

# 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

## INTER-CHAIN EFFECT OF LIFELINES ON THEIR ASEISMIC PERFORMANCE

星谷 勝\*・大野春雄\*\*

By Masaru HOSHIYA and Haruo OHNO

In order to investigate disaster restoration and system performance recovery of lifelines, a model is required which can forecast quantitatively time sequential changes in the restoration process. For this purpose, a functional evaluation model which treats the mechanism of disaster's influence, was described, and then a quantitative and realistic functional evaluation model which takes into consideration inter-chain between lifelines was derived. Utilizing a method of system dynamics (S. D.), the whole functional evaluation of electric power and water supply systems which play the most important role in lifeline systems was investigated.

*Keywords* : lifelines, earthquake, interaction, restoration process, system dynamics

### 1. ま え が き

ライフライン地震防災の課題に対して、現在までに多くの研究がなされてきている。既往研究についてまとめると、大きくは、①施設の物的被害予測、②建造物の地震時の挙動、③被害復旧予測および機能評価、④震災対策（事業対策、応急対策）の4つに分類できる。特に①、②は建造物の構造上の耐震性向上を追求するものである。また③、④は供給機能の維持、早期回復のための応急復旧対策、システムの形態面からみた被害軽減対策に指針を与えるものである。③の復旧予測、機能評価に関する研究においては、システムが複雑であるため現象を的確に表現できるモデルが望まれている。今までに、上水道システムや道路交通システムを対象とした研究が多く<sup>1)~5)</sup>、個々のシステムを独立した供給システムとしてとらえ、他システムとの相互影響を考慮していないものが、その大部分を占めている。これらの研究テーマは、事業主体（電力会社、水道局、ガス会社等）の復旧計画の策定に際し基本的情報となるもので、今後の地震防災

計画の分野に大きく貢献すると思われる。

本研究は、実際の地震防災計画（特に復旧計画、被害軽減対策等）における有効な計画指標の導出を目標に、機能評価シミュレーションモデルの構築を試みた<sup>6),7)</sup>。

ここでは、本研究で示す復旧予測・機能評価の理念に基づいたこの機能評価モデルの定式化について詳述し、より現実的なライフライン機能の評価法の提案を行う。

本機能評価モデルの特徴の1つは、過去に著者らが求めたライフライン機能の定性的な相互連鎖モデル<sup>8)</sup>を基礎として、ライフライン間の被害影響波及の関係をモデル内に反映させたことが挙げられる。

機能評価モデルの対象ライフラインシステムは、2つのシステムである。1つは、供給物の代替性がなく、生命の維持にかかわる上水道システムを取り上げ、もう1つは、供給過程における他システムへの影響度合の高さより電力システムを取り上げた。ここでは、これらのシステムの復旧過程におけるシステム間の相互影響の考慮、ネットワークの連結性、復旧戦略等をこのモデルに組み込み、より実際の供給機能の評価を行うこととした。

さて、この供給機能の評価を行うための基本モデルの構築には、社会システムの分野で利用されているシステムダイナミックス (System Dynamics) 手法<sup>9),10)</sup>を用い

\* 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)

\*\* 正会員 攻玉社短期大学教授 土木工学科 (前・産業能率大学) (〒141 品川区西五反田5-14-2)

た。このSD手法は、現実のシステムに複雑に影響する非線形関係の諸要因をわりあい自由に取り扱うことができるため、諸要因の因果関係が決定されれば、モデル構築の構築は柔軟に行える。SD手法を用いたこの種の研究として和泉らの研究<sup>4)</sup>が挙げられる。

地震時におけるライフライン機能評価に関する研究の方向は、“予測”から“制御”の分野を追求する時期にきている。ここでいう“制御”とは、今までの研究成果の現実場面へのフィードバックである。これは、前述した地震防災計画の構築に際して、事業主体の専門家らに有効な計画指標を与えることである。このことから、復旧予測や機能評価の方法は、現実的であり、かつ実用的な方向へのアプローチが必要となってきた。事業主体の専門家にとって、復旧予測モデルや機能評価モデルをどのように利用できれば復旧計画の策定、復旧対策やシステムの被害軽減対策などの効果的な支援ツールになり得るであろうかという点を考慮して本研究を進めた。

## 2. 復旧予測・機能評価の理念

事業主体者等の復旧計画に対して有効な指針を導出するための、現実的かつ実用的な復旧予測・機能評価の方法に関する基本的な考え方について考察する。

以下に、復旧予測・機能評価の理念としての必須検討項目を挙げる。

### ① ネットワークの連結性とシステムの冗長性

実際の復旧作業でも示されるように、ライフラインシステムの特徴はネットワーク化している供給経路にある。被害箇所を復旧する場合、他の施設（住宅施設、商工業施設等）の被害とは異なり、経路上に発生した1つの被害箇所を復旧しても、他に被害が存在すればそのシステムの供給機能は回復しない。また、需要側に複数の経路が存在する場合、1つの経路が健全であれば致命的な機能支障とはならない。

### ② システム間の相互影響

ライフラインシステムである電力、上水道、ガス等の供給機能をもったシステムに着目してみると、そのシステム間には相互影響が存在する。宮城県沖地震による被害で実証されたように、供給機能の低下が連鎖的に波及した。たとえば、停電による浄水場やポンプ所等のポンプ機能の停止、断水による火力発電所の冷却水の不足、またガス供給機能の停止による電力需要の増大などが挙げられる。このように、おのおののライフラインシステムは互いに影響されながら機能している。当然ながら、震後の復旧過程においてもこの影響は存在する。

