

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540410

研究課題名(和文)

リアルタイムマグマトモグラフィに向けた震源と解析法の研究

研究課題名(英文)

Real-time magma tomography - Basic research for sources and analysis

研究代表者：

山岡 耕春 ( KOSHUN YAMAOKA )

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：70183118

研究成果の概要(和文)：活動的火山におけるマグマの動きを、精密に制御された震源装置を連続で稼働させることにより検出するための基礎研究を実施した。桜島火山に於ける構造探査データを用いた解析により、現在稼働中の震源装置で火山モニタリングが現実的に可能であることが明らかになった。また構造不均質の大きな火山で有効と考えられる直線加振型低周波震源の稼働実験を行うことにより、その有用性も確認することができた。

研究成果の概要(英文)：We have conducted a research on the feasibility of volcano monitoring, in which a seismic source with high accuracy are used. We examined the efficiency of monitoring at Sakurajima volcano, Japan, using a dataset of seismic exploration, and showed that the monitoring with the existing seismic source is possible for Sakurajima volcano. We also showed the usefulness of a linear-moving low-frequency vibrator, which will be used for highly heterogeneous structure of volcanoes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野： 固体地球物理学

科研費の分科・細目：4401

キーワード： 観測手法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究代表者のグループでは、従来から ACROSS と呼んでいる精密制御震源装置の開発とその地球物理学的応用の研究を行ってきた。地震や火山活動に伴う地下の状態変化を捉えるためには、従来地震計、歪計、GPS などの装置によって主に受動的に信号を取得して推測していた。これらの試みに対し、我々を含むグループでは、精密に制御された弾性波信号を能動的に地下に送り、地下から戻ってくる信号の時間変化を捉えて、地下の状態の時間変化の情報を取得する技術の開

発を進めている。

(2) 火山においては、マグマの泡の含有量などマグマの物性変化があり、火山を通過する弾性波が火山活動によって変化することが期待される。実際デイサイト質マグマの冷却に伴う割れ目の生成によって地震波伝播速度が減少することは昭和火山において確認されている。このように地震発生場や火山において、弾性波の伝播をモニターすることは地震や火山を含む地殻の現象を理解する上で非常に重要な情報となる。

(3) 従来 ACROSS 震源の実験は、い

れも 10 Hz よりも高い周波数帯におけるものであり、散乱の強い火山への応用には限界があると考えられる。そこで、散乱の影響を受けにくい比較的低い周波数における地下構造モニタリングの手法開発を進める必要がある。

## 2. 研究の目的

活動的火山におけるマグマの移動を、精密に制御された震源によって捉えるために必要な要素技術の開発と、実際の火山に応用した場合の課題の検討を目的としている。

(1) 現実の火山を想定し、現実的な観測時間により十分な SN 比のデータが得られることが、モニタリングの精度を決める。従来型のアクロス震源については、非火山地域の地質における振幅の距離減衰特性が明らかになっているものの、火山における距離減衰は明らかになっていない。具体的な火山に於ける距離減衰がわかれば、その場所のノイズレベルを知ることにより、十分な SN 比を得るために必要な観測時間がわかる。ここでは、桜島火山を想定し、過去に行われた人口地震の観測データと、非火山地域の地質に於ける距離減衰から換算する方法を開発し、火山に於ける震源稼働所要時間を推定することを目的とする。

(2) 低周波震源は、不均質の強い火山における震源として望ましいものである。現在使われている ACROSS の震源は遠心力により力を発生させるため、比較的周波数の高い場合に有効であることから、必ずしも火山に向かないかも知れない。より有効な震源は大きなおもりを直線的に往復移動させることによって振動を発生させる原理のものである。低周波において大きな力を発生させるためには振動のゆれ幅を大きく取る必要がある。回転型の場合には周期によらず揺れ幅が同じであるが、直線加振方式は揺れ幅を自由に变化させることができ、低周波側で大きな力を発生させることが可能である。ただし、このような原理で振動を発生させる震源が波形の精密さを担保できるかが、モニタリングのための震源として利用可能かを判断する分かれ目である。そのため、実際に稼働している装置を借りだして試験観測を行い、直線加振型の性能を評価することを目的とする。

