

富士山の地下構造を 地震波から探る

中道 治久 なかみち はるひさ

京都大学防災研究所 nakamiti@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp <https://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/svo>

富士山はたくさんのマグマが噴き出してできたため日本一の大きさの山体になった。10万年前に噴火を始めた若い火山であるにもかかわらず、富士山が大きな山体になったのは、他の火山に比べてマグマ噴出率が大きいからである。そこで、富士山の地下に潜むマグマを地震波から見る試みをおこなったところ、富士山の地下の深さ 17 km より深い場所にマグマ溜まりを反映している地震波の低速領域が見つかった。

富士山はプレートがせめぎ合う 場所にある大きな火山

富士山は日本のシンボルの山として世界中に知られており、その素晴らしい景観によって古くから多くの人の心をとらえ、日本人の精神的よりどころの一部となっている。また、富士山は日本一標高の高い山としてよく知られている。富士山は標高が高いだけでなく、その裾野が広く分布している。つまり、富士山は日本で最も大きな山体をもつ山である。富士山がなぜ大きな山体をもったのかといえば、大量のマグマが噴き出してできた火山であるからである。富士山は 10 万年前に噴火を始めた若い火山である。比較的短い期間で日本最大の山体となったのは、マグマの噴出率(時間あたりの噴出量)が大きいからである¹。では、そのマグマはどこに存在するのだろうか？

富士山は短時間で大量のマグマを出した火山であるにもかかわらず、最近 300 年以上噴火をしていないこと、そして山体で噴気活動が見られな

いことから、噴火の活動が今後も起こらないと思っている人もいる。しかし、地下では火山活動の一つである火山性地震が発生している。火山性地震は波形の特徴や時間あたりの揺れの回数からいくつもの分類がなされ、その一つが低周波地震である²。おおよそ深さ 10 km から 40 km にて発生する低周波地震(深部低周波地震)が、2000 年秋から 2001 年春に頻発した³。そのため、噴火などさらなる火山活動の活発化が懸念されたが、本稿執筆時点までの 20 年間において噴火はしていない。

富士山のマグマ噴出率が大きく、そして山体が巨大であることの原因についてはよくわかっていないが、富士山が位置する場所に関係しているかもしれない。なぜなら、富士山は東北日本弧および西南日本弧、伊豆マリアナ弧の会合点に位置するという、他の日本の火山にはない特徴があるからである。これは、富士山が太平洋プレート由来の火山フロント上に位置すると同時に、フィリピン海プレートが収斂する場所にあることを意味する(図1)。収斂の結果としてフィリピン海プレートが東北日本弧側のプレート(北米プレート)に衝突しており、そのため丹沢山地が形成され、東側の沈み込みは関東スラブに対応し、西側の沈み込みは東海スラブに対応する(図1)。

通常、沈み込むプレートの上面付近では地震が発生し、沈み込みに沿って面的に分布するため、地震の震源分布からプレートの上面の形状を決める研究が古くからなされてきたが、富士山の直下ではフィリピン海プレートの沈み込みに対応する震源分布が見られないことから(図1)、フィリピン海プレートが富士山の直下では裂けているという考えがある^{4,5}。そのため、大量のマグマが富士

