

# ライフライン耐震診断プログラム ILAS の強化と

## 地域性を考慮した主要都市への適用

課題番号 07558055

平成7年度～平成8年度科学研究費補助金（基盤研究B）  
研究成果報告書



平成 9年 3月

研究代表者 川上 英二

(埼玉大学工学部教授)

## は し が き

### 研究組織

研究代表者： 川上 英二 （埼玉大学工学部教授）  
研究分担者： 茂木 秀則 （埼玉大学工学部助手）  
研究分担者： 野田 茂 （鳥取大学工学部助教授）  
研究分担者： 佐藤 正行 （東電設計（株）技術開発本部課長）

### 研究経費

平成7年度	4, 3 0 0千円
平成8年度	1, 8 0 0千円
計	6, 1 0 0千円

### 研究発表

#### (1) 学会誌等

- 1) 川上英二：埋設ライフラインの震害例と耐震設計 =物的被害と機能支障=  
（配管技術, Vol.38, No.6, pp.65-71, 1996年5月）
- 2) Kawakami H. and Mogi H.: Simulated Space-Time Variation of Earthquake Ground Motion Including Observed Time History Record (Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 908, 1996年6月)
- 3) Kawakami H. and Ono M.: Simulation of Space-Time Variation of Earthquake Ground Motion Using a Recorded Time History (Journal of Structural Engineering and Earthquake Engineering, Vol.13, No.2, pp.137s-147s, 1996年10月)
- 4) 川上 英二：道路交通システムの形状と連結確率との関係  
（第1回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp.169-172, 1996年11月）
- 5) 川上 英二：10kmに1カ所以上の被害が, 上水道の機能を左右する（震災フォーラム）  
（土木学会誌, Vol.81, pp.42-43, 1996年1月）
- 6) 川上 英二：阪神大震災に見るライフラインの震害と復旧（'96建築設備技術会議,  
pp.1-3-1~1-3-9, 1996年2月）
- 7) Ghayamghamian M.R. and Kawakami H.: On the Characteristics of Non-linear Soil Response and Dynamic Soil Properties Using Vertical Array Data in Japan (Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Ltd., Vol.25, No.8, pp.857-870, 1996年8月)
- 8) 川上英二, 茂木秀則：多地点の地震観測記録を含む時空間確率過程の内挿とシミュレーション（JCROSSAR'95論文集, Vol.3, pp.495-502, 1995年11月）

- 9) Ghayamghamian M.R., Kawakami H. and Mogi H.: Microtremor Data Analysis for Seismic Microzonation in North of Tehran (Earthquake Geotechnical Engineering, pp.561-566, 1995年11月)
- 10) Mogi H., Kawakami H. and Ghayamghamian M.R.: Probability Distributions of Spectra and Spectral Ratios (Earthquake Geotechnical Engineering, pp.573-578, 1995年11月)
- 11) 野田 茂: 電気・ガス・通信システムの被災とその影響、鳥取大学工学部公開講座 (地震災害と現代社会-阪神・淡路大震災の教訓-, pp.59~101、1995年6月)
- 12) Shimizu, Y., Yoshikawa, Y., Yamazaki, F., Noda, S. and Isoyama, R.: Development of SIGNAL (Seismic Information Gathering Network Alert System), (Proc. of the 6th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, pp.199~209, July 1995)
- 13) Noda, S. and Hoshiya, M.: Simple Kriging and conditional simulation of a lognormal stochastic field, Applications of Statistics and Probability (Proc. of the ICASP7 Conference, pp.1237~1242, July 1995)
- 14) 野田 茂:  $\mu$ シンセシスによる単純支持梁の振動制御、(第4回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集、pp.263~266、1995年7月)
- 15) 野田 茂・丸山 収・家村浩和・佐藤忠信・鎌形修一・斉藤芳人・孫 利民・古川忠稔・松山治邦・吉田郁政: 同定・免震・制震技術とその成果、(第3回振動制御コロキウム PART A 構造物の振動制御(3)、pp.93~157、1995年8月)
- 16) 野田 茂・塚本博之: 条件付正規確率場におけるベイジアン・クリッキング、(構造物の安全性および信頼性(JCOSSAR'95論文集)、第3巻、pp.649~656、1995年11月)
- 17) 野田 茂: リアルタイム地震災害制御システムの現状と将来、(鳥取大学工学部研究報告、第26巻、第1号、pp.261~293、1995年11月)
- 18) 野田 茂: 学校のライフライン防災、(教育と施設、第51号(冬号)、pp.49~52、1995年12月)
- 19) Noda, S. and Meguro, K.: A new horizon for sophisticated real-time earthquake engineering, (Journal of Natural Disaster Science, Vol.17, No.2, pp.13~46, 1995)
- 20) 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-送配水形態に着目した考察-, (阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.645~652、1996年1月)
- 21) 野田 茂: 相互連関とインテリジェント防災(震災フォーラム)(土木学会誌、第81巻、第1号、pp.46~47、1996年1月)
- 22) Noda, S., Nojima, N., Hosoi, Y. and Kozuki, Y.: Damage and functional performance of water supply systems, in The 1995 Hyogoken-nambu Earthquake -- Investigation into Damage to Civil Engineering Structures -- (Edited by the Committee of Earthquake Engineering, Japan Society of Civil Engineers), pp.229~240, June 1996.

- 23) 野田 茂：電力・通信システムの被害と復旧、阪神・淡路大震災調査研究委員会  
中間報告会講演集、土木学会関西支部平成8年度報告会テキスト、pp.164～169、1996  
年8月。
- 24) 野田 茂・宮谷浩史・桧谷 治・道上正規：鳥取市民に対するアンケート調査、  
鳥取大学工学部研究報告、第27巻、第1号、pp.157～178、1996年11月。
- 25) 野田 茂：リスク評価技術、計測と制御、第36巻、第1号、pp.8～11、1997年1月。
- 26) 野田 茂・能島暢呂・細井由彦・上月康則：水道を中心とした阪神・淡路大震災  
の被害連鎖、土木学会論文集、第556号Ⅰ-38、pp.209～225、1997年1月。

### (3) 出版物

- 1) 川上英二，馬越ふみあき，岡田浩義：首都圏エリア別防災ガイド（同文書院，pp.1-239，  
1995年）

## 研究実績の概要

ライフラインのシステムの信頼性の解析を考えてみると、近年多くの自治体、電力・水道・ガス・通信・交通などの事業者により解析が行われてはいるが、独立に行われている。この事が、解析方法の普及を妨げているばかりでなく、解析結果の相互のチェックを不可能とし、解析法の精度の向上を阻害しているものと考えられる。本研究では、ライフラインシステムの機能損失と復旧過程の診断のための解析アルゴリズムの体系化を進め、汎用プログラム・パッケージ I L A S (Integrated Lifetime Analysis System) を作成、強化することを目的とした。

(1) 物的被害、破壊確率の推定、(2) 連結性能に基づく系の信頼性の評価、(3) 機能性能に基づく系の信頼性の評価、(4) 復旧過程の推定、(5) システム相互の連鎖性の評価、(6) 低次施設のモデル化、(7) 図形出力、の各項目に対し、ワークステーションを用いて解析が可能になるように、次の調査、研究を行った。

- ・ 従来の手法・パラメーター・結果の調査
- ・ アルゴリズムの整理統合、体系化
- ・ プログラムサブルーチンの作成
- ・ 汎用プログラムライブラリの作成
- ・ 簡単な都市への適用

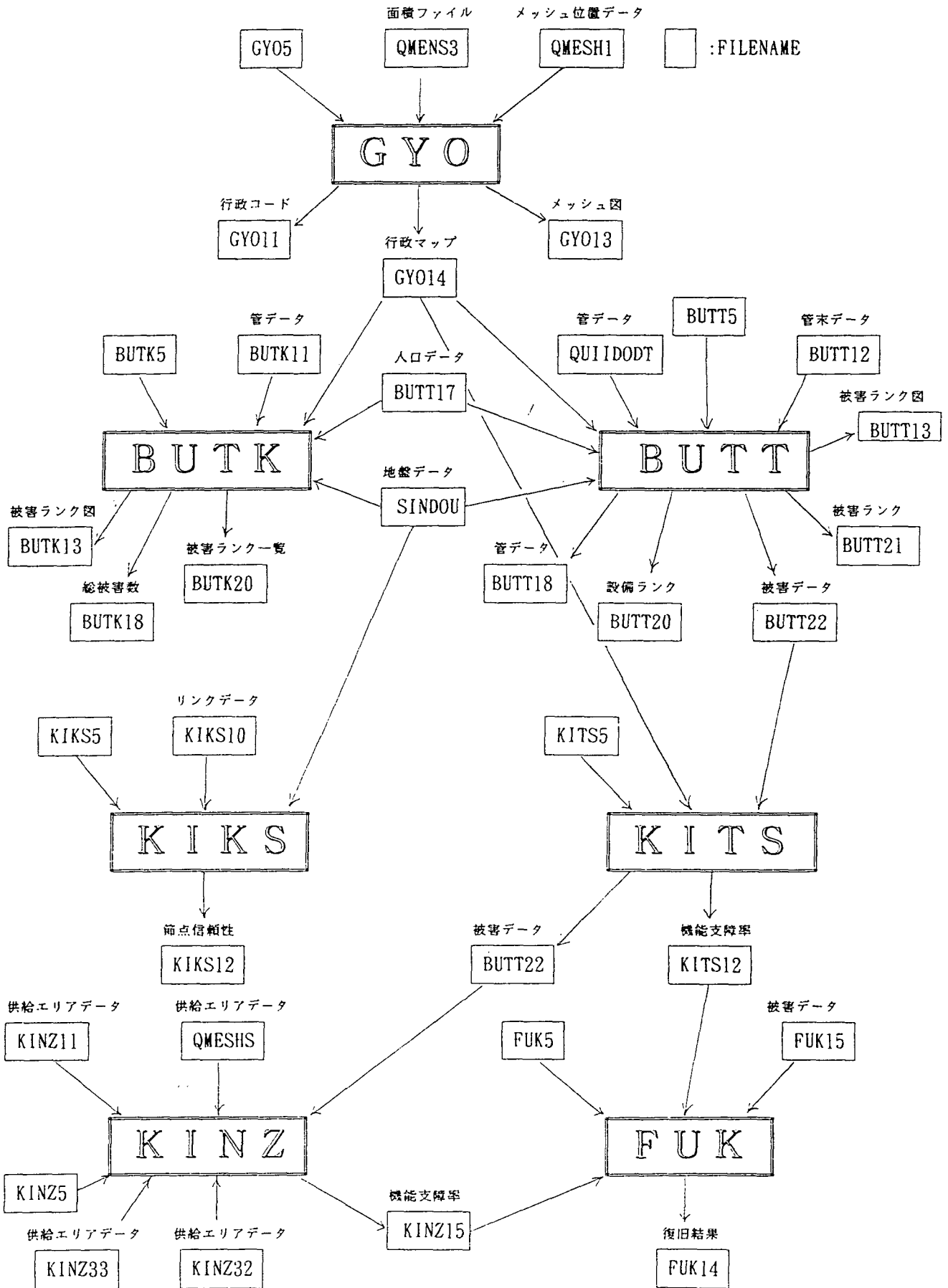
## I L A S の構成

- 1 Estimation of physical damage to each component of a lifeline system due to earthquake
  - 1-1 Estimation from the statistics of damages due to past earthquakes
  - 1-2 Estimation from the reliability theory
- 2 Seismic risk analysis on system connectivity
  - 2-1 Rigorous analysis by use of all failure combinations
  - 2-2 Series systems in parallel (SSP) and super series systems in parallel (SSSP)
  - 2-3 Monte Carlo technique
    - 2-3-1 Depth first search (DFS) method
    - 2-3-2 Warshall's algorithm
    - 2-3-3 Shortest route method
  - 2-4 Method dealing with the distribution of earthquake sources
- 3 Seismic risk analysis on system serviceability
  - 3-1 Simulations of flow in partially damaged systems
    - 3-1-1 Electric power supply systems /
    - 3-1-2 Water supply systems
    - 3-1-3 Gas systems
    - 3-1-4 Telecommunication systems
    - 3-1-5 Sewage systems
    - 3-1-6 Highway systems
    - 3-1-7 Railway systems
  - 3-2 Network flow analysis
- 4 Sensitivity analysis and importance measures
  - 4-1 Sensitivity analysis
  - 4-2 Importance measures based on connectivity
    - 4-2-1 Probabilistic importance
    - 4-2-2 Criticality importance
    - 4-2-3 Linear importance
  - 4-3 Other importance measures
- 5 Simulation of restoration process, and proper disposition of personnel
  - 5-1 Simple method dealing with total number of workers or materials
  - 5-2 Method of proper disposition of workers, machines and materials
  - 5-3 Program evaluation and review technique (PERT), and critical path method (CPM)
- 6 Inter-chain effect of lifeline systems
  - 6-1 System dynamics (SD)
  - 6-2 Interpretive structural modeling (ISM)
  - 6-3 Decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL)
  - 6-4 Fault tree analysis (FTA)
- 7 Modeling of subordinate systems
  - 7-1 Modeling of different kinds of subordinate systems
    - 7-1-1 Electric power supply systems
    - 7-1-2 Water supply systems
    - 7-1-3 Gas systems
    - 7-1-4 Telecommunication systems
    - 7-1-5 Sewage systems
    - 7-1-6 Highway systems
    - 7-1-7 Railway systems
  - 7-2 Method using the relationships between damage and service ratios
- 8 Graphic representation

