

リアルタイム地震防災に用いる強震動評価法

香川 敬生

理修 (財)地域 地盤 環境 研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)

リアルタイム地震防災における強震動評価法について整理する。距離減衰式による経験的評価法、断層破壊を考慮した半経験的評価法について、その長所・短所について記述する。特に、対象とする地域の状況（活断層の解明度・地盤構造情報の集積度・強震計設置数など）に応じて利点のある手法について検討をおこなう。また、各手法を用いてより精度の高い強震動評価をおこなうための課題についてまとめる。更に、活断層・地盤構造・強震計データが十分に整備された状況において、強震動評価手法による予測結果と得られた強震観測記録を組み合わせた合理的な即時予測法について紹介する。

Key Words : Real-time seismology, Strong motion estimation, Empirical method, theoretical method, Interpolation

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震以後、震源位置や地震規模の情報から地震動・地震被害分布を即時的に予測するシステムが数多く開発され、活断層を想定したシナリオ地震に基づいた地震被害想定もおこなわれるようになってきている。そのようなシステムでは、想定シナリオ地震による地震被害の概要を事前予測するための地震動分布計算には時間をかけた詳細なものがおこなわれている反面、地震発生後の初動体制のために地震動分布を即時的に把握するものには時間のかからない簡便な手法が用いられる場合が多い。しかし、現実には事前想定シナリオ通りに地震が発生することはほぼ無く、想定された詳細な地震動分布が現実の震災における2次災害の軽減にそのまま役立つ可能性は低い。また、震災発生後の初動体制確立のためには可能な限り詳細な地震動分布が求められるが、計算時間を短縮した簡便な手法ではその要求を満たせない。

一方、平成7年兵庫県南部地震では、震災直後における現地の地震動の大きさを被災地の外部から十分に把握できず、初動体制の遅れにつながった。これは、全国を網羅する観測点数が少なかったことと、被災地の記録の入手が遅れたことが大きな原因である。このような事実を反省し、大地震直後の地震動分布を把握するための強震計・計測震

度計が全国各地に数多く配備されている。これらによって大まかな地震動の分布を地震発生後速やかに知ることができるようになっている。また、このような観測記録を補間して用いることにより、かなり詳細に地震動分布の推定をおこなうことも可能である。

このような背景を踏まえ、本論ではまず地震動を計算するための各種手法について述べる。次に、シナリオ地震による詳細な地震動分布と地震直後の地震動情報（計測震度情報）を組み合わせた、現実的な地震防災に利用可能な即時地震動分布推定システムを紹介する。

2. 即時地震動分布を把握する手法

まず、地震発生後速やかに強震動分布を推定するために広く用いられている方法について概観する。本論で紹介する地震動分布推定手法について、表-1にその特徴をまとめて示す。

2-1. 距離減衰式

震源位置やマグニチュードの地震情報は、現在では地震発生後数分以内に気象庁から発表されている。また、観測地震記録を回帰分析することにより、距離とマグニチュードから地震動震幅を推定する距離減衰式がいくつか提案されている [例えば、福島(1993)]。これらを利用して対象地点の地震動

表-1 各種手法の特徴

	得られるもの	震源の影響	伝播経路	地盤の影響	長所	短所
距離減衰式	震度 最大値 応答スペクトル	マグニチュード (断層破壊の影響を 補正するものも提 案されている)	距離に応じた減衰	地盤区分毎の 増幅率が一般的	計算が速い 平均像が得られる	地震固有の地震動 分布の表現が困難
記録の補間	震度 最大値 (波形の例もある)	考慮されず	考慮されず	観測値を工学的 基盤に戻して補間 する過程で導入	観測記録で保証 計算が速い	欠測点への対応 周囲の小さな記録から大 きな記録の再現が困難
強震シミュレーション	波形 (他は波形から計算可)	断層破壊とその 進行を考慮可能	反射・屈折・表面波 ・内部減衰が考慮可能	不整形性・非線形 応答も考慮可能	詳細でリアルな地震動 分布が得られる	計算時間が膨大 パラメータによる変動大
事前予測分布の観測 地震動分布による補正	震度 最大値	断層破壊とその 進行を考慮可能	反射・屈折・表面波 ・内部減衰が考慮可能	不整形性・非線形 応答も考慮可能	実際に発生した地震に 応じた詳細地震動分布 が得られる	断層・地盤調査が充実 し、地震観測点の多い 場所以外では適用困難

