

# 断層震源と実観測震度を用いた即時地震動分布の推定

香川 敬生

理修 (財)大阪土質試験所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)

断層震源や深部地盤構造の影響を考慮して予め計算した詳細な地震動分布を、大地震直後に入手された強震観測データ(計測震度)を用いて速やかに補正する方法を提案した。この手法は、シナリオ地震では現実の震源破壊過程を事前に想定することが出来ない不備を補ったものであり、強震観測データ入手後極めて迅速に地震動分布を出力することができるため、リアルタイム地震防災システムへの応用が期待される。

*Key Words : Real-time estimation, Seismic intensity, Fault rupture model*

## 1. はじめに

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外部から十分に把握できず、これが初動体制の遅れとなった。これは、地震動強度を即時的にモニターする観測点が各府県に1~数点しか無かったこと、また最も地震動の大きかった神戸の観測情報の入手に時間を要したことが大きい。この事実を反省し、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が、大地震時の強震動域の情報が欠落した場合の補間方法も検討しておく必要がある。

また、震源位置や地震規模の情報から地震動あるいは地震被害の分布を即時的に予測するシステムが数多く開発され、活断層による地震を想定したシナリオ地震に基づいて詳細な地震被害想定もおこなわれつつある。このようなシステムを概観すると、想定される地震被害の概要を事前に予測しておくシナリオ地震のための地震動分布について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を意識して即時的に地震動分布を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ことが多い。しかしながら、事前想定した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次災害の軽減に役立つ可能性は低い。また、震災発生後の初動体制で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過ぎる手法ではその要求を満たせない。

このような状況下において、本論ではシナリオ地震の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地震動分布即時推定システムを提案する。

## 2. 即時地震動分布把握の各種手法

まず現在地震動分布の把握法として利用されている、あるいは開発されている方法について概観し、それらの手法を地震動分布の即時推定に利用する際の問題点について検討する。

### 2-1. 観測情報をそのまま用いるもの

地震動分布を最も簡便に把握する方法は、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、このような試みが現実におこなわれている。横浜市では市内に多数の強震観測網を構築し[例えば稲葉・他(1997)]、東京ガス(株)では非常に高密度の地震計(SIセンサー)の配置を計画している[清水・他(1998)]。

しかしながら、たとえ500mメッシュ程度の空間精度であっても、それだけの数の観測点を広い範囲に設けることは実際には困難である。また、システムの信頼性を向上するためには、通信システムの堅牢性に加え、最悪の場合として強震動域におけるデータが欠損した場合への対処法を構築しておく必要がある。

### 2-2. 観測情報を補間するもの

そこで、観測点で得られた情報を補間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、震源断層の影響を反映して震動の大きい領域のデータが即時的に入手できなかった場合、周辺のデータと表層地盤の影響だけでは大震動を把握出来ない可能性がある点である。このようなシステムは、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念頭に、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)]。

### 2-3. 震源位置、マグニチュードから推定するもの

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る。これを利用して対象地点の地震動分布を把握することが古くからおこなわれている。この場合、地震動を距離の関数と考えて良い程度の硬質な地盤上で距離減衰から地震動の大きさを評価し、それに表層地盤の影響を考慮して地震動分布が推定される。

427 しかしながら震源を点と考えた距離減衰式では、断層震源を点で近似できるほど広範囲の、おおまかな地震動分布では大きな問題は生じないが、実際に地震被害が生じる震源近傍の大地震動の把握には向かない。平成7年兵庫県南部地震でも大きな被害が震源直上に生じたわけではない。これを補うため、断層からの距離で規定した

距離減衰式と活断層の分布を意識したシステムも提案されている。この場合、震源近傍における平均的な地震動は再現されるが、震源断層上を破壊が伝播することによって生じる、震源断層近傍の詳細な地震動を表現することはできない。したがって震災直後の地震動分布の詳細な把握には問題が残ろう。

### 2-4. 断層震源を想定した強震動シミュレーション

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によって局所的な大きな地震動分布（いわゆる「震災の帯」）が生じた。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 [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。加えて詳細な推定ほど膨大な計算時間を要し、即時的な地震動分布の把握には向かない。

