

始良カルデラ下の S 波低速度異常
Low S-wave velocity anomaly below Aira caldera

○為栗健・筒井智樹・八木原寛・井口正人

○Takeshi TAMEGURI, Tomoki TSUTSUI, Hiroshi YAKIWARA, Masato IGUCHI

We obtain a three-dimensional seismic velocity structure below the Aira caldera at a depth shallower than 15km, applying seismic tomography inversion method to analyze 14,652 P-wave onsets and 10,935 S-wave onsets of natural earthquakes observed by 45 seismic stations, and 3,121 P-wave onsets generated by artificial explosions. An anomalous zone of low S-wave velocity is discriminated at depths deeper than 12 km below the center of the Aira caldera. The P and S wave velocities are 5-10% and 18-55 % lower than the surrounding area, respectively. We estimated a volume of melt from a combination of the P and S wave velocities in an anomalous zone. The volume of the anomalous zone is 139~255 km³ at shallower depths than 15 km, and the anomalous zone includes about 7 % melt (10~18km³).

1. はじめに

始良カルデラは九州南部の鹿児島湾奥に位置する東西 20km、南北 20km の広がりをもった火山性陥没地形で、入戸火砕流を生じた始良カルデラの最後の噴火とされるのは約 2.9 万年前である（奥野, 2002）。1914 年桜島大正噴火に伴う地盤沈降の後、現在まで継続している地盤隆起の膨張源は始良カルデラ中央部の 10-12km 付近の深さに見積もられている（例えば, Yamamoto et al., 2013; Iguchi, 2013）。この始良カルデラ周辺の地盤の隆起・膨張は、カルデラ下においてマグマの再蓄積が進行しているものと解釈されている（Iguchi, 2013）。

2008 年 11 月に行われた人工地震探査（井口・他, 2009）データを用いて、Miyamachi et al. (2013) は屈折法により深さ 4km までの P 波の地震波速度構造を推定しているが、4km 以深の速度構造は明らかになっていない。近地地震の走時を用いた南九州の地震波速度構造解析 (Alanis et al., 2012) では、始良カルデラ下深さ 20km 付近に V_p/V_s 比の高い領域が見出されたが、分解能が 10km であったため、高 V_p/V_s 比の領域の形状や大きさまでは分かっていない。本研究では、始良カルデラ周辺において地震観測点を稠密化して得られた自然地震観測データと人工地震による走時データをあわせて地震波トモグラフィ解析を行い、始良カルデラ下の 3 次元地震波速度構造を高分解能で明らかにすることを試みた。

2. データと解析方法

南九州 45 点における自然地震の P 波、S 波到達時を用いて 3 次元地震波速度構造解析を行った。2010 年以降に南九州一帯で発生した主にマグニチュード 2.0 以上の地震を対象に各観測点における P 波、S 波到達時をデータとしている。また、始良カルデラを通過する地震波線を多くするため、始良カルデラ周辺で発生した M1.5 程度の地震の P 波、S 波到達時も解析に使用した。そのイベント数は 383 であった。また、2008 年に行った始良カルデラを通過する人工地震探査の P 波初動読み取り値（井口・他, 2009）を解析に追加することで、表層付近（0-5km）の P 波データ数を増加させ、解像度を向上させた。解析に使用した読み取り値は、自然地震 P 波が 14,652、自然地震 S 波が 10,935、人工地震 P 波が 3,121 である。地震波トモグラフィインバージョンは八木原・他 (2010) の方法、グリッド空間は Thurber (1983) の配置を使用している。波線追跡には Pseudo-Bending 法 (Um and Thurber, 1987) を用いている。解析範囲は始良カルデラが含まれる北緯 31.4 度~31.9 度、東経 130.4 度~131.0 度、深さ 0~200 km である。始良カルデラ下については、グリッド間隔を水平方向、深さ方向ともに 0.05 度（約 5 km）とした。3 次元速度構造インバージョンの初期値は 1 次元モデルとし、Ono et al. (1978) を参考にして決めた。十分な波線が得られなかったため、本解析では深さ 15 km 以上の速度構造結果についての評価は行

