

# 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

## AN EXPERT-BASED FORECASTING MODEL FOR WATER SUPPLY SYSTEMS ON ASEISMIC PERFORMANCE

大野春雄\*・星谷 勝\*\*

By Haruo OHNO and Masaru HOSHIYA

This study aims to construct a practical forecasting model for the seismic damage restoration of city water supply functions by using experts' empirical knowledge as well as the functional data of the characteristics of water supply networks. The model itself is so simple and tedious computational time for the complicated network interlinkage analysis can be avoided. This forecasting model has been designed for the practical use that it can not only present a solid output of information required for planning for seismic damage prevention but also be a useful training device for personnel engaged in water supply operations.

*Keywords: lifelines, water supply system, earthquake, restoration process, practical forecasting model*

### 1. はじめに

ライフラインの震災後の復旧対策や被害軽減対策などの防災計画を策定するためには、その供給機能の支障状況を予測しておくことが不可欠であり、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<sup>1),2)</sup>。機能評価を行うためのシミュレーション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。複雑な計算過程を必要とする理由は、物理的被害とその結果がもたらす供給機能低下の関係を求めるためである。これらのシミュレーションでは、多くの入力データや計算時間を必要とし、実際の現場における行政担当者や事業者にとって実用的とはいえない。そこで、ライフラインシステムの本質をゆがめずに、しかも許容される精度内で簡略なシミュレーションを実行し、計画策定等の実務に必要となる出力が得られる実用性を向上させた手法が必要となる。

本研究では、著者らによる上水道システムに関する既往の機能評価モデル<sup>3),4)</sup>における物理的被害と機能支障

の関係を求める解析過程を水道事業実務者の経験的判断に基づく経験法則に置き換え、簡略化した実用的な予測モデルの作成を目指したものである。

この場合には、当然ながらノード間の水頭差やバルブ操作などを考慮した実務者の判断が反映されるので、ネットワーク連結性解析による従来のシミュレーションよりも将来的には予測精度が向上するものと考えられる。

本研究では、上水道機能の復旧予測システムの構築の考え方と方法を提案し、本予測モデルを用いた神奈川県水道局藤沢事務所管内における事例解析の検討結果について示す。

### 2. 上水道機能の予測モデル

本予測モデルは、物理的被害の復旧過程を求める被害復旧サブモデル (Damage Restoration Model : DRM) および物理的被害から供給機能の支障率を求める供給支障サブモデル (Supply Interruption Model : SIM) により構成される。

被害復旧サブモデルは、システムダイナミクス手法を用いたモデルである。これは、管径が400 mm以上の上水道管網や浄水場、配水所などの重要施設における物理的被害が直接的な修復作業によって減少していく過程

\* 正会員 工博 攻玉社工科短期大学教授 土木工学科  
(〒141 品川区西五反田5-14-2)

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

を求めるもので、この復旧過程の予測には、復旧戦略の指標を組み込んでいる。

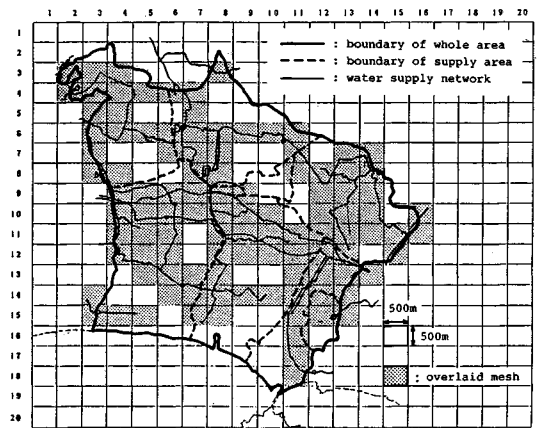
供給支障率サブモデルは、物理的被害と機能支障の関係をエキスパートの経験的判断に基づいて求めることによりネットワークの連結性等の数値解析的な方法をby-passするモデルである。具体的には、対象システムを担当する水道事業実務者に質問調査を行い、被害を与えたシステムに対して、経験的判断により機能的支障を推定してもらい、得られたデータをもとに物理的被害と機能支障の関係を回帰分析で求めるものである。

図一に予測モデルの全体構成を模式的に示す。まず、システムの初期被害分布を与える。この時刻  $t=0$  における物理的被害の件数をもとに、被害復旧サブモデルで復旧戦略を考慮しながら各時刻の物理的被害の復旧を求める。次に、得られた物理的被害を入力値として、供給支障サブモデルで各時刻の機能支障率を求める。このようにして、逐次供給機能の復旧過程が求められる。

(1) 上水道ネットワークおよび被害の表現方法

従来の研究では、システムをネットワークモデルで表現し、被害時のネットワークの連結性や管網解析により、システムの供給信頼性を評価している。用いられるネットワークモデルは、複雑なシステムをノード施設とリンク施設に分けて、重要な施設を取り上げ、単純化され表現される。ネットワークモデルを基本とした解析では、モデル化がその結果に大きく影響を与える。また、ネットワークモデルの作成に多大な労力と時間を要する。対象とする現実システムをモデル化する場合、その目的に応じてシステムのモデルをどの程度まで表現するかのレベルを検討しなければならないが、ライフラインシステムは大規模で複雑なため、非常に難しい問題である。