# 《プログラムの流れ -水道- 》

□ : PROGRAM NAME

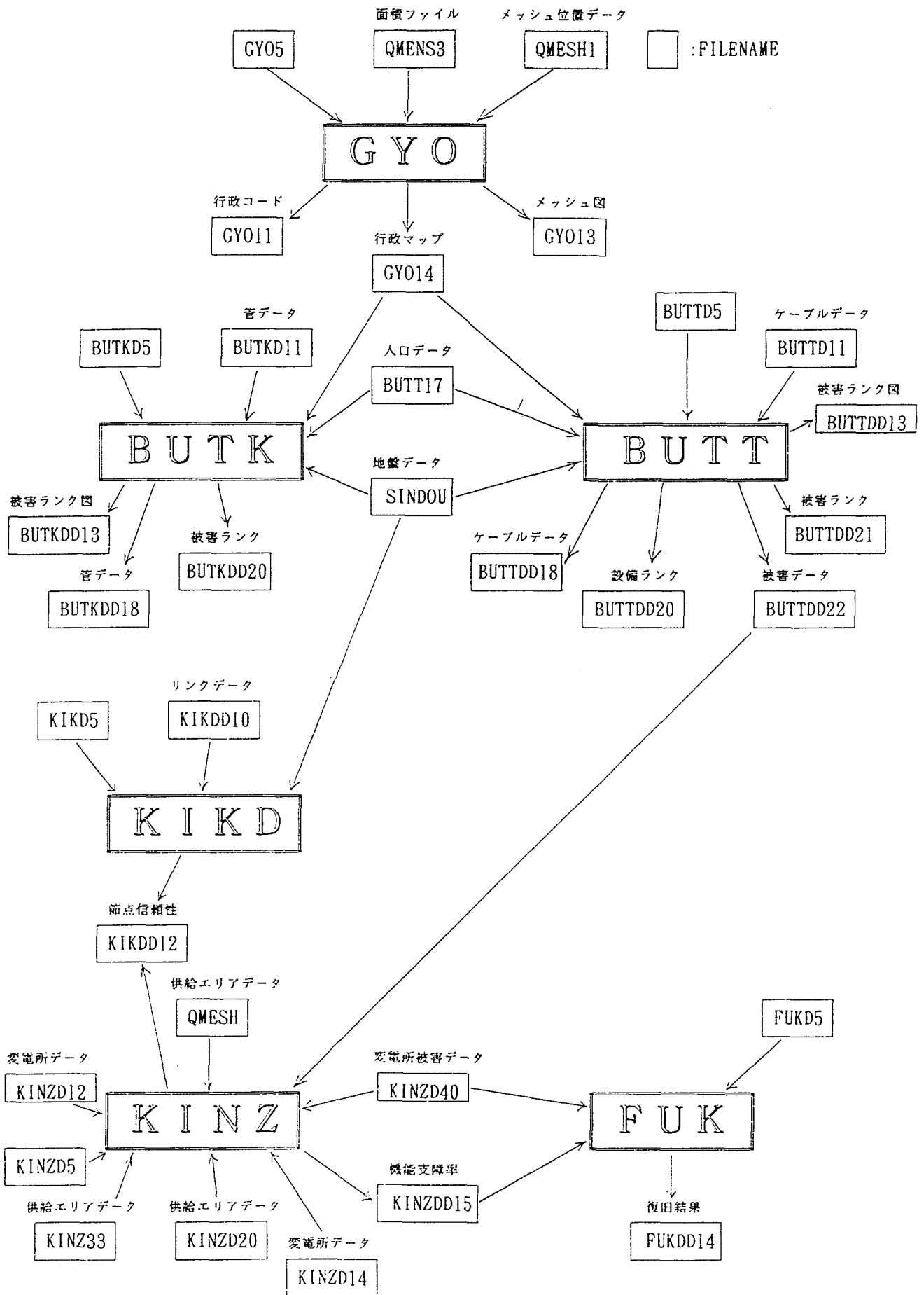
□ : FILENAME



# 《プログラムの流れ - 電カ- 》

□ : PROGRAM NAME

□ : FILENAME

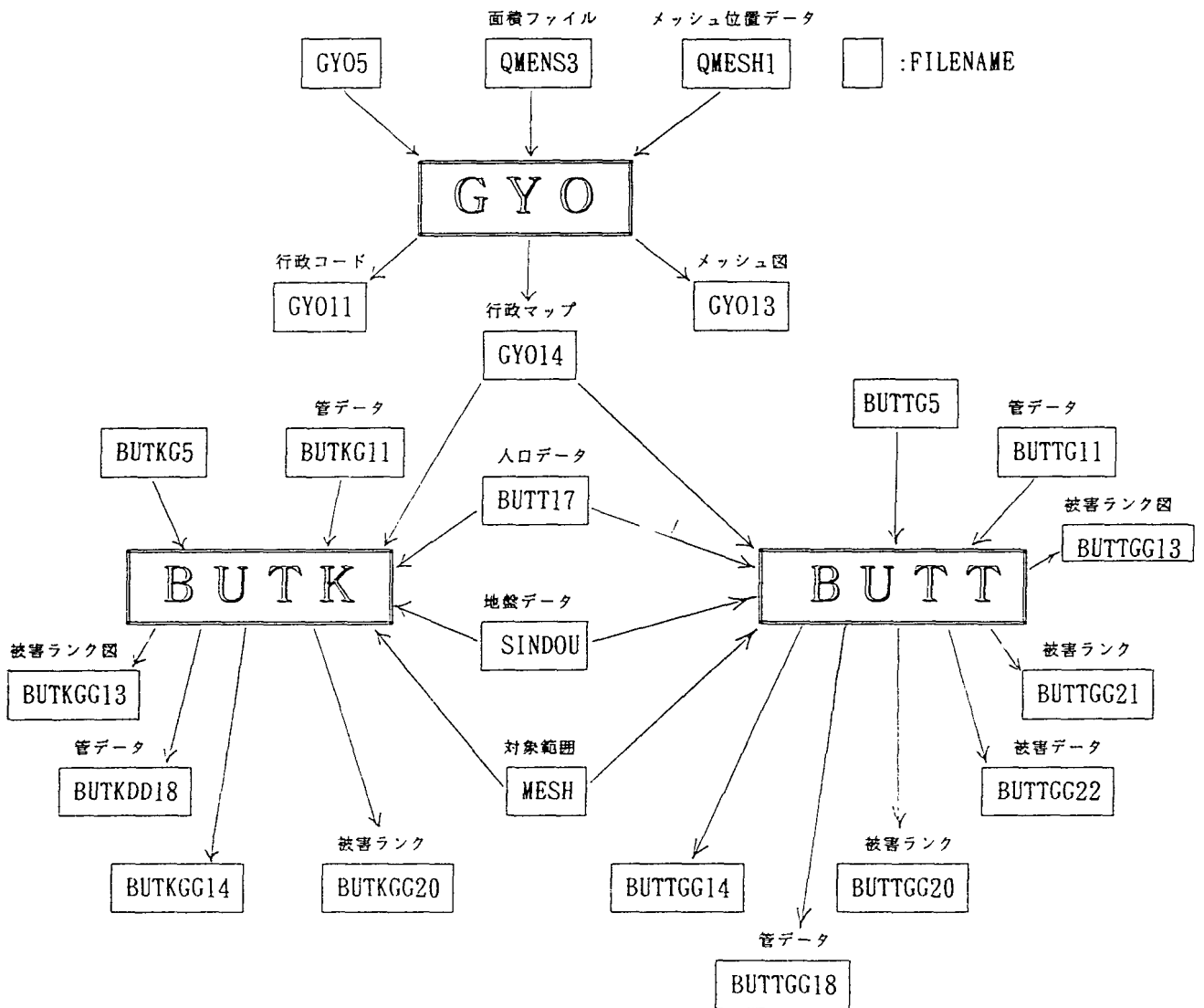




# 《プログラムの流れ - ガス - 》

□ : PROGRAM NAME

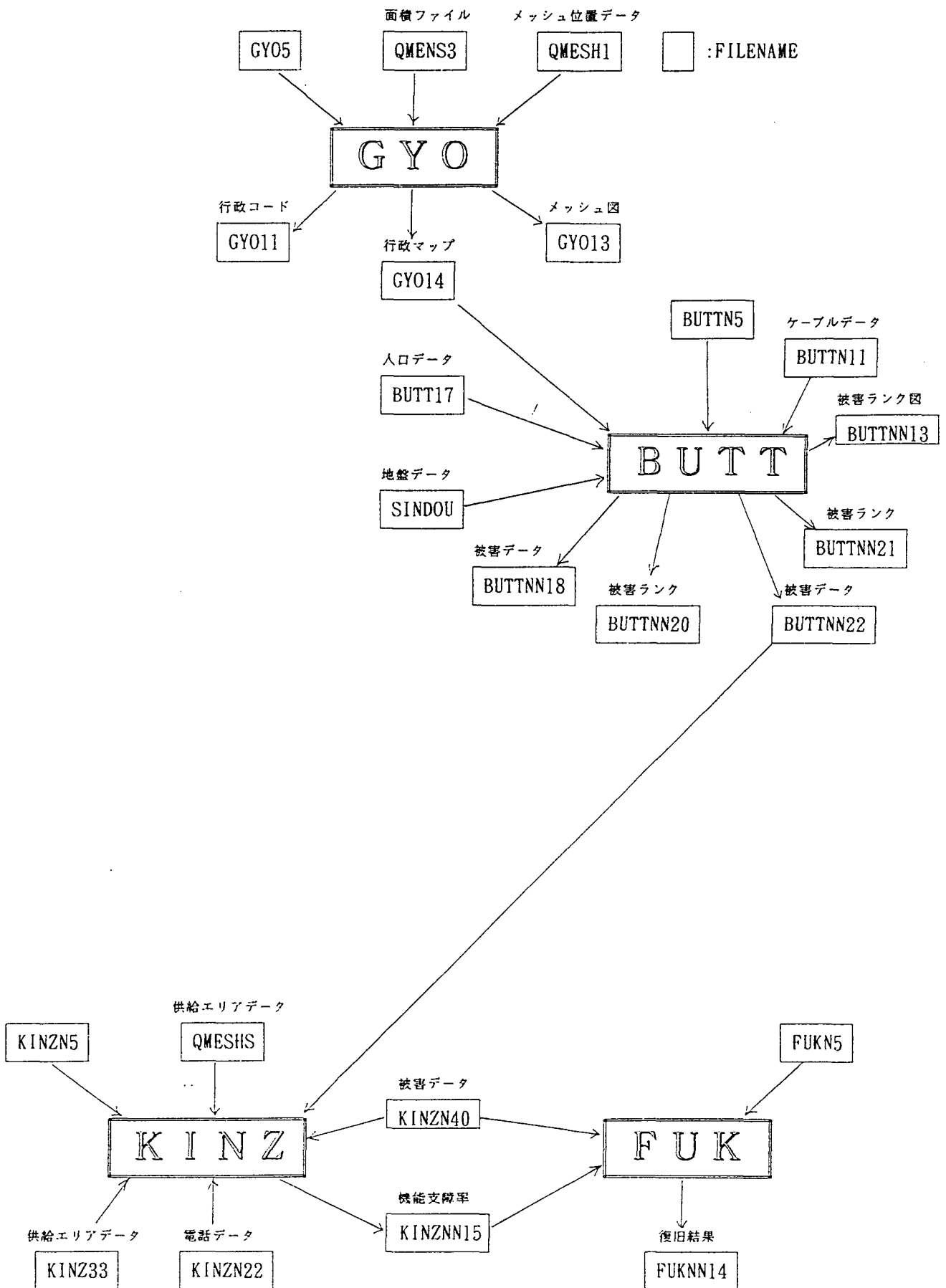
□ : FILENAME



# 《プログラムの流れ - 電話 - 》

□ : PROGRAM NAME

□ : FILENAME



# 埋設ライフラインの震害例と耐震設計

＝物的被害と機能支障＝

埼玉大学  
川上 英二

原稿No. H09-08

## 解 説

## 埋設ライフラインの震害例と耐震設計

＝物的被害と機能支障＝

埼玉大学 川上 英二  
Hideji Kawakami

## 1. 埋設ライフラインとは

「ライフライン (lifeline)」とは、生命・生活 (life) に関連した線状 (line) 構造物である。通常、上下水道施設などの水の供給処理系 (システム)、電力・ガス・オイルなどのエネルギーの供給系、道路・鉄道を含む交通網系、電信・電話・専用回線などの情報伝達網系を指す。

ライフラインの地震による被害の1つには、上下水道施設の破壊に伴う浸水、ガス施設の爆発のような狭い直接的な意味での被害がある。しかし、これらは局所的な被害であり、地震後に水、電気、ガス、交通、電話が使用できなくなり、炊飯、入浴、洗濯などに不自由を感じ、さらには、生活できなくなるといった生活困難への影響がより重要である。ライフラインは特に都市において、日常生活および産業活動をはじめ都市の機能を維持していくために不可欠であり、都市の防災を考える場合には特に重要である。もし、機能がマヒした場合には、住民生活に与える影響をはじめ、社会的経済的な影響は極めて大きい。しかし、これらは何れも人命に直接係わる問題ではない。ただし、断水による消火への影響は別である。上水道が地震時の消火の責任を負うべきか否かに関しては水道、消防に携わる機関の間で議論の分かれるところではあるが、断水の問題は単に不自由というだけでなく、生命に直接大きく係わる問題である。

上水道系が貯水施設 (ダム)、取水設備、導水路、浄水場、送水管、配水場、配水管、給水管などから構成されているように、ライフラインは一地点に存在する単独の構造物を指すものではない。ライフラインは、

生産・輸送・中継・配給の何れかの役割を担う多数、多種類の構造物が、広い面積にわたって、線的あるいは面的に分布して形成される。このため、地震時に各構造物に働く地震力が異なる。また、地中埋設管などの線状構造物を含む場合が多い。

埋設ライフラインとは狭義には地中埋設管を指し、広義には地中構造物を主体とするライフラインを指す。地中埋設管の震害分布は建物の震害分布と異なる。この理由は、地中構造物は周辺を地盤に囲まれており、また、密度が周辺の地盤と同程度であるためである。そのため、建物などの地上構造物と比較して管体に働く加速度による慣性力の影響が小さい。そして、むしろ、地震動の二地点間の相対変位およびひずみ、液状化などに著しく影響される。

## 2. 埋設管の物的な震害

埋設管の震害例を分類すると、震害の原因となる外力に関しては、

- (1) せん断波、表面波の伝播
- (2) 硬質地盤と比較して軟弱地盤での震動の増幅
- (3) 地層、地質構造の急変部、切土と盛土の境など地盤の不均質に伴う相対変位
- (4) 構造物との連結部で、管路との間に生ずる相対変位
- (5) 地盤の液状化に伴う側方流動または沈下
- (6) 斜面のすべり
- (7) 断層運動

によるものなどに分類できる。また、管に働いた力を力学的に分類すると、



写真1 引張による管の離脱の例  
(1923関東地震 Kubo<sup>(1)</sup>による)

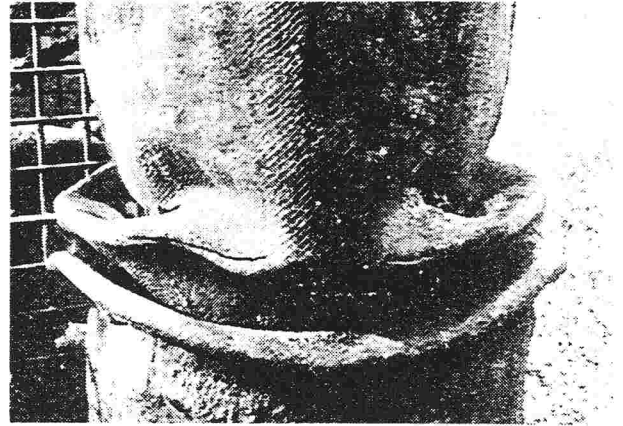


写真3 圧縮による局部座屈の例  
(1971サンフェルナンド地震 久保<sup>(3)</sup>による)

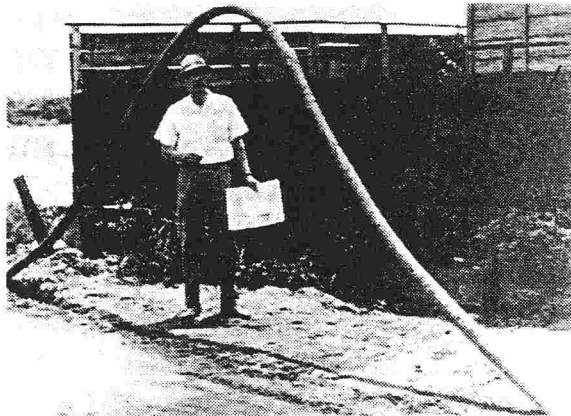


写真2 圧縮による全体座屈の例  
(1964新潟地震 Hamadaら<sup>(2)</sup>による)

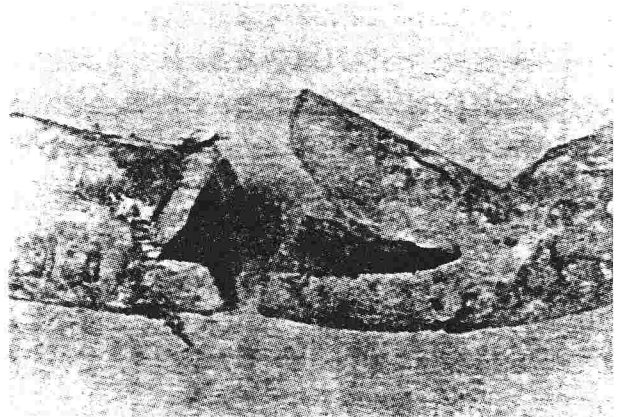


写真4 引張・圧縮の繰り返しによる破壊例  
(1983日本海中部地震 Hamadaら<sup>(2)</sup>による)

(1) 管軸方向の引張(写真1)または圧縮(写真2、写真3)

(2) 管軸方向の引張と圧縮の繰り返し(写真4)

(3) 管軸直角方向の曲げ、せん断

などに分類できる。また、被災した部位で分類すると、

(1) 直管の管体部での亀裂、折損(離脱、食い込み)

(2) 異形管部または分岐部で管運動が不連続なことによる破損(写真5)

(3) 変形性能が劣る継ぎ手部での抜け出し、破損(写真1)

(4) 溶接部の不良による亀裂、折損

などに分類できる。写真1～5には、過去の地震による代表的な破壊状況を数例示している。

埋設管の物的な被害の程度を統計的に検討する際に

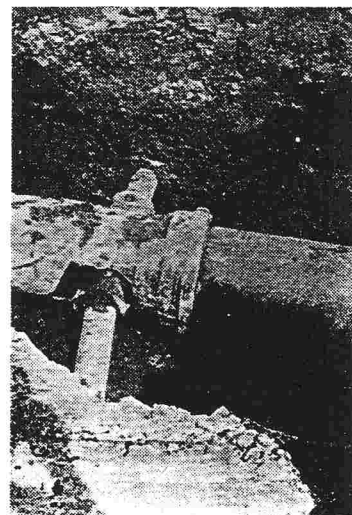


写真5 分岐部の破壊例  
(1964新潟地震 日本瓦斯協会<sup>(4)</sup>による)

は、破壊箇所数を管路延長で割った値、すなわち単位長さ当りの破壊箇所数の平均値が用いられ、これを被害率と呼んでいる。そして、過去の地震での被害統計から、最大加速度または速度、地盤の種類、液状化の可能性、管種、管径、埋設深さなどの関数として被害率が整理されている。

第1図には、過去の地震による地震動の激しさ（最大加速度の推定値）と被害率との関係を示している<sup>(5)</sup>。1995年の阪神大震災による結果を●で、他の地震による結果を○で示してある。ただし、横軸の最大加速度の値は、各市内の平均値の推定値であり、誤差を含んでいる。本図より、阪神大震災では、ライフラインに著しい被害が生じたが、これは外力が異常に大きかったためであることがわかる。久保・片山<sup>(3)</sup>による従来の経験式と比較してみると、被害率は外力の大きさの割にはむしろ小さいことがわかる。

