

応答スペクトルを用いた計測震度推定と震源断層推定への応用

Estimation of JMA Intensity using Response Spectrum and Its Application to Inversion of Earthquake Fault

栗田哲史* ・ 高橋 聡** ・ 嶋田昌義** ・ 安中 正***

Tetsushi KURITA, Satoru TAKAHASHI, Masayoshi SHIMADA and Tadashi ANNAKA

*正会員 工博 東電設計株式会社 地震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

**正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

***正会員 理修 東電設計株式会社 地震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

This paper proposed an estimation method of JMA intensity using a multi-regression formula with acceleration response spectrum. The estimated JMA intensities from the multi-regression relationship agree well with observed values. Combination of the proposed method with the attenuation relation of acceleration response spectrum and the amplification factors of subsurface can predict the distribution of JMA intensities for large area. Furthermore, this estimation method was applied to the inversion of earthquake fault by using genetic algorithm. From numerical experiments, it is confirmed that the identified results show enough accuracy to predict an isoseismal map for large area.

Key Words : response spectrum, JMA intensity, earthquake fault, inversion, genetic algorithm

1. はじめに

広域な地域の地震防災を考える上で、シナリオ地震に基づく地震動強さの分布および建物被害の推定が対策案策定の有効な基礎資料となる。国¹⁾および地方自治体^{例えば 2)~4)}は、独自に地震被害想定を行い、防災対策を実施してきている。これまでに行われてきた各種被害想定を概観すると、構造物の被害と関係が深いと考えられる震度階が最大加速度からの換算値として求められているものが多い。最大加速度と構造物被害との関係が必ずしも一対一とならない事は既に知られている事から、この手法は現実にそぐわないものとなっている可能性が有る。しかし、震度階はそもそも人体が感じる揺れの強さを表す指標であり、地震動強さを表す物理量との関係が明確でなかったため、致し方ないとも言える。

平成 8 年 10 月から、気象庁の震度階が計測震度によって求められる方式となり⁵⁾、震度と地震動との関係が明らかになった。即ち、地表の 3 成分加速度時刻歴が得られれば、その地表の震度は計算式により一意に求められる。しかし、イベントが発生する前の想定段階では、この方法を用いる事はできない。従って、既存の地震動に関する情報から計測震度を推定する手法が望まれる。

そこで、本研究では加速度応答スペクトルから計測震度を推定する手法を開発し、加速度応答スペクトルの経験式と組み合わせる事によって、広域の震度分

布を推定する方法を提案する。この際、応答スペクトルの増幅率によって表層地質の増幅を考慮する方法を用いて、ローカルな地盤の影響を表している。

また、リアルタイムの地震防災を考える時、早期に広域の地震動強さの分布を求めるにあたり、震源断層の位置を把握する事は、推定精度向上に有効である。特に震源近傍においては、断層の面的広がりを無視する事はできない。しかし、高密度のオンライン地震計ネットワークを有する特定の機関以外では、その様な情報を得ることは不可能である。また、例え有していたとしても、データ収集および処理には多くの時間を要し、その結果を用いて被害推定および復旧支援を早期に実施するには設備投資を含め多くの困難を伴う。そこで、リアルタイム防災の観点からは、データ収集の時間までも考慮した簡易な震源断層推定手法が望まれる。辻原等⁶⁾は、最大加速度を観測量として距離減衰式との比較から震源断層を推定する手法を提案している。この手法は、距離減衰式を用いることによって地震動の幾何減衰を表している。従って、理論的には 3 点以上の観測点が有れば解が得られる。しかし、最大値のばらつき等を考えると、精度上の問題として、観測データがより多く得られる方が有利である。実際の問題を想定する時、気象庁震度階の広域分布が発震後の早い段階で得られる事から、この情報を有効に活用すべきと考える。そこで本研究では、辻原等の手法を発展させ、先に述べた計測震度推定法を応用して、最大加速度と共に計測震度を観測量として、震源断層

表一1 解析に使用した時刻歴データの地震リスト

番号	発生年月日	名称	マグニチュード	データ提供機関
1	1979/10/15	インペリアルバレー地震	$M_w=6.6, M_L=6.9$	WDCA
2	1987/12/17	千葉県東方沖地震	$M_{JMA}=6.7$	日本建築学会
3	1989/10/17	ロマブリエタ地震	$M_s=7.1, M_L=6.9$	CSMIP
4	1993/01/15	釧路沖地震	$M_{JMA}=7.8$	震災予防協会
5	1994/01/07	ノースリッジ地震	$M_w=6.7$	震災予防協会
6	1994/10/04	北海道東方沖地震	$M_{JMA}=8.1$	震災予防協会
7	1995/01/17	兵庫県南部地震	$M_{JMA}=7.2$	気象庁
8	1998/08/29	東京湾の地震	$M_{JMA}=5.1$	K-NET (防災科研)

(矩形断層モデルの基準点および走向)の推定を行う手法を提案する。この時、同定手法に遺伝的アルゴリズムを用いる事によって、非線形最小二乗法に特有の局所解を回避する手法を採用している。

2. 計測震度の推定手法

2.1 手法の概要

本研究では、計測震度がフィルター処理によって人体の感じる揺れの強さを表現する効果を、応答スペクトルとの関係から求めることを試みた。両者を関係付ける方法として重回帰式を用いる事とした。ここで、目的変量は計測震度、説明変量は加速度応答スペクトルとした。尚、説明変量は水平2成分の平均値としている。既往の地盤条件等が異なる様々な種類の時刻歴記録を多数準備して、このデータの組み合わせをフィッティングして、回帰式によるモデル化を行う。

回帰式によるモデルは幾種類か考えることができる。ここでは、①データとして真数を用いる場合と対数を用いる場合、②回帰式に定数項が有る場合と無い場合、③回帰式のパラメータ数を幾つにするべきか、の3項目が考えられるため、各モデルの優劣を検討した。その際、規準としてAICを用いて定量的に評価する事とした。

2.2 使用したデータ

解析に用いた時刻歴データの地震一覧を表一1に示す。国内外の様々なタイプの地震記録を用いることとした。また、地震動強さも、小さいものから大きいものまで各種含まれている。計測震度を計算する都合上、地表で3成分揃っている記録を対象とした。条件を満たす全277組のデータを使用した。

各記録は、3成分を用いて計測震度を計算し、水平2成分を用いて5%減衰の加速度応答スペクトルを計算した。加速度応答スペクトルは成分間の平均を求め、計測震度と組合せてデータセットとした。加速度応答スペクトルの水平2成分の平均値を説明変量とする理由は、実際の推定に応用する場合に、加速度応答ス

ペクトルの経験式が一般に水平成分のみを用いて作成されている事による。また、計測震度の計算アルゴリズムを用いて別途検討した結果、水平2成分のみを用いて計測震度を計算したものと3成分全てを用いて計算したものは、殆ど一致する事を確認している。

