

# 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

A SEISMIC DAMAGE INFLUENCE MODEL BETWEEN LIFELINE SYSTEMS

星 谷 勝\*・大野 春雄\*\*・山本 欣弥\*\*\*

By Masaru HOSHIYA, Haruo OHNO and Kinya YAMAMOTO

In this study, it is investigated how the seismic damage of lifeline systems interacts on each other during and after severe earthquake. For this purpose, items associated with seismic damage are carefully extracted on the basis of past earthquake damage data. Then, by applying both the interpretive structural modeling method and the fuzzy structural modeling method on these items, a seismic damage influence model is constructed in the form of an oriented graph, whereby the mutual relationship among lifeline damages are evaluated qualitatively.

## 1. はじめに

都市機能のなかでも都市サービスの要素の強いライフライン系システムは、電力、都市ガス、上水道、下水道、交通（道路・鉄道）、通信等のネットワークから成り、それらの機能は都市生活を営むにあたり供給停止があってはならないものである。もし地震などの災害によって、それらの機能がマヒされるような事態が発生した場合、住民生活をはじめとして、社会的な影響力はきわめて大きい。またライフラインはネットワーク構成をなしているため一部分の破壊によりその機能を全面的にダウンさせてしまうという災害に対する弱さをもっている。ライフライン系システムのネットワークおよびそのシステム構成は都市の膨張による超過密、生活水準の向上等に伴い複雑化し災害に対する脆弱性をより増し、新しい形態の災害の発生の危険性を高めてくる。また、その複雑さ、複合性により災害時の被害波及の連鎖性を高めている。したがって、ライフラインの耐震性、信頼性の検討

をはじめとし、二次的被害の防止、復旧予測、最適な復旧計画の検討等も都市防災上重要な課題となっている。

また、おのおののライフラインシステムは機能上、システムの構成上、それらの相互間の関連性をもっていることからライフライン系システム全体を1つの巨大システムとしてとらえる必要が出てくる。たとえば、片山、磯山<sup>1)</sup>らによれば、現実のライフライン系システムはおのおの独自のシステム的特性をもつばかりでなく、地震時には、復旧の方法と関連して独特の挙動を示す。また、都市ガス、上水道システムの地震時機能評価はネットワークの連結性以外の条件の影響が大きく、システムそのものの自体の信頼性の考え方だけでは実際的な機能評価法とはいえない。そして、従来のライフライン耐震研究の大部分が多くの場合、現実ばなれしていることに気付いたと報告している。このことから、おのおののライフラインシステムに対する耐震性、信頼性の検討は、この相互関連性を十分に把握し、システム全体における位置付けを明確にし、現実的で、きめの細かい各システムの機能評価をしていくことが第1の出発点であり、系統的な研究を進めるうえでも自然の流れであると考えられる。

現在まで、ライフラインシステムの防災性に関する研究として、ライフライン施設および内容物の地震時挙動解析<sup>2), 3)</sup>、地震時の被害予測<sup>4), 5)</sup>および復旧予測<sup>6)~9)</sup>等、

\* 正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

\*\* 正会員 産業能率大学地域科学研究所研究員  
(〒259-11 伊勢原市上粕屋 1573)

\*\*\* 学生会員 武蔵工業大学大学院修士課程  
(〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

多数行われているが、1つのライフラインシステムを対象にして、他システムから影響を無視したものが大部分を占めている。わずかに、各ライフライン間の相互関連性<sup>11)12)</sup>や各システムの重要度を考察したものはある。しかし、それらのほとんどはシステムの一部分を対象にしたり、大まかな概要を経験的に、つまり研究者の主観によってとらえるにとどまっている。

そこで本研究では、現実的なライフラインの機能評価を目的とすることからも被害波及過程の構造を求める。そのために、現実性、網羅性、きめの細かさに富んだライフラインの被害項目を抽出し、この項目をもとに社会システムの構造同定に用いられている手法を適用し、多階層有向グラフにより求める。そして、この求められた有向グラフをライフライン被害波及構造モデルとし、これに基づいて、地震時のシステム全体の機能構造および相互関連性、連鎖性を示すものである。これにより総合的な視点で防災性の検討が可能となり、より現実面に即した研究を行うことができると思われる。また、本研究で示す定性的な機能構造を発展させて定量的なモデルを構築することが考えられる。このモデルを用い感度分析等を行い、いろいろな状態を想定したライフライン系システムの設計指針等の検討ができると思われる。

## 2. 被害影響波及構造の同定について

社会システムの問題の大部分は問題複合体をなしている。このような問題構造を同定する場合、一般的なシステムズアプローチではいろいろな障害が生じてくる。この点における問題を柔軟に解決していこうとする手法として、社会システムの構造化に用いられている ISM<sup>16)</sup>~<sup>18)</sup> (Interpretive Structural Modeling), DEMATEL (Decision Making Trial & Evaluation Laboratory), FSM<sup>19), 20)</sup> (Fuzzy Structural Modeling) 等がある。これらはすべてグラフ理論を基本としたものであり、特に FSM は、あいまい理論を導入した手法である。このような手法はこのライフラインのような複雑なシステムにも威力を示すと思われる。そこで、第1に ISM より基本的な被害波及構造モデルを求め、被害波及性状を把握し、ライフライン機能の相互連鎖性の基本的検討をする。第2に、この ISM での問題点を考慮し2項間のあいまいさを取り入れた FSM により柔軟で現実性をもった構造モデルを構築する。そして、このモデルを基盤としてライフラインの相互連鎖性を明確に示そうとするものであるが、ここでは手法適用のための準備作業について説明を加える。

