

位相差スペクトルを用いて推定した箱根直下の異方性構造の特徴

本多 亮*

Anisotropic structures beneath Hakone volcano revealed by phase difference spectra

by

Ryou HONDA*

1. はじめに

火山の地下には多くの亀裂系が存在し、それらが地下での熱水やガスの移動・上昇のチャンネルとして使用され、群発地震活動や傾斜変動を引き起こすことがある。箱根での例を挙げると、Yukutake *et al* (2011) では群発地震の際に微小地震の震源が流体の移動に伴い同心円状に移動していく様子が観測された。また2015年6月に発生した水蒸気噴火の直前には、地下深部からの熱水やガスが亀裂系を移動、上昇したことによって生じた傾斜変動が観測されている(本多ほか、2015)。このことから、火山体内の亀裂系の分布形状は、火山性地震の発生や水蒸気噴火といった現象に大きく影響を与えると考えられる。

地下に存在する亀裂系は、地震波の速度に異方性を生じさせるため、地震波の異方性について調べることで地下の亀裂系の情報がある程度得ることが可能である。地震波の異方性を調べる方法としてよく用いられるのは、S波のスプリッティング(Shear wave splitting)解析である。これはS波が異方性媒質中を伝播する際に、互いに直交する振動ベクトルをもつ異なった速度のS波に分離する現象を観測するものである。波が分離する原因としては、物質を構成する鉱物の物性や地中のクラックなどが考えられている。異方性媒質の特性は、先行波の振動方向(LSPD: Leading Shear-wave Polarization Direction)と後続波と先行波の到着時間差(Dt: Delay time)の観測から推定される。地中に存在するクラックによってスプリッティングが起こると仮定すると、クラック面に直交する方向に振動する遅いS波と、平行な方向の振動方向をもつ速いS波の2つの波に分離する。

Honda *et al* (2014) は、S波スプリッティング解析により、地下の異方性構造について調べた。彼らはボアホ

ール観測点である駒ヶ岳、小塚山、湖尻観測点の2007年までのデータを用いて箱根の異方性構造を推定し、駒ヶ岳付近では深さ5km付近まで徐々に異方性強度が減少していくのに対し、湖尻及び小塚山付近では、深さ2km付近までに異方性強度の強い媒質が存在する層構造的な異方性構造を持っていることを示した。亀裂系の特徴的なサイズは、スプリッティングパラメータが適用できる信頼区間の高周波側の上限値から推定できる。Honda *et al* (2014) では2-8Hzの範囲で解析を行ったが、実際には解析対象の周波数範囲よりも高周波数まで同じパラメータで説明できることがある(例えば、Mizuno *et al*, 2001)。そこで本報告では、S波スプリッティング解析で得られたパラメータの適用可能な短周期側の限界(信頼区間)を、Mizuno *et al* (2001)と同様の手法で推定した。

2. 方法

まずHonda *et al* (2014)と同様の手法でS波スプリッティング解析を行った。スプリッティングパラメータの推定には、水平2成分の波形の相互相関係数を用いるクロスコリレーション法(例えば、Shih and Meyer, 1990)を採用した。データは1995年1月から2015年12月までに発生したM0以上の地震について、駒ヶ岳・小塚山・湖尻・元箱根・金時・大涌谷で観測された速度波形に2-8Hzのバンドパスフィルターをかけ、S波部分を含む0.5秒間を切り出したものを使用した。ただし、各観測点への入射角が40°よりも小さいイベントのみを採用した。得られたパラメータ(LSPD, Dt)の誤差は、t検定によって推定した(Kuo *et al*, 1994)。推定されたパラメータのうち、水平2成分の波形の相関0.85以上、LSPDの誤差が±15°、Dtの誤差が0.03秒