2.3 重回帰式のモデル選択

2.1で述べた3項目のうち①と②より、回帰式は以下に示す4つのパターンを考えた。

a) データ：真数、定数項：有り

$$a_0 + a_1 \cdot S_a(T_1) + a_2 \cdot S_a(T_2) + \dots + a_{81} \cdot S_a(T_{81}) = I_{JMA} \quad (1)$$

b) データ：真数、定数項：無し

$$a_1 \cdot S_a(T_1) + a_2 \cdot S_a(T_2) + \dots + a_{81} \cdot S_a(T_{81}) = I_{JMA} \quad (2)$$

c) データ：対数、定数項：有り

$$a_0 + a_1 \cdot \ln[S_a(T_1)] + a_2 \cdot \ln[S_a(T_2)] + \dots + a_{81} \cdot \ln[S_a(T_{81})] = I_{JMA} \quad (3)$$

d) データ：対数、定数項：無し

$$a_1 \cdot \ln[S_a(T_1)] + a_2 \cdot \ln[S_a(T_2)] + \dots + a_{81} \cdot \ln[S_a(T_{81})] = I_{JMA} \quad (4)$$

ここで、

$S_a(T_i)$: 5%減衰加速度応答スペクトル

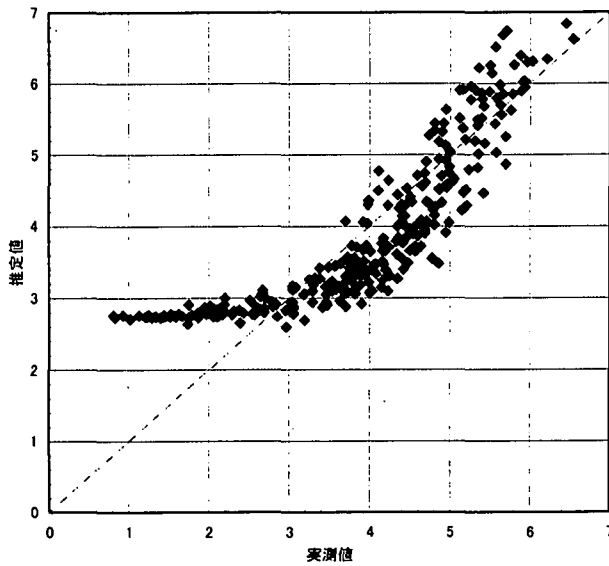
T_i : 周期

I_{JMA} : 計測震度

$a_i, (i = 0, 1, 2, \dots, 81)$: 回帰係数

a), b)は両者とも応答スペクトルの値をそのまま用いて、定数項の有無のみが異なっている。c), d)は河角式

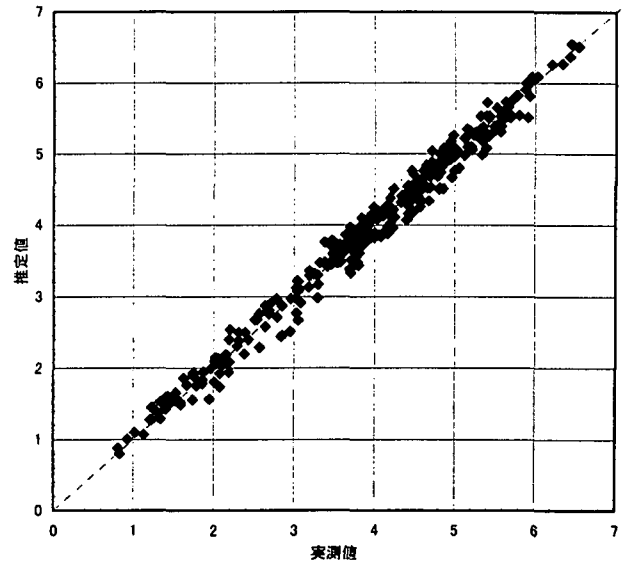
重回帰式による計測震度の推定



相関係数：0.858

図-1 推定値と実測値との比較
(データ真数・定数項有りの場合)

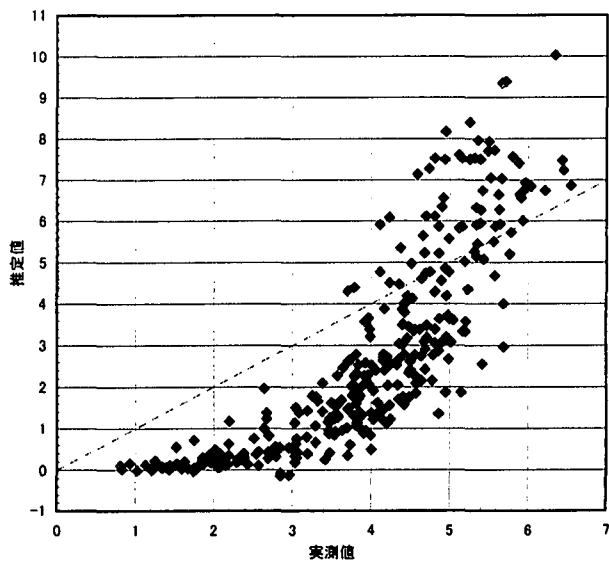
重回帰式による計測震度の推定



相関係数：0.992

図-3 推定値と実測値との比較
(データ対数・定数項有りの場合)

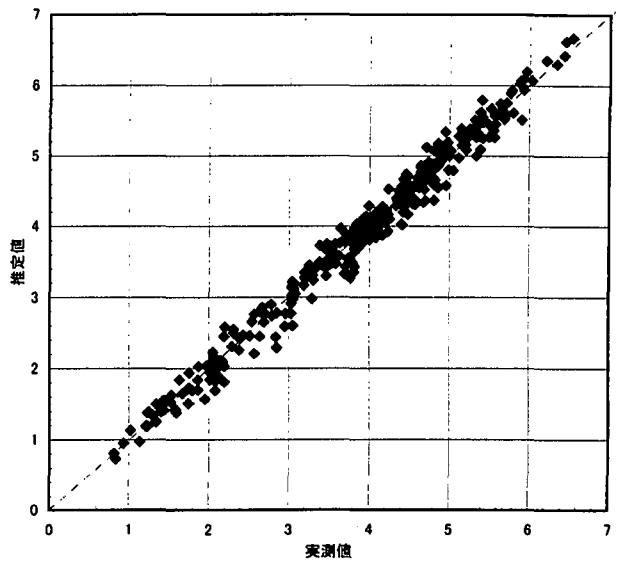
重回帰式による計測震度の推定



相関係数：0.829

図-2 推定値と実測値との比較
(データ真数・定数項無しの場合)

重回帰式による計測震度の推定



相関係数：0.991

図-4 推定値と実測値との比較
(データ対数・定数項無しの場合)

からも明らかなように震度と最大加速度との間に対数の関係があることを考慮して、データとして応答スペクトルの自然対数を用いている。各式において、応答スペクトルの周期の刻みは、後述する応答スペクトルの推定式に用いる Annaka and Nozawa⁸⁾の式と同じで計 81 ポイントとした。従って、定数項無しの場合は未知数 81、定数項有りの場合は未知数 82 となる。各回帰係数は、最小二乗法により求めた。最初に定数項

