

強震動

岩田 知孝*

Strong ground motions

Tomotaka IWATA*

Abstract

This article describes recent approach of strong ground motion prediction after lessons learned from strong ground motions during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake. A procedure for characterizing source model and basin and crustal velocity structure model is introduced for the strong ground motion prediction of scenario earthquakes. Research activities related to strong ground motion predictions for seismic hazard map by The Headquarters for Earthquake Research Promotions, which was founded after the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, are also shown. Future research studies for polishing up the methodology of prediction of strong ground motions are also shown in strong motion seismology.

キーワード：1995年兵庫県南部地震，強震動予測，特性化震源モデル，地下構造モデル，強震動地震学

Key words：the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, strong ground motion prediction, characterized source model, subsurface velocity structure model, strong motion seismology

1. はじめに

都市直下に存在した活断層が震源となって直上の現代都市が壊滅的な地震災害をうけた1995年兵庫県南部地震では，神戸～阪神間及び淡路島に延びた震度7の帯領域（震災の帯）の成因の解明が強震動研究の主題となった。神戸市域に設置されていたいくつかの強震観測点で地震動記録が得ら

れており，震源近傍域では，みかけの周期1秒程度のパルス波が断層直交成分に卓越していた。後述するようにこのパルス波は断層破壊の特徴に関係した波動（ディレクティビティパルス波）であることが解明された。また，震災の帯については，震源断層から生成したディレクティビティパルス波が神戸の特有の地盤構造によって増幅され

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

て激甚被害を引き起こす地震動となっていたことがわかった。

1995年兵庫県南部地震が引き起こした阪神・淡路大震災を契機として、全国に強震観測網が整備され、ひとたび地震が起されば強震動記録が得られるようになり、被害地震の全貌や強震動の生成原因が迅速かつ正確に調べられるようになってきた。また様々なタイプの強震動記録が得られ、地震被害との関係を詳細に議論することができるようになってきている。

また全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、1995年7月に地震防災対策特別措置法が議員立法によって制定され、同法に基づき、地震調査研究推進本部（当時総理府、現在は文部科学省に設置）（以下地震本部）が、行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明らかにして一元的に推進するために設置された。この中の地震調査委員会は、地震に関する各研究を行う関係行政機関、大学等の調査結果等の収集・整理と分析に基づき総合的な評価を行うとともに、1999年4月に「地震調査研究の推進について－地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策－」が策定され、それに基づいた地震調査研究を推進してきている。

本報告では1995年兵庫県南部地震の震源域強震動の生成原因についてのレビューを行うとともに、この教訓を将来に活かすため、強震動予測の高度化を目指した震源モデル・地下構造モデルについての研究の15年間の歩みを見るとともに、地震本部の地震防災に関する継続的な取り組みを踏まえて今後の強震動研究、及び強震動予測研究について述べる。

2. 1995年兵庫県南部地震の震源過程と強震動

兵庫県南部地震の断層モデルは、近地強震記録、遠地地震記録、測地データなどを用いて推定されているが、この中で震源近傍域の強震動生成に関係する周期帯域における分析は以下のものがある。近地強震記録のみを用いたもの (Ide et

al., 1996; Sekiguchi et al., 1996, 2000, 2002), 測地データを加えたもの (Horikawa et al., 1996), 更に遠地記録も加えたもの (Wald, 1996; Yoshida et al., 1996; Megawati et al., 2001) がある。多くの震源インバージョン法は断層面を予め仮定して、その面での断層の食い違いの時空間分布を推定する。断層面の仮定には、余震分布や既存断層、地表断層位置などが先験的 (a priori) な情報として用いられ、それらは研究者によって必ずしも一致しているわけではない。また、これらの震源インバージョンではグリーン関数は理論的に与える。そのためには震源－観測点の地下構造モデルが必要である。一般的には長周期の地震記録を使うほど、地下構造、特に地震基盤より浅い部分の地震波速度が小さい地盤構造の影響を受けにくいので、グリーン関数を計算するための地下構造モデルは粗いモデルでもよいが、地震被害に直結する周期1秒前後の周期帯域まで含む場合は地盤構造の影響を避けて通れないため、粗いモデルを使ったグリーン関数を用いた震源モデリングでは精度の高い震源像は見えない。ここで参考文献としてとりあげた震源インバージョン結果の多くは Iwata et al. (1998) によってコンパイルされている。Iwata et al. (1998) で指摘しているように、大勢では一致していると言えるが、詳細にみると違いが見受けられる。ここではまず震源域の強震動の生成にターゲットを絞った Sekiguchi et al. (1996, 2000, 2002) の一連の研究を紹介する。

