

論文

強震動予測レシピに基づくシナリオ地震による強震動シミュレーション —琵琶湖西岸断層系北部を起震断層として—

岩田 知孝*・三宅 弘恵**

Ground motion simulation during a scenario earthquake based on the strong motion prediction recipe -In case of the northern part of the Biwako-Seigan faults as a hypothetical source fault -

Tomotaka IWATA*, Hiroe MIYAKE**

Abstract

We have conducted strong motion simulation during a hypothetical active fault earthquake for the northern part of the Biwako-Seigan faults. Source model for the scenario earthquake was constructed by following the recipe of strong motion prediction (Irikura and Miyake, 2001; Irikura et al., 2003).

We used ground motion records of a small event occurred near the source area, as an empirical Green's function. Peak accelerations and velocities of simulated ground motions are compared with empirical relations. Rupture directivity effects and site effects such as deep basin effect were discussed.

キーワード：強震動予測レシピ，特性化震源モデル，アスペリティ，琵琶湖西岸断層，応力降下量

Key words : strong motion prediction recipe, characterized source model, asperity, Biwako-Seigan faults, stress drop

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では都市直下での断層運動により都市域が甚大な被害をうけた。この破壊的強震動は、複雑な震源過程と盆地端部での3次元的な地下構造の組み合わせによって生成され

たことがわかった（例えば Kawase, 1996; Iwata *et al.*, 1998; Pitarka *et al.*, 1998 など）。即ち、これらの震源過程と地下構造の情報が与えられさえすれば、どのような地震動が生成・伝播するかは予測できることが示唆された。しかしながら、地

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
** 東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, University of Tokyo

本論文に対する討論は平成17年2月末日まで受け付ける。

震が発生する前にその断層運動がどのようなものであるかを予め精度よく規定することは現在の地震学・地形地質学等の知見では困難であり、地下構造の情報が豊富にある都市域も非常に限られている。

80年代以降に強震記録を用いた震源インバージョンが行われるようになり、遠地記録を使った場合に比して、詳細な断層破壊過程が推定されるようになってきた。Somerville *et al.* (1999) は主に米国カリフォルニア州の地震について推定された不均質震源モデルをコンパイルして、平均すべり量との対比によって全破壊領域とアスペリティ領域を定義し、それらの面積が地震規模に対して自己相似関係になっていることを示した。

Somerville *et al.* (1999) によって行われた既往の不均質断層モデルをすべり量によって特性化する研究に基づき、入倉・三宅 (2001) は、シナリオ地震に対する理論的強震動予測手法をレシピの形でまとめている。彼らは震源モデルに、アスペリティと非アスペリティ領域を考え、それぞれの領域で特性化されたすべり速度関数・応力降下量を与えることによって構築される「特性化震源モデル」を提案している。入倉・他 (2003) は、この特性化震源モデルの応力降下量の設定について、動学的モデルの導入による拘束条件を与えた。ここで与えている特性化震源モデルに基づく特に震源域強震動予測の妥当性は、1995年兵庫県南部地震 (Kamae and Irikura, 1998; 入倉・他, 2002) や 2000年鳥取県西部地震 (池田・他, 2002) の広帯域の観測波形の再現によって検証されている。

本稿においては、入倉・三宅 (2001) 及び入倉・他 (2003) で提案されている強震動予測レシピに基づいて、特性化震源モデルの構築と強震動シミュレーションを行う。具体的には、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2003) の長期評価でその活動履歴が報告され、今後30年間の発生確率が高いグループに属している琵琶湖西岸断層系北部を起震断層とする場合を例とする。震源モデルパラメータの設定を行って波形シミュレーションを行い、その結果の特徴の考察と、それに基づく今

後シミュレーションの更なる高精度化に必要な震源のモデルパラメータ設定方法について議論する。

2. 特性化震源モデルと強震動予測レシピ

「はじめに」で述べたように、強震動記録を用いた震源インバージョンにより、最近の被害地震の多くについて断層すべり分布が明らかになってきた。その結果、特に震源域の強震動特性は断層全体の面積や総地震モーメントなどの巨視的断層パラメータ (outer fault parameter) よりもむしろ断層すべりの不均質分布、すなわち微視的断層パラメータ (inner fault parameter), に大きく影響されることがわかってきた。

Somerville *et al.* (1999) はすべりの大きいところを一定基準で切り出すことでアスペリティ領域を定義し、全破壊領域 S のみならず、アスペリティの総面積 S_a や最大アスペリティの面積 S_l が地震モーメント M_0 に対して一定の相似則に従っていることを明らかにした。宮腰 (2002) はその後起きた日本の地殻内地震、台湾・集集地震、トルコ・コジャエリ地震の強震記録から推定された不均質震源モデルを基に、Somerville *et al.* (1999) の規範を用いて、同様の関係が保たれていることを示した。

Fig.1 (a) は地震モーメント M_0 と全破壊領域 S の関係を示しており、Fig.1 (b) は全破壊領域 S とアスペリティの総面積 S_a の関係を示している (入倉・三宅, 2001)。Fig.1 (a) には最近の波形インバージョン結果だけでなく、地殻変動情報や地表地震断層情報を元にして推定された断層面積の情報も含まれている (Wells and Coppersmith, 1994)。これからは、地震モーメントと断層面積の関係は、地震規模によって変化しているように見える。一方、Fig.1 (b) より全破壊領域 (S) とアスペリティ総面積 (S_a) はこの地震規模範囲 (モーメントマグニチュードで 5.5~7.6 の範囲) において比例関係にあり、 S_a/S はほぼ一定であると考えられる。

