

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601
 研究種目：新学術領域研究
 研究期間：2009 年度～2011 年度
 課題番号：21200049
 研究課題名（和文） 高エネルギー素粒子による固体地球内部のイメージング法の開発と火山・地震現象の解明
 研究課題名（英文） Development of an imaging method of the solid earth's interior with high energy elementary particles for understanding volcanological and seismic phenomena
 研究代表者
 田中 宏幸 (TANAKA HIROYUKI)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号：20503858

研究成果の概要（和文）：

物質透過力の卓越した素粒子ミュオンの物質密度による透過度の違いを利用することにより、従来の地震学的手法を用いたイメージング法に比べて非常に高い空間分解能で火山体および断層破碎帯のレントゲン撮影に成功した。低消費電力かつ、分割運搬可能なポータブル宇宙線ミュオン検出器を開発することで、(1) 火山噴火前後での火道中の物質移動を 3 次元的に測定する方法を確立した。(2) 断層破碎帯の密度分布や密度の時系列変化のイメージングを行い、活断層等の調査を行う基礎技術を創出した。

研究成果の概要（英文）：

By utilizing density dependent stopping powers of muons, we succeeded to image a volume of a volcano and a fracture zone of a seismic fault with higher resolution than possible with conventional seismic tomography. By developing a power-effective and assembly-type portable muon detector, the following goals were achieved: (1) a method to measure the mass movement inside a volcano three dimensionally before and after the eruption, and (2) a technology to investigate active faults by measuring a distribution and time-dependent changes in a density contrast of a fracture zone.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
22 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
23 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総計	23,800,000	7,140,000	30,940,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：素粒子、ミュオン、火山、断層

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震波測定、地球電磁気学的測定、重力測定、火山ガス測定など様々な探査手法が開発され、応用されてきたことによる、固体地球内部の物理・化学現象の理解の進展に伴って、火山噴火・地震現象の解明が進み、20 世紀後半から現在に至るまで人類のこれ

らの現象に関する理解は飛躍的に進展してきた。これらの動向を踏まえ、更なる大きな発展を目指して、高エネルギー素粒子のひとつである宇宙線ミュオン（ミュオン粒子）を用いた巨大物体内部のイメージング手法の開発を世界的に主導してきた当研究者グループが、全く新しい目的を持って本課題の提案

を行った。物質透過力の卓越した宇宙線ミュオンの物質密度による透過度の違いを利用した火山や断層のレントゲン写真（ミュオンラジオグラフィ）を撮るため、従来の地震学的手法を用いた地殻のイメージング法に比べて非常に高い空間分解能での観測が可能である。

(2) ミュオンを捕らえる方法は原子核乾板を用いる方法、シンチレーション検出器を用いる方法など確立されている。しかし原子核乾板ではコンパクト、電力消費のないスタンドアロンなシステムが実現できる一方、リアルタイム観測が行えない、解析に時間がかかるなどの欠点がある。シンチレーション検出器を用いる方法ではリアルタイム観測は行えるが、大電力が必要、検出器がコンパクトに出来ないためトレーラーなどの通路の確保が必要、設置するための建屋が必要などの制約があった。一方、一般的な野外環境では商用電源、高規格道路などのインフラが整っていない場合が多い。もし、両方の利点を兼ね備えた検出器ができれば、置き場所を選ばず、リアルタイムに対象をモニタリングできる、画期的な観測システムが実現される。

(3) 本課題は当時、世界的に急速に広まりつつあった素粒子ミュオンを用いた火山体内部の可視化技術における世界的な潮流の中で、研究代表者を中心とするグループが本研究開始直前に到達した、太陽光発電などにより駆動可能な超低消費電力ミュオンイメージングシステムを実現させることによるリアルタイム火山体・活断層3次元イメージングのアイデアによっている。

