
総 合 報 告

強震動予測の現状と将来の展望

(財)大阪土質試験所* 香 川 敬 生

京都大学防災研究所** 入 倉 孝次郎

鹿島建設(株)小堀研究室*** 武 村 雅 之

Estimation of Strong Ground Motion —Present Status and Future—

Takao KAGAWA

Geo-Research Institute, Osaka Soil Test Laboratory, 4-3-2, Itachibori, Nishi-ku,
Osaka 550-0012, Japan

Kojiro IRIKURA

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji 611-0021, Japan

Masayuki TAKEMURA

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, K1 Building, 6-5-30, Akasaka,
Minato-ku, Tokyo 107-0052, Japan

(Received July 6, 1998; Accepted November 10, 1998)

This paper introduces the present feasibility of strong ground motion prediction technique on the basis of fault rupture propagation. Investigating the several applications of the technique, we point out its advantage and disadvantage against empirical techniques that have been used for engineering purposes.

We consider that the simulation technique itself is applicable enough for real engineering problems. In the case of having a detail source model and sedimentary structure model at a site, we can reproduce even strong ground motion waveform which can be comparable with observed one. However, we do not have enough information of source model for a future earthquake and sedimentary structure model for a target site. Predicting the ground motion caused by future earthquake, the shortage or uncertainty of the simulation models causes small confidence on the result of strong ground motion prediction.

Strong ground motion generated by real earthquake depends strongly on the fault rupture process and site condition. The existing empirical techniques produce mean characteristics of the past ground motion. It is not a source-specific nor site-specific ground motion. We have to estimate strong ground motion using the technique which can explain the aspects of actual site-specific ground motion. To achieve an advantage of the technique against empirical based techniques, it is important to investigate processes of fault rupture and sedimentary structures to reduce the uncertainty of predictions.

We hope that this paper will motivate further study for seismic disaster mitigation through the strong ground motion prediction.

Key words: Strong ground motion, Estimation of ground motion, Feasibility study, Further problems, The 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake.

* 〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2

*** 〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30 KI ビル

** 〒611-0021 宇治市五ヶ庄

§1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震では、我が国の近代都市が初めて大規模な地震被害を受けた。この地震では神戸市域をはじめとする被災域で既往最大級の地震動が観測されたが、「震災の帯」と呼ばれる被害集中地域内では観測記録が得られていない。よって、そこでの地震動の大きさおよび特徴は推測の域を出ない。

兵庫県南部地震以後、設計用の地震動を想定する、あるいは地震防災計画のシナリオを策定するにあたって、内陸活断層に起因する強震動を取り入れる例が増えている。そのような例では、過去に観測された地震動の経験的特徴を用いた予測から、地域の震源断層や地盤構造の特徴を取り入れた最新の強震動計算法を用いたもので、種々の手法が用いられている。それらのうち、地震動の経験的特徴を用いたものでは、安定に平均的な地震動の大きさを評価することができる反面、兵庫県南部地震で「震災の帯」を生じたような地震動の特徴を反映することが困難である。一方、局所的な特徴を反映した強震動予測には未知数が多く、強震動を支配するパラメータの設定如何によって予測地震動は大きくばらついたものになってしまう。このため耐震設計や地震防災など実務的な強震動予測では、特徴の異なる種々の手法を使い分けているのが現状である。

本論では、「地震」の特集号「強震動地震学・地震工学の現状と展望」[日本地震学会(1994)]やTAKEMURA *et al.* (1995) に詳しく述べられている近年の強震動地震学の成果を踏まえ、今日の技術水準で実施し得る現実的な強震動予測の現状とその利用例を示すとともに、その限界、問題点について論じる。また、強震動予測においてパラメータを設定する際に不可欠の情報となる、震源断層、地盤構造のデータの蓄積、整理状況についても言及する。

以上の検討を通じて、強震動予測を将来においてより有効な地震防災のための手段とするための課題について考察を試みる。

§2. 平成7年兵庫県南部地震の強震動

震源近傍における地震動が大きな被害をもたらした事

例としては、平成7年兵庫県南部地震が記憶に新しい。震源断層近傍の地震動では、広がりのある断層面上の破壊伝播による地震動の指向性が支配的であり、地震動距離減衰式など経験的な地震動予測では予想されない現象が生じる場合がある。そのような地震動の一例として、平成7年兵庫県南部地震における、いわゆる「震災の帯」の成因について地震学的知見から考察しておくことは重要である。また、強震動予測にあたっては、その要因を表現し得る手法の利用が望ましい。

被害の大きかった神戸市域から見た場合、兵庫県南部地震を生じた震源断層は距離に比べてはるかに大きな広がりを持っているため、もはや点震源ではなく面としてとらえるべきものである(Table 1のA)。この断層の右横ずれ運動に伴うS波の放射特性によって、断層の延長線に沿って断層直交方向の地震動が大きくなった(Table 1のB)。これに加えて明石海峡下深部の破壊開始点(震源)から神戸市域へと断層破壊が進行したことが大きく影響し、神戸市域から兵庫-大阪府県境部にかけて継続時間が短く、大振幅の長周期パルス波[久田・山本(1995)、嶺嶺(1996)、大野・他(1998)]が生じた(Table 1のC)。更に、断層面上のすべりが一様ではなかった[例えば、SEKIGUCHI *et al.* (1996)、釜江・入倉(1997)]。特に大きな地震波を生じたと考えられている部分(以下、アスペリティと称する)の大きさが、平成7年兵庫県南部地震の観測記録に見られる周期1~2秒の大振幅を生じたとされる(Table 1のD)。

このように神戸方向に放射された大きな地震動は、さらに深層地盤構造の影響によって特に狭い領域で増幅された(Table 1のE)。これは、岩盤山系と堆積層の速度差によって岩盤部から湾岸部へ堆積層を斜めに伝播する回折波が生じ、これが堆積層を下方から到来した波動と岩盤山系からやや離れた位置で増幅的に干渉し、地震動を大きくしたものと考えられており[川瀬・林(1996)、PITARKA *et al.* (1996)、永野・他(1998)]、盆地端部効果(エッジ効果)と呼ばれている。また、軟弱な湾岸部では液化化に至る地盤の非線形応答によって地表付近の地震動はかえって減衰した(Table 1のF)と考えられている[AGUIRRE and IRIKURA (1997)、川瀬・他(1995)]。

Table 1. Suspecting causes that resulted in large disaster in the Kobe City during the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.

	Factors	Effects
A	Finite Fault	Distance from fault affects more than hypocentral distance.
B	Strike Slip Fault	S wave radiation is large along fault plane.
C	Rupture Propagation towards Kobe(Directivity Effect)	Large amplitude and short duration pulsive wave has been generated.
D	Irregular Slip Distribution(Asperity)	It controls predominant period of large pulse.
E	Irregularity of Basalrock Boundary(Edge Effect)	Large ground motion occurred due to the effect of bended wave front.
F	Nonlinear Response of Soil Structure	It has deamplified the ground motion in bay area.

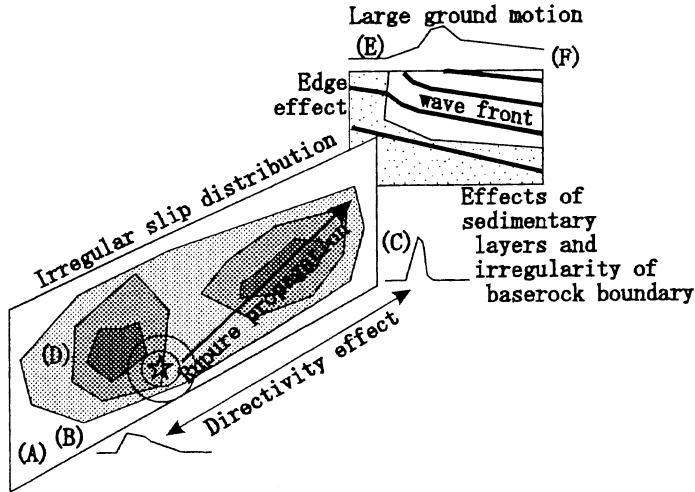


Fig. 1. Sketch of strong ground motion generation during the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. Characters (A)–(E) are related to the factors in Table 1.

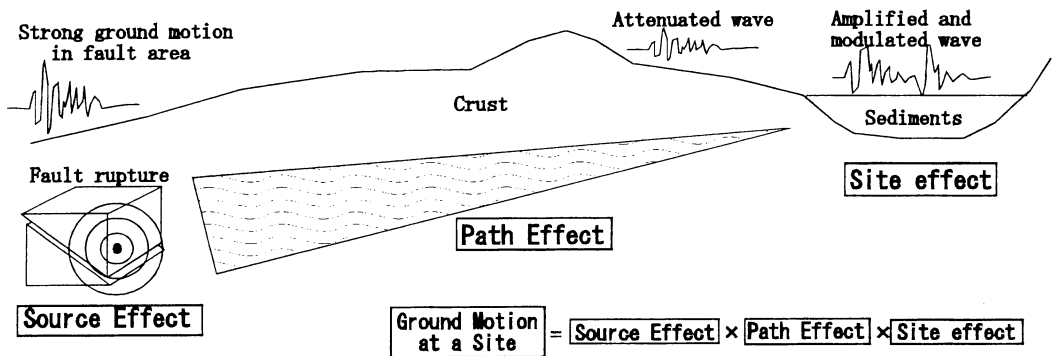


Fig. 2. Three fundamental components, source effect, path effect and site effect that control earthquake ground motion at a site.

