

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：11101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656555

研究課題名（和文） 直進ミュオン利用高精度地下断裂イメージング技術開発萌芽研究

研究課題名（英文） Exploratory research of technology development on high-resolution subsurface fracture imaging by the straight-forward muon

研究代表者

村岡 洋文（MURAOKA HIROFUMI）

弘前大学・北日本新エネルギー研究所・所長・教授

研究者番号：20358146

研究成果の概要（和文）：ミュオグラフィーは最近、田中ほかがマグマのイメージングに成功したことから、わが国発という点に加えて、地下探査分野に全く新しい手法を提供する可能性を秘めている。しかし、それが地下探査分野に広く普及するためには、マグマだけでなく、密度差の点でも、サイズの点でも、もう一段の困難を伴う断裂系を対象とする必要があり、本研究は地熱分野において、この可能性を検討することを狙った。ところが、本研究を進める過程で、同じ発想の研究はすでに、田中ほか自身が進めており、断裂中の水の移動という質量移動を利用して、実用化に肉薄していることが判明した。そのため、本研究では青森県の八甲田山地域や沖浦地域において、仰角観測という制約をもつ、ミュオグラフィーのモデルフィールド発掘の検討を進めるとともに、田中ほかが構想中の多様な地下資源分野を意識した新しいミュオグラフィーに関して、地熱分野における坑井利用のミュオグラフィーの可能性を研究するとともに、組織的な共同研究体制づくりを実現した（村岡ほか，2012；Tanaka and Muraoka, 2012）。

研究成果の概要（英文）：As Tanaka and his group recently succeeded to image subsurface magma chambers by Muography, this method was initiated in Japan and has a potential to bring us a new exploration tool in the subsurface exploration field. However, to spread this method into the subsurface exploration field, it is necessary to image not only magma chambers but also fractures which are one step harder in terms of their smaller density contrast as well as their smaller sizes. This study is then to aims at fracture imaging. However, we realized that Tanaka and his group are also promoting the same idea on the way of our study, and they are almost successful to trace a mass transfer of meteoric water along an active fault. This method seems already an applicable exploration method. Therefore, we have slightly changed our study objectives to seek optimum fault observation localities in the Hakkoda and Okiura volcanic fields in Aomori Prefecture. We have studied a possibility of the intra-borehole Muography in the geothermal exploration. We have also initiated to organize the collaboration study on Muography under the Tanaka and his group's umbrella (Muraoka et al., 2012; Tanaka and Muraoka, 2012).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：再生可能資源・エネルギー

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

### 1. 研究開始当初の背景

通常的地熱発電開発では地熱探査法によって地下の断裂を推定し、これを狙って深度 2km 前後の掘削を行う。この掘削は 1 坑井につき数億円を要し、開発初期コストの大部分を占める。しかし、直進しない地電流や弾性波を使ったこれまでの地熱探査法には精度的な限界があり、新規地点での掘削失敗確率は 50% に近く、大きな初期コスト要因となっている。宇宙線ミュオンは直進し、電子密度（≒岩石密度）によって減衰するという地下探査上の圧倒的な利点を持つが、岩石への貫通深度が 1km 程度に過ぎず、仰角観測が必須という短所を併せ持つ。本研究では直進するミュオンを利用した高い位置精度の断裂イメージング技術の確立を目的に、坑井内シンチレータ等観測機器や断裂検出坑井観測アレイの概念設計・一部試作を行い、次期の本格開発を目指す。

### 2. 研究の目的

地熱発電開発の初期段階では一般に比抵抗探査法や弾性波探査法等の地熱探査法によって、地下をイメージングし、推定された地下の断裂を狙って深度 2km 前後の掘削を行う。この掘削は 1 坑井当たり数億円を要し、開発初期コストの大部分を占める。そのため、この初期投資リスクを軽減する目的で、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が地熱開発促進調査という企業先導調査を行い、ごく初期段階の地熱掘削調査を国の予算で行って来た。しかし、この場合でも、直進しない地電流を使った比抵抗探査法や直進しない弾性波を使った弾性波探査法等、これまでの地熱探査法には精度的な限界があり、大きな初期コスト要因となっている。とくに、ここ 10 年程度行われた C-2 調査という地熱開発促進調査では、ほとんどが新規地点の掘削であったために、掘削が狙った地下断裂に当たらないケース、つまり、掘削の失敗確率が 50% に近い状況にあった。たとえば、失敗のケースではないが、長野県小谷村地域の C-2 調査では糸井川-静岡構造線で掘削が行われ、その境界ではジュラ系堆積岩と蛇紋岩とが構造的に接触している。この両者は比抵抗特性の差が大きいため、比抵抗探査法は断面図上に見事に対照的な比抵抗分布を描き出していた。しかし、その境界の位置精度、とくに深度の位置精度が不正確であったために、これを狙った掘削はその坑跡を何度も修正する必要に迫られ、何度もサイドトラック（少し浅い深度に戻ってから新たな坑跡で掘削し直す方法）を行う結果となっ

