

断層震源モデルにおける 位相スペクトル特性

澤田 純男¹・盛川 仁²・土岐 憲三³・小野 祐輔⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所地震災害研究部門 (〒611 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科修士課程土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

震源の相似則を表すモデルとして、オメガ・スクエア・モデルが良く知られているが、このモデルは振幅スペクトルに対して規定しているだけで、位相に関する相似則がどのようなものであるかは、ほとんど研究されていないのが現状である。そこで、本研究では、位相スペクトルにおける震源の相似則を調べ、このモデル化を試みる。解析方法として、位相特性を表現するのに群遅延時間を用い、大地震と小地震の関係を経験的グリーン関数重ね合わせ法である Irikura(1986)によって評価する。解析結果から、震源時間関数の平均、分散、ひずみ度および尖り度をパラメータとしてモデル化することができ、これらの値は震源のディレクティビティ効果によって大きく変化することがわかった。

Key Words: Phase spectrum, Fault rupture process, Directivity effect, Group delay time, Empirical Green's function summation method

1. はじめに

地震動特性の評価をおこなうのに、フーリエスペクトルがよく用いられるが、ほとんどの研究は振幅スペクトルのみについて議論しており、位相スペクトルについてはほとんど研究されていないのが現状である。本研究では地震動特性を形成する震源、伝播経路、地点特性のうち特に震源特性を取り上げ、大地震と小地震の関係、即ち相似則（スケーリング則）の位相特性について検討した。特に相似則のみを取り扱うのは、小地震の震源は震源時間が非常に短いことからインパルスとして近似的に扱うことができるので、相似則が明らかになれば大地震の震源の位相特性が明らかになるからである。相似則を表現するのに ω^{-2} （オメガスクエア）モデルに従う経験的グリーン関数重ね合わせ法である Irikura(1986)を用い、さらに位相スペクトルの表現法として群遅延時間を用いることにより、位相における相似モデルの構築を試みた。

2. 解析手法

本研究では、次式で示される Irikura(1986)¹⁾ による経験的グリーン関数重ね合わせ法を用いる。

$$U(t) = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{m=1}^{N_m} \frac{R_{lm}}{R_e} \frac{r_0}{r_{lm}} u(t - t_{lm}) + \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{(N_k-1)n'} \frac{R_{lm}}{R_e} \frac{r_0}{r_{lm}} \frac{1}{n'} u\left(t - t_{lm} - \frac{(k-1)\tau}{N_k n'}\right) \quad (1)$$

ここに、

$$t_{lm} = \frac{r_{lm} - r_0}{\beta} + \frac{\xi_{lm}}{V_r} \quad (2)$$

ただし、 $U(t), u(t)$ は、それぞれ大地震及び小地震の波形を表している。 R_{lm} は大地震の小領域(l, m)におけるラディエーションパターン係数、 R_e は小地震のラディエーションパターン係数である。 r_{lm} は小領域(l, m)と観測点との距離、 r_0 は小地震と観測点との距離を表す。また、 τ は大地震の立ち上がり時間、 β

はS波速度, V_r は破壊伝播速度, t_{lm} は破壊開始点と小領域(l, m)との距離, N_l , N_m , N_k はそれぞれ大地震と小地震の断層長さ, 幅, 立ち上がり時間の比である. n' は人工的な卓越周期を除去するための任意の整数である。(1)式を以下のように, 重ね合わせの効果を表す部分, すなわち重ね合わせの大きさとタイミングを表すインパルス列 $f(t)$ と小地震の観測記録 $u(t)$ との合積(*)の形に変形する.

$$U(t) = f(t) * u(t) \quad (3)$$

ここに,

$$f(t) = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{m=1}^{N_m} \frac{R_{lm}}{R_e} \frac{r_0}{r_{lm}} \delta(t - t_{lm}) + \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{(N_k-1)n'} \frac{R_{lm}}{R_e} \frac{r_0}{r_{lm}} \frac{1}{n'} \delta\left(t - t_{lm} - \frac{(k-1)\tau}{N_k n'}\right) \quad (4)$$

本論文では $f(t)$ について, その位相特性を検討する.