2. 研究の目的

実験手法開発と火山体および断層破碎帯を対象とした応用研究について、次のような具体的目標を持って、研究課題を進めた。

(1) 実験手法開発

① 超低消費光センサーとフィールドプログラマブルゲートアレイの組み合わせによる宇宙線ミュオン検出器を完成させる。

② ネットワークをダイレクトにコントロールすることにより、リアルタイムにオンラインでミュオンヒットパターンを遠隔地でモニタリング出来るようにする。

(2) 火山体イメージング

噴火活動を行っている火道内部では物質が移動している可能性があり、このような条件下で3次元的にこの空間分解能で火道中の密度変化を捉えられる技術を創出する。

(3) 断層破碎帯イメージング

ミュオン透過力が、わずかな密度の違いで大きく変化することがわかっている。この手法を使って、断層破碎帯を対象として地層中の低密度領域を時系列的にイメージングする。

3. 研究の方法

(1) 実験手法開発

以下の方法により、ミュオン検出器を先端化することで、商用電源などのインフラが整っていない火山体周囲でも観測を行える基礎技術を創出する。

① 高効率昇圧装置と光電子増倍管を効果的に組み合わせることで、ミュオン検出器のうち、光センサー部の電力消費量をドラスティックに下げる。また、直流数ボルトの電源で光センサーを駆動可能とすることで、従来必要であった高電圧印加装置を検出装置から取り除く。

② 光センサー部から出力される信号をフィールドプログラマブルゲートアレイにより処理し、ミュオンのヒットパターンを生成する。この手法により、ミュオン検出器のうち、データ取得部の省電力化を実現する。

③ ミュオンヒットパターン生成装置をウェブサーバーとして利用することにより、リアルタイムかつ、オンラインで遠隔地からモニタリング出来るようにする。

(2) 3次元火山イメージング

① (1) で先端化したミュオン検出器を山体の複数個所に配置することにより、複数方向からの火山体のミュオンラジオグラフィ観測を行う。

② 複数方向からの火山体のミュオンラジオグラフィイメージを組み合わせて3次元密度構造を再構築するアルゴリズムを開発する。

(3) 断層破碎帯イメージング

① (1) で先端化した検出器を地表に自然露出した断層破碎帯あるいは、トレンチ調査などで明らかになっている断層に適用することで断層破碎帯のラジオグラフィを行う。

② ①で得られたデータを元に破碎体の近傍に掘られたボアホールから地下の断層破碎帯の構造をイメージングする技術を創出する。

4. 研究成果

(1) 実験手法開発

① 従来の光センサーの消費電力に比べて新

型光センサーの消費電力は一桁下がった。

②従来 2000 ボルトの高電圧印加装置が必要であったが、新型光センサーの開発で 5 ボルト入力と同様の測定ができるようになり、装置が簡素化した。

③フィールドプログラマブルゲートアレイによる、ミュオンのヒットパターン生成装置により従来の粒子検出装置と比べて二桁消費電力が低下した。

④ワイヤレスLANの活用により、ミュオンのヒットパターン生成装置にリモートからアクセスできるようになった。

(2) 3次元火山イメージング

① 浅間山の北側と東側斜面にミュオン検出器を設置して、(1)の研究成果をもとに、2方向ミュオンラジオグラフィ観測を行った。このうち北側観測点については100%ソーラーパネルで駆動され、冬季の積雪時を除いては長期に安定的に稼動した。

② 重みつき最小二乗法を利用することで、浅間山山頂部の3次元密度構造の再構築に成功した。多点トモグラフィと比べて本観測では情報量が少ないので、山体の外形を既知の情報として与え、山体ボリュームをいくつかのボクセル(単位立方体)に分割して3次元的に密度を決定することに成功した(図1)。火口下の低密度領域(マグマの通り道と考えられる)が火口中心からやや北側によっていることがわかった。2004年の噴火、2009年の噴火など最近の噴火のほとんどが噴石などを北側に向けて飛ばしている。一般的に回転対象ではない火山の3次元構造を複数方向からの測定により視覚化することができれば、火山噴火予知のうち、「どこで起きるのか」についてより明確な答えにつながられるだろう。

(3) 断層破碎帯イメージング

① 糸魚川静岡構造線(糸静線)は新潟県糸魚川市から諏訪湖を通過して静岡県静岡市に伸びる大断層線であるが、そのうち断層露頭を直接確認することが可能なフォッサマグナパーク内の断層露頭を対象に(1)の研究成果をもとに、ミュオン観測を行った。この断層露頭は地層の空隙率分布を調べるためのミュオン観測には適している。それは、断層がほぼ垂直に立っており、丘の南斜面に位置しているため、水平方向より仰角の高いミュオンを利用することが可能であるからである。