分布を把握することができる。ただし、同じ規模の地震を同じ距離で観測しても、その振幅は地盤条件によって異なることは周知である。そこで、地盤条件毎に複数の距離減衰式を用いる方法や、硬質な地盤上で距離減衰から地震動の大きさを評価した上で表層地盤の影響（応答倍率）を考慮する方法が用いられる [例えば翠川・松岡 (1995)]。

距離減衰式を利用すると、極めて短時間に地震動分布を計算することができる。一方、地震動は距離（震央距離や断層最短距離）とともに減衰するので、表層の影響を考慮しない基盤地震動分布は同心円あるいは楕円形となる。このため、地震動分布は震源破壊過程によらない平均像として再現され、地震被害想定のためのシナリオ地震動としても用いられることが多い。

一方、平均的な基盤地震動分布を与えるため、断層上を破壊が伝播することによって生じる震源断層近傍の複雑な地震動分布を表現することはできない。このため、震源断層を点で近似できるほど広範囲の、おおまかな地震動分布には向いているものの、実際に地震被害が生じる震源近傍の大地震動分布の把握には注意が必要である。

2-2. 観測情報の補間

地震動分布を最も簡便に把握するためには、把握したい精度に応じて強震計や計測震度計を配置し、そのデータを直接入手すれば良い。限られた範囲を対象としては、このような試みが現実におこなわれている [例えば稲葉・他(1997)、清水・他(1998)]。しかしながら、たとえ 500m メッシュ程度の精度であっても、それだけ多数の観測点を広

