

ニューラルネットワークによる モニタリング地震計の配置優先度の決定

Decision making for locating monitoring seismographs by using neural network system

高田至郎*、福家貞二**、福井真二***

By Shiro TAKADA, Teiji FUKU and Shinji FUKUI

Urban lifeline network systems buried in wide area, are considered to be hard to detect seismic damage right after the occurrence of earthquakes. Several seismographs are generally arranged at the vicinity of important facilities of lifeline systems in order to obtain records for seismic ground motions which are greatly related to the earthquake damages. However, it is neither economical nor possible to arrange many seismographs at every site for the whole areas in lifeline systems. In this paper, we have developed the method to judge the optimum installing locations and the priority of seismographs for a given spacing by using the neural network system with a pattern recognition of earthquake damages to lifeline systems during recent severe earthquakes.

Keywords: seismic monitoring, neural network, priority of arrangement

1. 緒言

都市におけるライフラインシステムは広範囲にわたって地中管路が巡らされており、地震が発生し被害が同時多発した場合に被害箇所を早期に把握することが極めて困難である。被害箇所把握の遅れは2次災害を誘発し、後の復旧作業に影響して、システム本来の機能を回復するのに相当日数を費やすことになる。本研究で対象とする主要なライフラインはガス供給システムであるが、例えば1978年の宮城県沖地震¹⁾におけるガス供給機能回復日数に1ヶ月の日数を費やしており、電力システムが約1週間で回復したのに比し5倍程度の時間を要している。このような状況の中、1987年の千葉県東方沖地震後、ガス事業者の重要課題として遠隔監視地震計設置の必要性が取り上げられている²⁾。しかし現状では、地震動記録の収集のために計器を設置している場合が大半であり、モニタリングシステムとして地震計配置を考慮しているケースは少なく、首都圏におけるガスシステムやJRシステムにその本格的導入が検討されている段階にある。

そこで本研究では、モニタリング地震計は、他の条件が同じであれば、ライフライン被害の生じやすい地点に設置するのが良いとの基本的考え方を導入し、これまでに蓄積された地中管路の被害調査データから、過去の経験を生かすといった意味においてニューラルネットワークを用いることにより最も適切な地震計設置の地点および設置優先順位を決定する手法を提案する。モニタリング地震計の有無に係わらず直接被害は同様である。地震計情報は被害の発生している区域をいち早く特定して、緊急対応に役立てる目的を有するものであり、本研究では被害の生じやすい地点に設置するとの考え方を基礎にしている。本手法によれば地中管路

* 正会員 工博 神戸大学工学部建設学科 教授 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)

** 正会員 大阪ガス(株) 供給部中央指令室 (〒541 大阪市中央区平野町4-1-2)

*** 学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)

被害の原因となっている多数の定性的な要因（地盤条件、管種等）の分析を、バックプロパゲーション法を用いて学習することで、学習した結果を使って新たな条件の下における地中管路被害発生程度の予測を行うことが可能である。

本論文ではニューラルネットワークを用いることの有効性と、地中管路の被害に関する要因分析結果を述べ、現実のライフラインシステムを取り上げてその被害の可能性を予測するとともに、地震計の配置応用例を示す。

2. 要因分析に用いるニューラルネットワークの意味と手法の位置づけ

(1) ニューラルネットワークの概略^{3)、4)、5)}

人間の神経細胞（ニューロン）のモデルを用いた人工のシステムとしてのニューラルネットワークの特徴は、第一にその並列分散情報処理能力にある。神経回路網における並列分散処理の様式として、競合と強調によるものが考えられるが、これは、相互に結合した回路網の内部で、可能な決定をめぐって情報が競合するとともに強調し合い、回路網の力学過程を経て一挙に結論を出す方式である。図1には並列分散処理システムとしての脳のモデルを示した。これによって多量の情報を安定して処理することが可能となり、多変量解析や不確定性を考慮した要因分析を行うことができる。

第二の特徴は、学習能力と自己組織化能力を持つことである。脳は、外界や環境との相互作用を通して様々な事項を学習し、その情報を記憶、自己組織化してゆく。このメカニズムは基本的にニューロン間のシナプス結合の強さの変化や、新しいシナプス結合の形成などのハードウェアの可塑性によるものと考えられている。図2に入力 X_i が重み W_i のもとに結合されて出力 y を創出するニューロンのユニット模式図を示した。ここで、ニューロンの学習とは、情報処理システムの目的に合うよう合目的に各ユニット間の結合荷重を調整することで、そのプロセスは一般に、ランダムな値の結合荷重の初期設定を行った後この重みに対して学習データを入力し、評価基準を参照して評価を行い、次に評価結果に基づいて重みの値を調整し、再

