

大地震と小地震による短周期地震動の スペクトル比について

泉谷恭男¹・柳原雅樹²

¹正会員 理博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380 長野市若里500番地)

²工修 信州大学大学院工学系研究科 (〒380 長野市若里500番地)

経験的グリーン関数法は将来の地震に伴う地震動予測のための最も有望な手法と見なされている。しかし、余震記録を用いて本震の際の地震動を再現するという研究は多く見られるものの、予測の試みはほとんど行われていない。この原因は、大小地震の震源過程の相違について予測する方法が確立されていないためである。

震源が互いに近い大地震と小地震の同一観測点での記録から求めた短周期地震動のスペクトル比は、応力降下量一定の ω^{-2} モデルを仮定した場合に対して大きくなる。即ち、 ω^{-2} モデルを仮定して、大地震記録の合成を行うと、短周期地震動が不足することになる。経験的グリーン関数法の実用化のためには、先ずスペクトル比を予測するための経験則を求めておく必要がある。

Key Words : strong ground motion, empirical Green's function method, source spectral ratio

1. はじめに

経験的グリーン関数法を用いて強震動予測を行うためには、将来の大地震の震源過程をモデル化する必要がある。長周期地震学の成果として、震源スペクトルの ω^{-2} モデル、断層パラメータの相似則などがあるが、それらがそのまま強震動に関係する短周期領域に当てはまるという保証はない。特に大地震の場合には、断層破壊過程が時空間的に均質であるとはとても考えにくい。むしろ断層破壊過程の不均質（破壊強度やくいちがい量の空間的な変化、くいちがい速度や破壊伝播速度の時間的な変化など）のために、 ω^{-2} モデルから外れていると考えるのが一般的であろう^{1)~5)}。

経験的グリーン関数法を用いて余震記録から本震記録を合成する際に、応力降下量一定の ω^{-2} モデルからのズレが考慮される場合もある。例えば、本震の応力降下量が余震のそれと違うことを考慮するためのパラメータ⁶⁾や、断層の破壊過程の不均質のせいで、短周期スペクトルが ω^{-2} モデルに比して大きくなることを表現するためのパラメータ^{7),8)}が導入されている。これらのパラメータの値は観測データから推定されているが、経験的グリーン関数法を本震記録の再現ではなく、将来の大地震に伴う強震動予測に用いるためには、それらの値を予測する手段が必要となる。

最近、短周期スペクトルレベルに基づくマグニチュード(m)が提案された⁹⁾。地震モーメントから定義されるマグニチュードが同じ地震であっても、 m がかなり異なる場合が見られる。これは、地震毎の応力降下量

の相違や、断層不均質の相違を反映しているのであろう。従って、 m は短周期地震動をスケールリングするために有効なパラメータである。しかし、短周期地震動は局所的な地盤の影響を強く受けており、個々の地震の震源スペクトルの絶対値について議論することは非常に困難である。

本研究においては、ごく近くに発生した2つの地震について同一観測点での地震動間でスペクトル比を取ることにより震源スペクトルの比を求め、大小地震間における震源スペクトルの相違について調べる。それに基づいて、短周期地震動予測に必要なパラメータの推定法について検討する。

2. 解析手法およびデータ

観測される地震動のスペクトル $O(f)$ は、震源スペクトル $S(f)$ が伝播経路での影響 $P(f)$ と観測点近傍の地盤での局所的な影響 $G(f)$ を受けた結果として

$$O(f) = S(f)P(f)G(f) \quad (1)$$

と表現される。ごく近くで発生した2つの地震について同一観測点での地震動のスペクトル比をとると、 $P(f)$ と $G(f)$ とが共通であることから、それは震源スペクトル $S(f)$ の比となる。厳密には、震源が点と見なせるような遠方でのデータを用いる必要がある。しかし遠方になると短周期地震動は振幅が小さくなってしまい、解析に用いることが出来ない。ここでは、それ程遠方

