

## 都市震害のシステム分析序論

亀田 弘行・岩井 哲  
北原 昭男・能島 暢呂

### A PRELIMINARY INVESTIGATION OF THE SYSTEM ANALYSIS FOR URBAN SEISMIC DISASTER

By *Hiroyuki* KAMEDA, *Satoshi* IWAI, *Akio* KITAHARA,  
and *Nobuoto* NOJIMA

#### Synopsis

A system analysis of an urban seismic disaster sequence is performed. Comprehensive pictures are drawn regarding the elements of urban regions, the types of seismic hazards they are subjected to, the primary and secondary disaster, the emergency operation, and the restoration process. It is also observed how physical damage endangers human lives in each stage and how social functions are involved for post earthquake recoveries. Possible and potential causes that induce or expand seismic disaster are also described in detail. As a practical object of application, seismic disaster analysis for underground commercial and transportation spaces is studied using such methodologies as interpretive structural modeling (ISM), fault tree analysis (FTA), and event tree analysis (ETA), through which hierarchical structures among causes of various forms of disasters and their interrelations are analysed.

#### 1. 緒 論

1964年新潟地震や1978年宮城県沖地震のように、比較的近年に都市域を襲った地震では、ライフライン機能障害や、石油タンク火災、地盤の液状化現象による構造物破壊、宅地造成地の地盤災害など、震度V程度の地震に対しても都市の脆弱性が露見している。その結果、地震の発生頻度に比べてはるかに速い成長を遂げてきた現代都市の災害ポテンシャルの高さが再認識されるとともに、地震による生活環境悪化・都市機能損失に対する懸念が高まり、「都市型地震災害」と特別に分類されるようになった。都市震害が注目されるのは、①首都圏や地方中枢都市が人口の高密度集中化・都市活動の広域化・各種都市機能の高度集中化という点で共通して変容してきたことによって、地震を受けた場合の被害の様相も変化しつつあること、②人命の安全性維持に対する要望が強いことはいうまでもなく、都市生活機能保持あるいは都市空間の快適性保持に対する要望も高まってきたこと、の二点を象徴するものであるといえる。

都市震害の特徴は、都市を構成する人の活動、活動のための都市空間、さらに都市機能を支援する種々の都市基盤施設が同時に地震動の影響を受けるところにあり、多様な被害の同時多発、複合、波及、相互影響もたらす都市機能の低下または喪失、人命への危険の増大を極力抑制・制御することが必要である。都市震害を対象とした災害防止・軽減を考える場合には、こうした多様性・総合性を重視しつつ都市の安

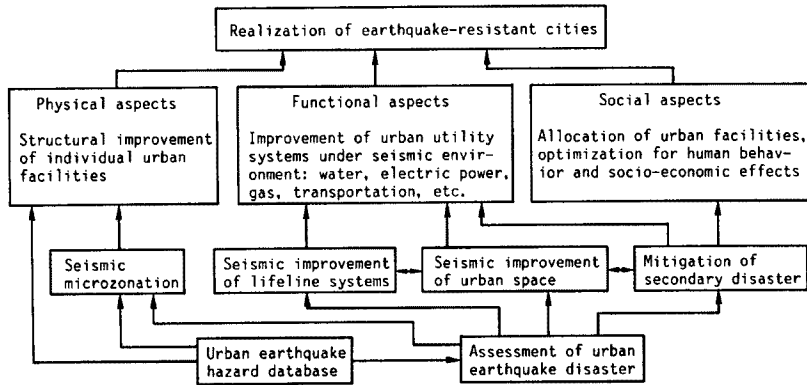


Fig. 1. Scenario for Urban Earthquake Disaster Assessment and Its Mitigation.

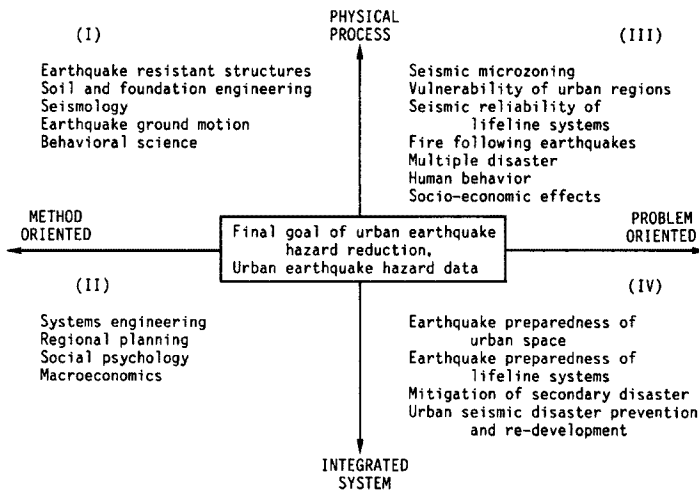


Fig. 2. Research Area of Urban Earthquake Hazard Reduction and Related Fields.

全性・防災性を図る方法論が必要となる。

筆者らは、京都大学防災研究所に新設された都市施設耐震システム研究センターの活動を始めるに当たり、都市耐震研究のあるべき方向を探るため、都市耐震問題に関わる研究領域の分析を行ってきた<sup>1), 2), 3)</sup>。そこでは、都市耐震の研究を Fig.

1のように物理的側面・機能的側面・社会的側面からの総合的研究課題として捉えるとともに、これに関連する個別研究領域を Fig. 2のように整理した。最終目標である耐震的な都市の構成を実現するためには、地震防災に関する個々の研究課題を有機的に結合して系統的・総合的研究を行い、かつその成果を個々の研究や地域防災の現場にフィードバックするという望ましい循環がなされなければならない。このような体系を築くためには、まず都市震害の多様な側面を整理しなおして全体像を把握し、問題の所在を体系的に明らかにしておく必要

がある。つまり都市地震災害の空間的・時系列的な展開や波及プロセスを大局的にとらえることにより都市震害の現象理解を十分に深めたうえで、その深層部分を解明し、震害を支配する要因相互の因果関係をシステム論的に解明することが課題となる。以上のような見地に基くと、都市震害の予測及びその防止・軽減のためのシステム分析モデルを構築する必要性が認識される。そこで本研究では、そのための基礎的研究として都市震害全般に関するシステム論的なフレームワークの完成を目標にすえ、以下の手順で研究を進めた。

- (1) 被害主体である「都市」の構成要素を整理し、各々の地震時被害波及の様相を系統的に分析する。また視点を変えて被害の時系列展開に着目し、種々の被害と災害対応行動の関係を整理する。
  - (2) 各被害にみられる特徴的な様相を簡潔にまとめ、それらの被害発生要因及び要因相互の連関を解明する。
  - (3) 上記の成果をもとに都市震害の分析モデル構築のために有効に用いられると考えられるシステム方法論 (ISM, FTA, ETA) について吟味する。
  - (4) 具体的な研究対象として地下街を取り上げ、(3) で挙げた3つのシステム方法論の実際の防災問題への適用を試みる。
- 以下、(1)については2で、(2)については3で、(3)、(4)を4で、それぞれ扱うものとする。

## 2. 都市震害の被害波及分析

### 2.1 概 説

都市震害をとらえることの困難さの理由の一つに、参考のできる地震が少ないということが挙げられる。このことには、被害を発生させるような地震の発生そのものが稀な現象であるうえに、都市の成長・発展・変容があまりに急速であったため、地震時の被害の様相が予測しきれないという要因が関与している。具体的にいうと、ラジオや地下鉄が無く、自動車が4500台、ポンプ車が38台しかなかったという時代の1923年関東大地震はもはや現代における都市震害予測の根拠とはなりたい点が多いことや、また1976年唐山地震や1985年メキシコ地震のような被害は日本の設計基準からは起きるとは考えられない、という問題である。

もちろんこれらの地震にみられた被害に関する情報は、貴重な経験として地震工学・耐震工学のあらゆる面で有効に活かされているが、現代の都市の震害を扱うということになると、これらの地震をそのまま現代都市に当てはめることは冒頭に述べた理由により不適当である。そこでこれらに加えて、ライフラインの被害が大きかった1978年宮城県沖地震や、石油貯蔵タンクの火災や地盤の液状化災害が目された1964年新潟地震などの比較的近年の地震によって都市が被った被害をつぶさに見つめなおすとともに、さらには地震災害以外の類似災害・類似事故にみられる被害の都市への影響をも、都市震害を考察するための有用な情報源としてとらえておく必要がある。そして被害要因の共通部分あるいは特徴的な部分を抽出し、それらを総合化することによって都市震害のシステム分析モデルを構築して、現代の都市に外挿して被害を予測し、震害防止・軽減のために有効に利用する必要があるといえる。

上記の見地に立つと、災害を見る視点あるいは災害を斬る断面が重要なポイントとなることが分かる。最も基本的な例として、田治米・望月・松田<sup>4)</sup>による災害のとらえ方をFig. 3に示す。災害を引き起こすインパクトを誘因と呼び、災害を受ける人間や施設を被害主体という。また誘因と被害主体をつなぐものが土地条件であり、被害主体と土地条件を合わせて素因と呼ぶ。またひとたび災害が発生すると、その災害が今度は誘因となったりあるいは直接素因に働きかけたりして災害が拡大したり新たな災害が発生する。都市震害を考える場合は、地震が誘因、都市システムが被害主体に相当する。本研究ではこの考え方を念頭に置き、都市震害について次の二つの被害波及分析を行った。

- (1) 都市システムの構成要素に着目した系統的な震害波及プロセス分析
  - (2) 震害の時系列的展開に着目した被害波及分析
- 以下、前者については2.2で、後者については2.3で扱う。

### 2.2 都市の構成要素と震害波及のプロセス

Fig. 3の考え方では、都市震害は、被害主体（都市システム）に対して誘因（地震による外力）がインプットされた結果としてのアウトプットとしてとらえることができる。この観点から、震害の発生から波及に至るプロセスを、都市の構成要素別に系統的に整理した結果をFig. 4に示した。以下同図に従い、(1)地震ハザード、(2)都市の構成要素、(3)一次災害、(4)二次災害、(5)緊急措置～復興、の5項目について説明を加えることとする。

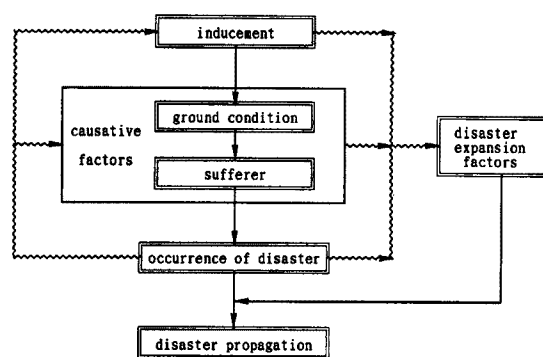


Fig. 3. General Interpretation of a Disaster Phenomenon (Ref. 4).