### (1) 地震被害項目の抽出

地震による被害項目の抽出は新潟地震<sup>13)</sup> (1964年6月発生)、十勝沖地震<sup>14)</sup> (1968年5月)、宮城県沖地震<sup>15)</sup>

(1978年6月)等の実態調査報告書と各ライフラインのシステム構成を資料として地震工学関係の研究者(著者らのほか大学7名(うち大学院5名)、民間研究所より1名、計11名)をメンバーとしたブレーン・ストーミング会議を開き、これにより項目の網羅性を満足させる点に注意しながら行った。この結果、細部の項目まで含めて401項目が得られた。この401項目の類似項目の整理統合を行うため KJ 法により、65項目に集約した。この段階において、本研究の目的である被害波及過程の構造把握という点より基本的な階層構造が解析結果に表現されるようにライフラインの各機能における直接的な被害項目 [LEVEL 1]、直接被害に影響されて発生する被害項目 [LEVEL 2]、LEVEL 2 の間接的被害によって現われる被害、ここでは、末端需要家に支障を及ぼす項目(業種等) [LEVEL 3] の3レベルを設定し、これをもとに65被害項目を分類した(表-1(a)~(c))。なお、これらの被害項目は各ライフライン機能(電力、都市ガス、上水道、下水道、交通、通信)と対応がとれるよう整理されている。

### (2) 被害項目間の2項関係行

被害波及項目の2項間の関係を求め2項関係行列( $f_{ij}$ )を作成する。この2項関係を求める作業量は非常

表-1 地震被害項目

(a) 直接被害項目 [LEVEL 1]

項目番号	被害項目およびその内容
* 1.	変電設備破壊(変電所、トランスなど)
* 2.	電線切断(配電線、地中配電線、引込み線など)
* 3.	配電装置破壊(柱上変圧器落下破壊、電柱転倒など)
4.	水力発電所破壊
5.	火力発電所破壊
6.	原子力発電所破壊
7.	ダム崩壊
* 8.	指令系統・管理機能破壊(電力、ガス、上水道など)
* 9.	ガス埋設管破壊、突出
* 10.	ガス整圧器破壊(ガスガバナーステーションなど)
11.	燃料供給施設破壊(貯蔵施設、パイプラインなど破壊)
12.	ガスタンク破壊(ガス供給所破壊)
13.	水源破壊(河川、地下水源、ダムなど破壊)
14.	水槽関係破壊(貯水層、受水層、高架水槽など破壊)
* 15.	水道管破壊(水道橋、送水管、導水管、配水管など破壊)
16.	浄水場破壊
17.	給水設備破壊
18.	消火栓破壊
19.	下水収集施設破壊(雨水弁、汚水弁、など破壊)
* 20.	下水管、マンホールの破壊
* 21.	下水処理場施設破壊(沈殿池、エアレーションタンクなど)
22.	ポンプ場破壊
* 23.	電話線切断(海底ケーブル、放送回線、パラボラアンテナなど切断)
24.	電話局破壊
25.	電話機破壊
* 26.	異常ふくそう
27.	交通(道路・鉄道)管制システム破壊
* 28.	道路構造物破壊(路体、のり面、盛土、橋梁、トンネルなど破壊)

\* 発生可能性の高い被害(難度 4~6)

(b) 間接被害項目 [LEVEL 2]

項番	目号	被害項目およびその内容
29.		停電
30.		ショート
31.		放射能汚染
32.		ダム崩壊による水没
33.		爆発
34.		ガス中毒
35.		ガス圧低下
36.		埋設管による道路、鉄道軌道破壊
37.		ガス供給停止
38.		ガス漏れ
39.		水圧低下
40.		漏水
41.		断水
42.		浸水・水没
43.		下水汚物の放出、流出
44.		悪臭
45.		下水処理不能、低下
46.		河川汚染
47.		通信・通話処理不能、低下
48.		情報混乱(避難、誘導情報不足、混乱など)
49.		交通(道路・鉄道)機関の事故
50.		救援活動不能
51.		復旧活動不能
52.		交通(道路・鉄道)障害(交通渋滞、通行規制など)
53.		火災
54.		パニック
55.		デマ
56.		死傷者発生(生き埋めなど)

(c) 間接被害より支障をきたす項目(業種等) [LEVEL 3]

項番	目号	被害項目およびその内容
57.		公共機関(政府機関、警察署、消防署、刑務所、郵便局、電話局など)
58.		製造業(工場、一般会社など)
59.		娯楽業、映画業などのサービス業
60.		教育、医療機関、銀行
61.		住民の家庭生活(暖房設備、料理不能、水洗便所使用不能、物価高騰など)
62.		卸売業、小売業(商店、食堂、風呂屋、デパート・スーパー、ガソリンスタンド、ホテル、旅館、クリーニング屋、営業納品業など)
63.		運輸関係(道路、港、鉄道、信号、飛行機、駅、列車、船など)
64.		放送、新聞関係(テレビ、ラジオ使用不能、コマercial不能、通信教育不能、諸案内機能、テレホンショッピングなど)
65.		社会的影響(犯罪増加、疫病発生など)

に膨大なものである。単純に計算すると 65 項目×65 項目=4225 回の一対比較を行いその回答を求めるわけである。しかし、波及被害を考えると LEVEL 1 から LEVEL 3 の各項目の関係と LEVEL 1 の内々関係は存在しないという前提が成り立つと判断される。これにより、ある程度一対比較の回数を少なくし回答を求めていった。ここでは、この 2 項間の直接的な影響度 (0.0 ~ 1.0 の距離尺度) をアンケート方式により地震関係の研究者(ブレンストーミングの参加者)を対象に実施した。ここでのアンケートは一般的な意識調査での感覚量等を問う方法とは異なり、あくまでも被害波及項目間の現象的側面を主にした直接的な影響度を示してもら

