

# 震度情報に基づく供給系ライフラインの 地震時機能リスクの二段階評価モデル

能島 暢呂<sup>1</sup>・杉戸 真太<sup>2</sup>・鈴木 康夫<sup>3</sup>・石川 裕<sup>4</sup>・奥村 俊彦<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 正会員 博(工) 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup> 正会員 工博 岐阜大学教授 流域圏科学研究センター (同上)

<sup>3</sup> 学生員 岐阜大学大学院博士前期課程 工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>4</sup> 正会員 博(工) 清水建設和泉研究室主席研究員 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル)

<sup>5</sup> 正会員 工修 清水建設和泉研究室主任研究員 (同上)

想定地震や実地震に関して得られる震度情報に基づいて、供給系ライフライン(電気、水道、都市ガス)の地震時機能を予測・推定するための二段階評価モデルを提案した。まず1995年兵庫県南部地震におけるデータを利用して、兵庫県内の被災地周辺から大阪府北部にかけて推定された高密度震度分布と、ライフライン機能停止の有無と停止期間のGISデータベースを構築した。評価モデルの第一段階は、機能停止の有無を確率で評価する機能的フラジリティ関数であり、ロジックモデルでモデル化した。第二段階は、機能停止期間を確率評価する統計的モデルであり、移動平均法と最小二乗法により導出した。震度のみに基づくため精度に限界はあるものの、簡便に利用でき、被害の概略的な予測・推定や、事前・事後の災害対策の基礎的検討には有用であると考えられる。

**Key Words** : utility lifelines, seismic intensity distribution, functional damage prediction, two-step evaluation, outage time, seismic risk management

## 1. 序論

地震時のライフライン機能の停止は、緊急対応の阻害、業務停止、生活支障、避難者発生、復旧・復興活動の阻害、など多様な影響を広域かつ長期間にわたって及ぼす。ライフライン機能停止およびその期間の予測は、地方自治体における地域防災計画の策定、企業部門の地震リスクマネジメント、一般家庭の地震への備え、など様々なレベルで被害防止軽減策を検討するために重要な課題である。

ライフラインの地震時機能の予測法は主として2種類に大別される。一つは「積み上げ式」の方法であり、地震動強度、物理的被害要因(埋設管標準被害率、管種、管径、管路延長、地盤条件、液状化など)、機能的被害要因(供給人口、ネットワーク形態、被災率予測式など)および復旧要因(復旧作業効率、投入復旧資材量など)に関するデータを用いて予測が進められる。わが国<sup>1,2)</sup>や米国<sup>3,4)</sup>における地震被害想定のおおむねは、基本的にこうした流れを踏襲するものであり、多段階の手順を踏むことによって不確実性が增大するといった問題があるものの、事実上の標準的手順となっている。

しかし詳細なデータを利用できるのは、一般的にラ

イフライン事業者や被害想定に関連する一部機関に限定される。従って、ライフライン途絶対策を独自に検討しようとする組織や個人にとって、網羅的にデータを入手することは容易なことではない。また、復旧過程が復旧戦略に大きく依存することから、供給を受ける側の需要家(利用者)の位置情報と関連付けた予測が一般的に困難である。このため自治体の地震被害想定<sup>5)</sup>では、物理的被害予測が中心となり、機能的被害と復旧は対象外とされるか、地域全体での復旧曲線が示されるに過ぎない場合が多いのが現状である。

ライフラインの地震時機能のためのもう一つの方法は、被災事例に基づいて震度と機能停止の統計的な関係を求め、そのモデルを用いて予測を行う方法である。関連研究としては、浦河沖地震を対象として被害・復旧と震度の関連を調査した事例研究<sup>6)</sup>や、兵庫県南部地震の被災事例に基づいた最大加速度による断水期間の予測モデル<sup>7)</sup>が挙げられる。またNojima et al.<sup>8)</sup>は、兵庫県南部地震におけるライフライン機能復旧の震度依存性を明らかにし、地域全体の復旧曲線を震度別に分解する方法を検討している。

地震動強度と直結した機能的被害予測方法は、推定精度に限界はあるものの、必要データを十分に得ることができない環境においては、簡便に活用される機会もあると考えられる。このためには、従来の「停電1

日、断水1週間、ガス停止1ヶ月」といった慣用的表現ではなく、定量的データを根拠とする客観性を備えた予測手法を確立することが望まれる。平成8年の気象庁震度階級改訂の際に公表された「気象庁震度階級関連解説表」<sup>9)</sup>には、震度階級に応じてライフラインの供給状況が参考程度に記載されているものの、停止期間に関する記述はない。

以上のような背景のもとで本研究では、1995年兵庫県南部地震の被災事例に基づいて、着目地点における震度情報のみをパラメータとして、当該地点における供給系ライフライン（電気・水道・都市ガス）の地震時機能を二段階で評価するモデルを提案する。

- (1) 機能停止の有無の確率予測
- (2) 機能停止が発生したという条件下における機能停止期間の確率予測

まず、1995年兵庫県南部地震における地震動強度分布とライフライン機能の被害と復旧のデータをGIS (Geographic Information System) 上に展開して集計する。集計の基本単位は、両データの詳細さに合わせて町丁目とする。地震動強度指標については、対象地域全域で推定が行われているという条件とユーザーにとっての指標の親近性などを考慮して、震度を採用する。予測モデルの同定には、ロジットモデル、最尤推定法、多変量解析手法などの統計的手法を適用する。

GISソフトウェアとしては、(株) Informatix社のSIS Ver.5.2を使用し、地図データとしては、国土地理院による数値地図2500(空間データ基盤)<sup>10)</sup>および数値地図25000(行政界・海岸線)<sup>11)</sup>を使用した。

以下、2.では1995年兵庫県南部地震における震度分布について、3.では供給系ライフラインの機能的被害と復旧について、それぞれのデータの概要を説明する。4.では、二段階評価モデルの第一段階にあたる機能停止の確率予測モデルについて、5.では、第二段階にあたる機能停止期間の確率予測モデルについて述べる。6.では、二段階評価モデルの手順について整理し、想定される利用形態について考察を行う。

## 2. 震度分布に関するデータベースの構築

### (1) 分析対象範囲

本研究で分析の対象とした範囲を図-1に示す。図中の境界線は市区町の行政界である。兵庫県側で東西約50km、大阪府側で東西約30km、あわせて東西約80kmの領域である。大阪府北部を含めたのは、ライフライン機能停止確率の評価において、低震度領域における精度を高めることを狙いとしたためである。

兵庫県側においては「被災を受けた本州側の主要8

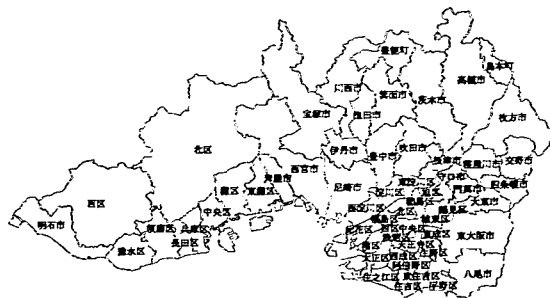


図-1 分析の対象とした範囲

市」、大阪府側においては、「大阪府北部の17市2町(能勢町を除く)」として、以下の市区を対象とした。  
 兵庫県：神戸市(東灘区、灘区、中央区、兵庫区、長田区、須磨区、垂水区、西区、北区の全9区)、西宮市、芦屋市、尼崎市、宝塚市、伊丹市、川西市、明石市

大阪府：大阪市(全24区)、池田市、豊中市、吹田市、箕面市、茨木市、高槻市、枚方市、寝屋川市、摂津市、門真市、守口市、交野市、四条畷市、大東市、東大阪市、八尾市、島本町、豊能町

### (2) 兵庫県南部地震の震度分布に関する調査研究

被害要因分析を行うには、広範囲での震度分布を面的に把握する必要がある。これまで、推定手段としては、揺れの体験者へのアンケート調査<sup>12)~14)</sup>や建物被害や墓石転倒などの被害分布<sup>15)~17)</sup>など、様々な手段で震度分布が推定され、強震記録によるキャリブレーションが行われている。本研究では2.(1)に示したように広範囲を対象とするので、3種類の研究成果<sup>13), 14), 16)</sup>をあわせて用いることを検討した。以下に各調査研究の概要を示す。

