

モニタリングシステムにおける 地震動補間法と精度の検証

AN ESTIMATING METHOD OF SEISMIC GROUND MOTIONS FOR MONITORING SYSTEM

高田至郎*、高谷富也**、小川安雄***、福井真二****

By Shiro TAKADA, Tomiya TAKATANI, Yasuo OGAWA and Shinji FUKUI

It is important to obtain various information of earthquake damages to lifeline systems as quickly and accurately as possible in order to make quick functional recovery for damaged lifeline facilities. Generally several seismographs are installed in the vicinity of important facilities of lifeline systems, but it is not easy to predict seismic ground motions of all over area (the area without seismographs) from these limited seismographs. This paper proposes a method to estimate seismic ground motions at arbitrary locations by using remote monitoring seismograph data observed at limited locations. In this proposed method, the shape interpolating function is applied to the estimation method of seismic ground motions. In addition, we investigate the estimating accuracy by practical observed data.

Keywords : seismic monitoring, estimation of motion, interpolating function

1. はじめに

電力、ガス、水道、通信などのライフライン事業者においては、都市部およびその周辺地域に独自の地震観測網を巡らし、観測データの蓄積を通じて自社保有のライフライン構造物の地震時挙動解析や被害予測などに適用している^{1)・2)}。しかし、ライフラインネットワークの広がっているあらゆる地点に地震観測用機器を設置することは経済的に不可能である。観測機器の設置法に関しては、著者らは既に「遠隔監視地震計の最適配置手法」として提案している³⁾。従来は重要な構造物や施設などを選んで観測用機器を設置せざるを得なかったため、地震直後における被害状況の把握や復旧戦略の策定などの面から、限られた地点に設置された観測機器からの実測データを用いて、供給地域全体における加速度、速度あるいは震度階分布などを推定する必要がある。このため、近年、確率過程論に基づいて限られた地点の地震動波形より任意地点における地震動を推定する研究^{4)・5)}が盛んに行われてきている。しかしながら、これら確率過程論に基づいた地震動波形解析にはかなりの時間を要するものと考えられるため、著者らが提案しているライフライン施設に対する早期被害把握のための地震動強度の推定への適用には問題が残る。

このような状況を考慮して、本研究では都市部およびその周辺地域に分散して設置されている加速度計、速度計、あるいは震度計といった地震観測機器による実測データから、マイクロゾーニング技法に用いられている地震動の増幅特性を表す地盤パラメータ⁷⁾を用いて、任意地点における加速度を推定する一手法を提

* 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 学博 舞鶴工業高等専門学校 土木工学科 講師

*** 正会員 大阪ガス(株) 供給部供給技術センター

**** 正会員 工修 清水建設(株) 土木本部設計第2部

案するものである。この手法により、点データであるモニター地震計の加速度記録が供給地域全域の面データに拡張されるため、限られた加速度記録よりある地域全体の加速度、あるいは震度階分布を推定することが可能となる。本研究では、その手法を概説し、いくつかの適用例を示すとともに実地震データを用いた推定精度の検証を行う。なお、上述したように確率過程論に基づいた地震動波形の推定法を用いることは時間的な制限により適用が難しいと考えられるため、波形解析による補間についても考察を加える。

2. 推定手法

本研究で提案する地震動推定手法は、有限要素法や境界要素法に用いられている形状補間関数^{*)}を用いて行うものである。形状補間法は、離散的な形で与えられた関数の離散点の間の値を補って連続関数として扱うための技法で、有限要素法においては、節点における関数値の間を補って要素内の連続関数を作る技法として極めて重要である。

いま、図-1に示すような4地点の最大加速度値が与えられた場合、補間関数を用いれば次式より容易に任意地点における最大加速度 A_{max} が求められる。

$$A_{max}(\xi, \eta) = N_1(\xi, \eta) A_1 + N_2(\xi, \eta) A_2 + N_3(\xi, \eta) A_3 + N_4(\xi, \eta) A_4 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、
 $N_1(\xi, \eta) = 0.25(1-\xi)(1-\eta)$, $N_2(\xi, \eta) = 0.25(1+\xi)(1-\eta)$,
 $N_3(\xi, \eta) = 0.25(1+\xi)(1+\eta)$, $N_4(\xi, \eta) = 0.25(1-\xi)(1+\eta)$