(1) 地震ハザード

地震災害において構造物あるいは人間が被る被害をみると、地震が外力として現れる形態は地震動、地盤変状、津波の3者に大別される。ここでは、地震発生が都市を襲う3つの外力となるまでのプロセスと、被害の様相を左右する初期条件（日時・季節）を地震ハザードとして以下に記述する。

(a) 地震

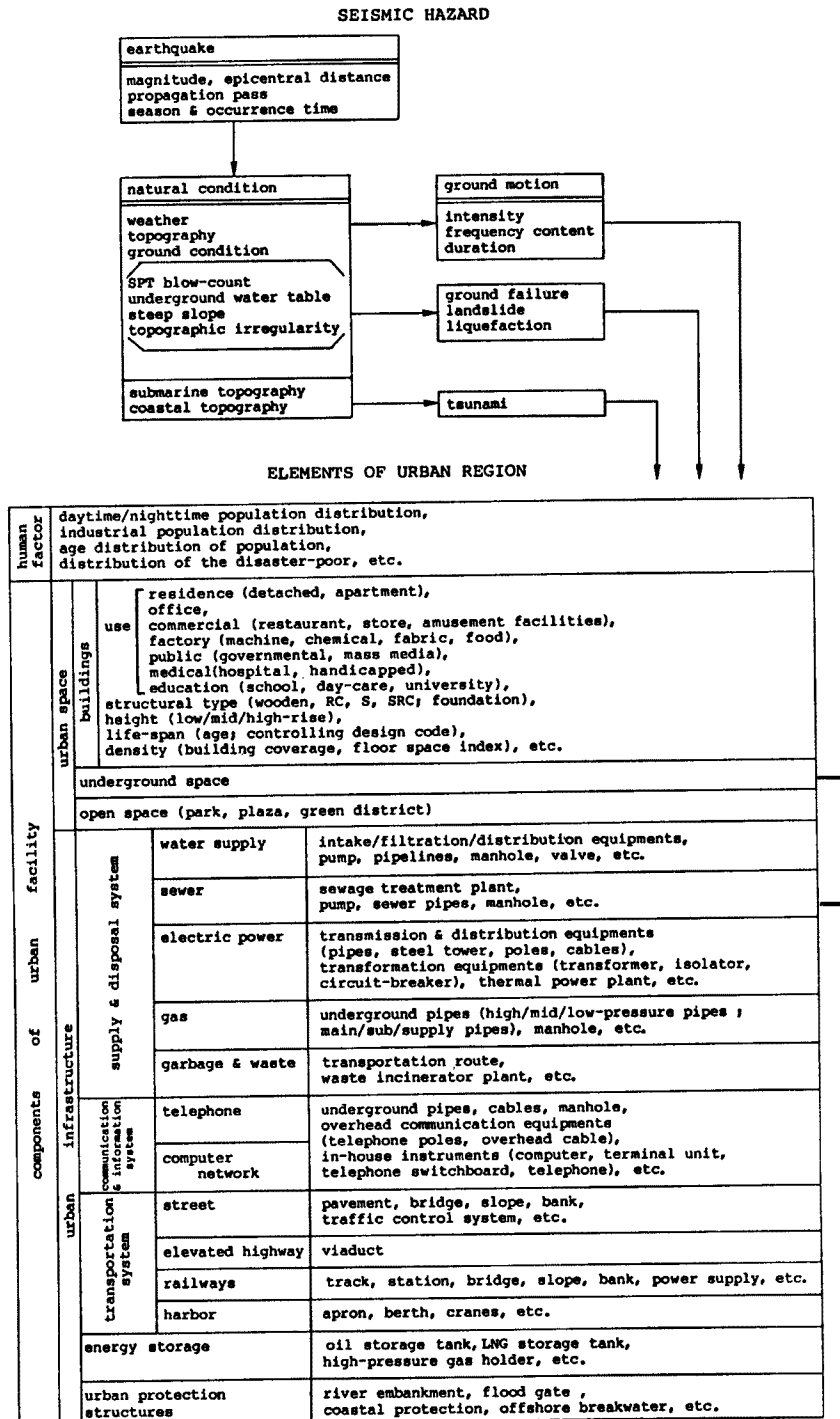


Fig. 4. Sequence of Earthquake Effects on Urban Region.

地震そのものについては、マグニチュードあるいは断層の破壊長さによってその規模及び性質が表現される。

(b) 都市までの伝達経路の長さ（震源距離/震央距離）と伝達経路における地震動の特性（距離減衰特性）

前者は都市と震源/震央との距離である。後者には、この距離に加えて伝達経路の地殻構造が深く影響を及ぼす。

(c) 自然条件

地形・地盤条件は、地盤変状の発生及び地震動の増幅特性に大きく影響する。地形・地盤条件は都市の立地条件と関連が深く、その特性は主として地盤の地質年代やN値分布で表現される。都市震害で特に問題となるのは、軟弱地盤や、異種地盤の境界部分、ゼロメートル地帯、人口造成地盤（宅地造成地、埋立地）、不整形地盤などである。これらは、Fig. 3 でいえば素因の一部であり、広い意味では都市の構成要素であるといえるが、本研究では、地震動の特性を大きく左右し、しかも時にはそれ自体が外力となる可能性を考慮し、地形・地盤条件を地震ハザードに分類した。また地震発生前後の気象条件も災害の様相を変化させる。例えば地震火災の動向は風速・風向に左右されるし、降雨は地盤を緩ませ、地震時に地すべりを誘発したり、堤防決壊時の水害の危険性を高める要素を持つ。このように気象条件は、誘因を強めたりあるいは素因を弱めたりする働きを持つといえる。また津波の規模・伝播速度は地震規模と震源位置

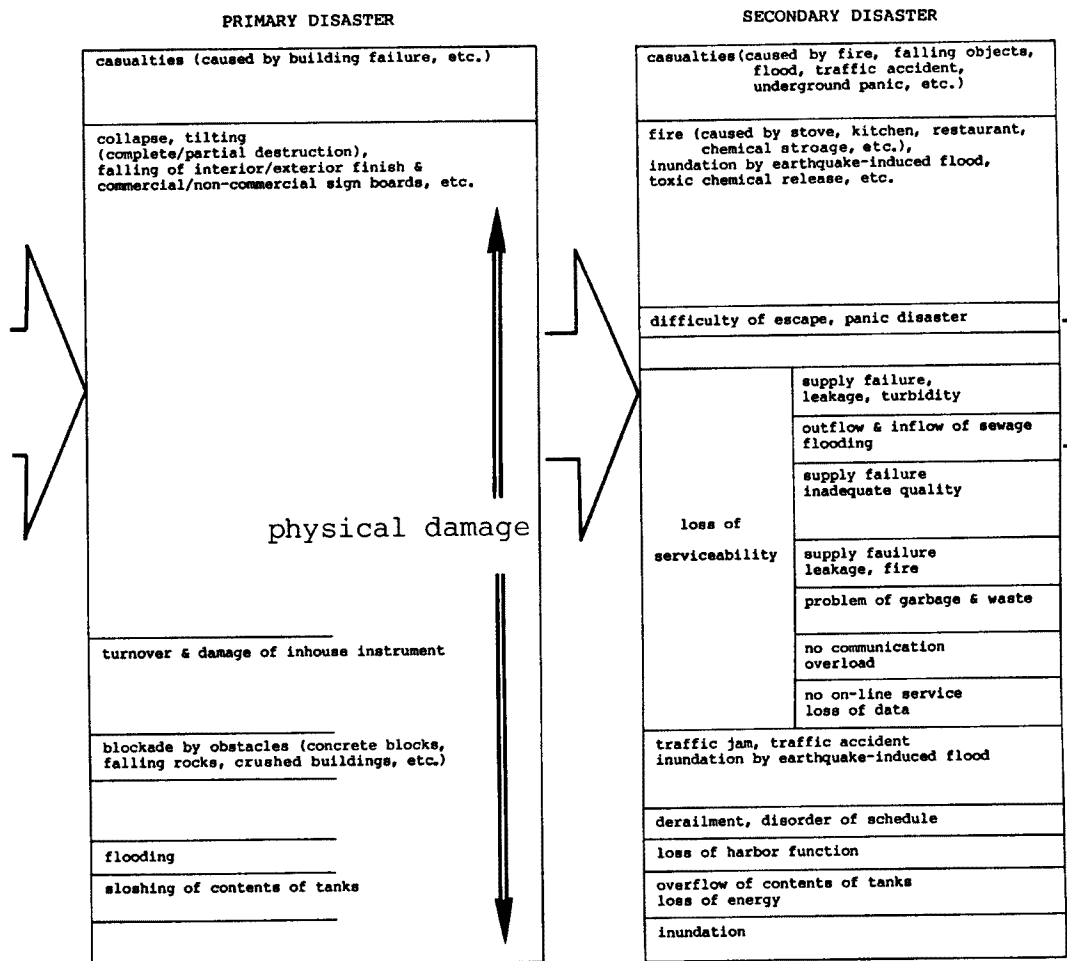


Fig. 4. (Continued)

でほぼ決定されるが、海底地形や海岸地形もこれらとともに大きな影響を及ぼす。

(d) 外力

(i) 地震動

構造物や施設の地震動による被害は、耐震性と地震力の力関係ということが出来る。地震動を特徴づける要因としては、強度・卓越振動数・継続時間などがある。これらの要因と、構造物の応答特性及び強度とのかねあいから被害が発生する。

(ii) 地盤変状

地震動そのものによる構造物被害の他に地盤変状による被害があり、それらは、①斜面崩壊による土砂が外力となって構造物を破壊、②地すべりが生じて地盤と共に構造物が滑動、③軟弱地盤での支持力が低下、④液状化現象が生じて支持力が低下、などの形で現れる。

(iii) 津波

沿岸地域では地震後の津波が新たな外力となる可能性があるため、警戒が必要となる。1933年の三陸地震津波の際には、マグニチュード8.3の大地震によって津波が三陸沿岸を襲い、3008名の死者・行方不明者が発生した。また1983年日本海中部地震では、死者104名のうち津波による死者が100名にのぼったのをはじめとして、港湾施設に多大な被害をもたらした。従来、津波の危険度が低いと考えられていた日本海沿岸でも、地震時には十分な警戒が必要であることが指摘されている。

