

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
産業能率大学 正会員 ○大野 春雄

1. はじめに

地震時における防災性の検討のなかで特にライフラインシステムにおいては、施設の構造的な被害の予測供給経路の確保、システム間相互に複雑にからみ合う相互連鎖性の解明、適切な復旧作業の方法およびその復旧予測など重要なテーマがいろいろとある。これらのテーマに関しては過去にも独立に細部にわたる研究がなされてきている。地震防災計画における有効な計画指標について考えてみると、これらの研究ではまだ総合的に不満がのこる。その一つとして研究成果の現実へのフィードバックである。すなわち、地震防災計画にどのように取りくみ、どのように反映させるか、計画行政との整合性の問題も追求していかなくてはならない時期にきていると思われる。本研究では、これらのソフトな問題に対する点も考慮したライフラインシステムの機能評価モデルの構築とその防災性の検討の応用について示す。本機能評価モデルはライフライン機能の相互連鎖性についての定性的モデル¹⁾で求められた被害影響波及の関係を反映することを第一に基本として構築した。また、機能評価については現実性の高い定量的な値で求めようと試みた。

都市の基幹施設であるライフラインのエネルギー系システムには、電力、都市ガス、上水道などがあげられる。なかでも、エネルギーの代替性や生命の維持ということを考えると上水道システムが最も重要であると言える。また、エネルギー供給過程において、他システムへの影響度合を考えると電力システムの重要性も高い。このことから、本研究では、ライフラインシステムのなかで重要な役割をもつ電力システムと上水道システムを対象として、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クス(System Dynamics)手法を用い、機能評価モデルを構築した。このSD手法は、現実のシステムに複雑に影響する非線形な関係の諸要因を割り合い自由に取り扱うことができ、計画指標に役立つモデルの構築が可能となる。ここで取り上げるシステムはエネルギー系システム(電力、上水道)であるため、それらの需要家に対する供給量を機能評価の一指標とした。ここでは、被害の復旧戦略、他システムの被害波及の連鎖性、供給経路であるネットワーク構成など、震後の防災計画に役立つ指標の最適化の検討が一元的に行えるようこの機能評価モデルのなかに盛りこまれている。

2. 定量的機能評価モデルの基本構造

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)に大きく分かれる。この構造的復旧と機能的復旧は、ライフライン施設である製造、供給施設(ノード)と供給ルート(リンク)の構造物の被害件数、例えば、埋設管の破壊箇所数、配電線の断線箇所数などが直接的な復旧、修復作業により、被害件数が減少することを構造的復旧と定義する。機能的復旧は、供給機能の停止、低下に着目したもので、直接的な構造物の被害による機能の停止、低下(構造的被害復旧)と他システムの影響を受けて低下するもの(システム間の相互連鎖性)、供給経路の連鎖性により供給できるか否かによるもの等がある。実際に需要家へエネルギーを供給する過程では、これらの要因が複雑に影響し

