

# 二重スペクトル比法に基づく九州地方の減衰特性に関する研究

## 堆積平野下のS波減衰特性の推定

清水 志遠

### 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、大地震の強震動を予測するには、これらの三要素を適切に把握しておくことが重要となる。このうち伝播経路の影響、すなわち地震波の減衰特性は、地震波の波面が広がることによる影響と伝播媒質の非弾性的性質や不均質性による影響によって特徴づけられる。媒質による減衰の大きさを表す指標がQ値であり、この値が大きいほど地震動振幅の減衰が小さくなる<sup>1)2)</sup>。

Q値を求める代表的な手法として、スペクトルインバージョン<sup>3)</sup>がある。この手法では震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性を同時に評価することができるが、求められたQ値は、解析に用いた地震の震源や観測点を含んだ比較的広範囲の領域の平均的な減衰特性を表す。

一方、Matsuzawa *et al.*(1989)<sup>4)</sup>によって提案された二重スペクトル比法では、まず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で震源の影響を取り除く。さらに、これに対してもう一つの地震に対するスペクトル比で比をとることで、地盤による影響も取り除き伝播経路の影響のみを抽出することができる<sup>4)5)</sup>。この手法によって求められたQ値は、解析に用いた観測点間、すなわち特定の領域の減衰特性を表す。しかし、二重スペクトル比法は震央と観測点の位置関係に厳しい制約条件があるため、十分な観測データがないと適用は難しい。1995年兵庫県南部地震以降、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-net、気象庁の95型震度計による高密度強振観測網が整備されたことで、二重スペクトル比法によるQ値の評価事例は増えつつあるがそれでも十分であるとは言えない。伝播経路の減衰評価において広範囲でのQ値の評価も重要であるが、細かい範囲でのQ値の評価も重要であり、二重スペクトル比法によるQ値の評価事例をさらに蓄積していく必要がある。

そこで本研究では、九州地方の平野周辺の観測点ペアに二重スペクトル比法を適用して堆積平野下のS波のQ値(Q<sub>s</sub>値)の特性について評価する。

### 2. 解析方法

本研究では対象となる平野下を通る地震波を用いて、平野下における減衰特性を推定する。用いた手法は二重スペクトル比法<sup>4)5)</sup>である。山田・小田(2018)<sup>6)</sup>に従い、二重スペクトル比法の原理を説明する。今、図1に示すような、2つの観測点と、その延長上の両側で発生する2つの地震1、2を考える。

ここで、地震1に対する観測点Aの観測記録のフーリエスペクトルは、震源スペクトル $S_1(f)$ 、伝播経路特性 $P_{1A}(f)$ 、そして、地盤増幅特性 $G_A(f)$ を用いて、(1)式のように表すことができる。

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

ここで、地震1の記録に対して、観測点Aに対する観測点Bのフーリエスペクトル比を考えると(2)式のように表され、震源特性が打ち消される。

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

同様に、地震2に対するスペクトル比は(3)式で表される。

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

さらに、これらのスペクトル比同士で比をとる(二重スペクトル比)ことで、観測点A、Bの地盤増幅特性が打ち消され(4)式が得られる。

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

ここで、震源距離を $R_{ij}$ 、円周率を $\pi$ 、弾性波速度を $V$ 、S波のQ値を $Q_s$ としたとき、地震 $i$ 、観測点 $j$ に対する

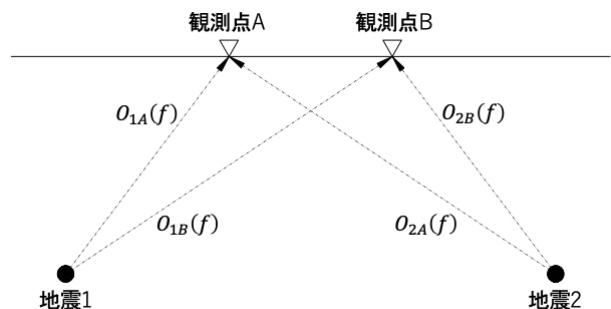


図1 二重スペクトル比法の概要

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)式に代入することで $Q_s$ 値を求めることができる。

