

上水道供給支障率予測モデルの検討
— 重要度評価とファジィ数量化理論の応用 —

千葉 利晃*・請川 健一**・岡野 誠吾***

Forecasting Model for Damage Restoration of Water Supply Network
— Estimation of Importance and Application of Fuzzy Quantification Theory —

Toshiaki CHIBA, Kenichi UKEGAWA and Seigo OKANO

ABSTRACT

There have been several simulation models for the evaluation of lifeline supply functions. These models so far developed are very complicated. And they require a long computational time due to a network inter-linkage analysis and so on.

Recently, to improve the complexity, Hoshiya and others proposed a simple forecasting model for the seismic damage restoration of city water supply functions. In this model, the supply interruption rate is estimated by the linear multiple regression model. Therefore, it is easy to estimate its rate for any damage patterns at every moment.

In the above model, however, there are some unstable conditions in the calculation of multiple regression analysis. Since the intensity of importance of nodes and links is used as an explanatory variable, it is necessary to get a proper estimation of its intensity. However, it is difficult to express its intensity quantitatively. Therefore, this study aims to consider these subjects of instability and to consider how to evaluate the intensity of importance.

There are vague variables such as the intensity of importance mentioned above. Therefore, the another object of this study is to discuss the applicability of Fuzzy quantification theories to the forecasting model of supply interruption rate.

キーワード : 上水道管網、供給支障率、シミュレーション、ファジィ数量化理論
Key Words : water supply network, supply interruption rate, simulation,
Fuzzy quantification theory

* 土木工学科

** 倉敷市役所 (前・福山大学大学院土木工学専攻)

*** 広島県庁 (前・福山大学大学院土木工学専攻)

1. まえがき

大地震時にライフラインシステムはどのような被害をうけ、それらの供給機能がどの程度まで低下するか、その結果が都市機能全体へ与える影響はどうかなどを適確に予測し、事前に補強対策や復旧計画を策定しておくことは極めて重要である。ライフラインシステムは節点と、それらを結ぶ管路から構成されたネットワーク構造であり、面的な広がりを持ちその地域の重要な生命線となっている。システムの構成上からは被害程度、被害総数などが同程度であっても、それらがネットワーク上にどのように分布しているかにより機能低下の度合は異なる。

ライフラインの供給機能の評価に関する研究は、過去に多数なされているが、機能評価を行うためのシミュレーションモデルにはネットワークの連結性や管網流量解析などの複雑な計算過程を組み込んだものが多い。現実的な評価をするためには、モデルは複雑にならざるをえず、多くの入力データや膨大な計算時間を必要とするので、これらのモデルの実用性に問題が残っている。

この問題を解決するために、星谷らはエキスパートの知識を利用した簡易な予測モデル⁽¹⁾⁻⁽³⁾を提案している。このモデルは、エキスパートへのアンケート調査結果（供給支障率あるいは供給戸数）をデータとして重回帰分析を行い、その結果である重回帰式より供給支障率を予測するものである。したがって、複雑な管網の連結性解析のような数値解析を用いないので非常にシンプルなモデルとなっている。しかしながら、アンケート調査結果を用いてモデル化するため、その妥当性はアンケート実施方法およびその回答に依存する。地震多発地帯の水道局を除き多くの水道局の場合、アンケートへの回答（質問された被害パターンに対する供給支障率の予測）そのものが大変な作業となろう。しかしながら、一度このモデルを構築しておけば、さまざまな被害パターンに対する時々刻々の供給支障率が瞬時に予測できるため、被害復旧過程のシミュレーションや防災計画立案あるいは被害復旧対策などに大いに役立つ。

しかしながら、星谷らの予測モデルにもデータによっては良好な重回帰分析が行えないなど、問題点も存在する。そこで、本研究の第一の目的は、福山市上水道管網を対象とし、モデル適用上の問題点を検討したものであり、モデル構築において必要となる節点および管路の重要度についても検討を加えている。

本研究の第二の目的は上記予測モデルへのファジィ理論の適用性に関する検討である。近年、土木学会誌や土木学会論文集などで、ファジィ理論を土木工学分野に応用した研究が数多く発表されている。自然を相手にする土木工学分野では、そのデータに非常に多くのあいまいさが含まれているからであろう。ファジィ理論が応用さ

れた日本で最初の土木工学関係の論文は、1978年の計画系の論文「あいまいさを考慮した経路選択モデルについて」のようである。L.A.Zadehが1965年にファジィ理論の基本的概念を提唱してから13年後に、日本の土木工学分野にこのファジィ理論が応用されたことになる。

ファジィ理論の土木工学分野への応用研究は構造系に多く、信頼性、安全性、評価などの問題に応用したものが多い。これら信頼性に関する研究は、従来の確率・統計理論を基礎としたものであり、ファジィ理論を適用するに無理がなく、最も応用しやすい問題といえよう。耐震設計への応用、美観を考慮した橋梁設計、ケーブルの形状決定、設計システムの開発などの構造物の設計法に応用された論文も多い。これらの論文は構造物設計に関するエキスパートシステム構築を目指した論文といえよう。ファジィ理論を応用した土木工学関係の文献調査の詳細は参考文献(4)を参照頂きたい。

供給支障率は先に述べたように重回帰式より推定する。この重回帰式の説明変数には節点や管路の重要度など定量的に決定しにくく、あいまいな変数も含まれている。したがって、本研究は上水道の供給支障率予測へのファジィ理論の適用を試み、ファジィ理論が上水道の供給支障率予測へ適用出来るか否かの検討を行った。用いたファジィ理論はファジィ数量化理論I類およびII類である。

2. 供給支障率予測モデルの概要^{(1),(3)}

モデルの詳細は参考文献(1)または(3)を参照頂きたいが、供給支障率予測モデルの概要を述べておく。本モデルは物理的被害が修復作業によって減少して行く過程を求める部分と、物理的被害から供給支障率を求める部分に大別できる。また上水道管網(Fig.1)をそのまま利用するのではなく、対象地域をメッシュで区切り、上水道管網を上水道管の供給経路(管路)と供給分配施設(節点)が存在するメッシュ(オーバーレイ・メッシュ)で表現し(Fig.2)、このオーバーレイ・メッシュ単位で復旧過程を予測する。その時の対象地域全体の供給支障率の予測は管網解析などの数値計算を行うのではなく、あらかじめ求めておいた重回帰式を利用している。この重回帰式はエキスパートより得たデータ、あるいは管網解析を行って得られた供給支障率のデータを用いて重回帰分析を行って求めればよい。重回帰式を求めてさえおけば供給支障率を容易に推定できる事になる。本研究ではこの供給支障率を推定するモデル(重回帰式)に焦点をあてて検討する。

供給支障率 F_t の予測は、それぞれのメッシュで求めた管路と節点の復旧件数をもとにして重回帰式より求める。この重回帰式は上水道供給支障率 F_t と被害指標である物理的被害率 D_1 、被害分散度 D_2 および重要施設被害

