

断層パラメータの予測誤差を考慮した 広帯域地震動の評価

大塚 久哲¹・P. G. SOMERVILLE²・佐藤 俊明³

¹フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

²Ph.D Woodward-Clyde Consultants, Senior Associate (566 El Dorado St., Suite 100, Pasadena, CA 91101, USA)

³工博 (株) 大崎総合研究所 主席研究員 (〒100 東京都千代田区内幸町 2-2-2)

短周期帯域と長周期帯域とで異なった手法を用いて地震動を作成した後、それらを合成して広帯域地震動を求める手法(ハイブリッド法)を用いて、1923年関東地震および相模トラフにおける将来の大地震の広帯域地震動の推定を行った。この際、将来発生する地震動に関しては震源パラメータの不確定性を考慮して、960波の時刻歴波形を発生させ、それらを統計的に処理して、平滑化応答スペクトルを標準偏差とともに提示した。さらにこの平滑化スペクトルを代表する10個の時刻歴波形を選定した。

Key Words: *strong ground motion time history, variable-slip model, broadband simulation hybrid method, Sagami trough, response spectrum, median and standard deviation*

1. 序論

土木の大規模プロジェクトにおいて構造物、例えば吊橋のような長大橋梁の耐震設計を行う場合、当該地点の地震動を的確に評価することが重要である。これまでの大規模プロジェクトにおいては、過去に発生した大地震を参考にして、当該地点に影響を及ぼすと考えられる大地震の規模と震央距離とから距離減衰式を使って当該地点の地震動を評価する手法が用いられてきた。しかしながら、プレート境界に近い地理的状況と、狭隘な国土に活断層が2000本以上存在するといわれているわが国において、今後、大規模プロジェクトを企画した場合、断層近傍に長大橋梁等を建設することが避け難いと思われ、このような場合、地震動の距離減衰式を用いる方法では、当該地域の断層の特性と、建設地点と断層との位置関係などを考慮した精度の高い地震動の評価は困難であろう。また、1995年兵庫県南部地震によって、日本においても内陸型活断層による直下型地震を考慮した構造物の耐震設計の重要性が認識されつつある。

このような観点から、断層モデルによって当該地点の地震動を予測する手法が開発されつつあるが、わが国においてはこれらの手法が実用的であるかの検討はほとんどなされていないのが現状である。現在、このような手法には、文献1)に示されるような経験的グリーン関数を用いる手法が提唱されている

が、これは当該地点において想定地震のマグニチュードより2程度小さいマグニチュードをもつ地震動の記録が得られている必要があり、どこにでも適用できる一般的な手法とは言い難い。したがって、本研究では、当該地点の地震動を評価する手法として、当該地点における小地震の記録が得られていない場合にも適用できる手法を用いることとした。

また、吊橋のような長大土木構造物の設計に当たっては短周期帯域と長周期帯域の両方の帯域をもつ広帯域において地震動を精度よく評価することが求められる。本研究では、短周期帯域と長周期帯域とで異なった手法により地震動を作成した後、それらを合成して広帯域地震動を求める手法(ハイブリッド法)を用いて、プレート境界型地震の断層モデルから広帯域地震動の推定を行うこととした。

但し、このようにして得られた地震動は、一組の震源パラメータを仮定した上での地震動の評価であって、将来発生するであろう大地震の震源パラメータを確定論的に予測することは現段階では不可能であるといわざるを得ない。したがって、想定される震源パラメータの範囲を地震学的に考慮して種々のパラメータを組み合わせることで多数の地震動を発生させ、それらを統計的に処理して、将来発生する地震動の予測平均値や予測誤差の標準偏差を提示していくことが、必要であると考えられる。そこで、震源パラメータを種々変化させたときの地震動を960波発生させ、予想される地震動がどの程度の平均値とばらつきを

有し、このような考え方が工学的に有用であるかを1923年関東地震の断層モデルを用いて考察した。さらに、平滑化スペクトルを代表する10個の地震波形を選定した。

2. 広帯域地震動の推定手法

広帯域の時刻歴波形をシミュレーションするためにハイブリッド法を用いた。この方法は、地震動を長周期帯域と短周期帯域に分けて計算した後にその両者を合成し時刻歴波形を求める方法である (Somerville et al, 1996)。本研究で用いた長周期及び短周期帯域それぞれの地震動作成の方法を簡潔に述べれば以下のとおりである。なお、本研究での長周期地震動と短周期地震動の作成には、境界周期3秒の周波数フィルターを用い、時間領域で合成した。

長周期帯域においては地震波振幅の方位特性、断層の破壊伝播効果および媒質の波動伝播効果を理論的に計算し、波形を求める方法 (Hartzell and Heaton, 1983) を用いている。この方法は近年起こった多くの地震による長周期強震動の波形のモデル化を行う際に広く用いられ、強震記録からインバージョンによって震源過程を求める際の典型的な一つの方法となっている。

短周期帯域においては、既往の大地震の震源近傍で起こった中小地震の強震観測記録から求めた経験的震源時間関数と、Helmberger (1974) の一般化波線理論において、地震波振幅の方位特性を無視して計算されたグリーン関数 (Somerville et al, 1991) を用いて、半経験的に地震動を作成する。

3. 1923年関東地震の断層モデルと地震動評価

(1) 震源特性、伝播特性およびサイト特性

本手法の適用事例として1923年関東地震を取り上げ、同地震による東京湾湾口部のサイトA (図-1) の地震動を推定する。断層モデルとしては、測地データと遠地実体波を用いたインバージョンによって求められた Wald and Somerville (1995) のモデルを用いる。このモデルは小田原付近と三浦半島付近にアスペリティがあるが、体験談に基づいた武村・池浦 (1994) の推定によれば、短周期地震波もこれらのアスペリティ付近から強くでてきているということであり、このモデルは広帯域地震動の評価にとって適切であると考えられる。表1に断層モデルのパラメータを示す。図-1は断層面の地表面への投影面を示し

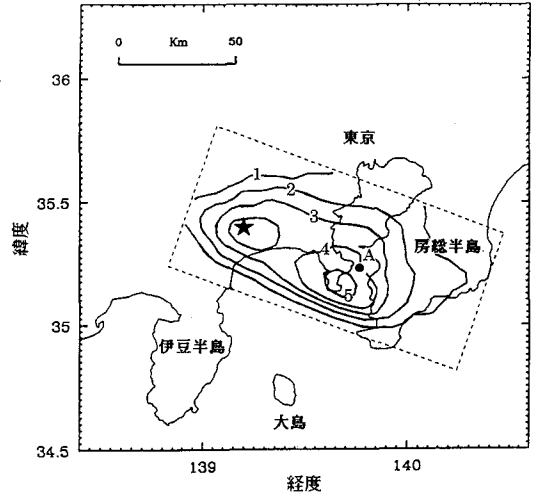


図-1 1923年関東地震の断層、最終滑り量分布 (単位 m)、およびサイトAの位置

表-1 破壊モデルパラメータ

震源	北緯 35.40° N 東経 139.20° E 深さ 14.6km
断層パラメータ	走向 N70° W 傾斜角 25° NE 長さ 130km 幅 70km 深さ 2.0-31.6km 地震モーメント 7.8×10^{27} dyne-cm
破壊パラメータ	速度 3.0km/sec 破壊モード 放射方向 時間関数 8 秒 (幅 4 秒の三角パルスを 2 秒毎に重ねた 3 つのタイムドレイ)

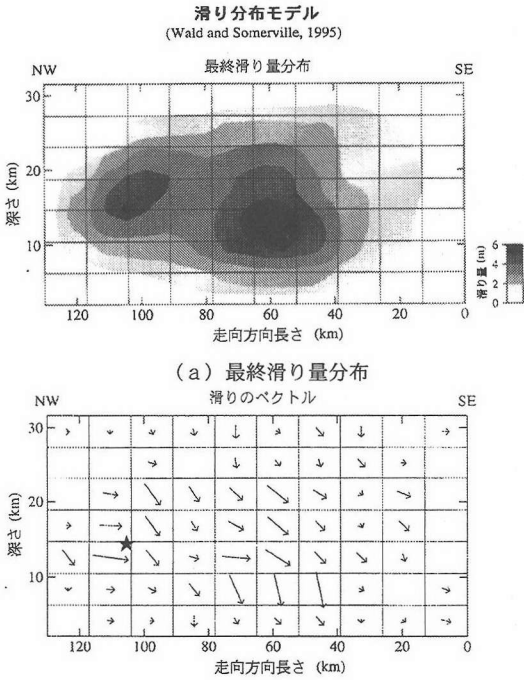
ており、最終すべり量のコンター図と地震動を求めるサイトA、震央の位置を併せて示している。

