

平成9年度

第15回神戸大学工学部公開講座

震災復興と将来への展望

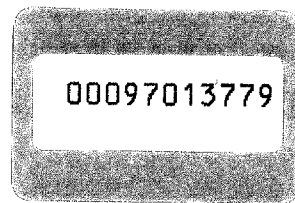
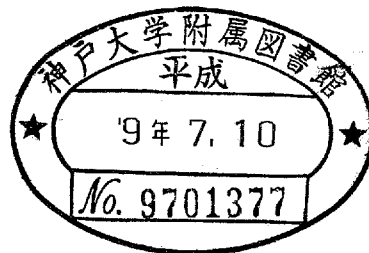
神戸大学工学部

震災文庫 8 - 225

平成9年度

第15回神戸大学工学部公開講座

震災復興と将来への展望



神戸大学工学部

## はじめに

「我々はどこから来たのか、我々とは何か、我々はどこに行くのか。」これは19世紀末、1891年にパリーでの文明生活、社会的地位も妻子もすべて投げ捨てて、南海のタヒチ島へ逃れた画家ゴーギャンの大作の題名であります。21世紀をあと3年にひかえた現代の我々にとってもこれほど切実に胸に響く疑問はありません。皆様のような知的水準の高い方々にとって、さらには阪神淡路大震災の惨禍の中から立ち上がりつつある私達にとっても、上のゴーギャンがうったえた言葉は、ひとしおずしりと重く響く意味を持つと思われます。

周囲を世界的に見渡しても、世代間秩序の混乱、政治的経済的秩序の混乱、価値体系の倒立など、世紀末症状のただ中に私達はおります。20世紀を貫いて不動であると考えられて来て、人類がそれに頼って来た価値体系－自然科学－も地球上の生命や人類の存続を脅かすものとして、その見直しが迫られています。地球の大きさをリングになぞらえれば、地殻の厚さはリングの皮の厚さの程度にすぎず、生命体はその薄い皮の部分にうごめいているわけです。時間軸をたどっても。自然科学の発生を、たとえばギリシャ時代にとれば、人類発生からの50万年にくらべると、自然科学の歴史2000年は一瞬のまばたきの長さでしかありません。有史以来我々は、急激な変化を遂げました。科学・技術の発達速度は、とくに異常にはやかったと断言できます。

2年前に起きた阪神淡路大震災は、あらためて我々が自然という巨大な力に支配されていることを見せつけました。本講座のタイトルは「震災復興と将来への展望」であります。しかし震災から3年目の本年でも、各講師の講演内容は「復興」のほうに力点がおかれています。しかし「展望」の方も、21世紀にどのような世界を築き上げるべきか、これは全世界が考えつつある大問題であります。自然科学・工学を排除するのではなく、その難点を克服して内包しつつ、新しい世界観を作り上げねばなりません。筆者の私見をあえて言わせて頂ければ、それは自己の自由な開放と、異質な他の存在の尊重であろうと考えています。

「我々とは何か、我々はどこにゆくのか。」と19世紀末にゴーギャンが発した疑問は、20世紀末の混乱を目前にしている我々の誰の胸にもうずいており、各自が自分で解かねばなりません。本公開講座がこの疑問を解くのに、なんらかのよすがになることを願って、まえがきに代えます。

平成9年度神戸大学工学部公開講座委員会

委員長 吉田虔太郎

## 受講に際しての留意事項

1. 講義は工学部LR501教室で行います。
2. 受講証は、係員が呈示を求める場合がありますので、必ず携帯してください。
3. 出席カードについて（テキストの最後に綴じ込み）
  - （1）テキストを受領されましたら、出席カード（11回分）すべてに、受講番号及び氏名を事前に記入しておいてください。
  - （2）出席カードは、受講番号及び氏名の記入漏れがないかを確認し、受講する回の分を受付の箱に入れてください。
  - （3）出席カードの提出がなかった場合は、欠席の取扱いとなります。
4. 修了証書は、11講義中7講義以上受講された方に対して、7月26日（土）の閉講式で交付します。

# 目 次

1. 地盤災害の復旧と復興 沖村 孝・・・1
2. 兵庫県南部地震における機械設備の被害およびその原因と対策 岩壺 卓三・・・15
3. 兵庫県南部地震にともなう廃棄物の緊急発生とその処分について 筏 英之・・・29
4. 震災を数学で考える -複素関数とフラクタル- 中桐 信一・・・39
5. 災害と電力供給システム 大澤 靖治・・・53
6. 公共交通の復興と整備のあり方 -阪神・淡路大震災の経験から- 森津 秀夫・・・65
7. 製造業における震災復興と今後の危機管理 森脇 俊道・・・77
8. 復興計画支援と進化型計算法 玉置 久・・・91
9. 震災復興とまちづくり 三輪 康一・・・105
10. 大災害時における人間救助ロボット機器はいかにあるべきか 高森 年・・・117
11. 石油基地の地震による災害の想定 片岡 邦夫・・・129

# 地盤災害の復旧と復興

都市安全研究センター 教授 沖村 孝

## 1. はじめに

本報では平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震による被害の種類を地盤災害、特に山くずれ災害と宅地地盤災害に着目し、これらの被害の概要、復旧がどのように進められてきたかを簡単に紹介する。更にこれからの神戸が住み良い安心、安全なまちとするため、復興に向けてどのような取り組みが計画され、進められてきたかについて述べる。

## 2. 山くずれ災害

### 2.1 山くずれ災害の概要

今回の地震により六甲山系では749箇所で山くずれが発生した。これは昭和42年の集中豪雨による山くずれ3,750箇所に対して約1/5と少ない。このことは六甲では地震もさることながら、豪雨により山くずれが起き易いことを我々は知っておく必要がある。今回の山くずれの分布は東六甲、特に宝塚市、西宮市、芦屋市や神戸市東灘区に多い。一部、西の須磨区にも見られるが、中部地区は少ない。東六甲に数多く分布している山くずれもよく見ると2本の帯状に分布しているように見える。これは五助橋断層と芦屋断層に平行で、かつこれらの断層の北西側に約2kmの幅で分布している。この原因としては活断層周辺で大きな地震動が発生したためよりも、むしろ断層地形に特有の急斜面上で多発したためであると思われる<sup>1)</sup>。

個々の山くずれの特徴としては急斜面上で小規模な崩壊が多い。また山くずれが出現した斜面は、豪雨による山くずれが谷型斜面に多いのに対して、今回は直線型かやや尾根型の斜面に多く見られた。これは地震による応答加速度がこのような斜面では増幅しやすかったためと思われる。崩れたものは土砂ではなく、角礫状の軟岩が多く、風化した花崗岩が崩れたものと思われる。このため崩れた土砂が降雨によって流下することはなく、ほとんどの斜面で崩土は山くずれが起きた斜面直下に堆積していた。その他、六甲ケーブル土橋駅上流で見られたように、転石もいくつかの斜面で見られた<sup>1)</sup>。

上述した特徴は豪雨後に発生する山くずれに見られない特徴であり、地震による山くずれの機構が雨によるものとは全く異なっていたことが推察される。すなわち、今回の地震による崩壊機構は、豪雨後に見られるすべり型ではなく、風化した岩塊が転倒して崩壊するトップリング型の山くずれ<sup>2)</sup>、および落石型の山くずれであったものと推察できる。一方豪雨時や融雪時に見られる土石流のような流動型の山くずれは今回見られなかった。

## 2.2 降雨による拡大

地震による山くずれ発生後、その周辺あるいは山くずれが発生していない場所でも地震によるクラックの発生、あるいは表土層の変位による抵抗力の減少に起因して、地震後の豪雨により新たに山くずれが起こることが懸念された。神戸では5月の月間雨量が358mmもあり、これは神戸海洋気象台が観測を開始して以来、最も大きな月間雨量を記録した多量の降雨があった。このため、例えば灘区鶴甲の斜面では崩壊面積が大きく拡大した（図-1<sup>3)</sup>参照）。また7月3日から6日にかけても235mmもの強い降雨があり、この雨によっても更に山くずれが拡大、

あるいは新たな山くずれが出現した。建設省六甲砂防工事事務所の調査によると地震後、降雨により発生した山くずれは72箇所にも及んでいる<sup>3)</sup>。またこれらの山くずれは地震前に比して30~50%程度少ない降雨で発生したことが明らかになっている。

山くずれにより生産された土砂は河床に堆積し、これらが降雨時に土石流になることが心配されたが、今回の崩土は上述したように角礫状の軟岩が多かったため空隙が多く、流水が貯留されることがなかったため、また後述するように緊急対策として谷止め工や砂防堰堤が築造されたため市街地へ土砂が流出することはなかった。

## 2.3 復旧対策

地震発生後の1月22日から27日にかけて、延べ1,200名の人々による支援チームが地すべり危険箇所や急傾斜地崩壊危険箇所等、予め危険箇所としてリストアップされていた約1,200箇所を対象として現地調査を実施した。調査結果は危険度に応じてA、B、Cの3ランクに区分された。最も危険度が高いと判断されたAランクは約85箇所あり、これらの場所では巡視や計器の設置による監視が開始されるとともに、二次災害の防止のために10箇所、480世帯を対象に降雨時には避難勧告が発令された<sup>4)</sup>。幸いにもこれらの場所では大きな二次災害は発生しなかった。

既に崩壊した場所に対しては災害関連緊急事業と災害復旧工事の2本立てで復旧工事が行われた。これらは治山<sup>5)</sup>、砂防の両分野で行われ、218箇所で231億円の予算で復旧工事が進められた。復旧工事の内容は山腹斜面に対しては現場打ち砕工が多く採用された。これは写真-1に示されるような工法で、フレームによって斜面を押さえ、崩壊を防止しようとするもので、砕の格子点にはすべり止めの鉄筋もしくはより安全に斜面を安定させるためにアンカー工が施工される場合もある（図-2<sup>6)</sup>参照）。この工法は45°以上の急斜

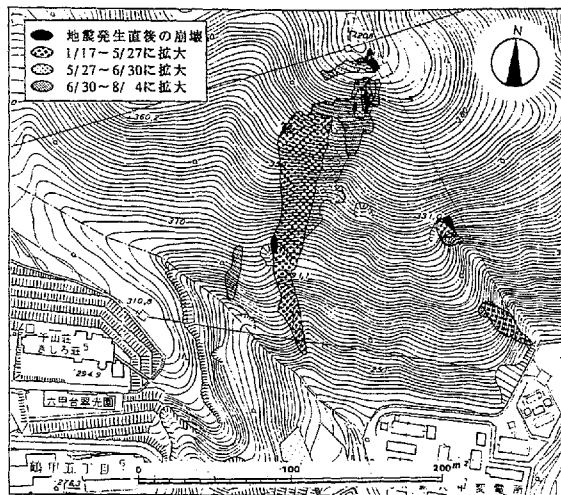
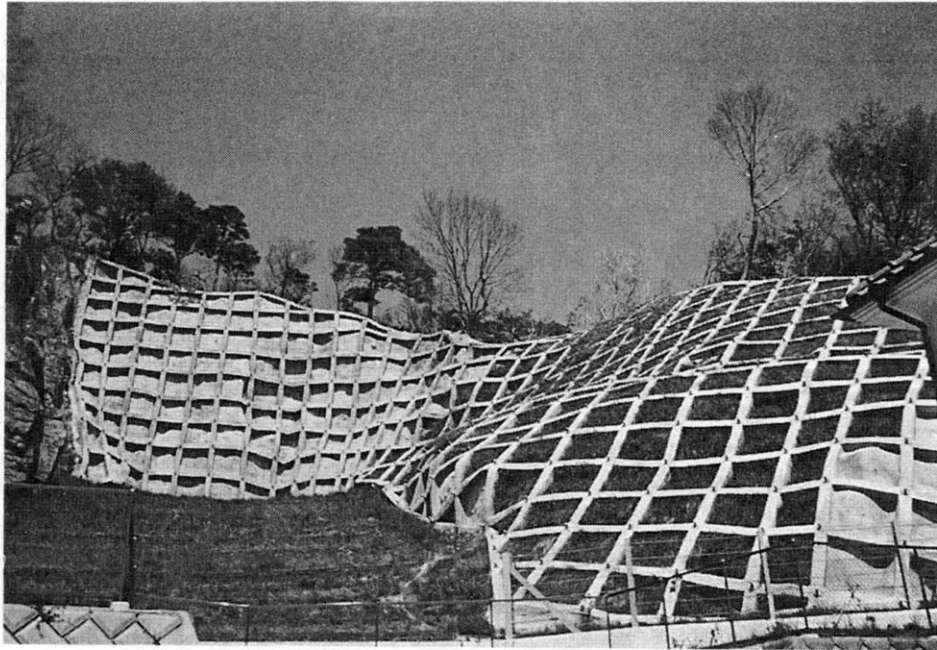
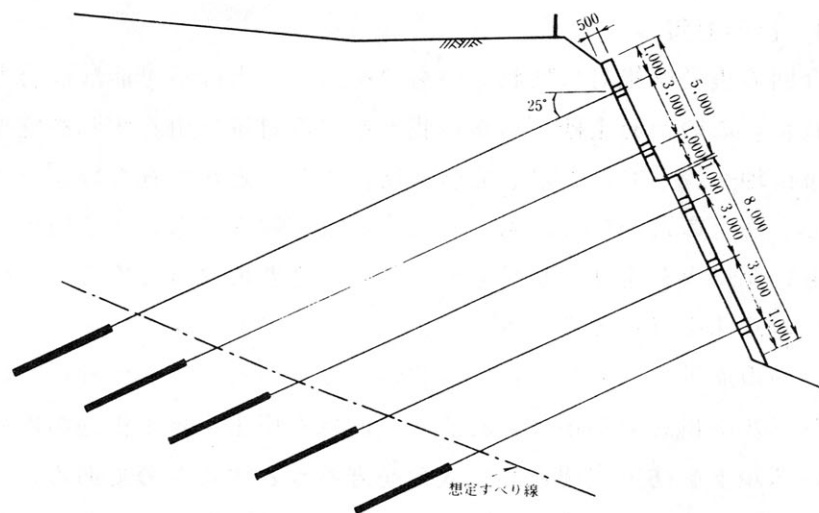


図-1 灘区鶴甲地区の降雨による崩壊面積の拡大<sup>3)</sup>



写真－1 格子柵工の状況

面でも工事が可能であるため、モルタル吹付に代わって近年急斜面で数多く採用されてきている。柵の中は種子入りの土壌を吹き付けることによって緑化を目指している。工事区域内の立木をそのまま柵内に残し、緑化を積極的に図っている斜面も近年多く見られる。しかし施工面積があまり大きくなると、幾何



図－2 格子柵工の断面<sup>6)</sup>

学的な固い模様が山麓斜面に目立つようになり、景観上新たな問題を投げかけている。今後、この工法を用いていかに景観と調和させていくかが大きな課題となる。

その他溪流には土砂の流下を防止するために、谷止め工や砂防堰堤が施工された。通常、これらはコンクリートにより築造されるが、この場合にはコンクリートを下の方から固まらせながら所定の高さまで築造されるため、施工期間が2～3年と長くなる。今回は豪雨に見舞われる前までにできる限り早急に完成し、河床に貯まっている土砂を市街地へ流下させないようにするため、施工期間が短くなる鋼製柵堰堤が主として施工された（写真－

2<sup>7)</sup>参照)。これは鋼製の枠をヘリコプター等で山の中の現地へ運搬し、現場で採取される石を鋼製枠の中に入れてことによって砂防堰堤として活用しようとするものである。今回の場合、約3ヶ月で完成した堰堤もあった。いずれにしても平成7年度中に全ての堰堤工事が完了した。



写真-2 鋼製堰堤の状況<sup>8)</sup>

#### 2.4 復興対策

今回の震災は絶対に壊れないものを造ることは不可能な場合もあることを我々に教えてくれた。このため土砂災害から我々を守る対策は山くずれを完全に防止し、あるいは土砂が市街地へ流下することを完全に防止することができない場合もあるかもわからないため、安心、安全のためには、もし、山くずれが起きて、あるいは土砂が市街地へもし流出してもいかに人命を守るかを考えることが必要になってくる。このような対策が復旧から復興への意味を持ってこよう。

今回の震災でとられた復興対策の主なものとして、土砂災害に対しては「六甲山系グリーンベルト構想」が挙げられる。これは六甲山系と市街地の間にグリーンベルトを設けて、このベルトを防災空間として人命を守ろうとするものである。六甲山系と市街地の間にこのようなグリーンベルトが形成されると、災害時には崩れてきた土砂をこのベルト内で堆積させ、市街地へ流下させないことが期待できるとともに、このベルト内で積極的に土砂災害防止のための工事を行うことも可能である。また日常時には緑地空間を形成するため良好な都市環境や風致景観の形成に寄与できるとともに、グリーンベルト内では散策路等を作り、健全なレクリエーションの場を提供することも可能となろう。加えて、人間生活の場が六甲山系へ拡大することを防止することにも大きな役割を果たすことが期待されている。この構想は今回の地震を契機として設定され、既にこのための施策が考えられつつあるが、その後グリーンベルトは全国的な展開を見せ、各地で設定されているようである。今回の六甲山系の復興が全国の貴重な手本となることを祈っている。

### 3. 宅地災害

#### 3.1 宅地災害の概要

今回の地震は山くずれのみならず宅地においても大きな被害を発生させた。その内容は擁壁の亀裂、前倒、全壊に加えて、宅地地盤そのものにも沈下、隆起、亀裂等の変形をもたらした。兵庫県の調べによると被害が発生した宅地は5,100宅地にも達し、そのうち約半数の2,400宅地、約7,000箇所の擁壁が将来の安全のためには何らかの対策が必要であると判定されている<sup>87</sup>。

被災宅地の分布図によると被災宅地は六甲山系の山麓部に出現し、六甲山系を取り囲むように分布している。このことは扇状地等の沖積低地における宅地の被害は少なかったことを示している。宅地被害はその内容を見ると宅地地盤の変状と擁壁被害に大別できる。まず宅地変状被害は昭和36～50年以前に造成された宅地での被害が多く、新しい時代に造成された宅地の被害は少ない。これは宅地造成等規制法に代表される法律上の施工基準に従って造成されたものは、やはり被害が少なくなっていることを暗示している。また被災宅地は盛土、とくに谷部に施工された盛土での被害が多い。このような被災事例は今回初めてではなく、1987年6月に発生した宮城県沖地震により仙台市内で盛土斜面が崩壊した事例が報告されており、今回も盛土が被害を受けた。今回の被害での特徴は盛土基盤が非常に緩い斜面上でも被害が発生した場所もあったことである。。このように盛土が被害を受ける原因としては、地震による応答加速度が大きくなること、また地下水が分布している場合は液状化のメカニズムも考えられる。

次に擁壁被害について述べる<sup>89</sup>。図-3は被災擁壁のタイプ毎に被災数を示したものである。これより石積擁壁の被害が圧倒的に多く、被災擁壁全体の81%を占めることがわかる。次いで無筋コンクリート擁壁での被害が13%を占めた。図-4、5は被災擁壁の内容を分類したものである。ここで対象とする被災擁壁は「宅地造成等規制法」に基づく許可を受けた宅地擁壁のうち、勧告を受けた57箇所の結果である。これらの図では「宅地造成等規制法」が施行された1962年（昭和37年）と「都市計画法」が施行された1970年（昭和45年）から5年経過した1975年

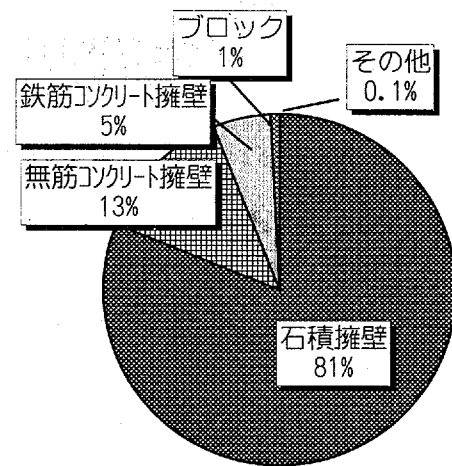


図-3 被災擁壁の種類

（昭和50年）をパラメータとして被災擁壁を二つに施工時期に分けた。図-4、5から1975年以降に施工された擁壁の被害は7箇所と少なく、被災擁壁の大半を占める47箇所が1974年以前に施工された擁壁であることがわかる。被災の内容は両施工時期ともクラック発生が大半を占め、転倒や上部の半壊、全壊の大規模な被害が発生した箇所は少ない。図-6、7は図-4、5で示した被災擁壁がどのような原因により被災を受けたかを示したもので

ある。ここでも施工時期をパラメータとして示している。これによると擁壁被害の原因としては基礎地盤の局所的な沈下等の変状に起因するものが圧倒的に多かった。このことは今回の地震による擁壁被害は、擁壁の構造そのものに起因するものは少なかったことを暗

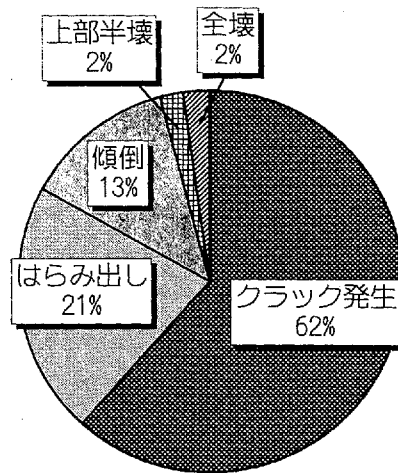


図-4 1962～1974年施工の被災内容（47箇所）

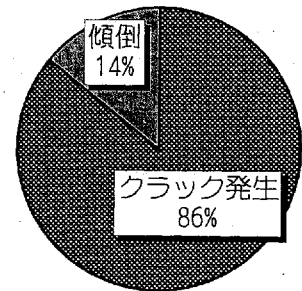


図-5 1975年～施工の被災内容（7箇所）

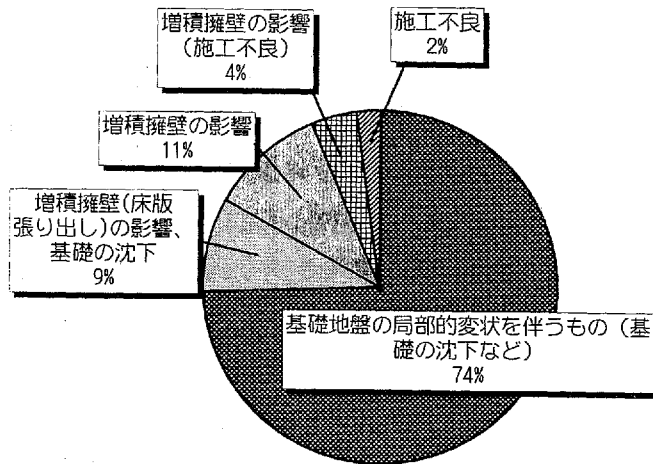


図-6 1962～1974年施工の被災原因

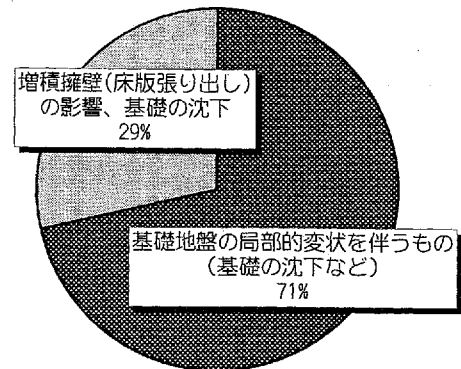


図-7 1975年～施工の被災原因

示している。特に1975年以降は増積み擁壁の影響、施工不良が原因と見られる被害が0箇所になっている。これより法律による技術基準、開発基準の設定が宅地地盤のみならず擁壁においても被害発生の抑制に効果を発揮したことがうかがえる。ただし、図-6、7の結果は、施工時期のパラメータからわかるように、あくまでも宅地造成等規制法の施行以降の結果であり、1961年以前に施工された擁壁被害の原因は不明である。

### 3.2 復旧対策

被災調査は緊急から対策まで含めて3次にわたり、延べ685人を動員して行われた。その結果は被害程度が大きなものや緊急性を中心にまとめられた。また宅地防災相談所も開設され、2日間の期間中に約1,400件の相談を受け付けた。この相談を受けて、現地パトロールも実施された。

宅地や擁壁は本来は私有地や私有物であるとみなされているため、復旧対策として公的

な予算を使用する公共工事は行われなかった。しかし所有者が被災した擁壁を安全に復旧するための指針が必要であり、このため平成7年8月には宅地擁壁復旧技術マニュアルが建設省により作成された。これは宅地擁壁の復旧技術に関する基本的な考え方や、復旧工法の選定手法等を体系的に整理したものである。そこでは復旧を応急措置、仮復旧、本復旧の三つの過程があるものとし、それぞれのレベルで練石積、空石積、RC等の擁壁毎に復旧の工法が明示されている。従来、擁壁を設計する場合は擁壁が壊れないように転倒、滑動等の条件に対して安定であるように設計するが、今回のように亀裂の発生はその考えには入っていなかった。このように今回の地震は我々にある意味で発想の転換を迫るものであった。上述した宅地擁壁復旧技術マニュアルも地震発生後約7ヶ月で完成した。従来のマニュアル作りは通常最低でも1～2年は要するものであり、常識では考えられないほど素早い対応で評価されるべきものであった。これも今回の地震が我々に与えた教訓、すなわち発想の転換の必要性を具体化したものとして評価されるべきものであろう。

その他、個人による復旧への支援としては、復旧工事のための融資制度を拡充することや阪神・淡路大震災復興基金による利子補給制度や2次災害防止工事に対する助成制度が設けられた。

### 3.3 復興対策

今回の地震による宅地被害の対策として大きく評価できるのは、私人の所有物である宅地擁壁を公的な予算で修理する措置がとられ、191箇所の宅地で約103億円の予算で復旧工事が行われたことである。上述したように宅地擁壁は原則として私有物であるため公的な予算では修理は不可能であるが、あまりにも多くの場所で宅地擁壁が被害をうけ、その擁壁被害により河川、道路、ライフライン等の公共施設が被害を受ける恐れのある場合は特例措置として今回の震災に限り災害関連緊急傾斜地対策事業として公共工事として対策工が実施された。

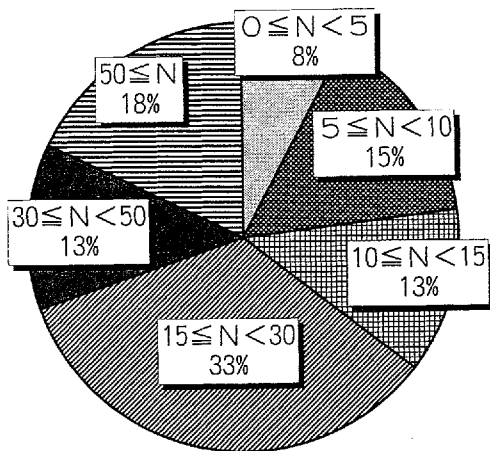


図-8 被災擁壁基礎付近のN値

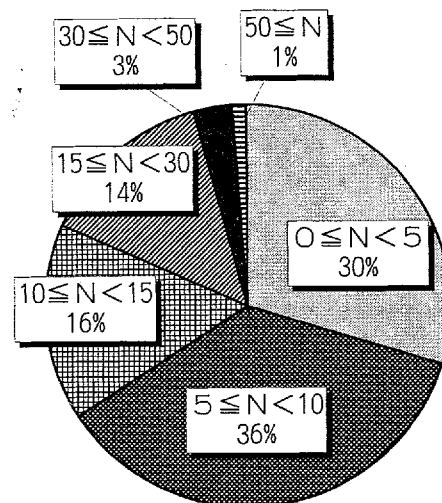


図-9 被災擁壁背面土のN値

この工事に先立ち対象場所で設計のためのボーリングが施工された<sup>9)</sup>。被災擁壁基礎付近のN値の分布を図-8に、被災擁壁背面土のN値の分布を図-9に示す。図-8より被災擁壁基礎付近ではN値10未満が全体の約23%を占める。このように一部の擁壁の基礎地盤は十分なN値を示さなかったために、前述したように基礎地盤の局所的な沈下等に起因する被害が多かったのではないかと考えられる。図-9より被災擁壁背面土はN値10以下が全体の約66%を占める。このように盛土のほとんどが軟弱地盤状態にあったために、地震時に背面土が変位した結果、擁壁にはらみやクラックが生じたものと考えられる。図-10は擁壁の復旧に当たって擁壁基礎にどのような対策を行ったかを示したものである。図-8にも示したように擁壁基礎のN値は低い場所もあったため、約半数の43%に相当する場所で、何らかの地盤対策が行われた。

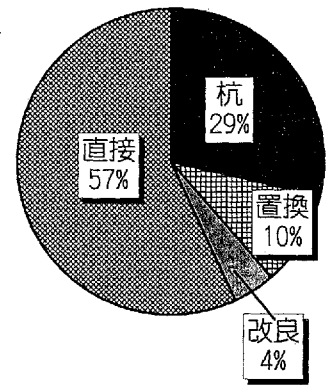


図-10 復旧のための基礎処理

次にどのような条件によりどのような復旧工法が選定され、どのように施工されたかについて二つの事例を用いて紹介する<sup>9)</sup>。

#### A地区

- 被災状況：被災擁壁は石積み擁壁であり、高さは3.5mである。擁壁の前面勾配は1:0.4~0.5である。特徴的な被災状況は地盤の沈下（陥没）と石積み擁壁のはらみ出しである。
- 現場条件：現地では全体的に家屋等に被害が大きい。復旧対象とする石積み擁壁の上下の宅地では所々に家屋が残っており、復旧工法の選定にあたっては掘削が制限される部分がある。

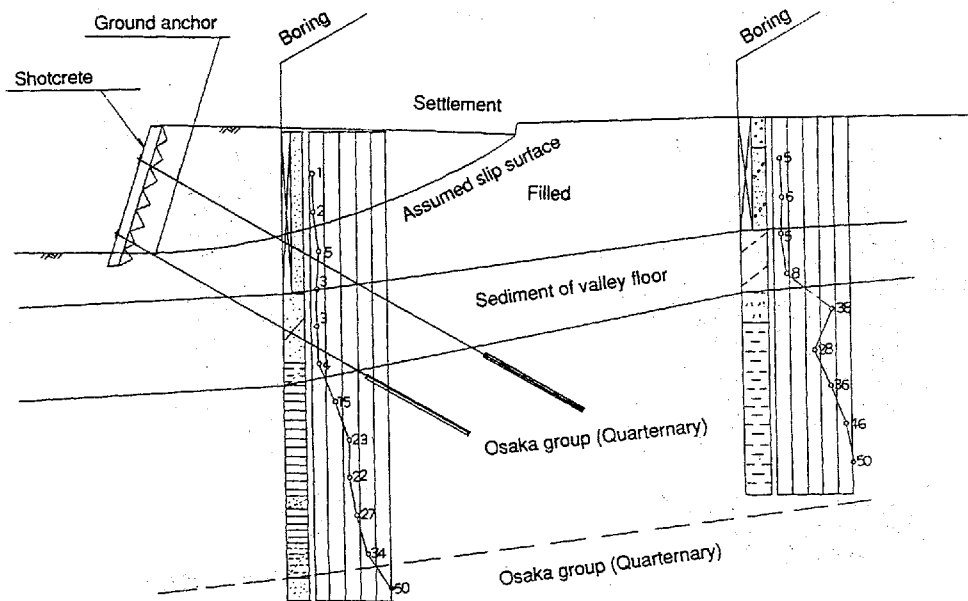


図-11 A地区の復旧工法<sup>9)</sup>

- 3)土質条件：この地区は谷筋を盛土して造成されたが、盛土は緩い土砂からなり、その厚さは2～6mと推定された。盛土の基盤は密な砂層と半固結の粘土層の互層で構成されている。N値15以上の支持基盤は擁壁底面より更に5m深いところに出現する。
- 4)その他の条件：現地踏査の結果、今回の地震により復旧対象とする擁壁を含んだ円弧すべりの存在が推定された。
- 5)採択された復旧工法：張コンクリート+グランドアンカー工（図-11参照）。グランドアンカー工の定着層は深部の支持基盤（N値平均20程度）とされた。またはらみ出しによる擁壁の損傷が激しいため、石積み擁壁表面が張コンクリート工により押さえられた。

#### B地区

- 1)被災状況：現況擁壁は石積み擁壁であり、擁壁高さは概ね4～5mである。擁壁の前面勾配は1:0.3である。特徴的な被災状況は石積み擁壁のはらみ出しである。部分的には積み石の崩落も見られる。
- 2)現場条件：現地は住宅地の中にあるため、道路幅が狭く、また施工空間の確保も難しいため大規模な施工機械、資材を用いた工法が採用できない。また今回の施工区間の一部では住宅の撤去が予定されていないため、掘削を伴う工法が採用できない。

3)土質条件：六甲山系の山麓に位置し、緩い斜面に沿って造成地が広がっている。調査ボーリングを4箇所を実施した結果、基礎地盤となり得る地層は深いことが明らかになった。5)その他の条件：この工事は安全性の確保、被災擁壁の早期復旧、被災住民の復興支援を目的としているため、被災前の土地の利用形態が可能な限り再現できるような工法の選定が行われた。また復旧後の土地利用の制限をできる限り小さくするため、地中には構造物を極力設けないことが配慮された。

- 6)採択された復旧工法：○掘削が可能な区間は重力式擁壁工と基礎杭工、○掘削が不可能な区間は網状鉄筋挿入工（引張補強工法）（図-12、13参照）

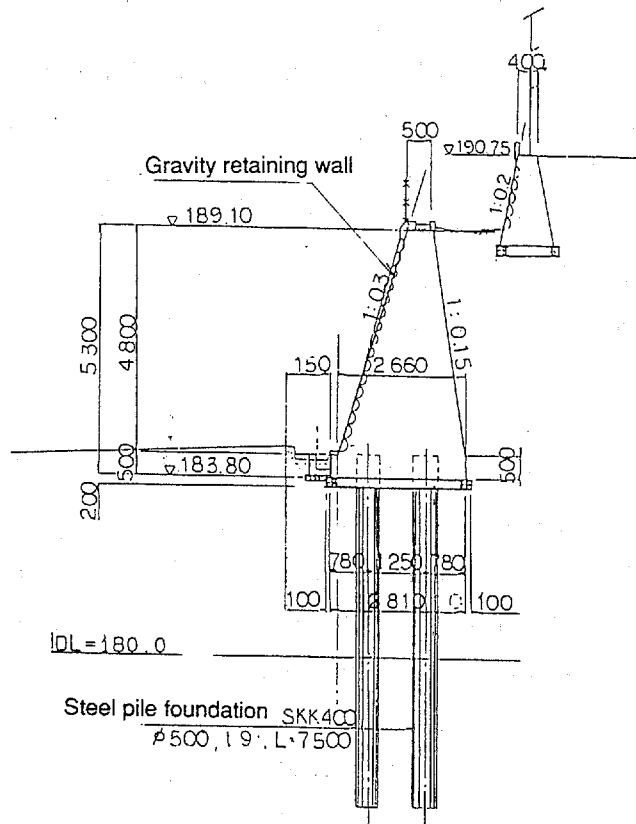


図-12 B地区の復旧工法（掘削可能な場所）<sup>9)</sup>

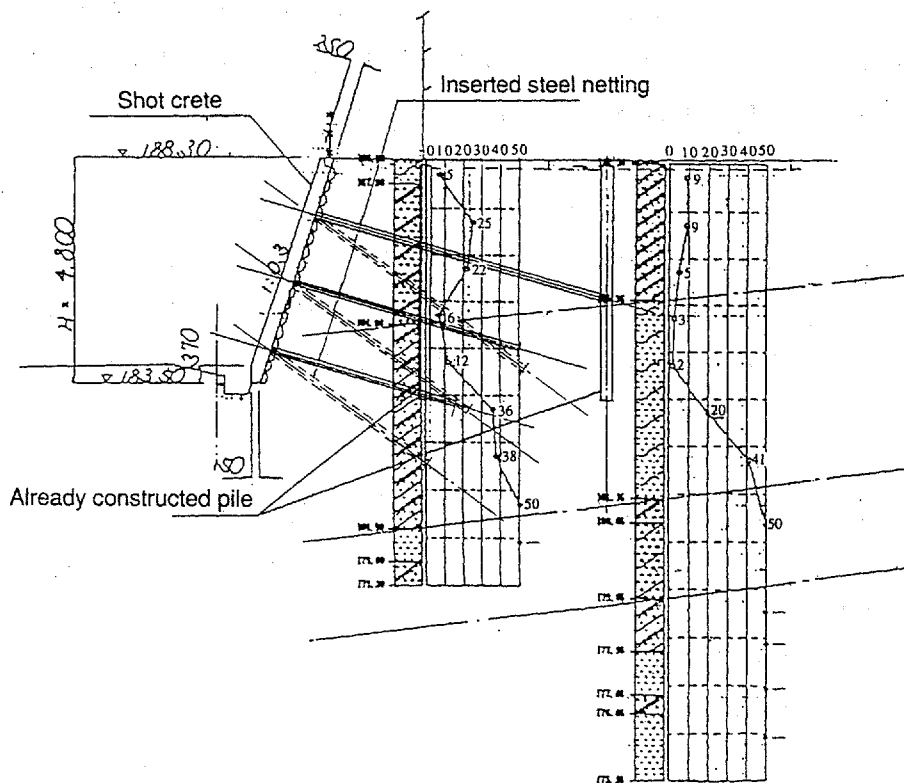


図-13 B地区の復旧工法（掘削不可能な場所）<sup>9)</sup>

図-14は今回採択された復旧工法の種類を示したものである。重力式が最も多く64%を占めている。今回新たに宅地に採択されたアンカー工や補強土工法は23%となり、全体の約1/4にも達した。神戸のように地形条件が厳しいまちでは、このような結果にならざるを得ない。今後はこれらの新しい工法による擁壁の維持管理が問題となろう。

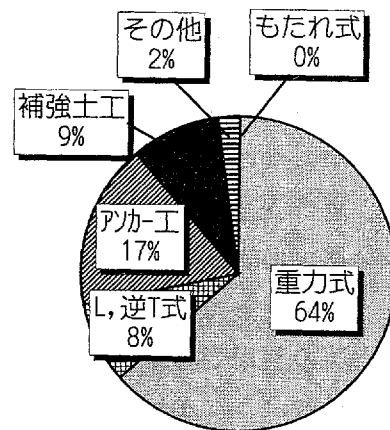


図-14 復旧工事で採択された擁壁

#### 4. おわりに

本報では兵庫県南部地震による被害を、特に山くずれと宅地災害に絞って、その概要、復旧および復興について概説した。地震による被害はこれらのみならず、住宅、道路、鉄道、港湾、埋立地等公判にわたっている。これらの被害においても復旧・復興計画が立てられ、その事業が進められているが、防災空間の創造を目指した水とみどりのネットワーク、ネットワーク型の都市構造を目指した多核ネットワーク型都市圏の形成、防災コミュニティを目指した防災福祉コミュニティづくり、防災マージメントの強化にもつなげる災害文化の継承等は、神戸から世界へその成果を発信できるよう一層の充実を期待している。

#### 参考文献

- 1) 沖村孝：兵庫県南部地震と斜面災害－山腹斜面崩壊－、地すべり技術、23(2)、pp. 38-44、1996.
- 2) 沖村孝、鳥居宣之：地震時山腹斜面崩壊の一例－トップリング崩壊の例－、神戸大学都市安全研究センター報告、1、印刷中.
- 3) 富田陽子、桜井亘、中庸充：六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について、新砂防、48(6)、pp. 15-21、1996.
- 4) 兵庫県土木部：復旧の軌跡－阪神・淡路大震災土木施設の災害記録－、28p.、1997.
- 5) 兵庫県六甲治山事務所：六甲の豊かな緑を未来に、92p.、1996.
- 6) フリーフレーム協会編：フリーフレーム工法設計・施工の手引き、pp. 39-77、1993.
- 7) 建設省六甲砂防工事事務所：阪神・淡路大震災における六甲山系の土砂災害と対策、27p.、1996.
- 8) 沖村孝：兵庫県南部地震と斜面災害－宅地地盤災害－、地すべり技術、23(3)、pp. 62-69、1997.
- 9) Takashi OKIMURA, Shinji MORITA and Shiro KIDO: Ground failures of residential land and mountain slope failures caused by the Hyogoken Nanbu earthquake and their restoration, Geotechnical Engineering in Recovery from Urban Earthquake Disaster(KIG Forum '97), pp. 313-321, 1997.

メ 毛



メ 毛

## 1. まえがき

兵庫県南部地震は大都市，大工業地帯，我国最大の港湾，商業地域を含めて，南北2 km，東西25 kmの地域を帯状に震度7が占める大地震で死亡者約6,000名，家屋全半壊 159,544棟という戦後最大の被害を受けた地震である．これに対して各学会，各行政機関，企業などから種々の報告書や安全のための手引き書が出版されると共に，現在も調査が続けられている．

日本機械学会では，地震後間もなく調査分科会が発足し，機械設備の被害に関する調査が行われた．そこで本日はその調査報告を基に被害状況及び我国における機械設備の耐震設計の動向等について述べる．

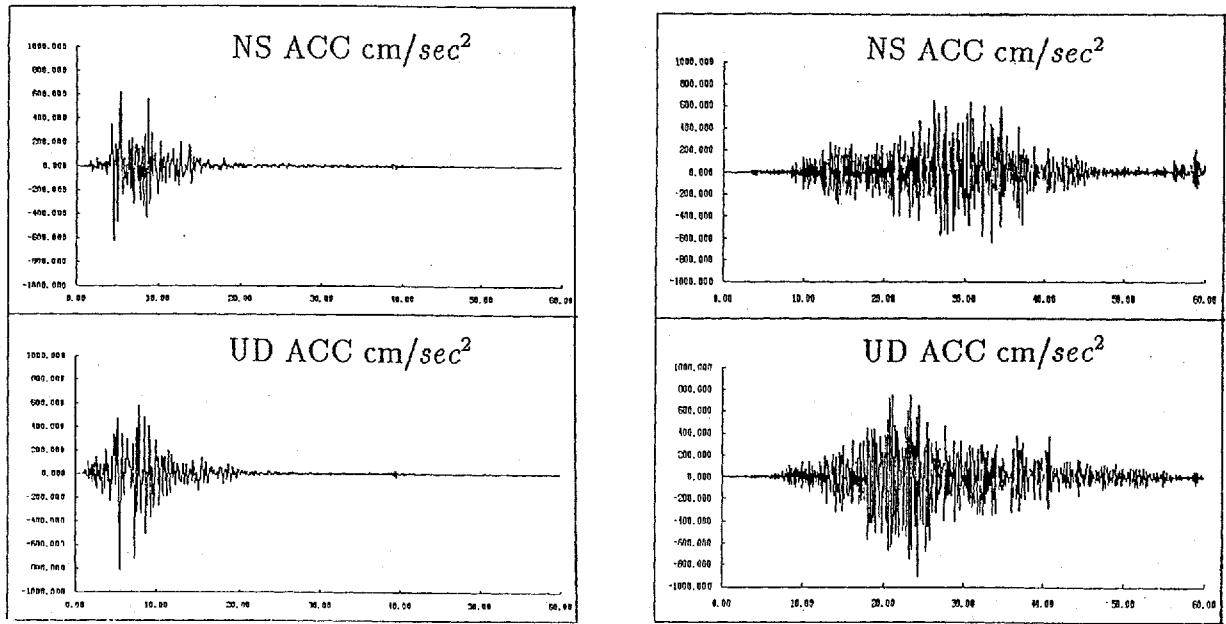
## 2. 地震の概要

神戸海洋気象台で観測された地震波形とスペクトルを釧路沖地震の場合と比較のもとに図1に示す．次に他の地域の地震と本地震とスペクトル分析による特徴のちがいを示す．本地震では大都市と震源地とが近かったためそこでは衝撃的な波であったが，震源地より離れると，次第に波は地盤の固有振動になっている（図2参照）．人工島ポートアイランドにおける地表および-79mの岩盤上の波形，地表面では上下振動は地盤に対し，拡大されているのに対し，水平地動では液状化現象のために非常に低い振動のみになっている．さらに地盤面，建物1階，建物31階における振動波形については地盤に比べて高層階の振動は大きい．これは建物が振動することによって増幅しているからである．震度7の地域の分布を図3に示す．

## 3. 土木・建築関係の被害状況に伴う工場設備の被害

建築物の損傷は4～6階で大きく受けている．産業用機械を高層に設置している工場では高層の方が被害が大きかった．また工場建屋で建屋に取り付けられているクレーン等の場合建屋の変形によりクレーンが作動しなくなった例もかなりある．橋梁，道路，港湾等土木関係については，地盤の変形，液状化によるものが多いが，一部では上下動による柱の破損，橋桁の落下，ずれが多く見られた．岸壁については，ケイソー岸壁における被害が多く見られた．工場が岸壁近くに建設されている場合，地盤の側方流動により埋設されたパイプ等が大変形し破損している場合が多く見られた．

土木・建築関係の被害は当時の新聞，TVその他のニュース及び他の講義を通じて知っていると思うので省略する．



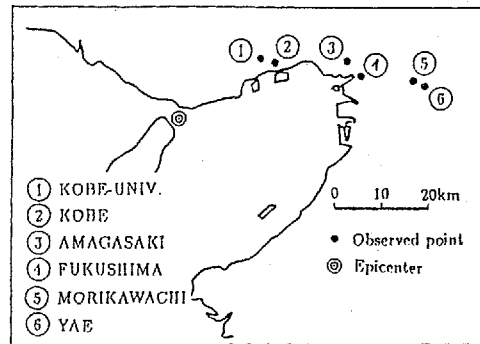
a) Accerelation of NS and UD

a) 兵庫県南部地震 [Kobe O.M.O.]