Sekiguchi et al. (1996) は、地表に断層が現れなかった神戸市域において、余震分布や既存活断層位置に加えて神戸市域の強震観測記録の地動軌跡に着目することによって、伏在震源断層面に拘束を与えた。Sekiguchi et al. (2000, 2002) は断層破壊の北東終端の様子を知るために、Sekiguchi et al. (1996) の観測点データに東側の観測点データを増やして震源インバージョンを行った。手法は Hartzell and Heaton (1983) によるマルチタイムウインドウ法に時空間でのスムージングと、破壊の伝播様式を組み込んですべり速度を評価することのできるようにした手法である (Sekiguchi et al., 2002)。測地データや In-SAR イメージデータ

のモデリングも参考にして仮定された断層モデルが図1に、それによって求められた断層の破壊過程が図2に示される。このインバージョンには観測されるよう地下構造モデルを適切にチューニングした1次元速度構造モデルを使っている。また、震源域から東の方向の観測点は大阪堆積盆地内にあり、盆地端部観測点では2~3次元地下構造の影響が強いと考えられるためここでは不均質地下構造モデルと1次元速度構造モデルとのグリーン関数の比較を行って後者のモデルの仮定が有効な区間(波形の部分)を解析区間と定めた。断層破壊の様子は以下のものであった。明石海峡下約17kmの深さから破壊が開始し、北東の神戸方向と南西の淡路島方向に破壊が進展したこと、破壊開始点付近と神戸市下のやや深い位置、及び淡路島側の浅い位置の3つのアスペリティが推定された。神戸側の震源近傍の記録に表れているみかけ周期1秒程度の2つのパルス波が、破壊開始点から神戸側の2つのアスペリティが神戸側に破壊進展することによって生じたディレクティブパルス波であることがわかる。また、淡路島側に見えた浅いアスペリティは、地表地震断層を生じた野島断層との対応が指摘できる。Sekiguchi et al. (2002) のインバージョンは近地波

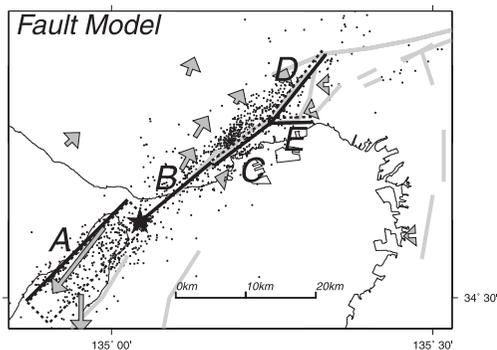


図1 1995年兵庫県南部地震の震源インバージョンに仮定された断層モデル。A-Eの5つのセグメントを仮定。矢印は地殻変動データ。黒丸は本震後1日間の余震の震央分布を示している。薄い実線は既存活断層を表している。★印は震央。各セグメントのうち実線は断層面のの上辺、点線は残りの辺を表している (Sekiguchi et al., 2002)。

形の1-10秒のフィルターを通した速度波形を用いて行われており、その周期帯域で見た震源像であるといえる。

これより短周期帯域を含む広帯域強震動の観点にたった震源モデルの構築は、前述するような地下構造モデルの不確かさにより同じようなスキームで行うことは困難である。松島・川瀬 (2000, 2009) は神戸市域の強震動に着目し、ディレクティブパルス波を0.4-10秒の周期範囲で再現する複数パッチモデルをフォワードモデリングによって提案している。神戸側の観測パルス波を詳細に説明するには、4つのパッチが必要であること、また鷹取の大きな観測パルス波には合計5つのパッチが必要であることを指摘している。

更に広帯域の地震波からみた震源のモデリングとしては、Kamae and Irikura (1998) が経験的グ

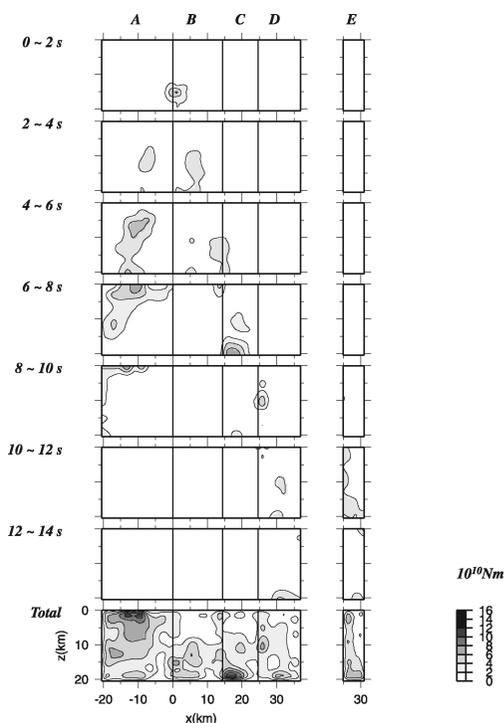


図2 推定された断層運動。図には2秒毎の地震モーメント解放量を示し、最後のパネルは全体の地震モーメント解放量を示している。A-Eのコラムは図1の各セグメントに対応 (Sekiguchi et al., 2002)。