これらの特徴を基に入倉・三宅 (2001) は将来の大地震に対する強震動を予測するための震源のモデル化の手続きをレシピとしてまとめた。この

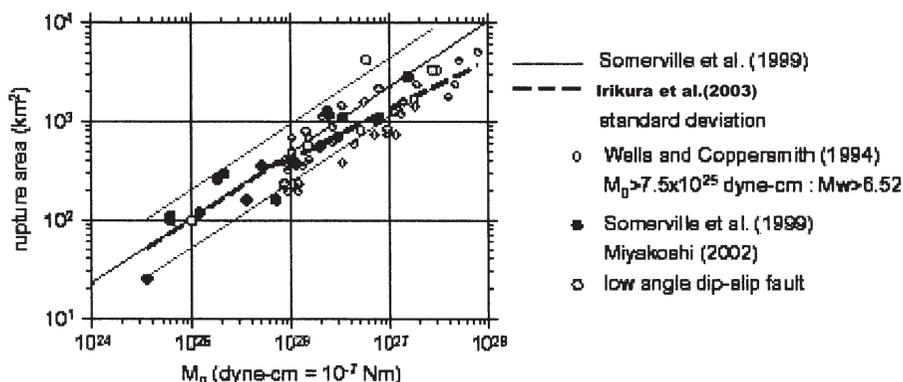


Fig.1(a) Empirical relationship between seismic moment and total rupture area for inland crustal earthquakes. Thick broken and thin solid lines show the relation obtained by Irikura and Miyake (2001) and Somerville et al. (1999), respectively. Shadow ranges $\pm \sigma$ (standard deviations). Thin solid lines show a factor of 2 and $1/2$ for the average.

レシピはマルチ・クラックモデルに基づいており、強震動の計算において重要なアスペリティの数、およびアスペリティや背景領域の実効応力を比較的自由に設定することができる反面、動力学理論に基づくアスペリティモデルからの拘束条件と整合的でないという問題があった。入倉・他(2002)は、入倉・三宅(2001)のレシピに、Das and Kostrov (1986)の動力学的シングル・アスペリティモデルをマルチ・アスペリティモデルに拡張し、この物理モデルに基づいて微視的断層パラメータを拘束する「修正レシピ」を提案した。このモデルでは、総地震モーメントおよび全破壊領域に対するアスペリティ面積の比率が与えられれば、殆どのパラメータが拘束される。特性化震源モデルに基づく内陸地殻内地震の地震シナリオに必要なパラメータは以下のようなものがあり、このうち*で示されたものが、不均質断層モデルの分析から与えられる経験式に基づいた見積もりがなされる。その他のパラメータは、活断層情報及び地震活動情報などを元に与えるか、尤もらしいいくつかのパラメータをシナリオとして提案することとなる。

・巨視的断層パラメータ

(1) 震源断層の全体の長さ L と幅 W の推定, 断層面積 $S (=LW)$ の推定

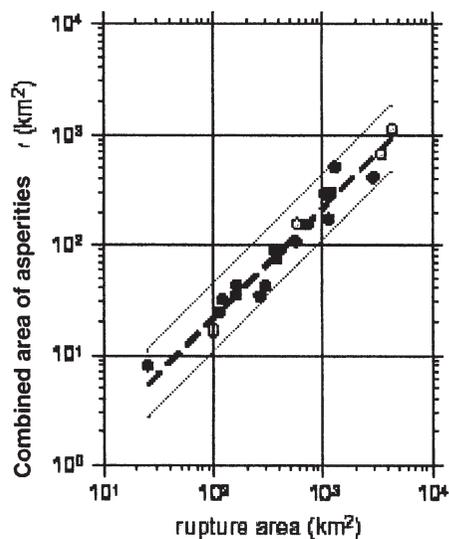


Fig.1(b) Empirical relationship between total rupture area and combined area of asperities (thick broken line) for inland crustal earthquakes (Irikura and Miyake, 2001). Shadow ranges $\pm \sigma$ (standard deviations). Thin solid lines show a factor of 2 and $1/2$ for the average.

(2) 震源域の平均応力降下量 $\Delta \bar{\sigma}_c$ の推定

(3) 総地震モーメント M_0 の推定 * ((1) (2) より見積もる)

- ・微視的断層パラメータ
- (4) アスペリティの総面積 S_a の推定*
- (5) アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$ の推定
- (6) アスペリティの個数 n の推定
- (7) 個々のアスペリティ (半径 r_i) での変位量 D_a
 i の推定 ((4) ~ (6) より見積もる)
- ・その他のパラメータ
- (8) アスペリティ位置
- (9) 破壊伝播方向
- (10) 破壊開始点

この中でアスペリティの位置などについては、活断層セグメントとの位置関係によって設定される(杉山・他, 2003)。

この特性化震源モデルが与えられた時に広周期帯域の波形を広域にシミュレートする方法としては、長周期帯においては理論的な方法、短周期帯においては統計的な方法によって波形を作り、それらを足し合わせるハイブリッド法(入倉・釜江, 1999) が用いられている。ここでいう広周期帯域というのは地震災害を引き起こす、という意味において 10 秒から 0.1 秒の範囲程度を指している。特に 1 秒付近の周期帯域は、一般建造物の倒壊などと密接に関係する(例えば川瀬, 1998)。理論的な方法とは一般に差分法によって、震源を含む領域の地震波速度・密度・減衰構造を与えて波動方程式を解くことである。このため、対象領域のそれぞれの構造を与える必要があり、計算したい周期の波長に見合う詳細な精度のある構造モデルが必要となる。

1995 年兵庫県南部地震以降、特に地震動の増幅・伸長効果と密接に関係し、人口密集地帯でもある盆地・平野において、人工地震による地下構造探査が行われ、盆地の地震波速度構造についての重要な知見が蓄積されてきている。しかしながら面的な構造モデルの構築は、重力探査・ボーリング調査などと組み合わせる必要がある、まだまだ数多くの調査が必要とされている。また、震源モデルが比較的単純であると仮定できる中規模地震記録をシミュレートすることで、その構造

モデルの妥当性と改良を進めていくことが不可欠である。

このような手順において周期 1 ~ 2 秒程度までのやや短周期帯まで信頼できる盆地構造モデルが準備されているのは大阪平野、京都盆地、濃尾平野などに限られており、それより更に短周期帯の地震動シミュレーションに必要な細かな構造パラメータが得られている地域は現時点ではほとんどない。また、観測地震波の分析から、短周期領域では速度・密度構造の短い波長の揺らぎに起因する散乱波が観測されており、決定論的な取り扱いではなく統計的な取り扱いをする統計的グリーン関数法を用いることが多い。これは、単位震源の震源スペクトルを満たしたランダム位相の時刻歴を、エンベロープ関数でシェーピングしたものをグリーン関数として用いるものである。伝播経路及びサイト特性を反映させたエンベロープ関数を与えることにより、短周期側のグリーン関数として統計的に妥当なものを与えることができる。