### ③ 復旧戦略

修復作業は有限である復旧人員や復旧資材を投入して行われる。ライフライン被害の復旧は、住民生活の維持

と経済活動への影響などの面より短期間で完全復旧することが重要である。最適、最良な復旧を実施するためには、被害箇所に対して、どのような場所から重点的に復旧を実施するかというような復旧人員の配備計画や復旧資材の確保などの戦略を事前に策定する必要がある。この復旧戦略は、システムの特徴、想定地震の規模、被害分布予測や復旧過程の予測の分析結果を情報として策定される。また、復旧戦略には人員の配備計画等のように事前に立てることが容易なもの（復旧戦略Ⅰ）と応急に行うバルブ開閉による配水調整や系統切替による系統制御などのシステムの特徴と機能支障の状況の判断から生ずるもの（復旧戦略Ⅱ）がある。

### ④ 実用的な入出力情報

事業主体の専門家が考える復旧予測・機能評価法のある方としては、その入出力情報が復旧計画や被害軽減対策等の策定に対して、効果的に利用できることが必要である。今までのこの種の研究の予測モデルの多くは、入力情報としてある初期条件を与え、各計算ケースでの復旧過程の傾向（復旧曲線）等を求める領域であり、一般的な予測法の範ちゆうを越えていない。計画策定の側面から、専門家が必要とする実用的な入出力情報について考えてみると、その出力情報が復旧にかかる所要日数に関することよりも、たとえば“地震後何日以内で復旧させるためには？”という入力情報に対し、出力情報すなわち回答が“そのための復旧戦略はこれである”というようなものが非常に便利である。これは、予測シミュレーションモデルというよりも復旧戦略エキスパートシステムという形態をなすことになる。現在では、人口知能技術の応用により、このシステムの構築の可能性は高く、対応しなければならぬ時期にきていると思われる。

以上のように、現実的な復旧予測・機能評価を行うためには、①ネットワークの連結性とシステムの冗長性、②システム間の相互影響、③復旧戦略（戦略Ⅰ、戦略Ⅱ）の3項目は必須検討項目である。また実用面では、④の実用的な入出力情報の検討が必要であると考えられる。

## 3. 機能評価モデルの基本構造

この機能評価モデルは、前述の復旧予測・機能評価の理念を考慮してモデルの構築を行った。このモデルは、構造的復旧モデル（Structural Restoration Model：SRM）と機能的復旧モデル（Functional Restoration Model：FRM）のサブモデルで構築されている。

構造的復旧とは、発電所、変電所、浄水場、配水所などの製造または供給施設（ノード）と送配電線、送配水管などの供給経路（リンク）における構造物の物理的被害件数が、直接的な修復作業によって被害件数を減少させることを意味する。

機能的復旧とは、供給機能の低下や停止に着目したもので、構造物が直接被害を受けた結果として機能が低下すること（構造的復旧の影響）、他システムの供給機能の低下がこのシステムの機能に影響を及ぼすこと（システム間の相互影響）や供給経路の連結性が失われることによる供給停止などの要因を反映し、これらの影響による機能支障の回復を意味する。この機能的復旧は、具体的には停電率、断水率を用いて表わすことができる。

Fig. 1 に示す機能評価モデルの基本構造について説明する。SRM は、個々の被害箇所が復旧する状況を示す構造的復旧過程を求めるモデルである（後述 4. の議論では個々のメッシュ内の被害件数に対して、それが減少する状況にあてはめた）。SRM には作業人員の配備計画（復旧戦略Ⅰ）が作用する。復旧作業にかかわる人員の配備を示すこの戦略は、復旧作業の完了に合わせて変更するため、SRM との間にフィードバックループが形成されている。

次に示すネットワークの連結性のルーチンは、供給路上にあるすべての被害箇所に対する修復が完了しなくては供給ができないというライフライン特有の供給経路の確保の問題に対処している。また、系統復旧の指標となる復旧戦略Ⅱをこの部分に組み込んでいる。

次に、機能的復旧過程を求めるモデル（FRM）について述べる。FRM は、エネルギーソースにかかわるモデルとして FRM 1 と、それをエリアに分配するモデルとして FRM 2 の 2 つに分けた（詳細は後述）。具体的には、電力システムでは発電所から配電施設までを EFRM 1（頭文字 E は Electric System の E）で対応させて、配電施設から需要家までの下位供給経路の機能の復旧を EFRM 2 に分担させた。上水道システムでは浄水場から配水施設までの上位供給経路の機能の復旧を WFRM 1（頭文字 W は Water System の W）で、配水施設から需要家までを WFRM 2 に分担させた。この FRM によりシステム間の相互影響を考慮した各システムの定量的な供給量を求めることができる。すなわち、機能的復旧を供給量の回復で表わすことにした。

このように、本機能評価モデルは復旧戦略、ネットワー

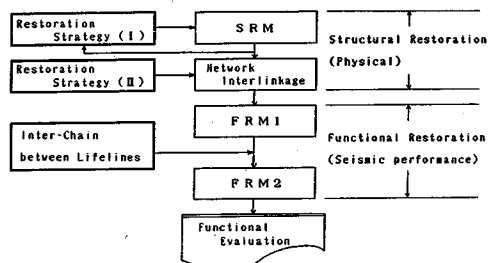


Fig. 1 The Basic Structure of Functional Evaluation Model.