(3) 実際の火山への応用として、インバージョン技術の開発が必要である。P 波や S 波の到着時刻を用いた解析も可能であるが、この場合は従来の方法を用いればよい。既存の波形計算の差分計算コードを用い、マグマだまりに代表される火山の地下構造変化の火山の弾性波伝搬特性に対するグリーン関数を計算する。さらにこのグリーン関数を用いたインバージョン計算を実施し、インバージョンの精度の検証を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究は、現実の火山において十分な SN 比を得るために必要な観測所要時間の検討、低周波震源の性能試験。そしてインバージョン技術の開発の 3 つとなる。それぞれについて方法を説明する。

(1) 桜島火山を対象として、桜島に既存の ACROSS 震源を設置した場合の距離減衰を推定し、観測時間と得られる SN 比との関係を明らかにする。具体的には、過去の桜島火山で実施されたダイナマイトによる人工地震実験のデータを利用し、桜島島内やその周辺域に於ける距離減衰特性とその周波数依存性を推定する。さらに、既存のアクロス震源の、非火山地域に於ける距離減衰特性と比較する事により、アクロスの震源を桜島に設置した場合の観測時間と SN 比との関連を明らかにする。

(2) 鹿島建設技研が所有する、直線加振型低周波震源を借出し、異なる地質の地域において実験をし、その精度と性能を検証する。具体的にはすでに回転型の ACROSS 震源が設置されている花崗岩地帯の淡路島と、100 点以上の地震計が設置されている凝灰岩地質の宇都宮市大谷地域において実験を行う。淡路島においては、既存のアクロス震源の近傍に設置し、震源の各部分における加速度を測定してその性能を評価するとともに、深さ 700 m のボアホールに設置されている地震計で観測し、既存の ACROSS 震源の記録と比較する。震源稼働は一定周波数の正弦波加振と、周波数を変化させるスイープ加振について試験する。大谷地域においては、半径約 2 km 以内に設置されている 100 点以上の地震計の記録を利用し、信号の距離や方位依存性を調べる。またその地震観測点で計測された遠地震の解析から得られた走時異常と低周波震源から得られた見かけ速度を比較し、地下構造の情報を得る。

(3) 地形効果を導入できる既存の 3 次元差分計算法 (Ohminato and Chouet, 1997) をもとに、低周波震源の震動をシミュレーションし、その計算で、任意の場所における弾性常数変化と波形変化との間のグリーン関数計算を行い、精度の検討をする。さらにそのグリーン関数を利用して、仮想的な地下構造変化を与えた場合に関するインバージョンを試行する。

## 4. 研究成果

(1) 桜島火山を対象とし、桜島に既存の ACROSS 震源を設置した場合に得られる SN 比を調べた。

データは、桜島の構造探査で得られた記録を用いている。図 1 には、波形の例と観測点分布を示した。

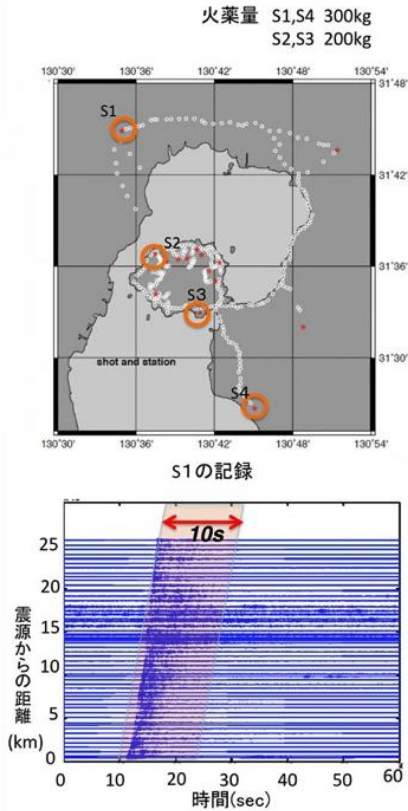


図1 桜島の人工地震実験の観測点分布 (上) と観測波形の例 (下)

このデータを用い、桜島の島内における地震波の距離減衰を周波数の特性として計算した。それぞれの周波数特性を、距離減衰を表す理論式で回帰させると図2のようになり、良い一致が見られる。上に凸の曲線となっているのは内部減衰 (Q) の影響である。この減衰特性と、それぞれの観測点に於ける通常のノイズレベルを用いて、桜島島内に既存の ACROSS を持ち込んだ場合の SN 比を見積もった結果、1 km の距離においては 1 日の観測で 10 程度の SN 比が得られ、5 km 程度の距離では 1 ヶ月程度の観測で 5 程度の SN 比が得られることがわかった。