本研究では、国土地理院基準分割四次メッシュ (500 m



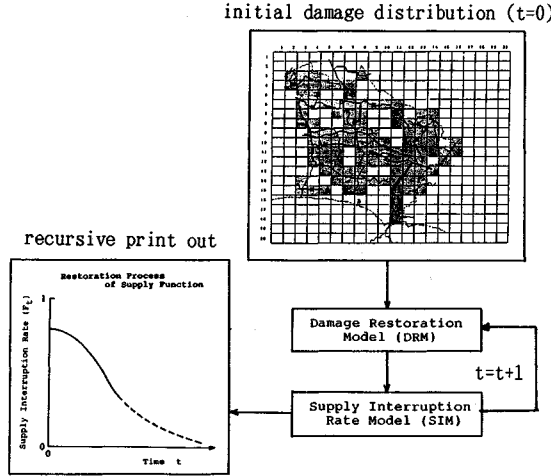
図二 藤沢事務所管内の上水道管網およびメッシュ表示モデル

×500 m) を利用し、対象とする上水道管網と各メッシュとの重なりをみて、重なるメッシュ (これをオーバーレイメッシュとよぶ) により上水道システムを表現する方法を用いた。これをネットワークモデルに代わる上水道システムのメッシュ表示モデルとした。図二に神奈川県水道局藤沢事業所管内 (藤沢市) の浄水場、配水池、ポンプ所および送配水管網の管径  $\phi 400$  mm 以上を対象としたメッシュ表示モデルを示す。

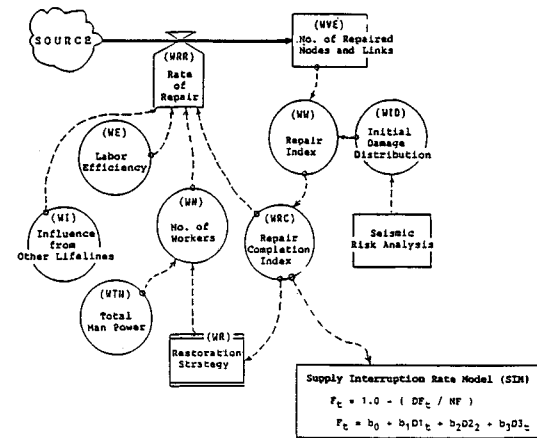
本研究における上水道システムの物理的被害は、基本的にはオーバーレイメッシュを用い、このメッシュ内の被害の有無により物理的被害の状況を表現する。また、メッシュ内の被害件数は被害復旧サブモデルで考慮される。

(2) 被害復旧サブモデル

図三に示す被害復旧サブモデルは、被害の存在するオーバーレイメッシュごとに配置され、各メッシュ内の初期被害に対する復旧件数  $WVE_i^t$  (件) を求め、物理



図一 上水道機能の予測モデルの全体構成



図三 被害復旧サブモデル (DRM) のフローダイアグラム

の被害の復旧状況を予測する。添字  $i$  は対応メッシュ番号,  $t$  は時刻である。このモデルにおける各レベル変数, レイト変数, 補助変数等を用いた状態方程式の定式化について以下に示す。なお, このモデルは既往の機能評価モデル<sup>4)</sup>の構造的復旧サブモデルをそのまま用いている。

a) 復旧作業人員:  $WN_i^t$  (人)

復旧作業人員  $WN_i^t$  は, 被害のあるオーバーレイメッシュ  $i$  に配置する復旧作業人員数である。この  $WN_i^t$  は, 対象地域全体に配置される総復旧人員  $WTN$  (人) に総復旧人員を各メッシュに配分する指標 (配分比率) である復旧戦略  $WR_i^t$  (無次元) を乗じて求める。これを式 (1) に示す。

$$WN_i^t = WR_i^t \cdot WTN \cdots \cdots (1)$$

b) 作業能力:  $WE_i$  (件/人・時)

作業能力  $WE_i$  は, 投入された復旧人員の作業能力を示す。復旧作業は 1 日 24 時間一様の能力で実施することは不可能である。また, 季節 (夏・冬・春秋) に対する変化も考えなければならない。ここでは復旧作業能力の時間や季節の変動を考慮するために, これらの変動の変動率を時間関数で任意に規定できるテーブル関数で与える (後述の表—5 参照)。作業能力  $WE_i$  はこれをもとに算出する。

c) 他システムの影響因子:  $WI_i$  (無次元)

他システムの影響因子  $WI_i$  は, 復旧作業に影響を与える他のライフラインの状態を考慮するものである。 $WI_i$  は 0.0~1.0 の値をとる。この影響で復旧が不可能となる場合は  $WI_i=0.0$ , 影響が全くない場合は  $WI_i=1.0$  となる。この  $WI_i$  はテーブル関数で与える。

d) 初期被害件数:  $WID_i^t$

初期被害件数  $WID_i^t$  は, オーバーレイメッシュ内に発生した上水道施設の初期被害件数である。これは入力データとして与えるもので, 求めるには地震危険度解析等が必要となる。

e) 復旧作業指標:  $WW_i^t$  (件)

