

経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の 震源のモデル化と強震動シミュレーション

SOURCE CHARACTERIZATION AND STRONG GROUND MOTION SIMULATION OF THE 2000
TOTTORI-KEN SEIBU EARTHQUAKE USING THE EMPIRICAL GREEN'S FUNCTION METHOD

池田隆明*, 釜江克宏**, 三輪 滋***, 入倉孝次郎****

Takaaki IKEDA, Katsuhiko KAMAE, Shigeru MIWA and Kojiro IRIKURA

In the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, many strong ground motions of the main-shock and the aftershocks have been observed at a lot of stations including near-source area. In this study, we attempted to construct a source model for broad-band strong ground motions by the forward modeling using the empirical Green's function method. We derived the best source model that consists of two asperities and background after several trials referring to the inverted source model by Sekiguchi and Iwata (2001). Two asperities are located in shallow and deep parts at the southeastern side of the hypocenter. We found that strong ground motions at near-source area were controlled by the areas and stress drops of two asperities. Relation between combined area of asperities and seismic moment of the best source model is in close agreement with the empirical relation by Somerville et al. (1999).

Keywords: 2000 Tottori-Ken Seibu earthquake, The best source model, Empirical Green's function method, Strong ground motion, Asperity, Source rupture process

2000年鳥取県西部地震、最適震源モデル、経験的グリーン関数法、強震動、アスペリティ、震源破壊過程

1. はじめに

2000年10月6日に鳥取県西部を震源とする $M_{BLI}=7.3$ の地震が発生した。この地震では、鳥取県の境港市と日野町で震度6強を観測し¹⁾、1995年の兵庫県南部地震以降では、国内で最も規模の大きい地震であった。兵庫県南部地震に比べ、震度の割には甚大な被害を被った木造家屋は少なかった^{2,3)}ものの、山間部には多くの崖崩れや地滑りを生じさせ、道路や鉄道の寸断といった被害が発生した。また、臨海部では埋立地や干拓地で液状化が発生し、港湾施設や農作物へ大きな被害を与えた。このような大地震において、震源近傍を含む広い範囲での地震動を広い周期帯にわたり適切に予測することができれば、防災対策および災害軽減に大きな効果があると考えられる。

特定の活断層による地震を想定して地震動を予測する方法は数多く提案されている。最近では、理論的方法と半経験的方法を組み合わせたハイブリッド法^{4,5)}により三次元的な地盤構造に起因する堆積層表面波などの影響も考慮できるようになってきた。深部地盤構造についての調査は近年精力的に行われてきており⁶⁾、地盤のデータが蓄積するにつれて全国的に展開可能な有用な方法になると考えられる。また、想定する断層付近の小地震の記録が予測するサイトで得られている場合は、経験的グリーン関数法^{7,8)}が最も有効な方法である。

以前は地震観測記録が少なく、経験的グリーン関数として適切な地震動記録を設定しにくいという課題があったが、兵庫県南部地震を契機として、全国で強震動観測が多くの機関において積極的に展開されてきており⁹⁾、この課題も解決されつつある。

高精度な強震動予測を実現するための最重要課題は震源のモデル化であり、特に断層面上でのすべりの不均質性を考慮した震源のモデル化手法に関する研究が精力的に進められている^{10),11),12),13)}。

釜江・入倉¹⁴⁾は、1995年兵庫県南部地震に対して、波形インバージョン結果を参考に断層面上のすべり量の大きいところにアスペリティを設定し、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングによってアスペリティの大きさ、地震モーメント、応力降下量などのパラメータを定量化した(アスペリティモデル)。結果として長周期地震動記録を使った波形インバージョン解析から求めたアスペリティモデルが短周期領域も含んだ広帯域強震動予測に有効であることを示した。同様な手法が1994年ノースリッジ地震、1999年トルコ・コジャエリ地震、1999年台湾・集集地震など^{15),16),17)}にも適用され、アスペリティモデルが検証されている。

一方、統計的に断層面上でのすべりの不均質性を抽出する試みがSomerville et al.¹²⁾によって行われた。彼らは内陸地殻内地震の波形インバージョン結果からアスペリティ(断層面上のすべりの相対的に

* 飛鳥建設株式会社 技術研究所 工修

** 京都大学 原子炉実験所 助教授・工博

*** 飛鳥建設株式会社 技術研究所

**** 京都大学 防災研究所 教授・理博

Technical Research Institute, Tobishima Corp., M. Eng.

Associate Professor, Research Reactor Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.

Technical Research Institute, Tobishima Corp.

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Sc.

大きい領域)を抽出し、その結果破壊域の面積やアスペリティの面積が地震モーメント(M_0)によってスケーリングされることを示した。その後、Miyakoshi et al.¹⁸⁾は同様な方法により日本国内で発生した中規模地震において検討を行い、このスケーリング則が成り立つことを示している。さらに宮腰¹⁹⁾は、1999年に相次いで発生したトルコ・コジャエリ地震と台湾・集集地震についても検討を行い、Somerville et al.が統計解析に用いた M_0 よりも大きい M_0 に対してもこのスケーリング則が成り立つことを示している。この結果は前述のフォワードモデリングでの検証事例を背景として、既に将来の内陸地殻内地震や海溝型巨大地震の広帯域強震動予測のための特性化震源モデルに適用されている²⁰⁾。

本研究ではアスペリティモデルの有効性はより多くの地震によって検証すべきとの観点から、2000年鳥取県西部地震を対象に釜江・入倉と同様の手法を用いて広帯域強震動評価のための最適震源モデルを構築した。鳥取県西部地震では、震源ごく近傍を含めた多くの地点における本震および余震での地震動記録が、防災科学技術研究所が実施している強震観測網(K-Net)²¹⁾、基盤強震観測網(KiK-Net)²²⁾、高感度地震観測網(Hi-Net)²³⁾において得られwebを通じて公開されている。また、地震直後にこれらの記録を用いた波形インバージョン解析による複雑なすべり量分布が報告されており^{24),25),26),27),28)}、経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングの適用条件が揃っている。

2. 鳥取県西部地震の震源破壊過程

前述のように鳥取県西部地震では、地震発生直後に関口・岩田^{24),25)}、堀川²⁶⁾、井出²⁷⁾、Yagi and Kikuchi²⁸⁾により震源の破壊過程が報告されている。いずれも、震源周辺のK-Net、KiK-Net等により得られた地震動記録を用いた波形インバージョン解析により得られたものであり、複雑な震源の破壊過程が示されている。これらの結果を比較すると、相互に異なる点が見られる。これは、波形インバージョン解析に用いたデータ、解析方法による差であると考えられる。

その後、関口・岩田モデル(以後、関口・岩田[2000]モデルと称す)は、①断層面を福山²⁹⁾の高精度余震分布を参考に5枚のセグメントからなるモデルに変更し、②震源をHi-Netの震源情報に基づき浅くし³⁰⁾、③断層面上の浅い部分の拘束が十分ではなかった点を、すべりに感度の強い国土地理院によるGPSおよび水準測量による地殻変動データおよび最浅のサブフォルトのすべりを抑える拘束を加える、などの検討を加えることによって再評価されている³¹⁾(以後、関口・岩田[2001]モデルと称す)。