リーン関数法を用いて、複数パッチで構成される震源モデルを提案している。彼らは Sekiguchi et al. (1996) を参照して、アスペリティの部分にパッチを置き、それを微調整して震源域の強震動シミュレーションを行うことで、震源モデルを求めた。彼らのグループはその後もデータを加えて改良モデルを提案している (例えば平井・他, 2006)。

兵庫県南部地震の震源過程から、神戸～阪神間の方向には、ディレクティブティパルス波が伝わってきたことがわかったが、震動レベルの増幅には、六甲断層系を盆地境界とした震源断層の南側に存在する厚い堆積層が接する盆地端部効果 (Kawase, 1996) が寄与していることがわかってい。Iwata et al. (1996) は震源域での余震観測を行い、地震被害域である堆積層上の記録は岩盤観測点に比べて何倍も増幅されていること、また地震記録に表れている変換波から、堆積層が 1 km にも及ぶ可能性を指摘し、その地震動増幅が堆積層による 1 次元的な増幅効果だけでなく、盆地端部の 2 次元的な構造の効果もあることを地下構造モデルに基づくシミュレーションによって指摘した (Pitarka et al., 1996)。変換波による神戸市域の地震基盤の深さについては Yamanaka and Aoi (1996) でも同様に指摘されている。また兵庫県南部地震後に伏在断層を調査するための反射法人工地震探査が行われ、神戸市域の地震基盤構造が明らかになっている (例えば岩田, 1995, 1996; 松島・他, 2002)。

この地下構造モデルと震源モデルに基づいて、3次元強震動シミュレーションが行われ、震災の帯の生成にはディレクティブティパルス波が盆地端部効果によって強められたことが強く関係しているということが指摘された (例えば Irikura et al., 1996; Pitarka et al., 1998; Furumura and Koketsu, 2000; 松島・川瀬, 2000, 2009)。震源近傍におけるディレクティブティパルス波は、1992年米国ランダース地震や1994年米国ノースリッジ地震でも観測されており (Somerville et al., 1997)、日本でも1995年兵庫県南部地震以降に展開された強震観測網 (K-NET, Kinoshita, 1996; KiK-net, Aoi et al., 2000など) によって、大地震が起きるたびに

観測されている。

このような起きた地震で観測されている強震動「評価」が、理論的手法に基づいた震源モデルと地下構造モデルの組み合わせによって定量的に行うことができることが、1995年兵庫県南部地震において我々が学んだことである。実際理論的な強震動評価が地震動災害と関連する周期帯域までなされるためには、その周期帯域に見合うだけの詳細な震源及び地下構造のモデルが確立される必要がある。強震記録を使った震源インバージョンは周期 1 秒程度までの帯域でモデル化される場合が多い。兵庫県南部地震の震源域の強震記録に表れたパルス波がみかけ周期 1 秒程度であったため、上記の強震動評価においては主たるディレクティブティパルス波の再現ができたと考えられる。

これらの知見を強震動「予測」に結びつけるには、当然必要とされる強震動の周期帯域に対応する想定震源のモデルと地下構造モデルの構築が必要となる。次の章では震源モデルと地下構造モデルに分け、1995年兵庫県南部地震以降の取り組みを示す。

3. 震源のモデル化

ある活断層に関して地震想定を行う場合には、活断層の長さや地震の規模を関係づけた松田の式 (松田, 1975) が使われることが多い。松田 (1975) は、地表地震断層を伴った地震の地表断層の長さとその地震の規模の関係式を得て、それを活断層の長さを利用して、ある活断層に関係する地震の地震規模を想定するというものである。また、地震学では震源相似則に関する研究があり (例えば Kanamori and Anderson, 1975)、地震の規模に関わらず、平均的な断層サイズとすべり量の関係は相似であることが成り立っていることを利用すると、想定震源断層面の設定を行うことが可能となる。こういった震源断層の設定に、地震動の距離減衰式等を適用することによって、想定地震に対する強震動の予測を行うことができる。

しかしながら、1995年兵庫県南部地震で得た教訓は、震源近傍の地震動が震源断層内での不均質

は strong motion generation area = 強震動生成領域と命名)の大きさの地震規模依存性が, Somerville et al. (1999) のアスペリティ面積の地震規模依存性の経験式に乗ること (図4), また各イベントに対して, 位置的には Somerville et al. (1999) の規範のアスペリティ領域と強震動生成領域がほぼ一致すること (図5) を示した。