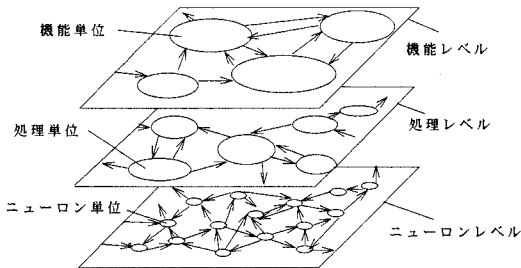


図1 並列分散処理システムとしての脳のモデル

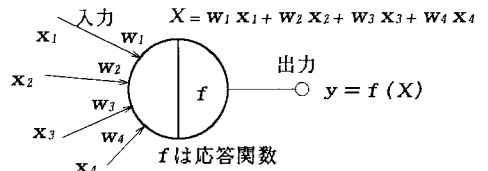


図2 形式ニューロンのユニット模式図

評価を行うといったプロセスを繰り返して次第に最適な値に近づけるといふものである。

本研究では入力層、中間層、出力層からなる3層のネットワークを用いており、以下より示すバックプロパゲーション法による学習を行っている。

(2) バックプロパゲーションのアルゴリズム³⁾

バックプロパゲーション法による学習は以下の手順で行われる。

①入力層にある信号を入力する。

②ニューラルネットワークのダイナミクスに従って入力層から出力層へ向かっての信号伝送過程に伴う各ニューロンの状態変化を順次計算する。

③②の計算の結果得られる出力層の*i*番目のニューロンの出力を O_i とし、入力信号に対するそのニューロンの望ましい出力（出力教師信号）を d_i とすると、望ましい出力と実際に得られた出力との二乗平均誤差は、出力ユニット数*n*とすれば、

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - O_i)^2}{n}}$$

である。バックプロパゲーション法は、上式の二乗平均誤差を極小化するように、すなわち実際の出力が望ましい出力に限りなく近づくようにネットワークのシナプス結合（*w*セット）を変化させる手法である。図3に上記のプロセスを示した。

（3）地中管路被害要因分析手法としてのニューラルネットワーク

地震による地中管路の被害は、云うまでもなく当該地点での地震動強度に影響を受ける。さらに埋設地点の地盤条件や管・継手の強度等種々の要因によるところも大きく、被害程度と被害区域の予測は困難な作業である。これまでも地震による地中管路に及ぼす種々の要因分析については、理論あるいは実験的な手法とともに実地震管路被害資料の統計的処理による手法を用いて検討されてきており、被害マトリクス法⁶⁾、数量化理論法⁷⁾などが代表的な手法である。地中管路被害の起因する要因には、地震の強さ、管敷設地点の地盤の種類や強度、地形状況、管の材質や口径並びに管の敷設密度等が列挙されるが⁷⁾、現実にはこれらの要因が相互に関連しあって被害が発生するため、被害分析はこれらの要因を個々に解析するのではなく、同時に解析すべきである。このような解析手法として多変量解析手法による重回帰分析が考えられるが、地中管路の被害に関する要因分析では、先に述べたように地盤種別や地形情報等、定量的に与えられない要因が含まれるために、分析対象と要因がともに数量として扱われる重回帰分析への適用は難しい。

ところで図4に示すように、過去の被災データの蓄積によって、ライフライン事業者のエキスパートらは自己経験と勘から、被害の状況ある程度判断することが可能である。これに対しニューラルネットワークでは信頼できるデータベースが揃っている場合、データを学習することによってエキスパートの代役としての機能（不確定要素を含めたライフライン被害予測の認識機能）を期待できる。地震時に、ある条件下での地中管路被害が1対1に推定できるとは

