

強震データの予測への利用法

Utilization of strong ground motion records for strong motion prediction

釜江克宏

Katsuhiko KAMAE

This paper presents a key role of ground motion records in predicting strong ground motion from a future large earthquake. Actual small event motions are available as green's functions including path effect due to realistic media as well as local site effect. A typical prediction technique using records is the empirical Green's function method (EGFM). Firstly, the effectiveness of the EGFM has mainly been shown through some simulation results for recent large earthquakes. Finally, the need of more investigations using available records have been pointed out in order to predict more realistic input motions.

Keywords : prediction techniques of strong ground motion, empirical Green's function, recent large earthquakes, simulation of ground motion

強震動予測手法、 経験的グリーン関数、 最近の大地震、 強震動評価

1. はじめに

地震時における地面の揺れ（地震動）を観測し、分析することによって我々は地震の本質や物理を学んできた。特にここ20～30年間で急速に進歩した震源過程の研究にも、観測網の整備によって近地の強震データ（以下断らない限り強震データとは地盤上や地中の観測記録のみを言う。）が使われる機会が多くなり、波形インバージョンにより詳細な震源での破壊過程が評価できるようになった。また、工学的には地震動が震源特性、伝播特性、局所的な地盤特性（サイト特性）の合積（コンボリューション）で表現されることから、それらの特性の地域性（有無も含め）の解明が重要であり、これまでの地盤震動に関する研究の多くがサイト特性の評価、次いで伝播特性の評価に傾注されてきた。このことはこれまでの建築学会の地盤震動シンポジウムのテーマを見ても明らかである。もちろんその多くが観測記録に基づいた検討である。一方、兵庫県南部地震以後、震源近傍地震動評価の重要性が再確認され、伝播特性やサイト特性に加え、震源での不均質な破壊過程の評価の重要性が指摘された。地盤震動に関する研究目的の一つが構造物の設計用入力地震動評価にあることは論を待たず、その評価過程で震源近傍も含めた強震データの果たす役割は大きい。特に強震動予測への利用として、地震動の最大振幅値の距離減衰式や応答スペクトル式などの提案は大きな成果である。また、より高精度な強震動予測手法の

開発も進み、断層モデルに基づいた広帯域、高精度強震動予測手法も提案され、既に一部実用に供せられている方法もある。ここでは、こうした強震動予測手法にどのように強震データが関わっているかを概観し、強震データを使った適用例を示す。さらに、強震動予測のより精度向上を目指すために残された課題について述べる。

2. 強震データと強震動予測との係わり

強震データが強震動予測に使われる最も一般的なのが地震動の最大加速度や最大速度の距離減衰式であり、これまでに数多くの研究者によって種々の経験式が提案されている¹⁾。兵庫県南部地震で観測された震源近傍域も含めた強震動の最大振幅も既存の距離減衰式で説明可能で、この地震が特殊な地震ではなかったとする報告もある²⁾。こうした経験式を使えば地震のマグニチュードと震源距離あるいは震央距離から想定される地震動の最大振幅値が予測できる。一般的な距離減衰式では地震を点震源として扱うため、これを大地震時における震源近傍域まで適用可能にするため、震源域の広がりが考慮できる等価震源距離を導入した式も提案されている³⁾。また、応答スペクトルに関する経験式も強震データを基に数多く提案されており、構造物の設計用標準スペクトルとして一般構造物はもとより、原子力施設などの設計に供せられている。冒頭で述べたように、地震動が震源特性、伝播特性、サイト特性を含んだ結果として

観測されることから、一般的には地盤種別のみで分類されていた距離減衰式が最近では震源特性や伝播特性の地域性なども考慮してその精度向上が図られている。ただし、これらの経験式から予測すべき強震動の最大振幅値やスペクトル形状は推定できるが、時刻歴波形を評価するためには何らかの方法で位相情報を与える必要がある。また、複雑な震源過程を反映した評価を行うためには、用いるパラメータが少ないため困難である。こうした欠点もある反面、少ないパラメータから地震動の最大振幅値が予測できることから、現在でも高精度化を目指した研究が行われ、後述する断層モデルに基づいた強震動予測結果の妥当性照査などにも用いられている。