関口・岩田[2001]モデルを図1に示す。すべり量の大きな領域の大部分は震源の南東側に見られ、かなり浅い部分にまでも広がっている。これに対して、震源付近のすべり量は小さいことがわかる。今回の震源付近では1989年、1990年、1997年に群発的地震活動($M_j=5.1 \sim 5.4$)が発生しており、瀬谷ら³²⁾は余震の震央分布から今回の地震を含めた4回の地震は全て同じ地震断層の一部が活動したものであるとしている。また、以前の活動では断層運動の進展を妨げるバリアのようなものが存在し大地震に成長しなかったが、今回の地震では震源に対して比較的浅い部分が活動したため、断層運動が一気に進展しMjが7を超えるような大地震へと成長したとしている。これらの知見は、関口・岩田[2001]モデルのすべり分布と調和しており、関口・岩

田[2001]モデルの信頼性は高いと考えられる。

また、今回の地震では明瞭な初期破壊が観測されている。梅田ら³³⁾によれば、初期破壊は震源から出発し南東方向のやや深い方向に7kmすすみ、そこで第二の破壊(主破壊)が始まったとしている。さらに、平田ら³⁴⁾は、初期破壊と主破壊の震源の再決定を行っており、主破壊開始点は震源の南東のすべり量が大きい領域の下部に位置しているとしている³⁵⁾。その深さは、初期破壊開始点が約7kmであるのに対して、主破壊開始点は7.5~11kmの範囲にばらつくとしている³⁶⁾。図1に文献35)に示された初期破壊開始点(▽印)と主破壊開始点(△印)を示す。また主破壊開始点のばらつきの範囲を矢印で示す。

関口・岩田はインバージョン結果より、震源で始まった破壊はいったん主破壊開始点付近に移動し、そこから上向きおよび北西上向きに進む、つまり回り込んでいるような現象があるとしている。従って、震源から破壊が同心円状に伝播すると考えた場合と異なる破壊伝播を示す。

このように鳥取県西部地震の震源の破壊過程は複雑であるため、震源モデルの設定においてもこの破壊過程を参考とした。

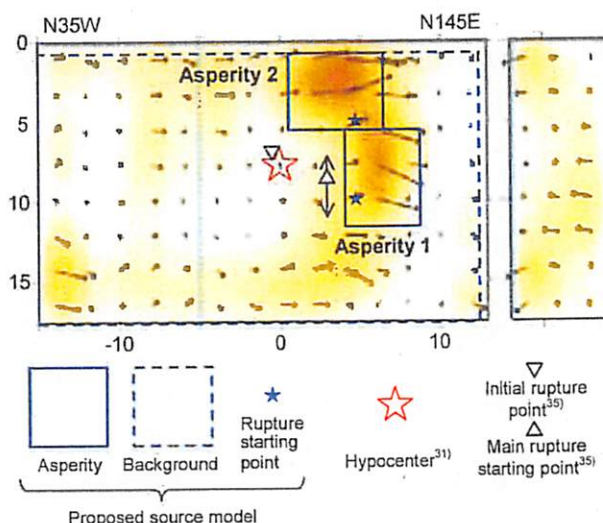


図1 提案する鳥取県西部地震の最適震源モデル
(関口・岩田³¹⁾に加筆・修正)

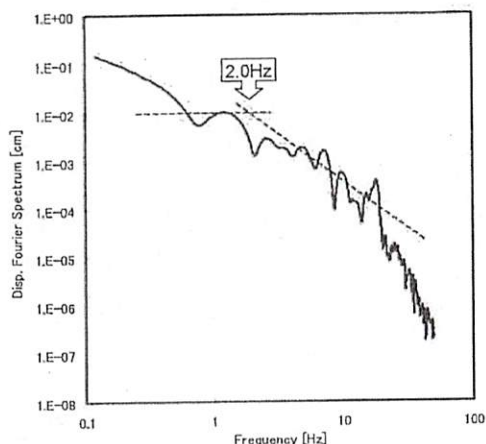
3. 経験的グリーン関数として用いる余震記録

鳥取県西部地震では、多くの余震記録が観測されており、K-NetおよびKiK-Netで観測された記録はwebを通じて公開されている。本検討では公開された余震記録の中から、規模が比較的大きく、震源メカニズムが本震と類似しており、多くの観測地点で記録が得られている等の観点から、10月17日22時16分の $M_{\text{max}}=4.2$ の余震による記録を経験的グリーン関数として使用する。この余震では、半径約70km以内ではK-Netが21観測地点、KiK-Netが15観測地点での記録が得られており、震源周辺の地震動を評価するには十分な点数と考えられる。なお、KiK-Netは全て地中の観測点を対象とする。

表1に余震の諸元を、図2には本震および余震の震央と、強震動シミュレーションの対象地点を示す。また、右上には本震と余震の震源メカニズムを示す。本震と余震の震源メカニズムは類似していることがわかる。地震モーメントとメカニズム解は広帯域地震観測網(FREESIA)³⁷⁾による結果である。

表1 余震の諸元

発生日時 ²³⁾	2000/10/17 22:16
M_{BL} ⁴¹⁾	4.2
震源位置 ²³⁾	35.182N, 133.434E
Strike, Dip, Slip ³⁷⁾	deg. 309, 87, 18
震源深さ ²³⁾	km 4.7
面積	km ² 1.44
地震モーメント ³⁷⁾	Nm 2.84×10^{15}
応力降下量	MPa 4.0



4. 震源のモデル化

2章で示したように、関口・岩田[2001]モデルは最新の情報を用いてモデルの修正が行われており、その結果は過去の地震活動も含めた余震分布から今回の地震の破壊過程を推定した澁谷ら¹²⁾の知見とも調和的であり、信頼性が高いと考えられる。そこで、このモデルを初期モデルとして、フォワードモデリングにより最適震源モデルを構築する。震源モデルの設定手順は以下の通りである。①これまでに発生した大地震における震源モデルの検討結果から^{14), 15), 16)}、すべり量の大きいところから短周期から長周期までの強震動が生成されるとし、そこにアスペリティを設定する。②アスペリティの位置や大きさを、観測波形に見られる特徴的な波形（フォワードディレクティビティ効果によるパルスなど）に着目し、その周期や振幅が一致するように調整する。この際の観測波形は、アスペリティからの強震動が支配的と考えられる震源近傍の観測地点での波形とする。③合成波形の振幅はアスペリティの応力降下量や f_{max} の補正で調整する。④破壊伝播は関口・岩田のインバージョン結果を参考とする。⑤アスペリティ以外の背景領域もモデル化する。

図1に設定した最適震源モデルを、表2には Kik-Net の観測地点のうち、震源近傍の SMNH01, TTRH02, 北房(OKYH14)の3地点での地中観測波形との一致度から得られた最適震源モデルの震源パラメータを示す。アスペリティはすべり量の大きい震源の南東側の浅い部分と深い部分の二箇所を設定された。本論文では、深い方を Asperity1, 浅い方を Asperity2 と呼ぶこととする。破壊領域からアスペリティを除いた部分が背景領域である。