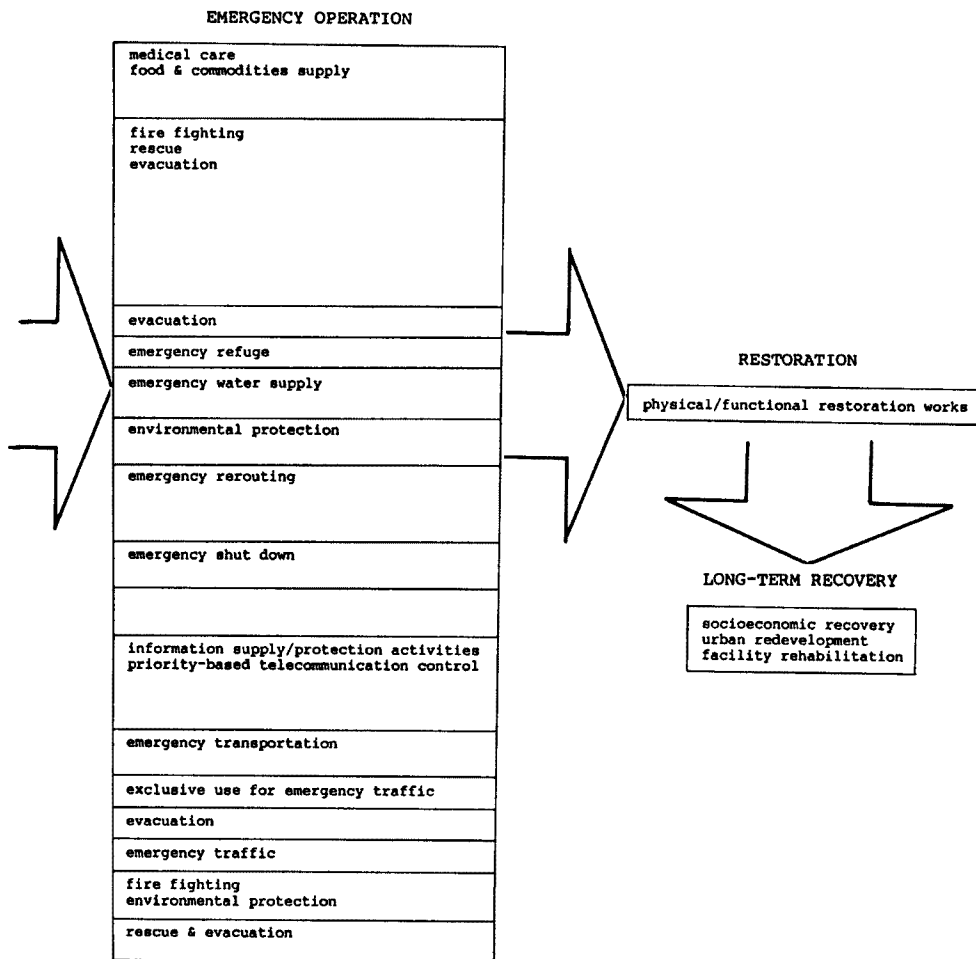


Fig. 4.

(f) 初期条件（日時・季節）

地震による物理的な被害は地震発生の日時に影響されないが、都市の活動状態は日時や季節によって大きく異なるため、人的被害や二次的な災害の様相は地震発生時間に強く左右されることになる。例えば、夕食前で火を使用する家庭が多い場合や寒冷期で石油ストーブが用いられている場合には出火危険性が高いこと、通勤時間帯や休日などでは多数の人がターミナル駅や映画館など特定の場所に集中するため群集災害の危険性が高いことなどである。

(2) 都市の構成要素

地震による外力を受ける「都市」における震害波及を考えるにあたって、その構成要素を明確に分類し把握しておく必要がある。ここでは、(a) 人間、(b) 都市空間（建物・地下街・オープンスペース）、(c) 都市基盤施設（供給処理システム・情報通信システム・交通システム・エネルギー貯蔵施設・都市防護施設）に大別したうえで、都市震害を扱うという観点から、各々の構成要素を細部にわたって分類し体系的に整理した。

(a) 人的条件

人的被害の発生や避難行動は、どういう人間がどこに分布しているかに左右される。昼夜別・産業別人口分布という側面から人間をとらえると共に、避難行動力が弱く保護が必要な災害弱者の分布を考えておくべきである。また社会的対応が未熟で混乱の引金となる恐れのあるような人もいることも考慮に入れる必要がある。

(b) 都市空間

(i) 建物

都市に構築された建築物群を、純粋に構造的な面からとらえて損傷の有無を問題としている場合には、構造別の分類（木造、鉄筋コンクリート、鉄骨造、鉄筋鉄骨コンクリート、れんが、ブロックなど）、高さ別の分類（低層、中層、高層）、あるいは経年別（老朽度、耐震基準）の分類をしておけばよい。一方、病院・行政機関など地震時の機能喪失が社会的に影響を及ぼす施設も多いことや、「爆発の危険性のある化学工場」あるいは「延焼する可能性が高い住宅密集地域」等といった防災の見地に立って建築物を見る場合には、以上の分類に加えて、用途別分類（住宅、オフィス、商業、工場、公共、医療、文教）とその分布や、都市全域での建築物密度の把握が不可欠となる。

(ii) 地下街

現代都市の特徴の一つに、「平面的・立体的に高度な土地利用」という点が挙げられるが、今日の地下街の発達はこの象徴するものであるといえる。地下街には飲食店・衣料品店などが多く設置され、出火・延焼・煙の発生等の災害危険性が高い。また密閉空間に近いので災害の波及は急速で、しかも多数の利用者がいるため群集災害が生じやすい。都市地震防災を考えるうえで特に重視すべき対象として4.であらためて取り上げ、その地震災害波及について行った具体的な分析結果の一部を示すこととする。

(iii) オープンスペース

ここでは、平面的・立体的に稠密に利用されている都市空間のなかで、災害時に安全空間となりうるような空間をオープンスペースという。地震火災や地震水害をとまなうような地震災害では、公園・運動場などのオープンスペースが広域避難所として防災的役割を果たす。また、広域避難所と同時に整備されている道路も、避難路と延焼遮断帯を兼ねた役割を持つと考えられるため、ここに分類した。

(c) 都市基盤施設（インフラストラクチャー）

インフラストラクチャーはいわば都市の下部構造であり、都市機能を支える施設であるとともに、都市の発展にともない集積化され整備された社会資本そのものである。ここではインフラストラクチャーを機能面から次のように分類した。

(i) 供給処理システム

用排水施設として上水道・下水道システム、エネルギー供給施設として電力・ガス供給システム、廃棄物処理施設としてごみ・廃棄物処理システムがある。それぞれについて構成要素の分類をした。各システムによってその細部に違いはあるが、いずれについても、都市全域に張り巡らされたネットワークのリンク（地中埋設管、架空線など）とノード（取水施設、発電施設、処理プラント施設、中継施設、系統管理・制御施設など）からなっている。

(ii) 情報・通信システム

供給処理システムと同様にネットワークを構成しているが、大きく異なる点は、供給処理のように流れが一方向（分散あるいは集中のどちらか）ではなく、情報伝達はその起点・終点がランダムであるということである。情報化社会といわれる今日では、都市の諸機能が情報・通信システムに重度に依存しているため、地震時の機能喪失による影響は甚大である。

(iii) 交通システム

道路交通・鉄道交通・海上交通が考えられるが、都市震害を扱う上での構成要素は、路線施設、系統管理・制御施設及び港湾施設である。

(iv) エネルギー貯蔵施設

都市へのエネルギー供給のために、都市にはエネルギー貯蔵施設が多数設置されている。臨海部には石油貯蔵タンク、LNGタンク等が、また都市全域に高圧ガスホルダー、ガソリンスタンド等が散在する。

(v) 都市防護施設

水害などの自然災害から都市を防護する施設であり、河川堤防や海岸堤防、防波堤などである。

(3) 一次災害

ここでは、構造物の物理的損傷（構造部材あるいは非構造部材について）と構造物破壊による人間の死傷を一次災害とする。これらの被害はほとんどが地震発生後数分の内に生じるものである。ただし津波による被害は津波の襲来自体がある程度遅れるため、場合によっては数十分～数時間後に発生することも考えられる。

建築物の被害には、基礎、柱、はり等構造部材の損傷によって生じる倒壊・傾斜、地盤破壊にともなう滑動・転倒の他、内・外装材や広告物等の落下、屋内機器の転倒等がある。地中埋設管の被害は、継手部の引き抜け、異形管部の破損、異種地盤境界部分での管折損が多い。また交通システムの被害は主に道路・橋梁・軌道の構造的被害と、路線施設上に障害物が生じることに分類される。

Fig. 4 に示すように、一次被害の段階では個々の構成要素自体の被害という側面が強い。これらの被害は後に続く災害波及の原点となる。

(4) 二次災害

ここでいう二次災害は、構造物の物理的な被害によって生じる各施設の機能障害や、地震火災、地震水害、危険物流出等の複合災害、及びそれらによる人間の死傷を含んでいる。これらの被害は、一次災害の発生直後～数日の期間に発生する。例えばライフラインシステムでは供給処理、情報伝達、人・物の輸送等それぞれのサービスが停止したりサービスの品質が低下したりして、その使命を果たせなくなる。また地震動の衝撃は、薬品火災や火気を使用する家庭・飲食店からの出火や石油タンクのスロッシングにともなう出火を招き、火災が発生する。

この段階で生じる被害は、すでに個々の構成要素には留まらない。もちろんそれぞれの要素の物理的損傷が最も大きく影響することは明らかだが、図に示した被害の内容には他の構成要素の被害が影響してくる。例えば上水道システムに物理的被害が全く無い場合でも、地震による停電で水の供給が停止することもある。



(5) 緊急措置～復興

地震被災時には様々な災害対応行動が取られる。短期的には、人的被害を最小限に抑えるために、避難、救援、救急活動が行われる他、避難場所への食糧・生活必需品供給がなされる。施設面では、供給処理システムにおける応急供給、道路交通システムにおける通行制限、情報・通信システムにおける利用制限など、各システムに要求されている機能を極力保持するため種々の措置が取られる。この他の災害対応行動としては、消火活動や嚴重警戒体制などが挙げられる。また長期的には、社会経済的な援助や都市再開等の措置を行うことにより、被災都市の復興を促進する。被災時における災害対応行動の具体的な内容については、3.で詳しく述べることとする。

2.3 都市震害の時系列展開

ここでは地震発生から都市復興までの都市震害の時系列的展開に着目して、特徴的な被害の様相を震害波及プロセスの中に位置づけるとともに、各被害相互の連関や、災害対応行動と被害との関わりについて整理する。Fig. 5の左に記したように、震害の様相は、地震の発生から順に①発震期、②被災期、③混乱期、④避難行動期、⑤避難救援期、⑥応急復旧期、⑦復旧期、⑧復興期へと変化してゆく<sup>5)</sup>。

まず発震期から避難行動期では災害は主として「人間」と「施設」という二面からとらえられる。Fig.