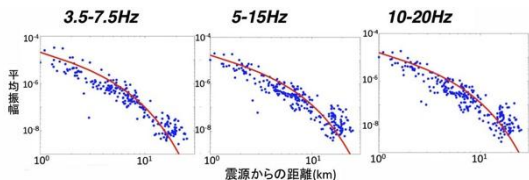


図2 桜島島内における地震波の距離減衰

(2) 直線加振型低周波震源の実験は、鹿島建設所有の振動装置を借りだして淡路島および宇都宮市大谷地域において稼働実験を行った。装置は、2 トンのおもりをモータの力によって水平移動させ、その反力を地面に

伝えて振動を発生させるものである。発生力は最大 1 トンとなっている。図3に装置の写真を示すが、中心に見えるのがおもりで、右端のモータによっておもりを左右に振動させる。

この震源を 1.0Hz から 10.0Hz まで 0.2Hz 刻みで 30 分ずつ正弦波震動をさせ、それぞれの周波数における伝達関数を得た。波形を見る限り、高調波ひずみは 5% 以下であり、十分実用に耐えることがわかった。また周波数の安定性は、信号を発生させるファンクションジェネレータの水晶発信の精度で決まることがわかり、GPS に同期した外部同期を施すことにより、高い時間精度も得られることがわかった。周波数領域で得られた伝達関数をフーリエ変換によって時間領域に直すことによって P 波や S 波に対応する信号が得られる (図4)。



図3. 水平加振型低周波震源装置

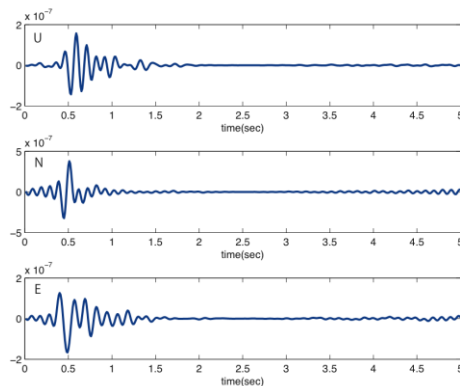


図4. 深さ 800m に設置した地震計でとらえた伝達関数。

一方、宇都宮市大谷地域に於ける実験では、大谷地域の半径 2 km あまりの場所に設置されている 126 点の地震観測点 (図5) のデータを利用して実験を行った。狭い範囲に多数の地震計が設置されている環境は他にはなく、震源の性能を探る実験場としては理想的

である。図5の同心円の中心に震源を設置した。互いに直交する2方向に加振するため、震源は途中で90°回転させて設置し直し、それぞれの方向で1.0Hzから10.0Hzまで0.2Hzおきに正弦波で震動させて記録を取得した。それぞれの方向の加振結果を加算することによってラジアル方向とタンジェンシャル方向に相当する加振による記録を得ることができる。

大谷地区に設置された地震計は固有周期14Hzであり、低い周期の感度は下がるものの、AD変換のダイナミックレンジが広いこと、おおむね2.0Hz以上の信号については地動ノイズレベル以上の信号が記録されている。

ラジアル加振とタンジェンシャル加振の伝達関数を距離の順に並べたものが図6である。P波に対応する部分とS波に対応する部分を認識することができ、およそ2km離れた場所でも波形を認識することができる。

これらのデータを用いて、観測点近傍におけるS波の見かけ速度を求め、本観測点で得られた遠地地震のP波の走時遅れと比較したものが図7である。一部の地域を除き、P波の走時が遅れる場所がS波の見かけ速度が小さい傾向がみられる。これは、この地域の地質や、採石後の地下空洞の有無が影響しているものと思われる。