また、 A_i ($i=1\sim 4$) は i 番目の観測地点における最大加速度値である。

ところで、実際の観測地点が図-1に見られるようにちょうど正方形の4頂点上に設置されていることはない。したがって、上述の推定法を任意形状の4節点四辺形に対する推定法に修正する必要があり、次に示すアイソパラメトリック要素^{*)}を用いることによって全体座標系における観測機器の位置を局所座標系での4節点に写像する。

いま、図-2の全体座標系に示すような四辺形の各頂点上に4箇所の観測地点が存在するものとする。このとき(1)式を用いた加速度値の推定を行うためには、4箇所の観測地点と同図の局所座標系あるいは図-1に示す4節点の位置との写像を考えればよいことがわかる。この場合、座標変換を行うことにより図形をゆがめ、距離を不正確にすることで、波動論的には問題が残るものの、全体座標系における (x, y) という地点が局所座標系の (ξ, η) の点に相当することがわかれば、(1)式より容易に (x, y) における最大加速度値が容易に推定できる。任意点における加速度値を節点における加速度値で補間したのと同様に、全体座標系の座標成分を節点における座標成分を用いて局所座標系と次のように関係づける。

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) x_i, \quad y = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) y_i \quad \dots\dots(2)$$

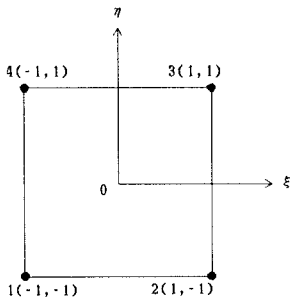


図-1 4箇所の加速度観測地点

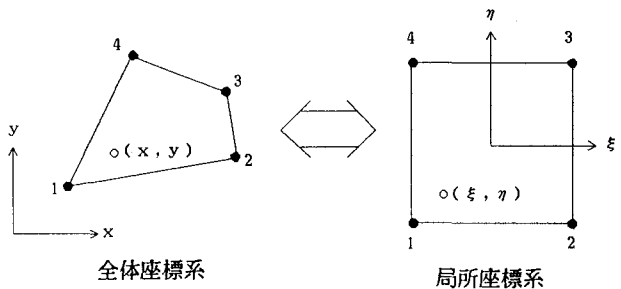


図-2 全体座標系と局所座標系

ここに、 x_i, y_i はそれぞれ i 番目の観測地点の x 座標値および y 座標値である。また、 $N_i(\xi, \eta)$ ($i=1\sim 4$) は(1)式と同様である。

ところで、観測値を一次元の点データとして捉えた場合、同じ地震波に対しても地盤条件の違い、すなわち地盤の良し悪しによって地表面で観測される加速度値は異なるために、上述の加速度推定手法は4箇所の加速度観測地点および推定地点がともに同一の地盤に対してのみ使用可能であり、異なる地盤への適用はできない。すなわち、一次元の加速度値を二次元に拡張する場合、地形の平面的広がりを考慮する必要がある。このような場合、地形の影響は少ないとも言われるが、本研究では、図-3に示すように観測地を一旦基盤に戻し、基盤面において補間した加速度値を地形の平面的広がりを考慮して表層地盤の増幅率を用いることにより、推定地点での加速度値を求めるものとする。すなわち観測地点および加速度推定地点のボーリング資料より、 N 値の深さ方向の分布を求め、地盤パラメータ S_n を用いて、地震動加速度に対する補正係数(地盤増幅率に相当するもの) $CA(S_n)$ を求め、地盤の最大加速度 A_{max} を次式により算定する。

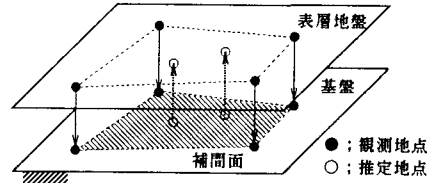


図-3 空間的広がりを考慮した加速度の推定

$$CA(S_n) = \left. \begin{aligned} &2.09^{S_n} \quad (S_n < 0.6) \\ &1.56 \quad (0.6 \leq S_n < 1.0) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

$$A_{max} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) A_i \cdot \frac{CA(S_n)}{CA(S_n)_i} \dots\dots (4)$$

3. 推定計算例とその考察

2. では、4 節点四角形に対する補間関数を用いた加速度の推定方法について説明したが、ここでは推定計算例として、4 節点以外に 8 節点および 12 節点四角形要素に対する補間関数を用いた加速度の推定結果について示す。なお、紙面の都合上 8 節点および 12 節点四角形要素に対する補間関数の詳細は文献(8)に譲る。

