

二重スペクトル比法を用いた九州地方火山地帯の減衰特性評価に関する研究

高口 仁

1. はじめに

地表で観測された地震動は震源・伝播経路・地盤増幅特性の影響を受けており、将来発生する大地震の際の強震動を予測するには、これら3要素を適切に把握することが必要である。このうち、伝播経路の評価は、すなわち、地殻・マントル内を伝播する地震動の減衰の評価を意味するが、この減衰を支配する要因としては、地震波の波面が広がることによる影響(幾何減衰)と媒質の非弾性的性質や不均質性による影響が挙げられる¹⁾。後者の媒質による減衰の評価は、減衰の大きさを表す指標であるQ値の評価が中心であり、主に観測記録に基づいて評価されるため、防災科学技術研究所²⁾によるK-NET、KiK-netによる高密度観測網が整備された1995年兵庫県南部地震以後、スペクトルインバージョン³⁾を始めとしたQ値を評価するいくつかの取り組みが行われるようになった。

中村・植竹(2007)⁴⁾は、トモグラフィ解析によって、日本列島下0~30kmの減衰構造を推定し、東日本の火山フロントより太平洋側においてHigh-Q_s、日本海側においてLow-Q_s、火山地帯ではLow-Q_sであることを明らかにしている。九州地方は活火山が多い地域であり、その影響により火山地帯では減衰特性が異なることが考えられる。

減衰の評価方法の一つとしては、Matsuzawa et al.(1989)⁵⁾により二重スペクトル比法が提案されている。二重スペクトル比法では一つの地震に対する2観測点間のスペクトル比をとることにより震源の影響を相殺し、さらに別の地震に対するスペクトル比で比をとることにより地盤の影響も相殺して伝播経路の影響のみを抽出することができる^{6),7),8),9)}。しかし、二重スペクトル比法による減衰特性の評価事例は少なく、伝播経路特性を適切に評価するには二重スペクトル比法による評価事例を蓄積する必要がある。

そこで本研究では、九州地方の火山フロントをまたぐ観測点ペアによる二重スペクトル比法を用いて火山直下の減衰特性に関する評価を行う。

2. 解析方法

本研究では火山直下を通過する地震波を用いて、火山地帯の減衰特性を推定する。用いた手法は二重スペクトル比法⁴⁾である。二重スペクトル比法は、複数の観測点で記録された複数の地震記録を用いて、震源特性とサイト特性を取り除き、減衰特性を推定する手法である。

地震1に対する観測点Aの観測記録の振幅スペクトル $O_{1A}(f)$ は、震源スペクトル $S_1(f)$ 、伝播経路特性 $P_{1A}(f)$ 、サイト増幅特性 $G_A(f)$ を用いると(1)式で表される。

$$O_{1A}(f) = S_1(f) \cdot P_{1A}(f) \cdot G_A(f) \quad (1)$$

ここで図1のような一組のイベントをA、B、そのイベントを観測した一組の観測点を1、2とすると、地震1、2に対するスペクトル比は(2)(3)式で表される。

$$\frac{O_{1A}(f)}{O_{1B}(f)} = \frac{S_1(f) \cdot P_{1B}(f) \cdot G_B(f)}{S_1(f) \cdot P_{1A}(f) \cdot G_A(f)} = \frac{P_{1B}(f) \cdot G_B(f)}{P_{1A}(f) \cdot G_A(f)} \quad (2)$$

$$\frac{O_{2A}(f)}{O_{2B}(f)} = \frac{S_2(f) \cdot P_{2B}(f) \cdot G_B(f)}{S_2(f) \cdot P_{2A}(f) \cdot G_A(f)} = \frac{P_{2B}(f) \cdot G_B(f)}{P_{2A}(f) \cdot G_A(f)} \quad (3)$$

以上より、スペクトル比をとることによって震源スペクトルの影響は相殺される。さらに、これらの比から比(二重スペクトル比)をとると(4)式となり、サイト増幅特性を相殺することができる。

$$\frac{O_{1B}(f)}{O_{1A}(f)} \cdot \frac{O_{2A}(f)}{O_{2B}(f)} = \frac{P_{1B}(f)}{P_{1A}(f)} \cdot \frac{P_{2A}(f)}{P_{2B}(f)} \quad (4)$$

