

1. はじめに

複数の地点で得られた観測記録を統計処理することにより作成された距離減衰式は、マグニチュードなどを説明変数とする平均的な震源特性、震央距離や震源距離を説明変数とする平均的な伝播経路特性、および平均的な地点特性を表現したものと解釈できる。しかしながら、距離減衰式では実際の記録に含まれる特性を完全には表現できないため、最大地動や応答スペクトルの観測値は距離減衰式による推定値と一致せず、これが距離減衰式のばらつきの要因となっている。本報告では、距離減衰式による加速度応答スペクトルの推定値と観測値のずれを分析し、全体のばらつきから地点特性と震源特性に起因するものを分離抽出するとともに、これらの特徴を考察する。

2. 距離減衰式のばらつきの表現

距離減衰式が平均的な地点特性 G_0 、伝播経路特性 $\hat{P}$ 、および震源特性 $\hat{S}$ の積で表現されているとき、地震 i による地点 j での地震動強さの観測値 A_{ij} は、距離減衰式による推定値 $\hat{A}_{ij}$ を用いて式(1)で表現することができる。なお、以下の記述において各項は一般に振動数の関数であるが、ここでは (f) を省略して表記している。

$$A_{ij} = U_{ij} \cdot \Delta G_j \cdot \Delta P_{ij} \cdot \Delta S_i \cdot \hat{A}_{ij} = U_{ij} \cdot \Delta G_j \cdot \Delta P_{ij} \cdot \Delta S_i \cdot (G_0 \cdot \hat{P}_{ij} \cdot \hat{S}_i) \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 ΔG_j 、 ΔP_{ij} 、 ΔS_i はそれぞれ観測記録に含まれる地点、伝播経路、震源特性と距離減衰式で表現される平均的な特性との比、 U_{ij} はこれらで表現できないばらつきである。ここで、観測値と推定値の比をとり、 $\Delta A_{ij} = A_{ij} / \hat{A}_{ij}$ とすると、 $\Delta A_{ij} = U_{ij} \cdot \Delta G_j \cdot \Delta P_{ij} \cdot \Delta S_i$ となるから、地点 j で得られている N 個のデータに対して式(2)を考えると、地点特性に関わる第2項は地震によらず系統的に現れるのに対して、右辺の第1項および第4項はそれぞれ十分な数のデータに対して1に近い値をとると考えられる。伝播経路に関わる第3項も同様に1に近い値となると仮定すれば式(3)が成立するから、地点 j の相対的な地点特性 ΔG_j は式(4)で近似的に抽出することができる。

$$\prod_{i=1}^N \Delta A_{ij} = \prod_{i=1}^N U_{ij} \cdot \prod_{i=1}^N \Delta G_j \cdot \prod_{i=1}^N \Delta P_{ij} \cdot \prod_{i=1}^N \Delta S_i \quad \text{----- (2)} \quad \prod_{i=1}^N \Delta A_{ij} \approx \prod_{i=1}^N \Delta G_j \quad \text{----- (3)} \quad \Delta G_j \approx \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \Delta A_{ij}} \quad \text{----- (4)}$$

次に、 ΔA_{ij} から地点ごとに抽出された地点特性の影響を除去し、 $\Delta A_{ij}^G = A_{ij} / (\hat{A}_{ij} \cdot \Delta G_j) = U_{ij} \cdot \Delta P_{ij} \cdot \Delta S_i$ を定義すると、 ΔA_{ij}^G には地点ごとの特性が含まれていないため、複数の地点で得られた観測値を対等に扱うことができる。そこで、 M 箇所の地点で得られている地震 i の観測値に対して式(5)を考え、複数の地点のデータを扱うことにより U_{ij} と ΔP_{ij} がそれぞれ相殺されると仮定すると、地震 i の相対的な震源特性 ΔS_i は式(6)で近似的に抽出することができる。

$$\prod_{j=1}^M \Delta A_{ij}^G = \prod_{j=1}^M U_{ij} \cdot \prod_{j=1}^M \Delta P_{ij} \cdot \prod_{j=1}^M \Delta S_i \quad \text{----- (5)} \quad \Delta S_i \approx \sqrt[M]{\prod_{j=1}^M \Delta A_{ij}^G} \quad \text{----- (6)}$$