こうしたハイブリッド法では信頼のおけるグリーン関数が構築できるだけの構造情報を準備する必要がある。本研究でのシミュレーションは実際に想定する震源域で起きた中規模地震記録をグリーン関数として用いる、経験的グリーン関数法(例えば Irikura, 1986) を用いる。

経験的グリーン関数法では、適切な実地震記録が得られている地点のシミュレーションに限られるという制限があるが、実記録の地震と想定地震の間のスケールリングを与えることにより、実記録が有効な周期帯域において精度の高いシミュレーションができることが示されている(Irikura, 1986; Kamae and Irikura, 1998; 三宅・他, 1999; 池田・他, 2002 など)。現時点では、稠密な強震観測点網で捉えられた記録を生かすことによって、シミュレーション点が寡少である欠点が改善されつつあり、シナリオ地震の広域の強震動シミュレーションの評価にも使うことができるといえる。

3. 琵琶湖西岸断層系北部を起震断層とした場合の特性化震源モデル

先頃、文部科学省地震調査研究推進本部・地震

調査委員会から琵琶湖西岸断層帯の長期評価がなされ、琵琶湖西岸断層帯は、断層帯全体が1つの区間として活動し、マグニチュード7.8程度の地震が発生すると推定された(地震調査研究推進本部・地震調査委員会, 2003)。また、その発生確率は今後30年の間には0.09~9%と評価され、我が国の主な活断層の中では高いグループに属すると指摘された。ちなみに1995年兵庫県南部地震に関係する野島断層の評価は、その発生直前の30年確率が0.4~8%とされ、それと同レベルの評価であるといえる。

我々が今回経験的グリーン関数として用いる

1999年3月16日に琵琶湖断層帯北部で発生したイベント (M_w 4.8, M_{JMA} 4.9) は、比較的広域で観測されているもので、そのため、ここでは想定震源を限り、琵琶湖西岸断層帯のうち、北部の活断層、酒波・饗庭野・上寺断層を起震断層とする場合の強震動シミュレーションを行う。仮定された断層形状についてのパラメータはTable 1に表される。

上記に示したように、地震調査委員会では琵琶湖西岸断層系を1セグメントとする断層モデルを考え、その長期評価を行った。本研究ではその中の北部断層系を起震断層とする地震シナリオをた

Table 1 Assumed fault parameters for the scenario earthquake for the northern part of the Biwako-Seigan faults.

	酒波断層	饗庭野断層	上寺断層	
断層長	6km	8km	5km	文献1から読み取り
断層幅(傾斜角) ($W=W_{max}/\sin\theta$)	21km(60度)	21km(60度)	21km(60度)	地震発生層厚(文献1, 2と地震発生層から仮定)
断層走向方向	N190E	N175E	N215E	文献1から読み取り
全断層面積(全破壊領域面積)	19km×21km			
アスペリティ面積	89 km ²			Somerville et al. (1999)より
各断層のアスペリティ面積	16 km ² (4km X4km)	64 km ² (8km X8km)	9 km ² (3km X3km)	各断層へアスペリティ振り分け
地震モーメント	Mw=6.5 (7.6 x 10 ¹⁸ Nm)			Somerville et al. (1999)より

文献1：活断層研究会(1991)

文献2：岡田・東郷(2000)

アスペリティ部における応力降下量 $\Delta\sigma$, 16-18MPa

ライズタイム 左から0.4s, 0.8s, 0.3s (Miyake et al.2003を参照)

破壊伝播方向 北から南

震源域の平均S波速度: 3.4km/s

破壊伝播速度: 3.1km/s

ている。この震源断層モデルは琵琶湖西岸断層系の固有地震とは異なる震源モデルを提案していることとなる。

ひとつの活断層系を起震断層とするシナリオ地震の強震動評価には、その断層系の固有地震のみならず、固有地震ではない地震シナリオの検討も重要と考えられる。小松原・他(2001)では南部の堅田断層で1662年頃の明確な活動履歴が得られなかったことと、地震被害記述は地震動の強さと関連している可能性もあるため、現状の情報では南部の最新活動と1662年の寛文地震と直接関係づけることができない、という結論を得ている。1662年の寛文の地震が史実としてある以上、その地震が琵琶湖西岸断層系を起震断層とする場合、琵琶湖西岸断層系の固有地震ではない地震であったと考える必要がでてくる。この意味において琵琶湖西岸断層系の固有地震ではない強震動評価の必要性が指摘できる。

断層の長さは活断層研究会(1991)および水野・小松原(1999)を参考に設定した。断層幅は、この地域での微小地震の深さ分布より地震発生層を深さ2 km~20 kmの18 km幅とし、断層面傾斜角を60度と仮定して、21 kmの幅があるとした。Fig. 2にはこの地域での地震活動の断面図を示す。破壊伝播速度は震源域の平均S波速度の約90%に相当する3.1 km/sとし、破壊様式は活断層の分岐形状と破壊様式の間を議論した中田・他(1998)を参考に、酒波断層と饗庭野断層のセグメント境界深部から始まる、円形伝播破壊を仮定した。

経験的グリーン関数に使うイベントの断層パラメータは以下のようにして推定した。小地震の断層領域は更に小規模の地震記録を経験的グリーン関数として用いて推定(Miyake et al., 2003)し、矩形断層サイズを求めた(1.2 km 四方)、地震モーメントは、震源近傍の露頭岩盤観測点の記録の変位スペクトルから $1.18\sim 1.28\times 10^{16}$ Nmを得た。これらの値から、小地震の断層領域における静的応力降下量(Eshelby, 1957)は16.6~18.0 MPaと推定された。

想定した地震のモーメントマグニチュードは

6.5 となり、2000年鳥取県西部地震クラスの地震ということになる。また、アスペリティ位置は起震断層として考える活断層のセグメントと1995年兵庫県南部地震を参考にしてやや深めの10 km程度に設定した。Fig. 3に仮定された断層面と経験的グリーン関数に用いた地震の震央、及び破壊開始点を示す。