断層面は長さ方向に10分割、幅方向に7分割された要素断層によってモデル化した。このモデルでは、断層上の滑り量と滑りの向きが70個の要素断層に対して図-2のように規定されている。この断層モデルの特徴は滑り量が大きな領域 (アスペリティ) が2つ存在することにある。

図-2は最終滑りの分布のみを示すが、長周期地震動の計算においては Wald and Somerville (1995) のインバージョンの過程で求められた時間依存を有する滑り量と滑りの向きを用いる。具体的には、それぞれの要素断層の滑りの時間的変化は、幅4秒の三角パルス状の遠方場震源時間関数を2秒ごとに重ね

表-2 計算に用いた速度構造

深度 (km)	厚さ (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	密度 (g/cm ³)	Qp	Qs
0.00						
	0.035	1.84	0.50	2.2	100	50
0.035	0.120	1.90	0.65	2.2	100	50
0.155	0.06	2.02	0.77	2.2	100	50
0.215	0.585	2.10	0.80	2.2	100	50
0.80	2.20	3.60	1.80	2.3	200	100
3.00	5.00	4.70	2.60	2.5	300	150
8.00	5.00	5.70	3.30	2.6	300	150
13.00	7.00	6.60	3.70	2.8	500	250
20.00	5.00	6.90	3.90	2.9	500	250
25.00	7.00	7.00	4.00	3.0	500	250
32.00		7.90	4.40	3.2	1000	500



(a) 最終滑り量分布
(b) 要素断層ごとの滑りの向きと最終滑り量を表すベクトル

図-2 1923年関東地震の不均質滑りを考慮した断層モデル

た3つのタイムウィンドウで表現している。3つの時間関数が重ね合わせられた状態での震源時間関数はトータルで8秒の時間幅となる。Wald and Somerville (1995)の断層モデルでは、3つのそれぞれの震源時間関数に対応して、要素断層上での滑り量、滑りの方向が規定されている。この断層モデルの妥当性は国内のいくつかの地点で得られた1923年関東地震の本震記録のシミュレーションによって検証されており、波形の再現性は良好であることが示されている(佐藤他, 1996a)。なおこの断層モデルの特徴と整合する2つのアスペリティーを持つ比較的単純な断層モデルを用いた同様のシミュレーションでも波形の再現性は良好であった(野澤他, 1995)。

さて、短周期帯域の計算には経験的震源時間関数が必要である。1923年関東地震直後の余震以降、断層面近傍ではM7程度の地震は発生していない。東京本郷で得られた1923年関東地震の余震記録は本検討で対象とする短周期成分までの分解能はない。したがって、ここでは、関東地震と同様にプレート境界で起こった巨大地震である1985年ミチヨアカン地震(Mw8.0)の際のMw6.8の余震によるCaleta de Campos(震央距離32km)で得られた加速度波形か

ら求められた経験的震源時間関数を用いた(Somerville et al, 1991)。この余震は関東地震と同じ低角逆断層型の震源メカニズムをもち、地震モーメントは 2×10^{26} dyne-cm、断層面の長さ、幅はそれぞれ25km、20kmでライズタイムは2秒である。これに基づき、1923年関東地震の断層面(長さ130km、幅70km)を長さ方向に5分割、幅方向に4分割する。また、各要素断面内ではライズタイム2秒を有するこの経験的震源時間関数を4つ用いて8秒のライズタイムを表現した。以上より、断層面全体では計80個の経験的震源時間関数が用いられた。この時間関数の重ね合わせの個数はJoyner and Boore (1986)の震源スペクトルの相似則を満足するものである。

地下構造モデルとしては、表-2に示す水平成層構造を用いる。この地下構造のモデル化に際しては、S波速度500m/secの層が露頭しているとして、-215mまでは検層結果を参考にして、それより深いところは佐藤他(1996a)およびSato et al(投稿中)に基づいている。計算点はこの地下構造モデルの地表面である。

(2) シミュレーション結果

図-3に計算された加速度波形のNS成分を示す。短周期地震動、長周期地震動、それらを合成した広帯域地震動、及びその広帯域地震動の水平2成分のスペクトルの平均を平滑化したターゲットスペクトルに適合させた模擬地震動の順に並べている。模擬地震動の時刻歴波形は、ターゲットスペクトルと広

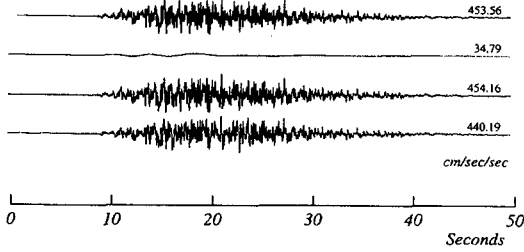


図-3 加速度の時刻歴波形 (NS成分)

(上から短周期地震動, 長周期地震動, 広帯域地震動, およびターゲットスペクトルに適合させた模擬地震動を示す)

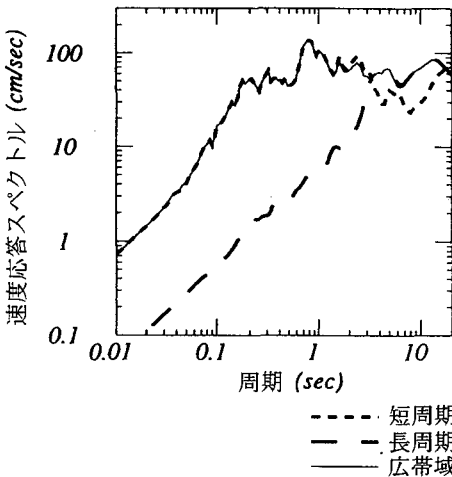
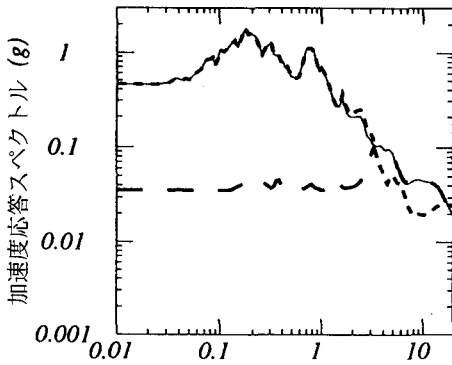


図-4 加速度及び速度応答スペクトル(NS成分, 減衰5%)

帯域地震動の NS 成分の位相を用いて作成した。図-4 に短周期地震動, 長周期地震動, それらを合成した広帯域地震動の加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトル (ともに減衰5%) を示す。図-5 には, 広帯域地震動の応答スペクトル, ターゲットスペクトル, 及びターゲットスペクトルに適合させた模擬地震動のスペクトルを示す。

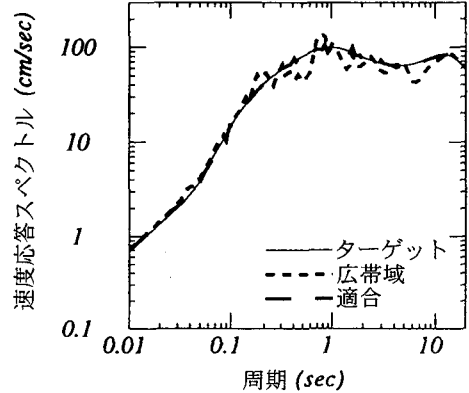
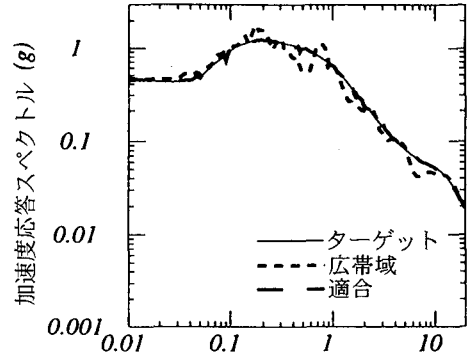


図-5 広帯域 (NS成分), ターゲット及び適合波形の加速度及び速度応答スペクトル (減衰5%)

ターゲットスペクトルを設定した理由は, すなわち, 短周期帯域のシミュレーションで用いた経験的震源時間関数は1985年ミチヨアカン地震の余震の強震記録から求めたものであり, スペクトルの細やかなピークや谷が1923年関東地震による東京湾口部の地震動を正確に反映しているとは限らないからである。ターゲットスペクトルは広帯域地震動の水平2成分のスペクトルの平均を平滑化して求めた。