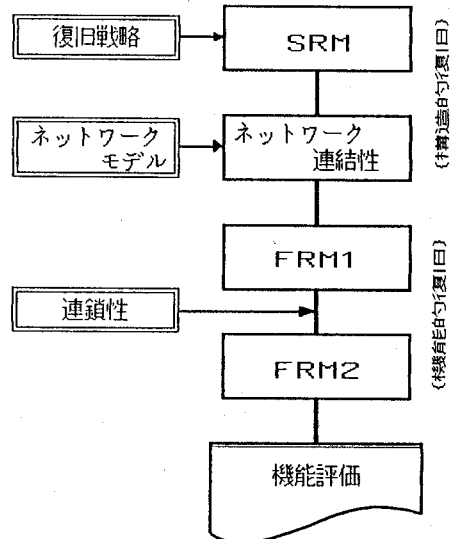


図-1 定量的機能評価モデルの基本構造

てくる。これらの点を反映した機能支障の回復を差し定義する。

図-1に示すモデルの基本構造について説明する。SRMは構造的復旧を求めるモデルであり、被害箇所に対して独立に復旧する状況を示すものである。実際の復旧においては、復旧作業に係わる復旧作業員数や復旧作業により影響され復旧状況が変化する。これらの作業計画の指針が復旧戦略であり防災計画に重要な部分を占めている。このSRMでは、復旧作業に関する人員の配備計画を復旧戦略で示し、構造的復旧過程を求める。次に、ライフラインシステム特有の供給経路の確保の問題であるが、点として独立な被害箇所の復旧が完了しても、他の供給経路上にある他の点の被害が完了しなくては供給ができない。このことを求めるのがネットワークの連結性である。これは複数のSRMの復旧状況により求まる(3.評価対象地域の定義とモデルの配置を参照)。FRMは機能的復旧を求めるモデルであるが、各システムの構成の特徴をより良く反映できるように2つに分割している。システム構成の対応領域によりFRM1とFRM2に分担し、例えば、電力システムでは発電所から配電施設までをEFRM1(頭に付くEはElectric)で求め、配電施設から需要家までをEFRM2で求める。上水道システムでは浄水場から配水施設までをWFRM1で、配水施設から需要家までをWFRM2で求める。このFRMでは、システム間の相互連鎖性を考慮しモデルを構成し、各システムの供給量を定量的に求めている。この機能評価モデルはネットワークの連鎖性のみで機能を評価をするモデルではなくFRMにおいて他システムの影響を考慮しながら機能を評価することのできるモデルになっている。各システムの機能評価指標はFRM2の出力値(レベル変量)を用いる。

3. 評価対象地域の定義とモデルの配置

2節で説明した機能評価モデルは評価対象地域(事例都市)に対して面的に広がる。ここで示す、対象地域、供給エリア、メッシュ、戦略エリアなどの各部分に配置され、モデルが動くことになる。この地域、エリア、メッシュの定義とこれらの部分にどのようにSRMとFRMが配置するのかについて説明をする。

図-2には、モデルの配置の状況を示す。まず、機能評価を行う対象地域は、都市圏あるいは中小都市域を考えている。例えば、宮城県沖地震の場合では、仙台市域、神奈川県事例では平塚市域などのような地域をさす。この対象地域内に各ライフラインシステム特有の供給エリアが形成されている。この供給エリアは各供給システムの供給系統の管轄エリアを示し、仙台市水道局の場合、茂庭配水系統、国見系、荒巻系などの6つの供給エリアで構成されている。このように供給エリアの集合が評価対象地域となる。次に供給エリアを方眼に切ったメッシュであるが、これは、国土地理院の基準分割メッシュを用い500m×500mのものを言う。図-2の下に示すものである。このメッシュは対象地域全体を包括し、供給エリアとの対応もとれる。国土地理院の基準分割メッシュを用いた理由は国勢調査における人口や世帯数、事業所統計における事業所数等がデジタルメッシュ統計として集計されており、これらのデータが供給機能(需要家に対する)を評価するうえで必要となるためである。以上に示した対象地域、供給エリア、メッシュにおいて機能評価モデルのSRM、FRM1、FRM2が配置される。FRM1は供給ソースに関するモデルであり、電力システムでは発電所ごとに存在する。対象地域内に発電系統が存在しない場合、送電ソースに各々存在する。上水道システムでは、浄水場ごとに各々存在する。このようにFRM1は対象地域全体の供給ソースに対して配置

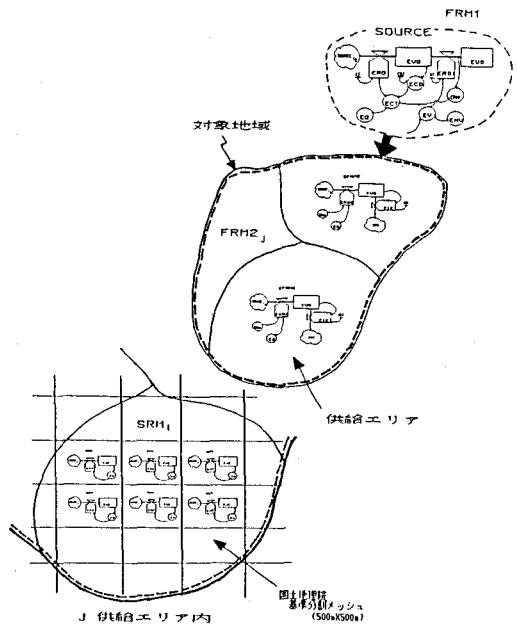


図-2 評価地域の定義とモデル配置

される。本モデルでの機能評価は供給エリア単位に行うため各供給エリアにFRM2を配置する。構造的復旧を示すSRMはメッシュごとにそれぞれ配置する。このSRMにより、各メッシュ内の被害に対する復旧過程を求め、メッシュごとの完全復旧（復旧作業終了）の指標をもとにネットワークの連結性を求めていく。

図-3に示す例題をもとにネットワークの連結性の求め方の説明をする。供給エリア内に4つのメッシュ $i=1\sim 4$ 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ーレイしている。ここで、ノードA、Bを結ぶリンクaの連結性を考えると、メッシュ $i=3$ とメッシュ $i=2$ 内の被害が復旧（SRMにおける完全復旧）しただけでは、リンクaは連結されない。リンクaはメッシュ $i=4$ にもまたがっており、このメッシュの復旧が完了することにより、リンクaは連結されノードA、Bの供給経路が確保されたことになる。このようにして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ている。

j:供給エリアNO. i:メッシュNO.