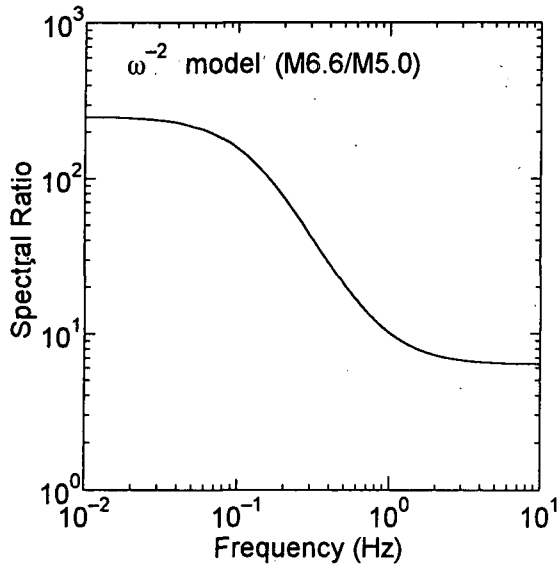


図-1 応力降下量一定の ω^{-2} モデルに基づいたスペクトル比。

でなくとも $O(f)$ の比が近似的に $S(f)$ の比を表すものと仮定する。また、発震機構の補正も必要であろうが、複数の観測点におけるスペクトル比の平均をとることによってその影響は相殺されると仮定する。

応力降下量一定の Brune⁹⁾ 型 ω^{-2} モデルによると、加速度震源スペクトルは

$$S(f) = CM_0 f^2 / [1 + (f/f_c)^2] \quad (2)$$

と表現される。ここで C は定数、 M_0 は地震モーメント、 f_c はコーナー周波数である。日本付近で発生する地震に関しては、

$$\log M_0 = 1.5M + 16.2 \quad (3)$$

$$\log f_c = 2.4 - 0.5M \quad (4)$$

という関係式が求められている¹⁰⁾。 M は気象庁マグニチュードである。式(2)~(4)を用いると、2つの地震のマグニチュードの差 M_D に応じたスペクトル比が得られる。図-1は式(2)~(4)により求められたスペクトル比の一例である。図の長周期部のスペクトル比 u_r と短周期部のスペクトル比 a_r は、

$$\log u_r = 1.5M_D \quad (5)$$

$$\log a_r = 0.5M_D \quad (6)$$

となる。観測されたスペクトル比をこれと比較することにより、 ω^{-2} モデルからのズレを表現するパラメータの値が得られる。

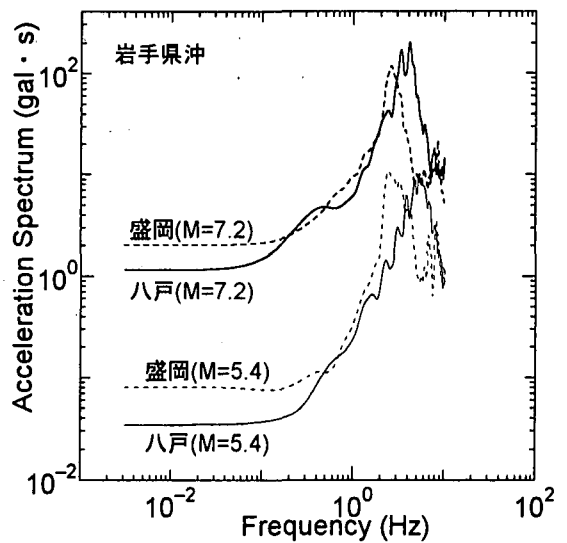


図-2 観測された強震動スペクトルの一例 (NS成分)。

使用したデータの概略を表-1に示す。これらの地震群は、その中で最大の地震の震央位置を中心として、緯度経度 $\pm 10'$ 以内に位置する地震からなる。これらの地震の記録のうち最大振幅が 3gal 以上の水平動成分を用い、最大 M の地震と、その地震群に属する他の地震とのスペクトル比を求める。