を除くパラメータ数を 81 に固定し、4 パターンの式に対する回帰を行った。その後、パラメータ数に関する検討を含め、AIC によるモデル選択を実施した。

a)の真数データを用いて定数項有りの場合の回帰式から推定した計測震度と実測値との比較を図-1 に示す。

b)の真数データを用いて定数項無しの場合における同様の図を図-2 に示す。また、応答スペクトルの自

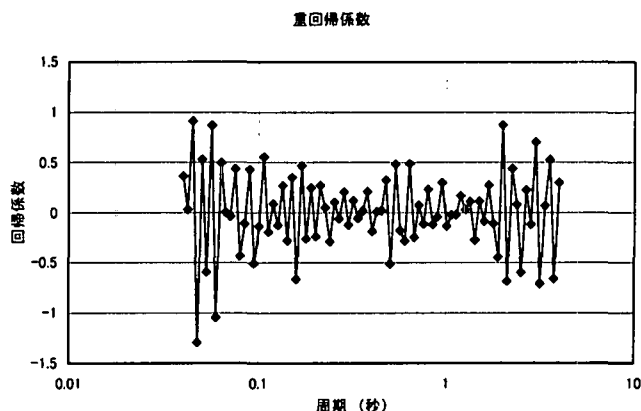


図-5 回帰係数（データ対数・定数項有りの場合）

然対数をデータとした場合の結果を図-3、図-4 に示す。図-1～図-4 から、定数項の有無によるモデルの優劣は明確でない。しかし、データの取り扱いによる差異は表れている。データとして応答スペクトルの値をそのまま用いた場合には、計測震度が小さい領域で或る一定の値に収束する傾向が見られ、大きい領域ではばらつきが大きくなっている。一方、データとして応答スペクトルの自然対数値を用いた場合には、推定値と実測値との対応は非常に良好であることが分かる。この時、相関係数は共に 0.99 であり、非常に高い精度で計測震度が再現できている事が分かる。

以上の結果より、定数項の効果は不明であるがデータとして加速度応答スペクトルの自然対数値を用いた場合の推定結果が優れていることは明白である。この時の回帰係数を図-5 に示す。これより、隣合う係数の符号が逆転した振動状態が連続していることが分かる。これは、近接した周期帯で値を打ち消し合うようにして微妙な調整をしていることを表していると思われる。しかし、やや不自然な印象を受け、回帰式のモデル化の適切性が懸念される。そこで、定量的な規準によるモデル選択に関する検討を行った。

一般に、パラメータ数の異なる何種類かのモデルが考えられる場合、その中からデータを最も良く説明するモデルを選び出すことが重要である。赤池⁹⁾は、一般的にモデルの当てはまりの悪さを表す規準量として次式を求めている。

$$AIC \equiv -2 \ln(\text{最大尤度}) + 2m \quad (5)$$

ここで、 m ：モデルの自由度

この AIC を指標としたモデル選択を実施した。尚、前述の検討結果より、データは加速度応答スペクトルの自然対数を用いる事とした。式(3)および式(4)を対象として、隣り合う周期のパラメータを順次まとめて、

パラメータ数を減少させた。表-3 の各解析ケース毎に AIC を計算した。

図-6 に各ケース毎に計算した AIC と残差二乗和を示す。図より、パラメータ数が増加するに従って残差二乗和が減少する傾向が見られる。AIC については、全ケースにおいて定数項有りの方が無い場合より値が小さくなっており、定数項を入れることによる自由度の増加よりも、誤差を削減する効果の方が上回っていることを示している。従って、定数項は有る方が良い

表-3 AIC 算定のための解析ケース

解析ケース	パラメータ数（定数項を除く）
Case 1	1
Case 2	2
Case 3	5
Case 4	10
Case 5	20
Case 6	30
Case 7	40
Case 8	81

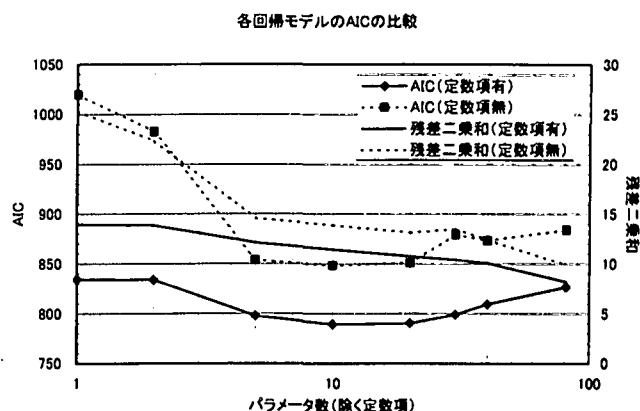


図-6 各回帰モデルの AIC の比較

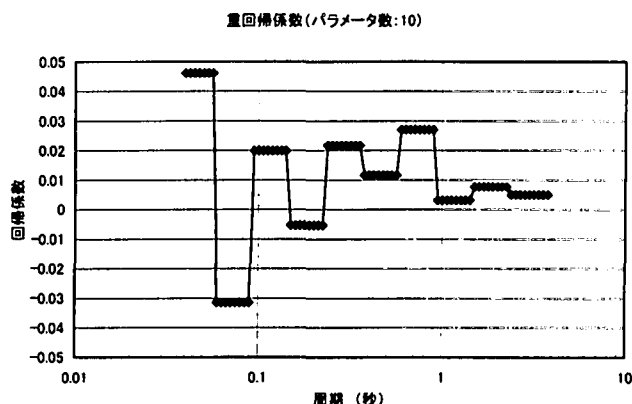
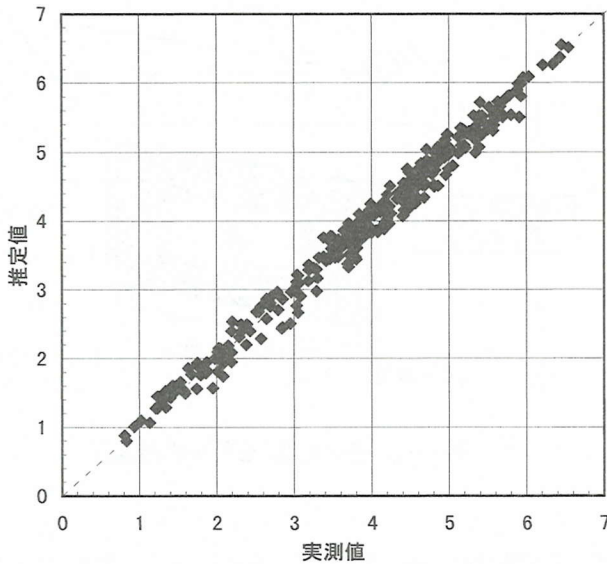


図-7 パラメータ数 10 とした時の回帰係数

重回帰式(パラメータ数:10)による計測震度の推定



相関係数 : 0.989

図-8 パラメータ数 10 とした時の推定値と
実測値との比較

ことになる。パラメータ数に関しては、パラメータ数 10 の時に AIC が最小となっており、この時がモデル化としては最も適切であることが分かる。図-7 にパラメータ数 10 とした時の回帰係数を示す。周期 0.1～1 秒までの間では、1箇所でのみ負の係数となっているが、その絶対値は非常に小さい。その他の係数は全て正の値となっている。また、図-5 と比べて全体的な係数のばらつきも小さくなっており、安定した解が得られている様子が分かる。図-8 にパラメータ数 10 の回帰式で推定した計測震度と実測値との比較を示す。両者は非常に良く対応している。パラメータ数 81 の時と比べると、相関係数は若干小さくなっているが、両者の差異は非常に小さく有意なものとは考えられない。