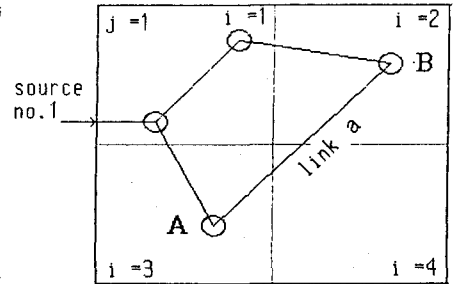


図-3 ネットワークの連結性(例題)

4. 定量的機能評価モデル

この定量的機能評価モデルは想定地震、危険度解析、被害分布予測の結果を受けて、ライフライン機能の評価をシミュレーションするものである。以下に、システムダイナミクスにおけるフローダイアグラムでこのモデルを示し、レベル変数、レイト変数、補助変数などの定式化について説明する。

1) 構造的復旧モデル (SRM) 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も同一。

このSRMは構造的復旧過程を求めるモデルであり、構造的復旧の評価指標は復旧件数： EVE_t^i (件) である。この添字 i は対応メッシュ番号である。復旧件数： EVE_t^i (件) は復旧率： ERR_t^i (件/時) によって決まる。(1式)に示すように、このEVEはERRの蓄積量である。

$$EVE_{t+\Delta t}^i \text{ (件)} = EVE_t^i + \Delta t \cdot ERR_t^i \text{ ----- (1式)}$$

なお、 i メッシュの被害の復旧が完了してしまった場合の復旧率の制御は復旧作業指標： EW_t^i (件) および復旧完了指標： ERC_t^i (n.d) で行う。

復旧作業指標： EW_t^i (件) は時刻 t における残りの復旧作業件数(被害件数)を示すもので、初期被害件数： EID_0^i (件) と復旧件数： EVE_t^i (件) との差で求める。(2式)に示す。

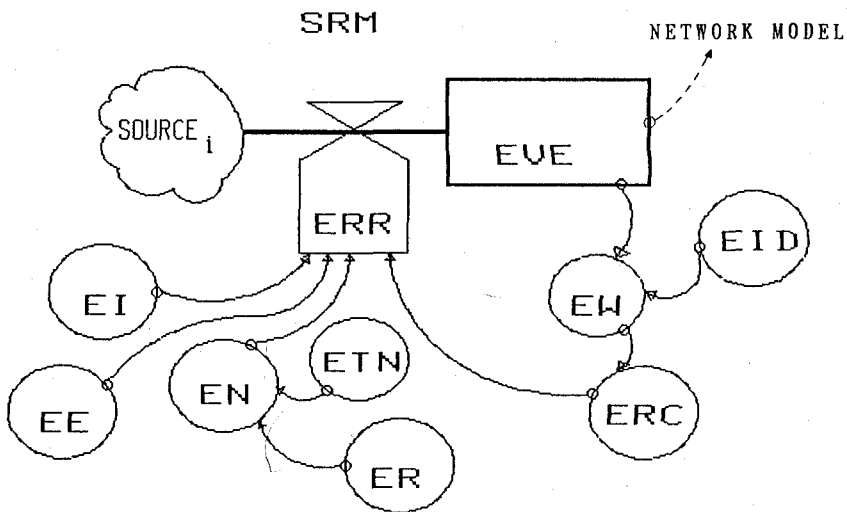


図-4 構造的復旧モデルESRM (電力システム) (上水道システムも同一 (WSRM))

$$EW_t^i \text{ (件)} = EID_0^i - EVE_t^i \text{ (2式)}$$

初期被害件数：EID₀ⁱはメッシュ単位の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で求まる（外挿）。

復旧完了指標：ERC_tⁱ (n.d) は各メッシュの初期被害EID₀ⁱが復旧を完了したかどうかを示す指標であり、復旧作業指標 EW_tⁱ ≤ 0 ならば完了したことになりERC_tⁱ = 0 とする。また、EW_tⁱ > 1 ならば、復旧は未完了でありERC_tⁱ = 1 とする。このERC_tⁱはすべてのメッシュに対して復旧完了テーブルに格納し、2)項で述べる復旧戦略：ER_tⁱ (n.d)の変更、算出の指標となる。また、このERC_tⁱは復旧率：ERR_tⁱを決める変数でもある。