関口・岩田[2001]モデルは前述のように5つの断層セグメントを想定しているが、南西～北西にのびるブランチ部分の断層面を無視し、走向N145E、傾斜角90度のひとつの断層面としてモデル化した。断層面の地表トレスを図2に示す。

表 2 最適震源モデルのパラメータ

震源位置 ⁴³⁾	35.26937N, 133.35669E
Strike, Dip, Slip	deg. 145, 90, 0
震源深さ ⁴³⁾	km 7.8
地震モーメント ⁴⁵⁾	Nm 9.6×10^{18}
破壊域の面積	km ² 464
せん断波速度	km/s 3.5

	アスペリティ		背景領域
	1 (下部)	2 (上部)	
面積	km ² 28.8 (4.8km~6.0km)	28.8 (6.0km<4.8km)	410.4
重ね合わせ数 ($N_L \times N_w \times N_T$)	4×5×5	5×4×5	$\frac{282 \times 17}{N_L \times N_w \times N_T}$
上端深さ	km	5.6	0.8
地震モーメント	Nm	1.99×10^{18}	0.99×10^{18}
応力降下量	MPa	28.0	14.0
破壊伝播速度	km/s	2.5	3.0
ライズタイム	s	0.6	0.6

波形合成は、Irikura⁷⁾の経験的グリーン関数法に、入倉ら⁴²⁾のすべり速度関数の補正式を適用した方法で実施した。

破壊開始地点は、主破壊開始点を参考に、図1中に示す Asperity1 内の★印から円状に広がるとし、破壊が Asperity2 内の★印に到達した後、再び円状に伝播すると仮定した。従って、Asperity2 内での破壊伝播様式は関口・岩田[2001]モデルと整合する。また、破壊伝播速度は関口・岩田[2001]モデルを参考に、Asperity1 内では 2.5km/s、Asperity2 内では 3.0km/s と仮定した⁴³⁾。

Asperity1 の面積およびライズタイムは、フォワード側にあたる OKYH14 の地中速度波形に見られた周期約 1 秒程度のパルスを再現できるように試行錯誤を行い設定した。ライズタイムは、0.4 秒から 1.0 秒まで 0.1 秒刻みで変化させ、最も波形の一致度が高い値を設定した。その結果、面積は $4.8\text{km} \times 6.0\text{km}$ (28.8km^2)、ライズタイムは 0.6 秒とした。なお、余震の面積 (1.44km^2) から断層の分割幅が 1.2km となるため、アスペリティの大きさはこの値の倍数に拘束される。同様に Asperity2 は SMNH01 の地中観測波形を対象に検討を行い、面積が $6.0\text{km} \times 4.8\text{km}$ (28.8km^2)、ライズタイムは 0.6 秒とした。また、本震と余震の応力降下量の比は Asperity1 が 7.0、Asperity2 が 3.5 とし、アスペリティの地震モーメントと応力降下量は次式から設定した。

$$Moa = Moe \times c \times N_L \times N_W \times N_T$$

$$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma_e \times c$$

ここで、 Moa : アスペリティの地震モーメント
 Moe : 余震の地震モーメント
 c : 応力降下量の比(アスペリティ/余震)
 N_L, N_W, N_T : 波形合成における重ね合わせ数
 $\Delta \sigma_a$: アスペリティの応力降下量
 $\Delta \sigma_e$: 余震の応力降下量

なお、設定されたアスペリティのライズタイムは 1995 年兵庫県南部地震の最適震源モデル¹⁴⁾における値と同じである。

背景領域については、Asperity1 内の★印から破壊が円状に広がると仮定し、アスペリティと同様に ω^{-2} の波形が生成されると考えて波形合成を行った。宮武によるダイナミックモデルの計算では⁴⁴⁾、アスペリティと背景領域での最大すべり速度の大きさは異なるものの、すべり速度関数の形状は似たものとなっており、この仮定は近似的に有効と考えられる。背景領域の面積は、破壊域の面積を菊地・山中⁴⁵⁾の地震モーメントを Somerville et al.¹²⁾の経験式に適用して求め、そこからアスペリティの面積を減じて設定した。地震モーメントは、全地震モーメントからアスペリティの地震モーメントを減じて設定した。応力降下量はアスペリティと同様に設定した。破壊伝播速度は Asperity1 と同じ 2.5km/s とし、ライズタイムは断層パラメータのスケール則に基づき⁴⁶⁾、アスペリティのライズタイムから 2.04 秒と仮定した。

図 4(a)~(c)に SMNH01、TTRH02、OKYH14 の 3 地点における地中観測速度波形と合成速度波形とを比較して示す。図は上から観測波形、アスペリティと背景領域をあわせた全体の合成波形、Asperity1 のみの合成波形、Asperity2 のみの合成波形、背景領域のみの合成波形、アスペリティのみ(Asperity1+Asperity2)の合成波形である。

余震記録はその精度を考慮して、SMNH01 と OKYH14 では 0.125Hz ~ 10.0Hz、TTRH02 では 0.3Hz ~ 10.0Hz のバンドパスフィルター処理

を行った。当初 f_{max} を補正しない合成をしたところ、5Hz 付近以上の振動数領域における合成結果が大きめの評価となったため、本震と余震の高周波遮断振動数 (f_{max}) の補正を実施した。本震の f_{max} を Faccioli⁴⁷⁾の経験式で評価すると 5.5Hz となり、概ね整合したため、本検討では f_{max} をこの経験式から評価して補正した。ただし、佐藤⁴⁸⁾は鳥取県西部地震を対象に、Kik-Net での観測波形を用いて f_{max} に関する検討を行っており、 f_{max} には明瞭な地震規模依存性は見られないという報告もある。本震と余震の震源放射特性の違いは、それぞれのセンスが異なる時のみ、補正係数を -1 とし、これを合成波形に乗じて補正した。

いずれの地点においても、断層破壊の指向性効果によるパルス状の波形が良く再現できている。特に、断層走向方向にあたる OKYH14 では主要動部の初期に見られる 1 秒程度のパルスが良く再現できている。最大値については多少ばらつきが見られ、TTRH02 では、上下方向は観測波形と合成波形との一致度は高いが、水平方向の合成波形は大きめの評価となっている。これは、兵庫県南部地震でのポートアイランドでの鉛直アレー観測波形などからわかるように、上下動に比べ水平動の方が地盤の非線形の影響を受けやすいため⁴⁹⁾と考えられる。TTRH02 の地中観測点は花崗岩中に設置されているが、 V_s は 790m/s と花崗岩としては小さく一様に風化が進んだ状態と考えられること^{50,51)}、地表付近の地盤は顕著な非線形性を示していることから⁵²⁾、ここでの観測波形は地盤の非線形性の影響を受けている可能性が高いと考えられる。

SMNH01 においては、NS 方向の一致度は波形、最大値ともに高いが、EW 方向および上下方向では最大値の一致度が低い。これは応力降下量の設定だけでは説明できなく、今回は符号のみで補正した本震と余震の震源放射特性の違いを補正することが重要であることを示唆するものと考えられる。