一方、確率過程論に基づいた地震動波形の補間法は時間的な制限があるため、この補間法に代わり提案した補間法の応用として、限られた地点で得られた加速度波形より任意地点における加速度波形を補間する。この手法は、パワースペクトル密度関数の振動数毎の補間より加速度波形を推定するものである。

(1) 最大加速度の補間

図-4、5は、それぞれ4箇所および8箇所の加速度観測地点における最大加速度の値がすべて100galの場合について、 (x, y) 座標値および (ξ, η) 座標値に相当する推定地点における地盤種別ごとの最大加速度の推定結果を示したものである。なお、推定地点の地盤種別により加速度の値が異なるため、推定地点における地盤種別を道路橋示方書(1980年度版)⁹⁾にした

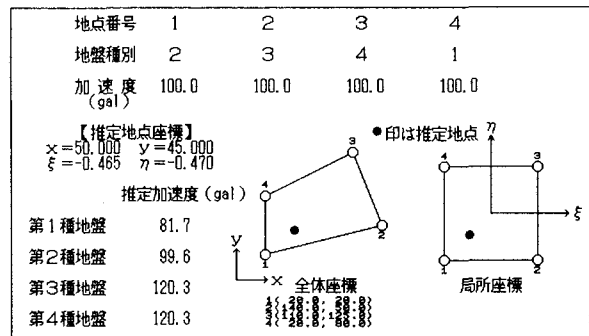


図-4 4 節点形状関数による加速度推定結果

がって第I種から第IV種として、地盤の増幅係数に相当するCA (Sn) をそれぞれ0.7、0.9、1.1、1.1の値を用いることとした。これらの値は各地盤種類の多くのボーリング資料より求めた平均CA (Sn)¹⁰⁾である。これらの図には4箇所および8箇所の観測地点にランダムに与えた地盤種別データも示してある。また、入力座標値(x, y)に相当する写像(ξ, η)値とその推定位置を全体座標系および局所座標系に表示している。これらの図より、すべての観測地点における加速度値が同じ値であるため、当然のことながら岩盤に相当する硬い第I種地盤上の観測地点近傍で、推定地点が埋立地や人工地等の軟弱地盤に相当する第IV種地盤である場合には、推定された最大加速度が大きな値となっていることがわかる。

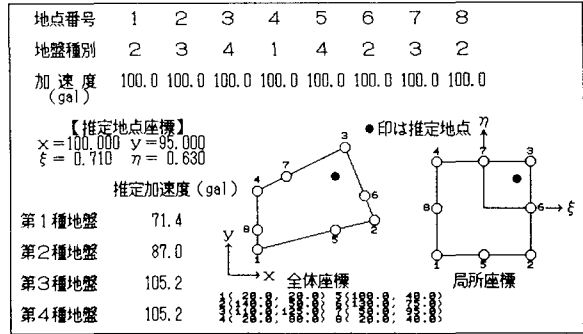
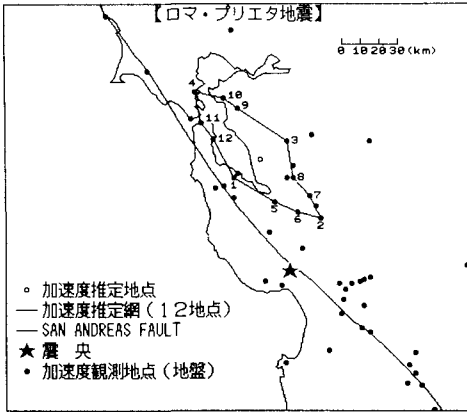
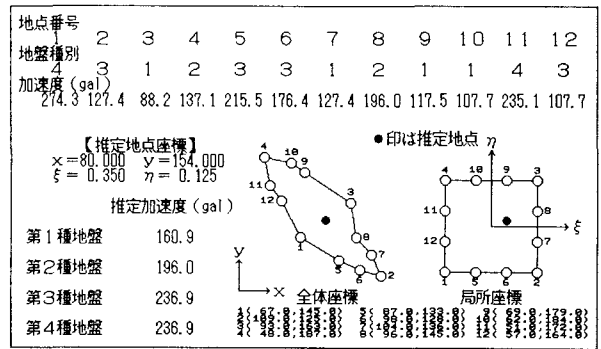


図-5 8節点形状関数による加速度推定結果

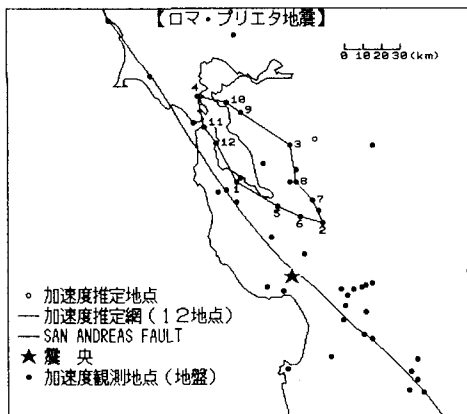


(a) 加速度推定網 (12箇所)

