

強震動の二重スペクトル比から推定した 九州南部における Q_S 値

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500番地)

九州南部における K-NET 観測点での強震記録を解析し、S 波の減衰に関する Q_S 値について調べた。2 つの地震の際の 2 つの観測点での記録の二重スペクトル比をとることによって、震源の影響と観測点での地盤の影響を取り除いて、伝播経路の影響だけを孤立させることができる。本研究で得られた Q_S 値は過去の研究で得られている値の $1/2 \sim 1/3$ 程度である。 Q_S 値が小さく求まった原因としては、過去の研究に比べて伝播経路がかなり浅いことと、霧島火山帯の下を通過する経路であることが考えられる。 Q_S 値は深さによって、また、地域によってかなり変化している可能性がある。

Key Words : Q_S -value, double spectral ratio, strong ground motion, southern Kyushu, K-NET

1. はじめに

地表で観測される地震動は、震源、伝播経路、観測点近傍での地盤の影響を受けている。このうち、伝播経路の影響としては、地震波の幾何学的な拡がりによる減衰と、地震波がその中を伝播する媒質の性質に基づく減衰（地震波の散乱や媒質の非弾性的性質による減衰）が考えられる。後者の減衰については、減衰しにくさを表わす Q というパラメータを用いて表現されるのが普通である。

強震動の主要部分は、多くの場合 S 波によって構成されている。S 波に関する Q 値である Q_S 値を求めるための手法は種々あるが、強震動記録の解析によって Q_S 値を推定する場合には、震源スペクトル、伝播経路の影響、地盤の影響を同時に求めるインバージョン手法が用いられることが多い^{1)~6)}。この手法によって求められる値は、解析に用いられた多数の地震の震源と多数の観測点とを含む領域での平均的な Q_S 値を表している。

例えば、岩田・入倉¹⁾は秋田県沖地域、Takemura *et al.*²⁾、Kato *et al.*³⁾、加藤ほか⁴⁾は関東から東北地方南部にかけての太平洋岸地域、Kinoshita⁴⁾と山中ほか⁶⁾は関東地方での Q_S 値を推定した。これらの研究によって得られた Q_S 値は、研究対象としている地域の違いにも関わらず、驚くほどの良い一致を示している（図-6 参照）。

平均的な Q_S 値を求めることは勿論重要ではあるが、 Q_S 値の深さ変化や水平方向の変化等について検討しておくことも必要である。例えば、震源の深い地震と浅い

地震とでは震源スペクトル構造が異なるのかどうかについて論じようとするれば、 Q_S 値の深さ変化を知った上でなければならない。また、活断層を考慮して断層近傍での強震動を理論的に予測しようとする際には、比較的浅い地殻内での Q_S 値の情報が不可欠である。

近年の強震観測網の整備によって、かつてとは比較にならないほど大量の強震動データが供給されるようになってきた。 Q 値の地域性については、既に種々の手法を用いて調べられているが^{7)~9)}、 Q_S 値の深さ変化や地域性について更に詳しく調べることが可能になりつつある。本論文ではその手始めとして、二重スペクトル比を用いた Q_S 値の推定手法^{10),11)}を、九州南部地域に適用した結果について報告する。

2. 解析手法

観測された地震動の S 波部分のスペクトルが、

$$O_{ij}(f) = S_i(f)P_{ij}(f)G_j(f) \quad (1)$$

と表現できるものと仮定する。 $S_i(f)$ は i 番目の地震の震源スペクトル、 $P_{ij}(f)$ は i 番目の地震の震源から j 番目の観測点に至る伝播経路の影響、 $G_j(f)$ は j 番目の観測点の地盤応答である。ここでは、インバージョン手法の適用に際して通常行われているように、 $S_i(f)$ は観測点に依存せず、 $G_j(f)$ は地震に依存しないものと仮定している。

伝播経路における特性は

表-1 地震リスト

Event	Date	Time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M	ϕ (°)	δ (°)	λ (°)
1a	1997/03/26	17:31:47.9	31.969	130.361	12	6.5	273	88	0
1b	1997/05/13	14:38:27.6	31.945	130.305	9	6.3	98	88	-1
2a	1996/10/19	23:44:41.7	31.795	131.992	41	6.6	230	20	106
2b	1996/12/03	07:17:58.1	31.755	131.679	43	6.6	196	12	71