復旧率：ERR_tⁱ (件/時) は復旧完了指標ERC_tⁱ (n.d)，復旧作業人員EN_tⁱ (人) 作業能力：EE_t (件/時・人)，他システムの影響因子：EI_t (n.d)，時定数WJ (n.d) によって決まる。なお、WJは3)項で説明する。定式を(3式)に示す。

$$ERR_t^i \text{ (件/時)} = ERC_t^i \cdot EN_t^i \cdot EE_t \cdot EI_t / WJ \text{ (3式)}$$

復旧作業人員：EN_tⁱ (人) は被害のあるメッシュ i に投入する復旧作業人員数である。このEN_tⁱは対象地域全体にかかる総復旧人員：ETN (人) と復旧人員をメッシュ単位の配分する指標である復旧戦略ER_tⁱ (n.d) で決まる。式を(4式)に示す。

$$EN_t^i \text{ (人)} = ER_t^i \cdot ETN \text{ (4式)}$$

作業能力：EE_t (件/人・時) は投入された復旧作業者は24時間一様に作業ができるわけではなく、また、季節（夏・冬）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変動を考慮するため、この変動をテーブル関数であたえ、これをもとにEE_tを導出する。

他システムの影響因子：EI_t (n.d)はこのモデルに示す電力システムと上水道システムの相互連鎖性の考慮ではなく、復旧作業に影響を与えるという観点から情報通信システム、交通システムの影響を考慮するもので、EI_tは0～1.0の値をとる。EI_t=0.0は他システム影響により復旧が不可能となった場合、EI_t=1.0は影響がまったくないときである。他システムの復旧過程を考えテーブル関数で与える。

2) 復旧戦略(ER_tⁱ) 変数名は電力システムのものを用いて説明する。上水道システムではWR_tⁱとなる。

この復旧戦略は防災計画において重要である。この戦略をモデルに反映する方法を示す。復旧戦略ER_tⁱ (n.d)は数値的にはメッシュ単位の復旧人員の配分比率によって表される。復旧状況に応じてこの配分比率を変えていくことを戦略としている。この変更方法は2つのルートをもつ。1つはメッシュの復旧完了時、1つは供給エリアの復旧完了時である。復旧戦略ER_tⁱはその初期値として図-5 aに示すような供給エリアごとに与える。図中に示すRS_j (jは供給エリア番号) はメッシュ単位の復旧人員の配分比率を求めるための母数となる。このRS_jは $\sum_{j=1}^n RS_j = 1.0$ (nは供給エリア数) になるように定める。このRS_jを用いて供給エリア内の各メッシュの配分比率すなわち復旧戦略ER_t^jを求める。式を(5式)に示す。なお、NS_t^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EID₀ⁱ ≥ 1) である。

$$ER_t^i = RS_j / NS_t^j \text{ (5式)}$$

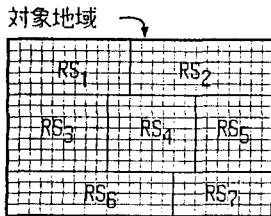


図-5. a

NS_t^j

9	**	18
* 15	12	16
12	8	

図-5. b

RS_j

0.0	**	0.1
* 0.4	0.2	0.0
0.2	0.1	

PRS_j

5	**	1
* 2	3	6
4	7	

図-5. c

図-5 復旧戦略の計算過程

図-5 b に示す例題で計算してみる。例えば、*印の供給エリア内の各メッシュの配分比率は $ER_t^{*i} = 0.4 / 15$ となる。このように、各供給エリア内の各メッシュの配分比率は平均配分する。ここでは各供給エリアに対して戦略指標 RS_j を与えるが、より細かい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、同様なルーチンによって ER_t^{*i} が求められる。この分割の指針として、用途地域別とか町丁目別とかが考えられる。次に、復旧に応じた復旧戦略の2つの変更ルートについて説明する。“iメッシュの復旧完了”の場合、iメッシュに復旧人員を投入する必要はない。このことから、復旧完了指標 ERC_t^i をもとに逐次 ERC_t^i の変更を行う。 ERC_t^i の供給エリア内のメッシュの供給 NS_t^j : j エリア内のメッシュの総和 NS_t^j (j エリア内の復旧する必要があるメッシュ数) $NS_t^j = \sum ERC_t^i$ を用いて (5式) で ER_t^i を求めていることにより、復旧完了してしまったメッシュを除いた配分比率 ER_t^i を求めていることになる。“j 供給エリアの復旧完了”の場合は対象地域内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 (配分比率の母数) の移動、再配置を行う。復旧が完了した供給エリアは $\sum ERC_t^i = 0$ となる。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 を復旧が完了していない供給エリアのなかで復旧優先度の高い供給エリアに再配置する。図-5 c を例に示す。例えば、*印の供給エリアが復旧完了したとする。 $RS_* = 0.4$ を、復旧未完了で、かつ復旧優先度の最も高いエリアに再配置する。図に示す例の場合、**印供給エリアがその対象となり $RS_{**} = 0.1 + 0.4 = 0.5$ となる。以上のようにして復旧戦略の変更を行う。地震防災計画における復旧戦略 (方法的な) 例えば、重要拠点優先、重要量の大きいエリア優先、または同時復旧などがあるが、これらをモデルのなかに反映させる指標が RS_j 、 PRS_j である。