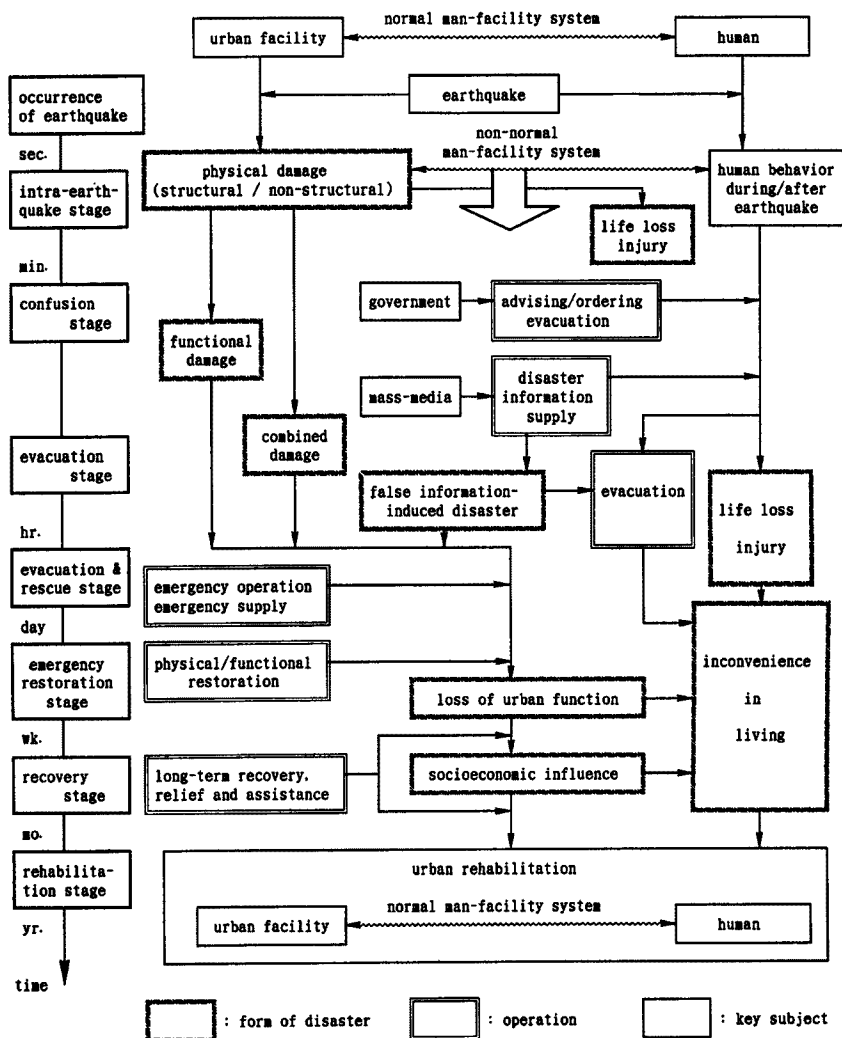


Fig. 5. Evolutionary Aspects of Urban Earthquake Disaster.

5では、「人間」と「施設」の関わり、すなわち都市生活のライフライン依存や建築空間の利用などをman-facilityシステムと表現している。通常は安定性が保たれ、合理的かつ円滑に機能しているこのシステムが、地震の発生によって攪乱されてバランスを失った結果、災害時のman-facilityシステムとなって、本来あるべき利便性や快適性が失われると同時に、火災が発生したり、構造物破壊によって人間が死傷するといったネガティブな影響をも与える。都市施設は地震によって物理的被害を被り、これが原因となって機能的被害が生ずる。人間は行政機関・マスコミ等の指示を受けながら避難行動をとるが、構造物被害によって死傷したりあるいは誤情報による情報災害を受けることも考えられる。ここまでの現象は地震発生後数時間以内に生じるものであり、混乱を伴いながら急激に展開する性質を持つ。そのため行政機関の取る緊急措置や応急対策が、災害の展開を大きく左右する。

一方、Fig. 5の避難救援期から復興期における災害現象には社会的な様相が強く現れてくる。被災都市では物理的・機能的被害が波及・拡大して、地震火災に代表される様々な複合災害が生じ、さらに都市機能損失という事態に発展する。被災都市の被害が甚大なときには、周辺地域や場合によっては全国にわたって社会・経済的影響を及ぼす。その間に物理的・機能的な応急復旧及び長期的支援・援助・復旧活動がなされ、都市は次第に復興に向かう。人間の生活の面では、ここまでに述べてきたあらゆる被害形態が総じて影響して来るため、生活災害がかなり長期にわたって続くが、都市復興とともに生活も地震発生前の状態に徐々に戻って行く。言い換えると、都市におけるman-facilityシステムは、復旧を通じて災害時のものから日常のものへと次第に回復してゆくわけである。

### 3. 都市震害の被害の様相と被害要因分析

災害をFig. 3の視点からとらえるとき、災害を防止・軽減するための方策は、①誘因の力そのものを低減するか、またはその力の都市への波及を食い止める、②素因(土地条件、被害主体)を改善する、③拡大要因を除去する、の3つに集約されよう。①では水害などに対する都市防護施設が代表的な例として挙げられるが、地震災害ではこれに相当するものがほとんど無い、と同時に都市防護施設の破壊が新たな被害を誘発する。ゆえに、被害主体(=都市の構成要素)と土地条件(=都市の立地条件)を改善するとともに災害拡大要因を除去することが地震災害の防止・軽減方策の要となる。このためには、Fig. 5でみた震害の各局面(物理的被害～社会経済的影響)での被害の様相を把握し、直接原因を明確にしたうえで、素因の中に潜在する被害発生要因の深層部分を明らかにする必要がある。

3.では、都市構成要素(人間及び都市施設)の属性や、あるいはもっとマクロな観点から都市総体の発展・変容にともなう社会問題等に被害発生要因を見だし、「都市の脆弱さ」あるいは「災害ポテンシャルの高さ」という問題点を抽出することを試みる。それら被害発生要因の多くは、合理的に構築された完成度の高い都市の利便性を裏付けるもの、もしくは都市化にともなう自然の成行きというべきものであって、通常はマイナス面としては現れず、それゆえ問題点として認識されていないと考えられる。しかし、ひとたび災害や事故が生じてバランスを失ったman-facilityシステムになった場合に初めて浮かび上がってくるものであり、いわば社会構造に内在化した潜在要因といえることができる。

このような分析をFig. 5に示した震害の各側面について行う(Table 1～5)と同時に、緊急措置ならびに復旧活動についても、事前対策・事後対策の両面をとらえる形で整理を試みる(Table 6,7)。

#### (1) 物理的被害(Table 1)

個々の構造物の構造的被害は、①支配している設計基準と、実際行われた設計施工の状況、及び地震時の構造物の力学的コンディションの総合的な結果としての耐震力と、②地震時に加わる外力、の2つの力関係によってもたらされるといえる。しかし全体を都市構造物群の被害としてとらえると、被害要因は都

Table 1. Aspects and Causes of Physical Damage

	sufferer	characteristic aspects of damage	possible/potential causes
structural damage	urban facilities ..... buildings underground pipes streets bridges, overpasses railway facilities urban protection structures energy storage facilities	*damage caused by inertia force ground motion ground failure tsunami ..... *collapse, tilting (complete/partial destruction)	*seismic loads exceeding design value (ground motion, tsunami, liquefaction, landslides, etc.) *poor performance standards to resist earthquake forces underestimate of earthquake forces unconsidered response characteristics of structures (low-cycle fatigue, sloshing, etc.) *design mistakes, inadequate design *physical/chemical deterioration of structural members (fatigue, alkali-aggregate reaction, etc.) *structures controlled by old-fashioned design codes ----- *worse condition of urban location *high accumulation of urban facilities *variety and multiplicity of urban facilities
	non-structural damage	inhouse instruments furniture outdoor facilities outdoor instruments ----- non-structural members of buildings	*leaving stability out of consideration ----- *leaving stability out of consideration ----- *poor performance to resist earthquake forces
ground failure	artificially altered topography poor soils slope	settlement of embankment ----- liquefaction landslides	*worse condition of urban location extending to unfavourable soil area *expansion of urban activities *urban planning without disaster prevention awareness *rainfall before/after earthquake

市の大規模化によって地盤の悪いところにまで建設が進んでいるといった立地条件悪化の問題や、構造物が多くしかも多様なため、現行の耐震基準を満たしていない建築物がいまなお残存し、耐震補強が十分に行き届かないという問題にまで深層化していることが分かるであろう。

非構造的被害では、落下物や屋内機器転倒が多い。その主たる要因は、耐震安定性に関する考慮不足といえる。この種の被害は従来では余り問題にされなかった、というより問題にする必要がなかった。しか

Table 2. Aspects and Causes of Functional Damage

	sufferer	characteristic aspects of damage	possible/potential causes
supply & disposal system	electric power gas water supply sewage treatment garbage & waste	*loss of serviceability	*partial disconnection, no linkage in network *hierarchical structure of network system *abnormal water/electric-power flow
transportation system	road traffic railway traffic	*unavoidableness of a measure of damage *interchain effects of malfunction	*expansion of network system *variety and multiplicity of components (large system with various failure modes) *interdependence among lifeline systems (ex. failure of water supply caused by power stoppage)
communication & information system	telephone computer network	*functional influence at confusion stage or restoration stage *overload in specific system telephone circuit, road traffic, etc.	*interinfluence among lifeline systems (ex. traffic jam caused by restoration work of underground pipes) *insufficient restriction on use *lack of substitutive system
building function	medical, education public, factory, commercial	*plumbing damage *no illumination, no air conditioning, etc. *merchandize scattering	*diversification of building function *accumulation of inhouse facilities *dependence on lifeline system

し、コンピューターの転倒が都市機能マヒにまで発展するおそれがあることが認識されたり、1978年宮城県沖地震でブロック塀倒壊による死傷者が多かったという教訓を経て始めてこの種の被害が注目されつつあることを考えると、被害の影響の重大さに対して認識不足であったといえる。同じく1978年宮城県沖地震で注目された宅地造成地における地盤災害についても、都市活動の広域化、都市の立地条件の悪化、防災的配慮が欠如した都市計画などの要因が潜在している。また1987年Whittier Narrows地震においては、CSULA (California State University at Los Angeles) が、構造的被害は軽微であったにも関わらず、天井板や外壁の落下などの非構造的被害が多々あったため閉鎖を余儀なくされた。被害のあったCSULAは切土・盛土のなされた人工造成地上に建設されたもので、背後の自然丘陵地にある住宅には全く被害がなかった、との報告がなされている<sup>6)</sup>。

