

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740328

研究課題名（和文）

地震波の減衰と異方性のハイブリッド解析で捉える地殻構造の時間変化

研究課題名（英文）Temporal variation in crustal structure derived from hybrid analysis of the seismic attenuation and anisotropy

研究代表者

田所 敬一（TADOKORO KEIICHI）

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：70324390

研究成果の概要（和文）：200字程度

箱根火山で2009年に発生した群発地震の震源域には、震源の並びと同じ方向に並んだクラック密度の高い構造が存在し、群発地震の発生期間中には、この構造の中に地殻内流体が入っていることが明らかになった。また、群発地震が発生していない期間には、これとは別のクラック構造が支配的である可能性があることが分かった。このように、群発地震の発生に伴って地殻内構造が時間変化する可能性があることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

We detected a crack structure with high crack density, whose direction is parallel to the epicenter alignment, in the region of the 2009 earthquake swarm at the Hakone volcano. Crustal fluid was included in the above crack structure during the earthquake swarm period. It was suggested that another crack structure was dominant during the period without earthquake swarm. This study presents that crustal structure possibly varies accompanied with occurrences of earthquake swarm.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、固体地球惑星物理学

キーワード：観測手法、地震波の減衰、地震波異方性、地殻構造、群発地震

1. 研究開始当初の背景

火山地域では、マグマや水といった地殻内流体の移動によって、噴気活動や地震活動がやや活発になる時期がある。このような地殻内流体の移動は、地殻構造の変化として捉えられる可能性が高い。

そこで本研究では、地殻構造の時間変化を地震波の減衰と異方性の両面から捉えることを目的とする。この目的を達するためには、地殻内流体の移動等が起こりやすい火山地域

をフィールドとするのが最適である。そこで、本研究では箱根・足柄地域をフィールドとして選定した。箱根火山は、現在では特に活発な火山ではないが、大涌谷などの噴気活動や群発地震活動が見られ、2007年7月24日にはマグニチュード(M)4.4の地震(箱根町ほかで震度3)が、10月1日の未明にはM4.9の地震(小田原で震度5強)も発生した。したがって、地殻活動としては活発な部類に入る地域であり、本研究のフィールドとしては最

適な場所のひとつである。箱根・足柄地域で群発地震活動が活発な場所を選び、そこで臨時地震観測を実施し、得られたデータを用いてS波スプリッティング（異方性領域内でS波が2つに分裂する現象）解析と地震波の減衰異方性解析を行う。その結果から、地殻内流体の移動にともなう地殻構造の時間変化の検出を試みる。

2. 研究の目的

本研究では、火山地域、特に箱根火山で発生する群発地震の発生原因を明らかにするため、群発地震発生域の微細地殻構造をイメージングし、群発地震の発生にともなう微細地殻構造の時間変化を検出することを目的とする。そのために、群発地震の震源域とその外側で収録された地震波形データを用いて、(1) S波スプリッティング解析と(2)減衰異方性解析を行う。

3. 研究の方法

(1) S波スプリッティング解析

まず、群発地震に関係した地殻構造、具体的にはクラック構造を検出するため、S波スプリッティング解析を行った。対象とした群発地震は、2009年8月に箱根火山で発生した一連の活動である。解析に使用した地震波形データは、2009年6月～2010年6月に発生したM1以上の約100イベントである。解析に使用した観測点は、神奈川県温泉地学研究所が設置している4観測点、および、我々が臨時に設置した1観測点の計5観測点である。このうち2観測点は群発地震発生域直上に、残り3観測点はその周辺に展開されている。

解析手順は次のとおりである：水平2成分の地震波形に10Hzのローパスフィルタをかけて高周波成分を除去する。その波形のS波部分0.3秒について、座標軸を 5° ずつ回転し、時間を0.01秒ごとにずらしながら相互相関係数を計算する。相互相関係数が最大となった方向を速いS波の振動方向、ずらした時間を2つの波の到達時間差として求める。

(2) 減衰異方性解析

(1)の解析で使用した観測点のうち、群発地震の直上に位置する2つの観測点で収録された地震波形データを用いて、減衰異方性解析を行った。解析期間は、2009年6月～2010年12月である。

今回は、S波のコーダ波を用いて、散乱減衰の異方性解析を行った。解析に使用した区間は、S波走時の2倍以降で、そこから10秒間の波形である。周波数帯は、4Hz、6Hz、8Hz、16Hzの4つとし、それぞれの周波数を中心周波数とするバンドパスフィルタをかけた。方位角 ϕ と傾斜角 δ をそれぞれ 10° ずつ変えながら、上下(U-D)、南北(N-S)、東西(E-W)