ためのものである。よって、ブレンストーミング時に各ライフラインのシステム構成や地震被害例等の議論を重ねた参加者をその対象とした。求められた 2 項関係行列 ( $f_{ij}'$ ) の各要素は 0.0~1.0 の距離尺度で得られているためサンプルの平均をすることが可能となる。このことより各サンプルの 2 項関係行列をまとめかたは算術平均による方法をとった。しかし、各回答の分散の大きいものについてはその回答をチェックし、デルファイ法的な修正ルーチンを取り整理した。これを構造同定に用いる 2 項関係行列 ( $f_{ij}$ ) とした。

### 3. ISM による構造同定

#### (1) ISM の数学的概要<sup>16),17)</sup>

あるシステム  $S$ ,

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

であるとき、この集合  $S$  上に 2 項関係  $R$  が定義されているとする。

すなわち、要素  $s_i$  と要素  $s_j$  が、直接関係しているとき、

$$s_i R s_j \dots \dots \dots (1)$$

直接関係しないとき、

$$s_i \bar{R} s_j \dots \dots \dots (2)$$

と表わす。

また、関係  $R$  は集合  $S$  の各要素を行と列にもつ 2 値行列としても表現される。この行列  $A$  を考え

$$s_i R s_j \text{ ならば } a_{ij} = 1 \dots \dots \dots (3)$$

$$s_i \bar{R} s_j \text{ ならば } a_{ij} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

とおく。

この 2 値行列  $A$  に単位行列  $I$  を加えブール積を

$$(A+I)^{k+1} = (A+I)^k = T \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) が得られるまで行って得られた行列  $T$  を可到達行列とよぶ。

この行列  $T$  はもとの行列  $A$  における直接関係と関係  $R$  の推移性によって得られる間接的關係もすべて示す。

次に、行列  $T$  より多階層有向グラフを得るために集合  $S$  の各要素  $s_i$  に対して可到達集合  $R(s_i)$  および先行集合  $A(s_i)$  を定義する。

$$R(s_i) = \{s_j \in S | T_{ij} = 1\} \dots \dots \dots (6)$$

$$A(s_i) = \{s_j \in S | T_{ji} = 1\} \dots \dots \dots (7)$$

集合  $R(s_i)$  は要素  $s_i$  から到達可能なすべての要素を含む。集合  $A(s_i)$  は要素  $s_i$  に到達可能なすべての要素を含む。 $R(s_i)$  と  $A(s_i)$  のブール積を考えて、

$$S_0 = \{s_i \in S | R(s_i) \cap A(s_i) = R(s_i)\} \dots \dots \dots (8)$$

式 (8) を満足する集合  $S_0$  を考える。この集合  $S_0$  はこれに属さない要素のどれにも到達できない要素の集合で多階層有向グラフの最上レベルの要素である。そして

この要素を行列  $T$  より除きこのプロセスを繰り返すことにより順次有向グラフの要素が同定される。

(2) ISM による地震被害波及構造モデル

ISM を用いるために2項関係行列 ( $f_{ij}$ ) を2値行列  $A$ , (0, 1) に変換する必要がある。ここでは、境界値  $p$  ( $p \leq f_{ij} \rightarrow a_{ij}=1, p > f_{ij} \rightarrow a_{ij}=0, p=0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ ) を設定し、ISM の直接関係行列  $A_p=0.4, A_p=0.5, A_p=0.6, A_p=0.7$  を求めた。この4種類の直接関係行列を用い有向グラフを求め、これらのグラフの要素間の連結を1つの判断基準として、最も被害波及構造を的確に示している有向グラフを選び、ISM の地震被害波及構造モデルとした。

この結果  $p=0.6$  の多階層有向グラフをここでの被害波及構造モデルとして 図-1 に示す。

この構造モデルに示されている ①→② は被害項目  $i$  が被害項目  $j$  に影響を及ぼすことを表わす。2重楕円はその中の項目すべてが互いに影響し合っていることを表わす。また、2重楕円に向かう矢印はその中のすべての項目に向かっていることを示し、2重楕円からの矢印はその中のすべての項目から出ていることを表わしている。なお、ある項目  $i$  からいくつかの階層をへて項目  $j$  へ到達する場合、項目  $i$  から項目  $j$  へ直接到達が存在しても、その線分を示していない。

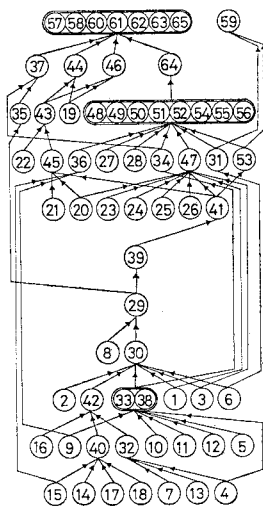


図-1 ISM による被害波及構造モデル ( $p=0.6$ )

この構造モデルよりライフラインの被害波及状況について判断される点を示す。

- 1) 電力システムでは電線切断 ② よりショート ⑩ の発生、停電 ⑨ の被害、そして他システムへ波及している。
- 2) 上水道システムでは水道管破壊 ⑮ の発生から漏水 ⑩ → 浸水、水没 ⑫ → 水圧低下 ⑬ → 断水 ⑭ に波及していく。
- 3) 都市ガスシステムはガス埋設管の破壊 ⑨ からガス漏れ ⑮、爆発 ⑮ → ガス中毒 ⑯ あるいは火災の発生 ⑰ に波及する。