これらの諸要因のイメージを Fig. 1 に示す。図中の (A)～(F) の記号は、上に述べた強震動生成要因に対応している。これらが、「震災の帯」と呼ばれる地震被害の集中域を生じた原因であると解釈されている。震源断層からの距離で規定した距離減衰式を用いても地震動分布のある程度の傾向は表現できるとの報告〔額綱 (1997)〕もあるが、震源近傍地震動の検討にあたっては震源近傍地震動の諸現象を合理的に評価し得る手法を用いることが望ましい。平成 7 年兵庫県南部地震の総合的なシミュレーション例については、この後で詳しく議論する。

§ 3. 強震動予測手法の概要

地殻岩盤で生じた破壊に伴って発生した地震波動は、地殻内を地表へと伝播して構造物などに影響を与える。このとき、震源断層においてどのような破壊が起こったか (震源特性)、生じた波動がどのようにに伝播したか (伝

播経路特性)、地盤構造によって地震波動がどのような影響を受けたか (サイト増幅特性) が、強震動に大きく影響する (Fig. 2)。したがって、強震動の予測にあたっては震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性を個別に評価する場合と、これらの総合特性として観測された地震動の統計的な解析から地震動の大きさを経験的に得ようとするものがある。

それらの点を考慮し、強震動を予測する手法について、Table 2 に整理した。ここで、A～F の項目は、Table 1 に示した平成 7 年兵庫県南部地震の強震動の要因である。つまり、これらの要因を多く満たしている手法ほど、震源断層近傍における現実的な強震動を表現し得るものとなる。ただし、E, F の項目は強震動の予測とは独立に検討することも可能な項目である。例えば、E については長周期帯域を対象とした 3 次元差分法によるシミュレーションや、F については工学的基盤波を入

Table 2. Current strong motion estimation methods. The characters A-E correspond to the factors in the Table 1.

	Output	Summary of the Method	A	B	C	D	E	F
Method 1	Peak Amplitude	Using empirical formula based on observed records, peak amplitude is estimated from Magnitude and hypocentral (epicentral) distance.	△					▽
Method 2	(Response) Spectrum	Using empirical formula for each frequency, spectral characteristics are estimated from Magnitude and hypocentral (epicentral) distance.	△					▽
Method 3	(Response) Spectrum	Summing up the contribution of sub-faults on ground motion spectrum that are estimated by empirical relations.	○		○			▽
Method 4	Wave Trace	Summing up the small earthquake records as an empirical Green's functions from sub-faults that are observed at the target site.	○	○	○	○	▽	▽
Method 5	Wave Trace	Summing up the theoretically generated small event records that are given from numerical computations.	○	○	○	○	○	○

△: If using equivalent hypocentral distance

▽: Included in empirical formula and in Empirical Green's function

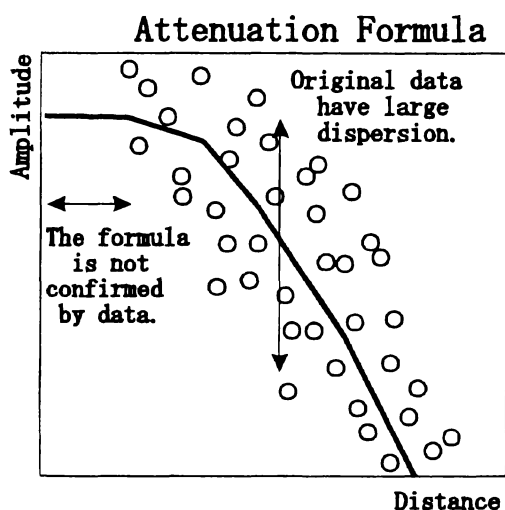


Fig. 3. An image view of peak ground motions vs. distances (open circles) and derived attenuation formula (solidline).

力とした液化解析などが考えられる。したがって、E、Fについては、これらを考慮した手法と組み合わせることが可能か否かを評価対象とした。以下に、Table 2に示した各手法の分類について概説する。

[Method 1] は地震動の最大値を得ることを目的としたものであり、観測記録の最大値を回帰して、マグニチュードと震源（震央）距離から最大値を求める経験式が用いられる。この方法については、基盤における地震動距離減衰をまとめた KANAI (1957) の先駆的な研究をはじめとして、種々の条件における経験式が提案されている。これらについては、福島 (1993) による詳しい紹介がある。また、アメリカにおけるレビューが ABRAHAMSON and SHEDLOCK (1997) によってなされている。しかし現実には観測期間と地震活動度の制約から、マグニチュードと震源距離が十分広範囲に分布しているデータ

を蓄積するまでには多大な労力と時間を要する。したがって、与えられた経験式の基となったデータの範囲と、そのばらつきに配慮すべきである (Fig. 3)。この方法には、震源近傍のデータで十分に拘束されておらず、また大きな地震であっても震源を点と考えているものも多いので、その利用にあたっては十分注意する必要がある。これについては、2段階回帰によってマグニチュードと距離との依存関係を除き、断層からの距離をとって震源近傍のデータを十分に反映させたもの [JOYNER and BOORE (1981), 福島 (1993) など] や、断層面の広がりを考慮した等価震源距離 [OHNO *et al.* (1993)] を用いたものなど、震源断層近傍にも適用が可能なものも提案されている。反面、震源特性をマグニチュードで代表させていること、距離によって最大値を示す波動のタイプが異なる場合やサイト特性が大きく異なる記録も同一に扱われている場合があるなど、地震波動の取り扱い上の問題がある。

[Method 2] は上記 [Method 1] に周期特性を持たせたものであり、(応答) スペクトルを得ることを目的としている。土木、建築の構造物の設計には、観測記録をモデル化したこのようなスペクトル距離減衰式がベースとされている [例えば、日本道路協会 (1990) の実例や長橋 (1994) によるレビュー]。この手法も、基本的には周期毎の地震動強さを (応答値で) 回帰した経験式となっているため、[Method 1] と同様の問題点を内在している。与えられたスペクトル特性を持つ模擬波形を与えることもしばしばおこなわれる [JENNINGS *et al.* (1968) など]。

[Method 3] は [Method 2] に断層の広がりと破壊の進行を考慮したものである。大地震の断層面を小断層に区分し、それらからの寄与を断層破壊に従って重ね合わせる方法が採られる。この重ね合わせの対象として、応答包絡線を回帰した小林・翠川手法 [翠川・小林 (1979), 武村・釜田 (1998)] や非定常スペクトルを回帰したもの

[SUGITO and KAMEDA (1985)] などがある。これらは断層破壊を考慮しているものの、個々の小断層からの寄与は [Method 2] と同様に経験的な距離減衰式であり、それら経験式が断層近傍のデータで十分拘束されていない場合は注意が必要である。また、経験式として補正されているとはいえ、波形では無く片側振幅のみの包絡線を足し合わせることにについては物理的な問題も指摘される [武村・釜田 (1998)]。大野・他 (1998) は、[Method 2] に分類される等価震源距離を用いたスペクトル距離減衰式に断層破壊の伝播に起因する地震動の指向性を反映させる手法を提案しており、これも [Method 3] に分類されるものである。

ここまでの手法はいずれも観測記録に拘束された経験式に基づいており、基となった記録に含まれていない特異な現象は表現できないものの、既往地震による平均的な地震動像を見るには便利である。このため経験に基づく設計など工学的な検討に馴染み易く、広範囲に利用され、地震工学を牽引する大きな原動力となって来た。

大地震と同じ断層面で小地震が発生した場合、想定大地震と小地震では Fig. 2 に示した観測点に至る伝播経路の特性はほぼ同じ、観測点近傍の地盤構造による影響も同じであると仮定することができる。つまり、地震動に及ぼされる影響の違いは断層面上での破壊の大きさだけとなる。この性質を利用すれば、小地震波形を震源における微小領域の破壊による伝播経路特性とサイト増幅特性の応答、つまりグリーン関数とみなし、これを断層破壊過程に従って重ね合わせるにより大地震による強震動を合成することができる。想定断層で生じた小地震観測記録を用いれば、大地震で期待される震源放射特性を考慮することも可能である。この手法が [Method 4] であり、経験的グリーン関数法と呼ばれる。これについても種々の手法が提案されているが、HARTZTELL (1978) を基本とし、IRIKURA (1983) から IRIKURA (1986)、TAKEMURA and IKEURA (1988)、DAN *et al.* (1989) 等で広い周波数帯域への適用が可能となり、地震工学にとって実用的な手法となっている。しかし、これを予測問題として考えると、適当な小地震観測記録が無い場合が多いことが難点である。また、小地震観測記録に含まれるサイト増幅特性は大地震の際には非線形性を示すと考えられるので、これを別途考慮する必要がある。