次に断層モデルに基づいた強震動予測手法について概観し、強震データとの係わりについて述べる。現在、強震動予測手法としては前述した距離減衰式などを用いた経験的手法の他、理論的方法、半経験的方法、ハイブリッド法（ハイブリッドグリーン関数法も含む）があげられる。ここで強震データとの係わりが最も大きいのが半経験的方法で、経験的グリーン関数法がその代表的なものである⁴⁾。地震動を高精度で予測するためにはグリーン関数をいかに高精度に評価するかが重要な課題である。経験的グリーン関数法ではグリーン関数として中、小地震時の実地震動記録を用いるため、伝播特性や予測地点でのサイト特性を別途評価しなくて良いと言う優れた利点がある。次章で経験的グリーン関数法を用いた最近の大地震時の強震動シミュレーション結果を紹介するが、これらは経験的グリーン関数として大地震の震源近傍で発生した余震記録が用いられており、本震との震源メカニズムや伝播特性の違いが小さかったことが成功を収めた大きな要因であろう。言い換えれば、将来の大地震時の強震動予測にこの方法を適用するためには、適切な中、小地震時の観測記録を収集し、震源特性などによって特性化しておくことが重要である。兵庫県南部地震以後、K-net、Kik-net や震度計などが全国規模で設置され、公的なデータとして一般に公開されるようになったため、構造物の設計用地震動評価にこの方法が適用できる可能性が高くなったと考えられる。

経験的グリーン関数法の適切な中、小地震記録が予測対象地点で必要であるという欠点を補うために提案されたのが統計的グリーン関数法⁵⁾であり、より実用性は高い。この方法では直接強震データを必要とはしないが、伝播特性やサイト特性は何らかの方法で評価する必要がある。強震データを使った震源特性、伝播特性、サイト特性の分離手法⁶⁾による地域的な Q 値や地盤增幅特性の評価は一つの方法であろう。ただし、グリーン関数としてランダムな位相を持つ統計的シミュレーション波形を用いるため、盆地構造などの不整形性を有する基盤、地盤構造による 2 次元あるいは 3 次元的な伝播特性や表面波などの後続波を評価で

きないのが欠点である。

最後に経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法の欠点を補うべく提案されたのがハイブリッド法^{7),8)}である。この方法では、長周期地震動が複雑な伝播媒質をモデル化し、有限要素法や有限差分法などを使って理論的に計算され、一方短周期地震動は統計的グリーン関数法を使って計算される。得られた地震動はお互い有効な周期領域でフィルター処理され、最終的に両者が時間軸で足し合わされ、広帯域強震動が合成される。長周期地震動については理論的に計算されるため、複雑な伝播媒質の影響や表面波なども評価でき、強震動予測手法として現時点で最も期待される。この方法の精度向上のためには、今後盆地や平野での複雑な波動場における 2 次元あるいは 3 次元的な影響を強震データを用いて検討していく必要がある。以上のように、強震データは将来の大地震時における精度の高い強震動予測を実現する上で非常に利用価値が高く、今後とも積極的な観測網の充実が望まれる。

ここでは強震動予測への強震データの利用について議論を行ってきたため、主として地盤上や地中におけるデータを念頭においていた。私的な強震観測としては構造物の地震時挙動の解明を意図した構造物内での観測が主体となろうが、動的相互作用効果の定量化などが進めば構造物基礎部での強震データは強震動予測にも利用可能であろう。