## (2) 機能的被害 (Table 2)

ライフライン・システムの機能障害は、1971年のサンフェルナンド地震で注目されて以来、都市型地震災害のもっとも特徴的な側面とされている。被害の様相は、「サービスの停止」及び「サービスの品質低下」である。この被害の要因は、①広域ネットワークを構成しているシステムとしての性質、②ライフラインシステムの相互依存性、③システムの相互影響性、の3つに要約される。①についてはネットワークの連結性が失われたり、系統管理・制御施設が機能できなくなって、供給処理、運輸通信などのサービス

が不能になるという被害をもたらす。このことは、広域化した都市のどこでもサービスが受けられるという利便性の裏返しとして、悪い地盤が不可避であることや、ネットワークを構成する要素が多種多様であり被害が免れないこと、などに起因するといえる。②については、そもそも独自では機能し得ない個々のシステムが、莫大な社会資本投資によって、相互に結び付けられながら発展し、全体システムとして今日の都市にみられるように円滑に機能しているという背景による。また③に関係する被害は、復旧段階にお

ける作業・資機材の競合や、道路交通への規制という形をとって現れる。各ライフライン網が、道路占用によって極めて接近して設置されている現状が主たる要因である。

建築物そのものも、今日では単なる居住・業務空間ではなく、重要度の相違こそあれ各々がユティリティーを持つものである。地震時の機能障害が問題となる。公共機関や病院など災害時の役割が大きい建築物の地震時機能障害は、しばしば復旧活動に支障をきたすこともある。建築物の機能障害は、建築物内施設の集積、建築物機能の多様化およびライフライン依存などの要因によるものである。

(3) 複合災害 (Table 3)

1964年新潟地震では、石油貯蔵タンクの火災・周辺地域の環境悪化が注目された。また化学工場の爆発などの類似災害の教訓からは、地震時に危険物質漏洩の危険があることがわかる。このように都市周辺・都市内部への危険物質取扱い施設や貯蔵施設集積によって災害ポテンシャルが高まりつつあること背景には、都市の大量エネルギー消費、土地利用の高度化、土地利用形態の多様化といった都市の特性がある。

また木造家屋の密集地帯が都市内に広く分布し、地震時の同時多発火災が憂慮されるわが国では1923年関東大地震の経験があるために、地震火災の恐ろしさが強く認識されて、地域防災の中心的課題となっている。地震火災の出火源には、家庭や飲食店のストーブ、ガスこんろのほか、薬品、コンビナート、ガス管破壊地点などがあるが、都市大火への拡大する要因には、①土地利用が高度化しており都市の延焼遮断帯整備が困難、②消防活動が道路交通システムに依存しているため緊急出動が妨げられる、③多種多様な災害が同時多発する地震時には消防力が追従できない、等がある。

次に地震水害については、まず津波の被害がある。ゼロメートル地帯での浸水は、都市防護施設の破壊が主たる要因であるが、都市の立地条件悪化によってゼロメートル地帯が都市活動空間になっているという深層要因が考えられる。大口径水道管破壊による水の流出や、下水道管破壊による下水溢流などに起因する浸水も、都市震害独特の現象である。地震水害は、地震被害と豪雨等の悪条件が重なった場合には相

Table 3. Aspects and Causes of Combined Damage

hazardous content leak	fire following earthquake	earthquake-induced flood	sufferer	characteristic aspects of damage	possible/potential causes	
			human buildings road traffic system	#fire, explosion, toxic-chemical release (inflammable liquid/gas, high-pressure gas, violent poison, oil, etc.)  #simultaneous outbreak of fires #building fire (->difficult to escape, toxic gas release) #chemical fire #petrochemical industrial complex fire	#accumulation of energy storage facilities #accumulation of facilities dealing with dangerous materials #diversification of land use in urban regions #vast consumption of energy in urban regions	
					outbreak of fire spread of fire (conflagration)	#failure to extinguish the origins of fire  #flammable cities (highly concentrated city blocks of wooden structures) #inoperable fire fighting (depending on road traffic system) #insufficient fire fighting power(capability?) #weather condition (wind velocity, wind vane)
				#tsunami #large-sized water pipe break #sewerage overflow #damage of urban protection facilities #inundation in lowland	#horse condition of urban location #weather condition (rainfall before/after earthquake) #damage of urban protection facilities	

乘的に大きな被害をもたらす。

(4) 人的被害・避難行動・情報災害 (Table 4)

人的被害回避の成否を大きく左右する避難行動における問題を Table 4 に従って以下のようにまとめておく。

	sufferer	characteristic aspects of damage	possible/potential causes
life loss injury	human	*casualties caused by building failure fire falling object flood	*failure in evacuation *lack of caution  ----- *mental shock, traffic accidents
evacuation	human	<ul style="list-style-type: none"> <li>*lack of information</li> <li>*wrong (incorrect?) information</li> <li>*failure to evacuate</li> <li>*unable to evacuate</li> <li>*too long evacuation distance</li> <li>*sudden attack (of crisis)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*dependence on communication &amp; information system</li> <li>*lack of portable radio</li> <li>*inaccuracy in communication (transmitting information)</li> <li>*problem of the way mass-media should be (concerning disaster information)</li> <li>*inadequate interpretation of disaster information (neglect of risk, disregard for risk)</li> <li>*problem of disaster-poor</li> <li>*insufficient equipment of regional evacuation are</li> <li>*falling object, collapse of building, quick tsunami</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>inaccessi- bleness to evacuation area</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*narrow streets</li> <li>*highly used roadside</li> <li>*insufficient equipment of regional evacuation area/route</li> <li>*flammable cities</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>panic disaster evacuation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*accumulation of facilities where many &amp; unspecified people gather (ex. underground commercial/ transportation space, theater, terminal, etc.)</li> <li>*lack of evacuation leader</li> </ul>
information- induced disaster	human	<ul style="list-style-type: none"> <li>*needless (unessential) evacuation</li> <li>*inadequate evacuation</li> <li>*demagoguery (demagoguism) spread (circulation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*a harmful influence of information-oriented society</li> </ul>

(a) 避難行動の遅れは、避難情報の不足・誤り、避難しようとしなない、または避難できない等の原因で生ずるが、これらは、近隣世帯のコミュニケーション欠如による災害文化の未発達、高齢化社会問題などによる災害弱者の増加等の社会的な要因に問題があるといえる。それと同時に情報化社会の発達にともなう問題もあろう。行政機関・報道機関は避難情報を提供する重要な責務を果たすが、いたずらにセンセーショナルな報道に走りやすい傾向があることや、情報の内容そのものの不適切さといったことが取り

Table 5. Aspects and Causes of Inconvenience in Living, Loss of Urban Function, Socioeconomic Influence

	sufferer	characteristic aspects of damage	possible/potential causes
inconvenience living	household	*no household affairs *unable to attend school/office *shortage of commodities (daily necessities) *hard living	*residence far from place of work (housing shortage) *breakdown of distribution machinery *death/injury of breadwinner *house repairs expenses
loss of urban function	urban activities	*no operation *no service *no production	*physical damage of each facility *dependence on lifeline system *interdependence among urban functions *lack of labor (due to death, injury and evacuation)
socioeconomic influence	urban activities	non-official	*shortage of manpower(labor) and material for production *poor purchasing(buying) power of citizens
		official	*extraordinary expenditure (due to restoration, relief fund)
	regional society	*depression *low productivity *shortage of restoration goods *financial(fiscal) difficulties *shortage of restoration and relief goods *increase in business *image down *social unrest *unsanitary environment	*moral degeneracy at confused stage at the time of disaster
	national	*financial difficulties *inflation, stagflation *stagnation of economical activities *deficit of international payment *social unrest	State liability, State subsidy decrease in effective demand increase in domestic demand

沙汰され、情報災害として社会問題化している。一方で、情報を受け取る側も、正確に受け止めて適切な判断のもとに迅速に行動を起こす必要がある。

(b) 安全に避難しようとしても、災害時にはそれを妨害する要素が付きまとうものである。避難路上には、落下物、がれき、放置された車があって、避難するには通常の道路の状態よりはるかに条件は悪化していると考えられる。これは通路幅員の狭さ、沿道の高度利用など都市化にともなう問題や、災害時のモラルの低下に起因する。さらに、疎開が必要となるような大規模災害では、交通手段の欠如が妨げとなり、交通システムに依存した現代社会の問題の一端が現れる。また土地利用の高度化と地価高騰のため、広域避難所が十分に整備されていないのが現状であり、避難距離が不適当に長い点が問題となる。

(c) 都市には不特定多数の人が集まる施設が多く存在しており、リーダー不在の異常避難行動によって群集災害が生ずる危険性も高い。その様な施設の例としては、地下街、映画館、ターミナル駅などが挙げられる。

(5) 生活災害・都市機能損失・社会経済的影響 (Table 5)

まず生活災害についてであるが、炊事、洗濯、風呂、トイレ等の日常生活での不便は、都市生活が重度に依存しているライフラインの

機能損失によるものである。またこれと関連して、都市内部あるいは都市周辺部では、電力・ガスや水道水との代替物(まきや川水)が入手困難であることも地震時の生活不便に拍車をかける要因である。また通勤・通学が不可能となる直接原因は交通システムの機能損失であるが、さらにその深層には、住宅難によって職住が離れているという背景がある。生活必需品の不足の原因には、復旧需要の増大による物資の絶対数の不足と、流通体系の破壊による物資の都市流入停止の2点が考えられる。また家計難が発生する

Table 6. Disaster Prevention System and Countermeasures in Japan

advance prepara- tion	Basic Plan for Disaster Prevention	by Central Disaster Prevention Council
	Prefectural/Municipal Plan for Disaster Prevention	by Prefectural/Municipal Disaster Prevention Council
emergency operation	Operational Plan for Disaster Prevention	by National Land Agency and related Ministries and Agencies (Designated Administrative Organs and Designated Public Corporations)
	establishment of Headquarters for Disaster Countermeasures (Prefectural/Municipal) establishment of Extraordinary Headquarters for Disaster Countermeasures requesting dispatch of a disaster relief force rescue and ambulance collection and dissemination of disaster information publicity activities (advising/ordering evacuation, evacuation inducement) emergency feeding, emergency water supply provisional housing, commodities supply security guard (specifying warning area, crime prevention, etc.) traffic control (emergency transportation etc.) fire-fighting, flood defense prevention of epidemics	based on Disaster Countermeasures Basic Act (1961), Disaster Relief Law (1957), etc.