[Method 5] は、[Method 4] で適当な小地震観測記録の無い場合にこれを何らかの手段で数値的に作成するものである。これは、実用的な地震動波形を全くの数値計算によって合成すると考えることもできる。別の地点の観測記録を震源に戻した経験的震源関数に震源から対象

地点までの地盤モデルによる影響を加味して小地震記録とするもの [SOMERVILLE (1993)] や、 ω^{-2} モデルに基づく震源スペクトルと位相特性を組み合わせる岩盤小地震波形を作成し [BOORE (1983)]、それをグリーン関数として大地震による強震波形を合成するもの [釜江・入倉 (1990)] などがある。BOORE (1983) の原論文では断層面の広がり時刻歴の継続時間に置き換えているのみで、断層破壊の伝播に起因する地震動の指向性は考慮されていない。これに対し武村・他 (1989) は、指向性を地震動の継続時間に反映させる方法を提案している。上記の統計的グリーン関数法の適用にあたっては、観測記録から導かれる経験的増幅特性 [例えば、鶴来・他 (1997)] を加味する場合もある。数値シミュレーションを用いれば地盤増幅特性を考慮する際に非線形地盤応答を考慮することもできるが、伝播経路から地盤増幅特性までの地盤構造に関する情報の質に結果が左右され、これらの情報収集が地震動予測に極めて大きな比重を占めることになる。

また、近年の計算機の進歩によって3次元不整形構造に対しても直接的に Green 関数を計算し、断層破壊過程に従って大地震波形を理論的に合成することも可能になりつつある。現状では主として周期1秒程度以上の長周期地震波成分に限定される場合が多いものの、計算機の進展が更に短周期成分までの評価を可能にしつつある。

上記の5手法分類では、[Method 1] ほど簡便で少ないパラメータで安定して評価でき、[Method 5] は詳細だが膨大なパラメータを必要とする。少ないパラメータによる表現では必然的に経験式を用いたモデルの単純化に起因する誤差を含み、パラメータが多くなるほどパラメータの設定そのものによるばらつきが大きくなる。実際の強震動予測の現場では、これらの長所短所を鑑みて、その時代で効果的と考えられた手法が選択され、設計、防災といった具体的問題に適用されてきた経緯がある [例えば、工藤 (1993)]。

§4. 強震動の予測例

次に、強震動予測が実際の設計、地震被害想定などに利用される分野において、どのような手法が用いられているかについて Table 3 にまとめ、その内容について考察する。

一般構造物の設計においては、経験的な震度を設定し、それに見合った静的な力を構造物に作用させる、いわゆる震度法による設計が広くおこなわれている。構造物はこのレベルにおいて損傷を受けることがあってはならない。ここで言う震度とは自重に対する外力の比であ

Table 3. Strong motion estimation methods recently used for earthquake design and earthquake disaster estimation.

Case	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5
Design of General Structure	○	◎			
Design of Important Structure		◎	◎	△	△
Seismic Disaster Estimation	◎		○		△
Real-time Seismic Disaster Mitigation	◎				

◎ : frequently used, ○ : used, △ : rarely used

り、例えば設計震度 0.2 は自重の 0.2 倍の外力に相当するものであり、気象庁震度階とは異なった概念である。

強震動予測法が積極的に活用されるのは、重要構造物や動的設計が必要とされる場合で、構造物はこの地震力をもってしても崩壊に至らないように設計される。この時に対象とされるのは、内陸活断層近傍の地震動あるいは海溝型の巨大地震による地震動である。一般には、Table 2 に示した [Method 1] あるいは [Method 2] を用いて期待される最大加速度あるいは応答値を設定することが多い。その一方で、重要構造物や新しいタイプの構造物で地震時挙動がはっきりしないものについては、予測強震動波形を用いて構造物の動的応答の照査がおこなわれる場合がある。例として、日本建築学会 (1992)、日本道路協会 (1996) の構造物設計や表 (1990) による原子炉施設の設計に関するレビューなどがある。

大地震動を生じるケースでは断層から対象地点までの距離に対して断層の広がりが無視できないため、震源近傍における大地震動の特徴を十分に反映し得る、Table 2 の [Method 3]~[Method 5] が用いられることが望ましいが、現実には [Method 3] あるいは断層の広がりを考慮した距離の定義を用いた [Method 1] や [Method 2] が用いられることが多い。設計に用いられる工学的判断が過去の経験に照らして行われるため、これらは経験則になじみ易い傾向がある。また、[Method 4] は適用条件が限られること、[Method 5] は地下構造に関する情報不足や用いる震源パラメータによるばらつきが大きいこと等が敬遠される理由となっているようである。しかし、平成 7 年兵庫県南部地震以後、特に地下構造の詳細情報の多い地域では [Method 5] を用いた構造物の耐震設計のための地震動予測が行われる例も見られるようになっている [例えば、入倉 (1996)、大阪府土木部 (1997)]。

次に地震被害想定への適用であるが、被害想定そのものが最大加速度、震度などの値だけから推定されることが多いため、[Method 1] が用いられることが多い。このような事例を、鏡味 (1993) はサイスミック・ゾーネーションの観点から整理している。また、最近では、消防

科学総合センター (1997) によるレビューがおこなわれている。ただし、平成 7 年兵庫県南部地震以後は、断層の広がりを考慮した距離の定義が用いられる傾向にある。表層地盤構造の違いの影響は、国土数値情報 [国土地理院 (1992)] や地域のボーリング・データに基づいて、応答倍率を表す係数で設定されることが多い [松岡・翠川 (1993)]。このような経験的手法でも面的に大まかな地震動分布を予測することができている。最近になって、ひとつのシナリオ地震としての前提で、[Method 5] を用いて地震防災に用いられる地震動分布の予測が行われる例が見られるようになっている [例えば、大阪府 (1997)]。

平成 7 年兵庫県南部地震をひとつの契機として、地震発災後すみやかに地震動情報を入手あるいは推定するリアルタイム地震防災が注目されるようになっていく。これらの情報は災害救助支援や復旧に用いられるため、精度の高い情報を提供することが望まれる。この場合、短時間で情報を提供しようとするあまり、Table 2 の [Method 1] を採用したシステムが構築されていることが多い。このような手法による大まかな地震動分布で初動体制を作ることはいささか危険である。かといって、詳細な震源断層情報を待って [Method 4] や [Method 5] を適用する余裕は無い。そこで、地震発生前の時間を利用してあらゆるケースに対応した地震動予測をこれらの詳細手法によっておこない、それらの結果をデータベース化しておき、実際に起こった地震に最も近いケースを適用することによって、合理的な初動体制を目指すことも考えられている [赤澤・香川 (1997)]。このような事前計算結果の利用は、気象庁では既に津波予測で試みられている。

[Method 1] と [Method 5] に代表される両極端の強震動予測手法を一言で述べると、少ないパラメータで地震動を評価できるものの、モデルの単純化 (経験式) による誤差を内在する簡便な “距離減衰式” と、合理的だが膨大なパラメータを必要とし、パラメータの不確定性によるばらつきが大きい “断層モデル” ということになる。 “断層モデル” による予測においてパラメータの自由度

が小さくならない限り、データに基づく安定性と過去の実績による信頼性がある“距離減衰式”が必要である。一方、“距離減衰式”という経験式の基となったデータで予期されない現象を経験式だけで評価することには危険も伴う。例えば観測事例の少ない逆断層タイプの内陸地震などを取り扱う場合、断層破壊過程を精密に表現し得る“断層モデル”による強震動予測手法を併用してゆく必要がある。

§ 5. 平成7年兵庫県南部地震に見る強震動シミュレーションの現状

[Method 4]や[Method 5]を用いて詳細に強震動を予測する場合、震源断層のモデル化、地盤構造によるサイト増幅特性が結果に大きく影響する。また、これらのモ

デルから地震動を計算する手法の精度も大きな問題となる。このように、強震動の詳細な予測にあたっては、「震源断層モデル」、「地盤構造モデル」、「計算手法」の3つのハードルをクリアする必要がある。そこで、モデルに関する情報が比較的豊富に得られている平成7年兵庫県南部地震を例として、[Method 4]や[Method 5]の現状について考察する。

平成7年兵庫県南部地震では、震源近傍の強震観測記録等を用いて、波形インバージョンによる断層破壊過程の解析がおこなわれている [例えば、IDE *et al.* (1996), SEKIGUCHI *et al.* (1996), WALD (1996), YOSHIDA *et al.* (1996)]. また、KAKEHI *et al.* (1996) は加速度波形のエンベロープを最適化するインバージョン手法により、高周波数成分を放射した震源過程を求めている。