得られた二重スペクトル比を用いて震源距離 R_{ij} 、観測点間距離 R_{AB} 、円周率 π 、弾性波速度 V とすると、地震 j 、観測点 i に対する伝播経路特性 $P_{ij}(f)$ は、(5)(6)式で表される。

$$P_{ij}(f) = \frac{1}{R_{ij}} \exp(-\alpha_{ij}) \quad (5)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\pi f}{Q_s V} R_{ij} \quad (6)$$

(5)(6)式を(4)に代入すると Q_s 値を算出できる。

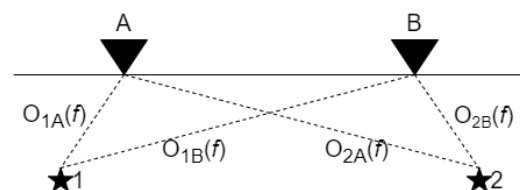


図1 二重スペクトル比法の概要

$$Q_s = \frac{2\pi(R_{1A} - R_{1B} + R_{2B} - R_{2A})}{V \cdot \ln\left(\frac{O_{1B}(f)}{O_{1A}(f)} \cdot \frac{O_{2A}(f)}{O_{2B}(f)} \cdot \frac{R_{1B}}{R_{1A}} \cdot \frac{R_{2A}}{R_{2B}}\right)} f \quad (7)$$

ここで、各地震に対して二重スペクトル比を計算するとき、観測点と震央の位置関係は、図2のように、2つの地震の震央位置が観測点ペアの両側に位置する場合と片側に位置する場合がある。震央が片側に位置する場合、(7)式中の $R_{1A} - R_{1B} + R_{2B} - R_{2A}$ は理論上では0となり、(7)式の左辺も0となるため Q_s 値を正しく評価することができない。一方で、観測点ペアの両側に位置する場合には $R_{1A} - R_{1B} + R_{2B} - R_{2A}$ が観測点ペアの間の距離(R_{AB})の2倍となり(7)式は(8)式で表され Q_s 値を正しく評価することができる。

$$Q_s = \frac{-2\pi R_{AB}}{V \cdot \ln\left(\frac{O_{1B}(f)}{O_{1A}(f)} \cdot \frac{O_{2A}(f)}{O_{2B}(f)} \cdot \frac{R_{1B}}{R_{1A}} \cdot \frac{R_{2A}}{R_{2B}}\right)} f \quad (8)$$

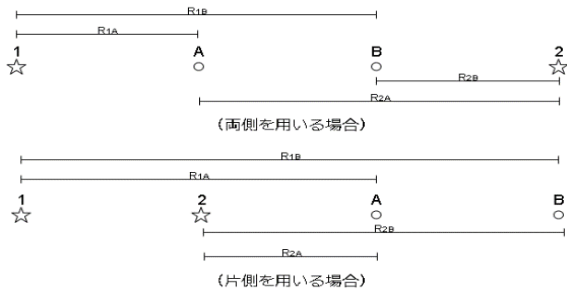


図2 観測点ペアに対する地震の位置による違い

本研究では K-NET、KiK-net で得られた観測波形から地震の S 波初動を読み取り、5.12 秒間の加速度記録の両端 1/32 に Cosine 型のテーパをかけ、フーリエスペクトルを算出した。幅 0.8 Hz の Parzen window で平滑化を行い、NS 成分と EW 成分のスペクトルの二乗和の平方根をとり合成を行った。得られたスペクトルを用いて(2)式および(3)式から観測点ペアのスペクトル比を計算した。以上の手順で得られたスペクトル比を用いて、各地域で地震の組み合わせごとに(4)式から二重スペクトル比を求め、対数軸上で等間隔になるように 25 個の周波数での値を抽出した。最後に(7)式により、 Q_s 値を算出した。(7)式の定数である S 波速度 V_s は二重スペクトル比を用いて霧島の減衰特性を評価した泉谷 (2000) を参考に $V_s=3.5\text{km/s}$ と仮定した。また、二重スペクトル比の値が 1 を超える場合は、(8)式により Q_s 値が負の値となり、 Q_s 値を正しく評価できない。 Q_s 値の評価を正しく行うために二重スペクトル比が 1 より小さい値のみを用いて複数の地震により得られる Q_s 値を平均して評価することとした。本研究において扱う周波数帯域は、0.2~20Hz である。