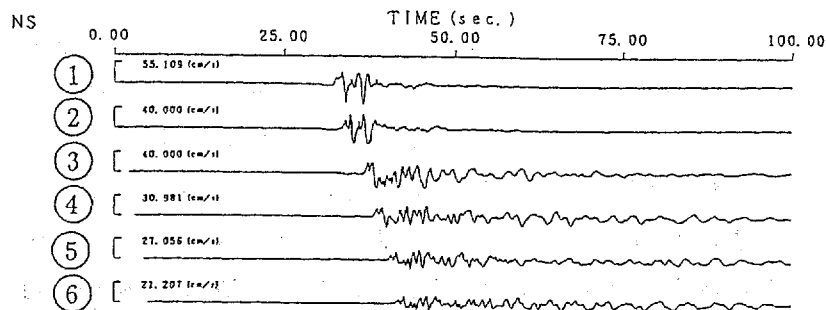
b) Accerelation of NS and UD

b) 釧路沖地震

図1 地震波形



a) observed point



ORIGIN TIME 1995-01-17 05:46:27.78 DT=0.010 (s)

b) observed velocity wave [NS]

図2 地震計測地点と地震波形 (Committee of Earthquake Observation and Research in the KANSAI Area)

4. 機械被害調査

4. 1 機械に関連する被害

図4及び表1に示すような44業種の工場を調査することができた。これは第3者の機関である機械学会による調査であり、公共の利益となる工場施設および機械設備の耐震設計マニュアルを作成し、今後の地震に役立たせようとする目的に理解があったものと思われる。

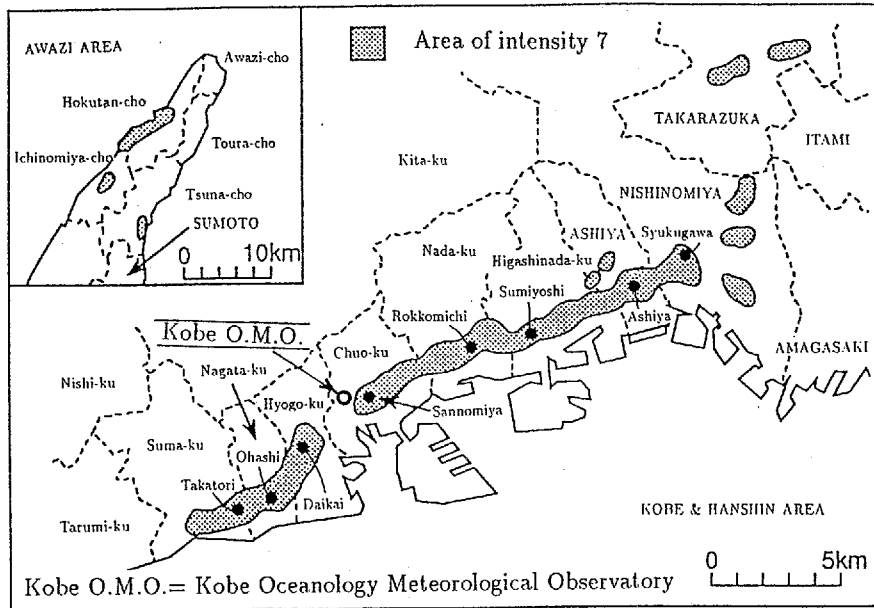
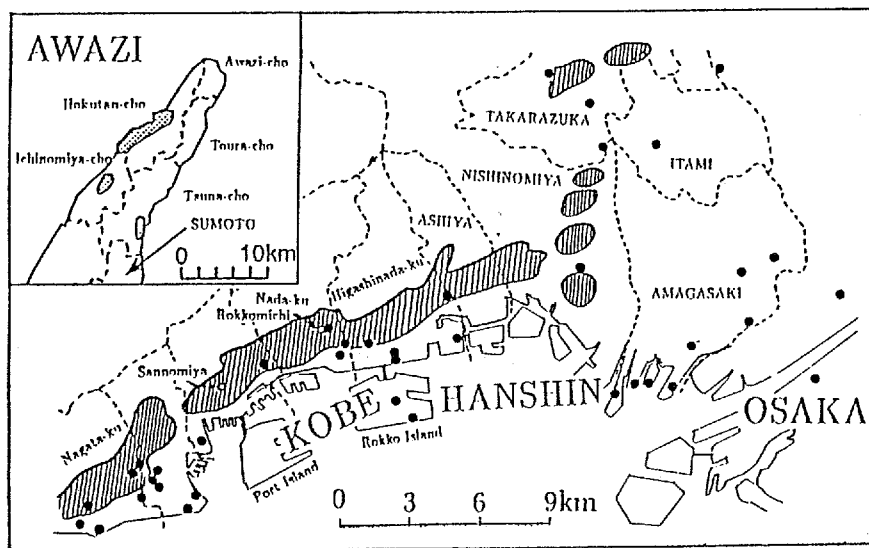


図3 震度7の地域



(Area of intensity 7, ● Investigated industry)  
(courtesy of The National Weather Service)

図4 震度7の地域と調査企業の位置

## 4. 2 調査結果

### (1) 工作機械

#### (a) 大形工作機械

便宜上の分類として、基礎面積が数10㎡の大形工作機械は、パイルを打ち込んだ基礎工事が十分で大きな被害はなかった。しかし数10mmの地盤沈下等があり、すべての機械はレベル出しを必要とした。また工作機械の構造上深いピットを必要とするものでは、そのピットにヒビが入り、浸水した例もあった。プラノミラーについては、ボールベアリングの破損、フレームの破損があったが全般的にはレベル合わせで済んだ。長尺旋盤についてはベッドのねじれ等はなく、レベル合わせで復旧できた。

#### (b) 中・小形工作機械

アンカボルト固定の場合ほとんどの機械は移動がなく、被害がなかったが、一部激震地ではボルトの破断や伸びがあった。それに対して置いただけの場合は最大1.5m程の移動があった。まれではあるが移動して壁面、柱、他の機械と衝突し、小破した例があった。一般に重い機械は動かないような錯覚をするが移動は床面と機械の摩擦係数と上下・水平動の位相で決まるので重量には余り関係がない。従って、数10tonの機械が1m程移動した例もあった。またプレス、ボール盤等重心の高い機械で基礎の固定がない物はかなり転倒しているが、激震地では、基礎ボルトのぬけとそれに伴う転倒、ビスのゆるみなどがあり、マシニングセンタのボールネジを用いた位置決め装置ではモータのブレーキがかかっていたのに原点のずれが生じた例があった。NCを用いた機械では、制御盤の転倒が多かったが、回路に支障が生じたのは少なかった様である。

### (2) 生産ライン

激震地では連続鋳造設備や圧延設備の床の基礎沈下やそれに伴うφ30、φ45のボルトのひきちぎれ、またコークスサイロの倒壊、搬送系統の損傷などが地震のすさまじさがうかがえる。また想定震度5～5.5の地域でも小・中径管冷間加工設備、その他数10mの長さを有する加工設備において芯ずれ、走行レールの破損、地下ピットの亀裂等地盤の液状化、不

表1 調査業種

業 種	調査数	業 種	調査数
重 工	4	製 紙	2
機 械	9	ゴ ム	2
精密機械	5	鉄 道	2
鉄 鋼	3	電 力	2
石 油	2	港湾施設	1
化 学	1	新聞社	1
薬 品	1	病 院	3
酒 造	3	焼却場	1
菓 子	2	合 計	4 4

等沈下に伴う被害が発生した。特に冷間圧延機本体の不等沈下によって重さ約10ton、150rpmで繰り返し運転するアームの自動調心ころ軸受の外輪ところがぼろぼろになる被害があった。スチレン成形機では、熱膨張を逃げるために一端は固定で他端は固定できない様な装置が地震に対して移動し、ベアリングが破損する例があった。この様に全長20～50mの大形設備が不等沈下し芯出しをしなければならなかった例は非常に多い。また同様に20～50mの大形設備でも比較的軽量の化学、菓子、ビール工場などでは、床に機械を固定していないため、数10cm移動した例もある。この様な機械は元にもどすことが出来ずにそのまま運転していた。また連続したラインにおいて、製造機械とその間をつなぐコンベアによって構成されている場合、コンベアを固定していないために、固定している機械に衝突して破損した例もある。

### (3) プラント関係

小形ボイラでは、ほとんど被害はなくボイラと配管との取り合いのところでもれ等が発生している例はあった。しかし火力発電用大形ボイラでは自重が2,000ton程となり熱変形を避けるためにそれを水平方向に支持している seismic tie がボイラを満水にしている時43本中9本が折損し、水がない時は被害がなかった。しかし、いずれの場合もボイラ本体には被害はなかった。回転機械では、ほとんど故障はなかったが、一例として、蒸気タービンの油圧ポンプが止まってタービンメタルが損傷した例がある。また機械設備と、それに附属する治具、部品材料等を取り付けるロボットから構成される機械では、変形に伴い相互関係にずれが生じ自動化に支障をきたしている例があった。

非常用発電装置、燃料切れの問題、灯油 1,000liter、重油 2,000liter が限度

### (4) クレーン、走行台車

工場内クレーンでは、建屋が変形していない場合はほぼ健在であったが、建屋の地盤の不等沈下により、レールが蛇行した場合やクレーンが落下したことがある。特殊な例として、クレーンに一本100tonの洗鋼と容器60tonの鍋が2本宙づりになった状態で震度7の地震波を受けた例があるが、このクレーンは破損しなかったということである。岸壁のクレーンは、岸壁の不等沈下、地盤の大変形により、レール幅が強制的に拡大されクレーンが股裂きの状態となって破損したものや、柱の座屈を起こしたものが多かった。

鉄道では、停車中の75輦中42輦が横転、脱線し、また100tonの整備中の機関車ではレールを大きく変形させた。ところが地震中の走行車輦には余り大きな被害はなかった。また洗鋼の入った台車が走行中に地震波を受け、何台も転覆した。

立体駐車場では、崩壊はなかったがブレスが数本座屈または破断する例が多かったとのことである。

### (5) タンク・パイプライン

屋上のタンクは、基礎コンクリートの破損による落下、スロッシングによるタンク天井板の破損、ステンレスタンクの内部構造の溶接部が原因で壁面からの微小な漏れなど、かなりの被害があった。ビール会社の横置きタンクでは、宮城沖地震の時の被害をもとに補

強していたものは破損せず、宮城沖地震と同じ設置方法にしていたものは破損した。対策による顕著な効果が表れた例があった。製造過程における液状チョコレートタンクのスロッシングによる噴出、溶けたアルミタンクのスロッシングによる噴出などがあったが、被災時に人が居れば大災害につながったものと思われた。石油タンクでは、地盤の液状化による傾斜が見られた。また基礎に20φ程のボルトを40cm程打ち込んでいるボルトがぬけたり、切れたりしている例もあった。

パイプラインでは、工場内に設置している高圧ガス、蒸気、水、アセチレン、酸素のパイプがいずれも使用不可能となっていた。地中埋設でも通常の配管でも漏れが発生していたが、その原因は異なる様である。石油給配ターミナルでは、タンカーのタンクから岸壁にあるパイプを通して石油を運ぶ系において直径8 inch全長約50mのパイプの途中にある4カ所の支持がすべて倒れ、ふらふらの状態になったがこれは支持の設計と岸壁の振動評価に問題がある。プロセス工場においてタンク等を固定していない場合、パイプとタンクとの取り合いでフランジ等から液が漏れる例があった。また、ポンプ、ファンとパイプとの間の取り合い部で多数切れた。また、頑丈な基礎と軟弱な基礎の間の段差によりパイプが破断する例が多かった。

#### (6) 電気、計測器

受電、変電設備は、古い設備はかなり被害を受けているが、トランスの移動と衝突に伴う電線の破断やフィンの破損、碍石の破損などがある。また、古い工場内施設では柱のトランスがほとんど落下した例もある。コジエネ装置については、震度5～6の地域で全然止まらなかったところと、瞬時にトリップがかかり翌日に運転が再開されたところとがあったが、非常用発電装置については、メカニカルにはトラブルは一件もなかった様だ。しかし電子電気回路の故障が少しあった。特に問題なのは燃料の保存量が少なく今回の地震のように長時間停電した場合には結局役立たなかった。

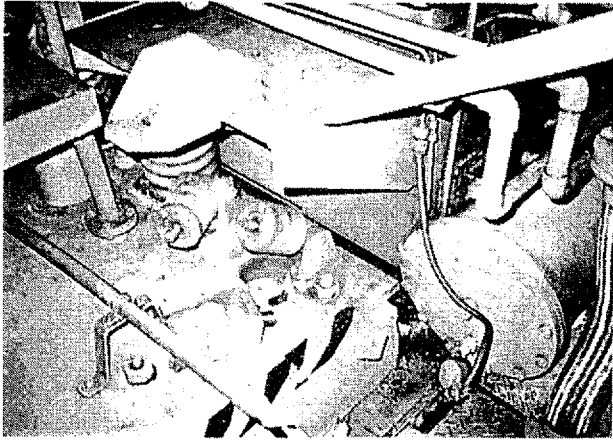
計測器として最も利用度の高い3次元測定器は激震地では転倒し使用不可となったものもあり、不等沈下で傾きスケールが破損した例もある。試験機類は、基礎を固定していないものが多く、しかも重心が高いのでかなり転倒していたが、破損したものは少なかった様である。制御盤は、ほとんど転倒していた。特に激震地ではアンカボルトで固定していても転倒した例もある。

#### (7) 倉庫

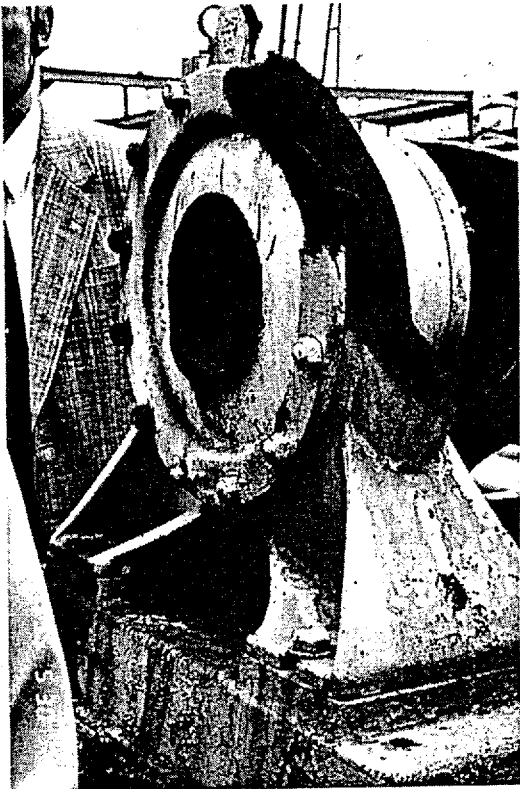
激震地（震度7）では、棚が倒れ物が落ちた例もあるが、同様の地域で棚もしっかりしていて、落下物もなかった自動倉庫もあった。倉庫に製品を積み上げていてそれがくずれ、大きな被害にあった工場は非常に多かった。何百種類もの金型の棚が転倒し大損害を起こした例もある。

#### (8) 工場内の様子

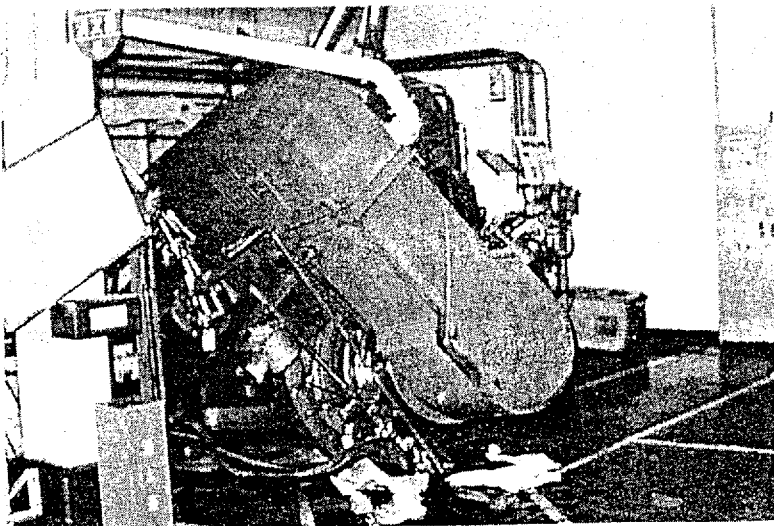
工具・治具類の散乱、半製品の被害等が多かった様だ。特に工具入れは、地震によって引き出しが出て、重心が前に移動し転倒という例が多かった。屋上に材料、原料を置いて



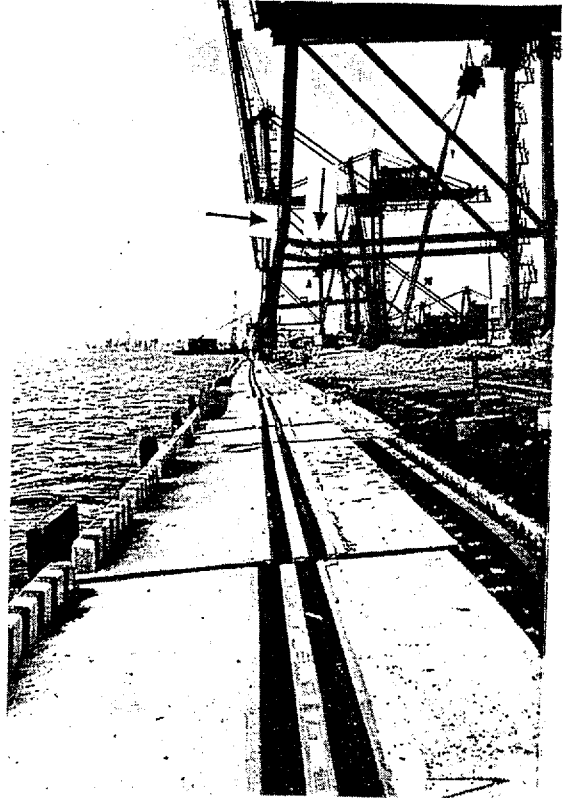
非常用ディーゼル発電装置の防振支持装置の破損



ポンプの入口及び出口部分より  
パイプにもぎ取られたケーシング



頭部の重い機械の基礎部の破損



ケーソン岸壁の側方流動により  
地盤が 3m 程海側へ移動したため  
クレーンの脚部が変形



自動鋳造ロボットの溶融アルミが  
地震により噴出

いて建屋の重心が高くなり、被害を受けた例もある。煙突は、下から2/3の位置で折れているのが多かった。ピットは亀裂が入り海岸近くの工場では、ほとんど浸水した様である。エレベータは、S56年以前の方でワイヤのはずれ、カウンタウエイトのはずれ、カウンタウエイトと隣のカゴとの衝突を起こした例があるが、もう少し調査をする必要がある。配線用の溝を天井から吊り下げている設備では、簡易ボルトの場合、ほとんどぬけて脱落していた。

## 5. 破損の特徴

### a) 地域による影響

破損の状況は地域によって地震波が直接伝わるか、あるいは軟らかい地盤のために変化してしまっているかによって以下のように異なる。

臨海地帯：液状化、軟弱地盤により変位が原因で損傷

地盤の硬い地帯：加速度が原因で損傷

b) 大形機械：基礎は岩盤または硬質地層で固定。数mm～数10mmの移動と不等沈下。

c) 工作機械：① 基礎固定 → ほとんど問題なし。ごくまれに固定ボルトの破損

(普通サイズ) ② 植込ボルト(簡易)による固定 → 抜けた例あり

③ 移動止め式 → 飛び越えた例あり

④ 基礎固定せず → 500～1,500mm移動(100mm以上ジャンプした跡あり)

⑤ 防振ゴム支持 → 支持なしよりよく跳ねる。

d) ボールベアリングの破損例：医療機器、機械の台車のころ

e) パイプライン：① 地盤液状化の影響大

② 機械とパイプとの相互変位による破損

③ 建屋とパイプとの相互変位による破損

④ 天井に吊っているパイプでは、吊り具の状態による

(簡易植込ボルトはだめ)

f) 工作機械、機械一般：頭の重い機械は壊れたり、転倒したりする。

g) 高温の機械：熱膨張のため機械の固定不可能=今後の課題

h) 鋳物用注湯ロボットの破損：湯槽のスロッシングによる湯の噴出 ← 安全性から問題

i) 小形コンピュータ：非常に強い(机より落下しても無事)

## 6. 耐震設計の今後

(1) 原子力発電所の耐震設計、高圧ガス施設の耐震設計等安全性が特に要求される設備は安全性の程度に応じてそれぞれ基準が決まっている。これらの施設を除く一般の機械に対しては、各企業がそれぞれ設計基準を設けているようであるが、その様な基準を作るときに考えなければならない事項を以下に示す。

### 1) 機械単体

- a) 機械の固定の必要性の有無の検討，もし固定する場合はその方法
- b) 機械基礎の設計法（現在は土木がしている）総合的に設計
- c) 熱変形する機械の固定・据付け
- d) 設計時に耐震性の考慮

計測機器，医療機器（安全のため），工作機械（壊れてもよい部分を設ける）

2) システムとしての機械

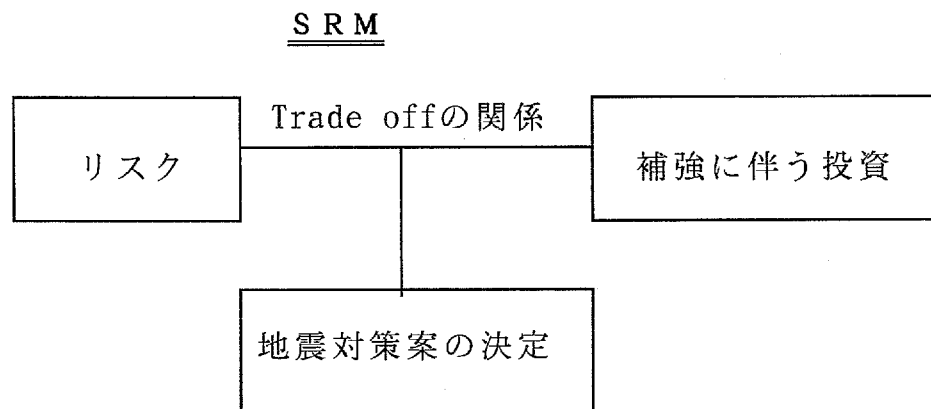
- a) 生産ライン
- b) プラントにおける配管
- c) 機械と配管の結合
- d) 機械と機械の結合

3) 工場の地震に対する対応

- a) ソフト面とハード面の対策
- b) 経営者側と従業員側の対策
- c) 工場建屋，附属設備の対策

4) 耐震設計の要，不要の決定手段

例えば，以下の Seismic Risk Analysis (management) が考えられる。



リスク： R = 施設の性能の低下量，あるいは安全性または信頼性を示す指標

$$R = \sum (P_i \times C_i)$$

$P_i$  :  $i$ 番目の損傷モードの発生確率

$C_i$  :  $i$ 番目の損傷モードに伴う損失額

5) 被害機械の診断

- a) 被害機械の診断方法
- b) 診断基準（特に大規模機械の立ち上げを考慮して）

7. 原子力発電施設の耐震設計の方法

原子力発電機器の耐震設計についてはどの様に行われているかをここで詳しく説明する。

7. 1 設計に用いる地震の大きさの推定

- a) 過去に起きた地震は、古いものについては各地に残る地震の記録から、最近のものは観測記録から調べる。過去に起こったことのある大地震が再び起こると想定。原子力発電所設置予定地を中心に過去の地震記録を描く。
- b) 原子力発電所の近くにある活断層を調査し、発電所に影響を及ぼす断層なら、その断層によって発生する地震を想定する。
- c) 原子力機器の重要な部分の設計には、a), b) の他にこれ以上の地震は起こり得ないぐらい大きな地震の想定を行う。

以上のデータを基に、標準応答スペクトルを作成する。

## 7. 2 耐震設計

想定されるいかなる地震力に対しても大きな事故の誘因とならないよう原子炉施設に十分な耐震性を持たせる。

- (1) 建物、構造物は岩盤に支持させる。
- (2) 原子炉施設の耐震設計上の重要度を、地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点からAクラス、BクラスおよびCクラスに分類し、それぞれ重要度に応じた耐震設計を行う。
- (3) Aクラスの施設は、基準地震動  $S_1$  に、Aクラスの施設のうち特に重要な施設をAsクラスと称し、これらの施設については、基準地震動  $S_2$  に対して安全であるように耐震設計を行う。
- (4) Aクラスの施設については、水平地震力と同時にかつ不利な方向に鉛直地震力が作用すると考えて設計を行う。

### 耐震設計上の重要度分類

Aクラスの施設：自ら放射性物質を内蔵しているか、または内蔵している施設に直接関係があり、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの。

Aクラスの施設中、特に重要な施設を限定してAsクラス施設という。

Bクラスの施設：上記において影響・効果が比較的小さいもの。

Cクラスの施設：A、Bクラス以外で一般産業用施設と同等の安全性を保持すればよいもの。

## 7. 3 荷重組み合わせと許容限界

### 7. 3. 1 耐振設計上考慮する状態

(1) 原子炉の運転状態、(2) 過渡的状态、(3) 事故時にある状態を考慮する。

### 7. 3. 2 荷重の種類

- ・ 通常運転時の状態で施設に作用する荷重
- ・ 運転時の異常な過渡変化の状態で施設に作用する荷重
- ・ 事故時の状態で施設に作用する荷重
- ・ 地震力

7. 3. 3 荷重の組合わせ

- ・ 地震力と常時作用荷重
- ・ 常時作用する荷重と事故時の状態で長時間作用する荷重と基準地震動  $S_1$  の組合わせ

7. 3. 4 許容限界

- ・ As クラス
  - (a) 基準地震動  $S_1$  による地震力に対して、安全上適切と認められる規格、基準による許容応力度とする。
  - (b) 基準地震動  $S_2$  による地震力に対して、十分変形能力の余裕を有し、終局耐力に対して安全余裕を持たせる。
- ・ Aクラス, Bクラス, Cクラスについては、Asクラスの(a)による許容応力度を許容限度とする。

7. 4 応力・強度解析

機器・配管系の応力は、解析モデルが集中質点系の場合は、曲げモーメント、せん断力、軸力として算定され、地震力と運転状態で作用する力を合わせて応力を計算する。

耐震安全性評価は、設計地震応力と組み合わせるべき他の荷重による各種応力が、それぞれに対応する許容応力限度内にあることを確認する。強度評価以外に機能維持の観点からの評価も必要である。設計の手順は、図5に示す様である。

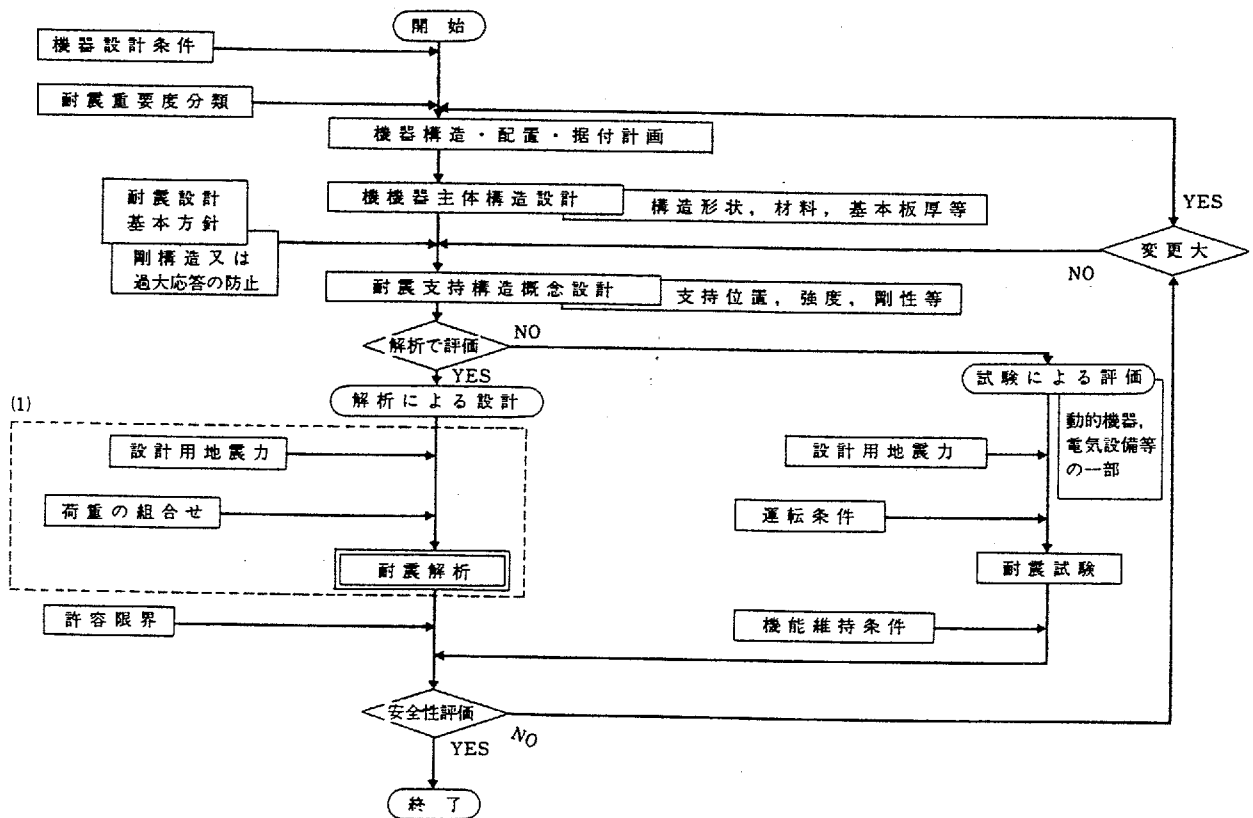


図5 機器・配管系耐震設計の基本手順

## 8. まとめ

現在、機械設備の被害状況調査はほとんど終了し、中間報告として写真集を出版した。現在は最終報告書を編集しているところである。そこには被害報告、復旧の状況、耐震のための考え方について記載する予定であるのでご期待を願います。

## 参考文献

- 1) 兵庫県南部地震災害調査緊急報告会，日本建築学会編集，1995.2.
- 2) 土木学会阪神大震災震災調査（第二次報告会資料），土木学会編集，1995.3.
- 3) 1995年兵庫県南部地震調査報告書，清水建設㈱編集，1995.2.
- 4) 平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書（第2報），鹿島編集，1995.3.



メ 毛

# 兵庫県南部地震にともなう廃棄物の 緊急発生とその処分について

応用化学科 助教授 筏 英之

1995年1月17日早朝兵庫県南部地方を襲ったあの大地震は6千余人近くの尊い人命を奪い、24万戸の倒壊・焼失家屋をもたらした。

この地震によって、JR、阪神、阪急など兵庫県内の交通を担っている鉄道は軌道を破壊され、高速道路も西宮と神戸市内で大きな被害を受けた。

太平洋戦争による壊滅的破壊からの復興を50年を費やして遂行してきた日本にとっても大きな痛手となった打撃であった。災害は人力では対処できない力を発揮し、大きな損害を与えている。

## 被害状況 (1996年末)

死者	6394人
負傷者	43177人
倒壊家屋	24万戸 (43.6万世帯)
火災	294件
焼失面積	65万㎡
被害見積額	9.9兆円

鉄道不通区間	28路線 (389km)
断水	100万戸
ガス供給停止	84.5万戸
停電	127万戸
電話不通	28.5万回線
県庁等停電・電話混乱により 外部に連絡不能、情報入らず	

## 阪神・淡路大震災による家屋の被害状況

(神戸市の場合)

### 1 被害の状況

被災家屋 129,614棟

(内訳) 全壊 67,421棟 半壊 55,145棟 全焼 6,975棟 半焼 73棟

## 2 倒壊家屋等の解体撤去

### (1) 解体撤去実施方法

- ア 市発注による解体撤去
- イ 三者契約による解体撤去（建物所有者、業者、市）
- ウ 自衛隊による解体撤去

### (2) 解体撤去進捗状況

ア	解体対象棟数	61,850棟	(100%)
イ	解体発注件数（1月現在）	61,538棟	(99.5%)
	（解体完了棟数）	60,917棟	98.5%
ウ	解体残物件数（1月現在）	312棟	(0.5%)

## 3 災害廃棄物の処理処分

### (1) 発生量予測

### (2) 処理方針

廃棄物の性状に応じてコンクリート系と木質系の2つに分けて処理を行っている。コンクリート系については、神戸港内での海面埋立処分を行っており、木質系については、仮置場で分別・破碎の上、可燃物については、仮設焼却炉及びクリーンセンターの余力活用による焼却をし、不燃物については、埋立処分を行っている。

### (3) 進捗状況（平成9年1月末現在、単位 千トン）

① 搬入実績		布施畑	2,836	
		淡河	1,045	
・木質系		ポートアイランド2期	450	
		その他	232	
		小計	4,563	(搬入率 98.6%)
・コンクリート系		3,364	(搬入率 95.7%)	
	合計	7,927		

### ② 処理実績（木質系・平成9年1月末現在、単位 千トン）

布施畑	1,166	(計画量の48%)
淡河	620	(計画量の73%)
ポートアイランド2期	450	(分別完了・焼却率85%)

### (4) 今後の処理見通し

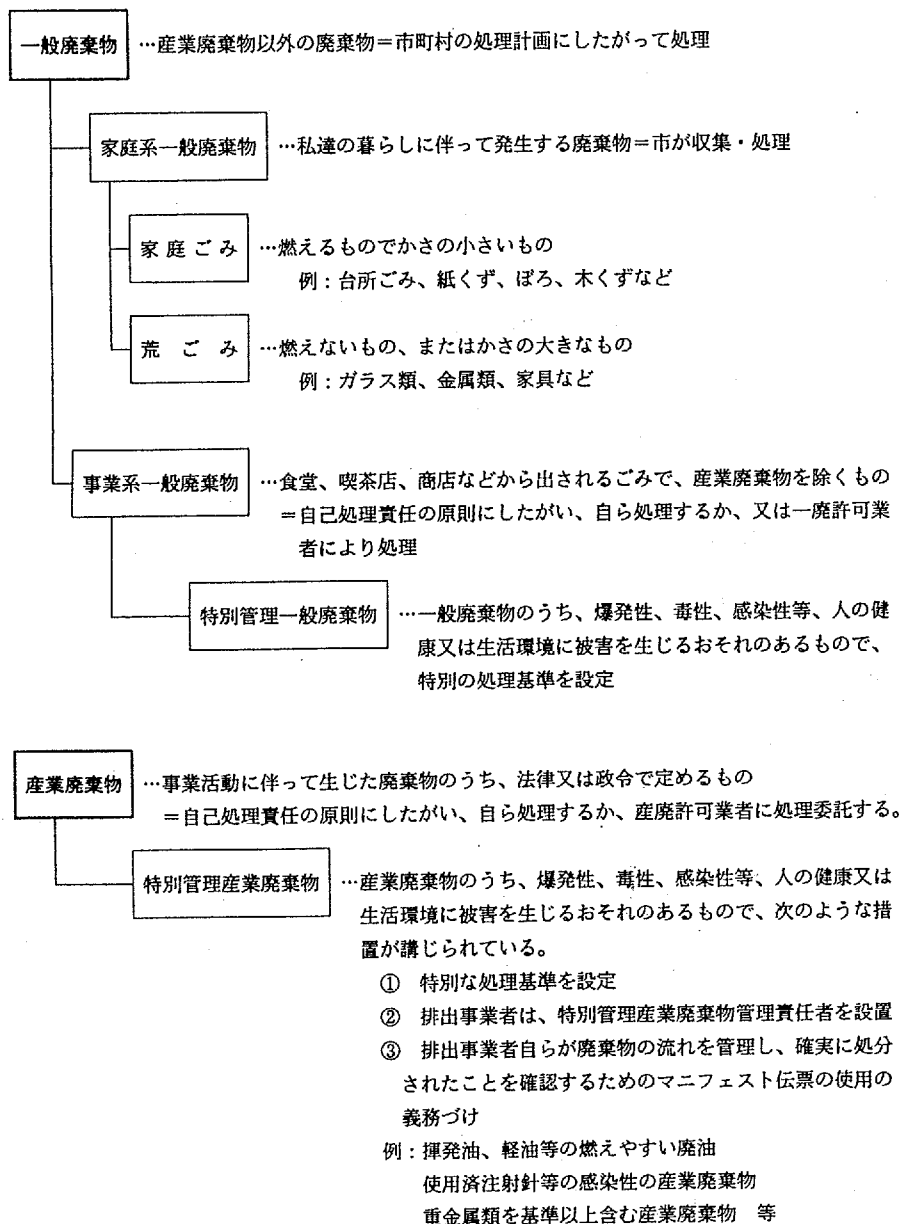
淡河・ポートアイランド2期については、8年度中に処理が完了すると見込まれるが、布施畑については、搬入量が膨大な上、自然発火、悪臭、粉塵等で掘り起こし・分別処理が困難を極め、処理実績は60%程度に止まる見込みである。

## 現代生活におけるごみ問題について

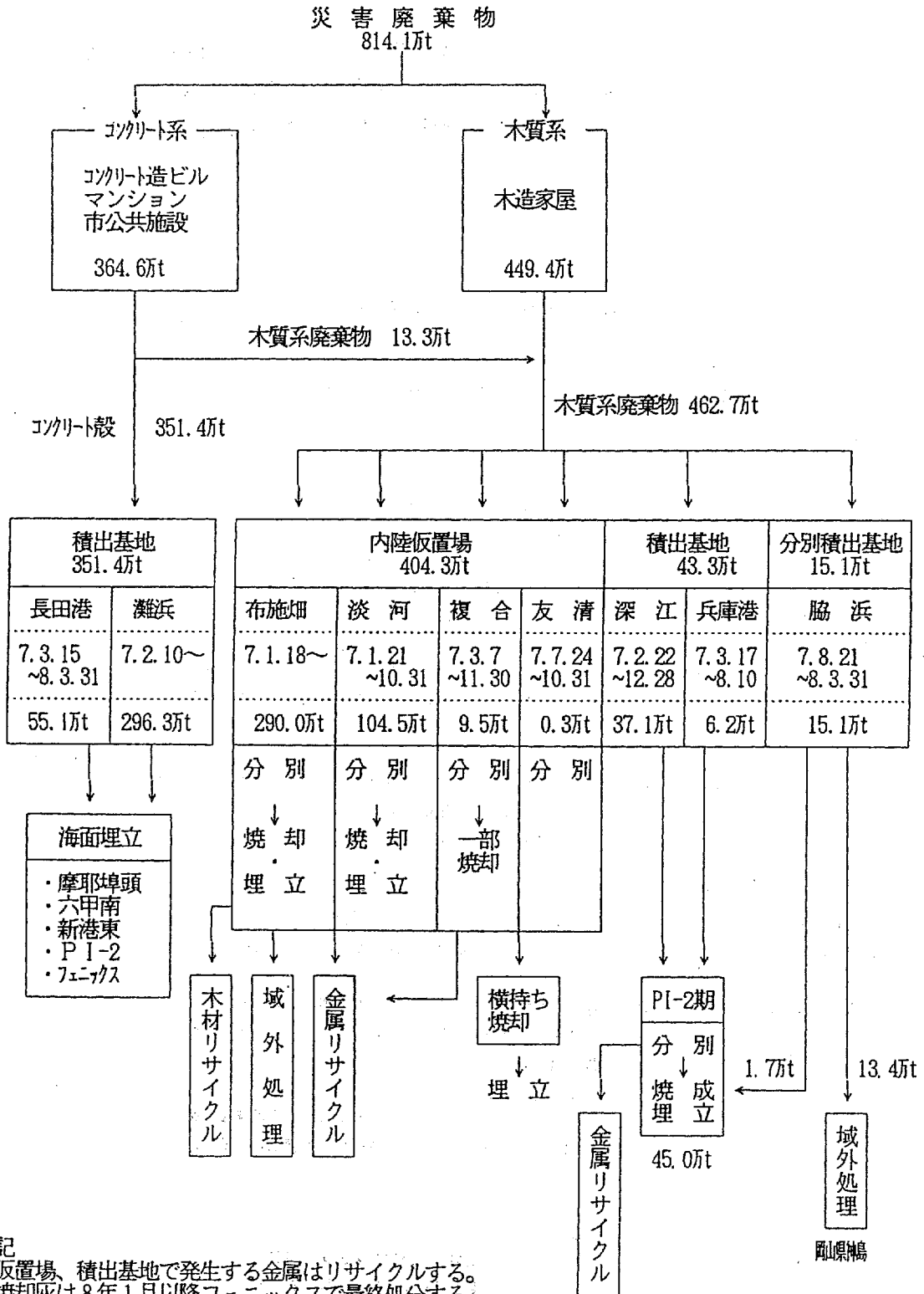
生活が豊かになるにつれて、ごみの排出の役割は増しており、いまでは行政のなかでも、重要課題の一つになっている。ごみの扱いについては、次表に示すように法律で定められている。