わない。

3. 結果

深さ 5km ではカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、4.5km/s~5.8km/s、2.6km/s~3.7km/s にあり、顕著な速度異常は見られない。深さ 10km でもカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、5.2km/s~6.1km/s、3.4km/s~3.8km/s にあり、P 波、S 波速度ともに顕著な不均質は見られない。深さ 15 km においてはカルデラ内の P 波速度および S 波速度はそれぞれ、5.4km/s~6.8km/s、1.1km/s~4.4 km/s にあり、始良カルデラ中央部には特に S 波速度が遅い領域がある。P 波速度の低下は周辺に対して 5~10%程度であるが、S 波速度は 1.1km/s~2.0km/s まで低下しており、S 波速度 2.45km/s 以下を領域 LS とすると速度比で約 18%~55%低下している。P 波速度には LS の外側の領域に対して 5~10%程度の低下しかないため、 V_p/V_s は 3.9 と大きい。S 波速度が 2km/s 以下となる領域は東西方向に 10km、南北方向に 8km の領域を占め、グリッド間隔 5km よりも有意に大きい。

4. 議論

深さ 15km において見出された S 波速度が 2km/s 以下（周辺より約-30%）の低速度領域の最上部は深さ 11~12km に達している。地盤変動観測から見出されている微小球状圧力源は、始良カルデラ中央部深さ 10~12 km に求められるが（Iguchi, 2013 ; Hotta et al., 2016）、深さ 10~12km には顕著な速度異常は見られない。微小球状圧力源は、マグマ溜まりに相当すると考える解釈（例えば、須藤・他, 2006; Hotta et al., 2016）も多いが、力学的に考えれば、地盤変動を引き起こす等方的応力の集中点と考えるべきであり、速度コントラストの強い S 波低速度領域の上端部付近では応力が集中しており、応力はその下にある S 波低速度領域が駆動していると解釈される。S 波低速度領域の上端における速度コントラストの強さは、地震波形後続相に現れる始良カルデラ北西部の深さ 13.6 km からの PS 変換反射波により示されている（筒井・他, 2021）。

領域 LS を扁平なメルトインクルージョンを多数含む領域と考えて議論を進める。Taylor and Singh (2002) はマグマ領域が結晶の集合体の中に微小な扁平なメルトインクルージョンを多数含

む場合、メルトインクルージョンの厚み方向に通過する S 波速度の低下率が同じ方向に通過する P 波のそれよりも著しく大きくなり、マグマ領域に含まれるメルトインクルージョンのアスペクト比が大きいほど厚み方向に伝わる S 波速度の低下率が大きくなることを指摘している。さらに P 波および S 波速度低下の組み合わせはメルト含有量と関連するので、Taylor and Singh (2002) の Figure 3 を用いて P 波および S 波速度低下の組み合わせからメルト含有量を推定する。低速度領域周辺部の S 波速度平均値は 3.4km/s である。それに対して 30%以上の速度低下（2.45km/s 以下）がみられる領域を低速度領域とすると、低速度領域の S 波速度平均値は 1.9 km/s で周辺に対して 44%低下した値である。一方、低速度領域の P 波平均速度は 5.6km/s であり、周辺平均 P 波速度 6.1km/s に対して、8.2%の低下である。球状のメルトインクルージョンの存在によって S 波速度は 44%、P 波速度は 27%低下するが、メルトインクルージョンを扁平にすることで、S 波速度低下に対する P 波速度低下の割合を低減できる。両速度比から始良カルデラ下の場合アスペクト比は 10~100 の間に対応し、メルトの含有量は約 7%と推定される。低速度領域の閾値を 2.45km/s とした場合には、15km 以浅における低速度領域の体積は 255km³、2.0km/s に設定すれば 139km³となるので、メルト含有量はその約 7%の 10~18km³であると考えられる。

5. まとめ

3 次元地震波トモグラフィーによって始良カルデラ浅部の地震波速度構造を明らかにした結果、始良カルデラ中央部の深さ 12 km を最上部とする S 波低速度領域 ($V_s < 2$ km/s, -30%) が見出された。深さ 15km 以浅の低速度領域の体積は 139~255 km³で、メルトを約 7%程度含むことから、10~18km³のメルトを含んでいると考えられる。

謝辞

本研究の経費は原子力規制庁令和 3 年度原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）を使用しました。ここに記して謝意を表します。