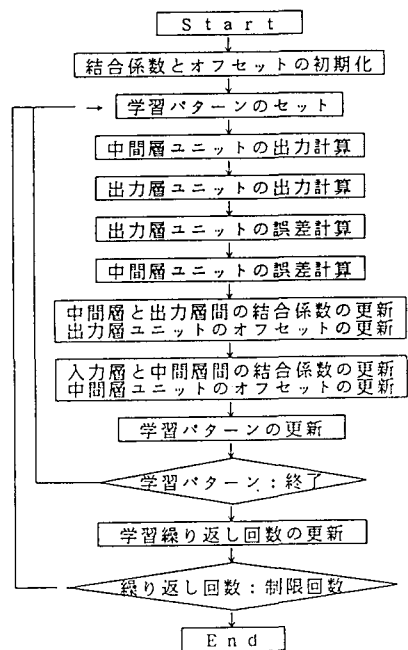


図3 バックプロパゲーション学習フローチャート

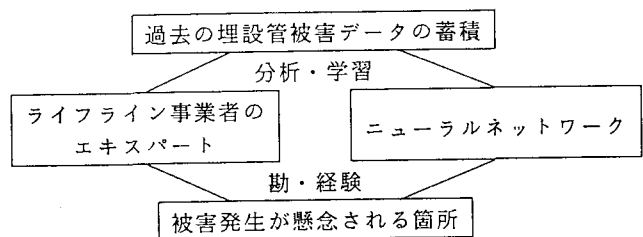


図4 ニューラルネットワーク手法の位置づけ

限らず、被害要因の不確定性によるところが大きいのが、人間が経験的に判断する場合「当たらずとも遠からず」といった表現にみられるように、脳の並列情報処理能力と記憶による自己組織化能力は非常に優れたものであり、本研究の目的はニューラルネットワークにより人間（エキスパート）の代役を実現するものである。なお、本研究では地中管路の被害予測を厳密に行う目的のものではなく、被害程度の推定をモニタリング地震計の配置に利用しようとするものとする。したがって、ニューラルネットワークによって分析するのは、①被害発生が懸念される箇所、あるいは②地中管路被害の波及影響をとくに軽減すべき箇所であり、エキスパートの勘と経験の代わりに総合判断し、適切な地点に地震計を設置して、その地点における正確な地震動強度情報を得て緊急対応や復旧計画に取り込むことで地震計設置の有効性を明らかにするところにある。

3. ニューラルネットワークによる要因分析

従来の研究において、地中管路に被害を与える要因として、地盤に関するものとしては、地盤の卓越周期や沖積層厚、あるいはN値等が用いられ、1kmメッシュが単位として扱われている場合が多い^{7)・8)}。文献7)では1メッシュ当たりの地中管路敷設延長距離が取り込まれているが、敷設延長の短い方が被害率が大きくなって、延長がある程度以上でないと平均化されないなどの不都合が生じることも知られている。本研究では、地中管路被害の波及影響をとくに軽減すべき箇所をも推定することを考慮し、以下に示す7項目を選択した。もちろん下記以外の要因も考えられるが、分析に用いる学習データ並びに予測対象地域において調査・測定可能であり、要因が互いに独立していること、すなわち要因間の関連が極度に強くならないことを配慮している。

(1) 分析に用いた要因

a) 地盤種別

一般に表層が軟弱である地盤は、地震動の増幅特性が顕著であり、沖積層で被害が大きくなる傾向がある。地盤種別はこれまでの要因分析においても取り上げられた項目であり、ここでは道路橋示方書⁹⁾に示される以下の3つのカテゴリーに分類している。

- i) I種：岩盤相当の洪積地
- ii) II種：I種、III種以外
- iii) III種：軟弱地盤（主として人工地、埋立地）

b) 微地形区分

1964年新潟地震¹⁰⁾や1983年日本海中部地震¹¹⁾での被害調査でも指摘されているように、液状化によって地中管路の被害が極端に増加することは明かである。地震時の地盤液状化予測については、液状化履歴調査と地形・地質との関係による予測手法¹²⁾や、土質調査に基づく限界N値法¹³⁾等がある。図5にそれらの成果の一例として液状化面積と微地形の関係を示す。本研究では過去の被害データおよび予測地域での地盤データの得やすさから、微地形区分によって液状化発生が予測される地域を考慮する¹⁴⁾。

- i) A：液状化する可能性が高い

(旧河道・現河道・砂丘間低地・人工地・埋立地・低湿地)

- ii) B：液状化する可能性がある

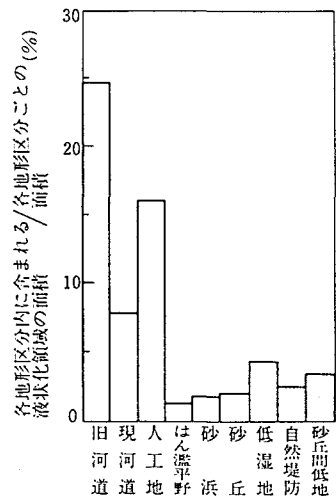


図5 新潟平野における液状化面積と地形との関係¹²⁾

{扇状地・自然堤防・砂丘・砂州・氾濫平野・砂浜}

iii) C: 液状化する可能性が低い

{山地・丘陵・台地}

c) 地盤急変部の有無

過去において行われた地盤の特性と被害率の相関分析に関する考察⁸⁾では、ある地域を構成する地盤性状の分布の不均一さの程度と被害率の間に、ある関係の存在することが示された。1978年宮城県沖地震調査報告¹⁾からも指摘されているように、丘陵地の宅地造成地で切土、盛土が行われた大規模な地盤の加工を伴った場所での被害が著しい。このことから、地中管路の被害は、「地盤性状の分布の不均一さの度合いに支配される」とし、被害要因の一つとして1メッシュ内における地盤急変部の有無を設定した。

d) 活断層の有無

最近の地質学的調査と活断層の調査の進展にともない、大被害をもたらす内陸地震は、地殻の上部（多くは深さ10~20km）にある断層の急激な変位に起因するものであること、その断層のうち大規模なものは「活断層」として地形・地質学的にその性質をあらかじめ知り得ること、その結果内陸の活断層の場合、その同じ断層が大被害地震を起こす時間間隔は、数百年から数万年以上の長いものであることなどが明らかにされている¹⁵⁾。日本では地表面断層運動に伴う地中管路被害の例は多くないが、米国サンフェルナンド地震や、中国唐山地震の折には活断層運動による被害が数多く報告されている¹⁵⁾。地中管路の被害発生が懸念される箇所としてこのような活断層の存在は無視できず、本研究においても地中管路被害要因に設定している。