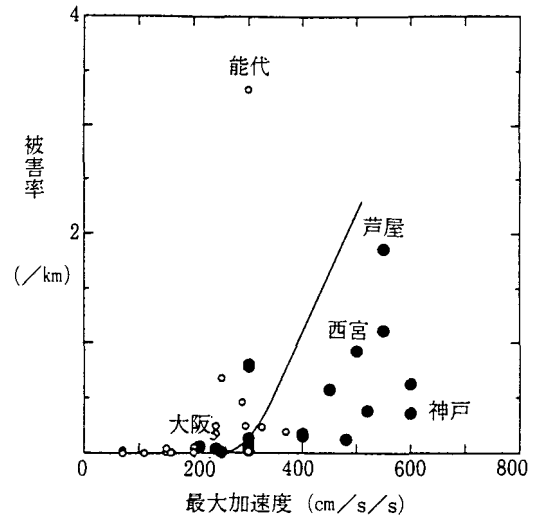
この理由の1つには管種などの違いによる影響他に次のことが考えられる。すなわち、過去の地震では液状化が生じると外力（加速度）の割には被害率が高くなることがわかっている（第1図の能代市の例を参照）。阪神大震災では、液状化による側方流動が埋め立て地の海岸付近の狭い領域だけに限定されていたため、外力の割には被害率がむしろ小さかったものと考えられる。

また、最近では、埋設管の被害の程度は地震波の加速度振幅よりもむしろ速度振幅に関係すると言われている。また、被害は地盤の不均一性の程度に大きな影響を受け、台地をきざむ谷底平野、宅地造成に伴う切土と盛土の境界上、液状化現象が発生する可能性が大きい地域などで大きいという性質がある。管の材質に関しては、石綿管、塩化ビニル管は弱く、鋼管、ダクタイル鋳鉄管、ポリエチレン管は強い。また、口径に関しては、小口径の管は地震には弱く破壊確率が大きく、大口径の管では小さいという結果が得られている<sup>(3)</sup>。

### 3. 物的な耐震設計

従来、地上構造物の設計は震度法で行うのが基本である。震度法とは、地震の影響を便宜上静的な力と考えて、構造物の質量に起因する慣性力に対して計算を行う手法である。

これに対し、一般の地中構造物では慣性力の影響が小さく、その挙動は地盤の変形に追随するため、その



第1図 最大加速度と被害率との関係  
(●阪神大震災、○その他の地震、—久保・片山<sup>(3)</sup>による)

耐震設計法は応答変位法によるのが合理的である。

応答変位法では、埋設管の地震時における挙動を主として周辺地盤の変位によって支配されるものと考えている。その最も基本的な方法では、地震時の地盤の変位を推定し、この地盤の変位に比例する（つまり、地盤と埋設管とをつなぐ地盤ばねのばね係数を乗じた）外力を地震力として埋設管に作用させる。本方法は、地盤の変形が埋設管により影響されないと考える方法である。一方、この影響も考慮する場合には、埋設管を支えている周辺地盤をも含めてモデル化する。そして、モデルの外周である地盤の境界において、自由地盤の変位を強制的に与える。こうして、埋設管の軸方向あるいは軸直角方向の変位、応力の算出を行う手法が応答変位法である。

地震波が変形せずに伝播し、管が地盤と同様に挙動する場合には、管に生じる軸方向の引張・圧縮応力の時間変化は、地震動の速度波形に比例し、一方、管の曲げ応力は加速度波形に比例する。また、小口径の直管部では曲げ応力に比較して軸応力が卓越することが理論的に示されている。

現在用いられている水道、ガスなどの埋設管および共同溝の設計基準は、1973年の「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示」を基本としている。ここでは、地盤中の管を弾性床上の梁とモデル化し、管に生じる応力の算定式が示されている。

また、近年の計算機の発達に伴い、計算モデル・入

力地震動を適切に用いれば動的解析法も有効な手法である。

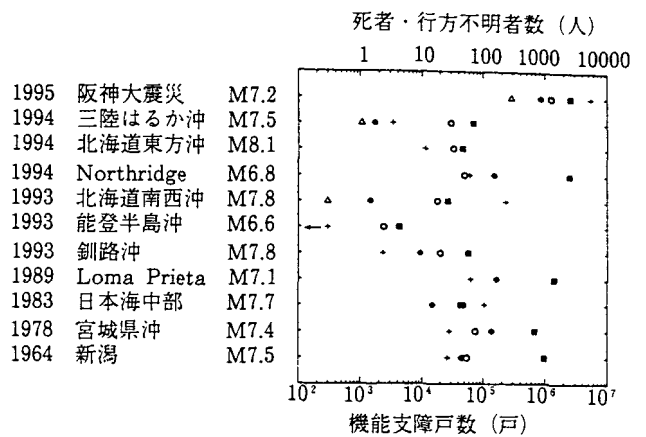
動的解析法は、前記の応答変位法による検討に加え、さらに厳密な検討を要する場合に使用される。本方法は、軟弱地盤中の埋設管や、地盤の急変部を通過する埋設管などの管軸方向の動的挙動を正確に評価する場合に特に有効である。本方法には埋設管と周辺地盤を梁-ばね-質点系に置換して地震動の加速度を入力する方法、および、地盤ばねを介して地震時の時刻歴地盤変位を強制入力し応答解析を行う方法がある。しかし、とくに前者の方法では、モデルが複雑になるため、使用するパラメーターの数も多くなり、計算モデル、入力地震動の適切さ、解析結果の解釈などが複雑であり、十分に安定した結果が得られない。このため、本方法は応答変位法による結果を確認する目的で用いられる場合が大部分であり、独立な設計方法として全面的に採用されるまでには至っていない。しかし、本方法は、地震時の現象をより正確に表す手法ではあるので、本方法を使用して計算を行った場合には、その結果を十分に尊重し、他の計算法による結果および設計条件などを照合して解釈するのが望ましいと考えられる。

上記の各種計算法に加えて、計算の信頼性を高めるために、全体あるいは部分的な模型実験により計算結果の検証を行うことや、実際の埋設管の地震時挙動を計測し、計算結果との照合を行う試みが行われている。

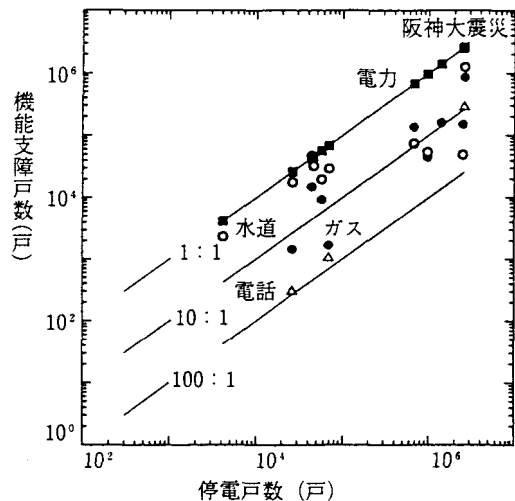
#### 4. システムとしての機能の被害

ライフラインでは、地震により上述した物的破損(管路の破断・漏水など)が発生し、これに従属して、機能低下(水圧低下・水量不足など)が発生する。単独の構造物では構造物の破壊がすなわち機能の低下であるのに対し、ライフラインではこれらの関係がこれほど個別かつ直接的ではない。これは、ライフラインでは、多くの構造物がネットワーク状に有機的につながって、全体が1つの系(システム)を構成し、初めてその機能を発揮できるためである。このため、少数の構造物の破壊でも、供給経路が断たれ、機能が全面的に停止してしまうという災害に対する脆弱さを示すこともある。

ライフラインの安全性を推定するための最も確かな根拠は、過去の地震による被害および復旧の実績である。アメリカ合衆国においては、1971年のサンフェル



第2図 最近の地震によるライフラインの機能支障の戸数 (■電力、○水道、●ガス、△電話、+死者・行方不明者)



第3図 最近の地震における停電戸数と他のライフライン機能支障の戸数 (■電力、○水道、●ガス、△電話)

ナンド地震において、また、日本においては、1978年の宮城県沖地震においてライフラインの震害が初めて大きな注目を集めた。

第2図には、主に最近の地震により電力、水道、ガス、電話が地震の直後において機能しなかった戸数および死者・行方不明者数を対数座標で示している<sup>(3)</sup>。何れの地震においても電力の機能支障の戸数が最大である。ただし、電力の場合には、事故が生じ需要と供給のバランスが崩れると、需要家の電力は一度は切り放されるが、すぐ自動的に再接続され(または手動により系統切り替えが行われ)るため、大部分の戸数の停電時間は数分から数時間と短い。

また、第3図の横軸には停電戸数を、縦軸には電力、水道、ガス、電話の機能支障の戸数を、共に対数座標で示している。非常に大ざっぱに言えば、停電戸数に

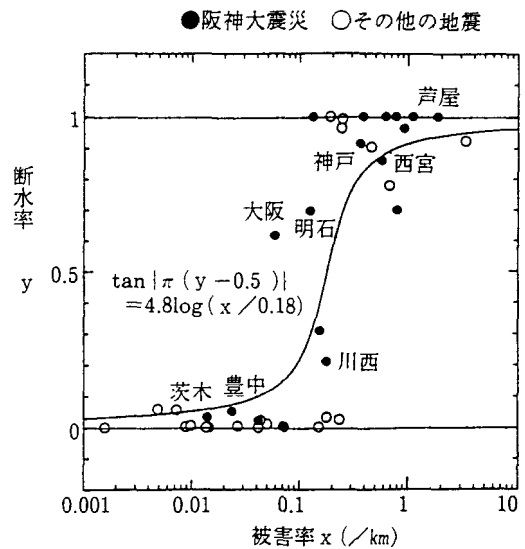
対して断水戸数およびガスの停止戸数は数割、電話は数%の回りに大きくばらついている。ただし、ガスの停止戸数が電力、水道と比較して少ないのは、都市ガスが十分普及しておらず、プロパンガスが使用されていることにもよる。また、電話は、断線による機能支障こそ少ないが、輻輳により地震直後には十分機能しない。しかし、この影響は本図では省略している。

阪神大震災では、大都市である神戸市を中心として死者数が5500名を越える大災害となった。断層に沿っての震度Ⅶの地域を中心としては、建物、橋梁などの被害が顕著であり、それを取り巻く震度Ⅵ、Ⅴ、Ⅳの広い地域では、ライフラインの被害が長期間にわたって最大の問題となった。第2図、第3図から、本地震によるライフラインの被害戸数は最大であることがわかる。

第4図には、埋設管の物的な被害率と地震直後の断水率(= [断水戸数] / [全給水戸数])との関係をプロットしてある。1kmあたり約0.2箇所の被害(これは、約5kmあたり1箇所の被害に相当する)を境に、断水率が0から1に急激に変化していることがわかる。ただし、これらの物的または機能上の被害についてのデータとしては過去の多くの震害調査報告書<sup>(5)</sup>の中の値を用いたが、矛盾した値の報告も多く、本図は若干の誤差を含んでいる。

過去の地震に対して、地震後の経過日数と復旧率の変化を求めると、復旧は一般に電話、電力、水道、ガスの順に遅くなる。復旧日数は地震の規模に大きく左右されることは当然であるが、粗っぽく代表的な復旧日数を挙げれば、電話1日、電力3日、水道1週間、ガス1箇月である。このことは、直観的には以下のように各システムの特性の違いを理由として大まかに説明することも可能である。つまり、電話では細い線がつながっていれば機能を果たしているのに対し、電力では大電力を流すための太い線が必要である。しかし、実際に物が移動するわけではない。一方、水道、ガスは漏れ易い液体、気体が実際に移動するシステムであり、電話、電力よりも一般に太い管が必要となる。その上、水道では幾分の漏れは許されるが、ガスでは漏れは許されない。こうした特性の違いのため、たとえ施設の被害が同程度であったとしても復旧日数に大きな差が出てくるものと考えられる。

大地震後には、地域によってはライフラインの機能



第4図 被害率と断水率との関係

が一旦は喪失し、復旧には上述のような日数がかかることを覚悟しておく必要がある。しかしながら、ライフラインの安全性を推定する場合、これら過去の被害量または復旧日数を直接使用することには問題が多い。使用できる地震の数が少な過ぎるばかりではない。また、システムが地域によって異なるばかりではない。同一地域であっても最近数十年間でのシステムの変化は著しく、ライフラインを構成する構造物は強化され耐震化された一方、システムの規模は巨大化した。このため、ライフラインの安全性を評価するためには、過去の震害のデータと現在の対象システムの状態に基づいて、以下に示すように再評価する必要がある。

## 5. 機能支障の想定と設計

ライフラインの機能上の安全性に関しては幾つかの基準が提案されている。まず、第1番目の基準では、ライフラインを節点とリンクからなるネットワークとして単純にモデル化する。各節点またはリンクは破壊しているかないかのどちらかの状態で表されるものとする。そして、ラインの最も基本的な性質である連結性を系の安全性の評価の尺度として採用する方法がある。

システムのネットワークが単純な場合には、連結確率の厳密解を解析的に算定できる。しかし、非常に多くの構造物から構成される複雑なネットワークに対しては、計算機の容量および演算時間の点から、厳密解の算定は容易ではない。こうした場合、モンテカルロ・



シミュレーションを用いれば効率良く安全性の近似解が求められる。

連結性の基準はネットワーク系の特性を簡潔に表現し、更にその基準が一般的であるために基本的なものと考えられる。しかし、この評価基準は各々のライフライン系の評価基準としては不十分であることは明かである。各々の系の特性および機能の種類を十分に表現する評価基準を設定し、しかも防災対策に必要な量を求め得るような機能の評価方法が必要である。たとえば、上水道系では需要点での水圧低下、水量の不足までも考慮に加えた機能上の定量的な検討が必要である。手法としては、複雑な物理的条件を反映しやすいモンテカルロ・シミュレーションが用いられることが多い<sup>(6)</sup>。

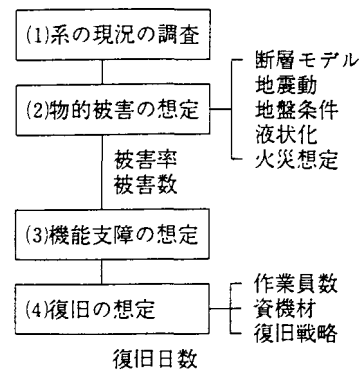
従来、国土庁、地方自治体、各事業者などにより、ライフラインの被害想定が幾つか行われている<sup>(7)</sup>。その多くは第5図の手順で行っている。

上水道、電力、都市ガスなどの各ライフラインシステムの機能上の安全性の地域分布を求めた例としては、地震直後の供給確率を、たとえば1km四方のメッシュ毎または市区町村別に0~100%の間を数段階に分けて地図上に表すことが行われている。また、幾つかの供給戦略、復旧戦略を仮定して、震災直後の供給確率のみならず、地域別の復旧日数を、または、地震後の日数別の復旧状態を、確保できる復旧作業員、資機材の量から推定し、地図上に示すことが行われている。更には、1つの都市の上水道、電力、都市ガスの相互の影響(連鎖性)を考慮して、被害復旧の全体モデルを作成し、地震後の任意の時刻における復旧率の分布を地図上に表すことも行われている。

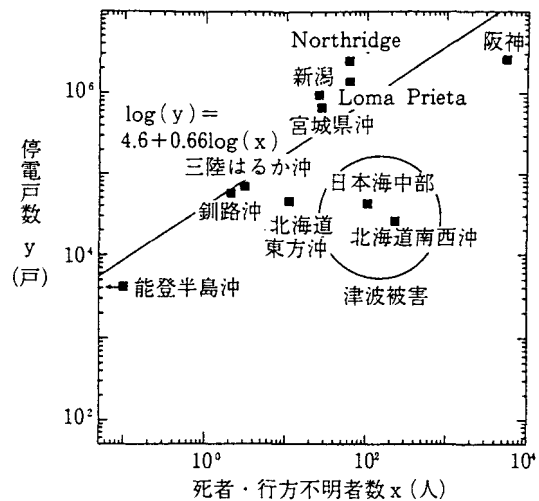
## 6. 生命と生活の耐震性に関する問題点

第6図には、死者・行方不明者数と停電戸数との関係を対数グラフで示してある。横軸は生命の問題を、縦軸には生活の問題を示している。日本海中部地震および北海道南西沖地震では津波の問題が顕著であり、生活よりも生命の問題がクローズアップされた(図で右下に分布する)。しかし、一般には両者は正の相関があり、図中に2つの地震を除いたデータに対する回帰直線を示している。また、阪神大震災では生命、生活ともに非常に問題になったことが確認できる。

こうした地震の震央付近では、震度Ⅶとなり、家屋



第5図 被害想定の手順



第6図 最近の地震における死者・行方不明者数と停電戸数との関係

倒壊・落橋・火災などにより多数の死傷者が生ずる可能性がある。しかし、このような震災ではライフラインの被害は地震直後には1番の大問題とはならない。阪神大震災でも、生命の問題が第一であった。しかし、震央から離れるにつれ、また、震後日数が経つにつれてライフラインの問題が重要になってきた。

地震に対するライフラインの安全性の評価に際しては、まず将来の地震の震源位置および規模を想定する必要がある。たとえば東京都においては巨大地震である関東地震(1923年、M=7.9)を基本とし、震度はⅥ程度を想定している。また、直下型地震も想定している。

しかし、被害想定では、震度Ⅵ、Ⅶとなる地震に加え、特にさらに1つの地震、つまり、巨大地震、断層が地表に現れる直下型地震に加えてもう1つ宮城県沖地震クラスの地震(つまり、たとえば断層が地表に現れないような少し深い直下型地震)を想定する必要

があると考え。なぜなら、ライフラインが最大の問題となるのは必ずしも最大の地震、最悪の条件下ではないからである。むしろ、関東地震クラスまたは阪神大震災クラスより1ランク下の宮城県沖地震クラスの地震において、地震直後から平常に近い生活が可能な場合には、ライフラインの被害がクローズアップされ、大都市は大混乱となる可能性が強い。そして、発生確率もこちらの方がずっと大きい。

以上の問題点の他にも、ライフラインの耐震性については、他の構造物とは異なる特徴的な問題点がある。ライフラインの安全性を向上する場合、主要な構造物(施設)においては特別に耐震的に作っておくことも可能ではある。しかし、末端の構造物の一部は大地震に際しては破損し、機能の低下は避けられないということは過去の震害例が示す通りである。また、既存の構造物の耐震性はすぐには向上できない。このため、既存の系の地震後の状態を正確に予測し、その都市機能・住民生活に与える影響を最小に抑える対策を考へておくことが防災上重要である。長期的な展望にたった耐震性の向上、耐震設計法の確立に加えて、新設よりも既存の系に対する精度の良い震害の予測、震災後

の適切な緊急措置対策、復旧対策の問題がライフラインでは特に重要である。

#### <参考文献>

- (1) Kubo, K. "Design of Underground Pipes", Seminar of the European Association of Earthquake Engineering, 1976.
- (2) Hamada, M. and O'Rourke, T.D. "Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes" Technical Report NCEER, 1992.
- (3) 久保慶三郎・片山恒雄：水道管の震害特性、生産研究、東京大学生産技術研究所、1974.
- (4) (社)日本瓦斯協会：新潟地震と都市ガス、1965.
- (5) これまでに発行された数多くの地震被害調査報告書
- (6) 川上英二：ライフラインシステムの被災度予測と耐震対策、土と基礎、1983.
- (7) 東京都防災会議：東京における地震被害の想定に関する調査研究、1990.

