

日本内陸で発生する浅い地震に関する 震源スペクトルの相似性についての考察

泉谷恭男¹

¹正会員 理博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1)

将来の大地震に対する強震動予測の際には、地震の相似性が仮定されることが多い。地震の相似性が成立しているとする、短周期震源スペクトル強度は地震モーメントの1/3乗に比例することが期待される。鳥取県西部地域、鹿児島県北西部地域、および宮城県北部地域で発生した地震について、K-NETとKiK-netの強震記録を解析して、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。その結果、これらの地震群については地震の相似性が厳密には成立していないことが明らかになった。規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、応力降下量一定の ω^2 モデルから期待されるよりも多くの短周期波動エネルギーを放出している。

Key Words : source spectrum, similarity, seismic moment, seismic energy, K-NET, KiK-net

1. はじめに

Aki¹⁾によって提案された所謂 ω^2 モデルは、地震の震源スペクトルを表現するために最も広く用いられているモデルであろう。変位に関する震源スペクトルの長周期極限(周波数0Hz)におけるスペクトル強度は地震モーメント M_0 に相当する。震源スペクトルは、コーナー周波数 f_0 よりも低い周波数帯ではフラットで、それよりも高い周波数帯では ω^{-2} に従って減衰する。

Aki¹⁾の ω^2 モデルにおいては地震の相似性(断層の広がりに関するパラメータとすべり量に関するパラメータが大小地震間で相似)が仮定されている。更に、断層破壊伝播速度や断層のすべり速度といった速度の次元を有するパラメータは地震の大きさによらず一定と仮定されている。その結果、 f_0 は $M_0^{-1/3}$ に比例することになり、短周期震源スペクトル強度は $M_0^{1/3}$ に比例することになる。即ち相似性の仮定により、震源スペクトルは M_0 というたった一つのパラメータで表現されることになる。

地震の震源スペクトルの平均像として、Aki¹⁾の ω^2 モデルが有用であることは多くの観測結果によって支持されている(例えば、Kanamori and Anderson²⁾)。そのため、想定地震についての強震動予測を行う際には大地震の断層要素毎に応力降下量を変化させて地震波動を計算し合成されることが多いが、その場合にも、断層全体からの地震波のスペクトルに関しては、相似性が成り立つとの仮定に基づいて行われるのが一般的である(例えば、入倉・三宅³⁾)。

しかし M_0 というのは震源の静的な性質を表すパラ

メータである。その静的なパラメータのみで震源断層のすべりに伴う地震波の放出という動的な現象を全て説明するには無理があると考えられることもまた自然であろう(例えば、Kanamori and Heaton⁴⁾)。見かけ上はちよつとした相似性の破れであっても、それが大地震と小地震の断層面上での物理現象の非常に大きな違いに起因する可能性も考えられる⁵⁾。

ところで、観測された地震動データを解析して震源のことについて調べるためには、先ず伝播経路での減衰や観測点近傍での地盤による影響を取り除かなければならない。これは非常に困難な仕事である。例えば震源から離れた地点では、震源から放出された短周期波動エネルギーのうちのほんの僅かの部分を観測しているに過ぎない。従って、伝播経路での減衰をどの様に仮定して補正を施すかによって、結果が大きく左右されてしまう。この困難さが、地震の相似性についての議論を長い間曖昧なものにしてきた。

近年、K-NET⁶⁾やKiK-net⁷⁾によって従来よりも広帯域・広ダイナミックレンジの加速度記録が大量に供給されるようになり、震源近くの記録を使って短周期震源スペクトルについて調べることが可能になってきた。伝播経路特性や観測点特性についても、データをうまく組み合わせることによって信頼性高く補正することが出来るようになり、地震の相似性についてもきちんと調べ直す環境が整ってきた。

本研究は、K-NETとKiK-netのデータを解析することによって短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べ、震源モデル等に依存しない純粋な観測事実として、地震の相似性がどの程度厳密