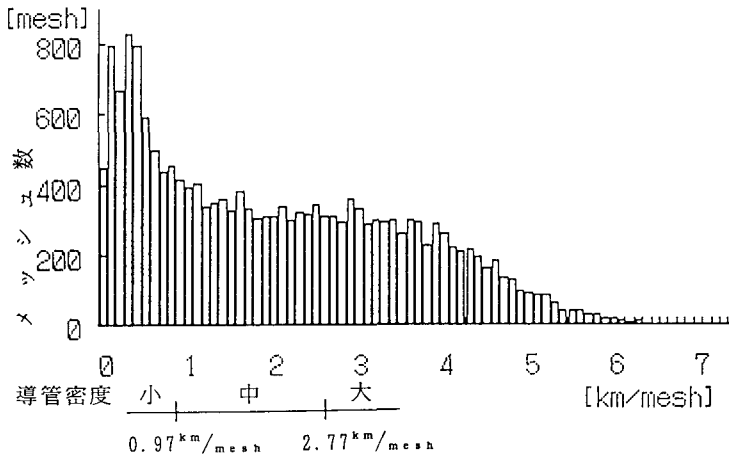


図6 メッシュ別導管延長の分布

e) 地中管路敷設密度

ニューラルネットワークの要因分析目標の一つとして管被害の波及影響をとくに軽減すべき箇所を設定しており、これについては地中管路の敷設密度に関する項目を取り上げた。例えば図6は、要因分析の対象地域におけるガス導管の1メッシュ当たりの敷設密度の頻度分布を表すものである（ただし1メッシュ382m*308m）。図6を利用して導管の総延長に対する分布から、密度面積が3等分される領域で相対的に導管密度を区分した。本区分は相対的な導管密度に対する尺度であり、同様の尺度を各データに用いる限り結果に影響を及ぼすものではない。

f) 地中管路および継手強度

千葉県東方沖地震では導管ねじ継手部における被害が顕著であった。埋設された管路の種類や継手特性により管体の耐震性が異なるため、要因分析ではライフラインの構造要素に関するものとして、管・継手の強

度特性についての項目を取り入れることは必至と考えられる。そこで本研究では管体の地震に対する強度および継手の性能に関し以下のように設定した。

- i) 強：鋼管溶接継手、ポリエチレン管、铸铁管伸縮メカニカル継手
 - ii) 中：铸铁管メカニカル継手
 - iii) 弱：铸铁管印籠型継手、鋼管ねじ継手
- g) 震度階

地中管路の被害が地震動強度の影響を受けることは改めて述べるまでもない。文献7)における要因分析においても震度の水道管被害率に対する影響は最も大きく震度 k が0.225を越えると影響が急激に大きくなるこ

表1 ニューラルネットワークによる
分析に用いる要因

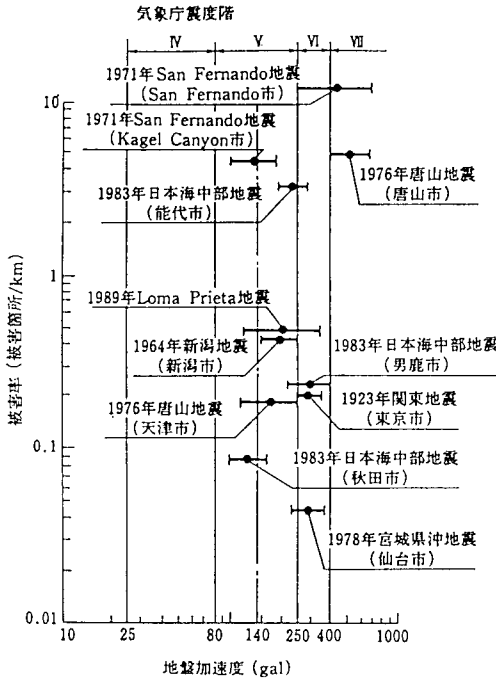


図7 ガス铸铁管の被害率と震度階¹⁶⁾

とが示されている。図7には過去の主要被害地震におけるガス铸铁管被害率と地盤加速度の関係を示す。被害率は地動加速度よりもむしろ地動速度との相関も強いと考えられる。

そこで本研究において地震動加速度あるいは速度に関わる項目として、気象庁震度階による強度区分IV~VIの4つのカテゴリーを導入した。

- i) 震度IV (25~80gal)
- ii) 震度V⁽⁻⁾ (80~150gal)
- iii) 震度V⁽⁺⁾ (150~250gal)
- iv) 震度VI (250~400gal)