復旧作業指標  $WW_i^t$  は, 時刻  $t$  における修復しなければならない残りの被害件数を示すものであり, 初期被害件数  $WID_i^t$  (件) とこのモデルより求まる復旧件数  $WVE_i^t$  (件) との差で与えられる。これを式 (2) に示す。

$$WW_i^t = WID_i^t - WVE_i^t \cdots \cdots (2)$$

f) 復旧完了指標:  $WRC_i^t$  (無次元)

復旧完了指標  $WRC_i^t$  は, 0 または 1 の値をとり各オーバーレイメッシュの初期被害  $WID_i^t$  に対して復旧を完了したかどうかを示す指標である。復旧作業指標  $WW_i^t \leq 0$  ならば完了したことになり  $WRC_i^t=0$  とする。また,  $WW_i^t > 0$  ならば復旧は未完了であり  $WRC_i^t=1$  とする。

この  $WRC_i^t$  は復旧戦略  $WR_i^t$  (無次元) の戦略変更の算出指標となる。また,  $WRC_i^t$  は復旧率  $WRR_i^t$  を制御する変数でもある。

g) 復旧率:  $WRR_i^t$  (件/時)

復旧率  $WRR_i^t$  は, 被害メッシュに投入できる復旧作業人員  $WN_i^t$  (人) と修復作業にかかわる作業能力  $WE_i$  (件/時・人) との積により基本的な復旧率を求める。しかし, 復旧資材の調達や復旧作業員の移動に影響を及ぼす他システムの機能 (特に道路交通システム) の考慮や被害に対する修復が完了した場合に復旧率  $WRR_i^t$  を 0 にするための制御が必要となる。そこで, 他システムの影響因子  $WI_i$  (無次元) と復旧完了指標  $WRC_i^t$  (無次元) の変数を用い, これらの積で復旧率  $WRR_i^t$  とした。これを式 (3) に示す。

$$WRR_i^t = WRC_i^t \cdot WN_i^t \cdot WE_i \cdot WI_i \cdots \cdots (3)$$

h) 復旧件数:  $WVE_i^t$  (件)

復旧件数  $WVE_i^t$  は, 復旧率  $WRR_i^t$  (件/時) の蓄積量であることから, SD 手法におけるレベル変数の変化率が, レイト変数に等しくなる基本的な関係式を用いた。これを式 (4) に示す。

$$WVE_{i,t+1} = WVE_i^t + \Delta t \cdot WRR_i^t \cdots \cdots (4)$$

i) 復旧戦略:  $WR_i^t$  (無次元)

復旧戦略  $WR_i^t$  は, 総復旧人員を各メッシュ  $i$  に配分する比率である。復旧に先立ち, ①総復旧人員  $WTN$  を各エリア  $j$  へどのように配分するかを与える配分比率  $RS_{j,0}^t$  と, ②各エリアの復旧完了時に, その復旧人員をどのエリアへ移動させるかを決定する復旧優先順位  $PRS^j$  によって具体的な復旧戦略を設定する。これらの 2 つの量  $RS_{j,0}^t$ ,  $PRS^j$  により, 重要拠点を含むエリアを優先する戦略, 需要量の大きいエリアを優先する戦略あるいは各エリアを平等に復旧する戦略などの具体的な戦略を与えることができる。

さて, 同一エリア内の被害メッシュには被害数にかかわらず, 平等に復旧作業員を割り当てるとすれば, エリア  $j$  内のメッシュ  $i$  への配分比率は式 (5) で与えられる。

$$WR_i^t = RS_i^t / NS_j^t, \text{ ただし } NS_j^t = \sum_{i=1}^{m_j} WRC_i^t \cdots \cdots (5)$$

ここで,  $m_j$  はエリア  $j$  内の総メッシュ数

式 (5) を用いれば, 式 (1) によりメッシュ  $i$  への配分される復旧人員  $WN_i^t$  が求められる。 $NS_j^t$  は時刻  $t$  におけるエリア内の被害メッシュ数であるから時間経過とともに減少し,  $WR_i^t$  は増加する。エリアの  $j$  メッシュが全て復旧を完了すると ( $NS_j^t=0$ ), そこに従事していた復旧作業員は  $PRS^j$  の順位に基づいて次に優先される順位のエリアへ移動する。これは  $RS_i^t$  の操作によって行う。たとえば, エリア 1 の復旧が完了したならば,  $RS_1^t=0$ ,  $RS_2^t=0.3+0.4=0.7$  とする (表—1 参照)。

表一 復旧戦略の計算ルール

供給エリア番号	j = 1	j = 2	.....	j = n
エリア配分比率	RS <sub>i</sub> <sup>1</sup> = 0.4	RS <sub>i</sub> <sup>2</sup> = 0.3	.....	RS <sub>i</sub> <sup>n</sup> = 0.01
エリア内被害メッシュ数	NS <sub>i</sub> <sup>1</sup> = 15	NS <sub>i</sub> <sup>2</sup> = 8	.....	NS <sub>i</sub> <sup>n</sup> = 3
エリア復旧優先順位	PRS <sub>i</sub> <sup>1</sup> = 1	PRS <sub>i</sub> <sup>2</sup> = 2	.....	PRS <sub>i</sub> <sup>n</sup> = 7