得られたターゲットスペクトルは, 周期1秒付近で約100cm/secの値をとる。長周期帯域のスペクトルは周期約12秒を中心とする大きなピークをもつ。

4. 相模トラフの将来地震の震源モデル

(1) 概要

相模トラフにおける将来の大地震では, 1923年関東地震の場合とは異なった滑り分布及び震源 (破壊開始点) 位置が予想され, その断層破壊モデルには不確実性が存在する。また, 破壊伝播速度及び立ち上がり時間についても不確実性がある。したがって,

地震動評価の信頼性を高めるためには、各種断層パラメータの変動を考慮して時刻歴波形を計算し、その平均像とばらつき具合を知ることが重要である。

ここでは、相模トラフにおける将来地震の震源モデルのモデル化について述べる。ここで、断層面の幾何学的形状のモデルは、3章と同じものを用いた。

(2) 破壊伝播速度の設定

これまでの多くの地震の解析例から、破壊伝播速度の平均的な値は経験的にS波速度の0.8倍であることが知られている。1923年関東地震の断層面の存在する深さ2kmから32kmの位置におけるS波速度の平均値は3.7km/sである(Sato et al.投稿中)ことから、本検討ではその0.8倍である3km/sを破壊伝播速度の中央値として採用した。

破壊伝播速度のばらつきを考えるにあたって、標準偏差0.5km/secの正規分布を仮定した。具体的には破壊伝播速度の(中央値-標準偏差)、(中央値+標準偏差)の値は2.5km/s, 3.5km/sである。

これらの異なった破壊伝播速度に対して計算された地震動の応答スペクトルを平均する際には、破壊伝播速度に関して仮定された確率密度分布関数(正規分布)を考慮した重みを用いるものとする。すなわち正規分布の密度関数を、(中央値-標準偏差)、中央値、(中央値+標準偏差)を離散点としてモデル化した。その際、重みの合計が1となる前提条件のもとに分布関数の形を考慮して、中央値の重みを0.45、(中央値±標準偏差)の重みを0.275と仮定した。

(3) 立ち上がり時間の設定

立ち上がり時間は断層面上のある位置における滑りの継続時間を表す。ここでは、Somerville他(1993)が地殻内地震について求めた地震モーメントと立ち上がり時間の経験的関係を参考にして、沈み込み境界(サブダクションゾーン沿い)の地震における同様な関係を推定した。図-6中の白丸は、Somerville他(1993)が地殻内地震の検討に用いた11個の地震の地震モーメントと立ち上がり時間の関係を示す。このデータを基に地殻内地震の立ち上がり時間 T_r と地震モーメント M_o の間の関係式は次の通りである。

$$T_r = 1.72 \times 10^{-9} \times M_o^{1/3}$$

一方、沈み込み境界の地震に関しては、ソースインバージョン結果に基づいて不均質滑りモデルの地震モーメントと立ち上がり時間の関係が検討できる例は、わずかに2例しかない。この結果を図-6中に

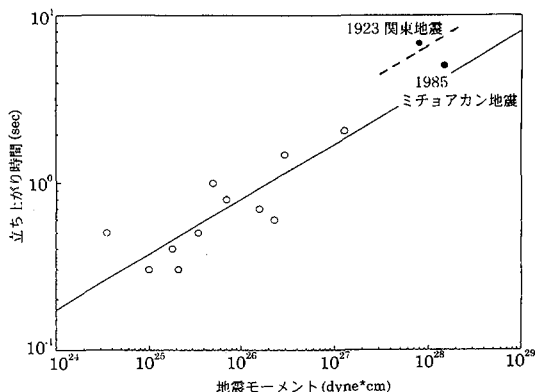


図-6 地殻内地震の地震モーメントと立ち上がり時間との関係。(1923年関東地震と1985年ミチョアカン地震の関係も記載)

黒丸で示す。1923年関東地震の立ち上がり時間6.8秒の推定値は遠地実体波のデータから導かれているが(Wald and Somerville, 1995)、強震動データの不足及び遠地実体波のデータが疎らであり、信頼性の点で確実なものではない。メキシコで発生した1985年ミチョアカン地震の立ち上がり時間の推定値5秒は強震動データ及び遠地実体波データに基づいてMendoza and Hartzell (1989)によって求められたもので、かなり信頼できるデータである。これら2つの地震の断層面の滑りの平均値は各々3.5m, 1.4mである。1985年ミチョアカン地震の滑りの平均値は、この規模の地震としてはかなり小さい値である。この滑りの平均値の小ささは立ち上がり時間の値が小さいことと関係があると考えられる。そこで、ここではWald and Somerville (1995)の結果も踏まえてマグニチュード8の沈み込み境界の地震の立ち上がり時間の平均値を6秒程度と推定し、立ち上がり時間 T_r と地震モーメント M_o の関係式として次の式を用いることとした。

$$T_r = 3.0 \times 10^{-9} \times M_o^{1/3}$$

この式から、1923年関東地震について、立ち上がり時間6秒が得られる。沈み込み境界の地震の立ち上がり時間のばらつきに関しては、他に参考となるデータがないことから、地殻内地震のデータから導かれた立ち上がり時間の標準偏差を表す倍率1.4倍という数値をそのまま用いる。これによれば立ち上がり時間の(中央値-標準偏差)および(中央値+標準偏差)の具体的な値としてそれぞれ、4秒, 8秒が得られる。

相模トラフの想定地震の立ち上がり時間の不確定性に加えて短周期の地震動シミュレーションにおいてサブイベントの経験的震源時間関数として用いる

表-3 仮定された立ち上がり時間の分布

主イベントの 立ち上がり時間	サブイベントの 立ち上がり時間	重み
4.0 (中央値-標準偏差)	1.5 (中央値)	.1375
6.0 (中央値)	1.0 (中央値-標準偏差)	.1375
6.0 (中央値)	1.5 (中央値)	.45
6.0 (中央値)	2.0 (中央値)	.1375
8.0 (中央値+標準偏差)	1.5 (中央値)	.1375

1985年ミチョアカン地震の余震の立ち上がり時間の不確定性もある。この余震の地震モーメントは、 2×10^{26} dyne·cm (Somerville 他, 1993) である。この地震モーメントから上記の関係式を用いて立ち上がり時間の平均値を求めると1.5秒となり、(中央値-標準偏差) および (中央値+標準偏差) の値としてそれぞれ1.0秒、2.0秒が得られる。このような考察に基づき、短周期帯域のシミュレーションにおいては、シミュレーションの対象となる1923年関東地震の立ち上がり時間の変動とともにサブイベントの経験的震源時間関数立ち上がり時間の推定誤差の影響も考えた。

想定地震とサブイベントの2つの立ち上がり時間の組み合わせについては、正規分布の密度関数を2次元で考え、それぞれの時間軸において(中央値-標準偏差)、中央値、(中央値+標準偏差)を離散点として、5個の立ち上がり時間の組み合わせでモデル化した。各離散点における重みは、合計が1となることを前提条件として、分布関数の形を考慮して仮定した。このようにして考えた組み合わせと重みを表-3に示す。

(4) 滑り分布モデルの作成

本研究ではSomerville 他 (1993) の考え方に基いて将来の相模トラフ地震を想定して8つの滑り分布モデルを作成した。この滑り分布モデルに滑りの大きさのコンター及び陰影を付けたものを図-7に、また滑りベクトルを図-8に示す。

滑り分布の作成においては空間に関する波数スペクトルを利用した。波数スペクトルの振幅成分はアスペリティ(大きく滑る領域)のサイズおよび強度を決定する。ここでは、8つの滑り分布モデルのすべてが、Somerville 他 (1993) に示された11個の地震の波数スペクトル振幅の平均特性に従っている。

波数スペクトルの位相成分はアスペリティの位置を決定する。各地震において類似の特性をもつ振幅

成分とは異なり、位相成分はアスペリティの位置の相違を反映して地震ごとにその値が異なる。したがって、ここでは波数スペクトルの位相成分をコントロールするための異なる乱数を選定し、位相成分がランダムに変化した8つの異なる滑り分布モデルを作成した。

各要素断層の滑り角は、中央値が 135° で、 100° から 170° の範囲に入る値をランダムに発生させて決定した。中央値の値は1923年関東地震の滑り角を参考とした。

これら8つの滑り分布モデルを用いて計算した地震動の応答スペクトルの平均値を求める際には、各滑り分布モデルの発生可能性が同じ程度であると考え、各モデルに対して1/8の重みを用いることにした。