位相特性は, 位相角の周波数軸上の傾きである群遅延時間を用いて表現する. すなわち, $f(t)$ をフーリエ変換して, 振幅スペクトル $A(\omega)$ と位相スペクトル $\phi(\omega)$ で表現する.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = A(\omega) \exp[-i\omega\phi(\omega)] \quad (5)$$

群遅延時間スペクトル $t_{gr}(\omega)$ は次式で表される.

$$t_{gr}(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (6)$$

本研究では, さらに $t_{gr}(\omega)$ を平滑化することにより, 以下に示す平均群遅延時間スペクトル $\mu_{t_{gr}}(\omega)$ と分散群遅延時間スペクトル $\sigma_{t_{gr}}^2(\omega)$ を求め, これによって位相特性を評価することとする.

$$\mu_{t_{gr}}(\omega_0) = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} \frac{A(\omega)}{\mu_A(\omega)} W(\omega; \omega_0) \cdot t_{gr}(\omega) d\omega \quad (7)$$

$$\sigma_{t_{gr}}^2(\omega_0) = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} \frac{A(\omega)}{\mu_A(\omega)} W(\omega; \omega_0) \left(t_{gr}(\omega) - \mu_{t_{gr}}(\omega_0) \right)^2 d\omega \quad (8)$$

ここに,

$$S = \int_0^{\infty} W(\omega; \omega_0) \frac{A(\omega)}{\mu_A(\omega)} d\omega \quad (9)$$

$$\mu_A(\omega) = \frac{1}{S'} \int_0^{\infty} W(\omega; \omega_0) A(\omega) d\omega \quad (10)$$

$$S' = \int_0^{\infty} W(\omega; \omega_0) d\omega \quad (11)$$

$W(\omega; \omega_0)$ は平滑化のウィンドウ関数で, 1 自由度の応答関数を用いる.

$$W(\omega; \omega_0) = \begin{cases} \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{\left\{1 - (\omega/\omega_0)^2\right\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}} : (\omega/\omega_0 \leq 1) \\ \frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{\left\{1 - (\omega/\omega_0)^2\right\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}} : (\omega/\omega_0 > 1) \end{cases} \quad (12)$$

ここに, h は減衰定数で, 0.05 としている.

3. 解析モデル

仮定した断層モデルを図1に示す. また簡単のため観測点は十分に遠方にあるものとし, 距離減衰及びラディエーションパターンに関する補正は行わないものとする. 平均群遅延時間スペクトル (太線) と分散群遅延時間スペクトルにより求めた標準偏差 (細線) の例を図2(a), (b)に示す.

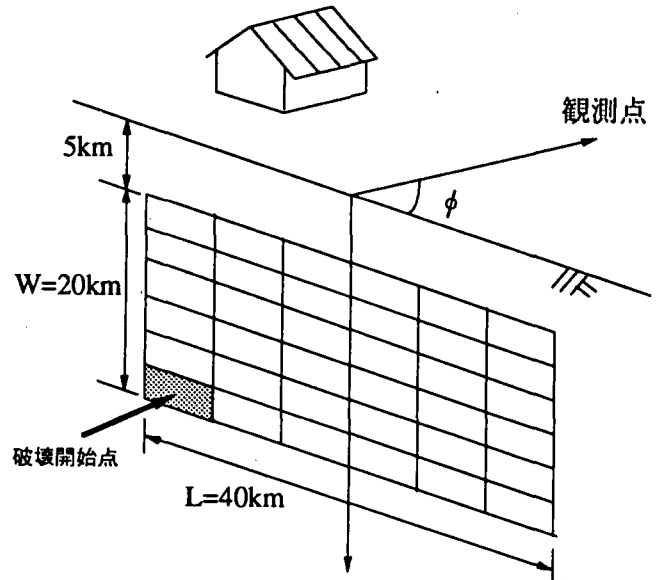


図1 断層モデル

4. 群遅延時間スペクトルのモデル化

断層面を破壊が伝播する方向と観測点方向とのなす角 ϕ を0から180°まで変化させて平均群遅延時間スペクトルを求めた結果、概形として図2(a), (b)のような2種類に分けられることが分かった。そこで、平均群遅延時間スペクトルに関して図3(a), (b)に示す2つの概形をもつとモデル化し、モデルのパラメータについてインパルス列の標準偏差 σ 、歪み度 S_k 、尖り度 k_k により規定することを試みた。