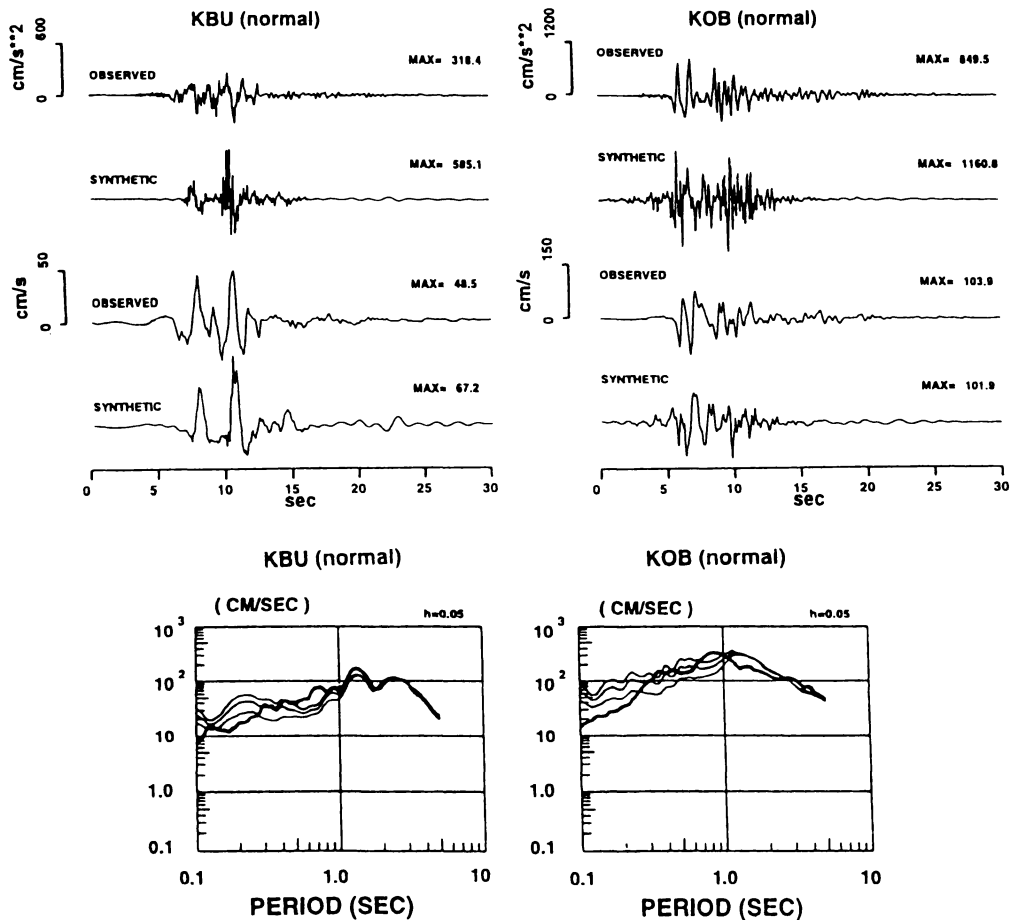


Fig. 4. Examples of hybrid simulation for the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake (after KAMAE *et al.* (1998)). The results are shown with the observed strong motion records for the fault normal component. KBU and KOB indicate CEORKA's Kobe University and JMA Kobe sites, respectively. In the pseudo-velocity response spectra, bold lines indicate the spectra for observed records, and thin lines show averages and standard deviations of the spectra for stochastic simulations.

神戸市域の地盤構造に関してはこれまでもいろいろな調査が行われており、文献として公表されているものも多い。香川・他(1993)は、これらの諸調査結果に基づいて、数値計算に利用し易い、関数による深層地盤モデルを提案している。また井上・他(1998)は、重力異常のデータを利用して、より詳細な基盤深度分布を示している。これらの地盤構造調査は、主に民間企業が主体となって地道に進めてきたものであったが、平成7年兵庫県南部地震以後には国を始めとする多くの研究機関により詳細かつ大量の地盤調査が実施されている。そのうち公表されたものは、岩田・他(1996)、兵庫県立人と自然の博物館(1997)に詳しく示されている。

釜江・入倉(1997)は余震観測記録と SEKIGUCHI *et al.* (1996), KAKEHI *et al.* (1996) に基づく震源モデルを用い、IRIKURA (1986) による経験的グリーン関数の重ね合わせを実施している ([Method 4])。その結果、観測波形との相関性および応答スペクトルの両方を満足するものが得られている。古和田・他(1998)は同様の震源モデルに、観測地点の振幅および位相特性を反映した人工小地震波(統計的グリーン関数)を重ね合わせるシミュレーションを実施している ([Method 5])。シミュレーション結果は良好であり、対象断層に起因する観測記録が得られない場合における統計的グリーン関数法 [釜江・入倉(1990)] の適用例となっている。

また、PITARKA *et al.* (1998), FURUMURA and KOKETSU (1998) は、3次元差分法を用いた地震動シミュレーションを実施している ([Method 5])。これらは3次元地盤モデルの中に震源断層面が導入され、その破壊の進行も忠実に再現されている。これらの計算はやや長周期帯域に限られたものではあるが、地震被害分布と傾向的に一致する地震動分布が得られている。これらの例では地盤の応答を線形として計算しているため、大震動域が「震災の帯」と言われる領域よりも海側に広がっている傾向が見られる。これについては、表層地盤の非線形応答を加味することにより海側の地震動が小さくなるとの結果 [川瀬・林(1996), 永野・他(1998)] が得られており、非線形地盤応答が「震災の帯」を幅の狭い領域とした一因と考えられている。これらの数値シミュレーションは、扱えるモデルの精度および計算上の格子化に限界があることから、実用的には1秒程度よりも長周期に限られている。KAMAE *et al.* (1998) では長周期を3次元差分法、短周期を統計的グリーン関数で組み合わせたハイブリッド法を用いて、震源近傍の波形を実用的なレベルで良好に再現している (Fig. 4)。

このように、パラメータさえ与えることができれば、兵庫県南部地震の強震観測記録を実用的なレベルでシ

ミュレーションすることは可能である。このことは、強震動シミュレーションの手法と現在の計算環境が、上に示した「計算手法」のハードルを着実に超えつつあることを示している。しかしながら、強震動の予測は、過去に起こった地震ではなく、将来において起こり得る地震に対してなされなければ意味がない。このためには、将来発生する地震の「震源断層モデル」、および予測対象となる地域の「地盤構造モデル」の設定が重要となる。

§ 6. 震源および地下構造データの現状

強震動予測をおこなう際に必要となり、かつ予測結果に大きく影響を及ぼすことになる、「震源断層モデル」、「地盤構造モデル」を設定するための基礎データの現状について検討をおこなう。いかに優れた計算手法であっても、用いるモデルの精度が低ければ確かな計算結果を得ることができない。このように、計算モデルの作成とそのためのデータ収集の努力は、計算手法の研究開発とともに強震動地震学を支えるひとつの柱と言える。

6.1 震源データ

平成7年兵庫県南部地震では、広い周期帯域で強震動観測記録波形との一致を議論できるほどのシミュレーションがおこなわれている [釜江・入倉(1997), KAMAE *et al.* (1998)] が、これはインバージョンによる断層破壊過程の評価 [SEKIGUCHI *et al.* (1996), KAKEHI *et al.* (1996) など] に大きく依存している。このように、「震源断層モデル」が既知の場合には、高精度のシミュレーションが実施されるようになっている一方で、将来の地震に対する「震源断層モデル」の不確かさが予測地震動のばらつきを大きくしている。

「新編日本の活断層」[活断層研究会(1991)] に代表される活断層の情報は、強震動予測において対象とする震源断層を特定し、またその規模を見積もる上で有力な情報を提供している。これは、長期的な地震予知研究の成果のひとつと考えることもできる。その結果、内陸の極く浅い地震に対しても強震動予測において対象とする震源断層モデルやその大きさを絞り込むことができるようになった。また、断層のグルーピングやセグメンテーションの研究 [THATCHER and BONILLA (1989)] から、断層長さに対する予測精度は向上し、また確率論的な地震規模予測もおこなわれつつある [WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES (1995)]。しかし、このような活断層情報から確実に導かれるのは、その位置と長さおよび平均すべり量であり、断層面の傾斜やすべりの方向すら確実に設定できる場合は少ない。ましてや、強震動予測に必要な動的な断層破壊パラメータ (Table 4 に必要なパラメータの一覧を示す) が得られ

Table 4. Static and dynamic parameters required for a strong ground motion simulation.