3) 機能的復旧モデル (FRM1, FRM2)

構造的復旧モデル (SRM) より時刻 t における復旧件数が求まる。この復旧件数をもとに前述したネットワークの連結性を求める。この連結性より各ノードに供給できるか否かを判断し、供給可能率: EPS_t^j を求める。この供給可能率 EPS_t^j は対応供給エリア j 内に存在する全ノード数と供給可能なノード数との割合で示す。なお、供給可能ノードを求めるときにシステムの冗長性も考慮している。求められた EPS_t^j より対象地域全体の平均供給可能 ETP_t を求める。この ETP_t が次に説明する FRM1 に送られる。

(a) 電力システムの機能的復旧モデル (EFRM1, EFRM2)

EFRM1 は発電所から配電施設 (配電用変電所) までをモデルの対応システム領域とする。平均供給可能率 $ETP_t (n.d)$ をもとに異常時 (地震時) の配管変動: $EV_t (MW/時)$ を求める。これは平常時配電変動: $ENV_t (MW/$

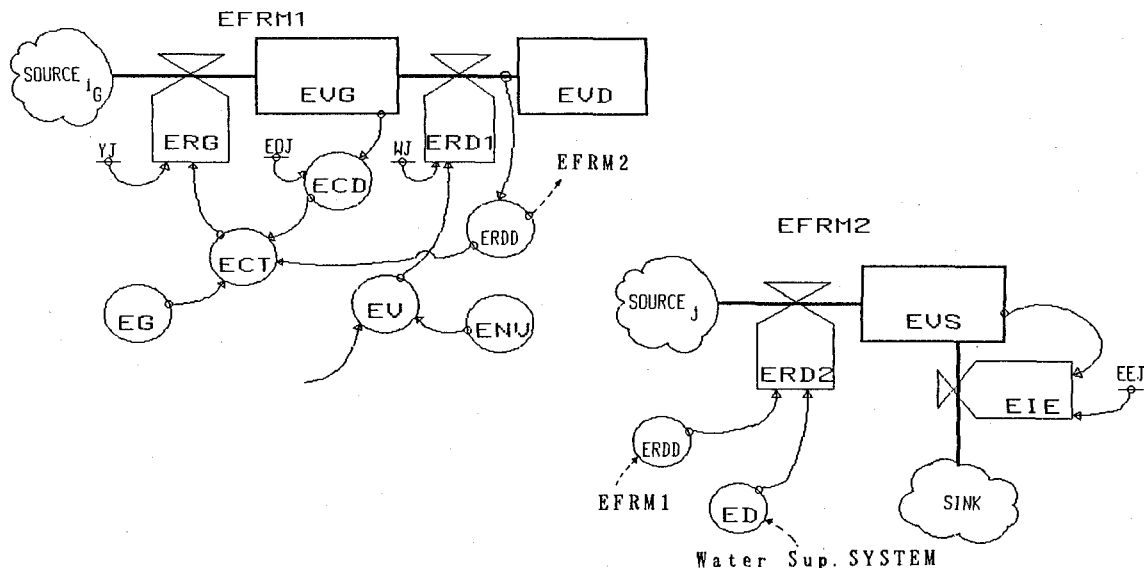


図-6 電力システムの機能的復旧モデル (EFRM1, EFRM2)

時)と ETP_t により求められる。式を(6式)に示す。なお、ENVは電力需要の日間負荷変動パターンを用い

$$EV_t(\text{MW/時}) = ETP_t \cdot ENV_t \text{----- (6式)}$$

テーブル関数で与える。この負荷変動パターンは供給エリアの性格により異なる。例えば、住宅地域や商業地域などである。

配電率: $ERD1_t(\text{MW/時})$ は配電変動 EV_t と時定数 $WJ(n.d)$ によって決まる。(7式)に示す。なお、この WJ はシミュレーション時の時間刻み Δt との関連により決まる。 $WJ=1/\Delta t$ 。なお、発電率: $ERG_t(\text{MW/時})$ にか

$$ERD1_t(\text{MW/時}) = EV_t / WJ \text{----- (7式)}$$

かる時定数 YJ も同一である。

補助発電制御(周波数制御): $ECD_t(\text{MW/時})$ は発電負荷量: $EVG_t(\text{MW})$ と負荷目標値: $EOJ(\text{MW})$ により決まる。この負荷目標値 $EOJ=0$ とする。式を(8式)に示す。なお、単位を変換するために $UC(1/\text{時})$ を用いる。