3. 解析結果

観測スペクトルの例を図-2に示す。かなり鋭いピークを有しており、そのピーク位置は観測点によって変化している。しかし、同じ観測点では地震が違ってもピーク位置は似ている。従って、短周期地震動が局所的な地盤の影響を強く受けていることが分かる。また、比較的低周波数帯のスペクトルはフラットになっており、そのレベルはピーク値に比較して非常に小さい。ノイズの影響を強く受けていることが懸念されるため、スペクトル比をとる周波数帯は 0.3 ~ 10 Hz とした。従って、短周期スペクトル比 a_r のみを扱う。

スペクトル比の例を図-3 ~ 図-6に示す。図中の実線は、その地震の組について求められた全てのスペクトル比を平均したものである。破線で示されたのは、応力降下量一定の ω^{-2} モデルを仮定した場合のスペクトル比であり、図-2に対応している。観測スペクトル比がモデルのスペクトル比を上回っている。短周期地震動スペクトル比の観測値 a_r としては、観測スペクトル比の、1 ~ 10 Hz の周波数帯における平均的なレベルを取ることにした。

図-7に短周期スペクトル比の常用対数 $\log a_r$ をマグニチュードの差 M_D に対してプロットした。この図には今回解析したデータの他に、1987年日向灘地震の

表-1 解析データ

| 地震群 | 期間 | 地震数 | 最大地震の M | 観測点数 | 解析記録数 | データの出典 |
|-------|-----------|-----|-----------|------|-------|--------|
| 岩手県沖 | 1989-1995 | 11 | 7.2 | 9 | 86 | JMA87型 |
| 能登半島沖 | 1993-1994 | 11 | 6.6 | 4 | 44 | JMA87型 |
| 国後島沖 | 1994 | 3 | 6.5 | 2 | 10 | JMA87型 |
| 日向灘 | 1996 | 3 | 6.6 | 22 | 126 | k-net |

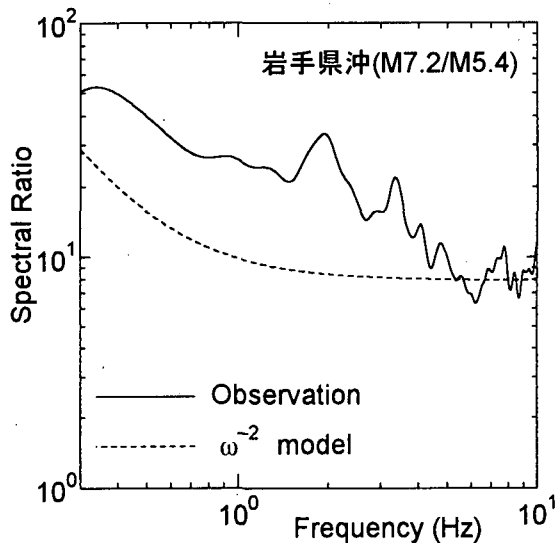


図-3 岩手県沖地震群の強震動スペクトル比の一例 (10 スペクトル比の平均)。

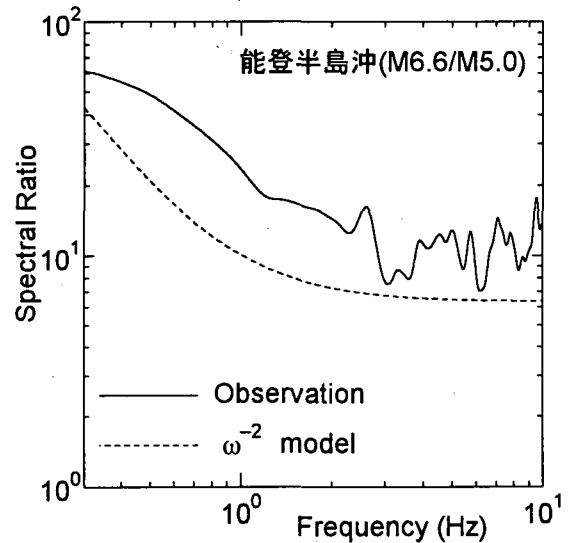


図-4 能登半島沖地震群の強震動スペクトル比の一例 (8 スペクトル比の平均)。

本震と余震のスペクトル比⁸⁾, 1993年北海道南西沖地震の本震と余震のスペクトル比¹²⁾, 1993年能登半島沖地震の本震と余震のスペクトル比^{13),14)}, 1995年兵庫県南部地震の本震と余震のスペクトル比¹⁵⁾ も含まれている。破線は式(6)である。全ての観測値が応力降下量一定の ω^{-2} モデルから期待されるスペクトル比を上回っている。