表-1 各地震群中の最大地震の諸元

Event	Date	Time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M	M_0 (Nm)	M_w
Kagoshima	1997/03/26	17:31	31.97	130.36	12	6.5	1.40×10^{18}	6.1
Tottori	2000/10/06	13:30	35.28	133.35	11	7.3	8.62×10^{18}	6.6
Miyagi	2003/07/26	07:13	38.40	141.17	12	6.2	1.53×10^{18}	6.1

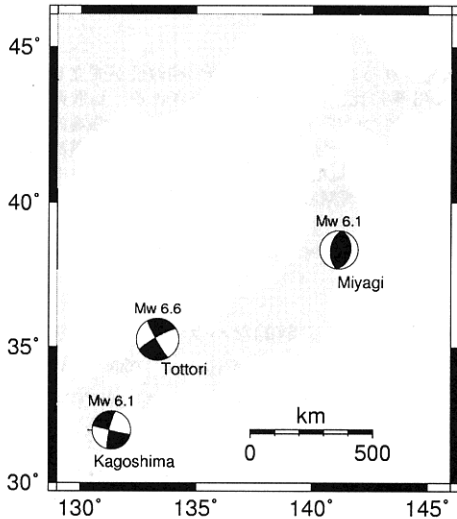


図-1 各地震群中の最大地震の震央と発震機構

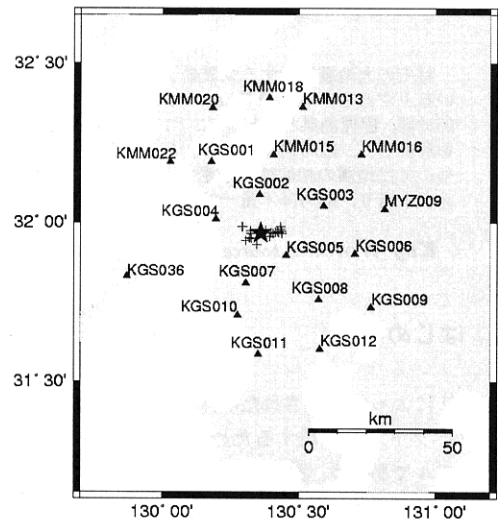


図-2 震央と観測点 (鹿児島県北西部)

に成立しているのかを確かめようとするものである。

2. データおよび解析

1997年鹿児島県北西部地震、2000年鳥取県西部地震、および2003年宮城県北部地震が発生した地域では、 $M_w = 4 \sim 6$ クラスの地震の記録が多数得られている。これらの各地震群中の M_w が最大の地震についての震源情報(震源時、震源位置、 M については気象庁、 M_0 と M_w については防災科学技術研究所F-net⁸⁾による)を表-1に示す。解析対象とした地震は、鹿児島県北西部ではモーメントマグニチュード $M_w = 3.6 \sim 6.1$ の20個、鳥取県西部では $M_w = 3.3 \sim 6.6$ の46個、宮城県北部では $M_w = 3.6 \sim 6.1$ の17個である。震源位置が互いに近い地震が選ばれている。これらの地震はどれも震源深さが約10kmの浅い地震である。

各地震群中の最大地震の震央位置とF-netによる発震機構解を図-1に示す。鹿児島県北西部と鳥取県西部の地震は横ずれ断層型、宮城県北部のものは逆断層型のメカニズムを示す。各地震群に属する地震はどれも

最大地震とよく似た発震機構解を持っている。

震源域を取り囲んで、震央距離が約50km以内のK-NETとKiK-net観測点での記録を用いる。図-2、図-3および図-4に、各地震群の震央(星印:最大の地震、十字:その他の地震)と観測点位置(黒三角)が示されている。これらの図から分るように、観測点は震央域をうまく取り囲むように分布している。

