート施設の強化 | → $P(E_1)$ 低減 |
| 供給ルート多重化 | → $P(E_1)$ 低減 |
| (ii) 被害波及防御のための自衛手段 | |
| システム②に対するバックアップ整備・強化 | → a_{2N} 低減 |
| システム②の引き込み多重化 | → $P(E_2)$ 低減 |
| (iii) システム②側の設備改善・体制改善 | |
| 供給ルート施設の強化 | → $P(E_2)$ 低減 |
| 供給ルート多重化 | → $P(E_2)$ 低減 |
| システム①への優先供給 | → a_{2N} 低減 |

また、ライフライン事業者が依存している他のライフライン機能の喪失に備えて整備するバックアップの効果は、被害発生確率の減少 $\Delta P(E_N)$ として評価されるが、上の定式化に基づく、クロス・インパクト係数の低減 Δa_{2N} と関係づけて考えることができる。すなわち、式(3)より、

$$\Delta P(E_N) = \{1 - P(E_1)\} \cdot P(E_2) \cdot \Delta a_{2N} \dots\dots\dots (4)$$

上の諸量が、地震動強度 Y の関数として得られ、しかも対象地域の地震危険度が「 Y が y を一年間に超過する確率」を表す地震ハザード曲線 $P_H(y) = P(Y > y)$ で与えられているとき、ノード N の機能喪失確率の減少の期待値 E_p は、

$$\begin{aligned} E_p &= \int_0^\infty \Delta P(E_N) dP_H(y) \\ &= \int_0^\infty \{1 - P(E_1)\} \cdot P(E_2) \cdot \Delta a_{2N} \cdot (dP_H(y)/dy) dy \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

となる。本研究ではこれを、特定の地震ハザードのもとでのバックアップ整備の有効性を表す尺度と解釈する。

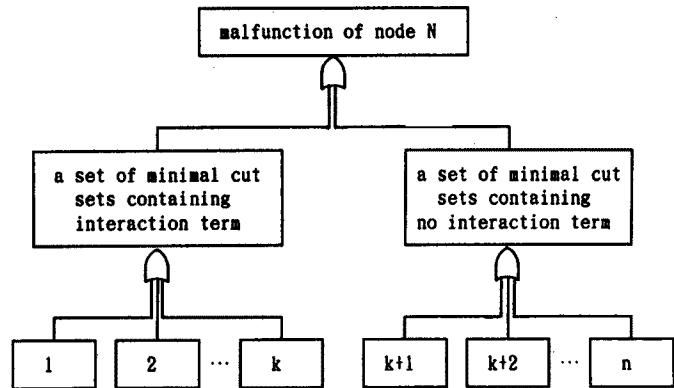
3.3 Fault Tree Analysisを用いたクロス・インパクト係数の算出

本研究では、式(3)中の諸量を求めるために、FTA¹⁴⁾ (fault tree analysis)を用いる。まず、問題とされている「ノード N の機能喪失」を頂上事象としてその発生要因を図示した FT (fault tree diagram) を構成する。次に、カットセット・アプローチを適用してブール演算を行い、最小カットセットをすべて求めて、FT の等価表現を行う。最小カットセットとは、頂上事象を発生させるために最低限要求される基本事象の集合のことである。いま、Fig. 3 のように n 個の最小カットセットが得られ、そのうちの k 個 (最小カットセット群 B) が、システム②からシステム①への連関に関する基本事象を1つ以上含み、 $n - k$ 個 (最小カットセット群 A) は含んでいないものとする。このようにカットセットを分離しておくと、相互連関に起因しない頂上事象の発生確率と、相互連関に起因する発生確率を別々に算出することが可能である。いま、 $P(A)$ と $P(B)$ をそれぞれ最小カットセット群 A と B の発生確率を表すものとする。明らかに

$$P(E_1) = P(A) \dots\dots\dots (6)$$

である。またクロス・インパクト係数は次式で求められる。

$$a_{2N} = P(B)/P(E_2) \dots\dots\dots (7)$$



- i : minimal cut set
- n : number of minimal cut sets
- k : number of minimal cut sets containing basic events related to influence of system 2

Fig. 3. Separation of minimal cut sets.