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

なお、本研究の解析では、フーリエスペクトルではなく、パワースペクトルを用いる。パワースペクトルを $G_{ij}(f)$ 、そのデータ長を  $T$  とすると、両者の関係は(8)式のように表される<sup>7)</sup>。

$$G_{ij}(f) = \frac{1}{T} |O_{ij}(f)|^2 \quad (8)$$

よって、(7)、(8)式より、 $Q_s$ は以下の式で算出される。

$$Q_s = \frac{2\pi(R_{1A} - R_{1B} + R_{2B} - R_{2A})}{V \cdot \left[ \frac{1}{2} \ln\left(\frac{G_{1B}(f)}{G_{1A}(f)} \cdot \frac{G_{2A}(f)}{G_{2B}(f)}\right) + \ln\left(\frac{R_{1B}}{R_{1A}} \cdot \frac{R_{2A}}{R_{2B}}\right) \right]} f \quad (9)$$

本研究では防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET、KiK-net<sup>8)</sup>で得られた観測波形から地震の S 波初動を読み取り、S 波到達時刻の 2.0 秒前から 10.24 秒間を解析区間とした。震源距離と方位角を求め、NS、EW 成分を Radial、Transverse 成分に回転させた。得られた Transverse 成分の解析長の前後 10% に cosine 型のテーパーをかけ、フーリエスペクトルを算出した。さらに、幅 0.4Hz の Parzen window で平滑化を行った後にパワースペクトルを算出した。得られたスペクトルを用いて(2)、(3)式から観測点ペアのスペクトル比を計算した。以上の手順で求められたスペクトル比を用いて、各対象領域での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、最後に(9)式によって $Q_s$ 値を算出した。(9)式の定数である S 波速度 $V_s$ は $V_s = 3.4 \text{ km/s}$ とした。また、(9)式における二重スペクトル比と震源距離の比の積の値が 1 を超える場合、算出した $Q_s$ 値が負となって $Q_s$ 値を正しく評価できない。そのため値が正となった $Q_s$ 値のみを平均して評価することとした。こうして得られた $Q_s$ 値の平均値を、対数軸上で等間隔となるように 250 個の周波数での値を抽出した。これらの値に対して最小二乗法による近似を行い、 $Q_s = Q_0 f^n$ の形にモデル化した。本研究の対象となる周波数帯域は、0.1~10 Hz である。

### 3. 解析に用いるデータ

#### 3.1 対象となる領域・観測点

本研究では九州地方の堆積平野下の減衰特性を評価するため、筑紫平野、熊本平野、中津平野、大分平野、宮崎平野、肝属平野の合計 6 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、筑紫平野は K-NET 久留米 (FKO011) と K-NET 八女 (FKO013)、K-NET 柳川 (FKO015) と K-NET 佐賀 (SAG007) の 2 組、熊本平野は K-NET 大津 (KMM005) と K-NET 熊本 (KMM006)、中津平野は K-NET 中津 (OIT002) と K-NET 豊後高田 (OIT003)、大分平野は K-NET 佐賀関 (OIT011) と KiK-net 野津原 (OITH05) のそれぞれ 1 組、宮崎平野は KiK-net 国富 (MYZH10) と KiK-net 佐土原 (MYZH11)、K-NET 西都 (MYZ008) と K-NET 宮崎 (MYZ013) の 2 組、肝属平野は K-NET 大崎 (KGS015) と K-NET 鹿屋 (KGS007)、K-NET 大崎 (KGS015) と KiK-net 大隅 (KGS008) の 2 組を用いた。K-NET 大津 (KMM005) は熊本平野からややはずれた場所に位置するが、震源と観測点の位置の兼ね合いで取り扱うこととした。

