

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02953

研究課題名（和文）固体天体地下探査用ミュオグラフィを搭載した移動ロボットの開発と実証的研究

研究課題名（英文）Development of a small muography instrument to map subsurface structures for a mobile planetary-exploration robot

研究代表者

宮本 英昭（Miyamoto, Hideaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：00312992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：数値計算とデータ解析により火星表面は水平方向に飛来するミュオンが地球上より多く存在し、ミュオグラフィが適用しやすいことを確かめた。ピングオ状地形の内部氷コアをモデル観測シナリオとして、30日程度で観測可能となる超小型ミュオグラフィ装置を設計し、この原理実証モデルを開発した。地上の3地点で5週間に渡り実証試験を実施し、開発した装置が十分な精度で密度構造を計測可能なことを確かめた。3年と短い研究期間であったが、世界発の宇宙版ミュオグラフィ装置の原理実証機の作成と運用、さらに火星で運用するための移動手段の開発・運用に成功し、予定以上の大きな成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミュオグラフィは日本が世界に先駆けて開発した巨大物体の透視技術である。この宇宙利用ができれば、次世代の世界各国の太陽系探査で切り札的な探査装置となる。本研究は世界初となる宇宙用小型ミュオグラフィ装置の原理実証モデルを、小型ロボットへの搭載性の観点も含めて開発に成功した点に大きな意義がある。この成果は日本発の原理を利用した世界に先駆けた天体浅部密度推定装置の開発につながり、ここで生まれた可搬性能は、惑星地質学的に重要な地球上の野外調査にも利用可能である。

研究成果の概要（英文）：By comparing numerical results and in-situ observational data, we find Mars surface environment is favorable for muography measurements due to higher horizontal fluxes of Muon. We define an identification of internal ice-core of pingo-like features on Mars as a model scenario; we determined the best design of the muon detectors for enabling an accurate-enough observation within one month. Based on the design, we developed a bread-board model of Muography instrument, which is applied to the field test at three different locations for more than five weeks. The field test shows that the instrument achieved sufficient resolution in determining the density structure of a pingo-type geological feature.

研究分野：太陽系探査学

キーワード：火星 ミュオグラフィ 地下探査 ミュオン ローバ ロボット 惑星探査 宇宙ミッション

1. 研究開始当初の背景

近年急速に進む太陽系探査により、60個以上の太陽系天体で「その場」観測が行われた。人類にとっての太陽系探査は未知の天体を調査するというフェーズはほぼ過ぎ去り、過去の探査成果を踏まえた本格探査を行う時代を迎えた。6機もの探査機が現在同時に火星観測を行っている事実もこれを示唆する(宮本, 小松, 2016)。

過去の探査で膨大な量の探査データが取得されたとはいえ、データ量の意味では大きな割合を占めているのは可視画像と反射光学的データである(e.g., McEwen et al., 2010)。固体天体は一般に衝突破砕物や外来物質で覆われており、光学的情報というごく表面部分(せいぜい深さ数百 μm)の情報だけを解析しても、必ずしも真の天体像に迫れない(土星の衛星のアトラスや小惑星ルーシアなどに至っては、内部物質と完全に異なった物質で表面が覆われている(Hirata and Miyamoto, 2014; Lazzarin, M. et al., 2004))。そのため今後の太陽系探査においては、天体表面に対する解像度の向上ではなく、内部の状態を正確に読み解くことが戦略的に重要となる。既に入手された膨大な表面データを有効活用するには、天体の起源や進化の鍵を握る基盤岩の露出や表層部との関連を知ることが必要であり、地下浅部の構造探査が高い重要性を持つことになる。

私たちは MELOS 火星探査計画の着陸探査に深くかかわり、火星衛星サンプルリターン計画(MMX 計画)の概念検討を担当しつつ、その関係者らと地球で実績のある全ての地下探査手法を惑星探査の観点から精査してきた。その結果、火星や小天体を対象とした内部探査装置として、浅部を対象とする場合はミュオグラフィが極めて有効であるとの考えに至った。なお地球探査と同様に、地震法による探査は深部も対象にでき内部探査において重要である点は間違いな。しかし将来的には、比較的探査装置が小型で済みそうなミュオグラフィと相補的に利用すると、効率的な探査ができると考えている。