#### a) 建物被害に基づく兵庫県下の震度分布

山口・山崎<sup>16)</sup>は、17箇所の強震観測地点で得られた強震記録を用いて、各記録の最大加速度、最大速度、SI値、および計測震度を算出し、各観測地点周辺の町丁目における建物被害率<sup>18)</sup>との関係から、建物のフラジリティ関数(後出図-14参照)を算出している。これに基づいて、兵庫県下の被災市区町(本研究の対象範囲から神戸市西区、北区、明石市を除く)を対象として、町丁目ごとの建物被害率データ<sup>18)</sup>より上記4種類の地震動強度指標の空間的分布を求めた。ただし神戸市域では算定結果の安定性を考慮して、大字単位で推定されている。文献16)には、建物種類を「低層独立住宅」に限定して得られた震度分布のほか、全建物を用いた結果を補足した震度分布が示されているが、後述のように本研究では前者を優先することとした。

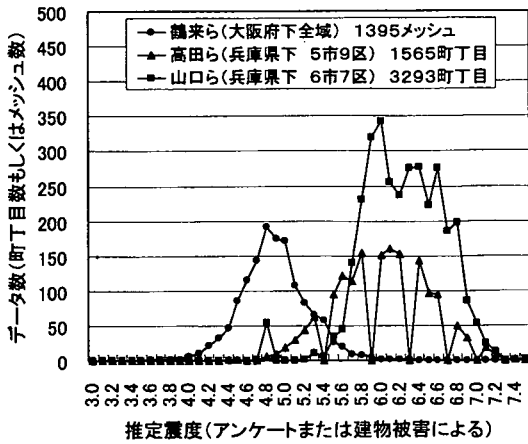


図-2 推定震度の頻度分布 (3種の調査研究による全データで、兵庫県は町丁目単位、大阪府は1kmメッシュ単位で震度0.1刻み)

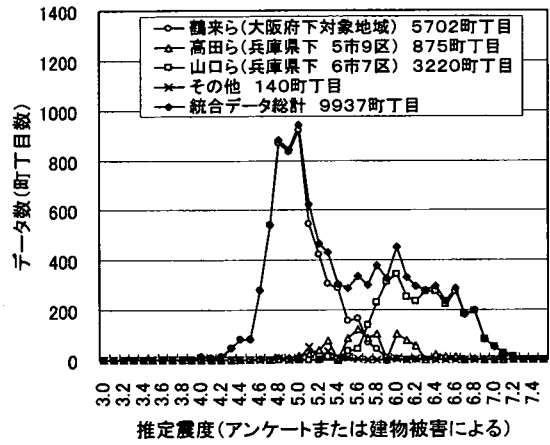


図-3 推定震度の頻度分布 (統合して重複を除いたデータ、町丁目単位で震度0.1刻み)

### b) アンケート調査に基づく兵庫県下の震度分布

高田ら<sup>13)</sup>は、兵庫県下の主な被災市区町(神戸市9区、西宮市、芦屋市、尼崎市、宝塚市、明石市および淡路島の1市10町)を対象として太田ら<sup>19)</sup>の方法によるアンケート調査を実施し、町丁目単位および大字単位の推定震度分布を求めている。アンケート震度は、高震度領域(震度4.5を超える領域)において計測震度よりも過小評価となる傾向が指摘されている。これを補正するため、各質問項目に対する回答に乗じる重み係数を修正して再集計する方法<sup>12)</sup>や、アンケート結果の再集計を行わずに簡易修正式を用いる方法<sup>20)</sup>が提案されている。本研究では、後者の方法により補正震度を求めることとした。

### c) アンケート調査に基づく大阪府下の震度分布

鶴来ら<sup>14)</sup>は、大阪府下の全市区町村を対象として太田ら<sup>19)</sup>の方法によるアンケート調査を実施し、3次メッシュ単位(東西約1.1km、南北約1km)でアンケート震度の空間的分布を得ている。鶴来らは、高震度領域の簡易修正式<sup>20)</sup>で補正してもなお、計測震度より過小評価になるとして、アンケート震度に一律に0.8を加算して再補正しており、本研究でもこれを採用した。

### (3) データセットの統合による広域震度分布

本研究では、以上の3種類のデータセットを統合して広域震度分布として利用する。まず、対象地域のうち兵庫県下に関しては町丁目単位、大阪府下に関しては3次メッシュ単位で震度分布をGIS上にデータ化した。図-2に推定震度の頻度分布を示す。震度の刻み幅は0.1で、兵庫県側は町丁目数、大阪府側は3次メッシュ数で表している。

山口・山崎<sup>16)</sup>による分析結果は、建物被害に基づくので、建物被害が少ない場合領域では、 fragility関数が0に近い裾野の部分での推定となり、精度が悪化する。図-2の震度4.8付近の孤立したデータ群は、建物被害がなかった町丁目での算出値であり、異常値として除外することが適当であると判断された。高田ら<sup>13)</sup>のアンケート調査の結果については、本研究の対象地域内のデータのみを示している。震度5.4、5.9などのデータが欠落している理由は、小数点以下1桁のデータ<sup>13)</sup>に簡易修正式<sup>20)</sup>を適用したため、データ間隔が0.1を上回ったことによる。鶴来ら<sup>14)</sup>のアンケート調査の結果については、本研究の対象地域のみを集計結果を、3次メッシュ数で表示している。

図-2より、以上の3種類のデータセットは相互補完的な関係にあり、これらを統合すれば、空間的広がりや震度領域の両方の意味で広範囲をカバーできることがわかる。ここで、兵庫県を対象とした文献<sup>16)</sup>と文献<sup>13)</sup>の結果には重複部分があるため、データ数や推定精度などを考慮したうえで、以下の手順によって、町丁目ごとの震度を決定した。

- 山口・山崎<sup>16)</sup>による低層独立住宅を対象とした町丁目単位の結果を優先して用いる。
- データ欠損の場合、全建物を対象とした町丁目単位の推定結果で補足する。
- さらに、高田ら<sup>13)</sup>による町丁目単位の推定結果で補足し、それでも欠損する場合、大字単位の推定結果で補足する。

また本研究では町丁目を基本単位とした評価を行うので、大阪府では3次メッシュデータを町丁目データに対応させる必要がある。その方法は次の通りである。



図-4 対象地域における推定震度分布(町丁目単位)

- 大阪府統計データ<sup>20)</sup>より, 対象地域(大阪市24区16市2町)における町丁目数を求める。
- GIS上で行政界(市区町界)と3次メッシュをオーバーレイし, 各行政界内での「震度の面積比構成」を求める。
- 各行政界内の町丁目数を, b)で求めた「震度の面積比構成」に応じて比例配分し, 震度ごとの町丁目数を求める。

ちなみに, 3次メッシュ相当領域における町丁目数は, 市区町ごとに1.2~20.9(町丁目/メッシュ)とばらつき, 平均6.4(町丁目/メッシュ)であった。

上記の3種類のデータセットを統合して重複を除き, 文献12), 14)による兵庫県側の140町丁目を補足的に加えた結果, 町丁目数はあわせて9937となった。震度の頻度分布を図-3に示す。兵庫県のうち主として震度が大きい領域(3220町丁目)は文献16), 相対的に震度が小さい領域(875町丁目)は文献13)によりカバーされ, さらに, 大阪府の結果<sup>14)</sup>(5702町丁目)によって, 震度階5弱~7の範囲がバランスよくカバーされていることがわかる。こうして得られた推定震度分布を図-4に示す。他の研究<sup>15), 17)</sup>による震度分布と大きな相違はないと判断される。

### 3. ライフライン機能停止のデータベースの構築

#### (1) ライフライン機能停止のデータセット

1995年兵庫県南部地震における供給系ライフラインの被害と復旧に関しては, 各事業者の関連協会, 監督官庁, 関連学会や研究機関などによる報告がとりまとめられている<sup>22)~38)</sup>。

京都大学防災研究所総合防災研究部門を中心とする研究グループは, 兵庫県南部地震におけるライフラインの施設被害と機能復旧およびその社会的影響のGIS分析を実施した<sup>38)</sup>。対象は神戸・西宮・芦屋の3市で, 町丁目を基本単位として, 上水道システムと都市ガス供給システムの被害と復旧過程に関する属性デ

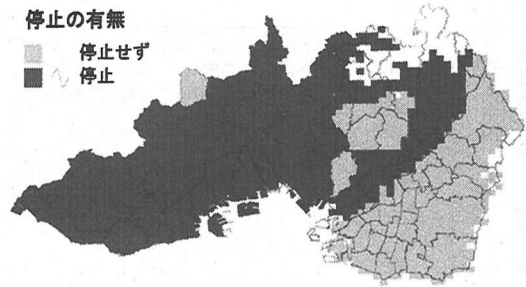


図-5 停電の発生範囲

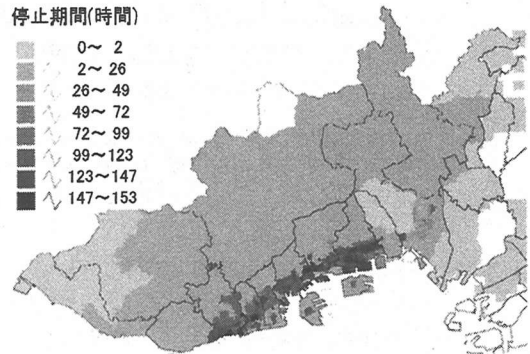


図-6 電力供給機能の復旧に要した時間

ータを付加したデータベースが構築されている。

これに加えて本研究では, 各事業者からの提供資料や文献<sup>22)~37)</sup>などにに基づき, 電気, 水道, 都市ガスのGISデータベースを構築した。以下, 供給系ライフラインの被害と復旧の概要を示す。