Static Parameters	Dynamic Parameters
Fault Length	Rupture Starting Point
Fault Width	Rupture Velocity
Strike	Rise Time
Dip	Slip Function
Rake	Asperity Size
Depth of Fault Top	Distribution of Asperity
Seismic Moment	
Stress Drop	

る場合はほとんど無い。この点、佐藤(1989)によってまとめられた既往地震の断層パラメーター一覧は貴重である。さらに、地表地震断層の長さが震源断層の大きさを直接反映したものでは無いこともある。平成7年兵庫県南部地震の大きな断層面に対して、いわゆる地表地震断層として地表に現れたのが淡路島における野島断層の一部であったことは記憶に新しい。これは地表の堆積層の変動だけから地震の再来間隔を議論することの不確かさにも繋がる。このように、活断層と震源断層の長さの関係についてさえ、現状では明瞭な成果が得られてはいない。また、厚い堆積層に埋もれた未知の断層の活動や、これまでに活動していても基盤岩面にさえ顔を出していない断層による地震の可能性も否定できない。したがって、強震動予測をおこなう場合には、このような活断層の情報を参照しつつ、独自の経験式と判断を用いて「震源断層モデル」を設定してゆく必要がある。

想定する断層が決まれば、まず地震の規模を評価する必要がある。この場合、想定断層の長さ、断層の面積からマグニチュードを評価する経験式が用いられることが多い。しかしながら、これらの相似則では地表に現れた活断層の長さ、余震域の大きさ(円形とした半径、長方形の長辺)など、地震断層の大きさを表す指標がまちまちであり、同一マグニチュードでも一桁異なる断層の大きさが得られることもままある。また、式の基となったデータも必ずしも最新の知見を反映してはいない。武村(1998)は、最新のデータに基づいて日本におけるこれらの経験式の見直しを試みている。

一方、近年では震源断層モデルが波形インバージョンから与えられるようになってきており、これらの結果を整理した関係式を利用することが望ましい[例えば、SOMERVILLE・他(1993), SOMERVILLE *et al.* (1998)]。

既往の経験式を用いる場合には、個々の式の意味する断層規模が何に基づくものであるかに注意して用いるべきである。例えば、「○○断層は長さ10 kmであるので、松田(1975)の経験式ではマグニチュード6.5となる。断層長さとし幅の経験式と、○○断層が横ずれ断層で傾斜

がほぼ鉛直であることを考慮すれば幅は5 km。地表に断層が及んでいるので、断層上端は地表とする。」といった震源断層モデルは、「そのような地殻浅部のみで強震動を生じるような断層破壊は一般には起こらない。」との、既往の経験[例えば、伊藤・中村(1998)]に反したものになってしまう。また、幾つかの活断層の集合体としての断層系の評価と、個々の活断層の評価を適切におこなう必要もある。

大地震の断層面上のすべり分布は一律ではなく、すべりの大きさ、レイク角(すべり方向)、ストレス・ドロップ(応力降下量)、破壊フロントの到達時間はそれぞれ非一様である。SOMERVILLE・他(1993)は、既往の波形インバージョン解析によって求められた既往地震の非一様断層すべりモデルを収集、調査し、アスペリティ分布の定量評価を試みている。その一例として、断層すべりの深さ分布が、横ずれ断層のすべりは深い位置で大きく、縦ずれ断層の場合はより浅い領域ですべりが大きい規則性が存在することを指摘している。しかし、近年の地震によるデータを追加すれば、その傾向は必ずしも明瞭では無くなっている[SOMERVILLE *et al.* (1998)]。また、地震モーメントと全断層面積、アスペリティ面積について統計的な解析をおこない、最新のデータに基づく、現在の強震動予測手法に適した関係式の導出を試みている。さらに、彼らはアスペリティ分布を2次元フーリエ変換し、波数領域におけるモデル化を試みている。このような2次元空間波数フーリエ振幅スペクトルにより、走向方向、深さ方向におけるアスペリティの変動の様子を平均的に捉えることができるが、モデル化に用いているインバージョン結果が数km四方程度の小断層分割で得られたものであるため、それよりも短波長(高波数)の分解能が無い。したがって、より細かいアスペリティ分布を設定する場合には、短波長(高波数)域における何らかのモデル化が必要になろう。

近年になって、FRANKEL(1991)のフラクタル・モデルやHERRERO and BERNARD(1994)の k^{-2} モデルも提案されている。しかしながら、現状では具体的なアスペリティ分布を事前に予測してモデル化することは困難であり、予測地震動の不確実性を大きくする要因となろう。このような点を考慮して強震動を予測するためには、いくつかの断層破壊パターンを複数想定してシミュレーションを実施し、その平均とばらつきを評価する統計的な地震動予測が現実的である。

6.2 地下構造データ

日本の都市は堆積平野、盆地に発達しており、そのような地盤では振幅が大きく複雑な地震動が長時間継続することが知られている。このため、十勝平野[MATSUDA

and SUDA (1964), MATSUSHIMA and OKADA (1990)], 関東平野 [嶋・他 (1976a, b, 1978a, b, 1981), 瀬尾・小林 (1980), 座間・他 (1985), 山中・他 (1986, 1988, 1991), 浅野・他 (1991), KOKETSU and HIGASHI (1992)], 濃尾平野 [中条・須田 (1972), 正木・飯田 (1981), 正木・他 (1982), 國友・他 (1987)], 大阪平野 [吉川・他 (1987), 鳥海・他 (1990), 香川・他 (1990), NAKAGAWA *et al.* (1991), 堀家・他 (1996)] などにおいては, 強震動予測を目的とした「地盤構造モデル」を設定するための調査が, 平成7年兵庫県南部地震以前から試みられてきた. 平成7年兵庫県南部地震の発生後, 前節で述べたように各地で活断層調査を主目的とした構造探査が実施され, それに伴って深部に至るまでの堆積地盤構造のデータが飛躍的に増えている. 各地域における深層地盤構造調査は額瀨 (1993) にまとめられている. ここではそれをベースに, その後の知見を追加し概説する.

大阪平野においては, これまでにも屈折法探査 [鳥海・他 (1990), 香川・他 (1990)], 反射法探査 [吉川・他 (1987), 岩崎・他 (1994)], 重力探査 [NAKAGAWA *et al.* (1991), 井上・他 (1998)], 微動探査 [堀家 (1996), 香川・他 (1998)], 深層ボーリング調査 [市原 (1991)] などの手法で構造探査が実施され, 強震動予測を目的とした大阪堆積盆地構造モデルの構築がある程度可能な状況にあった [香川・他 (1993)]. これらの地盤構造調査は, 主に民間企業が主体となって地道に進めてきたものであった. その後, 平成7年兵庫県南部地震以後の詳細かつ大量の探査によって, 特に神戸市域を中心とした構造データが飛躍的に充実したのは周知のことである [藤田 (1996), 岩田・他 (1996), 横田 (1997), 兵庫県立人と自然の博物館 (1997)]. それらの中でも, 基盤岩に達するまでの深層ボーリングとそれに付随して実施された検層結果からは得るところが大きい [小林・他 (1996), 小池・他 (1997), 伊藤・他 (1997)]. しかし, このような探査結果は点あるいは線上の情報に留まり, それらを補間する情報は得られていない. このため, 長周期地震動を対象とした大局的なモデル [宮腰・他 (1997)] を構築する情報は充実したものの, 堆積盆地端部の詳細なモデル化にあたっては, 更に詳細な情報が必要であることを示唆する結果となっている.

関東平野では, 夢の島発破実験 [首都圏基盤構造研究グループ (1989)] による屈折法探査から多くの知見が得られている [嶋・他 (1976a, b, 1978a, b, 1981), 瀬尾・小林 (1980), 座間・他 (1985), 山中・他 (1986, 1988, 1991)]. この他, 重力探査 [多田 (1976, 1982, 1983)], 反射法探査 [浅野・他 (1991), 天池・他 (1992), 山水・他 (1993)], 深層ボーリング調査 [TAKAHASHI and

HAMADA (1975)], 微動アレー探査 [川瀬・他 (1994), 佐藤・他 (1994), 山中・他 (1994, 1995, 1997)] がおこなわれている. 大阪平野では反射法探査の実施例が多いのに比べて, 関東平野では屈折法探査によるデータが充実しているのが特徴である. このような屈折法探査データを活用し, 強震動予測を目的とした基盤岩構造のモデル化がおこなわれている [KOKETSU and HIGASHI (1992)].

いずれの地域においても, 建築確認用のボーリングを始めとするボーリング・データベースが構築されている. これらは極く表層地盤による地震応答計算に用いられ, 地震防災の基礎資料とされていることが多い. その一方で, これらのボーリング孔で地震波速度検層が実施されているものはほとんど無く, 調査深度も建築物の支持層までに留まっている. また, これらは特定の業務に用いられているのみであり, 一般に広く公開された使い勝手の良いデータ・ベースとは言い難い.

深層ボーリングによる基盤岩深度を除けば, 地盤構造データは推定値である. 強震動予測を目的とした「地盤構造モデル」の設定過程においてこれらがお互いに矛盾しないことが確認されてはいる. しかしながら, それは細かい構造の差異が大きく影響しない長周期地震動を対象としたモデル化の場合に限定される. 局所的な不整形構造や速度構造のゆらぎによる波動の散乱現象を対象とする場合には, これら推定値の精度が問題となる. 反射法探査による反射断面は, 最も詳細な情報を与えてくれるものの, 探査に用いられた波長によってその分解能が規定される. また, 速度解析の性質から, 深層になるほど精度が落ちてしまう場合もある. これら探査データを用いて強震動予測用の「地盤構造モデル」を設定するにあたっては, 個々の情報の精度を十分に吟味する必要がある.

また, 上記の構造探査からは地質断面が描かれて最終結果となることが多いが, これらは必ずしも強震動予測用の「地盤構造モデル」として使い勝手の良いものではない. 強震動予測に必要なものは物性値の情報であって, それは必ずしも地質構造とは一致しない. また, 不整形地盤構造による地震動応答の数値計算を実施するためには堆積盆地全体の構造が必要であるにもかかわらず, 地質情報ではこれが与えられないことが多い. このため, 強震動予測に適した地盤構造のモデル化の検討も必要である [例えば, 香川・他 (1998)].