ミュオグラフィは、高エネルギー粒子ミュオンが高い物質透過性を持つことを利用した投影法であり(図1)、数百~数 km 規模の地形の面密度構造を直接測定できる。地球外でこの技術が用いられたことは無いが、予備的なシミュレーション計算によると、大気のある固体天体(金星や火星、タイタン)や、そのごく近傍の天体(例えばフォボス)で特に効果的に適用できる。そのため探査機搭載用に小型軽量化ができれば、今後の火星、金星、タイタン等の探査において、先駆的かつ実効的な重要な位置づけとなり、日本発の原理に基づくオリジナリティの高い、しかも科学的価値が極めて高い探査装置として、将来の各国の地下構造探査において、決定的な位置を占めることができると期待される。

2. 研究の目的

上述した通り、太陽系固体天体探査において今後最も重要となる調査対象は、浅部地下であろう。地下構造の理解には密度構造の把握が決定的だが、これを最も直接的に計測する手法はミュオグラフィ(素粒子ミュオンを用いた巨大物体の透視イメージング技術、図1)である。しかしミュオグラフィ観測はこれまで地球上の火山等で実施されているが、地球外への応用例は無い。

探査機に搭載するためには検出器の大きさ、重さが課題となる。特に現在用いられているミュオグラフィ装置の多くは重量が数百キロ程度のもので多いには、地球上の観測では、検出器重量に原理的な制限はないからである。しかし惑星探査においては検出装置の重量は重要な制約条件となってしまう。また消費電力も探査機搭載可能な機器とは比較にならないほど大きい。

ところがこれらの課題を解決するには、ミュオグラフィ装置を単純に超小型化すれば良いというものでもない。ミュオンの検出面が大幅に減少すると、検出効率が大きく下がるため、観測時間の大幅な延長を意味することになるからだ。また地球以外の天体におけるミュオン生成環境については、良くわかってない。たとえば火星環境では、水平方向から飛来するミュオンを利用することで、ミュオグラフィを行うのに十分なフラックスが得られると考えられているが、この仮説には検証が必要であった。さらに大気の薄い火星表面には一次宇宙線が直接到達し、そのフラックスはミュオンのそれをはるかに上回る可能性もあり、こうしたノイズを除去するような仕組みも必要である。

地上で運用されている既存のミュオン検出器であっても、実は多くは宇宙実績のある部品で構成されているため、宇宙用に開発できれば次世代の世界各国の太陽系探査で切り札的な探査装置となる。

そこで本研究は、火星環境を検討しミュオグラフィ装置として成立しうる環境にあるか、小型化をどこまで進めて良いか検討し、その後ミュオグラフィ装置を小型ロボットへの搭載性の観点から最適化し、地球上で実証的に有用性を示し測器要求を明確化することを目的とした。これは日本発の原理を利用した世界に先駆けた天体浅部密度推定装置の開発につながり、そこで生まれた可搬性能は、惑星地質学的に重要な地球上の野外調査での利用にも期待される。

3. 研究方法

ミュオグラフィは地球の火山観測などにおいて既に観測原理は確立され(Tanaka et al., 2012)、観測時間の改善やリアルタイム性を付加する研究が、現在精力的に進められている。一方で太陽系探査においては、むしろ観測装置自体の小リソース化(小型・軽量・低消費電力化)が本質的に重要となる。ただしむやみに小さくすると、対象天体上で意味のある観測が行えなくなってしまうかもしれない。

そこで本研究は既存の探査機による火星環境観測結果と数値計算などを組み合わせることで、火星上におけるミュオグラフィ観測の成立性を検討する。さらに観測の成立性(ロバスト性、設置観測の容易さ)という要素を含め最適設計解を求める。これと探査機(現実的には観測ローバ、小型ロボット)への搭載性という観点も含め、最適化した観測機器を完成させる。その装置を用いて地球上の異なる場所で長時間のミュオン観測運用を実施し、実際の検出性能を確かめることとした。

4. 研究成果

4.1 火星環境の検討

火星表面における放射線環境については、これまで観測例がなかったために、あまり理解されてこなかった。しかし Mars Science Laboratory (キュリオシティ) ローバに Radiation Assessment Detector (RAD) が搭載され、はじめて火星表面におけるプロトンや中性子線、 γ 線も含めた高エネルギー粒子の実測が行われた。本研究では、公表された Hassler et al (2012) による観測結果と GEANT4 による数値シミュレーション結果を比較し、火星上におけるミュオグラフィ観測のフィジビリティについて検討を行った。その結果、火星における特に水平方向のミュオンフラックスが十分に大きく、火星におけるミュオン環境は極めてミュオグラフィ装置にとっては良好と言えることが確かめられた。このことは小さな検出器であってもミュオグラフィ観測を実施するのに十分であることを意味する。一方で、一次宇宙放射線はミュオンフラックスを大きく上回ることもわかった(表1)。これはミュオグラフィ装置としてはノイズ源となるため、これを取り除く機構が必要となることを意味する。