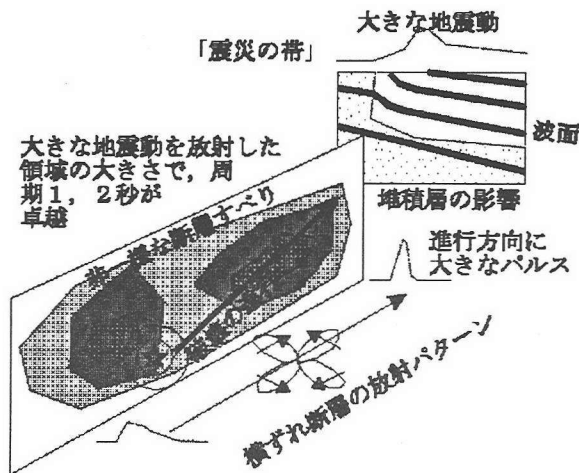


図-1 平成7年兵庫県南部地震による強震動の成因

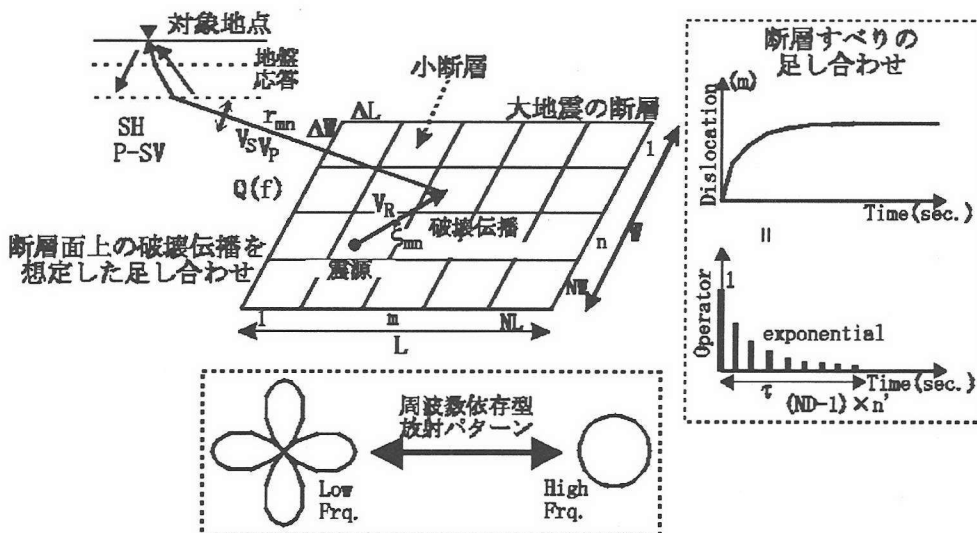


図-2 断層破壊を考慮した強震動シミュレーション

い範囲に設けることは実際には困難である。

そこで、観測点で得られた情報を補間することによって詳細な地震動分布を推定する方法が考えられる。この場合に一般的に用いられているものは、表層地盤の影響を考慮するために観測情報から表層地盤の影響を取り去って（工学的）地震基盤面に戻し、それらの情報を用いて地震動の空間補間をおこなった後、再び表層地盤の影響を考慮して対象地点の地震動を推定するものである。表層地盤の影響の評価にあたっては、地点の地盤構造を考慮した計算に時間を要するよりは、地盤種別を用いた経験的な方法 [例えば翠川・松岡 (1995)] が用いられることが多い。この方法で懸念されるのは、震源断層の影響によって震動が大きくなった領域のデータが即時的に入手できなかった場合、振幅の小さい周辺のデータと表層地盤の影響だけでは大震動域を把握出来ない可能性のあることがあげられる。

このようなシステムとしては、観測点における即時的なデータがほぼ確実に期待できる気象庁のデータを対象としてそれよりも細かい地震動分布を推定するため、国土庁で実用に向けた検討がおこなわれている [例えば横田・他(1997)]。

3. 強震動シミュレーションによる地震動分布

ここでは、震源破壊・波動の伝播・堆積地盤の影響を詳細に考慮した詳細な強震動シミュレーション法の現状について紹介する。

3-1. 断層破壊を想定したシミュレーション法

平成7年兵庫県南部地震では、広がりのある断層面上を破壊が進行したことによって特徴的な地震

動分布を示したとともに、深層地盤の不整形性および表層地盤の非線形応答が作用することによって局所的に大きな地震動が生じた（いわゆる「震災の帯」）。図-1にその様子を示す。

このような詳細な地震動分布を計算する手法のイメージを図-2に示す。大地震の断層面を小断層にメッシュ分割し、それらからの地震動を点震源として表現する。震源からは断層すべりの方向に依存する方位特性（図-3にS波放射のイメージを示す）を持った地震波が放射される。この地震波は地殻内で減衰し、コンラッド面・モホ面など深部構造による反射の影響や表面波の影響を受けて対象点近傍に至る。その後、堆積地盤の不整形構造の影響を受けて対象点で観測される。このような地震波の生成・伝播は、対象断層で生じた小地震波（経験的グリーン関数）で表現され、また近年では数値シミュレーションでも表現できるようになっている。数値シミュレーションの場合は、長周期帯域は3次元構造を反映した差分計算で、短周期帯域は平均値が震源理論に基づく統計波の伝播で扱い、それらを合成したハイブリッド