S波に関する震源スペクトルに注目するために、水平動の加速度記録(NS成分、EW成分)をtransverse成分の記録に変換する。transverse成分の記録においてはP波振幅に比べてS波振幅が非常に大きいため、S波部分の切り出し等の操作は行わなかった。その後、各観測点の記録についてスペクトル比(最大地震/他の地震)をとる。スペクトル比をとる各地震ペアについての震源間の距離が伝播経路の長さに較べて小さいことから、この操作によって伝播経路での減衰の影響と観測点近傍での地盤の影響が除去されたものとみなす。この方法は所謂「経験的グリーン関数法^{9),10)}」と呼ばれているものと同じ原理である。

また、各地震ペアについて、震央域を取り囲む観測点

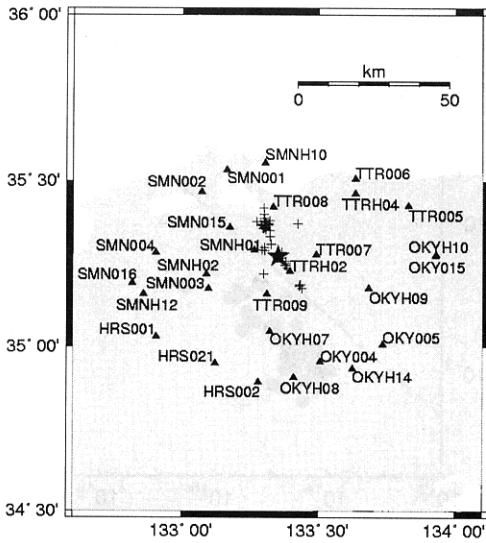


図-3 震央と観測点 (鳥取県西部)

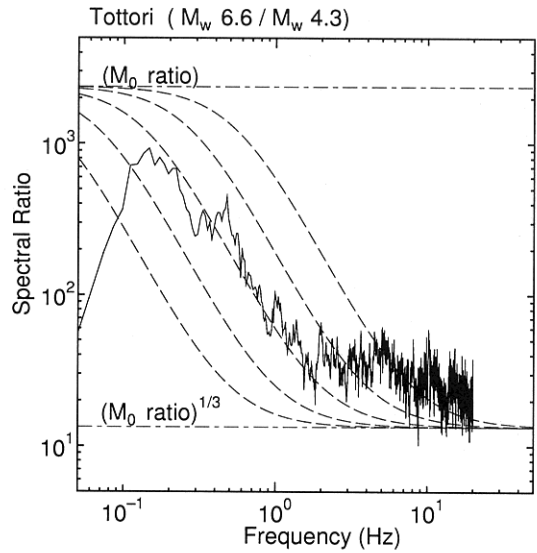


図-5 観測された震源スペクトル比の一例

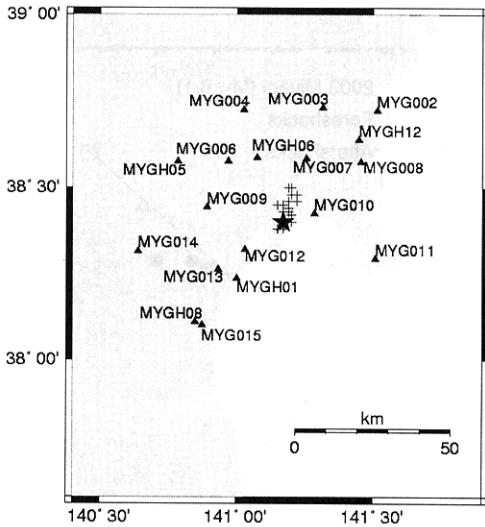


図-4 震央と観測点 (宮城県北部)

での $0.05\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$ のスペクトル比を、対数値について算術平均する。記録の得られている観測点数が 10 未満の地震や、記録の得られている観測点分布に空間的な偏りがある地震は、最初の段階で除外されている。各地震ペアの震源位置は厳密には同じではない。また、発震機構解も完全に同じとは言えない。震源位置が少し異なることに起因する伝播経路での減衰の影響の違い、放射パターンや断層破壊進行の影響の違い等がこの平均操作によって除去されるものとみなす。