以上の検討結果より、重回帰式による計測震度の推定では、加速度応答スペクトルの自然対数を入力とし、定数項有り、パラメータ数 10 とした回帰式のモデルを用いることとする。

2.4 震度分布の推定例

本研究で提案する手法を用いて、神奈川県を対象として 1923 年 9 月 1 日の関東地震における震度分布を推定した。震源断層には Matsu'ura *et al.*(1980)によって提案されているモデル ($M_J=7.9$)¹⁰⁾を用いた。工学的基盤上の加速度応答スペクトル (5%減衰) は式(6)に示す Annaka and Nozawa⁸⁾の応答スペクトル推定式を用いた。

$$\begin{aligned} \log A(T) &= Cm(T) \cdot M_J \\ &+ Ch(T) \cdot H + Cd(T) \cdot \log D + Co(T) \\ D &= R + 0.35 \exp(0.65 M_J) \end{aligned} \quad (6)$$

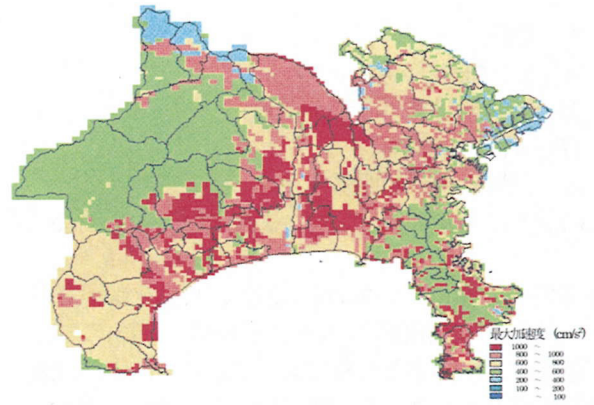


図-9 推定最大加速度分布 (関東地震)

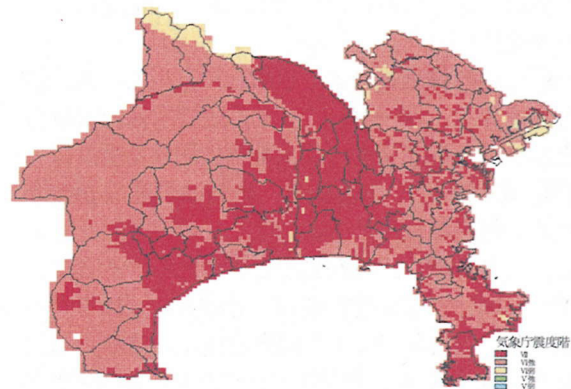


図-10 推定震度分布 (関東地震)

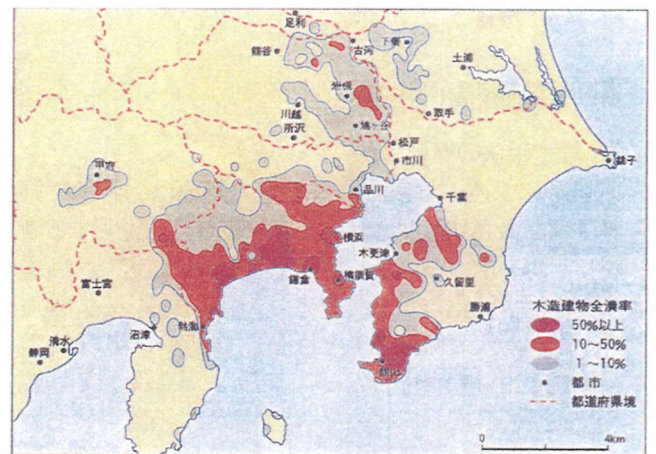


図-11 関東地震における木造建物の被害分布^{文献12)の引用}

ここで、

T : 周期

$A(T)$: 加速度応答スペクトル

M_j : 気象庁マグニチュード

H : 断層中央の深さ

R : 断層との最短距離

$Cm(T)$, $Ch(T)$, $Cd(T)$, $Co(T)$: 回帰係数

各回帰係数の値については、参考文献 8) を参照されたい。地表の加速度応答スペクトルは、式(6)の結果と表層地盤の増幅率との積によって求めた。表層地盤の加速度応答スペクトル増幅率は、数段階に振幅調整した各種入力地震動を用いて、1次元応答解析を実施し、入力地震波の応答スペクトルと地表の応答スペクトルとの平均的比率の形で与えた。尚、応答解析で利用した表層地盤モデルには神奈川県から公開されているデータを用いた¹¹⁾。

図-9 に距離減衰式により求めた神奈川県の最大加速度分布を示す。図-10 に提案手法で求めた震度分布図を示す。気象庁発表の関東地震における震度は神奈川県全域で震度Ⅵである¹²⁾。当時は震度Ⅶが無かったため、推定結果とは一応対応していると言える。しかし、より詳細な比較が必要と思われる。そこで、震度階との関係が深い建物被害の分布との比較を行った。図-11 に松澤¹²⁾による関東地震における木造建物の被害分布を示す。震度Ⅶの目安が家屋の倒壊率30%以上であることを考えると、震度の推定結果と木造建物の被害分布とは良く対応していると言える。従って、本提案手法の妥当性が示されたと考えられる。

3. 震源断層の推定

3.1 推定手法の概要

本研究で述べる震源断層推定の問題は、各地で観測された最大加速度と計測震度を最も良く説明する断層モデルを求める事として設定している。但し、断層モデルは単純化した矩形モデルに固定している。地震動が震源から幾何減衰する特性は、応答スペクトルの経験式を用いて表現している。また、表層地盤の増幅特性は予め作成しておいた増幅関数によって与えている。この問題は、最適化手法によって解くことができる。

いま、解析対象地震は地殻内地震 ($M > 6$) とし、震源断層は鉛直矩形モデルで表される活断層に基づくものとする。図-12 に震源断層モデルの概念図とモデルを規定するパラメータを示す。活断層を対象とするため、基準点深さは0km、傾斜角 90° で固定する。断層モデルは、断層面の一端の座標を示す断層規準点と走向、断層長さ、断層幅などで表すことができる。

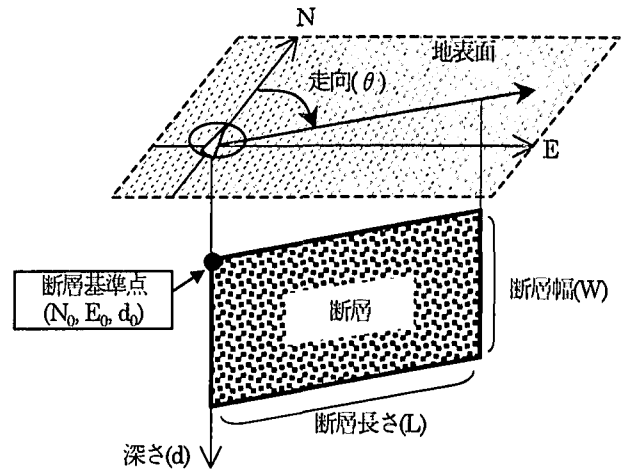


図-12 震源断層モデルの概念図

推定問題における既知情報としては、気象庁からのオンライン情報により、マグニチュードおよび震央位置が既知であるとする。また、既知情報に基づいて、断層パラメータの内、断層長さ、断層幅を決定した。断層長さは、次に示す松田式¹³⁾より決定した。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (7)$$