4. 強震波形合成結果と検討

強震動シミュレーションの周期範囲は2~0.1秒で行っている。これは要素地震記録のSN比とともに、計測震度(気象庁, 1996)を求めることを視野にいたためである。また、ここでは特性化震源モデルとして与えた主要なアスペリティからのみの強震動評価を行っている。震源インバージョンから求められたすべりの大きい領域(アスペリティ)と、広帯域の強震動シミュレーションから得られている強震動生成領域がほぼ一致すること(Miyake et al., 2003)と、加速度・速度波形には強震動生成領域からの強震動の寄与が大きいことが確かめられており、ここでの地震動の評価は2秒以下の周期範囲においてはほぼ十分であると考えられる。Fig. 4には震源に近い、いくつかの観測点での加速度・速度波形を示している。KISYMDは草津市にある関西地震観測研究協議会(CEORKA)の観測点で、堆積層上に位置し、長く伸びた地震動が観察されている。これは、1995年兵庫県南部地震時の大阪盆地内の観測記録に似た傾向を示している。Fig. 5には、シナリオ地震の強震動から計測震度を算出して地図上に示している。北から南へ破壊が進む様式をとっているため、震度6弱となる観測点が震源域から南南東の方向に見られる。また琵琶湖の南東部で震度6強、震度7が得られており、やや厚い堆積層や局所的な地盤特性の影響が見受けられる。

予測結果を既往の距離減衰式と比較するために、ここでは司・翠川(1999)の硬質地盤における水平最大加速度、速度の距離減衰式との比較を行った(Fig. 6)。シミュレーション値はそのままをプロットし、地盤特性の補正を行っていないことに注意する必要がある。最大水平加速度、最大水平

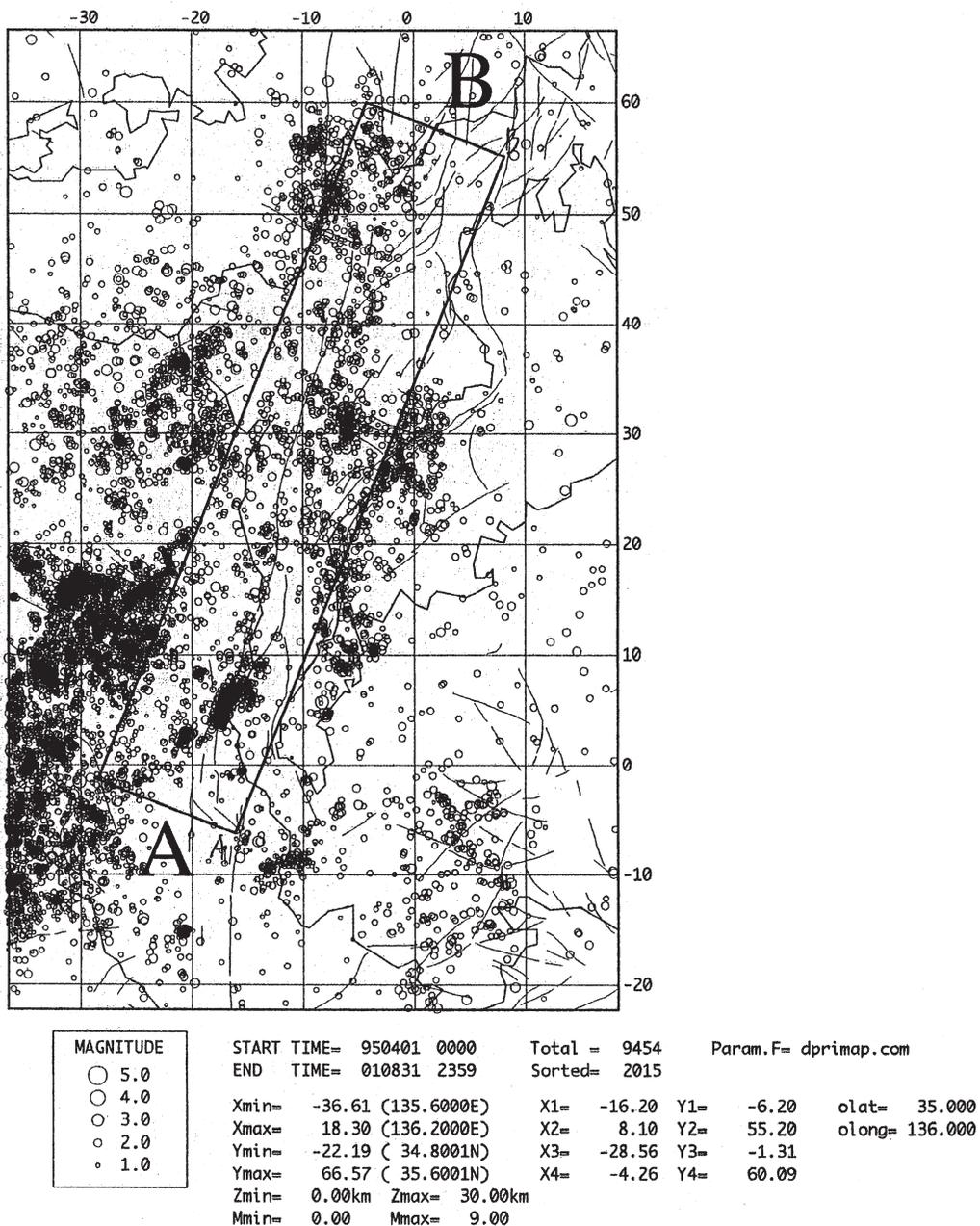


Fig.2(a)

速度値とも、ある程度経験式と合っているが、一部では経験式より大きな値となっている。赤で示したフォワードディレクティビティ方向の観測点と、最大速度分布において、青で示した堆積盆地

上にある観測点に経験式の平均より大きくなっている特徴がある。特に琵琶湖対岸に位置するSIG007 (K-NET 観測点) は最大加速度、速度とも経験式より大きな値を示している。シミュレー