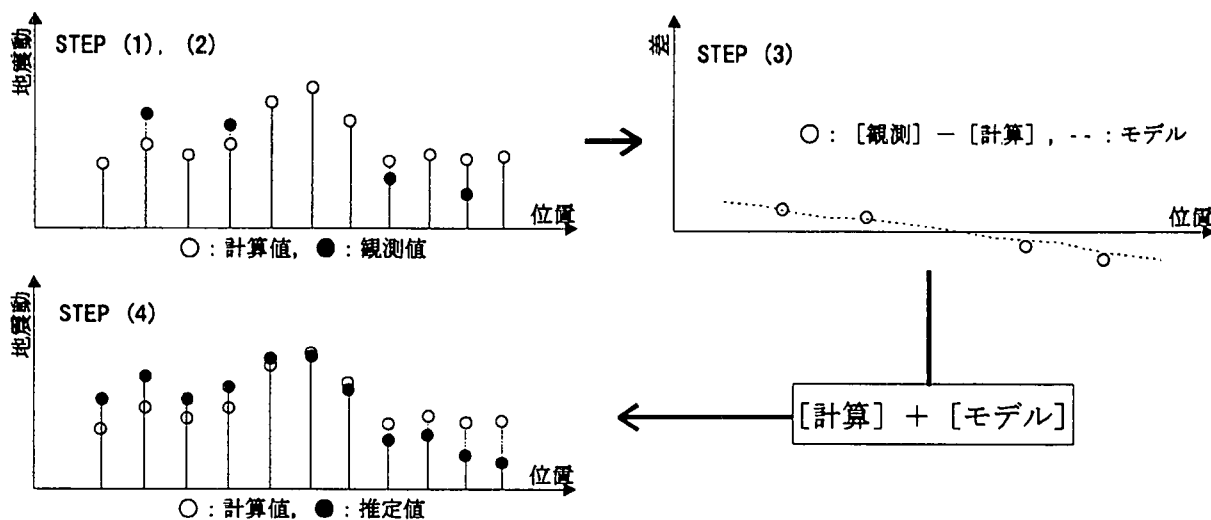


図-1 提案手法のイメージ

### 3. 事前シミュレーションと即時入手強震動情報の融合

以上の状況を踏まえ、ひとつの可能性として現実的な地震動分布の推定システムを提案する。ここで提案する手法は、断層震源を考慮した強震動シミュレーション手法による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)を用いて補正するものである[赤澤・香川(1997)]。別の観点から見れば、観測情報のまばらな部分を、単なる補間ではなく強震動シミュレーション法によって補うものと言うこともできる。具体的な方法について以下に示す。

まず、地震発生前の時間を有効に利用して継続的な準備を進めておく。ひとつは強震動の詳細なシミュレーションであり、以下の項目が望まれる。

- 対象地域で想定される震源断層による地震動分布を可能な限り精度の高い手法で計算し、その結果をデータベース化する。
- 破壊開始点、非一様断層破壊(アスペリティ)などの震源パラメータを変化させたケースを時間的な余裕のある時に計算してデータベースに追加するとともに、最新の調査を踏まえて計算をやり直してデータベースの更新に努める。

次に地震動情報を把握するため、以下の準備を進める。

- 対象地域から強震動情報を即時的に入手する観測点を、空間的に一様に設置する。あるいは、他機関から強震動情報が即時的に得られる様にしておく。
- 可能であれば、震源位置、マグニチュードが即時的に得られる様にしておく。
- 情報入手源となる観測点および情報入手のための通信手段の堅牢性、確実度の向上に努める。

このような状況下で大地震が発生した場合、以下の流れに沿って地震動分布を推定する。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 入手した観測値と、(2)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)。

- (4) (3)で得られた補正值分布を(2)の事前想定地震動分布に施すことにより、(2)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を用い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。このイメージを図-1に示す。図では線上の地震動分布を示しているが、実際には面的な分布を想定している。

ここで、ステップ(3)における差(補正值)のモデル化にあたっては、長波長の大局的な空間変動を取り出すために、与えた点を必ずしも通らない平均的な関数形によるモデル化手法を用いることが望ましい。また、(2)では震源情報を用いなくとも震源域を推定できる可能性がある。そのためには、地域で想定される震源断層を網羅したデータベースを構築しておく必要がある。