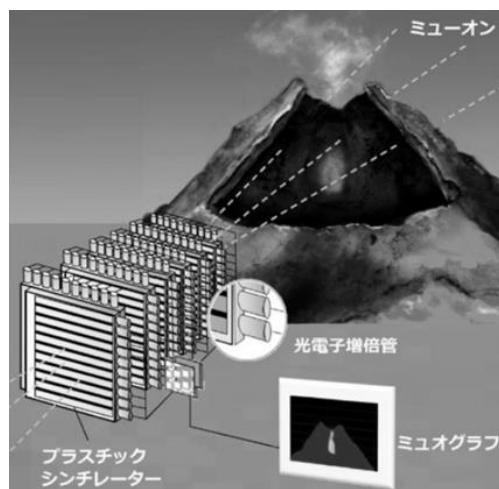


図1: ミュオグラフィの原理. 天然に生じている透過性の高いミュオンを受動的に受信し透視像を描く。

Particle	Proton	Helium	Pion	Muon	Electron Positon
Flux ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)	908.3	34.6	4.2	33.0	17.0

表1: シミュレーション値 (Matthiä and Berger, 2017) をもとに、火星の放射線フラックスを計算した結果. ミュオンは地球上の $\sim 25 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ より多い点は都合が良いが、プロトンなどの一次宇宙線が多量に存在する。

ただし本研究で検討している探査ローバ搭載のミュオグラフィ装置では、観測予定地点までローバで移動することを想定しており、観測対象物自身によって、プロトン程度のエネルギーの粒子はさえぎられることが考えられる。そこで本研究では、ローバ移動によって水平対象方向のプロトンは対象構造物自体で遮蔽できる場所で観測を行うことで、この問題を回避することとした（このフィジビリティについては、以下に示すように移動ロボットについて検討を行った）。観測装置側としては、上方からのプロトンは multiplicity cut (Tanaka et al., 2001) を用いることで、誤検出を排除するという形で検出器を検討することとした。

4.2 火星の対象物と検出効率の検討

火星の表面は広く岩石の破砕物であるレゴリスに覆われており、極論すれば全てのキロメートルスケール以上の凹凸はミュオグラフィによる地下構造探査の探査対象となる。小規模な火山体やガリー構造を含む斜面、リカリングスロープリニアの見られるクレーター壁面などは極めて興味深い対象である。そのひとつの例としては、氷河性もレーンがある。本研究は、火星のターシス地域にある3つの巨大火山（アシア山、バヴォニス山、アスクレイアス山）の北側斜面あるいは西側斜面にある、扇状堆積地形（FSD）に着目した解析を行った。FSDは、1) 互いに平行に延びる細長い多数の峰（リッジ）のある地域（以下「リッジ域」と呼ぶ）や、2) 多数の小高い丘に覆われた地域、3) 流動を示唆する凹凸の少ない地域に分類できる。FSDは約30億年前～現在（アマゾニア代）の中の自転軸傾斜角が大きい時期に、極域の氷が張りだして赤道域のターシス地域に厚さ2kmを超える氷堆積物として存在した際に、これが何らかの流動を伴ったことで生じたと考えられてきた。これまでに氷流動モデルとクレーター年代学的調査により、リッジは氷河後退期に岩屑物が氷河表面から末端部に運搬・堆積して形成したモレーンで、氷河後退期の約1億年の間に形成されたと考えられている。本研究ではこの仮説を、高解像度の熱力学的氷床モデルを用いて検証した (Parsons, RA, et al., 2020)。こうしたモレーンの存在は、火星の気候変動がこれまでに知られているよりも活発に、しかも今も生じていることを示唆し、氷が内部に存在している可能性のある地形の検出がやはり科学的に重要性を増すこと意味する。そこでここではさらに、ミュオグラフィによって内部に氷が残存している可能性も指摘されているピンゴ状の凸地形（図2）を効果的に探査できるかどうか、検討を行った。こうした地形については、特にアシダリア平原南部について形状を詳しく調べ、その典型的な大きさや考えられる構造などについても議論をおこなった (Hemmi, R. and H. Miyamoto, 2018, 2017)。