断層幅は、武村¹⁴⁾による地殻内地震のスケーリング則より、

$$W = (2/3)L \quad (8)$$

(但し、上限値 $W = 13\text{km}$)

とした。断層幅の上限値は、上部地殻をコンラッド面以浅と定義した時、その平均的厚さが15km程度となり、地表に近い3~5kmに地震を起こしにくい領域がある事から、これ以上の幅にはなり得ず(断層がコンラッド面から地表まで達するため)頭打ち状態になると解釈されており、本研究でもこの考えを取り入れた。以上の条件から、未知量は断層基準点の座標(緯度、経度)および走向となる。尚、走向については、未知量とする場合と断層が震央を必ず通る制約条件から計算して既知量とする場合の2種類を考えた。理想的な鉛直断層の場合、震央は断層線上に位置するが、実際には複雑な曲面で構成されている断層を矩形でモデル化しているため、必ずしもモデル化した断層線上に震央が有るとは限らない。場合によっては、この制約条件が悪影響を及ぼすことも考えられる。そこで、屈曲した断層の場合を想定して、この制約条件に関する検討を実施した。

3.2 遺伝的アルゴリズムによる推定手法

最大加速度および計測震度から上述の断層基準点を求める同定問題は、非線形最小二乗問題となる。本研究では、この問題を解くために遺伝的アルゴリズム¹⁵⁾¹⁶⁾を採用した。遺伝的アルゴリズムは、大域探索型の手法であるため、非線形最小二乗問題で常に問題となる局所解への収束を回避することができる。

遺伝的アルゴリズムの適応度関数は以下のように定義した。

$$F = \frac{N_A + N_I}{\sum_{i=1}^{N_A} \left\{ \frac{A_{\max}^{obs}(i)}{A_{\max}^{\max}} - \frac{A_{\max}^{cal}(i)}{A_{\max}^{\max}} \right\}^2 + \sum_{j=1}^{N_I} \left\{ \frac{I_{JMA}^{obs}(j)}{I_{JMA}^{\max}} - \frac{I_{JMA}^{cal}(j)}{I_{JMA}^{\max}} \right\}^2} \tag{9}$$

ここで、

- F : 適応度
- $A_{\max}^{obs}(i)$: i 地点における PGA の観測量
- $A_{\max}^{cal}(i)$: i 地点における PGA の解析値
- $A_{\max}^{\max}$: PGA 観測量の全観測点中の最大値
- $I_{JMA}^{obs}(j)$: j 地点における計測震度の観測量
- $I_{JMA}^{cal}(j)$: j 地点における計測震度の解析値
- $I_{JMA}^{\max}$: 計測震度の全観測点中の最大値
- N_A : PGA の観測データ数
- N_I : 計測震度の観測データ数

本研究では、使えるデータは全て使う事を考えているため、適応度関数の中に最大加速度と計測震度が混在している。両者は、大きさにかなり差があるため、適応度関数に与える影響が異なることになる。そこで、計測震度、最大加速度それぞれの最大値でスケールングすることとした。更に、適応度を一般的な値とするために、残差二乗和を観測点数で割って平均値としている。

また、本研究ではエリート戦略を採用している。エリート戦略の方法としては、各世代における最良個体が 1 つだけ必ず次世代に残るルールとした。これによって、世代を重ねる途中で最良個体が淘汰される事が無くなる。

3.2 数値シミュレーション

遺伝的アルゴリズムを用いた震源断層の推定を、神奈川県を対象として実施した。震源断層は、内陸活断層である北武断層 ($M_f=6.8$) とした。また、観測地点は地盤情報が明らかな K-NET サイト 14 地点とした。観測量となるデータは、正しい断層モデルを用いて予め計算しておいた値を用いた。最大加速度は地表

における加速度応答スペクトルの最短周期側 (25Hz) の値、計測震度は重回帰式による推定法を用いて作成した。また、解析量の計算にも同様の方法を用いている。

神奈川県内の K-NET サイトの位置と震源断層の位置関係を図-13 に示す。断層は県の南端に位置する。遺伝的アルゴリズムの解析条件は表-4 に示すものを用いた。いま、断層の破壊形態がバイラテラルであり、震央位置が断層の中央にあるものとする。走向は断層が震央を通る条件から決定し、未知量を断層基準点の座標 (緯度, 経度) のみとする。観測量としては、全観測点の最大加速度と計測震度が得られているものとした。図-14 に、総世代数 50 まで遺伝的アルゴリズムによる解析を実施した時の各世代における個体の解空間内の分布を適応度のコンターと共に示す。断層の両端が基準点となり得るため、コンターのピークは 2 箇所に表示されている。この 2 箇所が真値となる。初期状態ではほぼ均一に分布していたものが、世代を重ねる毎にコンターのピークに向かっていく様子が見られる。第 5 世代までに、殆どの個体が真値近傍に集合してい

表-4 遺伝的アルゴリズムの解析条件

総世代数	30~50
個体数	50
線列長 (bit)	12
交叉方法	一点交叉
交叉率	0.5
突然変異率	0.1
突然変異の種類	ビット置換方式
エリート戦略	有り

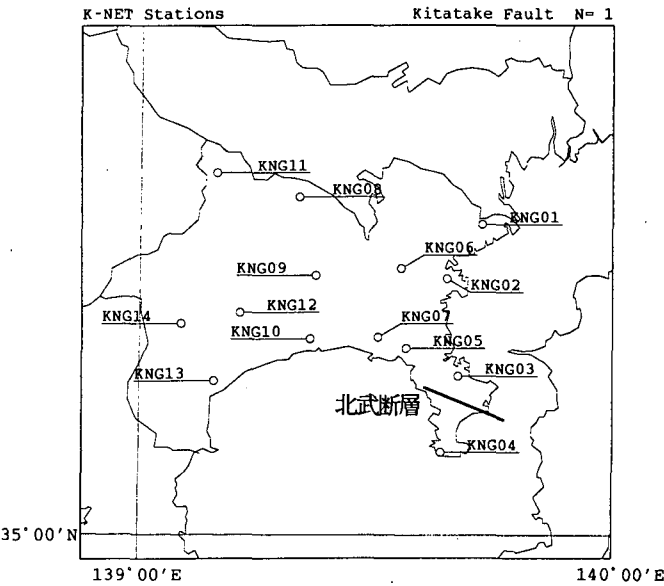
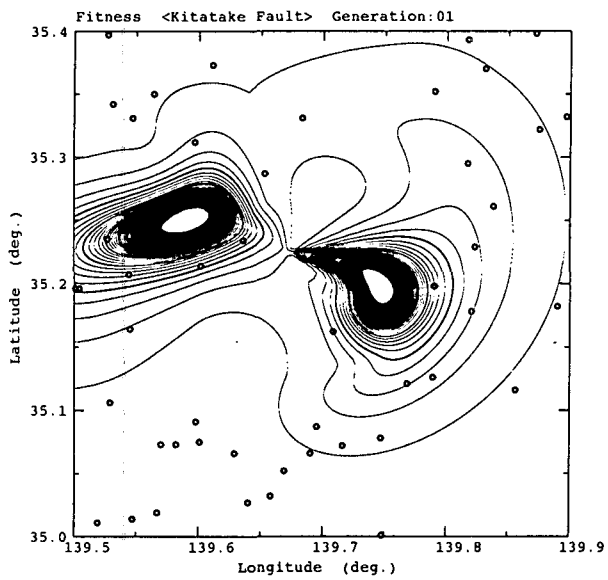
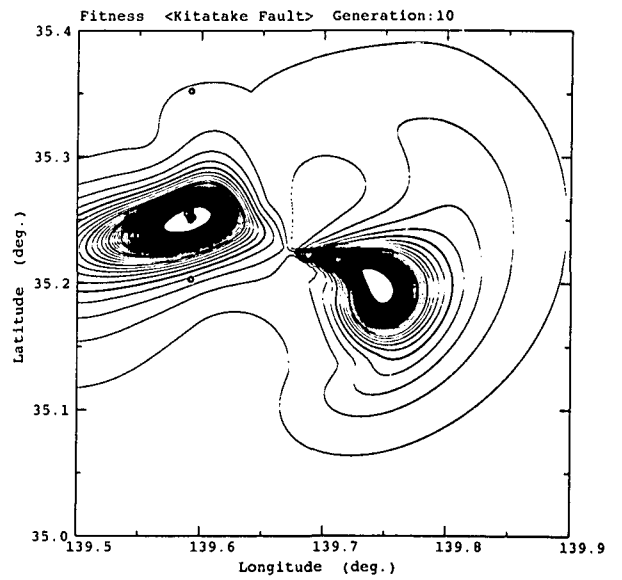


