

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

日向灘の地震活動と南九州の火山活動の相互作用および応力伝播・物質移動過程のモデル化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

エ. 地震活動と火山活動の相互作用

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

(2-1) 地震発生予測システム

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

(5) 本課題の5か年の到達目標：

九州地域にはフィリピン海プレートが沈み込み、日向灘において20～30年間隔で大地震が繰り返し発生している。また、隣接する南九州には、桜島などの爆発的火山がある。いずれもプレートの沈み込みに起因する地震・火山活動であり、両者の間の相互作用は大きいと考えられる。特に地震発生に伴う応力擾乱が、火山に及ぼす影響の評価は、短期から長期にわたる火山噴火活動予測において極めて重要である。加えて、1914年桜島噴火の際に発生した大地震のように、火山噴火に伴う大地震発生の予測も重要な課題である。

上記の観点から、日向灘の地震活動と南九州の火山活動に関連する応力伝播・物質移動過程のモデル化を目指す。この目標に向けて、京都大学防災研究所及び関係大学・機関により設置された南九州地方の地震・火山・地殻変動観測網を最大限活用して、地震活動及び地殻変動の時間的推移を捉える。並行して、九州南部において、沈み込むフィリピン海プレート及び陸側モホ面の形状及びマントルウェッジの地震波速度構造を明らかにし、マントルウェッジ内の流体分布とプレート間の固着域の推定を試みる。九州中南部において、広域電気比抵抗モデルを構築するとともに、詳細な火山体深部構造の推定を行う。さらに、これらの探査結果に基づいて数値構造モデルを作成し、シミュレーションを行い、日向灘からの応力伝播過程や火山体下深部からの物質移動過程を解明する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

【地震・地殻変動観測】

京大常設地震・地殻変動観測網にHinet、GEONET等のデータを統合し、南九州の地震活動、地殻変動の時間的な推移を捉える。PS/SBInSAR解析を実施し、九州太平洋岸から火山フロントに至る地殻変動の空間パターンを把握する。

このため、既存観測網を用いた地震・地殻変動連続観測及びGPS連続観測を実施するとともに、地震、GPS連続観測点の新設も試みる。

〔平成 21 年度〕

- ・九州地方南部に地震・GPS 観測点を新設し、高密度地震及び地殻変動観測を開始する。
- ・ALOS/PALSAR 画像を収集し、これまでの九州南部の干渉画像を作成し、地殻変動を検出する。

〔平成 22 年度〕

- ・九州南部の高密度地震・地殻変動観測を継続する。
- ・引き続き ALOS/PALSAR 画像を収集し、干渉処理を行い、地殻変動を検出する。また、予察的な PS/SBInSAR 解析を試みる。

〔平成 23 年度〕

- ・九州南部の高密度地震・地殻変動観測を継続する。
- ・引き続き ALOS/PALSAR 画像を収集し、PS/SBInSAR 解析を行い、地殻変動の時間変化を検出する。

〔平成 24 年度〕

- ・九州南部の高密度地震・地殻変動観測を継続する。
- ・引き続き ALOS/PALSAR 画像を収集し、PS/SBInSAR 解析を行い、地殻変動の時間変化を検出する。GPS 観測結果との結合を図る。

〔平成 25 年度〕

- ・九州南部の高密度地震・地殻変動観測を継続する。
- ・引き続き ALOS/PALSAR 画像を収集し、PS/SBInSAR 解析を行い、地殻変動の時間変化を検出する。GPS 観測結果と結合し、5 年間の時空間で高分解能の地殻変動を推定する。

#### 【地震波速度構造探査】

フィリピン海プレートの沈み込む方向に海岸部から火山フロント付近までの複数の測線において高密度で地震観測点を展開する。これら臨時観測点のデータに加えて、測線近傍の既存観測点のデータも活用して、レシーバ関数解析等を行う。プレート境界面やモホ面などの地震波速度不連続面の 3 次元構造を明らかにし、プレート境界付近やマントルウェッジ内の流体分布を推定する。

〔平成 21 年度〕 数点で予備観測を行うとともに測線候補地の検討を行う。

〔平成 22 年度〕 観測点の展開を行う。データ蓄積を開始する。

〔平成 23 年度〕 観測点の拡充を行う。レシーバ関数解析を行い、測線下の速度不連続面のラフなイメージを作成する。

〔平成 24 年度〕 観測を継続する。レシーバ関数解析を行い、測線下の速度不連続面のイメージを改善する。

〔平成 25 年度〕 沈み込むフィリピン海プレートと陸側モホ面の形状及びマントルウェッジの地震波速度構造を明らかにし、マントルウェッジ内の流体分布とプレート間の固着域の推定を試みる。

#### 【比抵抗構造探査】

九州地域で実施された種々の電磁気探査結果を包括的に再解析し、広域的な 3 次元比抵抗モデルの構築を行う。大局的な構造から、特定火山にクローズアップし、補充的に広帯域・長周期 MT 観測を実施し、その詳細な深部構造の推定につなげ、モデルの高度化を行う。