図 4 からわかるように、3 地点ともに全体の合成波形とアスペリティのみを考慮した合成波形には大きな差異は見られず、背景領域の寄与は小さいことがわかる。図 5 には 3 地点での観測波形とアスペリティのみを考慮した合成波形の NS 成分の変位フーリエスペクトルをそれぞれ比較して示す。一部の周波数帯域では小さめに評価しているものの、変位フーリエスペクトルは低周波から高周波までの広い周波数領域において概ね一致していると考えられる。

今回の最適震源モデルは、すべり量の大きい領域にアスペリティを設定し、短周期地震動も長周期地震動もそこから生成されると考えて得られたものである。一方、松元・岩田³⁹⁾は経験的グリーン関数法を用いたエンベロップインバージョンから、断層面上での高周波地震動の生成過程の推定を行い、高周波発生強度の高い領域は波形インバージョンで得られたすべりの大きい領域の周囲に分布していることを示している。これは、高周波地震動はアスペリティ以外の部分からも多く放出されるということを意味しており、エンベロップインバージョンの精度がまだ十分ではないものの、震源モデルの構築にとっては重要な問題であり、今後の検討課題としたい。

本検討では、破壊開始地点を梅田らの主破壊開始点を参考に震源の南東に位置する Asperity1 内に設定し、かつ Asperity2 も南東から北西に破壊伝播するように破壊開始点を設置することによって、関口・岩田[2001]モデルと整合させている。これに対して、通常考えられるような震源から同心円状に破壊伝播するとした場合の合成波形

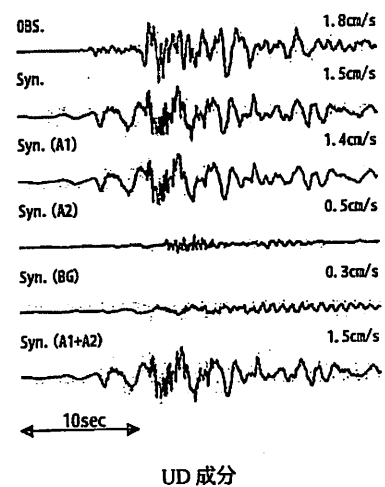
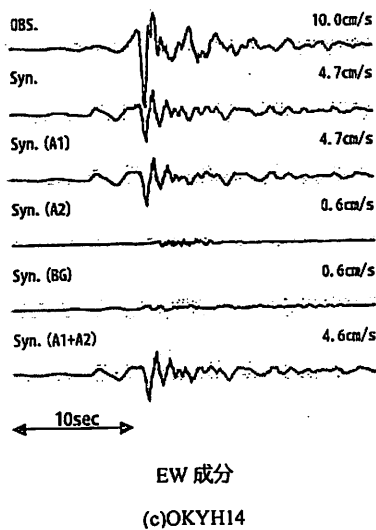
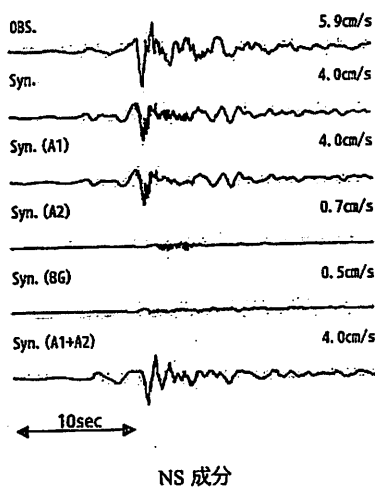
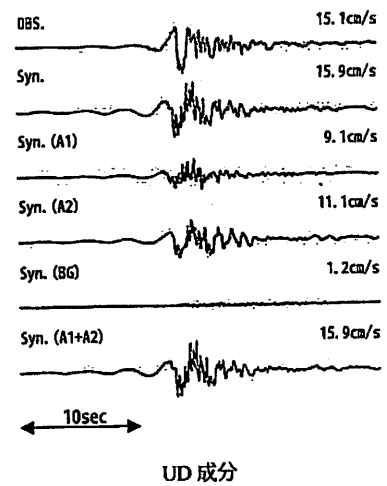
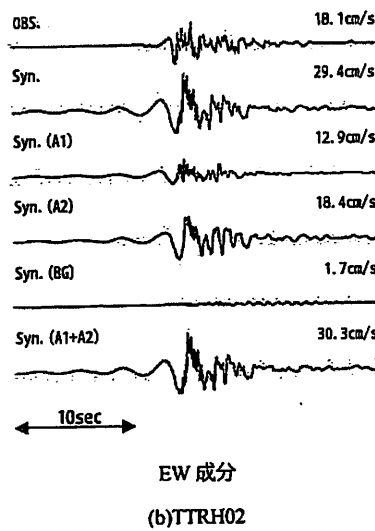
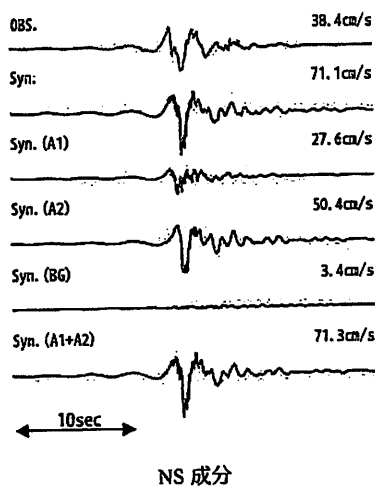
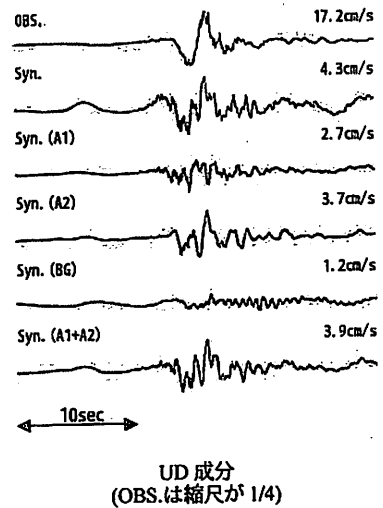
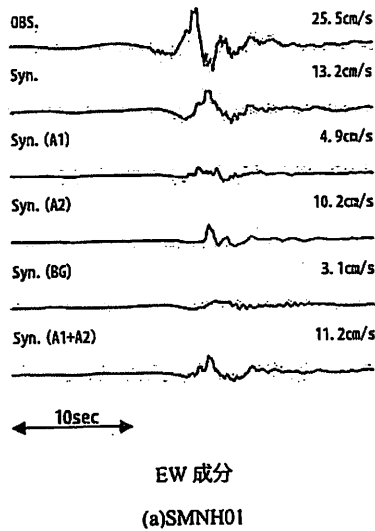
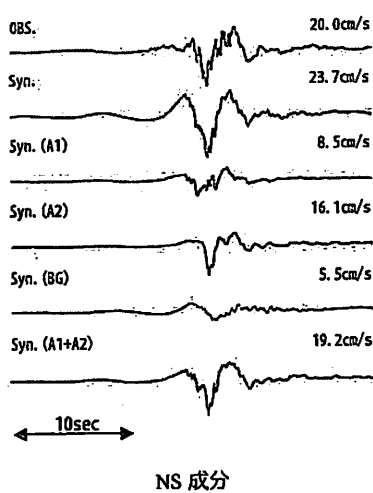