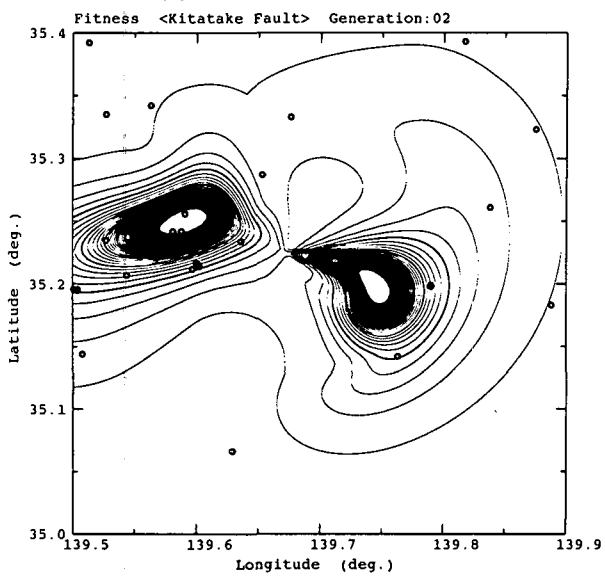
図-13 北武断層の震源断層モデル



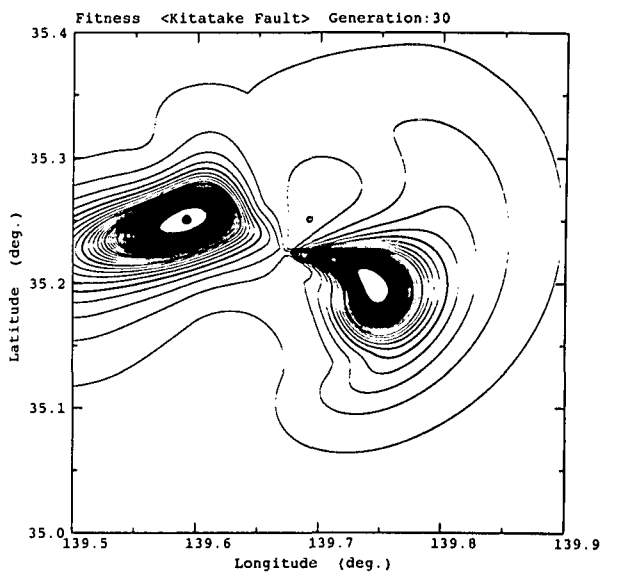
(1) 第1世代 (初期状態)



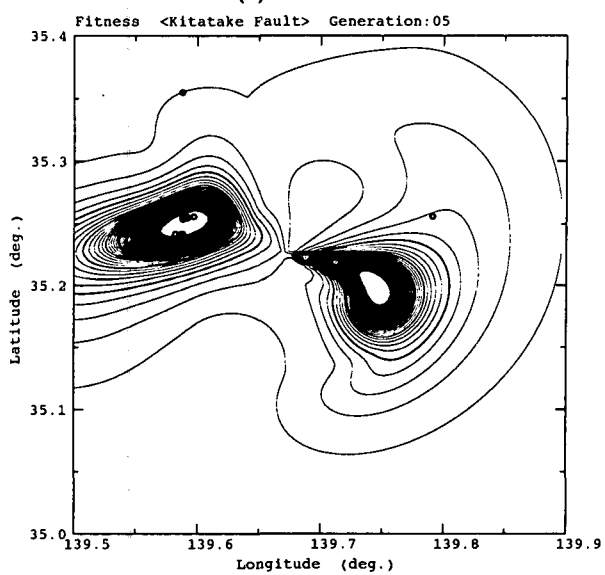
(4) 第10世代



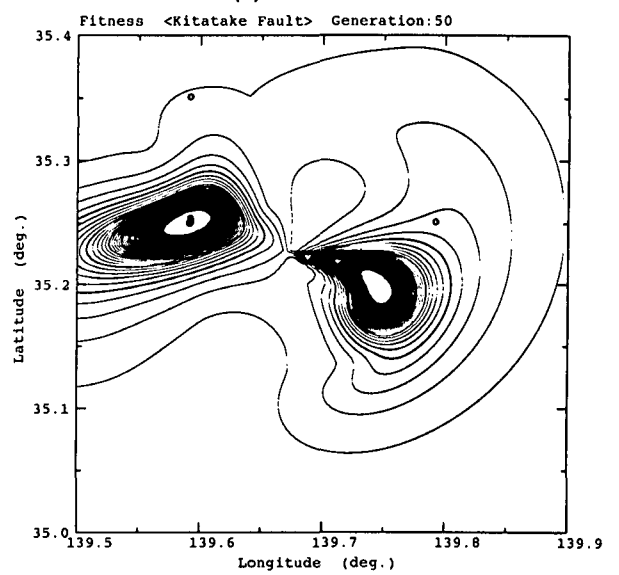
(2) 第2世代



(5) 第30世代



(3) 第5世代



(6) 第50世代

図一14 各世代における個体の分布状況

る。最終段階で大多数の個体がピークに集中している時に、コンターの低い位置に表れる個体は、突然変異によって出現したものである。第30世代までに、殆どの個体が真値に収束している。

3.3 屈曲した断層への適用

ここまで述べてきた例題は、直線で表される断層を想定し、矩形1枚断層モデルを用いて同定解析を行っているため、真値と完全に一致する解が得られた。しかし、実際の問題では断層が直線とは限らず、屈曲したものが多くあるのは事実である。そこで、このような非直線の断層を、直線モデルで同定した場合にどのような結果が得られるかを調べた。