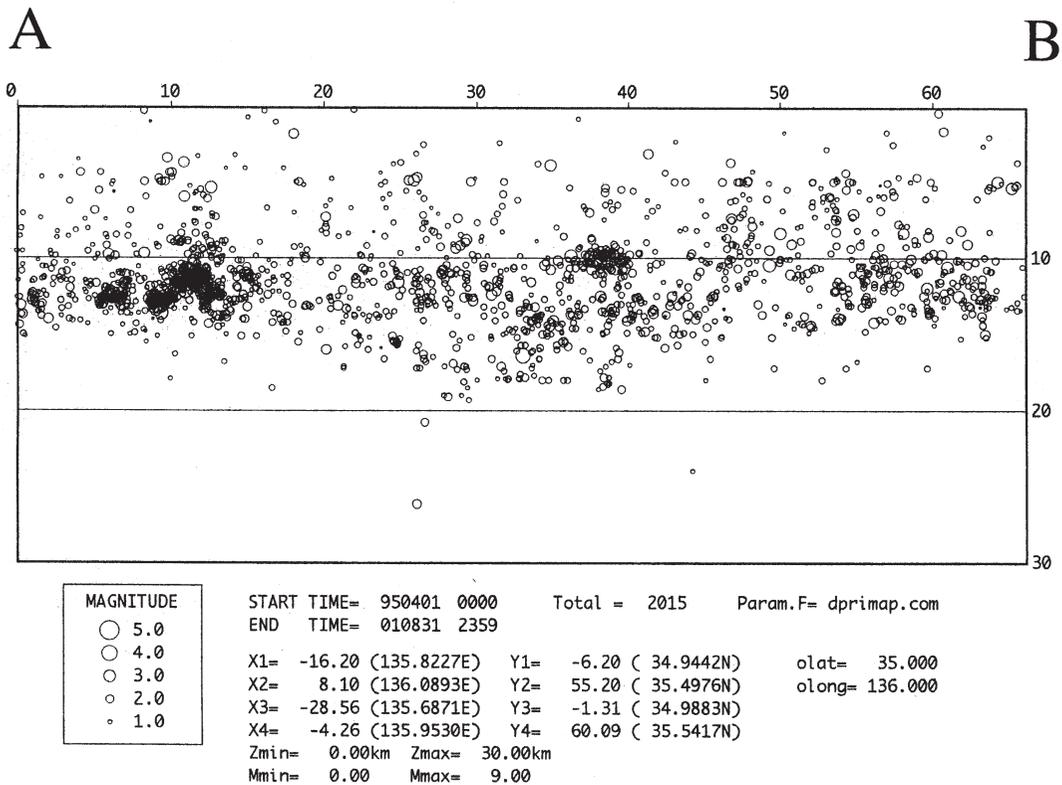


Fig.2(b) Seismicity of the microearthquakes in the Biwako-Seigan area. (a) Map view of seismicity. (b) Cross section of the hypocenters of events in the rectangular area in (a). Hypocenters were determined by the Research Center of Earthquake Prediction, DPRI, Kyoto University in a period of April 1995 to August 2001.

トされた波形を参照してわかるように、この地点は堆積層が厚いために主要動の増幅及び後続波群が顕著に発達している。今回のシナリオ断層破壊モデルではこの方向の観測点は破壊進展の方向にあたり、地盤によって増幅されているS波主要動の部分がフォワードディレクティビティ効果によって更に強調されていると考えられる。

また本計算には地盤の非線形応答は入っておらず、強震時に軟弱地盤においては、非線形効果により最大加速度値の低下や液状化効果によるS波伝達の遮断による地震動の減少が現実にはあるものと考えられる。

5. まとめ

波形インバージョンによって求められた不均質

断層モデルの特性化を基に構築された「特性化震源モデル」を用い、琵琶湖西岸断層系北部を起震断層とした場合を例にとってシナリオ地震の強震動シミュレーションを行った。

ここでは強震ネットワークで得られた地震記録を経験的グリーン関数とすることで、伝播経路のモデル化を簡略化することができた。強震動予測は観測された地点に限られるものの、このような中小規模の地震記録を用いることによって、今後様々なグリーン関数を構築することができる可能性があり、強震観測網によるデータの蓄積の重要性は言うまでもない。更に、このような強震観測網データは、各種の物理探査で構築された地下構築モデルの検証に必要不可欠である。