---

#### 筆者連絡先

川上 英二  
 埼玉大学  
 工学部建設工学科教授  
 〒338 埼玉県浦和市下大久保255  
 TEL:(048)858-3543  
 FAX:(048)855-9361

---

# 水道を中心とした阪神・淡路大震災の被害連鎖

野田 茂<sup>1</sup>・能島暢呂<sup>2</sup>・細井由彦<sup>3</sup>・上月康則<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科 (〒 680 鳥取市湖山町南 4-101)

<sup>2</sup>正会員 工博 広島工業大学講師 工学部土木工学科 (〒 731-51 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科 (〒 680 鳥取市湖山町南 4-101)

<sup>4</sup>正会員 工博 徳島大学講師 工学部建設工学科 (〒 770 徳島市南常三島町 2-1)

1995年兵庫県南部地震は都市機能を支えるライフラインに多大な被害を与えた。ライフライン被害の相互連鎖は、既往の震災事例をはるかに超え、明らかに質の異なるものとなった。本報告では、断水が他のライフライン(電気、ガス、下水道)や医療機関の機能および消火活動や廃棄物焼却施設などに及ぼした影響について述べる。差し水によるガスの復旧の遅れ、冷却水や工業用水道の供給停止による発電などへの影響や消火用水の多様な確保策がわかった。さらに、意外に少なかった通電火災、復電による通水の状況、水道の回復が下水道の機能に与えた影響や医療に不可欠な水道の役割などが定量的に明らかになった。

*Key Words : the Great Hanshin Earthquake, lifeline interactions, disaster propagation, water supply malfunction*

## 1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分52秒、M7.2の直下型地震が阪神地区の大都市圏を襲った。この地震の発生と同時に、供給処理システム(電気、ガス、上下水道)、通信システム(電話、情報通信)、交通システム(道路、鉄道、バス)や情報メディア(テレビ、ラジオ、新聞)からなるライフラインは寸断され、その機能が全てストップしてしまっただけでなく、また、数多くの構造物が倒壊し、多数の住民が被害を受けた。都市の生活・産業基盤は喪失し、都市機能は麻痺状態となった。

今回の地震では、上述したような個々の被害あるいは各システム固有の被害にとどまらず、様々な被害が相互に影響し合う相互連鎖の問題を生じた。相互連鎖に伴う被害連鎖は、結果的に阪神・淡路大震災の様相を大きく特徴づけることになった。

現代都市においては、限られた都市空間に極めて多くの社会資本が高密度に集中している。さらに、様々な機能は相互に依存し、都市機能は高度化している。こうした都市構造の変化に伴い、近年、震災時における相互連鎖の問題が目立つようになってきた。既往の研究<sup>1)~4)</sup>では、相互連鎖の多くの事例が報告され、それと同時に将来の地震で予想される相互連鎖についても言及している。この意味においては、都市化の進んだ阪神地域における被害の相互連鎖がある程度予見され、問題視されていたと言える。

阪神・淡路大震災においては個々のシステムが全て被害を受け、その被害規模は極めて大規模であった。このため、過去の事例よりもはるかに深刻な相互連鎖が

顕著に現れ、被害拡大や復旧の遅れなどの要因として、事態は一層悪化した。

兵庫県と大阪府などの9府県68市町村の水道施設は大きな被害を受けた。中でも、神戸市、西宮市や芦屋市などのほぼ全域で断水が発生した。震災直後の断水戸数は約130万戸に及んだ。

阪神間の水道システムの特徴は、4市(神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市)が淀川を水源とする阪神水道企業団からの受水に大きく依存していることである。各市の依存率は、神戸市が約75%、尼崎市が約75%、西宮市が約58%、芦屋市が約80%と高い。各水道事業者の施設被害のみならず、阪神水道企業団の浄水施設や送水施設はかなりの被害を受けた。同企業団からの送水は浄水場の被災や停電によって一時的に停止した。その結果、各市の断水解消過程は阪神水道企業団の送水低下の影響を強く受けた。水道の被害は事業者間に留まらず、広く影響波及した。各事業者の自助努力だけでは必ずしも解決できないため、相互連鎖による悪循環の防御の必要性が認識された。

阪神・淡路大震災により、水道は大きな被害を受けたが、その機能低下によって他の都市基盤施設にも少なからぬ影響を与えた。水は被災者の生命と生活を守るために欠かせない。従って、飲料水、医療用水や消火用水などの確保が必要になる。

本報告では、水道の被害が及ぼした影響について、種々の観点から検討を試みる。具体的には、都市ガスの復旧への影響、電力供給機能の低下による影響、下水道に及ぼした影響、医療機能への影響ならびに消火活動や廃棄物焼却施設に及ぼした影響を取り上げ、地

域的かつ時系列的な分析と考察を試み、被害波及の相互連関の問題を解明する。

## 2. 困難を極めた都市ガスの復旧

### (1) 被害状況

大阪ガスの製造所では、主要設備に被害の発生がなく、操業を継続した。工業用水道配管や海水配管のフランジ部から水が漏洩したが、軽微な被害だったため、機能の喪失はなかった。

中圧導管では106ヶ所で被害が生じた。その大半はバルブ部継手ドレッサーやフランジなどの継手のゆるみなどによるもので、軽微な被害であった。このため、中圧供給を遮断せず、ゴム輪取り替えや増締め作業による修繕を行うことができた。

荊藻橋では、液状化によって護岸が側方移動したため、添架されていた中圧導管(架管)が偏平化したが、漏洩はなかった。添架水道管3本は偏平化した。神戸大橋付近の水道管(600A)は添架部で座屈・偏平化し、立下り埋設部で破断の被害が生じたが、平行する2本の中圧管(300A)には漏洩がなかった。六甲アイランド大橋では上下2層の上層橋桁が落橋した。下層橋桁添架の2本の中圧導管のうち1本に水道管が上から重なったが、いずれの中圧導管ともに漏洩はなかった。また、芦屋浜センタービルに近い宮川大橋では、液状化によって橋台背面が沈下した。添架されている水道管は漏水したが、中圧導管は漏洩しなかった。

一方で、地震によって、多数の低圧導管は損傷を受け、漏洩が発生した。低圧本支供内管の被害は、ガスの供給停止地区で21,647ヶ所、供給継続地区で4,812ヶ所に生じた。被害の大部分(25,487ヶ所)は鋼管のねじ接合部に集中した。

上述のように、低圧導管の被害は多数発生した。その結果、供給継続による漏洩修繕は困難となり、2次災害を防止するため、全供給区域を55分割しているミドルブロックのうち、5つのミドルブロックへの供給を停止した。また、3ヶ所の団地ではそこへのガス供給元の中圧ガバナーを停止し、個別に供給が停止された。さらに、14ヶ所では、水道管とガス管が損傷を受け、水道管からの漏水や地下水などがガス管内に流入し、供給支障が発生したため、ガスの供給停止が個別に行われた。

### (2) 復旧作業の阻害要因とその対応

復旧作業の障害としては四つほどが考えられる。復旧作業を妨げた現象の一つ目は交通渋滞であり、その影響は復旧現場への到着の遅れや修繕作業の遅れとして現れた。二つ目の放置車両や駐車の問題は掘削やバ

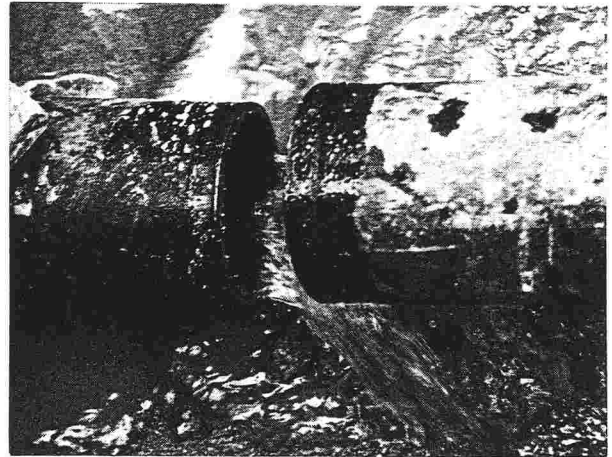


写真-1 ガス管修繕中にガス管内から流出する差し水

ルブなどの操作への障害となった。三つ目の瓦礫やゴミは、掘削への障害、バルブなどの操作への障害や処理場への交通渋滞を起こした。四つ目としてはガス管への水や土砂の流入が挙げられる(写真-1)。この影響は、パージ・漏洩調査への障害、抽水や土砂除去作業に現れた。量は少ないものの、差し水の影響はこれまでの地震被害にも見られたことである。しかし、多くの地域で大量の差し水が生じたのは初めての経験である。

被害の甚大な地域での復旧作業効率を高めるため、復旧隊の中に特別隊が組織された。この特別隊には、1) ガス管の損傷箇所と差し水箇所を調査する管内カメラ班、2) 専門の装置を使って広範囲の抽水を実施する抽水班、3) ガス管に浸入した土砂を排除する管内土砂排除班、4) 厚舗装割班や5) 水道修繕などの専門班が含まれる。この特別隊の編成によって、差し水も除去でき、修繕隊、復旧先行隊、復旧フォロー隊はスムーズに復旧作業を行うことができた。特別隊には、1月20日～1月31日の期間に87人(9班)、2月1日～2月28日に662人(88班)、3月1日～3月31日に93人(185班)が携わった。

被害の甚大な地域では、至る所で、ガス管の継手部分の亀裂や損傷箇所から、水や土砂が大量に流れ込んだ。ガス管の点検や修繕作業に入る前には、これらの水や土砂を全て除去するという手間のかかる作業が必要となる。このため、水抜き専門の車両が活用されたり、短時間で水を抜き取る専用装置HO2(27台)が投入された。また、もともとは下水道の汚泥除去用に使われていた「高圧洗浄装置」が管内の土砂を排除するのに用いられた。

大阪ガス開発の「支供管一括抽水装置(HO2)」<sup>5)</sup>(図-1)は、導管内にたまった水や泥を、コンプレッサーとエジェクター装置を活用した強力な空気圧で吸引する。これを用いれば、ガス管内の泥水の排出や管内の洗浄

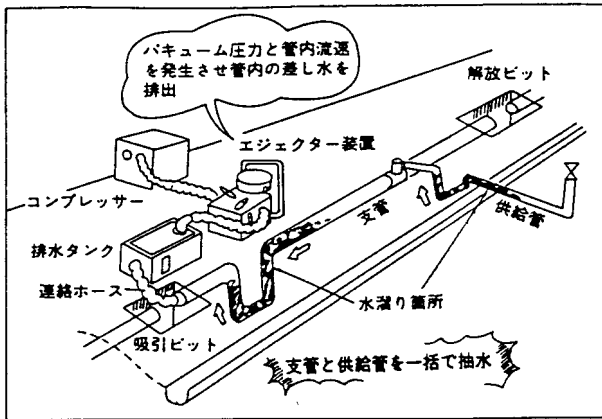


図-1 排水に活躍したHO2<sup>5)</sup>

などの仕事が一度にできる。基本的にはHO2で折損箇所を特定することはできないが、今回の震災では、使い方を工夫することにより、被害範囲を絞り込むことができたようである。半径150m以内にある支管と供給管をバルブの開閉だけで一括抽水でき、作業時間は約15分～20分と短い。2月9日の南部復旧フォロー隊の現場では、1時間で50A支管(約100m)と供給管20本の排水を行い、2ヶ所の折損を発見している。このように、従来の手動式抽水ポンプに比べ、一回の作業効率は大幅に向上した。

都市ガスの供給停止地域は復旧用セクターに分割され、222セクターで復旧作業が実施された。被害甚大地域(気象庁発表の震度7地区を含むセクター)は、1) 差し水が多い地域A(51セクター)と2) 差し水がないか少ない地域B(36セクター)よりなる。震度6以下の被害地域は、3) 液状化発生地域C(35セクター)、4) 差し水が多い地域D(44セクター)、5) 差し水がないか少ない地域E(56セクター)である。なお、差し水が多い地域とは10ヶ所以上で抽水したセクターを含む地域を意味する。A～Eの地域における代表的なセクターの歩掛かり(戸/班・日)は、おのおの、6.1、8.3、15.3、12.6、40.5であった。これより、差し水の多い地域では、困難な作業条件のため、修繕日数を要することがわかる。

### (3) 相互連携のあり方

差し水は、前述したように、復旧歩掛かりに与える影響が大きい。このため、大阪ガスでは、復旧活動開始後ほぼ毎日にわたって、4市(神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市)の水道事業者と復旧作業の日程の打合わせを行った。打合わせ内容は、復旧作業の完了地区、直近の復旧作業の予定地区、競合地区の有無の確認よりなる。各水道局から得た情報は、対策本部へ表示・周知することにより、都市ガスの復旧作業計画に反映された。