以上7要因を入力するものとし、出力を被害程度とする。学習データである被害程度の与え方は上記e)に準ずるものとし、被災地域を1kmメッシュに分割したときの1メッシュ当たりの被害件数に対する分布から相対的に決定している。したがって学習値に用いる過去の被災データは各地震被害において別個のものとして取り扱うこととする。入力要因と出力要因を一覧して表1に示した。

・入力要因

地盤に関するもの					
要因	地盤種別			地質急変部	
入力	I種	II種	III種	有	無
要因	微地形(液状化)			活断層	
入力	A	B	C	有	無

システムに関するもの

要因	埋設管敷設密度			
入力	大	中	小	
要因	管・継手強度特性			
入力	強	中	弱	
地震動強度に関するもの				
要因	震度階			
入力	IV	V ⁻	V ⁺	VI

・出力要因

相対的な埋設管被害程度				
出力	大	中	小	無

(2) 要因分析に用いる学習データ

ニューラルネットワークによる過去の地中管路被災データを学習することで不確定要素を含めた被害要因分析を行うために、信頼性のある学習のための教師値としてのデータベースを作成する必要がある。そのために、本章(1)項において列挙した入力要因が視覚的にかつ定量的に正確に得ることの可能なガス管あるいは水道管被害調査資料は次の4地震におけるものであった。以下に各地震の被害の特徴をまとめる。

a) 仙台市ガス管(1978年宮城県沖地震)^{11)、6)、8)}

仙台市における導管被害の特徴は、丘陵宅造地に被害が多発し、中でもねじ接合鋼管に折損・亀裂被害が集中したことである。仙台市以外の他市では軟弱な埋立地や河川沿いの沖積地に被害が集中しており、地中管路の震害が地盤・地質・地形に密接に関連していることを改めて示すものであった。

b) 能代市水道管(1983年日本海中部地震)^{11)、18)}

能代市については、地盤に関する豊富な資料をもとに行われたT S (Tapered Solvent) 継手を有する塩化ビニル管の被害調査および耐震解析に関する文献¹⁷⁾を利用する。文献¹⁷⁾では能代市の地盤状態と管路被害の関係が調べられ、日本海中部地震の特徴でもある液状化や、それに起因する地盤変状と管路の被害との関連について有効なデータを提供している。

c) 東金市ガス管(1987年千葉県東方沖地震)²⁾

東金市は台地の境界部の急変地盤と低地の平野の両方が存在し、管被害はこれらの急変部に集中している。この地域の口径80mm未満の小口径管はねじ接合鋼管が主体であるが、一部地域はLM継手を使用しており、急変地盤でも被害がなかったため、メカニカル継手の耐震性が評価されている。

d) 中国唐山市水道(1976年中国唐山地震)

本地震はM.7.8で市の中心部で発生し、市内の建物はほとんど崩壊した。極震区の震度がX~(MM震度階)と記録されており、断層による構造的な地盤亀裂、地盤沈下、液状化による被害が顕著であった。給水管路については口径20~600mmの铸铁管が主で、鋼、PRC、RC、VP等が用いられているが、平均被害率が4.61箇所/km

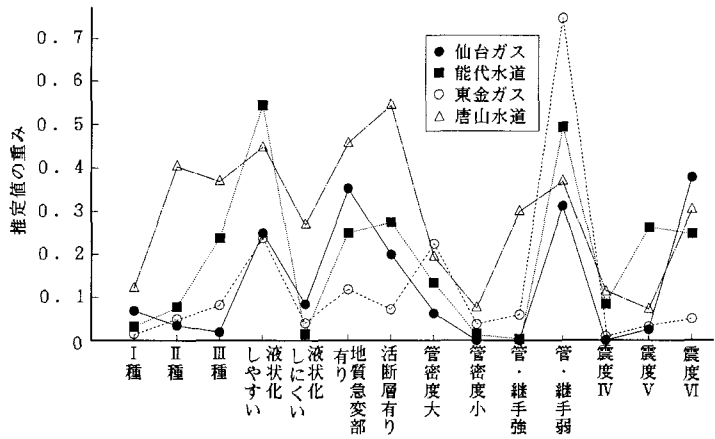


図8 被災地データ別の入力要因影響度

とかなり高く、地盤の激しい変状による影響が大きい。

(3) 要因分析結果

作成したニューラルネットワークは、入力層ユニット数20、中間層ユニット数40、出力層ユニット数4の3層構造とし、590個の学習データにより10万回のバックプロパゲーションを行った。中間層の数は20~50で10つつ変化させて試行錯誤的に打ち切り誤差の少なくなるユニット数を捜し、ここでは40を採用した。被害要因の不確定性を考慮するためニューロの「ゆらぎ」を利用