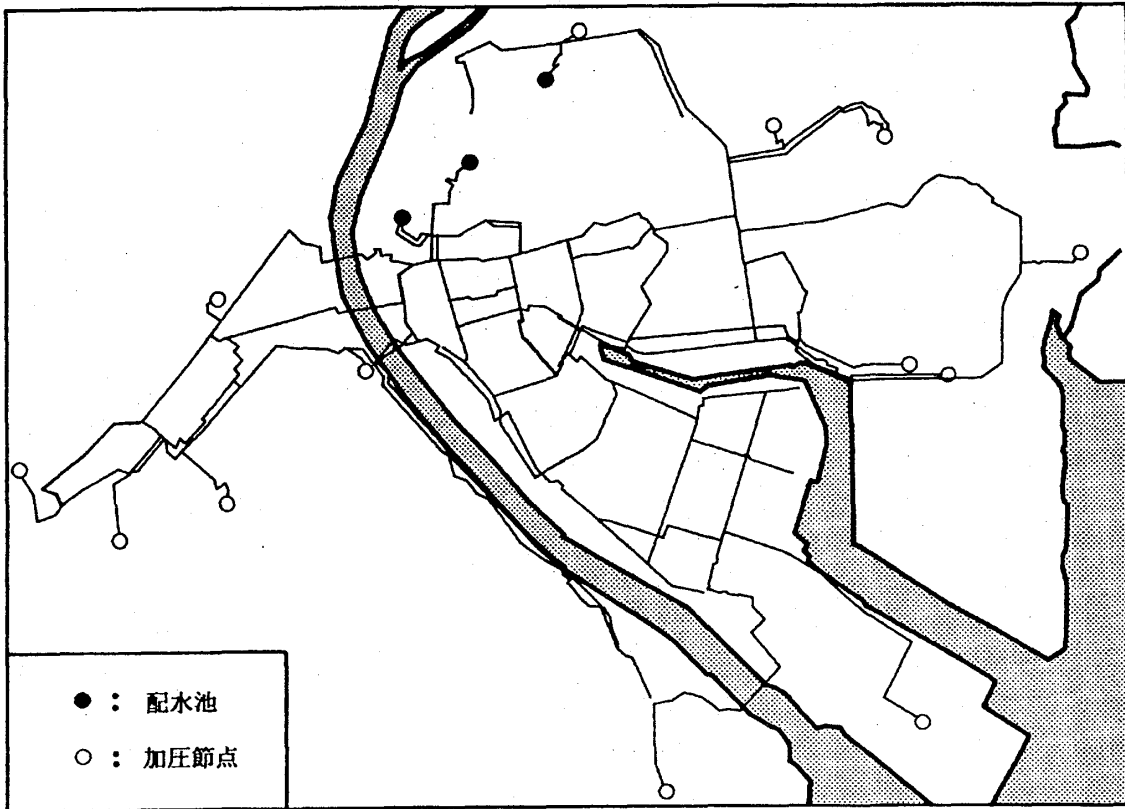


Fig.1 Fukuyama city water supply network.

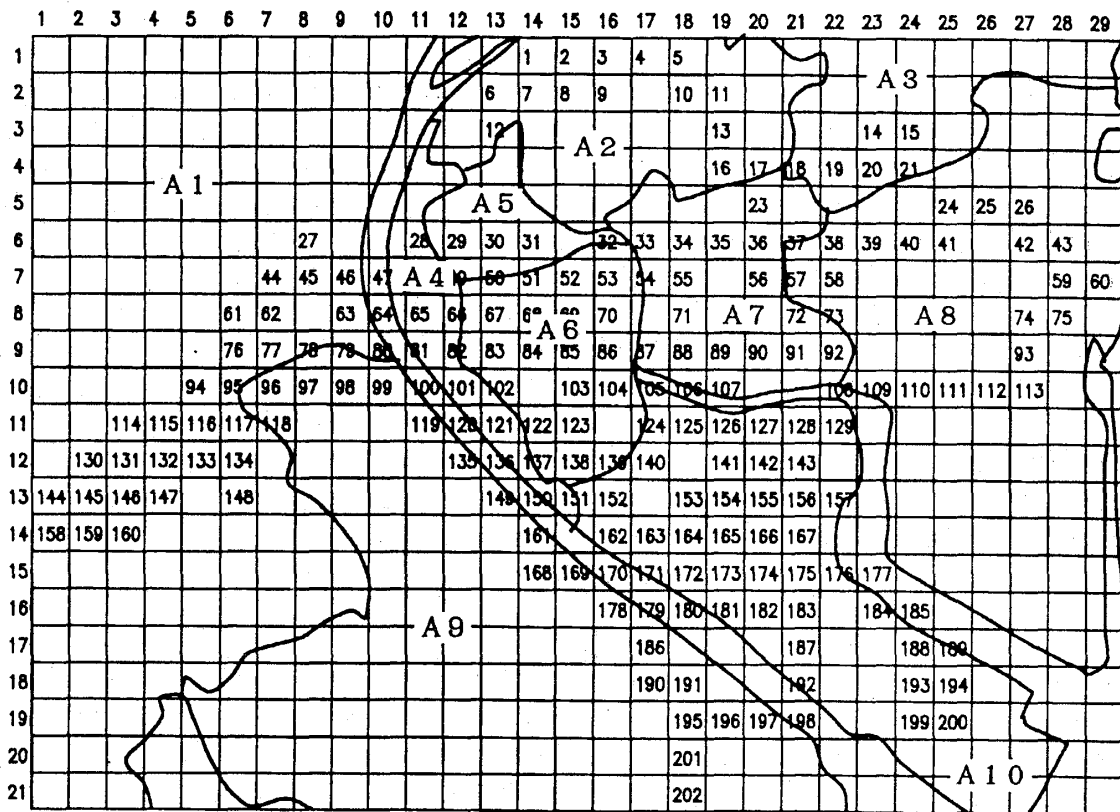


Fig.2 Overlay meshes(500m×500m) and supply areas.

率 $D3$ との関係を表したものである。供給支障率 F_t は、時刻 t における上水道機能の供給支障の程度を表し、次式によって与えられる。

$$F_t = f(D1, D2, D3) \\ = b_0 + b_1 \cdot D1_t + b_2 \cdot D2_t + b_3 \cdot D3_t \quad (1)$$

全面的な水供給停止時を $F_t=1.0$ とし、平常時の水供給時を $F_t=0.0$ とする。式(1)の偏回帰係数 b_0, b_1, b_2 および b_3 を求めておけば、式(1)より直ちに F_t が求まる。したがって、本モデルはネットワークの連結性や管網解析などの数値解析を避けたいきわめて簡潔なモデルとなっている。

メッシュ内の物理的被害件数が直接の復旧作業によって減少していく過程はシステムダイナミクス手法を用いて行う。また、どの地域を先に修復するかなどの復旧戦略も組み込めるので、復旧作業員の配分や復旧の過程を明らかにすることができるだけでなく、他のあらゆる復旧戦略にも応用することが可能である。この復旧戦略を考慮できるように、対象地域を数カ所の供給エリア(Fig.2)に分けている。

(a) 物理的被害率： $D1_t$

物理的被害率 $D1_t$ は、上水道管網のオーバーレイ・メッシュ総数に対する被害のあるメッシュ総数の比で定義する。

$$D1_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N WRC_t^i \quad (2)$$

ここで、 t =時刻、 i =メッシュ番号、 N =上水道管網のオーバーレイ・メッシュ総数、 WRC_t^i =被害復旧モデルの復旧完了指標であり、 i メッシュ内に被害がある場合には $WRC_t^i=1$ 、被害がない場合には $WRC_t^i=0$ とする。

(b) 物理的被害分散度： $D2_t$

$D2_t$ は被害のあるメッシュ間の距離の総和と上水道管網のオーバーレイ・メッシュ間の距離の総和の比であり、被害の広がり具合を表す。

$$D2_t = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N d_{ik} WRC_t^i \cdot WRC_t^k}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N d_i^k} \quad (3)$$

ここで、 d_i^k は上水道管網のオーバーレイ・メッシュ i とオーバーレイ・メッシュ k との距離(メッシュ i の図心からメッシュ k の図心までの距離)である。

(c) 重要施設被害率： $D3_t$

物理的被害率 $D1_t$ では、重要施設(浄水場、配水所、ポンプ所等)の被害は考慮されていない。そこで、重要施設被害率 $D3_t$ により重要施設の被害が供給支障率に与える影響を考慮することにする。これは、重要施設の存在するメッシュ総数と重要施設の被害メッシュ数との比で表す。

$$D3_t = \left(\sum_{i=1}^N I_i \cdot WRC_t^i \right) / \left(\sum_{i=1}^N I_i \right) \quad (4)$$