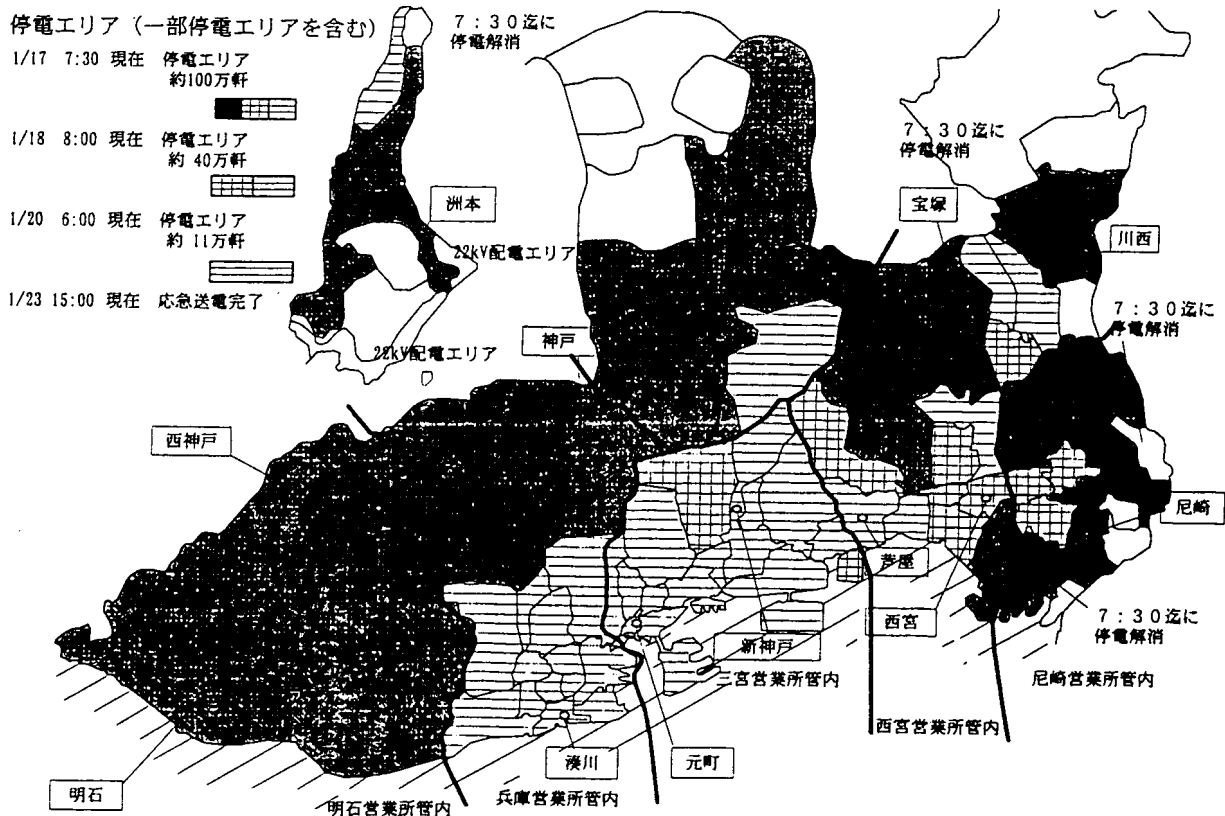


図-2 停電地域の時間推移

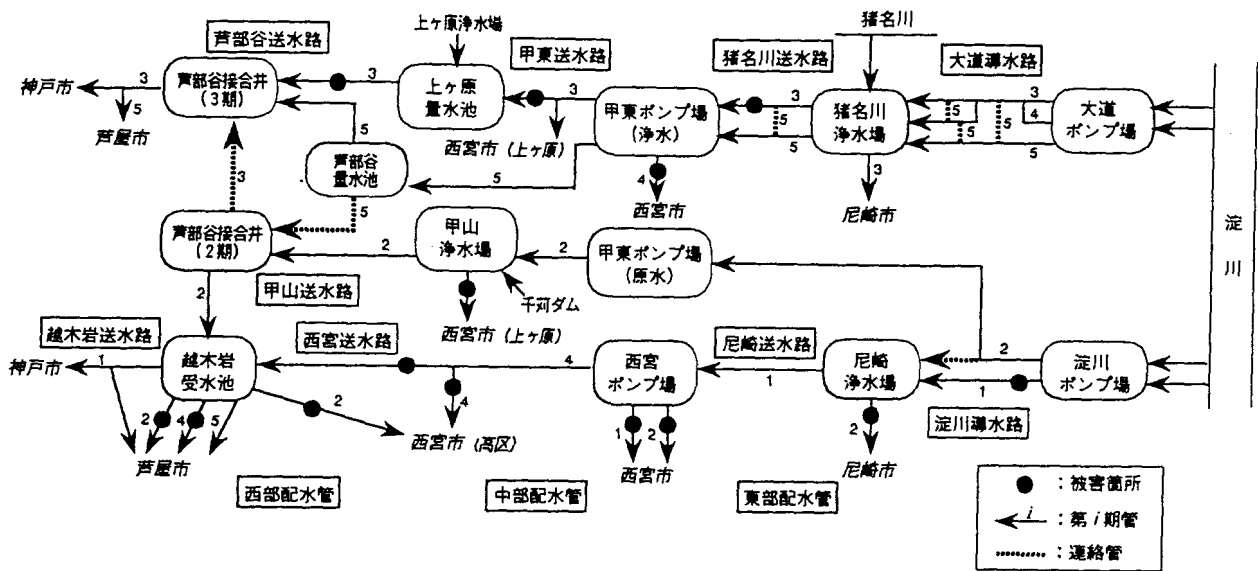


図-3 阪神水道企業団の主な施設と被害箇所<sup>8)</sup>

差し水の被害防止のためには、ガス管だけでなく、水道管も耐震性の高い埋設管にする必要がある。このためには、道路管理者の了解だけでなく、国、各省庁、各事業者の関与や相互連携を求めなければならない。

ガス管と水道管はともに地下埋設管である。従って、作業員の中には両管の復旧を兼務する場合があったようである。ガス導管の被害は、差し水の影響を受け、復旧作業に支障をきたす。今後は、その復旧に当たり、阪神・淡路大震災の経験を活かして、可能な範囲で工程調整を行うなど、相互に協力して効率よく復旧作業を行うことが肝要である。

### 3. 電力供給機能の停止

#### (1) 停電の状況

電力設備は、火力発電所、変電所、送電設備、配電設備のそれぞれに被害を生じた。関西電力が保有する火力発電所 21ヶ所のうち 10ヶ所、変電所 861ヶ所のうち 50ヶ所、架空送電線 1,065 線路のうち 23 線路、地中送電線 1,217 線路のうち 102 線路、配電線 12,109 回線のうち 649 回線、通信設備 4,048 回線のうち 76 回線が大きな被害を受けた。これらの被害は電力供給に支障のなかったものも一部含むが、停電の主な原因となった。なお、物理的な被害状況の詳細については文献 6) を参照のこと。

関西電力の供給地域で、地震発生時には約 260 万軒の供給支障が発生した。直ちに健全箇所から順次系統切替送電が行われ、約 1 時間 45 分後 (7 時 30 分頃) の停電軒数は主に神戸市と西宮市などの約 100 万軒、同

日 20 時には約 50 万軒まで減少した。系統切替操作と被害設備の復旧により、翌日の 18 日 8 時には神戸市西区と北区でもほぼ復旧し、停電軒数は約 40 万軒までに減少した。関係者のその後の復旧作業により、地震後 6 日目に全域 (家屋の焼失地域や倒壊地域を除く) において応急送電が可能となった。

地震発生直後の停電範囲、17 日 7 時 30 分、18 日 8 時、20 日 6 時の時点における供給支障地域の時間推移 (一部停電地域を除く) を示すと、図-2 のようになる。すなわち、停電地域は、17 日 7 時 30 分には図において 3 種類の凡例で示した地域であったが、18 日 8 時には 2 種類の地域に、20 日 6 時には 1 種類の地域に変化した。地震直後には、淡路島北部、兵庫県西部から大阪府の一部および京都府西部にかけての広範囲で停電した。しかし、その後徐々に復電していった様子が図より理解できる。

#### (2) 停電の影響

電気は浄水場やポンプなどの運転に必要である。そこで、本節では、三つの水道システムを例として取り上げ、停電が水道施設に及ぼした影響<sup>7)</sup>について述べる。

##### a) 阪神水道企業団

図-3 には、阪神水道企業団の主な施設位置とともに、導水路、送水路、配水管の被害箇所を示す<sup>8)</sup>。6 事業所 (大道取水ポンプ場、猪名川浄水場、尼崎浄水場、甲東ポンプ場、西宮ポンプ場、甲山浄水場) の基幹施設ならびに管路の 106 箇所被害が生じた。

地震発生と同時に、停電による影響を受け、6ヶ所における浄水場とポンプ場の基幹施設の機能は停止し

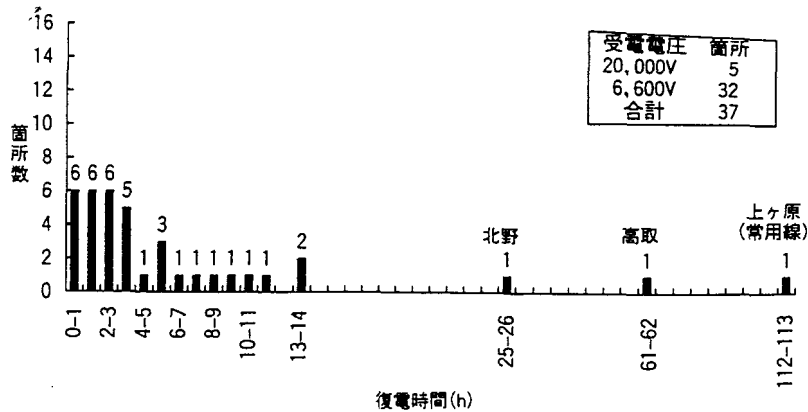


図-4 神戸市の浄水場とポンプ場における復電時間

たが、猪名川浄水場の常用線ならびに予備線は停電を免れた。大道取水ポンプ場では58分間、淀川取水ポンプ場では29分間、尼崎浄水場では1分間、甲東ポンプ場では59分間、西宮ポンプ場(特高圧受電)では67分間、甲山浄水場では194分間停電した。淀川取水ポンプ場と甲山浄水場は2系統受電であったが、その上位変電所が被災したために停電した。

停電により、猪名川浄水場を除いた基幹施設の導送配水が停止した。そのため、復電に備えて、施設の総点検と管路巡視が実施された。

淀川系統のうち、淀川取水ポンプ場、淀川導水路、尼崎浄水場、西宮ポンプ場、甲東ポンプ場、甲山浄水場の状況は次のようである。

淀川取水ポンプ場では、6時16分の復電後に導水可能な状態になった。淀川導水路(1期線と2期線)のポンプは5時47分に停止し、6時16分に復電して、同25分に自動運転で稼働したが、被災状況が不明のため、停止操作が行われた。1期線の機能は、漏水多発のために、2月19日の復旧完了日まで停止した。2期線は16時に試験通水された。淀川からの受水が停止したため、尼崎浄水場の送配水ポンプは停止したが、すぐに復電した。運転再開に当たって、施設の点検と調査が実施された。西宮ポンプ場では地震と同時に停電し、ポンプを停止した。場内の送配水管の漏水が多く、10日間運用不能となり、一部地域への送水の影響が長引いた。甲東ポンプ場では、導水ポンプ室の地下が浸水し、電動機4台が水没したが、不良部品を取り替えることで対応できた。甲山浄水場の停電時間は長かったため、発電機によって浄水処理を継続した。しかし、受水停止となったため、甲東ポンプ場からの導水に合わせて、17日の16時に運転が再開された。

大道系統においては、停電による影響や施設の能力の大幅な低下を生じなかった。大道導水路では17日の6時44分に復電した後、7時22分から導水が開始され

た。甲東ポンプ場のポンプは停電で停止した。猪名川送水路では、地震直後に送水が停止し、6時には代替ポンプ2台によって運転されたが、停電の影響を受けた甲東ポンプ場からの要請により、同20分に全台を停止した。その結果、甲東ポンプ場においては猪名川浄水場から受水できなくなった。甲東ポンプ場の受水体制が整った11時15分、猪名川浄水場では送水を再開した。

#### b) 神戸市の水道

6kVと20kVの受電電圧を有する水道と工業用水道の受配電設備(37ヶ所)の被害は、引込柱の傾斜、配電盤の基礎ボルト損傷、変圧器の基礎ボルト損傷による変圧器の移動、モールド式変圧器の高低圧分離スペーサー一部脱落、高低圧ケーブル保護管の損傷や特高圧遮断器と断路器の動作不全によるものである。

神戸市では、停電が発生してもすぐに断水に至るとは考えていなかったため、浄水場の設備と送水ポンプ設備駆動用として自家発電設備を設けていなかった。自家発電設備は四つのポンプ場(杭内ポンプ場の湧水ポンプや配水ポンプ揚水用に設置)と一つの管理センターにある。それらの停電時間は、おのおの、1.5、2、3、4、7時間である。冷却水断水による動作不全のため、一つのポンプ場では次のような事態となった。すなわち、停電発生後にこのポンプ場の自家発電設備は約1時間正常に作動したが、冷却水断水のために停止した。

6kVと20kV受電の浄水場とポンプ場(6kV受電32ヶ所と20kV受電5ヶ所)の復電時間を図-4に示す。同図には、各施設における停電日時と復電日時から復電時間を計算し、1時間ごとの復電時間帯に対応した施設数の頻度を描いている。

北野ポンプ場では、その周辺地域の損壊が大きかったため、復電までにまる1日を要した。関西電力の変電所の被害のため、高取ポンプ場の復電時間は約2日半と長い。37ヶ所のうち、16ヶ所では予備回線受電装置を有していた。上ヶ原浄水場では、地震発生とほぼ

表-1 明石市における地震直後の浄水場と配水の状況

	伊川谷浄水場	明石川浄水場	鳥羽浄水場	魚住浄水場	
受電	停電時間	3時間34分	2時間44分	3時間14分	瞬間
	時間帯	5:46~9:20	5:46~8:30	5:46~9:00	——
水処理	停止時間	4時間24分	1時間14分	6時間14分	停止せず
	時間帯	5:46~10:10	5:46~7:00	5:46~12:00	——
	要因	次亜取合配管が破断したため。	次亜取合配管が破断したため。	次亜、PACの取合配管が破断したため。(次亜タンク1基破損)	次亜No.1貯槽の取合配管が破断したが、No.2貯槽が助かったため。
送水	停止時間	3時間34分	配水池が場内にあるため	34分	停止せず
	時間帯	5:46~9:20	送水施設はなし。	5:46~6:20	——
	再開後	9:20~10:10間は、浄水池貯留水(700m <sup>3</sup> )を送水		6:20~12:00間は、浄水池貯留水(1,000m <sup>3</sup> )を送水	——
配水状況	(東部配水場) ① ポンプ配水を手動に切り替え各系1台運転とした。 ② 自然配水を出口弁で15%に絞る。 ③ 配水量を通常の60%程度に絞る。 ④ 送水停止時は配水場貯留水(13,300m <sup>3</sup> )で配水続行。	(場内配水池) ① 配水ポンプ停止24分(5:46~6:10) ② 6:10~7:00は、配水池(11,700m <sup>3</sup> )の貯留水で配水。 ③ ポンプ圧を通常の約60%程度に減圧。	(中部配水場) ① 7:10減圧弁で通常2.1kgf/cm <sup>2</sup> を1.3kgf/cm <sup>2</sup> に減圧。 ② 高区配水については出口弁を通常水量レベルで絞る。 ③ 送水停止時は配水場貯留水(25,520m <sup>3</sup> )で配水続行。	(場内配水池) ① 圧力による運転制御は不可状態となったので、原水量、配水池水位を見ながら手動運転で続行。(貯留水8,500m <sup>3</sup> ) (西部配水場) ① 県水は通常どおり受水。 ② 配水量を通常の40%程度に絞る。(貯留水16,500m <sup>3</sup> )	

同時に2回線ともに停電となった。予備回線は5分後に復電したが、常用回線の復電には約4日半を要した。図-4よりわかるように、大部分の浄水場とポンプ場では半日以内に復電している。4時間以内に復電した施設数は全体の約6割である。

### c) 明石市の水道

取水施設では、伊川谷系第11水源井受電用トランスが柱上で傾いて、オイルが漏れ、落下の恐れが生じたため、井戸の運転が不能となった。トランスは、トラッククレーンで地上に降ろされた後に点検され、オイルを補充した上で、所定の位置に戻された。

浄水施設の被害と応急復旧の状況は次のようである。

伊川谷浄水場の沈殿池運転用のケーブルが地中で3ヶ所破損し、絶縁不良となった。このため、沈殿池の運転が不能となった。3月21日には別電源から仮設ケーブルが引かれ、運転を継続した。本復旧では、新たにルートが選定され、ケーブルが布設された。明石川浄水場では、中央操作室と電気室のガラスが破損し、計装機器に支障をきたす恐れが生じた。窓枠は使用できる状態だったため、ガラスのみが取り替えられた。鳥羽浄水場の受電設備では、ダブルスロー(買電と自家発電の切替器)が損傷した。そのため、手動で強制的に投入して運転を継続したが、スイッチは作動不可状態となった。余震によって停電が起これば、自家発電の運転が不能となる恐れがあったので、緊急発注され、ダブルスローが取り替えられた。

配水施設では、明石川浄水場の配水ポンプ盤用絶縁碍子が破損し、漏電の危険性が生じた。配水ポンプ盤に支障が生じると、ポンプが停止して断水する非常事態となるため、緊急に取り替えられた。

表-1は、地震直後における浄水場の被災状況と配水状況を示したものである。魚住浄水場では停電による影響はなかったが、西部配水場の配水量は制御された。同表より、停電時間、水処理停止の時間と要因、送水の停止時間、再開後の送水量が読み取れる。震災に伴う緊急対応のため、配水量が調整された。

以上のことから、各水道システムは停電によって一時的にポンプ停止などの影響を受けたものの、復電後においても送配水システムの漏水などの被害により送水の停止や制限が実施されており、停電による影響は少なかったと言える。

### (3) 断水の影響

断水のため、飲料水、トイレの水や生活水の確保に苦勞する中、電力設備の被害復旧が進んだ。関西電力神戸支店ビルのある神戸市中央区は全域が断水状況にあり、ビルの貯水槽も破損した。この神戸支店では、地震直後に上下水道の使用不能が判明し、神戸市の給水車によって給水(1月20日、21日、23日)を受け、20日に水道が復旧しても、建屋内の配管が破断したため、水を使用できなかった。1月21日には、給水引込線をビニール管で仮接続し、受水体制を確立した。23日と24



日には受水槽に水供給が実施され、24日には本復旧となった。

地震によって電力設備に直接的な被害がなくても、断水に伴う機能停止の事態が発生した。その例<sup>6)</sup>を以下に示す。

尼崎東発電所では、尼崎市内における水道配管の損傷により、工業用水道と水道がともに断水し、運転時間に制約が生じた。そのため、排煙脱硫装置の運転が不可能となり、その長期化が懸念された。貯水量を有効に活用するように、工業用水道の使用量の多いこの装置を停止した。代替燃料として、超低硫黄重油の緊急調達(20日と24日)が実施された。また、工業用水道の輸送船が緊急手配され、1月25日から2月14日にかけて延べ2,400tonの工業用水道が受け入れられた。このようにして発電所の断水対策がとられた。