この結果は、大地震の方が小地震に比べて応力降下量が多い、大地震の断層面は不均質、小地震は断層面全体から地震波が放出されるが、大地震になると主に断層のうちの局所的な部分(アスペリティ)からのみ放出される、等の考え方^{1)~8)}と調和的である。

図-7の観測値は、応力降下量一定の ω^{-2} モデルから期待される値を、約3倍上回っている。この値は直ちに、経験的グリーン関数法によって強震動予測をする際に、短周期部分を持ち上げるためのパラメータ κ ¹⁶⁾として用いることができる。また、強震動予測を行う際に、断層全体に占めるアスペリティ面積の割合¹⁷⁾や大小地震間の応力降下量の違い⁶⁾を推定するための資料となるべきものである。

4. まとめ

震源が互いに近い大地震と小地震の同一観測点での記録から求めた短周期地震動のスペクトル比は、応力降下量一定の ω^{-2} モデルを仮定した場合に対して大きくなる。即ち、 ω^{-2} モデルを仮定して、大地震記録の合成を行うと、短周期地震動が不足することになる。経験的グリーン関数法の実用化のためには、更に多くのデータを解析し、スペクトル比を予測するための手法を確立する必要がある。

謝辞： 解析したデータは科学技術庁防災科学技術研究所 k-net および気象庁87型強震計によるものである。記して感謝します。

参考文献

- 1) Izutani, Y.: A statistical model for prediction of quasi-realistic strong ground motion, *J. Phys. Earth*, Vol.29, pp.537-557, 1981.
- 2) Gusev, A. A.: Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimate of short-period strong motion, *Geophys. J. R.*

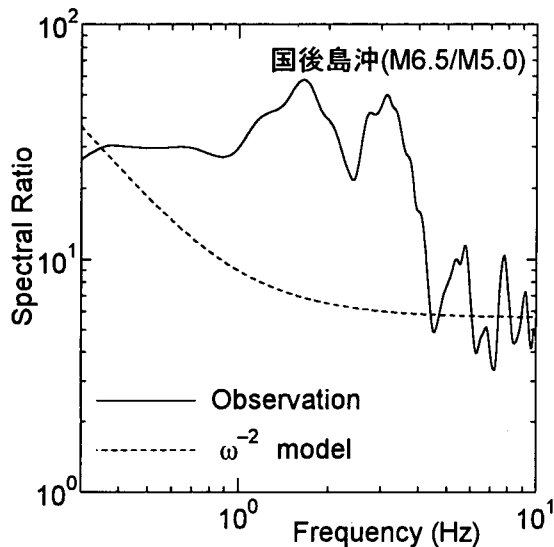


図-5 国後島沖地震群の強震動スペクトル比の一例 (4 スペクトル比の平均)。

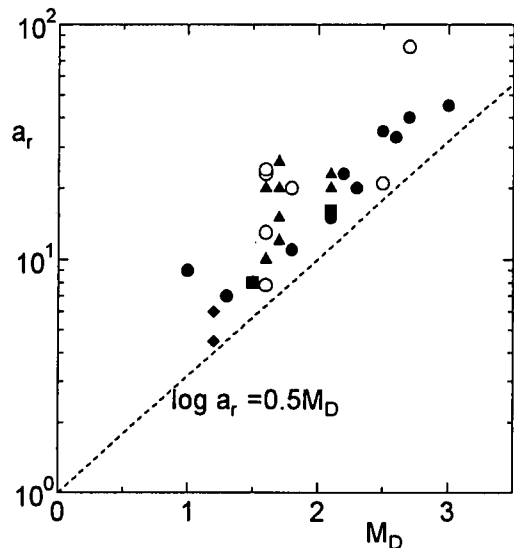


図-7 短周期スペクトル比 a_r とマグニチュード差 M_D の関係。●: 岩手県沖, ▲: 能登半島沖, ■: 国後島沖, ◆: 日向灘, ○: 文献^{8),12)~15)}。