3成分の波形を合成し(図1)、各 ϕ - δ の組み合わせでコーダ波のエンベロープ(包絡線)の減衰具合から散乱減衰の大きさを示す値(Q_c)を計算した。

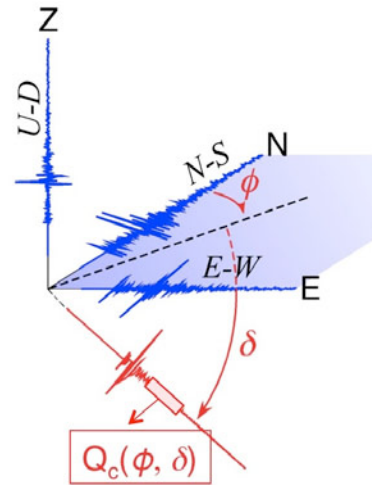


図1 減衰異方性解析の際に行う波形合成の概念図。 ϕ :方位角、 δ :傾斜角。 Q_c :散乱減衰の大きさを示す値。

S波スプリッティング解析は、同一方向にクラックが並んだ構造を推定するのに有効である。その一方で、群発地震の原因となる地殻内流体の存在を推定することは難しい。地震波の減衰解析では、地殻内の物性につながる物理量が推定できるため、流体の存在の証拠を掴むには優れた解析法である。しかし、その流体がどのような構造に支配されて存在するのかを推定することはできない。つまり、両解析法はどちらも一長一短である。そこで、本研究では両方の利点を兼ね揃えている減衰異方性解析を導入する。減衰異方性解析は、過去にはボアホールVSPデータの解析[たとえばHorne and MacBeth, 1997]、室内実験[たとえばThomsen, 1995; 安川ほか, 1992]、数値シミュレーション[Maultzsch et al., 2003]などで行われている。これらの結果から、クラックが選択的に並んでいる場合、その走向方向に振動する波は減衰が小さく、直交する方向に振動する波は減衰が大きいことが示されている。

4. 研究成果

(1) S波スプリッティング解析

2009年8月に発生した群発地震の震源域直上およびその外側の観測点でのS波スプリッティング解析の結果は次のとおりである。2009年8月の群発地震では、走向の異なる明瞭な2枚の面に沿って震源が分布している[Yukutake et al., 2011]。これらの面(震源域)上に設置した2つの観測点では、それぞれ群発地震の断層面の走向に一致する方向(それぞれ $N105 \pm 3^\circ E$ (T. OSS) および $N148$

±2° E 方向 (KZR)) に選択的に配向したクラック群が推定された (図 2)。群発地震の震源域の外側に位置するその他の 3 点の観測点では、これら方向とは異なり、水平最大圧縮応力の方向に選択的に配向したクラック群が推定された。クラックの配向方向は、N130±4° E (KIN)、N143±3° E (KZY)、N156±7° E (KOM) である (図 2)。また、2 つの S 波の到達時間差は、群発地震の震源域直上の観測点では 49±4ms (T.OSS) と 86±3ms (KZR)、外側の観測点では、43±7ms (KIN)、52±5ms (KZY)、54±12ms (KOM) であった。この値を異方性媒質中の地震波線の長さで割り (図 3)、S 波速度を掛けると、各観測点直下の平均的な異方性の度合いを計算することができる。このようにして求めた異方性の度合いは、震源域直上では周辺に比べて相対的に値が大きく、3.5~5.9% 程度であった。なお、震源域の外側の観測点で推定された異方性の度合いは、0.5~1.5% であった。

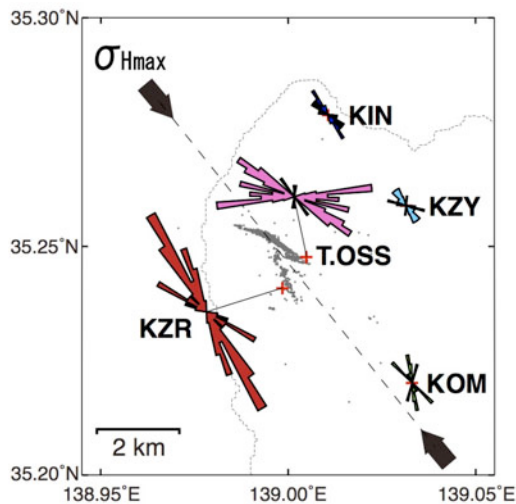


図 2 2009 年 8 月の群発地震発生期間中の S 波スプリティング解析結果。速い S 波の振動方向をローズダイヤグラムで示す。グレーの点は 2009 年 8 月に発生した群発地震の震央。σ_{Hmax} は、この地域の平均的な最大水平圧縮応力方向。