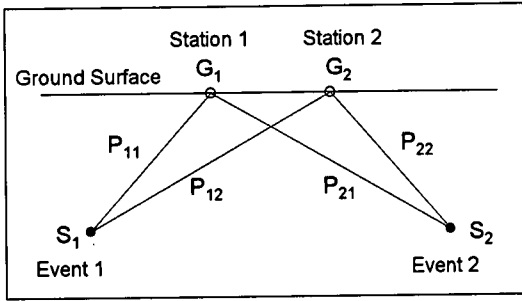


図-1 2つの地震と2つの観測点の組合せ

$$P_{ij}(f) = \frac{1}{R_{ij}} e^{-\pi f t_{ij}^*} \quad (2)$$

と表現されるものとする。ここで、 R_{ij} は震源距離、 t_{ij}^* は

$$t_{ij}^* = \int_{path} \frac{dR_{ij}}{V_S Q_S} \quad (3)$$

であり、 V_S 、 Q_S は各々、伝播経路に沿ってのS波速度と Q_S 値である。

図-1のように、2つの地震と2つの観測点の組を考える。2つの観測点における2つの地震の、合計4つの観測記録のスペクトルを用い、それらのスペクトル比(二重スペクトル比)をとると

$$\frac{O_{12}O_{21}}{O_{11}O_{22}} = \frac{R_{11}R_{22}}{R_{12}R_{21}} e^{-\pi f \Delta t^*} \quad (4)$$

となる。ここで、

$$\Delta t^* = t_{12}^* + t_{21}^* - t_{11}^* - t_{22}^* \quad (5)$$

である。このように、二重スペクトル比には震源スペクトルと地盤応答の影響とが含まれておらず、伝播経路の影響だけを孤立させることができる。二重スペクトル比の観測値を、幾何減衰の比に相当する震源距離

表-2 観測点リスト

Station Code	Latitude (°N)	Longitude (°E)
KGS006	31.9025	130.7044
MYZ012	31.8688	131.0708
MYZ014	31.8419	131.3050

の比で補正することにより、 Δt^* を求めることができる。 Δt^* は4つの伝播経路における減衰の差額に関係している。

本研究結果を他の研究によって求められている Q_S 値と比較するために、

$$Q_S = \frac{\Delta R}{\bar{V}_S \Delta t^*} \quad (6)$$

によって、 Δt^* を Q_S に相当する量に換算する。ここで

$$\Delta R = R_{12} + R_{21} - R_{11} - R_{22} \quad (7)$$

である。また、 \bar{V}_S は4つの伝播経路に沿った平均的なS波速度である。(6)式は、 Δt^* で表されている伝播経路による減衰の違いを伝播距離の差 ΔR に押しつけた場合に、そこでの Q_S 値に相当するものを求めることを意味する。得られる値は4つの伝播経路での平均的な Q_S 値と看做することができる。

このように、本手法を用いたとしても、依然として伝播経路に沿った平均的な Q_S 値しか求まらない。しかしながら、地震や観測点の組合せを変えて Δt^* や Q_S 値を求め、相互に比較することによって、伝播経路の違いによる減衰の相違について調べることが可能である。

3. データ

地震としては、表-1に示すように、1997年に発生した鹿児島県北部の地震(1a, 1b)と1996年に発生した日向灘の地震(2a, 2b)を選んだ。震源位置とマグニチュードの情報は気象庁による。表-1の ϕ は震源断層