(5) 震源位置(破壊開始点)の選定

1923年関東地震における震源は断層の北西端部に位置していたが、将来発生する地震では、断層走向に沿ってどの位置が震源となっても不思議ではない。したがってここでは断層走向に沿って等間隔に4箇所の震源を仮定した。1923年関東地震の震源深さは断層面のほぼ中央であり端部ではなかったことを参考として、ここでは震源深さとして断層面の幅方向において中央部付近の上部側と下部側の2箇所を選んだ。すなわち、本検討で用いる震源位置は、断層走向方向4箇所、断層幅方向2箇所の組み合わせから合計8箇所となる。これらの震源位置は図-7、図-8において星印で表示している。この8箇所には関東地震の震源は含んでいない。これらの震源位置を破壊開始点と考えて計算された地震動の応答スペクトルの平均値を求める際に、各位置は同様にあり得るものと考えて、各モデルに対して1/8の重みを採用した。

(6) シミュレーションで用いる変動パラメータのまとめとケース数

これまで8つの滑り分布モデルのセット、8箇所の震源位置のセット、3つの破壊伝播速度のセット、3つの主イベントの立ち上がり時間のセット、3つのサブイベントの立ち上がり時間のセット、およびこれらの各パラメータ値に割り当てられた重みについて説明した。以下では、これらの断層パラメータの変動を組み合わせ、 $8 \times 8 \times 3 \times 5 = 960$ ケースについてシミュレーションを行い、時刻歴波形を生成した。

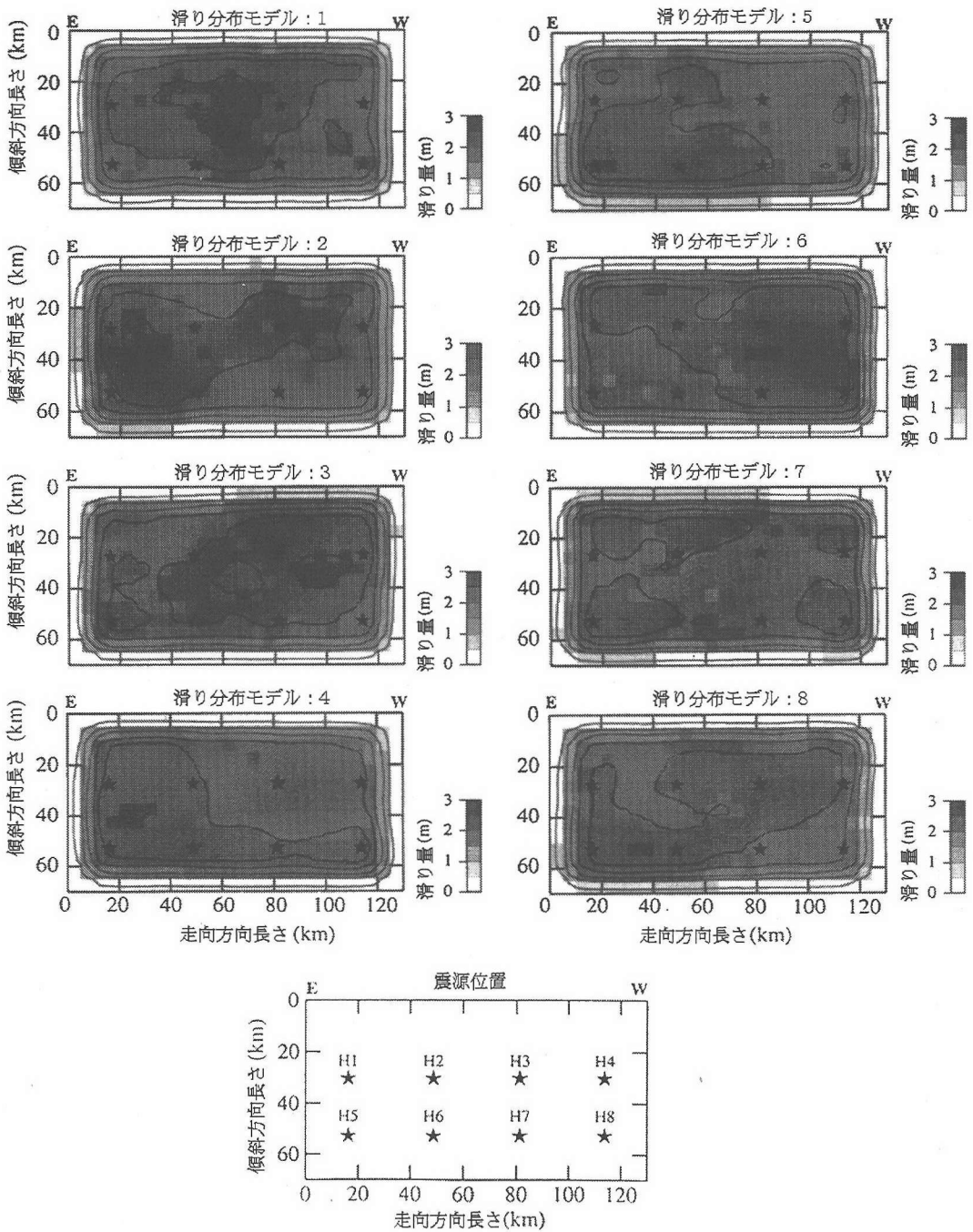


図-7 相模トラフの地震の断層モデルにおいて想定された8つの滑り分布および8つの震源位置
(滑り量分布は等高線及び陰影で表示)

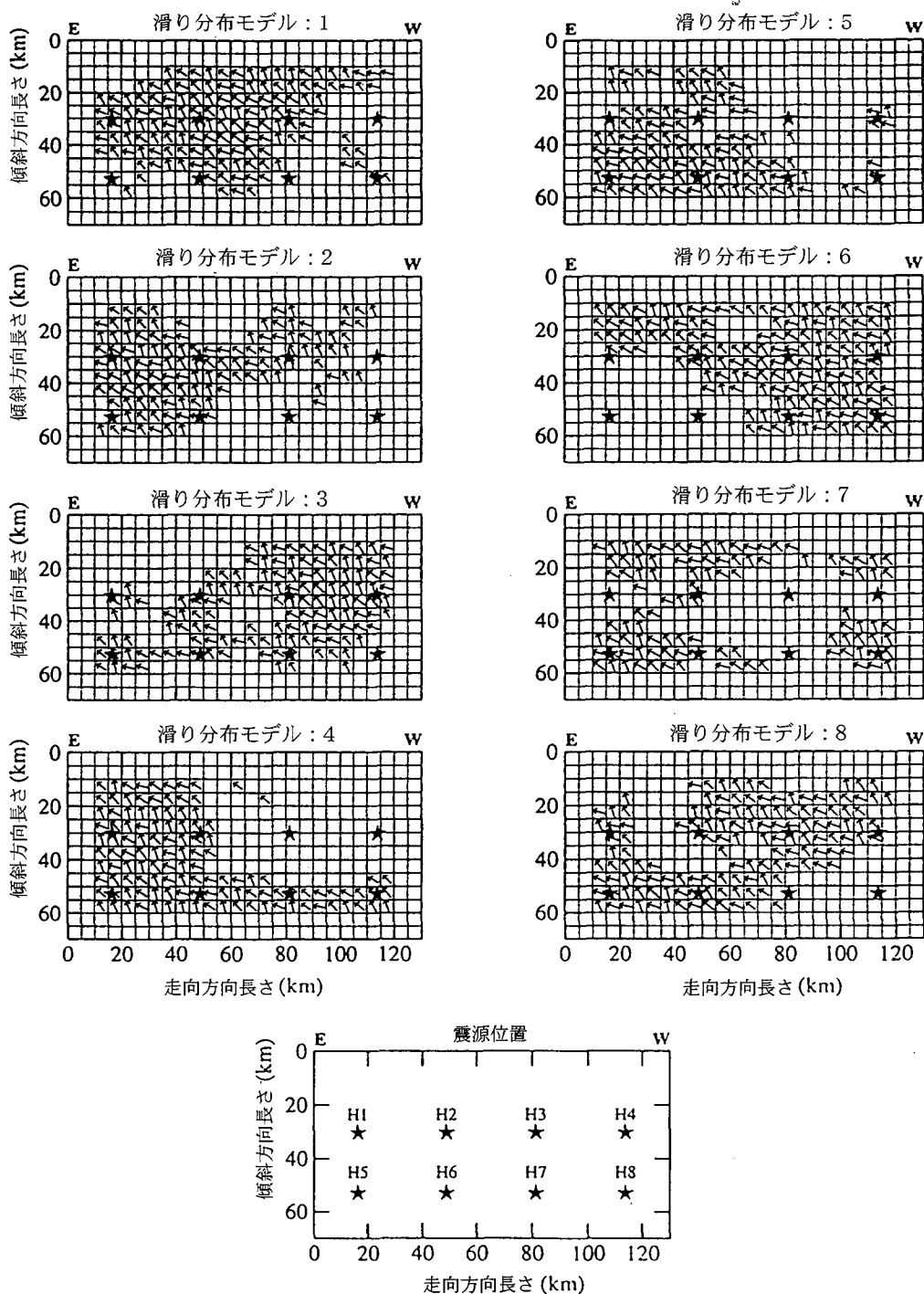


図-8 相模トラフの地震の断層モデルにおいて想定された8つの滑り分布および8つの震源位置
(大きく滑る部分の滑りの向きをベクトルで表示)