このように各システムにおける波及状況はある程度つかめるが他システムへどのような影響をもたらすかの点等については明確な判断はできない。この理由として、

第1に多階層にわたる直接到達関係を有向グラフ上に示さなかったことが考えられる。しかしこの点の性質を考慮しておくことにより、ある程度の判断は可能である。第2に2項関係を境界値  $p$  を用いて2値関係に変換し、これを用い ISM による構造同定を行っているが、そもそも、あいまい性が介在する被害波及関係に2値関係を用いなければならない点と、2値関係を直接影響行列とする ISM に疑問がある。すなわち、この地震被害波及問題の場合、2項間の連結度には強弱が存在するが、これを一元的な評価にまとめてしまい、有向グラフにおける関係が等値と表現されてしまうことなどが挙げられる。

ここでの全体的な問題点として LEVEL 1 の直接被害項目には、過去の地震被害状況より発生可能性の低い項目も含まれていること、また最終到達被害項目である LEVEL 3 には項目の選定、グループ化において明確でない部分もあること等が挙げられる。

このようないろいろな問題点はあるが、この ISM の構造モデルが示す被害波及構造について一般的あるいは概略的にとらえるにはある程度満足できる。しかし、ライフライン機能の相互連鎖性を明確に示していくためには問題点がでてくると思われる。

4. FSM による構造同定

このような ISM の被害波及構造モデルの問題点を考慮できる FSM により構造同定を行う。FSM はあいまい構造パラメーター ( $\lambda$ ) により、ISM の有向グラフのような一意的に決まるものではなく柔軟性をもった有向グラフを求めることができ、同時にその2項間の連結度、影響度も求めることが可能である。

(1) FSM の数学的概要<sup>(9), (20)</sup>

FSM によって構造同定を行う対象システムを、 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  とし、2項間のあいまい従属行列  $A$  を、 $A = \{a_{ij}\}$  と定義する。ここで、行列  $A$  は  $n \times n$  行列であり、その要素  $a_{ij}$  は

$$a_{ij} = f_r(s_i, s_j), 0 \leq a_{ij} \leq 1 \dots\dots\dots(9)$$

で与えられ、 $f_r$ : 要素間のあいまい2項関係に関するメンバーシップ関数(帰属度関数)によって特性づけられる。また、あいまい補集合  $\bar{A}$  のメンバーシップ関数  $\bar{f}_r$  と  $f_r$  との関係は

$$\bar{f}_r = (1 - f_r) / (1 + \lambda \cdot f_r), (-1 < \lambda < \infty) \dots\dots(10)$$

と与える。

ここで、あいまい従属行列  $A$  に対して次の3つの条件を満足しなければならない。

- i) あいまい非反射律  
 $\forall (s_i, s_i) \in S \times S$  に対して  $a_{ii} < P$
- ii) あいまい非対称律

$\forall (s_i, s_j) \in S \times S$  に対して  $a_{ij} < P$  or  $a_{ji} < P$

iii) あいまい半推移率

$\forall (s_i, s_j), (s_j, s_k), (s_i, s_k) \in S \times S, (i \neq j, j \neq k, i \neq k)$  に対して  $M = \bigvee_{j=1}^n (a_{ij} \wedge a_{jk}) \geq P$  のとき  $a_{ik} \geq M$

ここで、 $P$  は境界値 ( $0 < P \leq 1$ ) である。

次に、システム  $S$  の要素がどの階層に属するか、また階層間の結合関係を与える最上層レベル集合  $L_t(s)$ 、中間層レベル集合  $L_i(s)$ 、最下層レベル集合  $L_b(s)$ 、独立レベル集合  $L_{is}(s)$  の各レベル集合は次のように定義する。

$$L_t(s) = \left\{ s_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P \leq \bigvee_{l=1}^n a_{lk} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$L_i(s) = \left\{ s_k \mid P \leq \bigvee_{l=1}^n a_{lk}, P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$L_b(s) = \left\{ s_k \mid \bigvee_{l=1}^n a_{lk} < P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$L_{is}(s) = \left\{ s_k \mid \bigvee_{l=1}^n a_{lk} < P, \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P \right\} \dots\dots\dots (14)$$

このあいまい従属行列  $A$  を用いて次の手順でシステム  $S$  の構造を決定する。

1)  $L_t(s)$ ,  $L_b(s)$  および  $L_{is}(s)$  に属する要素に関して、 $L_t(s)$  の要素に対しては行を消去し、 $L_b(s)$  の要素に対しては列を消去し、 $L_{is}(s)$  の要素については行および列を消去して、要素間の従属関係を示す小行列 (単一ハイアラーキ行列  $A^{(j)}$ ) を作成する。