図3(a), (b)のモデルはインパルス列の歪み度 S_k の正負によって分けられる。また、どちらのモデルについても f_1 はインパルス列のフーリエ振幅スペクトルの長周期側のコーナー周波数と一致する。一方、 f_2 については一定の値となることが分かった。 f_3 , f_4

については、 $1/f_3$ 及び $1/f_4$ と ϕ の関係が図4のようになる。 f_5 については σ と $1/f_5$ の間に図5のような関係が認められた。 $t_{\max}^f$ は図4, $t_{\max}^l$ は図5によりそれぞれ ϕ と σ によって決めることができる。

次に、分散群遅延時間スペクトルの標準偏差のモデル化については、図6のような概形を持つものとする。図6の T_1 は図7から分かるようにインパルス列の標準偏差 σ とほぼ等しい。また、 T_2 については T_2/T_1 とインパルス列の尖り度 k_k との関係が図8のように得られた。

5. まとめ

本研究では、図1に示した断層モデルに基づき、Irikura(1986)による経験的グリーン関数重ね合わせ法を用いた際の位相スペクトルの震源特性について、群遅延時間スペクトルの概形をモデル化することに

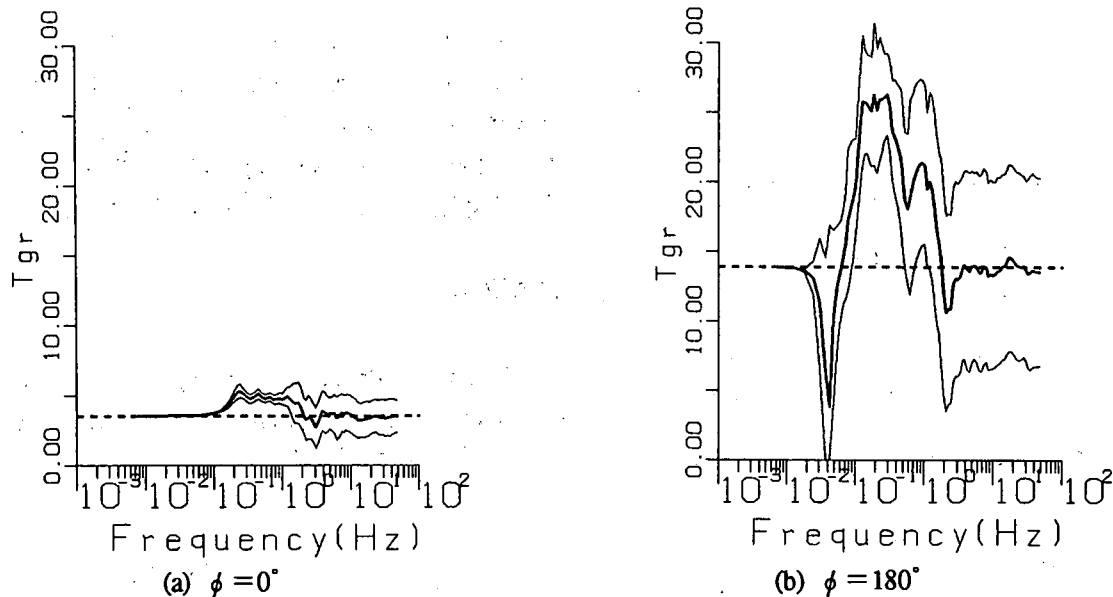


図2 平均群遅延時間スペクトルと標準偏差

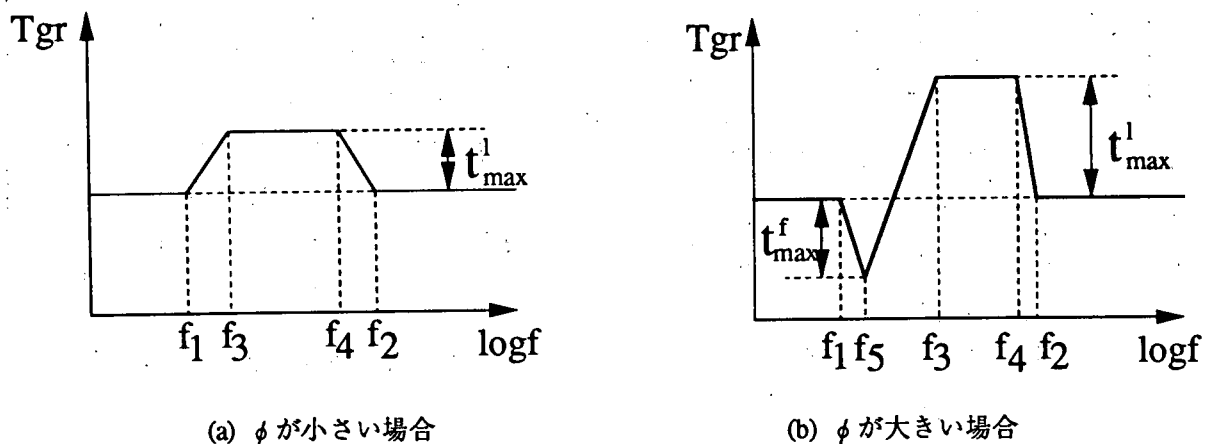


図3 平均群遅延時間スペクトルモデル

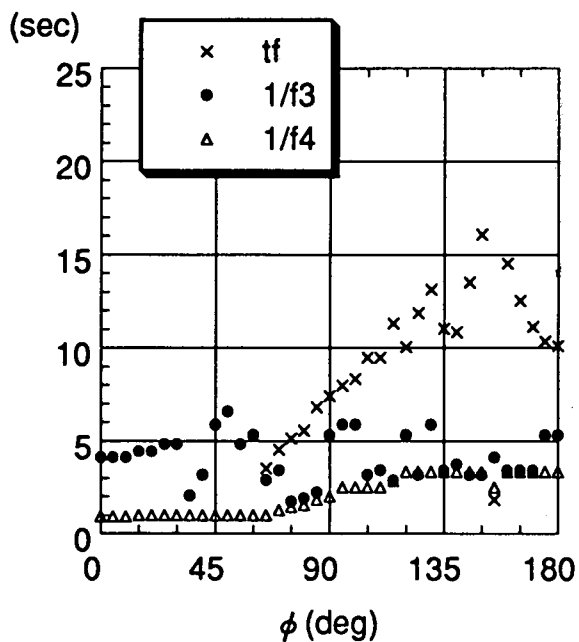


図4 $f_3, f_4, t_{\max}$ と ϕ の関係

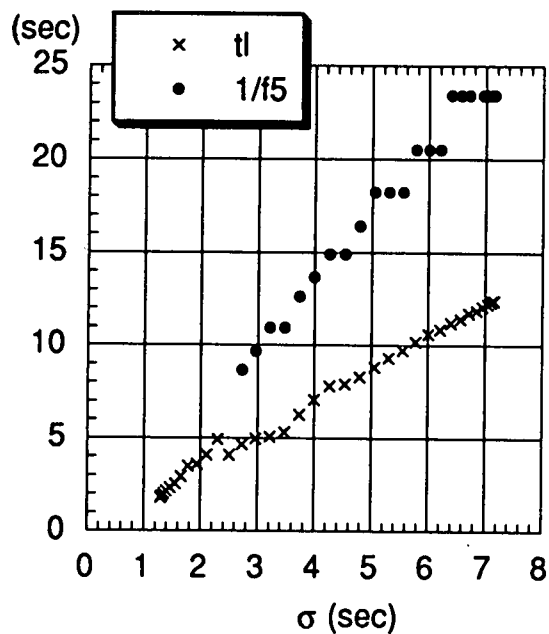


図5 $f_5, t_{\max}$ と σ の関係