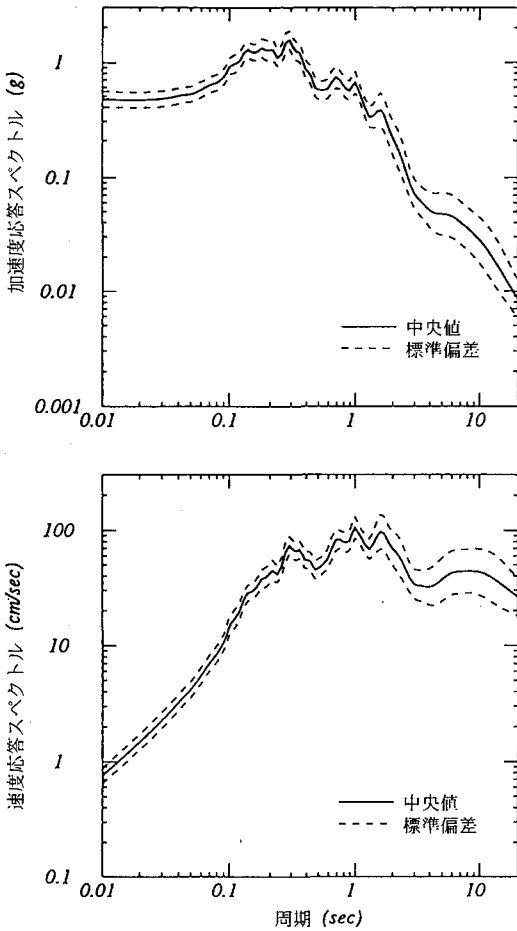


図-9 全ての震源パラメータの変動を考慮した場合の応答スペクトルの中央値と標準偏差

5. 相模トラフの将来の地震動の推定

(1) 概要

ここでは、前章の断層パラメータを用いた計算結果より、まず応答スペクトルの中央値と標準偏差を示す。次いで、応答スペクトルの震源パラメータへの依存性を考察する。さらに実現象をモデル化するに際しての不確実性をも考慮した応答スペクトルの標準偏差を求め、最終的な平滑化スペクトルの中央値と標準偏差を求めた。最後に、計算された960個の時刻歴波形の中からこの平滑化スペクトルの中央値とばらつきに適合する10個の時刻歴波形のサブセットを予測地震動の代表例として選択した。

地震動を求める点は3章と同じであり、図-1に示すサイトAである。震源とサイト間の伝播経路に沿った波動伝播効果を表すグリーン関数の計算にも3

章の水平成層地盤構造モデルを採用した。

(2) 各パラメータの変動を考慮した応答スペクトルの中央値および標準偏差

計算された時刻歴波形のNS成分とEW成分の応答スペクトル間で系統的な相違が小さいことがわかったので、水平2成分の応答スペクトルの平均をとって結果を表示する。前章の各パラメータ値に割り当てられた重みを用いて、全セットに対する応答スペクトルの中央値および標準偏差を計算した。その結果を図-9に示す。この図に示された標準偏差は全てのパラメータの変動による応答スペクトルのばらつき具合を表している。

(3) 応答スペクトルの震源パラメータへの依存性 (パラメトリック標準偏差およびモデリングによる不確実性)

変動を考えた4個の震源パラメータは、滑り分布、震源位置、破壊伝播速度、および立ち上がり時間である。それぞれのパラメータの変動に伴う応答スペクトルのばらつき具合を他のパラメータの変動がないものとして計算した結果を図-10に示す。また、図-11に、自然対数表示の加速度応答スペクトルにおける標準偏差を周期の関数として示す。この図から次のことが分かる。応答スペクトルの最大の変動は立ち上がり時間に関するものである。次に大きな変動は破壊伝播速度に関するものである。周期4秒までは周期が長くなるにしたがって応答スペクトルのばらつきが大きくなり、周期4秒以上の長周期帯域ではばらつきは減少する。3番目に大きな影響を及ぼす変動は震源位置に関するものである。応答スペクトルのばらつきは周期が長くなるにつれて次第に大きくなる。最も小さい変動は滑り分布モデルに関するものである。今回のシミュレーションでは、滑り分布モデルに関する変動が最も小さくなったが、これは、Takeo and Kanamori (1992,1997)の結果と異なっている。この理由は今回用いた滑り分布がTakeoらと比較してかなり滑らかであること、および最大滑り量が3m程度とTakeoらの10mと比較して小さいことが考えられる。このような滑り分布モデルとなった原因として、滑り分布モデルの作成に際して、内陸地震データを用いていること、および波数スペクトルで滑り分布を表す際のモデル化の精度の問題の2つが考えられるが、この点に関しては、今後の検討課題と考えている。

図-11には異なるパラメータの影響に関して相関

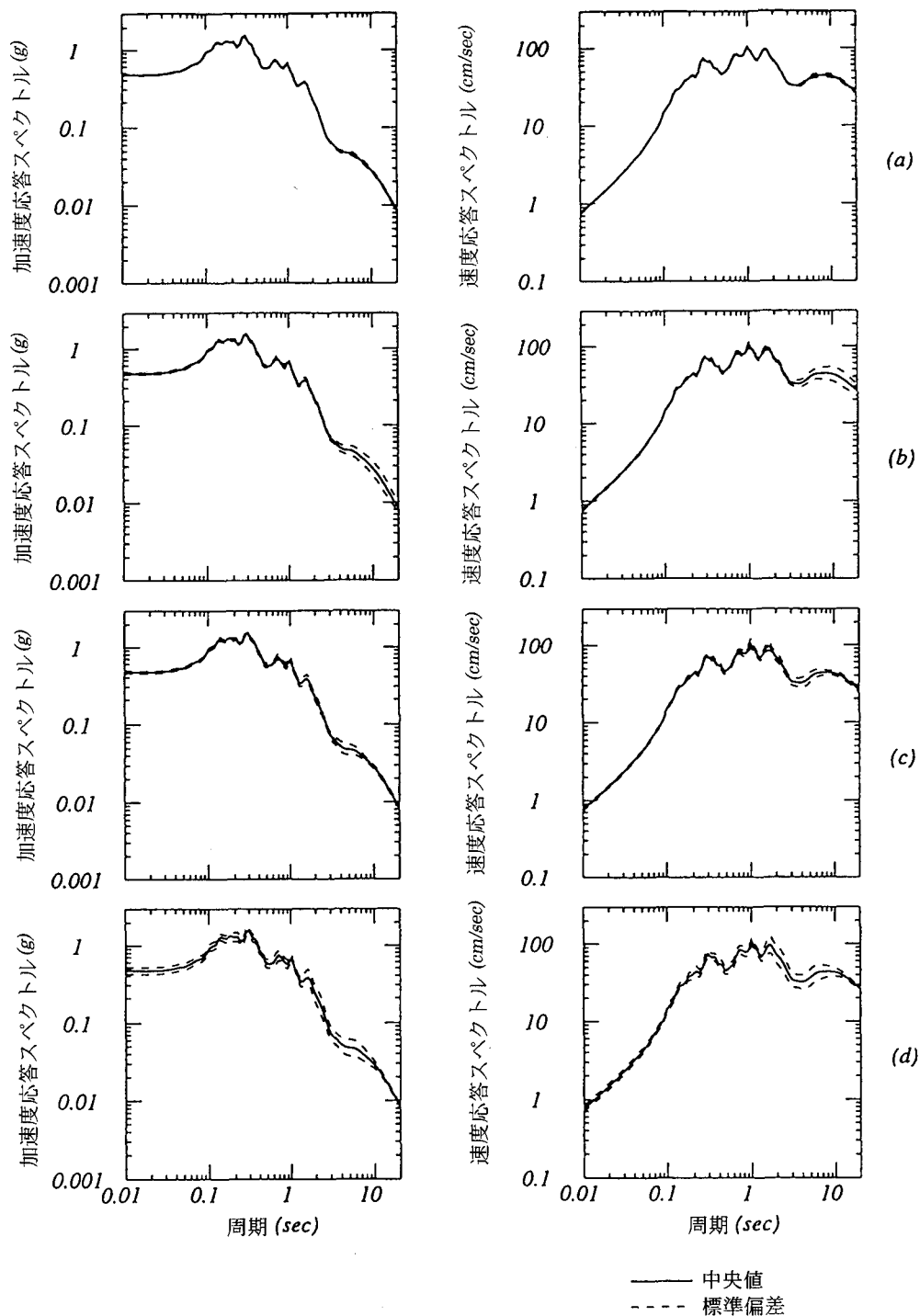


図-10 個々の震源パラメータの変動に対する応答スペクトルの中央値と標準偏差
 (a) 滑り分布モデル; (b) 震源位置; (c) 破壊伝播速度; (d) 立ち上がり時間