さらに、 ΔA_{ij}^G から個々の地震の相対的な震源特性 ΔS_i を除去した結果は、 $\Delta A_{ij}^{GS} = A_{ij} / (\hat{A}_{ij} \cdot \Delta G_j \cdot \Delta S_i) = U_{ij} \cdot \Delta P_{ij}$ となる。

通常距離減衰式のばらつきと呼ばれるものは ΔA_{ij} のばらつきであり、地点の特性が十分に把握されている(あるいは1地点のデータから距離減衰式を作成する)場合には、これを ΔA_{ij}^G のばらつきにまで減少させることができる。さらに、個々の地震の震源特性が詳細に記述できる理想的な条件下では、距離減衰式のばらつきは ΔA_{ij}^{GS} のばらつきまで減少する。 ΔG_j 、 ΔP_{ij} 、 ΔS_i および U_{ij} がそれぞれ独立な対数正規変量であると仮定し、それぞれの対数標準偏差を ζ_G 、 ζ_P 、 ζ_S 、 ζ_U とすると、 ΔA_{ij} 、 ΔA_{ij}^G 、 ΔA_{ij}^{GS} のばらつきはそれぞれ式(7)~(9)で表される。

$$\zeta_A = \sqrt{\zeta_G^2 + \zeta_P^2 + \zeta_S^2 + \zeta_U^2} \quad \text{---- (7)} \quad \zeta_{A^G} = \sqrt{\zeta_P^2 + \zeta_S^2 + \zeta_U^2} = \sqrt{\zeta_A^2 - \zeta_G^2} \quad \text{---- (8)} \quad \zeta_{A^{GS}} = \sqrt{\zeta_P^2 + \zeta_U^2} = \sqrt{\zeta_{A^G}^2 - \zeta_S^2} \quad \text{---- (9)}$$

3. 観測記録を用いたばらつきの分析

検討に用いる観測記録は、気象庁87型強震計によって前橋、水戸、大島、館山、東京、横浜で記録された震源深さが150km未満の40地震による水平440成分である。震源特性が抽出できるように上記6地点のうち5地点以上で記録が得られていることを地震の選定条件としている。ばらつきの評価に用いる距離減衰式は Annaka and Nozawa¹⁾ による加速度応答スペクトルの推定式で、この式による推定値と観測記録の加速度応答スペクトル($\eta=5\%$)の比から、6地点の地点特性と40地震の震源特性を抽出し、地点特性と震源特性に起因するばらつきを定量的に評価する。

図-1は観測値と推定値の比 ΔA_{ij} を440成分すべてについて表したもので、これを地点ごとに示した例が図-2であ

る。図-2から、地点ごとに固有の特性が現れていることが明確に読みとれる。Annakaらの距離減衰式に対する相対的な地点特性 ΔG_j を式(4)で算定し、これらを除去した ΔA_{ij}^G を示したものが図-3である。また、図-4は ΔA_{ij}^G を地震ごとに示したもので、震源特性が地点によらず共通して現れていることがわかる。式(6)を用いて相対的な震源特性 ΔS_i を抽出し、これらを除去した ΔA_{ij}^{GS} を示したものが図-5である。図-1, 3, 5の対数標準偏差を重ねたものが図-6(a)で、地点特性、震源特性を除去することによりばらつきが減少していく様子が読みとれる。図-6(b)に示すように、震源特性に起因するばらつきは対数標準偏差で0.3~0.5程度であり、2~4秒の長周期帯域で小さい。このことは、マグニチュードが比較的長周期の成分で決定されていることと整合する。

4. おわりに

距離減衰式に含まれるばらつきを分析し、全体のばらつきから地点特性と震源特性に起因するものを近似的に抽出した。この結果、地点特性を除去しても対数標準偏差で0.5~0.7程度のばらつきが残ること、震源特性に起因するばらつきは対数標準偏差で0.3~0.5程度で長周期帯域で小さくなることなどが示された。

参考文献：1) Annaka and Nozawa : Proc. 9th WCEE, Vol.II, pp. 107-112, 1988.8.