#### (2) 電力供給システム

電力供給システムについては, 関西電力(株)提供資料と文献<sup>22), 23), 37)</sup>よりデータセットを作成した。

図-5は, 本研究の対象地域内における地震直後の停電範囲を示す。明石市から大阪府の淀川以北を中心とした広い範囲で停電が生じており, 最大停電戸数は260万軒に上った。しかし西宮変電所からの77kV連絡線を経由した系統復旧の措置などによって, 2時間後の停電戸数は兵庫県内の100万軒にまで減少した。18日8時には, 全被災変電所において変圧器二次側母線の充電が完了し, 停電戸数は40万軒まで減少した。その後も系統切り替え作業が続けられ, 21日2時には送電線の仮復旧が終了した。系統復旧がスムーズに運んだ要因としては, 需要の少ない時間帯であったことや, 被害による負荷減少などが挙げられている。

一方, 家屋損壊の著しい区域では, 高圧線の切り離しや変圧器一次開閉器の開放によって, 被害が大きい地域を除外するとともに, 健全区間に対しては, バイパスケーブルや仮架線によって仮系統が構成された。

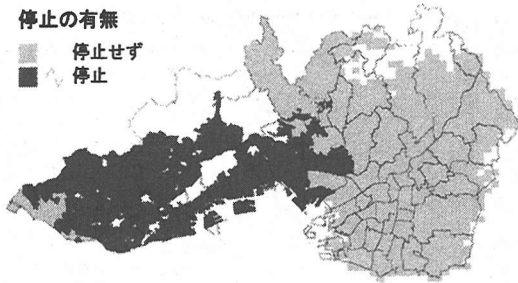


図-7 断水の発生範囲

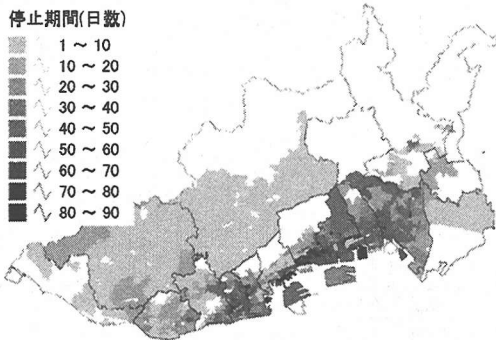


図-8 配水機能の復旧に要した日数

地震から一週間後の23日15時には配電可能な需要家への通電が完了した。

図-6は、町丁目単位での電力供給の復旧所要時間の分布を示す。これは、文献22)に記載された停電エリアに基づいて算出したものである。2日以上停電は、「震災の帯」の周辺に集中していることがわかる。

### (3) 上水道システム

上水道システムについては、各事業者による提供資料と聞き取り調査および文献24)~33), 37), 38)に基づいてデータセットを作成した。基本単位である町丁目のポリゴン属性としては、復旧開始日と復旧完了日の両方(北区, 西区, 垂水区を除く神戸市6区および芦屋市)または復旧完了日のみ(上記以外)をデータベース化した。本研究では復旧完了日を用いた。地震直後の断水範囲と配水機能の復旧所要日数の分布を、それぞれ図-7と図-8に示す。

兵庫県南部地震では、様々な事業規模・システム特性・地形的条件をそなえた多数の事業者が被害を受けた。淀川から神戸・尼崎・西宮・芦屋の各市に導・送・配水を行う阪神水道企業団の幹線網と、各事業者の配水管網が構成する階層的システムに広く被害が発生し、兵庫県下だけで約126万戸で断水した。

神戸市では全戸の65万戸で断水が発生した。阪神水道企業団からの受水量回復にあわせて、配水池への

貯留、試験通水、漏水探知、配水幹線の通水・修繕、小ブロックごとの配水管修繕、の手順で復旧作業が進められた。断水解消は北区が最も早く、西区・垂水区がこれに続き、被害が集中した須磨・長田・兵庫・中央・灘・東灘の6区は遅れた。2月下旬頃になると復旧が被害甚大地域に差し掛かり、復旧効率悪化が目立つようになったが、2月末には条件の整わない地域を除いて復旧が終了した。3月末には陥没のひどい一部臨海部を除く住宅地全域で復旧終了、4月17日に神戸市全域での通水を完了した。

西宮市では、全戸の約96%にあたる157,000戸で断水した。阪神水道企業団からの受水量不足などにより、地震から2週間の復旧効率は極めて悪かった。2月に入って市北部および市東部での断水解消が順調に進んだものの、市南西部での断水は1ヶ月を超えて長期化し、2月末にはほぼ通水を完了した。

芦屋市では全戸の33,400戸で断水し、阪神水道企業団から受水量減少などにより1月25日まで通水不能に陥った。復旧効率は極めて悪く、通水完了は2月末である。

尼崎市では、JR 東海道本線以北と液状化発生地域を中心に約10万戸で断水が発生した。市北西部の復旧が最も遅く、通水完了は1月末にずれこんだ。

明石市では高台地区を中心に約78,000戸で断水した。神戸市境付近で配水管被害が多く、通水完了は1月31日であった。宝塚市の断水は約5万戸で生じた。高地配水区で断水が長期化し、2月8日に断水はほぼ解消した。伊丹市では、淀川導水管の破損により千僧浄水場の配水能力が半減したため、市北部で水圧不足が生じ、約22,000戸で断水となった。復旧資材調達に時間を要し、2月2日の導水管修復により通水完了した。川西市では約7000戸に断水が生じたが、翌日にはごく一部を除いてほぼ解消した。大阪府域での断水発生は限定的で解消も早かったことから、ここでは断水範囲に含めていない。

### (4) 都市ガス供給システム

大阪ガス(株)は、地震後6~15時間の間に5つの中ブロック(神戸第1~第4, 大阪北第7)を遮断し、834,000戸への供給を停止した。さらに大阪市、豊中市、尼崎市、伊丹市などにおける局所的な停止23,400戸とあわせて、供給停止は計857,400戸となった。低圧導管の復旧作業は1月21日に開始された。導管網は需要家3,000~4,000戸ごとに222のセクターに分割された。既往の復旧事例から1セクターの復旧所要日数を4~5日程度とし、復旧体制の状況から約2万戸/日の復旧効率を見込んで、約1ヶ月半で復旧完了の目標が立てられた。しかし、修理箇所への浸水やガ

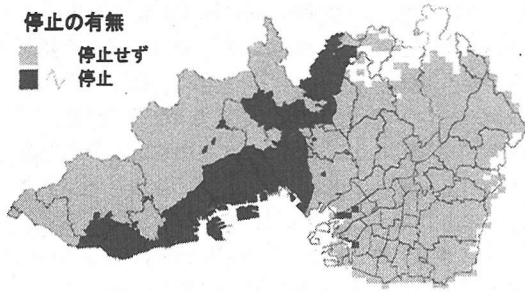


図-9 ガス停止の発生範囲

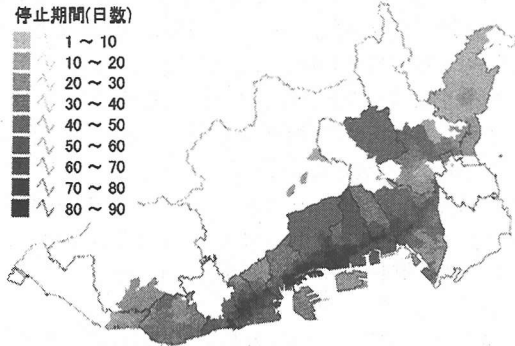


図-10 ガス供給機能の復旧に要した日数

ス管内への差し水による作業性低下、道路上の倒壊家屋の瓦礫や放置車両による作業障害、交通渋滞による移動支障などの影響で、704,000戸の復旧に85日を要し、復旧効率は平均約8,300戸/日にとどまった。

都市ガス供給システムについては、大阪ガス(株)提供資料と文献(34)～(38)に基づいてデータセットを作成した。属性データはセクターごとに付与されているので、GIS上で町丁目のポリゴンを重ね合わせ、両者の対応付けを行った。