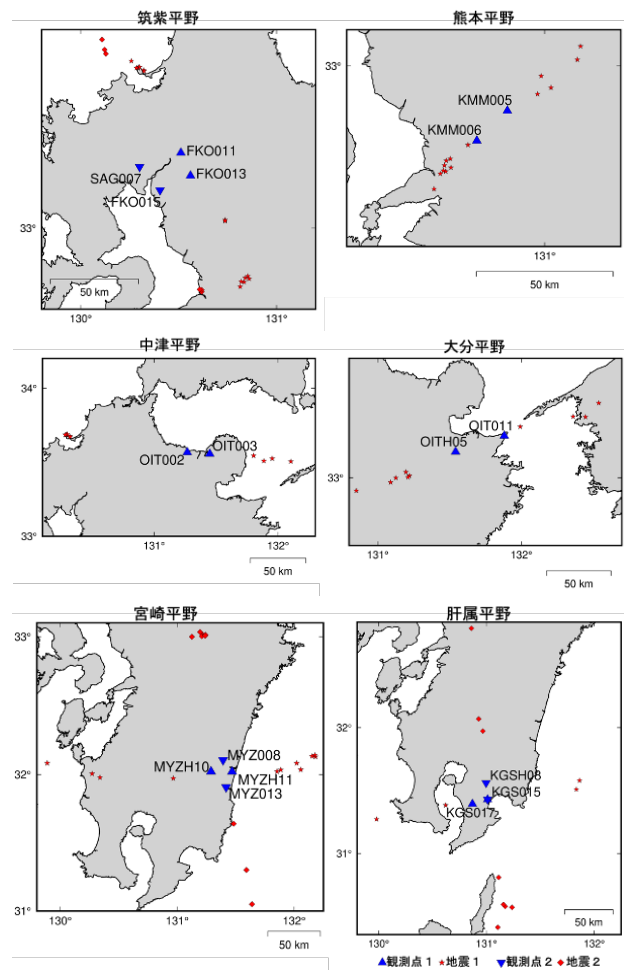


図 2 解析に用いた観測点と地震の位置

### 3.2 地震データ

3.1 節で選択した6つの領域と観測点ペアに対して、地震データの選定を行なった。地震データは、観測点ペアの両方で記録が取れていたマグニチュード3.5以上の地震のうち、震源が観測点ペアの直線上近辺に位置したものを選定した。

筑紫平野では21地震、熊本平野では14地震、中津平野では12地震、大分平野では10地震、宮崎平野20地震、肝属平野では13地震を選定した。3.1節と3.2節で選定した観測点と地震の位置を図2に示す。

### 4. 解析結果

$Q_s$  値を算出した結果を図3に示す。筑紫平野では65個、熊本平野では45個、中津平野では36個、大分平野では24個、宮崎平野では46個、肝属平野では21個の二重スペクトル比から $Q_s$  値を算出した。図中の赤の直線は、平均した $Q_s$  値を最小二乗法によってモデル化した近似曲線である。 $Q_s$  値の平均値は、観測点ペアにおいてそれぞれの二重スペクトル比から求められた $Q_s$  値を周波数ごとに平均することで求めた。また、図中にプロットされた丸印は周波数ごとの平均値であり、平均値±標準偏差によって得られたデータのばらつきも同時に示している。

筑紫平野で解析に使用したデータ数は多く、推定された $Q_s$  値に近似直線から大きく外れた周波数帯はない。求められた近似曲線は $Q_s = 112f^{0.85}$  となり、川瀬・松尾(2004)<sup>9)</sup>のスペクトルインバージョンによって求められた九州地方における内陸地震の平均的な $Q_s$  値に近い値となった。観測点ペアごとに検討するとFKO015とSAG007のペアを用いた方が傾きの大きい結果となった。観測点ペアごとに解析に用いた地震の数に違いはあるものの、観測点の両端の地震にはそれぞれ同じ断層帯の地震と考えられ、震央の位置や震源の深さなどに大きな違いは見受けられない。そのため、同じ筑紫平野内でも地殻の減衰構造で差がある可能性が考えられる。