2) あいまい構造パラメーター  $\lambda$  の値を設定し、それぞれの単一ハイアラーキ行列  $A^{(j)}$  に関して 図-2 に

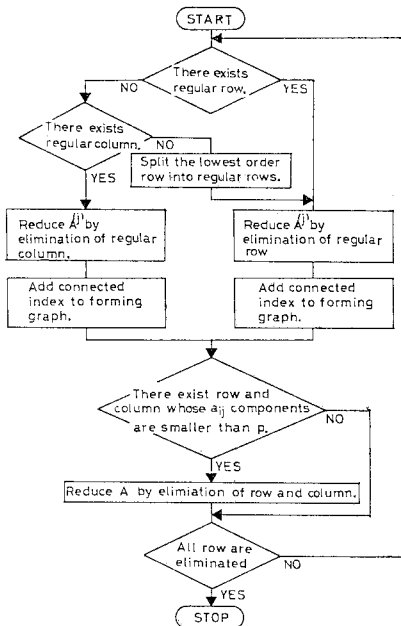


図-2 有向グラフ化のフロー<sup>19)</sup>

MEMBERSHIP FUNCTION

$$M(x) = (1 + 1 / (x - 10.0))^{1.3} - 1.0 \dots\dots\dots (1)$$

COMPLEMENT OF M(x)

$$\bar{M}(x) = (1 - M(x)) / (1 + \lambda \cdot M(x)) \dots\dots\dots (2)$$

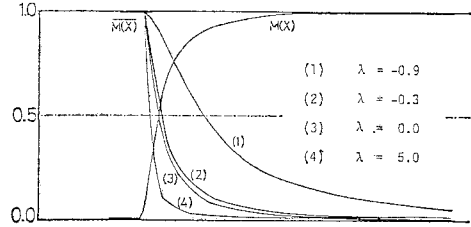


図-3 あいまい構造パラメーター  $\lambda$  の性質

示すに流れに従い、逐次有向グラフの要素を決定する。ここで、レギュラー行(列)は要素間の一意的従属関係を示す。また、要素  $s_i$  に対するレギュラー行  $s_k, k=1, 2, \dots, m$  の消去は

$$a_{i*} = a_{i*}^{(j)} \wedge \left( \bigwedge_{k=1}^m \overline{a_{*k}^{(j)}} \right) \dots\dots\dots (15)$$

式 (15) により  $a_{i*}^{(j)}$  を  $a_{i*}$  に置き換えることにより行う。また、 $\overline{a_{*k}^{(j)}}$  は式 (10) より求める。

(2) あいまい構造パラメーター  $\lambda$

FSM における、ある2項関係を示すメンバーシップ関数  $M(x)$  とするとそのあいまい補集合のメンバーシップ関数  $\bar{M}(x)$  は 図-3 の式 (2) により求められる。このあいまい補集合を制御するパラメーターとしてあいまい構造パラメーター  $\lambda$  があり、そのもつ意味は重要である。そこで  $\lambda$  のもつ意味について一般例を用いて少し説明する。図-3 に  $\lambda = -0.9 \rightarrow (1)$ ,  $\lambda = -0.3 \rightarrow (2)$ ,  $\lambda = 0.0 \rightarrow (3)$ ,  $\lambda = 5.0 \rightarrow (4)$  の  $\bar{M}(x)$  を示す。 $\lambda = 0.0$  のときは (2) 式より  $\bar{M}(x) = 1 - M(x)$  となり普通集合の補集合の形である。この  $\lambda$  の範囲が  $-1 < \lambda < \infty$  であることから、たとえば、普通集合でその補集合の帰属度を 0.5 としたとき  $\lambda = -0.9$  (図-3 の (1)) のあいまい補集合の帰属度は 0.91 である。すなわち、 $\lambda$  を負にとったとき、そのあいまい補集合の帰属度は大きく評価され、逆に  $\lambda$  を正にとった場合小さく評価される。このことは、 $\lambda$  によって FSM のあいまい2項関係をどのように評価するかが明示されていると思われる。

5. FSM による地震被害波及構造モデル

FSM によって解析するには、まず最初に境界値  $P$ 、あいまい構造パラメーター  $\lambda$  を解析者が仮定しなくてはならない。この仮定を満足するか否かの判断基準として、分析した結果である有向グラフについて現実性の検討を行う。この検討で満足できない場合には、仮定であ

る  $P, \lambda$  を再設定し、試行錯誤的な繰り返しのより最も目的に適した有向グラフを求める。本解析での現実性の検討は、著者らによって有向グラフの各要素間の連結性が実現現象すなわち、地震被害波及現象と整合しているかという点に着目し行った。

この結果、 $P=0.6, \lambda=-0.3$  の有向グラフを地震被害波及構造モデルとした(図-4)。ここで、項目間の連結度 ( $f$ ) すなわち被害が波及していく割合を  $P \leq f \leq 0.6$  ( $P=0.6$ ) $\Rightarrow$ 弱連結(破線で示す),  $0.6 < f < 0.9 \Rightarrow$ 中連結(一点鎖線),  $0.9 \leq f \leq 1.0 \Rightarrow$ 強連結(実線)に分類した。

この構造モデルより主な被害項目の位置付けについて考察する。

1) ショート⑩は電力関係の直接被害項目である電線切断②, 変電設備破壊①, 配電装置破壊③と爆発⑩, 浸水・水没④によって発生し, 火災⑤, 停電⑨, ガス供給停止⑦, 通信・通話不能低下④に波及する(図-5)。

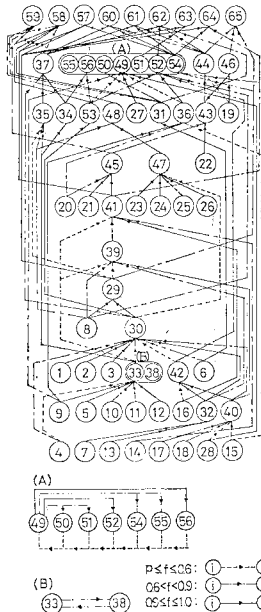


図-4 FSM による被害波及構造モデル ( $P=0.6, \lambda=-0.3$ )