3. 解析に用いるデータ

3.1 対象とする領域と観測点の選定

本研究では九州地方の火山地帯直下の減衰特性を評価するために、霧島、桜島、開聞岳の3つの活火山と、比較のため活火山がない阿蘇山と霧島間の地域の合計4つの領域で解析を行った。減衰特性を評価するための観測点ペアは、霧島では K-NET 横川 (KGS006) と KiK-net 都城北 (MYZH12)、桜島では K-NET 日吉 (KGS011) と KiK-net 大隅 (KGS008)、開聞岳では K-NET 枕崎 (KGS019) と KiK-net 佐多 (KGS011)、活火山がない地域では K-NET 五木 (KMM014) と KiK-net 南郷 (MYZH05) をそれぞれ用いた。

3.2 地震データの選定

3.1 節で選択した4つの領域と観測点ペアに対して、地震データの選定を行った。地震データの選定においては以下の条件を満たすものを選定した。

- 1) 観測点ペアの直線上から垂直方向±50 km の範囲内にあること
- 2) 震源深さが 30 km 以浅
- 3) 最大加速度が 100 cm/s² 以下

霧島では9地震、桜島では4地震、開聞岳では6地震、火山がない領域では8地震を選定した。3.1、3.2 節で選定した観測点ペアと地震を図3に示す。

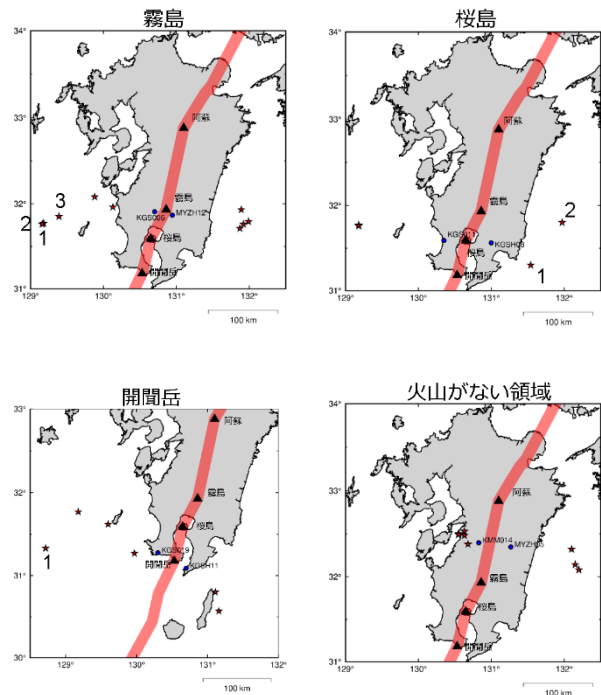


図3 使用した観測点と地震の位置

4. 二重スペクトル比法による Q_s 値の算定

3.2 節で選定した地震データには観測点ペアを結んだ直線の延長線上から外れた地震も含まれており、この延長線上から外れた地震が Q_s 値にどのような影響を与えているかを知ることができ、二重スペクトル比法の適用限界範囲を知ることができる。そこで本研究ではすべての地震を用いた場合と観測点ペアを結んだ直線の延長線上から外れた地震を除いた場合とで比較を行った。

4.1 すべての地震を用いた場合

Q_s 値を算出した結果を図4に示す。霧島では20個、桜島では4個、開聞岳のペアでは8個、火山がない領域では15個の二重スペクトル比から Q_s 値を算出した。各グラフの下段の棒グラフは解析に使用したデータ数を表している。図中の直線（太実線）は、それぞれの二重スペクトル比から計算され、周波数ごとに平均された Q_s 値に対して最小二乗法により求めた近似曲線である。

霧島では、解析の用いたデータ数は多く、推定された Q_s 値のばらつきは比較的小さい。求められた近似曲線は $Q_s = 55f^{0.80}$ となった。泉谷（2000）は、同じ霧島直下の地下構造に対して二重スペクトル比法を適用して、 Q_s 値を求めている。その近似曲線は $Q_s = 45f^{0.75}$ であり、本研究の結果は近い値となった。

桜島では、解析に使用されたデータは各周波数で4データ程度と少ないが、推定された Q_s 値のばらつきは小さく、近似曲線は $Q_s = 100f^{0.91}$ であった。この値は、既往の研究^{10),11),12)}による九州地方の平均的な Q_s 値と近い値となった。

開聞岳では、特に0.4~3 Hz付近の Q 値のばらつきが大きく、近似曲線を求めると $Q_s = 240f^{0.30}$ となる。これは既往の研究による平均的な Q_s 値よりも大きい。ただし、ばらつきの大きい0.4~3 Hzの Q_s 値を除外して近似をすると、 $Q_s = 112f^{0.55}$ となり、桜島の Q_s と近い値となる。