### 4. 検討例および考察

提案手法による地震動分布の再現性を確認するために、簡単な数値実験を試みる。

地震動の計算にあたり、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

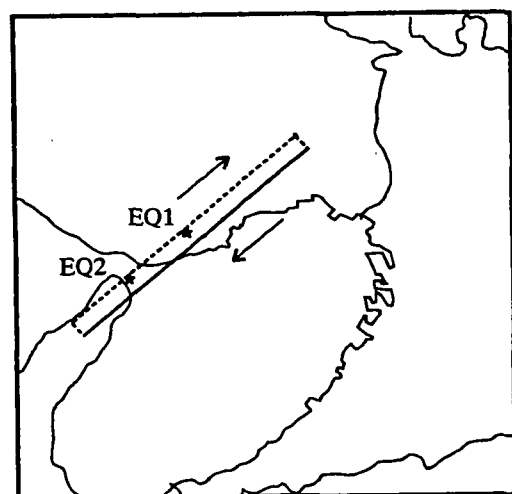


図-2 想定断層(六甲-淡路断層系)

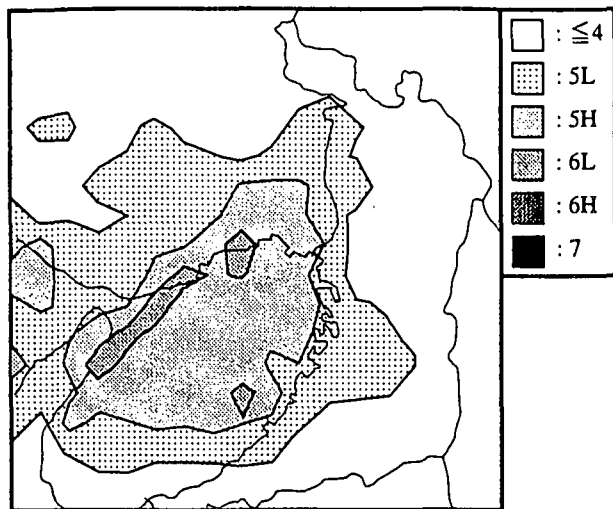


図-3 断層中央から一様破壊した場合の震度分布 (事前想定)

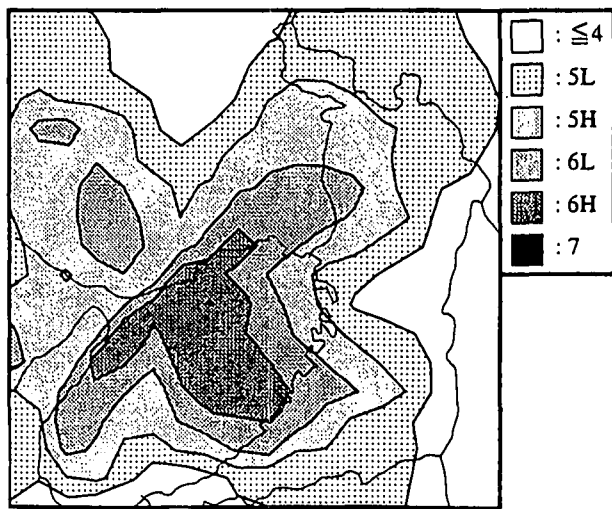


図-4 断層南寄りから破壊し中央部に大破壊域(アスペリティ)がある場合の震度分布 (実際に発生した地震)