特に、事業所が排出しているいわゆる”産廃”の処分が深刻な社会問題となっている。

### 2. 処理責任



# 災害廃棄物の処理処分計画



**注記**

- 1) 仮置場、積出基地で発生する金属はリサイクルする。
- 2) 焼却灰は8年1月以降フェニックスで最終処分する。
- 3) コンクリート系廃棄物は、9年2月以降PI-2に直接搬入の予定

ごみ収集量の推移

年 度	全 市 人 口	年 間 ご み 収 集 量			1 人 1 日 当 り 排 出 量
		収 集 量	家 庭 系 ご み	事 業 系 ご み	
50	1,360,605 人	399,305 t	320,275 t	79,030 t	804 g
55	1,367,390	482,103	343,373	138,730	966
60	1,410,834	530,094	348,100	181,994	1,029
元	1,465,149	688,440	437,568	250,872	1,287
3	1,488,619	754,856	479,897	274,959	1,385
4	1,499,195	777,206	496,795	280,411	1,420
5	1,509,395	795,882	514,528	281,354	1,445
6	1,518,982	868,256	592,283	275,973	1,566
7	1,423,830	811,886	538,443	273,443	1,562

年 度	家 庭 系 ご み			事 業 系 ご み			
	総 量 (再 掲)	家 庭 系 ご み	荒 ご み	総 量 (再 掲)	焼 却	埋 立	立
50	320,275 t	272,864 t	47,411 t	79,030 t	20,974 t	58,056 t	
55	343,373	258,112	85,261	138,730	117,837	20,893	
60	348,100	272,807	75,293	181,994	172,304	9,690	
元	437,568	336,336	101,232	250,872	233,089	17,783	
3	479,897	360,855	119,042	274,959	251,652	23,307	
4	496,795	373,461	123,334	280,411	251,965	28,446	
5	514,528	380,855	133,673	281,354	252,138	29,216	
6	592,283	381,106	211,177	275,973	245,825	30,148	
7	538,443	371,208	167,235	273,443	237,944	35,499	

◎ 1人1日当り排出量……年間収集量/人口/365日

◎ 人口は、10月1日現在

※ 阪神・淡路大震災に伴う災害廃棄物は除外

※ 平成6年度、7年度の家庭系ごみおよび事業系ごみは一部推計値を含む

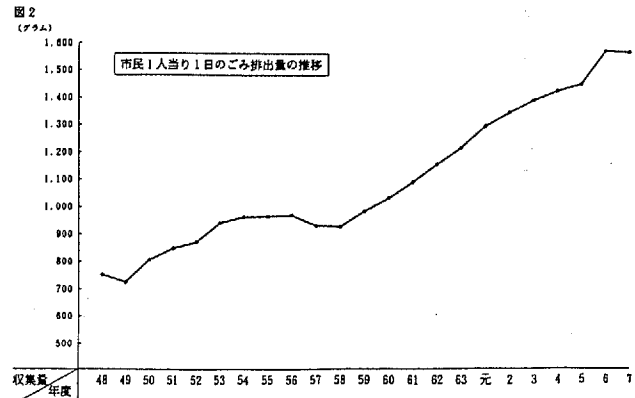
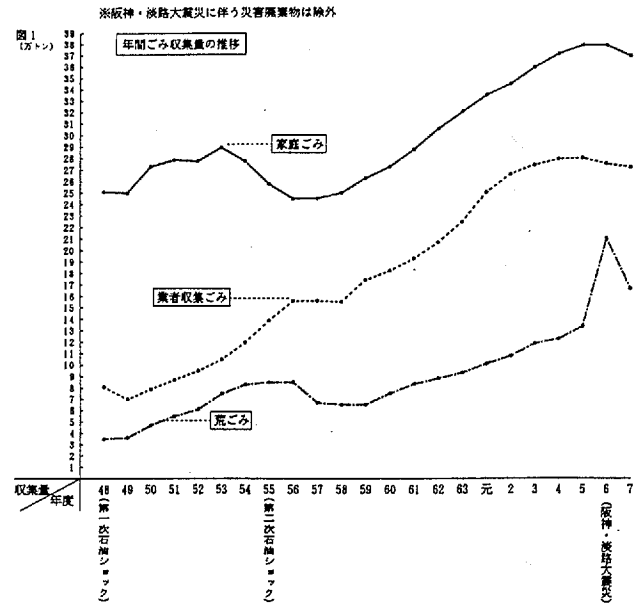
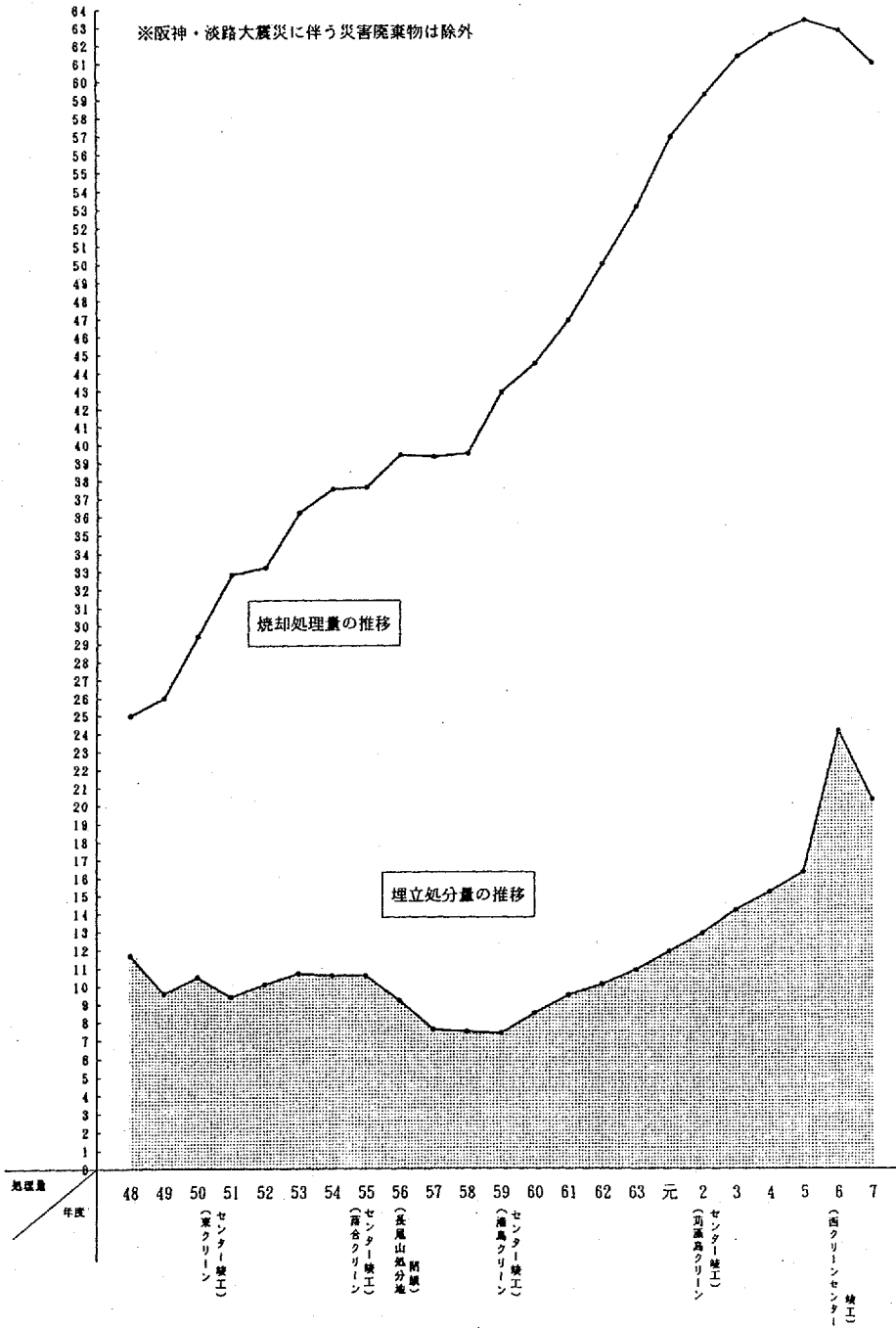


図3  
(万トン)



年度別事業実績

単位：トン

年 度 別	計 画 収 集															直 接 搬 入				總 計			
	直 営				委 託			市 収 集 合 計				許 可											
	可 燃	不 燃	粗 大	計	可 燃	不 燃	計	可 燃	不 燃	粗 大	合 計	可 燃	不 燃	粗 大	計	可 燃	不 燃	粗 大	計	可 燃	不 燃	粗 大	總 計
H/3年	53,391	6,819	2,768	62,978	42,657	5,637	48,294	96,048	12,456	2,768	111,272	46,254	412	910	47,576	14,042	257	2,489	16,788	156,345	13,125	6,166	175,636
H/4年	53,570	6,177	2,864	62,611	43,783	5,531	49,314	97,353	11,708	2,864	111,925	47,110	420	785	48,315	14,414	232	2,112	16,758	158,877	12,360	5,761	176,998
H/5年	53,961	5,754	3,047	62,762	44,527	5,291	49,818	96,488	11,045	3,047	112,580	49,797	451	743	50,991	12,104	174	1,627	13,905	160,389	11,670	5,417	177,476
H/6年	59,031	7,520	4,493	71,044	46,036	5,969	52,005	105,067	13,489	4,493	123,049	51,933	488	782	53,213	10,460	187	1,389	12,036	167,461	14,164	6,674	※ 188,298
H/7年	55,544	6,365	3,971	65,880	40,737	5,172	45,909	96,281	11,537	3,971	111,789	54,076	567	922	55,555	9,945	127	1,419	11,491	160,302	12,221	6,312	178,835

※ 飯塚、他市搬出は除く。

メ 七



メ 毛

# 震災を数学で考える

## - 複素関数とフラクタル

情報知能工学科 教授 中桐 信一

### 1 はじめに

本公開講座のテーマは、“震災復興と将来への展望”ということでそのテーマに合わせるべく上の様なタイトルをあたえました。しかし私の専門は、分布系の制御と同定の数学的理論でありテーマとの接点は殆どありません。私にできる講演は、数学的すぎて一般講演に向かないし、さりとて震災に関連した数学関係の適当な話題を見つけるのは実際の所不可能です。講師を引き受けるときにさんざん考えたのですが、結局比較的わかりやすく面白いテーマということで、フラクタル科学関係のお話をする事に決めました。震災とは直接関係はなく、地震の振動を現す曲線が微分不可能な一種のフラクタル曲線と考えられるという程度の関係と考えて下さればよいと思います。

そういった次第で、この講義では、複素関数とフラクタルというサブタイトルのもとで、複素関数を媒介として、フラクタル数学と関連した分野における2、3の題材を取り上げて話をしていきたい。

まず2章で、複素数の定義とその複素平面上の表示、極形式による表示をあたえる。そののち指数関数、三角関数を定義しそれらの関係を導く。次に特別な複素関数を用いて再帰的な図形(Koch曲線と呼ばれる)を描くことを考えてみる。その描き方のプログラムは、むしろ簡単でありここではプログラム言語 BASIC や Mathematica によるプログラムを用いて幾つかの曲線を描かせてみる。

3章では、実関数であるがフラクタルな、至る所微分不可能な曲線や曲面を考える。まずどのようにして、至るところ微分不可能な曲線が構成できるかについての数学的議論を行う。ここで用いられる構成方法は、フーリエ級数による重ね合わせの方法である。CG (Computer graphics) を用いて、Weierstrass 関数とか高木関数と呼ばれる微分不可能な連続曲線やフラクタルな曲面が、どのようにして現れるかをみていく。

最後に4章では、複素平面上のフラクタル集合を生み出す方法について述べる。Mandelbrot 集合や Julia 集合と呼ばれるフラクタル集合がどのようなメカニズムのもとで現れるかを数学的にのべてみる。実際は、深淵な数学的理論がフラクタル集合に対してつくられているが、ここではそれは省略し、CG を用いてその美的な観点からフラクタル集合を楽しんでみよう。

## 2 複素関数と再帰図形

### 2.1 複素数と複素平面

簡単に複素数を復習しよう。 $x, y$ を2つの実数として、

$$(2.1) \quad z = x + iy$$

の形の数のことを複素数と言う。ここで  $i$  は  $i^2 = -1$  となる数である。また  $z$  の共役複素数  $\bar{z}$  とは、 $\bar{z} = x - iy$  のことである。 $z$  の絶対値  $|z|$  は

$$|z| = \sqrt{z\bar{z}} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

により定義される。これは複素数の大きさを現している。実数の全体を  $\mathbf{R}$  複素数の全体を  $\mathbf{C}$  とかくと

$$\mathbf{C} = \{z = x + iy : x, y \in \mathbf{R}\} = \mathbf{R} \times i\mathbf{R}$$

なので  $\mathbf{C}$  は平面と同一視することができる。この平面を複素平面とかガウス平面と呼ぶ。複素数の加減乗除といった代数的演算が、複素平面上の幾何学的運動に関係していることは、よく知られている。

### 2.2 指数関数と三角関数

複素数を用いて初めて明確になることの1つに指数関数と三角関数の関係がある。微分積分学の始めに習ったように、 $e^x, \sin x, \cos x$  を原点のまわりで Taylor 展開すると

$$(2.2) \quad e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

$$(2.3) \quad \sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots$$

$$(2.4) \quad \cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots$$

となる。(2.2) の級数は全ての  $x$  に対して収束しており、従って全ての複素数  $z$  に対し級数  $\sum \frac{|z|^n}{n!}$  は収束する。よって複素数の級数  $\sum \frac{z^n}{n!}$  は収束していることがわかる。この事より、複素数  $z$  に対し

$$(2.5) \quad e^z = 1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \dots$$

と定義することは自然である。実際この定義から直接に  $e^0 = 1$  や関係式  $e^{z_1+z_2} = e^{z_1}e^{z_2}$  を証明することができる。同様に、複素数の三角関数

$$(2.6) \quad \sin z = z - \frac{z^3}{3!} + \frac{z^5}{5!} - \frac{z^7}{7!} + \dots$$

$$(2.7) \quad \cos z = 1 - \frac{z^2}{2!} + \frac{z^4}{4!} - \frac{z^6}{6!} + \dots$$

を定義する事ができる。この様な複素数への拡張により

$$\begin{aligned} e^{iz} &= 1 + \frac{iz}{1!} + \frac{(iz)^2}{2!} + \frac{(iz)^3}{3!} + \dots \\ &= \left(1 - \frac{z^2}{2!} + \frac{z^4}{4!} - \frac{z^6}{6!} + \dots\right) + i \left(z - \frac{z^3}{3!} + \frac{z^5}{5!} - \frac{z^7}{7!} + \dots\right) \\ &= \cos z + i \sin z \end{aligned}$$

なる有名な Euler の関係を証明することができる。 $z \rightarrow -z$  とすると、この関係より

$e^{-iz} = \cos z - i \sin z$  となり和と差をとることにより

$$(2.8) \quad \cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}, \quad \sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$$

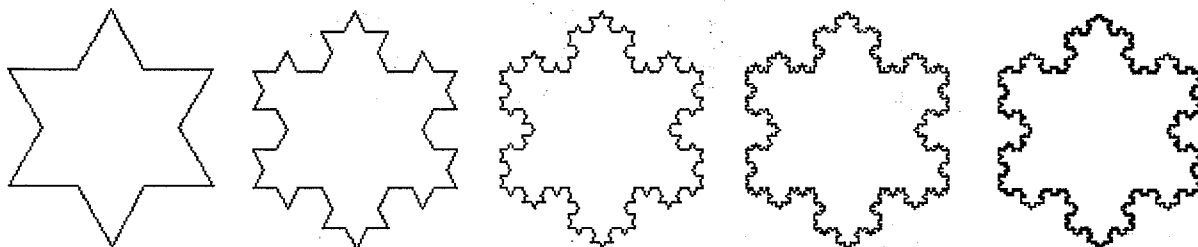
が示される。

即ち、指数関数は三角関数で、三角関数は指数関数で表現され、両者は複素数を仲立ちとして本質的には同じものと考えられる訳である。

### 2.3 複素平面上的の再帰図形

再帰的な規則に基づき、その細部が無限に繰り返されるような図形を再帰図形という。これはフラクタルな図形の1種であり、例えば次の Koch 曲線が再帰図形の最も古典的な例として知られている。

作り方：



再帰図形は、複素関数を用いて表示することができる。以下に述べる方法は、京都大学の畑正義氏が考案した、複素平面上に次つぎと点をうつことにより再帰図形をつくる方法である。

$a, b, c, d$  を複素定数として次の2つの種関数

$$(2.9) \quad f_0(z) = az + b\bar{z}$$

$$(2.10) \quad f_1(z) = c(z-1) + d(\bar{z}-1) + 1$$

を考える。 $z_0 = 0$  として  $\mathbf{C}$  上で

$$z_1 = \{f_0(z_0), f_1(z_0)\} : 2 \text{ 点}$$

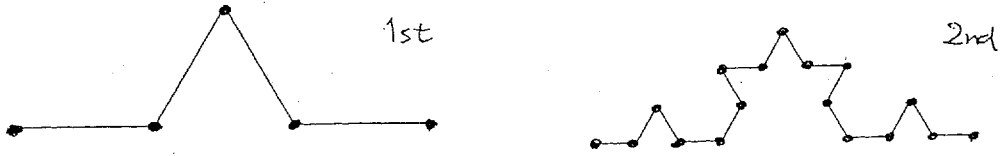
$$z_2 = \{f_0(z_1), f_1(z_1)\} : 4 \text{ 点}$$

$$z_3 = \{f_0(z_2), f_1(z_2)\} : 8 \text{ 点}$$

として点集合  $\{z_n : n = 0, 1, 2, \dots\}$  を  $\mathbb{C}$  上で表示すれば、これが再帰図形になる。Koch 曲線の場合は、

$$(2.11) \quad a = c = 0, \quad b = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6}i, \quad d = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{6}i$$

となり最初の 2 Step を描くと次の様になる。



$a, b, c, d$  をいろいろ変える事により様々な形の再帰図形がえられる。

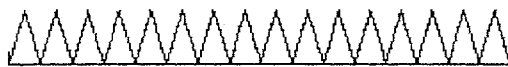


### 3 連続性と微分可能性-フラクタルな曲線

よく知っているように、ある関数  $f(x)$  が点  $x = x_0$  で微分可能であるとは

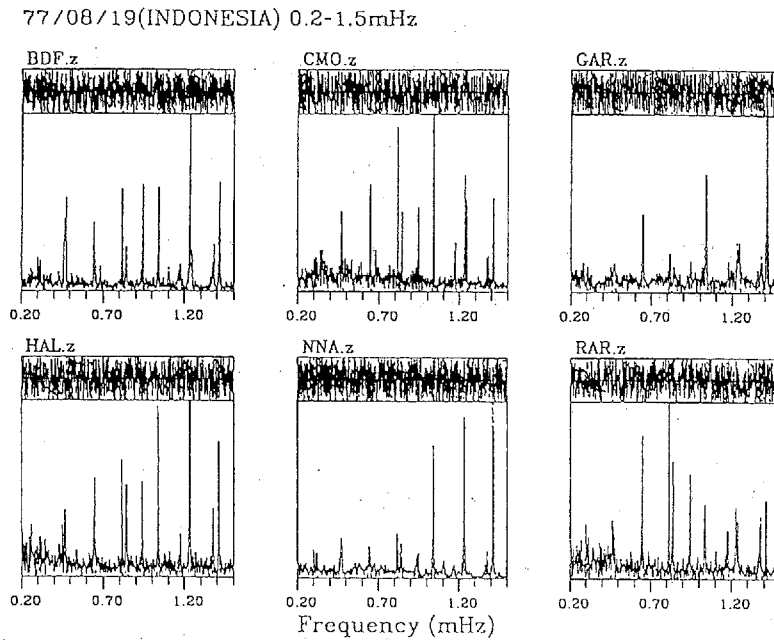
$$(3.1) \quad f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

が存在すること、いいかえるとその点  $x_0$  で接線が引けるということである。この微分可能性は、連続性の概念よりも強い概念であり、ある関数が連続であるからと言って、必ずしも微分可能とは限らない。下図の様なのこぎり型の関数は、各節点で連続であるが微分不可能である。



また大きな地震が起きたときの (マグニチュード 7.9 以上) 地震計の記録は非常に多くの微分

不可能な点をもつ連続曲線になる。ここでは、1977年のインドネシア地震による世界各地6個所での記録をあたえよう。地震のスペクトラムの位相と振幅が上下でしめされている。



それでは、もっと沢山の点で微分不可能になる様な連続関数が存在するであろうかという疑問が生じる。言い換えると、連続ではあるがどの点においても微分不可能な曲線が存在するであろうか。この疑問に対する答えは Yes であり、この様な関数の例を初めて明確に与えたのはドイツの数学者 Weierstrass(1874) である。彼は、

$$(3.2) \quad W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x), \quad a, b > 0$$

なる、いわゆる Weierstrass 関数をあたえた。ここで  $0 < a < 1$  かつ  $b$  は  $ab > 1 + \frac{3}{2}\pi$  を満たす奇数とした。(3.2) の関数は、Fourier 級数と呼ばれる級数であり、 $\cos \pi x$  を種関数とする繰り返しの極限操作により得られる関数である。例えば  $a = \frac{1}{2}, b = 2$  を極限演算のためのパラメータとする。この時、 $W_0(x) = \cos \pi x$  の子関数を

$$W_1(x) = \frac{1}{2} \cos 2\pi x, \quad W_2(x) = \frac{1}{2^2} \cos 2^2 \pi x, \quad \dots W_n(x) = \frac{1}{2^n} \cos 2^n \pi x, \quad \dots$$

とする。この時 Weierstrass 関数は、

$$W(x) = \sum_{n=0}^{\infty} W_n(x) = W_0(x) + W_1(x) + W_2(x) + \dots + W_n(x) + \dots$$

として作られる訳である。

$0 < a < 1$  かつ  $|\cos(b^n \pi x)| \leq 1$  であるから (3.2) の級数  $W(x)$  は全ての  $x$  について一様収束している。しかも各項  $W_n(x)$  は連続関数なので、一様収束の原理から  $W(x)$  は  $x$  についての連

続関数になる。 $W(x)$  が全ての点  $x$  で微分不可能になること証明が大事であるが、これは大変難しいので省略する。

その後 Hardy(1916) は、(3.2) において、 $a, b$  の仮定を  $0 < a < 1, ab \geq 1$  なる自然な条件のもとで  $W(x)$  は全ての  $x$  で微分不可能なることを示した。

ところで、 $ab < 1$  ならば  $W(x)$  を形式的に微分した級数

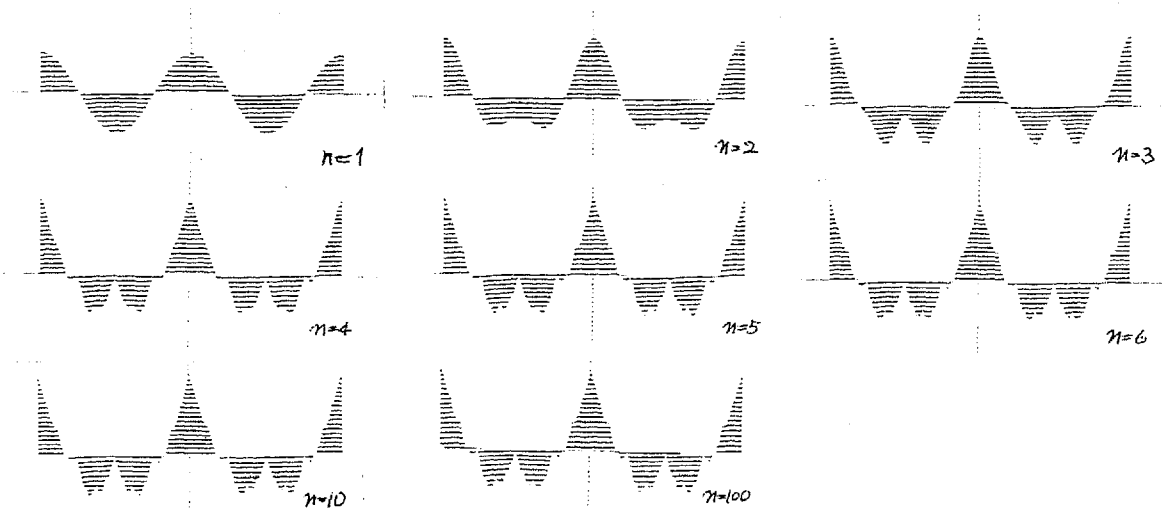
$$W'(x) = -\pi \sum_{n=0}^{\infty} (ab)^n \sin(b^n \pi x)$$

は一様収束しているので  $W'(x)$  も連続関数となり  $W(x)$  は全ての点で微分可能になる。よって Hardy の結果より、次の定理が証明されたことになる。

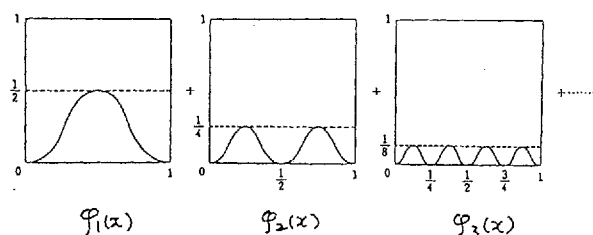
**Theorem (Hardy)**  $0 < a < 1, b > 0$  とする。(3.2) で与えられる Weierstrass 関数は連続関数であり

- (i)  $ab \geq 1$  ならば、全ての点  $x$  で微分不可能である。
- (ii)  $ab \leq 1$  ならば、全ての点  $x$  で微分可能である。

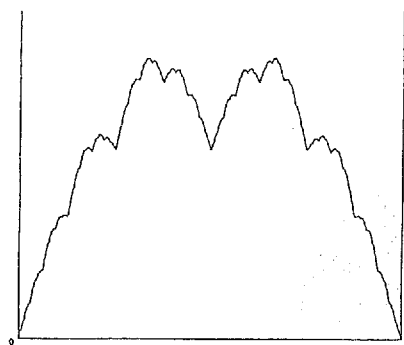
上の定理より  $a = \frac{1}{2}, b = 2$  の時  $W(x)$  は全ての点で微分不可能である。微分可能な三角関数  $W_n(x)$  がどのような様子で微分不可能な関数  $W(x)$  に近づいていっているかを CG でみると以下のようなになる。ほぼ 10 回の繰り返りでグラフの形は見かけ上は変化しない。



以上のことを、構成的に論じてみる。Weierstrass 関数とは、下図のような元々の種関数  $\varphi_1(x)$  (具体的には、 $\frac{1-W_0(x)}{2}$ ) から生み出される縮小子関数列  $\varphi_n(x)$  を考えて、その無限和  $\sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x)$  を現わしていると考えることができる。

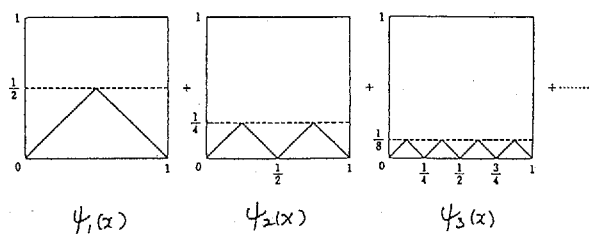


この時 Weierstrass 関数は、下図であたえられる。この図形は、作り方からも類推できるように”自己相似性”を持っている。



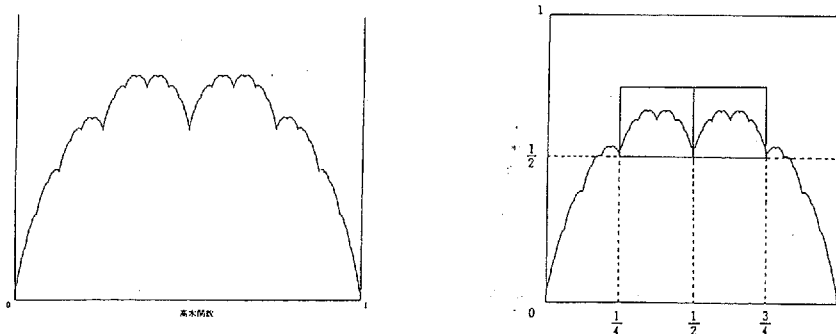
ワイエールシュトラスの関数 ( $\alpha = 1/2, \beta = 2$  の場合)  
 [ただし、高木関数と比較しやすいように、 $(1-W(x))/2$  のグラフが示してある]

同様のことを折れ線関数で考えてみよう。 $\psi_n(x)$  を以下のように作る。



この時できる無限和  $T(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x)$  のことを高木関数という。この関数の考案者である高木貞治は、有名な日本の数学者であり類体論の創始者として知られているが、一般には名著”解析概論”で有名である。この本の付録に高木関数のことが述べられている。

彼はこの関数が Weierstrass 関数と同じく、全ての点で微分不可能な連続関数であることを証明した。その証明は の定理の証明よりもはるかに簡単でエレガントである。しかし、ここで述べるには難しすぎるので略す。高木関数を CG で描かせてみると下図のようになる。



これら高木関数や Weierstrass 関数は上にみるように”自己相似性”という際立った性質を持っている。

高木関数を正の midpoint 変位法を用いて立体的 (2 次元的) に構成したものは、高木山と呼ばれており、次のようなその CG が Peitgen というドイツの数学者により得られている。

また折れ線関数のかわりに、非常に非対称な種関数を用い、またランダムな midpoint 変位法を用い

ることにより、地震により崩れたような斜面を持つ山岳風景が現れてくる。このような風景のことを、フラクタル風景と呼んでいる。

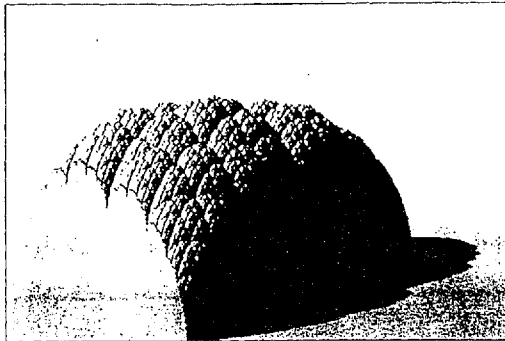


図 A.5 富士山。正の中点変位法で作られる。

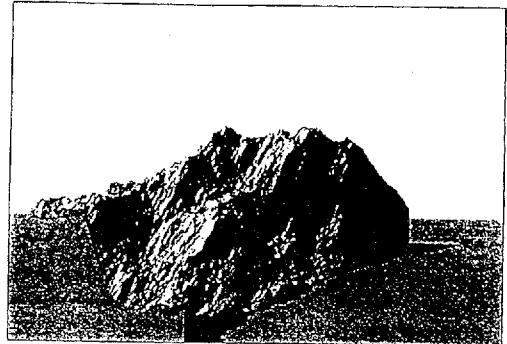


図 A.6 非常に非対称な分布を持ったランダム中点変位法によって作られた、最初のフラクタル風景。

## 4 複素平面上のフラクタル集合

3章で述べた関数や高木関数は”フラクタル”な曲線と呼ばれる。この”フラクタル”という概念は Mandelbrot により初めて導入され、彼の著書”フラクタル幾何学”において数学を始めとして、物理学、生物学、天文学、気象学、その他様々な分野での応用が展開されている。最近の複雑系の研究の基礎というか、その母体にもなっている。彼の本の説明によると”フラクタル”はラテン語の < *Fractus* > が基になっており、この語には”こわれる”という意味があり、不規則かつ断片的しかも複雑で手に負えないという意味が込められた言葉だそうである。

### 4.1 Mandelbrot 集合

$z$  を複素数として、ある種関数  $f(z)$  を考える。例えば 2 次関数  $f(z) = z^2$  をとる。この時  $\mu$  をパラメータに持つ関数

$$(4.1) \quad f_\mu(z) = f(z) + \mu, \quad \mu \in \mathbb{C}$$

を考え、初期値  $z_0 = 0$  として、点列  $\{z_n\}$  を (4.1) を用いて漸化的に、

$$(4.2) \quad z_n = f_\mu(z_{n-1}), \quad z_0 = 0$$

により定義する。この様にして作った複素点列  $\{z_n\}$  に対して、次の 2 通りの場合が考えられる。

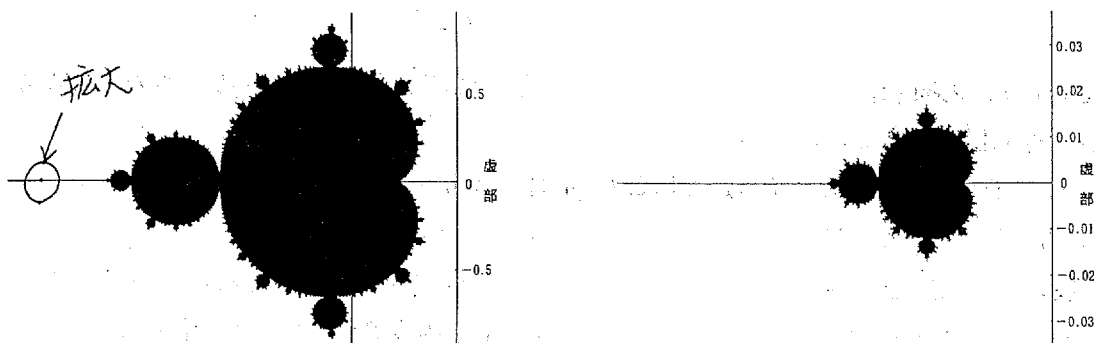
$$I) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |z_n| = \infty, \quad II) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} z_n \text{ が存在する}$$

II) が成り立つ場合の複素数パラメータ  $\mu$  の集合、即ち、

$$M = \{ \mu \in \mathbb{C} : (4.2) \text{ で定められる数列 } \{z_n\} \text{ が収束する} \}$$

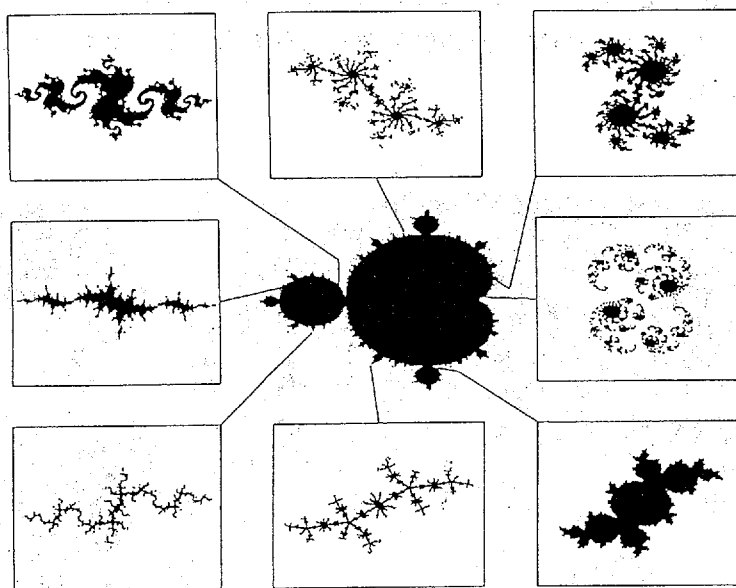
のことを Mandelbrot 集合という。

この集合は、極めて変化に富んだ集合であり、その細部はまさしく”フラクタル”であり大きな多様性を持っている。 $f(z) = z^2$ の場合に、この集合を描かせてみると下図のようになる。内部の黒い部分が Mandelbrot 集合である。



この集合は、驚くべきことに、連結集合であることが示されている。つまり、この集合内のどの2点をとってもその2点は集合内の連続な曲線でむすぶことができる。

最近の研究によりこの集合の境界付近では、様々なタイプの自己相似集合が現れてくることがわかっている。Barnsley の著書 ”Fractals Everywhere” には、次の様な自己相似集合が観察されている。



また  $f(z) = z^n$  ( $n \geq 3$ ) とすると、違った Mandelbrot 集合が得られる。

## 4.2 Julia 集合

複素変数の代数方程式

$$(4.3) \quad f(z) = 0$$

の根を求めることを考える。ここで  $f(z)$  は、 $z$  についての多項式とする。方程式 (4.3) の根を求める近似解法として、いわゆる Newton 法が古くからよく知られている。これは、適当な初期値  $z_0 = \alpha$  から出発して

$$(4.4) \quad z_n = z_{n-1} - \frac{f(z_{n-1})}{f'(z_{n-1})}, \quad n \geq 1$$

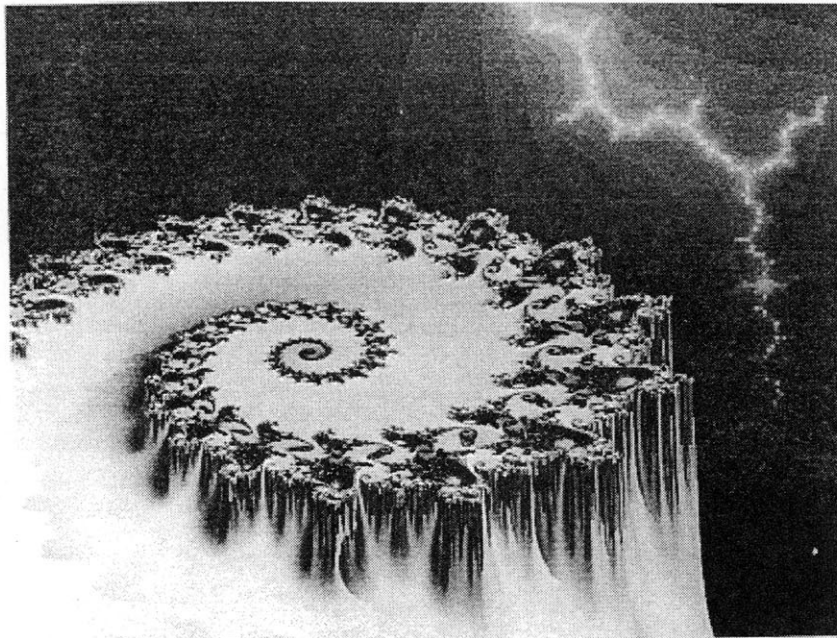
なる漸化式により、逐次  $\{z_n\}$  をもとめ、もし  $z_n \rightarrow p$  となれば  $p$  が  $f(z) = 0$  の 1 つの根になり  $z_n$  は  $p$  の第  $n$  近似値を与えるわけである。

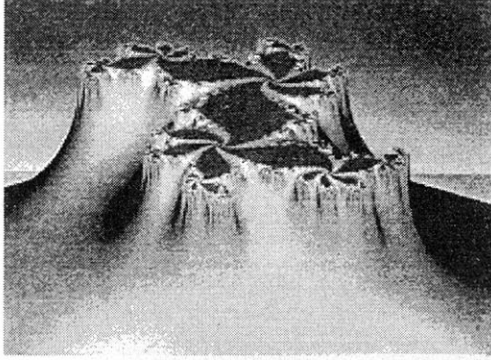
例えば  $f(z) = z^2 + 1$  とし、 $z_0$  を  $i$  の近くにとり (4.4) により  $\{z_n\}$  を作ると  $z_n \rightarrow i$  となり、一方  $z_0$  を  $-i$  の近くにとり (4.4) により  $\{z_n\}$  を作ると  $z_n \rightarrow -i$  となる訳である。

しかし一般には、初期値  $z_0 = \alpha$  をどこにとるかにより (4.4) により作った  $\{z_n\}$  は  $f(z) = 0$  の 1 つの根に近づくとは限らない。つまり初期値が、根からある程度離れていると近似列  $\{z_n\}$  はフラフラ動いて根に近づくない場合が起りうる。このような近似列が収束しないような初期値の集合が Julia 集合と呼ばれるものである。式でかくと Julia 集合  $J$  は、

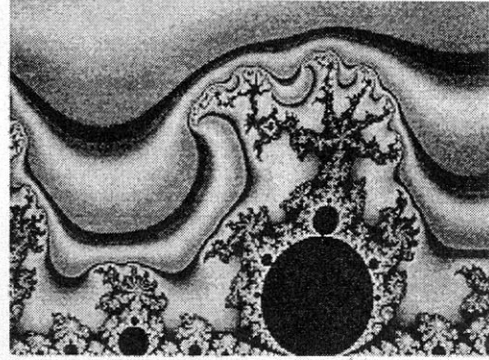
$$J = \{ \alpha \in \mathbf{C} : z_0 = \alpha \text{ として (4.4) で定められる数列 } \{z_n\} \text{ が発散する} \}$$

により定義される。色々な多項式や三角関数にたいして Julia 集合を CG により描かせてみると、これまた Mandelbrot 集合に劣らず奇怪でしかも美しい集合になっている。この集合もまた連結集合になっている。Julia 集合の幾つかの例及びそれらを用いたフラクタル CG Art を講義中にお見せして講演を終わる。

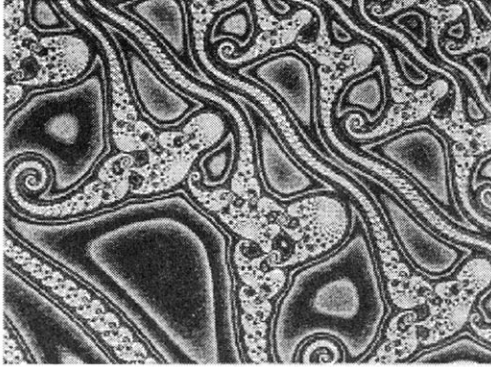




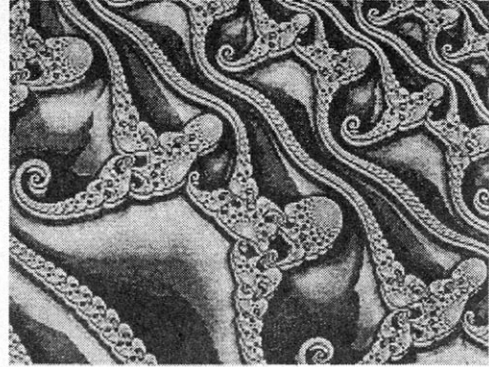
27



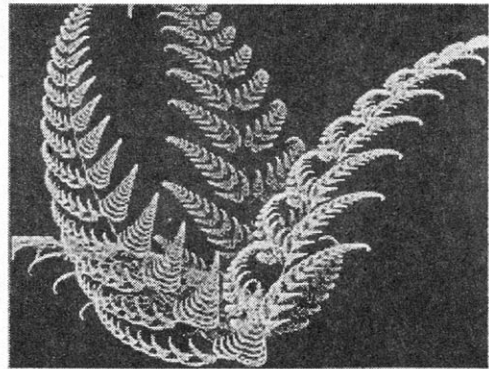
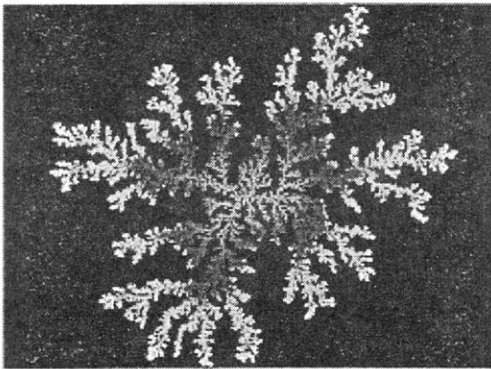
28



29



30



## 文献

- 1 ジェイムズ グリック著、大貫昌子訳、カオス-新しい科学をつくる、新潮社、1991.
- 2 H.-O. パイトゲン、P.H. リヒター著、宇敷重広訳、フラクタルの美カオス-、シュプリンガーフェアラーク東京、1988.