図-9は地震後のガス停止範囲を示す。ガス停止の発生は、ブロック供給遮断が行われた地域にはほぼ限定されたため、停電・断水の発生範囲より狭いのが特徴である。

復旧過程に関する属性データとしては、修繕開始日(道路に沿って埋設される本管・支管・供給管の修繕を開始した日)、復旧開始日(道路から敷地内に引き込まれる内管の復旧を開始した日)、復旧完了日(内管の復旧が完了した日)をデータベース化した。本研究では、復旧セクターと町丁目のサイズの相違を考慮し、復旧開始日と復旧完了日の中間日と、地震当日の日付の差を復旧所要日数として採用した。

図-10は町丁目単位でのガス供給の復旧所要日数の分布を示す。図-8の断水解消と比較してガス停止の方がはるかに長期間に及んだことがわかる。

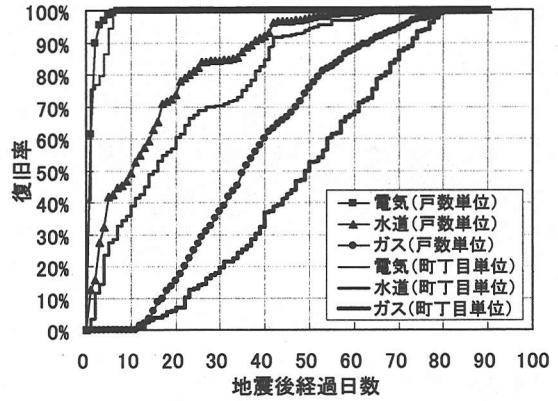


図-11 戸数単位と町丁目単位の復旧曲線の比較

表-1 マッチングできた町丁目数(兵庫県側)

項目 市区名	データ化された町丁目数			対応のついた町丁目数				
	震度	復旧日数			電気	水道	ガス	
		電気	水道	ガス				
明石市	142	172	105	63	142	100	49	
尼崎市	400	273	180	0	250	177	0	
芦屋市	51	56	56	55	51	50	51	
伊丹市	287	306	105	1	287	95	1	
川西市	161	162	12	152	161	12	151	
西宮市	347	407	356	351	338	332	338	
宝塚市	249	273	251	231	247	132	220	
神戸市	北区	247	269	257	22	234	168	22
	西区	228	253	245	16	227	226	25
	垂水区	259	272	263	258	259	257	256
	須磨区	319	352	333	237	314	312	222
	長田区	402	408	404	402	401	398	401
	兵庫区	309	310	312	308	305	305	305
	中央区	323	362	349	347	321	319	321
	灘区	342	353	360	352	340	340	340
東灘区	202	202	208	202	202	202	202	
計	4268	4430	3796	2997	4079	3425	2904	

### (5) 町丁目単位と戸数単位の復旧曲線の比較

図-11は、本研究で集計した町丁目単位の復旧曲線を、戸数ごとに集計された復旧曲線と比較したものである。前者は後者の特徴を概略的にとらえているが、町丁目単位での復旧曲線は、復旧をやや遅く評価する傾向にある。これは、集計単位よりむしろ復旧所要日数の定義の相違に起因すると考えられる。実際に、水道、ガスともに、復旧開始日までの日数を復旧所要日数とした方が両者の整合性がやや改善される傾向も認められた。しかし、公式的な復旧完了後においても機能障害が続き、修理を要する機会が多いことから、特に補正を行わないこととした。

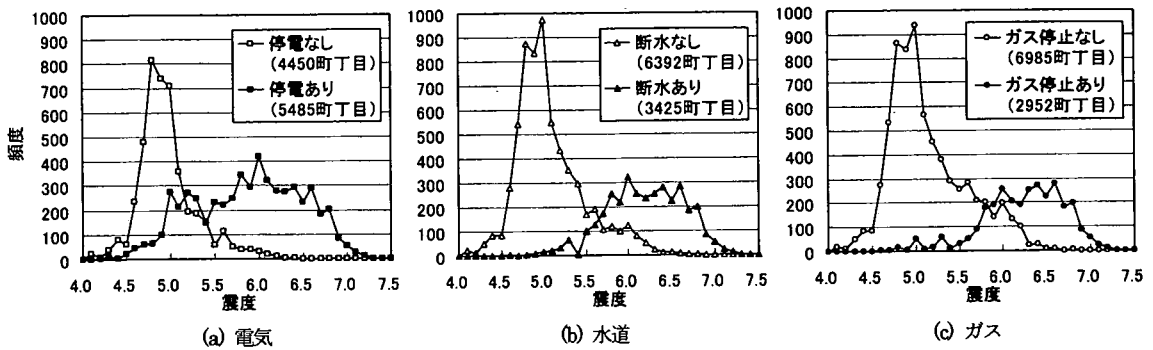


図-12 供給停止の有無で二群分類した町丁目数の頻度分布 (町丁目単位で震度 0.1 刻み)

#### (6) 震度と機能停止データのマッチング

表-1は、兵庫県側の市区について、停電・断水・ガス停止期間に関するデータと、震度のデータをマッチングできた町丁目数をとりまとめたリストである。これに大阪府側(表は省略)を加えたデータベースに基づいて、以下、4.では機能停止の有無と震度の関係をモデル化し、5.では機能停止の期間と震度の関係をモデル化する。

### 4. 機能停止の有無と震度の関係とそのモデル化

#### (1) 機能停止の有無と震度の関係に関する考察

図-4と図-5、7、9のマップを重ね合わせることで、機能停止の有無と震度の関係を考察する。図-5、7、9に基づいて町丁目を「停止あり」と「停止なし」の二群に分類し、0.1刻みの震度に対する頻度分布を示したものが図-12(a)~(c)である。町丁目数は、電気 9935 (停止あり 4450+停止なし 5485)、水道 9817 (停止あり 6392+停止なし 3425)、ガス 9937 (停止あり 6985+停止なし 2952) である。

これより、機能停止の有無は揺れの強さのみで規定されるものではないが、震度の大小でおおまかな説明は可能と判断することができる。とはいえ、重複した部分も認められることから、特定の震度を判別境界として機能停止の有無を判定することは、必ずしも適切とはいえない。そこで、震度を説明変数とする「機能的フラジリティー関数」の形で機能停止確率を予測することとする。

#### (2) 機能的フラジリティー関数の構築

ライフライン機能停止の有無を二項反応と捉え、震度  $I$  を説明変数とするロジットモデル<sup>39)</sup>で表現し、機

能的フラジリティー関数、すなわち、機能停止確率  $p$  の予測式を構築する。ロジットモデルでは、次式の左辺で表される対数オッズ(ロジット)が、右辺の線形モデルで表されると仮定する。

$$\ln \frac{p}{1-p} = b_0 + b_1 \cdot I \quad (1)$$

これより、機能停止確率  $p$  は次式により評価される。

$$p = \frac{\exp[b_0 + b_1 \cdot I]}{1 + \exp[b_0 + b_1 \cdot I]} \quad (2)$$

2個のパラメータ  $b_0$ 、 $b_1$  を推定するため、次式で定義される対数尤度の最大化を規準とする最尤推定法を適用する。

$$\begin{aligned} L &= \ln \prod_{i=1}^n p^{\delta_i} (1-p)^{1-\delta_i} \\ &= \sum_{i=1}^n \{ \delta_i \ln p + (1-\delta_i) \ln(1-p) \} \rightarrow \max \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $n$  は 4.(1) に示したデータ数、 $\delta$  は機能停止の有 ( $\delta=1$ ) および無 ( $\delta=0$ ) を表す二値変数である。以上の条件のもとで  $b_0$  および  $b_1$  を推定することは、2変数の非線形連立方程式を解くことに帰着する。ここでは Newton 法<sup>40)</sup>を用いた反復計算により2個のパラメータの収束値を求めた。

図-13(a)~(c)は、以上によりロジットモデルでモデル化した機能的フラジリティー関数である。図-12(a)~(c)に基づいて、ライフライン機能停止率を0.1刻みの震度ごとに求めた結果も記載しており、両者はよく適合している。また、評価結果 ( $b_0$ 、 $b_1$ 、平均、標準偏差、尤度比、的中率) を表-2にまとめて示す。