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

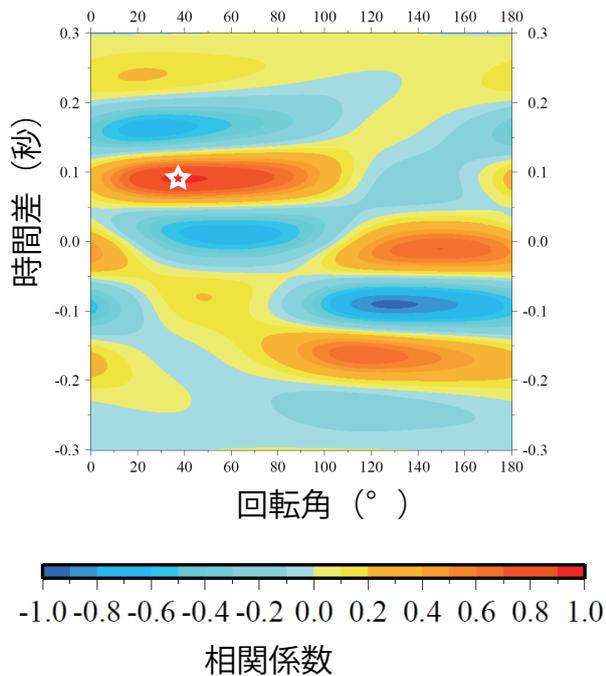


図1 水平2成分の相互相関係数の分布。2015年5月14日9時28分のイベントの例(湖尻観測点)。相関係数が最大となるのは、回転角39°、時間ずれ0.09秒の時(☆)。

以下の制約条件を満たしたものを採用した。図1に解析結果の例を示す。

次に Mizuno *et al* (2001) の手法を用いて、スプリッティング解析で得られた LSPD、Dt の信頼区間を推定した。2-8Hz の解析で得られたパラメータを用いて、フィルターを通さない生波形の回転・時間ずれを行い、2つの波形の位相差スペクトルを計算した(図2)。スプリッティングパラメータを推定するために使用した周波数帯(2-8Hz)においては水平2成分の位相差はほぼ0となっていることが期待されるが、解析周波数帯の外であっても、2-8Hzの解析で得られたパラメータが有効であれば、同様に位相差が0に近くなるはずである。位相差の小さい周波数帯を推定するため、2つの波形の位相差スペクトルを計算したあと、10ポイント(約4Hz分)の窓で位相差の移動平均とばらつきを計算し、移動平均が±0.25rad、ばらつきが0.1以下である場合、十分に位相差が小さいとした。同様の操作を観測点ごとにスプリッティングパラメータが得られたすべての地震について行い、周波数ごとに位相差が十分小さいと判定された数を積算し、信頼度ヒストグラムを作成した。波形データは0.5秒分の長さしかないが、スペクトルを計算する際に0埋めして見かけ上2.56秒の波形にする。そのため、位相差スペクトルでは低周波数領域にもデータが存在するが、2Hzよりも低周波側は物理的には意