平成7年兵庫県南部地震以降には, 神戸市域を中心として多くの地盤探査が実施された [藤田 (1996), 岩田・他 (1996), 横田 (1997), 兵庫県立人と自然の博物館 (1997)]. しかしながら, これらの調査をもってしても詳細な「地盤構造モデル」を構築するには不十分であり,

分かったことも多いが、より大きな疑問を生じた場合もある。例えば、大阪府中心部を南北に縦断する上町断層系は、平成7年兵庫県南部地震以後の調査によってその総延長が40 kmに達することが分かったが、分岐断層も判明して断層系の全体像はより複雑になっている〔杉山・他(1996)〕。このような点に関しては、地質学的知見を援用しつつ、「なぜ、現在のような地形、地質を生じたか?」という地質形成史の観点からのアプローチが重要となるものとする〔横田(1997)〕。

日本の大部分の都市が立地する堆積盆地構造における強震動シミュレーションを想定した場合、概略的な盆地形状の把握、および対象地点周辺域の詳細な地盤構造を、特にS波速度を中心とした地盤物性値とともに把握しておくことが望ましい。このためには、重力異常や発破振源による屈折法探査による概略構造の把握、反射法探査による詳細構造の把握、それらに基づくP波、密度構造に常時微動アレー観測を併用した深層までのS波速度構造の推定が一通りの探査仕様として想定される。また、可能な範囲で基盤岩に至る深層ボーリング調査および検層をおこない、現位置データで地盤構造を把握出来るポイントを設けておきたい。

現在、科学技術庁によって都市部の深層地盤構造把握のための新たな調査も計画されており、より多くの情報が公開され、シミュレーションに用いることのできる地盤構造モデルが充実してゆくものと期待される。

§7. 将来への課題

今後、強震動予測の精度をより向上させ、より実用的なレベルにするための課題についてまとめる。

まず、「震源断層モデル」について述べる。対象とすべき震源断層が、「新編日本の活断層」〔活断層研究会(1991)〕などでは地表で観察される断層に偏しているため、堆積平野下の伏在断層が考慮されてはいない。このため、都市が立地する堆積平野、堆積盆地直下の断層調査が急務である。また、堆積層下の伏在断層による地震動を評価するためには、そのような地震の発生可能性に関する検討が重要となる。一方、「震源断層モデル」の設定には、断層破壊過程の研究が不可欠である。活断層の形状から破壊開始点の位置やすべり分布を推定することも試みられている〔例えば、島崎・他(1998)〕、これらを断層破壊過程の研究から絞り込む努力〔例えば、亀・山下(1997)〕が必要である。

また、工学的に重要な短周期帯の強震動予測にあたっては、短波長域における震源断層モデルを構築する必要がある。このためには、高周波数に対応が可能な「計算手法」の開発と〔例えば、KAKEHI *et al.* (1996), NAKA-

HARA *et al.* (1998)〕、より高密度な強震観測網の確立が重要となろう。本論では強震観測網については紙数を割かなかったが、蓄積された観測記録は強震動研究のために必要欠くべからざる重要な情報である。平成7年兵庫県南部地震以後、科学技術庁防災科学技術研究所のK-NET〔木下・他(1997)〕をはじめとして強震観測体制が充実し、1997年鹿児島県北西部地震による強震動など、良質で高密度のデータが蓄積されつつある。これらの観測記録が今後の研究に反映されてゆくものと期待される。

次に「地盤構造モデル」についてまとめる。日本の都市部において、十分な精度で「地盤構造モデル」が設定できている場所は無い。かろうじて大阪平野、関東平野において、目的を限定したモデルが構築されているのみである。「地盤構造モデル」の設定にあたっては、高精度の地下情報を与える反射法探査の測線が多くあることが望ましい。先に述べた堆積平野下の伏在断層の調査に反射法探査を利用し、その仕様を基盤岩までの堆積層構造を探索し得るまでにすることにより、伏在断層と地盤構造の両方のデータを入手できる可能性がある。地震動応答計算で重要なS波速度の評価は、通常の反射法探査では困難である。また、反射法探査による反射断面も深部になる程精度が悪くなってしまう。このため、基盤岩に至る深層ボーリングや、微動アレー探査を併用することにより、より実用的で精度の高いデータが得られるものと期待される。

表層地盤のデータは建築確認ボーリングから得られることが多いが、PS検層がおこなわれている例はほとんど見られず、標準貫入試験値から地震波速度などを推定するしかない。これについても、PS検層の実施を奨励する制度を設けるなどの配慮によって、実用的な表層地盤データを広域で入手できるようになるものとする。また、これらのデータは一般に自由に利用できるようにはなっていない。これらデータ・ベースの公開利用についても、一層の努力が必要である。また、上記の地盤探査データを総合して、強震動予測に用いる実用的な「地盤構造モデル」を構築する方法論の検討も重要となろう。

以上の問題点が克服されてゆけば、「震源断層モデル」と「地盤構造モデル」を反映した強震動予測によって、特定断層の活動による特定地点の強震動の評価がより実用的で精度の高いものになっていくと期待される。しかしながら、現状のデータの範囲で強震動予測をおこなう場合、まだまだそのばらつきの幅は大きいと言わざるを得ない。つまり、「震源断層モデル」と「地盤構造モデル」を反映した強震動予測においてパラメータの自由度が小さくならない限り、データに拘束されていることに基づ

く安定性と過去の実績による信頼性がある経験的な距離減衰式による評価を併用することが必要となる。特に、第1近似としての粗い予測には経験的な距離減衰式で十分に実用的である[瀬戸(1997)]。この反面、経験式の基となったデータで予期されない現象を経験式だけで評価することには無理がある。例えば、平成7年兵庫県南部地震の際に注目された「長周期パルス波」や「盆地端部の効果(エッジ効果)」は、日本におけるこれまでの観測記録では経験されていなかったものである。経験だけでは過去に未経験のパターンで地震が発生する毎に予測される強震動の大きさが更新されることになり、その度に既往経験で設計された構造物に新たな地震被害を生じかねない。このように観測値で拘束されていないタイプの想定地震(例えば、内陸の逆断層による地震)を取り扱う場合には、断層破壊過程を精密に表現し得る、合理的な強震動予測手法が採用されるべきである。一方、断層モデルによる強震動予測も現状では被害地震で十分に検証されているわけでは無い。このため、最新の手法を被害分布や観測記録で検証するなどの研究も重要なテーマである。とはいえ、大地震は頻繁に発生するものではないため、早急に観測記録や地震動分布の情報を充実させることは困難である。このため、過去の事例に学ぶことが望まれる。観測記録が残っていない場合であっても、明治以降の被害地震では被害分布や地震動の特徴が詳細に調査されている事例が多い。これら過去の経験を現在の知識と手法を用いて再検討し、現状における情報の不足を補う姿勢も重要である[例えば、武村・他(1998)]。

§8. おわりに

強震動予測手法の現状とその利用例を通じて、手法の限界、問題点について述べた。その要点を以下にまとめる。

- 1) 強震動予測における計算法は、平成7年兵庫県南部地震の強震動をほぼ再現できることから、実用の域にあるものと考えられる。
- 2) しかし現状では、将来に発生が予測される地震による強震動を予測するにあたり、「震源断層モデル」、「地盤構造モデル」による不確かさが大きい。
- 3) 「震源断層モデル」には、特に自然現象としての不確かさが大きく、今後の研究によってその不確かさを小さくしてゆく必要がある。
- 4) そのためには、対象とする自然現象の研究にあたって最も基本的な情報である観測記録、つまり強震動記録を広範囲に入手する作業を継続すべきである。

- 5) 「地盤構造モデル」は経年的に大きく変化するものではないため、人口が集中している都市部を中心に地道な探査をおこない、データを集積しておくことが肝要である。特に、深層構造の把握が遅れているため、自治体を中心とした努力が望まれる。

強震動予測は、地震学の研究成果を社会に役立てることのできる重要な課題のひとつである。今後、強震動予測が地震防災を通じて、生命、財産の損失をより軽減することに役立つことを祈って止まない。

謝 辞

本報告の内容は、地震学会強震動委員会の活動を通じて収集した情報を、著者らが整理して構成したものである。委員の皆様、委員会に情報を提供していただいた関係各位にお礼申し上げます。京都大学原子炉実験所の釜江克宏博士には図の引用を快諾頂きました。北海道大学の笹谷 努博士、工学院大学の久田嘉章博士、竹中工務店の天池文男博士には貴重なご意見を頂きました。また、2名の匿名査読者には本論を精読頂き、貴重なご指摘を頂きました。記して感謝致します。