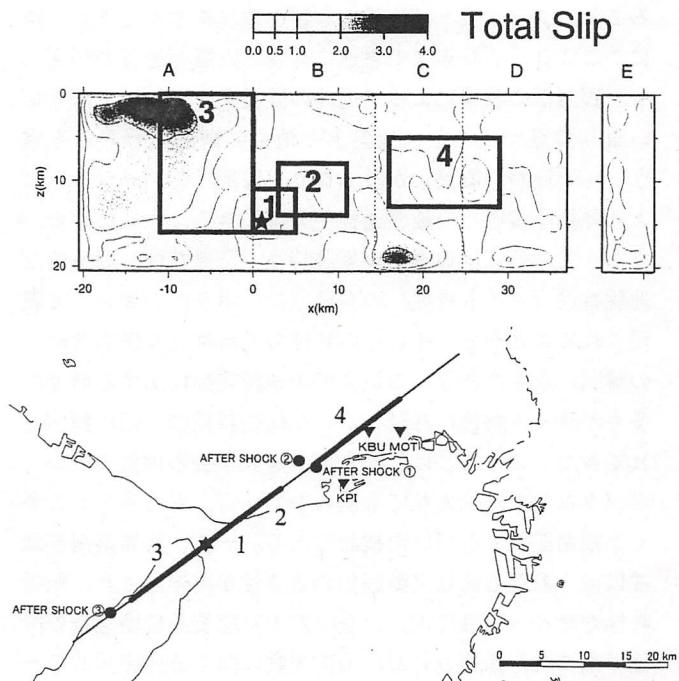


図 1 1995年兵庫県南部地震の 4 つのアスペリティからなる震源モデル（上）と断層面の地表トレース、観測点位置及び経験的グリーン関数として用いた余震の震央位置：Asperity-1, 2, 4 については余震 2 を、Asperity-3 については余震 3 を用いた