火星で典型的に見つかるピンゴ状の地形は、数十メートルから数百メートルの直径を持つ小さい丘である。ここで直径およそ50mのピンゴに、直径35mの内部氷コアが存在すると仮定して、この検出が可能であるミュオグラフィ装置の設計について検討を行った。観測にかかる時間として、およそ1か月程度として図2のような密度構造を仮定する。その結果、2x2mmのシンチレータを64個並べた程度の小型ミュオグラフィ装置であっても、密度を15%の精度で観測可能であることがわかった。このことから、以下の機器開発では、このサイズのミュオグラフィとして最適な組み合わせのシンチレータ、読み出し装置を含めた構成で設計することとした。

4.3 機器開発

本研究では、検討用モデルと原理実証機の2つのミュオグラフィ装置を開発した。検討用のモデルとしては、図3にあるような光電子増倍管と、プラスチックシンチレータを用いて検出器を作成した。

シンチレータは、指向性を出すために細長い形状のものを用いている。シンチレータの形状で指向性を出しているのは今回のミュオグラフィ装置が世界で初めてである。光電子増倍管の持つ周波数特性を考慮して、反応率が最も高くなるシンチレータを選んだ。また、シンチレータの本数も、光電子増倍管のアノード数（ピクセル数）に対応させており、それぞれの側面をチタンの反射材でコーティングしたのち、用意したアルミ製の枠で8×8の正形状に並べ、図4のように上からブラックラバーで遮光した。

次に光電子増倍管の光電面と、シンチレータの研磨面を直接重ね、境界を遮光した。外部磁場の影響を小さくするため、検出器全体をアルミホイルで巻き、その上から遮光のため植毛布で覆った。

光電子増倍管は、高圧電源をかけることで光電子を増幅することができる。光電子増倍管用の小型高圧電源ユニットを購入し、一般的に使用されている家庭用電源と接続しコントロールするため、電流計や電圧計、トリマーコンデンサー（電圧を調整する）を備えた小型高圧電源装置を開発した。

データの確認には、オシロスコープを用いた。今回の測定では上下1ピクセルずつの信号確認するために最低でも2CH必要であり、信号がトリガーにかかると自動でUSBにデータを書き込む機能が付いている扱いやすいものを選んだ。

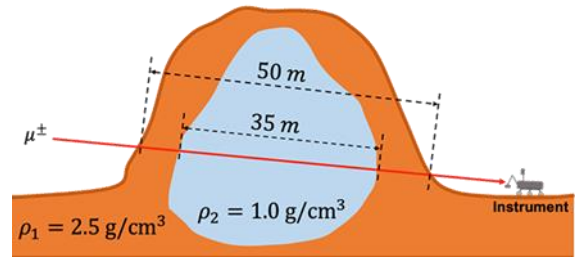


図2 想定している火星上のピンゴ状地形の概念図。火星にはたとえばユートピア平原などに多数の上に凸の小さな地形を見つけることができるが、これらはピンゴのように内部に氷の核を持つ可能性がある指摘されている。

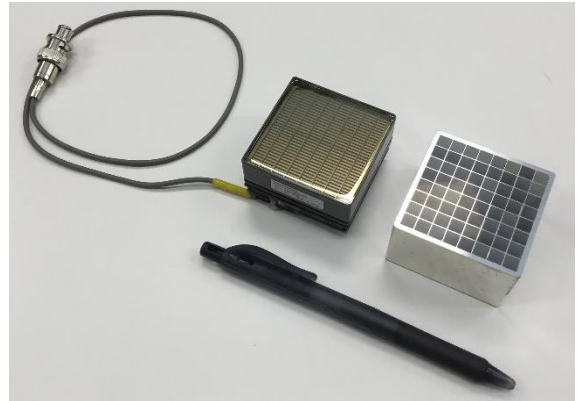


図3. 光電子増倍管(左)とプラスチックシンチレータ(右)