クの連結性、システム間の相互影響をモデル内に一括して組み込み、震後の復旧過程における機能評価を可能にしている。そして、各システムの機能評価の基本指標は FRM 2 の出力値（レベル変数）を用いる。

#### 4. 評価対象地域の定義と各モデルの配置

機能評価モデルにおける SRM, FRM 1, FRM 2 のサブモデルは評価対象地域に面的に広がる。すなわち、これらのサブモデルがそれぞれメッシュ、対象地域、供給エリアの各部分に配置されるため、対象地域内の各システムの構造上の特性に対して柔軟に適応が可能である。ここでは、メッシュ、対象地域、供給エリアの定義とサブモデルの配置方法について示す。

Fig. 2 に模式的なサブモデルの配置状況を示す。対象地域は中小都市域を前提としている。たとえば、宮城県沖地震の事例では対象地域に仙台市域等が挙げられる。この対象地域には、各システム特有の供給エリアが形成されている。仙台市水道局の場合では、茂庭配水系統、国見系統、荒巻系統等の 6 供給エリアで構成され、東北電力仙台営業所では配電用変電所単位で供給エリアが形成される。このように、供給エリアは供給系統の管轄区域をその範囲とする。Fig. 2 の下に示す対象地域を方眼に切ったメッシュは、500 m×500 m の国土地理院基準分割四次メッシュを用いる。理由としては、供給機能の評価に必要なデータである国勢調査の人口、世帯数や事業所統計における事業所数、従業員数等がデジタルメッシュ統計として集計されているため利用が容易であること、被害分布予測に用いる地盤図等もこのメッシュ分割を用いている等である。

モデル配置方法について示す。FRM 1 は供給源（発電所、一次変電所、浄水場等）に関するモデルであるため、対象地域全体の供給ソースに対して配置される。電力システムでは発電所あるいは一次変電所ごとに配置する。もし、対象地域内に発電系統が存在しない場合は、送電ソース側に配置する。上水道システムでは浄水場ごとに配置する。FRM 2 は各供給エリアに配置する。これは供給機能を供給エリア単位で評価するためである。構造的復旧を示す SRM は、各メッシュ内の被害に対する復旧過程を求めるため、すべてのメッシュに配置する。

#### 5. 機能評価モデル

機能評価モデルは、想定地震、被害分布予測の結果を受けて復旧過程におけるライフライン機能の評価シミュレーションを行うものである。以下にシステムダイナミックス手法におけるフローダイアグラムによりこのモデルを示し、レベル変数、レイト変数、補助変数などを用いた状態方程式への定式化について説明する。

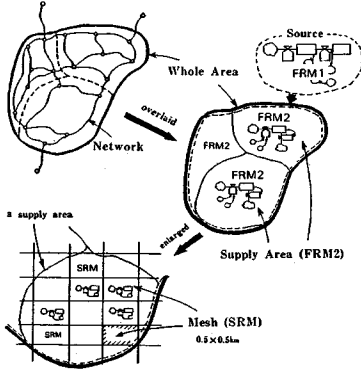


Fig. 2 Mesh (SRM), Supply Area (FRM 2), Whole Area (FRM 1), and Network.

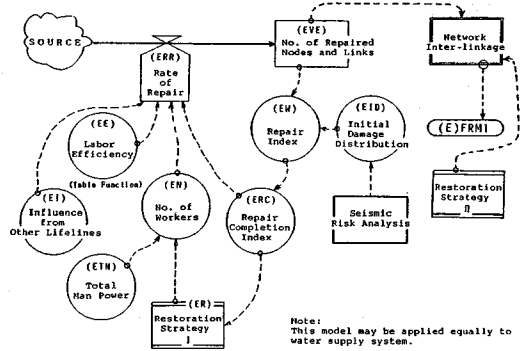


Fig. 3 Structural Restoration Model "(E)SRM" in Mesh (Electric Power Supply System).

(1) 構造的復旧モデル (SRM)

ここでは、電力システムの ESRM について記述する。上水道システムの WSRM は変数名の頭文字を E から W に変えることにより同一のモデルとした。たとえば、電力システムの復旧件数 EVE は上水道では WVE となる。ESRM のフローダイアグラムを Fig. 3 に示す。

この SRM はメッシュ内における被害件数の構造的復旧過程を求めるもので、その評価指標となる変数は復旧件数  $EVE_i^t$  (件) である。添字  $i$  は対応メッシュ番号、 $t$  は時刻である。

・復旧作業員： $EN_i^t$  (人) は被害のあるメッシュ  $i$  に配置する復旧作業員数である。この  $EN_i^t$  は対象地域全体に配置される総復旧人員  $ETN$  (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  $ER_i^t$  (無次元) を乗じて求まる。これを式 (1) に示す。 $ER_i^t$  に関しては (2) で詳述する。

$$EN_i^t = ER_i^t \cdot ETN \dots \dots \dots (1)$$

・作業能力： $EE_t$  (件/人・時) は投入された復旧人員の作業能力を示す。この復旧作業能力は 1 日 24 時間一様の能力で作業を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。これらの作業能力の時間、季節の変動を考慮するため、こ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、これをもとに  $EE_t$  を算出する。

・他のシステムの影響因子： $EL_t$  (無次元) は復旧作業に影響する要因である道路交通システムの影響を考慮するものである。 $EL_t$  は 0~1.0 の値をとる。この影響で復旧が不可能となる場合  $EL_t = 0.0$ 、影響が全くない場合  $EL_t = 1.0$  となる。この  $EL_t$  はテーブル関数で与える。

・初期被害件数： $EID_i^t$  は各メッシュの被害件数を示す初期被害分布テーブルより導出する。このテーブルは被害分布予測モデルによる解析結果に基づいて与えられるものである。なお、本研究では既存の地震危険度解析結