この断層すべりの不均質性と地震規模の関係の平均像が与えられ, アスペリティと広帯域強震動の生成領域が対応していることにより, 震源近傍の強震動を「予測」するための震源断層モデルの考え方, 「特性化震源モデル」が提案された (入倉・三宅, 2001, 2002; 入倉・他, 2003; Irikura, 2007)。これらの研究では上記の不均質震源像をアスペリティモデル (Boatwright, 1988) によって解釈し, 適切な応力降下量 (応力パラメータ) の設定方法を述べるとともに, 壇・他 (2001) による短周期地震動レベルと地震規模の経験的關係を考慮した応力パラメータの設定方法や, 強震動情報が寡少な長大活断層の震源モデルに対しては, Fujii and Matsuura (2000) のモデルを参考にした応力パラメータの設定方法について述べている。

文部科学省地震調査研究推進本部で取り組まれている地震動予測地図作成には, 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (レシピ) (最新版は地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009) として, モデルパラメータの設定方法について詳細に説明している。「レシピ」とは想定地震の強震動予

測を行う場合に, 誰もが参照して行うことができる手続きを述べたもので, 震源断層設定にはじまり, アスペリティとその他の領域 (背景領域), すべり時間関数, 破壊開始点と破壊速度の設定方法がまとめられている。

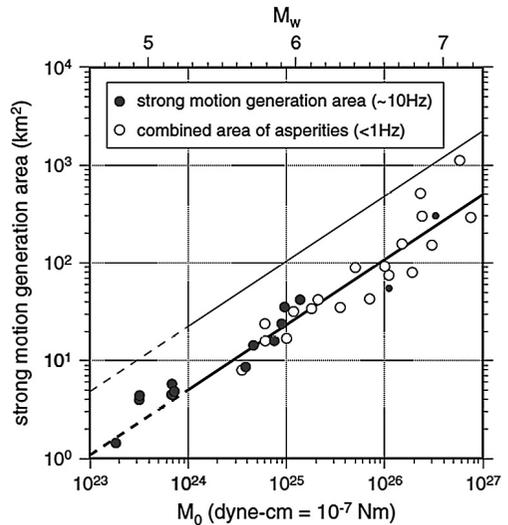


図4 強震動生成領域サイズと地震モーメントの關係式。白丸はSomerville et al.(1999)で分析されたイベントのアスペリティサイズ, 黒丸は強震動生成領域。太線・細線はそれぞれSomerville et al.(1999)のアスペリティ領域と破壊領域の地震モーメントに関する経験式 (Miyake et al., 2003)。

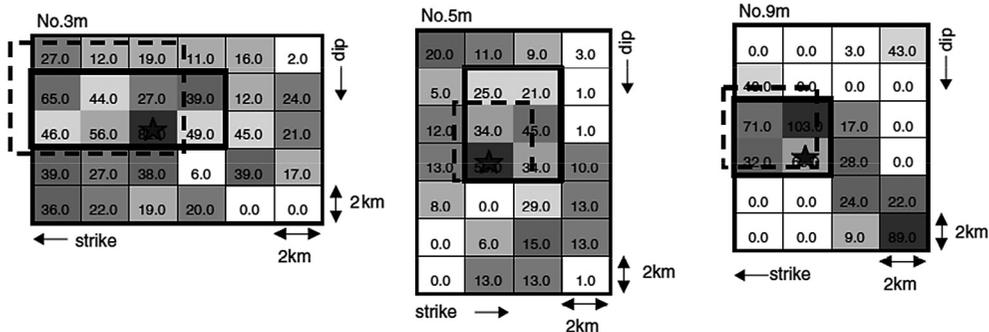


図5 いくつかのイベントに対するアスペリティ領域と強震動生成領域の比較。黒実線の矩形は, Somerville et al. (1999) の規範に基づくアスペリティ領域。点線の矩形は強震動生成領域。小矩形の中の数字は, サブ断層のすべり量 (cm) (Miyake et al., 2003)。

4. 地下構造モデル

理論的強震動予測には、震源域から予測を行う地点（地表）まで地震波が伝播してくる間の地殻の構造モデルを与える必要がある。特に堆積盆地など地震波の速度構造が急激に変化し、地殻構造に比して密度が小さく、地震波速度が小さい媒質においては、地震動が増幅されるため、精度の高い強震動予測には詳細な速度構造モデルが必要となる。また、主要動部分あたりの予測に限ると、震源域から予測地点への地震波経路に沿った領域のモデル化でよいが、巨大地震で震源域が大きい場合や、堆積盆地内で長い継続時間を持つ地震動を予測するには震源域及び盆地全体を含む広い領域のモデルが必要となる。

1995年兵庫県南部地震後に神戸阪神間で重点的に行われた人工震源を用いた堆積層構造探査は、2章で紹介した地震動の増幅的干渉をもたらし盆地端部効果を定量的に評価するためには必要不可欠であった。このような探査が、大都市圏が広がる石狩、仙台、関東、濃尾、大阪平野、京都盆地等で展開されるとともに、重力調査、微動アレイ探査、数少ないが大深度ボーリング調査など地球物理学的な調査が行われ、地震動の増幅に寄与する地下構造モデルの作成が進められた。詳細は瀧・三宅（2009）に詳しい。