メ モ



× 七

# 災害と電力供給システム

電気電子工学科 教授 大澤 靖治

## 1. はじめに

電気エネルギー（電力）は、各種の形態のエネルギーのなかでもクリーンで使い易いので、電力需要はつねに増加の傾向あり、またその伸び率は他のエネルギーの需要の伸び率を上回っている。このように便利な電気エネルギーであるが、1995年1月の兵庫県南部大地震で電力供給システムも大きな被害を受け、多くの需要家が停電した。本稿では、電気エネルギーの特徴、電力供給システム（電力系統）の概要について簡単に説明したあと、兵庫県南部大地震による電力システムの被害と復旧状況、災害に強い電力供給システムはどうあるべきかについて述べる。

## 2. 電気エネルギーについて

### 2.1 人類のエネルギー消費

人類の利用するエネルギーは大まかに言って、人間の生命を維持するための食糧と、生活・社会活動、生産活動に使うエネルギーの二つに分けて考えることができる。食糧として使われるエネルギーは、平均して1人当たり2,500kcal/日程度の割合であるが、後者に用いられるエネルギーは世界平均で40,000kcal/日に達し、前者の10倍以上になる。後者は、人間の文明の進展とともに、また時代とともに増加する。上に述べた数字は人類全体の平均であって、国によってその値は大きく異なる。人類全体の平均値の数倍のエネルギーを使っている国もあり、国の間の格差ははなはだしい。

### 2.2 エネルギーの供給源

現在、世界のエネルギー需要のかなりの部分が、石油、石炭、天然ガスなどのいわゆる化石燃料によって供給されており、このほか原子力、水力などが用いられている。石油、天然ガスなどの流体燃料が大きな役割を果たすようになったのは1930年代からで、それまでは石炭、木材などの固形燃料がそのままの形で用いられていた。消費面でも蒸気機関から電動機へ、暖房や炊事も木材から石炭へ、石炭から石油、天然ガスなどの流体エネルギーへ、さらには電気へというように、より便利で使いやすいエネルギーへと移り変わってきた。このような傾向は今後も続くと考えられている。特に、現在は電気エネルギーは全エネルギーの1/3以上を占めており、アメリカなどでは今世紀末までには半分に達すると考えられている。

### 2.3 電気エネルギーの特質

#### (a) 利用面からみた特質

電気エネルギーは、自然界にそのままの形では、利用できる程の量は存在していない。それにもかかわらず、電気エネルギーは次のような理由で多量に利用されている。

(1) 安全、清潔、容易に他のエネルギーに変換できる

電気エネルギーは、構造が簡単で取扱いの容易な機器によって、他のエネルギーに変換することができる。電熱器によって熱エネルギーに、電球によって光に、電動機（モータ）によって力学的エネルギーに、というように極めて簡単に行える。しかも、これらの機器を運転するのは容易であり、騒音、清潔さの点でもほとんど問題がない。

(2) 他のエネルギーへの変換効率が極めてよい

電気エネルギーから他のエネルギーに変換する効率は、多くの場合、90%以上に達し、極めて高く、他のエネルギーに対して断然たる優位性をもっている。また、化石燃料を熱エネルギーとして用いる場合を除いて、電気エネルギーという形を経ずに他のエネルギー同士で変換した場合は、ほとんどすべての場合に一度電気エネルギーに変えて使う場合よりも効率が悪い。たとえば、石油のもつ化学エネルギーを内燃機関エンジンとして動力に用いる自動車では、平均変換効率は10%内外と言われているのに対して、汽力発電所では40%程度の変換効率を得ることができる。

(3) エネルギーの流れを制御しやすい

スイッチ一つで電気の流れを止めたり流したりできる。しかも短時間に、かつ、なめらかに制御することができるのは、電気エネルギーのもつ最も優れた特質の一つである。

上に述べたように、電気エネルギーは利用者にとって便利な点が多いが、反面、

(4) 他のエネルギーに比べてやや高価である

(5) 自動車や飛行機などの移動体の動力源としては使いにくい

などの欠点もある。しかし、このような特殊用途を除けば、電気エネルギーの利用範囲はほとんど無限と言える。

(b) 供給面からみた特質

電気エネルギーは、自然界にはそのままの形ではほとんど存在しないので、他の一次エネルギーから転換する必要がある。そのため、電気エネルギーを二次エネルギーと呼ぶ。エネルギー供給上、電気エネルギーは次のような特徴をもっている。

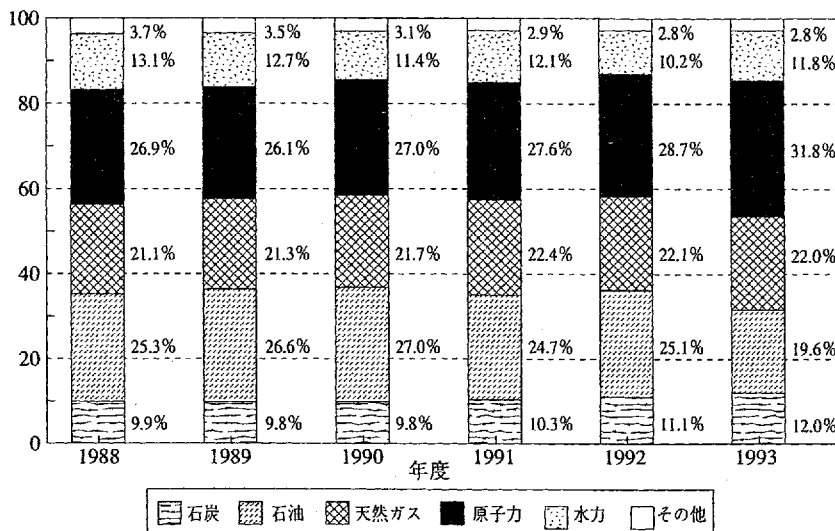


図1 電力用エネルギー源の割合（電気事業用）<sup>[10]</sup>

(1) ほとんどあらゆる種類のエネルギー源を利用できる

発電に用いる一次エネルギー源としては、石油・天然ガス・石炭のような化石燃料や核燃料はもちろん、水力資源や天然に存在する風力、太陽エネルギー、波力潮力など、ほとんどすべてのエネルギー資源に及んでいる。このため、電気エネルギー以外の形で利用した場合には、公害その他でいろいろの問題が生ずる場合、一度これを電気エネルギーに変えてから利用することが多い(図1参照)。

(2) 他のエネルギーから電気エネルギーへの転換効率が低い

現在、人類が用いている電気エネルギーのほとんど大部分は一度熱エネルギーの形を媒体として作り出されているが、現在の技術ではその転換効率は40%以下というように、低い値におさえられている。太陽電池などで直接電気エネルギーをつくり出そうとする場合には10%前後の低い効率となることもある。

(3) エネルギーの輸送が容易である

電気エネルギーを輸送するには、最低2本の電線を張るだけで十分であり、石油やガスのようにパイプを敷設しなければならないの比べると簡単である。また、石油や石炭などが何らかの形で重力などの影響を受けるのに対して、重力に対する障害もない。さらに、電気エネルギーは光の速度で伝搬するので輸送時間もまったく問題にならない。その反面、輸送に際して必ず損失を伴うこと、石油や石炭の輸送におけるパイプライン、タンカー、鉄道、自動車などのように多様な輸送手段をもたないため、立地問題などで輸送ルートの確保などに自由度を欠くという欠点もある。このため、特別の場合を除き、その輸送範囲も、発電所から数百kmの範囲に限られている。

(4) 電気エネルギーの貯蔵が困難である

現在、電気エネルギーのまま、もしくは比較的簡単に電気エネルギーに転換できる他のエネルギーの形で大量のエネルギーを貯蔵する有効な手段がない。このため、電気エネルギーは需要の発生と同時に発電する必要があり、発電設備、輸送設備なども最大需要に応じ得るだけの設備が必要である。これは設備の利用率の低下を招き、相対的に多額の投資を必要とする。そのため、世界的にエネルギーの貯蔵技術の開発が進められつつある。

### 3. 電力システム

#### 3.1 電力システムの構成

電力システム(電力系統)とは、電気エネルギー(電力)を発生してから消費するまでの一連のプロセス、すなわち、燃料などのエネルギー資源から電気エネルギーを発生し、変換し、輸送し、分配し、かつそれを需要家で消費するまでの全体の流れを司るシステムである。ハードウェアとしては原子力発電所、火力発電所、水力発電所、揚水発電所をはじめ、ピーク用ガスタービン発電所など様々な発電所、架空送電線、地中送電線などの送電線、送電線の電圧を変換し、電気エネルギーの流れを各所に分配するための変電所、開閉所、配電用変電所から需要家まで電力を届ける配電線、最終的にこの電気エネルギーを消費する需要家などがある。

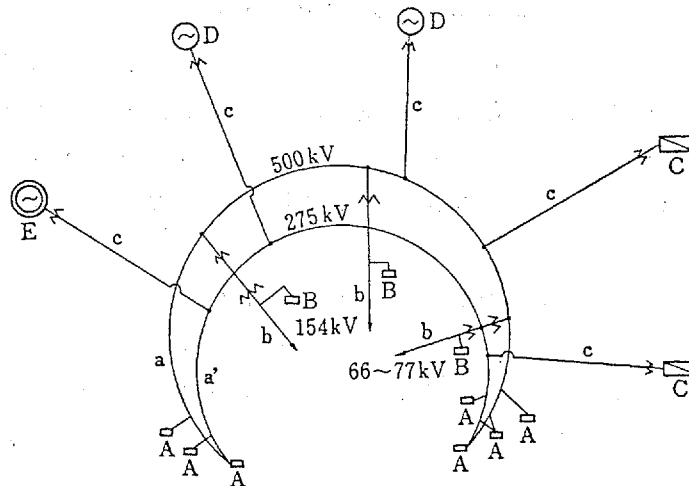


図2 わが国の典型的な電力系統<sup>(4)</sup>  
 (A, B : 火力発電所、C : 原子力発電所、D : 水力発電所、E : 揚水発電所)

図2は、わが国の大都市（大電力消費地帯）を取り巻く電力供給システムをモデル化して表したものである。火力発電所のうちAは比較的大容量のもので、系統火力発電所とよばれ、系統全体の負荷に電力を供給するのに対して、火力発電所Bは都市火力発電所、あるいは局地火力発電所などとよばれ、都市内部における局地的な負荷に電力を供給する比較的中容量の発電所である。図中のa, a'はいわゆる外輸送電線（あるいは外輸線）とよばれるもので、わが国では500kV, 275kVの超高圧送電線によって形づくられている。外輸線は系統火力発電所（A）や原子力発電所（C）、水力発電所（D）から送られてきた電力をいったんここにプールして、ここから需要家に分配する役目をもっている。

### 3.2 電力システムの特徴

システムとしての電力システムを他の種々のシステムと比較すると、次のような特徴がある。

- (1) 貯蔵機能が貧弱
- (2) 動特性は全体的な面と局所的な面がある
- (3) 電力システムは成長していく
- (4) 電力システムはそれぞれ異なった性格を有する
- (5) 電力システムの建設には巨大な資本を要する

### 3.3 系統連系

電力システムを構成、運用する場合の基本的な原理は、需要家にできるだけ安価に、かつ停電を起こさずに良質の電気エネルギー（周波数や電圧が規定値に維持された電気）を供給することである。簡単にいえば経済性と信頼性といえるが、系統連系（複数の電力システムを電氣的に接続し、電力を相互にやりとりできるようにすること）によってこの二つの目的を同時に達成することができる。すなわち、

- (1) 全体としての負荷変動が小さくなる

- (2) 供給信頼度が向上する
- (3) 供給予備力を低減できる
- (4) 大容量機器が採用できる

電力系統発達の歴史は系統連系発展の歴史といっても過言ではないが、その反面、事故波及（連系しているために系統内の1カ所で起きた事故が順次周囲に波及して、大停電となること）が起こる可能性もある。図3にわが国の系統連系の概要を示す。

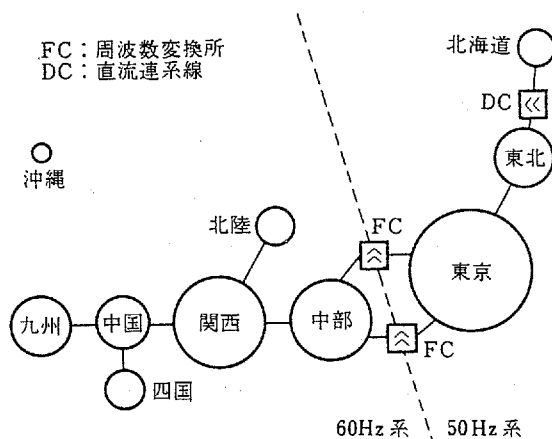


図3 わが国の系統連系と周波数の分布<sup>[5]</sup>  
 (円の面積は使用電力量に比例)

#### 4. 兵庫県南部地震による電力供給システムの被害状況と復旧状況<sup>[6], [7]</sup>

ほぼ2年半前に起きた兵庫県南部地震は甚大な被害をもたらし、多くの方々が犠牲にされた。電力、ガス、水道のライフラインも、神戸市を中心に広範囲に及ぶ停電、ガスの供給停止、断水などの被害があった。ここでは、被災地域の電力供給を受け持つ関西電力(株)の設備の被害状況と復旧状況について簡単に述べる。

##### 4.1 被害状況

被災の中心部にあたる海岸沿いの高密度需要地域には、電力供給のための送配電網が張り巡らされ、また火力発電所も何カ所もある。そのため、大部分の被害がこの地域に集中しているが、いわゆる激震地域と称されている場所から離れた姫路や大阪府東部にも被害が見られる。地震直後の停電件数は、末端の需要家数で約260万軒であった。

##### (a) 発電設備

水力発電所および原子力発電所の被害はゼロであり、激震地域にある火力発電所のみが被害を被った。

関西電力管轄の火力21発電所64ユニットのうち、10発電所20ユニットで被害が生じている。震源地と立地場所の距離に近いほど、被害が大きい。震源に近い東灘ガスタービン発電所や尼崎東・尼崎第三発電所では、液状化現象や地盤陥没に伴う建屋の損傷等甚大な被害となっているのに対して、大阪地区の各発電所では主要電気工作物の損傷、さらに高砂・姫路地区の各発電所では二、三の軽微な損傷で、大きな被害はなかった。

#### (b) 変電設備

変電所では、関西電力管轄の861箇所のうち、50箇所に被害があった。大きな被害が出たのは、伊丹変電所、新神戸変電所、神戸変電所、西神戸変電所、葺合変電所であり、激震地域と一致する。

主な被害は、変圧器の基礎アンカーボルトの破断、およびこれに伴う滑動、また変圧器および遮断機のブッシングの破損やずれ、およびこれに伴う漏油である。他にも制御機器、建築物、土木設備における被害が報告されている。

#### (c) 送電設備

架空送電線路では、全1,065線路のうち、23線路に被害があった。被害内容は、線路支持鉄塔の損傷が11件であり、他にがいしの損傷や電線の断線があった。

地中送電線路においては、全1,217線路のうち、102線路で被害があった。被害内容のうち、甚大なものは、送電ケーブルの損傷や接続スリーブ抜け、鋼管割れ等である。

#### (d) 配電設備

配電設備の被害は、高圧(6kV)全12,109回線の中で、649回線に、また特高(22kV)全1,246回線の中で11回線に被害が生じた。これらのうち、神戸支店管内に被害が集中しており、それぞれ551回線、10回線となっている。

配電線路のうち架空配電線路では、支持物(電柱等)11,289基、電線7,760径間、変圧器5,346台に被害があった。しかし、他の都市構造物が甚大な被害を受けた地域内において、ほとんど被害のなかった例もあり、耐震性が比較的高いと評価されている。また柱上変圧器も、単独で漏油や脱落をした例はなかった。

地中配電線路においては、全12,716条のうち、196条に被害があった。ケーブルそのものの被害では、建物・家屋の倒壊によってもたらされたものも多い。管路や人孔については、施設年の古い設備に被害が多いことが確認されている。

### 4.2 復旧状況

#### (a) 系統の安定化

地震発生直後の初期対応は、急激に発生した需給のアンバランスによってもたらされる電力系統の不安定(周波数の上昇;最大60.45Hz)を抑制する操作がなされ、6分後には復帰した。その後、連系間の潮流抑制、管轄内の系統切り替え等、中央給電指令所、基幹系統給電所、制御所等の迅速な対応により、系統の安定性を保ちつつ、停電地域の解消が行われた。

#### (b) 発電設備

被害のあった20ユニットのうち、8ユニットについては早期(平成7年1月中)に復旧(ただし、仮復旧のものもあり)を完了し、さらに10ユニットが平成7年5月末までに復旧した。

#### (c) 変電設備

変電設備についても、早期の停電解消を目指して、移動用変圧器を投入する等の応急復旧がまずなされた。1月18日8時の時点で、変電所としての機能は確保されていた。

#### (d) 送電設備

架空送電線路については、やはり仮鉄柱等の使用によって応急措置が施され、主たる被害線である有馬線と南大浜線について、1月19日に仮復旧を完了している。

一方地中送電線路については、被害の甚大であった神鋼灘浜線について、別ルートを用いた仮送電(33kV; 本来は77kV)が1月21日になされた。本復旧は4月12日に完了している。

#### (e) 配電設備

配電設備の復旧についても、まず停電の解消を目指した仮復旧が行われた。協力会社や他電力会社の人的・物的応援によって、1月23日15時に停電地域の完全な解消がなされた。停電件数の時間変化を図4にグラフで示す。

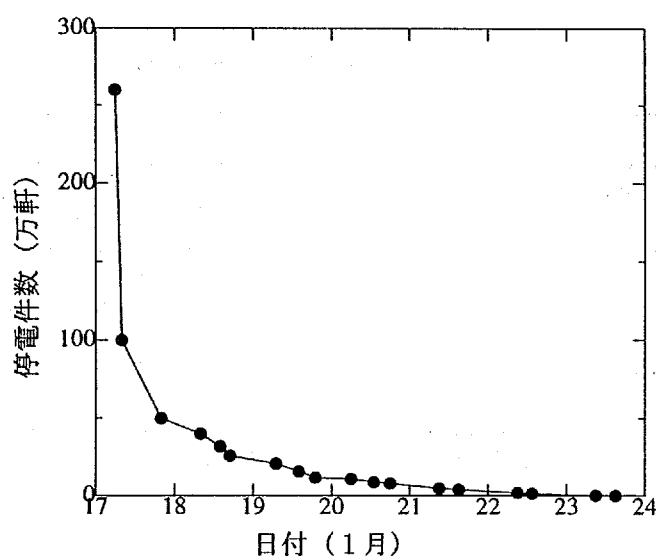


図4 停電件数の時間変化<sup>[7]</sup>

### 5. 地震に強い電力供給システムのあり方<sup>[8]</sup>

#### 5.1 地震に強い電力供給システムの考え方

電力供給システムを地震に強いものにするためには、概ね次のようなアプローチの仕方が考えられる。

- (1) 発電設備、変電設備、送電設備、配電設備など、電力システムの各構成要素の耐震性を適切に確保する。
- (2) 非常用発電機や蓄電池などの非常電源設備を需要家サイドに設置する。分散型の自然エネルギー利用発電設備(住宅用や学校用の太陽光発電など)も、このカテゴリーに含まれる。
- (3) 電源(発電設備)を分散化する、送配電網の構成に冗長性を持たせる、などの方策によって、災害時の電力供給システムの信頼性を向上する。

それぞれについて、以下で簡単に述べる。

## 5.2 電力システムの耐震性の確保

現在の耐震基準は、1978年の宮城沖地震を契機に1980年（昭和55年）に制定された「変電所等における電気設備耐震対策指針JEAG5003-1980」に準拠している。兵庫県南部大地震によって関西電力(株)の電力設備が受けた被害のほとんどは、現行の耐震基準の制定以前に設置された旧型設備であり、現行耐震基準に基づく設計手法により建設された新型設備については、大きな被害はなかった。同様のことが、1993年に発生した釧路沖地震、南西沖地震のときの北海道電力(株)における被害についても言える。

各電力会社では、過去の大きな地震や台風などの自然災害を教訓として、電力設備の設計基準にフィードバックさせてきている。例えば、兵庫県南部大地震における震度7のエリアに存在する変電所の被害状況を表1に示すが、昭和50年代以降の設備は全く被害を受けていないことがわかる。

表1 震度7エリア内変電所の被害状況<sup>[8]</sup>

		建設時期 ※				計
		昭和30年代以前	昭和40年代	昭和50年代	昭和60年代以降	
被害	有	7	7	0	0	14
	無	0	6	6	3	15
被害率		100%	54%	0%	0%	48%

※ 主要機器に対する改修を行ったものは、改修実施時期を表す。

## 5.3 非常電源設備とその耐震性

地震等の災害によって停電した場合にも電力を確保できる手段として、需要家サイドに設置された非常用発電設備や蓄電池、あるいは太陽光発電などの自然エネルギー利用発電設備が考えられる。兵庫県南部地震によるこれらの設備の被害状況について簡単にまとめるとともに、ライフライン停止時の独立した電源としての今後の可能性について述べる。

### (a) 非常用発電設備

被災地区に設置されている自家発電設備695件のうち、兵庫県南部地震時に始動したものが632件、始動しなかったものが63件であった。始動しなかった原因は、発電設備の故障・損傷、冷却水系の損傷、メンテナンス不良、操作・取扱いミス、などである。

自家発電装置の耐震基準は、昭和56年3月に策定された「自家用発電設備耐震設計のガイドライン」によっている。このガイドラインに従って設計・施工されたものは、今回の震災に対してもほぼ問題がなかったと報告されている。

耐震設計以外の災害時の自家発電設備のあり方に関しては、非常用発電設備の運転時間（短時間の停電時に防災負荷へ電力を供給することを前提としたこれまでの非常用専用発電設備では対応が難しい）、長時間運転に対応できる燃料貯蔵量（今回の震災では燃料切れによる停止が63件あった）、冷却水の供給停止に対応できる自家発電設備（水道水の供

給停止や冷却水パイプ破損による冷却不能等により、始動しなかったものや途中停止したものが24件あった）、発電設備の複数台設置（目的別に複数台設置、あるいは、屋上と地下等に分散設置して、電力供給を確実にすることを検討する必要がある）、自家発電設備のメンテナンスの向上（現在、月1回程度の始動試験および目視点検、年1～2回程度の負荷試験を行っているが、通常の点検では発見できないような不具合が16件報告されている）などが課題として浮かび上がっている。

#### （b）蓄電池

激震地区の神戸市および震災を受けた兵庫県各都市における蓄電池設備で、非常時の電力供給機能に支障を来す被害があったのは、3.7%、配列の乱れなど軽微な被害を含めると10%程度であった。蓄電池設備は電気鉄道の信号制御・病院の非常電源として、あるいは災害状況の伝達・復旧に関する情報交換などの通信設備に不可欠で、このような災害時にこそ重要性が高いと言える。

#### （c）太陽光発電

被害調査の対象となった16件のうち、被害件数は1件のみであった。しかもその被害は（配線用）配管のずれと軽微なもので、本体の重大な被害はなかった。これは、太陽光発電システムが設置されている建物は比較的新しいものが多く、建物・システムとも被害が少なかったと考えられている。地震後の運用状況については、商用電源システムが停電し、太陽光発電システムの連系が解列したことによって停止したものが3件あったが、商用システム復旧後、いずれも自動的に復旧している。

太陽光発電を非常用電源として考えるためには独立電源である必要があり、夜間や雨天でも供給できるために蓄電池（より一般的にはエネルギー貯蔵装置）を含むシステムでなければならない。また、現状の系統連系システムでは、商用電源停止時には安全のために運転が止められるようになっているので、非常時には運用できないことが多い。これを単独運転可能とする必要がある。さらに、今回の地震による被害は少なかったが、今後の普及により新築以外の建築への設置も進むと考えられるので、設置時の耐震性を再検討する必要があると考えられている。

### 5.4 系統構成<sup>[9]</sup>

超々高圧送電系統から高密度需要地までの電力輸送は、現状においては図5に示すように、500kV超々高圧外輪系統に275kV送電線をつながる275/77kV基幹変電所から77kV送電線を通して行われている。したがって、この77kV送電線が災害等で利用できなくなると停電に結びつく確率が高くなる。この状態を改善するため、例えば、図6に示すように275kV送電線によっても高密度需要地に電力を導入し新設の基幹変電所を介して電力供給する構成とすれば、供給信頼度の向上が期待できる。

以上は信頼度向上の定性的な説明であるが、定量的な評価を行うためには適切な信頼度評価指標を定義する必要がある。また、信頼性と経済性はトレードオフの関係にあり、信頼性だけを考慮して系統を構成することはできないことは言うまでもない。

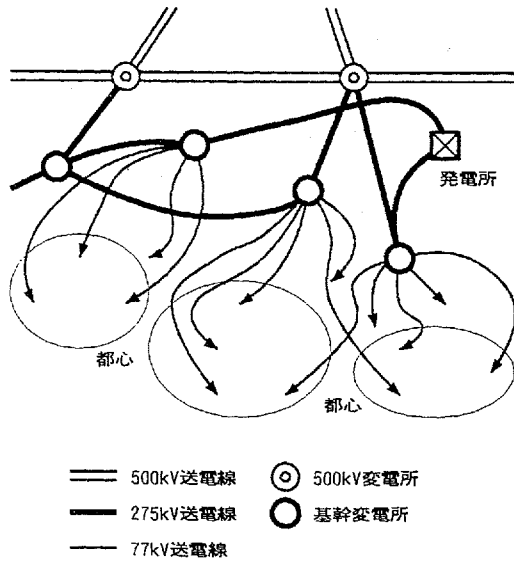


図5 現状の電力供給システム

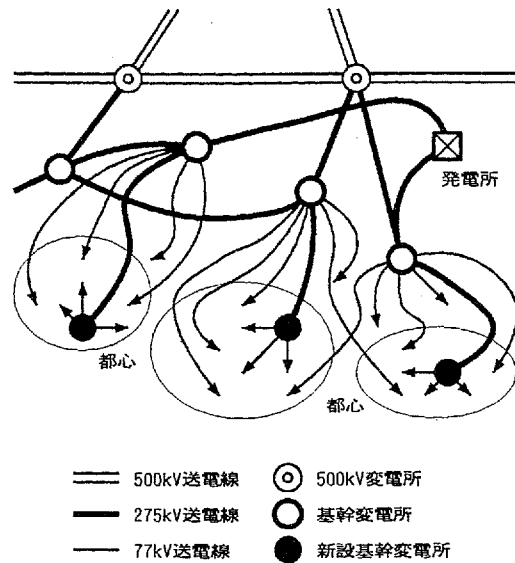


図6 信頼性の高い電力供給システム

## 6. あとがき

日本の電力供給システムは、欧米などの諸外国と比べて、高密度である、供給信頼度が極めて高い（停電頻度で海外の1/10程度）、電気料金が低い、などの特徴がある。最近の規制緩和の波は電気事業にも押し寄せており、入札制度による参入という形で、まず発電事業が自由化された。このようなIPP（独立発電事業者）の発電所が既存の電力システムに接続されてきた場合、電力供給コストは引き下げられるかもしれないが、信頼度を従来通り維持できるかどうかが大きな問題である。現にアメリカでは、電気事業の自由競争化が原因と見られるかなり大規模な停電が、昨年の夏、2回続けて発生した。電気事業の規制緩和は、それが電気料金にどう跳ね返るか、信頼性にどう影響するか、などに関して、電気事業内部だけでなく一般世論の十分な理解と合意を得ながら、進めるべきであろう。

### [参考文献]

- [1] 関根，堀米「エネルギー工学概論」電気学会（平成元年2月）
- [2] 棚澤，増子，高橋「エネルギー基礎論」電気学会（平成元年11月）
- [3] 向坊，青木，関根「エネルギー論」岩波書店（昭和51年6月）
- [4] 関根，林，芹澤，豊田，長谷川「電力系統工学」コロナ社（昭和54年3月）
- [5] 関根，豊田，長谷川，原，松浦「現代電力輸送工学」オーム社（平成4年2月）
- [6] 関西電力株式会社：「阪神・淡路大震災復旧記録」（平成7年6月）
- [7] 神戸大学：「兵庫県南部地震に関する総合研究」平成7年度報告書（平成8年3月）
- [8] 神戸大学：「兵庫県南部地震に関する総合研究」平成8年度報告書（平成9年3月）
- [9] 藤：「安心して暮らせるまちづくり」電気四学会関西支部講演会（平成8年4月）
- [10] 資源エネルギー庁：「1995/96年版資源エネルギー年鑑」（平成7年2月）



メ 七

# 公共交通の復興と整備のあり方

－ 阪神・淡路大震災の経験から －

建設学科 助教授 森津 秀夫

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災においては鉄道をはじめとする公共交通機関も大きな被害を受けた。素早い復旧がなされたが、今でもなお阪急伊丹駅は仮駅を使用している状態である。公共交通は人々の生活を支える不可欠の社会基盤であり、とくに我が国における大都市は鉄道がなければ成り立ち得ない。現代のクルマ社会においては自家用車が移動手段として使われることが多くなった。しかし、あらゆる人々に等しく交通サービスを提供する公共交通システムは決して廃することができないものである。高齢化社会の到来を迎え、むしろその充実が緊急の課題であるとも言える。

地震により、都市部における鉄道がこのような大きな被害を受けたことはかつてなかったことである。社会の混乱も極めて大きかった。したがって、今後の鉄道整備のあり方を考えるとき、これが新たな原点となる。また大規模災害時における公共交通機関としての鉄道のあり方を考えることは、単に震災を受けた地域だけの問題ではない。我が国においては地震や風水害と無縁でいることはできない。阪神・淡路大震災では現代の都市の脆さが様々な面において露わになり、それを克服することが求められている。そのような観点から、構造物の強度にとどまらず交通システムとしての鉄道のあり方が問い直されなければならない。そこで、ここでは鉄道を中心に阪神・淡路大震災における公共交通機関の復興に至る過程を振り返る。そして、震災経験に基づいて鉄道整備のあり方を考える。

## 2. 阪神・淡路大震災における公共交通機関の被災

ここで対象とするのは交通システムの機能に関する被害であり、構造物の被害状況等を問題とするものではない。まず鉄道においては、震災当日に運行が開始されなかった区間は表-1のとおりである。1月18日ないし19日には運行を開始した区間がかなりある。しかし、阪神間を直通する鉄道は4月1日のJR東海道線の開通まで待たなければならなかった。

バス路線となっている道路や橋梁の損壊、通行制限、交通渋滞等により、路線バスの運行にも大きな支障が生じた。すべての路線が元の状態に復旧するには不通となった道路がすべて開通しなければならなかった。地震から約1週間後の1月23日時点では、たとえば神戸市交通局で73系統のうち22系統、阪急バスで211系統のうち104系統、阪神電気鉄道でも25系統のうち13系統が運休したままであった。

タクシー事業者も神戸市内を中心に被害が及んだ。主な被災地内の法人タクシー事業者で営業所の全半壊が26戸、車両被害は全損が65両、一部被害が655両となった。個人タクシー事業者では営業所の被害が全壊（焼失を含む）222戸、半壊206戸、車両被害は全損11

表-1 鉄道の不通区間(1月17日に開通した区間を除く)

事業者名	線名	区間
JR西日本	山陽新幹線 東海道線 和田岬線 山陽線 福知山線	新大阪～姫路 尼崎～神戸 兵庫～和田岬 神戸～姫路 尼崎～広野
JR東海	東海道新幹線	京都～新大阪
阪急電鉄	神戸線 甲陽線 今津線 伊丹線 宝塚線	梅田～三宮 夙川～甲陽園 今津～宝塚 塚口～伊丹 池田～宝塚
阪神電気鉄道	本線 西大阪線 武庫川線	梅田～元町 西九条～尼崎 武庫川～武庫川団地前
神戸市交通局	西神線 山手線	西神中央～新長田 新長田～新神戸
神戸新交通	ポートアイランド線 六甲アイランド線	三宮～中公園～北埠頭～中公園 住吉～マリナーパーク
神戸電鉄	有馬線 三田線 公園都市線 粟生線	湊川～有馬温泉 有馬口～三田 横山～フラワータウン 鈴蘭台～粟生
神戸高速鉄道	東西線 南北線	三宮(阪急)～西代 元町～高速神戸 湊川～新開地
山陽電気鉄道	本線 網干線	西代～山陽姫路 飾磨～山陽網干
北神急行電鉄	北神線	新神戸～谷上
六甲摩耶鉄道	六甲ケーブル線	六甲ケーブル下～六甲山下

両、一部被害が26両と報告されている。このため、1月23日時点での神戸市におけるタクシーの稼働率は約20%であり、芦屋市及び西宮市でも約30～40%であった。

### 3. 阪神・淡路大震災時の代替輸送

鉄道の不通区間は徐々に復旧されていった。しかし、鉄道の不通は社会的な影響が大きいことから様々な形で代替輸送が行われた。これが鉄道の復旧に至る過程での特徴的な事柄である。鉄道の担っていた交通は幅広く、通勤・通学旅客から被災地を通過する長距離

旅客まで、多様な鉄道利用旅客に対する代替輸送が必要であった。主な代替輸送には鉄道迂回ルートによるもの、代替バスによるもの、船舶によるものなどがあつた。

鉄道迂回ルートによるものは、JRでは播但線や加古川線を経由するルートが使われた(図-1)。福知山線、播但線経由のルートでは、和田山駅での乗換人員が通常は590人/日であったものが最大6,950人/日となった。福知山線、加古川線経由ではさらに多く、谷川駅での乗換人員が260人/日から最大8,600人/日にもなった。また福知山線の特急「北近畿」系列車の乗車人員も4,900人/日が最大9,500人/日と倍増した。和田山駅や谷川駅での乗換人員が示すように通常とは桁違いの多数の利用者があつたことが推測される。

神戸電鉄から三田駅を経由するルートや、谷上から北神急行で新神戸へ入るルートも多数の人々に使われた(図-2)。三田駅での混雑ぶりは新聞などでもよく報道されたところである。神戸電鉄三田駅の乗降者数は平成6年12月に10,250人/日であったものが平成7年2月に35,701人/日を記録し、北神急行谷上駅の乗降者数も平成6年12月の18,824人/日が平成7年5月の40,685人/日にまで増加した。

被災地における代替輸送の主役

は鉄道代替バスであり、時間経過とともに運行区間は変わったが、各社で代替バスが運行された。代表的な区間である阪神間の代替バスの利用者数は図-3に示すとおりである。被

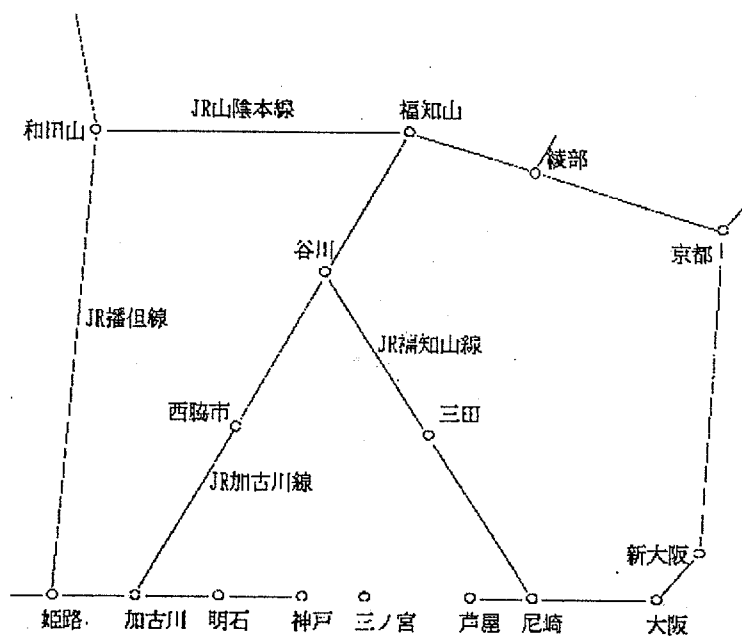


図-1 JR線による迂回ルート<sup>1)</sup>

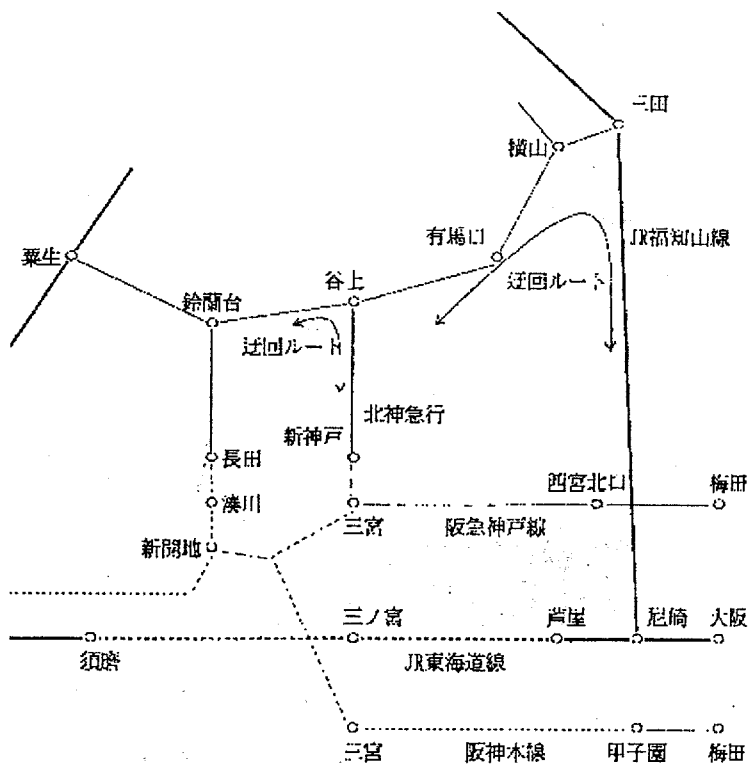


図-2 神戸電鉄有馬線、三田線による迂回ルート<sup>1)</sup>

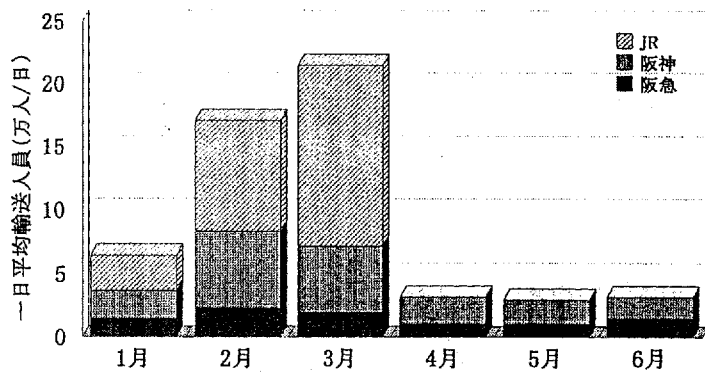


図-3 阪神間代替バスの輸送人員

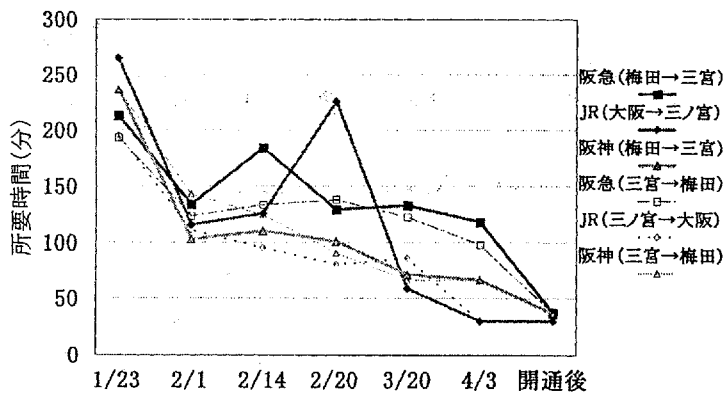


図-4 梅田(大阪)～三宮(三ノ宮)間の所要時間推計値

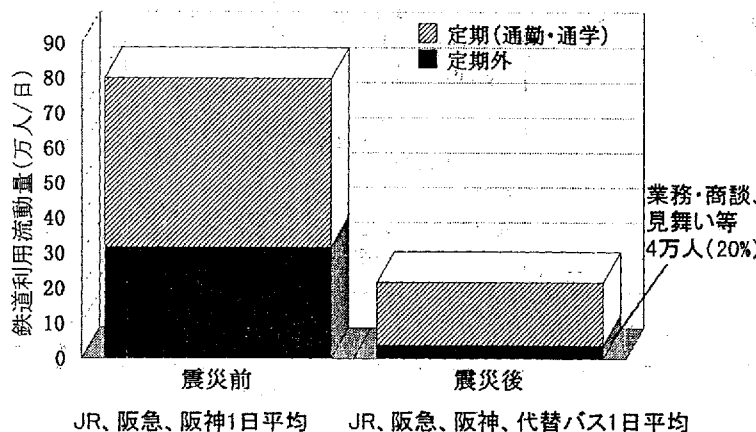


図-5 震災前後における鉄道利用流動量の変化 (推計値)

災地の人々の活動が活発になるに従って代替バスの利用者は増加し、3月に最大となった。この間、不通区間の開通が早く進んだJRの利用へ移っていったことがわかる。4月にJRが全区間開通したことにより、その後の代替バスの利用者は1日3万人ほどになった。

梅田～三宮間の徒歩アクセス、待ち時間等を含めた所要時間の推計値は図-4に示すとおりである。往復で大差があったりするが、震災直後は3時間から4時間を要していた。徐々に開通区間が延びることにより所要時間は短縮された。それでも通常は30分程度であるところを、代替バスを使ってはおおむね1時間半から2時間位はかかっていた。

阪神間の鉄道利用者は図-5に示すように、震災前には通勤・通学の48万人など1日に80万人あった。震災後の代替バス利用者は最大時で22万人であり、通勤・通学で30万人、定期外でも28万人減っている。通勤・通学者の残りに関しては、たとえば週に1回しか帰宅しなかったという話もよく聞かれた。道路交通状況も劣悪な中で、バスでよく22万人も運べたと言える。しかし、関係者の多大な努力によっても代替バスでは1/4しか運べなかったのであり、あらためて鉄道の輸送力を代替することの困難さを実感せずにはいられない。