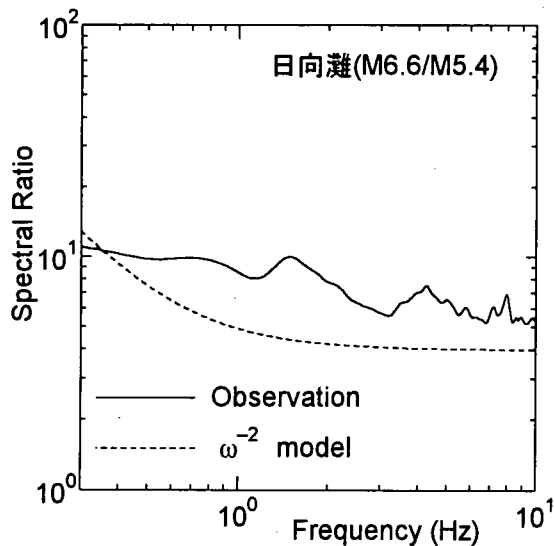


図-6 日向灘地震群の強震動スペクトル比の一例 (44 スペクトル比の平均)。

Astr. Soc., Vol.74, pp.787-808, 1983.

- 3) Papageorgiou, A. and Aki, K.: A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part I. Description of the model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.693-722, 1983.
- 4) 木下繁夫: f_{max} 周辺の話, 地震第2輯, Vol.41, pp.629-639, 1988.
- 5) 入倉孝次郎: 震源のモデル化と強震動予測, 地震第2輯, Vol.46, pp.495-512, 1994.
- 6) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th. Japan Earthq. Eng. Sym.*, pp.151-156, 1986.
- 7) Takemura, M. and Ikeura, T.: A semi-empirical

method using a hybrid of stochastic and deterministic fault models: Simulation of strong ground motion during large earthquakes, *J. Phys. Earth*, Vol.36, pp.89-106, 1988.

- 8) 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, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.209-217, 1995.
- 9) Atkinson, G. M. and Hanks, T. C.: A high-frequency magnitude scale, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, pp.825-833, 1995.
- 10) Brune, J. N.: Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 11) Sato, R.: Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude, *J. Phys. Earth*, Vol.27, pp.353-372, 1979.
- 12) 今西和俊, 池田音岩, 佐藤魂夫: 経験的グリーン関数法による1993年北海道南西沖地震の破壊過程, 地震第2輯, Vol.48, pp.365-373, 1995.
- 13) 榊井健, 武村雅之, 釜田正毅: 半経験的方法による1993年能登半島沖地震の強震動評価, 地震第2輯, Vol.47, pp.375-382, 1994.
- 14) 鶴来雅人, 田居優, 入倉孝次郎, 岡崎敦: 経験的グリーン関数重ね合わせ法の工学的適用に関する検討 — 1993年能登半島沖地震に対する適用性 —, 土木学会第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.153-156, 1995.
- 15) Kamae, K. and Irikura K.: A fault rupture model of the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake ($M_{JMA} = 7.2$) estimated by the empirical Green's function method, *Natural Disas. Sci.*, Vol.16, pp.31-40, 1995.
- 16) 原田隆典, 田中剛, 泉谷恭男, 大角恒雄: 確率論的グリーン関数法を用いた強震動の波形合成法, 土木学会論文集 (投稿中)。
- 17) Somerville, P. G., 入倉孝次郎, 澤田純男, 岩崎好規, 田居優, 伏見実: 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講演概要, pp.291-294, 1993.