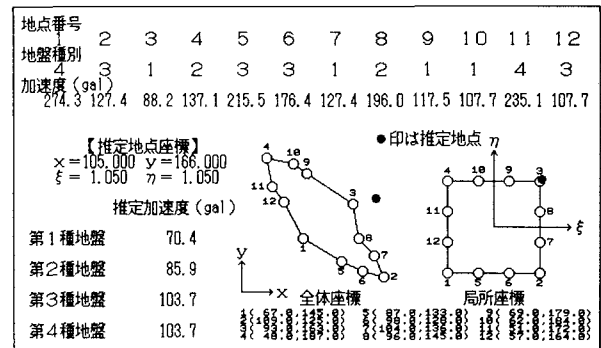


(b) (x, y) 入力

図-6 12節点形状関数による加速度推定結果 (その1)

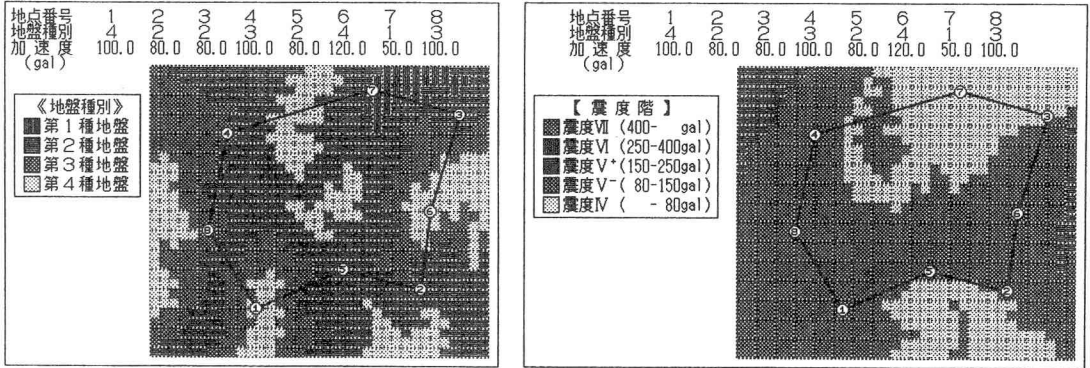


(a) 加速度推定網 (12箇所)



(b) (x, y) 入力

図-7 12節点形状関数による加速度推定結果 (その2)



(a)地盤種別

(b)震度階分布の推定結果

図-8 加速度記録からの震度階分布推定結果(8節点)

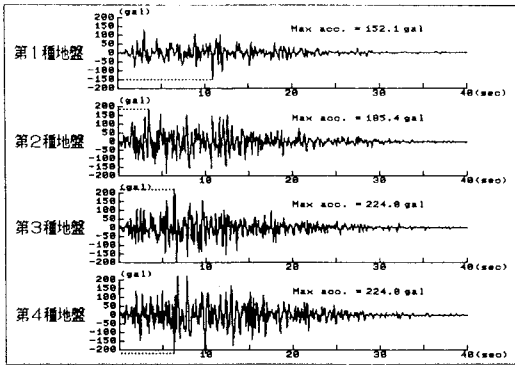
図-6、7は、1989年10月17日に起きたロマプリエタ地震(M=7.1)の際に地盤上で観測された12箇所の加速度観測記録¹¹⁾を用いて、任意地点の地盤種別ごとの加速度推定結果を示したものである。図-6、7は、実際に加速度の観測が行われた箇所に対して推定を行ったもので、観測された最大加速度の値はそれぞれ156.8galおよび39.2galである。図-6での加速度推定地点における地盤種別が第1種地盤である場合、かなり良い精度で加速度を推定していることがわかる。これに対し、図-7では推定地点が12節点多角形の外側に位置しており、いわゆる外挿補間になっているため推定精度は若干悪くなるようである。

次に、点データから面データへの変換例として、任意の8箇所に設置された加速度計から得られる最大加速度の値から、地域全体の加速度分布、すなわち震度階分布を推定したものを図-8に示す。ここでは、地域全体をメッシュ分割し、各メッシュ中央位置における震度階を示すものとする。なお、同図には8箇所の最大加速度の値、加速度計の設置位置および地域全体の地盤種別を示してある。