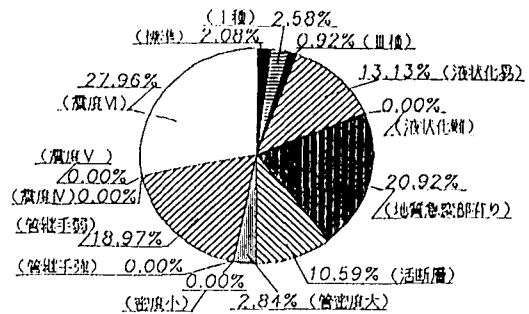


図9 被害の起因する入力要因別相対的格差

するものとして、二乗平均誤差を0.3で打ち切っており、学習回数は誤差0.3に至るまでのバックプロパゲーションの回数を示している。本打ち切り誤差は十分な精度をもつものではないが結果は従来の経験・解析から逸脱したものではない。

次に、完成した被害要因分析ニューラルネットワークにおける各入力要因の被害程度に対する影響の度合いについて考察する。図8は被災地域別にみた場合の、入力要因が被害程度への出力値に及ぼす影響を示すものである。図中の推定値は出力層の重み係数である。同図によれば、各市における管被害の特徴が明確に表れており、学習が正しく行われたことが認められる。また、図9には入力要因が被害程度に起因する相対的格差（推定値の重みの和に対する割合）を示した。これより、震度の影響が最も大きく、以下地盤急変部、管・継手強度、液状化の可能性といった要因が地中管路の被害に影響していることが知られる。

以上、本研究で試みたニューラルネットワークを用いた要因分析によって、これまでの文献（例えば6）、7）、8）から指摘されている事実と合致する結果が得られた。しかしながら、入力要因の選定等にいくつかの課題が残されており、先の4地震以外の被災データを用いれば入力要因の影響度が変化することも当然考えられる。これについてはニューラルネットワークの長所である知識更新による学習能力を用いることによ

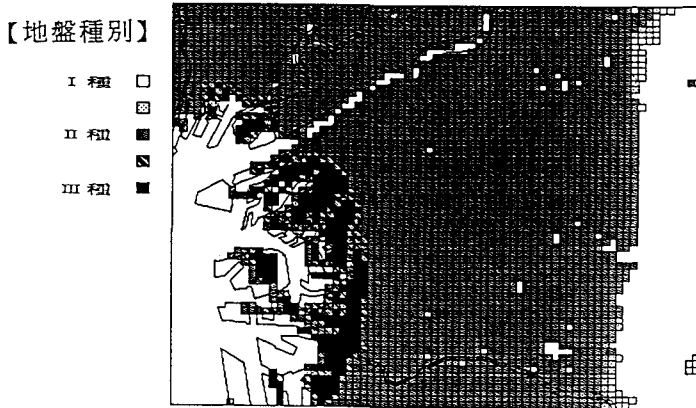


図10 大阪湾岸域における地盤種別

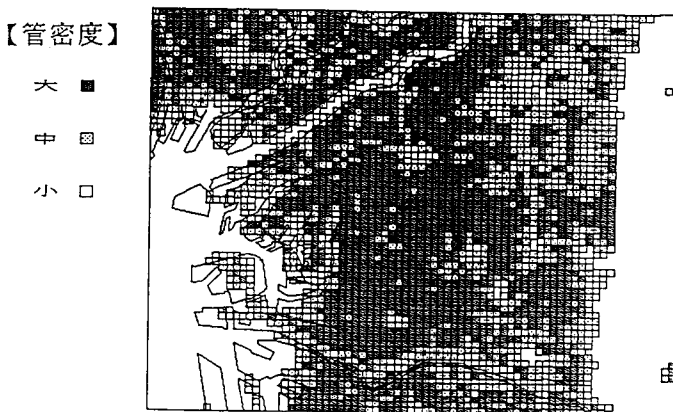


図11 大阪湾岸域におけるライフライン敷設密度

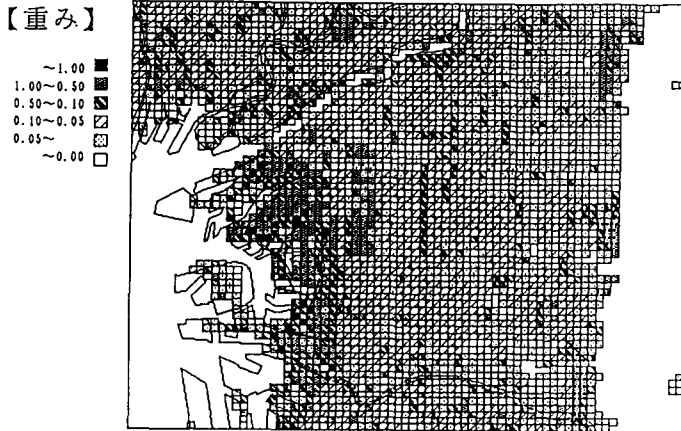
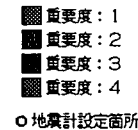