このため、平成 23 年度までの 3 年間で、九州の電磁気探査データを収集・コンパイルし、広域モデルを構築する。

〔平成 21 年度〕

・九州において、過去に実施された広帯域 MT 観測・ネットワーク MT 観測・長周期 MT 観測データの収集・整理を行う。

・広域比抵抗モデルを構築する初段として、ネットワーク MT 観測データを用いた 3 次元比抵抗モデル推定に着手する。

・電磁気データの面的カバーリングの過不足を検討し、不足している地域において、補充観測のための下見を行う。

〔平成 22 年度〕

- ・前年度で得られる広域 3 次元比抵抗モデルから、地域を絞りモデルの高度化を計る (九州南部)。

- ・データ不足域において補充長周期 MT 観測を実施する。

[平成 23 年度]

- ・前年度までの使用データ (NMT) に、広帯域 MT・長周期 MT データを統合し、比抵抗モデルの更なる高精度化を試みる。

- ・地表における火山活動域とスラブに至る深部構造の関連性を比抵抗という観点で検討する。

#### 【三次元構造モデルの構築と応力伝播・物質移動過程のモデリング】

上記の構造データ及び地震・地殻変動データを活用し、三次元構造モデルを構築し、粘弾性媒質あるいは粘性流体を仮定して計算を実行し、地震発生及び火山噴火に至る応力伝播・物質移動過程のモデリングを行う。

このため、既存データの収集し、これに基づく暫定モデルを作成する。

[平成 21 年度]

- ・モデル構築に必要な構造研究の文献・資料を収集し、予察的数値モデルを作成する。

[平成 22 年度]

- ・引き続き文献・資料を収集するとともに、数値モデルの精密化を図る。また、GPS/SAR データをインバージョンし、プレート間カップリング等の推定を試みる。

[平成 23 年度]

- ・引き続き文献・資料を収集し、モデルの精密化を図るとともに、地殻変動データからカップリング等の推定を行う。

[平成 24 年度]

- ・文献・資料を収集と地震波及び比抵抗構造探査結果をコンパイルし、モデルの精密化を図るとともに、地殻変動データからカップリング等の推定を行う。

[平成 25 年度]

- ・4年間の構造探査等研究成果を統合したモデルにより、地殻変動データからカップリング等の推定を行う。

### (7) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要:

#### 【地震・地殻変動観測】

(高密度地震観測)

火山噴火に伴う大地震の予測は重要な課題であり、その予測を行うためには火山周辺の地下構造や定常的な地震活動を把握し、大地震を引き起こすひずみの蓄積過程を明らかにすることが必要である。始良カルデラ周辺の地震活動および P 波速度構造を解明するため、平成 21 年度-23 年度にかけて、南九州一帯に 17 点の臨時地震観測点を設置した。平成 25 年度まで自然地震観測を継続している。浅部構造の解像度を上げるため、得られた自然地震データに 2008 年に実施した桜島火山人工地震探査データを加えて、トモグラフィインバージョン (Onizawa et al., 2007) により始良カルデラ周辺の P 波速度構造を明らかにした。56 観測点 (臨時観測 17 点、火山活動研究センター 18 点、防災科研 21 点) における P 波到達時を検測し、そのうち、読み取り誤差が  $\pm 0.1$  秒以内と思われるものを解析に使用した。

図 1 は始良カルデラ周辺の P 波速度構造と各深さに対応する地震の震源分布である。いずれの深さもカルデラ内は低速度であり、カルデラの東から南側で高速度である。高速度領域は深度が増すにつれ始良カルデラ中心部に入り込んでおり、すり鉢状のカルデラ構造が見えている。深さ 8km における始良カルデラ中心部から北西にかけての低速度領域の東端付近は GPS および水準測量で明らかになっているマグマ蓄積期における始良カルデラの圧力源である。深さ 1km、2km においては火山活動に伴う桜島および若尊火山浅部の地震が発生している。4km 以深の地震は桜島南端から始良カルデラ東側のすり鉢状の高速度領域の端で発生しており、速度変化の大きい場所に集中している。始良カルデラのマグマ蓄積における膨張ひずみがカルデラ境界付近の地震を発生させているものと考えられる。

(地殻変動観測)

### 1) 桜島火山の InSAR 解析

桜島火山を含む南九州地域の 2007 年～2010 年の期間における ALOS/PALSAR 画像を収集し InSAR 解析を行った。得られた干渉画像についてスタッキングと 2.5 次元解析を行い、準上下方向と東西方向の地盤変動を計算した。準上下方向の地盤変動からは、桜島北部で地盤隆起、桜島東部から南部では地盤沈降が検出され、同期間に行われた水準測量結果ともよい一致が見られた。桜島北部における地盤隆起は、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおける増圧を反映した変動を捉えたものと考えられる(図 2)。

2007 年～2011 年の期間における ALOS/PALSAR データおよび解析ソフトウェア StaMPS を用いた PS-InSAR 時系列解析を桜島火山に適用した。この結果、スタッキングにより得られた結果とほぼ同様な桜島北部における地盤隆起が、より客観的な解析方法で検出された(図 3)。

### 2) 日向灘沿岸地域の InSAR 解析

日向灘沿岸地域をカバーする ALOS/PALSAR の南行軌道(パス 72、フレーム 2970～2980)からの撮像画像、全 21 シーンを干渉処理し、さらにスタッキングすることにより、平均視線距離変化速度を得た。しかし、GEONET の変位速度から予測されるものと比較して、2 倍程度大きいため、電離層の影響等の系統誤差を補正する必要がある。そこで、全干渉画像について、GEONET の変位をもちいて補正し、さらにこれをスタッキング処理した。その結果が図 4 である。宮崎県南部が北部に比べて東南東へ約 3cm/yr 移動している。また、短波長の変動も認められる。