ここでの地震想定は地震調査推進本部の長期評

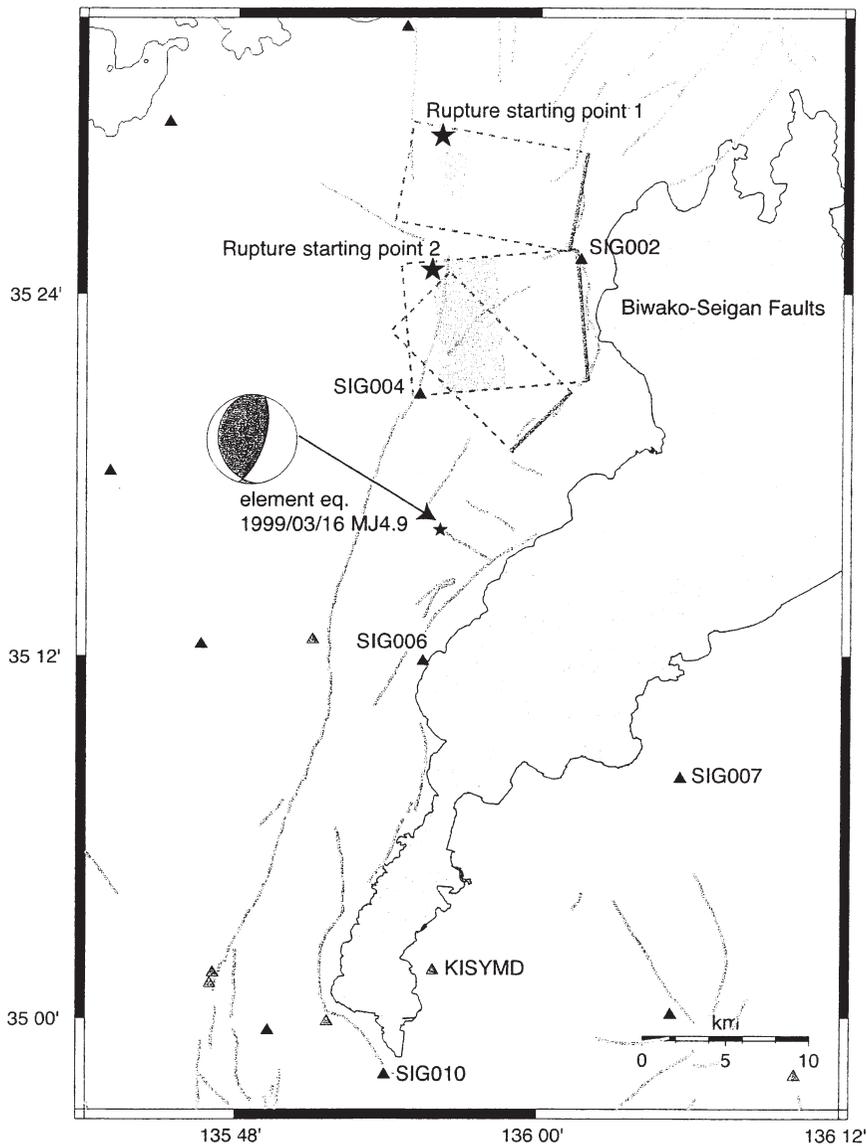


Fig.3 Assumed fault model of the hypothetical event of the northern part of the Biwako-Seigan faults. Thick lines show the traces of the target active faults. Big stars indicate rupture starting points and shadow areas show asperities. The epicenter of the event for the empirical Green's function is shown as a small star.

価で行われた固有地震とは異なっている。ここでの1例だけで議論をするべきではないが、過去の活動履歴等に従い、いくつかの地震想定の可能性をあげ、それらによる強震動シミュレーションを行い、地震動分布の特徴を精査しておくことが地

震防災の観点からは重要である。

また起震断層を決めた後にも断層モデルの設定において破壊様式やアスペリティ位置についての任意性がある。この一例では中田・他(1998)が指摘しているような活断層形態の知見に従う破

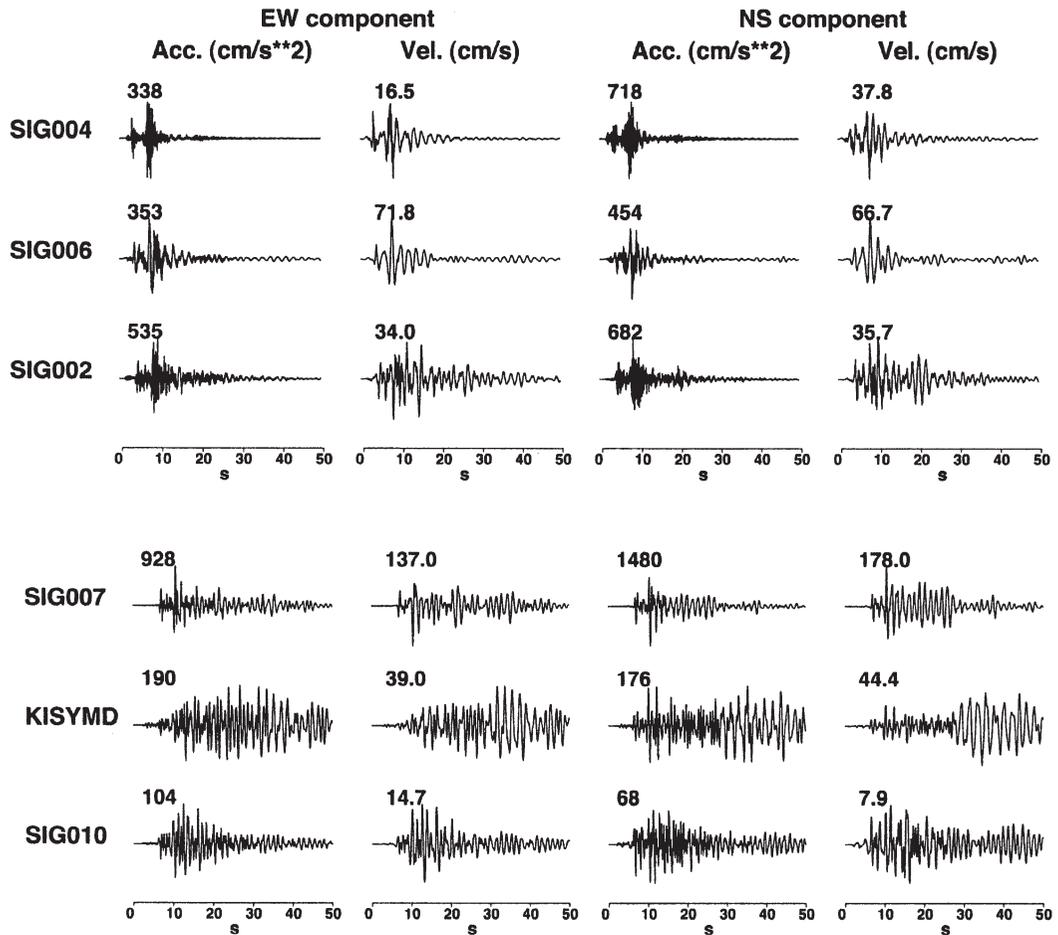


Fig.4 Examples of simulated ground accelerations and velocities at stations located on near-fault and sediment sites. Station locations are shown in Fig. 3.

