

(78) 近畿地方の地震記録による震源，伝播，サイト特性の分離

○田居 優 (財)大阪土質試験所
岩崎好規 (財)大阪土質試験所
入倉孝次郎 (京都大学防災研究所)
尾崎昌彦 (関西電力(株))

1.はじめに：地震記録には，震源，伝播，サイトの特性を示す情報が含まれている。これらの要素を地震記録から分離できれば，震源，地殻構造，表層地盤の特性の研究には有意義な情報を提供することができる。ここでは，近畿地方の気象庁87型強震計設置点での同時多点観測記録を用いて，分離手法及び分離解析結果についてのべる。

2.分離手法：ここで用いたモデルは次式で示される。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) \cdot \exp(-\pi f R_{ij} / Q_s(f) V_s) / R_{ij} \cdot G_j(f)$$

モデルは周波数領域で表現されており i の地震による j の観測点での地震動スペクトル $O_{ij}(f)$ が震源スペクトル $S_i(f)$ および伝播スペクトル， Q 値， R_{ij} ： i 地震と j 観測点との距離，およびサイトスペクトル $G_j(f)$ の積で示される。いま I 個の地震について J 個の観測点すべてで地震記録がとれたとすると，上式により $I \times J$ 個の連立方程式がえられる。未知数は I 個の震源スペクトル， J 個のサイトスペクトルおよび 1 個の Q 値で，計 $I + J + 1$ 個である。一般にこれは方程式の数が未知数の数より多い，条件過多であり，解は求められない。そこで最小二乗法による特異値解法により求める。(Lawson and Hanson(1974), Iwata and Irikura(1988))ただし，サイトスペクトル $G_j(f) \geq 2.0$ の拘束条件の下で解いている。これは物理的には地表面の条件を示す。

3.観測記録とスペクトルの推定：観測地震は3個で，東海地方南方沖地震 ($M=6.6$)，兵庫県南西部地震 ($M=5.2$)，鳥取県西部地震 ($M=5.9$) である。観測点は気象庁観測所で大阪，彦根，福井，名古屋，潮岬，松江，岡山，津の8地点である。図-1に観測地震の震央分布および観測点位置を示した。各観測点ではすべての地震記録が取れている。分離解析(インヴァージョン)はスペクトル領域で行なうので，まず各観測点での記録のフーリエスペクトルを求める必要がある。フーリエスペクトルは一般に激しく振動するので，ここでは周波数におうじて高周波数ほど強い平滑化を行なった。フーリエスペクトルはNS成分とEW成分とのベクトル和を用いている。

4.分離結果(インヴァージョン結果)：

4.1 Q 値：分離されたそれぞれの結果について先ず，伝播経路を示す Q 値の結果を周波数依存性として示したものが図-2である。図中，●印が今回の近畿での結果であり，○印は Tai(1992)で同じ手法で求めた関東での結果である。 Q^{-1} と周波数 f との関係は， $0.1H z$ から f とともに増大し，ある程度の f 以後 f と共に減少する。既往の結果では $f \geq 1.0H z$ で， $Q^{-1} = \alpha f^n$ の式で示されるのが分かっている。この式にあてはめると， $\alpha = 1.1 \times 10^{-2}$ ， $n = -0.73$ (関東)， $\alpha = 5.5 \times 10^{-3}$ ， $n = -0.73$ (近畿)となる。全体として，近畿での減衰が関東での減衰より小さい。また，それぞれ極大値が存在するようであり，その周波数は関東と近畿で異なっているようである。即ち，関東では $0.4H z$ 程度，近畿では $0.2H z$ 程度のところに極大値がある。また，図中には一次元散乱理論(佐藤(1984))による理論解をあわせて示している。 Q^{-1} の極大値に相当する周波数は不均質媒質としての地殻の相関距離に関係した量と考えることが出来るので，これからみると，関東より近畿のほうが相関距離が長い結果となる。すなわち，近畿のほうが関東に較べて，地殻の均一度が高いこととなる。これは近畿では関東に較べ活断層の分布の密度が高いことと一見矛盾するようであるが， $30 km$ 程度の大きな地殻を考え