熊本平野でも解析に使用したデータ数は多く、得られた $Q_s$  値は9 Hz付近で近似曲線から大きく外れている。求められた近似曲線は $Q_s = 87f^{0.69}$  となり、内山・山本(2016)<sup>10)</sup>のスペクトルインバージョンによる熊本平野周辺の平均的な $Q_s$  値と同等の値が得られた。これは、内山・山本(2016)同様、本研究で解析に用いた地震の多くが2016年熊本地震の一連の地震であることもその一因であると考えられる。

中津平野で求められた近似曲線は $Q_s = 138f^{0.86}$  となり、川瀬・松尾(2004)による内陸の地震の $Q_s$  値と同等の値が得られた。

大分平野で求められた近似曲線は $Q_s = 120f^{0.81}$  となり、川瀬・松尾(2004)による内陸の地震の $Q_s$  値とプレート間の地震の $Q_s$  値の中間ほどの値が得られた。

中津平野と大分平野を比較すると、川瀬・松尾(2004)の研究結果と中村(2009)<sup>11)</sup>の三次元減衰構造では大分平野よりも中津平野の方がLow- $Q_s$  となる点で一致している。しかし、本研究では中津平野と大分平野で得られた $Q_s$  値は同等、強いて言えば中津平野の方がやや大きい値を示した。本研究の中津平野と大分平野における解析では、ともに観測点の東側に位置する地震の震源深さが10 km程度のもものが多くを占めていた。その一方で観測点の西側の地震の震源深さが、大分平野の解析に用いた地震の多くは40 kmほどであったのに対し、中津平野では45~76 kmの地震を解析に用いている。中村(2009)の三次元減衰構造を比較すると深さが0~30 kmの中津平野と深さが30~60 kmの大

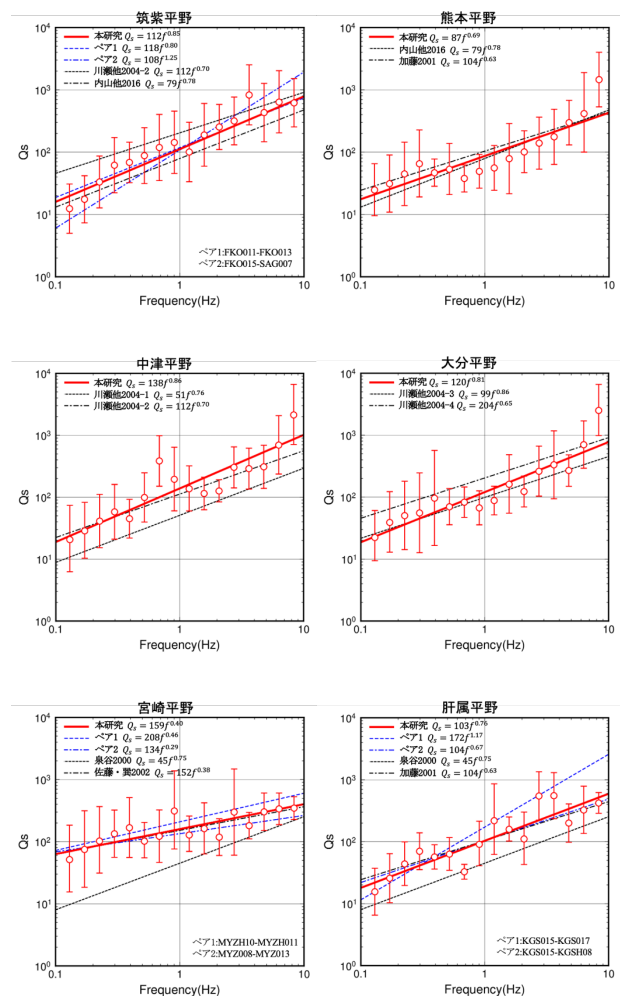


図3 算出した $Q_s$  値

分平野の $Q_s$ 値は同程度であると捉えることができる。厳密なことは詳しく検討をしないとわからないが、以上から中津平野と大分平野とでそれぞれ異なる深さでの $Q_s$ 値が得られた可能性がある。 $Q_s$ 値の空間的な変動の可能性は泉谷・池谷(2002)<sup>12)</sup>においても指摘されており、本研究においては中津平野下と大分平野下で $Q_s$ 値が近い値となるような深さでの $Q_s$ 値をそれぞれで求めた可能性が考えられる。