火山がない領域についても、推定された Q_s 値のばらつきは大きく、近似曲線は $Q_s = 479f^{0.51}$ である。既往の研究による平均的な Q 値よりもかなり大きい値となった。

4.2 観測点ペアの結んだ直線の延長線上から外れた地震を除いた場合

観測点ペアの直線上から外れた地震を除いた場合の

Q_s 値を図5に示す。観測点ペアを結ぶ直線に対する方が比較的大きい地震を対象として除いた。ただし、除いた場合に、解析に使用したデータ数が0となる地震は対象から外した。霧島ではまず図3の地震1、2を除いた場合の Q_s 値は $Q_s = 50f^{0.84}$ となりすべての地震を用いた場合に比べて低い値となり、ばらつきも小さくなった。地震1、2、3を除いた場合の Q_s 値は $Q_s = 48f^{0.86}$ と、地震1、2を除いた場合よりもさらに小さい値となり、ばらつきも小さくなった。桜島では地震1を除いた場合は $Q_s = 83f^{0.83}$ となりすべての地震を用いた場合に比べて低い値となり、ばらつきも小さくなった。開聞岳では地震1を除いた場合は $Q_s = 229f^{0.33}$ となりすべての地震を用いた場合に比べて低い値となり、ばらつきも小さくなった。

4.3 考察

全ての地震を用いた場合と観測点ペアの直線上から外れた地震を除いた場合とでは Q_s 値は後者の方がばらつきの小さい値が得られた。これは直線上から外れた地震を用いた場合は、観測点までの波線経路が異なり二重スペクトル比から観測点間の伝播経路特性を抽出することができないためであると考えられる。

観測点ペアの直線上から外れた地震を除いた場合の Q_s 値をより正確な Q_s 値とすると霧島では、 $Q_s = 48f^{0.86}$ であり、泉谷（2000）の霧島直下の深さ10 kmよりも浅い部分での $Q_s = 45f^{0.75}$ とほぼ一致し、霧島直

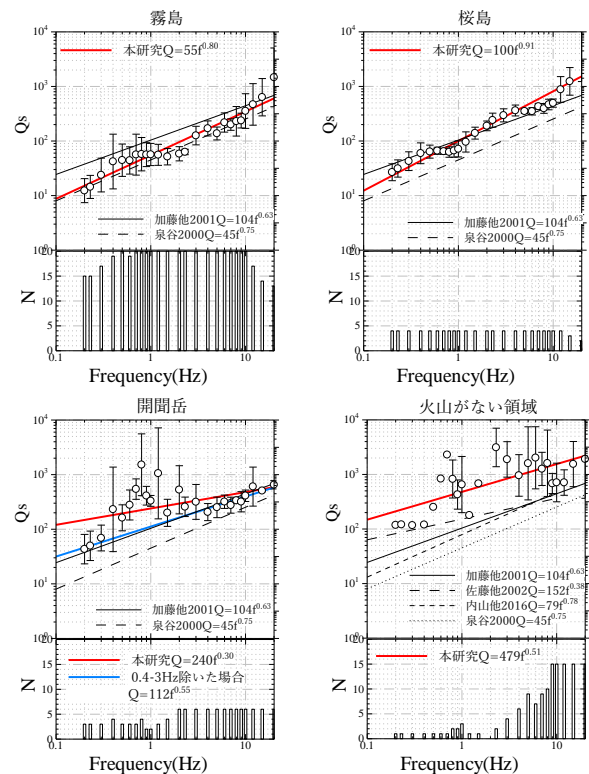


図4 すべての地震を用いた場合

下の減衰の影響を説明できる。桜島では、 $Q_s = 83f^{0.83}$ とやや Low- Q_s となり、既往の研究による Q_s 値に近い値となるが、これは KGS011 と KGS08 の観測点間距離が 62 km と比較的大きく桜島直下のみ減衰特性を抽出することができなかったことが原因と考えられる。

開聞岳では、 $Q_s = 229f^{0.33}$ であり、友澤他 (2019)¹³⁾ の九州地方でブロックインバージョン解析を用いた減衰構造と比較すると開聞岳直下には Low- Q_s な地域は見当たらず 0.4~3 Hz のばらつきの多いデータを除くと既往の研究による Q_s 値に近い値が得られるが他の活火山と比べて開聞岳では減衰の影響は小さいことがわかる。