図12 大阪湾岸域におけるライフライン被害発生の可能性パターン

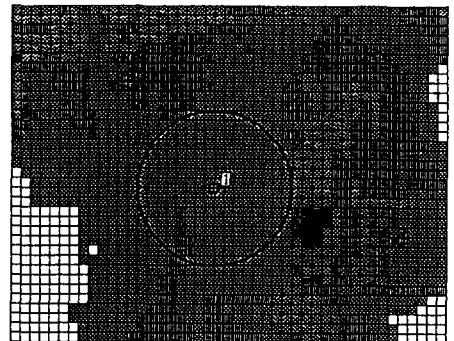
り、学習データの追加や修正を行うことでより精度良くかつ1地域の被災データに偏りすぎない被害推定を行うことが可能と思われる。

4. ニューラルネットワーク要因分析の適用例

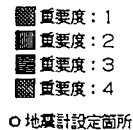
開発したニューラルネットワーク要因分析を実際に大阪湾岸域における地中管路の被害の可能性分析として適用する。対象地域を約382m*308mのメッシュに区分し、各メッシュ毎に地盤種別(図10)、微地形、地盤急変部、活断層、管路延長密度(図11)、管強度についてのパターンを与えた。震度については、一般に地中管路被害の発生する加速度の閾値が250gal前後と考えられることを考慮して、対象地域全体が一様に震度V⁽⁺⁾の地震を受けたものと想定している。このとき管路被害発生の可能性地域パターンは図12のように得られる。図12から、液状化の危険性の高い区域(大阪湾岸や河川流域)、東部の地盤急変部、また低強度の管が敷設されている区域での重み(被害の可能性)が高くなっており、本手法の妥当性が確認される。また被害の波及影響が懸念されるこのことを考慮した管密度の大小についても、とくに東部地域での相関がみられ、本研究の目的(有



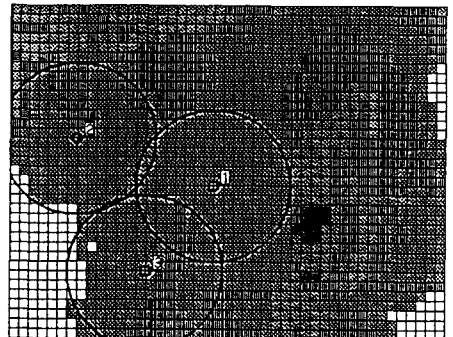
占有率=25.46%



(a)優先順位1番の設置点

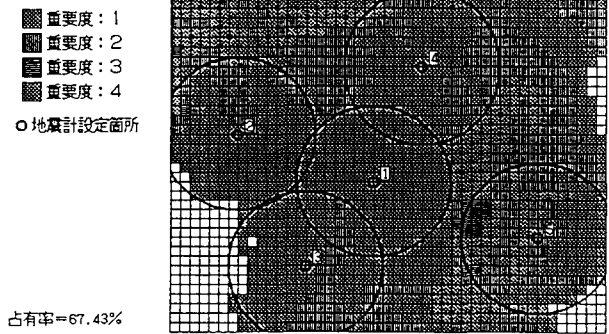


占有率=47.68%



(b)優先順位3番の設置点

効な地震計の配置)に対し満足いく結果が得られた。逆に、図11の中央部では管敷設密度が大きいものの、被害発生の可能性が低い。このことは、中央部における他の要因、例えば地中管路が高強度であることや、地盤急変部が存在しないこと等が影響しているものと思われ、ニューラルネットワークによる要因分析が適切に行われていることが伺われる。



(c)優先順位 5 番の設置点

図13 地震計優先度決定手法

5. 地震計の最適配置

本研究の目的とするところは、被害発生が懸念される箇所、あるいは地中管路被害の波及影響をとくに軽減すべき箇所を、エキスパートの勘と経験の代わりにニューラルネットワークによって総合判断し、適切な地点に地震計を設置してその地点における正確な地震動強度情報を得て緊急対応と復旧計画に取り込むことで地震計設置の有効性を明らかにするところにある。大阪周辺での被害発生パターンとして得られた図12は、換言すれば地震動をよりの確に知る必要性を示す度合いであり、地震計設置必要度と定義できる。著者らが提案した、経済的効果を

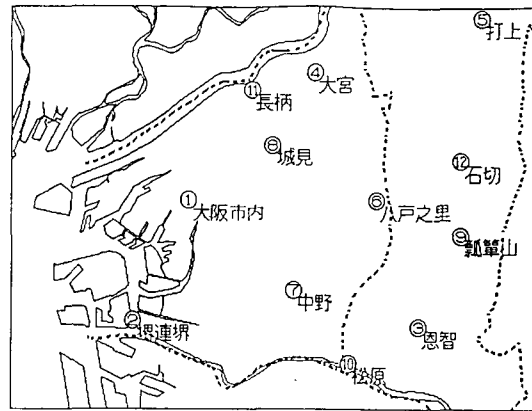


図14 地震計設置点と優先度の決定結果

考慮した地震計の配置間隔²¹⁾が、ひとつの地震計が捉えることのできる地震動の最大範囲を表すと考えれば、地震計を中心にして配置間隔を直径とする円に含まれるメッシュの重み(地震計設置必要度)の総和は、その地震計のもつ寄与率と考えられる。かかる寄与率の高い地点から地震計を設置してゆけば、地震計の設置優先度が決定できるものとする。ただし、円の中に既に含まれている地域は次の設置点を中心とする区域にできるだけ含まれないように寄与率の順位を考慮しながら決定している。このような手法を図13(a)~(c)に示す。これらは地震計設置間隔半径を8メッシュとしたものである。当然のことながら、地震計寄与率を求める円はなるべく重複しない方が経済的に有効となる。