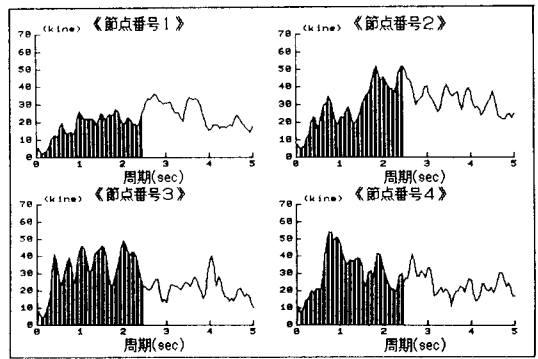
(2) 波形解析による補間

(1)に述べた手法は、観測地点の最大加速度を用いた任意点における最大加速度値の補間であるが、図-9には、観測地点で得られる加速度波形時刻歴から任意地点の加速度波形時刻歴を補間して得る手法の例を示した。近年、確率過程論に基づいて、任意地点における波形を補間する手法^{4)~6)}が提案されているが、ここでは、各観測地点でのパワースペクトル密度関数を振動数毎に補間関数を用いて補間したものより加速度波形を作成している。図-9(d)中の「補間式」に対応するものは、4箇所の加速度波形から得られる最大加速度およびS I強度の値¹²⁾を用いて任意地点における最大加速度とS I強度の値を推定したもので、同図中の「波形解析」に対応するものが観測地点の加速度波形を補間して得られた波形(図-9(c))から得られる最大加速度およびS I強度を示す。なお、この図においては4箇所の観測地点がそれぞれ第1種、第2種、第3種および第4種地盤上にあるものとしている。また、観測地点における模擬の加速度波形は、非定常確率ガウス過程としている。すなわち、ある地震動周波数特性を有する定常確率ガウス型の波形を、ある地震記録の特性を有する確定関数を用いて絞り込むことにより、加速度波形の作成を行った¹³⁾。同図より、最大加速度値から推定した任意地点の加速度(補間式)は、加速度波形を用いた推定値(波形解析)より大きな値となっている。これは、補間式では常に最大値を補間しているが、波形解析では4地点での最大加速度に時間差を有し、同時刻に最大値とならないためである。

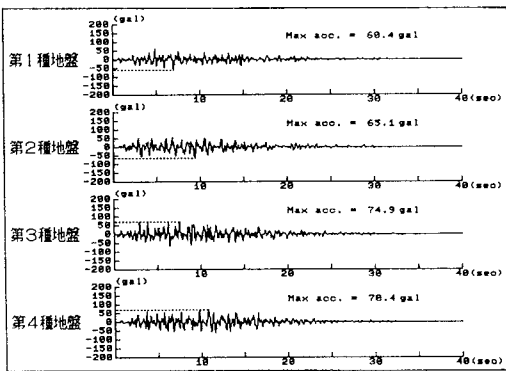
ところで、本研究の目的は限られた地域に設置された地震計の記録から任意地点、あるいは地域全体の地



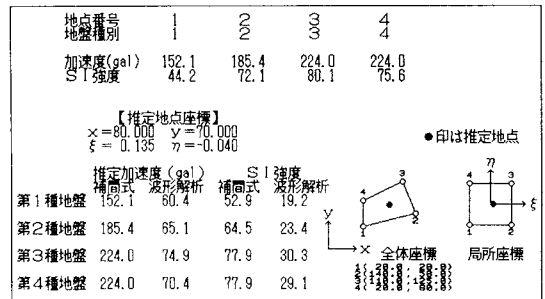
(a) 観測地点加速度波形



(b) S I 強度



(c) 推定加速度波形



(d) 加速度および S I 強度の推定結果

図-9 加速度および S I 強度の推定結果 (4 節点)

震動強度を推定するものである。とくに、著者らが提案している「リアルタイム被害予測システム」³⁾との関連から、地震動推定はできる限り短時間で(数秒内に)行う必要がある。波形解析による手法では、①各地震観測機器が数十秒間の加速度波をモニターするまでの待機時間、②観測された波形からの任意地点での加速度波形の補間解析に要する時間、③得られた波形より最大加速度・S I 強度を算定する時間、という一連の流れにおける観測・解析に要する時間がかかりすぎることからリアルタイムな被害予測への適用は困難と思われる。したがって、確率過程論に基づく手法に比べれば推定精度の点からは問題はあるものの時間的な制限より、本研究においては「補間式」による手法を採択するものとする。