探査自体は限られた領域や空間的に粗いサンプルにならざるをえないので、地下構造モデルはそれらの資料をもとにして、地質学的知見を取り入れながら外挿・内挿によって作成されている。ここで構築されている地下構造モデルの主目的は、強震動「予測」であるので、地下構造モデルによって観測地震動がうまく説明できるかどうか、というモデルの検証と改良が必要となる。Koketsu et al. (2009) は地球物理学的情報から作られた地下構造モデルの構築と強震観測点で観測された実地震記録を用いた検証方法についての手続きを整理し、関東平野を例としてその方法の適用を行っている。

地下構造モデルの構築と高度化は、これをすすめればすすめるだけ予測強震動の信頼性の向上や地震動特性の把握に役立つので、探査情報の共有

や検証に必要な不可欠な様々な機関で行われている強震観測データの流通を更に進めていくことが肝要といえる。

5. 強震動予測

上記のような特性化震源モデル及び地下構造モデルに基づいて、理論的な方法で強震動シミュレーションが行われる。約1秒より長周期側は決定論的な方法、短周期側は統計論的な方法によってシミュレーションされ、合成することによって強震動が作成されている（ハイブリッド法）。短周期側においては、地震波が伝播する地殻の速度構造の揺らぎに起因した地震波散乱現象が優位となり、確定論的なモデルの構築が困難であることを反映している。そのため、小断層から射出される地震波を、包絡形状と振幅スペクトルで記述し、ランダム位相を仮定して作成し、断層破壊や小断層の応力降下量等を考慮して波形計算を行う。実際の手続きに関しては、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）に記述されていて、この行程に従って震源モデルパラメータの設定から、強震動シミュレーションを行うこととなる。レシピを更に具体化した強震動予測手法については日本建築学会（2009）が詳しい。このような強震動予測手法の妥当性は、1995年兵庫県南部地震（入倉・他、2002）や2000年鳥取県西部地震（池田・他、2002）2003年十勝沖地震（森川・他、2005）2005年福岡県西方沖の地震（地震調査委員会、2008）など、経験した地震記録などの再現によって検証されている。

これらの強震動予測やシミュレーションを通じて震源モデル及び地下構造モデルにおいて高度化すべき点について記述する。現在構築されている特性化震源モデルは、地震被害に直結するフォワードディレクティビティパルスの再現と予測することを欠かさないようにすることを大前提としている。久田（2006）は強震動予測レシピに従って1994年ノースリッジ地震のいろいろな方向の強震記録の再現を試みると、破壊進展の後方側の観測点での地震動の再現性がよくないことを示した。また、アスペリティ面積/全体面積の比に関

しても、最近の解析事例において、中規模地震の観測記録をモデリングすることによってグリーン関数のチューニングを行った信頼性の高い地下構造モデルに基づいた震源インバージョンを行うと、経験式のバラツキの中ではあるが、アスペリティ面積/全体面積の比が小さくなる例が複数出てきている（例えば Asano and Iwata, 2006, 2009）。また、ここまでの議論は主として内陸地殻内地震に対してであったが、アスペリティと強震動生成領域の比較をプレート境界地震で行うと、空間的には強震動生成領域はアスペリティの中にはあるが、面積は強震動生成領域の方が小さいことが複数報告されている（Kamae and Kawabe (2004) による2003年十勝沖地震, Suzuki and Iwata (2007) による2005年宮城沖地震）。更には1994年三陸はるか沖地震のように、すべりの大きい領域の外で、短周期地震動が強烈に生成された事例もある（Nakahara et al., 1998）。これらは解析対象イベントの特性の可能性もあるが、次代の特性化震源モデルの構築の際には導入する必要があるかもしれない。渡辺・他（2008）は2003年十勝沖地震の強震記録を用いた震源インバージョン結果と、それをもとに特性化震源モデル化した場合の波形の特徴の変化を追い、破壊時刻やアスペリティ内のすべり時間関数の特性化が波形に大きく影響することから、予測時におけるそれらの不均質性の導入の重要性を指摘している。特性化震源モデル構築は、起きた地震の強震記録の分析によって得られた震源像と強震動の新たな特徴を踏まえて更新していく必要がある。

地下構造モデルの高度化については4. で述べたように、様々な地球物理学的な探査結果のみならず強震観測記録の再現性を確かめていくことで、「財産」となる観測地震動の説明能力がある地下構造モデルの構築をしていくことが必要である。地震本部で取り組まれている基盤観測等の維持・整備に加えて、後述するJ-SHISのようなウェブデータ公開システムの維持運営が不可欠である。

