

京都大学大学院 学生員 盛川 仁
 京都大学防災研究所 正員 亀田弘行
 筑波大学大学院 学生員○高橋 功

1. 序論 本研究では、あらかじめ都市内に配置された複数のセンサーにおいて観測された地震動に関するデータを被害推定に役立てようとする、地震動モニタリングシステムの構築に際し、経済的制約のもとで限られた数の観測点を都市内のどこに配置すべきか、という問題を取り扱う。このような問題については既に、Takada et al.¹⁾によるガス管路網の被害推定結果から決定される地震計の配置優先度を用いる方法や、笠野ら²⁾による最大加速度等の推定誤差分散ができるだけ小さくなるように、幾つかの地震計の設置候補地点の中から最適な設置点を組み合わせ問題を解いて選ぶ方法が示されている。本研究では、これらの研究ではまだ十分に議論されていなかった、都市全体としての地震防災を考えるという観点から、観測点の最適配置問題を考える。すなわち、観測記録から推定される都市内の地震波動場の推定誤差を一律に小さくするのではなく、人口密集地区や地盤条件の悪い地区などの都市地震防災上、相対的に重要と考えられる地区では推定誤差が他に比べて小さくなるように観測点を配置するためのアルゴリズムを示す。そのうえで簡単な例題について数値計算を行い、本研究で提案する手法が妥当な結果を与えるものであることを示す。

2. 観測点の最適配置決定法 本研究における観測点の配置に関する基本的な立場は、観測記録から推定された地震波動場の推定誤差分散の都市内における総和が小さい程、観測点の配置としては好ましいとするものである。ただし上に述べたように、都市地震防災上、重要と考えられる地区の推定精度を高めた観測点の配置を得るために、各地区の重要度を表す重み関数を導入する。以下では、地震波動場のスペクトル特性は既知であると仮定し、簡単のために一次元の都市における観測点の最適配置問題を非線形計画問題として定式化する。ただし、変数 x を $x = (x, y)$ に、線積分を面積分に置換えることで二次元の問題へ容易に拡張することができる。

x 軸上に存在する都市内の p 個の地点 x_1, x_2, \dots, x_p を観測点としたとき、そこで得られた観測波形を用いて推定された地震波動場に対する、任意の地点 x における波形の推定誤差分散 $\sigma^2(x; x_1, x_2, \dots, x_p)$ は地震波動場のスペクトル特性を用いて、条件付確率場の理論³⁾から求められる。さらに、地震による被害の大きさを左右する要素を考慮して、各地区の都市地震防災上の相対的な重要度を表す重み関数 $f(x)$ を設定することができたとする。このとき、都市域が x 軸上の $0 \leq x \leq L$ なる範囲に存在し、設置する観測点の個数 p が与えられているとした場合の観測点の最適配置問題を、次のような非線形計画問題として定式化する。

制約条件; $0 \leq x_i \leq L$ ($i = 1, 2, \dots, p$) のもとで、

$$T(x_1, x_2, \dots, x_p) = \int f(x) \cdot \sigma^2(x; x_1, x_2, \dots, x_p) dx \rightarrow \min.$$

とする $x_1^*, x_2^*, \dots, x_p^*$ を求めよ。

図1に観測点の最適配置を決定するための計算手順を示す。なお、目的関数 $T(x_1, x_2, \dots, x_p)$ の最小化には、非線形最適化問題を解くための汎用アプリケーションプログラムであるASNOPシステム⁴⁾を用いた。

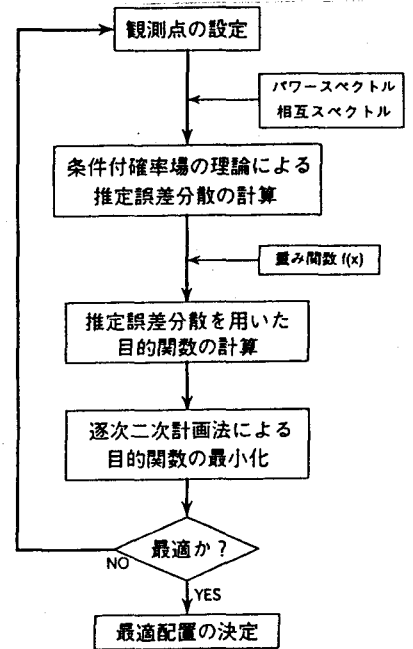


図1 観測点の最適配置決定の計算手順

3. 数値計算例 上で与えた計算アルゴリズムの妥当性を確かめるために、 $p = 3, L = 10.0$ とし、4種類の重み関数 $f(x)$ のパターンを与えて観測点の最適配置を求める計算を行った。パターン1は重要度を考慮しない場合 ($f(x) \equiv 1.0$)、パターン2は重み関数が線形に変化する場合、パターン3は中央部の重要度が高い場合、パターン4は重要な地区が対称に2つにわかれて存在する場合を表している。なお、この計算では地震波動場のスペクトル特性として文献3)で用いられている一様な場に関する式をそのまま用い、最適化計算に必要なパラメータの値は収束・安定性について十分に吟味を行なった値を用いた。