壊様式を用い、活断層の小さなセグメントに対応するようにアスペリティを配置し、その深さは1995年兵庫県南部地震タイプの地震発生層の深い方に設定した。これらは、現在の活断層情報や地震学の知見から得られる尤もらしい設定と位置づけられる。アスペリティの配置、破壊様式については他のシナリオによる検討も今後必要と考えられる。

ここで与えたアスペリティでの静的応力降下量は16~18 MPaとなる。これは、運動学的断層モデルに基づいて評価した実効応力である10~25 MPaの中庸の設定となっている (Iwata et al., 2

004)。彼らの研究では実効応力と静的応力降下量はほぼ同じ値であることが示されている。また、実効応力は地殻内地震においてアスペリティの微かな深さ依存性をもっている可能性が指摘されており (Iwata et al., 2004)、今後このようなモデルパラメータの拘束をすすめていくことにより、信頼性の高い強震動予測手法の構築がなされていくと考えられる。

謝 辞

強震記録は (独) 防災科学技術研究所 (K-NET)、関西地震観測研究協議会 (CEORKA) のデータを

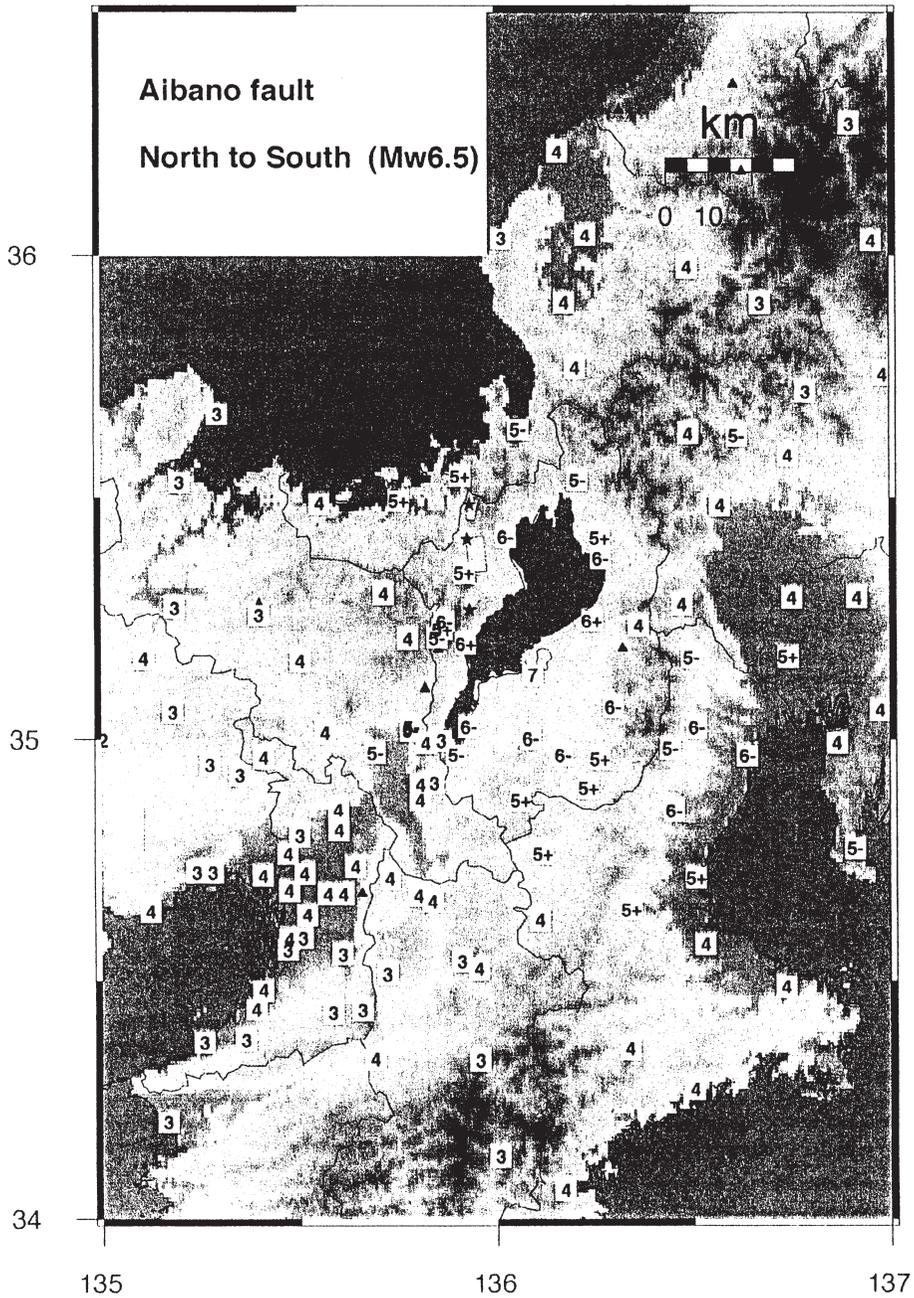


Fig.5 Distribution of the instrumental seismic intensity for the hypothetical northern part of the Biwako-Seigan faults.