### 3) 横穴式地殻変動連続観測

宮崎観測所の管理する横穴式地殻変動連続観測網において地殻ひずみの観測を継続した。宮崎平野の南端に位置する宮崎観測抗では、2013 年 3 月 11 日に日向灘で発生した M5.2 の地震の際に、地震時断層変位および余効変動を反映したものと考えられるひずみの変化が記録された(図 5)。豊後水道の四国側に位置する宿毛観測抗では、過去に、豊後水道長期スロースリップ発生時にひずみ変化が観測されたことが報告されていたが、温度記録等の再検討により、温度の影響による見かけの変化である可能性が排除できないことがわかった。霧島連山新燃岳火口の北西約 18 キロに位置する伊佐観測抗では、2011 年 1 月 26 日からの新燃岳噴火に伴う顕著な地殻ひずみの変化が記録された。同観測点のひずみ時系列の精査により、3 回の準プリニー式噴火と同時に発生した  $10^{-7}$  程度のひずみ変化以外にも、各噴火に数時間先行する  $10^{-9}$  程度のひずみ変化が発生していたことが確認された。同程度の大きさの伸縮変化は同観測点ではまれにしかみられないことから、これは噴火の先行過程を反映したものと推定される。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震発生時には、各観測抗で、地震動に伴う動的ひずみ変化に加えて、 $10^{-8}$  程度の静的ひずみ変化が記録された。

### 【地震波速度構造調査】

九州中南部地域下におけるマグマの生成に関するモデルを構築するためには、フィリピン海プレートからの脱水やマントルウェッジ内の流体の挙動を解明する必要がある。本研究では、定常観測点および臨時観測点のデータを用いて、レシーバ関数解析や地震波走時トモグラフィーなどにより、プレート境界面やモホ面などの地震波速度不連続面を含む詳細な 3 次元速度構造を推定することを目的とする。

我々は、高角傾斜する不連続面の形状を正しく推定するために、波面法(de Kool et al., 2006, GJI)を用いたレシーバ関数(RF)のイメージング手法を開発した(Abe et al., 2011, GJI)。そして、急角度に傾斜している九州地方のフィリピン海(PHS)スラブの上面や海洋モホ面の検出および正確な形状推定のためにその手法を適用した。我々は、九州地方に設置されている 120 点の地震観測点(Hi-net 及び J-array)のデータのうち、1996 年 8 月から 2010 年 5 月までの間に発生した遠地地震(マグニチュード 5.5 以上、震央距離 30-90°)の波形を用いて RF を作成し、イメージングを行なった。そして、九州地方の大陸モホ面、海洋モホ面およびスラブ上面に対応する不連続面を検出し、その形状を推定することに成功した(Abe et al., 2011, GRL; Abe et al., 2013, JGR)。この結果から、海洋地殻の脱水深度やマントルウェッジにおける流体分布範囲が、九州地方の北部から南部にかけて変化していることが明らかになった。

PHS スラブの海洋地殻は、九州地方南部(図 6 の断面 D)では 70km、中部(断面 B,C)では 80-90km までスラブマントルに対して低速度であり、含水鉱物を含んでいると考えられる。九州地方北部(断面

A)では海洋地殻はあまり低速度ではなく、50kmの深さではすでに海洋地殻の脱水が進んでいると考えられる。九州地方中部(B,C)ではマントルウェッジに大陸地殻よりも低速度の領域が存在し、大陸モホ面が負のRFピークで検出される(逆転モホ面)。逆転モホ面直下では、蛇紋岩あるいは間隙水の存在が示唆される。そのような低速度領域は、九州地方北部(A)や南部(D)のマントルウェッジには存在しない。

これらの結果から、九州地方南部ではスラブ脱水流体が前弧側ではなく背弧側へと移動して火山活動を引き起こしていると考えられる。一方、九州地方中部では、スラブ脱水流体は前弧側へと移動しマントルウェッジ前弧側の地震波速度を低下させる。このことは九州地方中部の火山フロント上に火山が存在しない原因かもしれない。

臨時地震観測では、平成22年度に宮崎市南部から霧島火山へ延びる測線を設定し、間隔が5km程度になるように7点の観測点を設置し、11月下旬から観測を開始した。平成23年度は、鹿児島県北西部に新規に4点の観測点を設置し、12月から観測を開始した。Hi-netとF-netの定常観測点を含めて、宮崎市から阿久根市まで九州南部を横断する稠密リニアアレイ(図7のAA')を構築した。平成24年度は、宮崎市南部から桜島に延びる第2の測線を設定し、6点の臨時観測点を展開した(図7のMK12~MK17)。既存の臨時観測点も合わせて、観測点間隔が約5kmの稠密リニアアレイを構築した。

平成25年度には、宮崎-阿久根測線において、霧島火山の西方に観測点を2点追加した(MK18とMK19)。また、宮崎-桜島測線において、既存の臨時観測点(SK08とSK09)の地震計を2Hz計からレシーバ関数解析に有利な1Hz計に変更した。これらの観測点での観測を継続し、波形データを蓄積した。レシーバ関数解析では、宮崎-阿久根測線の暫定的なレシーバ関数イメージを更新した(図8)。

西北西に傾き下がるフィリピン海スラブ内の海洋モホ面を深さ120kmまで確認することができる。ただし、深さ70kmくらいからレシーバ関数イメージから読み取れる海洋モホ面と黒丸で示される深発地震面との間に開きが生じるが、これは水平成層構造を用いたイメージングによるバイアスであり、今後補正する必要がある。大陸モホ面は、測線の中~西部では深さ30~35kmにみられるが、東部のウェッジ域では不明瞭である。これは、ウェッジ部がスラブ起源流体の影響で低速度化し、モホ面が高速度層上面ではなくなっているためと考えられる。宮崎市付近の深さ40kmのプレート境界面は安定滑り域である可能性が高い。また、新燃岳付近の低周波地震の発生域には、強い低速度層を示す濃い青のイメージが見られる。この近傍のAK14という観測点のレシーバ関数には、強い低速度層上面でP→S変換したと考えられる大きな負の振幅が見られる。この強い低速度層は、新燃岳の噴火に関与する流体によるものと考えられる。

#### 【比抵抗構造探査】

九州地域で1993~1998年の期間に実施されたNetwork-MT法観測によるデータをもとにした広域比抵抗構造推定に関する研究を実施した。Network-MT法観測による2つの電場ダイポールが構成する三角形の分布が、九州全域で可能な限り空間的に均質なるよう、三角形の組合せを再構築した上で、探査情報となるインピーダンスを求め、逆解析により、九州の地下構造、特に火山フロント周辺を中心とした広い範囲の地下深部の2次元および3次元大規模比抵抗構造を求め、以下のような構造的特徴を明らかにした。

- ・火山フロントの主要火山の地下には、背弧側深部から沈み込むプレートの上面に沿うように浅部までに至る低比抵抗異常域が存在している。
- ・低比抵抗異常域は、火山フロントに沿って連続しているわけではなく、由布、九重、阿蘇火山の下に、また、霧島、桜島火山の下に、不連続的に存在している。
- ・一方、沈み込むプレートを含め火山フロントより前弧域は、概ね高比抵抗である。
- ・逆に、非火山地域では、前弧域のプレート上面から浅部にわたり、火山地域と比較して低比抵抗値を示している。

**(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：**

寺石眞弘・山崎健一・小松信太郎, 日向灘地殻活動総合観測線における地殻変動連続観測, 平成 25 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P24, 2014. Ken'ichi Yamazaki, An attempt to correct strain data measured with vault-housed extensometers under variations in temperature, *Tectonophysics*, 599, 89-96, 2013. Ken'ichi Yamazaki, Masahiro Teraishi, Kazuhiro Ishihara, Shintaro Komatsu, and Koji Kato, Subtle changes in strain prior to sub-Plinian eruptions recorded by vault-housed extensometers during the 2011 activity at Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 65, 1491-1499, 2013.

澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山崎健一・大倉敬宏・吉川 慎・安部祐希・井口正人・為栗 健・園田忠臣・市川信夫・三浦 勉, 南九州下に沈み込むフィリピン海プレートのイメージング (3), 京都大学防災研究所研究発表講演会, P20, 2014 Abe Y., T. Ohkura, K. Hirahara and T. Shibutani, Along-arc variation in water distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res.*, 118, 3540-3556, 2013, doi:10.1002/jgrb.50257 安部祐希, 大倉敬宏, 平原和朗, 澁谷拓郎 (2013), レシーバ関数解析によって明らかにした九州地方の上部マントルにおける流体の分布, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SCG63-P11(ポスター), 千葉市 Yuki Abe, Takahiro Ohkura, Kazuro Hirahara, Takuo Shibutani (2013) Water distribution in the upper mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, American Geophysical Union Fall Meeting, DI33A-2226 (poster), 米国サンフランシスコ

**(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：**

橋本学, 澁谷拓郎, 大谷文夫, 福島洋, 寺石眞弘 (防災研究所地震予知研究センター)  
大志万直人, 吉村令慧 (防災研究所地震防災研究部門)  
井口正人, 山本圭吾, 神田径, 為栗健 (防災研究所火山活動研究センター)  
大倉敬宏, 宇津木充, 井上寛之 (京都大学大学院理学研究科火山研究センター)  
平原和朗 (京都大学大学院理学研究科) 以上, 16 名  
他機関との共同研究の有無：無

**(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先**

部署等名：

電話：

e-mail：

URL：

**(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者**

氏名：橋本学

所属：京都大学防災研究所

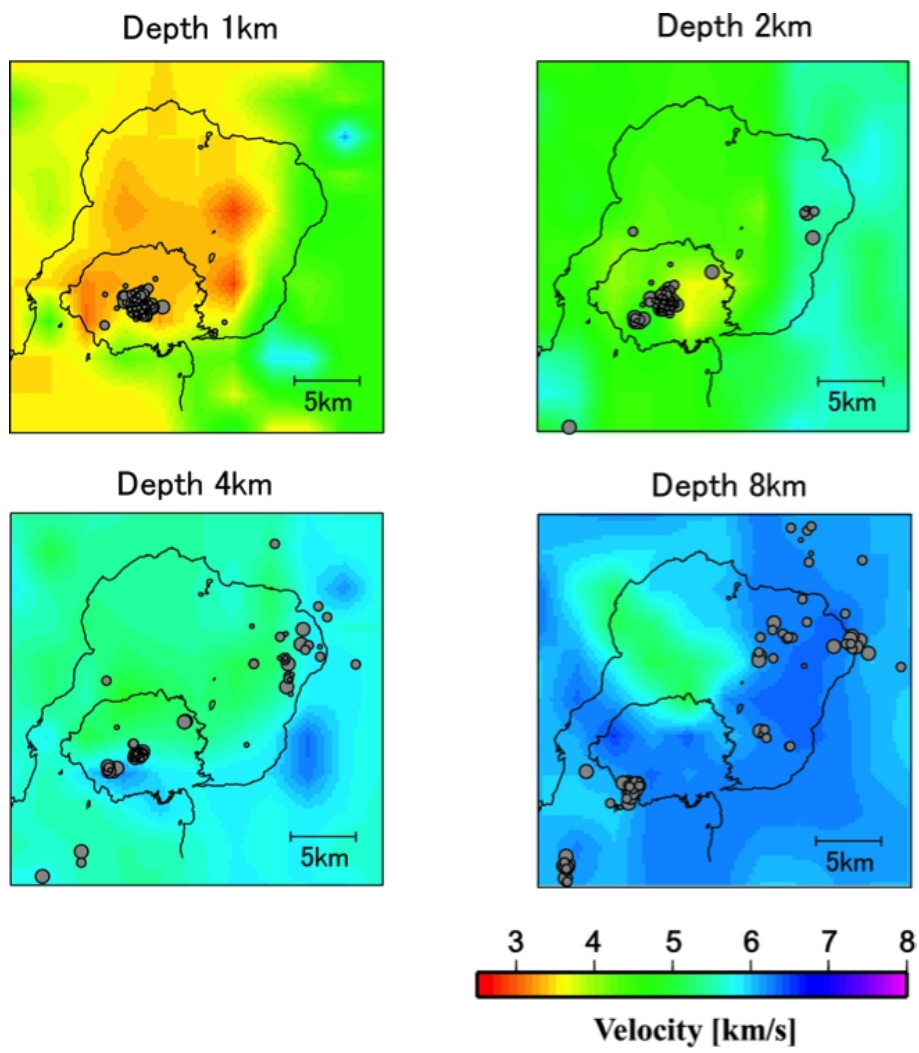


図1  
始良カルデラ周辺のP波速度構造と各深さに対応する地震の震源分布.

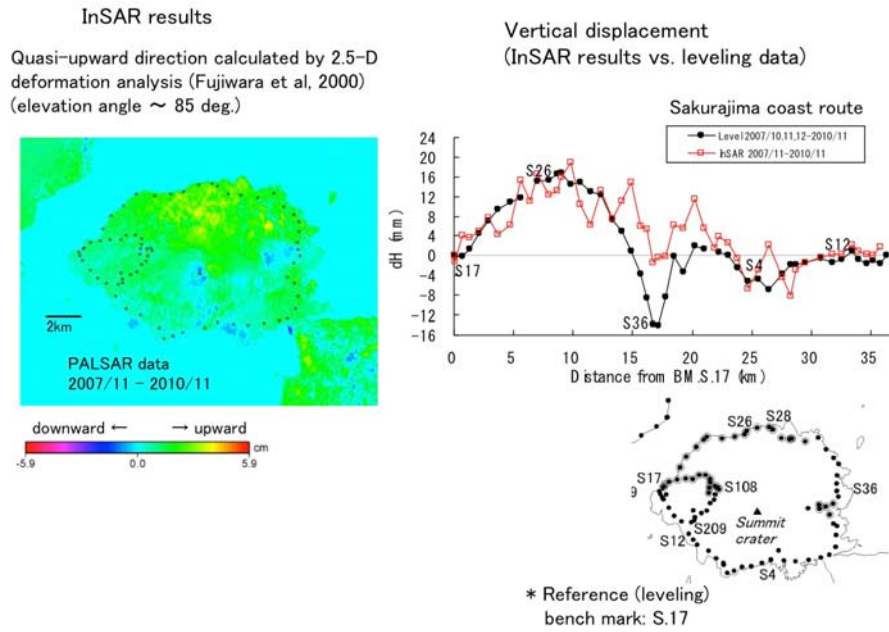


図 2

左図：桜島火山における InSAR 解析結果（2007 年 11 月～2010 年 11 月の期間のスタッキングおよび 2.5 次元解析による準上下方向の変動）。右図：各水準点（左図中の黒丸）における InSAR 解析結果（準上下方向の変動）と水準測量結果の比較。

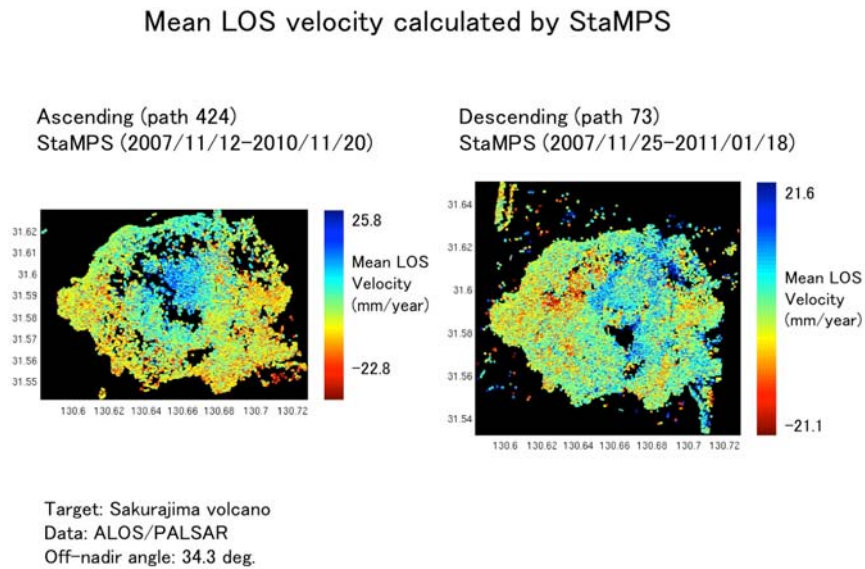


図 3

2007 年～2011 年の期間の桜島火山における StaMPS を用いた PS-InSAR 時系列解析結果。



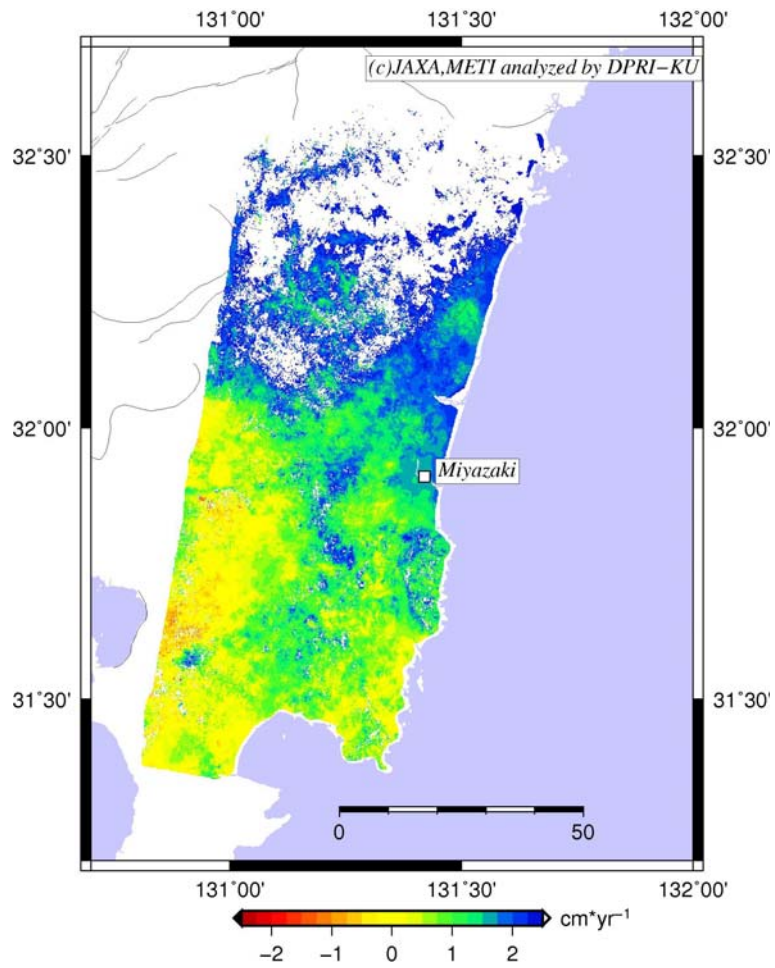


図 4

ALOS/PALSAR の南行軌道（パス 72、フレーム 2970 - 2980）の全 21 回の画像の干渉画像を，GEONET 変位で補正し，スタッキングした結果得られた平均視線距離変化速度図。

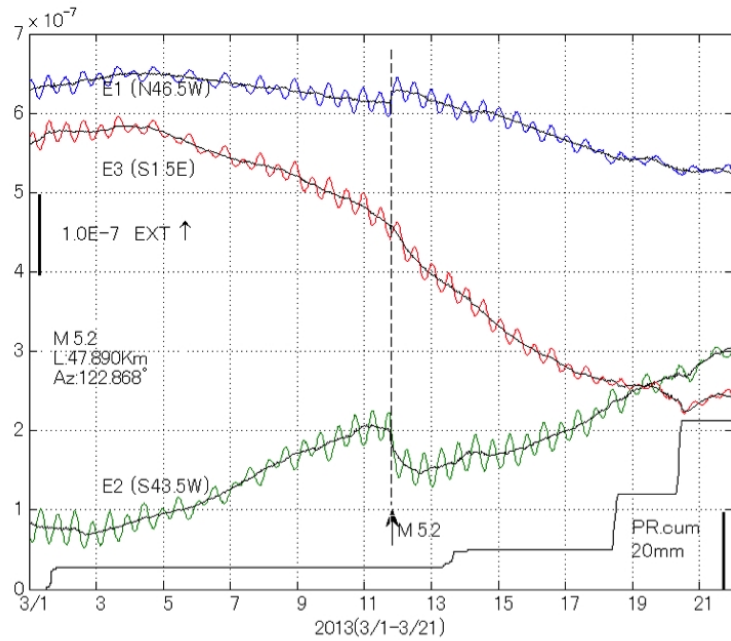


図 5

宮崎観測坑における日向灘の地震 (M5.2; 2013/3/11, LT18:34:49) 発生前後の伸縮計記録。青, 緑, 赤のグラフは E1 方向 (N46.5W), E2 方向 (S43.5W), E3 方向 (S1.5E) に設置された伸縮計の元データを, 対応する黒線はそれらから潮汐成分を除去したものを表す。最下部のグラフは雨量の積算値を表す。

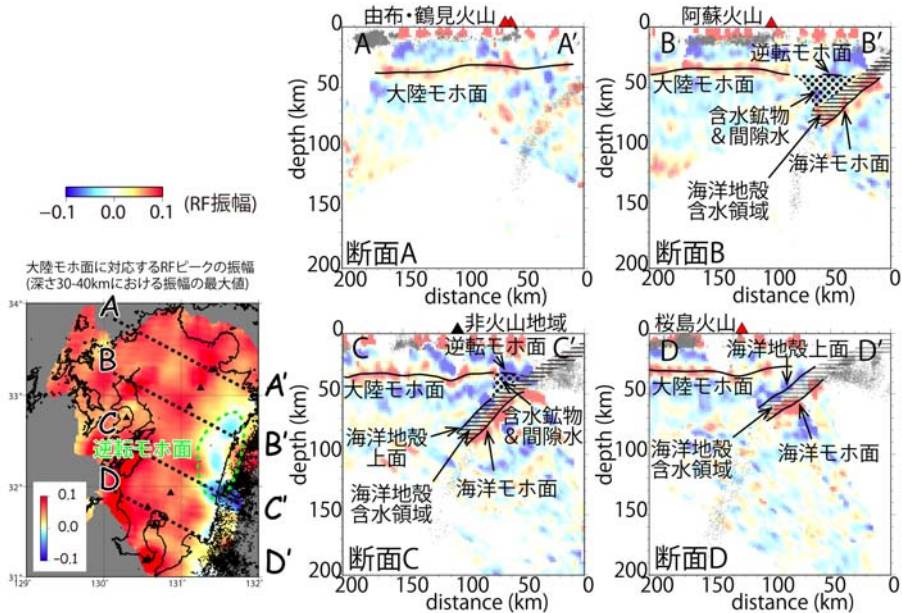


図 6

レーバ関数の平面図 (地図) および断面図。断面 A, B, C, D はそれぞれ、地図中の A-A', B-B', C-C', D-D' に対応する。小さい黒点は、気象庁が決定した断面内の地震の震源を示す。

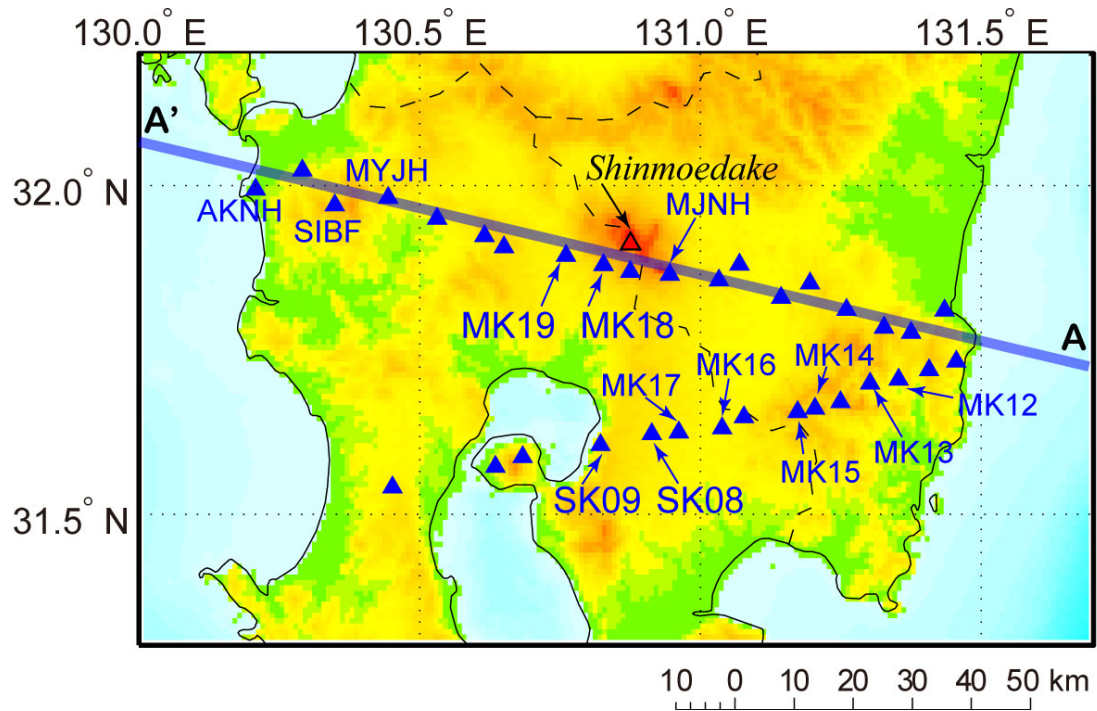


図 7

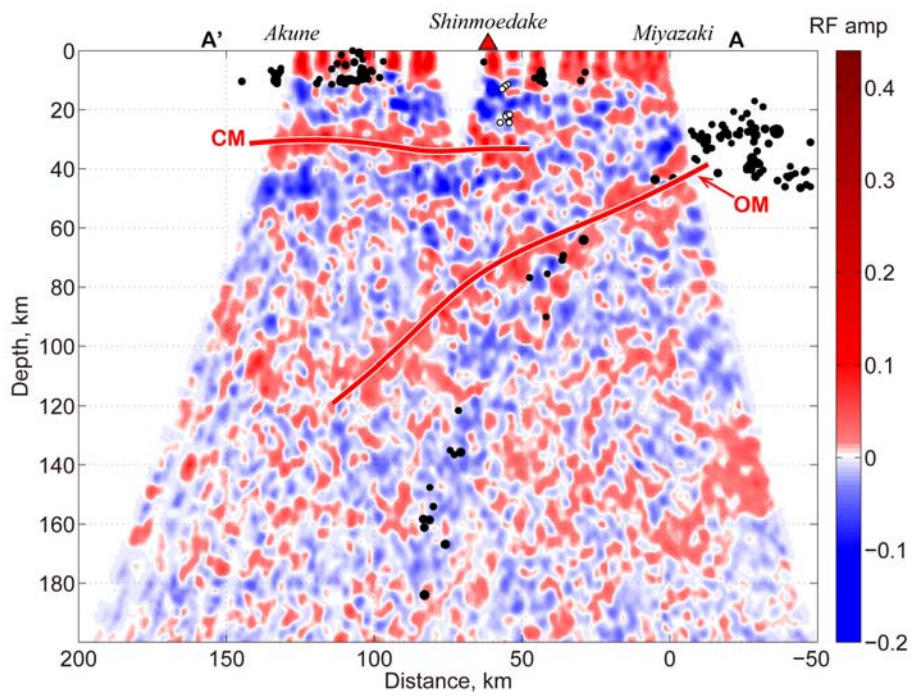


図 8

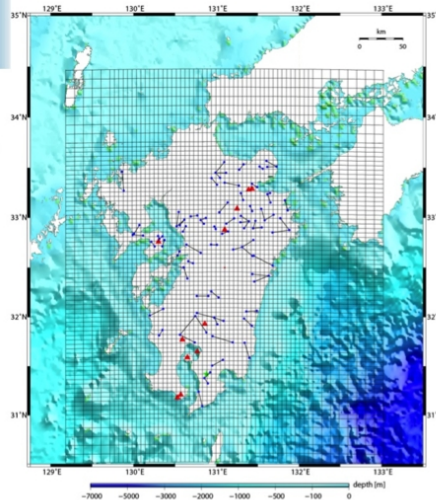
宮崎—阿久根測線（図 1 の AA'）でのレイバ関数イメージ。赤線は高速度層の上面を表す（CM：大陸モホ面，OM：海洋モホ面）。白抜き丸は低周波地震，黒丸は通常の地震を示す。赤三角は新燃岳。



# 3次元解析の初期モデル

WSINV3DMT\_NMT[Uyesima et al., 2008]

- \* 初期値
  - ・海水: 0.33[Ω m][fix]
  - ・陸(海底): 100[Ω m][free]
- \* 計算領域
  - ・南北方向: 440[km]
  - ・東西方向: 360[km]
  - ・上下方向: 1,000[km]
- \* メッシュ
  - 【75 × 59 × 27=119,475】
  - ・南北方向: 75
  - ・東西方向: 59
  - ・上下方向: 27
- \* データ【72 × 14 × 4=4,032】
  - ・ダイポール数: 72
  - ・周期数: 14 (480~40,960[s])
  - ・観測値数: 4



Error floor 5[%] ⇒ RMS: 1.4

図9 3次元解析の初期モデル

## 3次元比抵抗構造モデルを基にした2次元断面

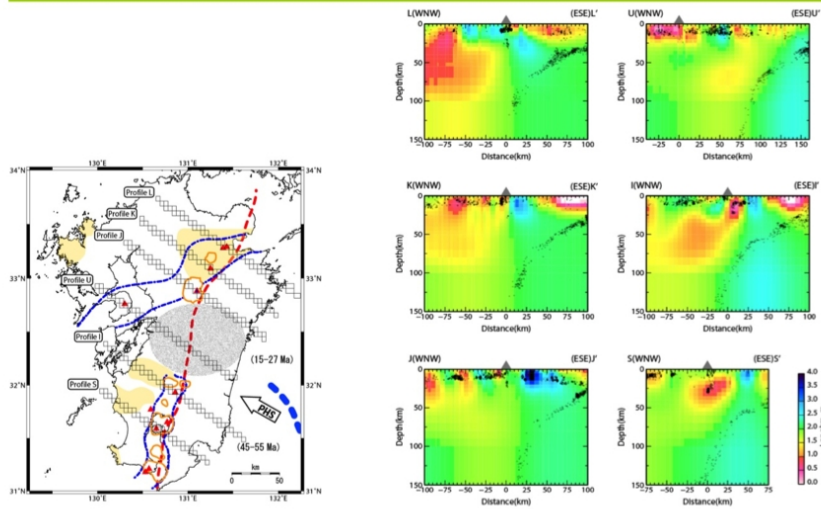


図10 3次元比抵抗モデルを基にした2次元断面