(3) 供給支障サブモデル

供給サブモデルは、物理的被害と供給支障の関係を求めるものである。物理的被害の状況は、被害復旧サブモデルの復旧完了指標  $WRC_i^t$  を用いて、物理的被害率  $D1_t$ 、物理的被害分散度  $D2_t$  および重要施設被害率  $D3_t$  により示す。供給支障の程度は、水道事業実務者に対する質問調査により、対象システムに物理的被害を与えたときの供給機能を給水量または給水戸数（水栓数）で推定してもらい求める。以下に供給支障サブモデルの供給支障率  $F_t$ 、物理的被害率  $D1_t$ 、物理的被害分散度  $D2_t$  および重要施設被害率  $D3_t$  の定式化を説明する。また、供給支障サブモデルは e) で示す。

a) 供給支障率： $F_t$

供給支障率  $F_t$  は、時刻  $t$  における上水道の機能的供給支障の程度を示すものである。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。ここで用いている平常時の水供給機能  $NF$  および被害時の供給機能  $DF_t$  は、給水量または給水戸数で求める。この供給支障率  $F_t$  は、対象地域（水道局管内）を分割する供給エリアごとに求める。

これを式 (6) に示す。

$$F_t = 1.0 - (DF_t / NF) \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

$DF_t$ ：被害時の水供給機能（給水量または給水戸数）

$NF$ ：平常時の水供給機能（給水量または給水戸数）

b) 物理的被害率： $D1_t$

上水道管網の物理的被害状況は、メッシュ表示モデルのオーバーレイメッシュ内に被害があるか否かによって示される。メッシュ内の被害の存在の有無は、被害復旧サブモデルの復旧完了指標  $WRC_i^t$  により求められる。物理的被害率  $D1_t$  は被害量の程度を示す量であり、この  $WRC_i^t$  を用いて上水道管網のオーバーレイメッシュ総数と被害の存在するメッシュ総数の比により求める。これを式 (7) に示す。

$$D1_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N WRC_i^t \dots \dots \dots (7)$$

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

$WRC_i^t$ ：被害復旧サブモデルの復旧完了指標

$i$ メッシュ内に被害がある場合： $WRC_i^t = 1$

$i$ メッシュ内に被害がない場合： $WRC_i^t = 0$

c) 物理的被害分散度： $D2_t$

上水道管網の被害の広がり度合を物理的被害分散度  $D2_t$  により示す。これ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求める。これを式 (8) に示す。

$$D2_t = \left( \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N d_{ik} \cdot WRC_i^t \cdot WRC_k^t \right) / \left( \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N d_{ik} \right) \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

$d_{ik}$ ：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  $k$  との図心間距離

d) 重要施設被害率： $D3_t$

重要施設（浄水場、配水所、ポンプ所、送水管等）の被害は、水供給機能の予測に影響を与える因子となると思われるので、これを考慮することとした。そこで、重要施設被害率  $D3_t$  は重要施設の位置するオーバーレイメッシュの総数と被害のある重要施設のメッシュ数の比で求める。これを式 (9) に示す。

$$D3_t = \left( \sum_{i=1}^N I_i \cdot WRC_i^t \right) / \left( \sum_{i=1}^N I_i \right) \dots \dots \dots (9)$$

ここで、

$i$ ：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

$I_i$ ：重要施設存在指標

$i$ メッシュ内に重要施設が存在する場合： $I_i = 1$

$i$ メッシュ内に重要施設が存在しない場合： $I_i = 0$

e) 供給支障サブモデル

水道事業実務者に対する質問調査の結果をもとに、目的変数に供給支障率  $F_t$ 、説明変数に物理的被害状況を示す  $D1_t$ 、 $D2_t$ 、 $D3_t$  として、式 (10) に示す重回帰モデ

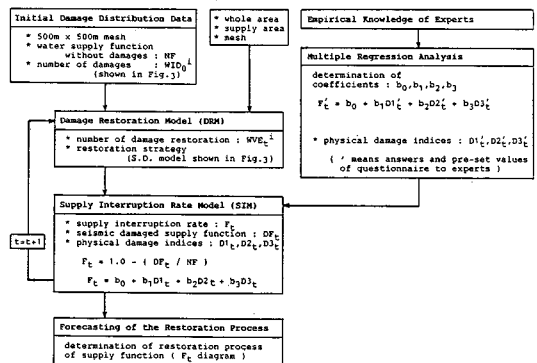


図-4 上水道機能の予測モデルの詳細予測フロー

ルを適用して供給支障サブモデルを求める。すなわち、物理的被害  $D1_t, D2_t, D3_t$  で供給機能を説明できるものと仮定する。

$$F_t = b_0 + b_1 D1_t + b_2 D2_t + b_3 D3_t, \dots \dots \dots (10)$$

以上のように、本予測モデルは上水道システムのメッシュ表示モデル、被害復旧サブモデル、供給支障率サブモデルによって構成される。詳細な予測フローを図-4に示す。

### 3. 神奈川県水道局藤沢事務所管内を対象とした事例解析

藤沢市は神奈川県下5番目の人口(33万人)を抱え、市域総面積は69.63 km<sup>2</sup>である。また、神奈川県中央南部に位置し、首都圏内の有力な衛星都市である。神奈川県水道局藤沢事務所は、藤沢市域の南半部を管内として、藤沢市の中心部分を担当している。また、藤沢事務所は、この管轄地域を8つの供給エリアに分割し管理している。