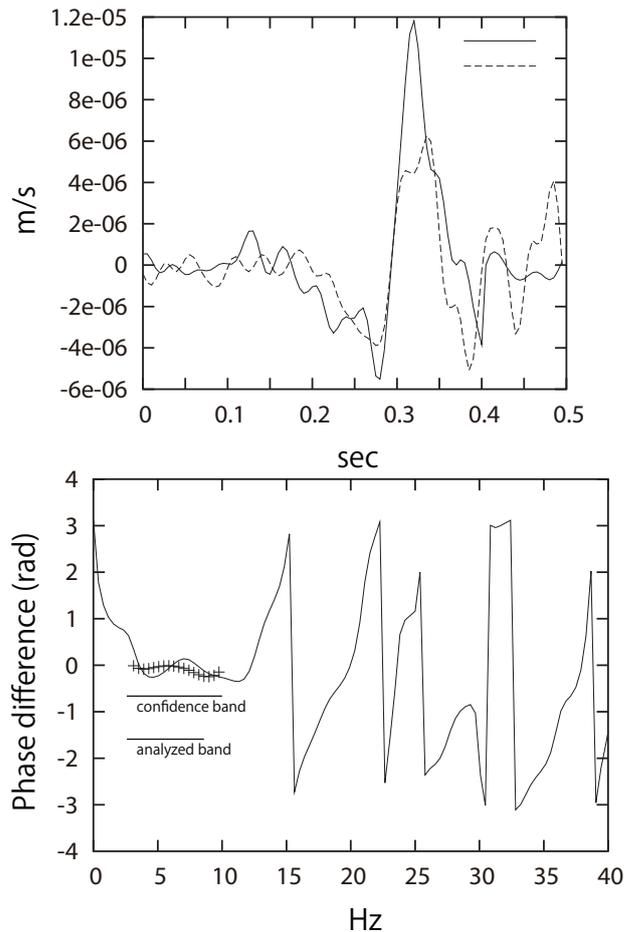


図2 上:2-8Hzの周波数帯の解析から得られた、LSPDとDtを用いて回転および時間をずらした波形のS波部分(フィルターなし)。下:二つの波形の位相差スペクトル。10ポイントの窓で位相差の移動平均を計算し、その値が0.25rad以下かつばらつきが0.1rad以内の場合に、位相差が0に近い(+)とした。

味がない。

位相差スペクトルを計算するときに注意が必要なのが、観測設備の更新に伴うサンプリングレートの変更である。温地研の観測点はこれまで1989年に整備されて以来、ロガーや地震計の更新に伴いサンプリングレートが変更されている。駒ヶ岳、湖尻は2008年にサンプリングが120Hzから200Hzに変更され、その他の点は2010年に同様の変更が行われている。スプリッティングパラメータの信頼区間を推定するに当たり、長期間のデータを比較するためにはサンプリングレートをそろえる必要がある。そのため位相差スペクトルを計算する際に、波形を線形補完して再サンプリングを行う周波数変換フィルターを挿入して200Hzに統一した。

3. 結果

図3に各観測点で推定されたスプリッティングパラメータを示す。金時観測点のLSPDは他の観測点に比較して明らかに異なり、東西に近い方向を持っている。箱根カルデラ内の金時山付近で発生する群発地震活動の震源は、東西に並ぶように発生する傾向があることから、金時山観測点付近の地殻には、東西方向に亀裂系が発達している可能性も考えられる。金時観測点を除いてLSPDはほぼ北西南東方向であり、広域応力場の方向に近い(例えば、Seno *et al.*, 1993)。駒ヶ岳観測点はHonda *et al.* (2014)で報告されているLSPDよりも10度程度南北方向にずれているように見えるが、LSPDについては誤差を±15°まで認めているので、この差の有意性については検討が必要である。本報告では、推定されたスプリッティングパラメータについては詳細な解釈は行わない。

図4に、それぞれの観測点で得られたパラメータの信頼度ヒストグラムを示す。このヒストグラムの数値の大きい周波数帯では、2-8Hzで推定されたスプリッティングパラメータが有効であると考えられる。スプリッティングが発生するのはクラックよりも波長が十分長いとする仮定が成り立つ範囲であるから、本来は低周波側の位相差は0に近いはずである。しかし、いずれの観測点でも低周波側で信頼度は高くなく、位相差が0になっていない場合も多いことを示している。これは、使用している地震が小さいためノイズの影響を強く受けている

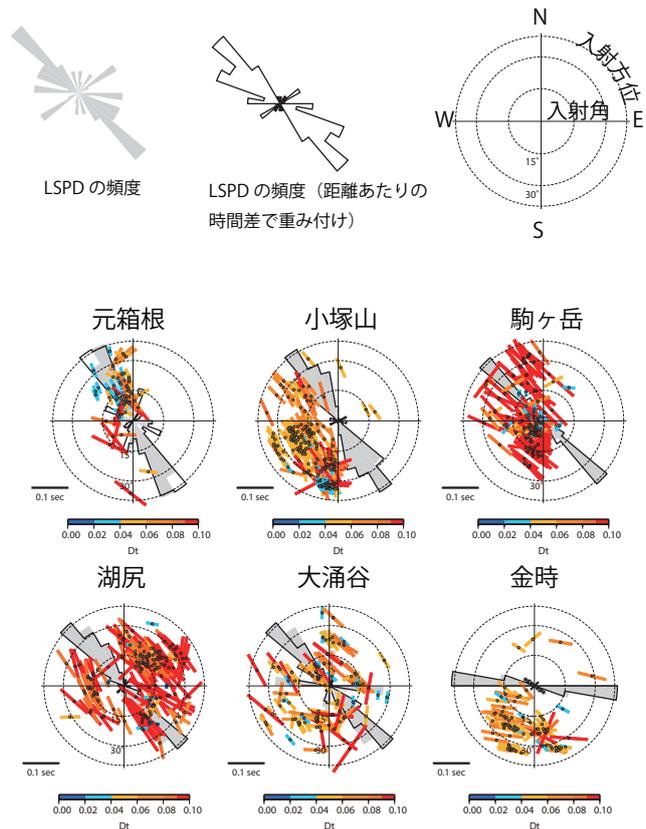


図3 S波スプリッティング解析によって得られた、各観測点のLSPDとDt。色付きバーは、その向きでLSPDを、長さとしてDtを表している。プロットされている位置は、観測点から見た方位と破線の入射角を示す。ローズダイアグラムは、LSPDの分布をグレーでしめし、伝播距離で重み付けしたLSPDの分布を黒い太線で示す。

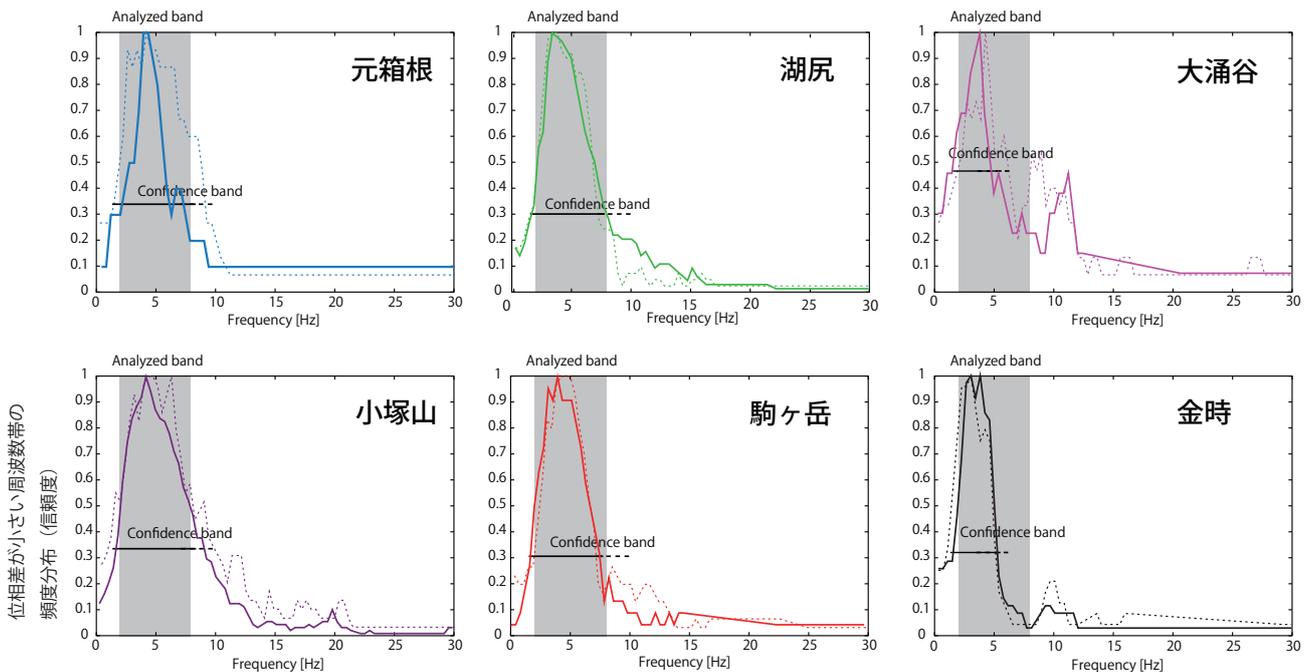


図4 図4の位相差スペクトルで、十分に位相差が小さいと判定された周波数(+)の頻度分布(実線:2015年のみ、点線:2014年まで)。頻度が高いほど、信頼度が高い。ただし、最大値に意味はないので規格化してある