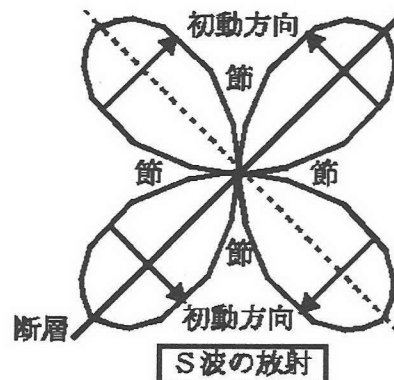


図-3 S波放射のイメージ

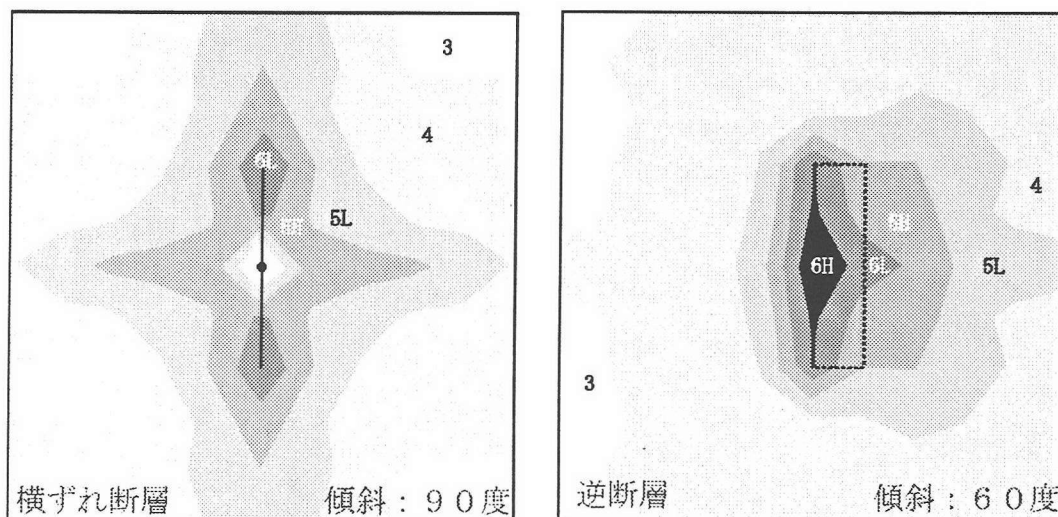


図-4 横ずれ断層 (左) と逆断層 (右) による地震動分布

法が用いられることが多い。各小断層からの寄与（グリーン関数）を、断層破壊の進行による時間遅れを考慮して足し合わせる事【例えば、Irikura(1986)】によって大地震波を合成することができる（図-2）。

このような波形シミュレーションを広範囲の計算点で実施することにより、地震動分布を描くことが出来る。図-4には断層長さ40km、幅20km、マグニチュード7の地震の基盤地震動分布を試算した例を示す。左が横ずれ断層、右が逆断層の場合で、いずれも断層中央からの一様破壊を想定している。断層破壊パターンの違いが、地震動分布に大きく影響することが分かる。詳細な地震動分布を把握するためには、このような断層破壊条件を考慮する必要がある。

3-2. 適用事例

兵庫県南部地震では、その後多くの調査研究から、断層破壊プロセスや被害地域の地盤構造が明らかになってきている。現在の強震動予測手法は、このようなパラメーターさえ与えられれば、観測波形をほぼ再現できるレベルになっている【例えば Kamae et al. (1998)】。そこで、このような強震動予測手法を用いて想定断層による詳細な地震動分布の推定がおこなわれつつあるが、断層震源を想定した強震動のシミュレーションでは、断層モデル・地下構造モデルが詳細に把握されていることが前提である。したがって実際の適用例は、活断層情報と地盤構造が広域で明らかになっている地域に限定されている【例えば、大阪府(1997)】。

また、震源近傍の強震動分布は震源断層モデルや断層面上の破壊開始点（震源）の位置によって大きく変動するので、現実の震災による地震動分布が事前に想定した通りとなる可能性は低い。加えて、3次元地盤応答計算などを考慮した詳細な推定ほど膨大な計算時間（CPU時間で数日）と記憶容量（1GB超）を要し、即時的な地震動分布の把握は不可能である。

4. 事前シミュレーションと即時入手地震動情報の融合

次に、詳細だが膨大な計算時間を要する強震動シミュレーションと地震発生直後に得られた観測地震動を利用した地震動分布推定法【赤澤・香川(1997)】について紹介する。

4-1. 即時入手強震動情報による事前シミュレーションの修正

膨大な時間を要する強震動シミュレーション手法による詳細な地震動分布計算を、地震発生直後

におこなうことは意義が小さい。しかし、これを地震発生以前に実施しておくことは、シナリオ地震としての利用も可能であることから、意義のあるものである。とはいえ、強震動シミュレーション手法は多くのパラメーターを必要とし、震源断層モデルや断層面上の破壊開始点（震源）位置によって結果が左右される。

ここでは、地震発生前に実施した詳細な地震動分布を、実際に観測された強震情報（例えば計測震度）を用いて補正する方法【赤澤・香川(1997)】を紹介する。別の観点から見れば、観測情報のまばらな部分を、強震動シミュレーション法に含まれる震源特性・地盤応答特性を反映して補間する