相互連関に起因しない頂上事象の発生確率と、相互連関に起因する発生確率を別々に算出することが可能である。いま、 $P(A)$ と $P(B)$ をそれぞれ最小カットセット群 A と B の発生確率を表すものとする。明らかに

$$P(E_1) = P(A) \dots\dots\dots (6)$$

である。またクロス・インパクト係数は次式で求められる。

$$a_{2N} = P(B)/P(E_2) \dots\dots\dots (7)$$

4. 数値計算例

ここでは、3. で定式化した方法の数値計算例を示す。Fig. 4 は本研究で用いた FT である。ノード N の機能喪失が頂上事象であり、その発生原因の因果関係を示している。この FT を構成するのは、Table 3 に示す 11 の基本事象である。このなかで表中“interaction term”と記した6つの基本事象が相互連関に関するものであり、「システム②に対するバックアップの有無 (基本事象 No. 9)」や「ノード N のシ

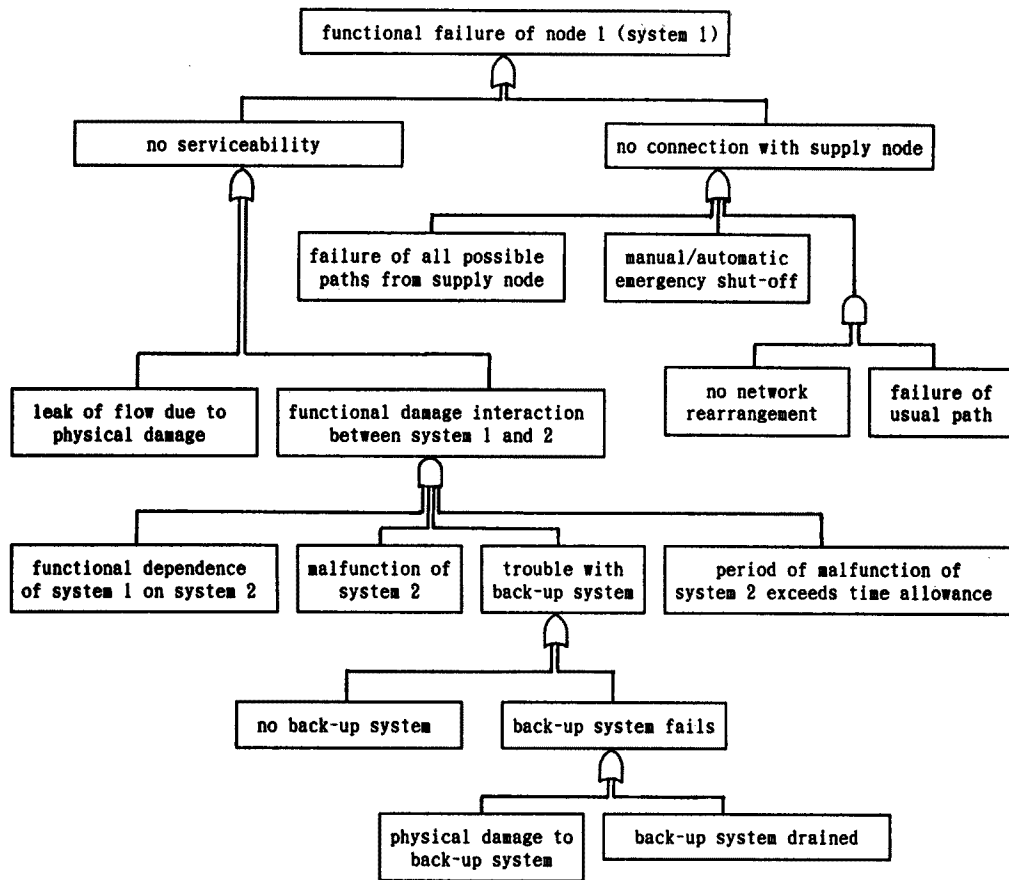


Fig. 4. Fault tree diagram for the numerical example.

Table 3. Basic events composing the fault tree (See Fig. 4)

event No.	basic event	interaction term
1	failure of all possible paths from supply node	
2	failure of usual path	
3	no network rearrangement using redundant paths	
4	manual/automatic emergency shut-off	
5	leak of flow due to physical damage to system 1	
6	functional dependence of node N on system 2	○
7	malfunction of system 2 at node N	○
8	period of malfunction of system 2 exceeds time allowance	○
9	no back-up system against failure of system 2	○
10	physical damage to back-up system	○
11	back-up system drained	○

Table 4. Minimal cut sets of the fault tree (See Fig. 4)

cutset No.	minimal cut set {i}, i=event No.	interaction term
1	{1}	
2	{4}	
3	{5}	
4	{2, 3}	
5	{6, 7, 8, 9}	○
6	{6, 7, 8, 10}	○
7	{6, 7, 8, 11}	○

Table 5 Data for Nnormal distributions of fragility curves

event No.	μ (gal)	σ (gal)
1	400	50
2	250	50
3	350	50
4	350	50
5	300	50
6	—	—
7	200	50
8	230	50
9	—	—
10	300	50
11	300	50