Exploring the subsurface structure of Fuji volcano, Japan from seismic waves

Haruhisa Nakamichi

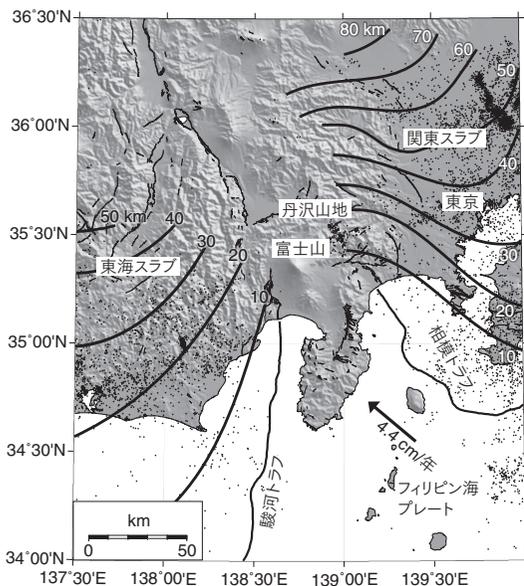


図1—富士山とフィリピン海プレートの位置関係

フィリピン海プレートは陸側プレート(東北日本弧のある北米プレートと西南日本弧のあるユーラシアプレート)に対して年間4.4 cmの速さで衝突と沈み込みをしている。沈み込むプレートの上面の位置の深さを等深線で示す。プレート上面の位置はスラブ内の地震の震源分布から推定される。丹沢山地は衝突している場所で、地震が発生している。富士山周辺およびプレート沈み込み方向(北西方向)延長上はスラブ内地震が存在しない。

山に供給されているという考えである。しかし、富士山の直下にフィリピン海プレートはあるが地震が発生していないのか、フィリピン海プレートがないのかについては決着がついていない。

そこで、地震波を使って富士山の地下構造を2002年から2005年にかけて調べたところ、フィリピン海プレートに対応した丹沢山地から富士山を横切り南西方向へプレート上面が深くなるような傾斜構造があり、富士山直下の深さ20 kmより深くにマグマ溜まりに対応する明確な低速度領域があることがわかった。

まず、富士山にまつわる地震学的な研究課題について解説する。そして、地震波で調べた富士山の地下構造とその意味することについて述べる。

富士山にまつわる地震学的な研究課題

先に述べたとおり、富士山の地下ではフィリピン

海プレートの沈み込みに対応する地震は発生していないが、プレート同士が衝突している丹沢山地の直下では地震活動は活発である(図1)。一方、富士山の直下では深部低周波地震が発生している。図2に富士山にまつわる地震学的な研究課題をまとめた。富士山の直下ではプレートは裂けているのだろうか? という疑問については地震波速度構造から議論する。また、プレートが裂けている場合と裂けていない場合では、裂け目があると想定されるプレートの部分で発生する地震の起こり方が異なると想像される。プレートが裂けていない場合には、プレートの沈み込む方向と直交する方向の応力を考えると、プレート境界からプレート内は深くなるにつれて、応力が変化すると思われる。一方、プレートが裂けている場合は、そのようなことはないであろう。

富士山が大量のマグマを短時間にて噴出することについては、富士山の地下にマグマ溜まりに相当する地震波低速度域として見るができるであろう。マグマ溜まりから火道を通してマグマが上昇していく過程において火道内の圧力が低下していくため、ある深さにおいてマグマに溶け込んでいる水や二酸化炭素といった揮発性物質としての流体がマグマから分離してくるであろう。そのような流体の停留する場所はあるのだろうか? そして、流体はどのような状態で富士山の直下に存在するのだろうか? さらに、富士山直下の深部低周波地震の震源域とマグマ溜まりはどのような位置関係にあるのだろうか? といったように、富士山にまつわる興味深い地震学的課題はいくつもあり、地震波の伝わる速さの分布(地震波速度構造)からわかったことについて次に述べる。

揮発性物質——一般に火山噴火の際に気体として大気中に放出される、マグマに含まれる物質で、水、二酸化炭素、二酸化硫黄などである。これらは、一般的に噴火前またはマグマが高圧下にあるときにマグマ中に溶解しているが、マグマが地表へと上昇する間に離溶する。