本事例解析では、実用的予測モデルの藤沢型供給支障率サブモデルの構築およびある被害を与えたときの復旧シミュレーション計算例を示す。

#### (1) 藤沢型供給支障率サブモデル

物理的被害と供給支障の関係を求めるために、神奈川県水道局藤沢事務所の水道事業実務者に対して質問調査を行った。調査実施にあたっての設定条件を下記の①~⑥に示す。

- ① 被害想定時期：夏・平日・昼間(ピーク時)  
昭和63年夏期の給水量：110 654 m<sup>3</sup>/日、  
給水戸数：83 109 戸(水栓数)
- ② 被害原因：地震(南関東地震クラス)
- ③ 被害対象施設：φ400 mm以上の送水管・配水管  
延長：約63 km  
管種：ダクタイル鋳鉄管、高級鋳鉄管、  
アーク溶接鋼管、印ろう継手鋼管  
口径：400~1 200 mm
- ④ 被害形態：被害箇所の前後のバルブは閉止操作され、その区間の供給は完全に停止するものとする。φ400 mm未満の管路被害は考慮しないで供給支障の評価をする。
- ⑤ 供給支障の評価単位：藤沢事務所管内は8つの供給エリアで構成される。評価の単位は、被害時の給水量、水栓数(戸数)を平常時に対する百分率で示す。
- ⑥ 被害パターン：被害箇所の想定は、管種・地盤・地形等の状況から基本的にはエキスパートにお願いした。被害発生件数は、1, 2, 5, 7, 10, 15, 20件として、各被害発生件数ごとに4種類の分布パターンを設定した。合計28被害パターンとした。

以上の条件は、水道実務担当者の回答作業をしやすいするための目安として設定したものである。なお、これらは他地域でのデータ収集の共通の指針となると考えられる。

被害想定時間は、夏・平日・昼間(ピーク時)として、この時期の昭和63年の給水実績を平常時の水供給機能  $NF$  の値とした。これを表-2に示す。

質問調査の結果、得られたデータは28被害パターンの28サンプルである。物理的被害状況を示す  $D1, D2, D3$  および供給支障率  $F$  を表-3に示す。なお、本計算では供給支障率  $F$  の算出には給水量(m<sup>3</sup>/日)の  $DF, NF$  を用いた。この結果をもとに、重回帰分析により式(10)に示す  $b_0, b_1, b_2, b_3$  のパラメーター推定を行い、藤沢型供給支障サブモデルを求める。これを式(11)に示す。重相関係数は  $R=0.969$  である。

$$F_t = -0.020 + 4.263 D1_t + 7.370 D2_t - 1.860 D3_t, \dots \dots \dots (11)$$

式(11)では重要施設被害率  $D3_t$  に掛かるパラメーターが負になっている。これは重要施設被害に送水管被害を含めていることが考えられる。すなわち、送水管には供給エリアを通過するだけで、そのエリアの供給機能に関係しない場合もあるため、供給支障率と重要施設被害率の関係が理論どおり(符号は正)に示されなかったと思われる。この点の対処として、今回は供給支障サブモデルの説明変数に重要施設被害率  $D3_t$  を含めないモデルも求めた。これを式(12)に示す。重相関係数は  $R=0.958$  である。

表-2 被害想定時期における平常時の水供給機能：NF

供給エリア	供給エリア I	供給エリア II	供給エリア III	供給エリア IV	供給エリア V	供給エリア VI	供給エリア VII	供給エリア VIII	全エリア
給水量(m <sup>3</sup> /日)	9,190	13,541	25,260	30,340	2,419	16,960	9,787	2,100	110,654
水栓数(戸)	7,867	10,455	20,902	21,782	2,174	12,312	6,194	1,422	83,109

表-3 藤沢型供給支障サブモデル構築に用いたデータ(質問調査結果)

被害パターン No.	被害件数	被害戸数	供給支障率 F	物理的被害率 D1	被害分位数 D2	重要施設被害率 D3
1	1	1	0.022	0.0034	0.0000	0.0000
2	1	1	0.037	0.0034	0.0000	0.0000
3	1	1	0.000	0.0034	0.0000	0.0000
4	1	1	0.037	0.0034	0.0000	0.0000
5	2	2	0.059	0.0187	0.0001	0.0000
6	2	2	0.037	0.0187	0.0002	0.0000
7	2	2	0.285	0.0187	0.0028	0.0208
8	2	2	0.033	0.0187	0.0001	0.0000
9	5	4	0.071	0.0374	0.0003	0.0417
10	5	5	0.133	0.0487	0.0013	0.0208
11	5	5	0.155	0.0487	0.0012	0.0285
12	5	5	0.200	0.0487	0.0015	0.0000
13	7	6	0.144	0.0581	0.0022	0.0208
14	7	6	0.107	0.0581	0.0020	0.0625
15	7	7	0.211	0.0654	0.0033	0.0208
16	7	7	0.285	0.0654	0.0028	0.0417
17	10	7	0.144	0.0654	0.0029	0.0417
18	10	9	0.248	0.0841	0.0057	0.0825
19	10	10	0.286	0.0935	0.0081	0.0417
20	10	10	0.211	0.0935	0.0080	0.0417
21	15	12	0.285	0.1122	0.0089	0.1042
22	15	12	0.386	0.1122	0.0089	0.0417
23	15	13	0.426	0.1215	0.0111	0.0833
24	15	12	0.586	0.1122	0.0102	0.0417
25	20	16	0.379	0.1495	0.0188	0.0333
26	20	13	0.379	0.1215	0.0108	0.1250
27	20	18	0.598	0.1882	0.0260	0.1042
28	20	17	0.810	0.1589	0.0215	0.0833