Table 7. Substance of Physical/Functional Restoration and Long-term Recovery Relief and Assistance

	substance of restoration, relief, assistance	note
physical/ functional restora- tion	governmental *repairing operation *emergency water supply, etc. *collection and dissemination of disaster information *rerouting by system switching *supply shut off avoiding gas leak and explosion *telephone control	State liability, State subsidy redundancy of the system
	lifeline *damage inspection *repairing operation *relief request to related companies *starting of independent electric power plant	damage assessment(prediction) and restoration strategy earthquake disaster countermeasures drill optimum distribution of manpower and materials for restoration priority-based restoration strategy securing manpower and materials for restoration zonal block system of the network system (subdividing the network into some zonal blocks)
long-term recovery, relief, assistance	governmental *support to the disaster-stricken area *financial help to sufferers *repairing work	State liability supported by State subsidy
	non-governmental *reconstruction of buildings and lifelines	earthquake insurance

要因としては、生計維持者の死傷あるいは失業による収入減、住居の補修のための支出増大等が考えられる。

都市機能損失は、広い意味では生活災害を含むものであるが、ここでは都市施設の物理的・機能的破壊が公共・民間の各種業務をマヒさせることによって生ずる被害を考える。これには、それぞれの持つ施設・設備の破壊や労働力の喪失といった直接原因だけでなく、ライフラインの基盤の上に高度に集積し、かつそれらが相互に強く依存・影響して成り立っている都市システムのバランスが失われることが関与している。

社会・経済的影響は、被災都市の公共・民間部門と地域社会から被災都市周辺地域に及び、さらには全国的に波及する場合もある。被災都市に限れば、経済的影響は、都市機能損失が、①生産物資・復旧物資の不足と②生産力・生産性の低下をまねき、さらに③復旧・救援・援護に必要な資金による支出増大と④税収の減少による財政悪化、という流れのもとに生ずると考えられる。また全国レベルで考えると、震害の影響は、①復旧事業の国庫負担・国庫補助や税収減による財政難、②復興需要拡大と有効需要減少にともなう内需拡大・輸出減少などが絡んだ、インフレ・経済活動停滞・国際収支悪化、といったところにまで及んでくる。

次に社会的影響としては、地域の

イメージダウン、衛生環境悪化、社会不安の発生などがみられる。社会的影響と経済的影響はそれぞれが複雑多岐な様相を持つうえに、「社会的不安→経済活動停滞」といったような相互連関があるため、このような現象の因果関係を「原因→結果」のように一元的にとらえることはもはや不可能であり、動的な社会・経済システムの災害時の挙動として把握する必要がある。このような中長期にわたる社会・経済的影響を詳細に考察するには、マクロ経済学や社会心理学の知見が必要となる（例えば文献7）など。

以下では、緊急措置ならびに復旧活動 (Fig. 5 の ——— で囲んだ部分) について記述する。

#### (6) 行政の防災体制と被災時の緊急措置・応急対策 (Table 6)

わが国では、防災関係機関として29の省庁よりなる指定行政機関と31の指定公共機関があり、これらの機関の行う災害対策の計画性・総合性を確保をするため、災害対策基本法に基づいて、国には中央防災会議が、都道府県・市町村には地方防災会議が設置されている。また災害の未然防止や効果的な応急対策の実施、速やかな災害復旧のために、あらかじめ中央防災会議は防災基本計画、地方防災会議は地域防災計画、指定行政・公共機関の長は防災業務計画を策定している。緊急時には市町村・都道府県に災害対策本部、国に非常災害対策本部が設置され、以上の防災計画と災害対策基本法を中心とする諸関連法規に基づいて応急対策にあたることになっている。その主な内容は、①被災状況に関する情報を収集・伝達する、②住民に避難や警戒を指示する、③被災者の救護・救助をする、④被災者に生活必需品を供給し、応急給水活動を行う、⑤消防・水防活動、道路の啓開・修復にあたる、⑥緊急警備体制を取って交通規制を行い、犯罪予防・民生の安定を図る、⑦必要に応じて、他市町村・他都道府県に応援を要求する、等である。災害時に行政の果たす役割は上にみるように広範かつ重要なもので、災害発生後の被害の展開を支配すると言っても過言ではない。しかしこのような防災業務は、情報通信システムや道路交通システムの基盤の上に成り立つものであるから、被災時にスムーズに遂行されるとは限らず、「防災業務の遅滞→復旧の遅れ」という悪循環が生じたり、対応が遅れたために避けられたはずの被害を被ったり、新たな災害を発生させたりするおそれもある。特に非常時の通信確保は防災業務上不可欠であるため、この面では、災害による伝送路の損傷が無く機動力に富む、無線通信が有効に利用されている。

#### (7) 物理的・機能的応急復旧 (Table 7)

ライフラインの機能的復旧についてみると、緊急時には、被災情報に関する情報をもとに、①ネットワークの冗長性を活用した電力・水道の系統切り替えによる応急供給、②ガス爆発防止のためのガス緊急供給遮断、③ふくそう防止のための電話の利用制限などの措置が取られる。ライフラインの物理的復旧では、必要に応じて他都市へ応援を依頼し、被災設備の修理・修復が行われる。この局面では、復旧戦略の適否が早期復旧の成否を左右するため、あらかじめ被害予測を行っておき、需要家の重要度を考慮して効果的な復旧シナリオ (人員・資機材の最適配分) を策定しておく必要がある。

また停電による動力源・照明の喪失が重大な問題となる施設では、停電時に蓄電池や自家発電設備などのバックアップ電源が起動する。これも1つの機能的応急復旧と考えられる。

#### (8) 長期的支援・援助・復旧活動 (Table 7)

行政的な面に注目すると、被災地・被災者に対して経済的支援・援助が施される。これは、①弔慰金・見舞金の支給や、資金貸付けなどの融資と、②税金の免減や損害補償などの援護によって被災地の早期復興を図ろうとするものである。また公共土木施設、文教施設、構成施設等に関しては、復旧事業の国庫負担・国庫補助の措置が取られ、都市復興に向けて再建がなされる。

### 4. 都市震害のシステム分析モデルのための方法論と地下街を対象とした解析例

2.2の都市震害の被害波及プロセスをみると、初期の段階では各構成要素の被害それぞれが独自に発生するが、時間を追うごとに、相互の影響度を深めながら都市総体の被害へと展開してゆく。また3.で試みたように、都市震害にみられる被害の様相を根底から理解しようとするには、被害の直接原因をまず確認してから、さらにその深層の潜在被害要因を追求して要因分析を行い、同時に緊急措置や復旧活動に

よる被害の様相の変化を見る必要がある。

このような複雑な構造を持つ現象（＝都市震害）を解析的に扱おうとすると、なんらかのシステム論的な方法論を援用してシステム分析モデルを構築し、詳細な定性的分析とともに定量的分析を行う必要性が生じる。4. ではシステム分析モデルにおいて有効に用いられるシステム方法論として、(1) 要因の階層構造を明確にしてシステムの複雑な挙動の全体像をつかむ ISM, (2) 災害や事故の原因を段階的に探って各要因と災害発生との関わりを定性的・定量的解析を通じて理解する FTA, (3) 災害の発端から始めて、展開・発展のプロセスをとらえる ETA, の3つを取り上げて、それぞれの手法の概説を行う。

#### 4.1 ISMの概要<sup>8),9)</sup>

ISM (Interpretive Structural Modeling) は、多くの要素が互いに複雑に関連している社会システムがはらんでいる諸問題を取り扱うシステムズアプローチとして開発されたものである。扱う要素が非常に多くて複雑な因果関係を持つシステムを対象とする場合に有効に用いられ、その結果は多階層の方向性グラフとして図示されるものである。以下に、ISMの数学的な基本概念を簡単に示す。

あるシステムが  $n$  個の要素  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  から成り立っているものとし、各要素間に二項関係 (binary relation)  $R$  が定義されているとする。すなわち、要素  $s_i$  が、要素  $s_j$  に直接関係している場合、これを  $s_i R s_j$ 、直接関係していない場合、 $R$  の否定  $\bar{R}$  を用いて、 $s_i \bar{R} s_j$  と表す。そして二項関係  $R$  が、任意の要素  $s_i, s_j, s_k$  について、

$$s_i R s_j \text{ and } s_j R s_k \rightarrow s_i R s_k \quad (1)$$

を満足するとき、 $R$  は推移的 (transitive) であるという。グラフ理論を用いて、システム  $S$  の各要素を頂点 (vertex) に対応させると、任意の要素間に関係  $R$  が存在する場合には、辺 (edge) でこれを表すことができる。Fig. 6 (a) に関係  $R$  を表現する有向グラフの例を示す。

また関係  $R$  は集合  $S$  の各要素を行と列にもつ二値行列 (binary matrix)  $A$  を用いて表現することも可能である。Fig. 6. An Example of Directed Graph and Its Hierarchical Damage.

$$s_i R s_j \text{ ならば } a_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$s_i \bar{R} s_j \text{ ならば } a_{ij} = 0 \quad (3)$$

とすれば、関係  $R$  が二値行列として表される。システム  $S$  の関係  $R$  に基づく二値行列  $A$  と単位行列  $I$  のブール和を隣接行列 (adjacent matrix)  $N$  と定義する。さらに隣接行列  $N$  のブール積を

$$T = N^p = N^{p-1} \quad (p \text{ は } 2 \text{ 以上の自然数}) \quad (4)$$

となるまで行った結果得られたマトリクス  $T$  は可到達行列 (reachability matrix) と呼ばれる。可到達行列  $T$  は、二項関係  $R$  を表現する行列  $A$  におけるすべての直接的な関係のみならず、式 (1) で示す関係  $R$  の transitive な関係をもすべて示しているものといえる。

次に、可到達行列  $T$  に基づいて、階層構造を同定する。まずシステム  $S$  の各要素  $s_i$  について、可達集合 (reachability set)  $R(s_i)$  と先行集合 (antecedent set)  $A(s_i)$  をそれぞれ次式により定義する。

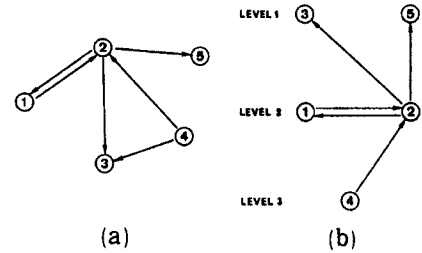
$$R(s_i) = \{s_j \in S \mid T_{ij} = 1\} \quad (5)$$

$$A(s_i) = \{s_j \in S \mid T_{ji} = 1\} \quad (6)$$

$R(s_i)$  は要素  $s_i$  から到達可能なすべての要素を含み、 $A(s_i)$  は要素  $s_i$  に到達可能なすべての要素を含む。いま、 $R(s_i)$  と  $A(s_i)$  のブール積を考え、

$$S_0 = \{s_i \in S \mid R(s_i) \cap A(s_i) = R(s_i)\} \quad (7)$$

なる集合  $S_0$  を考える。この集合は、これに属さない要素のどれにも到達できない要素の集合であり、多階層有向グラフのレベル1 (top level) の要素である。レベル1に属する要素が決定されると、これら



の要素に対応する行と列を可到達行列から削除して同様の手順を繰り返すことにより、レベル2以下の要素が順次決定される。階層構造が求まると要素間の関連を辺 (edge) で結び、多階層有向グラフを描く。ここで多階層有向グラフは、1つの階層構造に対して必ずしも一意に確定するものではなく数個のものが考えられる。すなわち要素間の辺の結び方には、i) 隣接行列を用いる、ii) 可到達行列を用いる、iii) 骨格行列を用いる、などがある。ここで骨格行列とは、可到達行列における1の要素が最小個になるように、推移的 (transitive) な関係を除いたものである。Fig. 6 (b) は、Fig. 6 (a) に対応する多階層有向グラフの一例で、骨格行列を用いて求めたものである。

#### 4.2 FTAの概要<sup>10),11)</sup>

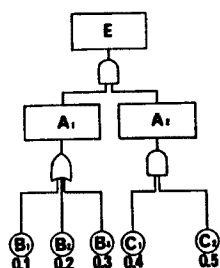


Fig. 7. An Example of Fault Tree.