最適解の唯一性を確認するために、それぞれ3~4種類の初期点から最適化計算を行ったが、相当数の反復計算を行なった後にも収束判定基準を満足しない場合もあった。しかし、 $T(x_1, x_2, \dots, x_p)$ の値の変化状況から最適解であるとの判断を下して計算を打ち切っても、明らかに局所解と考えられる場合を除けば、初期点の違いによらずおおむね同じ解を得た。図2に、与えた重み関数のパターンと観測点の最適配置及びその際の(重み) \times (推定誤差分散)を示す。この結果から、重要度が一定の場合には、(重み) \times (推定誤差分散)が同じ形となるように観測点が配置されるが、重要度が変化する場合には、重要度の高い地区のほうへ観測点が全体としてシフトしていることがわかる。特にピークを持つような重み関数の場合にはピークがある地点に観測点が配置されている。

4. おわりに 地震動モニタリングシステムの構築を念頭において、推定誤差分散および都市地震防災上、重要と考えられる地区の重要度を表す重み関数を用いて、観測点の最適配置を得るためのアルゴリズムを構築した。さらに、数値計算の結果、このアルゴリズムにより、数値的に安定した解が得られ、かつ重要度の高い地区に観測点が重点的に配置されるという妥当な結果が得られることを確認した。今後は、地震被害と相関の高い要因を抽出したうえで、工学的見地だけでなく社会学的な観点からも重み関数の決定法についての議論を深めていきたいと考えている。

参考文献 1) Takada, Fuke, and Ueno, "Seismic monitoring and system control for lifeline," *U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*, PWRI, 1992.8, pp.481-502. 2) 笠野・野田: GAを用いた地震センサーの最適戦略配置, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993.9, I-154. 3) 盛川・亀田: 条件付確率場の理論とその工学的応用, 京大防災研年報, 第36号B-1, 1993.4, pp.159-178. 4) ASNOP研究会: 非線形最適化プログラミング, 日刊工業新聞社, 1991.4.

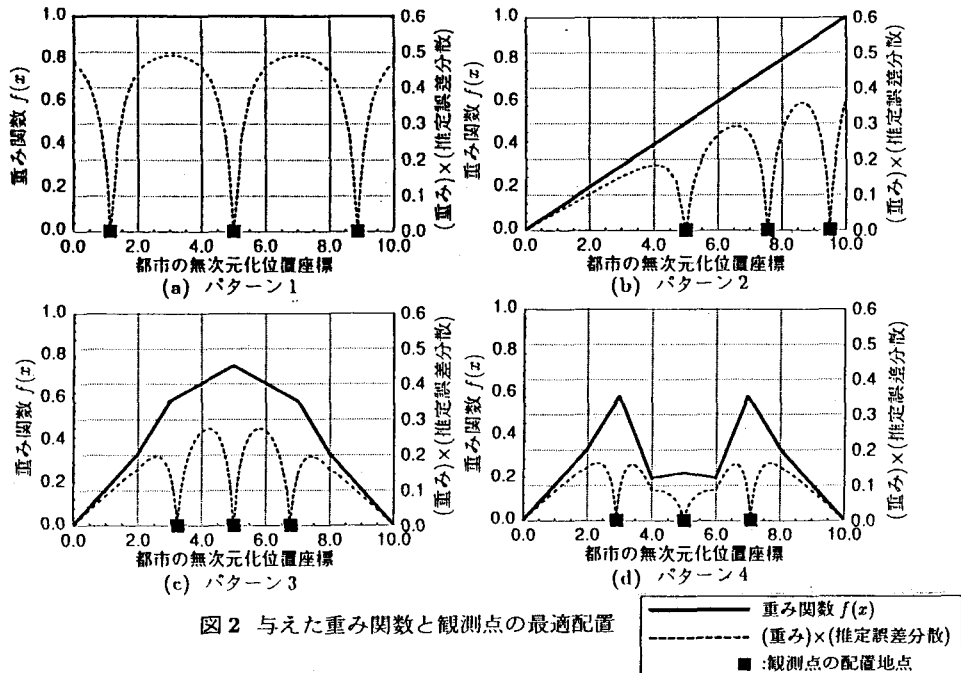


図2 与えた重み関数と観測点の最適配置

— 重み関数 $f(x)$
 - - - (重み) \times (推定誤差分散)
 ■ : 観測点の配置地点