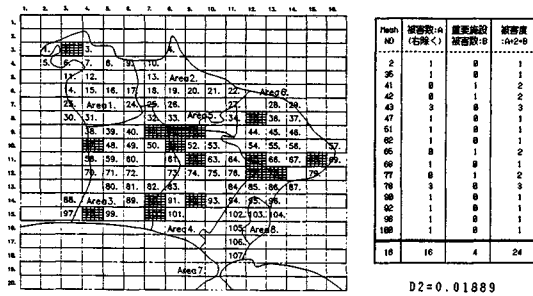
$$F_t = -0.009 + 2.891 D1_t + 8.732 D2_t \dots \dots \dots (12)$$

(2) 復旧予測システムの敏感度解析

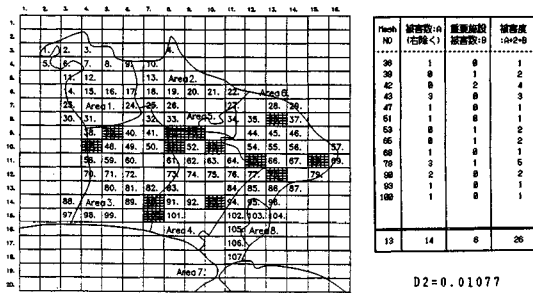
ここでは、本予測モデルに対する数種の初期入力データを用意し、復旧予測のシミュレーション計算により本モデルの敏感度解析を行う。

a) 初期被害分布データ

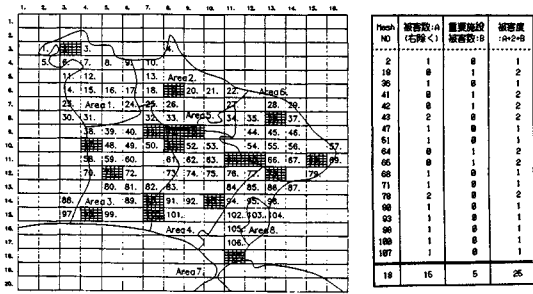
初期被害分布データは図-5(a)~(c)に示す3つのケースを用意した。これらは供給障害サブモデルの物理的被害分散度  $D2$  (式(8))の値を考慮して被害均等型  $D2=0.01889$  (DAMAGE1)、被害集中型  $D2=0.01077$  (DAMAGE2)、被害分散型  $D2=0.02599$  (DAMAGE3)とした初期被害分布データである。図中のメッシュに番号が入っているものが水道管網のオーバーレイメッシュであり、網掛けされているメッシュが被害メッシュであ



(a) DAMAGE1



(b) DAMAGE2



(c) DAMAGE3

図-5 初期被害分布データ

る。なお、ここでは1ケースとして重要施設被害は一般施設被害の2倍の重みで換算し各メッシュ内の被害度(被害件数)とした。図中には供給エリア分割 (Area 1.~Area 8.)も示している。

b) 復旧戦略データ

復旧戦略データは供給エリアに対する復旧人員の配分比率  $RS$  と復旧優先順位  $PRS$  がある。表-4に示すデータを用いる。 $RS$ は供給エリア内の人口を指標としてそれに比例するように求めている。復旧優先順位は供給エリア別の優先指標として、重要施設の多い供給エリア ( $RS1$ )、人口の多い供給エリア ( $RS2$ )、被害件数の多い供給エリア ( $RS3$ )、被害件数の少ない供給エリア ( $RS4$ )、配水系統で上流側の供給エリア ( $RS5$ )のそれぞれの順位に従って5種類用意した。

c) 復旧作業能力データ

復旧作業能力 ( $WE$ ) データは1人の作業員が1時間に被害箇所を修復できる能力であり、ここでは復旧作業員の1日24時間の能力の分布を与えるものである。このデータを表-5に3種類示す。これらの作業能力は基本的には昼間を高くし、夜間を低くして  $WE1$  を設定し、 $WE1$  よりも時間変動の大きいものを  $WE2$ 、 $WE1$  よりも小さいものを  $WE3$  とした。なお、数値は過去の地震被害事例をもとに逆算して求めた。

d) 他システムの影響因子データ

他システムの影響因子は、主として道路交通システムの被害が復旧作業に影響することを想定している。ここでは、表-6に示す1種類のデータを用いた。

表-4 復旧戦略データ (復旧優先順位, 配分比率)

PR.S' 復旧優先順位	RS... <sup>6)</sup> 配分比率				
	復旧優先順位 エリアNO.	重要施設 RS1	人口多 (水栓数) RS2	被害大 RS3	被害小 RS4
1	4	4	4	8	3
2	7	3	3	5	4
3	3	6	6	2	1
4	1	2	7	1	2
5	2	7	1	7	6
6	6	1	2	6	7
7	8	5	5	3	8
8	5	8	8	4	5