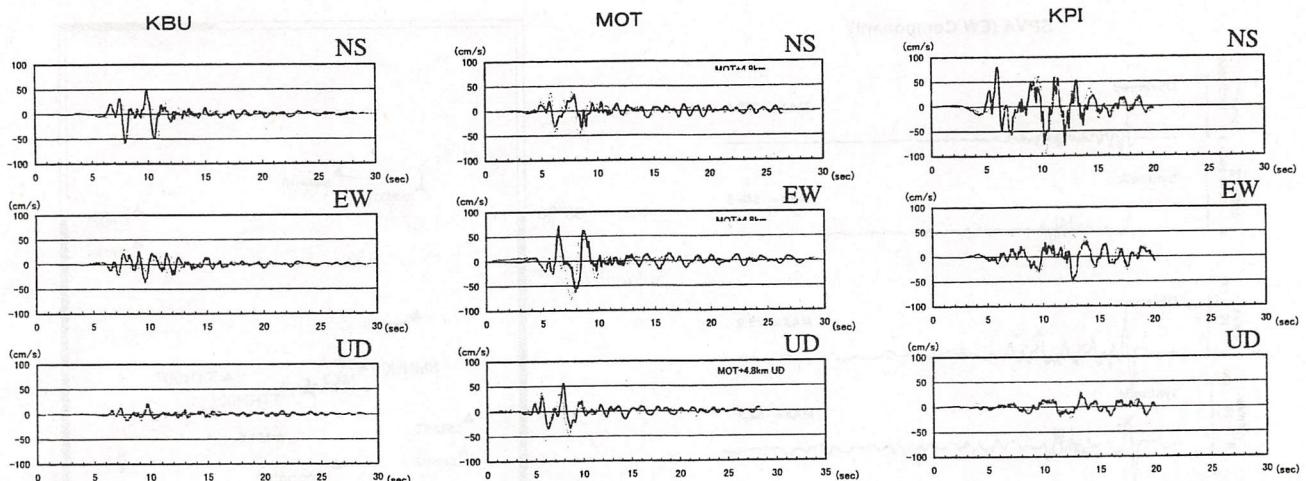


図2 3観測点における3成分の合成結果と観測結果との速度波形での比較
較、KPIは地下-80mの記録である。観測波形—実線、合成波形—点線

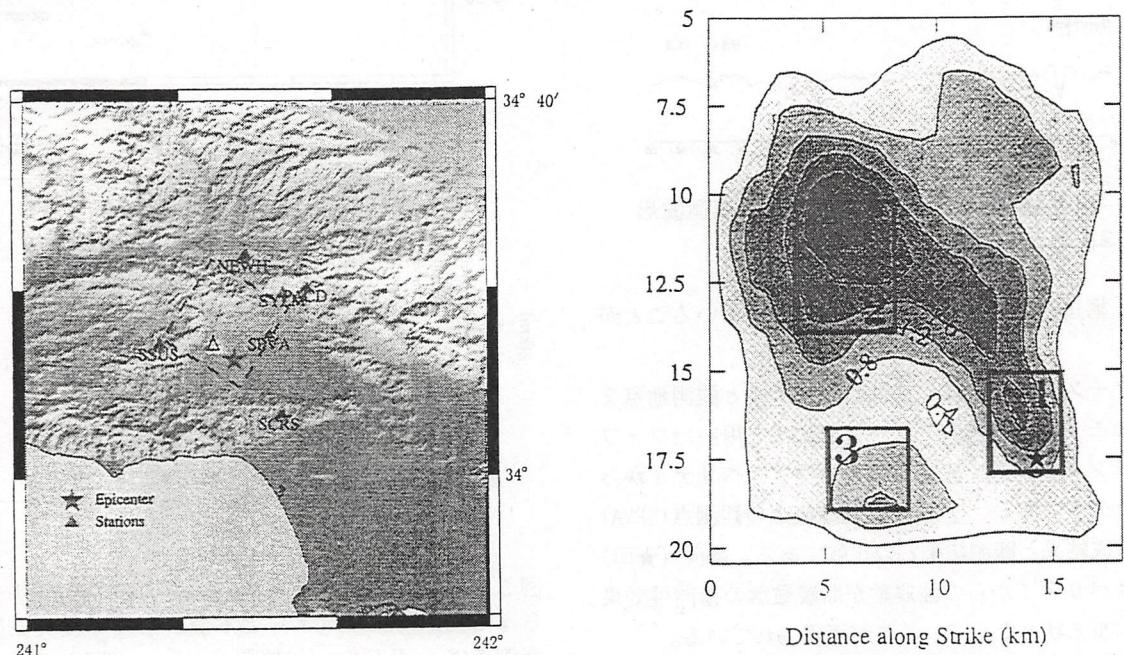


図3 1994年ノースリッジ地震の3つのアスペリティからなる震源モデル（右）と断層面の位置、本震震央位置（★）、経験的グリーン関数として用いた余震の震央位置（△）及び観測点位置（左）

3. 経験的グリーン関数法の適用例

前述したように強震データを直接利用した予測手法の代表的なものは経験的グリーン関数法である。この方法について既に一般化されており、ここでの詳細な方法論の記述は割愛し、いくつかの地震のシミュレーションへの適用例を紹介する。なお、詳細は参考文献に譲りここでは結果のみを示す。なお、この方法についても将来の地震時の強震動予測に適用するには残された課題もあり、次章にまとめて議論する。

図1には兵庫県南部地震の震源断層モデルと観測地点を示す。このモデルは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提案した3つのアスペリティからなる震源モデル⁹⁾を修正したものである¹⁰⁾。図2には震源近傍の神戸大学(KBU)、本山(MOT)、ポートアイランド(KPI)