6. おわりにー地震調査研究推進本部の歩みと強震動予測研究ー

1. はじめに、でも述べたように1995年兵庫県南部地震以降に改革された地震調査研究に関する国の組織の変更を強震動予測の立場から改めて整理し、近未来での強震動研究についてのおわりとしたい。活断層が多く、また歴史的にも繰り返し地震が起きてきたことが明らかであるにもかかわらず、近代において南海地震などの他に被害地震が起きなかった関西圏において阪神・淡路大震災を被ってしまったことを契機にして、地震に関する調査研究の成果が国民や防災を担当する機関に十分に伝達され活用される体制になっていなかったという課題意識のもと、地震防災対策特別措置法に従って地震本部が作られた。この地震本部の「総合的かつ基本的な施策」において当面推進すべき地震調査研究の主要な課題として、全国を概観した地震動予測地図の作成を挙げた。この地図の作成のため、地震本部の下に作られた地震調査委員会の長期評価部会と強震動評価部会がおのこの地震発生の長期予測と強震動予測についての評価を行ってきた。

強震動予測においては「確率的地震動予測地図」と「震源断層を特定した地震動予測地図」がなされてきたが、後者の地震動予測地図作成においては、本稿3-5章で示したような震源モデルと地下構造モデルに基づく予測手法の整理と手法の検証、高度化が行われてきた。またこれらの取り組みの一環として、地震本部においては活断層に関する重点観測調査研究、地下構造調査が行われた。また、「新世紀重点研究創世プランーリサーチ・レボリューション・2002（RR2002）ー」の防災分野の委託事業として、大都市大震災軽減化特別プロジェクト（通称「大大特」）が平成14（2002）年度から5カ年行われ、このプロジェクトのサブテーマのひとつとして、地震動（強い揺れ）の予測「大都市圏地殻構造調査研究」が行われた。ここでは、関東及び京阪神地域において長測線の人工地震波探査が行われるとともに、地質学、測地学等の最新の知見によって地殻構造の調査研究が行われた。平成19（2007）年度からは首都直下に

おける地震発生の逼迫性とその被害予測をうけて、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトがはじまり、首都直下地震の首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等に関する研究が開始された。また、平成20(2008)年度からは東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト、ひずみ集中帯の重点的調査研究・観測プロジェクトが開始されている。これらは地震本部によって行われたプレート境界地震の長期評価や近年多発している被害を引き起こす地殻内地震などの活動評価に基づいて策定された重点的な調査研究であり、地震本部がイニシアティブをとって調査研究を推進していく仕組みが構築されているといえる。

地震本部は平成21(2009)年7月21日に全国地震動予測地図を公表した。この地図は国民の防災意識の向上や効果的な地震防災対策を検討する上での基礎資料として活用されることが期待されている。同時に、(独)防災科学技術研究所は「全国を概観した地震動予測地図」の公開システムの開発を実施し、「地震ハザードの共通情報基盤」として地震調査研究とその利用者を結ぶ双方向の情報交換の場として「地震ハザードステーションJ-SHIS」を構築している(防災科学技術研究所, 2009) こういった情報ウェブの形態といった、時代にマッチした情報公開とその利用法についての検討も含め、広く地震ハザードを理解してもらうための取り組みも進められている。

地震本部ではこれまでの10年間に比しての環境変化や地震調査研究の進展を踏まえて、「新たな地震調査研究の推進について」を策定し、平成21年4月21日に公表した(地震調査研究推進本部, 2009)。ここでは当面10年間に取り組むべき地震調査研究として、海溝型地震を対象とした調査観測研究による地震発生予測及び地震動・津波予測の高度化、活断層等に関する調査研究による情報の体系的収集・整理及び評価の高度化、そして防災・減災に向けた工学及び社会科学研究を促進するための橋渡し機能の強化、の項目が挙げられ、阪神・淡路大震災を契機にくみ上げられた地震の観測調査研究のさらなる推進をプロモートしてい

る。これらの地震ハザード評価の根幹をなしている長期予測と強震動予測の精緻化、高度化は重要な研究テーマであることには変わりはない。

現在の特性化震源モデルは、平均的な震源の不均質性を取り入れた震源像を与え、ディレクティブパルス波の生成を再現することができるモデルになっていることはわかっているが、5章の後半で述べたように、系統的な解析をすることによって、そのモデルの弱点も見えてきている。全国の地下構造モデルのプロトタイプが構築され、これの検証・改良を実地震記録で行っていくことにより、起きた地震の震源モデルの詳細なパラメータをふまえた特性化も更に進んでいくと考えられる。