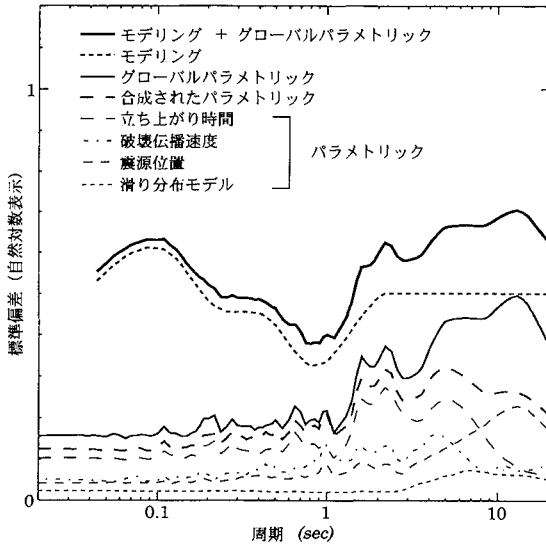


図-11 全ての震源パラメータの変動に対する加速度応答スペクトルの標準偏差 (中太実線), モデリング自体の不確実性による標準偏差 (中太破線), およびその両者を考慮した標準偏差 (太実線). 個々の震源パラメータの変動に対する標準偏差 (下側の4つの線), および個々の震源パラメータの変動が応答スペクトルに及ぼす影響は独立であると仮定して個々の震源パラメータの変動に対する標準偏差から求めた全ての震源パラメータの変動に対する標準偏差 (間隔のあいた太破線)

がないと仮定して個々のパラメータの変動に関する標準偏差をすべて合成 (自乗和の平方根) することによって求めた標準偏差も示す. 合成されたパラメトリック標準偏差はシミュレーションの全セットから求めたグローバルパラメトリック標準偏差よりも小さい. このことはパラメータの影響に関して何らかの相関があることを示している. 別途行った検討から立ち上がり時間と破壊伝播速度の間に相関があることがわかった.

応答スペクトルの第二の不確実性であるモデリング自体の不確実性は, 震源パラメータが既知である地震に対して本方法を適用して求められた合成地震動と観測地震動との相違から評価される. しかしながら, 厳密な意味で震源パラメータが完全に既知である地震は存在せず, この第二の不確実性のみの評価を行うことは現実には難しい. 本研究では, Somerville et al (1991) が1985年ミチョアカン地震に対して評価したこのモデリングによる不確実性の影響を用いることとし, 図-11 にその結果を併記し

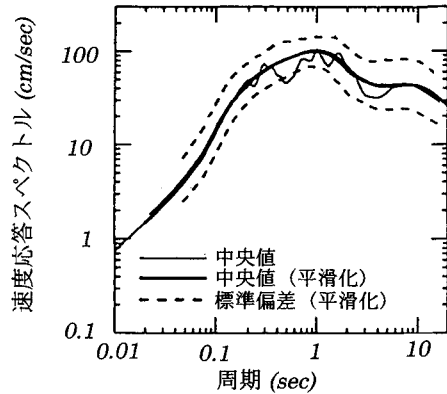
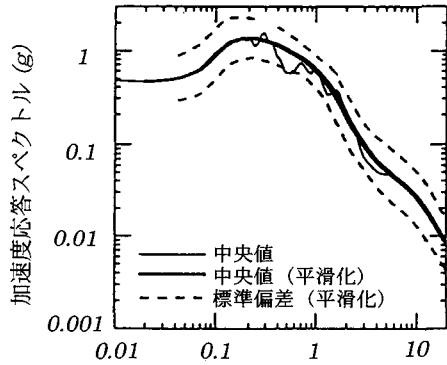


図-12 本検討で得られた応答スペクトルの中央値(図-9)と平滑化応答スペクトルの中央値とその標準偏差

ている. Somerville et al (1991) の結果にも震源パラメータの不確実性が完全に排除されているわけではないが, 1985年ミチョアカン地震は比較的精度の良いデータから震源パラメータが推定されている地震であることから採用した. 1985年ミチョアカン地震のシミュレーションの際には短周期地震動のシミュレーションのみを実施しているため, 周期3秒以上の長周期帯域における不確実性は不明である. そこで, 図-11 では短周期帯域における不確実性の平均的な値である数値 1.65 (自然対数表示で 0.50) を長周期帯域における不確実性として見積もった. 以上の二つの不確実性を考慮した応答スペクトルの標準偏差は, それぞれの不確実性による標準偏差の自然対数の自乗和の平方根を計算することにより評価される. その結果は図-11 に併記されており, これによって2種類の不確実性を考慮した応答スペクトルの標準偏差が得られた. この標準偏差は, 第二の不確実性が完全に分離されていないため, 過大評価となっているおそれがあることに留意すべきである.

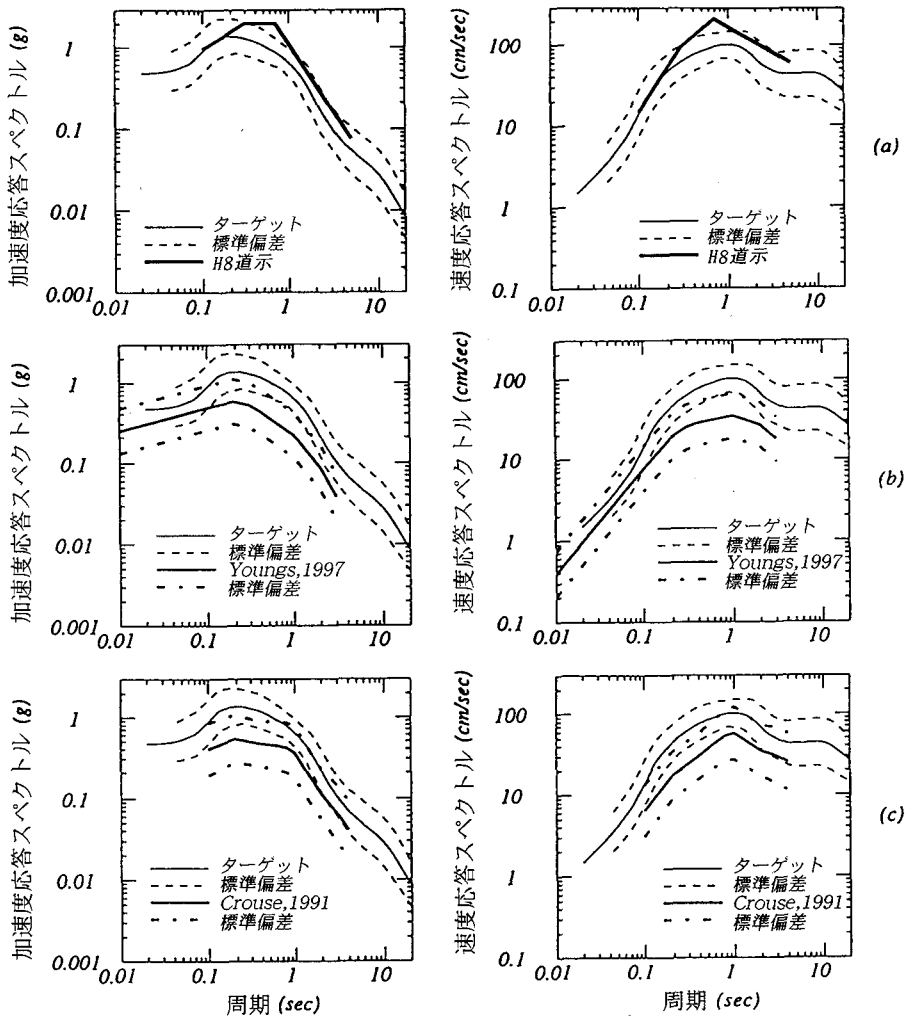


図-13 平滑化された応答スペクトルと他の経験的応答スペクトルとの比較

- (a) 地盤種別 I に対する H8 道示スペクトルとの比較
- (b) Youngs(1997)の経験的なスペクトルとの比較
- (c) Crouse(1991)の経験的なスペクトルとの比較