ここで、 I_i は重要施設存在指標であり、 i メッシュ内に重要施設が存在する場合には $I_i=1$ 、存在しない場合には $I_i=0$ とする。

3. 上水道管網の重要度評価^{(5),(6)}

今回の研究で取り上げた管網は福山市の西部と北部を除いた福山市上水道管網(Fig.1)であり、福山市水道局において実際に管網解析を行う際に使用している75mmの細管まで含んだ全管網を使用した。ただし、Fig.1はおもに管径250mm以上の管を取り出して図示したものである。対象地域全体を500m×500mのメッシュで区切り、上水道管網を上水道管の供給経路(管路)と供給分配施設(節点)が存在するメッシュ(オーバーレイ・メッシュ)で表現するが、このオーバーレイ・メッシュに番号を付けて図示したものがFig.2である。図中のA1~A10は10の地域に分けた供給エリアを示している。

管径250mm以上の管網上に被害を与え、1被害個所のみの被害パターンあるいは5個所被害がある被害パターンなど、合計46種類の被害パターン(1被害パターンにおける被害数は1,2,3,5,7,10,15,19,20および25とした)を用意した。これらの被害パターンごとの供給支障率を管網解析^{(7),(8)}を行って求め、重回帰分析用のデータとした。

供給支障率は被害時の供給支障戸数と平常時供給戸数との比で表した。また、供給支障戸数は節点の平常時基本圧力(m)から評価圧力(m)を差し引いた影響度(m)で評価している。基本圧力とは、{平常時の節点水位(m)−節点の地盤高(m)}であり、評価圧力とは{被害時の節点水位(m)−節点の地盤高(m)}である。この各節点の影響度(m)をTable 1に示すように、その節点の全給水戸数が断水するか、半分の戸数が影響を受けるとみなすか、あるいは平常時と同じく全戸数に水が供給され全く

Table.1 Number of houses at node interrupted water supply.

節点種別	影響度 I_s (m)	各節点での影響給水戸数
一般節点	$I_s \geq 20$ m	影響なし
	$10\text{m} \leq I_s < 20\text{m}$	1/2の戸数が影響を受ける
	$I_s < 10\text{m}$	全戸数が影響を受ける
加圧節点	$I_s \geq 5\text{m}$	影響なし
	$0 \leq I_s < 5\text{m}$	1/2の戸数が影響を受ける
	$I_s < 0$	全戸数が影響を受ける

影響がないかに分けて供給支障戸数を求めている。

結果が式(5)である。

3.1 星谷らによる供給支障率モデルの問題点

上述した46種類の被害パターンを総て用いて重回帰分析を行うと重相関係数は0.65と非常に悪くなる。これは被害を任意に与えたため、ある節点あるいはある管路に被害があるとその先には水が供給されない、すなわち迂回路が全く存在しない直列の管路が存在するなど、被害形態が大きく異なるものが混入されているのが最大の理由である。このような特殊な被害パターンを除き、またなるべく多くの被害パターンを用いて（データ数が少ないほど重相関係数は高くなる）重回帰分析を行った

$$F_t = -0.053 + 4.293 \cdot D1_t + 8.888 \cdot D2_t + 2.200 \cdot D3_t \quad (5)$$

式(5)は29種類の被害パターンを用いており、重相関係数は0.933である。

なお、Fig.3は25個所に被害が発生したときの状況（時刻 $t=0$ ）を表しており、支障率は0.5826すなわち全市の約58%が断水していることを表している。図中メッシュを網掛けした部分に被害が発生（複数の被害

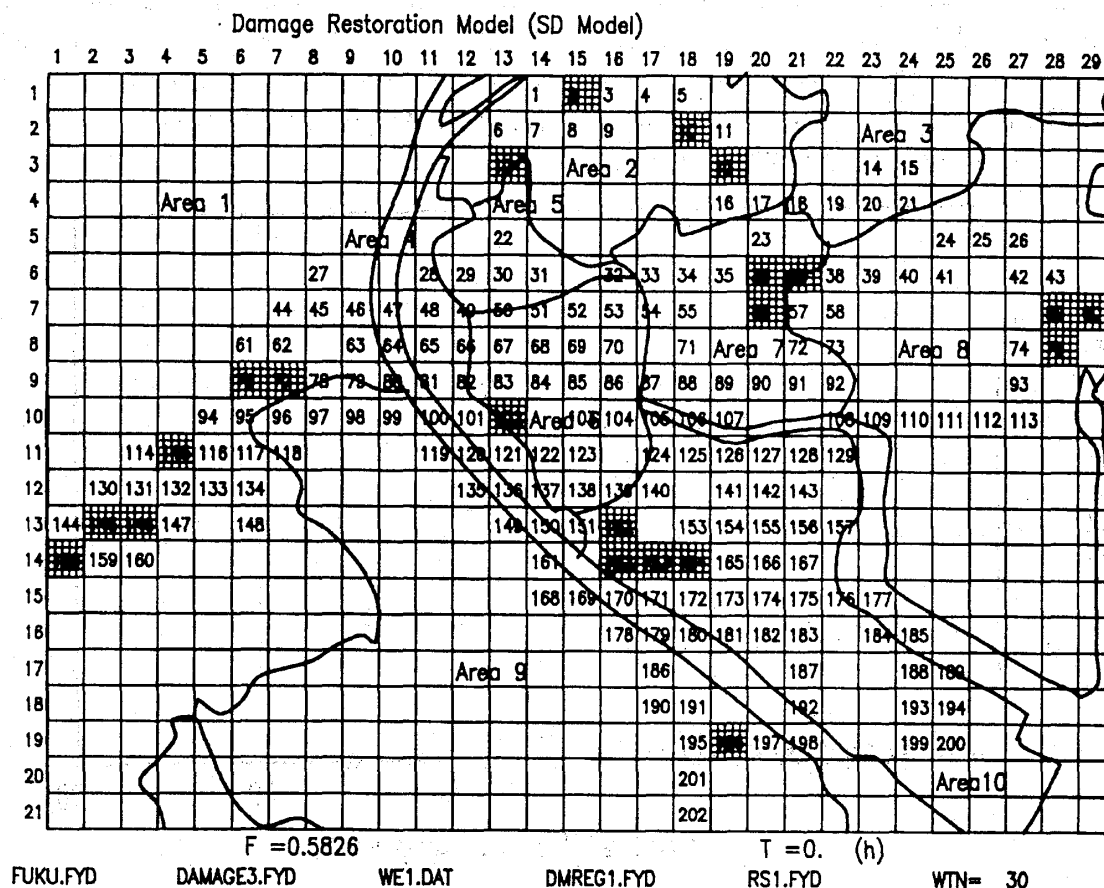


Fig.3 Damage restoration processes ($t=0.0$).