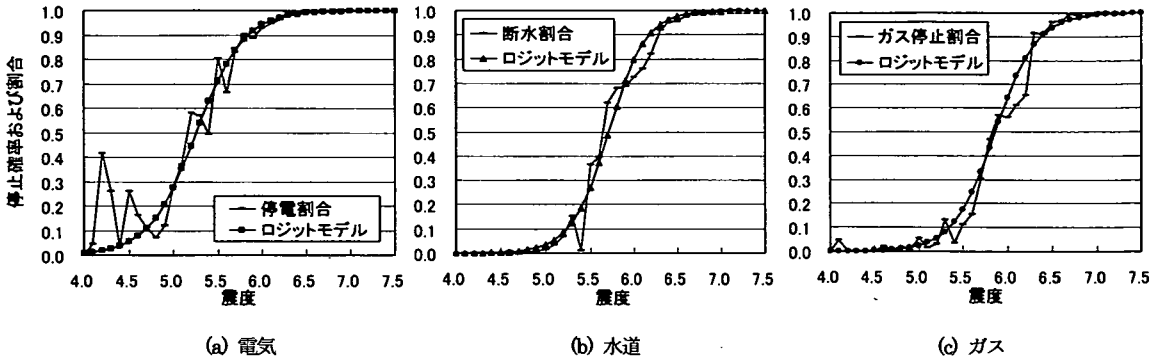


図-13 ロジットモデルによる機能的フラジリティー関数

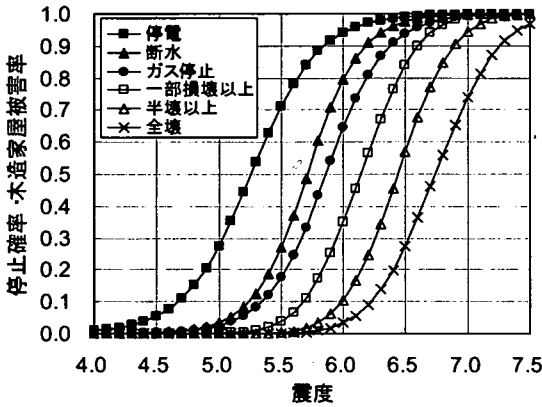


図-14 停電・断水・ガス停止と低層独立建物<sup>16)</sup>のフラジリティー関数

停電に関しては、平均 5.26、標準偏差 0.48 となり、震度 4.3 程度から被害が出始め、震度 5.3 で約 50%、震度 6.2 でほぼ 100% に達する。断水に関しては、平均 5.71、標準偏差 0.38 となり、震度 4.9 程度から被害が出始め、震度 5.7 で約 50%、震度 6.5 でほぼ 100% に達する。ガス停止に関しては、平均 5.86、標準偏差 0.42 となり、震度 5.0 程度から被害が出始め、震度 5.9 で約 50%、震度 6.7 でほぼ 100% に達する。

尤度比  $\rho^2$  は MacFadden 決定数とも呼ばれ<sup>41)</sup>、次式で定義される。

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\mathbf{b}})}{L(\mathbf{0})} \quad (4)$$

すなわち、 $b_0 = b_1 = 0$  において  $p = 0.5$  (定数) としたモデルについての尤度  $L(\mathbf{0})$  と最大尤度  $L(\hat{\mathbf{b}})$  との比較によって、モデルの説明力を表す尺度である。回帰分析の場合とは異なり、ロジットモデルにおける尤度比は 0.2~0.4 の値でも適合度は十分高いと判断される<sup>42)</sup>。停電、断水、ガス停止に対して、それぞれ 0.43、0.62、0.60 となっている。一方、的中率は、停

表-2 ロジットモデルのパラメータと適合度

	停電	断水	ガス停止
$b_0$	-19.72	-26.98	-25.08
$b_1$	3.75	4.72	4.28
平均	5.26	5.71	5.86
標準偏差	0.48	0.38	0.42
尤度比	0.43	0.62	0.60
的中率	0.82	0.89	0.88

止確率 50% を基準として停止の有無を判断した場合に、予測が的中したサンプル数の全サンプル数に対する割合を表す。それぞれ 0.82、0.89、0.88 となった。以上より、かなり適合度が高いモデルが得られたといえる。

図-14 は、停電、断水、ガス停止の機能的フラジリティー関数をまとめて表示したものである。これより、停止しやすさは、電気、水道、ガスの順であることがわかる。停電は震度階 5 弱程度でも生じる可能性があり、最も広範囲に影響を及ぼす恐れがある。断水は、被害の立ちあがりはガス停止に近く、被害率 100% 近くでは停電と近い傾向を示す。ガス停止は、ブロック供給遮断により初期被害が限定されれば、停止確率は停電・断水よりも一貫して低く抑えられる。都市ガス供給システムでは、SI 値 30kine (状況により停止) と 60kine (即時停止) を基準とする供給停止が提案されている<sup>36)</sup>。これらの SI 値を計測震度に変換すると 5.24 と 5.83 となり<sup>42)</sup>、式(2)に代入すると、対応する停止確率はそれぞれ 6% と 47% となる。被害の出始めと中央値にほぼ対応していることは興味深い。

図-14 には、文献 16) に記載の低層独立住宅のフラジリティー関数を比較のために記した。震度に対する正規分布でモデル化されており、全壊、半壊以上、一部損壊以上の平均値はそれぞれ 6.74、6.44、6.14、標準偏差はそれぞれ 0.40、0.35、0.36 となっている。



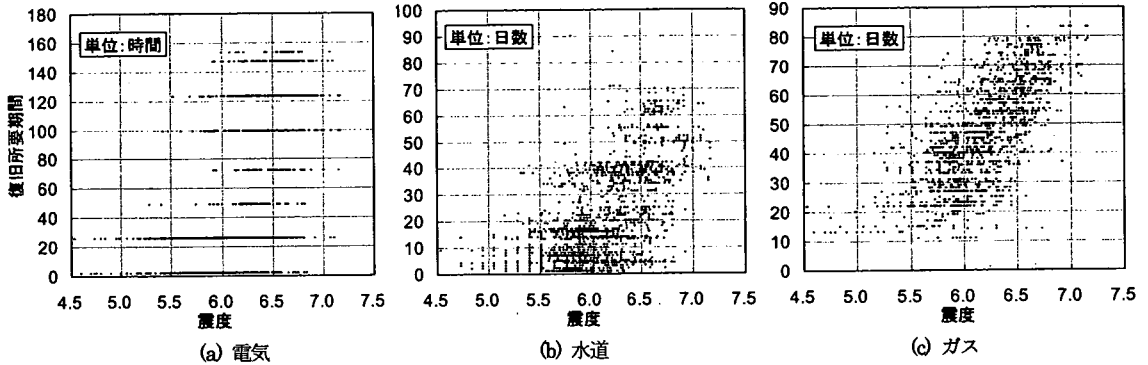


図-15 ライフライン停止期間と震度の散布図(町丁目単位)

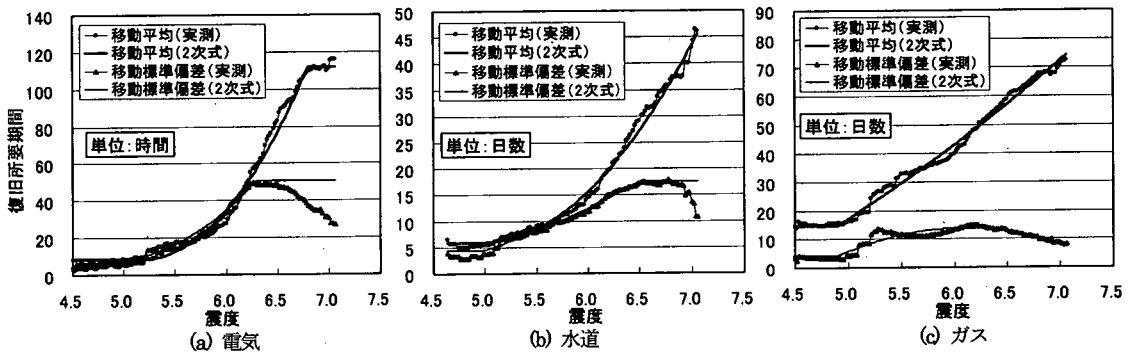


図-16 復旧所要期間の移動平均値と移動標準偏差(シンボル付き:実測値,シンボルなし:二次式モデル)

## 5. 機能停止の期間と震度の関係とそのモデル化

### (1) 機能停止期間と震度の関係に関する考察

図-15(a)~(c)は、ライフライン機能停止期間と震度  $I$  との関係のプロットしたものであり、図-4と図-6, 8, 10のマップを重ね合わせて求めたものである。ばらつきが大きいものの、各システムとも、震度と機能停止期間の間に明らかに正の相関が認められる。

電気に関しては、1月17日午前6時を起点とする時間単位で表示している。系統切り替えによる早期復旧は震度の小さい領域に多く見られ、長時間の停電は、配電設備に大きな被害が生じた震度6.0以上の領域に集中している。