た。このように、比抵抗探査法や弾性波探査法は常套的な地下資源探査法として十分に定着しているものの、現在のところ、必ずしも完璧な地下断裂イメージング技術の域には達していない。そして、もし、完璧な地下断裂イメージング技術が確立されれば、それは地熱探査分野のみならず、全ての地下資源探査分野に大きな波及効果をもたらすことになる。

本研究では長期的ながら、宇宙線ミュオンを利用して、このような高精度の断裂イメージング技術の確立を目指す。ミュオンとは、初生的な宇宙線が大気と衝突して発生する二次的な宇宙線であり、絶えず地上に降り注いでいる。宇宙線ミュオンの最大の特徴は直進し、電子密度（≒岩石密度）によって減衰する点にある。この特徴は地下断裂の位置決定において、圧倒的な利点となる。東大地震研の田中宏幸らはミュオンによって火山体をイメージングし、マグマの透視に成功し、話題を集めた（図 1）。しかし、他方でミュオンは、岩石への貫通深度が 1km 程度に過ぎず、仰角観測が必須という短所を持つ。つまり、もしこれを地下断裂に適用する場合には、坑井観測を利用し、仰角範囲を広げる努力が必要となる。また、断裂はマグマに比べて xy（面）方向の広がりを持つが z（厚さ）方向に薄いため、高い分解能を必要とする。ミュオンによる断裂のイメージングはまだ成功しておらず、坑井内シンチレータの開発を始め、いくつかの工夫を必要とする。

しかし、このミュオンを使った地下探査手法は日本発の手法であり、製造業でアジアに猛追されている我が国が、複雑系の地下開発において、一挙に先頭に躍り出る千載一遇の好機である。本研究はこれまでとは全く異なる直進ミュオン断裂探査法開発を目指す野心的な研究である。

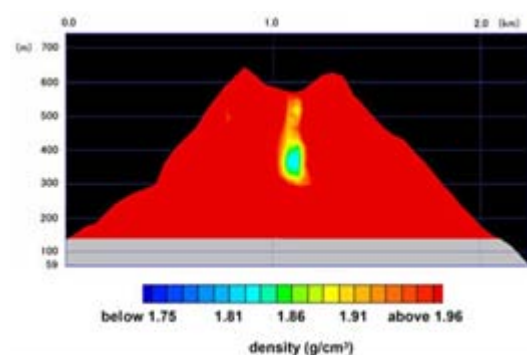


図 1 薩摩硫黄島の岩石密度イメージング結果（田中宏幸らが、2009 年 7 月 4 日毎日新聞 Web 上に公開）

### 3. 研究の方法

本研究では、①最適実験フィールド選定、②精密地形調査、③精密地質調査、④坑井観測アレイ設計、を実行する。現時点では、最適実験フィールドとして、破碎帯の厚さが明瞭な青森県黒石市の沖浦環状正断層系の虹の湖断層を想定している。断層の3次元的な形状が決まると、ミュオンの直進性のため、断層の検出能力は、ほとんど幾何学的に推定可能となり、最適坑井観測アレイの設計を行う。次いで、⑤坑井観測アレイ浅部大口径坑井群掘削、⑥坑井内センサー開発、⑦観測、⑧データ解析、⑨断裂貫通実証掘削、といった次期研究計画を立案作成する。ただし、⑥については予算の許す限り、本研究の中でも、一部の製作を試みるものとする。言うまでもなく、ミュオン断裂探査法は本研究のみでは完結しない。本研究の中で、具体的開発計画を立て、高額予算を獲得して、⑤～⑨が実行できたとき、初めて、ミュオン断裂探査法の開発が完結する。

次期研究計画を含め、研究計画全体を構想すれば、次の9つのステップから成る(図2)。すなわち、①最適実験フィールド選定、②精密地形調査、③精密地質調査、④坑井観測アレイ設計、⑤坑井観測アレイ浅部大口径坑井群掘削、⑥坑井内センサー開発、⑦観測、⑧データ解析、⑨断裂貫通実証掘削、の9ステップである。本研究計画では予算の適性規模を考慮して、このうち①～④を実行し、⑤～⑨については、次期研究計画のための研究計画を立案作成するものとする(図2)。ただし、⑥については、本研究の中でも、一部の製作を試みるものとする。

①～④の実行は、①に依存しており、最適実験フィールドの選定がきわめて重要である。最適実験フィールドの条件は地熱資源の賦存に関係した断裂の存在が明瞭であり、しかも、その断裂が浅い坑の坑底から仰角観測可能な地形的位置にある必要がある。そのようなフィールドは実際に断層を調査した経験のある者でなければ選定できない。図3は申請者が調査した黒石図幅地域の地質図である(村岡・長谷, 1990)。東半分には沖浦カルデラが分布し、その陥没を担った断層系は申請者が沖浦環状正断層系と命名したものである(図3)。これらの環状正断層系はいずれも地熱資源の賦存を規制しているが、内側のもほど、熱源に近く高温の傾向があり、しかも、その地表トレースの標高が高い傾向がある。白い矢印で示した位置には虹の湖断層の露頭が見られ、剪断帯の厚さが8mもあり、典型的な破碎帯の厚さが1.5mもある(村岡・長谷, 1990)。したがって、理想的な最適実験フィールド候補の一つと考えている。岩石密度を正確に推定するためには、正確な