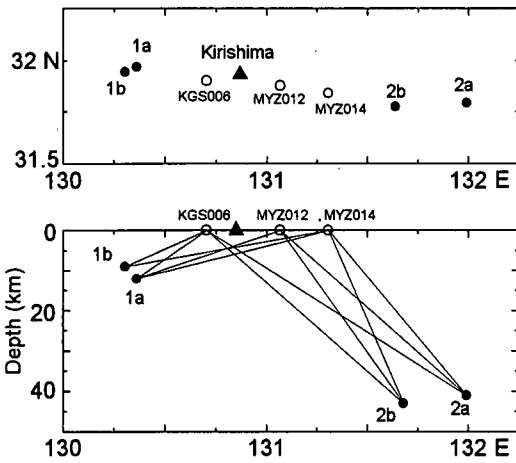


図-2 本研究で用いた地震の震源と観測点の位置関係

の走向, δ は傾斜角, λ はすべり角である¹²⁾. また, 観測点としては, 表-2 に示すように, 科学技術庁防災科学技術研究所による K-NET¹³⁾ の横川 (KGS006), 高崎 (MYZ012), 田野 (MYZ014) を選んだ. 但し, MYZ012 においては, 地震 1b の記録が欠けている.

M 6 クラスの地震の震源断層は, かなりの大きさを持っていると考えられる. しかし本研究では (7) 式に示されるように, 地震波の射出点から 2 つの観測点に至る距離の絶対値ではなく, 差だけが問題になる. 従って R_{ij} としては, 断層の破壊開始点 (即ち震源) からの距離で代表させても差し支えない. 同様に, 観測点の標高についても相殺されるため, ここでは考慮しない.

これらの地震の震央と観測点は, 図-2 に示すように, ほぼ一直線に並ぶ. つまり, 地震波の伝播経路は, ほぼ同一の鉛直平面内にある. 従って, 二重スペクトル比をとる際に, 地震の組み合わせや観測点の組み合わせを変えることによって, 経路の違いによる Q_s 値の変化について調べることができる. また, この直線上には霧島が位置しており, 火山下を通る経路における Q_s 値についても調べることが出来る.

観測波形の例を図-3 と図-4 に示す. 震源距離に対して並べたこれらの観測波形から, 地震 1a については S 波速度が 3.5km/s 程度 (図は省略したが, 地震 1b についても同様), 地震 2a については S 波速度が 3.8km/s 程度 (地震 2b についても同様) であることが分かる. S 波到着から 10 秒間の水平動記録を解析の対象とした. バンド幅 0.4 Hz の Parzen ウィンドウによってスムージングしたスペクトルについて, 二重スペクトル比を求めた. 本研究において扱う周波数帯域は, 0.5~20 Hz とした. また, 地震の震央と観測点と

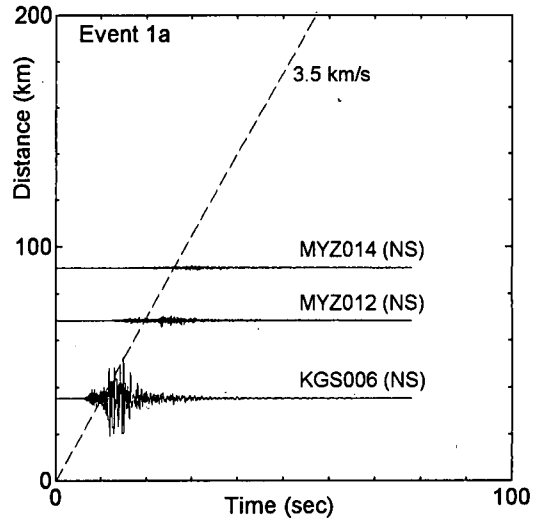


図-3 地震 1a の観測記録 (NS 成分)

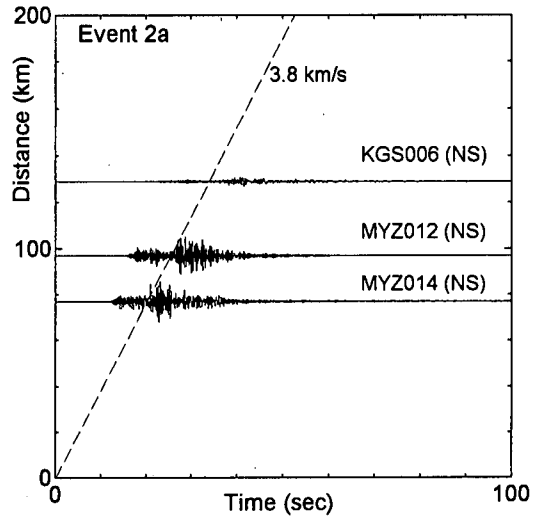


図-4 地震 2a の観測記録 (NS 成分)

がほぼ東西の一直線上に並んでいるため, NS 成分には SH 波, EW 成分には SV 波が主に含まれていると考えられる.