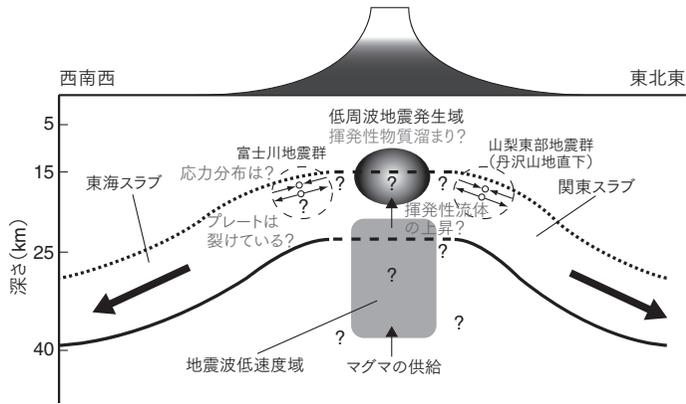


図2—富士山にまつわる地震学的研究課題

富士山の直下においてプレートが裂けているため、大量のマグマが富士山直下に存在する可能性が指摘されている。プレートが裂けているのと裂けていないのでは地震の発生メカニズムから推定される応力場が異なる可能性がある。大量のマグマが溜まっているとすると、地震波速度の低速度域として可視化される。富士山直下では深部低周波地震が発生しているが、マグマ溜まりとの位置関係や、マグマ溜まりと水や二酸化炭素といった揮発性物質が溜まっている場所との関係は興味深い。

地震波の伝わる速さから富士山直下のフィリピン海プレートとマグマ溜まりを見る

人間の体の内部を撮影する方法としてCTスキャンがある。これはX線を照射し体を透過してきたX線の強度をもとに体内の密度の分布断面を求めるものである。CTスキャンと同様の手法で地球内部を可視化する手法の一つに地震波速度トモグラフィー(地震トモグラフィー)がある。地震トモグラフィーは地表の複数の地震計で複数の地震を観測し、地震の位置(震源)と地震計の間の地震波の伝わる時間(走時)から地球内部の地震波速度構造を求めるものである。地下の岩石の組成や温度によって地震波の伝わる速さが異なる。マグマは岩石が溶けてできた高温の流体で、液体と気体と結晶が混ざったものである。地下にマグマがある程度溜まっているとすると、その場所を通過する地震波の伝わる速さは遅くなる。そのため、地震波の伝わる速さの遅い場所を探すことが、マグマ溜まりを見つける第一歩となる。

富士山にて深部低周波地震が頻発した2001年の翌年の2002年の秋から2005年の春にかけて

富士山の周辺に高密度の地震観測網が展開された⁶。1990年代後半から2000年代前半にかけて日本全土の地震観測網が整備されたため、富士山の近傍の30カ所に臨時の地震観測点を設置することにより容易に高密度地震観測網が構築されたのである。そして、地震観測データから地震波の到達時刻の読み取りをおこなって走時を計算し、地震トモグラフィーを用いて富士山の直下および周辺の地震波速度構造を推定した⁶。また、2003年秋に富士川から富士山を横切り丹沢山地に至る南西—北東方向の89kmの測線に468の地震計が設置され、測線上の5カ所にて500kgのダイナマイトによる爆破がおこなわれ、富士山の周りに展開された多数の地震計で人工地震が観測された⁷。

富士山の直下および周辺の地震波速度構造の西南西—東北東断面を図3に示す^{6,7}。この断面は富士川から富士山、そして丹沢山地を横切っている。この断面は深さ30kmまでを対象としている。図3(a)はP波速度の分布を示し、(b)はS波速度の分布を示す。グレースケールで示した値は、自然地震の走時から求めた地震波速度構造を示す。一方、図3(a)の太破線は人工地震の走時から求