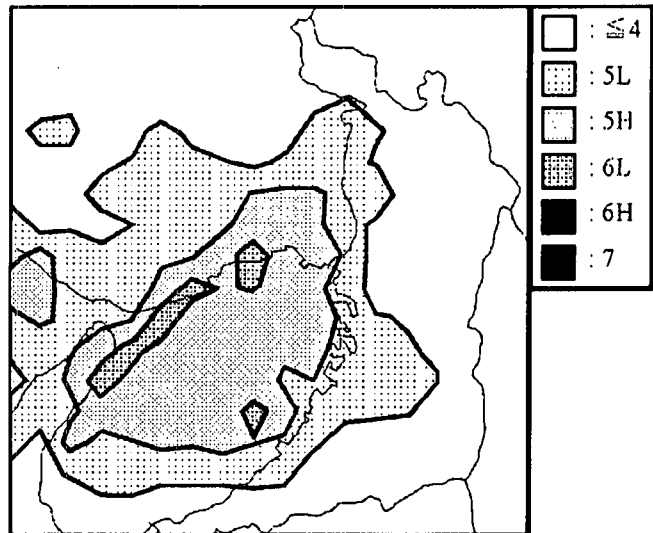
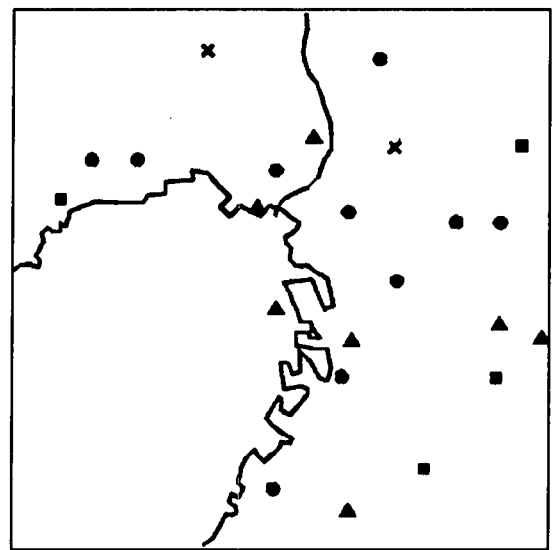


図-5 六甲-淡路断層系中央からの一様破壊を想定した震度分布（事前想定）



- : CEORCA
- ▲ : The Kansai Electric Power Co., Inc.
- : Osaka Gas Co., Ltd
- × : Railway Technical Research Institute

図-6 平成7年兵庫県南部地震の観測点分布

ものとも考えることもできる。具体的な方法について以下に示す。

- (1) 地震発生前の時間を有効に利用して、危険断層毎に想定シナリオ地震による地震動分布を計算しておく。
- (2) 地震発生後、即時に観測情報を入手する。可能であれば震源情報も入手する。
- (3) 事前に計算しておいた地震動分布のデータベースを順次呼び出し、観測情報と観測点近傍の予測との計算領域全体でのトレンドの差が最も小さいものを実際に起こった地震のケースとして抽出する。このとき、震源情報が得られていればその情報を積極的に用いて抽出の精度と速度の向上を図る。
- (4) 入手した観測値と、(3)で抽出された事前想定における想定値との差(補正值)から、計算領域全体における補正值の分布を数学的にモデル化する(例えばSpline関数)。
- (5) (4)で得られた補正值分布を(3)の事前想定地震動分布に施すことにより、(3)で想定していた震源破壊過程と現実との相違を補正した地震動分布を得ることができる。

この方法の特徴は、平成7年兵庫県南部地震でいわゆる「震災の帯」を生じた様な、空間的に短波長成分の地震動分布は事前の強震動シミュレーションで再現されたものを用い、震源破壊過程が事前想定とは異なることによる長波長の空間変動の補正を観測値によっておこなうことにある。このため、仮に大震動域での観測値が即時的に得られなくても、そこが事前のシミュレーションで周辺に比べて大きな地震動を示す場所であれば、たとえ周囲の観測値が小さくとも現実的に大きな推定値を得ることが可能である。

4-2. 兵庫県南部地震への適用例

提案手法による地震動分布の再現性を確認するために、平成7年兵庫県南部地震を対象に簡単な数値実験を試みる。

事前地震動分布の計算にあたり、理論的な震源特性を持つ人工小地震波に観測点までの伝播経路特性を数値計算で与え、Irikura(1986)に従って重ね合わせて大地震波とする方法を用いる[香川(1996)]。このとき、宮腰・他(1997)による大阪地盤モデルを導入し、計算地点毎に設定した1次元線形地盤応答を考慮しておく。ここでは3次元地盤応答、

地盤の非線形応答の効果は考慮されておらず、簡易的な地震動予測をおこなっている。

まず、六甲淡路断層系を想定断層とし、長さ45km、幅21km、傾斜82.5度の断層面に $M_0=5.0 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m}$ ($M_w=7.0$)の右横ずれを設定する。断層中央の深部から一様な断層破壊が伝播した場合の計測震度分布を図-5に示す。これが「事前想定」となる。