るとそのようなこともありうるだろう。

4.2 サイト特性：インヴァージョンより分離されたサイト特性を図-3に示した。インヴァージョン解では、震源、伝播、サイト特性の平均値がもとまる。そこで、伝播特性を固定して、サイト特性を各地震ごとのバラツキの程度も考慮したかたちで次式よりもとめたものが図-3の領域である。図中、シンボルで示したものがインヴァージョン解で求めたものである。

$$G_j(f) = [R_{ij} / \exp(-\pi f R_{ij} / Q_s(f) V_s)] \cdot O_{ij}(f) / S_i(f)$$

サイト特性を示す図-3をみると、3つに分類できる。1つは地震基盤に相当する潮岬、1つは1-2Hzに単一のスペクトルピークのある津、彦根、福井、松江、岡山、1つは1-2Hzから0.2-0.3Hzにかけてスペクトルピークのある名古屋、大阪である。この現象は平野部の大きさに関係している。

このようにして求めたサイト特性について検討するために深発地震の記録をもちいた。すなわち深発地震では震源距離がほぼおなじの観測点が多く、また震源が深いので、観測点への入射角がほぼすべて等しいとかがえられるため、その観測点のスペクトルがほぼそのサイト特性を示すものとなる。以上の理由により図-1に示した深発地震M=6.6、震源深さD=325kmの地震について検討する。各観測点での波形を図-4に示した。図-4の波形のS波部分を用いて、スペクトルを計算し、潮岬のスペクトルを分母として、各観測点でのスペクトル比を求めた。このスペクトル比と分離解析によるサイト特性を示すスペクトルをあわせて示したものが図-5である。いずれの結果も2つのスペクトルはよく一致しているのがわかる。これは分離解析結果がよくそのサイト特性を反映したものであることを示している。

次に京都大学防災研究所の地震観測ネット(松波その他(1989))との比較を行なう。用いている地震計は村松式の速度タイプの地震計で、1つの地震が2地点で同時観測された記録がある。1989年2月19日、奈良県でおこったM=5.3の地震の阿武山、および大阪管区气象台での記録である。阿武山は岩盤と考えられるので、阿武山に対する大阪のスペクトル比を取り図-6に示した。分離解析の大阪での結果も合わせて示している。これは、防災研究所の速度計と87型強震計が同じ地点に設置されているためである。0.1Hzから3Hz程度までその結果はほぼ一致している。3Hz以上での不一致は、潮岬を岩盤としたこと、または阿武山を岩盤としたことに問題があるとおもわれるがその詳細はわからない。

4.3 震源特性：インヴァージョンで求めた伝播特性を固定して、震源スペクトルを各観測点ごとのバラツキの程度も考慮したかたちで次式よりもとめたものを図-7に示した。

$$S_i(f) = [R_{ij} / \exp(-\pi f R_{ij} / Q_s(f) V_s)] \cdot O_{ij}(f) / G_j(f)$$