(4) 平滑化スペクトルの作成

平滑化スペクトルは 960 ケースのシミュレーションから得られた応答スペクトルの平均値を滑らかなカーブで表現したものである。平滑化スペクトルは、当該サイトで実際に生じると予想される平均的な地震動特性を反映していないと考えられるスペクトルのピークおよび谷を目視によって除外して作成した。その結果を図-12 に示す。

平滑化スペクトルの標準偏差は Abrahamson et al (1990) の方法に従い前述の 2 種類の不確定性による影響を考慮して作成した。

図-12 には 2 種類の不確定性を考慮した場合の標準偏差を平滑化スペクトルとともに示している。この図-12 が相模トラフで将来起こる地震によるサイト A における地震動の平滑化スペクトルとそのばらつきに関する最終的な結果である。

表-4 960ケースのシミュレーション結果を代表するために選択された10ケースの時刻歴波形の計算に用いた震源パラメータ

サンプル番号	スリップモデル	震源位置	破壊速度 (km/s)	立ち上がり時間の組み合わせ (主要動+サブイベント,sec)
1	1	1	3.0	8.0 + 1.5
2	2	2	3.0	4.0 + 1.5
3	3	3	2.5	8.0 + 1.5
4	4	4	3.5	4.0 + 1.5
5	5	5	3.0	6.0 + 2.0
6	6	6	3.0	6.0 + 2.0
7	7	7	2.5	6.0 + 2.0
8	8	8	3.0	6.0 + 1.5
9	1	2	2.5	4.0 + 1.5
10	3	2	3.5	6.0 + 1.0

(5) 平滑化スペクトルと経験的なスペクトルとの比較

図-13(a)は平滑化応答スペクトルと地盤種別Iに対する平成8年版道路橋示方書耐震設計編に規定されるスペクトルとを比較したものである。0.2秒より短い周期帯域では平滑化スペクトルと道示スペクトルはほぼ重なっている。周期0.2秒から5秒の間では、道示スペクトルの方が大きい。

平滑化応答スペクトルと沈み込み境界沿いの地震に対する地震動の経験的距離減衰式に基づいたスペクトルモデル (Youngs et al, 1997 および Crouse, 1991) との比較を行った結果を図-13の(b)および(c)に示す。Youngs et al (1997) のスペクトルは岩盤サイトに対するもので、Crouse (1991) のスペクトルは硬い地盤サイトに対するものである。これらの経験的な応答スペクトルは平滑化応答スペクトルの(中央値-標準偏差)程度かそれよりもやや小さい値を示す。標準偏差も本検討の結果の方が小さい。

経験的な地震動の距離減衰式は震源近傍ではデータが少なく、かつ近距離のデータの多くは1985年ミチョアカン地震のものである。この1985年ミチョアカン地震は大きな破壊領域上で平均的には小さな滑りしか生じていないので、震源近傍では大きな地震動が生じていない。結果的にはこれが経験的な地震動の距離減衰式によるスペクトルが小さな値となっている一つの原因と考えられる。

(6) シミュレーション結果を代表する10ケースの時刻歴波形セットの選定

960ケースのシミュレーション波の中から10ケースの時刻歴波形のセット(1ケースでNS, EW成分があるので計20波)を数多く作成し、各セットの応答スペクトルの平均値とばらつきが平滑化応答スペ

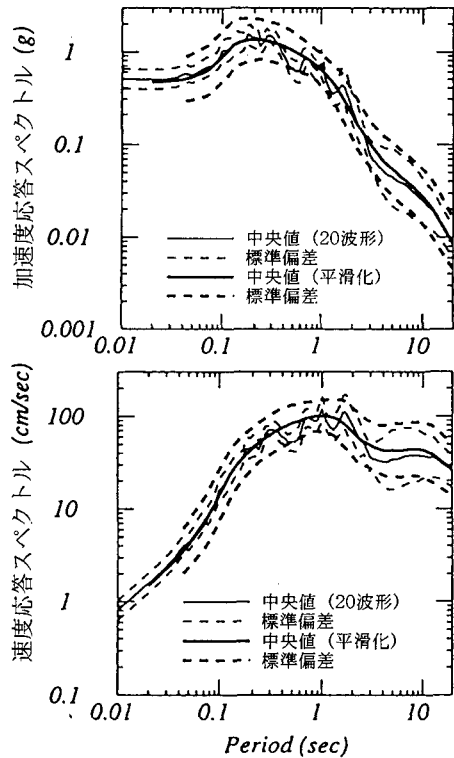


図-14 平滑化された応答スペクトルと10ケース(20波形)の時刻歴波形の応答スペクトルの中央値と標準偏差の比較

クトルの平均値とばらつきに最も近い1セットを選択した。これら10ケースの時刻歴波形(計20波)の応答スペクトルの中央値と標準偏差を平滑化応答スペクトルのそれらと比較したものを図-14に示す。表-4にこれらの時刻歴波形の計算に用いた震源パラメータのリストを示す。10セットの加速度、速度、変位の時刻歴波形の一部をそれぞれ図-15(a), (b), (c)に示す。

これらの10ケースの時刻歴波形は相模トラフで起こる大地震によるサイトAの地震動の平均的特性とそのばらつきを表すという観点で使用できる。3章と異なり、個々の時刻歴波形を平滑化応答スペクトルに適合させることは行っておらず、各時刻歴波がそれぞれ固有の地震動レベルと応答スペクトルの山谷を有している。

図-15(c)に示された静的変位は地震による地殻変動の結果生じるものに対応する。その静的変位の方角(南東方向)は1923年関東地震の後に観測されたものと整合している(Wald and Somerville, 1995, Figure 9)。10ケースの静的変位の平均(約1m)は1923

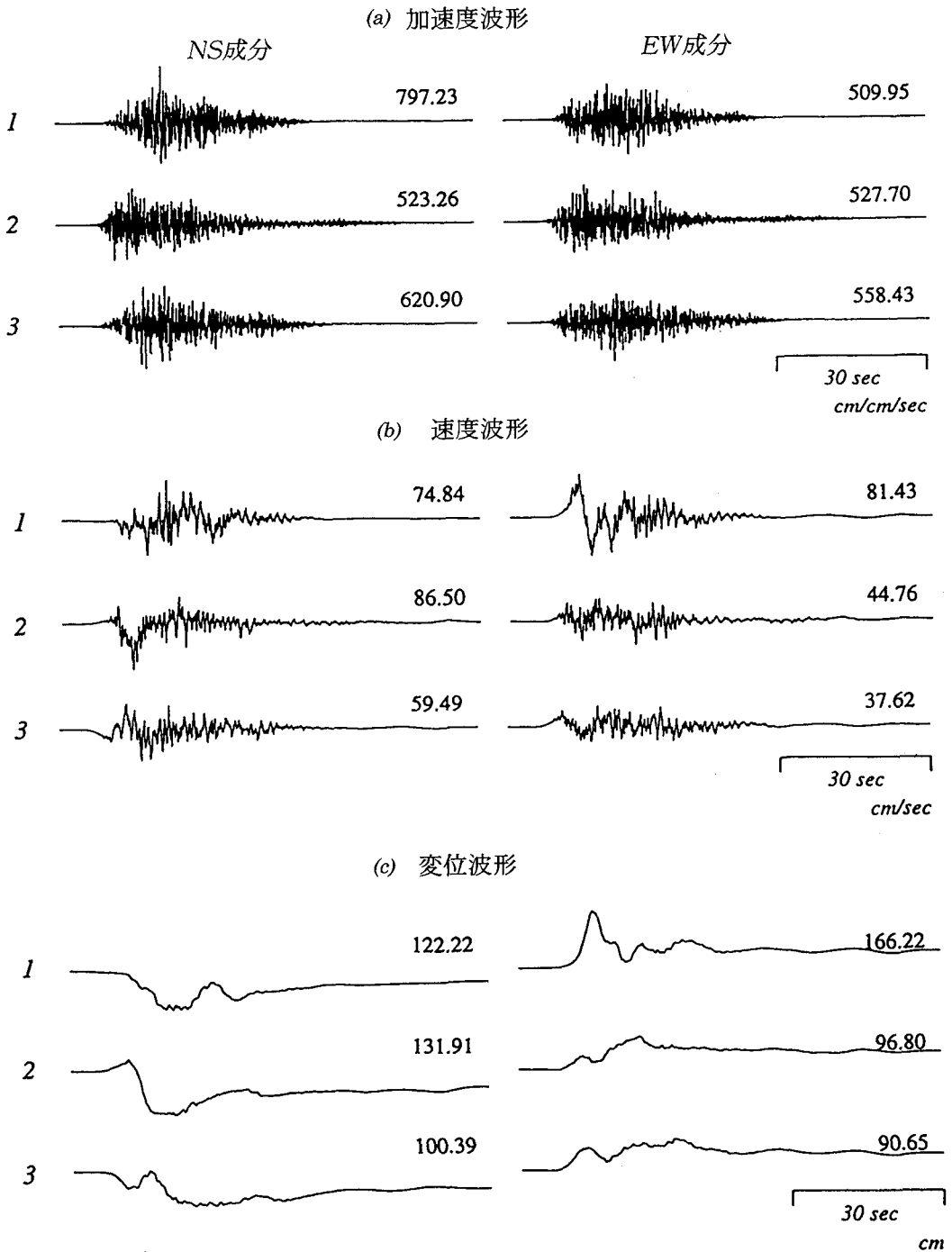


図-15 平滑化応答スペクトルを代表する10ケースの時刻歴波形のNSおよびEW成分の一部

(a) 加速度時刻歴波形 (b) 速度時刻歴波形 (c) 変位時刻歴波形

年関東地震の後に当該サイト近傍で観測された約3 mという値 (Matu'ura et al, 1980) よりも小さいが、これは1923年関東地震では、当該サイト付近の直下

に大きなアスペリティが存在したことによると思われる (Wald and Somerville, 1995, Figure 17) .