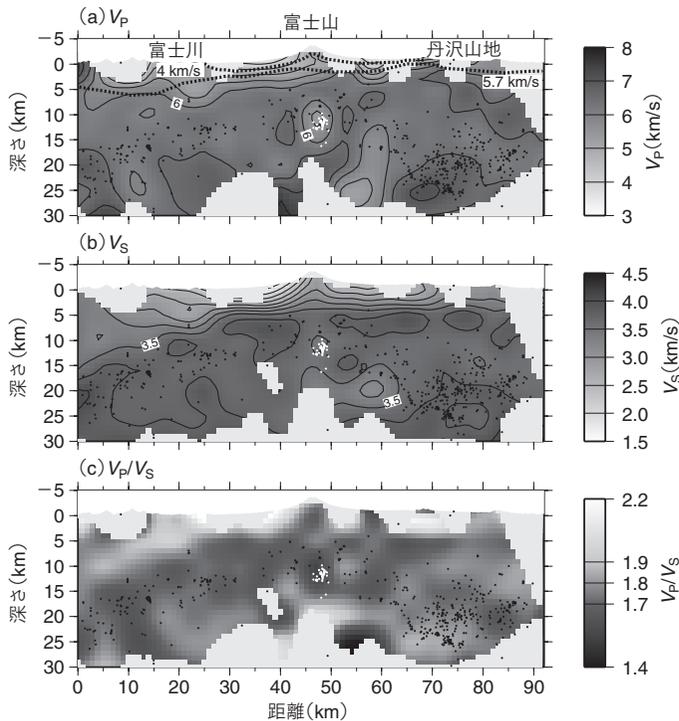


図3—自然地震と人工地震を用いて推定した富士山周辺の地震波速度構造の鉛直断面

富士山を東北東から西南西に横切る断面で、この断面は丹沢山地と富士川を横切っている。断面に示した黒点は解析に用いた地震の震源を示し、白点は深部低周波地震の震源を示す。(a)自然地震の波の伝わる速さから推定したP波速度構造。速度値はグレースケールで示してある。実線は等速度線である。また、太破線は人工地震の波の伝わる速さから推定したP波速度構造における4 km/sと5.7 km/sの等速度線を示す。(b)自然地震の波の伝わる速さから推定したS波速度構造。速度値はグレースケールで示してある。実線は等速度線である。(c)自然地震から推定したP波速度構造とS波速度構造から求めたP波速度値とS波速度値の比(V_p/V_s)。

めたP波速度の4 km/sと5.7 km/sの等速度線を示す。以降、自然地震から求めたP波速度が6 km/sとS波速度が3.5 km/sの等速度線に着目して説明する。

人工地震から求めたP波速度の4 km/sの等速度線は、富士山の山体の形状に沿っているような形をしており、山頂直下にて浅くなる構造をしている。自然地震から得られたP波速度およびS波速度も同様の傾向があり、自然地震から得られた等速度線は富士山直下で浅くなっている。これは、過去に繰り返された噴火によって形成された過去の山体を表していると考えられる。

人工地震から求めた5.7 km/sのP波の等速度線は丹沢山地直下では深さ1 kmから2 kmであ

るが、富士山直下では深さ3 km、そして富士川へと向かうにしたがって、徐々に深くなっていき、富士川周辺では深さ4 kmから6 kmにある。この傾向は自然地震から得られたP波速度にも見られ、6 km/sの等速度線は丹沢山地直下では深さ1 kmにあるが、富士山直下では深さ5 km、そして富士川直下では深さ6 kmから8 kmにある。この傾向は、自然地震から得られたS波速度構造も同様で、3.5 km/sの等速度線は丹沢山地では深さ4 kmにあるが、富士山直下では深さ5 kmにあり、富士川直下では深さ10 kmにある。地震波の等速度線が丹沢山地直下では浅く、そして富士山から富士川へと向かうにしたがって深くなる傾向が見られる。フィリピン海プレートは丹

沢山地で衝突している、西側では東海スラブとして沈み込みをしていることと地震波速度の連続性から、富士山直下ではフィリピン海プレートが裂けておらず、連続して存在して東海スラブにつながっていると考えるのが自然である。