対象とした断層は、図-15に示す伊勢原断層($M_f=7.0$)である。伊勢原断層は中心部に屈折点を有している。震央位置は断層中央の屈折点として、バイラテラル型の破壊形態を想定した。ここでは、断層が震央を必ず通る制約条件から走向を決定する場合と、走向も未知量する場合の二種類を考えた。断層が震央を通る条件を設けた時の同定結果を図-16(1)に示す。ここで、破線が真の断層、実線が同定結果を表している。また、走向も未知量とした時の同定結果を図-16(2)に示す。断層が震央を通る条件の時の同定結果は、中央の屈折点に接する形で推定されているため、真の断層から若干離れた所に位置している感がある。しかし、推定断層の走向は、真の断層の主軸方向に近いものとなっている。一方、走向を未知とした場合、真の断層の主軸線に近い同定結果が得られている。

両同定結果を用いて、地震動強さの分布の推定を行い、同定結果を評価した。対象は神奈川県とし、最大加速度分布と震度分布の比較を行った。図-17に最大加速度分布の比較、図-18に震度分布の比較を示す。走向の取り扱いの違いが最終的な地震動強さに及ぼす影響を比較すると、最大加速度分布、震度分布共に、走向を未知とした時の同定結果を用いた方が、真の断層モデルを用いた時の結果に近い傾向が得られている。従って、伊勢原断層のような屈曲した断層の場合でも、本研究で行ったような1枚断層で同定した結果は、真の断層モデルを用いた時と殆ど差異が無い地震動強さの分布が推定可能である事が確認できた。本研究で想定しているような、リアルタイム防災における早期段階の一次推定としては、十分な精度であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、加速度応答スペクトルを用いて計測震度を推定する手法を提案した。また、この提案手法を簡易な震源断層推定問題に応用した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

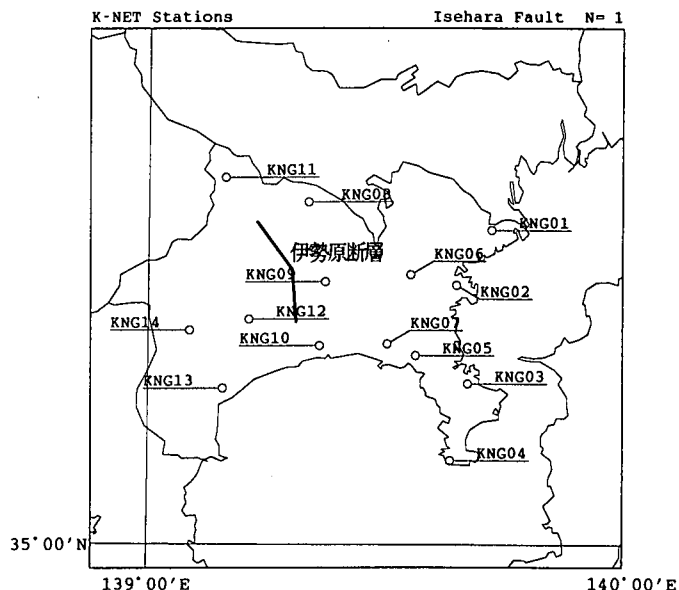
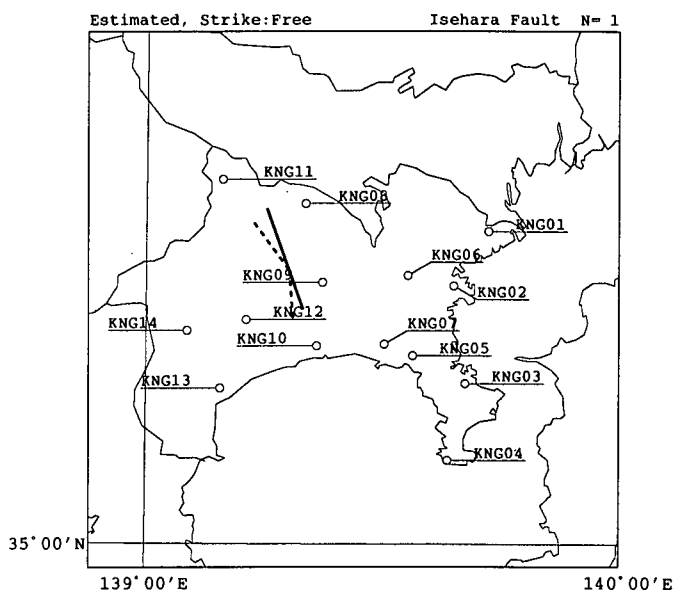
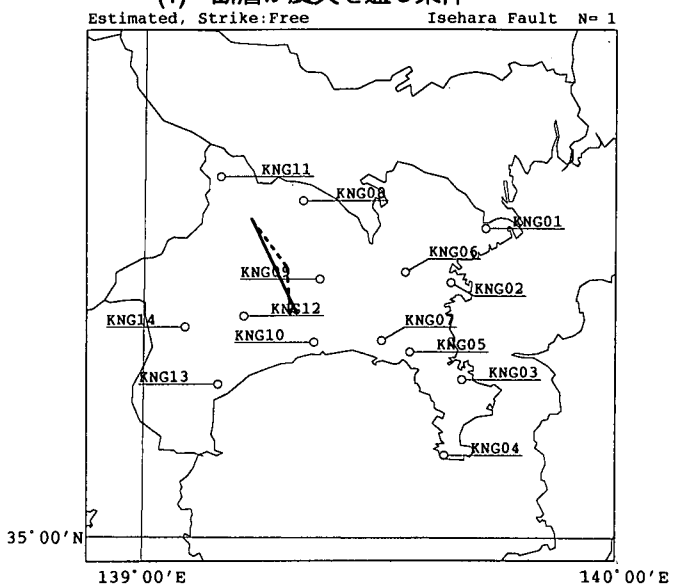