対象地域に地震計を設置する場合、図12を用いて上記手法を適用すれば、例えば設置間隔5kmとした場合に図14に示すように地震計設置地点と優先度が決定される。これは被害発生が懸念される箇所、および地中管路被害の波及影響をとくに軽減すべき箇所を同時に満たすものであり、効果的なモニタリング地震計の設置手法であるといえる。

6. まとめ

ライフラインにおけるモニタリングシステムに関して地震計の配置優先度をニューラルネットワーク手法を用いて検討した。研究成果は以下のように要約される。

- (1) 管路被害に影響を与える主要な7項目を設定し、過去の管被害データに基づいてニューラルネットワークシステムを開発した。そのシステムは従来の別手法による要因設定の困難を克服するとともに妥当な結果を与えることを明らかにした。
- (2) 開発されたニューラルネットワークシステムを用いて、ライフラインの敷設されている地域メッシュに重みを与え、一つの地震計が周辺地域の管路被害の軽減に果たす役割を重みの合計（寄与率）として定義し、寄与率の高い地点が地震計配置の優先度の高いものとする考えを示した。
- (3) 本研究での手法、考え方を特定の広範な地域に適用してモニタリング地震計の配置優先度の決定法に関して具体例を示した。

地中管路地震被害資料を、過去に受けた教訓として生かす意味から、学習機能を有するニューラルネットワークを用いることによって地盤条件等の定性的な要因を考慮した被害要因分析を行い、被害推定例を示した。本研究では約600地点でのデータをもとにして学習を実行したが、さらに利用し得るデータが収集されれば、ニューラルネットワークの知識更新機能を利用することで、新たなデータの追加、あるいは修正を行うことによって既成の予測手法（例えば8）とは異なったアプローチによる被害率予測法の可能性を十分に有している。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告、1980. 2.
- 2) 日本ガス協会関東中央部会：千葉県東方沖地震と都市ガス、pp. 223-226、1988. 6.
- 3) 合原一幸：ニューラルコンピュータ 脳と神経に学ぶ、東京電気大学出版局、pp. 110-112、1988.
- 4) 甘利俊一：神経回路網の数理、産業図書、1988.
- 5) 中野肇、飯沼一元、ニューロンネットワークグループ+桐谷滋：ニューロコンピュータ、pp. 12-84、1989.
- 6) 片山恒雄、増井由春、磯山龍二、甚内郁郎：1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧 -都市ガス施設-、生産研究 第31巻第2号、pp17-40、1979.
- 7) 市原松平・山田公夫：地震時における名古屋市の水道管の相対危険度、土木学会論文報告集 第316号、pp. 51-63、1981.
- 8) 西尾宣明：埋設管の地震時被害率予測法に関する一提案、土木学会論文報告集 第316号、pp. 1-9、1981.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990. 2.
- 10) 日本瓦斯協会：新潟地震と都市ガス、1965. 6.
- 11) 土木学会：1983年日本海中部地震震害調査報告書、1986. 10.
- 12) 佐藤弘行、岩崎敏男、常田賢一：流動化履歴地点の地盤特性（その5）、土木学会第36回年次学術講演概要、1981
- 13) 小泉安則：新潟地震における砂の密度の変化、土と基礎、Vol. 13、No. 12
- 14) 地震予知総合研究振興会：地中設備大規模地震被害想定作業報告書、1986. 4.
- 15) 地震予知総合研究振興会：近畿地方における地震活動調査、1985. 5.
- 16) 高田至郎：ライフライン地震工学、共立出版、p. 23、1991. 9.
- 17) 高田至郎、永井淳一、田辺揮司良：塩化ビニル管の地震被害と耐震解析、建設工学研究所報告第27号抜刷、1985. 12.
- 18) 能代市：能代市の災害記録、1984. 12.
- 19) 孫建生：地盤変状を受ける地中構造物の耐震診断エキスパートシステム構築および対策に関する基礎的研究

究、神戸大学博士論文、pp.20-28、1991.3.

20)久保慶三郎・片山恒雄：地下埋設管の被害、東京区部における地震被害の想定に関する報告書（東京都防災会議の同名報告書、第5章）

21)Takada,S., Takatani,T., Fuke,T., and Fukui,S., An estimating method of predicted seismic ground motions and arrangement of remote monitoring seismographs for early detection of earthquake damage, Proc. of 10th WCEE, Vol.IX, pp.5569- 5575, July 19 - 24, Madrid, 1992.

(1993年9月16日受付)