近畿で観測された他の地震について、インヴァージョンより求めた伝播特性およびサイトスペクトルをもちいることによって、震源スペクトルを推定することができる。図-11は近畿地方で観測された地震の震央位置をあわせて示したものであり、これらの地震についてその震源スペクトルを求める。震源スペクトルからその特性値、特に地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_0 を求める。地震モーメント M_0 の算定式はつぎのとうりである。 $M_0 = (4\pi\beta\mu R / F_s) \cdot \Omega_0$ ここで Ω_0 ：変位スペクトルの長周期側フラット値、 F_s ：ラジエイションパターン、 μ ：せん断弾性定数、 β ：せん断波速度、 R ：震源距離である。図-8はその一例を示したものであるが、各観測点での観測されたスペクトルをもちいて、伝播経路およびサイト特性の補正をおこなって、図中×と●で震源スペクトルを示した。震源スペクトルは用いる観測点などで当然誤差がふくまれる。そこで、震源スペクトル(図中●は最短距離の観測点の結果である。)を用いて、 M_0 、 f_0 を求めた。図-8、9はこの研究で求めた震源パラメータとDziewonskiのCMT解がともに求まっている例である。地震モーメントの値が両者きわめてよい一致を示しているのがわかる。以上のように震源スペクトルから地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_0 、断層面積 S を求めた。 $r_0 = C_s \beta / 2\pi / f_0$ 、 $S = \pi r_0^2$ (Sato and Hirasawa(1973))ここで r_0 は断層半径、 C_s は定数である。図-10には地震モーメントとコーナー周波数との関係、図-11には、地震モーメントと断層面積の関係求めた。 M_0 と f_0 の関係はKamae(1992)によりもとまっている近畿地方の関係とよく一致した。 $\log M_0 = -3.0 \log f_0 + 23.1$ 地震モーメントと断層面積との関係はSato(1979)による関係にほぼ近い関係になっている。 $\log M_0 = 1.5 \log S + 22.3$

5.まとめ：(1) インバージョンより求めたQ値の周波数依存性には近畿と関東のローカリテイがあり、それぞれの地殻の不均一の程度の差として定量化できた。(2) インバージョンにより求めたサイト特性は深発地震より推定したサイト特性とよく一致した。大阪管区気象台では他の観測点と比較して地盤特性がよく分かっているの今後それとの比較を行ないたい。(3) インバージョンにより求めた震源特性は他の観測記録より求めた結果とよく一致し、また相似則として ω^{-2} 則が適切であることが分かった。

6.参考文献：Lawson,C.L.and Hanson,R.J.(1974) : Solving Least Squares Problem,Prentice-Hall. , Iwata and Irikura(1988):Source Parameters of the Japan Sea Earthquake Sequence.,J.Phys.Earth,36. ,Sato,T. and T. Hirasawa(1973):Body Wave Spectra from Propagation Shear Cracks.,J.Phys.Earth,21. ,Kamae,K. and K. Irikura(1992):Prediction of Site-Specific Strong Ground Motion Using Semi-Empirical Methods.,10.W.C.E.E. , Tai,M.,Iwasaki,Y and M.Oue(1992):Separation of Source,Propagation and Local Site Effects from Accelerographs and its Application to Predict Strong Motion by Summing Small Events.,10.W.C.E.E. ,佐藤春夫 (1984) : リソスフェアにおける地震波の散乱と減衰—ランダムな不均質構造による一次元散乱理論—, 国防防災科学センター研究報告, 33. , 松波, 入倉, 岩田, 藤原, 松井 (1989) : 大阪平野及びその周辺地域における広周波数帯域, 広帯域地震波観測, 京都大学防災研究所年報, 32.

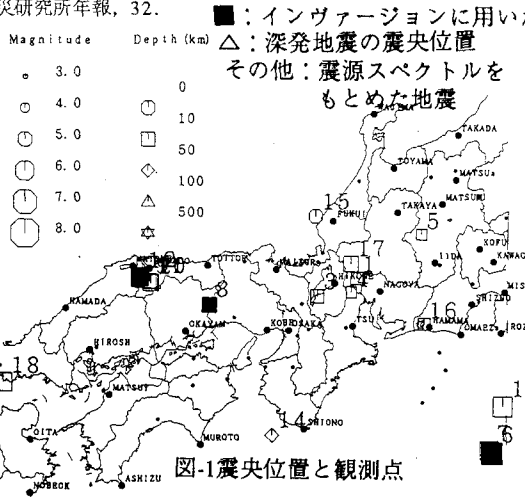


図-1震央位置と観測点

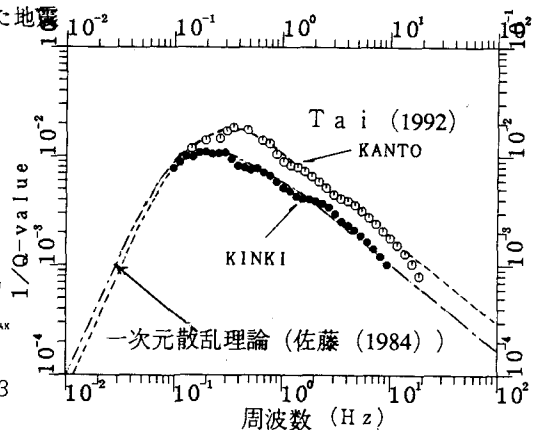


図-2インバージョンによるQ値の周波数依存性

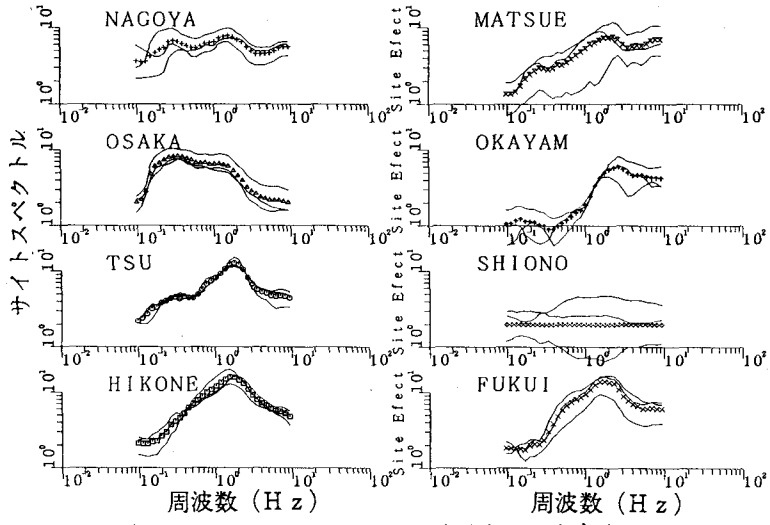


図-3インバージョンによるサイトスペクトル

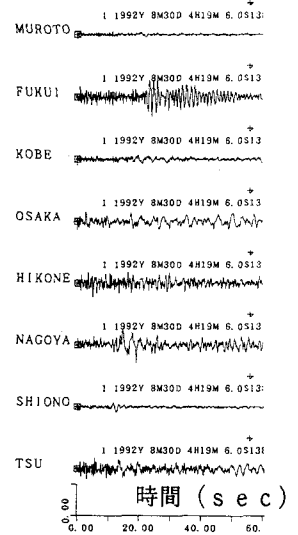


図-4深発地震の波形

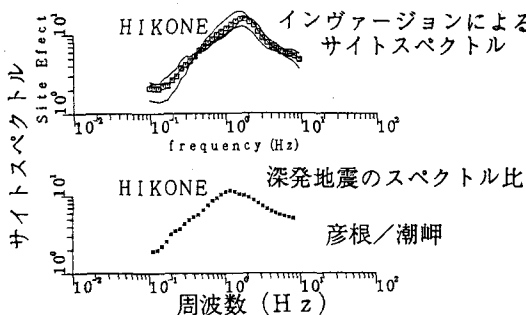


図-5 (a) サイトスペクトルの比較 (彦根)