図-15 伊勢原断層の震源断層モデル

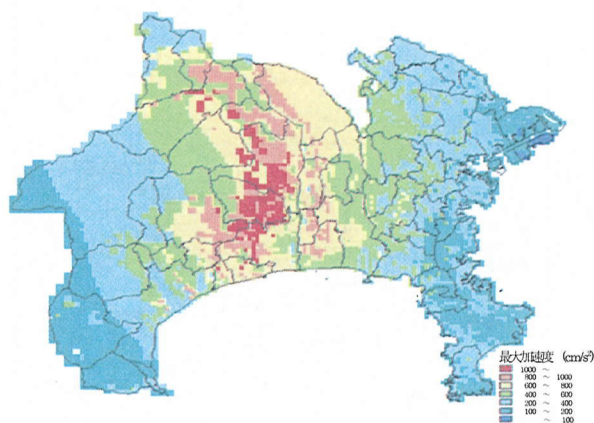


(1) 断層が震央を通る条件

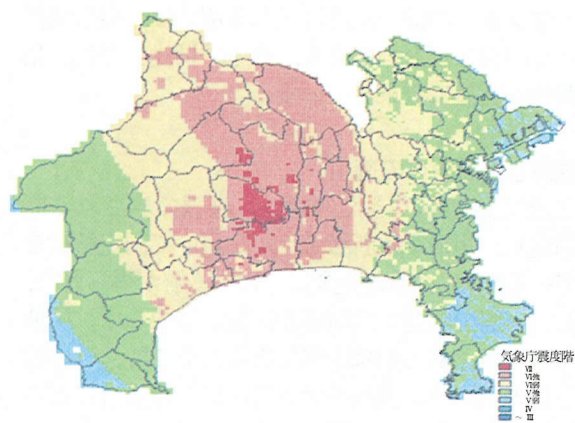


(2) 走向未知の条件

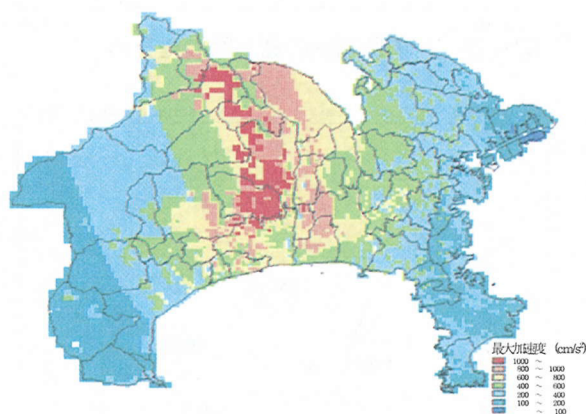
図-16 伊勢原断層の推定震源断層



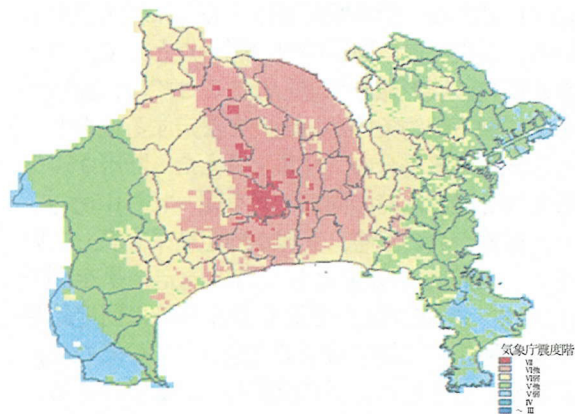
(1) 真値



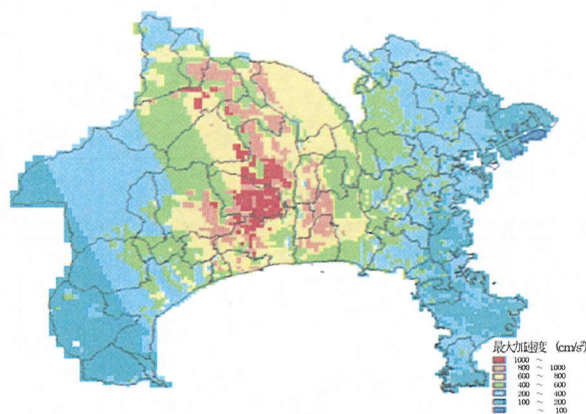
(1) 真値



(2) 推定値 (断層が震央を通る条件)

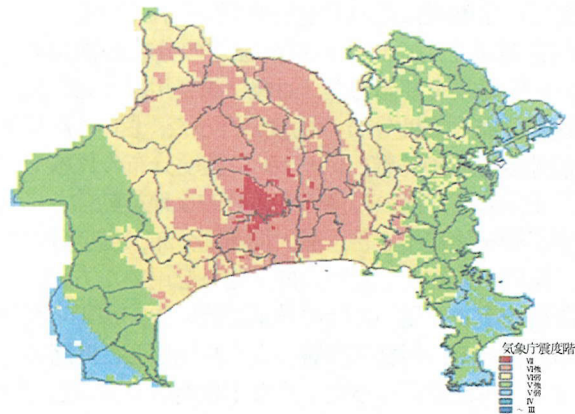


(2) 推定値 (断層が震央を通る条件)



(3) 推定値 (走向未知)

図一17 最大加速度分布の比較



(3) 推定値 (走向未知)

図一18 震度分布の比較

- ・ 加速度応答スペクトルを説明変量とする重回帰式により、計測震度を推定する手法を開発した。
- ・ 重回帰式により推定された計測震度は真値との対応が良く、本手法が精度良いものである事が確認できた。
- ・ 上記の重回帰式と加速度応答スペクトルの経験式、表層地盤の増幅率を組み合わせ、広域の震度分布を推定する手法を提案した。

- ・ 計測震度推定法を応用し、遺伝的アルゴリズムによる簡易な震源断層推定手法を提案した。数値シミュレーションの結果、本提案手法を用いて良好な結果が得られた。
- ・ 鉛直矩形の1枚断層でモデル化する同定手法を屈曲した震源断層の推定問題に適用し、同定結果が地震動強さの分布を推定する目的には十分な精度で得られることを確認した。

謝辞

本研究で使用した地震記録は、気象庁、日本建築学会、震災予防協会、WDCA、CSMIP、防災科学技術研究所より公開されている時刻歴データを使用して頂いた。また、神奈川県全域の表層地盤モデルは神奈川県、K-NET サイトの表層地盤モデルは防災科学技術研究所より公開されている柱状図データを使用して頂いた。表層地盤の増幅率の計算にあたっては、東電設計（株）地震技術部の高橋誠氏の協力を得た。匿名査読者には原稿を丁寧に読んで頂き、指摘内容は本稿の修正に大変有益でした。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 桐山孝晴：地震防災情報システム (DIS) の開発, 第 1 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.59-62, 1999 年 1 月.
- 2) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, 1997 年 8 月.
- 3) 神奈川県地震被害想定調査委員会：神奈川県地震被害想定調査 報告書, 1999 年 3 月.
- 4) 静岡県：第 2 時地震被害想定結果 報告書 (人的・物的被害編), 1993 年 6 月.
- 5) 気象庁 監修：震度を知る 基礎知識とその活用, (株)ぎょうせい, 1997 年 9 月.
- 6) 辻原治, 沢田勉, 谷口亜希子：距離減衰式に基づく断層位置の即時推定について, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3367-3372, 1998 年 11 月.
- 7) 辻原治, 江川智之, 沢田勉：最大加速度記録を用いた断層位置の簡易推定法と精度について, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.2, pp.503-514, 1999 年 8 月.
- 8) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol.II, pp.107-112, 1998 August.
- 9) 中川徹, 小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1982 年 5 月.
- 10) 佐藤良輔：日本の活断層パラメータハンドブック, 鹿島出版会, 1995 年.
- 11) 神奈川県：神奈川県地震被害想定調査報告書 (地質地盤), 昭和 60 年 3 月.
- 12) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会 編：日本の地震活動 ー被害地震から見た地域別の特徴ー, 財団法人 地震予知総合研究振興会, pp.120-121, 1997 年 10 月.
- 13) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について第 2 輯, 第 28 巻, pp.269-284, 1975 年.
- 14) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケールリング則ー地震断層の影響および地震被害との関連ー, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp.211-228, 1998 年.
- 15) 北野宏明 編：遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1995 年 4 月.
- 16) L. デービス 編：遺伝的アルゴリズムハンドブック, 森北出版, 1994 年 9 月.

(2000 年 4 月 21 日 受付)