震災による鉄道不通時の代替輸送機関が果たした役割は以下のようにまとめることができる。まず鉄道迂回ルートは大きな迂回であっても定時性が高く、また遠距離の移動に対応する手段となった。代替バスは神戸・阪神地域間の最も重要な交通手段として機能し、

とくに通勤・通学には欠かせなかった。路線バスも完全ではなかったが早い段階から運行を開始し、生活を支える身近な交通手段であった。そして、乗客間での情報交換の場としても役立った。船舶は道路事情に左右されない利点があり、四国・九州と関西方面間の輸送ルートとしての役割が大きかった。

#### 4. 鉄道輸送における災害への対応

鉄道輸送における災害への対応は災害により不通となった区間を早急に復旧することが第一である。それと同時に不通区間が果たしていた機能を代替する方策を実施しなければならない。すなわち代替輸送の確保である。そこで、ここでは阪神・淡路大震災時における代替輸送を省みることにより、震災時の代替輸送の問題点と課題について述べる。

代替ルートとなった播但線や加古川線、あるいは神戸電鉄などは通常とは全く異なる大量の利用者を扱わなくてはならなかった。災害時に代替ルートとして機能することを期待するならば、そのような大量の需要を想定しなければならず、複線化や電化等の施設整備が必要になる。しかし通常時の需要とは大きなギャップがあり、他路線の災害に備えた整備を行うことは採算性の問題が生じる。また他路線や他社から車両、人員の応援を受けるにしても限界がある。したがって、単に鉄道が存在することだけで需要の大きな鉄道路線の代替ルートの役割を果たせると考えてはならない。

災害時における鉄道ネットワークの信頼性の点からは、相互に代替機能を発揮できるネットワークを構築しておくことが望ましい。そのためには平常時に各路線に旅客が分散し、それぞれが余力を残しているようなネットワークが目指されるべきであると言えよう。同様に、乗り換え等が行われる結節点が分散したネットワークが好ましいことにもなる。

旅客がいろいろなレベルで分散することは、地震等発生時の旅客の安全にも寄与する。多数の人間が集まることは公共交通には好ましいことではあるが、その安全を確保するには過度の集中を避けなければならない。災害時を考えれば、列車ごとや車両ごと、通路などあらゆるレベルで分散を図る配慮が必要なのではないかと考えられる。

鉄道迂回ルートや代替バスの利用においては、利用者自身が不慣れな路線であったり、多大な混雑のための混乱が生じたと考えられる。大規模な災害時には、被災地における旅客需要の円滑な処理が優先されなければならない。そのためには、鉄道各線や代替バスの利用に思い切った方策が考えられてもよい。たとえば共通化、単純化した臨時の運賃制度を設けるとか、鉄道不通区間をバスで連絡するにとどまらず、被災地域の公共交通システムを一元化して共同で代替バスを運用することなどが検討されるべきであろう。

大きな役割を果たした代替バスに関しては、バス停をどう設けるかが大きな問題であった。幹線道路とのアクセスや多数の利用者を待たせるスペースの確保など、都合のよい場所を得ることは難しい。余裕のある駅前広場が確保されていれば有効であり、今後は駅前広場の整備にこのような観点も考慮しなければならないであろう。運行ルートの設定に際

表-2 鉄道各社の情報提供手段

	テレビ	ラジオ	新聞	広報誌	運輸省ファックス	駅での掲示・案内	市内への掲示	専用窓口	電話窓口
JR 西日本	○	○	○		○	○			○
阪神電気鉄道	○		○	○	○	○		○	
阪急電鉄	○	○	○	○	○	○			
神戸電鉄	○		○			○			○
山陽電気鉄道	○	○	○	○	○	○			
神戸新交通			○		○	○	○		○

表-3 鉄道各社の情報提供内容

	発着時刻	運行ルート	待ち時間	所要時間	運賃	発着場所
JR 西日本	○	○	○	○		○
阪神電気鉄道	○	○	○	○	○	○
阪急電鉄	○	○	○	○	○	○
神戸電鉄	○	○	○	○		○
山陽電気鉄道	○	○		○		○
神戸新交通	○	○		○	○	○

鉄道事業者ごとにどれが使われたか示したものである。また提供された情報内容を示したのが表-3である。代替バスの発着時刻や運行ルート、待ち時間、所要時間、運賃、それに発着場所などである。

これに対して、利用者はどのような手段で情報を入手していたかをアンケート調査で調べた結果が図-6である。やはり、テレビと新聞から情報を得た人が多い。ファックスサービスの利用者は少ないが、サービスの存在を知らなかった人も多かったのではないかと思われる。サービスを使用できた人には好評であった。またアンケート調査において利用者がどのような情報が欲しかったかを聞いた結果が図-7であり、所要時間、運行間隔、待ち時間の回答が多かった。

利用者に対する情報提供の課題をまとめると、ひとつは情報内容に応じたメディアの選択があげられる。すなわち、公共交通機関全体の運行状況等は、広くマスメディアの利用が適しており、音声情報や文字情報でかまわない。待ち時間や所要時間などのきめ細かい

しても、道路の被災状況、緊急輸送との調整、あるいはバスレーンの設置、交通規制等、関係機関との連携が必要であり、そのような体制が迅速にとれるようにしておかなくてはならない。

## 5. 鉄道利用者への情報提供

震災後の鉄道運行状況は通常時とは大きく異なる。しかも、不通区間の部分開通や道路状況の変化によって代替輸送も日を追って変わってゆく。そのため、利用者には的確に情報を提供することが重要な課題であった。そこで、ここでは鉄道利用者への情報提供に関して述べる。

代替輸送が行われていた時期にどのような手段で、利用者に情報提供が行われていたかを示したのが表-2である。主な情報提供手段にはテレビ、ラジオ、新聞のほか、広報誌、運輸省で行われたファックスサービス、その他に窓口の設置などがあった。これらの情報提供手段のうち、

情報はマスメディアだけでは不十分であり、ローカルメディアや事業者の窓口を通して提供することが適している。また画像情報の利用も有効である。

もうひとつの大きな課題は情報伝達手段の整備である。所要時間や待ち時間等の情報を利用者は欲しているが、そのようなオンタイム情報を公共交通の利用者に伝達する手段は乏しい。VICsの実用化に見られるように、自動車の利用者にはダイナミックな交通情報を得る手段が用意されている。これに対し、公共交通の利用者に対しては車内や駅でのアナウンス、あるいは駅での情報板などしかない。

この現状を考えたとき、災害時に備えてということだけでなく平常時のサービス向上のためにも公共交通利用

者に情報を提供するシステムが必要である。あらゆる公共交通機関共通で、利用者に詳細かつ的確な情報を提供できるようなシステムであり、たとえばミニFMでFM文字多重放送、いわゆる見えるラジオを使ったシステムなどが考えられる。周波数を決めておけば、視覚案内装置すなわち鉄道やバスの車内情報表示装置が利用者の手元にあるようなことが実現できる。

情報が手に入らなくても支障がないことが多いが、今の時代はそれでは落ち着かない。災害時のことだけを考えた投資はつらいものであるが、情報化時代への対応によるサービス向上として公共交通利用者への情報提供システムが検討されることを期待したい。

## 6. 阪神間における鉄道ネットワーク整備の課題

復興計画等においては、とくに道路に関して災害に強いネットワークの整備が提唱されている。災害への備えを検討しなければならないのは鉄道に関しても同様である。そのような観点から今後の鉄道整備における一般的な課題はすでに述べたところである。それらも踏まえたとき、阪神・淡路大震災の被災地である阪神間地域においてはこれからの鉄道ネットワークの整備をどのように考えればよいかを述べることにする。

震災後、道路と比較してはるかに早く鉄道各線は復旧した。しかし、運行形態や利用者

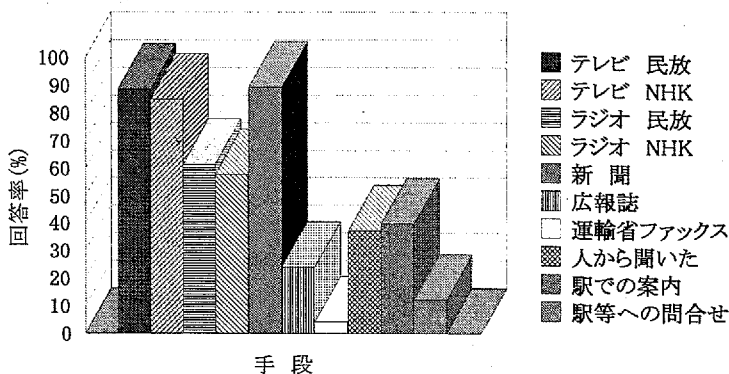


図-6 利用者の情報入手手段 (1ヶ月後)

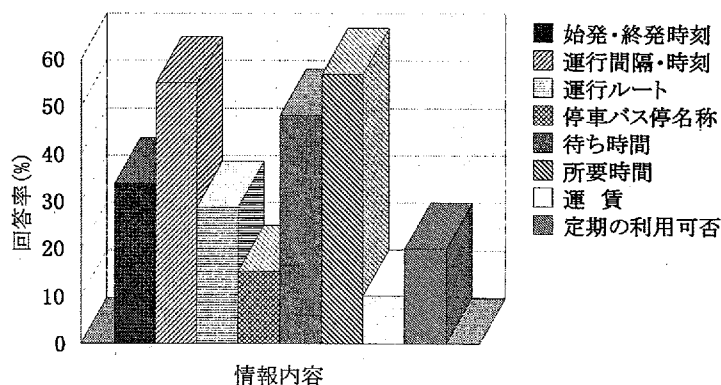


図-7 利用者が事前に入手したかった情報

の流れが元と同じに戻ったわけではない。復旧の早かったJRの利用者は増加し、阪急や阪神の利用者は減少したと言われている。これは必ずしもすべてが震災に起因するものではなく、最近における各社の戦略が影響したものであるかもしれない。けれども、震災時に他の路線を使うことにより、使い慣れなかったルートが便利であることに気づいた利用者も多かったものと考えられる。一方で、阪急電鉄では神戸線の全線開通に際して特急の停車駅を追加したように、震災を契機に需要の変化に対応する目的で運行形態が見直された。これが利用者に対するサービス向上であるにとらえれば、単なる復旧ではなく、まさに復興であったと言えよう。

阪神間は伝統的に私鉄が強い地域であり、首都圏と対比したときの関西の特徴でもあった。だが国鉄の民営化後、その勢力分布に変化が見られるようになり、震災が拍車をかけたと考えられる。それに対応して民鉄を中心にプリペイドカードの共通化が実施されるなど、関西における鉄道利用環境の変化が激しくなった。さらにこの春、JR東西線の開通によって福知山線や神戸方面から片町線への直通電車が走るようになった。しかし、首都圏と比べて関西では鉄道の相互直通化が遅れていると指摘されて久しい。車両を持たない第3セクターの鉄道である神戸高速鉄道によって阪神、阪急、山陽、神戸電鉄の4社線が結ばれるという先進的な事例もあったが、相互直通化が実現した例は少ない。長年の間に、あるいは震災のために地域構造や都市構造は変化しており、人の流れも変化してきている。将来に予想される変化をも見込んだうえで鉄道ネットワークを再編し、既存鉄道路線の有効な活用を図らなければならない。また、相互直通化によって駅間での乗り換えを減少させることは、乗客の利便性だけでなく、交通結節点における防災性を向上させる観点からも必要なことである。

たとえば神戸においては、三宮が鉄道ネットワークの中心である。地下鉄海岸線や神戸空港のアクセス鉄道ができることになれば、その傾向はより一層強まる。しかし、現状に

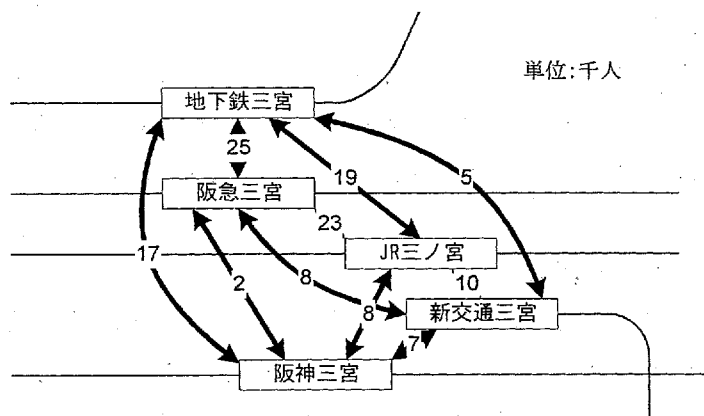


図-8 三宮における鉄道駅乗り継ぎ者数 (第3回京阪神パーソントリップ調査)

においても人の流れに対して最適な鉄道運行形態になってはいない。1990年に行われた京阪神パーソントリップ調査の結果を見ると、図-8に示すように三宮地区においては12.5万人/日の鉄道駅乗り継ぎ者がある。その半数は地下鉄と他路線との乗り継ぎであり、この割合はさらに高まっていると推測される。この地区においては地下鉄が最も新しい駅であるが、その利用者には乗り継ぎを行う者が多く含まれているのである。阪神間には阪神、阪急、JRの3路線が

あり、阪神と阪急はともに神戸高速線から山陽電鉄まで直通している。現在の状況からすれば、おそらく阪神間のどちらか1路線と地下鉄との相互直通が行われるのが無駄な乗り換えを減らすために必要であろう。

三宮にある各駅はいずれも理想的な状態からは遠く、何らかの問題を抱えている。そこで、実現性を無視すれば、三宮地区を大改造することが考えられる。たとえば、阪急を地下化して地下鉄の西神方面と相互直通化し、地下鉄の新神戸方面からは神戸空港へ向かう路線とし、それに阪神が乗り入れるというようなものである。阪急と阪神の役割が逆になっても、もちろんかまわない。構想されている大阪湾横断鉄道を神戸空港アクセスを兼ねた新幹線直通の鉄道とすれば、関西国際空港発の新幹線も三宮に停車することになる。円滑な乗り換えが可能なJRを含めた総合駅を完成させれば、ようやく神戸の玄関にふさわしい駅になるのではないだろうか。

新たな鉄道の整備に関しては、ここに述べた具体性のある神戸空港のアクセスの他に、長期的には大阪湾横断鉄道、大阪湾岸高速鉄道の構想もある。さらに阪神間における既存鉄道の代替ルートを整備することを目的とするならば、神戸電鉄有馬線の谷上から先を標準軌化、高速化して北神急行と直通運転を行い、さらに宝塚へ至る路線を建設することが考えられてもよい。これらが含まれたネットワークが完成したならば、極めて充実した鉄道サービスの供給が可能になるであろう。

## 7. おわりに

阪神・淡路大震災の被害が社会的に許容できる範囲内であったのかどうかは評価する立場によって異なり、時間経過とともに変わってゆくであろう。個々の被災者にとって耐え難い災害であったことは事実であるが、何事もなかったかのように社会は動いていると見る人もあるであろう。震災と鉄道とに関しても様々な見方があるだろうが、冷静に検討してゆかなくてはならない。

都市が大地震に襲われることは極めて確率の低いことである。しかし、対応が不十分であれば大きな混乱を招く。大量高速輸送が特性である公共交通としての鉄道が震災時にどうあるべきかに関しては、さらに検討を重ねてゆかなければならない。そのために阪神・淡路大震災の経験が役立ち、我が国では避けられない次の大震災時に円滑な輸送が確保されることを願いたい。

阪神間における交通システムは、ようやく落ち着きを取り戻した段階である。鉄道整備には多額の資金が必要なため、これから先は大きな変化は見られないかもしれない。しかし、地球環境問題が深刻化すれば、非効率な自動車交通中心から公共交通中心の社会へ再度の転換を行わなければならなくなる。それに備えて防災性をも考慮した鉄道ネットワークの整備方向を考えておくことは無駄なことではない。

## 参考文献

- 1) 財団法人 関西交通経済研究センター：震災等発生時の旅客交通に関する調査研究報告書，平成7年10月．



又 毛

# 製造業における震災復興と今後の危機管理

機械工学科 教授 森脇俊道

## 1. まえがき

先の阪神・淡路大震災においては、残念ながら極めて多くの人的、物的被害を被った。このことは産業界、なかんずく製造業においても同様である。平成7年6月に出された神戸経済復興委員会報告書<sup>1)</sup>によれば市内の主たる産業関連の被害は表1のようである。ここでは神戸における製造業に関して、筆者が関係した震災の被害調査と復興支援、並びに今後の危機管理についての基本的な考え方を紹介する。

## 2. 製造業における震災の被害状況

主として神戸市内の機械製造業を対象に行った震災の具体的な被害項目をまとめると、表2に示すとおりである<sup>2)</sup>。この内、タンク、倉庫、棚などの貯蔵設備、各種計測装置では比較的大きな被害があったのに対し、各種工作機械をはじめとする生産設備の被害は、一部を除いて相対的に軽微であったようである。

表1 神戸市内における震災の被害状況（産業関連）<sup>1)</sup>

項目	被害状況
港湾施設	大型岸壁239バースのほとんどが被災し、荷役機械、倉庫、海岸保全施設、臨界道路など多数破損。
製造大手企業	生産設備や本社ビルの損壊により、操業を一時停止したほか製造ラインの一部を国内他地域へ移転。
中小製造業	集団化団地29団地、352社のうち5団地、35社が全半壊。 (社)神戸市機械金属工業会加盟の407社のうち、72社が全半壊。
地場産業	ケミカルシューズ業界の80%の企業が全半壊または焼失の被害、清酒業界ではほとんどの企業で建物あるいは設備に甚大な被害、その他の業界も大小の被害を被っている。
商業	百貨店・スーパーは都心部を中心に、各社とも数百億円規模の巨大な被害、商店街・小売市場では、被災の著しい6区で商店街の店舗の1/3、小売市場の店舗の約半分が全壊・全焼するなどの甚大な被害を受けた。
観光・コンベンション	北野の異人館や灘の酒蔵、旧居留地やウォーターフロントなど市街地の集客観光施設、コンベンション・宿泊施設などで建物損壊などの大きな被害をうけた。有馬温泉でも旅館に被害。

特に工作機械に限って見れば、中小型では工場レイアウトの変更などに柔軟に対応するため、基本的にレベリングブロックを介して床置きにしている場合が多く、そのためレベリングブロックからの脱落、移動、傾きなどが顕著であった。一部アンカーボルトなどによる固定をしたものでは、その被害は極めて軽微であった。多くの中小型工作機械では、据え付けのし直しを行って、レベル出しをし、精度チェックや調整を行った程度で、ほとんど生産再開にこぎつけたようであった。すなわち、もともと構造の剛性が高く作られている工作機械は、ほとんど震災に耐えたといえる。その一方で、別置きのNC制御装置などは大半が転倒し、そのため工作機械本体に接続されたケーブルや油圧の配管は大半が切断されていた。

他方、海岸近くの大手企業では、大型の工作機械が多くあったが、これらの工作機械は元来精度を出すためにしっかりしたコンクリートの基礎の下に、岩盤までコンクリートパイルを打つなど、十分な対策が施されていたこともあって、大きな被害はほとんど無かったようである。

なお特に被害の大きかった生産設備としては、溶解炉があげられる。溶解炉は連続して使用されるため、設備の停止によって中の金属が凝固し、致命的な被害を受けたものもあ

表2 製造業における被害項目のまとめ

項目	具体的な被害
建物	内部壁の剥離、ヒビ割れ 天井の一部が陥落 地盤の液状化 鉄筋コンクリート梁の損傷 本社事務所半壊、工場全壊により一時本社機能マヒ 岸壁の損壊
機械	工作機械（NC機、汎用旋盤、工具研磨機、フライス盤など）の位置ズレ、芯ズレ、傾き、転倒 製品機械などのズレ、傾き、転倒 コンピュータ機器などの破損（落下、水損） クレーン倒壊
設備	製品倉庫や自動収納倉庫の棚の変形、崩れと散乱 上下水道管、給排水管の一部破損 生産仕掛品の落下による棚などの損傷 大型給湯器のパイプ破損による工場水損 焼き入れ装置の液層の配管が外れ、液漏れ 建物屋上キュービクルの一部損傷 槽類の配管などの損傷

った。ラジアルボール盤のように背が高く、またオーバーハングの大きい工作機械では、転倒したりアームが振れて破損したものが目立った。また例えば3次元測定器のように精密な測定器などでは、剛性よりも使いやすさを重視し、さらに作業空間を大きく取っているため、強度が不足していて大きな被害を受けたものが多い。

製造業においては生産設備だけでなく、ロジスティクスの面でも大きな被害を受けた。すなわち震災によって道路・鉄道網、港湾施設などあらゆる交通、運搬手段が壊滅的な損害を受けて機能不全に陥った。そのため原材料や部品、更には製品の輸送能力が大きく低下し、結果として生産活動に大きな支障が生じた。主として多量生産においては、これまで生産コストを徹底的に下げるために、いわゆるジャストインタイムやカンバン方式に代表されるように、仕掛かりや在庫を極力減らすことが推奨されてきた。その結果、今回の大震災では大手の自動車メーカーにおいて、部品納入業者からの部品納入が途絶えて（部品が生産されなかったり、搬送ルートの崩壊で配達されなかったしたことによる）、一時的な操業停止に追い込まれたことは良く知られているところである。

### 3. 震災復興の支援

震災直後から国や県、市などでは製造業における震災復興のための支援を種々行っている。筆者が関係した神戸市においても、応急的な支援策として表3に示すような対策を行っている。中でも、主として中小企業を対象とした金融支援（無担保の融資を含む）や、仮設工場の提供は大きな効果があったと聞いている。特に市街地の再開発が遅れているため、工場再建のめどが立っていないところも多く、仮設工場は当分撤去されないで、むしろ常設の方向に進んでいるところもある。

表3 神戸市による応急の産業支援策

項目	具体的な内容
総合相談業務の実施	震災・円高に対応するため、金融・雇用・法律等の相談業務を実施
金融支援	事業再建のための長期かつ低利の資金融資
税制面での優遇措置	復旧、復興に向け、負担を軽減するため、所得税、法人税、地価税、市民税、固定資産税等の減免
仮設工場の提供	中小製造業に対して低廉な賃料で仮設工場を貸し付けることにより被災企業の早期立ち上がりを支援
集団化・共同化による再建	高度化資金等の活用によって、企業の集団化・共同化による再建を促進
市内企業への復興需要の誘導	地元製品の購買奨励運動や、地元企業への優先発注
雇用の安定確保	企業の流出防止や雇用の安定、特に、被災失業者に対する雇用の場の確保

神戸市においては種々の観点から中長期的な産業復興の支援が行われている。神戸経済を支えてきた工業・ファッション産業における復興支援策（提言）の一部を表4、表5に示す<sup>1)</sup>。神戸市では、こうした提言の実現を目指して、現在も引き続き努力を行っている。

表4 まちづくりと一体となった産業の復興策<sup>1)</sup>

項目	具体的な内容
「くつのまち・ながた」構 想の推進	ケミカルシューズ等の工場の適切な配置を進めるとともに、生産と小売りを組み合わせ、地区の集客力を強化し、賑わいを演出する。
酒を生かしたまちづくりと 一体となった清酒業の復興	灘五郷における歴史と文化を生かしたまちづくりの中で清酒業の復興を図る。
ファッションタウンの機能 拡充等	ポートアイランド内の交通アクセスの改善を図るとともに、小売りなどの機能を拡充し、界限性をもたせることによって街の活性化を図り、ファッション都市イメージの向上を図る。
ポートアイランド（第2 期）のファッション街区整 備	ファッション産業の創造提案拠点として、衣食住遊に関する総合的なファッション企業や情報・通信産業などを誘致し、ポートアイランド（第1期）のファッションタウンと連携して、新しい生活文化の創造と集客・賑わいのある街区の形成を図る。
まちづくりを活用した産業 のイメージアップ	展示コーナーやクラフト工房を活用したショーウィンドーゾーン設置の検討等。

表5 既存産業の高付加価値化、技術力の強化による高度化の推進支援<sup>1)</sup>

項目	具体的な内容
神戸ファッション美術館と神戸 ファッションマートを中核とし た復興拠点づくり	六甲アイランド内に隣接して立地している神戸ファッション美術館と神戸ファッションマートの連携により、神戸ファッション産業復興の中核施設とする。
神戸ファッション産業復興支援 センターの開設	製品の高付加価値化による高度化を強力に推進していくため、情報収集・処理・提供、コンサルティングとネットワーク化の促進、教育・研修などを行う。
産業高度化推進機構による産業 の振興方策の提言と推進	産学官の連携により、産業高度化のための方策を提言し、その実現のため調整・コーディネートなどを行う。
複合産業団地における企業の集 団化・高度化の推進	複合産業団地への中小企業の移転、集団化を進め、操業環境の改善を図るとともに、異業種交流等を促進して、高度化を進める。

神戸市産業振興財団の機能拡充	情報提供等のビジネス支援強化、新産業の無償展示会の実施、マイスターの活用等により、市内産業の高度化をソフト面から支援する。
ワールドパールセンター（WPC）の設立	WPO（世界真珠機構）、真珠検査所、真珠取引所、真珠美術館等の機能をもったワールドパールセンター（WPC）を設立し、真珠産業の取引・情報発信拠点とする。
ファッション産業工房村の創設	職人がモノを作っているところを見せて、販売するマイスター（名匠、師匠）のまちをつくる。
事業革新円滑法によるリストラクチャリング（事業再構築）支援	事業革新円滑化法を活用した税制特例、低利融資、債務保証等による円滑なリストラクチャリング（事業再構築）支援。

#### 4. 製造業における危機管理

製造業ではこれまでも、様々の観点から生産における異常状態や、危機に対する対策を講じてきており、またこうした問題に対する研究も行われている。しかしながら対象としている問題の多くは、例えば工作機械や生産設備の故障などの異常、停電、特急仕事の割り込みや素材の搬入遅れなど、比較的限られた課題を対象としている。今回の震災で多くの製造業は、単に生産設備の問題だけでなく、先に述べたようにロジスティクの問題や取引先との関係など、これまで経験したことのない広い範囲の問題に遭遇している。その意味で今後は企業活動全般にわたった危機管理の意識が必要と考えられる。

これまで、こうした広い範囲の問題については、それを取り扱う科学的な手法はあまりなく、研究も進んでいない状況にある。そこで筆者らの研究室では、危機における問題の把握と意志決定の支援をする目的で、総合的な生産システムシミュレータを開発している。すなわち、製造業における企業活動全般をコンピュータを用いて模擬し、種々の異常、危機とそれらに対する挙動をコンピュータ上で再現し、問題点の把握と、対策を検討するための支援を行おうとするものである。ここでは以下に、開発中の総合生産システムシミュレータの基本的な考え方と概要、簡単なシミュレーション事例を紹介する。

##### （1）生産システムシミュレータの概要

対象とする生産システムは、階層構造を有するシステムとして取り扱う。すなわち例えば図1に示すように、最上位に企業があり、順に工場、加工ショップ等のショップがある。ついで数台の設備からなる加工セルや組立セルが位置し、最下位には工作機械やハンドリングロボットなどの設備が存在する。この他に、さらに上位の階層や、反対に下位の階層を想定することも可能であるが、ここでは図1の3階層の構造を対象とすることにする。

開発した統合生産システムシミュレータで取り扱うシステムの構成要素の例を図2に示す。生産システムを構成する要素は、基本的には（1）対象物の物理的な特性を変化さ

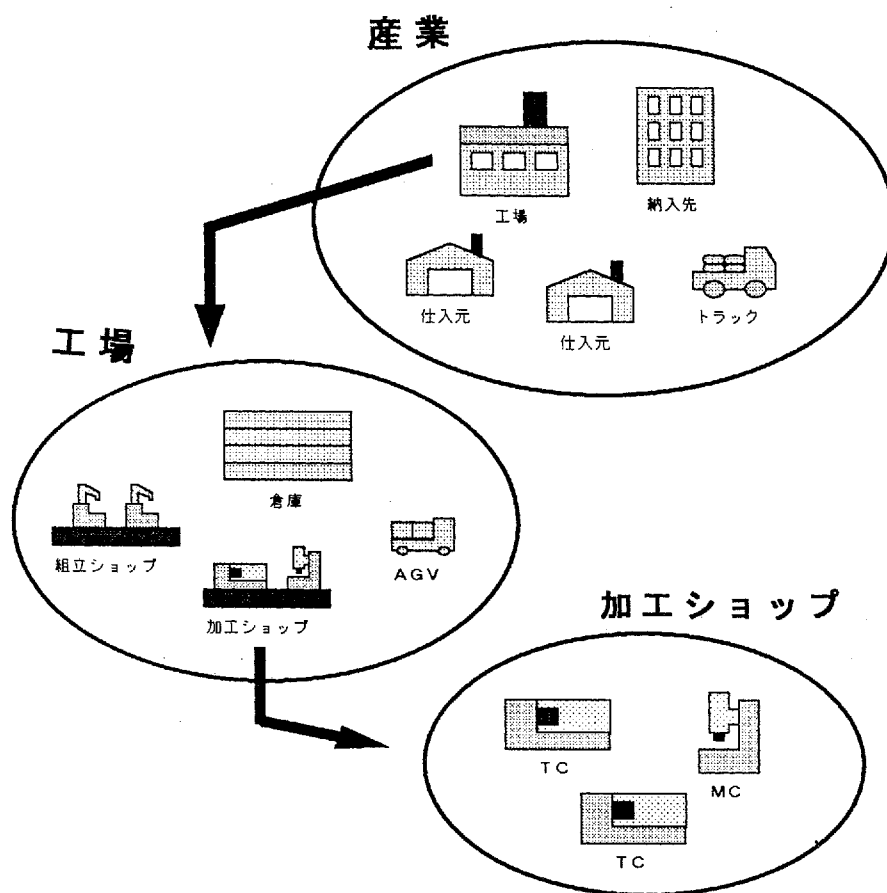


図1 生産システムの階層と構成要素

せるもの、(2)物理的な特性を変化させずに、対象物の位置のみを変化させるもの、(3)物理的な特性も位置も変化させないものに分類される。例えば、工作機械は、材料の不要な部分を除去し、部品としての機能を与えるため、物理的な特性を変化させる構成要素として位置づけられる。ハンドリングロボットや、無人搬送車(AGV)などは、対象物の位置を変化させ、物理的な特性を変化させないものとして扱う。また、倉庫やパレットは、対象物の特性も位置も変化させないシステム要素である。

ここでは、生産システムの最下層に位置する設備だけでなく、その他の階層に存在する要素もそれぞれ一つの要素として取り扱う。そのため、この分類方法を、全ての階層を構成する要素に拡張する。例えば工場は、資材を購入して製品を製造する要素であることから、対象物の物理的な特性を変化させる要素として取り扱い、トラックは位置を変化させる要素として、また仕入れ元や納入先は、特性も位置も変化させない要素として取り扱う。

本システムでは、こうした要素を任意に組み合わせて生産システムを構成し、その各階層における挙動をシミュレートする機能を有している。また 生産システムの状態を容易に把握するためにコンピュータグラフィックスを用いた表示システムも同時に開発した。

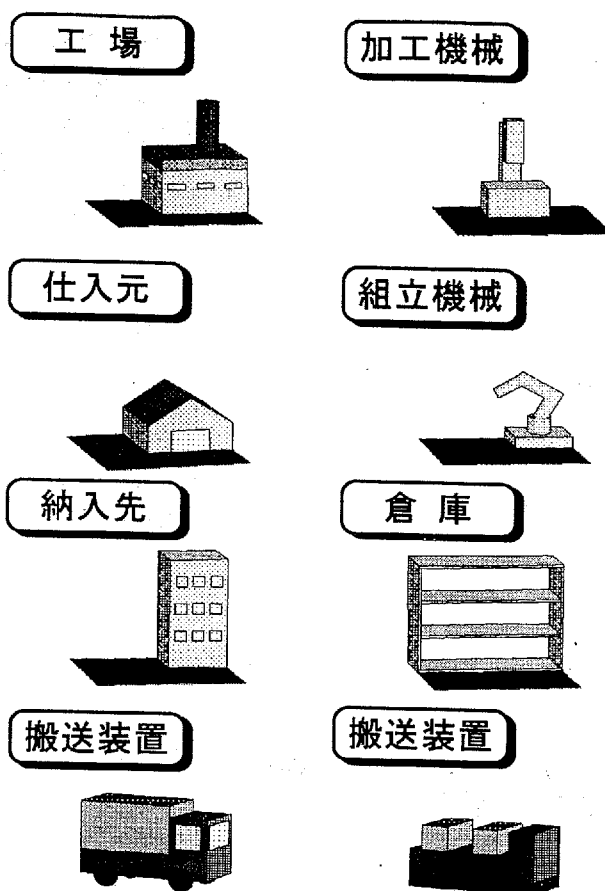
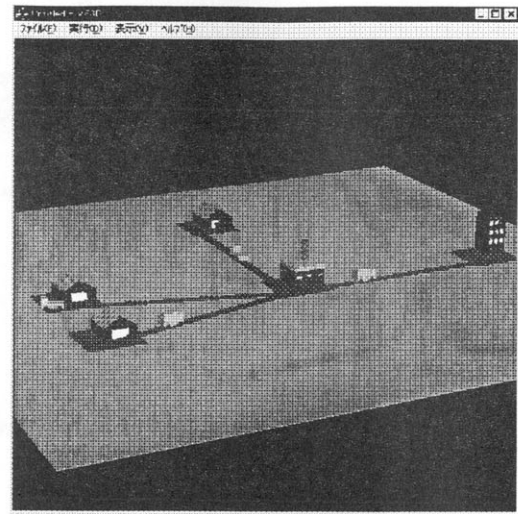
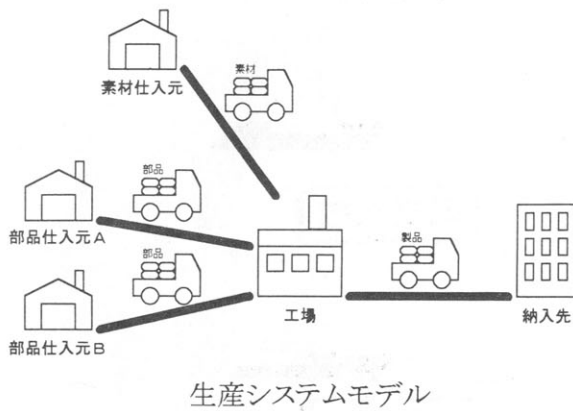


図2 生産システムの構成要素例

開発した表示システムでは、システムの構成要素は、自由に視点を変えて見る事ができる3次元要素として表示されるだけでなく、それぞれの要素の状態に応じて、色や表示位置を変化させることができる。

システム内の個々の構成要素の形状、位置、稼働状態などを表す情報は、コンピュータ内では、それぞれの情報を記述したファイルの形式で個別に保存してある。シミュレータは計算に必要な情報をこれらのファイルから入手すると共に、シミュレーションの結果をファイルに書き込む。表示システムは、必要なファイルを検索し、ファイル内に記述された情報に従って要素の状態を画面に表示する。

開発した表示システムを用いて、工場と仕入元および納入先との間での製品の簡単な取引状態を示した例を図3に示す。図では、工場を中心に部品と製品がトラックによって搬送されている様子が表示されている。図4に複数の階層から構成される生産システムの一例を示す。ここでは3階層から成る生産システムを想定して、工場内部の状態と工場内の加工ショップの状態を表示している。このシステムを用いれば、それぞれの階層における状態を視覚的に把握することができ、資材の運送状態や、設備の稼働状態等を容易に知ることができる。



3次元表示

図3 生産システムのグラフィック表示例

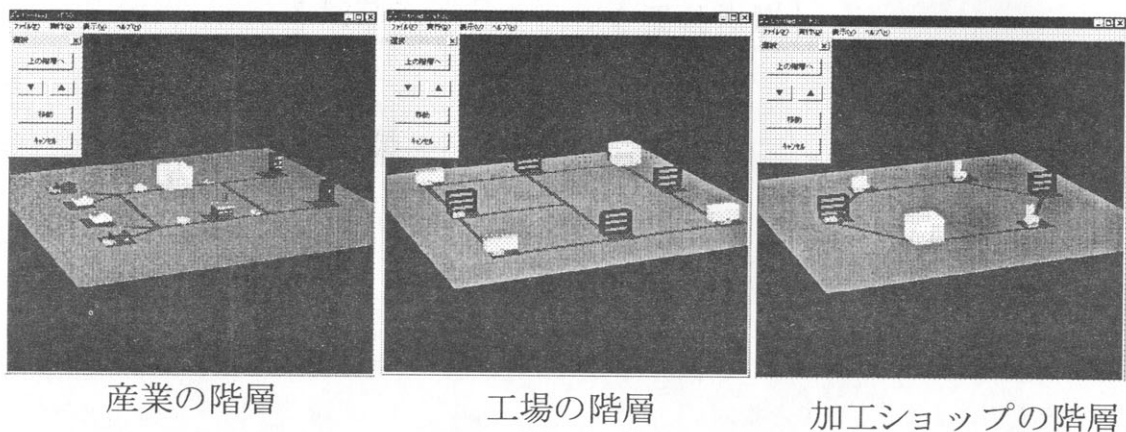


図4 階層を有する生産システムの例

(2) シミュレーションの事例

簡単な生産システムを想定し、開発したシステムを用いた評価を行った。対象とした2種類の生産システムの構成を図5に示す。図に示した構成要素の内、工場内部では複数の加工機械が存在し、部品の加工と組立を行っている。工場全体の状態を定量的に評価するために、工場運営に要した費用の値を出力するように設計してある。図6は、工場が運営に必要とした費用の内訳を示したものである。ここでは、同じ製品を製造する際に、材料単価を下げるために、部品を1社から大量購入した場合と、供給の安定性を確保するために、2社から購入した場合との比較を行った。

図7は、通常の状態におけるそれぞれの生産システムの支出と収入の関係を示している。部品購入時に支払う費用と、製品納入時に得られる収入との間に時間差がある。また、わ

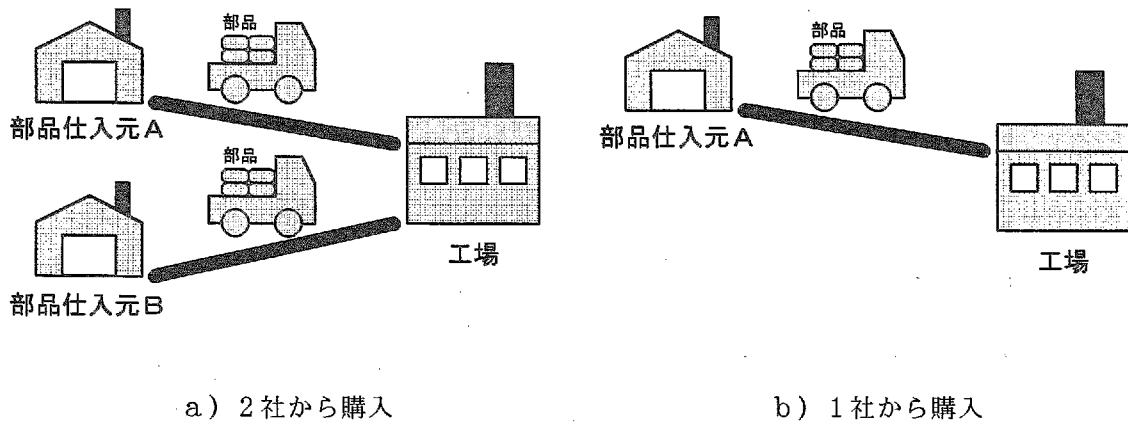
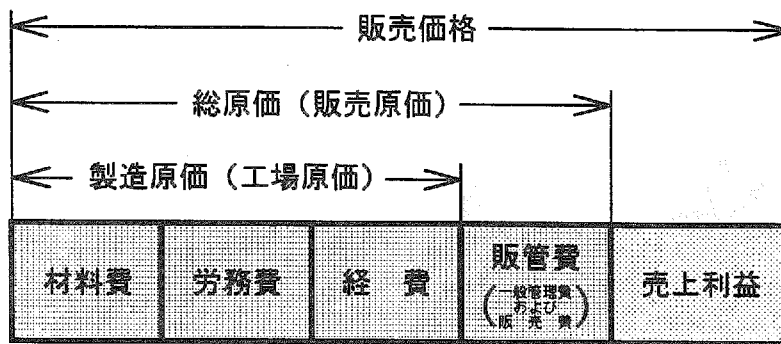


図5 対象とした生産システムの構成



販売価格の構成要素

材料費：素材費、購入部品費

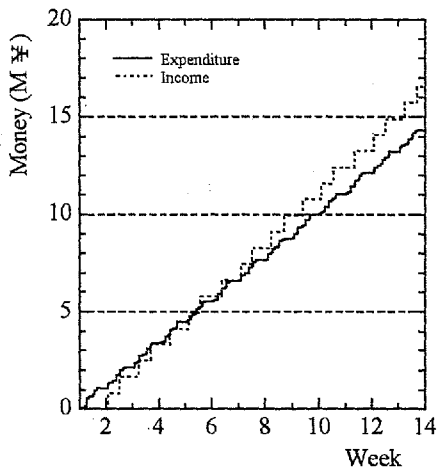
労務費：給料、賃金

経費：減価償却費、光熱費

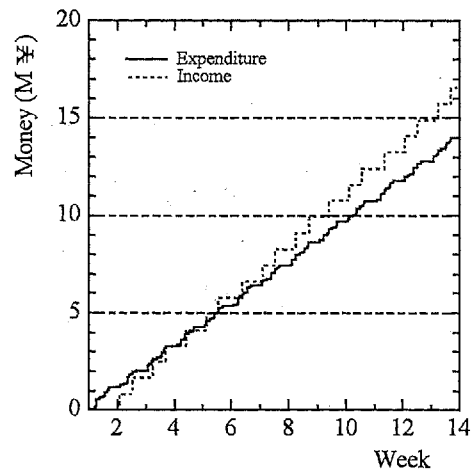
販管費：諸経費、運搬費

図6 工場の運営に要する費用

ずかではあるが、1社から部品を購入した方が利益が大きくなっていることが理解できる。図8は、第6週から第10週までの一定期間の間、部品の供給が停止したときの状態を示す。当然の事ながら、1社からのみ部品を購入している場合には、供給の停止からすこし遅れて収入が無くなっていることが理解できる。他方、支出に関しては、従業員に支払う賃金や、装置の原価償却費等の影響で、部品の供給が停止している間も増加していることがわかる。

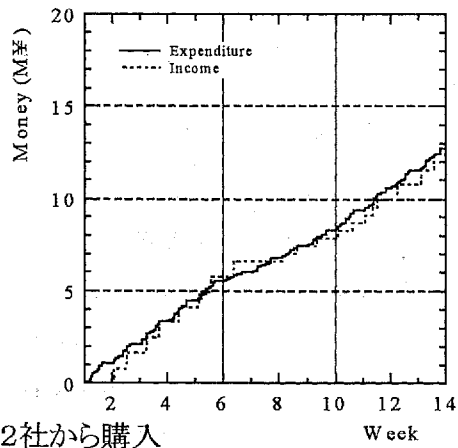
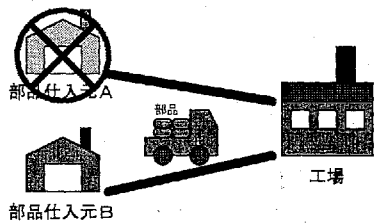


a) 2社から購入

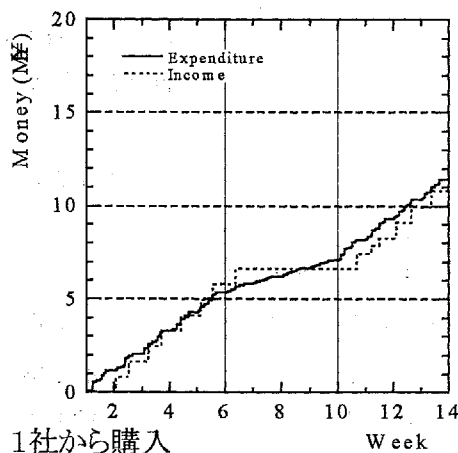
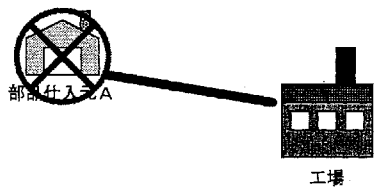


b) 1社から購入

図7 生産体制の違いによる支出と収入の相違 (平常時)



a) 2社から購入



b) 1社から購入

図8 生産体制の違いによる支出と収入の相違 (部品の供給が停止した場合)

## 5. まとめ

ここでは先の大震災で、主として市内における製造業が受けた被害の概要と、神戸市における震災復興支援策について紹介した。また、今後製造業が種々の危機に対してどのように対処すべきかを考えるための一助として、開発中の総合生産システムシミュレータについて概略の説明を行った。本シミュレータは極めて汎用性が高く、しかも想定したシステム内のあらゆる危機、異常についてシミュレーションを行うことが出来る。何時起こるともわからない危機に対して、このような机上のシミュレーションなどによって、対処すべき基本的な方針を検討することは重要であると考えている。またこうしたシミュレータは、実際に危機が生じた場合に、意志決定を行う上での支援にも利用することが可能であり、今後システムの拡充を図っていきたい。

## 参考文献

- 1) 神戸経済復興委員会：神戸経済復興委員会報告書（1995.6）pp1-44.
- 2) 森脇俊道：阪神淡路大震災と製造業の危機管理、トレンドアイ '95、神戸市産業復興財団（1995）pp1-10.
- 3) 森脇俊道ほか、危機管理のための総合生産シミュレータの開発、日本機械学会講演論文集 No.974-1（関西支部第72期定時総会講演会）（1997）pp15-16.