ところで、震央に非常に近い観測点の記録については、地盤の非線形挙動の影響のために、スペクトル比を取るることによる地盤の影響の除去に不安がある。そのため、地盤の非線形挙動の影響が大きいと考えられる観測点 (具体的には鳥取県西部地震に関する TTRH02 と SMNH01) を除いた場合についても同様の検討を行った。多くの観測点でのスペクトル比を平均化したものを用いているため、これらの観測点を除いた場合についても、最終的な結果はほとんど変化しなかった。以下においては、これらの観測点を除いた場合についての結果を示している。

以上の操作の結果、得られたスペクトル比は震源スペクトル比を表すことになる。得られた震源スペクトル比の一例を図-5に示す。実線は観測された震源スペクトル比、2本の点線は、この地震ペアについての M_0 の比と M_0 の比の $1/3$ 乗の値を示している。ここで、 M_0 の値は F-net によって求められた値を用いた。破線は応力降下量一定の ω^2 モデルから期待されるスペクトル比 (コーナー周波数を 5 通りに変化させた場合) である。

震源スペクトル比は、大きい方の地震の f_0 よりも低い周波数帯で M_0 の比に漸近することが期待されるが、観測された震源スペクトル比は 0.2Hz 付近から周波数が低くなるとともに減少している。一般に、加速度記録には低周波ノイズが含まれ、記録の振幅が小さい場合にはノイズの影響が大きく現れる。図-5に見られる低周波数帯域でのスペクトル比の減少は、小さい方の地震記録 (スペクトル比をとる際の分母) に含まれる

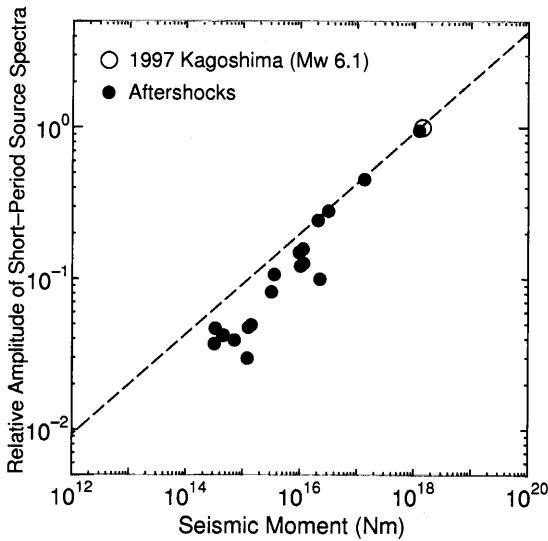


図-6 相対的な短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係（鹿児島県北西部）

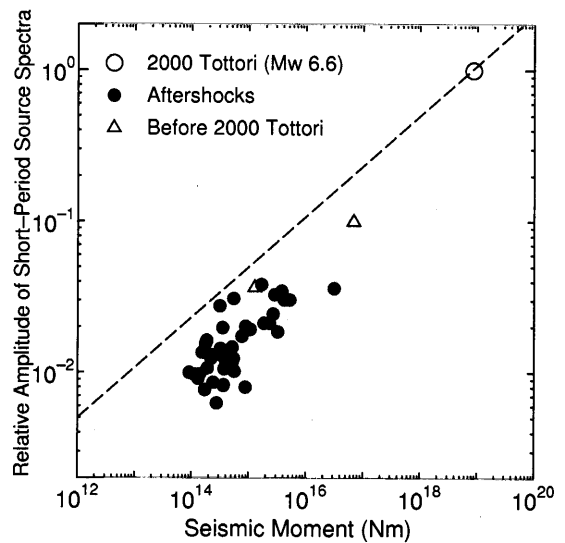


図-7 相対的な短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係（鳥取県西部）

低周波ノイズのせいであると考えられる。

本研究で注目するのは、比較的高い周波数帯域（10Hz 周辺）でのスペクトル比である。このあたりの周波数帯域は小さい地震の f_0 よりも高い周波数帯域と考えられる。したがって、もし2つの地震の間に相似性が成立しているとする、震源スペクトル比は M_0 の比の $1/3$ 乗になることが期待される。しかしながら図-5の震源スペクトルの比はそれよりもかなり大きい。このことは、2つの地震間には相似性は成り立っておらず、大きい方の地震の短周期震源スペクトルが相似性から期待されるものよりも大きすぎる、又は、小さい方の地震の短周期震源スペクトルが小さすぎることを意味している。