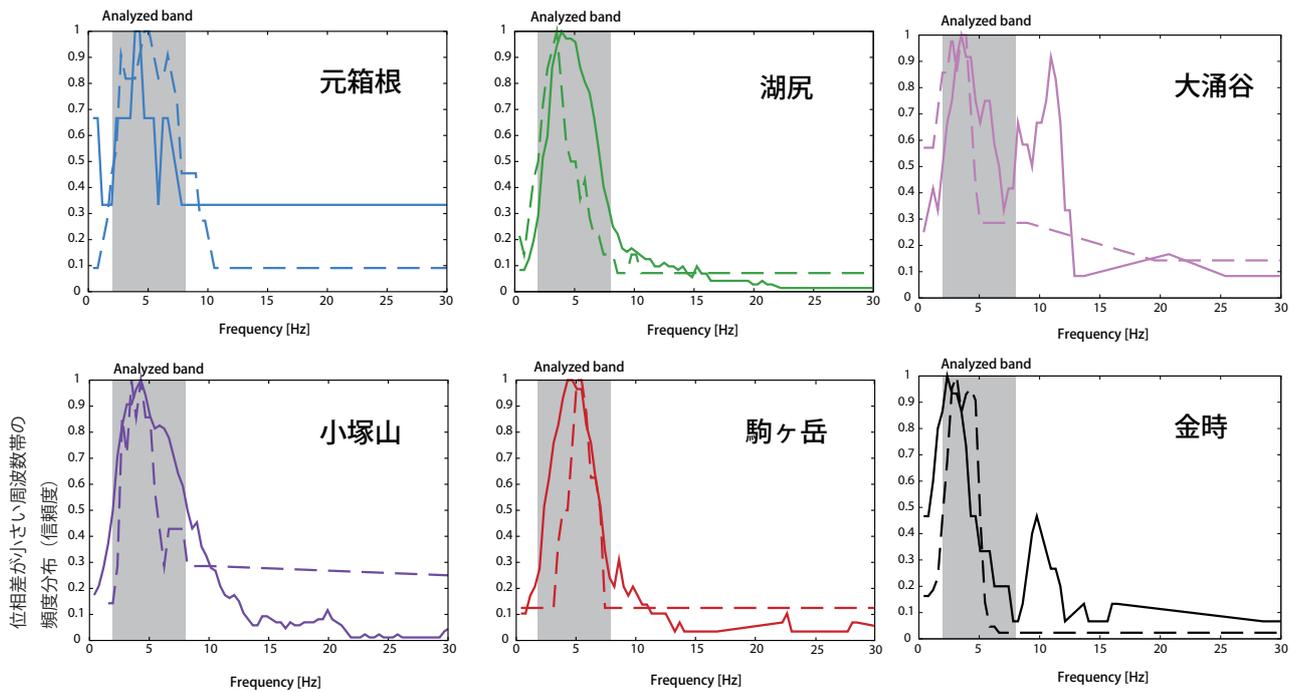


図5 信頼度のLSPDによる違い。点線はLSPDがN80°E-N110°E(東西)の波形、実線はLSPDがN120°E-N160°E(北西-南東)の波形についての結果。大涌谷・金時観測点では、北西-南東方向のLSPDをもつ地震で5Hz以下と9-11Hz付近に信頼度の高い(位相差の小さい)周波数帯が存在する。