6. あとがき

本検討では短周期帯域と長周期帯域とで異なった手法で地震動を作成した後、それらを合成して広帯域地震動を求める手法を用い、1923年関東地震による断層モデルを使用して、将来大型土木構造物が建設される可能性のあるサイトAの地震動を評価した。

本文で示したように、プレート境界型の短周期帯域の地震動の推定に関し、同じプレート境界型の余震記録を用いたことが本手法の特徴の一つである。この手法によれば、地震動を推定したい断層上で起こった地震による記録波形がない場合でも、短周期帯域の地震動の推定が可能である。

次いで、相模トラフのプレート境界付近で将来起こる大きな地震によって、サイトAで発生すると考えられる地震動の評価を行った。この評価では予想される地震の震源パラメータ（滑り分布、震源位置、破壊伝播速度、および立ち上がり時間）の不確定性を考慮して、これらのパラメータを組み合わせた合計960ケースに対して時刻歴波形を計算し、全ケースの応答スペクトルの中央値とばらつきを示した。

サイトAにおける地震動は、平滑化応答スペクトルの中央値とその標準偏差によって表した。応答スペクトルの標準偏差は予測される地震の震源パラメータに関する不確定性のみならず、シミュレーション方法のモデリング自体に起因する不確定性の影響も含んでいる。また、960ケースの時刻歴波形の中から、平滑化応答スペクトルの中央値とその標準偏差を満足するような10ケースの時刻歴波形のセットを選択した。この時刻歴波形のセットは当該地点に建設される構造物の動的応答解析を行う際、有効に利用できる。

本検討結果によって、本研究で用いた手法は、今後増加が予想される断層近傍における地震動評価の一手法として十分考慮に値するものと考えられる。また、相模トラフで発生する大地震によるサイトAの地震動の具体的数値は類似地点の地震動を評価する上で有用な工学的資料となるといえる。

謝辞：本研究に御協力いただいた（株）大崎総合研究所の渡辺孝英氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) Somerville, P.G., Graves, R.W., and Saikia, C.K.:

Estimation of strong motion time histories experienced by steel buildings during 1994 Northridge earthquake, *Proc. of the 11th W.C.E.E., Acapulco, Mexico*, June,

1996.

- 2) Hartzel, S.H. and Heaton, T.H.: Inversion of strong groundmotion and teleseismic waveform data for the fault rupture of the 1979 Imperial Valley, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, pp.780-810, 1983.
- 3) Saikia, C.K.: Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: modeling of Lg waves in eastern North America. *Geophys. J. Int.* 118, pp.142-158, 1994.
- 4) Helmberger, D.V.: Generalized ray theory for shear dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, pp.45-64, 1974.
- 5) Somerville, P.G., Sen, M.K. and Cohee, B.P.: Simulation of strong ground motions recorded during the 1985 Michoacan, Mexico and Valparaiso, Chile earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, pp.1-27, 1991.
- 6) Wald, D.J. and Somerville, P.G.: Variable slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan earthquake: geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, pp.159-177, 1995.
- 7) 武村雅之, 池浦友則: 短周期データから見た1923年関東地震の多重震源性, 地震第2輯, 47巻, pp.353-364, 1994.
- 8) 佐藤俊明, Helmberger, D.V., Somerville, P.G., Graves, R. and Saikia, C.: 1923年関東地震 (Ms 8.1) の近地および震源近傍のやや長周期地震動のシミュレーション, (その1) マスターイベント(1990年小田原地震, M 5.1)の震源パラメータの再評価と波形モデリングによる1次速度構造モデルの評価, 日本地震学会講演予稿集, 1996年度秋季大会, A63, (1996a).
- 9) 野澤貴, 武村雅之, 池浦友則, 山中浩明: 地震動のやや長周期成分からみた1923年関東地震の震源特性, 地震第2輯, 48巻, pp. 331-340, 1995.
- 10) Joyner, W.B. and Boore, D.M.: On simulating large earthquakes by Green's function addition of smaller earthquakes, un *Earthquake Source Mechanics*, S. da J. Boatright, and C.H. Scholtz (Editors), *Mauries Easing Series 6, Americal Geophysical Union Monograph*, 37, pp.269-274, 1986.
- 11) Graves, R.W., Somerville, P.G., Sato, T. and Kataoka, S.: Estimates of long-period strong ground motions in the Kanto District from the 1923 Kanto earthquake, *Proc. of the 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, Vol.1, pp.577-582, Dec. 1994.
- 12) Sato, T., Helmberger, D.V., Somerville, P.G., Graves, R.W. and Saikia, C.K.: Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan, Earthquake (Ms 8.2), Part 1: Source estimation of a calibration event and modeling of wave propagation paths, *Bull. Seism. Soc. Am.* (submitted).

- 13) Somerville, P.G., 入倉孝次郎, 沢田純男, 岩崎好規, 田居優・伏見実 : 地震断層の滑り変位量の空間分布の検討, 第 2 回地震工学研究発表会, 土木学会耐震工学委員会, pp.291-294, 1993.
- 14) Mendoza, C. and Hartzell, S.H.: Slip distribution of the 19 September Michoacan, Mexico earthquake: near-source and teleseismic constraints, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, pp.655-669, 1989.
- 15) Takeo, M. and Kanamori, H. : Simulation of long-period ground motions for the 1923 Kanto earthquakes (M=8), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, 67, pp.389-436, 1992.
- 16) Somerville, P.G.: Engineering applications of strong motion simulation, *Tectonophysics*, 218, pp.195-219, 1993.
- 17) Takeo, M. and Kanamori, H. : Simulation of the long-period ground motion near a large earthquake, *Bull. Seism.Soc. Am.*, Vol.87, pp.140-156, 1997.
- 18) Somerville, P.G., Sen, M. and Chee, B. : Simulation of strong motions recorded during the 1985 Michoacan, Mexico and Valparaiso, Chili earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 81, pp.1-27, 1991.
- 19) Abrahamson, N.A., Somerville, P.G. and Cornell, C.A.: Uncertainty in numerical strong motion predictions, *Proc. Fourth U.S. Nat. Conf. Earthq. Eng.*, Palm Springs, CA, 1, pp.407-416, 1990.
- 20) Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J. and Humphrey, J.R.: Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes, *Seismological Research Letters*, 68, pp.58-73, 1997.
- 21) Crouse, C.B.: Ground motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia Subduction Zone: *Earthquake Spectra*, V.7, pp.201-236, and p.506, 1991.
- 22) Matu'ura, M., Iwasaki, T., Suzuki, Y. and Sato, R. : Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake, *J. Phys. Earth*, Vol.28, pp.119-143, 1980.

(1997.3.21 受付)

ESTIMATION OF BROADBAND STRONG GROUND MOTIONS CONSIDERING UNCERTAINTY OF FAULT PARAMETERS

Hisanori OTSUKA, Paul G. SOMERVILLE and Toshiaki SATO

Broadband strong ground motion time histories at a site above the fault plane for the 1923 Great Kanto Earthquake and future earthquakes on the Sagami trough are generated, using a hybrid method that computes the ground motions separately in the short period and long period ranges and then combines them into a single time history. Considering uncertainty in the source parameters of future large earthquakes, 960 strong motion time histories are generated. The ground motions at the site are characterized by a smooth median response spectrum and its standard error estimate, together with a subset of ten time histories whose average response spectrum, and whose variability approximately matches the standard error of the smoothed response spectrum.