メ モ



メ モ

# 復興計画支援と進化型計算法

電気電子工学科 講師 玉置 久

## 1. はじめに

復興計画の立案等，システムの計画・運用・制御を効率的に行うことを考える場合，そこでの問題の本質は，どれだけ多くの人・組織が，どの程度満足できるかといった評価尺度を最大(ときには最小)にすることであると言える．このような問題は，いわゆる工学的最適化問題，特に組合せ最適化問題の範疇に入る問題であり<sup>[1]</sup>，従来よりさまざまなアプローチがなされてきた．しかしながら，一般に組合せ最適化問題はその求解が極めて難しく，現実的な問題に対して厳密な最適解を求めることはほとんど不可能である．そこで，最適ではないにしても合理的な意志決定の支援を目的としたアプローチが盛んに研究・実用化されつつある．

このようなアプローチの一つとして，最近，生物の遺伝と進化を計算機上で模倣して最適化を行おうとする進化型計算法 (Evolutionary Computation: EC あるいは Evolutionary algorithm: EA)<sup>[2-4]</sup>が注目されており，多くの分野で工学的応用が試みられるようになってきた．EC/EAには符号化やパラメータの調整など多くの自由度があり，応用を成功させるためにはEC/EAについて一定の理解が必要である．特に，応用の現場ではEC/EAを効果的に利用することについての指針が求められている．しかしながら，このような点についてしっかりと記述された教科書などは少なく，種々の研究書や論文などを参照しながら応用が試みられているのが現状である．

このような状況を踏まえて，本講義ではEC/EAの一つである遺伝アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA)<sup>[5,6]</sup>を取り上げ，基礎的な事項に焦点を当てて具体例を交えながら解説する<sup>[7]</sup>．以下，まずEC/EAが手本とする生物の遺伝と進化について簡単に説明するとともに，EC/EA適用の対象となる最適化問題の典型例を紹介する．次に，EC/EAの概要を紹介した上で，GAについてその基本的な構成を説明する．

## 2. 遺伝と進化

生物は親から子へその形質を伝えつつ，環境に見事に適応している．このような生命現象のメカニズムは「遺伝 (genetics)」と「進化 (evolution)」と呼ばれ；生命科学の大きなテーマである<sup>[8,9]</sup>．生命が環境に適応していくメカニズムを進化として捉える考え方は，LamarckやWallaceらの議論を経て，Darwinの自然選択説 (natural selection) の提唱<sup>[10]</sup>により，生物学の大きなテーマとして位置付けられた．自然選択説は，異種間で交配が起こったり，ある種が何らかの原因で変化 (変異) して新種が発生したとき，新種はその環境への適応の度合に応じて増殖していくとともに，変異の一部分が遺伝するというものである．

遺伝と進化のメカニズムをシステム論的な観点から捉えると，その特徴は，

- (a) 遺伝子による記号的な情報の表現，
- (b) 遺伝子の複写による増殖，
- (c) 突然変異や交叉による新しい遺伝子型や表現型の生成，および
- (d) 環境への適応の度合に基づく個体間の競合による子孫数の決定，

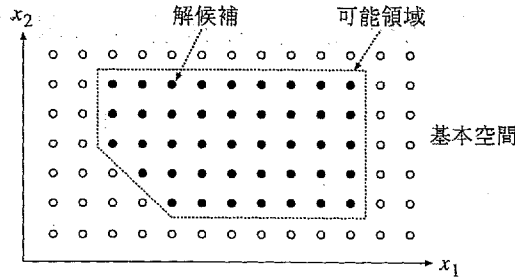


図1 組合せ最適化問題

2 整数変数 (すなわち, 基本空間  $\mathcal{X}$  は  $x_1$ - $x_2$  平面上の格子点) の最適化問題の例を示す. 問題は, 可能領域 (解集合)  $\mathcal{F}$  に含まれる有限個の解候補の中で, 評価値 (目的関数値) が最小となるものを見つけ出すことである.

にあると言える.

進化型計算法 (EC/EA) は, ここで紹介した自然選択に基づく遺伝・進化のメカニズムを最適値探索の過程として用いて, アルゴリズムを構成しようとするものである. もちろん, 生物における複雑なメカニズムをそのまま模倣するのではなく, 適当に簡略化された形で利用するものである.

### 3. 最適化問題

最適化問題は, その目的関数および制約条件の与え方によって種々の分類がなされるが, ここでは, GA で対象とされることの多い組合せ最適化問題を取り上げる. 一般に, 組合せ最適化問題のほとんどは NP 困難 (NP-hard)<sup>†</sup> なので, 厳密な最適解を効率的に求めることが容易ではなく, 探索に基づく (近似) 解法が注目されている [1]. なお, 組合せ最適化問題以外にも, その求解が困難なものとして, 実数空間での多峰性の非線形関数最適化問題などが挙げられるが, ここでは省略する.

#### 3.1. 一般的定義

組合せ最適化問題とは, 組合せ的な制約条件の下である目的関数を最小化 (あるいは最大化) する数理計画問題であり, 一般に次のように記述される [1].

$$\min_x f(x) \quad (1a)$$

$$\text{subject to } x \in \mathcal{F} \quad (1b)$$

$$\mathcal{F} \subseteq \mathcal{X} \quad (1c)$$

ここで, 基本空間  $\mathcal{X}$  およびその部分集合の解空間 (可能領域)  $\mathcal{F}$  は組合せ的・離散的なものである (図 1).

可能領域が組合せ集合となる組合せ最適化では, 実数集合を対象とした連続性や微分概念に基づく古典的な最適化手法を直接利用することはできない. したがって, 組合せ最適化問題の解法は連続変数の最適化手法とは本質的に異なるものとなり, 一般に解を数え上げるという列挙法的なアプローチとならざるを得ない. しかし, 上述のように組合せ最適化問題のほとんどは NP 困難となることが示されており, 可能領域  $\mathcal{F}$  の要素 (実行可能解) の総数は有限ではあっても膨大な数にのぼることが多く, これ

<sup>†</sup> 問題の規模の多項式オーダーでの厳密解法が存在しないと予想されている問題のクラス ('NP' は Non-deterministic Polynomial の略).

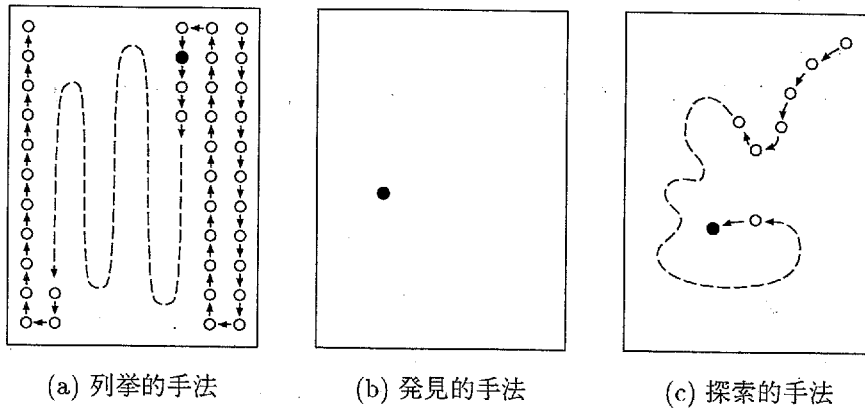


図2 組合せ最適化手法の基本的考え方

枠が可能領域(解の全体集合), 丸が一つの解候補をそれぞれ表す. また, 黒丸は最終的に選ばれる解を表す.

らをすべて列挙することは現実には不可能である. そこで, 実際に列挙する範囲をいかに限定するかが重要となる.

従来の組合せ最適化手法は, その厳密性(得られる解の最適性)に注目すると,

- (a) 厳密解法: 最適解を求めるための方法,
- (b) 近似解法: 近似最適解(近似解)を高速に求める方法,

に大別される. まず(a)の厳密解法には, 動的計画法や分枝限定法などがある. 前者は効率的な探索を可能とするために, 取り扱う問題に強い仮定を設け, 後者は広大な解空間(可能領域)をくまなく探索することを基本とするので, 一般に膨大な計算量を必要とする. これに対して, (b)の近似解法では問題に関する先験情報を利用して探索領域を絞り込むことを基本とするが, (1)質の良い解を得るためにはできるだけ広い領域を探索することが望ましく, 一方, (2)計算時間を短縮するためには先験情報によってできるだけ探索領域を狭めることが望ましい. これらの相矛盾する二つの要求のうち, 前者を重視するのがランダム探索法(モンテカルロ法)であり, 後者に重きを置くのが逐次改善法(山登り法)や欲張り法である.

ここで, 最適解あるいは近似解を探索するという観点から組合せ最適化手法を捉えると, その基本的な考え方(アプローチ)は, 図2に示すように,

- (a) 列挙的手法: すべての解を列挙して(あるいは, これと等価な手続きで)厳密な最適解を見出す,
- (b) 発見的的手法: 実行可能解を生成するためのアルゴリズムまたはルールを用い, 一つの解を求める,
- (c) 探索的手法: 列挙的手法と発見的的手法の中間に位置する方法で, 可能領域の部分領域内を探索することによって, (近似)最適解を探し出す,

の3種類に分類される. 厳密解法では, 効率的な列挙法の構成や, 厳密解が得られることを保証する発見的手法の構成が中心課題である. 一方, 近似解法においては, より最適に近い近似解を求めるための発見的手法の経験的な模索, あるいは解の精度向上と計算時間短縮とをうまくバランスさせる探索的手法の実現を目的とすることが多い. 本講義で取り上げるEC/EAは, この探索的手法の範疇に入る方法である.

## 3.2. 典型的な組合せ問題

### 3.2.1. 関数最適化問題

関数最適化問題は、 $N$ 次元整数空間  $\mathbf{Z}^N$  内のベクトル  $x = (x_1, \dots, x_N)$  を決定変数として、以下のよう記述される<sup>†</sup>。

$$\max_x f(x) \quad (2a)$$

$$\text{subject to } x \in \mathbf{Z}^N \quad (2b)$$

### 3.2.2. ナップサック問題

いくつかの荷物と一定重量まで荷物を入れられる袋がある。各荷物の重量およびその価値(重要度)は既知とする。このとき、袋の容量を越えない範囲で、その価値の和が最大となるように入れる荷物を決める問題を、ナップサック問題 (Knapsack Problem: KP) という。

いま、荷物が全部で  $N$  個あるとして、順に 1 から  $N$  までの番号が付けられているものとする。そして、荷物  $i$  の重量および価値をそれぞれ  $a_i$  および  $c_i$  とし、袋の許容重量を  $b$  とする。このとき、決定変数  $x_i \in \{0, 1\}$  を導入し、荷物  $i$  を袋に入れることを  $x_i = 1$ 、入れないことを 0 で表すと、KP は、以下のような整数計画問題として定式化される。

$$\max_{\{x_i\}} \sum_{i=1}^N c_i x_i \quad (3a)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N a_i x_i \leq b \quad (3b)$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3c)$$

表 1 に、8 荷物 ( $N = 8$ ) の KP の例を示しておく。このとき、例えば、

$$x = (1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0) \quad (4)$$

は実行可能解となり、荷物 1, 2, 3, 5 および 7 を袋に入れることを表す。

表 1 ナップサック問題の例

荷物 $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	$b$
重量 $a_i$	3	6	5	4	8	5	3	4	25
価値 $c_i$	7	12	9	7	13	8	4	5	

### 3.2.3. 巡回セールスマン問題

いくつかの都市があり、あるセールスマンが各都市を一度ずつ巡回訪問しなければならないものとする。この際、各都市間の距離は決まっているものとし、巡回路長(総距離)が最小となるように巡回路を決定する問題を、巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) という。一例として、8 都市の TSP およびその巡回路の一つを図 3 に示しておく。

<sup>†</sup> 実数空間内のベクトルを決定変数とする最適化問題において、変数の量子化を行った場合もこの形式の問題となる。

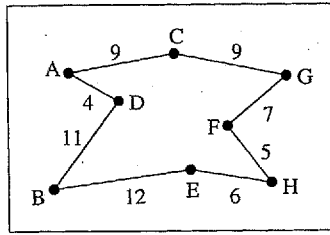


図3 巡回セールスマン問題の例

節点 A~H および閉路は、それぞれ都市および巡回路 (の一例) を表す。また、枝の重みは都市間の距離を表す。

### 3.2.4. ジョブショップ・スケジューリング問題

いくつかの仕事をいくつかの機械で処理するとき、完了時間等の評価値 (目的関数値) を最小にするように仕事の処理順序を決定する問題を、スケジューリング問題 (scheduling problem) という。このスケジューリング問題は、機械の種類や台数、仕事に課せられる条件および目的関数の選び方によって、いくつかのタイプに分けられるが、ここでは、ジョブショップ・スケジューリング問題 (Job-shop Scheduling Problem: JSP) を取り上げる。

JSP は、仕事や機械についての制約条件:

- (a)  $n$  個の仕事  $J_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) が,  $m$  台の機械  $M_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) で処理される,
- (b) 仕事  $J_j$  は  $n_j$  個の作業  $O_u$  ( $u = N_{j-1} + 1, \dots, N_j$ ;  $N_j = \sum_{k=1}^j n_k$ ;  $N_0 = 0$ ) からなっている,
- (c) 各仕事の中では,  $n_j$  個の作業  $O_u$  が  $u$  の増加順に処理されなければならない,
- (d) 作業  $O_u$  は予め指定された機械  $M_{\mu_u}$  ( $\mu_u$  は作業  $O_u$  が処理される機械の番号を表す) 上で処理されなければならない, これに時間  $p_u$  を要する。作業途中での中断・再開は許されない,

を満たしながら, 最大完了時間 (maximum completion time; メイクスパン (makespan) とも呼ばれる) が最小となるように, 各機械上での作業の順序, すなわち各作業の開始時刻を求めることであると定義される。

表2 および 図4 に, 3 機械 3 仕事の JSP の例および, この例題に対する解 (スケジュール) の一例をそれぞれ示す。なお, 図4 は縦軸に機械, 横軸に時間をそれぞれとって, 各作業の処理時間区間を図示したもので, ガント・チャート (Gantt chart) と呼ばれる:

表2 ジョブショップ・スケジューリング問題の例

仕事	作業 (機械, 処理時間)		
$J_1$	$O_1 (M_1, 5)$	$O_2 (M_2, 4)$	$O_3 (M_3, 3)$
$J_2$	$O_4 (M_1, 2)$	$O_5 (M_2, 5)$	
$J_3$	$O_6 (M_2, 3)$	$O_7 (M_1, 6)$	$O_8 (M_3, 2)$

## 4. 進化的計算法

1. でも述べたように, 進化的計算法 (EC/EA) では問題解決のためのキーとして, 進化過程を模倣した計算モデルが用いられる。遺伝アルゴリズム (GA) を含めて, これまでに進化戦略 (Evolution Strategies:

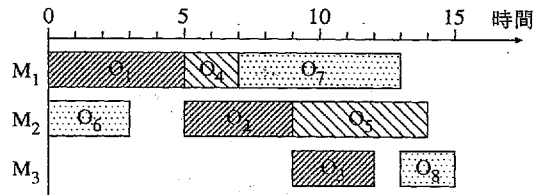


図4 表2の例題に対するスケジュールの一例

ES)<sup>[12,13]</sup>や進化プログラミング (Evolutionary Programming: EP)<sup>[14]</sup>など、種々のEC/EAが提案されているが<sup>†</sup>、これらのアルゴリズムに共通するのは、

- (a) 個体 (individual) の集合 (個体群: population) を保持すること、
- (b) 選択 (selection)/複製 (reproduction), 組み換え (recombination), 突然変異 (mutation) などの遺伝演算子 (genetic operators) を適用して個体群を進化 (evolution) させること、
- (c) 各個体には、環境 (environment) に対する適応度 (fitness) が与えられること、
- (d) 選択/複製によって、より高い適応度を持つ個体がより多く残され (exploitation), 一方、組み換えや突然変異により、個体に摂動を加えて多様な個体を生み出す (exploration) こと、

である。図5にEC/EAの概略を示しておく。

```

世代カウンタの初期化:  $t = 0$ .
 $P(0)$  の初期化.
 $P(0)$  の評価.
while (終了条件  $\neq$  true) do
  組み換え:  $P'(t) = R(P(t))$ .
  突然変異:  $P''(t) = M(P'(t))$ .
   $P''(t)$  の評価.
  選択/複製:  $P(t+1) = S(P''(t) \cup Q(t))$ .
  世代カウンタの更新  $t = t + 1$ .
end

```

図5 進化型計算法の概要

$P(t)$  は世代  $t$  の個体群を表し、 $R, M$  および  $S$  は、組み換え、突然変異 および 選択/複製の演算子をそれぞれ表す。さらに、 $Q(t) \in \{\phi, P(t)\}$  である。

ここで、次の5.で取り上げるGAの特徴は、

- (a) 適当なコーディング方法により、問題の解候補を記号列 (遺伝子列: 個々の記号を遺伝子 (gene) に対応させる) を用いて表現し、解候補およびその遺伝子表現を、それぞれ表現型 (phenotype) および遺伝子型 (genotype) に対応させること、
- (b) 組み換えの一種として交叉 (crossover) を用いること、
- (c) 突然変異は一様にランダムに行われること、
- (d) 適応度に基づいて確率的に選択が行われること、

などにあると言える。

<sup>†</sup> GA, ES および EP は、生物の進化を手本として少しずつ異なる背景のもとに独立に開発されたものであるが、近年相互の交流が深まり、区別は意味を失いつつある。

## 5. 遺伝アルゴリズム

遺伝アルゴリズム (GA) の起源は 1960 年代の Holland による適応システムの研究に遡る。その後、1970 年代に入って DeJong により関数最適化問題を対象とした計算機実験が試みられた後、1985 年から国際会議 (ICGA) が開催されるとともに<sup>[15]</sup>、1989 年には Goldberg によってアルゴリズムの枠組みが整理された<sup>[6]</sup>。以下では、この Goldberg の枠組みに基づいて、GA の概要を紹介するとともに、簡単な例題に対する最適値探索の過程を示す。

### 5.1. 概要

最適化問題の決定変数ベクトル  $x$  をいくつか (ここでは  $N$  個とする) の記号  $X_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) の列で表すことにし、これを  $N$  個の遺伝子座からなる染色体とみなす。  $X_i$  は遺伝子であり、これの取り得る値が対立遺伝子である。対立遺伝子としては、ある整数の組、ある範囲の実数値、単なる記号の値などを適当に考えればよいが、最も簡単なものは 0 と 1 の 2 値とする場合である。このように表された染色体  $X$  が個体の遺伝子型であり、染色体に対応して定まる変数  $x$  の値が表現型である。通常、遺伝子型と表現型は 1 対 1 に対応させるが、問題によっては遺伝子型に冗長性を持たせたほうが取扱いが容易になる場合もある。また、染色体の長さ  $N$  も一定とすることが多いが、問題によっては可変長にするほうが好都合の場合もある。

$M$  個の個体からなる集合 (population) を考え、世代  $t$  における個体集合  $\mathcal{P}(t)$  が遺伝子の複製・変異を経て次の世代  $t+1$  における個体集合  $\mathcal{P}(t+1)$  に変わるものとする。このような世代の更新が繰り返され、更新の度ごとによりよい個体 (より最適値に近い解  $x$ ) が選択されて、増殖するようにすれば、やがて最適解  $x^*$  が得られるであろうというのが GA の基本的な考え方である (図 6)。この際、最適化問題での目的関数値  $f$  がよい解 (表現型) ほど、それに対応する個体 (遺伝子型) の適応度 (fitness)  $g$  が高くなるようにしておく<sup>†</sup>。

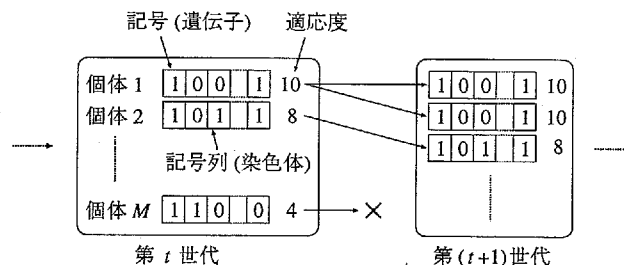


図 6 遺伝アルゴリズムの枠組み

実際の生物では、染色体の変異と選択によって種の進化が実現する。これに対応して GA では、主に次のような遺伝的操作 (遺伝演算子: genetic operators) を用いる。

- (a) 選択 (selection): 世代  $t$  の個体集合中の各個体  $i$  について、その適応度  $g_i$  に応じて、次世代に残す子 (offspring) の数を増減させる。
- (b) 交叉 (crossover): 個体集合内の個体をランダムにペアリングし、各ペアについて 1 点または複数点の分解位置 (交叉点: cross-point) をランダムに選び、ある確率 (交叉率: crossover rate) で、2 つの個体の遺伝子列を部分的に交換する。

<sup>†</sup> 生物学では、事後的に (選択の結果として決まる) 子孫の数を適応度と呼ぶ。これに対して、GA では予め与えられた適応度に基づいて、個体の選択・複製が行われる。

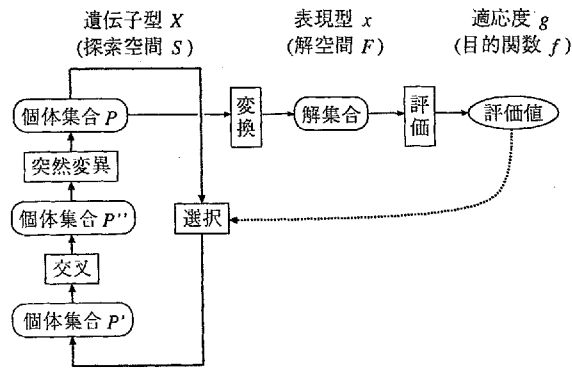


図7 遺伝アルゴリズムによる探索

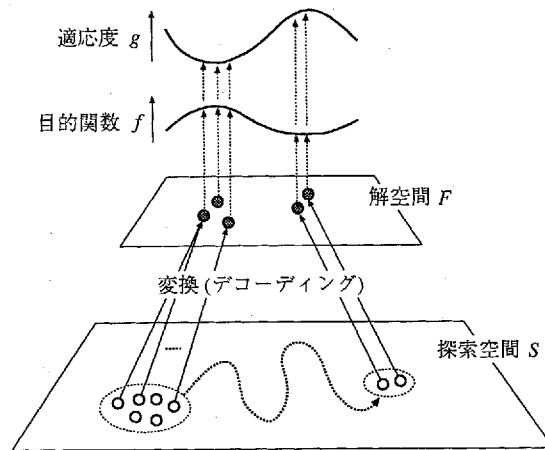


図8 解空間と探索空間

(c) 突然変異 (mutation): 各個体について、ある確率 (突然変異率: mutation rate) で、各遺伝子座の遺伝子を他の対立遺伝子と入れ換える。

以上の3種類の演算子を用いて、GAの全体的手順は次のように構成される (図7)。

- 0° 初期化: ランダムに  $M$  個の個体を生成して初期個体集合  $P(0)$  を作り、世代  $t=0$  とする。繰返し回数  $T$  を設定する。
- 1° 評価: 個体集合  $P(t)$  内の個体について、その適応度  $g$  を計算する。
- 2° 選択: 個体集合  $P(t)$  に選択演算子を適用し、 $P'(t)$  を生成する。
- 3° 交叉:  $P'(t)$  に交叉演算子を適用し、 $P''(t)$  を生成する。
- 4° 突然変異:  $P''(t)$  に突然変異演算子を適用し、次世代の個体集合  $P(t+1)$  を生成する。
- 5° 判定:  $t \leq T$  ならば、 $t=t+1$  として1°へ。そうでなければ、計算終了。これまでに得られた最大適応度の個体を解とする。

このGAを実際に最適化問題に適用する場合、図8に示すように、問題の解候補  $x \in \mathcal{F}$  ( $\mathcal{F}$  は問題の解空間 (可能領域) を表す) をどのような遺伝子列  $X \in \mathcal{S}$  ( $\mathcal{S}$  は遺伝子型の全体、すなわちGAによる探索空間を表す) として表現するかを定めなければならない。この部分の設計は、個々の問題ごとに

行われるものであり、探索過程の良否に大きく影響を及ぼすことになる。したがって、対象とする最適化問題の構造・性質を十分に把握した上で、遺伝子表現方法を定めることが重要である。また、目的関数  $f$  に対して適応度  $g$  を定めるルールも決定しなければならない。

上述の枠組みに基づいてアルゴリズムを構成する場合、遺伝演算子の実現や遺伝子表現の方法の定め方によって、様々なバリエーションが考えられる。これまでも、種々の問題例に対する数多くのアルゴリズム構成法が提案・報告されている。以下では、最も基本的な構成法として、Goldberg によって提案された単純 GA (Simple GA: SGA) の構成<sup>[6]</sup>について記述するとともに、簡単な例題に対するその最適値探索の過程を示す。なお、3. に挙げた最適化問題への応用例、および GA の種々のバリエーションについては、文献[7, 16-19]等を参照されたい。

## 5.2. 基本構成：単純遺伝アルゴリズム

まず、SGA の構成を記述する<sup>[6]</sup>。

- (a) 個体の遺伝子表現：SGA では、2 値  $\{0, 1\}$  の対立遺伝子からなる固定長の記号列、例えば、

1 0 0 1 0 1 1

を用いて染色体 (個体) を表現する。

- (b) 初期個体集合の生成：一様乱数を用いてランダムに記号列の値を決め、 $M$  個の個体を生成する。

- (c) 適応度の計算：SGA では、個体の適応度に比例して子孫数を決定するため、その値は非負に限定され、その最大化が図られる。そこで、最適化問題の目的関数と適応度との対応規則 (最小化問題の場合は最大化問題への変換、また値域が非負となる変換など) を予め定めておく。

- (d) 遺伝演算子の実現：

1. 選択 (あるいは複製 (reproduction))：世代  $t$  の個体集合  $\mathcal{P}(t)$  中の各個体  $i$  の適応度  $g_i$  を計算し、個体集合内での適応度の総和  $G$  を求める。そして、選択後の個体集合  $\mathcal{P}'(t)$  に含まれる各個体を、それが  $\mathcal{P}(t)$  の個体  $i$  となる確率を  $g_i/G$  として決定していく。
2. 交叉：個体集合  $\mathcal{P}'(t)$  内の個体をランダムにペアリングし、各ペアについて、(a) 交叉点をランダムに 1ヶ所選び、(b) 予め定められた交叉率  $p_c$  で部分記号列を入れ換えて (一点交叉)、 $\mathcal{P}''(t)$  の個体となる。一例を以下に記す。

$$\begin{array}{ccc} \underline{1} \ 0 \ | \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 & \rightarrow & \underline{1} \ 0 \ | \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 1 \ 1 \ | \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 & & 1 \ 1 \ | \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \end{array}$$

3. 突然変異： $\mathcal{P}''(t)$  の個体の各遺伝子座について、その遺伝子を予め定められた突然変異率  $p_m$  で反転させて、 $\mathcal{P}(t+1)$  の個体とする。一例を以下に記す。

1 0 0 1 0 1 1  $\rightarrow$  1 0 1 1 0 1

- (e) パラメータの設定：SGA を実現するに当たって、4 つのパラメータ

$T$  : 計算終了までの世代数,

$M$  : 個体集合のサイズ (個体数),

$p_c$  : 交叉率,

$p_m$  : 突然変異率,

の値を予め設定する必要がある。このとき、上述のパラメータの設定による特定の SGA の実現は、4 項組  $(T, M, p_c, p_m)$  によって特徴づけられる。

表3 例題に対する計算結果

初期世代	第10世代	第50世代
1011111110 8	1011111110 8	1111111110 9
1011111010 7	1011111110 8	1111111111 10
0100111110 6	1011111110 8	1111111011 9
1011100110 6	1011110110 7	1111111111 10
1010111001 6	1001110010 5	1111111111 10
1011101001 6	1011111110 8	1111111111 10
0100100110 4	1011111110 8	1111111111 10
1100000111 5	1011111110 8	1111011111 9
1101101011 7	1011110110 7	1111111111 10
0000000111 3	1011111110 8	1111111111 10
平均値 5.8	平均値 7.5	平均値 9.7

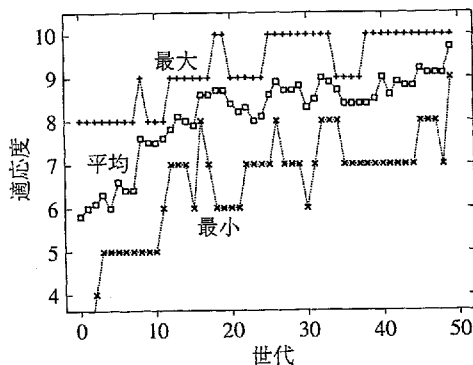


図9 例題に対する計算結果

### 5.3. 計算例

例題として、10ビットの最適化問題：

$$\max_{\{x_i\}} f = \sum_{i=1}^{10} x_i \quad (5a)$$

$$\text{subject to } x_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, 10) \quad (5b)$$

を考える。この問題の場合、特に制約が課されていないので、決定変数  $x_i$  の値を単純に並べることによって直接的に個体の遺伝子表現とできる(以下の計算例では、遺伝子型  $X$  と表現型  $x$  を同一視する)<sup>†</sup>。また、適応度の計算についても目的関数が非負であり、問題自体が最大化であるので特に工夫する必要はなく、以下の計算例では目的関数値 ( $f$ ) をそのまま適応度 ( $g$ ) とした。なお、実際的な問題の場合はこのように単純にはいかないが、ここではGAによる探索過程を確認することが目的である。

SGAにおけるパラメータを、 $(T, M, p_c, p_m) = (10, 50, 0.5, 0.0001)$  と設定して計算した結果を表3および図9に示す。表3には、初期世代、第10世代および第50世代での個体集合に含まれる個体(遺伝子型)および適応度を示してある。また、図9には、横軸に世代、縦軸に適応度をそれぞれとって、各世代の個体集合における適応度の最大値、最小値および平均値を示してある。表3および図9より、

<sup>†</sup> 制約条件がある場合の取扱いについては、文献[7]等を参照されたい。

GA では個体集合の平均適応度が徐々に増加していくとともに、より高い適応度を持つ個体が発見されていく様子がわかる。

## 6. まとめ

以上、本講義では最適意志決定支援に関連する話題として、組合せ最適化問題を紹介するとともに、進化型計算法の一つである遺伝アルゴリズム (GA) を取り上げ、GA の基本的な構成方法について概説した。組合せ最適化問題については、その代表的な問題を示すにとどまったが、これらの問題への GA の応用を考える場合、最適化問題として、

- (a) 制約条件の充足、より最適に近い解の発見、計算の高速化、問題の性質・経験的な知見・既存手法の有効利用など、

の要請に応えられるように、また解法 (GA) を設計する側において、

- (b) 遺伝子表現、適応度の計算、効果的な遺伝演算子の実現方法など、

を具体化しなければならない。さらに、本講義では紹介できなかったが、進化型計算法に基づく手法を核としつつ最適意志決定支援システム全体を設計・実現するためには、ヒューマン・マシン対話などのインタフェース部を充実させることも肝要であろう。

## 参考文献

- 1 西川・三宮・茨木：最適化 (岩波講座情報科学：19)；岩波書店 (1982)
- 2 T. Bäck and H.-P. Schwefel: An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization; *Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 1~23 (1993)
- 3 D. B. Fogel: *Evolutionary Computation*, IEEE press (1995)
- 4 T. Bäck: *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford Univ. press (1996)
- 5 J. H. Holland: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*; Univ. of Michigan Press (1975), MIT Press (1992)
- 6 D. E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*; Addison-Wesley (1989)
- 7 玉置・喜多・岩本・三宮：講座「遺伝アルゴリズム」；システム/制御/情報, Vol. 39, No. 6, pp. 295~302 (1995) (第1回) ~ Vol. 40, No. 4, pp. 170~177 (1996) (第6回)
- 8 D. J. Futuyma (岸他訳)：進化生物学 (原書第2版)；蒼樹書房 (1991)
- 9 P. J. Russell (太田監訳)：ラッセル現代遺伝学；オーム社 (1990)
- 10 C. Darwin: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (1859) (八杉訳：種の起原；岩波書店 (1990))
- 11 茨木：離散最適化法とアルゴリズム (岩波講座応用数学：方法8)；岩波書店 (1993)
- 12 H.-P. Schwefel: *Numerical Optimization of Computer Models*, Birkhäuser (1977)
- 13 H.-P. Schwefel: *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley & Sons (1995)
- 14 L. J. Fogel, A. J. Owens and M. J. Walsh: *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, John Wiley & Sons (1966)
- 15 J. J. Grefenstette (Ed.): *Proc. of 1st Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications*; Lawrence Erlbaum Associates (1985)
- 16 北野 (編)：遺伝的アルゴリズム；産業図書 (1993)
- 17 L. Davis (嘉数他訳)：遺伝アルゴリズムハンドブック；森北出版 (1994)
- 18 伊庭：遺伝的アルゴリズムの基礎；オーム社 (1994)
- 19 Y. Davidor (大橋・濱岡訳)：遺伝的アルゴリズム；培風館 (1996)

メ モ



メ 七

# 震災復興とまちづくり

建設学科 助教授 三輪 康一

## 1. はじめに

震災から3年目を迎え、被災地は徐々に再建されたまちなみが目につくようになってきた。それでも、市街地のあちこちでは依然として相当数の更地が残るなかで、復旧の全体的な見通しはいまだに明確でなく、復興の将来像について確かな展望を得ることもできない。しかも、時間の経過とともに新たな問題も見いだされてきた。ここでは、住宅の再建を中心とした復旧の動きを振り返るとともに、それを含めた生活再建の鍵をにぎる地域のまちづくり活動の動向とこれからの課題をさぐってみたい。

## 2. 被災と復旧の実態

### (1) 復旧の推移とその地域格差

震災による住宅の滅失戸数は被災地全体で13万6730戸（解体処理申請件数による。）、このうち神戸市では約9万戸が滅失したと推定されている\*1。これに対し、民間住宅の再建は戸建住宅を主に活発に進展し、これに着工済みの公的復興住宅を合わせると、1995年2月から1996年9月までの神戸市の住宅着工戸数は73,126戸となり\*2、さらに今後計画されている公的住宅を合わせると、マクロにみれば数字の上ではある程度順調に住まいの再建が進みつつあるとみえる。しかし、個別の地域に着目すれば、後述するように再建の順調な地域とそうでない地域があり、時間の経過とともに復旧・復興の地域格差が生じてきたことも次第に明らかになってきた。図-1は神戸市の建築確認申請の受理件数（1995年1月から1996年8月まで）を町丁目ごとに示しているが\*3、都心の地域を挟む東部市街地と西部市街地を比較すれば、東部市街地ではかなり再建が進んでいるのに、西部市街地では再建の進み方が比較的遅れている。また、図-2のように復旧の推移をみても、1995年の8月をピークとして下降傾向にあり、民間建築については、土地区画整理事業の区域などを除く復興促進区域内では今後大幅な再建件数の増加は期待できない。

### (2) 復旧と地域の空間特性

こうした住宅復旧の程度を、復旧度という指標（ここでは、全半壊棟数に対する確認申請受理件数の割合）で検証してみよう。1996年8月時点で神戸市の復興促進区域全体の復旧度は44.3%、このうち重点復興地域の平均が46.7%、事業区域の平均が21.8%である。これをさらに小単位区域に分割してみれば、建築制限がかかる事業地区を除外してもなお、復旧度が80%を超える地域もあれば、20%を切っている地域もあり、そのばらつきは大きい。そして先述のように、概して東部と西部の地域格差が顕著である。現時点では自力復旧できる場合ほとんどがすでに再建済みであり、一方、再建できない場合が更地などで残存しているといわれ、この更地の状態が今後も継続していくことが懸念される（図-3）。

こうした再建を阻んでいる要因には、建設資金、土地や建物の権利関係、法的な規制を含む敷地の条件などがあるが、もともと、被災市街地の多くが、震災前からインナーシティ問題と呼ばれる、物的・社会的問題を内在していた地域に該当し、そうしたインナーシティ問題を震災後も引きずってきた結果、その影響が再建の地域格差につながっていると考えられる（図-4、図-5）。