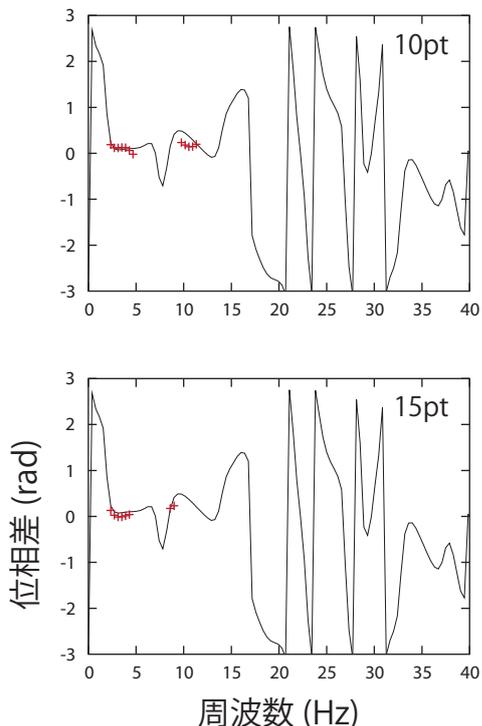


図6 移動平均を取る窓の幅を10ポイントとした場合(上)と15ポイントとした場合(下)の、信頼区間の違い(2015年6月4日大涌谷観測点)。位相差が小さいと判定された周波数を赤の+で示した。この例では、8Hz付近に位相差の大きな周波数帯があり、その前後では位相差が小さい。

ことと、前述のように2Hzより低周波側はFFTのため便宜上データが存在するが物理的に意味がないことによる。2014年までのデータで見ると、小塚山、元箱根では、解析対象周波数帯よりもやや高周波数領域まで信頼度の高い領域(位相差の小さい領域)が広がっているように見える。ここで、高周波側の信頼度の高い領域を、解析周波数の低周波側(2Hz)と信頼度が同程度の値までの範囲だとすると、およそ10Hzが信頼区間の周波数の上限値である。また、広がりはやや小さいが、駒ヶ岳、湖尻でも同様の傾向が見える。一方、金時、大涌谷では信頼区間の高周波側への広がりが解析対象周波数の上限である8Hzよりも低い周波数までしか無いように見える。2015年のデータのみで見ると、元箱根観測点も同様の傾向が見られる。また、金時と大涌谷観測点での特徴として、5-8Hz付近でいったん信頼度が下がり(位相差が大きくなり)、その後10Hz前後で再び信頼度が上がる(位相差が小さくなる)傾向が見られる。次に、このような傾向がスプリッティングパラメータに依存するかどうかを調べた。

図3のLSPDの分布に見られるように、金時をのぞく観測点では北西-南東方向、金時観測点では東西方向に異方向性が存在する。そこで、LSPDがN80°EからN110°Eの範囲に入るデータと、N120°EからN160°Eの範囲に入るデータに分けて、信頼区間を調べた(図5)。すると、北西-南東方向のLSPDについてのみ、大涌谷

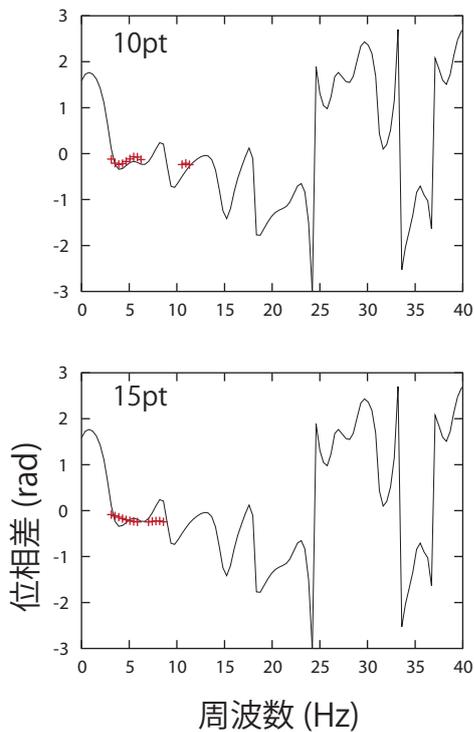


図7 移動平均を取る窓の幅を 10 ポイントとした場合 (上) と 15 ポイントとした場合 (下) の、信頼区間の違い (2015 年 6 月 3 日大涌谷観測点)。位相差が小さいと判定された周波数を赤の+で示した。この例では、8Hz 付近から位相差のばらつきが大きくなり始め、10Hz 付近より高周波側では大きく変動しているが、平均を取る窓が狭いと、11Hz 付近で位相差が小さいと判定されている。