式(1)の震源スペクトルは, 観測点 j によらないものと仮定されている. 多数の地震による多数の観測点の記録を同時に解析する場合には, 震源での地震波の放射パターンの影響は平均化されるものとして無視しても構わないであろう. しかし, 本研究では地震数も観測点数も少ないため, 放射パターンを無視することによって, 解析結果に何らかの影響が及ぶことも懸念される.

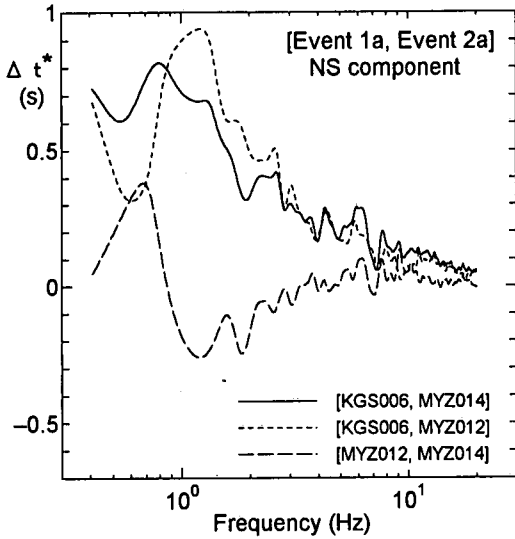


図-5 地震 1a と 2a の NS 成分記録を用いた場合の Δt^*

表-1 の発震機構解を用い、S 波の射出方向は震源と観測点を結ぶ直線方向と仮定して、放射パターン係数を求めた。EW 成分 (SV 波) に関しては、観測点によって放射パターン係数がだいぶ変化する。しかし NS 成分 (SH 波) に関しては、どの地震の場合についても、3 つの観測点における放射パターン係数はほぼ同じである。以上の検討の結果、EW 成分の記録を使用することは差し控え、NS 成分の記録のみを用いることにした。

4. 解析結果

求められた Δt^* の一例を図-5 に示す。地震 1a と 2a とに関し、3 つの観測点での NS 成分の記録を 2 つずつ組合せた場合の結果である。

伝播経路の差 ΔR が最も大きいのは [KGS006, MYZ014] の組合せである。しかし、 ΔR 間での減衰を表わす Δt^* の値は、 ΔR がそれよりも小さい [KGS006, MYZ012] の組合せの場合と大差ない。むしろ、0.8~3.5 Hz では Δt^* の大きさが逆転している。

図中の 3 本の曲線は、3 観測点のデータを 2 観測点ずつ組合せて求めたものであり、互いに独立というわけではない。上で述べた 0.8~3.5 Hz での Δt^* 値の逆転のおかげで、その周波数帯において、[MYZ012, MYZ014] の場合の Δt^* の値が負になっている。

Δt^* が負になるというのは、距離の短い経路での減衰の方が距離の長い経路における減衰よりも大きいということであり、式(6)によって Q_s 値を求めることが出来ない (Q_s 値が負になってしまう)。このことに関

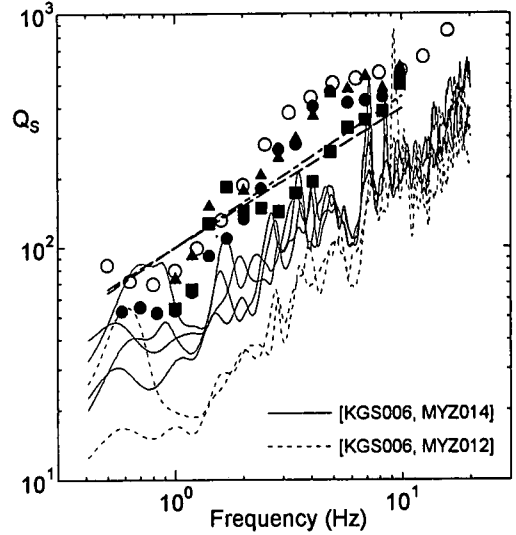


図-6 Q_s 値。細い実線と点線：本研究結果、破線：岩田・入倉¹⁾、▲：Takemura *et al.*²⁾、■：Kato *et al.*³⁾、○：Kinoshita⁴⁾、●：加藤ほか⁵⁾、一点鎖線：山中ほか⁶⁾。