観測点における合成結果と観測結果との比較を示した。図には上下動の結果についても示されている。兵庫県南部地震では断層破壊の指向性効果による大振幅速度パルス波の生成が特徴的であり、大被害の原因となったことが指摘されている。断層破壊が考慮でき、伝播特性やサイト特性が自ずと含まれる経験的グリーン関数法によって、高い精度で観測記録がシミュレートできることがわかる。兵庫県南部地震のように平野端部に存在する活断層によって発生した地震で、しかも複雑な破壊過程を有する地震への経験的グリーン関数の適用に際しては、グリーン関数として用いる余震の発生場所やメカニズムの違いが合成結果に与える影響は大きく、余震の選別に注意を要する。この方法によって構築された震源モデルと適切な余震記録を用いれば、本震記録の存在しない激震地での本震時の強震動が再現可

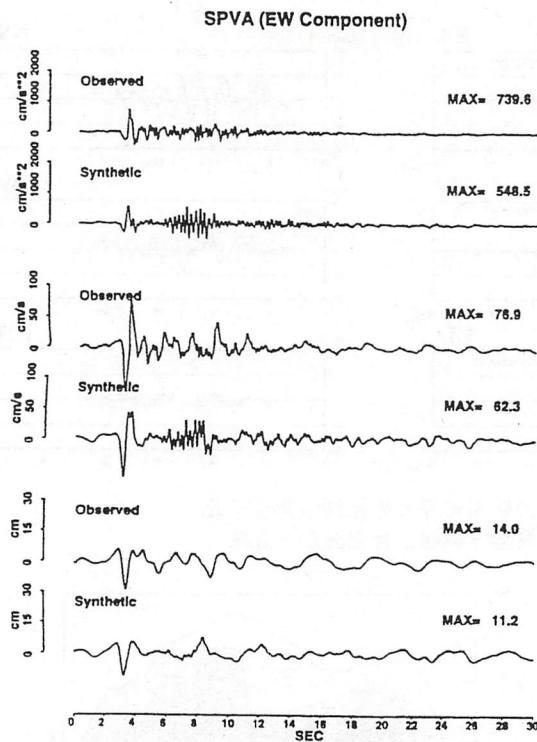


図4 SPVA観測点におけるE W成分の観測波形と合成波形との比較

能であり、構造物の被害指標などの検討にも用いることができる。

図3はノースリッジ地震の震源断層モデルと観測地点を示す。このモデルは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提案した3つのアスペリティからなる震源モデルである¹¹⁾。図4は震源直上の観測点(SPVA)における合成結果と観測結果との比較である。震源(★印)近傍のアスペリティからの強震動が断層破壊の指向性効果によってパルス状となっているのが再現されている。

図5は最近発生した鳥取県西部地震の震源断層モデルと観測地点を示す。このモデルは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提案した2つのアスペリティからなる震源モデルである¹²⁾。こうした研究はK-netやKik-netなどの公的な観測網による記録が地震発生後速やかに公開されることにより可能となるもので、関係機関や関係者にこの場を借りて敬意を表したい。波形合成は図5に示す4箇所の震源近傍観測点(SMNH01, TTRH02, TTR007, TTR009)で実施した。これらはほぼ震源断層を取り囲んでおり、震源モデルを拘束する上での初期解析としては十分であろう。図6には結果の例として、TTRH02とTTR009での速度波形での観測記録との比較を示す。合成結果にはやや高周波数成分が見られるものの、両観測点とも波形の一一致度は良い。現時点の計算では震源放射特性の違いやfmaxの違いなどを考慮していないため、2つのアスペリティの応力降下量についての最終結論は得ていないものの、60~80