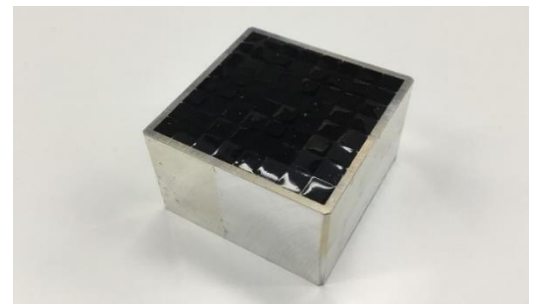


図4.シンチレータ上部に遮光のため、ブラックラバーで蓋をした



図5. 製作した超小型ミュオン検出器。植毛紙は外した状態

ここで、データ読み出し機能としてはデジタルオシロスコープでは大型の割にファイルの書き込み中はデータの取得を行うことが出来ないデッドタイムが生じるなどの不都合がある。そのため屋外に持ち出すための小型軽量化も考慮したミュオグラフィ装置としては、読み出し装置側の都合に合わせた形でミュオン検出部を再設計することとした。

原理実証機は64本のシンチレータ(2×2×30 mm³)と受光領域が64に区切られたフォトダイオードから成る検出器として、これをを2個作成した。ミュオンがシンチレータに入射し発生する微弱な光をフォトダイオードが検出することで、ミュオンを観測する。

ここでミュオン検出部の2次元概念図を図6に示す。長細いシンチレータを各検出層に配置し、その2層の同時検出性によりミュオン候補を検出する。この際のミュオントラック候補も、それぞれの検出器における平面位置に依存する。位置決定は、シンチレータの発火位置を検知器側で2次的に求めることとした。読み出し装置にはShimazoe et al(2012)で開発された新しいdToT法を利用することで、小型軽量低電力(3.3V, 11x12cm²)でありながら、エネルギー分解能を持つ装置を達成することができた。これをFPGAで形成されるDAQボードに接続し、検出データを処理用PC側に送信する。DACボードは20x40x5cmであり、その構成は図7のようなものとなった。

開発したミュオン検出部のシンチレータの感度は、²⁴¹Am, ²²Na, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Coの4つをガンマ線源として計測を行った。またMPPC部の温度依存性についても、5, 10, 20, 30, 40℃における計測を実施することで近似曲線を得て把握した。

4.4 地上検証実験

開発したミュオグラフィ装置を、東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)、柿岡試験場(茨城県石岡市)、東京ドームシティ(東京都文京区)の3か所で実際に稼働して、検証を行った。本郷キャンパスと東京ドームシティは周囲を高い建築物で囲まれているが、柿岡試験場は建築物が一切周囲に存在しない。標高や緯度はほぼ同様であるため、本郷キャンパスと東京ドームシティでの計測には、水平方向成分を持つミュオンがそもそもかなり少ないという利点がある。

ミュオグラフィ装置はそれぞれの場所において、建築物のほぼ上部に設置して計測を実施した(そのため、ほぼ天空から飛来するミュオンを捉えることができる)。

検出器の向きや対象構造物を変化させながら、約5カ月間、開発装置でのミュオン検出実験を行った(表2)。ミュオンフラックスと天頂角の依存性は、たとえばKedar et al (2013)などでも示されていたが、この検出器で極めて正確にこれを再現することができた(図8)。

作成した小型ミュオグラフィ装置を用いて、実際に建物や土砂の密度を測定した例を図9に示す。開発したミュオグラフィ原理実証機によって、期待通り、密度差を十分に少ない誤差で検出できることが示された。

4.6 ロボバ(ロボット)側の開発検討結果

本研究は、特に火星においてミュオグラフィ観測を実施する可能性を検討しており、火星上で動作可能でミュオグラフィ観測が実施可能なロボバ(ロボット)についても同時に検討を行った。この部分は主に研究分担者である慶應大・石上のグループで実施しており、以下について取り組みを行った。

まずセンサ搭載に向けたロボットの仕様変更を実施した。特にハードウェアの換装やロボット制御装置のソフトウェアを汎用化した。また、センサ取得データを円滑にダウンリンクできる枠組みを開発し、センサ取得時における周囲環境地図取得を目的として、ロボット搭載レーザ距離計による局所的な地形図の獲得と、それらを統合する大局地図生成手法の開発を実施した。さらにセンサ取得時における周囲環境地図取得を目的として、ロボット搭載360度カメラによるカラー環境情報取得と走行領域の判断手法の開発を行った(図10)。

これらが機能することをフィールド実験で実証した(図10)。小型ミュオグラフィ装置の検討の結果、火星表面においてミュオンフラックスが十分に高いことから、ミュオグラフィ観測にむしろ都合が良いことがわかったが、同時にプロトンの照射頻度が高く、この誤検知を低減することが鍵である。こうしたロボットの周囲環境地図取得能力と走破領域の判定制度が向上させたことで、プロトンによるノイズを遮蔽する有効な地形的特徴をうまく探し出して利用することが可能となり、この問題は解決できると考えられる。すなわち火星上でミュオグラフィ観測を実施するための移手段も検討が十分なレベルにまで進めることができたと言える。

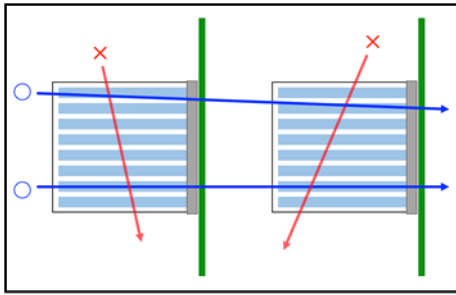


図6. ミュオン検出部におけるミュオン候補選定の概念図。発光部の座標と2台の検出部の同時性を利用する。

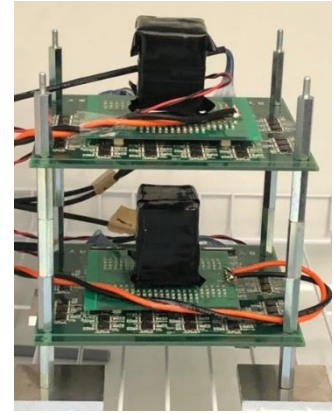


図7. 小型ミュオグラフィ原理実証機の外観。上下に2つの検出器が並ぶ。上下の距離を変化させることで、解像度や積分時間を調整できる。

表2. 鉛直ミュオンフラックスの観測値とGEANT4による数値シミュレーション結果との比較

	検出器間距離	積分時間	Muon count	Count/day
茨城	2.0 cm	7.94 days	66	8.3 ± 1.0
東京	2.0 cm	16.88 days	134	7.9 ± 0.7
シミュレーション	2.0 cm	17.68 days	142	8.1 ± 0.7

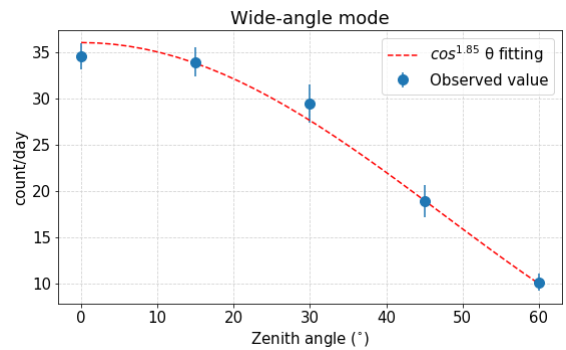


図8. ミュオン検知数と天頂角の依存性。赤の直線は理論的に推定されている依存性で、計測値と良い一致を示した

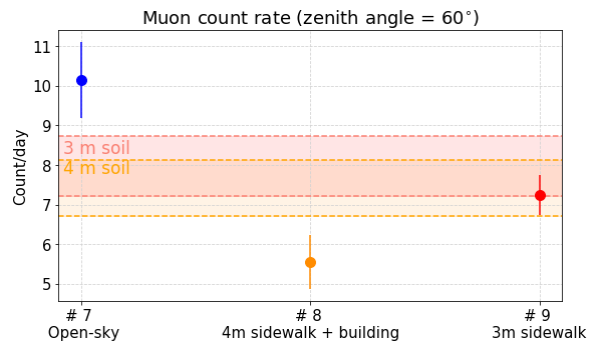


図9. ミュオンカウント数と異なる観測対象との関係。対象が無い(open sky)とくらべて、平均密度の違いとともにミュオンカウント数が減少していることがわかる。

5. まとめ

本研究により、火星表面においてミュオグラフィに都合の良い水平方向に飛来するミュオンが地球上より多く存在するため、ミュオグラフィを原理的に適用しやすいことがわかった。一方でプロトンなどの一次宇宙線が大量に存在するため、ノイズを除去するための工夫が必要となることも明らかになった。

このノイズは、長方形のシンチレータを利用し2組の検出器のジオメトリを調整することで、現実的に解決可能であることを数値的に確かめた。さらに火星上における有望な探査対象となるピンゴ状地形について、30日間程度の観測で内部の水コアの存否が判別できる検出器サイズを決定した。