3. 結果

図-6から図-8に、3つの地震群に関する短周期震源スペクトル強度の相対値を M_0 に対してプロットした。図中の白丸は各地震群中の最大地震に関するもので、その短周期震源スペクトル強度を1.0としている。黒丸は最大地震発生以降の地震（余震）のものであり、白三角は最大地震以前に発生した地震（前震、または、最大地震発生前の数年以内に発生した地震）のものである。また破線は、各地震群中の地震間に相似性があつた場合に期待される短周期震源スペクトル強度の相対値（この値は $M_0^{1/3}$ に比例する）を示している。

最大地震以前に発生した地震と以降に発生した地震

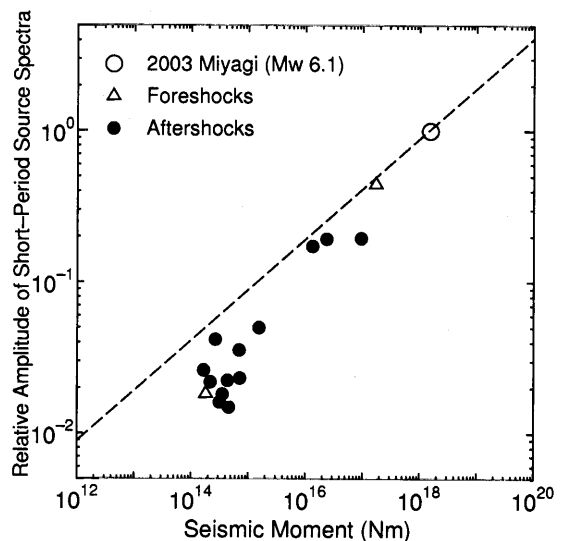


図-8 相対的な短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係（宮城県北部）

に関する結果の間に、明確な違いは認められない。また、発震機構や発生地域の違いにもかかわらず、3つの地震群についての結果は良く似ている。

M_0 について偏りがあるものの、少なくとも M_0 にして 10^{17} Nm よりも小さい地震に関するプロットが、例外なく破線よりも下方に位置することが、3つの地震群について共通に見られる。このことは、各地震群中

の最大地震の短周期震源スペクトル強度を基準とした場合、小さい地震の短周期震源スペクトル強度は地震の相似性から期待されるものよりも小さいことを意味する。即ち、規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、応力降下量一定の ω^2 モデルから期待されるよりも多くの短周期波動エネルギーを放出しており、相似性は厳密には成立していない。従って、もし小さい地震の短周期震源スペクトル強度の観測値を用いて、地震の相似性を仮定して大きい地震の短周期震源スペクトル強度を予想しようとする、過小評価になってしまう。

4. 考察

大地震と小地震の震源の物理的性質の間には根本的な違いがあるのか、それとも地震間には相似性が成立しているのかは、未解決の興味深い問題である。

地震学の分野では、地震記録から推定可能な2つのマクロな震源パラメータである地震波動エネルギーと地震モーメントについて調べることによって、この問題が議論されることが多い。例えば、地震波動エネルギーと地震モーメントの比が地震の大きさとともに増加するという研究結果がある(例えば、Kanamori et al.¹¹⁾, Mayeda and Walter¹²⁾, Izutani and Kanamori¹³⁾)。これは大地震ほど単位モーメント当り多くの波動エネルギーを放出することを意味し、本研究の結果と調和的である。即ち、大地震と小地震の震源の物理的性質の違いがあることを示唆している⁵⁾。