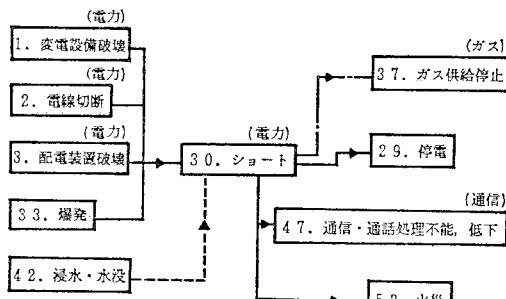


図-5 「ショート」(電力システム)を中心とした被害波及

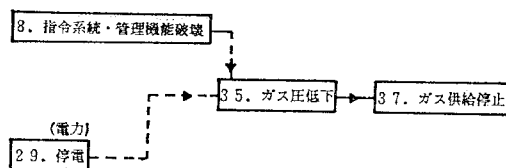


図-6 「ガス圧低下」を中心とした被害波及

2) ガス圧低下⑩は, 停電⑨, 指令系統・管理機能破壊⑧, ガス管破壊⑨による爆発⑩によって発生し, ガス供給停止⑦へと波及する(図-6)。

3) 水圧低下⑩は停電⑨, 爆発⑩, 漏水④, 指令系統の被害⑧によって発生し, 断水④に波及する(図-7)。

4) 交通事故⑩, 交通障害⑩は, 水道管の破壊⑩, 下水管・マンホール破壊⑩, ガス管破壊⑨によって起こる埋設管による道路破壊⑩および道路構造物の破壊⑩より波及する(図-8)。

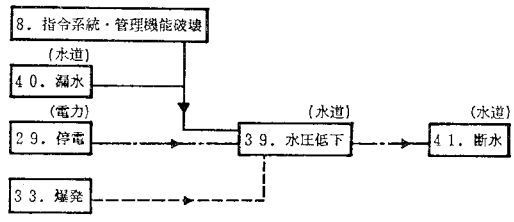


図-7 「水圧低下」を中心とした被害波及

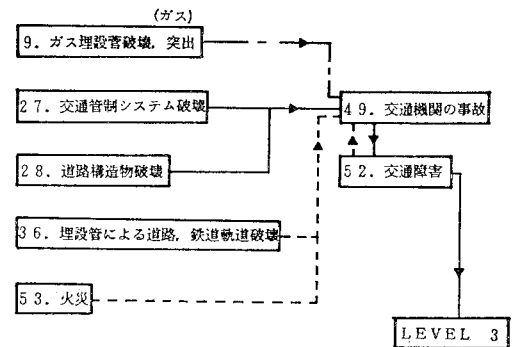


図-8 「交通事故」, 「交通障害」を中心とした被害波及

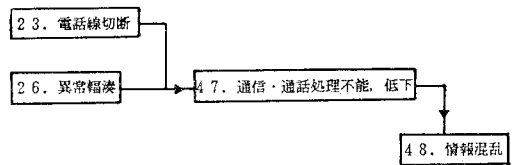


図-9 「通信・通話処理不能, 低下」を中心とした被害波及

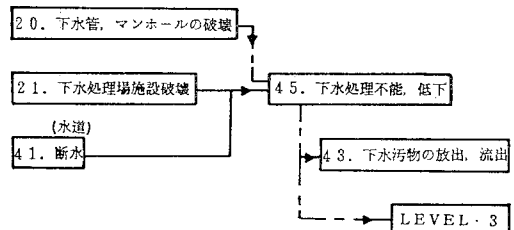


図-10 「下水処理不能, 低下」を中心とした被害波及

5) 通信・通話処理低下, 不能 ④7 は, 電線切断 ②, ショート ⑩, 異常ふくそう ⑥ によって発生し, 情報の混乱 ⑨ へと波及していく (図-9).

6) 下水処理不能・低下 ④5 は, 下水管・マンホールの破壊 ⑩, 下水処理場施設の破壊 ⑪ と上水道の断水 ④1 にて, 起因される. そして, 下水汚物の放出・流出 ④3 へ波及する (図-10).

ライフラインの各システムの主な被害項目の考察より明らかのように, 電力システムその他システムへの波及性は高い.

### 6. ライフライン機能の相互連鎖性

ライフライン系システムにおける, あるシステムの破壊は他システムの機能に影響波及する. これはそのシステム相互間に連鎖性が存在するためである. このライフライン機能の相互連鎖性を FSM による被害波及構造モデルに基づいて求める. 以下に各システムに着目した相互連鎖性を示す.

#### (1) 電力システム

このシステム被害の一般的な特徴として, 送配電線等が地表にあるため被害状況が容易に把握でき, その修復, 復旧は比較的早い. 電線切断等の被害ではガス管, 水道管等の被害と異なりその機能がただちに 100% ダウンしてしまう. しかし送電線の被害ではその系統がネットワークであるため切り換えなどにより, その被害を回復できる場合が多い. また, この電力機能停止による被害の影響範囲は非常に広いことなどが挙げられる.