鳴尾情報処理センターでは、断水のため、計算機用冷却水が不足した。このため、1月24日から2月4日にかけて冷却水(170ton)が購入され、復旧した。

#### (4) 自家発電装置の問題

電力設備(受変電設備、非常用自家発電設備や動力設備など)の被害原因は大別して二つある。その一つは設計・施工の不具合によるもので、他は建築物や空調衛生設備の被災による2次的被害である。外壁損傷などで地下水が噴出したり、停電で地下水の排水ポンプが停止して、受変電設備の電気室浸水の例が見られた。また、同様な原因で、動力設備の地階設置動力制御盤も浸水した。

自家発電設備の被害状況と稼働状況は、アンケート調査(695台対象)によって、次のようにわかっている<sup>9)</sup>。

上下水道施設のポンプ場などに設置されている695台の非常用発電設備のうち、77台(全体の11.1%)は防災用以外の設備である。695台のうち、始動できなかったものは63台であった。被害としては、冷却水配管破損、高架水槽転倒、断水ならびに冷却水配管破損による冷却水断水でのトリップを生じた。このような被害原因が不始動の理由となったものの割合は12.7%(8台)である。始動はしたが、断水によって異常停止したのは、632台中16台(2.5%)であった。この16台は全て水冷式と放水式のディーゼルよりなる。

自家発電装置では、1)断水が原因となった放水冷却式装置の停止、2)冷却水系統のラジエータ部での水漏れ、3)冷却水配管の破損、4)燃料移送ポンプの浸水などの被害が目立った。しかし、冷却水補給の不要なラジエータ式の自家発電装置では、断水による影響がないため、燃料がなくなるまで問題なく運転ができた。

以上よりわかるように、2次的な被害、すなわちス

プリンクラーの誤動作による放水、給水管の破断による漏水などの配電盤の被害や動力盤などの冠水被災を事前に予測することは難しい。従って、今後は、早期に復旧できる方策を考えたり、構造設計を行うことが望まれる。

## 4. 下水道への影響

### (1) 下水道もライフライン

下水道は水道のように被圧状態で流下するわけではない。その下水道の処理場と管渠は大きな被害を受けた。容易に漏水を発見できないことなどの理由で、復旧は遅れた。

水道やエネルギー(電気、ガス)の供給遮断は被災者を苦しめた。日が経つにつれて、このような供給システムだけでなく、生活の処理システムである下水道の破壊が次第に問題になってきた。これまで平常時に下水道の重要性があまり意識されることはなかったが、水道やガスとは性質を異にする下水道システムも、都市生活に不可欠なライフラインの一つである。

今回の地震では、排水設備(一部公設ますを含む)、排水設備と下水管を結ぶ取り付け管、枝線におけるマンホール、管渠の接続部の被害が多かった。住民苦情の大部分はこの排水設備関係の被害であった。その他、継手からの土砂流入、下水管の閉塞や下水管自体の破損が見られた。家庭排水設備と終末処理場という下水道システムの両端に大きな被害が生じた。幹線での大きな被害としては、地下鉄の陥没に関連したものや圧送水の水管橋落下などが挙げられる。雨水幹線の被害は汚水幹線のものよりも多かった。

下水道被害で特徴的なのは機能低下した処理場の出現である。特に深刻だったのは、神戸市の汚水全体の30%を受けもつ東灘処理場の被害だった。北岸が運河に接する同処理場は、岸壁が運河側に数mずれ、地盤沈下で地下のコンクリート製導水管渠が4ヶ所で破断した。対岸のポンプ場から汚水を運ぶ管も切断され、沈澱池も破損した。このため、汚水を貯留できず、処理機能が壊滅して、100余日、運転が止まった。この間、運河が沈澱池代わりとなった。

公道部分の雨水管渠、汚水管や取り付け管(公共下水道)は自治体が管理する。一方、宅地部分の排水設備(汚水ますやトラップますなど)は家庭や事業所などに管理義務がある。汚水管や汚水ますなどの排水設備が壊れたら、トイレは使えない。路上への汚水流出は少なかったが、汚水は宅地内に溢水した。公道下の下水管が修理されても、排水設備の破損のため、汚水が逆流した。これは、水道と下水道が一体的な復旧をせず、水道の復旧が先行したことによる。地震後、トイレに

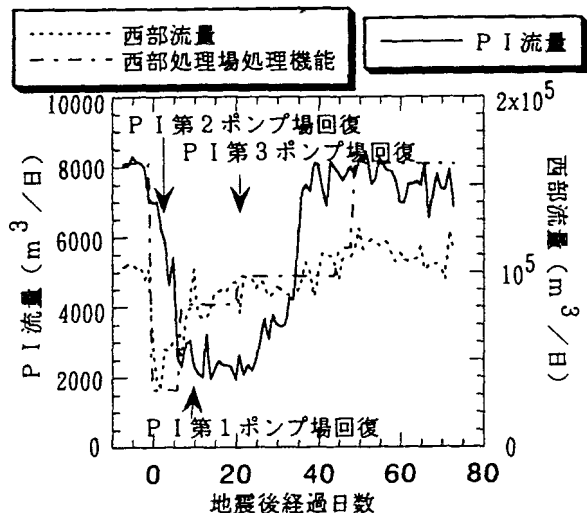


図-5 処理場（ポートアイランド、西部）における下水流量の変化

不便したことで、下水道の大切さが再認識された。

前述のように、水道の供給停止と復旧は下水道の機能に波及した。地震後4日間水道が断水中にも係らず、豊中市の庄内処理場では処理能力の倍近い流入水があった。一方で、神戸市西部処理場においては、2系列の処理施設のうちの 하나가処理停止となったが、断水のために流入下水量が少なく、残りの系列で通常に処理できた。

## (2) 水道被害の波及

ここでは、断水が下水道の機能に及ぼした影響に関し、神戸市下水道局のデータ<sup>10)</sup>を基にした定量的な考察を試みる。なお、以下の図において、横軸には地震発生当日の1月17日を時間の原点として地震後からの経過日数を示す。

図-5は神戸市のポートアイランド(PI)処理場と西部処理場における下水流量の変化である。PI処理場の放流量は流入量にほぼ等しいと仮定した。第1ポンプ場は1月26日に、第2ポンプ場は1月19日に、第3ポンプ場は2月7日に機能が回復した<sup>11)</sup>。

ポートアイランドでは橋梁添架の送水管が破損したため、地震直後から完全に断水した。病院などの一部では2月初旬に通水されたが、ほとんどの地域は2月中旬まで断水の状態にあった。図-5からわかるように、PIの下水流量は地震後5日目にほぼ最低になり、その状態は2月中旬まで続いた。ポートアイランドでは多くの高層建築物において受水槽の水が数日間使用できたことと、プールなどの貯水を用いて水洗トイレを維持できたことにより、地震後5日間程度における下水流量の低下傾向はゆるやかである。ポートアイランド内の三つのポンプ場は、管渠からの泥水流によって水没し、

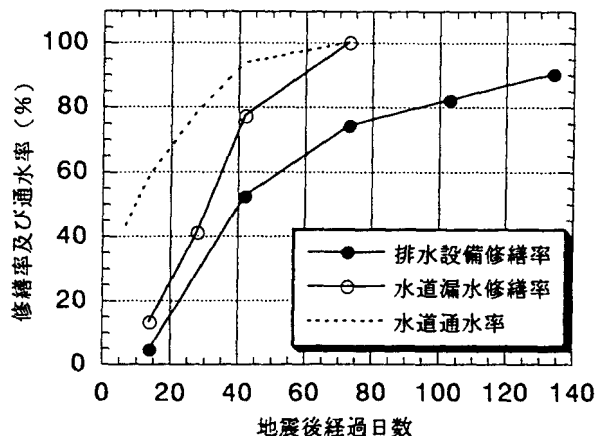


図-6 神戸市における上下水道の修繕率

機能を停止したが、いずれも、水道が復旧する前に機能を回復したため、水道からの流入水による機能停止の影響は発生しなかった。

西部処理場では、第2系列のみが運転状態になり、全体の処理機能が20%に低下した。1月24日には第1系列の一部が運転可能になったため、50%の処理機能が確保された。処理機能は2月7日に60%、3月3日に70%、3月7日に100%に回復した<sup>11)</sup>。この処理機能(図中の細線)と2つの系列の処理水量の合計値(破線)を比較すると、処理場の機能回復量は汚水の回復量をほぼ上回っているため、機能低下の影響が下水処理に及ぶことはほとんどなかったと言える。

排水管の破損やトイレのつまりに伴う排水設備の修繕件数(文献11)に示されている修理受付件数の月末データから算定したものを5月31日時点の修繕受付件数(14,464件)で割って修繕率を求めると、図-6の曲線(●印)となる。このデータと比較するため、水道の通水率と漏水修繕率を1月、2月、3月の月末ごとにプロットした。なお、この修繕率は、道路上と宅地内における水道の修繕数を、通水率がほぼ100%になった3月31日における値(64,613件)で割って求めたものである。

下水道の修繕率は水道のそれを下回っている。その理由としては、水道が復旧して初めて下水道の被害に気がついたことが考えられる。また、下水道工事の公認業者は水道の工事も取り扱っており、水道の復旧を優先したことも一因である。これらの理由により、水道が復旧しても、トイレが使えないなどの問題が生じたのである。上下水道の修繕率が同一地域で同程度に進むことが理想的であり、正常な水循環を回復していく上では望ましい。

図-7には、宝塚市における汚水量、配水量、断水率、ガスの供給率を示す。宝塚市では公共下水道の流量を

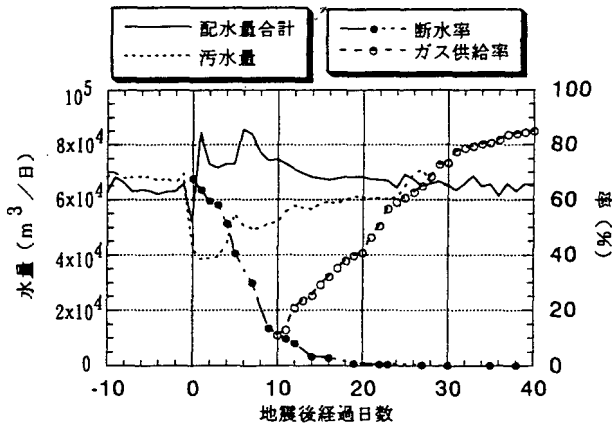


図-7 宝塚市における上下水量の関係

15地点で定期的に測定している<sup>10)</sup>。ここでは、このデータを基にして汚水量(2月中旬まで)を算定した。

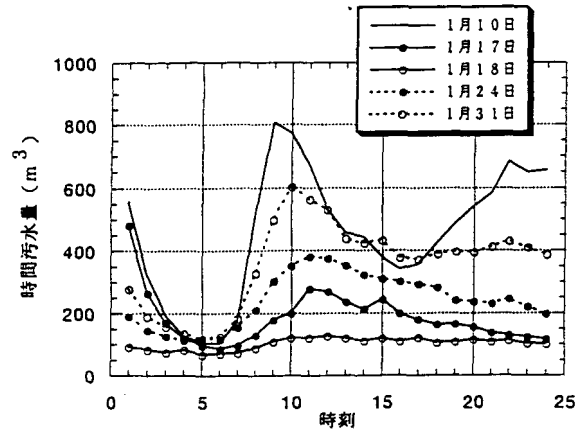
地震直後は生活用水などの使用が減ったので、汚水量は減少している。一方、配水量<sup>10)</sup>は地震前よりも増加している。この原因としては配水管の破損による漏水が考えられる。宝塚市の雨水管の大部分は従前から水路などを利用した開水路である。護岸の崩壊などもあったが、ほぼ流下能力を維持できた。このため、漏水は污水管に流入せず、雨水管を通して排除されたものと考えられる。

断水率の低下に伴い、汚水量は漸増しており、逆に配水量は減少する傾向にある。断水の解消後、ガスの供給率の増加は汚水量の増加に関係しているように見受けられる。これは給湯器やガス風呂などの再使用によるものと考えられる。このように、汚水の発生は水道の復旧だけでなく、ガスの供給状況にも依存した。ちなみに、ガスの復旧完了日は3月25日である。

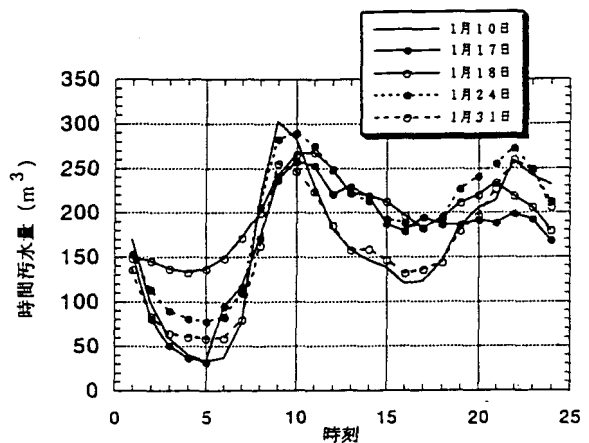
図-8は、宝塚市の代表的な污水幹線(宝塚幹線と中山安倉幹線)における時間汚水量の変化<sup>10)</sup>を示したものである。地震前(1月10日)、汚水量は、午前9時と午後10時頃にピークをもつ典型的な水道使用パターンに対応した変化となっている。

地震直後から、宝塚污水幹線区域のほとんどでは、断水し、ガス供給も停止した。1月17日のデータによると、汚水の増加が昼間にやや見られるが、18日には通常の水使用パターンを示していない。図-8(a)より、17日には受水槽などで蓄えられた水が使用可能であったが、その1日後にはそれも不可能であったことが伺える。時間の経過とともにこの区域の断水は徐々に解消され、26日には完全に通水した。その結果、24日さらには31日において、午前中における汚水量のピークが顕著に見られるようになった。

23日までは病院やホテルの公共施設を除いて、都市ガスの供給は停止した状況にあった(図-7参照)。24日



(a) 宝塚幹線



(b) 中山安倉幹線

図-8 宝塚市における時間汚水量の変化

にはまだ10%の復旧にも満たず、31日になって25.2%に回復した。ガスの供給再開によって風呂が使用され始めたため、図-8(a)のように、24日には夜間汚水量がそれほど増えていないが、31日の夜間汚水量は増加し、そのピークの存在がやや見え始めるようになった。

一方、中山安倉幹線地区では地震当日もほとんど通水状態にあり、ガスの供給停止は地区内の一部に限定された。従って、図-8(b)に見られるように、地震後も汚水量の大幅な減少は見られない。通常時(1月10日)と比べ、地震当日の午後や翌日の早朝と午後の汚水量は増えたが、午前9時と午後10時頃に見られたピーク値は低く抑えられる一方、最小値は増大している。このようなパターンを示すのは非日常的生活を余儀なくされたためと推察される。

次に、3市(神戸、尼崎、芦屋)の下水処理場における機能低下が放流水に与えた影響について水道の断水との関係で検討する。なお、神戸市の中部および西部処理場では一部処理機能が低下したが、流入してきた下水量を全て二次処理できたようなので<sup>11)</sup>、神戸市においては東灘処理場を主に対象した。

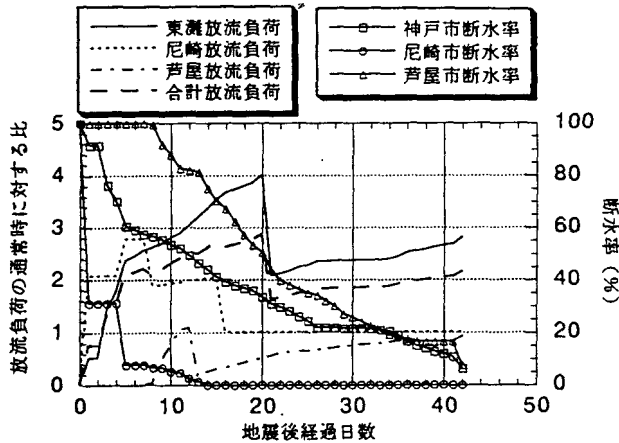


図-9 被災した処理場からの放流汚濁負荷量の試算結果  
(神戸市、尼崎市、芦屋市)

3月始めまで降雨がほとんどなかったため、処理場に流入した下水量を水道の断水率より求め、放流汚濁負荷量の変化を試算することにした。実際の下水量には水道からの供給以外に、地下水や漏水による不明水も加わることが考えられるが、それらの量を予測することは不可能なので、ここではこの不明水を無視することにした。放流汚濁負荷量の試算式は次式によった。

$$\frac{\text{下水処理人口} \times (1 - \text{断水率}) \times \text{放流水質}}{\text{下水処理人口} \times \text{通常時の放流水質}} \quad (1)$$

上式における分子は地震後の上下水道施設の機能低下時における下水処理場からの放流汚濁負荷量を、分母は通常時のものを示している。ただし、前述のように下水量を正確に予測することは難しいので、試算式では下水量の代わりに下水処理人口を用いた。下水道法施行令による放流水の水質の技術上の基準<sup>12)</sup>は、通常の高級処理ではBODを20mg/l以下に、簡易処理では60mg/l以下に、殺菌処理のみでは120mg/l以下に規定している。そこで、ここでは、通常の高級処理に比し、簡易処理と殺菌処理の放流水質をおのおの3倍と6倍に仮定した。その結果、断水率の時系列変化に対し、各市の放流汚濁負荷量の通常時に対する比は図-9のように求められる。図中に示す合計放流負荷とは3市の放流汚濁負荷量の合計値を意味する。