4. 実地震観測記録を用いた精度の検証

図-10(a)、(b)は、首都圏における地震観測データで、29箇所の観測点の位置および最大加速度(単位: gal)を示したものである。同図(a)は千葉県東方沖地震(1987年12月、M=6.7)におけるもので、(b)は茨城県南西部に発生した比較的中規模の直下型地震(1989年2月、M=5.6)における加速度観測データである。以下より、図-10を用いて提案する推定手法の精度を検証する。ここでは、文献7)の地震動加速度に対する補正係数 $C_A(S_n)$ を用いた(4)式の代わりに、道路橋示方書(1990年度版)¹⁴⁾に示された地盤別の補正係

数 C_G 値 (I種地盤 0.8、II種地盤 1.0、III種地盤 1.2) を用いるものとし、加速度の推定は次に示す(5)式により算定する。

$$A_{max} = \sum_{i=1}^4 N_i (\xi, \eta) A_i \cdot \frac{C_G}{C_{Gi}} \quad \dots\dots(5)$$

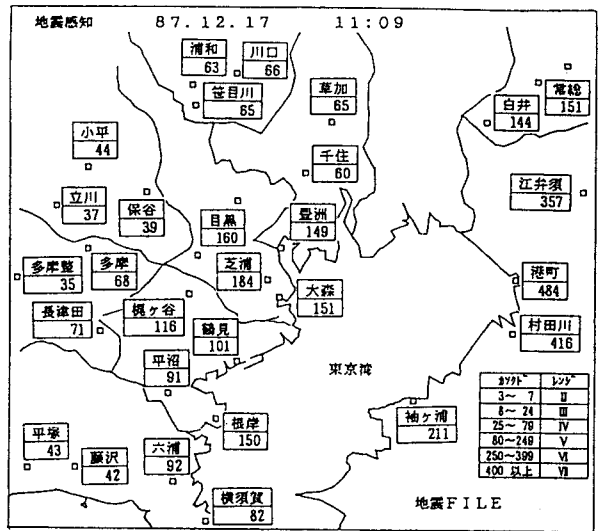
本手法の推定精度を検証するために、観測された加速度と推定した値がどの程度一致するかを観測値と推定値の比、すなわち適合度 (conformability) α_i の平均値 $\tilde{\alpha}$ およびその標準偏差を用いる。一般に、適合度が1に近く、かつ標準偏差が1に対して小さければばらつきが小さく精度の良い推定であることを意味する。

なお、観測された最大加速度値を $A_{max(Obs)}$ 、推定最大加速度を $A_{max(Est)}$ とすれば、適合度は以下のように定義される。

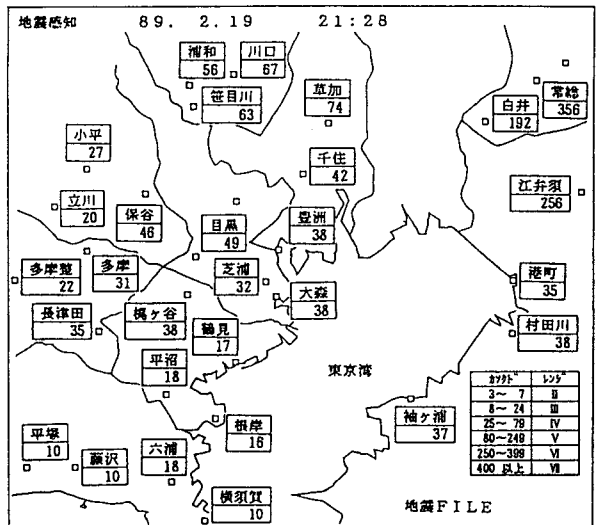
$$\alpha_i = \frac{A_{max(Obs)}}{A_{max(Est)}} \quad \dots\dots(6)$$

$$\tilde{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} \quad \dots\dots(7)$$

図-11は、地震観測データ(その1)における4節点形状関数による推定結果および推定精度を示している。また、節点の選び方による推定精度の違いを(a)、(b)に示した。観測地点の座標、地盤種別の読み取り誤差を考慮すれば、かなり良い精度で推定していると言える。また、図-12は8節点形状関数による推定結果を示したものである。同図(a)は観測データ(その1)における推定であるが、図-11での4節点によるものより良い精度で推定しており、高次の形状関数ほど正確な推定が可能と言える。同図(b)の観測データ(その2)については、近地地震であるために観測点間の加速度値の差が遠地地震に比べて大きく、観測された加速度値が(a)との比較においてばらついていることから、補間により全体的に値のばらつきを均すことにより推定精度が悪くなったものと考えられる。この場合、各節点を近づけて推定範囲を小さくする、すなわち対象地域を複数の形状で分割することによって精度良い推定が可能であると思われる。しかしながら、推定補間形状の大きさに関しては、いくつかのケーススタディによって最も精度良く推定する形状を試行錯誤的に求める必要があり、ネットの大きさに関する課題については著