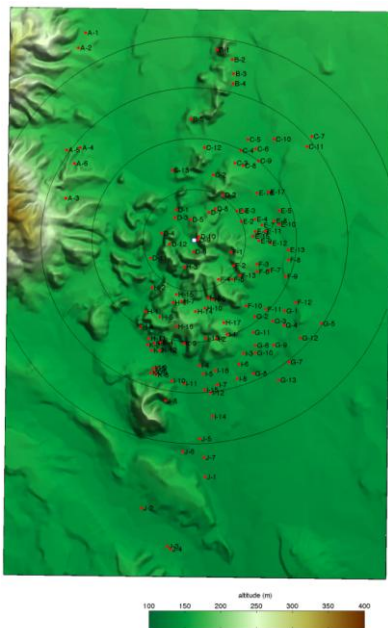


図5. 大谷地域に於ける地震観測点分布。同心円の中心に震源装置を設置。同心円の半径は内側から500m, 1000m, 1500m, 2000m。

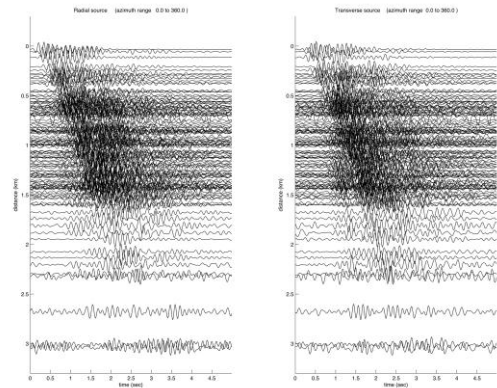


図6. 伝達関数を距離で並べたもの。左がラジアル加振、右がタンジェンシャル加振。

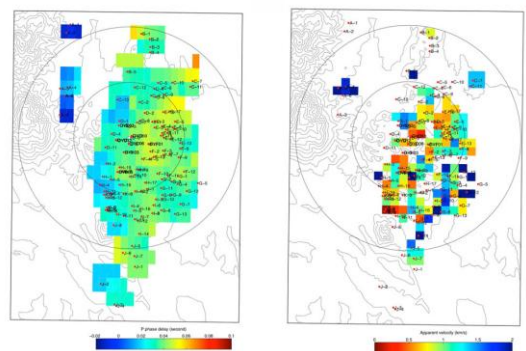


図7. 各地震観測点付近のP波の遅れ(左)とS波見かけ速度の遅れ(右)

(3) 地下構造変化をインバージョンにより得る手法の開発を行った。まず、地形を考慮できる地震波の理論計算手法を用いて、理想的な火山の形を与え、マグマの上昇による波形変化を計算した。火道の位置があらかじめわかっていると仮定し、火道内の密度やP波S波速度が変化した場合、その変化をうまく捉えられるかを、数値計算によって確かめた。Ohminato and Chouet (1997) の計算コードを用いてグリーン関数を求め、構造の変化をインバージョンで求めることにした。火道に沿ってマグマが上昇してくることを想定し、密度変化をインバージョンで捉えられるかを調べた(図8)。その結果、十分なSN比がある場合には密度変化を捉え等得ることが明らかになった。さらに地震波計算コードのGEOWAVEを用い、現実的な減衰構造を考慮して、桜島の地下構造が変化した場合の伝達関数の変化も見積もった。その結果、現実的な構造変化の場合、伝達関数にはパーセントオーダーの変化が認められる可能性が高いことが明らかになった。

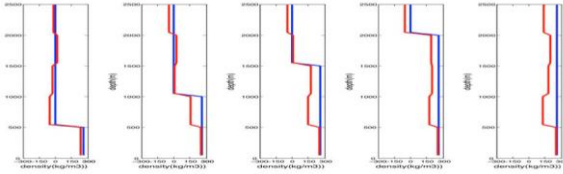


図8 波形計算モデルに与えた火道の密度変化(青)と、それをインバージョンで再計算したもの(赤)

## 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2件)

① 山岡耕春・渡辺俊樹・生田領野 地震波による能動モニタリングのための直線加振機の実験. 物理探査学会第121会学術講演会講演論文集, 2009

② 渡辺俊樹 地殻内構造と物性の解明のための反射法地震探査の技術動向 地震 61, S217-S223, 2009.

[学会発表] (計5件)

① 山岡耕春 低周波成魚震源を用いた地下伝達関数取得実験. 日本地球惑星科学連合2011年大会, 2011年5月28日 千葉市

② 小林由実 野島断層における ACROSS を用いた S 波異方性の時間変化. 日本地震学会2010年秋季大会, 2010年10月28日 広島市

③ 山岡耕春 マグマモニタリングに向けた低周波制御震源の実験 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月17日 千葉市

④ 道下剛史 火山活動における人工地震を用いた能動監視の可能性 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月17日 千葉市

⑤ 山岡耕春 パークフィールドに於ける能動震源実験 「アスペリティのマッピングとモニタリングのシンポジウム」 2008年10月28日 (東京大学地震研究所)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

時間(sec)

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/yamaoka/research/across/across-j.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山岡耕春 (YAMAOKA KOSHUN)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 70183118

(2) 研究分担者

渡辺俊樹 (WATANABE TOSHIKI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号: 50210935

中道治久 (NAKAMICHI HARUHISA)

名古屋大学・大学院環境学研究科・助教

研究者番号: 00420373

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