火山がない領域では $Q_s = 479f^{0.51}$ であり、中村(2009)¹⁴⁾ の日本列島下でスペクトルインバージョン解析を用いた 3 次元減衰構造ではこの地域では High- Q_s な値が得られているが、使用できるデータが少なく、選定した前弧側の地震も観測点ペアの直線上から外れているものが多いことから、既往の研究による Q_s 値と比較するとかなり大きい値となった。

全体的な傾向としては友澤・他 (2019) による減衰構造と近い傾向が得られた。

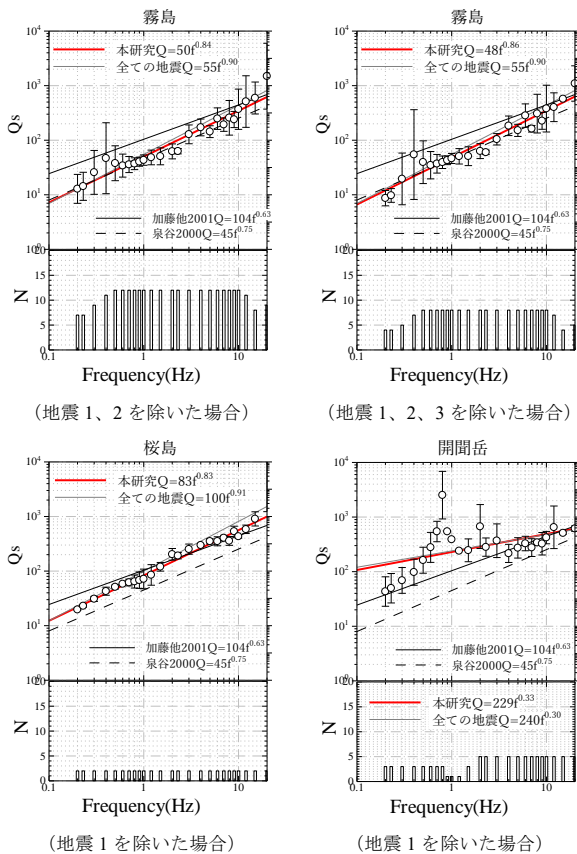


図5 観測点ペアの結んだ直線の延長線上から外れた地震を除いた場合

5. まとめ

本研究では、九州地方火山地帯において二重スペクトル比法を用いて減衰特性の評価を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 観測点ペアを結ぶ直線上から外れた地震を除いた場合 Q_s 値のばらつきは小さくなった。
- ・ 火山などの直下の減衰特性の影響を評価する場合は観測点間距離が大きい場合火山のみの減衰の影響を評価できない。
- ・ 霧島と桜島では比較的 Low- Q_s な値となり、火山による減衰が大きい Q_s 値が得られた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：地盤震動—現象と理論—、p.180、日本建築学会、2005
- 2) 防災科学技術研究所：ジオ・ステーション、<http://www.geo-stn.bosai.go.jp/>
- 3) 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 (第2輯)、第39巻、pp.151-156、1986
- 4) 中村亮一、植竹富一：地殻・上部マントルでの減衰—トモグラフィ手法による Q 値評価とその利用—、物理探査、第65巻、第1&2号、pp.67-77、2012
- 5) 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.
- 6) 山中佳子、菊池正幸：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
- 7) 泉谷恭男：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、土木学会論文集、No.640/I-50、pp.225-230、2000
- 8) 松澤孝紀、武尾実、井出哲、飯尾能久、伊藤久男、今西和俊、堀内茂木：長野県西部地域における二重スペクトル比による S 波減衰の推定、地震2、Vol.56、pp.75-88、2003
- 9) 山田雅行、小田義也：二重スペクトル比法で推定した主要活断層帯の減衰特性、日本地震工学会論文集、第18巻、第1号、pp.59-76、2018
- 10) 加藤研一：K-NET 強震記録に基づく1997年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価、日本建築学会構造系論文集、第543号、pp.61-68、2001
- 11) 佐藤智美、巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性、日本建築学会構造系論文集、第556号、pp.15-24、2002
- 12) 内山泰生、山本優：スペクトルインバージョン解析に基づく2016年熊本地震の震源・伝播経路特性の評価、日本地震工学会論文集、第16巻、第10号、2016
- 13) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎：九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定 (その1) ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019
- 14) 中村亮一：短周期地震動記録に基づく日本列島下の三次元減衰構造 Q_s ・震源スペクトル・地盤増幅の同時インバージョンとその応用、東京大学、2009、博士論文