$$ECD_t(\text{MW/時}) = (EOJ_t - EVG_t) \cdot UC \text{----- (8式)}$$

発電制御: $ECT_t(\text{MW/時})$ は配電量 $ERDD_t(\text{MW/時})$, 時定数 WJ と周波数制御 $ECD_t(\text{MW/時})$ により決まる。また、配電量 $ERDD_t$ が発電能力 $EG(\text{MW/時})$ をこえた場合、発電能力を上限とする。式を(9式)に示す。

$$ECT_t(\text{MW/時}) = ERDD_t \cdot WJ + ECD_t \text{----- (9式)}$$

発電率: $ERG_t(\text{MW/時})$ は発電制御 $ECT_t(\text{MW/時})$ と時定数 YJ により決まる。(10式)に示す。

$$ERG_t(\text{MW/時}) = ECT_t / YJ \text{----- (10式)}$$

発電負荷量: $EVG_t(\text{MW})$ は実際の電力システムの給電制御の指標となる周波数変動を示すものである。発電率 $ERG_t(\text{MW/時})$ と配電率 $ERD1_t(\text{MW/時})$ との差より決まる。式を(11式)に示す。

$$EVG_{t+1}(\text{MW}) = EVG_t + \Delta t \cdot (ERG_t - ERD1_t) \text{----- (11式)}$$

総配電量: $EVD_t(\text{MW})$ は配電率 $ERD1_t$ より決まり、日単位の評価等の指標に用いる。配電された量の蓄積である。式を(12式)に示す。

$$EVG_{t+1}(\text{MW}) = EVD_t + \Delta t \cdot ERD1_t \text{----- (12式)}$$

EFRM2は配電施設から需要家までを対応領域とする。EFRM1の配電量 $ERDD_t(\text{MW/時})$ を受けてEFRM2のモデルに入る。このEFRM2は、供給エリア数分存在し、ソースすなわちEFRM1の出力値である $ERDD$ を各供給エリアに配分された量を受けとることになる。供給エリアごとに配分する分配率 $ED_t^j(n.d)$ は各エリア内の人口をもとにその比率によって求める。

エリア別配電率: $ERD2_t^j(\text{MW/時})$ は各エリアごとの配電率を示すもので、対象地域全体の配電量 $ERDD_t(\text{MW/時})$ と分配率 $ED_t^j(n.d)$ で決まる。式を(13式)に示す。

$$ERD2_t^j(\text{MW/時}) = ERDD_t \cdot ED_t^j \text{----- (13式)}$$

評価単位制御: $EIE_t(\text{MW/時})$ は評価指標であるエリア別電力供給量 $EVS_t^j(\text{MW})$ の評価時間の単位を変更するためのものである。これは EVS_t^j がレベル変量のため常に蓄積されてしまう。そこで、例えば1時間ごとの蓄積量を取り出す場合、その都度レベル変量を0クリアしなければならない。この制御をするのが、 EIE_t である。これは、エリア別電力供給量 $EVS_t^j(\text{MW})$ と変換係数 $EEJ(1/\text{時})$ によって決まる。(14式)に示す。

$$EIE(\text{MW/時}) = EVS_t^j \cdot EEJ \text{----- (14式)}$$

エリア別電力供給量(機能評価量): $EVS_t^j(\text{MW})$ はエリア別配電率 $ERD2_t^j(\text{MW/時})$ と評価単位制御 $EIE(\text{MW/時})$ との差によって決まる。式を(15式)に示す。

$$EVS_{t+1}^j(\text{MW}) = EVS_t^j + \Delta t \cdot (ERD2_t^j - EIE_t) \text{----- (15式)}$$

このエリア別電力供給量 $EVS_t^j(\text{MW})$ によって各供給エリアの機能評価を行う。単位は電力量 MW で示される。他の指標変換として、各世帯あるいは人口から求まる平常時消費電力量との比を求め機能評価曲線を求めることができる。逆に出力されたエリア別電力供給量から供給可能人口や世帯を算出し機能評価することも可能である。以上のように電力システムにおける機能的復旧モデルの定式化についてほとんど説明してきたが説明を省略した部分もある。

(b) 上水道システムの機能的復旧モデル (WFRM1, WFRM2)