しては次章で改めて述べる。

Δt^* が正値をとる [KGS006, MYZ014] と [KGS006, MYZ012] の組合せの場合について、式(6)により Q_s 値を求めた。その結果を図-6 に示す。図中の細い実線は [KGS006, MYZ014] に対する、4 地震の 4 通りの組合せについての結果である。これらは全てが互いに独立な結果というわけではないが、全部を表示した。また、過去の研究結果^{1)~6)} も、比較のために図示した。

岩田・入倉¹⁾ は秋田県沖地域、Takemura *et al.*²⁾、Kato *et al.*³⁾、加藤ほか⁵⁾ は関東から東北南部にかけての太平洋岸地域の Q_s 値であり、Kinoshita⁴⁾ と山中ほか⁶⁾ は関東地方での結果である。

本研究の結果は、過去の研究による Q_s 値の 1/2 程度の大きさしかない。 Q_s 値を周波数 f の関数として表すと、おおよそ

$$Q_s \sim 45f^{0.75} \quad (8)$$

である。

[KGS006, MYZ012] の場合は地震 1b の記録が欠けている。そのため、地震 1a と 2a、1a と 2b を組合せた場合の結果が細い破線で示されている。得られた Q_s 値は過去の研究結果の 1/3 程度でしかなく、おおよそ

$$Q_s \sim 20f^{0.9} \quad (9)$$

である。

5. 考察

本研究で得られた Q_s 値は、過去の研究結果^{1)~6)}と比較してかなり小さい。過去の研究によっていろいろな地域で得られている Q_s 値が殆ど一致していることを考えると、本研究と過去の研究との間に特に変わった事情が無ければ、本研究による Q_s 値もほぼ一致して然るべきであろう。

本研究と過去の研究との間には、事情の違いが二つある。一つは、鹿児島県北部の地震 (1a, 1b) の震源深さが約 10 km と浅いことである。過去の研究に用いられた地震の震源深さはいろいろであるが、深さ 30~60 km の地震が比較的多く、中には深さ 100 km 近いものも使われている。従って、過去の研究による結果が比較的深い部分までの平均的な Q_s 値を表しているのに対し、本研究で求めた値は、深さ 10 km よりも浅い部分での Q_s 値を主に反映しているものと考えられる。

もう一つは、霧島の存在である。[KGS006, MYZ014] の場合、4 通りの地震の組合せのそれぞれにおいて、4 つの伝播経路のうちの長い方の 2 つの経路が霧島の下を通過しており、短い方の 2 つの経路は通っていない。[KGS006, MYZ012] の場合についても同様である。従って、もし霧島の下において、高温のために媒質の非弾性的性質が顕著であるとすると、今回の結果のように Q_s 値が小さくなると考えられる。火山下を通る地震波の減衰が異常に大きいことは、岩手山直下を通る経路の場合についても報告されている¹⁴⁾。

本研究で用いた地震に関して、K-NET 観測点における加速度最大値の分布図⁸⁾を見てみると、等加速度値を表すコンターラインが南北方向に長く伸び、東西方向には狭い。この傾向は、九州南部を東西に横切る経路での Q_s 値が小さいという本研究結果と調和している。