水道に関しては、震度が大きい程ばらつきが大きく、断水が早期に解消する場合もあるのが特徴的である。この理由としては、基幹施設の被害状況、起伏などの地形的条件、震度と配水管被害の不整合、配水拠点との位置関係にも依存すること、特定地域を優先する復旧戦略の適用、など様々な要因が考えられる。

ガスに関しては、地震直後の初動の遅れが目立ち、断水に比べて復旧が遅いのが特徴である。震度5.5~6.5の領域でのばらつきが大きい一方、震度6.5以上

の領域での早期復旧が少なかったため、ばらつきは小さくなっている。震度が相対的に小さい領域でも復旧が遅い場合があるのは、セクターごとに復旧を進めるため、各セクター内で作業の遅れた部分に歩調を合わせる必要があることが理由として挙げられる。ガス停止範囲は比較的狭い範囲に限定されたため、復旧阻害要因の多い地域が相対的に多かったことも一因である。

### (2) 機能停止期間の移動平均と移動標準偏差

震度  $I$  を説明変数として、図-15(a)~(c)の機能停止期間を予測するモデルを検討する。ばらつきは震度ごとに顕著に異なる傾向を示しており、最小二乗法を直接適用することは明らかに不適切である。そこで、探索的データ解析<sup>43)</sup>の概念を参考にして、図-15(a)~(c)のデータに平滑化処理を施し、傾向変動とばらつきを評価することとした。

まず、震度幅  $\Delta I$  を設定し、区間  $[I - 0.5 \cdot \Delta I, I + 0.5 \cdot \Delta I]$  の領域内に含まれるデータを用いて、機能停止期間の平均値と標準偏差を算出する。この操作を震度  $I$  に対して連続的に適用することにより、移動平均値と移動標準偏差の値を求める。本研究では震度幅を  $\Delta I = 0.4$  とした。これは、山口・山崎<sup>10)</sup>による推定震度と計測震度を比較した結果、 $\pm 0.2$  の誤差

表-3. 停止期間の予測モデルの回帰係数と適用区分

		停電	断水	ガス停止
平均値	$a_0$	1067.96	228.93	-56.25
	$a_1$	-409.00	-89.82	5.49
	$a_2$	39.47	9.04	1.84
	適用下限震度	5.2	5.0	4.9
	適用上限震度	6.8	7.0	7.0
標準偏差	$c_0$	498.40	5.12	-237.66
	$c_1$	-201.90	-6.94	82.59
	$c_2$	20.78	1.36	-6.78
	適用下限震度	4.8	5.0	4.9
	適用上限震度	6.3	6.5	7.0

範囲を見込めば、的中率 64% (14 地点中 9 地点) で両者が整合することから、推定震度の不確定性を考慮することを兼ねて定めたものである。

このようにして算出した移動平均値と移動標準偏差を図-16(a)~(c)のシンボル付きの線で示す。元データの図-15(a)~(c)と対応の取れた傾向を示し、復旧所要期間の震度依存性がより明確に現れている。停電と断水は放物線状、ガス停止は直線状であり、震度に対して強い単調増加の傾向が現れている。

一方、移動標準偏差については、データ数の稀少な領域 (特に、震度 5.0 以下および震度 7.0 以上) では不安定となるものの、移動平均値との関係から判断すると、停電と断水に関しては変動係数 100%、ガス停止に関しては変動係数 40%が、予測モデルの不確定性の目安となろう。

### (3) 機能停止期間のモデル化

図-16(a)~(c)の移動平均値と移動標準偏差を、震度  $I$  の関数としてモデル化する。ここではデータの全体的傾向を踏まえて、次式のように震度  $I$  に関する二次曲線でフィッティングし、最小二乗法で回帰係数を求めることとした。

$$\mu(I) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 \quad (5)$$

$$\sigma(I) = c_0 + c_1 I + c_2 I^2 \quad (6)$$

ただし低震度および高震度領域では二次曲線でフィッティングできない部分が認められる。このため二次曲線を適用する震度の上下限値を目視で決定して区分的フィッティングを行い、この範囲外の外挿は、回帰範囲の上下限値を用いて行うこととした。表-3に、電気、水道、ガスについて、回帰分析の適用範囲と得られた回帰係数を示す。図-16(a)~(c)にモデル曲線を元データに重ねてシンボルなしの線で示す。データの傾向は二次曲線で比較的良好に表現されている。

これらを用いて、震度  $I$  が与えられた場合の停止期間  $t$  を予測・推定する確率分布への当てはめを行う。

分布形としては、既往の研究<sup>20)</sup>を参考にして、ガンマ分布を採用した。ガンマ分布の確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(t|I) = \frac{t^{\alpha(I)-1} \exp\left(-\frac{t}{\beta(I)}\right)}{\beta(I)^{\alpha(I)} \Gamma(\alpha(I))} \quad (7)$$

パラメータ  $\alpha(I)$ 、 $\beta(I)$  は、式(5)~(6)の平均値  $\mu(I)$  と標準偏差  $\sigma(I)$  を用いてモーメント法を適用すると、次式により与えられる。

$$\alpha(I) = \left(\frac{\mu(I)}{\sigma(I)}\right)^2, \quad \beta(I) = \frac{\sigma^2(I)}{\mu(I)} \quad (8)$$

以上より、所与の震度  $I$  に対して、停止期間  $t$  の非超過確率 10%~90%のラインを表示したものが図-17(a)~(c)である。それぞれの実測値である図-15(a)~(c)をよく反映したモデルが得られている。また図-18(a)~(c)は、所定の期間までに復旧する確率を示す。低震度領域において、ガンマ分布のパラメータの組み合わせによっては、やや矛盾した傾向もみられるが、概ね良好な結果が得られている。

停止期間・停止確率ともに、震度階 5 強から震度階 6 強にかけて確率値は特に急変している。小数点以下 1 位まで有効な震度情報が望まれるといえる。

## 6. 機能停止の二段階推定モデルの手順とその適用性

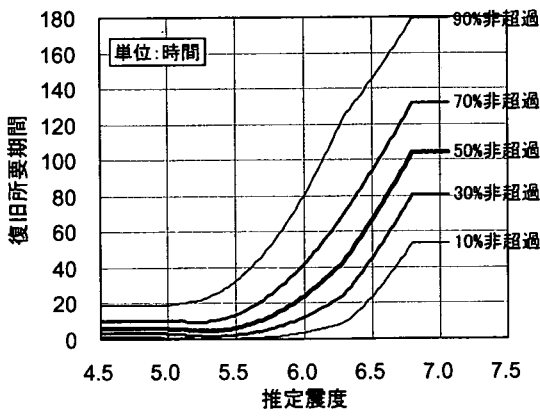
4.(2)および5.(3)で導いた2つのモデルを組み合わせることにより、着目地点での推定震度  $I$  に基づいて、当該地点でのライフライン機能停止確率と、停止した場合の機能停止期間の分布を予測することが可能となる。その手順は以下の通り至って簡便である。

- 震度  $I$  に基づき、式(2)、表-2により停止確率を計算。
- 式(5)~(6)、表-3により  $\mu(I)$ 、 $\sigma(I)$  を計算し、式(8)により  $\alpha(I)$ 、 $\beta(I)$  を計算。
- 式(7)により停止期間の超過確率を計算。

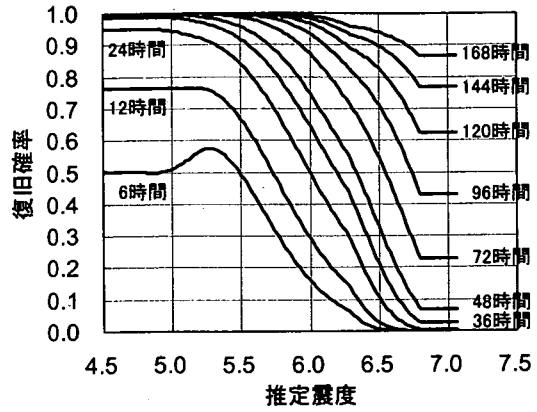
提案モデルの利用法としては、大きく次の3つの場合が挙げられる。

### (1) 想定地震による被害の概略推定

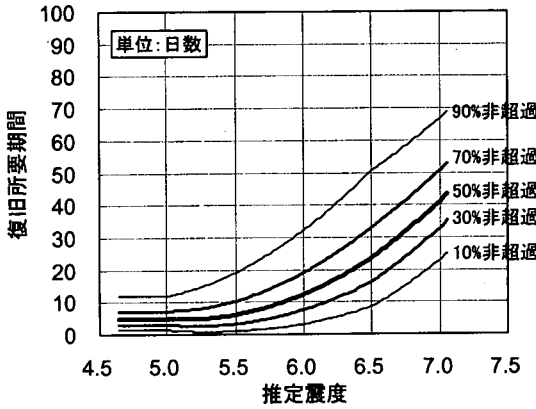
想定東海地震<sup>44)</sup>をはじめとする想定地震の震度分布の公表が相次いでいる。こうした情報の受け手にとって、被害の具体的なイメージを持つことは重要である。震度に直結した提案モデルはその手掛かりを与えるものとして有用であろう。また、上記手順を広域に適用すれば、機能的被害の面的分布を把握できる。さらに、震度分布と人口分布をオーバーレイすることにより求