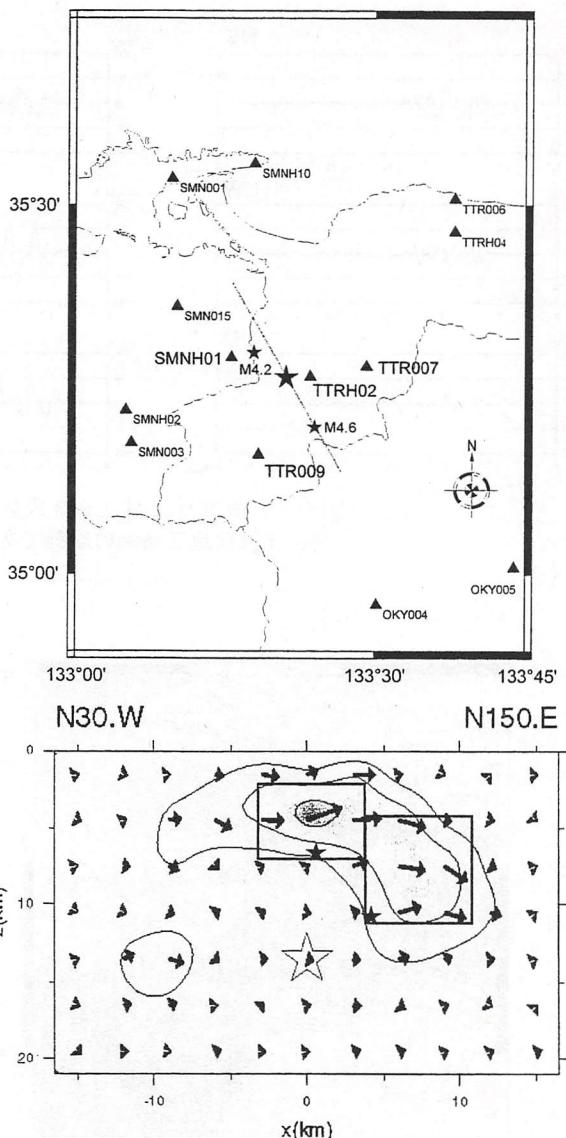


図5 2000年鳥取県西部地震の2つのアスペリティからなる震源モデル(下)と本震、余震の震央位置及び観測点(K-net及びKik-net)位置(上)、下図のスリップ分布は岩田・関口によるインバージョン結果

bars程度と推定される。このように応力降下量がアスペリティ内で小さかったことの一つの理由は、図5でも明らかのように、両アスペリティとも浅かったためと考えられる。

以上、経験的グリーン関数法の適用例を簡単に紹介した。兵庫県南部地震以後、活断層を発生源とする内陸地震時の強震動予測の重要性が指摘され、活断層調査や大都市圏での地下構造調査が国の主導により精力的に実施されている。また、それらの結果に基づき数年後には地震動予測地図の作製も計画されており、高精度で広帯域な強震動予測手法の開発も急務である。ここ数年の間に強震観測点の数は目を見張る勢いで増加し、これまで以上に強震データが蓄積されている。こうしたデータは地盤震動に関する研究に大きな役割を果たすとともに、ここで述べたように将来の大震時の強震動予測にも利用可能である。