ここでは、現在の特性化震源モデルが運動学的震源モデルに立脚していることから、その枠組みの中でのレビューをしてきた。本来、断層破壊現象は震源の物理に基づく動力的な枠組みの中でのモデルパラメータ化が行われるべきであるけれども、動力的パラメータの知見がまだ十分とは言えず、実用的なモデル構築の枠組みが構築されるには至っていない。現在は動力的な震源モデルを模した、擬似動的震源モデルによる地震動シミュレーションの取り組みなどがはじめられたところである(たとえば、Gattereri et al., 2004)。今後は高度化した地下構造モデルのもとで、発生した地震の詳細な震源モデルが求められることにより、断層面上の動力的パラメータを与えることができるようになることが期待される。

ここで述べてきた強震動予測では、震源モデル、地下構造モデルを与えると適切に予測ができる、ということを示してきたが、アスペリティの位置や破壊様式など、強震動分布を左右するパラメータについての議論はしてこなかった。地殻内地震については、起きた地震に対して地殻構造の不均質とアスペリティの対応が指摘されているが、事例を増やすことによって震源断層を特定した場合の将来発生する地震についての適切なアスペリティの設定について、拘束条件を与えられるようになる可能性もある。

謝 辞

本稿をまとめる機会を与えてくださった、自然災害科学編集委員会（三村衛委員長）に感謝いたします。本稿をまとめるに当たっては、岩田・三宅（2003）、岩田（2009）を参考にしました。

参考文献

- Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara, and Y. Okada: New strong motion observation network: KiK-net, *Eos Trans. AGU*, **81**, F863, 2000.
- Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura: Estimation of source rupture process and strong ground motion simulation of the 2002 Denali, Alaska, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 1701-1715, 2005.
- Asano, K. and T. Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth, Planets Space*, **58**, 93-98, 2006.
- Asano, K. and T. Iwata: Source rupture process of the 2004 Chuetsu, mid Niigata prefecture, Japan, earthquake inferred from waveform inversion with dense strong motion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **99**, 123-140, 2009.
- Boatwright, J.: The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 489-508, 1988.
- 壇 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，**545**，51-62，2001.
- Fujii, Y. and M. Matsu'ura: Regional difference in scaling laws for large earthquakes and its tectonic implication, *Pure and Applied Geophysics*, **157**, 2283-2302, 2000.
- Furumura, T. and K. Koketsu: Parallel 3-D simulation of ground motion for the 1995 Kobe earthquake: The component decomposition approach, *Pure and Applied Geophysics*, **157**, 2047-2062, 2000.
- Graves, R.W., and D.J. Wald: Resolution Analysis of Finite Fault Source Inversion Using 1D and 3 D Green's Functions 1. Strong Motions, *J. Geophys. Res.*, **106**, 8745-8766, 2001.
- Guatteri, M., P.M. Mai, and G.C. Beroza: A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 2051-2063, 2004.
- 平井俊之・釜江克宏・長沼敏彦・伊藤進一郎・西岡勉・入倉孝次郎：分岐断層の特性化震源モデルを用いた兵庫県南部地震の強震動シミュレーション，日本地震工学会論文集，第6巻，第3号，1～11，2006.
- Hartzell, S.H. and T.H. Heaton: Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1553-1583, 1983.
- 久田嘉章：震源アスペリティーと震源近傍の強震動特性，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，186-189，2006.
- Horikawa, H., K. Hirahara, Y. Umeda, M. Hashimoto, and F. Kusano: Simultaneous inversion of geodetic and strong-motion data for the source process of the Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 455-472, 1996.
- Ide, T., M. Takeo, and Y. Yoshida: Source process of the 1995 Kobe earthquake: determination of spatio-temporal slip distribution by Bayesian modeling, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 547-566, 1996.
- Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo*, 151-156, 1986.
- 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，**110**，849-875，2001.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵：予測のための震源のモデル化，月刊地球，号外37，62-77，2002.
- 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，**46B**，105-120，2003.
- Irikura, K.: Predicting strong ground motions with a "Recipe", *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **81**, 341-352, 2007.
- Iwata, T., K. Hatayama, H. Kawase, and K. Irikura: Site amplification of ground motions during aftershocks of the 1995 Hyogoken-nambu earthquake in severely damaged zone - Array observation of ground motions at Higashinada Ward, Kobe city, Japan - , *J. Phys. Earth*, **44**, 553-561, 1996.