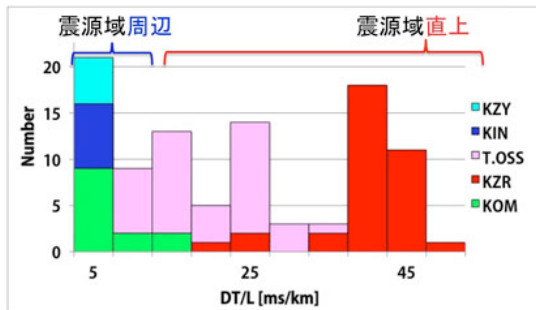


図 3 異方性媒質中の地震波線の長さ (L) で割った 2 つの波の到達時間差 (DT) のヒストグラム。

以上の結果から、群発地震の断層面の走向

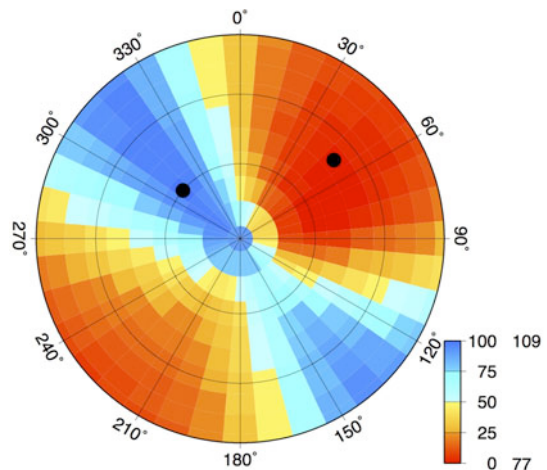
と同じ向きに配向しているクラック群が相対的に高い密度で分布している構造が 2009 年 8 月の群発地震の震源域に存在し、この構造に支配されて群発地震が発生した可能性が考えられる。クラック密度が高いことから、地殻内流体がこのクラック構造に入っていることが考えられる。

(2) 減衰異方性解析

2009 年の群発地震発生域直上の観測点 (図 2 の KZR) で収録された波形を用いた 4Hz 帯における減衰異方性解析結果のうち、群発地震発生中と終了後の典型的な結果を図 4 に示す。図 4 は、色が青い方向ほど減衰が小さく (Q_c が大きく)、色が赤い方向ほど減衰が大きい (Q_c が小さい) ことを示している。つまり、青色で示された方向にクラックが並んでいることを意味している。

図 4 の結果の場合、2009 年の群発地震発生中には、減衰が小さい方向は N130~140° E である。つまり、この方向にクラックが選択配向していることを意味しており、これは、群発地震発生期間中の S 波スプリティング解析の結果とほぼ一致している。一方、群発地震終了後には減衰が小さい方向は N40~50° E であった。この方向に走向をもつ構造は見あたらないため、具体的にどのような構造に起因するクラック群がイメージできているかは不明である。なお、Q_c の最大値については、それぞれ 109 と 88 であり、顕著な差はない。同様の傾向は、他の周波数帯 (たとえば、図 5 に示した 16Hz 帯) でも見られる。つまり、群発地震の発生期間中とその後とで、地震波に減衰をおよぼすクラックの配向方向に変化が生じている可能性があることが、減衰異方性解析から見出されたと言える。