FTA (fault tree analysis) はシステムの信頼性を解析する手法の1つである。解析しようとする災害や事故の発生を頂上事象 (top event) とし、以下その直接原因となる要因 (欠陥事象; fault event) を並べて書き、AND (論理積) ゲートおよび OR (論理和) ゲートで結ぶ。さらにその欠陥事象の原因となる要因を並べて同様の手順を繰り返し、基本的な発端となる要因 (基本事象; basic event) にいたる。このように、各種の事象とそれを結ぶゲートによって構成される図を、その樹木に似た形態から FT (fault tree) という。Fig. 7 の簡単な例に示すように、AND ゲートは記号  $\square$ 、OR ゲートは記号  $\triangle$  で表される。頂上事象を  $E$  とすると、 $E$  は  $A_1$ 、 $A_2$  が共に生じた場合 ( $A_1$  AND  $A_2$ ) のみ発生する。 $A_1$  は基本事象  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  のいずれかが生じた場合 ( $B_1$  OR  $B_2$  OR  $B_3$ ) に発生し、一方  $A_2$  は  $C_1$ 、 $C_2$  が共に発生した場合 ( $C_1$  AND  $C_2$ ) に生じる。このように FT は各段階での事象の原因となる要因を順次明らかにして、最終的に頂上事象の発生が基本事象のどのような組合せによるものなのかを示すものであり、演繹的な手法によって要因分析を行った後に、災害発生までのプロセスを帰納的に追跡する手法であるといえる。以下に FTA の手順を簡単に示す。

##### (a) 災害現象や事故に関する調査

解析しようとするシステムの行程・作業内容を把握し、既往の災害や予想される災害の内容やその発生頻度をできるだけ詳しく調査する。

##### (b) 頂上事象の決定

解析の対象とする事故や災害に応じて頂上事象を決定する。部分的な FT を作成してから全体の FT を構成する場合は、それぞれの部分 FT の頂上事象を全体の FT の基本事象として取り入れることになる。

##### (c) FT の作成

部分的な FT をそれぞれ基本事象まで分析した後、それらをつなぎあわせて全体の FT を構成してゆく。

##### (d) FT の構造分析

FT のなかで重要な位置を占めることになる共通モード (FT のなかに現れる共通の原因事象) を発見したり、頂上事象に関与しない事象を発見したり、あるいは簡単なアルゴリズムによってミニマルカットセット (頂上事象を起こすための必要最小限の基本事象の集合) やミニマルパスセット (そのなかに含まれる全ての基本事象が起こらないとき初めて頂上事象が起こらないような必要最小限の基本事象の集合) を求めることができる。

##### (e) FT の定量化

構造分析に基づいて FT のブール変換を行ったのち (共通モードを取り除くため) に、FT の基本事象に発生頻度あるいは unavailability を与えて、頂上事象の発生確率を求める。

FTA の適用方法として、上記の (d) までを行うのが定性的解析、(e) を含めた場合は定量的解析ということになる。定性的解析を行うだけでも、考えられる全ての原因を列挙するので類似災害の防止に役

立ち、しかも災害要因を簡潔に図式化するので視覚的に理解し易い、という意義がある。

### 4.3 ETAの概要<sup>1)</sup>

ET (event tree) は、災害の発端となった初期事象 (initiating event) から出発し、二次的原因や安全手段の成否などによって分岐し、最後に災害事象 (possible consequences) に達する流れを図示したものである。Fig. 8の例に示すように、ETの各分岐において合計1となる確率をそれぞれの枝 (sub-

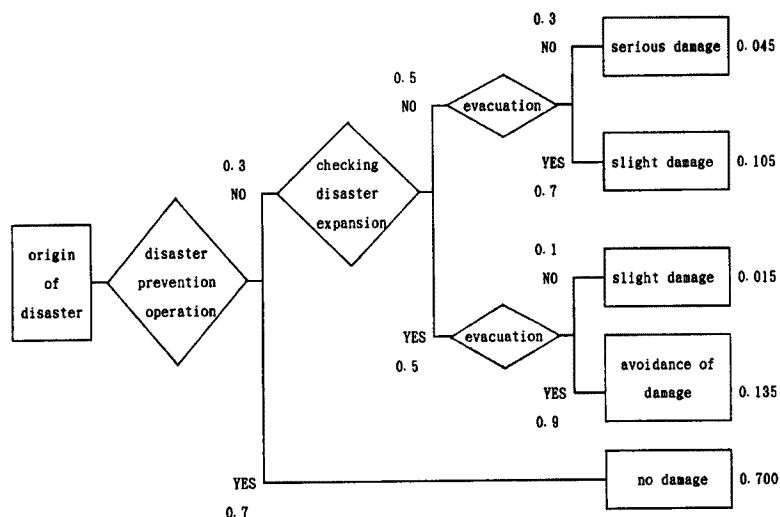


Fig. 8. An Example of Event Tree (numbers denote probability of occurrence).

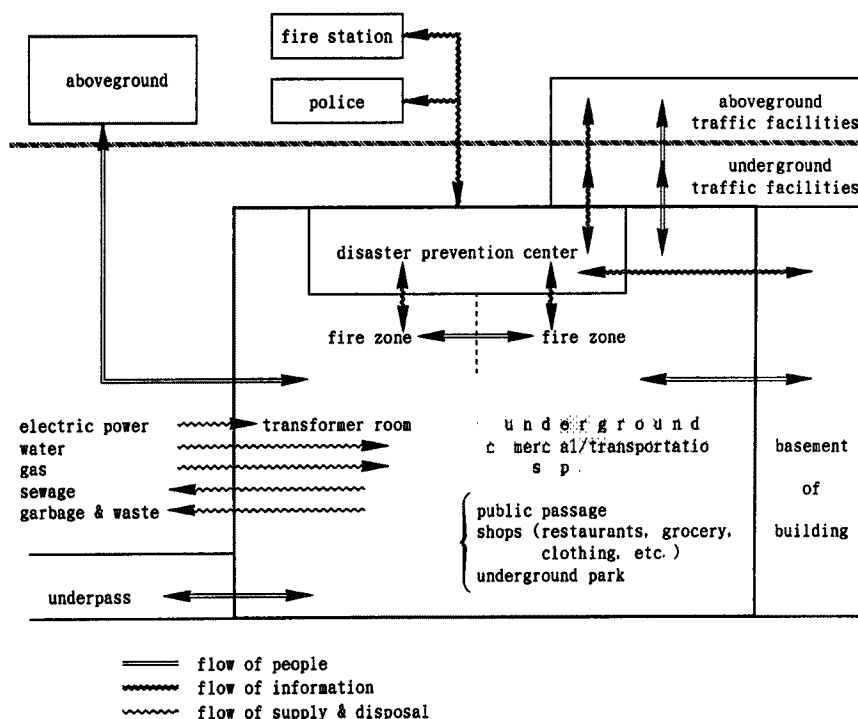


Fig. 9. Composition of Underground Space and Flows of People, Information, and Supply & Disposal around Underground space.

quent event) に与えて簡単な確率計算を行うと、すべての結果の発生確率(合計1)が算出される。ただしここで与える確率は、その分岐に至ったという条件の下での条件付確率であり、図のように同じ「避難可能かどうか」についての確率でも、「拡大防止」ができた場合には0.9、「拡大防止」ができなかった場合には0.7と異なる値をとることもある。

FTがすべての「原因」を列挙して頂上事象の発生の条件を探るものであるのに対し、ETはすべての「結果」を演繹的に列挙するものであるといえる。ETA(event tree analysis)を行うことの意義としては、次の点が挙げられる。

(a) 過去の災害例を分析する場合には、それと別のシーケンスと比較することにより、潜在災害を発掘(他の災害事象の発見)できるとともに災害を拡大した要因を明確にできる。

(b) 災害のレベル(重大災害、軽災害、災害回避)の発生確率の大小関係を把握できる(発生確率の比較)。

(c) 図式化により災害発生のプロセスを視覚的に簡潔に理解できる。

#### 4.4 地下街の地震災害を対象とした解析

本研究では広範な都市施設の中から地下街を対象を絞り、ISM、FTA、ETAの3つのシステム的手法を用いて地震災害の波及のシステム分析を行った。地下街を取り上げた理由は、①限られた空間の中に都市施設が高度に集積しており都市の縮図的存在であること、②火災・ガス漏れ・停電などの被害が地震時に同時多発する可能性があること、③不特定多数の人が集まるため群集災害の発生が憂慮されること、等であり、その地震災害は、関与する要因、時系列的展開ともに複雑多岐なものになると予想されるため、システム手法を用いた解析を行う必要があると判断したことによるものである。

まず地下街の構成と人・情報・供給処理の流れの概略をFig. 9に示す。地下街は公共通路や飲食店・衣料品店などの店舗、地下駐車場等の用に供され、ライフライン依存のもとにその機能が維持されている。また地上・地下の交通機関やビル地下階など多数の施設と接続しており、全体として地下活動空間を形成している。災害時には防災センターが中心となり、隣接施設・消防・警察・ガス事業者などと情報交換を取りながら災害対応にあたる。

次に地下街の現況及び安全対策の現状を細かく分析したのちに、ISM、FTA、ETAの3手法による地震災害波及分析を行った。紙面の都合上、分析結果の全てを示すことはできないので、ここではそのごく一部を示すにとどめることとし、詳しくは文献12)によらねたい。

##### (1) ISMによる被害波及構造

本研究では、まずISMを用いて地下街の地震災害波及の要因の階層構造化を試みた。地下街における地震災害に関わる項目として66項目を抽出してISMのアルゴリズムを適用した結果、Fig. 10の多階層有向グラフを得た。レベル16の地震発生からレベル1の人的被害に関する項目までの波及構造が明らかにされ

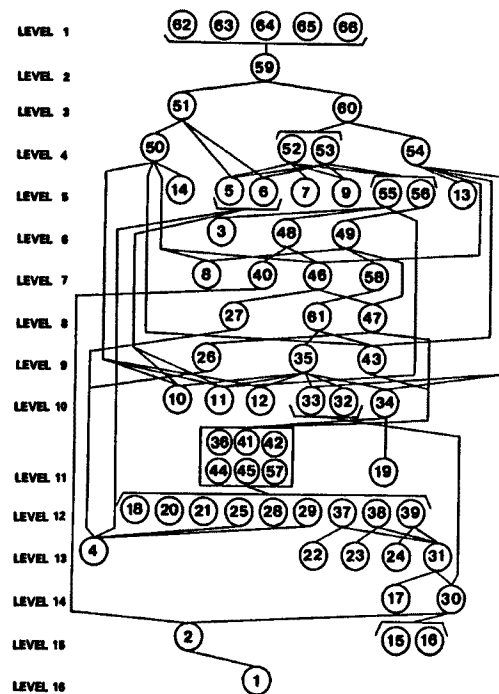


Fig. 10. Hierarchical Structure of Items Related to Earthquake Disaster in Underground Commercial/Transportation Space Using ISM.