表-5 復旧作業能力データ (WE1~WE3)

復旧作業能力 (件/人時) : WE1													
時 期	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
作業能力	0.0200	0.0200	0.0300	0.0200	0.0300	0.0300	0.0400	0.0400	0.0500	0.0400	0.0300	0.0200	0.0200
時 期	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
作業能力	0.02	0.0200	0.0300	0.0500	0.0400	0.0300	0.0200	0.0300	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	
復旧作業能力 (件/人時) : WE2													
時 期	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
作業能力	0.0057	0.0057	0.0325	0.0057	0.0325	0.0325	0.0559	0.0559	0.0743	0.0559	0.0325	0.0057	0.0057
時 期	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
作業能力	0.0057	0.0057	0.0325	0.0743	0.0559	0.0559	0.0325	0.0057	0.0325	0.0057	0.0057	0.0057	
復旧作業能力 (件/人時) : WE3													
時 期	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
作業能力	0.0283	0.0283	0.0292	0.0283	0.0292	0.0292	0.0303	0.0303	0.0320	0.0320	0.0290	0.0283	0.0283
時 期	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
作業能力	0.0283	0.0283	0.0292	0.0320	0.0303	0.0303	0.0292	0.0283	0.0292	0.0283	0.0283	0.0283	

表-6 他システムの影響因子データ

時刻 $t$ (地震発生時: $t=0$ )	0~23	24~35	36~
他システムの影響 $WI_i$	0.90	0.95	1.00

e) 復旧予測のシミュレーション計算

ここでのシミュレーション計算には、式(12)に示した供給支障サブモデルを用い、a)~d)の初期入力データにより復旧過程の計算を行った。図-6(a)~(d)に各ケースのシミュレーション結果を示す。縦軸に供給支障率  $F_i$  (各エリアの供給支障率をもとに、それぞれの給水量を重みとした加重平均により全体の供給支障率を求めている)、横軸に時刻  $t$  をとり復旧曲線を示す。復旧曲線の線種の違い(実線, 破線および一点鎖線)は、シミュレーションケース設定の違いを示し、図の下側に対応する初期データ種(DAMAGE, WE, RS, WTN)を示している。また、WRCTは各シミュレーションにおける復旧完了時刻である。ここでは、次のf)項で敏感度解析を行うことから(a)図に復旧戦略(RS)、(b)図に復旧作業能力(WE)、(c)図に総復旧作業人員(WTN)および(d)図に初期被害分布(DAMAGE)のそれぞれの要因が復旧過程に与える影響が求められるように示した。

f) 本復旧予測システムの敏感度解析結果

図-6(a)では、復旧戦略の差による影響がみられる。重要施設が設置されている供給エリアを優先する復旧方針を取っているもの(RS1)が実線の復旧曲線であり、被害の多い供給エリアを優先しているもの(RS3)が破線の復旧曲線である。また、逆に被害の少ない供給エリアから復旧しているもの(RS4)が一点鎖線の復旧曲線