もある)していることを示している。今回解析の予測モデルを用いれば、これらの被害が時間の経過とともに復旧していく過程をパソコンで容易に追求していくことができる。実際のパソコンの画面上では、被害のあるメッシュを赤色で網掛けしており、復旧すれば青色の網掛けに変わるようにして復旧過程を表示している。

ところで、式(5)を導くのに使用したデータ数が46から29に減少しているのは、先に述べたように重回帰分析において、偏回帰係数 b_1 、 b_2 あるいは b_3 が負になったり、重相関係数が低いなど、良好な重回帰分析が行われなかったためである。また、今回の想定システムでは管路等の重要度の分類を大きく2つに分けているが、実際の場合には同じ管径であっても管路等によって重要度が大きく異なり、単純に2つに分けることに無理があるためであろう。したがって、直列結合成分等は削除節点の給水戸数を別途考慮したり、重要度の分類をもう少し実状にありように設定するなどの改良が必要であろう。したがって、以下上水道管網の重要度の評価について検討することにする。

3.2 1節点被害による供給支障率 F_{tN}

今回解析の対象とした福山市上水道管網の全363個の節点の内、無作為に104種類の節点を抽出し1つの節点に被害を与えたときの供給支障率を管網解析を行なって求めた。被害を与えた節点に接続している管路の平均管径と供給支障率との関係を示したものがFig.4である。この図からもわかるように接続管路の平均管径が25cm以下の場合、供給支障率は非常に小さくほとんど影響がないことが分かる。したがって、接続管路の平均管径が

25cm以上の節点(21節点)を対象として重回帰分析を行った。

なお、供給支障率としては、被害を与えた節点の供給戸数は完全に断水することは明らかであるので、管網解析を行って求めた実供給支障率からこの供給戸数分の支障率を差し引いている。このようにして求めた供給支障率は、節点を取り除くことにより影響を受ける他の給水戸数の支障率を意味する。目的変数には、この補正支障率 F_{tN} を用いている。実際の供給支障率 F_t は、この補正支障率 F_{tN} に、(節点の給水戸数/全戸数)を加えたものになる。

説明変数は、①接続管路の平均管径:ND、②配水池からの最短直線距離:L、③接続管路の本数:NM、および④節点密度(当該節点を中心とする1km²の円内に存在する節点数):NCであるが、これらはすべて最大値で正規化して使用している。得られた重回帰式を式(6)に示す。このときの重相関係数は0.8804、決定係数は0.7752である。

$$F_{tN} = -0.0147 + 0.4582 \cdot ND - 0.9358 \cdot L + 0.8225 \cdot NM - 0.4850 \cdot NC \quad (6)$$

式(6)より、支障率は配水池よりの直線距離に大きく依存し、距離が短いほど、すなわち配水池に近い節点が被害を受ければ受けるほど大きくなるのがわかる。また、接続管路の平均管径よりも接続管路の本数の方が支障率に与える影響は大きくなっている。

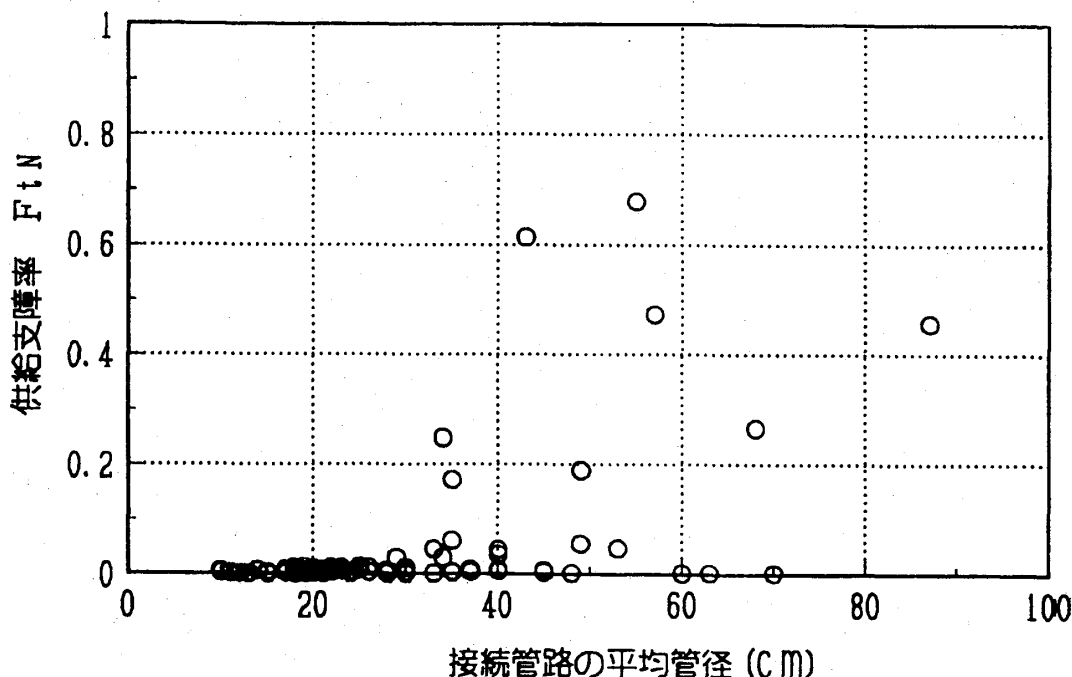


Fig.4 Supply interruption rate by a damage of node.

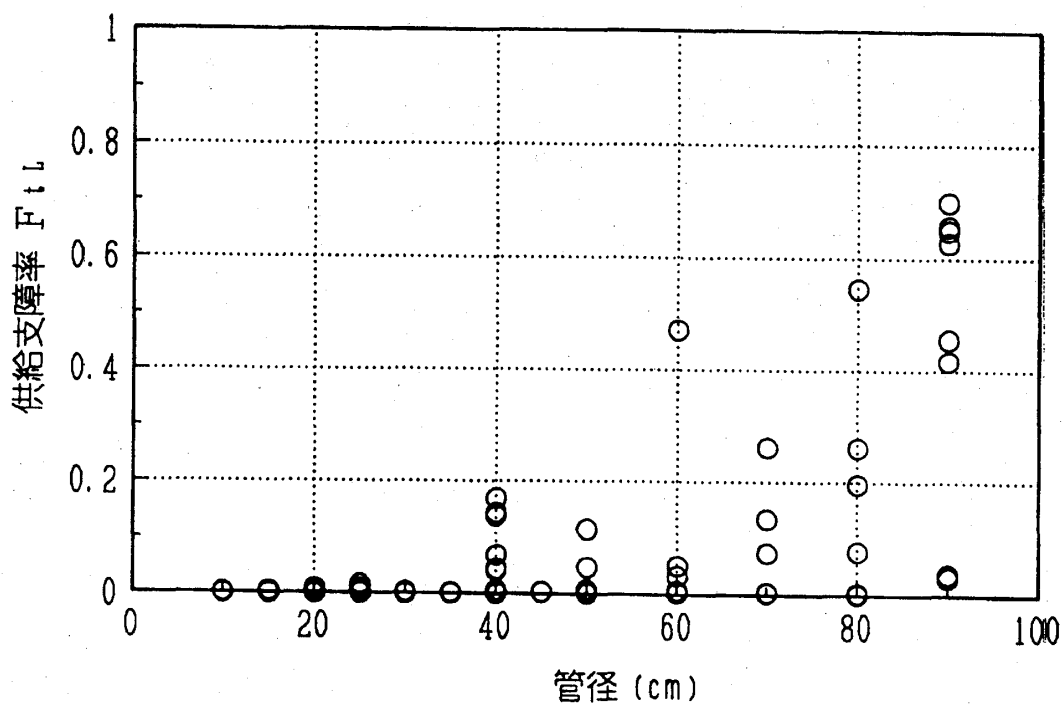


Fig. 5 Supply interruption rate by a damage of link.