ミュオンの貫通距離、つまり、地形データが必要である。そこで、②本研究では新たな航測測量までは行えないにしても、既存の空中写真から、縮尺5,000分の1程度の精密地形図を作成する。

沖浦環状正断層系については5万分の1の縮尺ではすでに調査済みである(村岡・長谷, 1990)。しかし、ここでは、精密地形調査に併せて、③縮尺5000分の1程度の精密地形図をベースに、精密な断層地質調査を行う。

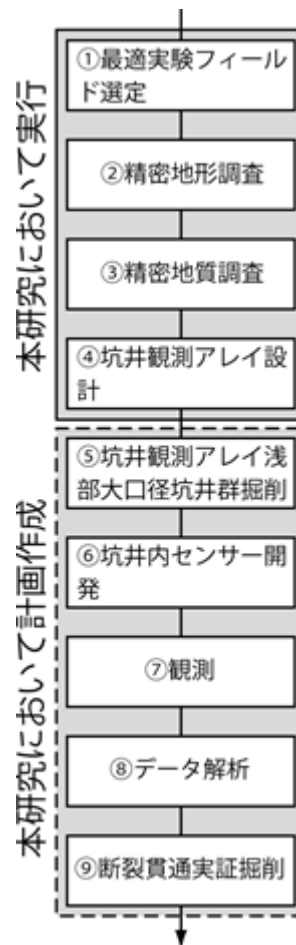


図2 本研究の流れ

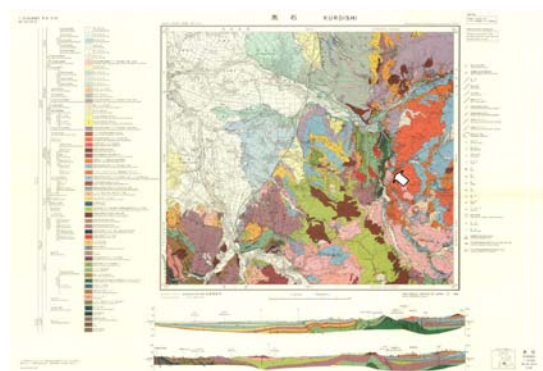


図3 黒石地域の地質(村岡・長谷, 1990)

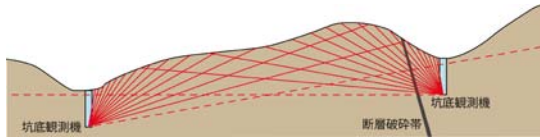


図4 坑底から断層を仰角観測するときの幾何学

#### 4. 研究成果

ミュオグラフィーは最近、田中ほかがマグマのイメージングに成功したことから、わが国発という点に加えて、地下探査分野に全く新しい手法を提供する可能性を秘めている。しかし、それが地下探査分野に広く普及するためには、マグマだけでなく、密度差の点でも、サイズの点でも、もう一段の困難を伴う断裂系を対象とする必要があり、本研究は地熱分野において、この可能性を検討することを狙った。ところが、本研究を進める過程で、同じ発想の研究はすでに、田中ほか自身が進めており、断裂中の水の移動という質量移動を利用して、実用化に肉薄していることが判明した。そのため、本研究では青森県の八甲田山地域や沖浦地域において、仰角観測という制約をもつ、ミュオグラフィーのモデルフィールド発掘の検討を進めるとともに、田中ほかが構想中の多様な地下資源分野を意識した新しいミュオグラフィーに関して、地熱分野における坑井利用のミュオグラフィーの可能性を研究するとともに、組織的な共同研究体制づくりを実現することができた(村岡ほか, 2012; Tanaka and Muraoka, 2012)。

#### 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1件)

Tanaka, H.K.M. and Muraoka, H. (2013) Interpreting muon radiographic data in a fault zone: possible application to geothermal reservoir detection and monitoring. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, **2**, 145-150, doi:10.5194/gi-2-145-2013.

[学会発表] (計1件)

村岡洋文・井岡聖一郎・田中宏幸 (2012) 宇宙線ミュオンによる断裂地熱貯留層の動的モニタリング手法の可能性. 日本地熱学会平成24年学術講演会講演要旨集, p.B31.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

村岡 洋文 (MURAOKA HIROFUMI)  
弘前大学・北日本新エネルギー研究所・所長・教授  
研究者番号：20358146

##### (2) 研究分担者

南條 宏肇 (NANJO HIROTADA)  
弘前大学・学長特別補佐・名誉教授  
研究者番号：00106840