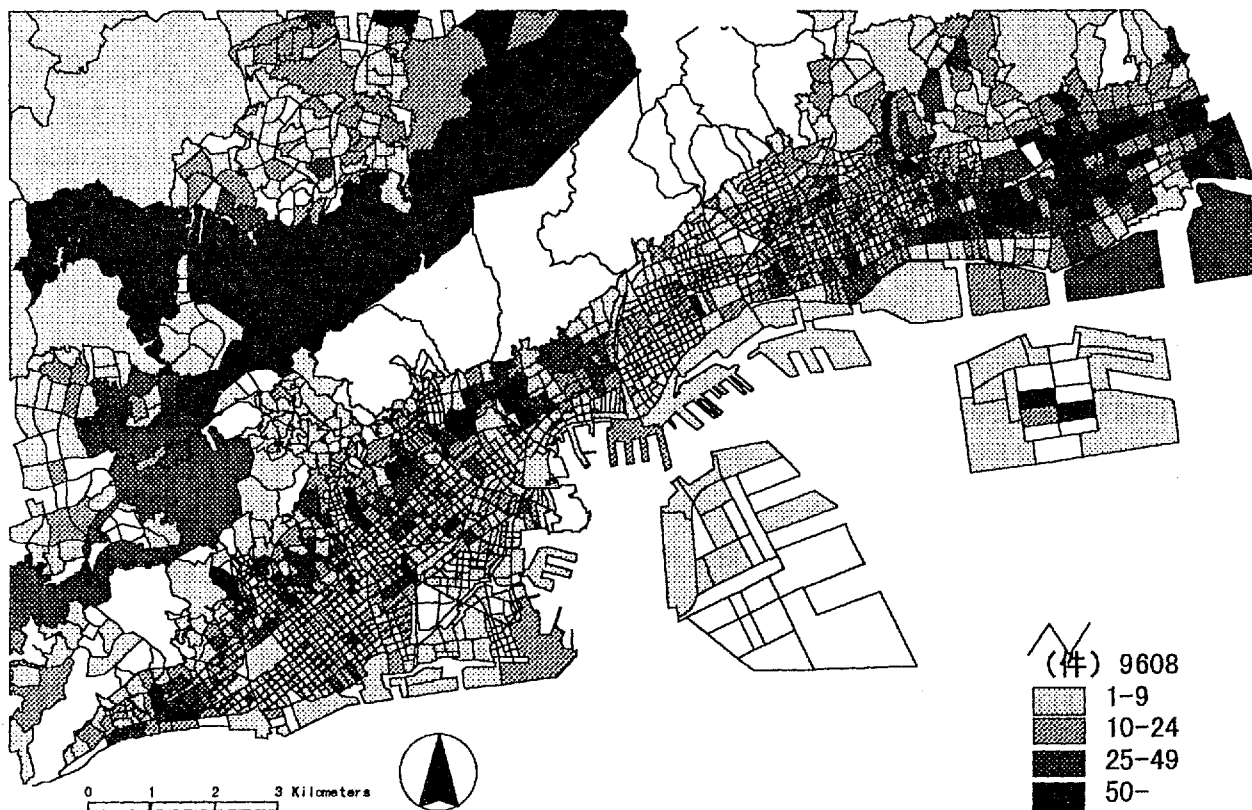


図-1 神戸市の建築確認申請受理件数の地域分布（1995.1-1996.8）

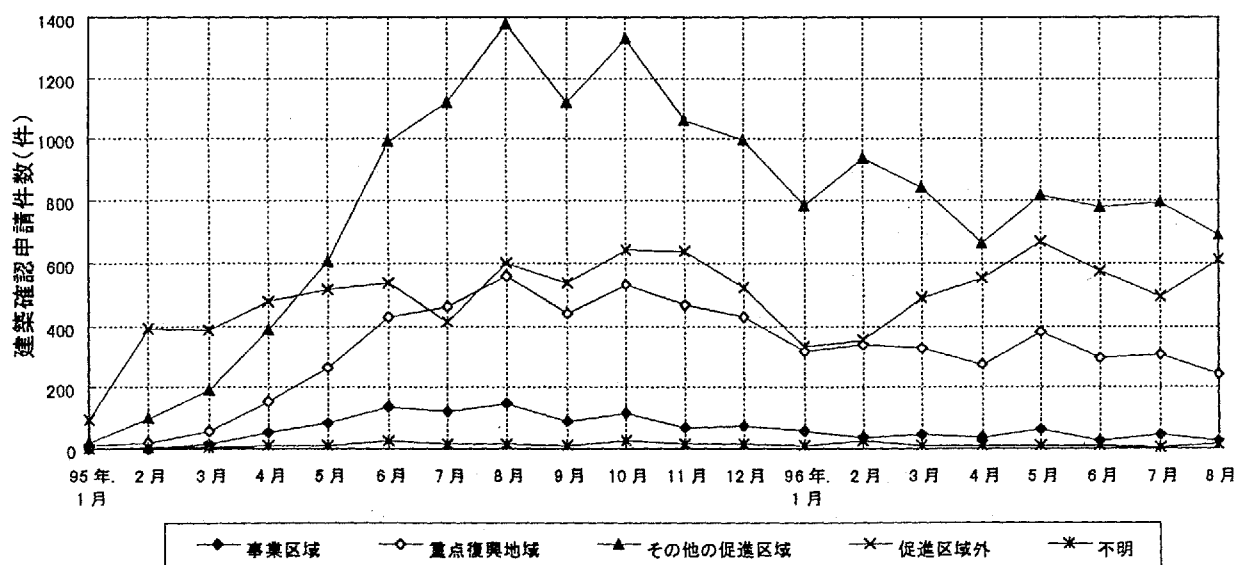
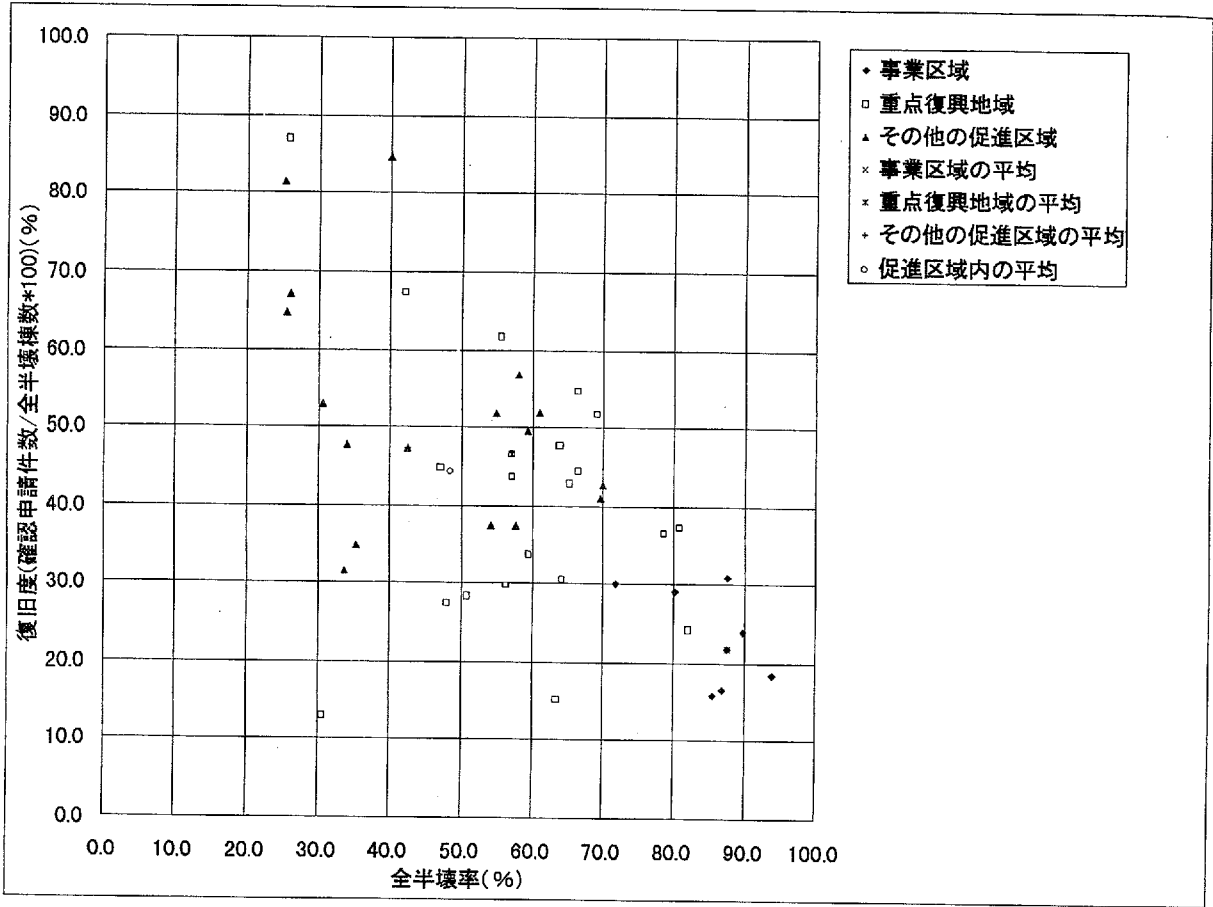
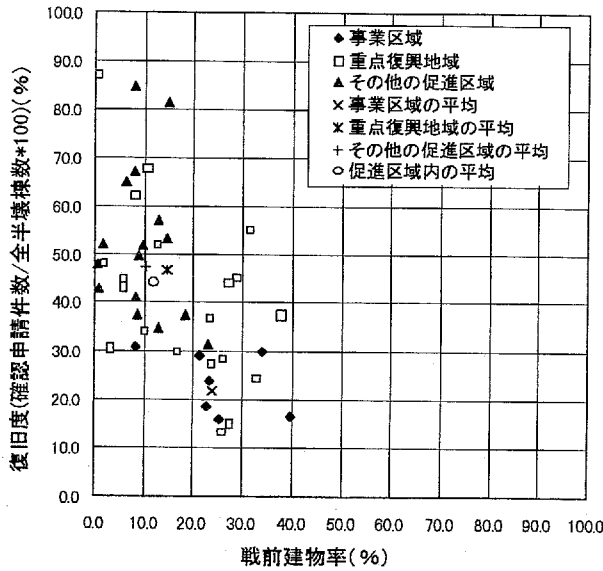


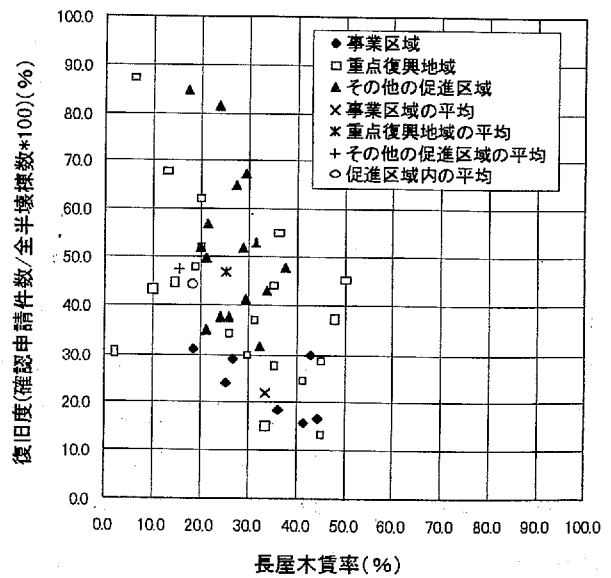
図-2 神戸市の建築確認申請受理件数の推移



図一三 全半壊率と復旧度



図一四 戦前建物率と復旧度



図一五 長屋・木賃率と復旧度

### 3. 復興まちづくり組織の動向

#### (1) 復興まちづくり組織の設立とその動機

先にみたような復旧・復興の地域格差を是正し、再建できない場合に着目した復興を進めていくためには、それぞれの被災地の特性や個別のケースに応じたきめ細かな対策が必要であるが、そのためにも地域ごとの住民によるまちづくり組織が極めて重要な役割を果たす。現在、被災地では100以上のまちづくり組織が結成されているといわれるが、そのまちづくりの組織がこれまでにどのような復旧・復興の活動を行い、どのような役割を果たしてきたかを、神戸・阪神間のまちづくり組織に関して実施した調査<sup>\*4</sup>をもとに把握し、復興まちづくりの現状とその問題点について整理してみたい。

調査の対象となった組織は、震災前から設立されていたまちづくり協議会などの組織を含み、震災後何らかの形でまちづくり活動を行っている組織であるが、これらのまちづくり組織が設立されているのは、被害の程度が深刻な都市計画事業地域や重点復興地域などがほとんどで、それ以外のいわゆる白地地区ではまちづくり組織化の動きは遅れており、これが今後の大きな問題になっている。ともあれ調査対象となったまちづくり組織のうち、震災後結成されたものの多くは、震災後4月から9月にかけて設立されており、一方、震災以前からすでに活動していた組織では、震災後の初会合の多くが、震災直後の1月から2月にかけて行われている。震災前からまちづくり活動が盛んな地区ではその立ち上がりが高く、コミュニティ活動も他地区と比べて盛んであるといわれるが、実際、震災直後の住民活動やまちづくり組織の設立時期、これまでの成果をみると、そこには震災前のコミュニティの状態が大きく影響している。とりわけ「老人会」「子供会」「自主防災組織」の活動が与える影響が大きく、こうしたコミュニティ活動の活発な地区ほどその後の復興まちづくりに大きく寄与している。

まちづくり組織の設立の動機について、震災前後で共通しているのは、やはりまちづくりの基礎ともいえるべき住まいの問題である。しかし、震災前に設立された組織では、それ以外のきっかけも各組織によって多様であったのに比べて、震災後の組織設立の動機は「住宅の再建」「都市計画事業への対応」「災害に強いまちにする」ことの3つに集約される。震災前にはまちづくりの問題が必ずしも明確な形をとらず、いわば「課題発見型」の活動形態が多くみられたが、震災後には住宅や商店街の復興といった目的がはっきりとした形であらわれる「課題解決型」であることが求められている。

#### (2) まちづくり組織の活動内容とこれまでの成果

こうしたまちづくり組織の活動は大別して、震災直後の応急救援的活動（第1段階）と、その後の本格的な復興まちづくり活動（第2段階）に分けられる。まず前者の第1段階の活動では、もっとも多く多くの地区で行われていたのが「住民の安否確認」であり、ついで「救援物資の配給」「救護活動」「治安パトロール」など緊急時のさまざまな対応がとられている（図-6）。一方、第2段階の活動は、それぞれの地域の抱える課題に対応して多様に展開されているが、震災前後で比較すると、「勉強会」「まちづくりニュースやミニコ

ミ紙などの発行」「まち全体の計画づくり」「行政への陳情・要望」など、まちづくりの基本的な内容については概してあまり差がない。しかし「見学会」「イベント」「シンポジウム」「建築のルールづくり」といったまちづくりの基礎的、準備段階的、長期的な活動や啓発的な活動は震災後減少し、逆に「市の計画案に対する反対運動」「共同建替の計画づくり」「弁護士・建築士などによる相談会」など具体的な活動が増えている（図-7）。現時点では当然、早期復興を優先させる必要があるため、じっくり時間をかける余裕はなく、できるだけ早い段階で具体的な成果が望まれている。今後の活動予定をみても「計画の具体化」を目標に勉強会や調査を通じて住民の合意形成を図っていこうとする組織が多くみられる。

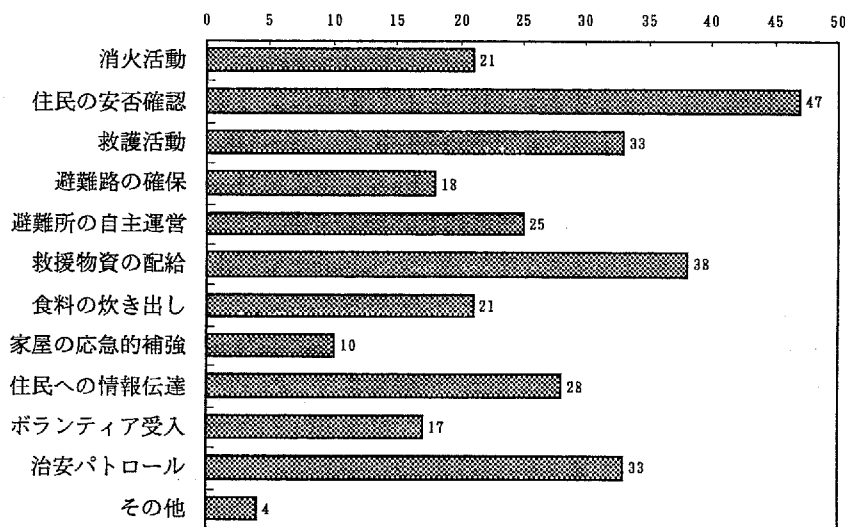


図-6 復興まちづくり組織の震災直後の活動（複数回答・件）

一方、これまでの活動の成果のなかでは、もっとも多い回答が「まちづくりの計画をつくっている」ことである。さらにみると、「まちづくり組織ができた」ばかりで具体的な成果がまだない段階の組織が9地区ある一方で、既に何らかの「事業を行っている」という組織も同数あり、各地区によるまちづくりの進展の差が現れている（図-8）。

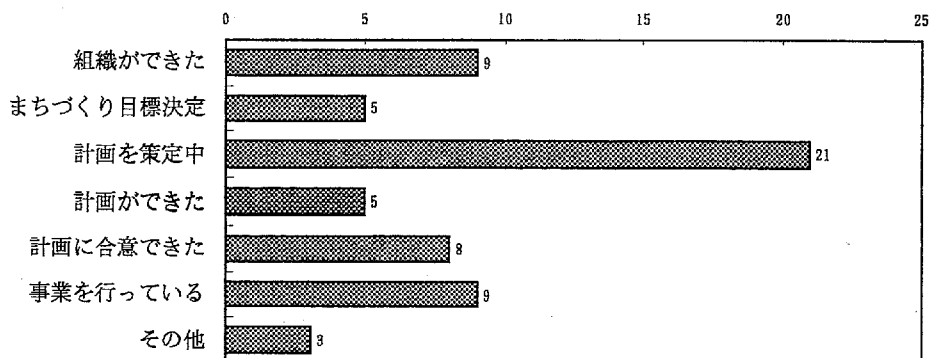


図-8 これまでの活動の成果（件）

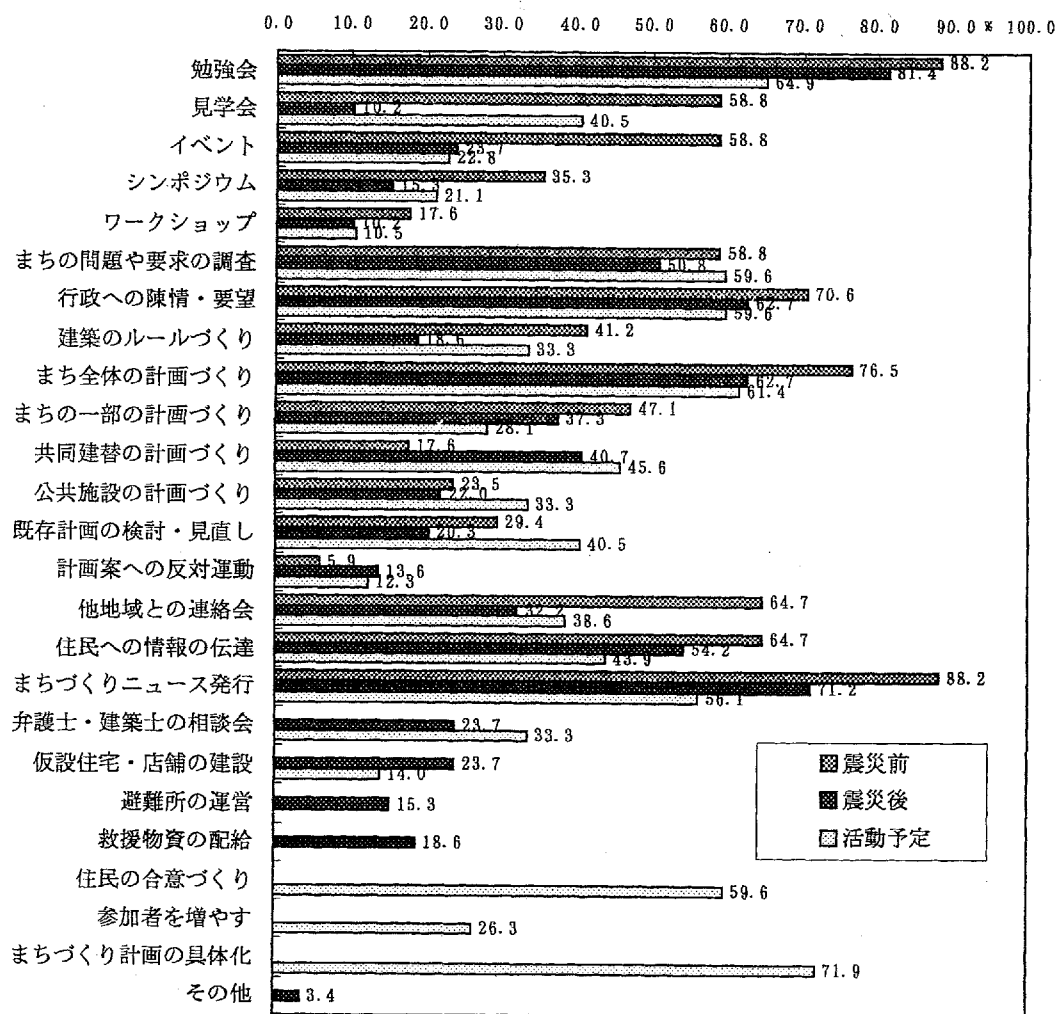


図-7 復興まちづくり組織の活動内容（数字は%）

### (3) 復興まちづくり組織の性格

まちづくり活動では、いうまでもなくその場に居住する住民が中心となるが、その活動に対してさまざまな形の支援があることが大切であり、また現実的に程度の差はあれなんらかの支援が行われている。図-9は、専門家と行政によるまちづくり組織への支援の程度を活動内容別に評価してもらったものである。住民の、専門家の支援に対する評価は比較的高く、まちづくり計画へのアドバイスや勉強、法律上の相談など専門能力への期待が高い。一方、行政の支援に対しても内容的には同様の傾向はあるが比較的评价は低い。

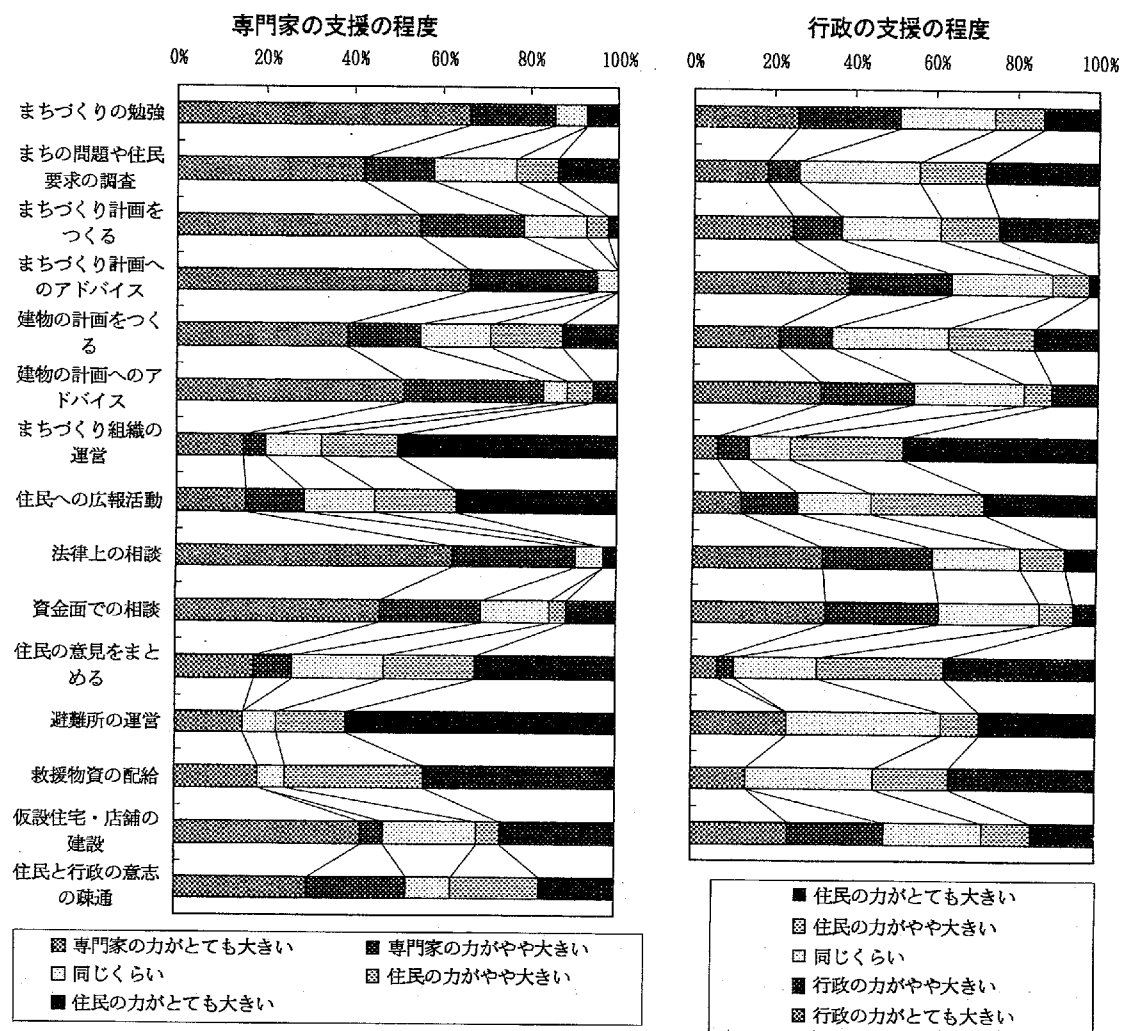
以上の専門家・行政の果たす役割についての住民側の評価をもとに次のようなタイプにまちづくり組織を分類できる。

- A. 住民の果たす役割が大きい「住民主導」型：10組織（16.4%）
- B. 専門家の果たす役割が大きい「専門家主導」型：13組織（21.3%）
- C. 行政の果たす役割が大きい「行政主導」型：4組織（6.6%）
- D. 住民と専門家の果たす役割が大きい「住民+専門家」型：6組織（9.8%）

E. 専門家と行政の果たす役割が大きい「専門家+行政」型：9組織（16.4%）

F. 行政と住民の果たす役割が大きい「行政+住民」型：4組織（6.6%）

G. 住民と専門家と行政が役割分担されている「住民+専門家+行政」型：11組織（18.0%）



図－9 専門家と行政の支援の程度

ここで「専門家主導」型と「行政主導」型と「専門家+行政」型を合わせると44.3%に達し、まちづくり活動に対する専門家や行政の役割の重要性が再認識できる。ところで、この役割分担タイプと都市計画事業との関連をみると、市街地再開発事業や土地区画整理事業など事業区域のまちづくり組織では「専門家主導」型や「専門家+行政」型が多くを占める。事業区域では行政の果たすべき役割は実質的に大きいはずであるが、住民の評価としてはさほど表面化せず、むしろ事業の運用における専門家の技術的、調整的能力に期待がかけられているといえよう。一方、事業区域以外のまちづくり組織では、「住民+専門家+行政」型の占める割合が多く、「住民主導」型もあわせて、住民による主体的な運

用が行われている。なお「行政主導」型の組織では、会合の頻度や認知度はそれほど高くはないにもかかわらず、まちづくりの進展は早い。行政の制度に合致した方向で進むため、まちづくりの進み方も早いという結果であろうが、その場合、住民の意向が十分反映されていることが肝要であろう（図-10）。

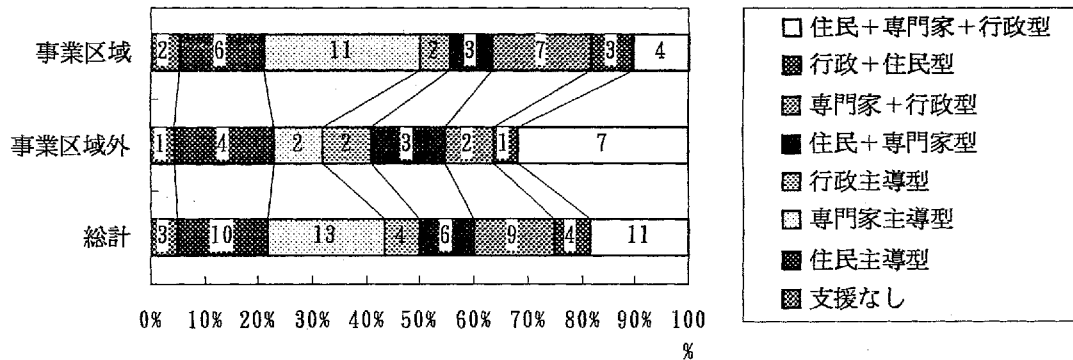


図-10 復興まちづくり組織のタイプ

#### (4) 復興まちづくり組織の問題点と役割

震災後の問題点は、第1にその活動が緊急性と実効性を要求されていることに起因する。従来のまちづくりであれば、一步ずつ時間をかけて勉強や啓発活動から段階的に進めることができたのに対して、震災後はそうした前提も準備段階もなく、いきなり具体的な課題に直面し、早期の解決を迫られている。実のところ震災以前のまちづくり活動でも、具体的な成果をあげた地区はそれほど多くなく、したがって範となる先例も十分でない。調査の結果からも「基本的な事柄について意見がまとまらない」「経済的な問題に直面する」「複雑な権利関係に直面する」といった土地や建物に関する具体的な問題があがっている。

問題点の第2には、活動を担うメンバー自身が被災していることから、活動のための十分な時間的、空間的、さらに精神的ゆとりがないことである。「地区の人達と連絡がとれない」「自分のことで精一杯でまちづくりに参加する余裕のない人が多い」「集まれる場所がない」といった参加の前提となる障害や、中心メンバーが時間がとれないといった問題が指摘されている（図-11）

さらに、震災後のまちづくりでは、住民はもとより行政も専門家でさえも、これまで経験のない状況下に直面していることである。今後新たな問題がでてきても、旧知の知識や、まちづくりの進め方、現行制度だけでは対応できない場合も多い。つまるところ、平時と比べて極めて困難な状況にあるといえよう。

つぎに、まちづくり組織の果たした役割についてみる（図-12）。現段階では「住民のまちづくりへの意識を高める」「まちづくりの目標を明確にする」「まちづくり活動を盛んにする」「コミュニティ活動を盛んにする」など、まちづくりの基本となる活動についてまちづくり組織が大きな役割を果たしているが、「計画の見直しやチェックをする」「計

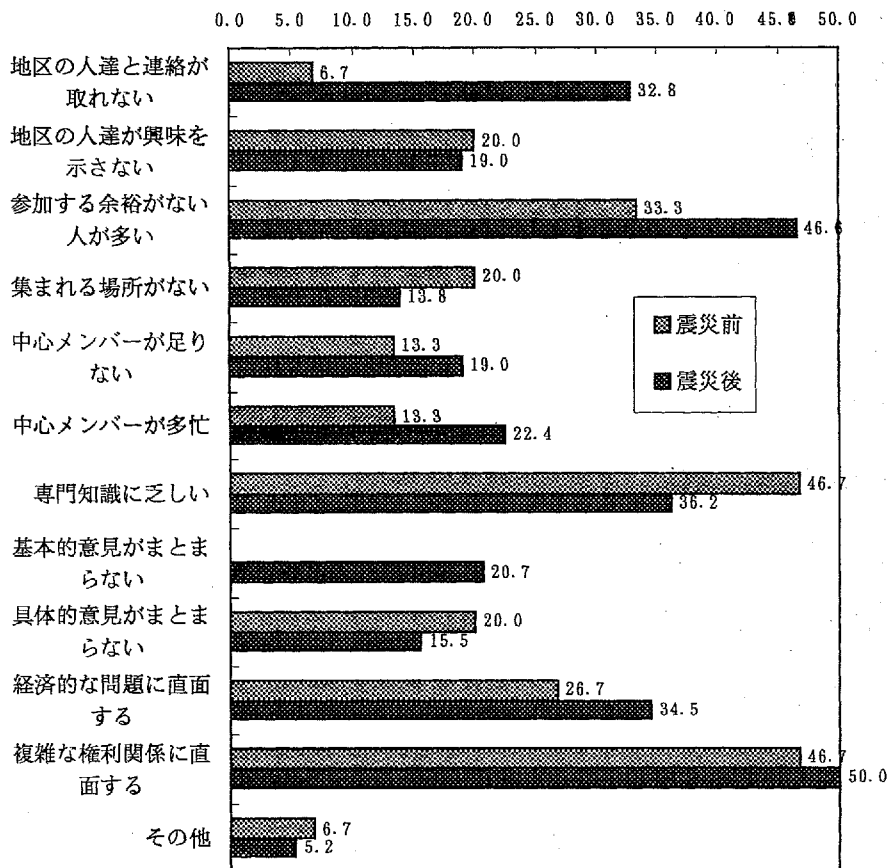


図-11 復興まちづくり組織の問題点（数字は％）

画への合意が取れる」など、まちづくりが一步進んだ段階での項目ではあまり役割を果たしていない。このような実効面での役割を果たしていくことが当面の課題であるが、全体的にみて、まちづくり組織がその地区の復興まちづくりに大きく貢献していることは否定できない。

なお、調査項目には具体的にあげていないが、共同建替や街区再建計画を進める際に、とくに権利者の話し合いの場をもち、合意形成を図っていくうえで、まちづくり組織の存在は大きい。共同化事業は基本的には近隣の範囲、街区の範囲の問題ではあるが、それをまち全体の問題として地元まちづくり組織の活動の一環として取り組む場合がしばしばみられる。そこではまちづくり組織が当事者と行政や専門家の間をつなぐ触媒的役割を果たしている。

また、個別にはなかなか得られないさまざまな情報がまちづくり組織を通じて獲得できることも重要なメリットであり、会合やニュースなどを通じて地区の復興の動向や行政の提供する住宅再建の諸制度の紹介などが提示される。さらに道路などの公共施設や公益的な施設などへの住民の要望を伝える場をもてた例もある。こうした情報の受信・発信機能としても評価されるべきであろう。

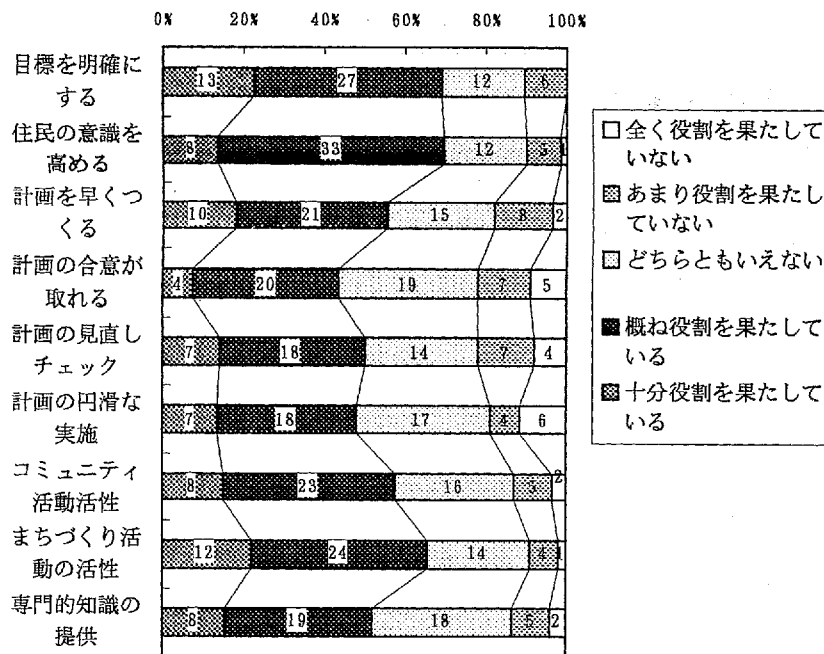


図-12 復興まちづくり組織の役割評価

#### 4. おわりに

復興のまちづくりにとって住民のまちづくり組織は一定の役割を担ってきたが、今後、事業区域での具体的なものづくりはもとより、いわゆる白地地区での展開など復興まちづくりは次の新たな段階に入る。自力再建が進みつつある地域での環境形成に関するルールづくりや、再建ができない地域での新たな支援方策の展開などこれからの課題は多いが、いずれにせよ、それぞれの場でのまちづくり組織がますます重要な位置を占めるであろう。このまちづくり組織が有効に機能していくために、①新たな復興まちづくりを組織化するための推進方策と体制づくり、②まちづくり主体としての住民まちづくり組織の制度的確立、③まちづくり組織への支援体制、方策の確立と強化といった点で今後検討を深めていくことが求められる。

#### 参考文献

1. 日本都市計画学会関西支部震災復興都市づくり特別委員会『震災復興の1年 中間資料』1996.11
2. 安田、三輪、末包、谷本、黒川「阪神・淡路大震災の被災地における復興まちづくり組織とまちづくり支援に関する研究」(その1)(その2)日本建築学会近畿支部研究報告集, 1996.7
3. 谷本裕美『復興まちづくり組織とまちづくり支援に関する研究—阪神・淡路大震災の被災地における事例調査を通じて—』1996.2(神戸大学修士論文)

#### 注記

- \*1. 参考文献1による。しかし、同書では、この滅失戸数は芦屋市、西宮市で少なく見積もられているため、実際は14万5000戸から15万戸と推定している。
- \*2. 神戸都市問題研究所生活再建研究会「震災復興と生活再建」都市政策, 1997.1による。
- \*3. ここで用いたデータは、被災状況に関しては、震災直後に実施された日本建築学会・日本都市計画学会合同調査による被災度調査であり、復旧状況に関しては建築確認申請の受理件数である。なお、資料および地図情報処理システムについては、神戸大学総合情報処理センター福島徹助教授の助言を得ている。
- \*3. このアンケート調査は1995年11月から1996年1月に筆者らの研究室で実施したもので、神戸市、尼崎市、芦屋市、西宮市の復興まちづくり組織78団体に配布し、61件の回収(有効回収率76.3%)を得た。



メ 七

# 大災害時における人間救助ロボット機器はいかにあるべきか

情報知能工学科 教授 高森 年

## 1. はじめに

阪神淡路大地震（1995.1.17）によって6,000人を超える死者がでたことは、既に広く報道された周知の事実である。死者のほとんどが圧死による即死であるとの調査結果もあるが、数時間以内での救助が可能であれば生存率は相当高かった、と多くの体験者が証言している。震災直後に迅速な救助活動が行われれば多くの人命が救われた可能性が高く、大規模災害における人命救助に対する対策が遅れている現状においては、人災による被害ではなかったか？との疑問がだされてもやむを得ない。

災害時の人命救助において人間の作業を補完・支援するレスキュー機器の重要性・必要性については改めて説明を必要としないところであるが、今回の震災により、現存のレスキュー機器（多くは消防署保有）に種々の問題点が存在することが明らかになり、その有用性について再点検が必要とされる状況にある。その原因の一つに、現在、消防隊などが保有している機器は主として欧米型の構造物を対象としており、日本特有の家屋構造を前提とした救助に必ずしも適しているとは言えない。また、現存のレスキュー機器設計にはロボット技術などの最新技術が取り入れられておらず、そのため、機能面や利用者とのインターフェース等に問題があり、一分一秒を争うような短時間での救助作業に役立たせることがきわめて困難であった、との指摘もある。従って、災害現場において本当に役立つレスキュー機器の設計は如何にあるべきか？を、抜本的に検討すべき現状にあると認識すべきであろう。

「救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査」研究会（略称レスキューロボット研究会：日本機会学会ロボティクスメカトロニクス部門、平成7年11月～8年11月）は、“災害現場において本当に役立つレスキュー機器の設計は如何にあるべきか？”をテーマとして、阪神淡路大震災で被害を受けた人々および人命救助に携わったさまざまな人々に聞き取り調査及びアンケート調査を行い、その人命救助の実際を知ると共に、その過程を整理した。さらに、その結果に基づき、ロボティクスメカトロニクス分野の研究者によるディスカッションを行い、人命救助作業を支援するレスキュー機器に求められる設計仕様を明らかにした。

本講座では、今後のレスキュー機器研究の一つの指針になるとも考えられるこの研究会報告書〔1〕に基づいてレスキューロボット機器のあるべき姿について考察する。

## 2. レスキューの現場（阪神淡路大地震の事例を基に）

研究会によるレスキューの現場に関する調査は、自衛隊、消防隊、被害者、からの聞き取り、およびビデオによる映像（NHK）に基づいてなされている。その詳細については

報告書を参照して頂くことにして、ここでは、最も多くの人命が失われた現場として、木造家屋の倒壊現場における倒壊形態とレスキューの一例について述べる。これによってレスキュー現場の概略の認識が可能となる。

## 2. 1 家屋の倒壊形態

この地区は、戦後すぐに建てられた家屋が多く、ほとんどの家が木造であった。家屋の形態は一戸建て、長屋、文化住宅といった様々な家屋が密集して建っていた。

関西では過去に大地震が起こった例が少ないためか、耐震を考慮して建てられている家屋は少ない。筋交いが入っている家は数少なく、家屋の基礎工事についてもひどいもので煉瓦の基礎の上に家を設置しただけといったところもあった。

その結果、今回のような直下型の地震が発生すると筋交いが入っていない家屋では、柱の接合部であるホゾとホゾ穴が外れて家屋の倒壊につながったものと考えられる。

図 1 と図 2 に木造家屋の典型的な倒壊例と実際に全壊した木造家屋の例をあげる。

倒壊した木造家屋のほとんどが瓦葺きであった。瓦葺きの屋根は非常に重く、そのため 1 階部分により多くの負荷がかかり、1 階部分のみが倒壊するケースが多く見受けられた。さらに、この地域は図 2 に示すように道路の幅が非常に狭く、道路幅が 4m 未満のところが多かった。そして、家屋の倒壊により多くの道路が通行不能となった。道を塞いだ瓦礫は道路の通行を妨げるばかりでなく、延焼を拡げる原因にもなった。

## 2. 2 救出の手順

上記のような倒壊状況の中で、救出作業を次のように行った。

いわゆる下町のネットワークが震災前から確立されており、この地域に古くから住んでいる住民がどこに誰が住んでいるかを把握していた。そのため埋もれた人の発見は比較的簡単に行えた。埋もれている人のうち、手足が動く人は音をたててもらい、音が聞こえてくる方向と振動で、だいたいの場所を特定した。手足の身動きが取れず、発声のみが可能な人は声を出してもらい、声の聞こえてくる方向から場所を特定した。そうした上で、懐中電灯でもって埋もれている人の周辺を照らし、懐中電灯の明かりがどこに見えるかで、より正確に場所を特定していった。手足の身動きもとれず、声も出せない人の場合、家族の人から家の間取りを聞き、寝ていた場所を特定し、その辺りからやみくもに掘り起こした。

以上の手順をまとめると図 3 のようになる。

救出作業は 2 階の家具を取り除き、続いて 2 階の床板、1 階の天井板をはがして行った。

家具を壊したり、床板や天井板をはがす際に大ハンマ、大バール、のこぎりといった道具が大変役に立った。

埋もれている人の上に柱や梁がある場合は、これを切り取り排除した。この時、家の重

みで柱や梁がたわみ、のこぎりでは切れないことがあった。この場合は、車のジャッキやチェーンブロックを利用して柱や梁を持ち上げ、切断を行った。

人を引っ張り出し、毛布で体をくるみ、担架もしくは戸板で搬出した。

これらの救出作業中に生じた問題点は次の通りであった。

- ・余震の危険を伴いながら、作業を行わなければならない。
- ・まわりの騒音やマスコミのヘリコプタの音が大きく、人が埋もれている場所を特定することが困難である。
- ・家の荷重がかかっている家具を取り除いたり、柱や梁を切断すると家屋の倒壊の危険がある。
- ・ジャッキやチェーンブロックを安定したところへ設置することができない。
- ・ガスが充満しているところもあり、爆発や窒息の恐れがある。

救出活動を通して最も必要とした機器は、埋もれている人がでてこれるだけの空間を作るためのジャッキであった。これに求められる機能としてはつぎのようなことが考えられる。

- ・小型・軽量で一人で持ち運びができるもの。
- ・至る所でガスが噴出しているため爆発・引火の危険性がないこと。
- ・エンジンやモータといった動力源を必要としない。
- ・不安定な場所でも設置可能であること。
- ・家屋の倒壊を検知するためにかかっている負荷を測定できるセンサを有しているもの。

### 3. レスキューロボットに要求される機能と性能

上記の救出作業手順例に従い、レスキューロボットに要求される機能として、探索・掘削・救助の3つの作業に分類し、それぞれに必要な性能・仕様について調査・考察された結果について述べる。

#### 3. 1 探索作業

##### 3. 1. 1 救助用探索機器に要求される事項

探索活動は大きく2ステップに分かれる。第1ステップは被災者の位置を同定するプロセスであり、第2のステップは被災者との意志疎通を含めた状況把握である。両ステップともに上記災害時の状況に対応するためには探索用機器に対して以下が要求される。

- 1) コンクリート瓦礫、鉄骨、材木、土砂などを通して探索可能なこと。
- 2) 探索に当たり走査面などの基準平面を必要としないこと。
- 3) 被災者の意識の有無に関係なく探索できること。出来れば生死の判別が出来ること。
- 4) 被災者に非接触で探索可能なこと。出来れば遠隔探索可能なこと。
- 5) 天候に左右されず、昼夜分かたず使用できること。
- 6) 人手で運搬可能な重量であること。
- 7) 組立、準備が短時間で可能なこと。高精度よりも短時間で探索できること。
- 8) 自動車などからの給電が可能なバッテリー駆動であること。
- 9) 操作及びデータの解釈、判断に高度な専門知識を必要としないこと。
- 10) 出来れば災害時以外の日常活動においても活用される機器であること。

救助用機器は常用されるものではなく、一方、いざというときには確実に作動する必要がある。そのためには、保守が容易であることが必須条件である。また、日常活動において使用されるもので災害時に転用可能なものが望ましい。これらの要求事項を1種類の探索機器で全て満足する必要はなく、複数種の探索機器を使用し、状況に応じて使い分けることが肝要であろう。

### 3. 1. 2 各種探索技術の調査結果

本調査は、救助活動に当たっての探索プロセスにおける問題点を明確にし、探索技術に求められる機能・仕様を明確にすることを目的としていることから、新聞情報をデータベースとして利用した。人間(人)あるいは人命と探索、探査をキーワードに新聞情報の検索を行い、プレス発表者に問い合わせを行い、技術資料、カタログなどを入手して、適用可能性を議論した。また、探索の方法によっては、瓦礫の隙間などの狭隘部にセンサーを進入させることも必要であり、その方法についても議論した。被災者の探索に利用されている方法には以下がある。

- 1) 可視光、赤外光(サーチライト、赤外投光器との併用も含む)

暗視装置、ファイバースコープカメラ、狭隘部移動ロボット+超小型カメラ、サーマルイメージャー、赤外線カメラ、レーザー視覚センサー

- 2) 電磁波

地中探索レーダー

- 3) 音響

地中音響探知機、超音波視覚センサー

- 4) ガス、臭い

炭酸ガス検知器、探索犬、警察犬

### 3. 2 掘削作業

#### 3. 2. 1 仕様と問題点

まず、今回の阪神淡路大震災における救助活動の現場からあげられた声を集約することによって掘削マシンが満たすべき仕様をまとめると次のようになる。

- [a] 軽量（20kg未満）で構造がシンプルである。
- [b] 持ち運び、取扱が容易である（はじめてでも使える）。
- [c] 移動能力が高い。例えば、階段や瓦礫を乗り越えられる。
- [d] いくつかの作業ができる。
- [e] 投光器が付随している。
- [f] 雨、塵や熱に強い。
- [g] 乾電池で使用可能である（すなわち、エネルギー源を確保する）。
- [h] 大型の場合、自律型ではなく遠隔操縦型とする。
- [i] 現在技術の応用で開発できるもので万能ロボットは望まない（単能ロボット）。
- [j] 開発期間5年未満であること。