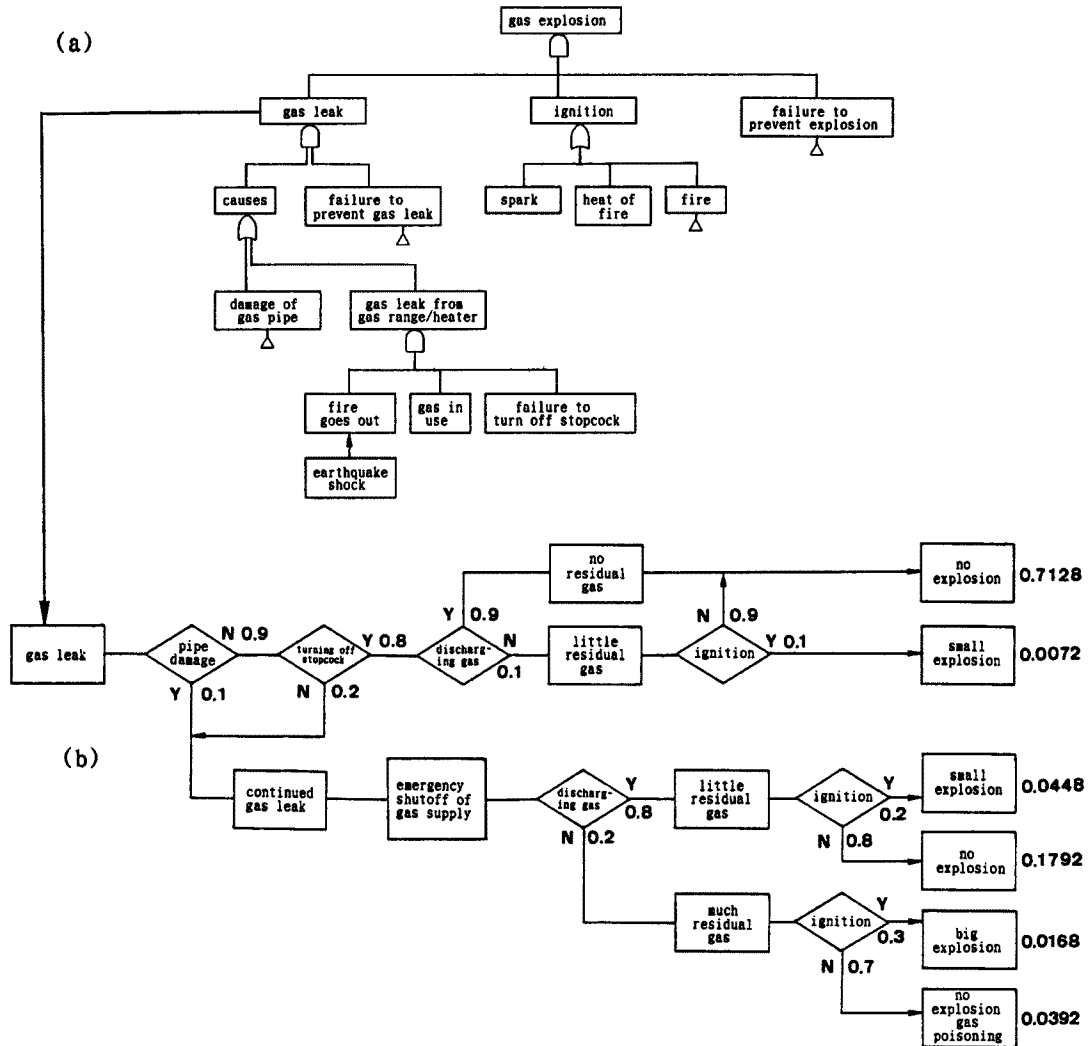


Fig. 11. Fault Tree (a) and Event Tree (b) on Earthquake-induced Gas Accident in Underground Commercial/Transportation Space.

た。レベル 11 に現れる 6 項目 (36, 41, 42, 44, 45, 47) はフィードバックループを形成しており、「災害→防災設備破壊→未然防止失敗→新たな災害発生」という悪循環が生じるおそれがあることを示唆している。

(2) FTA による被害要因分析

ISM の結果得られた Fig. 10 の多階層有向グラフに基づいて構成した FT の一例として、ガス爆発を頂上事象とする部分 FT を Fig. 11 (a) に示す。被害の原因として疑わしい項目群が OR ゲートで結ばれ、災害原因と防災対応行動の失敗が対になって AND ゲートで結ばれることが分かる。事象の中で△のついているものは、別の FT でさらに分析を行ったことを表すものである。

(3) ETA による被害波及分析

地下街の防災設備・防災体制を詳細に検討したうえで構成した ET の一例として、さきの FT 中の「ガス漏れ」から「ガス爆発」に至るプロセスを扱った ET を Fig. 11 (b) に示す。図中の数字は、地震によってガス漏れが発生したという条件のもとでの爆発の発生確率を試算したものである。

## 5. 結 語

本研究により得られた成果を以下に要約する。

(1) 複雑で多様な側面を持つ都市震害の分析にあたって、その被害主体である都市の構成要素を整理した。この構成要素を単位として、都市震害の被害波及のプロセスを系統的にとらえた。各要素の被害が都市活動に与える影響が整理できた。

(2) 都市震害の被害の時系列的展開に着目し、man-facility システムの概念を中心とする被害波及構造や、種々の災害対応行動が災害の展開に関与する様子などを総合的に整理した。また各局面での被害の原因を都市に内在する潜在要因まで掘り下げ、被害とそれらの要因の関係をとらえた。都市震害の要因は都市化にともなう問題等に深く根ざしていることが分かった。

(3) 都市震害のシステム分析モデルに用いるシステム論的手法として、ISM, FTA, ETA を取り上げ、それらの特徴をみた。

(4) 地震災害の分析モデルの具体的な対象として地下街に焦点を絞り、ISM, FTA, ETA の手法を実際に適用した結果、次の成果を得た。

(a) ISM によって被害波及の要因の階層構造と因果関係が把握できた。

(b) FTA により各種の被害の原因が網羅的に明らかにされ、視覚的に理解しやすい FT が得られた。

(c) ETA によって災害の展開の様相と防災対応行動の関係が明確にされた。

本研究は、都市という複雑・巨大なシステムを対象とするが故に、まず都市震害の全体像を把握することから始めたのであり、本論文はその第一ステップの報告である。本論文で認識された種々の概念についてはさらに的を絞って研究を進める計画であるが、その中で、特に man-facility システムの概念により、都市震害における物理的施設群と人間行動の関わりにつき、災害発生に関する定量的なパフォーマンス関数を定式化すること、それに基づき、種々の震害態様の発生確率を定量化することを目指したいと考えている。

## 謝 辞

都市耐震の対象となる研究領域は非常に広範かつ複雑であり、著者らはできる限り機会を見い出して多数の人々と討論を重ね、本研究の主眼である都市震害のシステム分析のために研究の方向づけを行ってきた。本研究の成果は、それらの蓄積によって徐々に形をなしてきたものである。個々のお名前を挙げることはできないが、都市耐震センターの研究会等での議論を通して本研究に貢献して頂いた方々にここで深く感謝の意を表する次第である。

なお本研究の数値計算には、京都大学大型計算機センター FACOM/M 382 /VP-200 システムを用いたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 亀田弘行: 都市施設耐震システム研究センターの設立と発足後の経過, 都市耐震センター研究報告, 第1号, 1987. 4., pp. 1-8.
- 2) 亀田弘行・岩井哲・北原昭男・能島暢呂: 都市耐震のための研究領域の分析, 土木学会関西支部都市防災シンポジウム講演集, 1987. 10., pp. 207-216.
- 3) Kameda, H., Iwai, S., Kitahara, A., Nojima, N.: Urban Earthquake Hazards Reduction—Problem Areas and Needs for Multi-Disciplinary Reserch—, Proc. of US-Asia Conference on Engineering for Mitigating Natural Hazards Damage, Bangkok, Thailand, De-



- cember 1987, pp. D9-1 ~D9-12.
- 4) 田治米辰雄・望月利男・松田磐余：地盤と震害—地域防災研究からのアプローチ—，槇書店，1977, pp. 237-258.
  - 5) 村上處直：都市防災計画論 一時・空概念からみた都市論一，同文書院，1985, pp. 132-145.
  - 6) Celebi, M., Brady, G., and Krawinkler, H.,: Preliminary Evaluation of Structures; Whittier Narrows Earthquake of October 1, 1987, Open-File Report 87-621, U. S. Department of the Interior, Geological Survey, October, 1987.
  - 7) 梶秀樹：地震が市民に及ぼす長期的影響分析のための試論，自然災害科学総合研究班ワークショップ報告書「都市の問題点」，1985.
  - 8) Warfield, J. N.,: Binary Matrices in System Modeling, IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 3, IEEE, September, 1973.
  - 9) 吉川和広：新体系土木工学 52・土木計画のシステム分析, pp. 29-56, 技報堂出版, 1980.
  - 10) 井上威恭：FTA 安全工学, 日刊工業新聞社, 1979.
  - 11) Ang, A. H-S and Tang, W. H.,: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II-Decision, Risk, and Reliability, John Wiley & Sons, Inc., 1975, pp. 485-504.
  - 12) 能島暢呂：都市震害のシステム分析モデルに関する基礎的研究, 京都大学修士論文, 1988. 3, pp. 26-42.