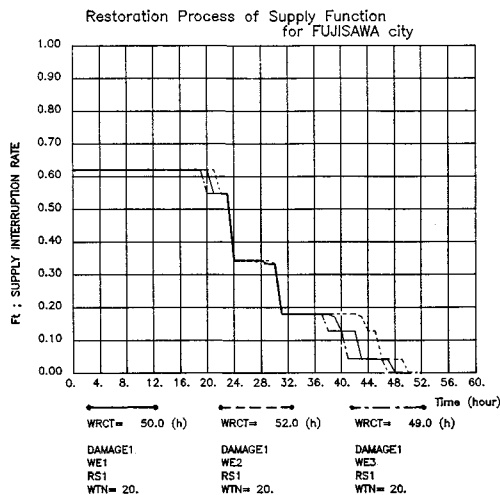


図-6(b) 復旧作業能力(WE)要因の影響

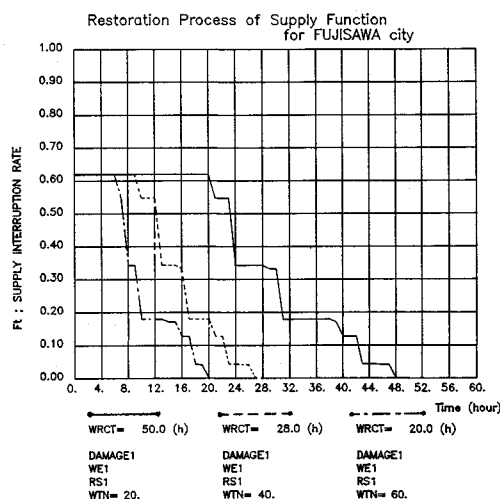


図-6(c) 総復旧人員(WTN)要因の影響

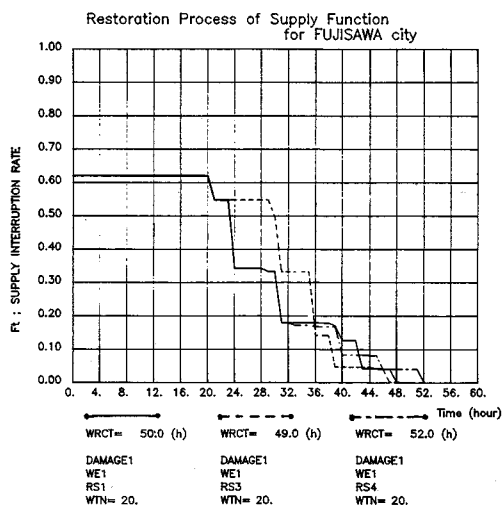


図-6(a) 復旧戦略(RS)要因の影響

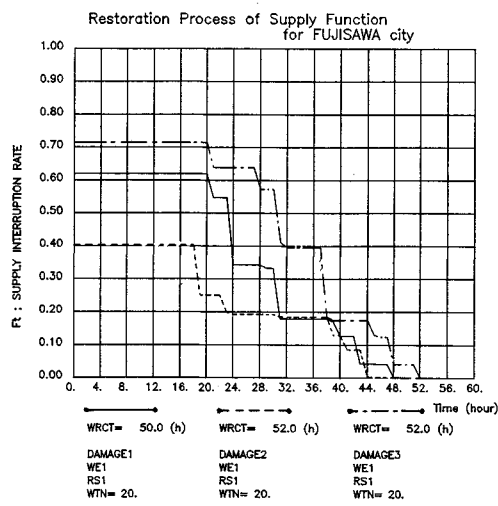


図-6(d) 初期被害分布(DAMAGE)要因の影響

である。RS1の戦略とRS4の戦略ではそれらの復旧過程に大差はないが、RS1とRS3では23時間後から36時間後までの状況には大きな差がある。早期に供給機能を復旧させるといった目的においては、RS1の戦略が有効であることがいえる。

図-6(b)では、復旧作業能力(WE1~WE3)の差による影響がみられる。ここで用いたデータは復旧能力の時間変動パターンを変えている程度であるため、その差は復旧過程に影響を与えていない。復旧作業能力の定式化よりその数値を大きくすれば復旧完了時刻は早くなることはいえる。

図-6(c)では、総復旧作業人員(WTN)の差による影響がみられる。WTN=20人が実線の復旧曲線、WTN=40人が破線の復旧曲線であり、一点鎖線の復旧曲線はWTN=60人である。復旧作業人員を増加させれば復旧完了時刻は早くなることはいえるが、システムが非線形系であるから復旧完了時間と復旧作業人員とは比例していない。

図-6(d)では、初期被害分布(DAMAGE1~DAMAGE3)の差による影響がみられる。初期被害分布の違いは復旧戦略により算出される各供給エリアの配分復旧人員に大きく影響するため、それらの復旧過程における単独の影響をみるには難しいが、被害分散型(DAMAGE3:一点鎖線)の初期供給支障率が高く、被害集中型(DAMAGE2:破線)の初期供給支障率は低いことがいえる。

なお、管網解析などを含む従来の評価モデルの出力結果や予備試算結果などを参照して、本復旧予測システムの敏感度解析の結果は余り差がないことを確認しているが、現段階では精度の問題に対する詳細な解析は行っていない。また、モデルの使用時には復旧戦略の配分比率や復旧優先順位は初期被害分布の状況に応じて柔軟に決定し、復旧過程を予測することが最も重要といえる。

#### 4. 今後の展開

本研究は実務者の経験法則を用いた簡略化モデルの構

築とその計算例を示した。このようなモデルは、詳細化した複雑なモデルと逆行する立場にあるが、大規模でかつ複雑なシステムの予測には、適しているのではないかと考える。

現在、広島県福山市水道局および神奈川県水道局茅ヶ崎事務所の事例解析を実施中である。本復旧予測モデルの詳細な敏感度解析により、両市の水道システムの耐震性に対し具体的な提案を導出した。さらに、将来は多くの上水道システムに拡張し、システムのタイプごとの汎用性のある復旧予測システムを構築していきたい。

最後に、本研究は理論の構築を星谷と大野が共同で行い、数値解析は大野が行っている。また、研究の討論に参加していただいた福山大学 千葉利晃助教授ならびに本計算を手伝っていただいた武蔵工業大学応用力学研究室の学生に感謝いたします。質問調査において多大な協力をしていただいた神奈川県企業庁水道局藤沢事務所飯岡副技幹に深謝いたします。なお、本研究は文部省科学研究費重点領域研究(1)<sup>5)</sup>(研究代表者 佐武正雄)の研究助成金によるものである。

#### 参考文献

- 1) 研究代表者 志賀敏男：大地震時における都市生活機能の被害予測とその保全システムに関する研究，文部省自然災害特別研究(1)502004，昭和59年3月。
- 2) 研究代表者 山田善一：地震時におけるライフライン系を含む都市機能の防災と復旧過程に関する研究，文部省自然災害特別研究No.58022021，昭和62年3月。
- 3) 星谷 勝・大野春雄：震災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，昭和62年10月。
- 4) 大野春雄：博士論文，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，昭和63年3月。
- 5) 研究代表者 佐武正雄：都市供給施設における震害の防止・軽減並びに復旧対策に関する研究(第2年度)，文部省科研費重点領域研究(1)，平成元年3月。

(1990.2.28・受付)