図4 伯太(SMNH01), 日野(TTRH02), 北房(OKYH14)における地中の観測速度波形と合成速度波形との比較
(各図とも上から, 観測記録, 合成結果, Asperity1のみ, Asperity2のみ, 背景領域のみ, アスベリティのみの合成結果)

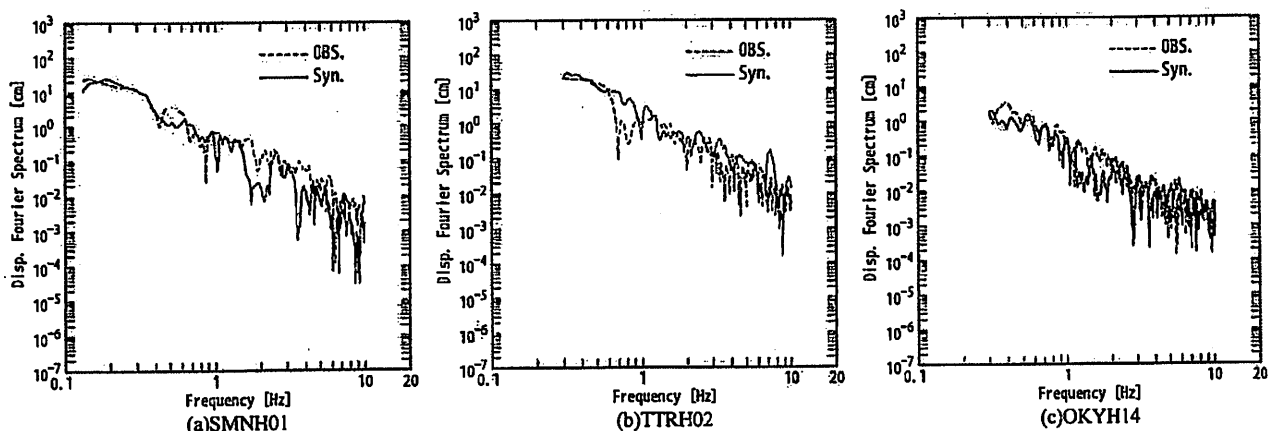


図5 伯太(SMNH01), 日野(TTRH02), 北房(OKYH14)における地中の観測波形とアスベリティのみを考慮した合成波形との変位フーリエスペクトルの比較(NS成分)

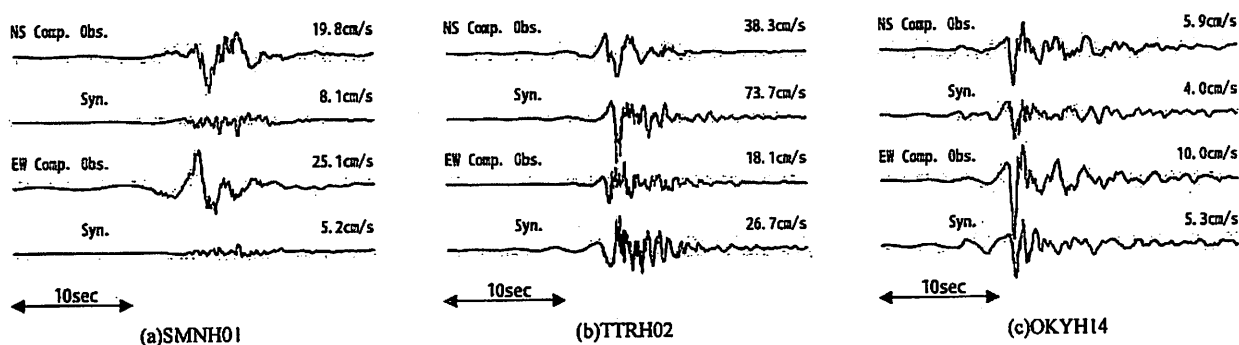


図6 地中の観測速度波形と震源から同心円状に破壊伝播するとした場合の合成速度波形(アスベリティのみを考慮)の比較

を図6に示す。フォワードとなるTTRH02およびOKYH14では同程度の結果が得られるが、バックワードとなるSMNH01にはパルス状の波形は再現できない。このことは、鳥取県西部地震の震源モデルでは、破壊伝播様式が複雑なため、これを適切に評価することが重要であることを示していると考えられる。

図7に前述したSomerville et al.¹²⁾, Miyakoshi et al.¹⁰⁾, 宮腰¹⁹⁾が示したアスベリティの総面積と地震モーメントとの関係に本検討結果(★印)と釜江・入倉^{14),15),16)}およびMiyake et al.¹⁷⁾が本検討と同様のフォワードモデリングにより国内外の大～中規模の地震に対して求め

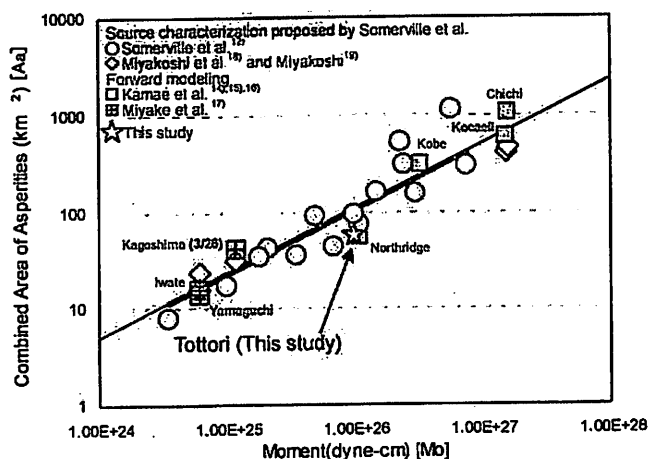


図7 アスベリティの総面積と地震モーメントとの関係

た結果をあわせて示す。図中の実線はSomerville et al.が提案したアスベリティの総面積と地震モーメントとのスケーリング則であり、太線部分はSomerville et al.が検討に用いた M_0 の範囲を示す。本検討結果はアスベリティの総面積は小さめであるものの、Somerville et al.によるアスベリティの総面積と地震モーメントの関係式でほぼ表現できると考えられる。

5. 震源周辺地点の強震動シミュレーション

設定した最適震源モデルを用い、図1に示す観測地点のうち、TTRH02, SMNH01, OKYH14を除く震源周辺地点を対象に経験的グリーン関数法を用いた強震動シミュレーションを実施した。Kik-Netは地中観測地点を対象とした。図8にKik-Netの観測地点のうち、震源から少し離れた赤崎(TTRH04), 岡山(OKYH03), 口和(HRSH06)の3地点におけるEW成分の加速度と速度について、観測波形と合成波形とを比較して示す。余震記録にはそれぞれの波形の精度に基づきバンドパスフィルター(TTRH04: 0.125Hz~10.0Hz, OKYH03, HRSH06: 0.4Hz~10.0Hz)を作用させている。