果のものを用いることとした。

・復旧作業指標： $EW_i^t$  (件) は時刻  $t$  における修復しなければならぬ残りの被害件数を示すものであり、それ故、初期被害件数  $EID_i^t$  (件) とこのモデルより求まる復旧件数  $EVE_i^t$  (件) との差で与えられる。これを式 (2) に示す。

$$EW_i^t = EID_i^t - EVE_i^t \dots \dots \dots (2)$$

・復旧完了指標： $ERC_i^t$  (無次元) は 0 または 1 の値をとり各メッシュの初期被害  $EID_i^t$  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  $EW_i^t \leq 0$  ならば完了したことになり  $ERC_i^t = 0$  とする。また、 $EW_i^t > 1$  ならば復旧は未完了であり  $ERC_i^t = 1$  とする。この  $ERC_i^t$  は復旧戦略 (I)  $ER_i^t$  (無次元) の戦略変更の算出指標となる。また、 $ERC_i^t$  は復旧率  $ERR_i^t$  を制御する変数でもある。

・復旧率： $ERR_i^t$  (件/時) は被害メッシュに投入できる復旧作業員  $EN_i^t$  (人) と修復作業にかかわる作業能力  $EE_t$  (件/時・人) との積により基本的な復旧率は求まる。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の復旧率  $ERR_i^t$  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  $EL_t$  (無次元) と復旧完了指標  $ERC_i^t$  (無次元) の変数を用い、これらの積をとり復旧率  $ERR_i^t$  を求める。これを式 (3) に示す。

$$ERR_i^t = ERC_i^t \cdot EN_i^t \cdot EE_t \cdot EL_t \dots \dots \dots (3)$$

・復旧件数： $EVE_i^t$  (件) は復旧率  $ERR_i^t$  (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。

$$EVE_{i,t+1} = EVE_i^t + \Delta t \cdot ERR_i^t \dots \dots \dots (4)$$

(2) 復旧戦略 I の求め方

この復旧戦略と、これをモデルに反映させる方法を Fig. 4 の例題を用いて説明する。変数名は電力システム

のものを用いる。復旧戦略  $ER_i^j$  (無次元) は総復旧人員のメッシュ  $i$  に対する配分比率である。復旧戦略  $I$  は復旧状況に応じて配分比率を変更することを戦略とする。この変更は、メッシュ内の被害の復旧終了時と供給エリア内のすべてのメッシュの復旧完了時に適用される。この戦略  $ER_i^j$  の入力変数は、Fig. 4 [c] に示すように供給エリアごとに与えられる  $RS^j$  ( $j$  は供給エリア番号) が基準値となり、これをベースとしてメッシュごとの復旧人員の配分比率を求める。この  $RS^j$  は  $\sum_{i=1}^n RS_i^j = 1.0$  ( $n$  は供給エリア数) となるように定めるのでエリアへの配分比率を意味する。この  $RS^j$  を用いて供給エリア内の各メッシュの復旧人員の配分比率すなわち復旧戦略  $ER_i^j$  を求める。これを式 (5) に示す。ここに、 $NS_i^j$  は供給エリア  $j$  内の復旧する必要があるメッシュ数 (被害のある  $ERC_i^j=1.0$  のメッシュの総メッシュ数) である。なお、式 (5) は復旧戦略指標である  $RS^j$  と  $NS_i^j$  より  $j$  供給エリア内に属する  $i$  メッシュの復旧戦略  $ER_i^j$  を求める。したがって、添字  $i$  は供給エリア  $j$  内に属するメッシュ番号を示す。

$$ER_i^j = RS^j / NS_i^j \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 4 [b], [c] に示す例題で計算してみる。たとえば、\*印の供給エリア内の各メッシュの配分比率は  $ER_i^j=0.4/15$  となり、この配分比率はこのエリア内の各メッシュに同じ値として与えられる。ここでは、各供給エリアに対して戦略指標である  $RS^j$  を与えるが、より詳細な復旧戦略を立てる場合は供給エリアを細分化した戦略エリアを設定して同様な計算により  $ER_i^j$  が求められる。この戦略エリアの分割指標として、たとえば用途地域別や町丁目別等が考えられる。

次に、復旧状況に応じた2つの戦略変更方法について示す。“ $i$ メッシュの復旧終了”の場合は  $i$ メッシュにその後は復旧人員に投入する必要はない。そこで、復旧完了指標  $ERC_i^j$  をもとに逐次  $ER_i^j$  の変更を行う。これは時刻  $t$  における  $j$  供給エリア内の復旧未完了メッシュ数  $NS_t^j$  ( $NS_t^j = \sum_{i=t_j}^{b_j} ERC_i^j$ ;  $t_j$  は  $j$  供給エリア内の最初のメッシュ番号,  $b_j$  は最後のメッシュ番号) を用

いて式 (5) で  $ER_i^j$  を求めることで、復旧が完了したメッシュを除いた  $ER_i^j$  を求めたことになる。“ $j$  供給エリアの復旧完了”の場合は対象地域のすべての供給エリアに対する復旧優先度  $PRS^j$  をもとに  $RS^j$  (配分比率の基準値) の再配置を行う。この復旧優先度  $PRS^j$  は都市部に属する供給エリア、住宅地に属する供給エリアや被害の多い供給エリアを優先復旧したり、各供給エリアを平均的に復旧していく復旧方針における作業の優先順位である。復旧が完了した供給エリアは  $NS_t^j=0$  となり、これを判断指標として  $RS^j$  の再配置を行う。再配置の方法は、復旧完了した供給エリア  $j$  の  $RS^j$  を、まだ復旧完了していない供給エリアの中で復旧優先度の最も高い供給エリアに再配置する。たとえば、Fig. 4 [c] に示す例の場合、\*印の供給エリアが復旧完了したとする。 $RS^2=0.4$  を復旧未完了で、かつ復旧優先度の最も高い\*\*印供給エリアに再配置すると  $RS^2=0$ ,  $NS_t^2=0$  となり、 $RS^2=0.1+0.4=0.5$  となる。