東灘処理場の放流汚濁負荷量は、神戸市の断水率が低下するに従い、通常のもの4倍まで漸増している。運河を使った仮設沈殿池による処理が2月7日(地震後21日)に開始されると、それは2倍程度にまで低下する。神戸市の全処理場に対する合計放流負荷を見ると、ピーク時には通常約2.5倍に達したが、2月7日以降には約1~2倍に変化した。芦屋処理場では地震直後に処理が全く行えない状況にあったが、1月30日(地震後13日)までに仮復旧を終えたので、放流汚濁負荷量

は通常値を超えることがなかった。これは水道復旧との兼合いがうまくいった例と言える。

今回の地震は冬場に起こった。夏季の災害を考えると、被災地に与える環境面の影響は深刻なものになるに違いない。断水は、水洗トイレの機能停止を起こすとともに、健康管理面にも影響した。今後はこのような相互連鎖の解決も重要なテーマになるであろう。

## 5. 医療機関の被害と機能への影響

医療機関は心身の弱者を治療・看護する施設である。災害時には、施設に入院中の患者だけでなく、被災者が次々と運ばれてくる。こうした状況下で、電気・ガス・水など、病院のライフラインが寸断されると、医療機関はその機能を失う。

災害によるライフラインの途絶、医療用資器材などの供給と被災者の対策に関する報告はこれまで必ずしも多くなかった。その中で、大阪府下の全病院と兵庫県下の200床以上の病院に対して、鶴飼・甲斐・太田は「大規模災害に対する備え」に関するアンケート調査をしている<sup>13)</sup>。265通の回答のうち、飲料水の備蓄は69.8%の、専用井戸は7%の病院が備えていたが、ライフラインの途絶に対して、エレベータ、滅菌装置、コンピュータ、揚水ポンプや厨房機器全部が完全に作動する病院は全体の13%にすぎないことがわかった。このように、災害準備体制は極めて不十分であった。こうした中で、阪神・淡路大震災が起こったのである。

### (1) 医療施設における機能破壊

兵庫県保健環境部では、阪神・淡路大震災に伴う医療機関(被災10市10町内の病院と診療所)の被害や防災に対する備えなどに関して、アンケート調査をしている<sup>14)</sup>。回収数(率)は病院182(81.3%)、診療所1,845(61.5%)である。

調査によれば、自家発電装置、水の備蓄タンク、医薬品、患者の食料、消防本部などのホットライン、地下水、LPガスの備蓄タンクについて、それぞれ、74.6%、46.7%、33.7%、29.3%、24.7%、17.8%、9.9%の病院が地震発生前に設置・備蓄・確保していたようである。鶴飼ら<sup>13)</sup>とほぼ調和した結果が得られている。

施設や設備に損失がなかったか、軽微な補修が必要な病院は全体の38.9%であり、大半の病院では何らかの損傷を受けていた。被災による影響を受けた設備には、被災率の高い順に、MRI(被災率70%)、給水管(56.7%)、エレベータ(40.9%)、人工透析装置(37%)、高架水槽(36.5%)や受水槽(30.9%)がある。自家発電装置と通信設備(コンピュータを含む)の被災率は、おのおの、20.0%と19.6%である。ライフライン施設の中でも、水

に係わる給水施設の損傷が目立っていることがわかる。

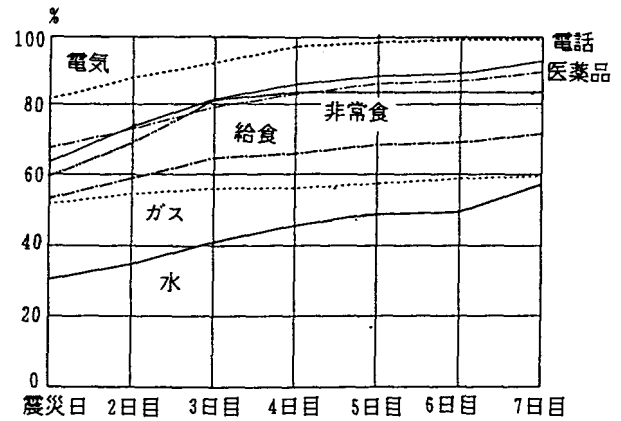
震災当日に対応できた診療機能の割合は、手術が43.1%、人工透析が47.1%、全診療部門が43.5%などである。水などのライフラインの途絶によって、対応できなかったことがわかる。事実、診療機能を低下させた原因の第1は、水道の供給不能すなわち断水(120病院、73.6%の回答)であった。続いて、電話回線の不通および混乱が98病院(60.1%)、ガスの供給不能が88病院(54%)、医療従事者の不足が72病院(44.2%)、施設・設備の損壊が68病院(41.7%)、電力供給不能が54病院(33.1%)である。

医療活動には大量の水が必要であり、人工呼吸器、人工透析装置や消毒装置には一定水圧の給水が欠かせない。高架水槽や受水槽は備えられてはいたが、前述の如く、それらの被災は著しく、備蓄していた貯水槽の水も有効に使えなかった。地下水などの自己水源も少なかった。水の断絶で医療活動は麻痺し、水がないために応急処置や手術ができなかった。断水のため透析治療ができず、亡くなった重症患者もいた。まさに断水は生死をわける一因となった。

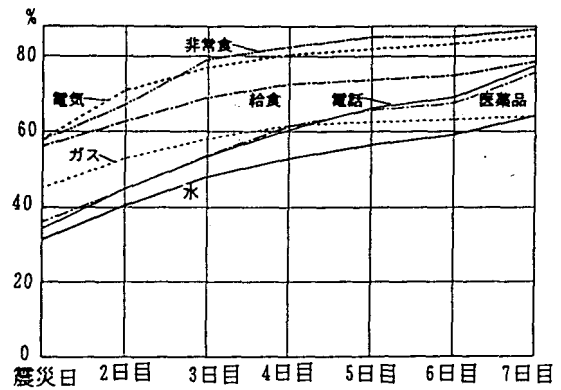
水の確保と要請は、回答した140病院のうち、101病院(72.1%)が市町に対して実施している。以下、県へは32病院(22.9%)、民間協力企業へは32病院(22.9%)が協力要請を行った。自己水源(地下水・備蓄タンク)で対応した病院は29(20.7%)にすぎない。医療機関の運営に必要な最低限の水さえ確保できなかったのは2病院(1.4%)である。これより、用水の確保と多様な給水装置の配置がいかに重要かが認識されるが、今後の対応に当たって水の確保はほとんどの病院(121病院、87.1%)で計画されていない。震災後に水の備蓄タンクを配備したのは3病院(2.2%)、配備中なのは15病院(10.8%)にすぎない。

診療所の防災対策や被害状況は、病院に比べると、さらによくはない。水の備蓄タンクを有していたのは回答した1,806診療所のうち185診療所(10.2%)、地下水の確保は1,819診療所のうち108(5.9%)にすぎない。709診療所の被害設備は、単純X線装置(64.5%)、給水管(33.4%)、通信設備(24.9%)、受水槽(14.9%)、エレベータ(14.4%)や高架水槽(11.8%)である。ライフラインの中でも、水道の供給不能は診療機能を低下させた主原因(74.4%)である。ガス、電話や電気の影響は、おのおの、51.8%、47.9%、37.8%であった。病院に比し、診療所では、必要最低限の水の確保ができなかった診療所が多く(回答した1,206診療所のうち13.8%)、自己水源で対応したのは16の診療所(13.8%)にすぎなかった。

電気、電話、水道、ガスが被災した病院数は、それぞれ、167、167、158、143である。診療所における各



(a) 病院



(b) 診療所

図-10 ライフラインなどの回復状況<sup>14)</sup>

ライフラインの被害数は、1,363、1,120、1,100、726である。これら被災医療機関における電気、電話、水、ガス、医薬品、非常食や給食の回復状況を震災後1週間について見ると、図-10のようになる。復電は比較的早いものの、水とガスの回復が遅れている。このため、医療機能の復帰にはかなりの時間を要することになった。なお、震災直後の被災率は水道よりもガスの方が低いですが、復旧の進捗状況は水道の方がよい。これは、病院では中圧ガスが使用されていたり、プロパンガスが使われたことに起因しているものと考えられる。

ライフラインの確保はまさに病院の生命線である。阪神・淡路大震災では、建物に被害がなかった病院でも、高架水槽や受水槽などの給水施設が損傷した。これにより、給食機能が麻痺したり、院内が水浸しになり、検査・治療に支障をきたした。また、断水が病院の機能に大きく影響した。防災体制を強化する上で、給水施設の補強は今後の大きな柱にならなければならない。

## (2) 病院の被害とその対応事例

建物自体には診療が中断してしまうような問題は多くなかったが、現実には多くの医療機関でその機能が麻痺した。それは既に指摘したように、ライフライン

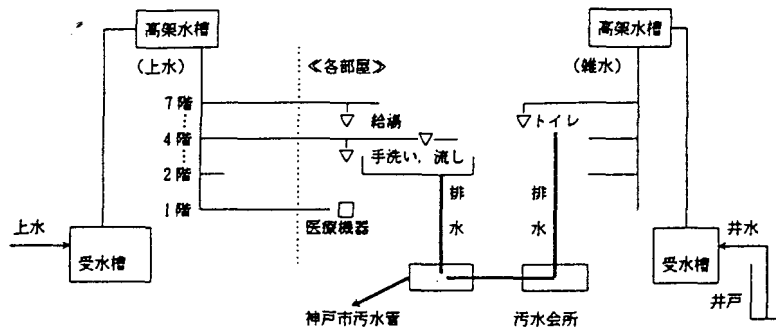


図-11 神鋼病院の給排水衛生設備<sup>17)</sup>

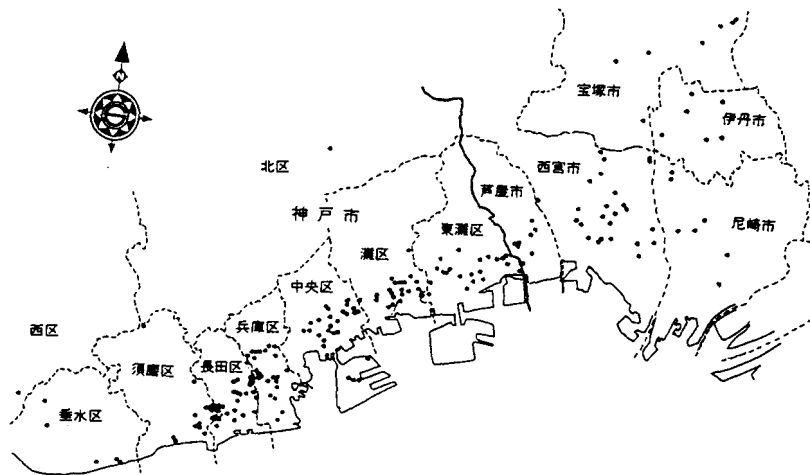


図-12 出火点の地域別分布<sup>18)</sup>

の破壊や建築設備の損傷によって、水やエネルギーを確保できなかったからである。なお、給水や水道などの状況を含めたライフラインの影響に関し、個々の被災病院を対象にした聞き取り調査やアンケート調査については文献 15) や 16) に詳しい。

ここでは、1994年5月1日にリニューアル建築された比較的新しい神鋼病院の被災状況<sup>17)</sup>を示す。なお、この地区は今回の地震で最もひどい被害を受けた一つである。周辺の神戸製鋼関連のビルの多くは倒壊したが、病院の被害は最小限に留まった。

地震直後、神戸市の水道は断水した。また、停電に伴い、上水と雑用水ポンプは運転を停止した。これにより、大量に水を使用する透折・中央材料部などは機能しなかった。

給排水衛生設備(図-11)のうち、1階から6階の建物内外の給水・排水管や井水管の多くが切断・破損した。上水高架水槽は天井パネルの陥没・側板パネルの破損、雑水高架水槽はマンホールパネルの破損・内部支柱の脱落・側板パネルの亀裂を生じた。ともに大破の状態であり、水槽より漏水した。配管トレンチ内でも漏水が見られ、その水は防火水槽に流れ、満水状態になった。単独二槽型の上水受水槽には約80%の上水

が残った。この水は、給水車がくるまで、飲料水として使われた。

神鋼病院では、水道は飲料用・手洗い・医療機器の洗浄に、井戸水はトイレ洗浄・散水・冷却塔補給水・消防用水に使っていた。揚水ポンプと配管の損傷が軽微だったため、1月18日15時52分に井戸水が使われた。これで、衛生面の確保、医療機器と吸引装置の冷却水として市水から井水への切替、消防用水や清掃用水の確保が容易となった。

地下排水管の漏水については応急処置がされなかった。地中井水管の破損も考えられたため、井水ポンプを停止し、雑水受水槽への補給は市水へ切換えられた。

1月20日には高架水槽の仮配管が完了し、同日15時46分には受水を開始した。給水設備のうち、2月18日に配管系が1次修復し、3月6日には給湯を開始した。上水高架水槽は4月16日、井水高架水槽は4月27日に正常状態に回復した。

## 6. 消火活動への影響

### (1) 地震火災

図-12は兵庫県下における出火点の地域別分布状況

(地震発生から1月19日まで)<sup>18)</sup>を示したものである。小規模のうちに消火されたものを含めると、火災は震度7地帯を中心にほぼ均一に発生したことがわかる。

地震発生後時間が経過した後も、火災は同時に多発した。大規模な延焼火災が数多く発生し、それはゆっくりと拡大していった。飛火火災や再燃火災も発生した。耐火造からの出火や延焼もあった。強震動を受けたことにより、消防設備などが損壊した他、種々の消火活動の障害がでたため、市民の消火活動が広範囲に見られた。

火災原因の調査と分析がいくつか試みられてきている<sup>18)~21)</sup>。それによると、電気やガスの被災と応急復旧の影響が指摘されている。例えば、室崎の結果<sup>19)</sup>によれば、次のようである。7市182件の火災(1月17日~19日)のうち、50.5%の火災は地震直後の1時間以内に集中した。84件の出火原因(ヒアリング調査)は38.6%が電気関係、18.1%がガス関係、10.8%が電気とガスに係わっている。神戸市内で30棟以上が焼失した22件の出火原因は、電気が2件、石油ストーブまたはガスが5件、不明が15件である。22件のうち、地震直後の火災が大部分(16件)で、4件が6時30分から7時30分までに、2件が午後(14時30分と17時)に起こったとしている<sup>20)</sup>。

神戸市消防局の調査<sup>21)</sup>によれば、地震発生後から1月27日5時45分までの市内火災は175件である。火災の発生日は17日が109件と最も多く、18日が14件、19日が15件、20日以降が3~8件/日である。17日6時までの建物火災数は57件で、そのうち、1万m<sup>2</sup>以上焼失した火災は10件、1,000m<sup>2</sup>以上では29件である。出火原因が判明した81件の内訳は、電気44件、ガスストーブ2件、ガスコンロ3件、石油ストーブ5件、都市ガス(他の出火原因と重複するものを含む)6件などよりなる。電気に関係した火災数は、電気設備・器具類24件、家電製品などの電源コード11件、屋内配線9件である。

一方、震災によって、関西電力の電力設備は多大な被害を受けた。その結果、神戸市内に電力を供給する3つの基幹変電所(神戸、新神戸、西神戸)は、図-2に見られるように、地震発生と同時に停電した。その後、神戸市内に送電を再開したのは、17日8時2分の神戸変電所が最初であった<sup>6)</sup>。従って、この下位につながるいくつかの変電所での受電は早くとも8時2分以降になる。同時刻に受電した湊川変電所(神戸市長田区への電力供給を行う)はその中の一例である。

文献20)で指摘された30棟以上の大規模火災22件のうち、電気が原因とされている2件の出火時刻は7時と7時30分である。従って、上記の理由により、指摘された22件の火災は送電とは無関係であると判断で

きる。同様に、神戸市消防局発表の29件の大火は、神戸市内の変電所の最も早い復旧時刻が8時2分であるから、電気とは関係のない火災である。

神戸市消防局によれば、電気火災数は44件であるが、火災発生日時と当該地域への送電時刻を比較した結果、44件のうち14件は火災発生日時に未送電であることがわかった。また、残りの30件の中でも、送電後2時間以上経過して出火したものが20件ある。これらは、送電の再開が火災の原因とは考えにくいものであると判断できる。

電気火災の被害規模は半数以上が小火である。電気火災の原因は、電気器具の転倒・損傷、配線の損傷、これら損傷とガス漏れとの複合にある。送電直後(30分以内)の出火5件は、そのうち4件が電熱機器で、残り1件が蛍光灯火花で漏れたガスに引火したものである。

以上の結果、電気やガスに関係した出火は、各機関から発表された数に比し、それほど多くないことがわかる。そうは言っても、今後は種々の方法によって事故防止対策に努める必要があろう。