このWFRM1, WFRM2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、電力システムと上水道システムでは、そのシステム構成、供給物の性格が違ふ。例えば、性格の面を取り上げると電力は蓄積することができない。すなわち、電力の発電量と供給量は整合してなくてはならない。上水道の場合は逆に、蓄積することが可能でシステムのなかに配水池などの貯留する場所がある。また、経済効率の面から上水施設の稼働を一定にする性格をもっている。異常時には、漏水箇所の発見のためにも通水する。埋設管などの被害に対してもその程度によるがある程度は供給できることなどいろいろある。ここでは、上水道システムの特徴的なものに対してモデルの定式化について説明する。

上水道システム構成に対するWFRM1の対応領域は浄水場から配水施設までである。このWFRM1は対象地域内の浄水場の箇所数配置する(電力システムと異なる)。浄水場番号をkとする(添字)。

浄水率: WRG_t^k (m³/時) は異常時でもある程度一定に浄水することを考慮し、計画時間最大給水量: WHS_k (m³/時), 浄水制御 WCT_t^k (n.d) と時定数YJによって決まる。式を(16式)に示す。

$$WRG_t^k \text{ (m}^3\text{/時)} = WHS_k \cdot WCT_t^k / YJ \text{ (16式)}$$

計画時間最大給水量: WHS_k (m³/時) はk浄水場系区域内の時間係数 K_k (n.d) と計画1日最大給水量 Q_k (m³/時) より求まる。(17式)に示す。(参照: 簡易水道等国庫補助事業にかかる施設基準, 厚生省)

$$WHS_k \text{ (m}^3\text{/時)} = K_k \cdot Q_k / 24 \text{ (17式)}$$

配水池貯留量: WVG_t^k (m³) は配水池における貯留量変動を示すもので浄水場 WRG_t^k (m³/時) と配水率 WRD_t^k (m³/時) との差によって決まる。(18式)に示す。

配水率: WRD_t^k (m³/時) は配水変動 WV_t^k (m³/時), ポンプ加压能力 WPP_t^k (n.d) と時定数WJ(n.d)によって決まる。(19式)に示す。なお、ポンプ加压能力 WPP_t^k はポンプ加压式の配水系統に機能する。また、電力シ

$$WRD_t^k \text{ (m}^3\text{/時)} = WV_t^k \cdot WPP_t^k / WJ \text{ (19式)}$$

ステムの相互連鎖性を受ける因子でもある。他の変数の定式化は省略する(考え方は電力と同様)。

WFRM2は配水施設から需要家までをモデルの対応領域とする。このWFRM2はk浄水場系区域内の供給エリア数存在する。上水道の特徴である漏水量や応急給水という緊急的な対応についても考慮している。

エリア別配水率: WRD_t^j (m³/時) はWFRM1からの配水量 $WRDD_t^k$ (m³/時), エリアに配分する分配率 WD_t^j (n.d)

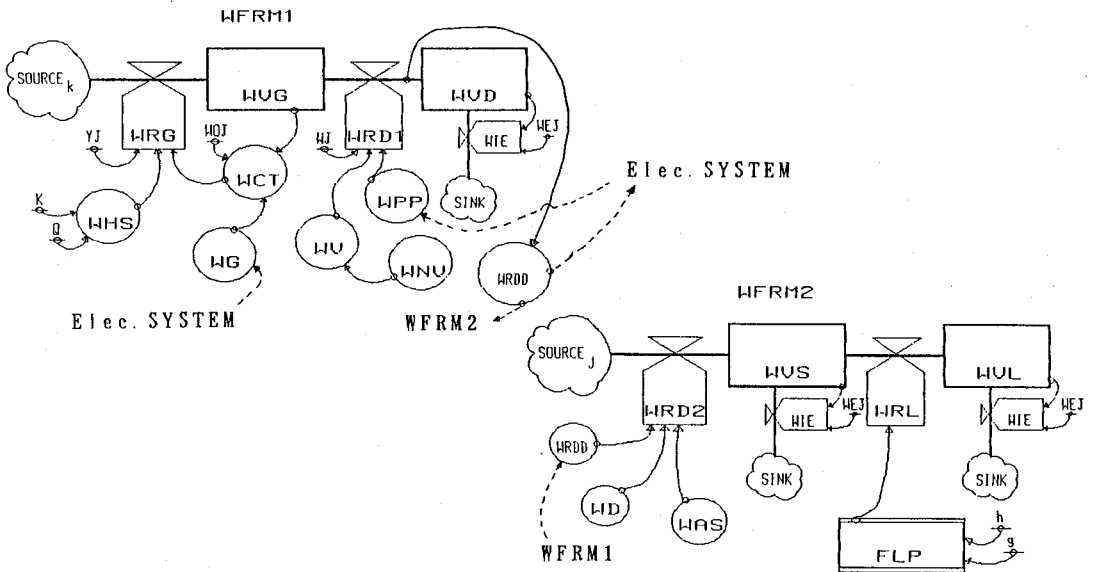


図-7 上水道システムの機能的復旧モデル (WFRM1, WFRM2)