ライフライン防災計画における復旧戦略の具体的な方法としては、重要拠点優先、需要量の大きいエリア優先や同時復旧などがある。これらをモデルに反映させる指標が復旧人員の配分比率の基準値  $RS^j$  と供給エリアにおける復旧優先度  $PRS^j$  である。

(3) ネットワークの連結性の求め方

SRM により算出される各メッシュの復旧完了指標  $ERC_i^j$  をもとにネットワークの連結性が求められる。Fig. 5 に示す例題をもとに連結性の求め方を説明する。供給エリア  $j$  ( $j=1$ ) 内に4つのメッシュ  $i$  ( $i=1\sim4$ ) が存在した場合を考える。このメッシュ上にネットワークがオーバレイしている。ここで、ノードA, Bを結ぶリンク a の連結性を求める。リンク a はメッシュ  $i=3, i=4, i=2$  を通過し、これらのメッシュにすべて被害が発生 ( $EID_i^j \geq 1, i=3, 4, 2$ ) していたとする。メッシュ  $i=3$  と  $i=4$  が復旧完了 ( $ERC_i^j=0, i=3, 4$ ) しただけではリンク a は連結されない。すなわち、メッシュ  $i=2$  の復旧完了を待って、始めて連結されたことになり、ノードA, Bの供給経路が確保される。このように、各メッシュに配置されたSRMよりネットワークの連結性を求める。

具体的な計算方法は、まず平常時ネットワークモデルのノードを要素とする連結行列 (隣接行列) を二値 (1

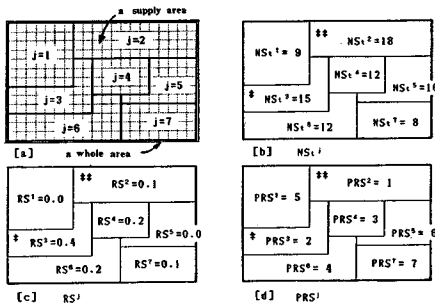


Fig.4 Assignment Rule of Worker's in Restoration Strategy (I).

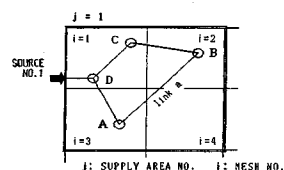


Fig.5 The Network Interlinkage (an example).





$EV S_t^k$  の評価時間の単位を変更する変数である。この  $EV S_t^k$  はレベル変量のため常に蓄積される。そこで、たとえば 1 時間単位の蓄積量を取り出す場合、その都度  $EV S_t^k$  を 0 クリアしなければならない。この制御変数が  $EIE_2^k$  である。これはエリア別電力供給量  $EV S_t^k$  と変換係数  $EEJ_k$  (1/時) との積で求める。これを式 (21) に示す。なお、 $EEJ_k$  はテーブル関数で与える。

$$EIE_2^k = EV S_t^k \cdot EEJ_k \dots \dots \dots (21)$$

電力システムの機能評価は式 (20) に示すエリア別電力供給量  $EV S_t^k$  (MWh) によって各供給エリア単位に求まる。単位は定量的な電力量 MWh (メガワット時) で示される。 $EV S_t^k$  は他の単位指標に変換することも可能である。たとえば、 $EV S_t^k$  の電力量と平常時消費電力量との比から機能評価をする方法や、得られた電力量から供給可能人口、世帯数を算出し、一般的な供給支障率曲線を求め機能評価をする方法等が挙げられる。

b) 上水道システムの機能的復旧モデル

ここで示す WFRM 1, WFRM 2 は電力システムの EFRM と同様な形でモデル化している。しかし、電力と上水道システムでは、システム構成や供給物の性格が違う。たとえば、電力は蓄積できないが水は蓄積できるために、上水道システムでは配水池などの貯留する施設がある。経済効率の面から浄水施設などの稼働を一定にする性格を有している。被害時には、漏水箇所の発見のために通水を続ける。また、埋設管の被害ではその被害の程度が小さければ供給可能であること等が挙げられる。このように、上水道システム固有の性格を考慮して WFRM のモデルを構築した。

① 上水道機能的復旧モデル 1 (WFRM 1)

WFRM 1 は上水道システムの供給ソース系を説明することから、システム構成に対する対応領域は浄水場から配水施設までである (Fig. 8 参照)。WFRM 1 は基本的には対象地域内の浄水場系統ごとに複数配置され、電力システムとは異なる。添字  $k$  は浄水系統番号である。