図-11 より, 電力システムは「都市ガス」, 「上水道」, 「通信」, 「交通」の各システムに影響を与えている. この要因となる機能被害はショート ⑩, 停電 ②9 であり, 電力に頼る他システムの状況が明確に現われている. またショートによる火災の発生によっても他システムに支障を与えている. 次にシステム構成から電力が他システムに影響する状況について考察すると, 上水道システム

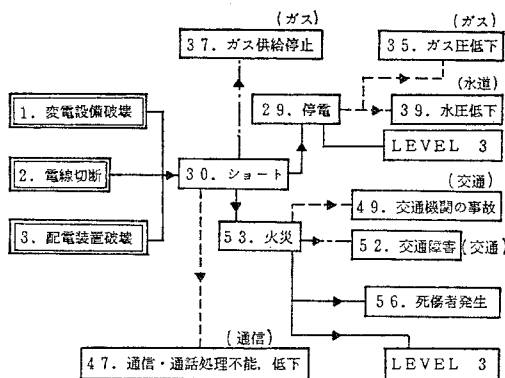


図-11 電力システムに着目した相互連鎖図

ではポンプ場等で電力を使用しているため送配水機能に影響を与えて水圧低下を起こし断水等の間接被害を発生する. 都市ガスシステムでもやはり, ガス送出に電力を使用し上水道と同様にガス圧低下, 供給停止の被害に波及する. しかしガス製造場のなかには自家発電装置を設置している所も多くこの影響は小さくなることが考えられる. 通信システムについては電話交換機に電力を主に使用しているが予備電源を備えておりこの影響も小さいことが予想される. しかし設置されている予備電源の能力は長時間もたず機能するのは1日程度である. したがって電力被害が長時間にわたる場合は影響が大となる.

#### (2) 都市ガスシステム

このシステム被害の特徴は, 被害が発生した場合一時すべての供給機能を停止しガスの放散を行う. また復旧には 1: ガス製造工場, 2: 供給幹線, 3: 中継所, 4: 末端供給の埋設管の順に点検作業を行い供給を再開する. このため機能停止は長時間にわたるケースが多い. 緊急時の対応として代替燃料によりこの機能被害の影響を取り除くことも可能である. 供給源であるガス製造工程に着目すると, 電力, 水, 原料のいずれかが供給停止しても生産は停止してしまうことなどが挙げられる.

図-12 より, 都市ガスシステムは「上水道」, 「電力」, 「交通」の各システムに影響を与えているがその要因としてガス漏れによる爆発によるものがほとんどである. また交通システムに対する影響として道路路体内のガス埋設管が地盤の液化化や断層により路面に突出し交通障害, 交通事故等の被害波及をもたらすことが挙げられる.

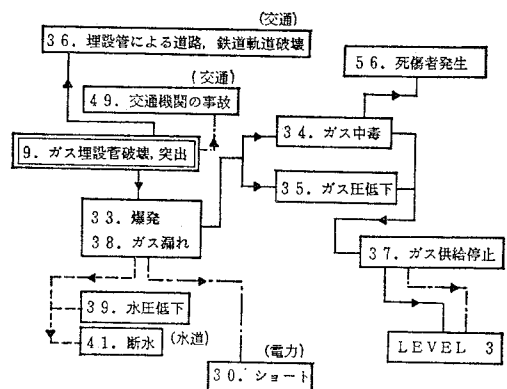


図-12 都市ガスシステムに着目した相互連鎖図

#### (3) 上水道システム

このシステム被害の特徴として, 地下埋設の送配水管が破損されてもその管路の被害の程度によっては漏水が発生していても送水はされる. したがって電力システムや都市ガスシステムとは違って被害発生後ただちに機能

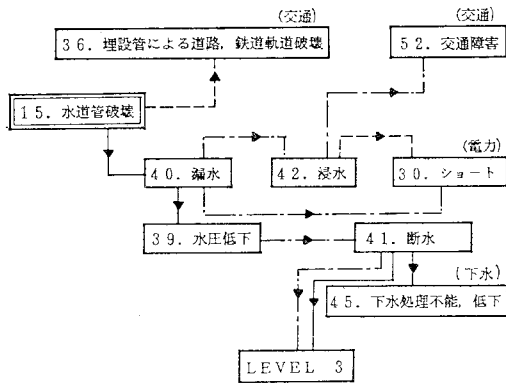


図-13 上水道システムに着目した相互連鎖図

がすべて停止することはなく水圧低下の程度に比例してくる。水源の被害では取水施設や取水パイプの破損等がある。また送水のためのポンプ場等の外部機能は電力供給に頼るところが大きい。上水は全く代替物がないため生活レベル（末端需要家；LEVEL 3 の項目等）の影響が大きいこと等が挙げられる。

図-13 より、上水道システムは「下水道」、「電力」、「交通」の各システムに影響波及する。「下水道」に対する影響被害項目は断水であり水供給停止に伴う下水処理不能、低下を引き起こす。「電力」への影響は漏水による浸水であり、この結果ショートが発生により停電等の電力供給被害をもたらす。また「交通」への影響は地下埋設の送配水管による路面突出等の被害である。

以上のことからまとめると、この電力システム、都市ガスシステム、上水道システムのなかで電力システムの被害による機能停止が他システムへの影響が広く、大きいといえる。つまり、電力システムの機能障害は直接的に影響を与えてしまい、しかも相互の関係として能動的立場をとっているといえる。逆に、都市ガスシステムは他システムのシステム構成からみても影響度が小さく、代替物として電力、石油等が挙げられることからライフライン系システムの全機能に対する重要度は低い。しかしガス漏れによる火災、爆発、ガス中毒という危険性の高い供給物であるため、重大被害を発生するシステムであるという意味からの重要度は高い。上水道システムは漏水、浸水、断水等の被害より他システムに影響することからもその被害の程度によっては全く影響しないことも考えられる。しかし代替性に欠けるため生活レベルへの緊急性が非常に大きい。このことからこのシステムの重要度をつけるとしたら前述の2ライフラインシステムの中間に位置するといえる。