各地点とも合成加速度波形の継続時間や包絡形状は観測波形と良く一致している。合成速度波形についても、長周期波形の位相や形状はよく再現できている。OKYH03の観測波形には、OKYH14よりも振幅は小さいが、フォワードディレクティブ効果による同様のパルス状の波形が見られるが、これについてもよく再現できている。

最大加速度の再現精度は f_{max} の補正により高くなっているものの、

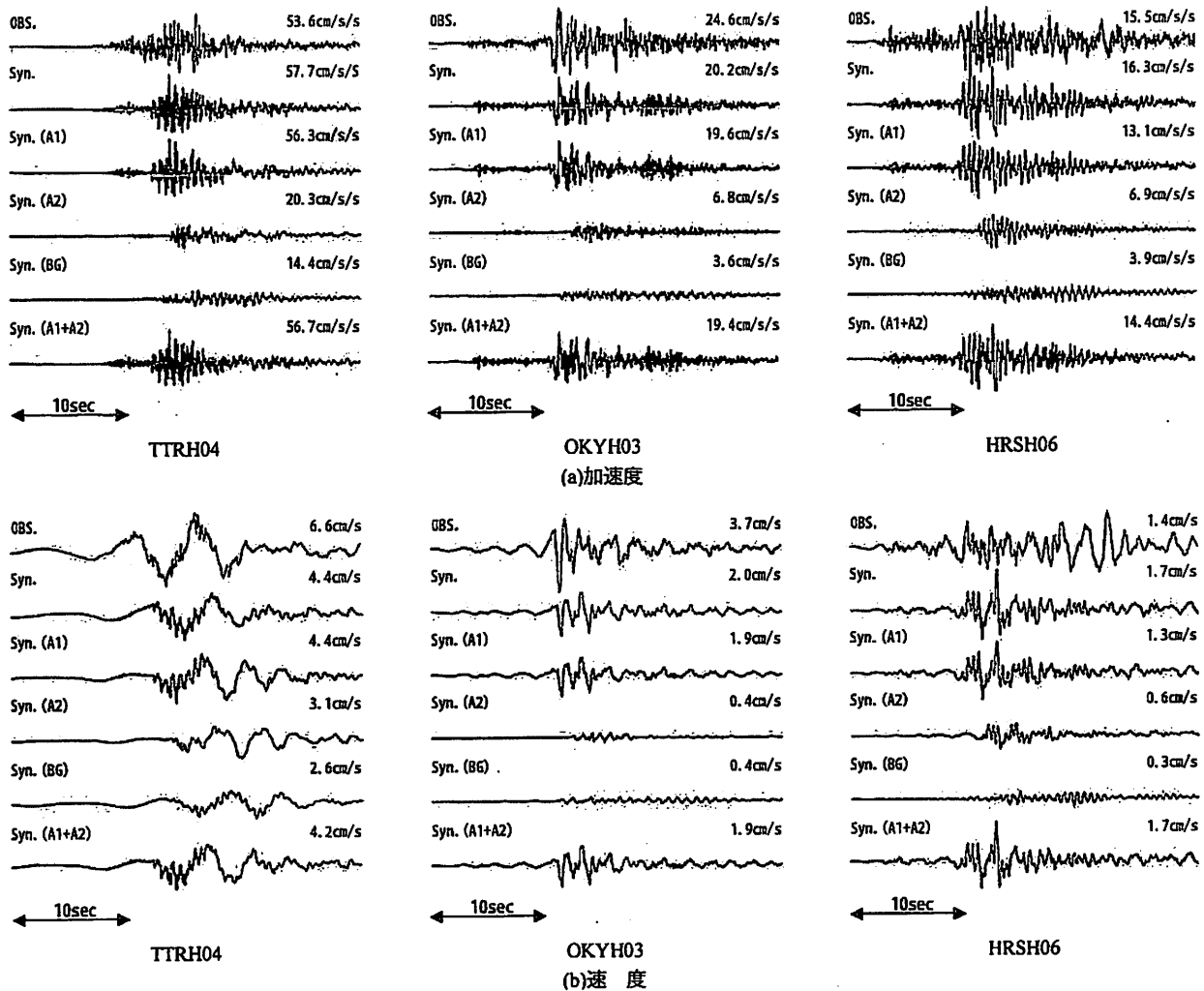


図8 赤崎(TTRH04), 岡山(OKYH03), 口和(HRSH06)における地中の観測波形と合成波形との比較(EW成分)
(各図とも上から, 観測記録, 合成結果, Asperity1のみ, Asperity2のみ, 背景領域のみ, アスぺリティのみの合成結果)

最大速度はこれに比べるとやや低く, 長周期成分の評価精度がやや低いことが考えられる。前述のように, 震源近傍の観測点では, 合成波形におよぼす背景領域の寄与は小さく, 震源の近くにアスぺリティが見られることから, 地震動はアスぺリティのみから生成される強震動によりほぼ説明できると考えられる。一方, 図8に示すように, 震源から離れたTTRH04では, 背景領域でのモーメント解放量が大きく, しかもアスぺリティと背景領域までの距離がほぼ等しくなることから背景領域から生成される長周期地震動の寄与が大きくなっている。

図9にK-Net, 図10にKik-Netの観測地点における観測波形に対する合成波形(アスぺリティのみを考慮した場合)の最大値の比(合成/観測)を示す。各図の標準偏差は, K-Netが0.57と0.52(最大加速度と最大速度), Kik-Netが0.32と0.31であり(一つだけ大きくはずれたTTRH02を除く), Kik-Netに比べK-Netの方がばらつきが大きいことがわかる。これは, 震源から半径50km程度の範囲では地表の最大加速度が概ね 200cm/s^2 を超えていることから³⁴⁾, 地中の観測点であるKik-Netに比べ, 地表の観測点であるK-Netの観測波形は地盤の非線形性的影響を大きく受けたためと考えられる。

本検討では本震と余震の震源放射特性の違いは符号のみでしか考

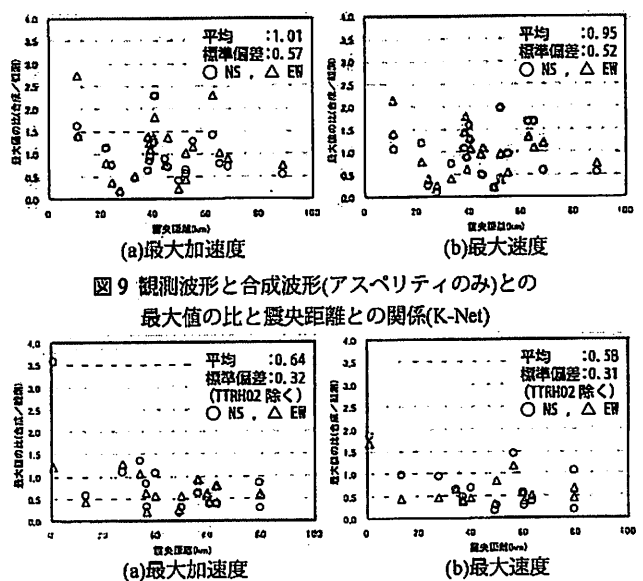


図9 観測波形と合成波形(アスぺリティのみ)との最大値の比と震央距離との関係(K-Net)