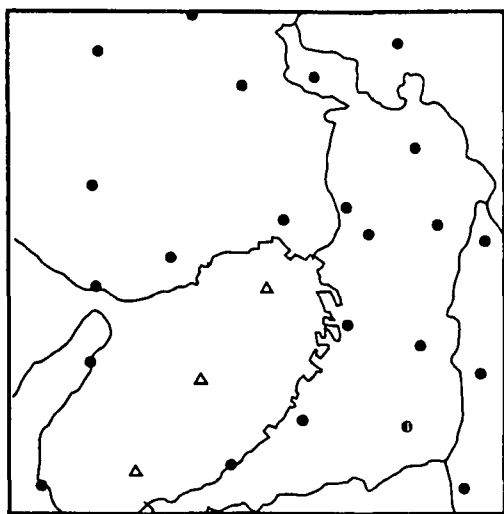


図-5 仮想観測点の分布

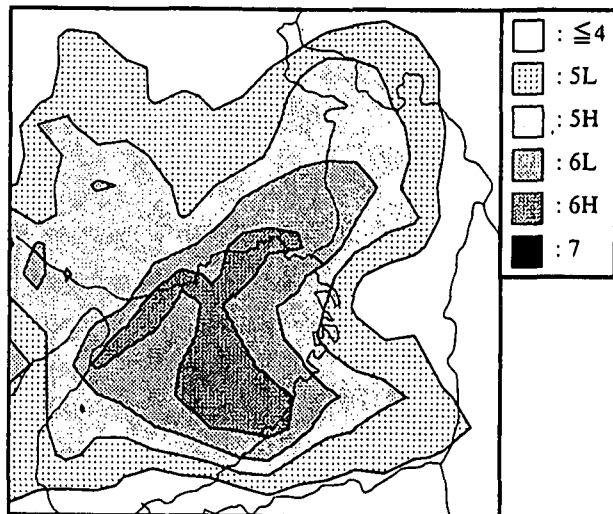


図-6 提案手法によって図-3を補正した震度分布

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に留まっている。

まず、断層破壊過程の異なる2ケースの地震動分布を、数値計算で求める。想定断層は六甲淡路断層系とし、長さ45km、幅21km、傾斜82.5度の断層面に $M_0=5.0 \times 10^{26}$  dyne·cm ( $M_w=7.0$ )の右横ずれ破壊が生じた場合を想定する(図-2)。図-3に断層中央の深部(図-2のEQ1)を破壊開始点として断層が一様破壊した場合の計測震度分布を示す。これが「事前想定」である。また図-4には、やや南寄りの明石海峡部(図-2 EQ2)を破壊開始点とし、断層中央部にアスペリティを

持つ非一様破壊の場合の計測震度分布を示す。これを「実際に発生した地震」とする。震源破壊過程の違いにより、両者の分布には大きな差が見られる。

次に、図-5に示す仮想観測点で強震観測情報(計測震度)が即時的に入手できたと仮定する。これらの地点は、科学技術庁防災科学技術研究所の地震観測システムK-net [木下・他(1997)]の観測点(図-5の黒丸印)と、それとほぼ同じ密度で大阪湾内に配置した仮想地点(三角印)で構成されている。これらの地点には、「実際に発生した地震」(図-4)の場合の計測震度値が観測値として与えられる。

これらの値と、「事前想定」(図-3)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図-3の「事前想定」に施した結果を図-6

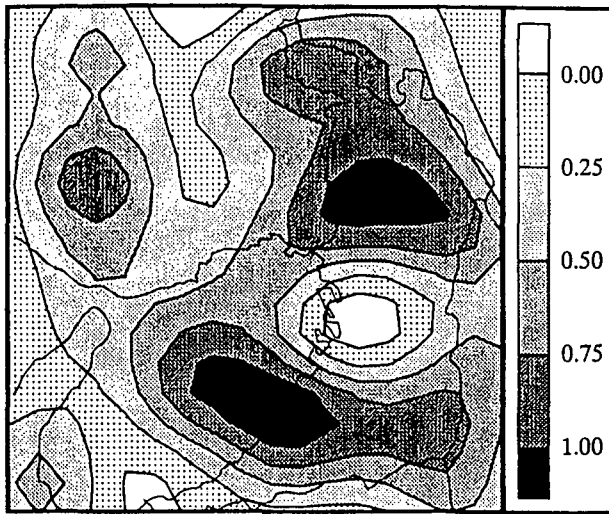


図-7 図-6の作成に用いられた補正值モデル

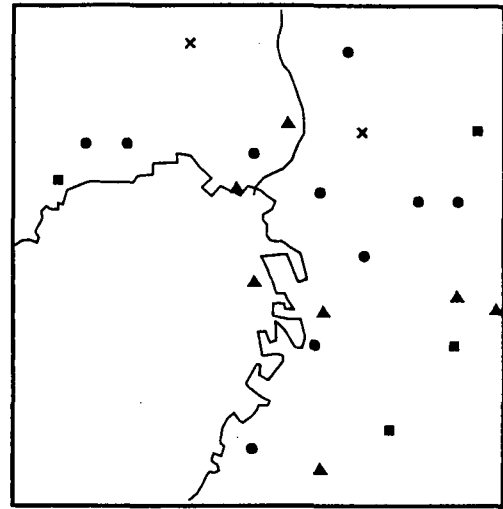
に示す。特に地震計が希薄な地域では図-4の計測震度分布とは異なった分布を示すものの、「実際に発生した地震」の全体的な傾向は非常に良好に再現されている。