3.3 1管路被害による供給支障率 F_L

福山市上水道管網全601本の管路の内、任意に158本の管路を抽出しその内の1つの管路に被害を与えたときの供給支障率を管網解析を行なって求めた。得られた供給支障率と管径との関係をFig.5に示す。この図より管径が40cm未満の場合には、ほとんど影響がないことが分かる。したがって、今回は管径が40cm以上の管路(33管路)を対象として重回帰分析を行なった。

目的変数は供給支障率 F_L 、説明変数は、①管路の直径:LD、②配水池からの最短直線距離:L、および③管路両端の節点に接続している管路数:LM、の3つの説明変数とした。これらは1節点被害の場合と同様にすべて最大値で正規化して使用している。重回帰分析結果を式(7)に示す。重相関係数は0.9116、決定係数は0.8311である。

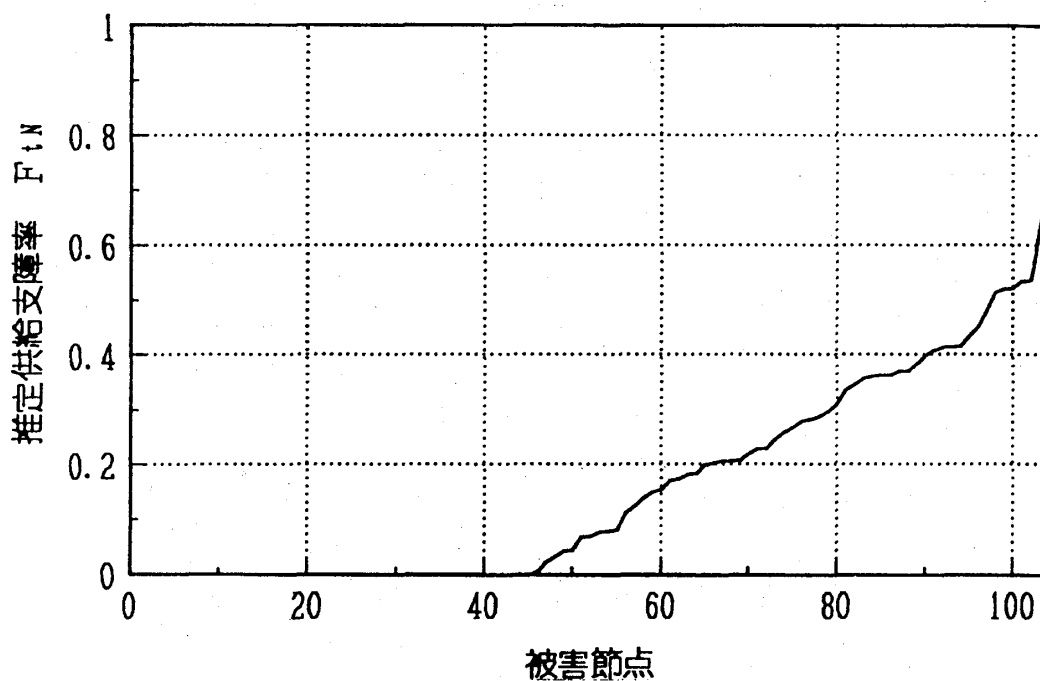


Fig. 6 Supply interruption rates for nodes.

Table 2 Intensity levels of importance for nodes.

重要度レベル	接続管路の平均管径	推定供給支障率
1	25cm未満	
2	25cm以上	0.1未満
3	25cm以上	0.1以上～0.3未満
4	25cm以上	0.3以上～0.5未満
5	25cm以上	0.5以上

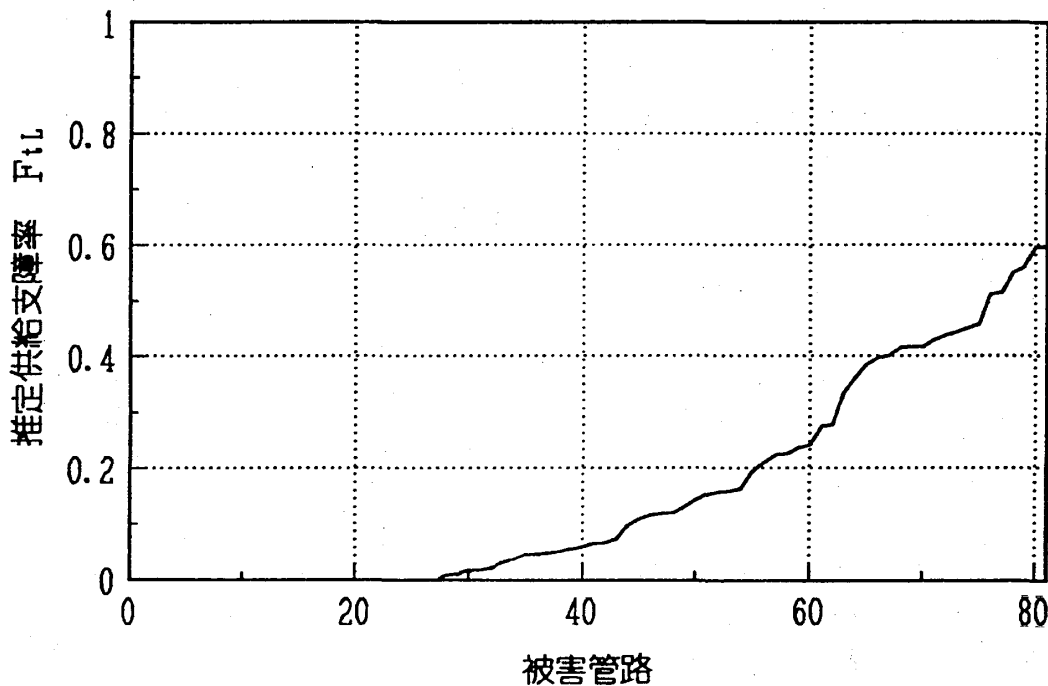


Fig. 7 Supply interruption rates for links.

$$F_{L} = -0.4303 + 0.9621 \cdot LD - 0.5062 \cdot L + 0.2353 \cdot LM \quad (7)$$

式(7)を見ると、管路の場合は当然のことながら管径が供給支障率に大きく影響を与えることがわかる。

3.4 同時複数被害による供給支障率 F_{LM}

複数ヶ所の節点や管路に同時に被害が発生した場合の供給支障率 F_{LM} を目的変数とし、①節点ごとの供給支障率の合計; SND と ②管路ごとの供給支障率の合計; SLD の2つの項目を説明変数として重回帰分析を行った(39データ)。ここでいう節点および管路の支障率とは、1節点あるいは1管路に被害がある場合の供給支障率であり、管網解析を行って得られた支障率である。

重回帰分析結果を式(8)に示す。重相関係数は0.9098であり、決定係数0.8277である。

$$F_{LM} = 0.0272 + 0.6564 \cdot SND + 0.8541 \cdot SLD \quad (8)$$

式(8)からも分かるように、1つの節点および1つの管路で管網解析を行い、供給支障率を求めたデータが揃ってさえおれば、複数ヶ所の節点や管路が同時に被害を受けた場合でも、管網解析を行わずに上述の重回帰式から供給支障率を予測できることが分かる。

3.5 節点、管路およびメッシュの重要度評価

式(6)で与えられる1節点被害による供給支障率 F_{LN} を節点に接続する平均管径が25cm以上の全節点にあてはめて、節点ごとの供給支障率を推定した。これを支障率順に並べて図示したものがFig.6である。この図を参照し、節点の重要度をTable2に示すように5段階で評価することにする。

一方、管路の重要度については、式(7)で与えられる1管路被害による供給支障率 F_{L} を管径40cm以上の全

Table 3 Intensity levels of importance for links.