これとは逆に、地震波動エネルギーと地震モーメントの比は地震の大きさによらず一定であるという報告もある(例えば、Ide and Beroza¹⁴⁾)。地震波動エネルギーと地震モーメントの比が地震の大きさとともに増加するように見えるのは、地震計の記録できる周波数帯域の限界や波動伝播経路における減衰の補正の不適切さから生じる見かけの現象に過ぎないという主張である。

一方、地震工学の分野においては、経験的グリーン関数法によって小地震記録を重ね合わせて大地震記録を合成するという試みが非常に多く行われてきた。Irikura and Kamae¹⁵⁾は、地震の相似性を仮定して大地震記録を合成すると短周期エネルギーが不足してしまうことを解決するために、「応力降下量の比」というパラメータを導入した。これは、 ω^2 モデル的な相似性を仮定して合成作業を行う前に小地震の震源スペクトルを、大地震の応力降下量と同じ応力降下量を持つ場合に期待される震源スペクトルに変換するためのパラメータである。また原田ほか¹⁶⁾や大角ほか¹⁷⁾も小地震の短周期スペクトルを補正するための独自のパラメータを導入

している。これらのパラメータは、その物理的な意味は明確ではないが、大地震と小地震との間に相似性が成立していないことを補正するために導入されたものと解釈できる。

また、短周期地震動励起能力を直接調べた研究として、岩手県沖や能登半島沖で発生した地震に関するJMA87型の地震記録を使って調べられた例がある¹⁸⁾。データの質や観測点配置等が本研究で扱ったものに較べるとかなり劣るため信頼性は必ずしも高くはないものの、本研究と同様の結果が得られている。また北海道や東北地方周辺で発生するやや深発地震についての短周期地震動励起能力についても調べられている^{19),20)}。それらの結果を見ると、短周期地震動の励起能力は必ずしも地震の相似性から期待されるようにはなっておらず、大きい地震ほど励起能力が大きい。この結果は本研究で得られた浅い地震の場合と非常に良く似ており、このような相似性からの外れが普遍的なものである可能性も示唆される。

本研究結果と整合する研究結果がある一方で、短周期震源スペクトル強度は地震モーメントの1/3乗に比例しており、かなり広いモーメント範囲にわたって地震の相似性が成立しているという研究成果も発表されている²¹⁾。しかしこれは、多くの地震についての結果の、大きくばらついているうちの平均をとったものであり、個別の地震群に着目した場合の本研究結果と必ずしも矛盾するものではないと考えられる。

平均的な傾向としての相似性が成立するものの、個別地震群について着目した場合には相似性が破れているように見えることには、どのような物理的な意味があるであろうか。このことをきちんと理解することは、将来の大地震に伴う強震動を予測するためにも重要である。この問題の解決にはまだ時間がかかるであろうが、本研究のように観測事実を積み上げていくことが大切であろう。

5. まとめ

鳥取県西部地域、鹿児島県北西部地域、および宮城県北部地域で発生した地震について、K-NETとKiK-netの強震記録を解析して、短周期震源スペクトル強度と地震モーメントの関係について調べた。その結果、これらの地震群については地震の相似性が厳密には成立していないことが明らかになった。規模の大きい地震の方が、単位モーメント当り、応力降下量一定の ω^2 モデルから期待されるよりも多くの短周期波動エネルギーを放出している。

もちろんこの結論はここで解析した3つの地震群(日本内陸で発生する浅い地震)について、また限られた

範囲 ($M_w = 3.3 \sim 6.6$) の規模の地震についての結果である。地震の相似性が「おおまかに」成立していることを否定するものではないし、「おおまかな相似性」が実用的な強震動予測のために役立っていることは間違いない。しかし、観測された小地震記録から大地震記録を合成する場合には、完全な相似性の仮定に頼りきらずに、震源スペクトルについて適切な補正を施す必要があることが、改めて確認された。