システム②に対する依存度（基本事象 No. 6）」などを含む。本来、相互連関と関係しない事象、例えば「連結性喪失（基本事象 No. 1, 2）」や「機能性喪失（基本事象 No. 5）」などについても、信頼性解析やネットワーク理論を組み込んで詳細な原因分析を行う必要があるが、本研究では、その部分を単純化して考えている。また、これ以降の計算例では簡単のため、全ての基本事象の発生は独立であるとした。ここで、基本事象 No. i を式(3) で用いた記号と対応させると、事象 E_1 は最小カットセット No. 1 ～ 4 を表し、事象 E_2 は基本事象 No. 7 を表す。また基本事象 No. 6, 8～10 がクロス・インパクト係数に集約されることになるものである。

Table 4 に、FT の最小カットセットを列挙した。7 つの最小カットセットのうち、No. 5 ～ 7 は、相互連関に関係するものである。

次に、頂上事象の発生確率を求めるために、基本事象の発生確率を個別に与える。本研究では、地震規模と相互連関の発生の関係をみるために、横軸を地盤最大加速度とするフラジリティー曲線を、各基本事象に与えることとした。曲線の形状は便宜上、正規分布曲線とした。ただし、基本事象 No. 6 と No. 9 の 2 つは、システムの状態および防災対策の状況を表すものであるから、確定的に 0 か 1 の二値をとる変数とした。ここではバックアップの効果を調べるために、No. 9 については 0（バックアップ有り）と 1（バックアップ無し）の両ケースを考え、No. 6 については 1（100% 依存）を

与えた。Table 5 は、フラジリティー曲線を表す正規分布曲線の平均値と標準偏差を示している。

以下に計算結果を示す。Fig. 5 は、クロス・インパクト係数の値である。2 本の線は、システム①のノード N においてシステム②の機能に対するバックアップを整備していない場合と整備している場合の

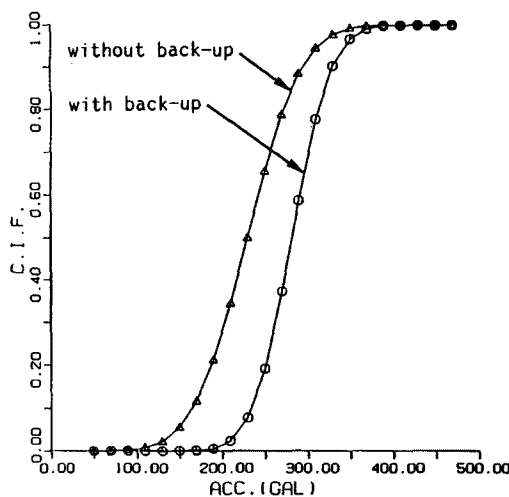


Fig. 5. Cross impact factors.

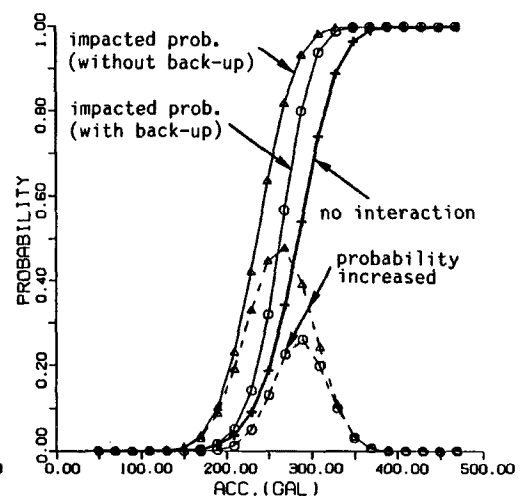


Fig. 6. Probability of malfunction of node N.

クロス・インパクト係数である。同じレベルの最大加速度で比較すると、前者が後者の値を常に上回っている。バックアップを整備していてもクロス・インパクト係数が0にならないのは、地震規模が大きくなると、バックアップ施設そのものが地震被害を受けて機能しなくなること（基本事象 No.10）や、システム2の機能回復が遅れてバックアップの寿命が尽きる（基本事象 No.11）によるものである。

次に、頂上事象すなわちノードNの機能喪失の発生確率 $P(E_N)$ を Fig. 6 に示す。太い実線は、システム①に対するシステム②の影響を考慮しない場合の $P(E_N)$ 、すなわち式(3)の $P(E_1)$ の値を表す。Fig. 5のインパクトを受けるとこの確率は、バックアップ有/無に対応して2本の細い実線のように増加する。この2本の実線の差が式(4)にあたる。

バックアップ有/無の2ケースにおいて、システム②の影響を考慮した場合、考慮しない場合と比べて被害発生確率がどれだけ増加したかを、同図の2本の点線で示した。大地震では、システム①自体が多大な被害を被るため、システム②からの影響は被害発生確率の増加という形ではあまり表面化しない。この数値計算例の場合、被害発生確率の増加のピークは、270～290 galにある。