使わせていただいた。Fig. 2 の地震活動の図面作成には京都大学防災研究所地震予知研究センター

澁谷拓郎博士に御協力いただいた。3名の査読者の方の意見は本稿を改善するのに役立ちました。

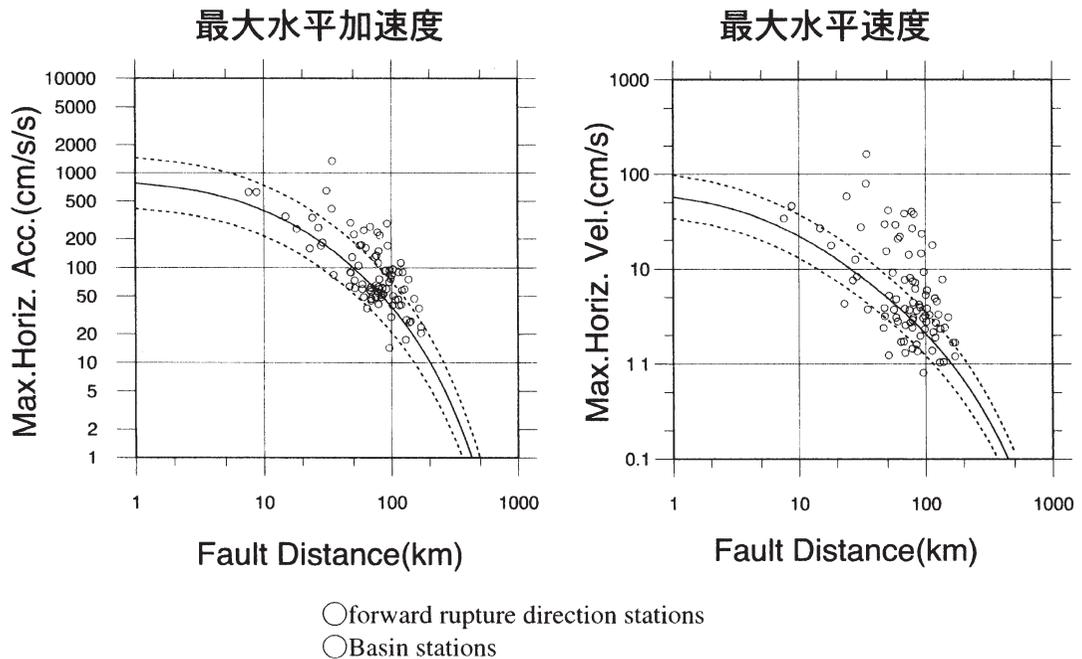


Fig.6 Comparisons between simulated peak horizontal accelerations and velocities together with the empirical relation for the hard soil sites of Mw6.5 event by Si and Midorikawa (1999). Solid line and dashed lines show the average and standard deviations for the attenuation relation. Red and blue color circles indicate data of stations in the forward directivity area and in the basin, respectively.

記して感謝いたします。本研究は文部科学省振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究」により行われた。

参考文献

- Asano, K, T. Iwata, and K. Irikura : Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong motion simulations, *Earth, Planets and Space*, Vol. 55, pp. e5-e8, 2003.
- Das, S. and B. V. Kostrov : Fracture of a single asperity on a finite fault: A model for weak earthquakes?, In Das, S., J. Boatwright, and C. H. Scholz, eds.: *Earthquake Source Mechanics*, AGU, Washington D. C., pp. 91-96, 1986.
- Eshelby, J. D : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, *Proc. of the Royal Society of London*, A241, pp. 376-396, 1957.
- 池田隆明・三輪 滋・釜江克宏・川辺秀憲・入倉孝次

郎：経験的グリーン関数法による2000年鳥取県西部地震の強震動シュミレーション，-合成結果に及ぼす経験的グリーン関数の影響-，地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究第2回シンポジウム論文集，pp. 19-22, 2003.

- Irikura, K : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng.*, pp. 151-156, 1986.
- 入倉孝次郎・釜江克宏：1948年福井地震の強震動－ハイブリッド法による広周波数帯域強震動の再現－，*地震* 第2輯，Vol. 52, pp. 129-150, 1999.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測，*地学雑誌*，Vol. 110, No.6, pp. 849-875, 2001.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・川辺秀憲：強震動予測のための修正レシピとその検証，第11回日本地震工学シンポジウム講演論文集，pp. 567-572, 2002.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・川辺秀憲・Luis Angel Dalguer：将来の大地震による強震動を予測するためのレシピ，*京都大学防災研*

- 究所年報第 46 号, pp. 105-120, 2003.
- Iwata, T. and H. Sekiguchi, A. Pitarka, K. Kamae, and K. Irikura : Evaluation of strong ground motions in the source area during the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) earthquake, Proc. 10th Japan Earthq. Eng. Symp., Vol. 1, pp. 73-78, 1998.
- Iwata, T., H. Sekiguchi, H. Miyake, W. Zhang, and K. Miyakoshi : Dynamic source parameters and characterized source model for strong motion prediction, Proc. 13th World Conf. on Earthq. Eng., 2392, 2004.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 : 琵琶湖西岸断層帯の長期評価について http://www.jishin.go.jp/main/chousa/03_jun_biwako/index.htm, 2003.
- Kamae, K. and K. Irikura : Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 88, pp. 400-412, 1998.
- 活断層研究会 (編) : 「新編」日本の活断層, 東京大学出版会, 1991.
- Kawase, H : The cause of the damage belt in Kobe: "The basin edge effect", constructive interference of the direct S wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, Seism. Res. Lett., Vol. 67, pp. 25-34, 1996.
- 川瀬 博 : 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能- 1995 年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ-, 第 10 回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp. 29-34, 1998.
- 小松原 琢・水野清秀・七山 太・木下博久・新見 健・間野道子・吉村辰朗・井上 基・葛原秀雄・関司高志・中村美重・横井川博之 : 琵琶湖西岸活断層北部・饗庭野断層の活動履歴, 地震第 2 輯, Vol. 51, pp. 379-394, 1999.
- 小松原 琢・水野清秀・松山紀香, 琵琶湖西岸活断層系南部, 特に堅田断層の補備調査. 活断層・古地震研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, Vol. 1, pp. 115-131, 2001.
- 気象庁 : 気象庁告示第 4 号, 平成 8 年 2 月 15 日官報, pp. 1831, 1996,
- 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎 : 経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 (M 6.5) 及び 5 月 13 日 (M 6.3) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震第 2 輯, Vol. 51, pp. 431-442, 1999.
- Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura : Source characterization for broadband ground motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 93, pp. 2531-2545, 2003.
- 宮腰 研 : 不均質震源の特性化, 月刊地球号外 Vol. 37 「最近の強震動予測研究 どこまで予測可能となったのか?」, 56-61, 2002.
- 水野清秀・小松原琢 : 琵琶湖西岸断層系堅田断層及び今津-高島沖湖底断層の補備調査. 平成 10 年度活断層・古地震研究調査概要報告書, pp. 215-224, 1999.
- 中田 高・島崎邦彦・鈴木康弘・佃 栄吉 : 活断層はどこから割れ始めるのか?—活断層の分岐形態と破壊伝播方向—, 地学雑誌, Vol. 107, pp. 512-528, 1998.
- 岡田篤正・東郷正美 : 近畿の活断層, 東京大学出版会, 2000.
- Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and H. Sekiguchi : Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 88, pp. 428-440, 1998.
- 司 宏俊・翠川三郎 : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 523, pp. 63-70, 1999.
- Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., Vol. 70, pp. 59-80, 1999.
- 杉山雄一・関口春子・石山達也・伏島祐一郎 : 活断層情報と不均質震源特性の関係, 第 2 回地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究シンポジウム論文集, pp. 125-130, 2003.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith : New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, pp. 974-1002, 1994.

(投 稿 受 理 : 平成14年 9 月 1 日
訂 正 稿 受 理 : 平成15年 3 月 9 日)