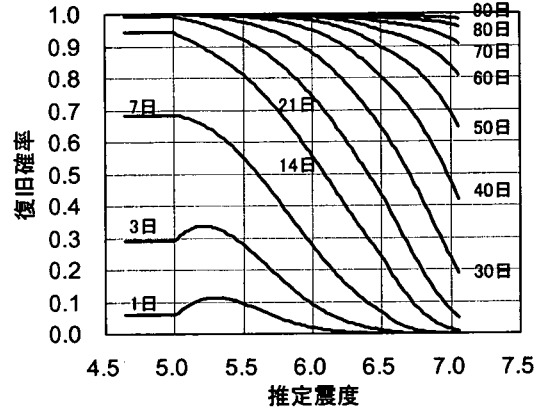
(a) 電気



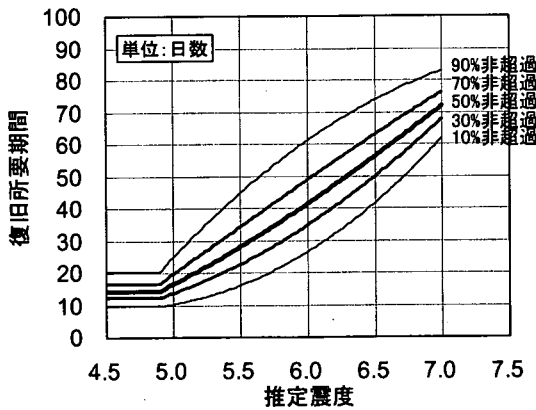
(a) 電気



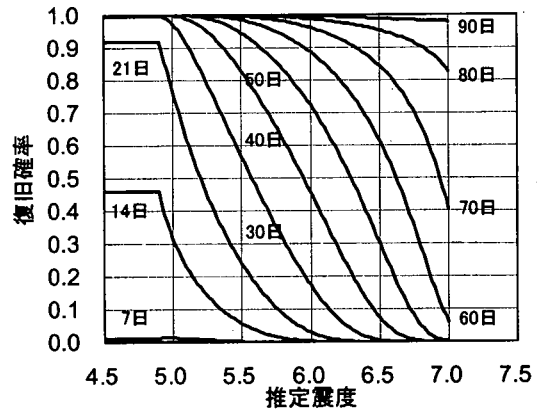
(b) 水道



(b) 水道



(c) ガス



(c) ガス

図-17 非超過確率レベルに対応した停止期間

図-18 所定の期間内に機能復旧する確率

められる「震度曝露人口<sup>45)</sup>」とあわせて集計すれば、地域全体での被害・復旧の概略予測が可能となる。

## (2) 地震直後の被害の早期推定

近年、強震観測体制の充実により、地震後、高密度な震度情報が得られるようになった。復旧の初動体制

を確立する局面では、迅速な被害推定が重要である。震度情報のみを入力データとする提案モデルは、詳細分析ができない状況下では特に有意義であり、概略推定結果を意思決定材料として有効利用できる。実被害情報に基づいて初期推定結果を逐次更新<sup>46)</sup>すれば、さらに精度向上を図ることが可能である。

### (3) 地震リスクマネジメント

事前あるいは即時的な被害推定が可能となれば、これを地震防災対策立案の基礎資料として、地震リスクマネジメントに活かすことができる。例えば企業部門においては、個々の事業所の事業中断リスク評価や、個々の施設のエネルギー備蓄計画の策定などに利用することができる。またライフライン事業部門においては、早期復旧のため適正な規模の支援要請の検討や、被災者のニーズを勘案した応急供給計画の策定に活用することができる。防災行政部門においては、ライフライン機能停止に起因する避難者数の予測や避難所設営など、種々の被災者支援体制に役立てることが可能となろう。

以上のように、提案モデルは着目地点での震度情報のみを用いることから、施設に関する詳細なデータが利用できない環境下においても、簡便な予測が可能である。その反面、ばらつきが大きく推定精度に限界があることことも事実である。同じ震度の地点でも、被害の全体的な規模や広がりとの関係が異なれば、違った様相を示すのが普通である。また、耐震強化を実施した前後で推定結果が変わらないため、その効果を測定することができないという短所もある。

そのことを認めた上で不確定性をも定量的に評価し、予測モデルに組み込んだところに特徴がある。特に、「積み上げ式」の推定手法では考慮することが難しいシステム間相互連関<sup>47)</sup>の影響は、提案モデルにおいては、震度という単一パラメータに集約され、暗黙のうちに考慮されているといえる。

また、兵庫県南部地震の事例のみに基づいたとはいえ、震度階7の領域を含む貴重な記録を最大限利用するとともに、本州側の被災地域ほぼ全域と無被害地域の一部をカバーして基礎データを構築している。つまり、3.(2)~(4)に示したような対象エリアにおける多様な被災形態を包含していることから、結果として、モデルの一般性がある程度保持されていると考えられる。

一方、推定精度の向上を図る一つの方法として、「積み上げ式」の推定手法との接点を持たせた利用形態も考えられる。例えば、Nojima et al.<sup>48)</sup>は、配水管および低圧ガス導管の被害箇所数を所与の条件とした上水道・都市ガスの復旧曲線の簡易予測モデルを提案している。このように利用可能なデータに応じて、本研究の二段階推定モデルによる結果のキャリブレーションを行うことが望ましいといえる。

## 7. 結論

本研究では、震度情報に基づいて供給系ライフライ

ンの地震時機能を予測・推定するための二段階評価モデルを提案した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 個別に公表されている3種類のデータセットを統合して、1995年兵庫県南部地震の高密度震度分布のGISデータベースを構築した(表-1, 図-3, 4)。大阪府北部を付加することによって、震度階5弱~7の範囲を広く含めることができた。(2章)
- (2) 1995年兵庫県南部地震における供給系ライフライン(電気、水道、都市ガス)の機能停止の有無と停止期間のGISデータベースを構築した(表-1, 図-5~10, 図-15)。神戸・西宮・芦屋の3市のみならず、比較的被害の軽かった周辺の都市を含めることにより、モデルの精度向上を図ることができた。(3章)
- (3) ロジックモデルを用いて、供給系ライフライン機能停止の有無を確率で予測・推定するため、震度を指標とした機能的フラジリティー関数をモデル化した(図-14, 式(2))。機能停止確率が50%となる震度の値は、電気で5.26、水道で5.71、ガスで5.86となり、比較的、推定精度の良いモデルが得られた(表-2)。(4章)
- (4) 機能停止期間を確率で予測・推定を行うため、探索的データ解析の考え方をを用いて統計的予測モデルを導出した(図-16~18, 表-3, 式(5)~(8))。すべて震度の関数としてモデル化され、利用が容易な形となっている。(5章)
- (5) 提案モデルによる供給系ライフラインの地震時機能性の評価手順についてまとめ、その適用可能性について考察した。(6章)

今後、近年わが国で発生したいくつかの地震に提案モデルを適用し、有効性を検証することを課題としたい。この点については、2001年芸予地震を対象として、一部検討を進めている段階<sup>49)</sup>であるが、それらの結果を踏まえて、ネットワーク施設の脆弱性や形状特性、地域的特性、地震災害規模、着目地点の周辺状況などに基づいた補正を施すことにより、予測精度の向上を図ることも考えたい。また、南海トラフ沿いのプレート間巨大地震や内陸活断層に起因する地震を想定地震とする震度分布<sup>49)</sup>を用いてケーススタディーを行い、広域を対象としたマクロな被害想定と広域災害対応および地震リスクマネジメントのシミュレーションを実施したいと考えている。

謝辞： 本研究を行うにあたり、多くの方々のご協力により貴重な資料やデータを利用することができた。防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター 亀田弘行センター長および広島工業大学 岩井哲助教授(ほか文献 38)の著者諸氏、東京大学生産技術研