ある地域における地震危険度が、地盤最大加速度 Y をパラメータとする地震ハザード曲線 $P_H(y) = P(Y > y \text{ in 1 year})$ として Fig. 7¹⁵⁾ のように表されるとき、ノードNの機能喪失確率は、

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| (i) 相互連関を考慮しない場合 | 1.16×10^{-2} |
| (ii) 相互連関を考慮（バックアップ無し） | 2.18×10^{-2} |
| (iii) 相互連関を考慮（バックアップ有り） | 1.48×10^{-2} |

となり、式(5)で定義したバックアップの有効性は、 0.70×10^{-2} となる。

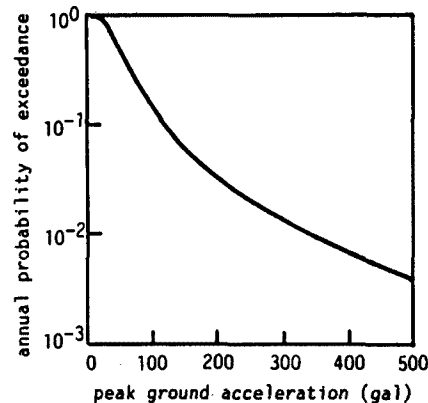


Fig. 7. Hazard curve (data excerpted from Ref. 15).

5. 結 論

本研究により得られた結論をまとめておく。

- (1) 地震災害におけるライフライン系間の相互連関の様相を表にまとめるとともに、既往の地震で実際に確認されている相互連関を整理した。システム間の相互連関が発生する原因を分析し、地震規模やシステム特性、地震防災体制などに左右されることを指摘した。
- (2) 多面的な相互連関の中で最も重要な側面と考えられる、機能的被害波及に焦点を絞り、この種の相互連関がライフライン機能に及ぼす影響の確率論的評価法を提案した。特定のノードに対する他システムからのインパクトの度合いを、クロス・インパクト法とFTAの方法を応用して、クロス・インパクト係数という単一の指標で表した。
- (3) 機能的被害波及の防止対策の一つである、バックアップ整備によって低減できる機能損失リスクを、信頼性解析の手法と地震危険度解析の手法をもとに、クロス・インパクト係数を用いて定式化した。
- (4) 簡単な数値計算例を示し、地震規模の違いによるインパクトの変化や、バックアップの有効性などを示した。

参 考 文 献

- 1) 吉川徹志・能島暢呂・亀田弘行：都市ライフライン系における地震防災システムの基本構造の分析，都市耐震センター研究報告別冊第2号，1989。

- 2) 能島暢呂・亀田弘行：ライフラインにおける地震防災システムの基本構造に関する考察，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，1989，pp.89-109.
- 3) 佐藤尚次・伯野元彦：障害波及を考慮したライフライン設計への一考察，第16回地震工学研究発表会，1980，pp.185-188.
- 4) 和泉正哲・野村季晶・牧瀬研二：ガス・電力・上水道システムの震害復旧シミュレーション，第6回日本地震工学シンポジウム，1982，pp.2025-2032.
- 5) 星谷勝・大野春雄・山本欣弥：あいまい理論によるライフライン機能の震災影響波及の構造化，土木学会論文集，第344号/I-1，1984，pp.323-331.
- 6) 星谷勝・大野春雄：震害時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法，土木学会論文集，第386号/I-8，1987，pp.387-396.
- 7) 大野春雄：ライフラインの地震災害の相互影響と機能評価に関する研究，武蔵工業大学学位論文，1988.
- 8) 亀田弘行（研究代表者）：1989年ロマプリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する調査研究，文部省科学研究費（No01102044），総合研究（A）突発災害研究成果，重点領域「自然災害」総合研究班，1990.
- 9) 東京都：いつか東京にも？ ロマ・プリータ地震東京都調査団報告，1990.
- 10) Kameda, H., Asaoka, K., Scawthorn, C., Khater, M.: Effects of the 1989 Loma Prieta Earthquake on the Bay Area Transportation Systems, Proc. of the 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1990. (投稿中)
- 11) 加藤多郎：都市ライフラインの地震被害とライフラインシステム間の相互連関の分析，京都大学工学部卒業論文，1990.
- 12) 寺野寿郎：システム工学入門，共立出版，1985，pp.133-134.
- 13) Sage, A.P.: Methodology for Large-scale Systems, McGraw-Hill Book Company, 1977, pp.165-203.
- 14) 井上威恭：FTA 安全工学 第2章，日刊工業新聞社，1979，pp.69-118.
- 15) 亀田弘行・石川裕：ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析の拡張，土木学会論文集，第392号/I-9，1988，pp.395-402.