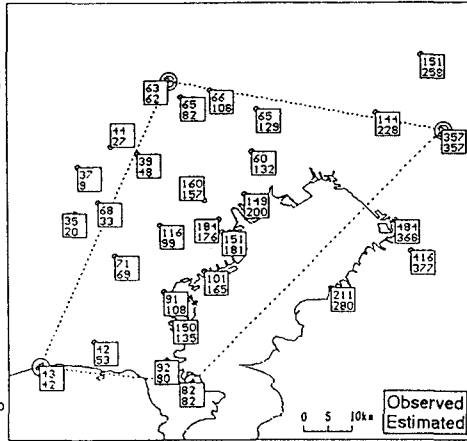
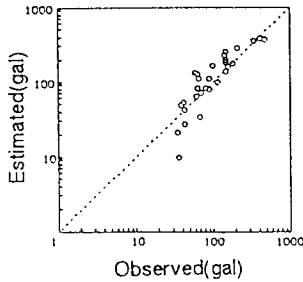
(a) 地震観測データ(その1)



(b) 地震観測データ(その2)

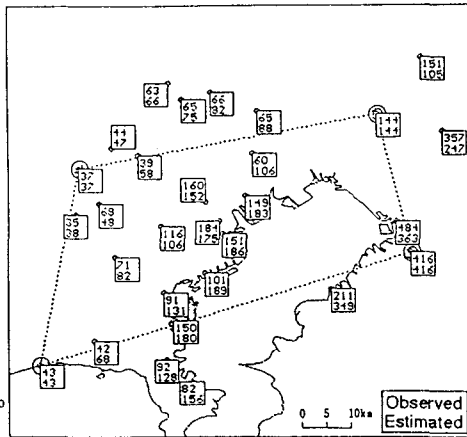
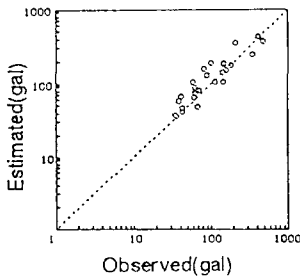
図-10 実地震加速度分布(東京ガス地震観測データによる)

Conformability=1.069
Standard Deviation=0.631



(a) 推定形状パターン 1

Conformability=0.903
Standard Deviation=0.273



(b) 推定形状パターン 2

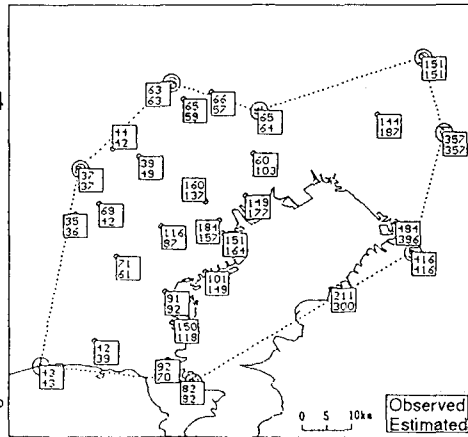
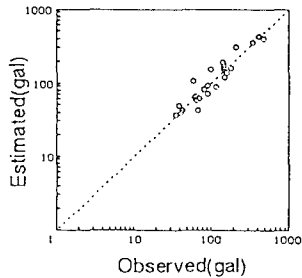
図-11 観測データとの比較 (4 節点)

者らの他の論文¹⁵⁾に示すものとする。あるいはまた、観測データのばらつきから、近地地震・遠地地震を判断し、最良の補間形状を自動的に選択するようなシステムが要求される。また、推定形状の自由な選択は、地震時のデータ欠損の処理に関しても有効と考えられる。すなわち、推定形状をただ一つに確定することは言い換えれば、節点となっている観測地点のデータが絶対的に必要であることを示し、何らかの事由により節点の観測データが欠損した場合、当該形状が推定する地域全体の加速度分布が得られないことになり、被害予測が不可能となることから、データ欠損処理は今後の重要な課題であると言えよう。