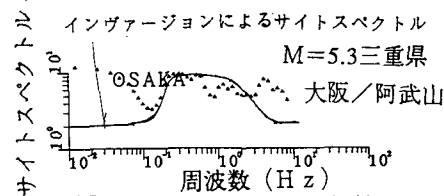


図-6 サイトスペクトルの比較

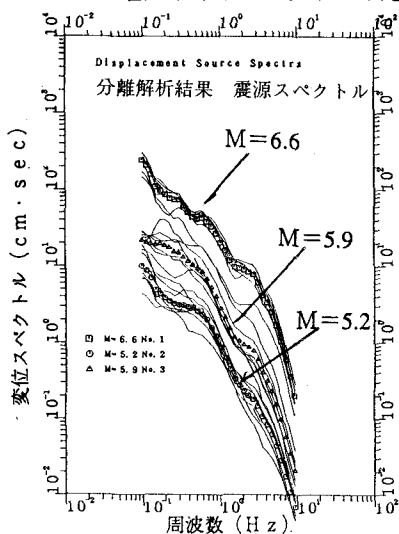


図-7 インヴァージョンによる震源スペクトル

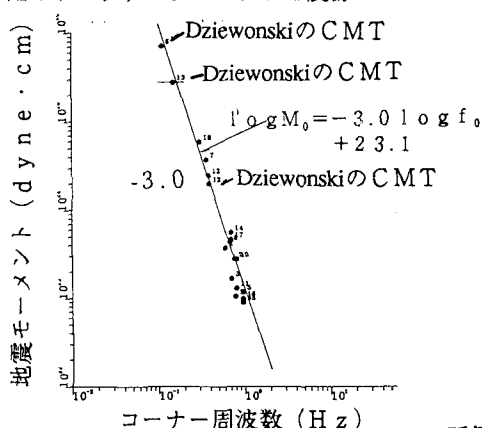


図-10 地震モーメントとコーナー周波数との関係

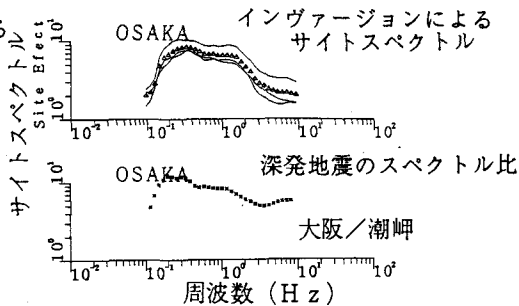


図-5 (b) サイトスペクトルの比較 (大阪)

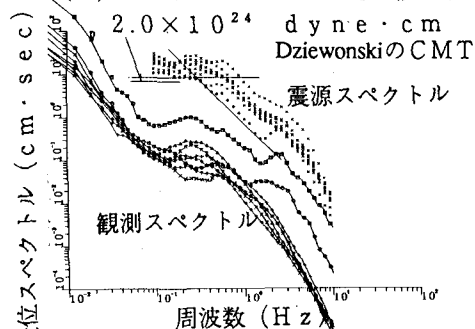


図-8 震源スペクトルの例

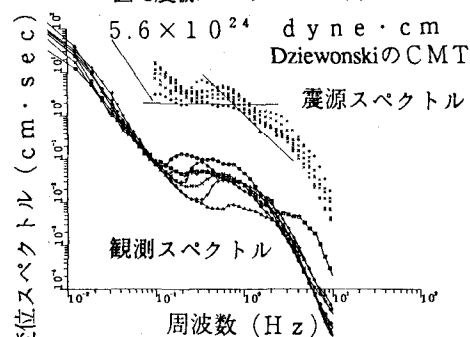


図-9 震源スペクトルの例

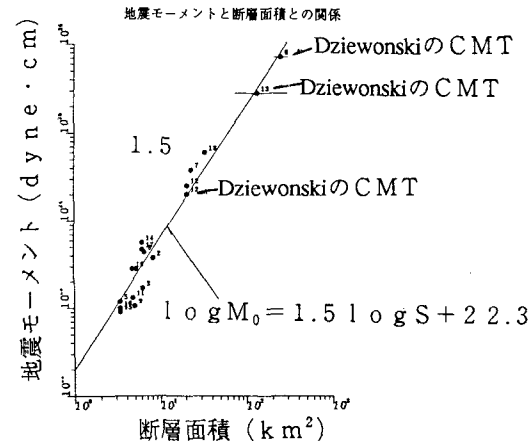


図-11 地震モーメントと断層面積との関係