- Iwata, T., H. Kawase, H. Sekiguchi, S. Matsushima, and K. Irikura: Strong motion data and geological structures distributed for Simultaneous Simulation for Kobe, *Proc. 2nd Int. Symp. on ESG*, Vol.3, 1295-1310, 1998.
- Iwata, T. and K. Asano: Characterization of heterogeneous source model of intraslab earthquakes toward strong ground motion prediction, *Pure and Applied Geophysics*, accepted, 2010.
- 岩田知孝: 震源近傍の強震動とそれを用いた震源過程の推定, *地震 2*, **44**, 315-328, 1991.
- 岩田知孝・三宅弘恵: シナリオ地震に基づく強震動予測の現状, *自然災害科学*, **22**, 229-231, 2003.
- 岩田知孝: 地震動と地盤構造, 1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究, *日本建築学会第23回地盤震動シンポジウム論文集*, 29-38, 1995.
- 岩田知孝: 大阪盆地の地下構造と地震動, 1995年兵庫県南部地震で試された地盤震動研究(2)-大阪平野について考える-, *日本建築学会第24回地盤震動シンポジウム論文集*, 5-20, 1996.
- 岩田知孝: 強震動予測のための特性化震源モデル, *地震 2*, **61**, S425-S431, 2009.
- 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.*, **88**, 400-412, 1998.
- Kamae, K. and H. Kawabe: Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake ($M_{\text{JMA}}=8.0$) estimated by the empirical Green's function method, *Earth, Planets Space*, **56**, 323-327, 2004.
- Kanamori, H. and D.L. Anderson: Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **65**, 1073-1095, 1975.
- 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.*, **67-5**, 25-34, 1996.
- Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seism. Res. Lett.*, **69**, 309-332, 1998.
- 額縁一起・三宅弘恵: 地下構造モデルと強震動シミュレーション, *地震 2*, **61**, S441-S453, 2009.
- Koketsu, K., H. Miyake, Afnimar, and Y. Tanaka: A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan, *Tectonophysics*, 472, 290-300, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.037, 2009.
- 松田時彦: 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, 1975.
- 松島信一・川瀬 博, 2000, 1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, **534**, 33-40.
- 松島信一・川瀬 博・佐藤俊明・R.W. Graves・P.G. Somerville: 神戸市域の三次元基盤速度構造の推定, *地震 2*, **55**, 129-141, 2002.
- 松島信一・川瀬 博 (2009). 1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価, *日本建築学会構造工学論文集*, **55B**, 537-543.
- Megawati, K., H. Higashihara and K. Koketsu: Derivation of near-source ground motions of the 1995 Kobe (Hyogo-ken Nanbu) earthquake from vibration records of the Akashi Kaikyo Bridge and its implications, *Engineering Structures*, **23**, 1256-1268, 2001.
- 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.*, **93**, 2531-2545, 2003.
- 日本建築学会: 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法, 164pp, 2009.
- Murotani, S., H. Miyake, and K. Koketsu: Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, **60**, 987-991, 2008.
- 森川信之・藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 謙・小林京子・大井昌弘・先名重樹・奥村直子: 2003年十勝沖地震の観測記録を用いた強震動予測手法の検証, *防災科学技術研究所研究資料*, 第303号, 149pp., 2007.
- Nakahara, H., T. Nishimura, H. Sato, and M. Ohtake: 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, 1998.
- Pitarka, A., K. Irikura, and T. Iwata: Modeling of ground motion in Higashinada (Kobe) area for an aftershock of the January 17, 1995, Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake, *Geophys. J. Int.*,

- 131, 231-239, 1997.
- Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and H. Sekiguchi: Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogoken-nanbu, Japan, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 428-440, 1998.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, and M. Hoshiya: Minute locationing 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**, 473-487, 1996.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, and T. Iwata: Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 117-133, 2000.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, and T. Iwata: Source inversion for estimating continuous slip distribution on the fault - Introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults-, *Geophys. J. Int.*, **150**, 377-391, 2002.
- Somerville, P.G., N. Smith, R. Graves, and N. Abrahamson: Modification of empirical strong motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seism. Res. Lett.*, **68**, 199-222, 1997.
- Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D.J. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kawagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, **70**, 59-80, 1999.
- Suzuki, W. and T. Iwata: Source model of the 2005 Miyagi-Oki, Japan, earthquake estimated from broadband strong motions, *Earth Planets Space*, **59**, 1155-1171, 2007.
- Wald, D.J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, **44**, 489-504, 1996.
- 渡辺基史・藤原広行・佐藤俊明・石井 透・早川 崇：断層破壊過程の複雑さが強震動予測結果に及ぼす影響とその支配的パラメータの抽出 - 2003年十勝沖地震に対する検討 -, *地震*, **60**, 253-265, 2008.
- Yamanaka, H. and S. Aoi: Estimation of basement depth along the Sumiyoshi river in Kobe City-Travel time analysis of P-, S-, and SP-waves from an earthquake array observation, *J. Phys. Earth*, **44**, 543-552, 1996.
- Yoshida, S., K. Koketsu, B. Shibazaki, T. Sagiya, T. Kato, and Y. Yoshida: 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, 1996.
- 地震調査委員会：2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について, http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_fukuoka/index.htm, 2008年4月11日.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm, 2009年3月5日.
- (投稿受理：平成22年3月9日)