• 配水変動:  $WV_t^k$  ( $m^3/時$ ) は被害時の  $k$  浄水系統区

域内の配水変動を示す。電力システムの  $EV_t^k$  と同様に平常時配水変動  $WNV_t^k$  ( $m^3/時$ ) に WSRM で求められる  $k$  浄水系統区域内の平均供給可能率  $WTP_t^k$  を乗じて求める。これを式 (22) に示す。なお、 $WNV_t^k$  は時間当たりの配水量変動パターンをテーブル関数で与える。

$$WV_t^k = WTP_t^k \cdot WNV_t^k \dots \dots \dots (22)$$

• ポンプ加圧能力:  $WPP_t^k$  (無次元) はポンプ加圧式の配水系統に作用する。この  $WPP_t^k$  は電力の供給機能に影響されるため、相互影響係数  $WIC_t^k$  (無次元) (後述 (6) 参照) によって与え、0~1 の値をとる。これを式 (23) に示す。ただし、ポンプ加圧式の配水を採用していない配水系統  $k$  は、 $WPP_t^k=1$  とする。

$$WPP_t^k = WIC_t^k \dots \dots \dots (23)$$

• 配水率:  $WRD_t^k$  ( $m^3/時$ ) はレイト変数であり、 $k$  浄水系統区域内の配水量を制御する変数であることから基本的には配水変動  $WV_t^k$  ( $m^3/時$ ) で与えるが、ポンプ加圧能力  $WPP_t^k$  (無次元) を考慮することから、これらの積によって求める。これを式 (24) に示す。

$$WRD_t^k = WV_t^k \cdot WPP_t^k \dots \dots \dots (24)$$

• 計画時間最大給水量:  $WHS^k$  ( $m^3/時$ ) は  $k$  浄水系統区域内の計画 1 日最大給水量  $Q^k$  ( $m^3/時$ ) と時間係数  $K^k$  (無次元) により与えられる<sup>11)</sup>。これを式 (25) に示す。

$$WHS^k = K^k \cdot Q^k / 24 \dots \dots \dots (25)$$

• 浄水制御:  $WCT_t^k$  ( $m^3/時$ ) は  $k$  浄水系統区域内の配水池の貯留余裕率に電力システムの影響を考慮した浄水能力  $WG_t^k$  ( $m^3/時$ ) を乗じた値  $WCP_t^k$  を指標として式 (26) のように与える。ただし、貯留余裕率は  $k$  浄水系統区域内の総配水池容量  $WOJ^k$  ( $m^3$ ) と総配水池貯留量  $WVG_t^k$  ( $m^3$ ) との差により貯留余裕量を求め、これと総配水池容量  $WOJ^k$  との比により求める。

$$WCP_t^k = (WOJ^k - WVG_t^k) / WOJ^k \cdot WG_t^k$$

$$WCP_t^k \leq 0 \text{ ならば } WCT_t^k = 0$$

$$WCP_t^k > 0 \text{ ならば } WCT_t^k = WG_t^k \dots \dots \dots (26)$$

ここで、 $WG_t^k$  は電力システムの影響を受ける変数である (後述 (6) を参照)。

• 浄水率:  $WRG_t^k$  ( $m^3/時$ ) は浄水量を制御するレイト変数であり、被害時でもある程度一定に水を浄水することを考慮して、計画時間最大給水量  $WHS_k$  ( $m^3/時$ ) と浄水制御  $WCT_t^k$  ( $m^3/時$ ) とによって与えられる値  $WHC_t^k$  によって求める。これを式 (27) に示す。

$$WRG_t^k = WHC_t^k$$

$$WHS^k \geq WCT_t^k \text{ ならば } WHC_t^k = WCT_t^k$$

$$WHS^k < WCT_t^k \text{ ならば } WHC_t^k = WHS^k \dots \dots \dots (27)$$

• 総配水池貯留量:  $WVG_t^k$  ( $m^3$ ) はレベル変数であり配水池の貯留量の時刻  $t$  の状態量を示すものである。よって、時刻  $t+1$  の  $WVG_{t+1}^k$  は  $k$  浄水系統区域内の

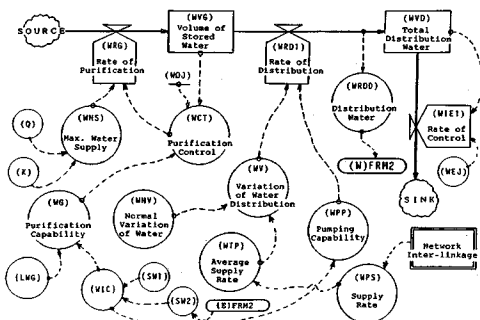


Fig. 8 Functional Restoration Model 1 "WFRM 1" in Source (Water Supply System).



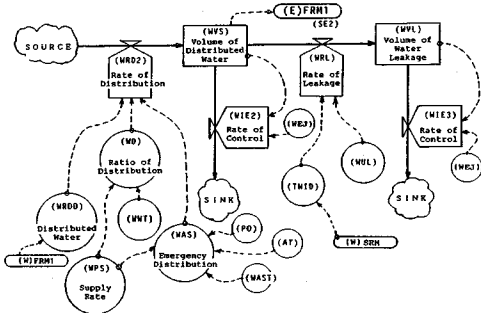


Fig. 9 Functional Restoration Model 2 “WFRM 2” in Area (Water Supply System).

浄水率  $WRG_t^k$  と配水率  $WRD1_t^k$  ( $m^3/時$ ) との差の累積により求める。これを式 (28) に示す。

$$WVG_{t+1}^k = WVG_t^k + \Delta t \cdot (WRG_t^k - WRD1_t^k) \dots (28)$$

・評価単位制御： $WIE1_t^k$  ( $m^3/時$ ) は式 (21) に示す  $EIE2_t$  と同様に表わす。なお、 $WEJ_t = EEJ_t$  である。これを式 (29) に示す。

$$WIE1_t^k = WVD_t^k \cdot WEJ_t \dots (29)$$

・総配水量： $WVD_t^k$  ( $m^3$ ) はレベル変数であり、配水量の蓄積量である。日単位等の評価の指標に用いることから時刻  $t+1$  の  $WVD_{t+1}^k$  は配水率  $WRD1_t^k$  と評価単位制御  $WIE1_t^k$  ( $m^3/時$ ) との差の累積によって求める。これを式 (30) に示す。

$$WVD_{t+1}^k = WVD_t^k + \Delta t \cdot (WRD1_t^k - WIE1_t^k) \dots (30)$$

② 上水道機能的復旧モデル 2 (WFRM 2)