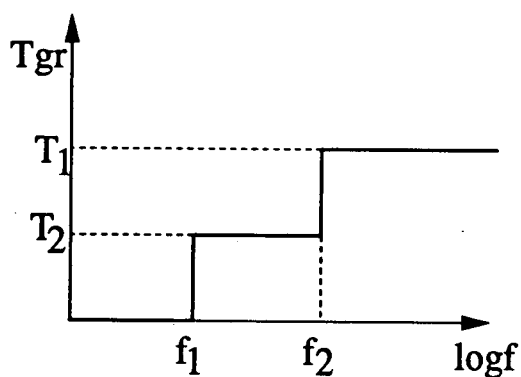


図6 分散群遅延時間スペクトルモデル

より検討した。位相スペクトルの震源特性は、震源のインパルス列の標準偏差、歪み度、尖り度によって特徴づけられることを示した。なお、さらに立ち上がり時間、断層の傾斜角、震源アスペリティ等に関する考察を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) Irikura, K., Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, 第7回日本地震工学シンポジウム, 151-156, 1986

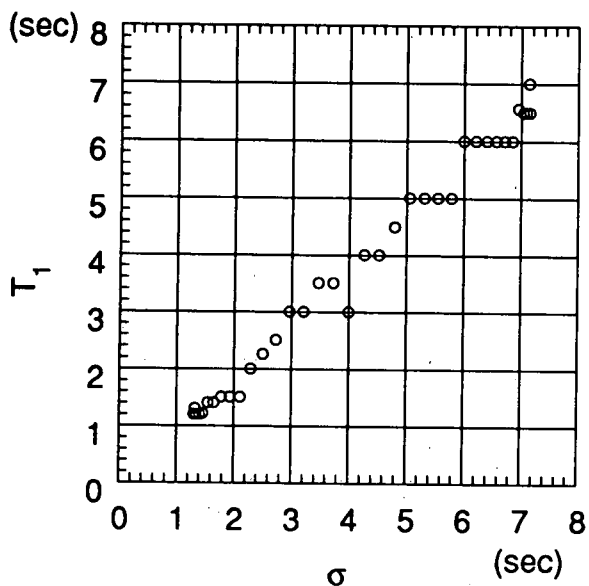


図7 T_1 と σ の関係

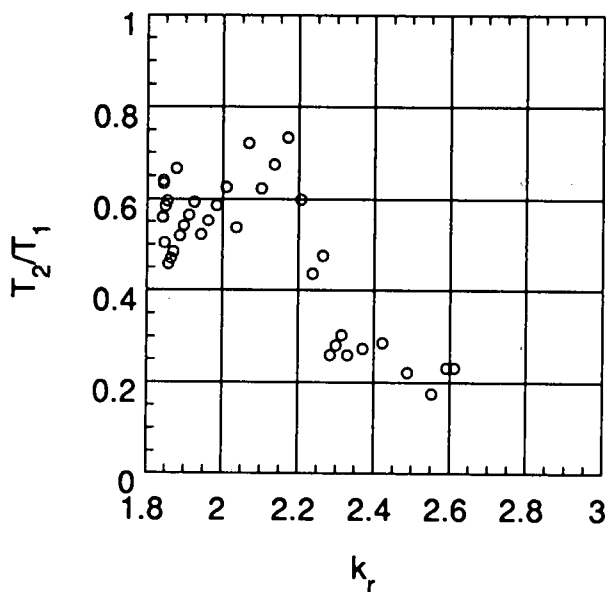


図8 T_2/T_1 と k_r の関係