と応急給水 WAS_t^j ($m^3/時$) で決まる。この WAS_t^j はテーブル関数で与える。(20式) に示す。

$$WRD2_t^j (\text{m}^3/\text{時}) = WRDD_t^k \cdot WD_t^j \cdot WAS_t^j \quad \text{----- (20式)}$$

漏水率: WRL_t^j ($m^3/時$) は漏水量算定式 $FLP=f(h, g, ww)$ h : 世帯数, g : 地盤条件, ww : 被害率によって決まる。この算定式 FLP は数量化理論第 I 類によって求めた式を用いている (ここでは省略)。(21式) に示す。

$$WRL_t^j = FLP \quad \text{----- (21式)}$$

以上, WFRM の特徴的な変量について述べた。

4) システム間の相互連鎖性の考慮

電力システムと上水道システムの相互連鎖性として, 上水道システムへの影響は配水量 $WRDD$ が発電能力 EG かけられる。この間には波及係数 EIC が介在する。また, 電力システムが上水道システムに与える影響はエリア別電力量 EVS が電力供給エリアに対応している上水道の各エリアにある浄水場の浄水能力 WG とポンプ加压能力 WPP かけられる。これも同様に波及係数 WIC が介在する。

以上のように, S.D による定量的機能評価モデルの定数化を示した。

5. 宮城県沖地震における仙台市域の事例計算

定量的機能評価モデルを用いた仙台市域の機能評価のシミュレーション結果の一例を図-8 に示す。このケースの場合の復旧完了時刻は, 電力システムで地震発生後37時間となり, 上水道システムでは地震発生後205時間となった。供給エリア別, 経時別に機能的復旧を11段階にランク分けして仙台市域の地図上に表現

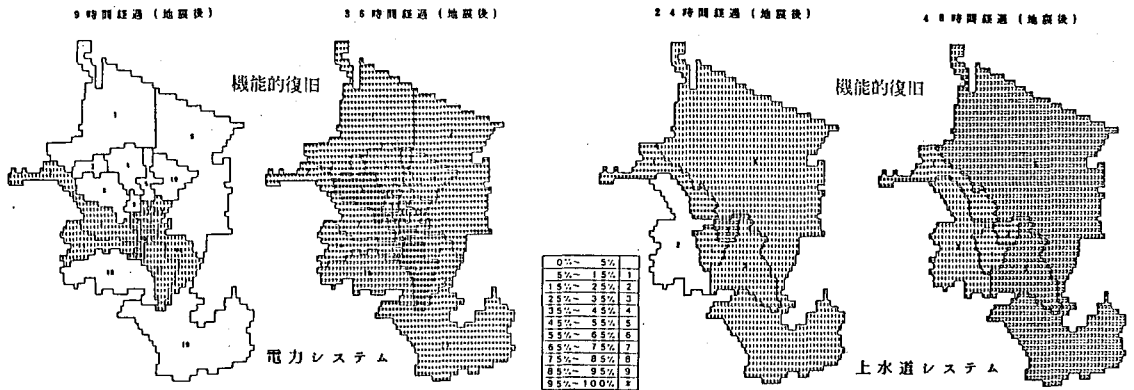


図-8 機能評価シミュレーション結果 (一例)

している。復旧戦略, 復旧作業能力 (人員), システム間の相互連鎖性の影響度, ネットワークモデルの脆弱箇所, 地震発生時刻, 季節などの環境指標, 以上の要因によるケースを設定し分析している。

6. おわりに

ライフライン地震防災計画指標の検討を目的とした定量的機能評価モデルの説明をしてきた。ライフラインシステムはその構成要素間には復旧な相互依存関係があること, 非線形システムであること, 因果関係には非常に複雑なフィードバックループをもっていることなどがこのシステムの特徴と言える。これらの現象をより良くモデルに反映できる手法としてシステムダイナミクス手法を用いた。S.D モデルはパラメータ依存型ではなく構造依存型であることから非常に柔軟であり, 難しい点がある。過去にも文献2), 3) で発表してきたが逐次改良を重ねてきた。最後に財団法人トヨタ財団の研究助成に對し感謝します。

参考文献1) 星谷・大野・山本: 「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334号/ I-1, 1984.4

2) 星谷・大野: 「電力・上水道システムの相互連鎖性を考慮した震災時供給機能の定量的評価」地震工学研究発表会, 1985.7

3) 星谷・大野・丸山: 「システムダイナミクスによるライフラインの震災時定量的機能評価について」第40回年次学術講演会, 1985.9