WFRM 2 は上水道システムの需要家系を説明することから配水施設から需要家までを対応領域とする (Fig. 9 参照)。WFRM 2 は  $k$  浄水系統区域内の  $j$  供給エリアごとに配置する。ここでは、上水道システムの被害時の特徴である漏水や応急給水等について考慮している。

・分配率： $WD_t^j$  (無次元) は  $k$  浄水系統 (供給ソース側) の配水量  $WRDD_t^k$  を  $j$  供給エリアに配分するための変数であり、WSRM によって求められる  $j$  供給エリアの供給可能率  $WPS_t^j$  に供給エリアの重み係数  $WWT_t^j$  を乗じて求める。これを式 (31) に示す。

$$WD_t^j = WPS_t^j \cdot WWT_t^j \dots (31)$$

・供給エリアの重み係数： $WWT_t^j$  (無次元) は供給エリアの需要特性を示す変数で式 (18) と同様に求まる。これを式 (32) に示す。

$$WWT_t^j = (PO^j + LA^j \cdot AD_t \cdot AW_t) / \left( \sum_{j=1}^{m_{Wk}} PO^j + \sum_{j=1}^{m_{Wk}} LA^j \cdot AD_t \cdot AW_t \right) \dots (32)$$

・応急給水量： $WAS_t^j$  ( $m^3/時$ ) は供給エリアの供給不能率  $(1 - WPS_t^j)$ 、供給エリア内の給水人口  $PO^j$ 、供給時間考慮係数  $AT_t$  (無次元) と単位応急給水量  $WAST$  ( $m^3/時 \cdot 人$ ) の積により与える。これを式 (33) に示す。

ただし、 $AT_t$  は応急給水を実施する時間帯を考慮する係数で実施する場合は  $AT_t = 1$ 、実施しない場合は  $AT_t = 0$  としてこれをテーブル関数で与える。応急給水量は宮城県沖地震の例でも日最大量  $230m^3$  と非常に少量であるため上水道供給機能に与える影響は小さいが、緊急時の対策としては有効であるためここで考慮した。

$$WAS_t^j = (1 - WPS_t^j) \cdot PO^j \cdot AT_t \cdot WAST \dots (33)$$

・エリア別配水率： $WRD2_t^j$  ( $m^3/時$ ) はレイト変数であり、 $j$  供給エリアの配水量を制御する変数である。これは WFRM 1 より求められる  $k$  浄水系統の配水量  $WRDD_t^k$  ( $m^3/時$ ) とそれを  $j$  供給エリアに配分する率を示す分配率  $WD_t^j$  (無次元) との積に応急給水量  $WAS_t^j$  ( $m^3/時$ ) を加算して与える。これを式 (34) に示す。ここで、 $WRDD_t^k = WRD1_t^k$  である。

$$WRD2_t^j = WRDD_t^k \cdot WD_t^j + WAS_t^j \dots (34)$$

・漏水率： $WRL_t^j$  ( $m^3/時$ ) は配水管被害件数との関係から、時刻  $t$  における  $j$  供給エリア内の総被害件数  $TWID_t^j$  (件) と単位漏水量  $WUL$  ( $m^3/時 \cdot 件$ ) との積により求める。これを式 (35) に示す。ここで、総被害件数  $TWID_t^j$  は各メッシュにおける SRM の式 (2) と同様に求められる上水道システムの復旧作業指標  $WW_t^j$  から  $j$  供給エリア内に属するすべてのメッシュの  $WW_t^j$  について総和したものである。なお、 $WUL$  は文献 12) 等を参考にした。

$$WRL_t^j = WUL \cdot TWID_t^j \dots (35)$$

・評価単位制御： $WIE2_t^j$  ( $m^3/時$ ) は式 (21) と同様に求める。これを式 (36) に示す。

$$WIE2_t^j = WVS_t^j \cdot WEJ_t \dots (36)$$

・エリア別給水量 (機能評価量)： $WVS_t^j$  ( $m^3$ ) はレベル変数であり、時刻  $t$  における  $j$  供給エリアの給水量の状態量を示す。時刻  $t+1$  の  $WVS_{t+1}^j$  は基本的にはエリア別配水率  $WRD2_t^j$  と漏水率  $WRL_t^j$  ( $m^3/時$ ) との差の累積により漏水を考慮した給水量を求める。しかし、この給水量は時間単位、日単位等に評価することから、前述の式 (16) と同様に漏水を考慮した給水量と評価単位制御  $WIE2_t^j$  ( $m^3/時$ ) との差により与える。これを式 (37) に示す。

$$WVS_{t+1}^j = WVS_t^j + \Delta t \cdot (WRD2_t^j - WRL_t^j - WIE2_t^j) \dots (37)$$

・評価単位制御： $WIE3_t^j$  ( $m^3/時$ ) は式 (21) と同様に求める。これを式 (38) に示す。

$$WIE3_t^j = WVL_t^j \cdot WEJ_t \dots (38)$$

・漏水量： $WVL_t^j$  ( $m^3$ ) はレベル変数であり、時刻  $t$  における  $j$  供給エリアの漏水した量の状態量である。時刻  $t+1$  の  $WVL_{t+1}^j$  は前述の式 (16) と同様に漏水率  $WRL_t^j$  と評価単位制御  $WIE3_t^j$  との差の累積により求める。これを式 (39) に示す。

$$WV L_{i+1}^k = WV L_i^k + \Delta t \cdot (WRL_i^k - WIE3_i^k) \dots\dots\dots(39)$$