図-7は、上の計算で利用された補正值モデルの分布を示している。スプライン関数の効果により、補正值の広がり、滑らかに表現されている。断層線の延長上に当たる大阪府北部一帯と断層直行方向、特に大阪湾中央部付近から大阪府南東部にかけての広い領域に、比較的大きな値の広がりが見られる。前者は断層破壊の進行に伴うディレクティビティ、後者は断層中央下部のアスペリティにより増幅された影響が現れたものである。本手法では、このような実際の観測値と事前想定値の差異が、補正值として反映される。

次に図-3の「事前想定」と平成7年兵庫県南部地震の観測情報から、兵庫県南部地震時の地震動分布の再現を試みる。観測値として、図-8に示す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)〕が公開した強震観測記録による計測震度を用いる。これらの計測震度情報が地震発生後に即時入手されたと仮定して震度分布の再現を試みた結果を図-9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「震災の帯」が精確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方向の大震動域が良好に再現されている。

ここで提案したシステムの長所は、既に3章の解説で示した。しかしながら、本提案手法はどのような条件でも適用が可能なものではなく、以下の短所を併せ持っている。

- 強震動シミュレーションが可能な程に震源



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

図-8 平成7年兵庫県南部地震の観測点分布

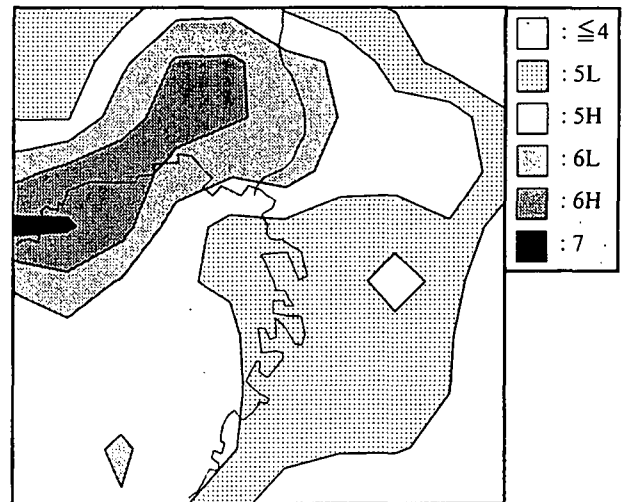


図-9 提案手法によって図-3を補正した平成7年兵庫県南部地震の震度分布

モデル、地盤モデルが得られている地域でなければ利用できない。

- 事前に実施する強震動シミュレーションに多大な労力と時間がかかる。
- 未知の断層震源による直下地震に対応できない。

これらの点については、今後の調査の充実に期待される。未知の断層による直下地震についても、事前のシミュレーションの工夫（平面波鉛直入射の場合を事前計算ケースに加える）や想定ケースを増やすことにより、ある程度の精度での対応が可能であると考えられる。

## 5. おわりに

現実的な地震防災に利用することができる地震動の即時予測方法として、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）を用いて補正する方法を提案した。この手法は、地震被害想定基礎としても用いることが出来るシナリオ地震による想定地震動分布を有効に活用したものであり、シナリオ地震では現実の震源破壊過程を事前に想定することが出来ない不備を補ったものとなっている。また強震観測データ入手後は極めて迅速に地震動分布を出力することができ、リアルタイム地震防災への応用も可能である。

提案した手法では、強震動シミュレーションに必要な震源断層、地盤構造のモデルを詳細に調査しているほど、また強震動情報を得るための観測点をより多く配置しているほど、実用的な精度で地震動分布を得ることができる。その反面、強震動シミュレーションのためのモデルを構築するための情報が乏しい地域ではその実用化が困難である。

ただし、これらの情報は詳細な強震動予測を実施するための基礎データであるため、今後の地震防災検討において積極的に調査がおこなわれることに期待する。観測点に関しては、近年各機関が多数設置している強震計や震度計を有効に利用することができるものと期待される。

**謝辞**：本研究は(財)大阪土質試験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.
- 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.