しかし、解析に使用できた地震が少なかつたため、今後、地震数を増やして詳しい検討を行う必要がある。また、直達波を用いて内部減衰の異方性解析を行う必要もある。



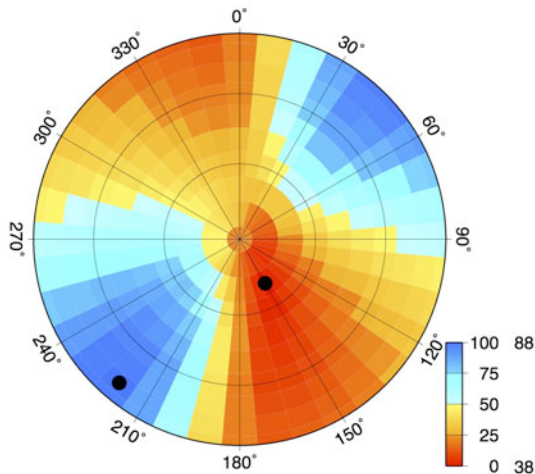


図4 4Hz帯における減衰異方性の解析結果の例。(上)群発地震発生中の2009年08月05日22時00分に発生した地震、(下)群発地震終了後の2009年11月29日12時43分に発生した地震。各 ϕ - δ の組み合わせに対する Q_c の値を色で示す。カラースケールは Q_c の最大値・最小値で規格化してある。

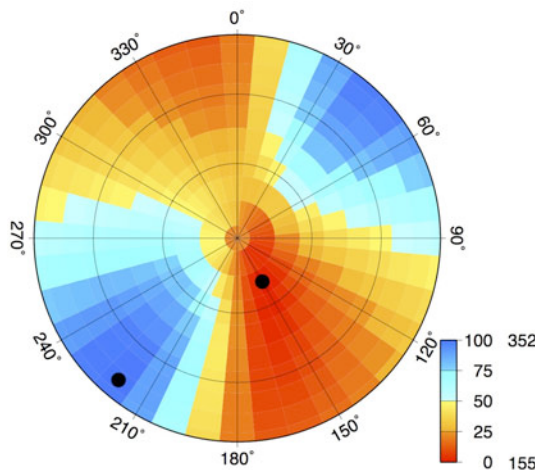
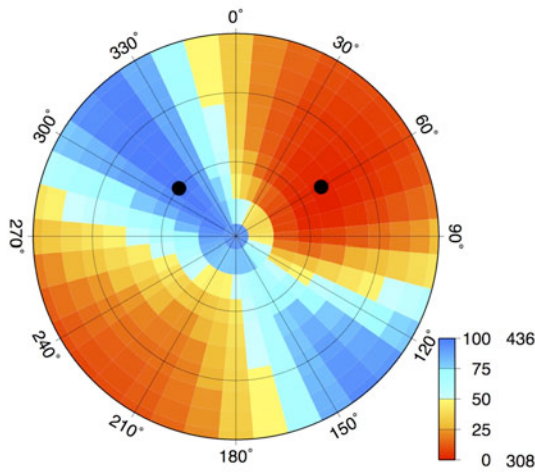


図5 16Hz帯における減衰異方性の解析結果の例。解析した地震は図5と同じ。

(3) 結果のまとめ

S波スプリットングおよび減衰異方性の解析結果から、箱根火山の群発地震と地殻内

の微細構造との間に以下の関係があることが分かった：

- ① 群発地震の震源域の外側には水平圧縮応力方向に選択配向したクラック群が卓越するのに対し、群発地震の震源域内には、震源の並びと同じ方向に並んだクラック群が卓越する。そのクラック密度（異方性の度合い）は、群発地震の震源域の外側よりも相対的に高い。
- ② 群発地震の発生中には、震源の並びと同じ方向に並んだクラック群の中に地殻内流体が入っていると考えられる。
- ③ 群発地震が発生していない期間については、同じ領域であっても、①とは異なるクラック群が支配的である可能性がある。つまり、群発地震の発生に伴って、地殻内構造が変化する可能性があることが明らかになった。しかし、減衰異方性解析に使用できた地震が少なかったため、今後、さらに多くの地震を用いた詳細な検討を行う必要がある。さらに、直達波を用いた内部減衰の異方性解析によってもクラックの配向方向およびその変化を捉える試みも必要であろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Nihara, Y., Tadokoro, K., Y. Yukutake, R. Honda, and H. Ito, Spatial distribution of crack structure in the focal area of a volcanic earthquake swarm at the Hakone volcano, Japan, Earth Planet Space, 2011, 印刷中、査読有。

[学会発表] (計2件)

- ① 丹原 裕・田所敬一・行竹洋平・本多 亮・伊東 博, 箱根火山における2009年の群発地震発生とクラック分布との関係, 日本地震学会秋季大会, 2010年10月12日, 静岡。
- ② 丹原 裕・田所敬一, 箱根火山の群発地震発生域におけるS波スプリットング解析, 地球惑星科学連合大会, 2011年5月23日, 千葉。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田所 敬一 (TADOKORO KEIICHI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：70324390

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし