

地震学的手法による火山における構造探査について

行竹 洋平 (東京大学地震研究所)

2025年6月13日
火山調査研究推進本部政策委員会
総合基本施策・調査観測計画部会
第2回調査観測計画検討分科会

火山体構造推定のための地震探査について

総合基本施策・調査観測研究部会による基本目標

「噴火履歴・火山体構造等の基礎情報調査の推進」

今後10年間に取り組むべき調査観測・研究項目

- 火山活動度評価や火山ハザードの把握、噴火の時期、場所、規模、様式、推移の予測、及びこれらに基づく火山ハザードの予測のための火山体構造等の基礎情報調査
- 火山活動の状態把握や噴火の規模等の予測等に資する火山体構造探査等（水蒸気噴火の発生場や、マグマ供給系等についての地震探査等）
- 噴火発生場における熱水・マグマだまりの位置や大きさ等の噴火規模予測や噴火準備過程を把握するための基礎情報の取得
- 地下構造（及び広域応力場等）の推定結果に基づいた、水蒸気噴火・マグマ噴火の発生場を把握する研究の推進

火山活動の状態把握や噴火の推移・規模の予測に必要な項目

1. マグマ・熱水貯留域とその供給経路の把握

- 浅部不透水層構造と熱水の空間分布（水蒸気噴火発生場）
- マグマ溜まりから火口直下への供給経路把握
- マグマ溜まりの空間分布の把握（深さ、水平方向の広がり等）
- 地殻下部からマグマ溜まりへの共有経路の把握
- 低速度層の定量的解釈（流体の種類、流体の体積分率、温度・岩相の影響）

2. 変動源との関連性

- 地震活動域、地殻変動源と構造との位置関係

3. モニタリング精度の向上

- 3次元速度構造を用いた火山性地震・微動の震源位置の高精度推定
- 構造の時間変化の推定

火山浅部から深部（地殻下部付近）までの地下構造推定のアプローチ方法

1. 人工地震による浅部高解像度推定
2. 自然地震による広域な構造推定
3. 常時微動を用いた構造推定（Ambient noise tomography: ANT）

人工地震（発破）による高解像度構造イメージング

■ 日本での人工地震による地震構造探査実施例

実施年	火山名	観測点数	観測範囲	震源数	成果
1994	霧島	163	23kmx18km	6	浅部高速度域の把握
1995	雲仙岳	164	15kmx25km	6	浅部高速度域の把握
1997	磐梯山	276	18kmx25km	6	地震活動と構造の関係把握
1998	阿蘇山	296	10kmx13km	6	
1999	伊豆大島	252+6(海底)	9kmx15km	6	山体浅部構造把握
2000	岩手山	300	35kmx40km	9	地震活動域との関係
2001	有珠山	295	25kmX25km	7	火山浅部構造把握
2002	北海道駒ヶ岳	221	20km×20km	5	火山浅部構造把握
2003	富士山	468	89km	4	浅部速度構造・反射面検出
2004	口永良部島	165	10kmx10km	19	火山浅部構造把握
2006	浅間	464	20km×20km	5	マグマ供給経路の推定

筒井(2005)を参照

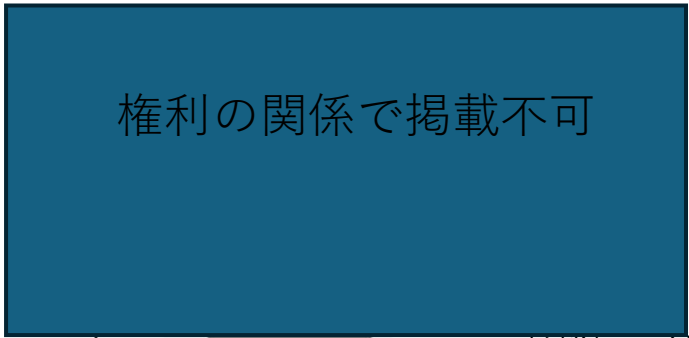
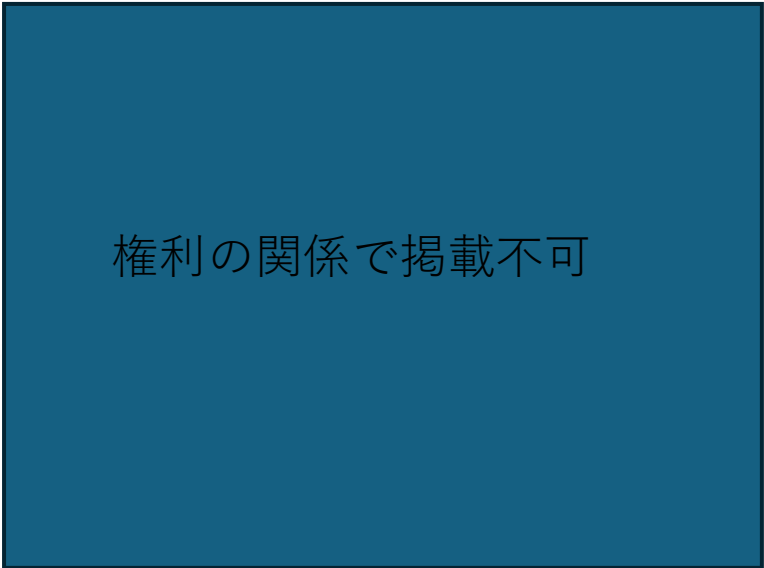
■ 利点

- 火山浅部における高解像度速度構造のイメージング（分解能1km程度）
- 発震時刻・震源位置と速度構造のトレードオフがない
- 絶対速度値の高精度推定が可能

■ 不利な点

- 人的・予算的なコストが大きい
- 火山深部域の制約が困難
- P波速度構造の制約が主

■ 浅間山での研究例



- 固結マグマを反映した高速度域の把握
- 浅部地震活動域と構造との関係把握
- マグマ供給経路に関する理解（e.g. 浅間山）



東北大地震・火山予知研究センターHPより引用

Aoki et al., (2008)

人工地震（発破）による高解像度構造イメージング

■ 後続波（反射波・散乱波）を用いたイメージング

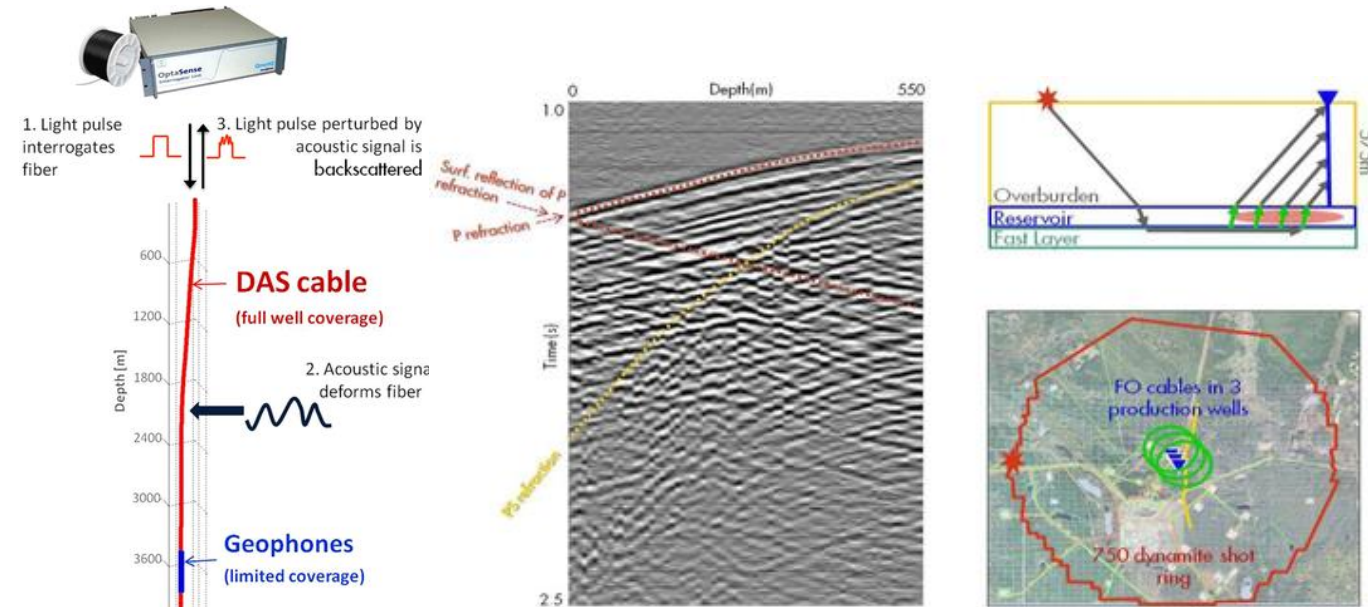
桜島での構造探査の例

権利の関係で掲載不可

Tsutui et al. (2016)

- 後続波を使うことでより深部の構造を推定することも可能
- 同一震源探査を複数期間実施することで時間変化を推定

■ 分布型光ファイバ音響センサ(DAS)を用いたイメージング例

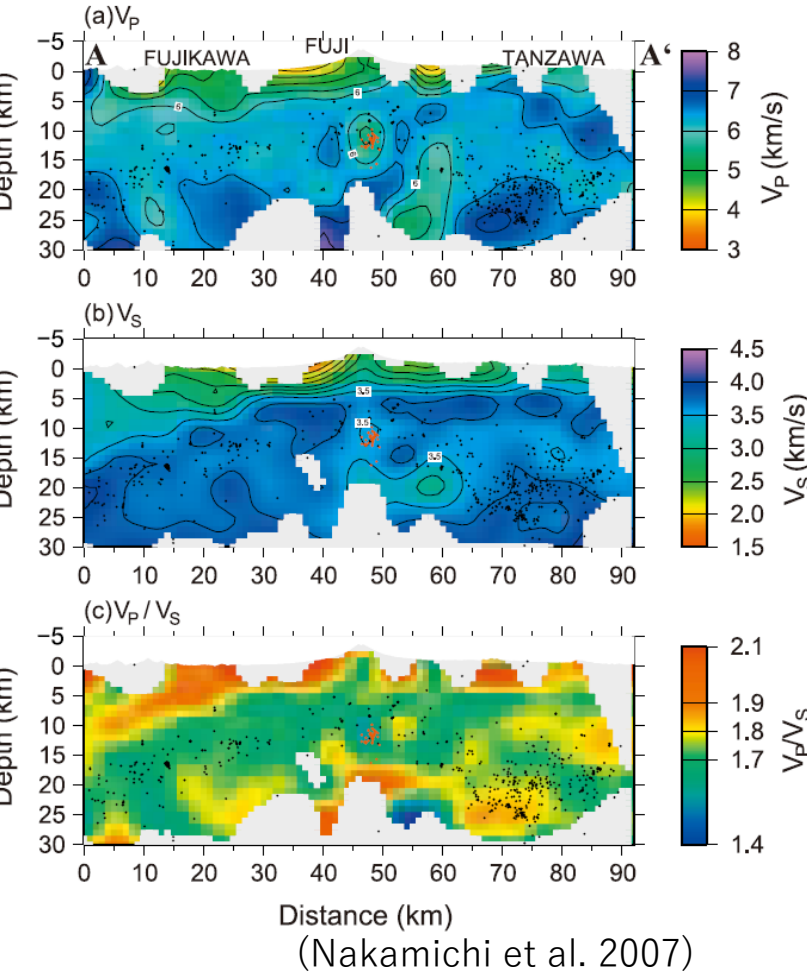


Mateeva et al., (2014)

- 地熱開発域では鉛直方向の観測抗に展開したDASケーブルを用いた浅部熱水域のイメージング
- 高コスト・SNの問題（実用化に向けた研究段階）

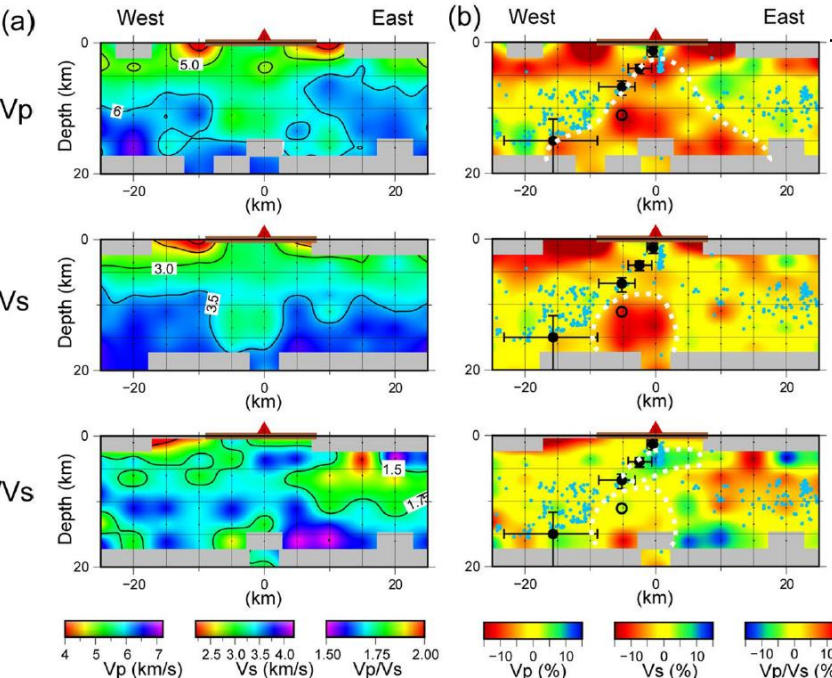
自然地震による広域な構造推定

富士山



- 火口から約25kmの範囲に臨時29点(約2年) + 定常点

雲仙



- 臨時 + 定常点179点
- 約9年間のデータセット

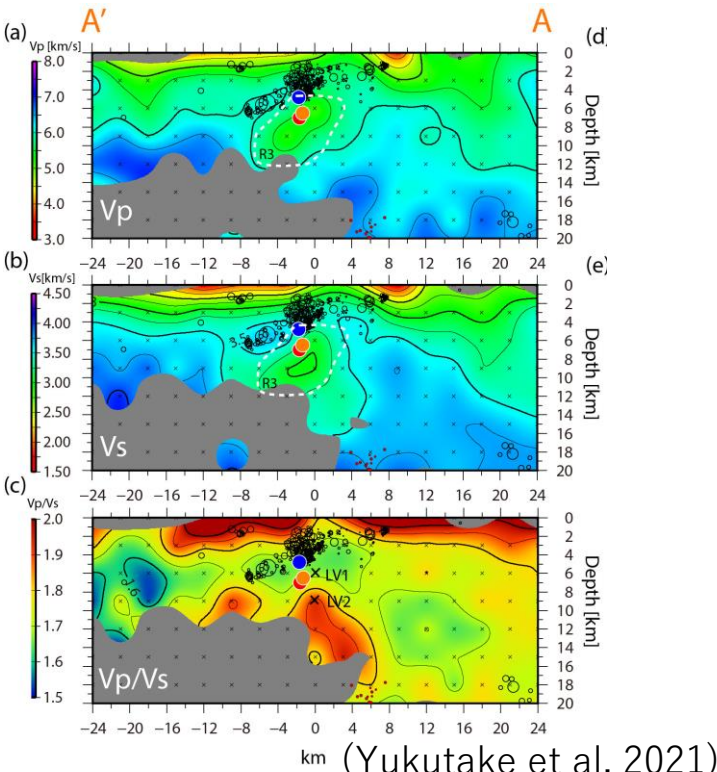
■ 利点

- 火山深部まで推定できる (マグマ溜まりや供給経路の評価)
- S波速度の制約が可能 (V_p/V_s 比の推定)

■ 不利な点

- 震源位置と速度構造のトレードオフ
- 地震活動がない火山では困難
- 震源分布に偏りがある
- 長期的な観測の必要性 (1年以上)
- 波形の読み取りが必要 (機械学習の適用可能性)

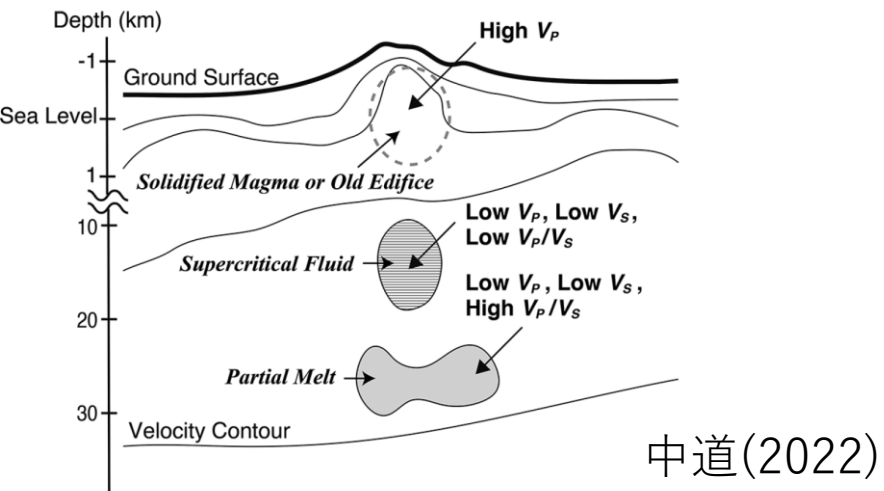
箱根



- 火口から約20kmの範囲に臨時40点(約1年) + 定常点

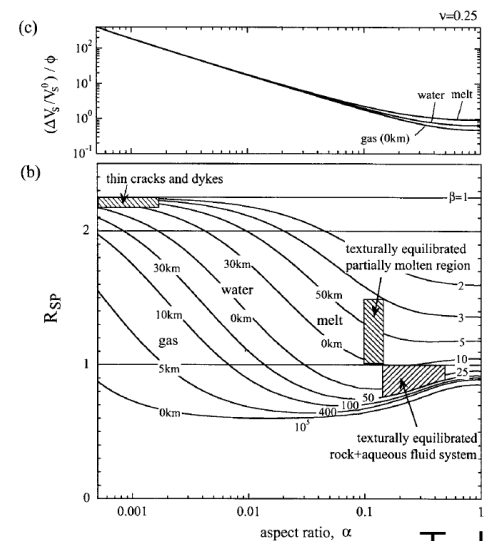
自然地震による広域な構造推定

■ Vp及びVsに基づく速度構造の解釈



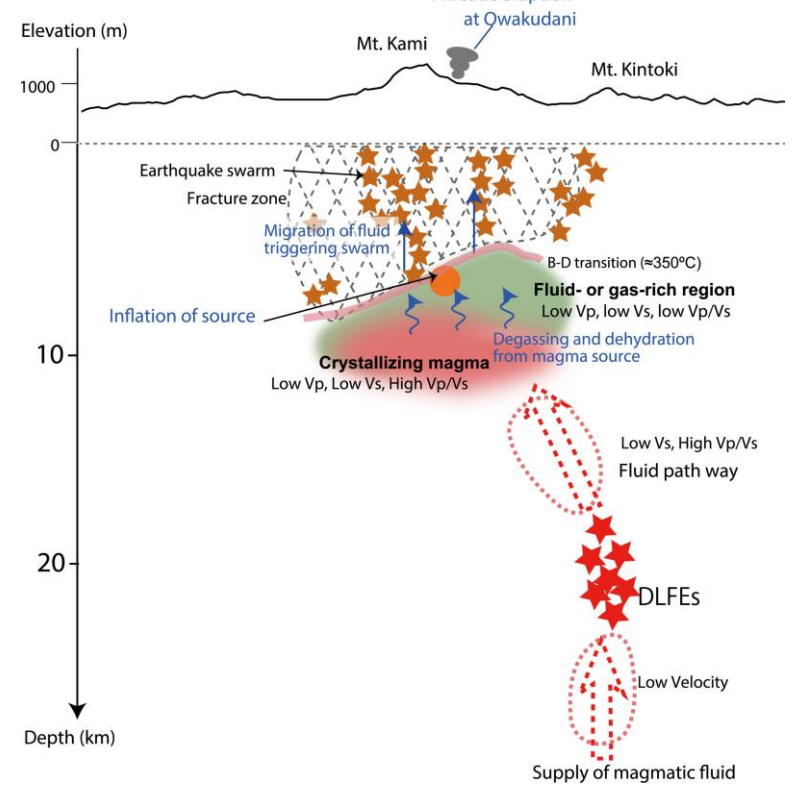
中道(2022)

Vp 及びVsの速度低下率とクラックアスペクト比



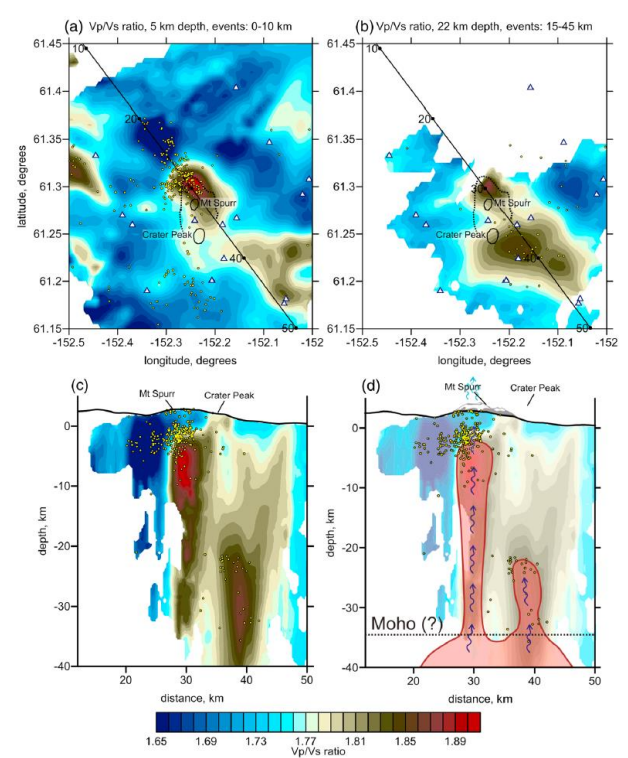
Takei (2002)

箱根火山



Yukutake et al., (2021)

Mt. Spurr



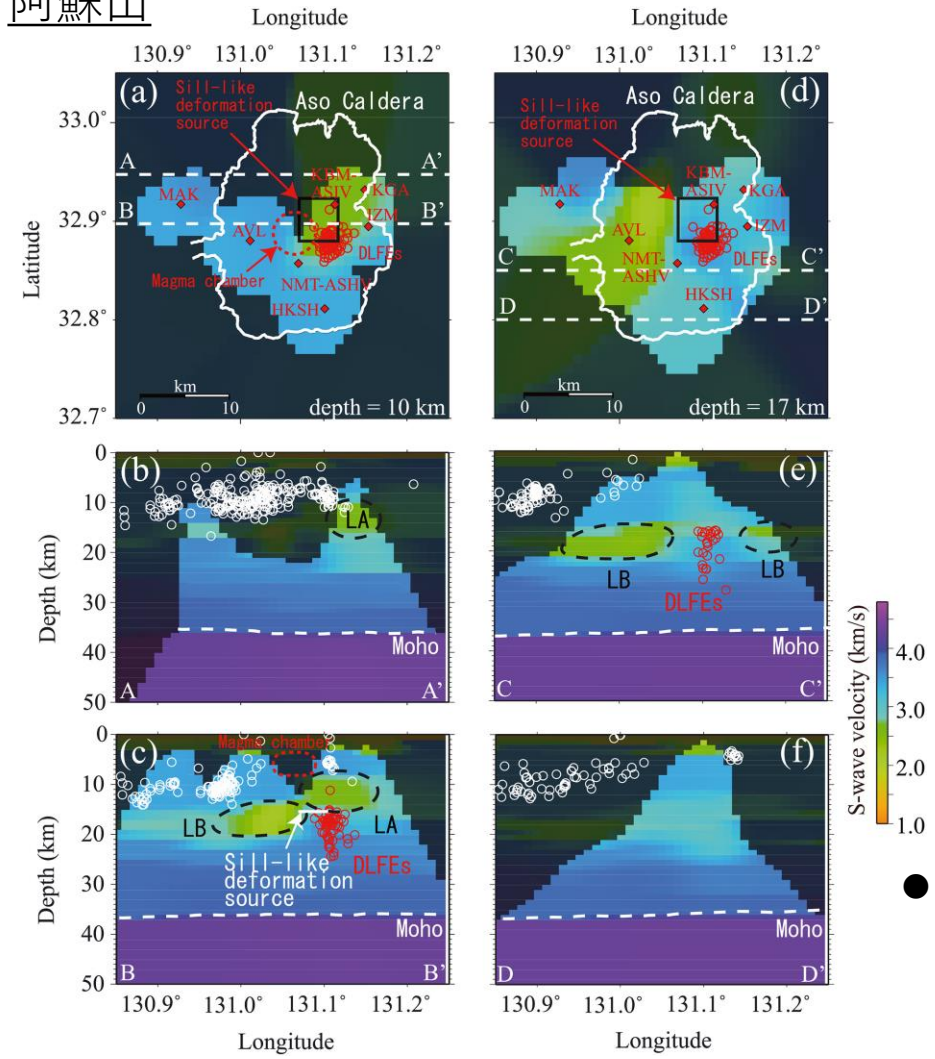
Koulakov et al., (2013)

- 多孔質弾性体理論(Takei, 2002)を用いてVp, Vs値から低速度域における空隙の形状、流体の種類、体積分率に関する推定が実施
- 箱根ではマグマリザーとその上部の熱水域が推定され、流体体積分率が推定 (数%)
- モホ面付近からの低速度、high Vp/Vs領域がマグマ供給経路として解釈 (Mt. Spurr)

自然地震による広域な構造推定

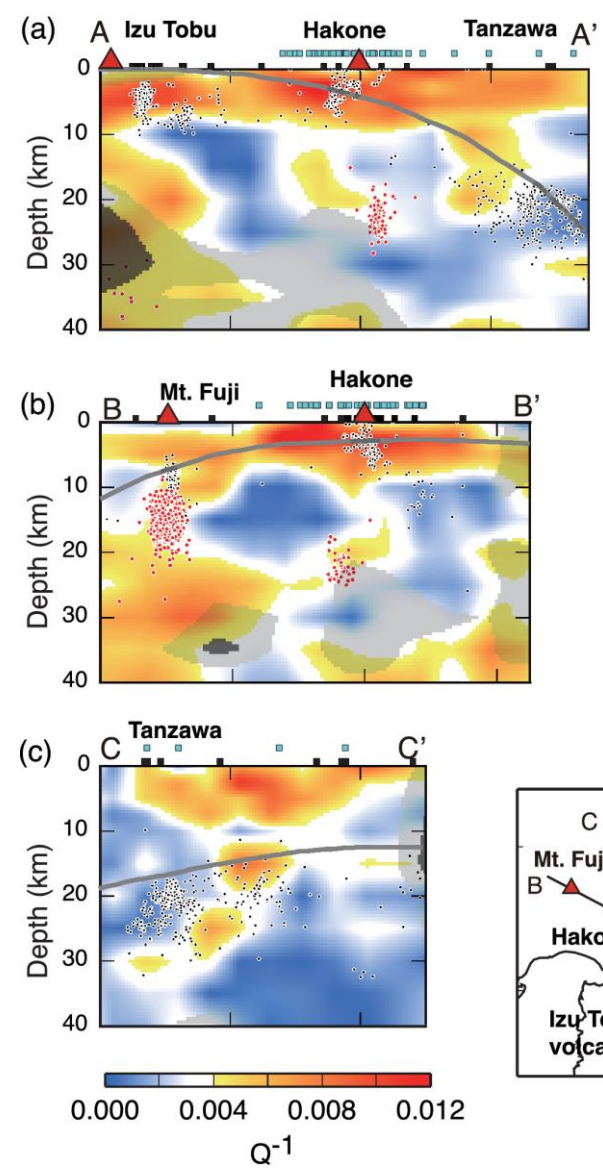
遠地地震変換波（レシーバー関数）

阿蘇山



(Abe et al. 2017)

地震波の減衰構造の推定
富士・箱根



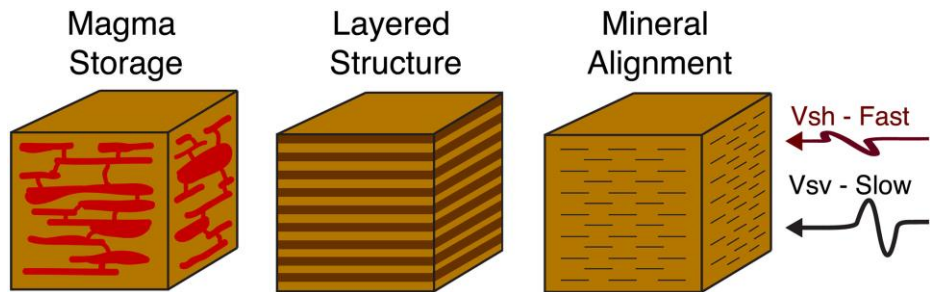
● 地震波速度とは別の指標で流体分布を推定可能

- 遠地地震の変換波を使うことで火山深部のイメージングが可能
- 地震活動度の低い領域でも適用可能

(Kashiwagi et al. 2020)

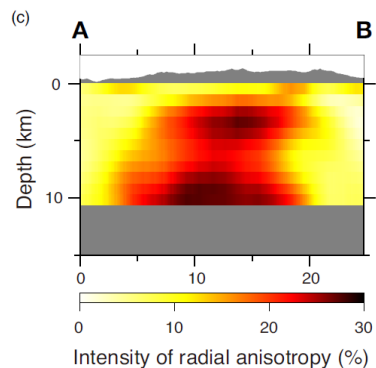
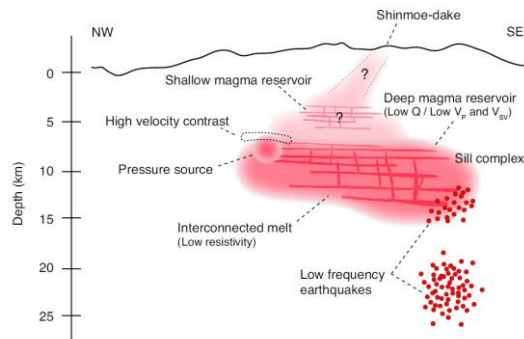
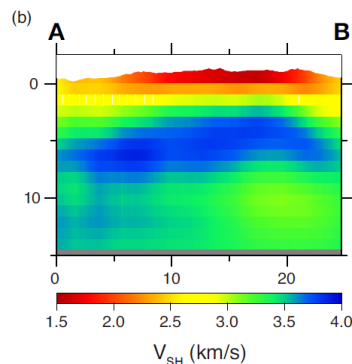
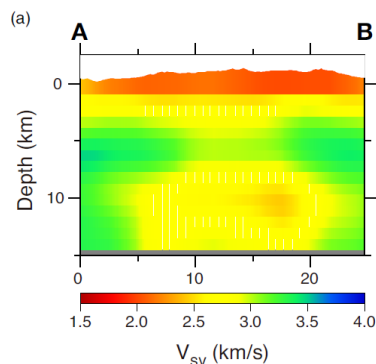
常時微動を用いた構造推定

■ 異方性構造 (Radial anisotropy) の推定



Lynner et al. (2018)

霧島火山



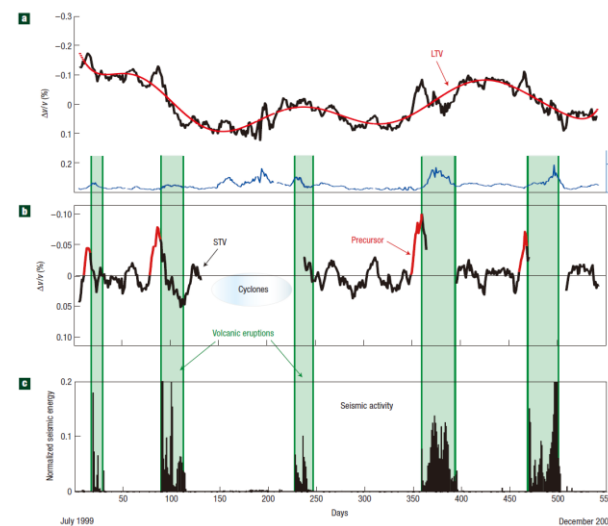
- $V_{SV} < V_{SH}$ となる異方性構造を検出
- シル状マグマの存在を示唆

- 火口から約20kmの範囲に臨時9点 + 定常点
- 約2年間の地震波形記録を使用

Nagaoka (2020)

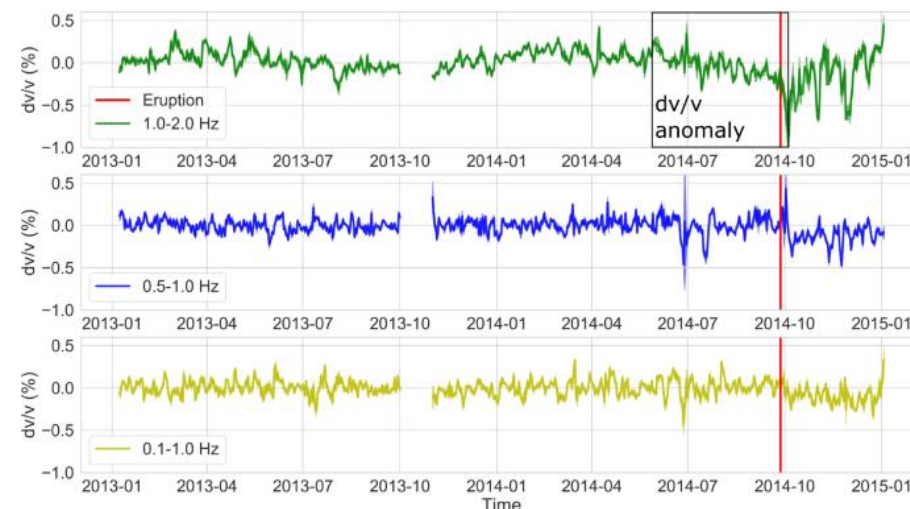
■ 構造の時間変化の推定

Piton de la Fournaise volcano



Brenguier et al. (2008)

御岳山



Caudron et al. (2022)

- 相関関数を長期間モニタリングすることで火山活動に対応した構造時間変化を推定することも可能
- 表面波の時間変化の推定が主

構造探査手法の特徴の比較

	適用深度	解像度	観測領域 (火口から)	観測間隔	観測期間	コスト	特徴
人工地震	表層～上部地殻付近	1km～数 100m	10～20km	数100m (測線上)	1週間程度	大	・絶対速度の制約に重要 ・浅部高分解能推定向き ・Vpが主
自然地震	上部地殻～モホ面付近	数km～ 10km	20km～ 30km	数km～ 10km	1年以上	小	・広範囲の構造推定向き ・Vp,Vsの制約が可能 ・減衰構造推定への適用 ・解像度が地震分布に依存
ANT	上部地殻～深さ10km付 近	数km～ 10km	20km～ 30km	数km～ 10km	10か月以 上	小	・震源ソース不要 ・Vsが主 ・異方性構造推定への適用 ・深部の解像度は波長・高次モードの識別に依存

火山体構造探査の活用と今後の展望

1. 地震観測の強化

- 対象火山に地震計ノードなど簡易地震観測点の多点設置
 - ✓ 自然地震トモグラフィー、ANTにより：
 - マグマ/熱水分布の可視化・マグマ供給経路を推定
 - 地震活動域や地殻変動域と構造との対応関係を把握
- 人工地震探査による浅部構造の高解像度化

2. 既存観測資源の最大活用

- 自然地震トモグラフィーなどの長期観測が前提となる手法では、既存データも積極的に活用
 - ✓ 数年～数十年分の蓄積を解析資源として再評価
 - ✓ 機械学習の導入により大量地震データの効率的かつ高精度処理

3. 地球物理データの統合的解析の推進

- 地震波速度構造×電気比抵抗構造のマルチパラメータ統合解析
 - ✓ 流体存在域の定量的評価、温度場、岩相の推定など (Iwamori et al., 2025)

火山の選定基準方針について考慮すべき視点

1. 実現性

- 地形・用地条件・アクセス性：密な観測網の展開が可能か、人工地震が利用できる環境の有無
- 既存観測網のデータ資源：長期観測データ利用可能性、構造解析・時系列変化の両面に活用可能
- 自然地震活動：自然地震トモグラフィーが適用できるか

2. 科学的意義

- マグマ熱水系・供給系の形態が未推定な火山
- 水蒸気噴火／マグマ噴火など異なる噴火様式の構造モデル蓄積
- 電気比抵抗などと組み合わせた統合解析が可能な火山

3. 噴火リスク

- 中長期的に大規模噴火が想定されるか
- 人的・社会的被害の大きさ：人口密集地・観光地に近いかなど