これらの仕様は現場からの声が反映されているという意味で非常に重要であるが、いくつかの注意点がある。

- (A) これらのうちのいくつかの仕様を満たしている掘削マシンはすでに存在する。
- (B) 色々なサイズ／種類の掘削マシンへの要求が混在している。
- (C) 早急に必要とされる掘削マシンに重点がおかれている。

これらは、掘削マシンを考えて行く際、掘削マシンをいくつかのクラスに分ける必要性を示している。そこで、図4をもとに掘削マシンのクラスを4つに分類してみる。

[第0フェーズ] すでに一般に広まっている機器で、どの家庭にも常備されるべきものがある。ただし、改造、改良の余地はある。

[第1フェーズ] すでに存在するものも含まれているが、さらにレスキュー活動を意識した改造／改良、あるいは新開発が望まれる機器で、2年以内を実現すべきもの。これらは少なくとも5～10世帯に1台は装備しておくべきものである。

[第2フェーズ] すでに存在するものも一部含まれているが、さらにレスキュー活動を意識した改造／改良、特に新開発が望まれる機器で、5年以内を実現すべきもの。これらは少なくとも一丁目内に数台は装備すべきである。

[第3フェーズ] 現状では実現されていないが、将来的には必ず必要とされる機器で、10年後を目安に開発すべき機器。これらは、市や都道府県単位あるいは国家レベルで装備しておくものである。

図中、左上から右／下へ向かっている→は、価格の上昇を表しており、普及数が少なくなる度合が高くなることを意味する。

上にあげた掘削マシンへの仕様は、第0フェーズ、第1フェーズにおける開発にターゲットがおかれたものと理解できる。これらのレベルの考察は早急に行うべきであるが、同時に第2、第3フェーズに対しても今から十分対処してゆかねばならない。

### 3. 3 救助作業

救助すなわち探索・掘削後の人間のハンドリング・取り扱いに関して考察した結果、次のような機能が必要であることが明らかとなった。

#### 1) 被災者の生死・状態の判断の機能。

状態によって救出の優先順位を付ける。体温、血液、声等から判断が可能である。

#### 2) 生命維持の機能。

診断、応急治療、薬剤投与を行う。また、換気・塵埃対策を行う。

#### 3) 負担軽減の機能。

肉体的圧迫軽減、精神的サポートを行う。

#### 4) 人体を瓦礫の中から取り出す機能。

人体にダメージを与えないように運搬可能な状態まで穴から引き出す。マスタースレーブ技術、セラピー技術などが関連する。

#### 5) 運搬を行う機能。

瓦礫上から路地へ、路地から大通りへ、大通りから近隣の病院へ、近隣病院から遠隔地の大病院への運搬が必要。

#### 6) 作業者のための安全を確保する機能。

その他、次のような事項が重要である。

#### 1) 通信・誘導の機能。

救助団の移動と作業遂行、被災者の運搬・応急治療、避難者の誘導、人や物資の確認、外部への情報伝達を目的とする。緊急性、同時多発性、信頼性、情報蓄積・中継・選別、ローカル性、分散性が必要である。

#### 2) 災害に対してロバストな組織やインフラストラクチャの整備。

#### 4. おわりに

瓦礫に埋もれ、救出された学生は手記の中で次のように書いている〔2〕

私は叫び声を上げた後、自分自身で言った言葉にもものすごい恐怖感を覚え  
ました。私はまた叫びました。

「死ぬんか！？ 死ぬんか！？ 死ぬんか！？」

叫ばずにはいられませんでした。でも「死」という言葉を口走るたび、  
その意味がのしかかってきました。全身から脂汗がにじみ、呼吸は乱れ、  
心臓は高鳴り、両足には痛みが食い込んできました。

彼は運よく5時間後に助け出され、今年の3月修士課程を卒業、現在、社会人の一年生  
として元気に活躍している。しかし、救出されずに無念の思いを抱いて亡くなられた犠  
牲者の方々が多数いる。これらの人々の死を無にしない意味においても、早急なレスキュー  
機器の開発とそのための支援を望む。

#### (参考文献)

〔1〕日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門研究会：救助ロボット機器の研究開  
発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会報告書、  
1996

〔2〕藤智史：阪神・淡路大震災－復興への願いをこめて－，レスキューロボット機器研  
究会資料，1995

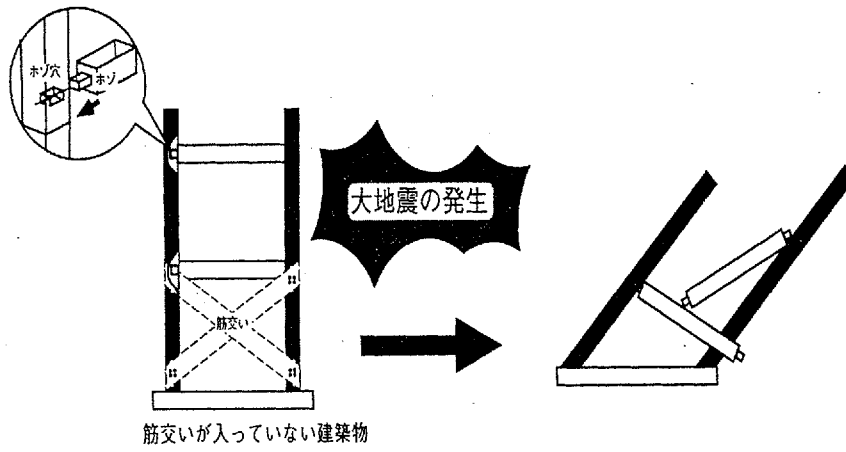


図1 木造家屋の典型的な倒壊例

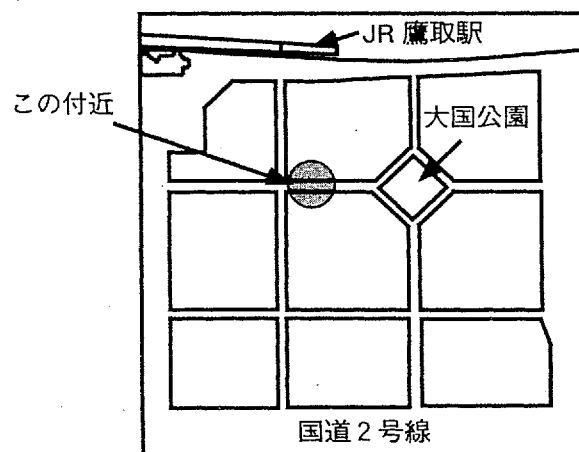


図2 全壊した木造家屋

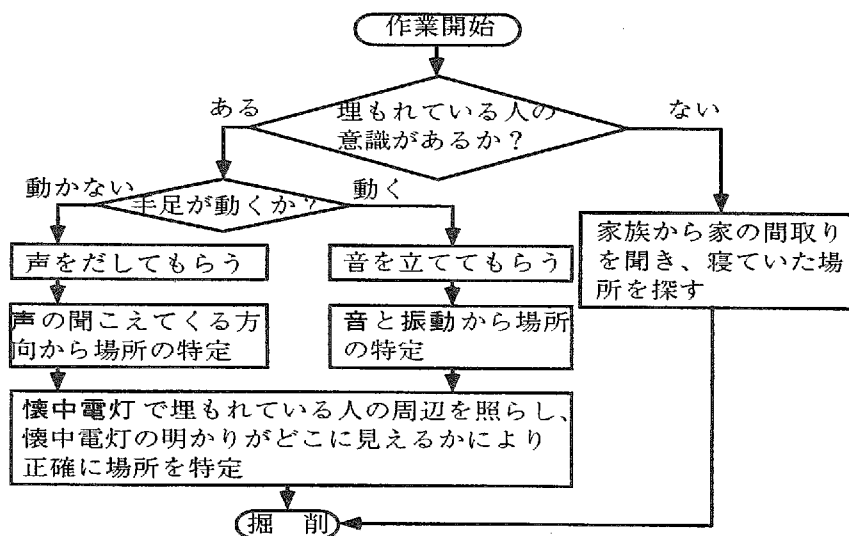


図3 埋もれている場所の特定の手順

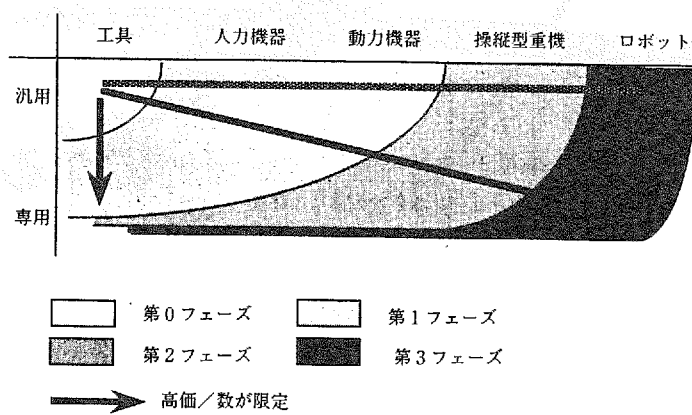
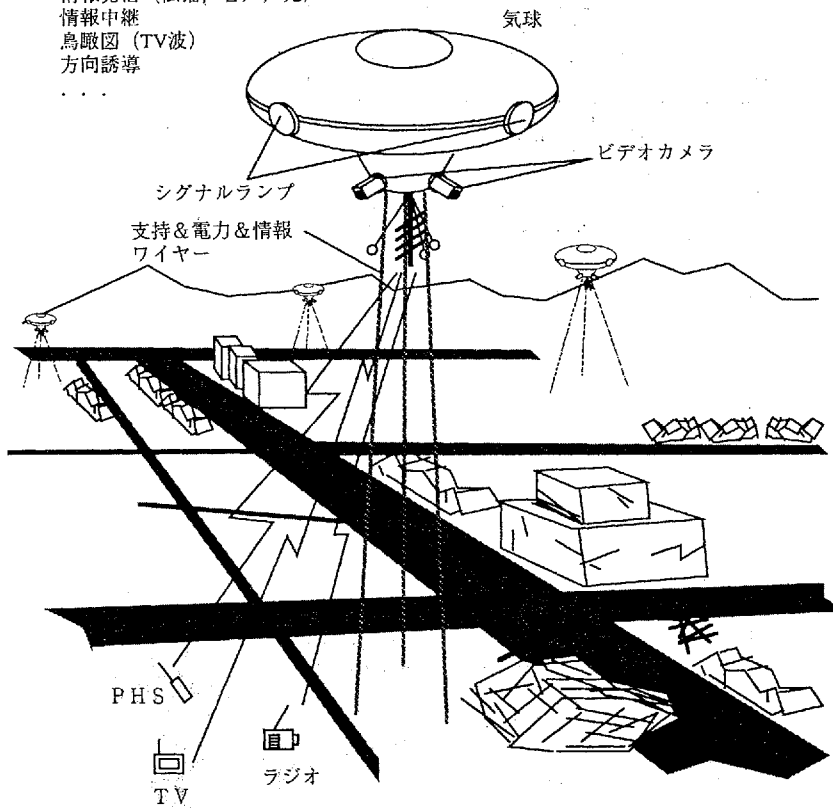


図4 特徴

誘導ステーションのイメージ

情報発信 (伝播, 音声, 光)  
情報中継  
鳥瞰図 (TV波)  
方向誘導  
.....





メ モ

# 石油基地の地震による災害の想定

応用化学科 教授 片岡 邦夫

## はじめに

都市は巨大で複雑な人工システムであり、これをどのように制御する（運転しながら導く）かは大変難しく重要な問題である。人口が集中して過密化すると危険性をはらむが、一方では便利で活発な経済的活動、文化的生活を享受できる。

このような都市活動を安全にサポートするためにインフラ、ライフラインについて十分な防災対策が必要であることを今次の阪神淡路大震災で痛感した。本稿は神戸大学特定研究「兵庫県南部地震に関する総合研究」に参画するプロジェクト研究の一つであり、エネルギー供給システムの安全対策の一つである石油基地の防災対策について紹介するものである。幸いにして、震度の大きかった被災中心地には、大きなエネルギー基地がなく、主として輸送・供給するライフラインが被害を受けただけであったが、もし、エネルギー貯蔵基地が被災しておれば、もっと致命的な大災害となっていたと推測される。

石油基地の防災については石油コンビナート等災害防止法（昭和50年法律84号）とその関連の政令、省令、施行令で規定されており、石油基地の災害で被害の大きなものはタンクの爆発・火災とタンクからのオイルの流出である。石油基地の大半が、輸送を海上に頼っているため、敷地の全部または一部が海域に接している。本研究では地震時における巨大タンクから海域へのオイルの流出災害の予防のための災害想定を取り扱っている。

## 石油基地・石油コンビナートの自衛防災組織

特別防災区域（例：石油の貯蔵・取扱量が1万キロリットル以上の第1種事業所が2以上存在する地域）が所在する都道府県には、特定地方行政機関の長および職員で構成される石油コンビナート等防災本部が置かれている。特定防災区域の特定事業所の自衛防災組織に関しては、特定事業者は火災に対しては、貯蔵規模に応じた台数の自治省令で定める大型化学消防車（放水圧力が8.5 kg/m<sup>2</sup>で毎分3,100 l以上の放水能力のもの）等、大型高所放水車（毎分3,000 l以上の高所放水能力のもの）、泡原液搬送車とこれに関連する器具（可搬式放水銃、泡放水砲など）を備えることになっている。流出に対しては、自治省令で定める規格のオイルフェンスおよびオイルフェンス展張船、油回収船を備えなければならない。オイルフェンスの寸法は単体の長さが20 mで、海面上の高さ30 cm以上、海面下の深さ40 cm以上が必要である。例えば、百万キロリットル以上の貯蔵・取扱量の事業所は接続した全長が2,160 mのオイルフェンスを備えることになっている。展張船は備え付けられたオイルフェンスを1時間以内に展張する能力を有していることとなっている。また災害の発生または拡大を防止するために、これらの防災資機材を運転・使用できる防災要員を置かねばならない。

## タンクヤードについて

発電所や精油所の石油基地は他の石油コンビナートと同様に「石油コンビナート等における特定防災施設等および防災組織等に関する省令」に規定されたタンクヤードの具備すべき安全対策や防災対策を守って建設されている。一般に各種石油類は通常、浮き屋根式平底円筒型タンクに貯蔵される。平常時の環境には安全に十分に安定して貯蔵できる構造的条件は十分に満足して建

設されているが、もし、タンクが損傷して石油の全貯蔵量が流出した場合でも、タンクを囲む防油堤（鉄筋コンクリート）内で流出をくい止められることになっている。防油堤を越えてさらに流出した場合を考えて、屋外タンクの全ての防油堤を囲む防止堤（鉄筋コンクリートまたは土で造られ、高さが地盤面より0.3 m以上）を設置することになっている。しかし、今次のような震度7を超える激震ではタンクはもちろん、防油堤、防止堤とも破損しないとは言い切れない。

## 研究の目的

エネルギー基地である大規模石油タンクヤードの地震による災害は発生すれば国を左右する程に影響が大きく、それに対する防災対策は非常に重要である。すなわち、地震災害は発生頻度が高くなくても一旦発生すると甚大な被害をもたらすので、危険度は発生確率と災害規模の掛け算で評価すべきである。本研究は、FT分析により防災対策が重要である項目を抽出して「地震による石油基地の石油等の海上流出の災害想定」を行うこととし、石油基地の有効かつ的確な予防のための防災対策と災害発生時の応急対策、復旧対策について検討することを目的とした。したがって、どの地域において発生しても災害拡大を抑止する対策がとれるように短時間に災害想定ができること、貯蔵施設の構造と応急設備の配備に関して検討すべき因子を提供できること、応急対策のための的確な防災要員の動員と指令を出せるように災害の規模とその拡大傾向を予測できることなどが重要である。

## 本シミュレーションの特長

プロジェクト研究の初年度は災害の過大想定で災害の範囲の把握を目的に、オイルは海上の任意の位置に点源状に瞬時に流出し、その後、油膜厚さに応じて拡散する油膜の拡がりを見積もった。しかし、この条件設定では、危険性の評価が非現実的で過大すぎ、災害防止法に基づく防災対策の充実と改善を実現して行きにくい。したがって、第2年度は、瞬時流出ではなく、タンクに亀裂等の損壊が起きた時の油の流出速度の時間変化を考慮して災害想定を行った。

その前提条件と留意事項は以下のとおりである。

### (1) 全ての特別防災区域を対象

任意の地域任意の流出位置での災害想定ができるように、最初に地形データを入力する方法を採用する。地形の入力と地域の細分割の例として、地域のスケールを東西2 km 南北2 km に、地形は陸と水上（海）の区別のみを入力することにし、細分割は1メッシュを20 m x 20 mとした。

### (2) 時間変化する流出速度

タンクが損壊した場合、油の流出速度は損壊部の位置、面積と油面の損壊部からの高さにより変化する。したがって、流出速度の時間変化を考慮して油膜を形成する総流出油量および油膜拡散速度の評価をした。ただし、防油堤、防止堤を経由して海面に至る所要時間を遅れ時間として考慮していない点で危険度の過大評価になっている。

### (3) 潮流・海流の影響無視

防災の基本対策は防波堤内で流出災害をくい止めることと考えており、潮流・海流の影響は考慮しないことにした。陸上にタンクを囲むように防油堤が、またこれら全部を囲む防止堤が設備されているが、海上に防波堤が存在することが望ましい。防波堤がない地域でも潮流の影響を無視した本シミュレーションで応急対策の目安になると考えられる。（時間的にも位置的にも変化する潮流や海流のデータを入力することは難しく時間を要すること、もっと面倒な拡散方程式を用いなければならないことなど、モデルが複雑になり、計算時間が非常に長くなるため、応急対策に間に合わない問題がある）

### (4) 油自身による拡散速度を油膜厚さの関数として表現

Fay, Hoult らの点源からの円形状拡散の式（油膜半径を時間の関数として表したものを）を任意形状にも応用できるように拡張使用した。流出油量は時間とともに増加するが、その全量が各時間ステップ毎に瞬時に油膜に均等に（油膜厚さ一定で）分布するとした。

## (5) 任意風向、風速

いかに災害の拡大を抑止し、拡大速度を小さくするかの観点から本計算例では、風向はその地域の年間平均の風向または被害が大きくなる最悪風向とする。風速のオーダーは年間平均風速とした。

## 仮定

本シミュレーションで使用した仮定は以下である。

- (1) 海流、潮流、波の油拡散への影響は無視する。
- (2) 風は風速、風向とも拡散過程中、一定とする。
- (3) 流出油の性質は拡散過程中、不変とする。
- (4) 吹送流の方向は風向と同じで、吹送流により運ばれる油膜も吹送流と同方向、同速度とする。
- (5) 油は水平な海面上を拡散する。
- (6) 油の流出速度はタンクの損壊部の面積と油面高さで評価する。
- (7) 流出位置は時間とともに動かない。最初の1時間ステップの流出分は指定された1メッシュ(400 m<sup>2</sup>)に点源的に流出するとする。
- (8) 油膜を形成する総流出油量は時間とともに変化する流出速度を時間積分して求める。
- (9) 拡散後期の表面張力の影響は考慮しない。
- (10) 油膜はちぎれたり、分散したりすることはない。
- (11) 油膜厚さは、その時間までの総流出油量から評価し、油面全体で一様であるとする。(油面上での油の移動は瞬時に起きると仮定する)
- (12) タンクの損壊箇所から海上の流出点までの距離とその間の移動(遅れ)時間を今回の計算では考慮しない。

## 基礎式

### (1) 流出速度と流出総量

直径  $D$  m のタンクで、損壊部(亀裂面積  $A$  m<sup>2</sup>)から油面までの高さが  $h$  m の時の流出速度は

$$Q = A \sqrt{2gh} \quad (1)$$

油面高さの時間変化は、油面の初期高さを  $h_0$  m として

$$h = h_0 - \sqrt{2gh_0} kt + \frac{1}{2} g k^2 t^2 \quad (2)$$

ただし

$$k = \frac{A}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

総流出油量は

$$V_o = \int_0^t Q dt \quad (3)$$

## (2) 拡散速度と油膜厚さ

### (1) 拡散初期 拡散速度

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} K_i^2 \left[ \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \right) g \delta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

油膜厚さ

$$\delta = \frac{V_o}{\pi K_i^2 \left[ \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \right) g V_o \right]^{\frac{1}{2}} t} \quad (5)$$

### (2) 拡散中期 拡散速度

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\pi^{3/2} K_v^4}{4} \left[ \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) \frac{g}{\nu_w^{1/2}} \right]^{2/3} V_o^{-1/6} \delta^{3/2} \quad (6)$$

油膜厚さ

$$\delta = \frac{V_o}{\pi K_v^2 \left[ \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) \frac{g V_o^2}{\nu_w^{1/2}} \right]^{1/3} t^{1/2}} \quad (7)$$

### (3) 拡散後期

拡散後期は油膜はひじょうに薄く、油拡散に対する抵抗として表面張力が支配的であるが、十分に時間が経過してから現れる状態である。防災の観点から初期の応急対策は6時間 - 10時間程度が勝負と考えられるので、拡散後期の式は使用しない。

## (3) 吹送流による拡散速度

(1) 風速  $W$  が  $4 \text{ m/s}$  以下の時

(2) 風速  $W$  が  $4 \text{ m/s}$  以上の時

$$V_w = \frac{0.259}{\sqrt{\sin \phi}} W^{1/2} \quad V_w = \frac{0.0126}{\sqrt{\sin \phi}} W \quad (8)$$

緯度として日本を考えて北緯  $\phi = 34^\circ 45'$  を採用した。

#### (4) 遷移時間の問題

油膜の拡散が重力支配から粘性支配へ遷移する時間は拡散初期と中期の速度が等しくなる時間であり、次式で求められる。

$$t_c = \left( \frac{K_v}{K_i} \right)^4 \left[ \frac{\rho_o^3 V_o}{\rho_w^2 (\rho_w - \rho_o) g v_w} \right]^{1/3} \quad (9)$$

### 結果と考察

防波堤を持つ簡単な地形を例題とした。タンクの大きさ、貯蔵量（油面高さ）、タンクの損壊程度（亀裂面積をパラメータ）、風向、風速などを変化させて計算できるモデルにした。実際の流出の仕方を特定できないが、いかに流出をくい止めるかが問題であり、損壊部からの流出でタンク油面高さが時間変化することを考慮して計算した。

結果の1例として、タンク直径  $D = 50$  m, 損壊発生時の油面高さ  $h_0 = 20$  m、亀裂面積  $A = 0.5, 0.2, 0.1$  m<sup>2</sup> について計算した。地形の例として、沖合 1.5 km まで防波堤がある地形を用いた。

計算条件：C重油 1000 kl が岸壁中央付近に連続的に流出（パラメータ：亀裂面積）

風向：北北西（最悪方向） 風速（平均）：5 m/s（強風）

計算結果を図1～3に示す。

本例のタンクは大きさ（直径）として、 $D = 50$  m を与えており、大型タンクの部類に属す。損壊時の損壊部分から油面までの高さとして  $h_0 = 20$  m を与えており、かなり大きな災害を想定する条件設定になっている。また大きな風速で防波堤出口方向すなわち最悪風向の場合の計算である。縦軸、横軸の数値100.0は2 km を意味する。損壊部の亀裂面積をパラメータとして  $A = 0.1, 0.2, 0.5$  m<sup>2</sup> の3種に変化させて計算した。

例えば、亀裂面積  $A = 0.1$  m<sup>2</sup> の場合、最初の約30分は流出速度が大きく、油膜は厚く、重力支配であるため、風の影響は受けない。1時間経過すると油膜が対称形でなくなり変形する。この時点ではすでに粘性支配域に入っているため、風（吹送流）の影響で北北西に拡散し始めている。計算上は5時間以上経過すると流出油膜は防波堤外へ流出している。

亀裂面積が  $A = 0.2$  m<sup>2</sup> の場合でも、油膜の拡散はほとんど同じになった。亀裂面積が  $A = 0.5$  m<sup>2</sup> の場合は、少し流出速度が大きいため、風（吹送流）の影響を受けるのは2時間近く経過してからになった。しかし、いずれの亀裂面積の場合でも流出油膜は5時間経過時にはまだ防波堤内にあるが、6時間経過時にはすでに防波堤外へ出ている結果となった。

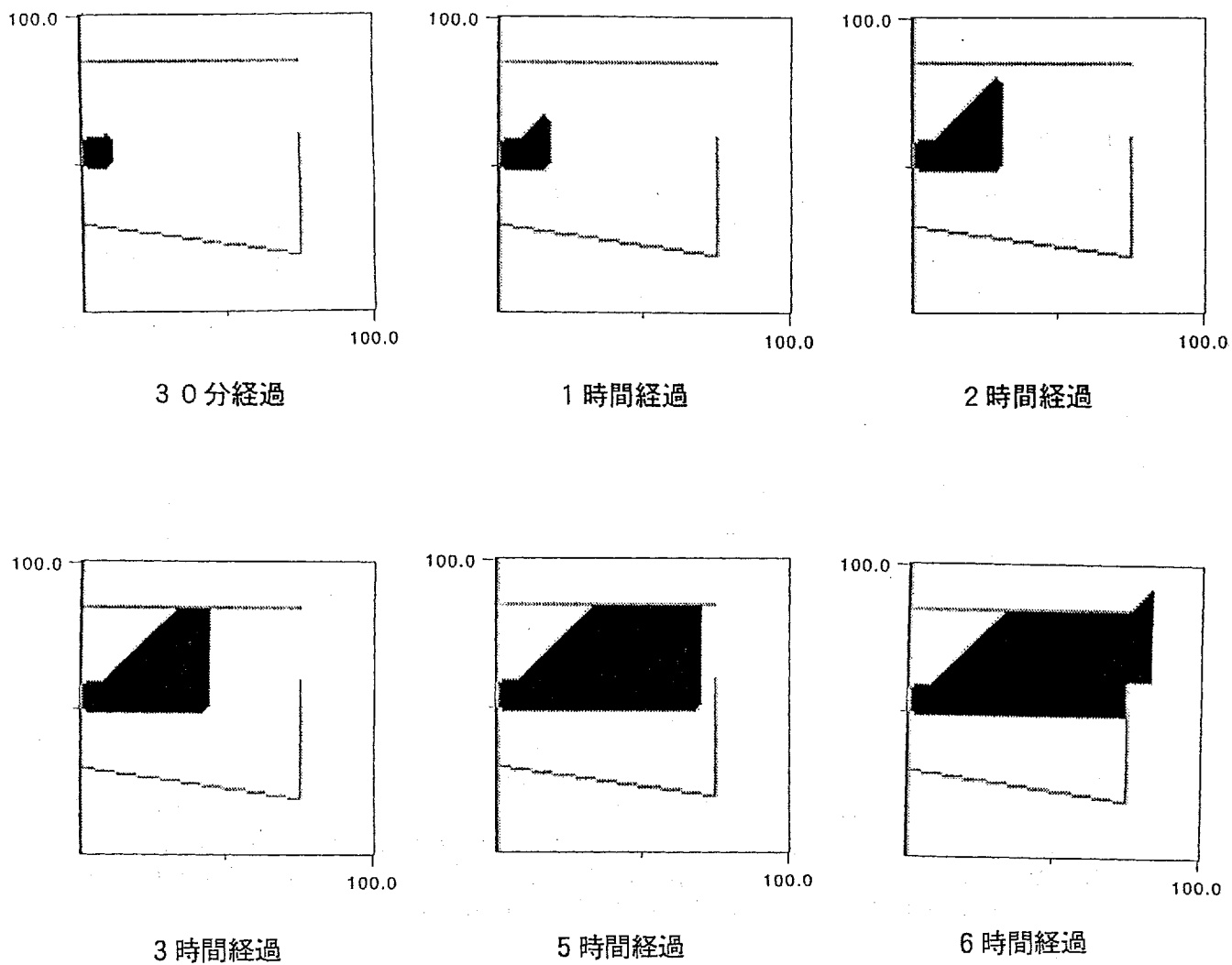


図1 流出油膜の時間変化  
 亀裂面積 : 0.1 m<sup>2</sup>, 風速 : 5 m/sec, 風向 : 北北西

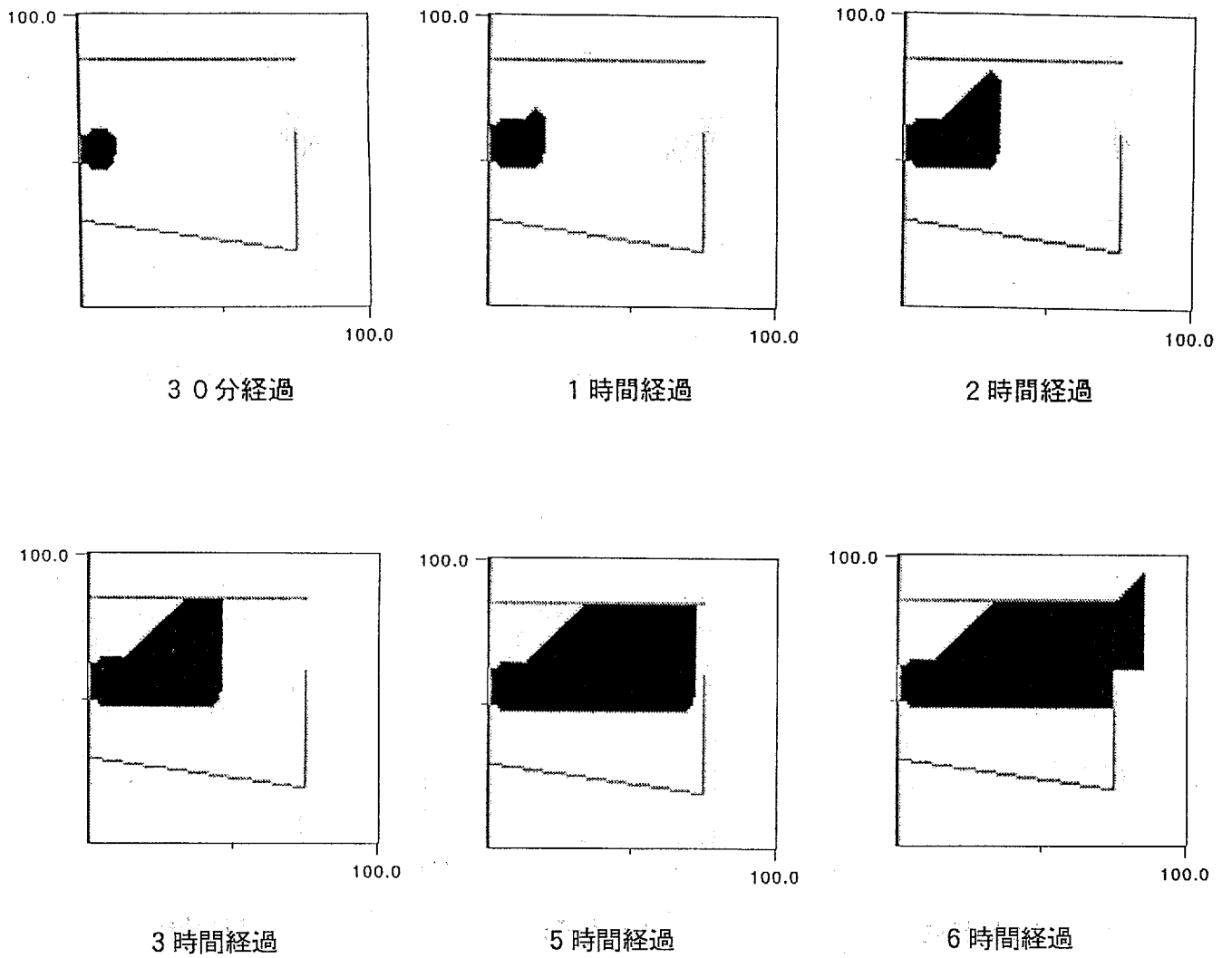


図2 流出油膜の時間変化  
 亀裂面積 : 0.2 m<sup>2</sup>, 風速 : 5 m/sec, 風向 : 北北西

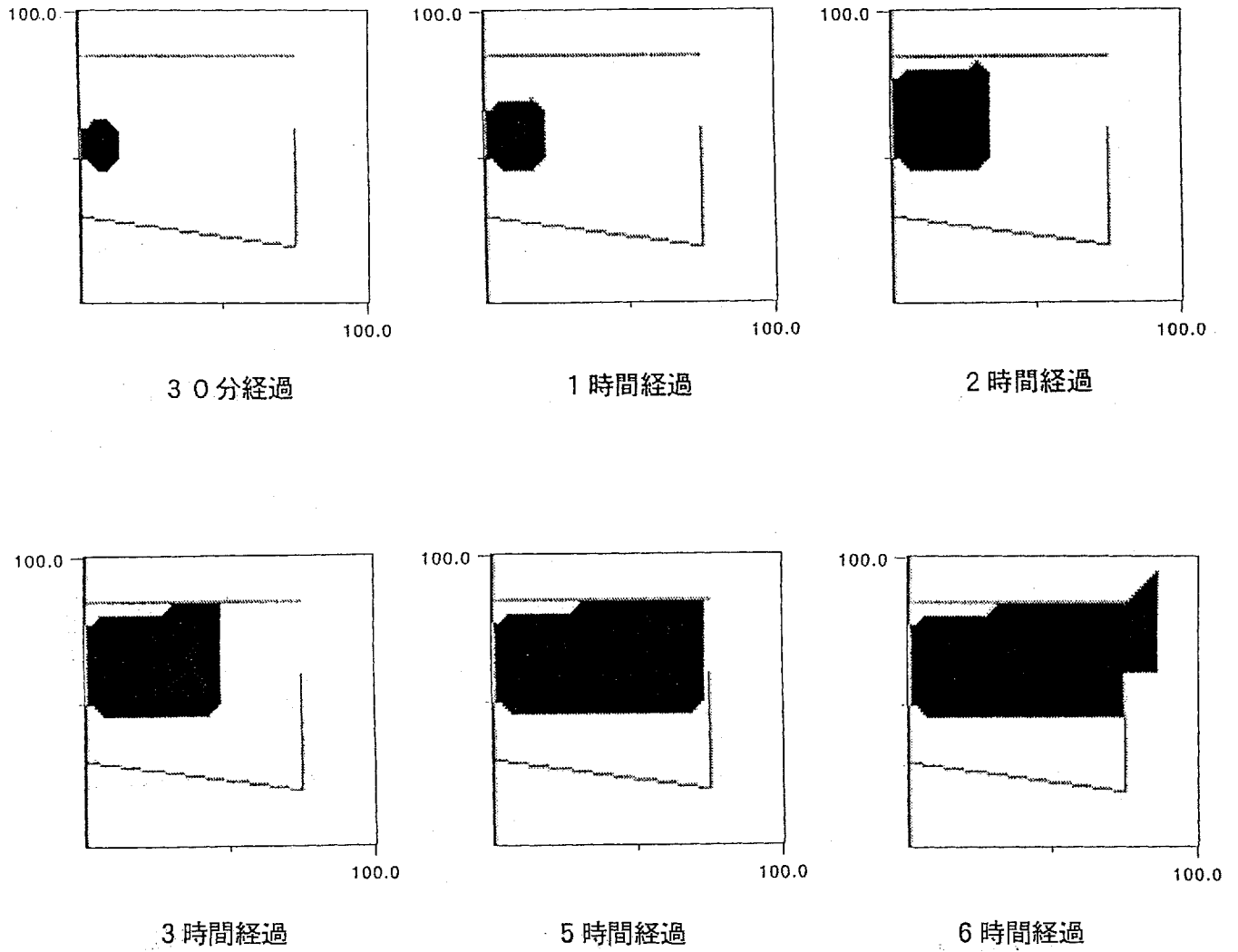


図3 流出油膜の時間変化  
 亀裂面積：0.5 m<sup>2</sup>, 風速：5 m/sec, 風向：北北西

## 今後考慮すべき問題点

このような災害想定シミュレーションにおいて、流出原因を特定することは難しいが、石油コンビナート等災害防止法（昭和50年法律第84号）で定められている基本事項以外に、予防設備について以下のことを留意すべきである。

（1）タンクの破損ができるだけ軽微になるように、タンク壁面、底面の構造および材料を考慮する。例えばタンクの金属製内壁に亀裂ができて油の流出の抵抗となるように、その外側に不燃、不溶繊維のフェルトなどが巻いてあると流出速度を抑制できて応急対策に時間的余裕ができてよい。

（2）もし、タンクから流出した場合、できるだけ防油堤内でくい止める構造上の工夫をする。すなわち防油堤がコンクリート構造であっても地震による損壊が大きくなるような構造にすること。防止堤が最後の砦であるが、防止堤の容量は最大防油堤の容量以上と規定されているが、複数基のタンクから流出した場合、問題である。また、土盛り構造より鉄筋コンクリート構造の方がよいが、伸縮継手や水抜き弁、排水溝から漏洩しないようにすること。

（3）地震等により災害程度が大きく、複数基のタンクが破壊され、防油堤さらに防止堤も損壊して、海上に流出する場合は、いかにその流出速度を抑制して小さくするかが問題で、そのような構造上の対策を必要とする。地震のような瞬時に起きる大きな災害の場合、今次の震災のように防災本部の対応や指令が速やかに行われることは困難であるから、防油堤そして防止堤から海上までの間で油流出を抑制する構造的配慮が必要である。例えば、防止堤が損壊しても海上までの距離が長い、その間の排水路も油の流出を抑制できるように、水のみがくぐりぬける堰構造も必要である。

（4）今次のような大地震になれば、防波堤自身も被害を受ける可能性はあるが、オイルフェンスのような役目は十分にできる。今回の計算結果を見ても明らかなように、防波堤は海上流出被害の拡大を防止する最善の設備である。石油基地の海岸を囲むような防波堤の出口にオイル・フェンスを張るのが効果的である。地震のような非常事態に出動することは困難であるが、オイル・フェンス展開船は災害発生時から遅くとも5時間以内に現場に到達する必要がある。

## おわりに

プロジェクト研究の2年目を終える現段階では、災害規模の時間変化を評価する災害想定モデルが一応できた。石油コンビナート等災害防止法による石油基地の防災対策を今次の阪神淡路大震災のような大規模災害の非常事態に対してまで整備して行くためには、本研究のような災害想定方法が災害の予防対策、災害直後の応急対策、防災組織の見直しに有効である。

## 参考資料

兵庫県石油コンビナート等防災計画：兵庫県石油コンビナート等防災本部（平成元年修正版）  
石油コンビナート等災害想定手法策定業務結果報告書：災害想定調査研究会（昭和58年）



メ 毛

メ 毛

## 工学部公開講座講師紹介

回	氏名	所属・職名	最終学歴	専攻
1	おきむら たかし 沖村 孝	都市安全研究センター 教授	神戸大学大学院工学研究科 土木工学専攻修士課程修了 (1969)	水文学、土質力学、 地形学
2	いわつぼ たくぞう 岩壺 卓三	機械工学科 教授	大阪府立大学大学院工学研究科 修士課程航空工学専攻修了 (1966)	機械力学、制御工学
3	いかに えいじ 筏 英之	応用科学科 助教授	京都大学大学院理学研究科 化学専攻博士課程中退 (1966)	応用物理化学、 応用高分子化学、 有機光化学
4	なかざり しんいち 中桐 信一	情報知能工学科 教授	神戸大学大学院理学研究科 数 学 専 攻 (1973)	解析学、計測・制御工学
5	おおさわ やすはる 大澤 靖治	電気電子工学科 教授	京都大学大学院工学研究科 修士課程電気工学専攻修了 (1971)	電力系統工学、 エネルギー変換工学
6	もりつ ひでお夫 森津 秀夫	建設学科 助教授	神戸大学大学院工学研究科 土木工学専攻修士課程修了 (1976)	交通工学、都市計画
7	もりおま としみち 森脇 俊道	機械工学科 教授	京都大学大学院工学研究科 修士課程精密工学専攻修了 (1968)	生産システム、機械工作、 工作機械、超精密加工、 メカトロニクス、人間工学
8	たまき ひさし 玉置 久	電気電子工学科 講 師	京都大学大学院工学研究科 博士後期課程電気工学専攻 研究指導認定退学(1990)	システム最適化
9	みわ こういち 三輪 康一	建設学科 助教授	神戸大学大学院工学研究科 建築学専攻修士課程修了 (1975)	建築計画、都市計画
10	たかもり とし年 高森 年	情報知能工学科 教授	神戸大学大学院工学研究科 計測工学専攻修士課程修了 (1967)	計測工学、制御工学、 アクチュエータ工学、 メカトロニクス
11	かたおか くにお夫 片岡 邦夫	神戸大学副学長 応用化学科 教授	京都大学大学院工学研究科 化学機械学専攻博士課程 修了 (1968)	移動現象学、 伝熱・エネルギー工学

講義日程・題目及び講師

回	講義日	講義題目	時間	講師
		開講式、概要説明	13:00~13:20	学部長・委員長
1	6月21日(土)	地盤災害の復旧と復興	13:30~15:10	教授 沖村 孝
2		兵庫県南部地震における機械設備の被害およびその原因と対策	15:20~17:00	教授 岩壺 卓三
3	6月28日(土)	兵庫県南部地震にともなう廃棄物の緊急発生とその処分について	13:30~15:10	助教授 筏 英之
4		震災を数学で考える ー複素関数とフラクタルー	15:20~17:00	教授 中桐 信一
5	7月 5日(土)	災害と電力供給システム	13:30~15:10	教授 大澤 靖治
6		公共交通の復興と整備のあり方 ー阪神・淡路大震災の経験からー	15:20~17:00	助教授 森津 秀夫
7	7月12日(土)	製造業における震災復興と今後の危機管理	13:30~15:10	教授 森脇 俊道
8		復興計画支援と進化型計算法	15:20~17:00	講師 玉置 久
9	7月19日(土)	震災復興とまちづくり	13:30~15:10	助教授 三輪 康一
10		大災害時における人間救助ロボット機器はいかにあるべきか	15:20~17:00	教授 高森 年
11	7月26日(土)	石油基地の地震による災害の想定	13:30~15:10	教授 片岡 邦夫
		閉講式	15:20~15:40	学部長・委員長

# 出席カード

出席カード (7月26日)

受講番号

11

氏名

回

出席カード (7月19日)

受講番号

9

氏名

回

出席カード (7月19日)

受講番号

10

氏名

回

出席カード (7月12日)

受講番号

7

氏名

回

出席カード (7月12日)

受講番号

8

氏名

回

出席カード (7月5日)

受講番号

5

氏名

回

出席カード (7月5日)

受講番号

6

氏名

回

出席カード (6月28日)

受講番号

3

氏名

回

出席カード (6月28日)

受講番号

4

氏名

回

出席カード (6月21日)

受講番号

1

氏名

回

出席カード (6月21日)

受講番号

2

氏名

回