## (2) 消防水利

今回の地震では、消防活動に大きな障害が各所で発生したため、火災の拡大を早期に制圧することができなかった。その最大の原因は水利不足にある。地震によって消火栓が損壊し、全く機能しなかった。水道管の被災で断水したことに加えて、防火水槽の破損漏水や建物倒壊による交通障害ならびに道路陥没などの事情悪化により、消火活動は困難を極めた。こうした中で、海や河川あるいはプールなどからの中継送水に頼らざるを得なかった。

破壊した管路からの漏水は非常に多かった。そのため、水圧を上げて漏水箇所を見つけることは容易ではなかった。漏水箇所は、配水幹線から準幹線および枝線へと順次水密性を確保する方法で見つけざるを得なかった。阪神地域の水道は阪神水道企業団からの受水に依存している。給水を受けもつ阪神水道企業団も被災したため、当初の送水量は極めて不十分であった。このことも、漏水箇所の発見を困難にした一つの要因である。

神戸市水道局では、緊急時に飲料水と消火用水の双方を確保するため、21ヶ所の配水池に緊急遮断弁システムを設置していた。二つの配水池をもつ2池式のうち一つは、感知した地震動と流出水の状況から、緊急遮断弁が自動的に閉じるようになっていた。今回の地震では、18ヶ所の配水池で緊急遮断装置が作動して42,268m<sup>3</sup>の水が確保され、応急給水の水源として役立った<sup>7)</sup>。しかし、緊急遮断弁のない配水池(データ不明2ヶ所を除く79ヶ所)では、被災管路からの漏水が激しかったことと

水源からの送水が一時的に停止したため、7ヶ所で1時間以内に、30ヶ所で6時間以上経って全ての貯留水が失われた。その結果、2池式配水槽システムは消火用水を確保できず、地震当日から翌日にかけて発生した延焼火災の消防水利として機能しなかった。

神戸市内には消防水利施設が28,229基設置されていた<sup>22)</sup>。そのうち、公設消火栓は23,595基(83.4%)である。私設消火栓は767基、公設防火水槽は968基、私設防火水槽は335基、指定水利は131、その他の水利は2,503である。耐震性の防火水槽は629基である。

非耐震の防火水槽の一部は、今回の地震によって躯体または採水管が損傷を受け、減水や吸水不能となった。また、一部の地域を除いて、ほとんどの消火栓は被害を受けたり、無被害でも水圧・水量不足によって使用できない状態にあった。能島・亀田は、文献<sup>23)</sup>において、検討の対象とした33件の消火栓のうち、使用可能だったのはわずか4件と報告している。このため、貯水槽、防火水槽の水を利用せざるを得なかったが、水はすぐに使い果たされた。火勢が非常に強いので、消防隊は、プールや河川などの水利によって火災防衛活動に努めたが、水が絶対的に不足したため、海水を利用した消防体制が採用された。

次に、西宮市消防局の消防活動の事例<sup>22)</sup>を示すと、次のようになる。

西宮市では、地震発生から6分後の5時52分から7時までの間に22件の火災が発生した。17日は34件、18日は4件、19日は3件、火災の発生数は3日間で計41件である。水道は16万3,800世帯で断水し、2月28日に応急復旧が完了した。また、市内に637ヶ所ある危険物施設は、防火塀の倒壊・亀裂47件、建物自体の倒壊・傾斜40件、配管の切断・破損40件など、205ヶ所で何らかの被害があった。

消防水利としては、消火栓3,826基、防火水槽927基、井戸51基、プール88基、受水槽36基ならびにマンホール1基があった。自然水利としては、溝水池、河川や海が考えられていた。その消防水利の被害としては、防火水槽が27基、井戸が8基あった。

消火栓は、地震発生とほぼ同時に、一部の地域を除いてほとんどが断水したため、使用不能状態となった。このため、防火水槽が29基、水流の量の少ない河川が20基、学校のプール6基、井戸4基、側溝4基、屋外消火栓1基、受水槽1基、配水池1基が使用された。河川や溝水では、土嚢やビニールシート、倒壊家屋の瓦礫などを使用して、水がせき止められ、取水された。これは、渇水による教訓から、1994年9月に「異常渇水に伴う特別消防体制」のマニュアルを各消防署に通知して功を奏したためである。

西宮市の世帯数は神戸市の約28%、出火総数は約

25%、1月17日の出火件数は約31%、防火水槽は約71%である。このことに加えて、消防局と消防団のポンプ車両数が出火件数を上回ったことや防火水槽が多かったことなどにより、西宮市の消防活動は神戸市に比べてうまく機能した。

平常時の消防水利の約8割は水道に設置されている公設消火栓に依存しているが、今回の地震では、その能力をほとんど発揮することができなかった。今後は、防火水槽の増設、地下水特に井戸の利用など、消防水利の多元化を考える必要がある。

## 7. 廃棄物焼却施設に対する影響

ここでは断水が廃棄物焼却施設の機能に与えた影響の概要<sup>24)</sup>を述べる。

今日、主な一般廃棄物の焼却処理施設においては、発生した余熱をボイラーによって取りだし、発電などに利用するシステムとなっている。また、排ガスの洗煙なども実施しており、そのために水道や工業用水道が利用されている。

今回の地震により、水道や工業用水道の断水は、このような廃棄物焼却施設に対しても深刻な影響を与えた。断水の影響を受けた施設を表-2に示す。表中には、各廃棄物焼却施設ごとの焼却能力、水道の復旧完了日、施設の運転再開日を記している。いずれの施設も、電気、ガス、水道、電話のライフラインが復旧してから、運転が再開された。中でも、炉の運転再開の最大のネックとなったのは断水であった。

神戸市で焼却処理をしているクリーンセンターの水道の用途は、蒸気を利用した燃焼空気の加熱、燃焼ガスの冷却、燃焼灰の消火、灰運搬時の飛散防止、燃焼ガスの洗浄などである。全てのクリーンセンターでは断水や機能低下のため、受水に支障をきたした。例えば、落合クリーンセンターでは、ガスの停止や水道の断水はなかったが、給水圧が低下したため、給水量が不安定となった。これは、水道局が漏水防止などのために減圧措置をとったことによる。東クリーンセンターのプラント設備において水道(φ200)と工業用水道(φ150)の埋設配管は地盤の陥没によって寸断されたが、HIP管で仮復旧された。放流水配管(φ400)も2箇所破断したが、補修された。東クリーンセンターと荻藻島クリーンセンターでは工業用水道を利用していた。工業用水道の復旧は、おのおの4月12日と3月1日であり、水道の復旧よりも遅れた。このため、水道を利用して運転が再開された。

尼崎市では、第1機械炉、第2機械炉、第3工場の3基の焼却炉を使用していた。このうち、第2機械炉ではボイラーで余熱を取りだして蒸気タービンによる発



表-2 廃棄物焼却施設の復旧

廃棄物焼却施設	焼却能力	水道復旧日	運転再開日
神戸市 東クリーンセンター	690ton/日 (230ton × 3)	2月19日 (工水4月12日)	2月20日
落合クリーンセンター	450ton/日 (150ton × 3)	1月22日	1月23日
港島クリーンセンター	450ton/日 (150ton × 3)	2月10日	2月11日
苅藻島クリーンセンター	600ton/日 (200ton × 3)	2月6日 (工水3月1日)	2月6日
西クリーンセンター	600ton/日 (200ton × 3)	1月23日	1月24日
尼崎市環境処理センター	625ton/日	1月19日	1月19日
第1機械炉	150ton/日		
第2機械炉	175ton/日		
第3工場	300ton/日 (150ton × 2)		
豊中市・伊丹市 クリーンセンター	675ton/日	豊中市水道通水 (伊丹市工水 1月26日)	
1号炉	225ton/日		2月27日
2号炉	225ton/日		2月27日
3号炉	225ton/日		1月21日
4号炉 (試運転中)	195ton/日		1月23日

電を、第3工場ではボイラーによって蒸気を隣接工場に供給していた。第1機械炉においては排ガスの冷却に対して水噴射をしていた。このため、水道や工業用水道を使用していたが、いずれもが断水した。そこで、市の環境処理センターでは水道局に対して最優先の復旧を依頼した。2日後には水道が復旧したことにより、運転を一部再開できた。

豊中市と伊丹市では両市の境付近に豊中市・伊丹市クリーンランドを建設していた。三つの炉を使用して焼却を行うとともに、第4号炉を建設して試運転中であった。1号炉と2号炉では排煙用の煙突が折損倒壊するとともに、その影響で水処理施設や苛性ソーダタンクが破壊した。第3号炉では大きな被害がなかったが、伊丹市の工業用水道が断水したため、運転が不能になった。同じ敷地内に豊中市の水道が引かれていたため、これを急拠代替水として使用し、4日後には運転が再開された。このように二つの市にまたがって複数の給水源を有していたことが施設の安全度を高めることにつながった。

芦屋市の焼却施設では、排ガスの冷却用に、隣接する下水処理場の処理水を利用するシステムとなっていた。下水処理場が被災して完全に停止したため、処理水が得られなくなった。そのため、応急的に施設を空気冷却式に改良し、3日後から運転を始めたが、焼却能力は低下した。

気温の高い夏季ならば、廃棄物の蓄積は都市の衛生問題に発展したものと考えられる。今後は、予備的な水源や貯水あるいは焼却炉方式の多様化、焼却の応援依頼など、断水時における対処方法を検討しておく必要がある。

## 8. おわりに

停電は給水停止に至る。電気やガスの供給停止は水質試験をできなくし、安全でない水の供給につながる。水道管の破断は濁水や水質汚染および廃棄物処理の不能や低下などを引き起こし、土砂や地下水はガス管などに流入して、復旧を困難にした。また、用水型産業は制約を受け、冷却水と空調を用いる機器やシステム環境に支障を生じた。さらに、消防に制約を生じ、火災が拡大した。飲料水制約は不衛生な水の使用につながり、人々に精神的なストレスがたまった。このように本論で取り扱ったライフラインにおいては、図-13に示すように、水道機能の破壊が他システムの機能に影響波及した。この被害連関図についてはこれまでも発表されてきているし<sup>1)~4)</sup>、今回の震災でも報告されている<sup>23),25)</sup>。

今日の都市の膨張による超過密性や生活水準の向上に伴い、都市の機能は高度化・複雑化している。それは災害に対する脆弱性を増し、新しい形態の災害発生の危険性を高める。阪神・淡路大震災は複合災害時の被害波及の連鎖性を改めて喚起したのである。従来から問題視されてきた被害の相互連関においては、階層構造に整理した上で、様々なレベルにおけるマイクロな時空間分析が必要である。

水道施設の被害については、現行の耐震技術の適用を推進することで十分に軽減可能であったケースが多かったが、今回の水道被害は、消火活動や災害医療などの緊急対応を著しく阻害するとともに、様々な都市機能の麻痺につながった。また、単なる生活不便というレベルをはるかに超え、あまりに長期的な生活支障の原因となった。震災時に刻々と変化する水需要に対

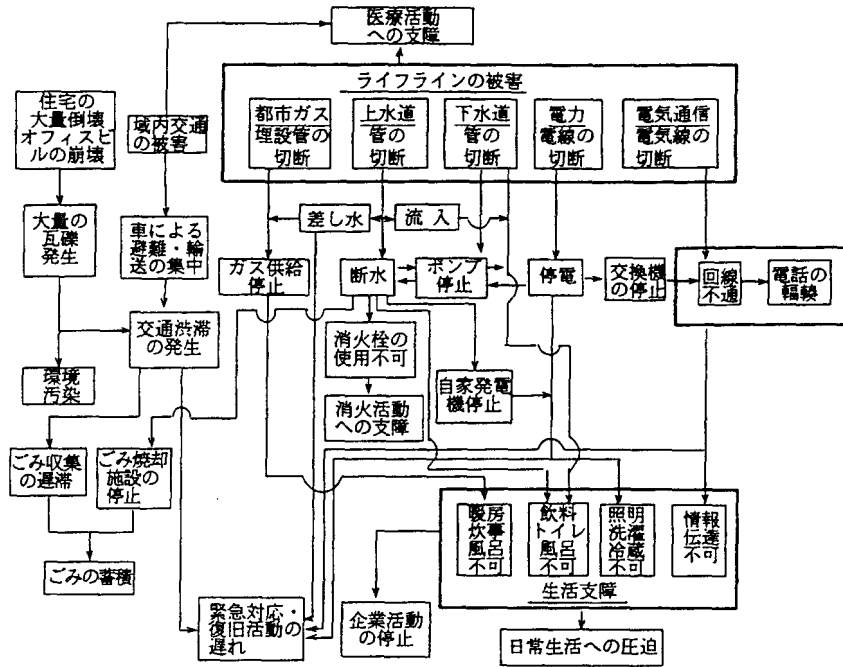


図-13 阪神・淡路大震災で見られた被害連関図

して最低限の水供給機能を損なうことのないよう、今後はシステム間の連携や応急対策あるいは恒久対策を含めた防災システムを構築していく必要がある。

最後に、本文のとりまとめや資料収集に当たり、ご協力を頂いた関係機関の諸氏に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 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, No.344/I-1, pp.323~331, 1984年4月.
- 2) 片山恒雄(研究代表者): 都市震災の連関および波及構造の解明とその震災想定調査への利用に関する研究, 昭和63年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書, 1989年3月.
- 3) 土木学会関西支部: より安全な都市を目指して-ライフライン系の地震防災から-, 平成3年度講習会テキスト, 1991年11月.
- 4) 能島暢呂, 亀田弘行: 地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.231~241, 1995年1月.
- 5) 大阪ガス本社広報対策本部・兵庫地区対策本部広報隊: しんどいなかにもうれしい便利-阪神大震災-ガス復旧情報かわら版, 第3号, 1995年2月16日.
- 6) 関西電力: 阪神・淡路大震災復旧記録, 1995年6月.
- 7) 阪神水道企業団, 神戸市水道局および明石市水道部との私信による.
- 8) 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-送配水形態に着目した考察-, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.645~652, 1996年1月.
- 9) 日本内燃力発電設備協会: 阪神大震災自家発状況調査(第2次報告), 1995年4月28日.
- 10) 神戸市下水道局, 宝塚市下水道部, 神戸市水道局, 尼崎

市水道局と芦屋市水道部との私信による.

- 11) 神戸市下水道局: 阪神・淡路大震災における下水道復旧の記録, 1995年7月.
- 12) 環境庁環境法研究会編: 環境六法(平成6年度版), 中央法規, 1994年2月.
- 13) 鶴飼 卓, 甲斐達朗, 太田宗夫: 災害に対する病院の備えについて, 救急医療, No.16, pp.1659~1664, 1992年.
- 14) 兵庫県阪神・淡路大震災復興本部保健環境部医務課: 災害医療についての実態調査結果, 1995年6月.
- 15) 小堀鐸二研究所: 1995年兵庫県南部地震 医療機関とその救急医療活動に関する調査報告-被災地における聞き取り調査-, 1995年4月.
- 16) 日本医療福祉建築協会: 兵庫県南部地震における病院の被災状況に関する研究会, 1995年7月.
- 17) 神鋼病院: 阪神大震災時神鋼病院対応の記録, 1995年7月.
- 18) 自治省消防庁消防研究所: 兵庫県南部地震における神戸市内の市街地火災調査報告(速報), 1995年3月.
- 19) 室崎益輝: 阪神淡路大震災における地震火災に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告書, No.35・計画系, pp.797~800, 1995年6月.
- 20) 室崎益輝: 火災 “手つかず”の同時多発火災で70h近くを焼失, 日経アーキテクチャ編「阪神大震災の教訓」, pp.85~89, 日経BP社, 1995年3月.
- 21) 神戸市消防局: 兵庫県南部地震に伴う神戸市における火災概要, 1995年4月14日.
- 22) 神戸市消防局ならびに西宮市消防局との私信による.
- 23) 能島暢呂, 亀田弘行: 4.4 ライフラインの相互連関、阪神・淡路大震災-防災研究への取り組み-, 京都大学防災研究所, pp.360~369, 1996年1月.
- 24) 神戸市環境局との私信による.
- 25) 水越 薫, 石田 寛, 早坂 浩: 阪神・淡路大震災の被害連関図, 第2回地震防災シンポジウム(1995), pp.117~118, 1995年10月.

(1996. 1. 16 受付)

# INTERACTION-RELATED DISASTER PROPAGATION BETWEEN WATER SUPPLY SYSTEM AND URBAN FUNCTIONS DURING THE GREAT HANSHIN EARTHQUAKE

Shigeru NODA, Nobuoto NOJIMA, Yoshihiko HOSOI and Yasunori KOZUKI

In the Great Hanshin Earthquake, the effects of water supply cut-off on other lifeline systems and waste incinerator were very severe. The disruption of the water supply systems caused great difficulties in the medical services and fire-fighting. Gas pipes were filled with water leaking from the water and sewerage systems. The inability to operate pumps and emergency generators due to lack of industrial water was a common problem. The recovery of malfunction of sewerage system was affected by water supply cut-off and its restoration process. The effects of breakdown in the electric power system on water supply system were also examined.