図10 観測波形と合成波形(アスぺリティのみ)との最大値の比と震央距離との関係(Kik-Net)

慮していない。そのため、前述のように SMNH01 で見られたような成分によって観測波形と合成波形の一致度が異なる現象は震源放射特性によるものと考えられる。釜江⁹⁾は既往の震源放射特性に関する観測的研究に基づき、本来周波数に依存しない震源放射特性について、その周波数依存性を考慮する方法を提案している。彼らは 0.5Hz 以下では理論的放射特性を示し、5Hz 以上では等方的になるとしている。ここでは、0.5Hz 以下(2 秒以上)の長周期成分を対象に、本震と余震のラディエーションパターン係数を理論的に求め、その比を補正係数とし、これを合成波形の最大値に乘じるという方法で震源放射特性の補正を行った。

本震のラディエーションパターン係数は、一様なすべり角を想定して分割小断層毎に求められるが、図 1 に示すように断層面のすべり角は一様ではないため、ここではアスペリティでの平均値を使用した。この補正は、地震動におよぼす地盤の非線形性の影響が小さいと考えられる Kik-Net の地中観測地点に対して実施した。

図 11 に観測波形に対する合成波形の最大速度値の比と震央距離との関係を震源放射特性の補正前後について、Radial 方向と Transverse 方向についてそれぞれ示す、合成波形はアスペリティのみを考慮した場合である。

震源放射特性の補正を行わない場合、特に震源ごく近傍の観測点では最大値の比が大きいくずれていることがわかる。これに対して、震央距離が伸びるにつれて最大値の比は一定値に近づいていることがわかる。これは、適切な余震を選択したこと、震央距離が遠くなることにより断層の広がりへの影響が薄れ、点震源に近くなるためと考えられる。これに対して、震源放射特性の補正を行うことにより、震源に近い観測点での最大値の比が改善されており、補正の有効性を示唆するものと考えられる。

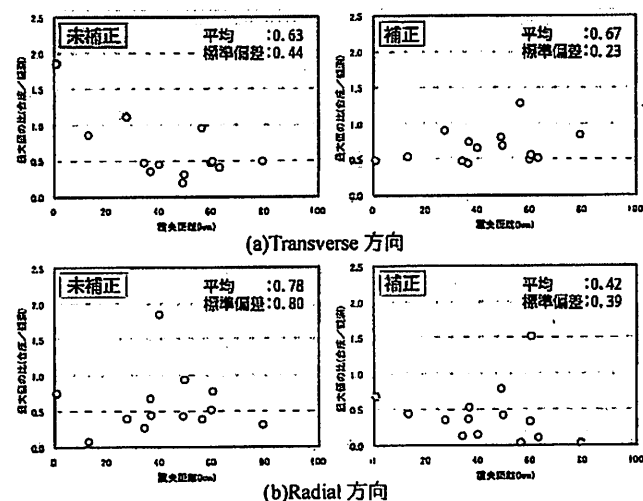


図 11 観測波形と合成波形(アスペリティのみ)との最大値の比と震央距離との関係におよぼす震源放射特性の影響
(最大速度、周波数 ≤ 0.5 Hz, Kik-Net)

6. 結論

2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震の最適震源モデルを経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングにより構築した。その結果、二箇所(震源の南西側の浅い部分と深い部分)のアスペリティと背景領域からなるモデルを提案した。

- (1) 震源ごく近傍の観測点の強震動は、震源の南西側の浅い部分と深い部分の二つのアスペリティのみから生成される強震動によりほぼ説明できた。そのサイズ、地震モーメントおよび応力降下量は深い部分が $4.8\text{km} \times 6.0\text{km}$, $1.99 \times 10^{18}\text{Nm}$, 28Mpa, 浅い方が $6.0\text{km} \times 4.8\text{km}$, $0.99 \times 10^{18}\text{Nm}$, 14Mpa である。震源全体のアスペリティの総面積と地震モーメントとの関係は、アスペリティの総面積がやや小さいものの、Somerville et al. の経験式によってほぼ説明できた。一方、震源から離れた地点では、アスペリティ以外の背景領域から生成される長周期地震動の影響が大きくなる。
- (2) 震源の破壊伝播様式は複雑であり、震源から破壊が同心円状に伝播すると考えた場合には、破壊伝播の方向が異なるため震源ごく近傍の SMNH01 での観測波形は再現できない。このことは、鳥取県西部地震では、震源の破壊過程が重要であったことを示唆するものと考えられる。また、将来の大地震を想定した強震動予測では、震源の破壊過程も重要なパラメータであると考えられる。
- (3) 提案した最適震源モデルを用いて震源周辺(震央距離約 70km 以内)の地震観測地点を対象に強震動シミュレーションを行った。その結果、加速度合成波形の継続時間や包絡形状、速度合成波形の位相や形状はよく再現できた。最大値の一致度は、Kik-Net 観測地点に比べ K-Net 観測地点の方がばらつきは大きく、地盤の非線形性の影響を強く受けたためと考えられる。
- (4) 本震と経験的グリーン関数として用いた余震との震源放射特性の違いを考慮することによって、震源に近い観測点での最大値の一致度が改善され、震源放射特性の補正の有効性を示唆するものと考えられる。

謝辞

本検討では、防災科学技術研究所の K-Net および Kik-Net の観測波形、Hi-Net の震源情報および Freesia のメカニズム解を使用させていただきました。(独)産業技術総合研究所の関口春子博士には震源インバージョン結果を使用させていただくとともに破壊過程についてご教授いただきました。京都大学大学院の平田美佐子氏には初期破壊および主破壊開始点についてご教授いただきました。(財)地域地盤環境研究所の宮腰 研博士には震源の特性化結果を使用させていただきました。また、査読委員には非常に有益な意見をいただきました。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：平成 12 年(2000 年)10 月 6 日の鳥取県西部地震の余震活動について、報道発表資料(平成 12 年 10 月 7 日 16 時 00 分)、2000.10.
- 2) 林 康裕、北原昭男、平山貴之、鈴木祥之：2000 年鳥取県西部地震の地震動強さの評価、日本建築学会構造系論文集、第 548 号、pp.35-41、2001.10.
- 3) 翠川三郎、藤本一雄：2000 年鳥取県西部地震の震源域での地震動強さ、日本建築学会構造系論文集、第 549 号、pp.59-65、2001.11.
- 4) 入倉孝次郎、釜江宏、Arben Pitarka：直下地震による強震動のハイブリッドシミュレーション法、日本地震学会講演予稿集、1994 年秋季大会、C26、1994.10.
- 5) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka：A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.88, pp.357-367, 1998.4.