また、[KGS006, MYZ014] の場合よりも [KGS006, MYZ012] の場合の方が Q_s 値が小さく見積もられたこと、および、[MYZ012, MYZ014] の組合せの場合に Δt 値が負になったことについては、次のように考えることができる。地震 2a または 2b からこれらの観測点に至る経路に、経路の長さ以外に特別な違いがあるとは考えられない。ところが、地震 1a からこれらの観測点に至る経路は、どちらも霧島の下を通る。更に、地震 1a から MYZ012 に至る経路は MYZ014 に至る経路よりも浅い。霧島火山直下のマグマ溜まりの深さや大きさ等については正確には判っていないが、もし霧島の下では浅い経路を通るほど減衰が大きいものと仮定すると、本研究の結果は矛盾なく説明することができる。

6. まとめ

九州南部を東西に横断する経路において、過去の研究と比較してかなり小さい Q_s 値が得られた。この原因として、経路が浅いことと、霧島の下を通る経路であることが考えられる。 Q_s 値は深さや経路によってかなり異なっているようである。

活断層を考慮して断層近傍での強震動を予測するためには、かなりの深さまでの平均的な Q_s 値よりも、比較的浅い部分での Q_s 値の情報が重要と考えられる。強震観測網の整備により、今後ますますデータが増えるであろう。本研究で用いたような手法をいろいろな地域に適用することにより、平均的な Q_s 値ばかりではなく、 Q_s 値の深さ分布や地域性についての詳細が明らかになることが期待できる。

謝辞： 科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET データを使用させていただきました。記して感謝します。本研究は文部省科学研究費の補助を受けて行った。

参考文献

- 1) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, Vol.39, pp.579-593, 1986.
- 2) Takemura, M., Kato, K., Ikeura, T. and Shima, E.: Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, *J. Phys. Earth*, Vol.39, pp.537-552, 1991.
- 3) Kato, K., Takemura, M., Ikeura, T., Urano, K. and Uetake, T.: Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method, *J. Phys. Earth*, Vol.40, pp.175-191, 1992.
- 4) Kinoshita, S.: Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern kanto area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.1387-1396, 1994.
- 5) 加藤研一, 武村雅之, 八木和彦: 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震2, Vol.51, pp.123-138, 1998.
- 6) 山中浩明, 中丸明子, 栗田勝実, 瀬尾和大: 表層の地盤特性を拘束条件にした S 波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価, 地震2, Vol.51, pp.193-202, 1998.
- 7) 海野徳仁, 長谷川昭: 東北日本弧の三次元 Q_s 値構造, 地震2, Vol. 37, pp.217-228, 1984.
- 8) Hashida, T.: Three-dimensional seismic attenuation structure beneath the Japanese Islands and its tectonic and thermal implications, *Tectonophys.*, Vol.159, pp.163-180, 1989.
- 9) Tsumura, N., Hasegawa, A. and Horiuchi, S.: Simultaneous estimation of attenuation structure, source parameters and site response spectra — application to the northeastern part of Honshu, Japan, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, Vol.93, pp.105-121, 1996.
- 10) 松澤鶴, 長谷川昭, 高木章雄: 二重スペクトル比による Q の推定, 地震学会講演予稿集, 昭和59年度秋季大会,

C75, 1984.

- 11) Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Takagi, A. : Q_p structure beneath the northeastern Japan arc estimated from twofold spectral ratio method, *Tohoku Geophys. J.*, Vol. 32, pp.21-33, 1989.
- 12) 菊地正幸 : EIC 地震学ノート (<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/>).
- 13) 科学技術庁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/>).
- 14) 山中佳子, 菊地正幸: 二重スペクトル比法を用いた岩手山直下の Q_s^{-1} の推定, 地震2, Vol.51, pp.457-458, 1999.

(1999. 3. 25 受付)

Q_s -VALUE IN SOUTHERN KYUSHU EVALUATED FROM DOUBLE SPECTRAL RATIO OF STRONG MOTION RECORDS

Yasuo IZUTANI

Q_s -value is evaluated from strong motion records at K-NET stations in southern Kyushu. Taking ratio among four strong motion spectra at two stations for two events, path effect is isolated from source and site effects. Q_s -value obtained in this study is one half or one third of those of previous studies. The cause of low Q_s -value may be that the wave propagation paths are shallower than those of previous studies and pass beneath the Kirishima volcanic area. The present result suggests that Q_s -value varies with depth and is very different from place to place.