次に、自然地震から得られた地震波速度構造における富士山直下および周辺の低速度域について述べる。P波速度が6 km/sの等速度線で鉛直の楕円状で囲まれた領域が深さ7 kmから17 kmにかけて存在する。また、富士山直下から10 km程度丹沢山地寄りの深さ12 kmから28 kmにも、6 km/sの等速度線で囲まれた領域がある。これらはP波の低速度領域である。一方、S波速度が3.5 km/sの等速度線で囲まれた領域は、富士山直下の深さ7 kmから12 kmにて円状に存在し、また、富士山直下から丹沢方向へ水平方向20 kmにおいて、深さ15 kmから23 kmにピーナッツ状に存在する。これらはS波の低速度領域である。P波とS波の低速度領域がマグマ溜まりのある場所の候補である。

マグマ溜まりの候補を絞り込むための情報としてP波速度をS波速度で割った値(V_p/V_s)の分布図(図3c)を参考にする。富士山直下の深さ7 kmから17 kmにかけてのP波の低速度領域に対応する V_p/V_s は1.5から1.6である。一方、富士山の下深さ17 kmから23 kmでは V_p/V_s は1.9から2.1で、先ほど述べたP波とS波の低速度領域に対応する。空隙や流体を含まない岩石の場合は V_p/V_s は1.73である。岩石中にマグマが存在することを想定した場合は V_p/V_s は1.8よりも大きい。したがって、富士山の直下から丹沢方向へ20 kmの深さ17 kmから23 kmに存在するP波とS波の低速度領域はマグマ溜まりである。一

方、富士山直下の深さ7 kmから17 kmにかけて楕円状に存在するP波の低速度領域は何を反映しているのだろうか？ これはマグマ溜まりではなく、マグマから出てきた水や二酸化炭素といった揮発性物質が超臨界状態で溜まっている場所である可能性がある。図3の白点で示すとおり、この場所に深部低周波地震が発生している⁸ことから、揮発性物質が深部低周波地震の発生に関わっている可能性があるが、検証はこれからである。一方、富士山の噴出物の岩石学的検討からマグマ溜まりがこの深さに存在することが指摘されている⁹。したがって、この場所ではマグマと超臨界状態の揮発性物質が混在している可能性があり、これを検証するにはさらなる地震学および岩石学的な検討が必要である。

文献

- 1—藤井敏嗣: 科学, **71**, 1595(2001)
- 2—西村太志・井口正人: 『日本の火山性地震と微動』, 京都大学学術出版会(2006)pp. 1-242
- 3—M. Ukawa: Bull. Volcanol., **68**, 47(2005)
- 4—高橋正樹: 月刊地球, **22**, 516(2000)
- 5—K. Aizawa et al.: Geophys. Res. Lett., **31**, L09603(2004)
- 6—H. Nakamichi et al.: J. Geophys. Res., **112**, B03310(2007)
- 7—J. Oikawa et al.: Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, **96**, 1(2021)
- 8—H. Nakamichi et al.: Earth Planets Space, **56**, e37(2004)
- 9—T. Kaneko et al.: J. Volcanol. Geotherm. Res., **193**, 161(2010)

中道治久 なかみち ちるひさ

2013年4月より京都大学防災研究所附属火山活動研究センターに所属して、桜島火山観測所をベースに桜島火山をはじめとする噴火が活発な火山について主に地震を使った研究をしている。同時に、日本より大きな噴火を繰り返すインドネシアの火山の研究をしている。過去には、自然地震の到達時刻を使った富士山の地下構造の研究や2007年御嶽山噴火に前駆した超長周期地震の研究を行った。最近の分担執筆著書: 日本自然災害学会(編)『自然災害科学・防災の百科事典』丸善出版(2022)、一般社団法人日本家政学会住居学部会(編)『住まいの百科事典』丸善出版(2021)

超臨界状態——液体も蒸気も別々に存在しない臨界点を超える圧力と温度における物質(流体)の物理的状態である。海水の場合の臨界点は圧力が30 MPaで、温度が405℃である。二酸化炭素の場合の臨界点は圧力が7.4 MPaで、温度が31℃である。