- 6) 例えば, 地震調査推進研究本部: 地震関係基礎調査交付金による地下構造調査報告について, <http://www.jishin.go.jp/main/kozo/>
- 7) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.151-156, 1986.12.
- 8) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地域的な震源スケリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp.57-70, 1990.10.
- 9) 例えば, 防災科学技術研究所の強震観測網(K-Net), 基礎強震観測網(Kik-Net), 高感度地震観測網(Hi-Net), <http://www.bosai.go.jp/index.html>
- 10) 入倉孝次郎, 香川敬生, 釜江克宏, 関口春子: 強震動予測のためのレシピ, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム, a-21, pp.125-128, 1998.10.
- 11) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏: 周期帯域に応じた強震動評価法の高精度化, 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1回シンポジウム論文集, pp.89-96, 2002.3.
- 12) Somerville, P. G., K. Irikura, K., 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, Seismological Research Letters, Vol.70, No.1, pp.59-80, 1999.
- 13) 増一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井 透: 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp.51-62, 2001.7.
- 14) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第500号, pp.29-36, 1997.10.
- 15) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1994年ノースリッジ地震(Mw=6.7)の震源モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.643-648, 1998.12.
- 16) 釜江克宏, 入倉孝次郎: トルコ・コジャエリ, 台湾・集集地震の震源の特性化と強震動シミュレーション, 第11回日本地震工学シンポジウム(投稿中)
- 17) Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura: Source characterization of inland crustal earthquakes for near-source ground motions, Proceedings of 6th International Conference on Seismic Zonation, II-32B, 2000.
- 18) Miyakoshi, K., T. Kagawa, H. Sekiguchi, T. Iwata and K. Irikura: Source characterization of island earthquakes in Japan using source inversion results: 12th World Conference on Earthquake Engineering, 1850, 2000.1.
- 19) 宮腰 研: 私信
- 20) 地震調査推進研究本部: 地震に関する評価, 強震動評価, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 21) 防災科学技術研究所: K-Net, 強震観測網, <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 22) 防災科学技術研究所: Kik-Net, 基礎強震観測網, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 23) 防災科学技術研究所: Hi-Net, 高感度地震観測網, <http://www.hinetdata.bosai.go.jp/>
- 24) 関口春子, 岩田知孝: K-net, Kik-net 地震記録を用いた断層破壊過程の推定, <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwata/ttr/source.html>
- 25) 岩田知孝, 関口春子: 2000年鳥取県西部地震の震源断層の実体, SEISMO, pp.5-7, 2001.3.
- 26) 堀川晴央: 2000年鳥取県西部地震の断層モデル, <http://www.gsj.go.jp/~horikawa/2000Tottori/source.html>
- 27) 井出 哲: 鳥取県西部地震の近地地震波による解析, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ide/TTR/ttr1.html>
- 28) Yagi, Y. and M. Kikuchi: Source Rupture Process of the Tottori-ken Seibu earthquake of Oct. 6, 2000, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tottori/>
- 29) 福山英一, William L. Ellsworth, Felix Waldhauser, 久保篤規: 2000年鳥取県西部地震の詳細断層構造, 地球惑星連学会合同大会, S3-007, 2001.6.
- 30) 関口春子, 岩田知孝: 2000年鳥取県西部地震の震源過程と地震発生場, 地球惑星連学会合同大会, S3-006, 2001.6.
- 31) 関口春子, 岩田知孝: 震源過程が支配する震源近傍強震動—2000年鳥取県西部地震—, 日本地震学会講演予稿集 2001年度秋季大会, A73, 2001.10.
- 32) 笠谷拓郎, 中尾節郎, 西田良平, 竹内文朗, 渡辺邦彦, 梅田康弘: 2000年鳥取県西部地震に先行して発生した1989年, 1990年および1997年の群発的地震活動, 地球惑星連学会合同大会, S3-003, 2001.6.
- 33) 梅田康弘, 平田美佐子, 吉井弘治, 大見士朗, 伊藤潔: 2000年鳥取県西部地震の初期破壊について, 地球惑星連学会合同大会, S3-P001, 2001.6.
- 34) 平田美佐子, 梅田康弘, 川方裕則, 伊藤潔: 2000年鳥取県西部地震の初期破壊について(2), 一初期破壊と主破壊の震源再決定とスペクトル, 日本地震学会講演予稿集, 2001年度秋季大会, P129, 2001.10.
- 35) 梅田康弘: 鳥取県西部地震の本震の初期破壊について, http://www2.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/TOTTORI/syokihakai_j.html
- 36) 平田美佐子: 私信
- 37) 防災科学技術研究所: Freesia, 広帯域地震観測網, <http://argent.geo.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>
- 38) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.9.
- 39) Brune, J. N.: Correction, Journal of geophysical research, Vol.76, p.5002, 1971.7.
- 40) 川瀬 博, 松島信一, 佐藤智美, 伏見 爽, 巽 蒼樹: JMA87型強震計の観測記録に基づいた震源・伝播経路・サイトの各特性の分離, (その1) 内陸浅発地震の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21101, 構造II, pp.201-202, 1999.9.
- 41) 気象庁監修, 月刊気象
- 42) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25, 1997.9.
- 43) 関口春子: 私信
- 44) 宮武 隆: 震源物理に基づく震源モデル, 一強震動予測のために一, 月刊地球, 1/外 No.37, pp.42-46, 2002.6.
- 45) 菊地正幸, 山中佳子: 遠地実体波解析, 10月6日鳥取県西部の地震(M7.3), EIC地震学ノート, No.93s, 2000.10.6, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/001006.html
- 46) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.33, Part2, No.298, 1983.6.
- 47) Faccioli, E.: A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, Geophysical Monograph, 37, Maurice Ewing, AGU, Vol.6, pp.297-309, 1986.
- 48) 佐藤智美: Kik-net 地震記録を用いた鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及び fmax の検討, 日本地震学会講演予稿集 2001年度秋季大会, A56, 2001.10.
- 49) 吉田 望, 中村 晋, 末富岩雄: 1995年兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動とその予測, 第23地盤強震動シンポジウム, pp.39-52, 1995.10.
- 50) 吉中龍之進, 桜井春輔, 菊地宏吉編著: 岩盤分類とその適用, 岩盤工学体系[1], 土木工学社
- 51) 藤谷昌弘, 嶋田昌義, 小池 豊, 古田一郎: 地盤の変形特性把握のための室内試験と原位試験の対比, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—」に関する国内シンポジウム, 発表論文集, 社団法人土質工学会, pp.259-268, 1993.1.
- 52) 永野正行, 加藤研一, 武村雅之: 2000年鳥取県西部地震時の震源断層近傍における基礎地震動の推定, -1995年兵庫県南部地震との比較-, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp.39-46, 2001.12.
- 53) 松元康広, 岩田知孝: 2000年鳥取県西部地震(M_{max}7.3)の断層面上の高周波(2~10Hz)地震波の生成過程の推定, <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/yasuhiro/tottori.html>
- 54) 防災科学技術研究所: K-Net, Kik-Net による最大加速度分布, http://www.bosai.go.jp/ad/Jpn/news/tottori/tottori_k-net.html

(2002年3月8日原稿受理, 2002年8月20日採用決定)