(6) システム間の相互影響の考慮

電力システムと上水道システムの相互影響として、2.②で示した関係を機能評価モデル内に反映した。この相互影響を考慮した変数の定式化について示す。

・相互影響係数(上水道→電力)： $EIC_i^k$ (無次元)は供給ソース系の施設の機能が停止すれば、それより下位の施設も供給できなくなることから発電施設に水供給が可能かを示す  $SE1_i^k$ (無次元)と変電施設系に水供給が可能かを示す  $SE2_i^k$ (無次元)との積により求める。これを式(40)に示す。ここで、 $SE1_i^k$ はWSRMの可到達行列より与えられ0, 1の値をとる。 $SE2_i^k$ はWSRMの出力値である  $WTP_i^k$ により与えられ0~1の値をとり  $SE2_i^k = WTP_i^k$ である。また、上水と電力では供給エリアの範囲が異なるため、添字  $j, k$ の対応を計る。

$$EIC_i^k = SE1_i^k \cdot SE2_i^k \dots\dots\dots(40)$$

・相互影響係数(電力→上水道)： $WIC_i^k$ (無次元)は  $EIC_i^k$ と同様に浄水施設に電力供給が可能かどうかを示す  $SW1_i^k$ (無次元)と配水施設に電力供給が可能かを示す  $SW2_i^k$ (無次元)との積により求める。これを式(41)に示す。ここで、 $SW2_i^k = ETP_i^k$ であり、供給エリア添字  $k, j$ の対応を計る。

$$WIC_i^k = SW1_i^k \cdot SW2_i^k \dots\dots\dots(41)$$

・発電能力： $EG_i^k$ (MW)は上水道システムの影響を受けて発電能力が低下することから発電施設がもつ発電最大能力  $LEG$ (MW)と  $j$ 供給エリアの相互影響係数(上水道→電力)  $EIC_i^k$ (無次元)の平均との積により求める。これを式(42)に示す。

$$EG_i^k = LEG \cdot \sum_{j=1}^{me} EIC_i^k / me \dots\dots\dots(42)$$

・浄水能力： $WG_i^k$ ( $m^3$ /時)は電力システムの影響を受けて浄水能力が低下することから  $k$ 供給エリアの浄水最大能力  $LWG^k$ ( $m^3$ /時)と相互影響係数(電力→上水道)  $WIC_i^k$ (無次元)との積により求める。これを式(43)に示す。

$$WG_i^k = LWG^k \cdot WIC_i^k \dots\dots\dots(43)$$

6. ま と め

本研究では、機能評価の理論編としてモデル定式化について詳述した。本モデルを用いた事例研究については、頁数の制約より事例編で報告する予定である。以下に、本研究で得られた結果と今後の課題についてまとめる。

(1) 本機能評価モデルにより、復旧予測、機能評価の理念に従った、より現実的な機能評価のシミュレーションが行えることがいえる。また、本モデルは実際のシステムに近い説明変数群で構築したため、防災計画の立案に役立つ指標抽出のための感度分析が可能である。

(2) 電力システムの供給機能が上水道システムに与える影響が大きいことから、機能評価を行ううえで、このシステム間の相互影響の考慮は非常に重要である。本モデルでは、この考慮を重要項目として反映させた。

(3) 特に電力システムの場合、復旧人員等の配置計画を示す復旧戦略よりも、ネットワークの特性を生かした系統制御により復旧戦略の方が早期機能回復に大きな影響を与える。このことから、今後、震後の供給機能の情報を効率よく反映できる復旧戦略の立案方法の検討が重要である。

(4) 本研究における理念の1つであるモデルの実用的な入出力情報については、より検討が必要である。

最後に、本研究を進めるにあたり(財)トヨタ財団の研究助成金の援助に対して感謝します。また、武蔵工業大学応用力学研究室の諸氏の協力に対して深謝します。

参 考 文 献

- 1) 磯山龍二・片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法，土木学会論文報告集，第321号，pp.37~48，1982年5月。
- 2) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，第327号，pp.1~11，1982年11月。
- 3) 星谷 勝・宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧戦略と予測，土木学会論文報告集，第331号，pp.45~54，1983年4月。
- 4) 和泉正哲・野村希晶：ガス，電力，上水供給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講演集，pp.2025~2032，1982年12月。
- 5) 山田善一・家村浩和・野田 茂・伊津野和之：道路交通網の最適な震後復旧過程の評価，土木学会論文集，第368号/I-5，pp.355~362，1986年4月。
- 6) Hoshiya, M. and Ohno, H. : A System Dynamics Model in Seismic Performance Assessment on Electric Power and Water Supply Networks, Proc. of Trilateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Nov., 1985.
- 7) Hoshiya, M. and Ohno, H. : A Quantitative Functional Evaluation Model of Lifelines by System Dynamics in the Earthquake Disaster, Proc. of the 1st. East Asian Conf. on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Thailand, Jan., 1986.
- 8) 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，pp.323~331，1984年4月。
- 9) Forrester, J.W. : Principles of Systems, MIT Press, 1968.
- 10) Forrester, J.W. : Industrial Dynamics, MIT Press, 1961.
- 11) 厚生省環境衛生局：簡易水道施設設計指針，全国簡易水道協議会，1978年4月。
- 12) 亀田弘行・斉藤 宏：1978年宮城県沖地震における水道網の破損と漏水量の推定，第37回年次学術講演会講演概要，第1部門，1982年10月。(1986.12.26・受付)