究所 山崎文雄助教授および山口直也助手, (財)地域地盤 環境研究所 鶴来雅人氏, 神戸大学 高田至郎教授, 東濃地震科学研究所 太田裕副主席主任研究員および小山真紀研究員, 香川大学 野田茂教授, 関西電力(株), 神戸市・西宮市・尼崎市・伊丹市・川西市・宝塚市の各水道局, 芦屋市・明石市の各水道部, 阪神水道企業団, 兵庫県企業庁, 大阪ガス(株)の関係各位に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 例えば, 東京都防災会議: 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書(被害想定手法編), 869p, 1997年8月。
- 2) 内閣府防災部門: 地震被害想定支援マニュアル, 内閣府防災部門「防災情報のページ」, <http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>, 2001年10月。
- 3) Applied Technology Council: Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, ATC-25, Redwood City, California, 1991.
- 4) Federal Emergency Management Agency: Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS99, Technical Manual, Washington, D.C., 1999.
- 5) 損害保険料率算定会: 地震被害想定資料集, 地震保険調査報告 28, 1998年9月。
- 6) 岡田成幸, 太田裕: 市町村単位でみた地震時被害・復旧プロセスの要因分析, 第1報 1982年浦河沖地震の被害, 日本建築学会構造系論文集, No.361, pp.41-48, 1986年3月。
- 7) 中村孝明, 静間俊郎, 藤井俊二, 飯塚崇文: 兵庫県南部地震による上水道停止期間と地震動のマクロ的相関について, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1073-1076, 1999年7月。
- 8) Nojima, N., Ishikawa, Y., Okumura, T., Sugito, M.: Empirical Estimation of Lifeline Outage Time in Seismic Disaster, Proc. of U.S.-Japan Joint Workshop and Third Grantee Meeting, U.S.-Japan Cooperative Research on Urban Earthquake Disaster Mitigation, Seattle, WA, USA, pp.516-527, August 2001.
- 9) 気象庁監修: 震度を知るー基礎知識とその活用ー, ぎょうせい, 238p, 1996年9月。
- 10) 建設省国土地理院: 数値地図 2500 (空間データ基盤) CD-ROM版, 兵庫1~4, (財)日本地図センター, 1997年4月。
- 11) 建設省国土地理院: 数値地図 25000 (行政界・海岸線) CD-ROM版, 全国, (財)日本地図センター, 1998年10月。
- 12) 太田裕, 小山真紀, 中川康一: アンケート震度算定法の改訂ー高震度領域ー, 自然災害科学, Vol.16, No.4, pp.307-323, 1998年。
- 13) 神戸大学工学部建設学科土木系教室耐震工学研究室 兵庫県南部地震アンケート調査分析グループ (代表: 高田至郎, 嘉嶋崇志): 兵庫県南部地震に関するアンケート調査ー集計結果報告書ー, 1996年11月。
- 14) 鶴来雅人, 澤田純男, 入倉孝次郎, 土岐憲三: アンケート調査による兵庫県南部地震の大阪府域の震度分布, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.165-179, 1999年1月。
- 15) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫: 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp.61-68, 1997年12月。
- 16) 山口直也, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.325-336, 1999年1月。
- 17) 藤本一雄, 翠川三郎: 被害分布から推定した1995年兵庫県南部地震の震度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.71-78, 1999年9月。
- 18) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 303p, CD-ROM添付, 1996年。
- 19) 太田裕, 後藤典俊, 大橋ひとみ: アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, 第92号, pp.117-128, 1979年1月。
- 20) 小山真紀, 太田裕: アンケート震度の気象庁震度への略算変換式, 自然災害科学, Vol.17, No.3, pp.245-247, 1998年。
- 21) 大阪府企画調整部統計課: 大阪府統計情報, <http://www.pref.osaka.jp/osaka-pref/toukei/index.htm>
- 22) 関西電力(株): 阪神・淡路大震災復旧記録, 394p, 1995年6月。
- 23) 資源エネルギー庁編: 地震に強い電気設備のために, 278p, 1996年3月。
- 24) 神戸市水道局: 阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, 163p, 1996年2月。
- 25) 西宮市水道局: 阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, 140p, 1997年10月。
- 26) 芦屋市水道部: 阪神・淡路大震災 水道復旧の報告, 66p, 1997年1月。
- 27) 尼崎市水道局: 阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, 95p, 1996年3月。
- 28) 宝塚市水道局: 阪神・淡路大震災 水道の被害と復旧の記録, 104p, 1996年9月。
- 29) 伊丹市水道局: 阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, 126p, 1998年3月。
- 30) 明石市水道部: 兵庫県南部地震 水道の記録, 181p, 1996年3月。
- 31) 川西市水道部: 阪神・淡路大震災 復旧の記録・同資料編, 16p+35p, 1995年8月。
- 32) (社)日本水道協会: 1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析, 189p, 1996年5月。
- 33) 能島暢呂, 野田茂, 細井由彦, 上月康則: 阪神・淡路大震災における水道の被害と復旧ー送配水形態に着目した考察ー, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.645-652, 1996年1月。
- 34) 大阪ガス(株): 阪神・淡路大震災被害・復旧記録, 197p, 1996年3月。
- 35) (社)日本ガス協会: 阪神・淡路大震災と都市ガス,

- 197p, 1997年1月.
- 36) 資源エネルギー庁監修, ガス地震対策検討会編: ガス地震対策検討会報告書, 255p, 1996年3月.
- 37) 能島暢呂: 阪神・淡路大震災調査報告 共通編-3, 第5章 緊急・活動期の対応と課題, 5.8 供給・処理施設の応急対応, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 日本建築学会, pp.267-287, 1999年6月.
- 38) 亀田弘行, 岩井哲, 碓井照子, 能島暢呂, 坪井健次, 古藤智子, 小川安雄, 松下眞, 藤田裕介, 橋上重弘: 総合防災研究報告第六号 阪神・淡路大震災におけるライフラインの復旧過程と生活支障の GIS 分析, 京都大学防災研究所総合防災研究部門, 1998年3月.
- 39) 東京大学教養学部統計学教室編: 基礎統計学3 自然科学の統計学, 東京大学出版会, 366p, 1992年8月.
- 40) 川崎晴久: C & FORTRAN による数値解析の基礎, 共立出版, 1993年5月.
- 41) 佐々木綱監修・飯田恭敬編著: 交通工学, 国民科学社, 382p, 1992年4月.
- 42) 童華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, 第48巻11号, pp.31-68, 1996年11月.
- 43) 渡部洋, 鈴木則夫, 山田文康, 大塚雄作: 探索的データ解析入門, 朝倉書店, 188p, 1985年5月.
- 44) 中央防災会議東海地震に関する専門調査会: 第10回「東海地震の震度・津波高分布などの公表」, 内閣府防災部門「防災情報のページ」, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/10/index.html>, 2001年11月.
- 45) 能島暢呂, 杉戸真太, 久世益充, 鈴木康夫: 震災ポテンシャル評価のための震度曝露人口指標の提案, 第21回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.61-62, 2002年9月.
- 46) 能島暢呂, 杉戸真太, 金澤伸治: 被害情報の逐次処理による地震時緊急対応の意思決定支援モデル, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.129-142, 2001年7月.
- 47) Nojima, N. and Kameda, H.: Lifeline Interactions in the Hanshin-Awaji Earthquake Disaster, The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake Investigation into Damage to Civil Engineering Structures, Committee of Earthquake Engineering, JSCE, pp.253-264, June 1996.
- 48) 千葉利児, 能島暢呂, 高井広行: 第7章 ライフライン系の被害, 科学研究費補助金(特別研究促進費(1))「平成13年芸予地震による都市地震災害に関する総合的調査研究」報告書, pp.127-161, 2002年3月.
- 49) 久世益充, 杉戸真太, 能島暢呂: 海洋型巨大地震による広域震度分布推定について, 第21回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.79-80, 2002年9月.

(2002.5.16 受付)

## DEVELOPMENT OF A TWO-STEP RISK EVALUATION MODEL FOR POST-EARTHQUAKE SERVICEABILITY OF UTILITY LIFELINES BASED ON SEISMIC INTENSITY DISTRIBUTION

Nobuoto NOJIMA, Masata SUGITO, Yasuo SUZUKI, Yutaka ISHIKAWA  
and Toshihiko OKUMURA

A two-step model has been proposed for evaluation of post-earthquake serviceability of utility lifelines in terms of an estimate of seismic intensity at the site concerned. From the experience of 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, Japan, a GIS database containing high-density distribution of seismic intensity, utility lifeline disruption and outage time was compiled. Then, a two-step model was developed on this basis; the first model being a logit model for probabilistic assessment of occurrence of lifeline disruption, and the second model being a statistical prediction model for the evaluation of outage time. Combining these two models, one can conveniently perform both pre- and post-event evaluations of serviceability of electric power, water, and city gas supply systems, providing rapid estimates solely on the basis of seismic intensity information.