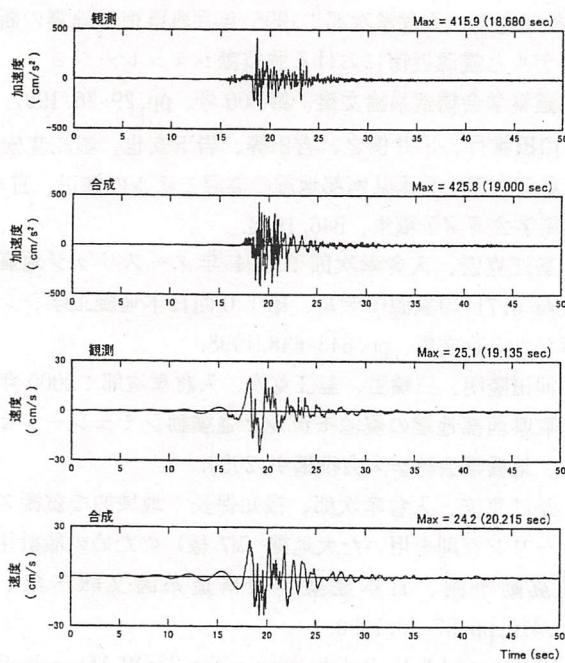


図 6-1 Kik-net観測点(TTRH02)のEW成分における観測波形と合成波形との比較

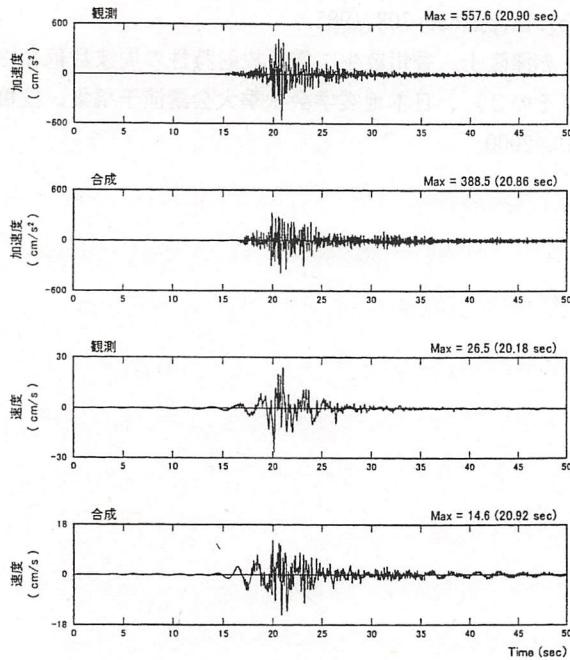


図 6-2 K-net観測点(TTR009)のNS成分における観測波形と合成波形との比較

4. 強震データを予測に利用する場合の課題

経験的グリーン関数法を構造物の設計を目的として、将来の地震時の強震動予測に使おうとした時、建設地点と中、小地震記録が得られている地点とがどの程度まで距離が離れていても問題がないかと言う質問をよく受ける。もちろん、距離の違いやサイト特性の違いは何らかの方法で補正することは可能である。また、大地震の断層面の広がりを考えれば、各小断層からの減衰の違いや震源放射特性の違いは容易に理解され、グリーン関数として1個の地震記録

を使おうとすると何らかの補正が必要となる。その補正方法については既に提案されている¹³⁾が、その有効性の検証については強震観測網の不足などから十分に行われていなかった。その1つが震源放射特性の影響である。震源放射特性についてはその周波数依存性が観測記録によって既に指摘されており¹⁴⁾、また、兵庫県南部地震で大振幅速度パルス波を生成させた1つの要因でもあり、強震動予測にとっては重要な特性である。最近K-netやKik-netの整備により、震源を取り巻く観測点で広帯域な記録が得られるようになり、関連する研究が精力的に行われるようになった。その1例を図7に示す¹⁵⁾。この結果はKik-netによって得られた強震データを用いて得られたものである。長周期地震動では理論的な震源放射特性を示すが、短周期地震動では等方的になることを明瞭に示している。今後、こうした研究成果を基に震源放射特性の周波数依存性を強震動予測手法に反映する必要がある。さらに、工学的に重要な短周期地震動の評価に影響する高周波遮断周波数(fmax)の定量化が急務である。既に関連する研究は行われているが、地盤上で観測された強震データから直接fmaxを抽出することが困難なため、表層の影響が少ない地中での観測記録(Kik-netなど)を用いた検討が急務である。これらの特性把握は経験的グリーン関数法のみならず、統計的グリーン関数法やハイブリッド法における接続周期近傍での高精度化を図る上で重要である。