参 考 文 献

- ABRAHAMSON, N. A. and K. M. SHEDLOCK, 1997, Overview, *Seism. Res. Lett.*, **68**, 9-23.
- AGUIRRE, J. G. and K. IRIKURA, 1997, Nonlinearity, liquefaction, and velocity of soft soil layers in Port Island, Kobe during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 1244-1258.
- 赤澤隆士・香川敬生, 1997, 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.
- 天池文男・植竹富一・中村亮一・小林啓美・井川 猛, 1992, 船橋市における反射法地下構造探査, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B52.
- 浅野周三・安井 譲・平間邦興・若松邦夫・桑原 徹・奥田 暁・鈴木宏芳・笠原敬司・山水史生・井川 猛・太田陽一, 1991, 首都圏における反射法地下構造探査 2, 府中 VSP 調査による速度・減衰構造, 地震学会講演予稿集, No. 2, 150.
- BOORE, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894.
- 中条純輔・須田芳朗, 1972, 伊勢湾の重力調査報告, 地質調査所.
- DAN, K., T. WATANABE and T. TANAKA, 1989, A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, *J. Structural and Construction Engi-*

- neering (Transactions of AIJ), **396**, 27-36.
- 藤田和夫, 1996, 阪神地域活断層調査について, 大阪湾の深部構造を考える, 断層研究資料センター, 1-10.
- FRANKEL, A., 1991, High-frequency spectral falloff of earthquakes, fractal dimension of complex rupture, b value, and scaling strength on fault, *J. Geophys. Res.*, **96**, 6291-6302.
- 福島美光, 1993, 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**, 315-332.
- FURUMURA, T. and K. KOKETSU, 1998, Specific distribution of ground motion during the 1995 Kobe earthquake and its generation mechanism, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 785-788.
- HERRERO, A. and P. BERNARD, 1994, A kinematic self-similar rupture process for earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1216-1228.
- HARTZELL, S. H., 1978, Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1-4.
- 久田嘉章・山本俊六, 1995, ノースリッジ地震の地震動一類似点と相違点一, 第23回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 93-100.
- 堀家正則・竹内吉弘・今井智士・藤田 崇・横田 裕・野田利一・井川 猛, 1996, 大阪平野東部における地下構造探査, *地震* **2**, **49**, 193-203.
- 兵庫県立人と自然の博物館, 1997, 阪神・淡路大震災と六甲変動, 兵庫県南部地震域の活構造調査報告, 1-106.
- 市原 実, 1991, 大阪とその周辺地域の第四期地質図, *アーバンクボタ*, **30**, 株式会社クボタ.
- IDE, S., M. TAKEO and Y. YOSHIDA, 1996, Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake determined by near-field strong motion records, *J. Phys. Earth*, **44**, 649-653.
- 井上直人・中川康一・領木邦浩, 1998, 大阪平野の重力異常と基盤構造, *物理探査*, **51**, 1-16.
- IRIKURA, K., 1983, Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, **32**, 63-104.
- IRIKURA, K., 1986, Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 151-156.
- 入倉孝次郎, 1996, 大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 第24回地盤振動シンポジウム, 91-100.
- 伊藤 潔・中村修一, 1998, 西南日本内帯における地震発生層の厚さ変化と内陸大地震, 京都大学防災研究所年報, **41**, 印刷中.
- 伊藤佳洋・山田雅行・松本正毅・藤原吉美・小池章久・岩崎好規, 1997, 大阪平野深部の速度構造調査(その2)一大阪湾岸部速度構造の検討一, 第52回土木学会年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, 64-65.
- 岩崎好規・香川敬生・澤田純男・松山紀香・大志万和也・井川 猛・大西正純, 1994, エアガン反射法地震探査による大阪湾の基盤構造, *地震* **2**, **46**, 395-403.
- 岩田知孝・入倉孝次郎・土岐憲三・笹谷 努・工藤一嘉・瀬尾和大・横井俊明, 1996, 神戸市及びその周辺の地下構造探査, 平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 平成7年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書(課題番号07300005), 2-21-2-49.
- JENNINGS, P. C., G. W. HOUSNER and N. C. TSTAI, 1968, Simulated earthquake motion for design purposes, *Proc. 4th WCEE*, 145-160.
- JOYNER, W. B. and D. M. BOORE, 1981, Peak acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**, 2011-2038.
- 鏡味洋史, 1993, サイズミック・ゾーネーション, *地震* **2**, **46**, 217-228.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・江見 晋, 1990, 発破実験より推定される大阪堆積盆地構造, *地震* **2**, **43**, 527-537.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南莊 淳, 1993, 大阪堆積盆地における深部地下構造のモデル化, 第22回地震工学研究発表会, 199-202.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南莊 淳, 1998, 常時微動アレー観測による大阪堆積盆地深部S波速度構造のモデル化, *地震* **2**, **51**, 31-40.
- KAKEHI, Y., K. IRIKURA and M. HOSHIBA, 1996, Estimation of high frequency wave radiation area on the fault plane of the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake by the envelope inversion of acceleration seismograms, *J. Phys. Earth*, **44**, 505-518.
- 釜江克宏・入倉孝次郎・福和保長, 1990, 地域的な震源スケー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集, **416**, 57-70.
- 釜江克宏・入倉孝次郎, 1997, 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, **500**, 29-36.
- KAMAE, K., K. IRIKURA and A. PITARKA, 1998, A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 357-367.
- 亀 伸樹・山下輝夫, 1998, 大きな地震より小さな地震が多いのはなぜかー自ら止まる地震破壊の性質一, *科学*, **68**, 702-709.
- KANAI, K., 1957, Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **35**, 309-325.
- 活断層研究会, 1991, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 412 pp.
- 川瀬 博・佐藤智美・片岡俊一・佐藤俊明・野田静男・真下 貢, 1994, アレー微動による都市部における地下構造探査法(その1)測定条件に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, **B**, 493-494.
- 川瀬 博・佐藤智美・福武毅芳・入倉孝次郎, 1995, 兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, **475**, 83-92.
- 川瀬 博・林 康裕, 1996, 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュ

- レーション, 日本建築学会構造系論文集, **480**, 67-76.
- 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔, 1997, K-NET95 型強震計の記録特性, 地震 **2**, **49**, 467-481.
- 工藤一嘉, 1993, 強震動予測を中心とした地震工学的研究の歩み—総合報告: 強震動地震学・地震工学シリーズの序にかえて—, 地震 **2**, **46**, 151-159.
- 小林啓美・衣笠善博・長谷川明生・井川 猛・大西正純・井畑茂治, 1996, 神戸市東灘区における反射法地震探査, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, A38.
- 小池章久・松本正毅・藤原吉美・山田雅行・伊藤佳洋・岩崎好規, 1997, 大阪平野深部の速度構造調査(その1)—概要および結果—, 第52回土木学会年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, 62-63.
- 国土地理院, 1992, 国土数値情報(改訂版), 国土情報シリーズ, **8**, 大蔵省印刷局.
- KOKETSU, K. and S. HIGASHI, 1992, Three-dimensional topography of the sediment/basement interface in the Tokyo metropolitan area, central Japan, Bull. Seism. Soc. Am., **82**, 2328-2349.
- 額縁一起, 1993, 基盤構造の探査, 地震 **2**, **46**, 351-370.
- 額縁一起, 1996, カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震, 科学, **66**, 93-97.
- 額縁一起, 1997, 強震動シミュレーションは経験的手法を越えるか?, 日本地震学会シンポジウム: 強震動予測による地震災害の軽減をめざして, 日本地震学会強震動委員会, 75-76.
- 古和田 明・田居 優・岩崎好規・入倉孝次郎, 1998, 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 印刷中.
- 國友孝洋・井上 公・古本宗充・山田功夫・嶋田基史, 1987, 名古屋港東部における反射法地震探査実験, 地震学会講演予稿集, No. 1, 167.
- 正木和明・飯田汲事, 1981, 名古屋地域の深部地盤構造 I, 愛知工業大学研究報告 B, **16**, 165-173.
- 正木和明・谷口仁士・飯田汲事, 1982, 名古屋地域の深部地盤構造 II, 愛知工業大学研究報告 B, **17**, 159-171.
- 松田時彦, 1975, 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震 **2**, **28**, 269-283.
- MATSUDA, T. and Y. SUDA, 1964, Bouger anomaly maps in Japan, Rept. Geol. Surv. Japan, 209.
- 松岡昌志・翠川三郎, 1993, 国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文集, **447**, 51-56.
- MATSUSHIMA, T. and H. OKADA, 1990, Determination of deep geological structures under urban areas using long-period microtremors, BUTSURTANSA, **43**, 21-33.
- 翠川三郎・小林啓美, 1985, 地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定, 日本建築学会構造系論文集, **282**, 71-80.
- 宮腰 研・香川敬生・越後智雄・澤田純男・南荘 淳, 1997, 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.
- 長橋純男, 1994, 建築構造物を対象とした設計入力地震動の強さ, 地震 **2**, **46**, 513-532.
- 永野正行・大野 晋・古山田耕司・加藤研一, 1998, 兵庫県南部地震時の神戸市内における基盤地震動および地盤増幅特性, 日本建築学会構造系論文集, **511**, 77-84.
- NAKAHARA, H., T. NISHIMURA, H. SATO and M. OHTAKE, 1998, Seismogram envelope inversion for the spatial distribution of high-frequency energy radiation from the earthquake fault: Application to the 1994 far east off Sanriku earthquake, Japan, J. Geophys. Res., **103**, 855-867.
- NAKAGAWA, K., K. RYOKI, N. MUTO, S. NISHIKAWA and K. ITO, 1991, Gravity Anomaly Map and Inferred Basement Structure in Osaka Plain, Central Kinki, South-west Japan, J. Geoscience, Osaka City Univ., **34**, 103-117.
- 日本道路協会, 1990, 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 222 pp.
- 日本道路協会, 1996, 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 228 pp.
- 日本建築学会, 1992, 地震荷重—その現状と将来の展望, 240 pp.
- 日本地震学会, 1994, 「総合報告」強震動地震学・地震工学研究の現状と展望, 256 pp.
- OHNO, S., T. OHTA, T. IKEURA and M. TAKEMURA, 1993, Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, Tectonophysics, **218**, 69-81.
- 大野 晋・武村雅之・小林義尚, 1998, 観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性, 第10回日本地震工学シンポジウム, 投稿中.
- 表 俊一郎, 1990, 原子炉施設の耐震設計用入力地震動を定めるためには, どのように考えればよいであろうか, 物理探査, **43**, 330-345.
- 大阪府, 1997, 大阪府地震被害想定調査報告書, 13-25.
- 大阪府土木部, 1997, 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 4-103.
- PITARKA, A., K. IRIKURA, T. IWATA and T. KAGAWA, 1996, Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995 Hyogoken-nambu Earthquake, J. Phys. Earth, **44**, 563-576.
- PITARKA, A., K. IRIKURA, T. IWATA and H. SEKIGUCHI, 1998, Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., **88**, 428-440.
- 佐藤良輔, 1989, 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 390 pp.
- 佐藤智美・川瀬 博・片岡俊一・早川 崇・西村 功・中村亮一, 1994, アレー微動による都市部における地下構造探査法(その2)検知限界に対する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B, 495-496.
- SEKIGUCHI, H., K. IRIKURA, T. IWATA, Y. KAKEHI and M. HOSHIBA, 1996, Minute locating of fault planes and source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu

- (Kobe), Japan Earthquake from the waveform inversion of strong ground motion, *J. Phys. Earth*, **44**, 473-488.
- 瀬尾和大・小林啓美, 1980, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査, *地震* **2**, **33**, 23-36.
- 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏尅・一ノ瀬洋一郎・瀬尾和大・山崎謙介・大保直人・山本喜俊・小口雄康・長能正武, 1976a, 東京の基盤構造, *地震研彙報*, **51**, 1-11.
- 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏尅・一ノ瀬洋一郎・瀬尾和大・山崎謙介・大保直人・山本喜俊・小口雄康・長能正武, 1976b, 東京の基盤構造 その2, *地震研彙報*, **51**, 45-61.
- 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏尅・瀬尾和大・黒羽公明, 1978a, 東京の基盤構造 その3, *地震研彙報*, **53**, 305-318.
- 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏尅・瀬尾和大・大保直人・星野 務・長能正武, 1978b, 東京の基盤構造 その4, *地震研彙報*, **53**, 1245-1255.
- 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・瀬尾和大, 1981, 東京の基盤構造 その5, *地震研彙報*, **56**, 265-276.
- 島崎邦彦・中田 高・鈴木康弘, 1998, 破壊方向を示す断層分岐形状, *地球惑星科学関連学会 1998 年度合同大会予稿集*, Sf-006, 313.
- 首都圏基盤構造研究グループ, 1989, 夢の島人工地震実験資料集, 東京大学地震研究所.
- 消防科学総合センター, 1997, 簡易型地震被害想定システム Ver. 1 について, *地震被害予測システムに関する検討調査報告書*, 17-26.
- SOMERVILLE, P. G., 1993, Engineering applications of strong ground motion simulation, *Tectonophysics*, **218**, 195-219.
- SOMERVILLE, P. G.・入倉孝次郎・澤田純男・岩崎好規・田居 優・伏見 実, 1993, 地震断層のすべり変位量の空間分布の検討, 第22回地震工学研究発表会, 291-294.
- SOMERVILLE, P. G., K. IRIKURA, R. GRAVES, S. SAWADA, D. WALD, N. ABRAHAMSON, Y. IWASAKI, T. KAGAWA, N. SMITH and A. KOWADA, 1998, Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, submitted.
- SUGITO, M. and H. KAMEDA, 1985, Prediction of nonstationary earthquake motions on rock surface, *Proc. JSCE Structural Eng. Earthquake Eng.*, **2**, 149-159.
- 杉山雄一・横田 裕・林 和幸・吉澤正夫, 1996, 反射法地震探査による大阪・上町断層の南方延長の追跡と上町断層系の評価, *日本地震学会講演予稿集*, No. 2, P07.
- 多田 堯, 1976, 関東平野の地下構造について, *地震* **2**, **29**, 47-53.
- 多田 堯, 1982, 関東平野の基盤構造と重力異常(1)—基盤深度図一, *地震* **2**, **35**, 607-617.
- 多田 堯, 1983, 関東平野の基盤構造と重力異常(2)—活断層の地球物理学的研究一, *地震* **2**, **36**, 359-372.
- TAKAHASHI, H. and K. HAMADA, 1975, Deep bore-hole observation of the Earth's crustal activity around Tokyo—Introduction of the Iwatsuki observatory—, *Pure Appl. Geophys.*, **113**, 311-320.
- 武村雅之・釜田正毅・小堀鐸二, 1989, 地震波の発生伝播理論を考慮した模擬地震動作成法, *日本建築学会構造系論文集*, **403**, 25-34.
- TAKEMURA, M. and T. IKEURA, 1988, A semi-empirical method using a hybrid stochastic and deterministic fault models: Simulation of strong ground motions during large earthquakes, *J. Phys. Earth*, **36**, 89-106.
- TAKEMURA, M., M. MOTOSAKA and H. YAMANAKA, 1995, Strong motion seismology in Japan, *J. Phys. Earth*, **43**, 211-257.
- 武村雅之・釜田正毅, 1998, 強震動予測に与える短周期ディレクティブティの影響—小林・翠川手法と等価震源距離—, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 165-166.
- 武村雅之・諸井孝文・八代和彦, 1998, 明治以後の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴—震度 VII の発生条件—, *地震* **2**, **50**, 485-505.
- 武村雅之, 1998, 日本列島における地殻内地震のスケリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, *地震* **2**, **51**, 211-228.
- THATCHER, W. and M. G. BONILLA, 1989, Earthquake slip estimation from geologic, geodetic and seismologic observation: Implication for earthquake mechanics and fault segmentation, *U. S. Geol. Surv. Open File Rep.*, **89-315**, 386-399.
- 鳥海 勲・竹内吉弘・大場新太郎・堀家正則・井上豊・馬場研介, 1990, 大阪平野の地下構造—北港発破実験(1988年)による—, *地震* **2**, **43**, 373-378.
- 鶴来雅人・田居 優・入倉孝次郎・古和田 明, 1997, 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, *地震* **2**, **50**, 215-227.
- WALD, D. J., 1996, Slip history of the 1995 Kobe, Japan, Earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, **44**, 489-504.
- WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES, 1995, Seismic hazards in southern California: Probable earthquakes, 1994 to 2024, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 379-439.
- 山水史生・笠原敬司・鈴木宏芳・井川 猛・足立幾久, 1993, 下総深層観測井における反射法地震探査, *日本地震学会講演予稿集*, No. 2, 261.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲・翠川三郎, 1986, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(2), *地震* **2**, **39**, 607-620.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲・翠川三郎・嶋 悦三・柳沢馬住, 1988, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(3), *地震* **2**, **41**, 527-539.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲, 1991, 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(4), *地震* **2**, **44**, 9-20.
- 山中浩明・武村雅之・石田 寛・池浦友則・野澤 貴・佐々木 透・丹羽正徳, 1994, 首都圏西部におけるやや長周期微動の観測と S 波速度構造の推定, *地震* **2**, **47**, 163-172.

- 山中浩明・古屋伸二・野澤 貴・佐々木 透・高井剛, 1995, 関東平野におけるやや長周期微動のアレイ観測, 日本建築学会構造系論文集, **478**, 99-105.
- 山中浩明・佐藤浩章・栗田勝実・瀬尾和大, 1997, 関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレイ観測, 物理探査学会学術講演会論文集, **96**, 440-443.
- 横田 裕, 1997, 強震動予測からみた反射法地震探査の現状と展望, 日本地震学会シンポジウム: 強震動予測による地震災害の軽減をめざして, 日本地震学会強震動委員会, 3-6.
- YOSHIDA, S., K. KOKETSU, B. SHIBAZAKI, T. SAGIYA, T. KATO and Y. YOSHIDA, 1996, Joint inversion of near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe Earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 437-454.
- 吉川宗治・町田義之・寺元光雄・横田 裕・長尾英孝・梶原正章, 1987, 大阪市内における反射法地震探査, 物理探査学会学術講演会論文集, **77**, 114-117.
- 座間信作・柳沢馬住・嶋 悦三, 1985, 千葉県中部の地下構造(2)—簡単な走時計算法とその適用—, 地震学会講演予稿集, No. 2, 150.