宮崎平野では得られた $Q_s$ 値は全体的に近似直線に近い値となった。求められた近似曲線は $Q_s = 159f^{0.40}$ であり、日向灘付近の地震を用いて海溝性地震の $Q_s$ 値を求めた佐藤・巽(2002)<sup>13)</sup>との似た値を示した。

肝属平野では、推定された $Q_s$ 値は0.7 Hz付近で急に落ち込み、そのばらつきも小さい。求められた近似曲線は $Q_s = 103f^{0.76}$ となり、加藤(2001)<sup>14)</sup>のスペクトルインバージョンによって求められた鹿児島県北西部の平均的な $Q_s$ 値と同程度の値であった。

泉谷(2000)<sup>15)</sup>では二重スペクトル比法を用いて霧島直下の減衰特性の評価を行い、 $Q_s = 45f^{0.75}$ という値が得られた。加藤(2001)ではスペクトルインバージョンによって霧島の西側にあたる鹿児島県北西部の平均的な $Q_s$ 値を求め、その値は霧島直下の2倍ほどであった。本研究では霧島の東側に位置する宮崎平野と南側に位置する肝属平野の $Q_s$ 値を求め、それぞれで霧島の2~3倍ほどの値が得られた。以上より霧島とその周りを取り囲む領域の $Q_s$ 値が得られたが、これらから霧島直下の減衰の影響は大きい、今回解析した範囲に限るとその周囲まではLow- $Q_s$ となる領域は見られないということが言える。また、これは友澤・他(2019)<sup>16)</sup>の減衰構造と近い傾向であった。

## 5. まとめ

本研究では、二重スペクトル比を用いて九州地方の堆積平野下の減衰特性の評価を行なった。得られた知見を以下にまとめる。

- 求めた $Q$ 値は $87f^{0.69} \sim 159f^{0.40}$ となり、対象とした平野下の減衰構造は既往の研究は一致して、特別Low- $Q_s$ となる領域はみられなかった。
- 筑紫平野において観測点ペアごとの $Q_s$ 値の傾向に違いが出たことから、同じ平野内であっても場所によっては減衰構造に差がある可能性がある。
- 霧島直下ではLow- $Q_s$ となると言われているが、今回解析した範囲に限るとその周囲でLow- $Q_s$ となる領域は見られない。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：地盤震動-現象と理論-、p180、日本建築学会、2005
- 2) 日本建築学会：地盤震動と強震動予測-基本を学ぶための重要項目一、pp.155-176、日本建築学会、2016
- 3) 岩田知孝、入倉孝次郎：観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性およ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) Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Takagi, A.:  $Q_p$  Structure beneath the Northeastern Japan Arc Estimated from Twofold Spectral Ratio Method, Tohoku Geophys. Journ, Vol.32, pp.21-33, 1989
- 5) 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
- 6) 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、pp59-76、2018
- 7) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、p81-84、鹿島出版会、1994
- 8) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET、KiK-net)、<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 9) 川瀬博、松尾秀典：K-NET、KiK-net、JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析、日本地震工学会論文集、第4巻、第1号、2004
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 泉谷恭男、池谷太輔：強震動の二重スペクトル比を用いた $Q_s$ 値の空間的変動の推定、土木学会論文集、No.710/I-60、479-484、2002、7
- 13) 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、15-24、2002、6
- 14) 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、pp61-68、2001
- 15) 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
- 16) 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