謝辞: 科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET, Kik-net および F-net のデータを使用させていただきました。本研究は文部科学省による「大都市大震災軽減化特別プロジェクト: I 地震動 (強い揺れ) の予測 (大都市圏地殻構造調査研究)」の一環として行われた。また、文部科学省科学研究費 (課題番号 14550477) の補助を受けたことにも感謝します。

参考文献

- 1) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 2) Kanamori, H. and Anderson, D. L.: Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.65, pp.1073-1095, 1975.
- 3) 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, No.37, pp.62-77, 2002.
- 4) Kanamori, H. and Heaton, T. H.: Microscopic and macroscopic physics of earthquakes, in *GeoComplexity and Physics of Earthquakes*, AGU Geophys. Mono. 120, edited by J. B. Rundle, D. L. Turcotte, and W. Klein, pp.147-163, American Geophysical Union, Washington, D. C., 2000.
- 5) Kanamori, H. and Rivera, L.: Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, in press.
- 6) 防災科学技術研究所: K-NET のホームページ (<http://www.k-net.bosai.go.jp/>).
- 7) 防災科学技術研究所: KiK-net のホームページ (<http://www.kik.bosai.go.jp/>).
- 8) 防災科学技術研究所: F-net のホームページ (<http://www.fnet.bosai.go.jp/>).
- 9) Hartzell, S. H.: Earthquakes aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.5, pp.1-4, 1978.

- 10) Hough, S. E.: Empirical Green's function analysis of recent moderate events in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.91, pp.456-467, 2001.
- 11) Kanamori, H., Hauksson, E., Hutton, L. K. and Jones, L. M.: Determination of earthquake energy release and ML using TERRAScope, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.83, pp.330-346, 1993.
- 12) Mayeda, K. and Walter, W. R.: Moment, energy, stress drop, and source spectra of western United States earthquakes from regional coda envelopes, *J. Geophys. Res.*, Vol.101, pp.11,195-11,208, 1996.
- 13) Izutani, Y. and Kanamori, H.: Scale dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp.4007-4010, 2001.
- 14) Ide, S. and Beroza, G. C.: Does apparent stress vary with earthquake size?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp.3349-3352, 2001.
- 15) Irikura, K. and Kamae, K.: Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *ANNALI DI GEOFISICA*, Vol.37, pp.25-47, 1994.
- 16) 原田隆典, 田中剛, 田村好文: 震源特性を考慮した地震動のシミュレーション手法, 土木学会論文報告集, 第 507 号/I-30, pp.209-217, 1995.
- 17) 大角恒雄, 原田隆典, 泉谷恭男: 確率論的グリーン関数を用いた強震動の波形合成法とその検証例による震源パラメータの考察, 応用力学論文集, Vol.1, pp.595-606, 1998.
- 18) Izutani, Y.: High-frequency source spectral ratio between large and small earthquakes, *Proc. 10th Japan Earthq. Eng. Symp.*, Vol.1, pp.697-702, 1998.
- 19) 池田孝, 武村雅之, 加藤研一: 強震記録に基づく北海道周辺のやや深発地震の高振動数成分の励起特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 560 号, pp.67-73, 2002.
- 20) 池田孝, 武村雅之, 加藤研一: 強震記録に基づく東北地方周辺のやや深発地震の高振動数成分の励起特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp.39-46, 2003.
- 21) 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, 第 545 号, pp.51-62, 2001.

(2004. 1. 26 受付)

A STUDY ON SIMILARITY OF SOURCE SPECTRA FOR SHALLOW EARTHQUAKES IN JAPAN

Yasuo IZUTANI

Similarity of earthquakes is generally assumed for the prediction of strong ground motion for future large earthquakes. If earthquakes are similar, it is expected that short-period source spectral amplitude is proportional to one-third power of the seismic moment. Strong motion records at K-NET and KiK-net stations are analyzed and relationship between short-period source spectral amplitude and seismic moment is examined. Similarity is not found for the earthquakes analyzed here. Larger earthquakes radiate short-period seismic energy more effectively than smaller ones.