次に、関西地震観測研究協議会(関震協:CEORKA)、関西電力(株)、大阪ガス(株)、(財)鉄道総合技術研究所[中村・他(1996)]が公開した平成7年兵庫県南部地震の強震観測記録(図-6)による計測震度を用いて事前予測を補正する。これらの記録は実際には地震発生から時間をおいて公開されているが、ここでは即時的に入手できたと仮定する。

これらの値と、「事前想定」(図-5)による各観測点での事前想定値の差を、2次元3次Bスプライン関数でモデル化した後、それを補正值として「事前想定」に施した結果を図-6に示す。事前想定が堆積盆地端部の不整形地盤の効果や湾岸域を中心とする非線形応答を表現していないために「震災の帯」が十分には再現されていないものの、神戸から西宮・宝塚にかけての断層延長方向の大震動域が良好に再現されている。

ここで紹介した手法は、

- A) 対象活断層が特定でき、
- B) 強震観測情報が即時的に入手でき、
- C) 地盤モデルが整備されている

地域においては有効と考えられるが、その他の地域についてはA)~C)の条件をクリアする必要がある。A)に



図-7 観測情報によって図-5を補正した平成7年兵庫県南部地震の震度分布

については、今後の断層調査で全国的に対象が特定されてゆくことが期待される。また、未知の断層による直下地震については、平面波鉛直入射の場合を事前計算ケースに加えるなど、事前シミュレーションの工夫により、ある程度の精度での対応が可能であると考え。B)については、強震観測点の充実によってほぼ全国的に実用可能なレベルに達していると考え。C)については、今後の地道な調査の蓄積が望まれる。

5. おわりに

リアルタイム地震防災に利用される地震動分布の推定手法について概説し、それぞれの手法の長短について示した。特に、震源域では断層破壊の進行による影響が大きいと、そのような地震動を表現し得る計算法の解説に力点を置いた。また、断層震源や深部地盤構造の影響を考慮した強震動シミュレーションで予め計算した詳細な地震動分布を、大地震発生後速やかに入手された強震観測データ（計測震度）を用いて修正する強震動分布推定法を紹介した。

いずれの手法もそれぞれに長所・短所を持つため、リアルタイム地震防災への適用にあたってはその目的に応じた合理的な手法を選択すべきである。また、詳細な地震動分布を速やかに入手するためには、地震観測点の充実、地盤調査、活断層調査と、被害地震発生前の時間を有効に利用して知識の蓄積をはかっておくことが需要である。

謝辞：本研究は(財)地域地盤環境研究所の赤澤隆士氏との共同研究を再構築したものである。検討にあたっては、JR警報地震計(FD シリアル番号 R-006)、関西地震観測研究協議会、同協議会を通して提供されている関西電力(株)、大阪ガス(株)の強震観測記録を使用した。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 赤澤隆士，香川敬生：強震動予測に観測情報を導入した即時地震動分布推定，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，文部省科学研究費補助金重点領域研究「都市直下地震」総括班，329-332，1997。
- 福島美光：地震動強さの距離減衰式（経験式）に関する最近の研究動向，地震2，46，315-32，1993。

- 稲葉健太郎，石原靖，斎藤正徳，菊地正幸，阿部進，高島一徳，内田淳：高密度強震計ネットワークの構築（その3），日本地震学会講演予稿集，1997年度秋季大会，P50，1997。
- Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 151-156, 1986.
- 香川敬生：断層破壊過程を考慮した模擬地震波の作成，強震動予測に関する総合的研究，平成7年度科学研究費補助金（総合研究A）研究成果報告書，53-62，1996。
- Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka : A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 357-367, 1998.
- 翠川三郎，松岡昌志：国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価，物理探査，48，519-529，1995。
- 宮腰研，香川敬生，越後智雄，澤田純男，南荘淳：大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化（その2），第24回地震工学研究発表会，33-36，1997。
- 中村豊，上半文昭，井上英司：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)，JR地震情報 No.23d，財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部，1996。
- 大阪府：大阪府地震被害想定調査報告書，1997。
- 清水善久，小金丸健一，中山渉：新S Iセンサーを用いた超高密度リアルタイム地震動モニタリングシステム，土木学会平成10年度全国大会講演概要集，B-II，427，1998。
- 横田崇，加藤孝志，藪内生死，田中昌之：面的な震度分布の推計について，強震動予測による地震災害の軽減をめざして，日本地震学会シンポジウム，123-124，1997。