と金時観測点で、10Hz 付近に位相差の小さい周波数帯が存在することがわかった。他の観測点では、このような変化は認められなかった。このことは、金時と大涌谷観測点の近傍では、北西—南東方向の LSPD を持つデータにのみ感度があるような、何らかの構造が存在していることを示唆している。

より詳細に調べるため、5-8Hz 付近で位相差が大きくなるケースについて、位相差スペクトルを個別に検討した。その結果、図 6 のように、8Hz 付近にのみ位相差が大きい周波数帯があり、その後位相差が 0 付近まで戻っている場合と、図 7 のように高周波側で位相差のばらつきが大きく、たまたま 10Hz 付近で平均が 0 近くになって条件をみたしている場合があることがわかった。後者については物理的な現象を示しているというより、パラメータの選択の仕方によるアーティファクトである。そこで、位相差の平均とばらつきを計算する窓を 10 ポイントから 15 ポイントに広げて再度信頼区間の推定を行った。位相差を 0 と判定する条件は変更しない。再解析の結果を図 8 に示す。10Hz 付近に見られた信頼度のピークはほぼ見えなくなり、大涌谷では信頼区間が他の観測点と同様に高周波側まで広がる結果となった。一方金時では、10Hz 付近のピークは見えなくなったものの、信頼区間の広がりにはさらに低周波側に限定される結果となった。