なお、図-11~13 に示す連結線の意味は FSM によって得られた被害波及項目間の直接的影響度 ( $f$ ) を  $P \leq f \leq 0.6$  弱連結 ( $\overline{i} \dashrightarrow \overline{j}$ )、 $0.6 < f < 0.9$  中連

結 ( $\overline{i} \dashrightarrow \overline{j}$ )、 $0.9 \leq f \leq 1.0$  強連結 ( $\overline{i} \rightarrow \overline{j}$ ) に分類したものである。この影響度 ( $f$ ) は被害の影響波及の状況を把握するのによい指標となっている。

## 7. 結 論

本研究では、地震によるライフラインシステムの被害影響波及の構造を主観的および経験的な方法を極力避けたシステムズアプローチにより明確に示そうと試みたものである。その手順として、ISM を適用することにより基本的な構造を把握し、この結果からの問題点を抽出した。そして、これらの問題点の考慮とあいまい理論を適用した構造同定手法すなわち被害項目間のあいまいさを取り込んだ特性関数（ここではメンバーシップ関数）を用いた FSM により被害波及構造モデルを同定した。これに基づいて被害影響波及のライフライン相互間の連鎖図を求め、この連鎖性について考察した。得られた成果をまとめると次のとおりである。

(1) FSM の特徴として  $P$ 、 $\lambda$  すなわち2項間の境界値とあいまい構造パラメーターにより自由度のある構造同定が可能となり、現実性の高い構造モデルの検討が、それらのパラメーターにより即座にできるということがいえる。

(2) 被害波及構造モデルを作成するうえでの基礎となる資料は2項関係行列である。これを求めるためにはアンケートを用いたがこのアンケートに対する不確実性を考慮できた FSM の有効性は非常に高く評価できる。

(3) このライフライン系システムの相互関連性のような複雑なシステムを定性的に同定するには、一般に社会システムの構造同定に用いられている手法によるアプローチが最適であると考えられる。

(4) FSM により求められた被害波及構造モデルは、従来からの経験的なモデルを包含していることが6.の細部の考察より明らかになった。さらに、今後の被害影響波及の性状を把握するうえでの一指標となる直接的影響度 ( $f$ ) も求められた。

(5) FSM により求められた定性的な被害波及構造モデルは、今後の展開となる定量的な構造同定のための有力な基礎的な成果となり得ることがいえる。

以上の研究成果に基づいて、今後、定量的な構造モデルを構築し、地震による被害影響波及をダイナミックにとらえることによりライフライン系システム全体に着目した防災性の確保の問題や機能復旧の問題を解明していく予定である。すなわち、基本的構造を微分方程式系に構築し数値解析モデルによる定量評価を被害と復旧過程に対して行う。そして敏感度解析などにより各ライフラインの脆弱箇所や、重要要素などを明らかにしていきたいと考える。



最後に、本研究を進めるにあたり財団法人トヨタ財団昭和58年度研究助成金の援助に対して感謝いたします。また、武蔵工業大学応用力学研究室の諸氏の協力に対し深謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 片山・磯山：ライフラインの地震防災（考え方と現状報告），東京大学生産研究所報・生産研究，東京大学，Vol. 32, No. 6, pp. 273~281, 1980年6月。
- 2) 高田・J.P. Wright：ライフライン系解析のための相対地盤震動，土木学会論文報告集，第299号，1980年7月。
- 3) 篠塚・小池：埋設ライフラインシステムの機能性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，第311号，1981年7月。
- 4) 西尾：埋設管の地震被害率予測法に関する一提案，土木学会論文報告集，第316号，1981年12月。
- 5) 東京都防災会議：東京区部における地震被害の想定に関する報告書，東京都，1978年。
- 6) 星谷・小池：ライフラインの地震災害における復旧予測モデル，土木学会論文報告集，第308号，1981年4月。
- 7) 星谷・小池・宮崎：上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測，土木学会論文報告集，第322号，1982年6月。
- 8) 星谷・宮崎：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文報告集，第331号，1983年3月。
- 9) 星谷：ライフライン地震災害復旧過程に関する基礎的検討，第16回地震工学研究発表会，土木学会，1981年。
- 10) 田崎・栗林：耐震設計における重要度について，土木学会第32回年次学術講演会，I-260, 1977年。
- 11) 三星・後藤：都市部における地震時の被害の波及構造に関する基礎的研究，土木学会第37回年次学術講演会，I-322, 1982年。
- 12) 佐藤・伯野：障害波及を考慮したライフライン設計への一考察，第15回地震工学研究発表会，土木学会，1980年。
- 13) 土木学会編：新潟地震震害調査報告，1964年。
- 14) 十勝沖地震調査委員会（北海道大学）：十勝沖地震調査報告，1968年。
- 15) 土木学会編：宮城県沖地震調査報告書，土木学会東北支部，1978年。
- 16) 河村：複雑な社会問題を取扱う一手法，(Interpritive Structural Modeling)，計測と制御，計測自動制御学会，pp. 157~161, 1977年1月。
- 17) Warfield, J.N. : Binary Matrices in System Modeling, J. of SMC, Vol. SMC-3, No. 5, IEEE, 1973.
- 18) Venkatesan, M. : An Alternate Approach to Transtive Coupling in ISM, J. of SMC, Vol. SMC-9, No. 3, IEEE, 1979.
- 19) Tazaki, E. and M. Amagasa : Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory, International Journal for Fuzzy Sets and Systems, Vol. 2, pp. 87~103, 1979.
- 20) 田崎：あいま理論による社会システムの構造化，数理科学，第191号，1979年5月。

(1983.8.30・受付)