重要度レベル	管径	推定供給支障率
1	40cm未満	
2	40cm以上	0.1未満
3	40cm以上	0.1以上～0.3未満
4	40cm以上	0.3以上～0.5未満
5	40cm以上	0.5以上

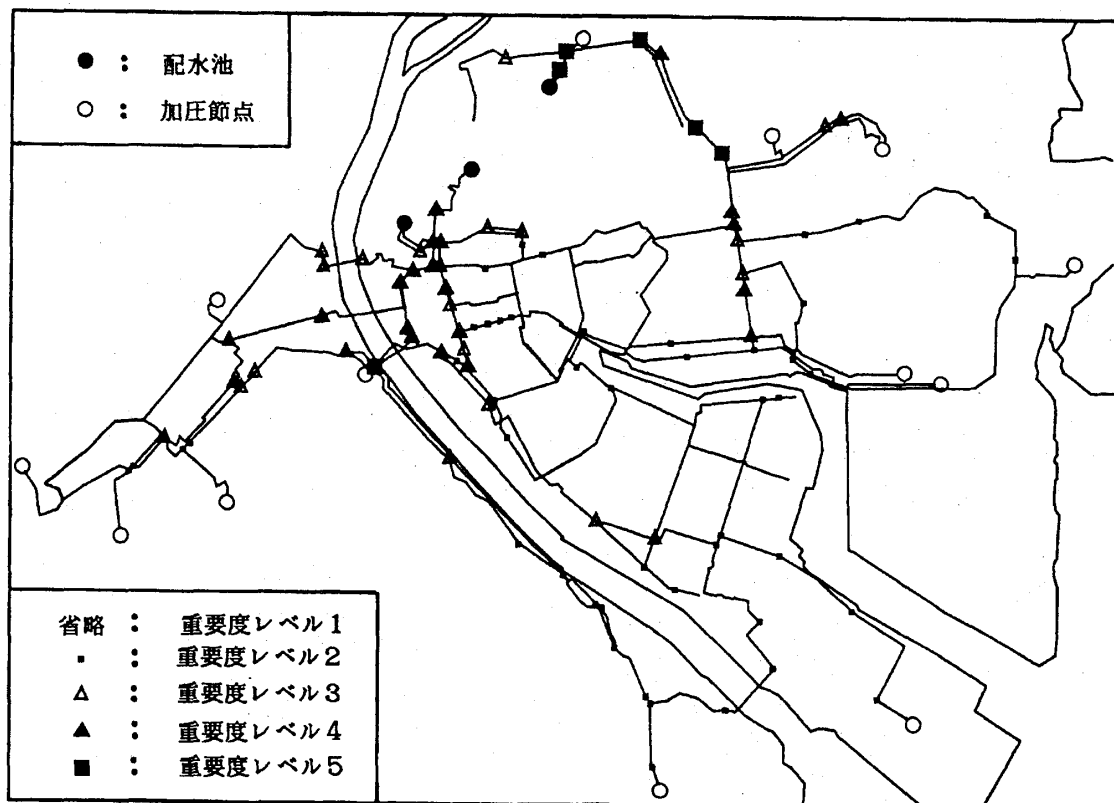


Fig.8 Important nodes.

管路に適用し、各管路ごとの供給支障率を推定した。これを支障率順に並べて図示したものがFig.7である。節点の場合と同様に、管路の重要度をTable 3に示すように5段階で評価した。このように5段階評価した福山市上水道管網の節点および管路の重要度を示した図がFig.8およびFig.9である。

今回解析の対象としたモデルは、上水道管網をメッシュ単位で表現しているが、星谷らは各メッシュの重要度を重要かそうでないかの2段階に分けて解析を行っている。この重要度を2段階といった非常に単純な分け方をして

いる点が、重回帰分析を行う際の重相関係数を小さくし、偏回帰係数が精度よく求められず不安定になる1つの要因である。したがって、ここではメッシュの重要度を5段階評価することを考える。メッシュ内に含まれる節点および管路が同時に被害を受けたと考えた時の供給支障率の大小でメッシュの重要度を評価する事にする。式(6)～(8)を用いて各メッシュの供給支障率を推定し、この結果を参照しメッシュの重要度を5段階評価した。このようにして評価したメッシュの重要度をFig.10に示す。図中の番号は重要度を表し、数字が大きいくほど重要であ

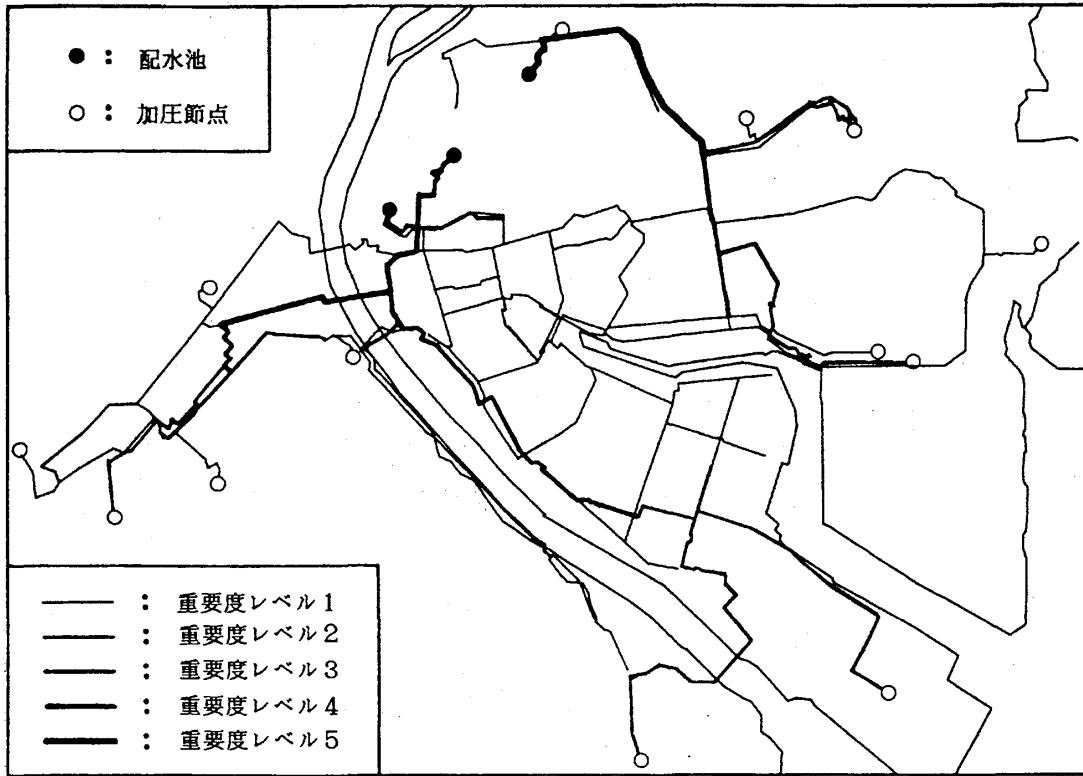


Fig.9 Important water pipes.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1														1	1	4	3	4											
2												1	3	5	4		3	3											
3											1						3						3	2					
4																	4	4	3	3	3	3							
5												5														1	1	1	
6							1				5	4	3	3		1	1	1	1	4	1	2	2	1	1		2	1	
7							1	1	3	3	3	4	3	2	2	1	1	1		3	3	3						2	3
8							3	1		4	3	4	3	3	1	1	1		1		3	3						1	1
9							3	3	3	3	3	3	4	3	1	1	2	1	1	3	1	3	2						1
10						1	3	3	3	3	3	3	3	3		1	2	3	1	2			3	2	2	2	2	1	
11			1	1	1	3	2				1	1	1	3	1		1	1	1	1	2	1							
12		1	1	3	3	2					1	3	3	1	1	1		1	1	1									
13	3	1	2	3		3						1	1	3	1		1	1	1	1	1								
14	1	1	3											2		3	3	3	3	3	2								
15														2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2					
16															2	1	1	2	2	2			2	2					
17																2				2			2	2					
18																1	1			2			2	2					
19																				2	2	2	2			2	2		
20																				2									
21																				2									

Fig.10 Intensity levels of importance for meshes.