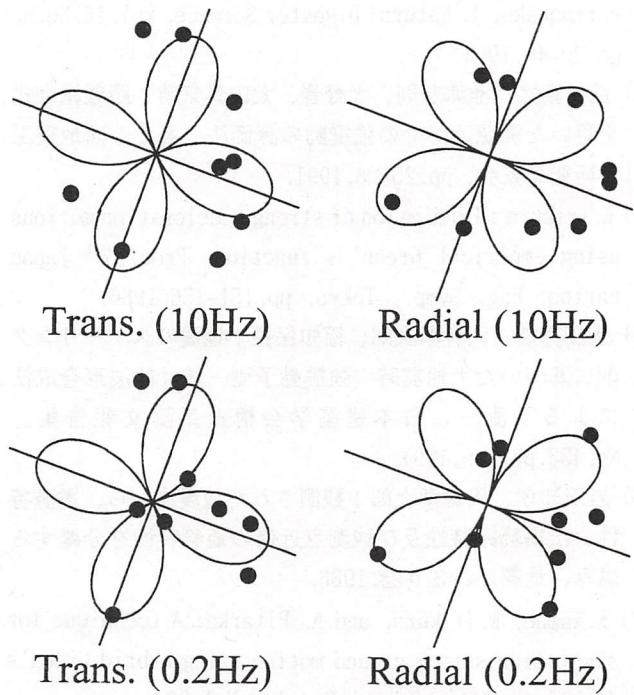


図 7 Kik-net観測点における記録から得られた震源放射特性の周波数依存性(赤澤・香川,2000)

5. おわりに

強震データの予測への利用法と題して現時点における予測手法に強震データがどのように係わっているかを簡単に紹介した。特に断層モデルを用い、強震データを直接的に利用する手法に限定し、いくつかの適用例を示すとともに、今後の課題についても論じた。ここでは筆者が得た結果のみを紹介したが、これ以外にも数多くの研究者による適用例や問題点の指摘などがあることを附記しておく。最後に、強震観測には多大の労力と経費が必要であるが、得られる強震データは数多くの情報を我々に与えてくれるとともに、強震動予測の高精度化にとっても必要不可欠であることを強調し結びとしたい。

謝辞

鳥取県西部地震のシミュレーションでは、科学技術庁防災科学技術研究所により提供されている K-net 及び Kiknet の記録を使用させていただきました。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) Y. Fukushima and T. Tanaka : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 80, pp. 757-783, 1990.
- 2) K. Irikura and Y. Fukushima : Attenuation characteristics of peak amplitude in the Hyogoken-nambu earthquake, J. Natural Disaster Science, Vol. 16, No. 3, pp. 39-46, 1995.
- 3) 武村雅之、池浦友則、大野晋、太田外気晴：距離減衰式を用いた震源近傍での強震動の評価法、第 21 回地震工学研究発表会、pp. 25-28, 1991.
- 4) K. Irikura : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo, pp. 151-156, 1986.
- 5) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測－統計的波形合成法による予測－、日本建築学会構造系論文報告集、No. 430, pp. 1-9, 1991.
- 6) 岩田知孝、入倉孝次郎：観測された地震波から、震源特性、伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み、地震 2、39 卷, 1986.
- 7) K. Kamae, K. Irikura, and A. Pitarka: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 88, No. 2, pp. 357-367, 1998.
- 8) 入倉孝次郎、釜江克宏：1948 年福井地震の強震動－ハイブリッド法による広周期帶域強震動の再現－、地震 2, 52 卷, pp. 129-150, 1999.
- 9) 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) 山田雅行、平井俊之、吉田等、岩下友也、釜江克宏、入倉孝次郎：兵庫県南部地震の震源モデルの修正、日本地震学会講演予稿集、B46, 1998.
- 11) 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論文集、pp. 643-648, 1998.
- 12) 池田隆明、三輪滋、釜江克宏、入倉孝次郎：2000 年鳥取県西部地震の震源モデルと強震動シミュレーション、地震学会秋季大会投稿中, 2000.
- 13) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：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報告集、No. 416, pp. 57-70, 1990.
- 14) Liu, H. and D.V. Helmberger : The 23:19 Aftershock of the October 1979 Imperial Valley earthquake ; more evidence for an asperity, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75, pp. 689-708, 1985.
- 15) 赤澤隆士、香川敬生：震源放射特性の周波数依存性（その 2）、日本地震学会秋季大会講演予稿集、投稿中、2000.