謝辞：本研究で用いた強震記録は気象庁87型電磁式強震計の波形データである。データを公開された気象庁に謝意を表します。

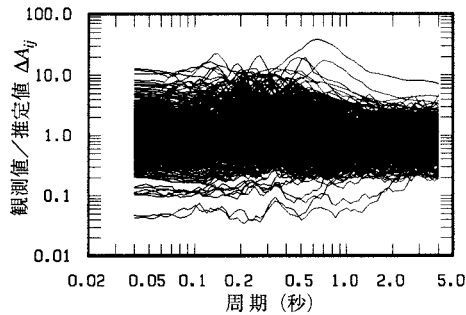
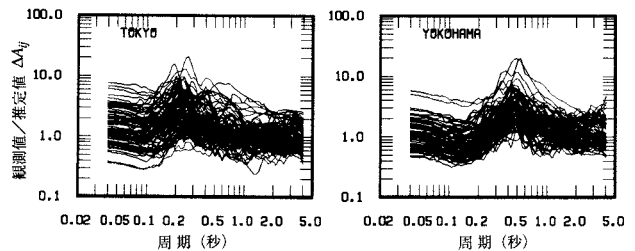


図-1 観測値と推定値の比 ΔA_{ij}



(a) 東京 (b) 横浜
図-2 地点ごとの観測値と推定値の比 ΔA_{ij} の例

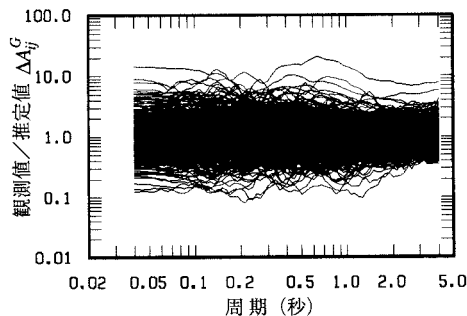
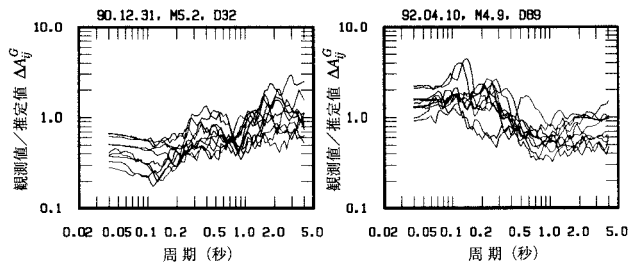


図-3 地点特性除去後の観測値と推定値の比 ΔA_{ij}^G



(a) 1990.12.31, M=5.2 (b) 1992.4.10, M=4.9
図-4 地震ごとの観測値と推定値の比 ΔA_{ij}^G の例
(地点特性の除去後)

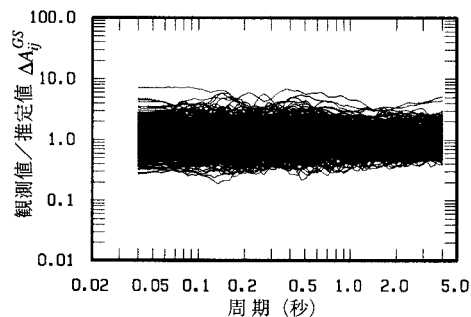
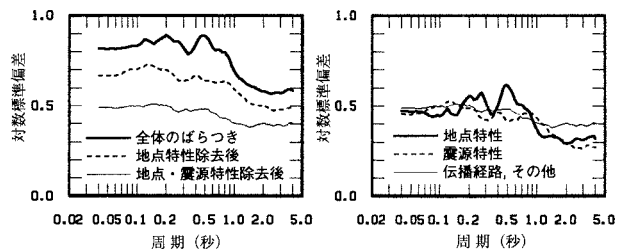


図-5 地点特性と震源特性除去後の観測値と推定値の比 ΔA_{ij}^{GS}



(a) ばらつきの推移 (b) 要因ごとのばらつき

図-6 観測値と推定値の比の対数標準偏差