ることを表す。配水池に近いメッシュの重要度が高く、
ついで幹線部の存在するメッシュの重要度が高くなって
いることがわかる。したがって、このようにして求めた
重要度の評価法は重要度の5段階評価程度の問題には十
分使用できるものと思われる。

4. ファジィ数量化理論による検討^{(4),(9)}

先に述べたように、データ数がわずかでも変わると重
回帰式がうまく求められないなどの問題がある。これは
特異な被害パターンが含まれていたり、重回帰式の説明
変数に節点や管路の重要度など定量的に決定しにくいあ
いまいな変数が含まれているのも一因であろう。この重
要度の評価については既に述べたが、ここでは観点を交
え、ファジィ理論を利用することを考えてみる。また、
市の中心部と周辺部では性質も異なり、この点も考慮し
た重回帰式を求める必要もあろう。そこで市中心部と周
辺部で供給支障率がどのように異なるかを数量化理論 I
類⁽¹⁰⁾を用いて検討することにする。

供給支障率を推定する場合、従来の重回帰分析による
推定値では、供給支障率は [0, 1] の値であるにも関
わらず、0.0以下の数値や1.0以上の数値が生じる場合
がある。ファジィ数量化理論 II類⁽¹¹⁾を用いて、この点
を解消するとともに、星谷らのモデルと同様な式(1)の
関係を求めることを試みてみる。

4.1 ファジィ数量化理論 I類による供給支障率の推定

直列結合の存在する被害パターンを削除して得られた
29種類の被害パターンを用いて以下のファジィ数量化
理論 I類での分析を行った。この29種類の被害パター
ンごとの供給支障率と、ファジィ数量化理論 I類の説明
変数である物理的被害率D1、被害分散度D2、および重
要施設被害率D3、またファジィ群として市中心部の被
害の程度を中心部の供給支障率(0~1)で与え、供給
支障率が中心部の被害の程度にどれほど影響を与えるか、
ファジィ数量化理論 I類を用いて解析した。

解析により得られた結果を見ると、中心部の被害率を
考慮した場合には供給支障率FはD1、D2およびD3と

$$F = -0.023 + 1.36 \cdot D1 + 14.28 \cdot D2 + 5.33 \cdot D3 \quad (9)$$

の関係にある。一方、中心部の被害率を考慮しない場合
には

$$F = -0.013 + 2.26 \cdot D1 + 22.14 \cdot D2 + 2.67 \cdot D3 \quad (10)$$

の関係になる。このときの偏相関係数と重相関係数を
Table 4に示す。

偏相関係数においては、D1では中心部の被害の程度
を考慮した場合もしない場合も大きな差はない。これは、
D1自体が上水道管網全体に対する被害のある箇所の割
合で、またその被害箇所もランダムに与えているので中
心部であっても周辺部であっても大きな変化がないため
であろう。またD2では中心部の被害の程度を考慮した
場合、負の相関になっている。これは中心部のネットワ
ークは非常に複雑で、また1つのメッシュに多くの管路や
節点が存在するため、被害が起きても迂回路が多いので
被害が広く分散されている方が中心部自体の被害は小さ
くなるためだと思われる。

しかしいくら迂回路が多くても給水戸数は中心部の方
が周辺部より多いし、被害が広く分散されると復旧作業
にも時間がかかり供給支障率にもかなり影響されると思
われる。したがって、分散率の設定方法やメッシュの取
り方も改良すべき点であろう。

D3では、中心部の被害程度を考慮した場合の方がか
なり高くなっている。これは重要施設に被害が発生する
と、市中心部の方が周辺部よりも影響を受け易いことを
意味している。しかし、今回の解析では浄水場、配水場、
ポンプ場、および重要管路を重要施設とし、一つのメッ
シュ内に重要施設があるかないかの2つにしばっている。
この重要施設も重要管路においては、どのくらい重要な
管路なのか、またそのメッシュにどのくらい入っている
のかなどは考慮していない。また浄水場、配水場、ポン
プ場および重要管路はどれも同一の重要度としているが、
それぞれについて重要度は異なるので、先に述べた重要

Table 4 Partial correlation coefficient and multiple correlation
coefficient (Fuzzy quantification theory, type II)

	偏相関係数			重相関係数
	D 1	D 2	D 3	
ファジィ群を 考慮した場合	0.517	-0.206	0.610	0.757
ファジィ群を 考慮しない場合	0.443	0.149	0.257	0.926

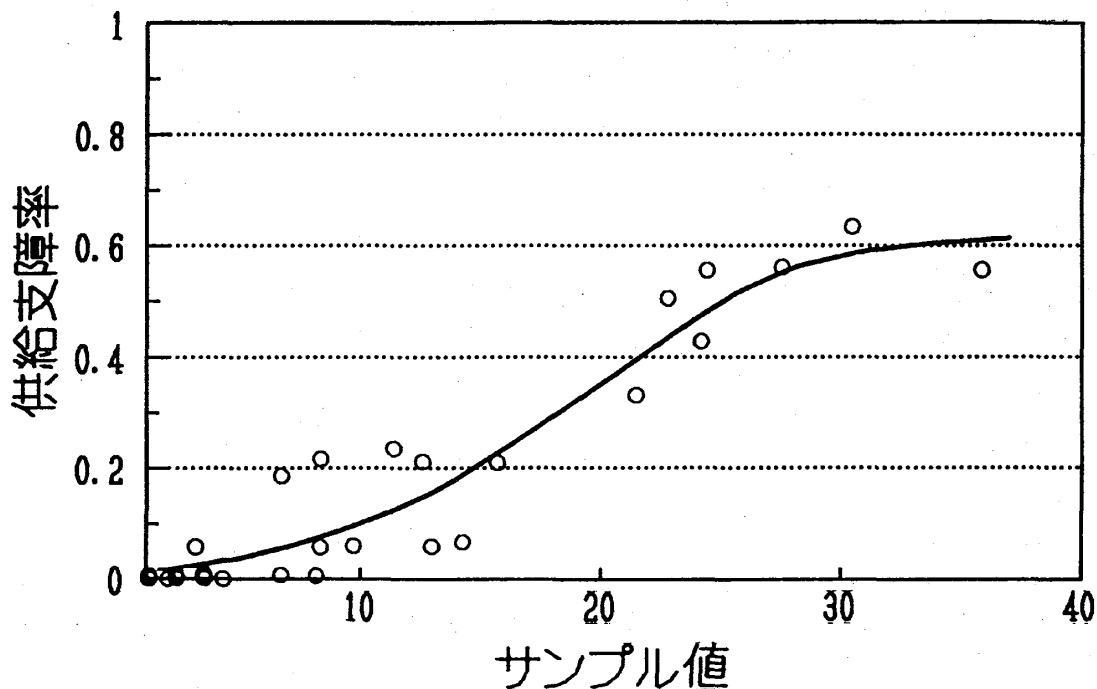


Fig. 11 Relationships between supply interruption rates and sample values determined by Fuzzy quantification theory, type II.