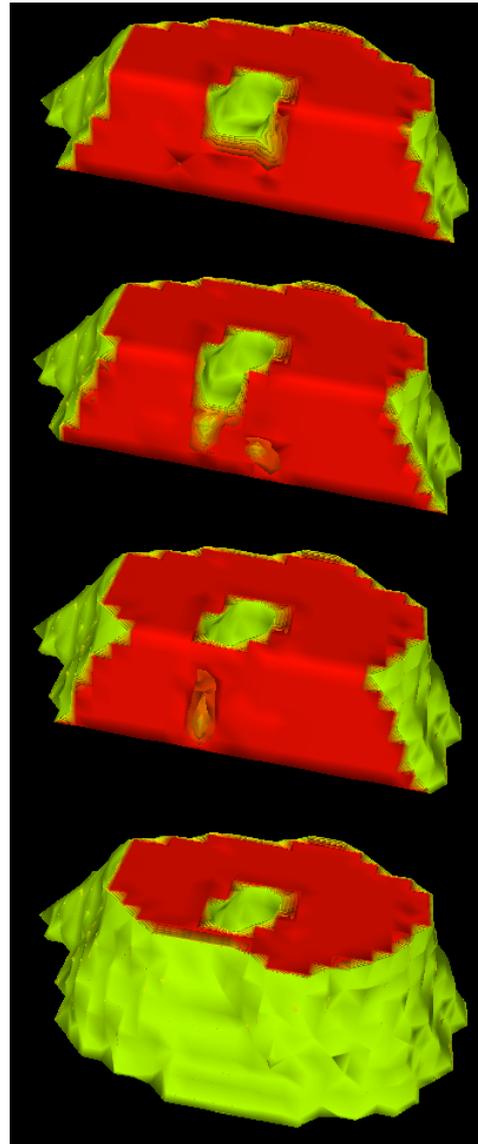


図1. 浅間山の山頂付近の3次元トモグラフィ像。下降中新を通る鉛直平面で浅間山の山頂付近をスライスしたものの。上から下へ向けてカットする面を北へずらしている。

当断層において破碎帯の空隙率分布と透水状況をイメージングするために、降水量とミュオン透過強度の日変化を調べた。破碎された岩石の空隙に雨水がトラップされて密度が上昇するはずである。図2が降水のイベントからの時間を関数に相対的な密度変化をマッピングしたものである。降水イベントの後には岩石の空隙にトラップされた雨水が徐々に抜けていき、平均密度が低下することによってミュオン強度が再び上昇する。さらに一般的なトレンドとして、ミュオン透過領域が深くなるにつれて、降水イベントとミュオンイベントの増減との相関に遅れが生じている。この遅れから透水速度を見積もることが出来る。値はそれぞれ表面から 5m

and 30 m の間では~300 mm/h, 30 m と 50 m の間では~200 mm/h であった。

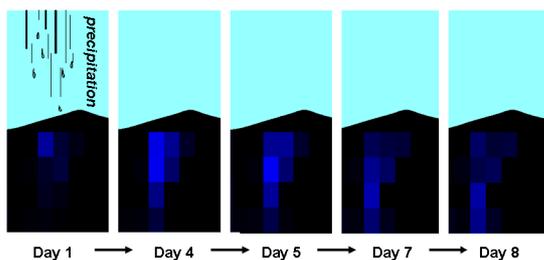


図 2. ミュオン透過強度の変化から導かれた密度の相対変化量の日変化をプロットしたもの。

本観測において、剪断集中帯の周囲数メートルにおいて高い空隙率（低い密度）が観測された。クラックの分布や破碎の形状にもつながる情報として期待されている。空隙がクエンチされるメカニズムや断層回復過程を理解するうえで、これまでにない、新しい情報が得られたといえる。

② ①で得られた経験を元にボアホールから地下の断層破碎帯の構造をイメージングする技術を創出するにあたり、どのようなミュオン検出器が適切であるかをモンテカルロシミュレーションを用いて検討した。その結果、ミュオンエネルギースペクトルの仰角分布と地層の厚みによるミュオン減衰効果を組み合わせた方法がより多くのミュオンを簡素な測定装置で集めることが可能であることがわかった。このシミュレーション結果および(1)の開発結果を元に、ボアホール挿入型ミュオン検出器を製作して、実際のボアホールを用いて挿入実験を行った。深さ10mまでのミュオン測定実験では、深さに伴うミュオンカウント数の減少を確認することができた。また、ミュオンカウント数の減少率と地表からの深さの関係から周囲の密度を求めた。その結果、ほぼ期待される値 1.6g/cm^3 が得られた。

この結果を元により深い場所でのミュオン測定を試みた。10m以深では水が存在しているため、耐水加工を施したミュオン測定装置を深さ40mに挿入した。しかし、水が浸入したため、測定は成功しなかった。今後、ミュオン検出器用耐圧ケースの開発が課題である。

本テスト実験ではボアホール内におけるミュオン測定により、周囲の地層の密度が制度よく求められることを確認したことで、地下

の断層破碎帯の構造をイメージングする技術の妥当性を確認することができた。

(4) これまでミュオンを用いたイメージング技術開発において、世界をリードする先端的な研究を推進してきた当グループと日本の技術とは独立に発展してきた斬新な検出技術のノウハウを持つ欧米の研究機関との連携を深めることと、火山の3次元トモグラフィ、断層破碎帯のイメージングの成功を受けて、これらの現象について新たな理解への道を開き開くことを目的として、2011年東京で国際シンポジウムを主宰した。日本、米国、ドイツ、イギリス、スイス、フランス、イタリア、ニュージーランド、カナダ、スペインから30以上のトークの申し込みがあり、活発な議論がなされ、成功を収めた。本会議の成功を受け、今後、国際シンポジウムの定期開催を行うことを決定した。2012年の大会はフランス・クレルモンフェラン市で行われ、成功を収めた。

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 Hiroyuki K.M. Tanaka, Hiroshi Miyajima, Taro Kusagaya, Akimichi Taketa, Tomohisa Uchida, Manobu Tanaka, Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan, Earth Planet. Sci. Lett., 査読あり, 306, 2011, 156-162.
- ② Hiroyuki K. M. Tanaka, Hideaki Taira, Tomihisa Uchida, Manobu Tanaka, Minoru Takeo, Takao Ohminato, Yosuke Aoki, Ryuichi Nishiyama, Daigo Shoji, and Hiroshi Tsuji, Three-dimensional computational axial tomography scan of a volcano with cosmic ray muon radiograph, J. Geophys. Res., 査読あり, 115, B12332

[学会発表] (計 4件)

- ① Hiroyuki K.M. Tanaka, Hiroshi Miyajima, Taro Kusagaya, Akimichi Taketa*, Tomohisa Uchida, Manobu Tanaka, Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: the measurement of density variation by rainfall using cosmic ray, International Workshop on High Energy Geophysics 2011 Muon and Neutrino Radiography, Tokyo, Japan, October 27-28, 2011
- ② Tomohisa Uchida, Taro Kusagaya, Hiroyuki K. M. Tanaka, and Manobu

Tanaka, Application of a readout module to a real-time monitoring system, International Workshop on High Energy Geophysics 2011 Muon and Neutrino Radiography, Tokyo, Japan, October 27-28, 2011

- ③ Hiroyuki K.M. Tanaka, Cosmic-ray muon radiography of a volcano, Incorporating the Geoscience Society of New Zealand Conference and the New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, New Zealand, 21-24th November
- ④ Hiroyuki K.M. Tanaka, Muon radiography of seismic faults in ISTL, Japan, International Workshop on Muon Radiography of Volcanoes, Naples, Italy, 11-12 October, 2010

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：巨大物体の内部構造解析装置

発明者：内田智久, 田中宏幸, 田中真伸

権利者：内田智久, 田中宏幸, 田中真伸, 国立大学法人東京大学、大学共同利用法人高エネルギー加速器研究機構

種類：特許

番号：特願 2009-243564

出願年月日：2009 年 10 月 22 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/GA09/index.html>

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/WS11/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 宏幸 (Tanaka Hiroyuki)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：20503858

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：