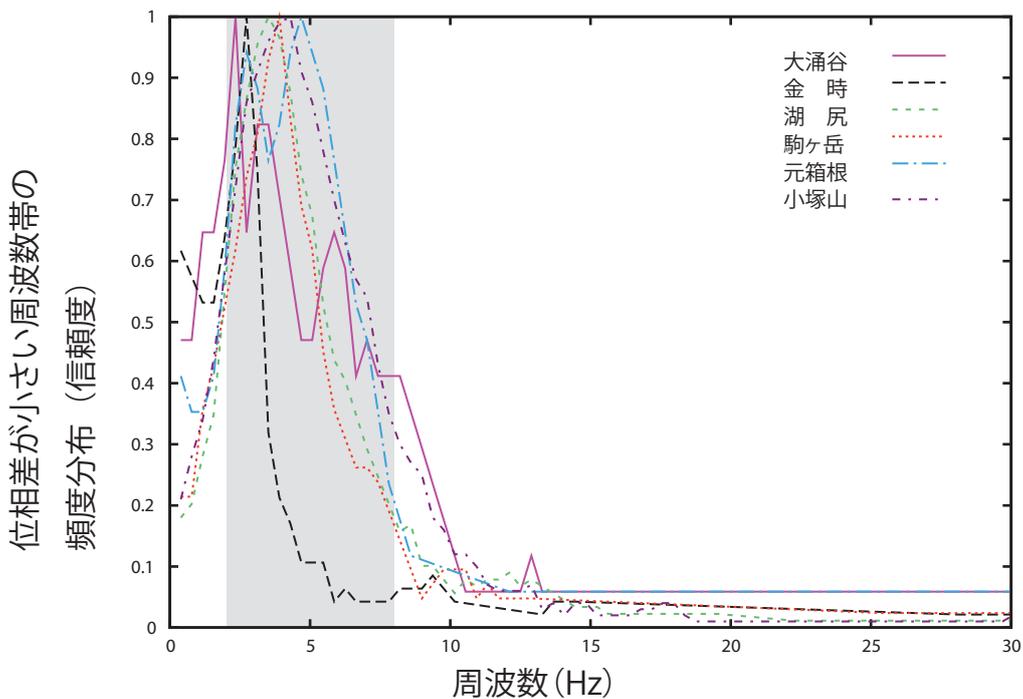


図8 位相差の判定窓を 15 ポイントにした場合の信頼度のヒストグラム。

4. まとめ

箱根山で観測されるスプリッティングパラメータについて、周波数領域で信頼区間を推定した。その結果、小塚山、元箱根では信頼区間の高周波側への広がりが見られ、10Hz程度までは同じパラメータで説明できることがわかった。また、駒ヶ岳、湖尻もやや広がり小さいが、解析対象周波数帯よりも高周波側まで信頼区間の広がりがある。一方、金時、大涌谷では、位相差の平均をとる窓を10ポイントとした場合には、信頼区間の広がり解析対象周波数の高周波側の上限よりも低い周波数までとなり、かつ、10Hz付近で再び位相差が小さくなる現象が見られた。しかし、位相差の平均をとる窓を広げて同様の解析をしたところ、このような現象はほぼ見えなくなり、大涌谷においても解析対象周波数よりも高周波側まで信頼区間がのびる結果となった。金時では、窓の幅をかえても高周波側に信頼区間は広がらなかった。8Hz付近での信頼度は、窓の取り方に大きく影響されることがわかったが、一方で図6のように、8Hz付近でのみ位相差が大きくなる例も見られ、さらにLSPDがN120°E-N160°Eの場合にのみ選択的に見られたことから、振動方向に依存した何らかの物理現象を反映している可能性は残っている。

スプリッティングする波の波長が、クラックサイズよりも十分に大きいという古典的な考え方に従えば、信頼区間の短周期側の限界はクラックサイズの上限についての情報を持っていると考えられる。信頼区間の高周波側の限界が10Hzであるとすれば、その観測点付近のクラックの特徴的なサイズの上限は200m～300m程度と考えられる。金時では、高周波側の限界が4Hz程度であることから、クラックの特徴的なサイズの上限が他に比べて大きく、500m程度であることが示唆される。

謝辞

本研究では、温泉地学研究所のルーティン解析によって得られた箱根の震源データを使用した。この震源決定には、温泉地学研究所の観測点の他、気象庁、防災科学研究所、東京大学地震研究所の観測点のデータも使用さ

れている。ここに記して感謝する。

参考文献

- Honda, R., Y. Yukutake, A. Yoshida, M. Harada, K. Miyaoka, and M. Satomura (2014) Stress-induced spatiotemporal variations in anisotropic structures beneath Hakone volcano, Japan, detected by S wave splitting: A tool for volcanic activity monitoring, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 7043–7057, doi:10.1002/2014JB010978.
- 本多亮・行竹洋平・原田昌武・加藤幸司・宇平幸一・森田祐一・酒井慎一 (2015) 箱根山のごく小規模噴火に先立って2015年6月29日に観測された傾斜変動と火山性微動について, 火山学会予稿集 P48, pp146.
- Kuo, B., C. Chen, and T. Shin (1994) Split waveforms observed in northern Taiwan: Implications for crustal anisotropy, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1491–1494, doi:10.1029/94GL01254.
- Mizuno, T., K. Yomogida, H. Ito, and Y. Kuwahara (2001) Spatial distribution of shear wave anisotropy in the crust of the southern Hyogo region by borehole observations, *Geophys. J. Int.*, 147, 528–542.
- Seno, T., S. Stein, and A. E. Gripp (1993) A model for the motion of Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, 98, 17,941–17,948, doi:10.1029/93JB00782.
- Shih, X. R., and R. P. Meyer (1990) Observation of shear wave splitting from natural events: South moat of Long Valley Caldera, California, June 29 to August 12, 1982, *J. Geophys. Res.*, 95(B7), 11,179–11,195, doi:10.1029/JB095iB07p11179.
- Yukutake, Y., H. Ito, R. Honda, M. Harada, T. Tanada, and A. Yoshida (2011) Fluid-induced swarm earthquake sequence revealed by precisely determined hypocenters and focal mechanisms in the 2009 activity at Hakone volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, N04308, doi:10.1029/2010JB008036.