度評価の結果を利用すべきであろう。

重相関係数を見ると中心部を考慮した場合の方が悪くなっている。これは中心部として指定した区域を適当に決めたことが原因であろう。しかしながら、ある地域の被害と供給支障率の関係は数量化理論 I 類を用いて求められることを示している。

このように上水道の供給支障率の推定にファジィ数量化理論 I 類を用い、中心部あるいはある特定の地域の被害によって、供給支障率がどのような影響を受けるかを知ることができる。すなわち、ファジィ群を変えることにより、ある要因が供給支障率に与える影響を検討できよう。したがって、供給支障率を推定するにあたり、ファジィ数量化理論 I 類の利用価値は高いものと思われる。

4.2 ファジィ数量化理論 II 類による供給支障率の推定

先に述べたように、供給支障率を推定する場合、従来の重回帰分析による推定値では、供給支障率は $[0, 1]$ の値であるべきであるが、0.0以下の数値や1.0以上の数値が生じる場合がある。そこで、ファジィ数量化理論 II 類を用いて供給支障率を推定してみることにする。

外的基準に供給支障率および給水率を与え、各アイテムはD1、D2、およびD3として解析を行った。得られたサンプル値 Y_s の予測式を式(11)に示す。

$$Y_s = 227.352 \cdot D1 + 555.855 \cdot D2 + 92.240 \cdot D3 \quad (11)$$

偏相関係数は D1 に対しては 0.131、D2 に対しては

0.049、D3は0.053であった。D1の偏相関係数が大きくなっているが、これは供給支障率（給水率）とD1との関係が高いことを表している。

得られたサンプル値 Y_s と供給支障率 F_t の関係を Fig.11に示す。この図より、サンプル値 Y_s が20を超えると供給支障率は0.4以上になり大きな支障率を示し、 Y_s が5以下ではほとんど被害がでないことが分かる。また、式(11)と式(5)とを比較すると、物理的被害分散度D2の影響がいちばん大きく、物理的被害率D1の影響はD2の約1/2程度、重要施設被害率D3はD2の約1/4となっているなど、ほぼ同等の傾向を示している。

式(11)を用いて供給支障率の推定を行うには、アイテムD1、D2およびD3の値を式(11)に代入して得られたサンプル値 Y_s を用いて、その Y_s に対応する供給支障率を Fig.11より読みとればよい。しかしながら、Fig.11を見る限り、同定度のサンプル値 Y_s でも供給支障率はかなり異なることを示しているため、精度よく供給支障率を推定することは困難である。式(11)と式(5)が同じ傾向を示しているため、供給支障率の推定精度は重回帰分析とこのファジィ数量化理論 II 類を用いる方法には大差がないが、供給支障率が $[0, 1]$ の範囲を越えないという利点はある。

5. あとがき

本研究で取り上げた予測モデルの特徴は、管網解析等の数値計算を行わずに妥当と考えられる程度の精度で支

障率が予測できることにある。正確な予測値を求めるには管網解析などを行えばよいが、例えば、最良の復旧戦略を求めたいとか、様々な被害パターンでの被害の予測を行いたい場合、管網計算を行えば気の遠くなるような計算時間を必要とする。今回計算に用いたPC9801RAとPC9801VXでは1種類の被害パターンの管網計算に30~40分必要であった。これを時々刻々の復旧過程を管網計算で追求して行けば、例え大型計算機を用いたとしても、かなりの時間が必要である。したがって、種々な被害パターンを想定し、復旧過程を追求して行くことは不可能に近くなる。

今回の予測モデルは、その点パソコン・レベルでも簡単に時々刻々の復旧過程を追求できる。このように、精度はある程度犠牲にせざるを得ないが、視覚的にも、また数値計算の時間がかからないという点においても優れた面を持っている。このモデルを用いれば被害復旧過程が知れるだけでなく、どの箇所が壊れると被害が大きくなるか、大被害が発生したときどのような戦略で復旧作業を行って行けばよいか等を、数多く計算して(時間はあまりかからない)前もって知ることができよう。このような面から、防災計画立案あるいは被害復旧対策を立てるときに有用である。問題はいかに妥当な式(1)を導いておくかである。

式(1)を導くときに問題となる節点、管路およびメッシュの重要度について考察を行った。1節点あるいは1管路の被害による供給支障率は、かなりの精度で推定できることを示した。この結果を用いれば、全管網の各節点あるいは各管路の供給支障率を簡単に推定できる。したがって、どの節点が重要であるか、あるいは、どの管路が重要であるかを供給支障率の面から、容易に推定できることを示している。また、1つの節点被害あるいは1つの管路被害であっても、6割前後の支障率が出ること、管路の場合は管径が400mm未満の場合、節点にあつては持続管路の平均管径が250mm未満の場合には、供給支障率は無視できることを示した。また、同時に複数の節点あるいは管路が被害を受けたときの供給支障率を予測する帰式を導いた。この結果を使い、メッシュの重要度をも供給支障率の面から評価した。しかしながら、これらを応用するところまでは今回は行っていない。今回求めた節点、管路およびメッシュの重要度を考慮すれば、重回帰分析の不安定さもある程度改良されるものと期待できる。この点は今後検討したい。

供給支障率予測へのファジィ数量化理論の応用であるが、今回は利用が可能であるか否かの検討のみを行っていると言ってよい。しかしながら、数量化理論I類ではある特定の地域の影響などを考慮するとき利用可能であり、数量化理論II類では重回帰分析を利用する方法と

ほぼ同程度の結論が得られた。福山市の中心部、高台あるいは南東部の平地では当然被害形態も異なり、供給支障率に与える影響も異なることが予想される。これらの検討にファジィ数量化理論I類は利用できよう。これらの検討も今後研究を行いたい。

今回は福山市上水道管網についてのみ解析を行なった。他の都市での上水道管網においてこれらの方法があてはまるかどうかについての検討を行ない、より一般性のある予測式を求める必要があろう。また、実際の被害では、被害の程度も問題になる。今回の研究では、1つの被害はその節点あるいは管路の100%の断水を意味するが、実際の被害では、不完全ながらも使用に耐える程度の極軽微な被害から、今回仮定しているような完全なる被害(100%断水)まで色々である。復旧予測を行う場合、このような被害の程度をどのように考慮すべきか、またどのように復旧させていくべきか、つまり、適切な復旧戦略をどう設定するかについての検討も今後必要であろう。

[謝辞]

本研究の機会を与えて頂いた武蔵工業大学星谷勝教授、また管網解析プログラムならびに福山市上水道管網のデータを提供頂いた福山市水道局の丸山高司さんに感謝致します。数値計算では研究室在籍の多くの学生に協力頂いた。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) Hoshiya, M., Ohno, H. and Chiba, T. "A Practical Forecasting Model for Seismic Damage Restoration of a Water Supply System", 2-nd East Asian Conf. on Structural Engr. & Construction, Chiang Mai, Thailand, 1989.1, Vol.2, pp. 1497-1502
- 2) Hoshiya, M., Ohno, H. and Chiba, T. "A Practical Model for Forecasting Water Supply Functions at Time of the Earthquake", 5-th Int. Conf. on Structural Safety & Reliability, San Francisco, U.S.A., 1989.8, Vol.1, pp.685-692
- 3) 大野春雄、星谷勝、「実務者の経験法則を用いた震災時上水道機能の復旧予測システム」、土木学会論文集、No.422/I-14, 1990.10, pp.353-360
- 4) 岡野誠吾 「ファジィ数量化理論による上水道の供給支障率予測」 福山大学修士論文、1992.2
- 5) 請川健一 「上水道システムにおける供給支障率の簡易予測に関する研究」 福山大学修士論文、1991.2
- 6) 千葉利晃、請川健一「上水道供給支障率の簡易予測法に関する検討」、第21回地震工学研究発表会講演概

- 要、土木学会耐震工学委員会、1991.7、pp.341-344
- 7) 「配水管網運用解析システム」、システム仕様書、福山市水道局、1984.10
- 8) 「配水管網運用解析システム」、取扱説明書、福山市水道局、1984.10
- 9) 岡野誠吾、清水洋治、千葉利晃、「ファジィ理論の上水道機能支障率予測への応用」、第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、1992年5月、pp. 50-51
- 10) 和多田淳三、田中英夫、浅井喜代治、「ファジィ数量化理論II類」、行動計量学、11巻1号、1983,pp. 66-73
- 11) 和多田淳三、田中英夫、浅井喜代治、「ファジィ数量化理論I類」、行動計量学、9巻2号、1982,pp.24-32