5. まとめ

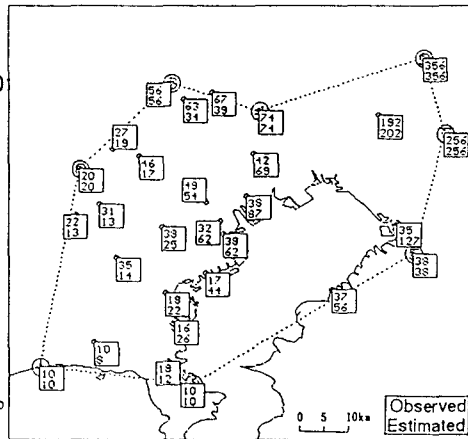
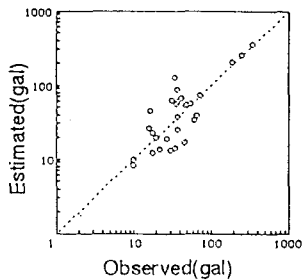
本研究は、限られた地震観測地点におけるデータから、任意地点、ひいては地域全体における地震動強度

Conformability=1.026
Standard Deviation=0.214



(a) 観測データ (その1) での比較

Conformability=1.136
Standard Deviation=0.620



(b) 観測データ (その2) での比較

図-12 観測データとの比較 (8 節点)

を推定する手法を提案し、その推定精度の検証において良好な結果を得ることができた。本手法を用いることによって必要最小限の地震観測機器の設置が可能となるが、正確な地震動把握という意味においては、高次の形状関数を用いた推定地域の形状の複数分割を行うためにも、できる限り観測機器を多数設置すべきことは言うまでもない。しかしながら、最初にも述べたように1つの事業者があらゆる地点に地震観測機器を設置することは経済的に困難であることから、本手法を適用することはリアルタイムな被害予測およびその後の復旧戦略の策定に極めて有効であるものと考えられる。また、本研究は、地震発生後地震計から送られてくるデータを基にして数分以内にライフライン供給地域全体における地震動強度を算定し、被害を推定することを目的としているため、近年盛んに研究が行われている確率過程論に基づいた地震動波形のシミュレーションに比較すれば、地震動波形の推定精度には多少問題が残るものの、提案した補間法はライフライン被害の推定という目的には適しているものと考えている。しかしながら、本手法は確率論に基づいた地震動波形の補間法に比べて、時間的な制約は満足しているものの、推定精度の面からは多くの問題を持っているため、これらについては今後の課題と言えよう。

参考文献

- 1) 佐武正雄(研究代表者):都市供給施設における震害の防止・軽減並びに復旧対策に関する研究、文部省科学研究費 重点領域研究、1990.
- 2) 平成3年度講習会テキスト より安全な都市を目指して -ライフライン系の地震防災から-、土木学会関西支部、1991.11.
- 3) Takatani, T., Takada, S., Fuke, T., and Fukui, S.: An estimating method of predicted seismic ground motions and arrangement of remote monitoring seismographs for early detection of earthquake damages, Proc. of 10th WCEE, Vol. IX, pp.5569-5575, July 19 - 24, Madrid, 1992.
- 4) 水谷治弘、土岐憲三、清野純史:非均質な確率場を考慮した時空間波形のシミュレーション、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、I-340、1993.
- 5) 丸山 収、星谷 勝:定常均一確率場の条件付き地震波動シミュレーション、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、I-342、1993.
- 6) 盛川、亀田弘行:条件付確率場の理論構築とモンテカルロ・シミュレーションおよび初期通過問題への応用、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、I-343、1993.
- 7) Kameda, H., Sugito, M., Goto, H.: Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions, Proc. Third International Microzonation Conference, Vol. III, pp.1463-1474, June 28 - July 1, Seattle, 1982.
- 8) 鷺津久一郎、宮本博、山田嘉昭、山本善之、川井忠彦:有限要素法ハンドブック I 基礎編、培風館、1981.
- 9) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1980.
- 10) 高田至郎:神戸市域における水道・ガス供給施設の地震耐久度調査、1985.
- 11) 亀田弘行:1989年ロマブリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の被害に関する調査研究、重点領域「自然災害」総合研究班、1990.
- 12) 大崎順彦:地震動のスペクトル解析、鹿島出版会、 pp.170~219、1984.
- 13) 星谷 勝:確率論手法による振動解析、鹿島出版会、1981.
- 14) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1990.
- 15) 高田至郎、高谷富也、小川安雄、福井真二:地震動モニタリングとライフラインのリアルタイム被害推定、構造工学論文集、1994(印刷中)。

(1993年9月16日受付)