この設計に基づき、小型のプラスチックシンチレータを用いた超小型ミュオグラフィ装置を開発した。探査機での搭載が可能な極小型(10×10×15 cm)の2層検出器となっており、読み出し機構のサイズは20×40×5 cmと十分に小さなものとなった。この開発した装置を用いて、地上の3地点で数週間ずつの検証実験を行い、開発した装置が十分な精度で(密度検出が可能な精度で)ミュオンを検出可能であることを確認した。

さらにミュオグラフィ装置を火星上で実際に観測に利用するには、地形的特徴をうまく利用してプロトンの影響を排除することが有効であることがわかった。そのためのロボット移動手段も検討し、実フィールドにおいて十分に地図作成性能と走破性能を発揮できるシステムを開発しており、ミュオグラフィ搭載機と搭載用の火星ローバのプロトタイプ開発という意味でも、想定していた以上の重要な成果を得られたと考えている。

以上のように、宇宙探査用ミュオグラフィ装置のプロトタイプモデル制作とその実証という本研究で予定していた目的は、予定以上に順調に実施することができた。この成果は関連するものも含めれば既に5篇の国際誌論文と2つの国際学会での発表に結び付いているが、総合的にまとめた成果として、さらに国際誌に2編の論文として公表を予定している。

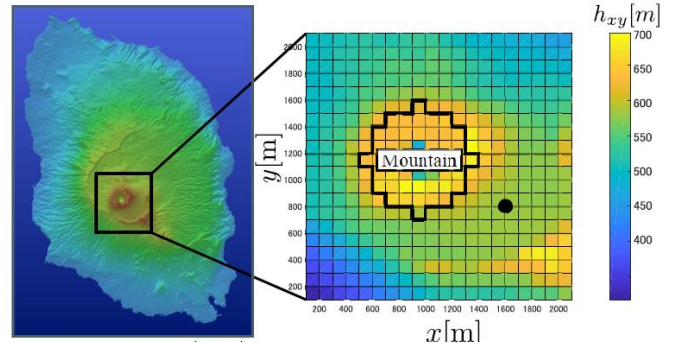


図 10. 移動ロボットによる実フィールドでの移動実験の様子。走行範囲の判別しつつ大局的な地図を作成することで、開発した超小型ミュオグラフィ計測器による観測において決定的に重要であることがわかった、プロトンによるノイズを遮蔽する有効な地形的特徴を探し出すことが可能となった。

引用文献

- Hassler, D. M., C. Zeitlin, R. F. Wimmer-Schweingruber, C. Martin S. Böttcher, J. Andrews, E. Böhm, D. E. Brinza, et al. 2012. The Radiation Assessment Detector (RAD) Investigation. *Space Sci. Rev.*, 170 (1-4), 503-558.
- Hemmi, R.; Miyamoto, H. High-Resolution Topographic Analyses of Mounds in Southern Acidalia Planitia, Mars: Implications for Possible Mud Volcanism in Submarine and Subaerial Environments. *Geosciences*, 8, 152, 2018
- Hemmi, R., Miyamoto, H. Distribution, morphology, and morphometry of circular mounds in the elongated basin of northern Terra Sirenum, Mars. *Prog Earth Planet Sci* 4, 26 2017
- Hirata N, Miyamoto H, Showman AP., Particle deposition on the saturnian satellites from ephemeral cryovolcanism on Enceladus, *Geophysical Research Letters*. 41(12):4135-41, 2014
- McEwen, A.S., et al., The High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) during MRO's Primary Science Phase (PSP), *Icarus*, Volume 205, Issue 1, 2-37, 2010.
- 宮本英昭, 小松吾郎, 地形学からみた火星の表層環境史と生命探査, *地学雑誌*, 125:1-184, 2016
- Miyamoto, H., H. Tanaka, Y. Toshimitu, M. Otsuki, M. Taguchi, S. Saito, Y. Uchiyama, and S., Kikuchi, H. Kameda. 2013. Muography for future Phobos landing mission. 47th Lunar and Planetary Science Conference.
- Prettyman, T. H., A. Empl, L. S. Pinsky, M. V. Sykes, and M. C. Nolan. 2019. "Deep mapping of small solar system bodies with galactic cosmic ray secondary particle showers." NICA Phase II final report, Planetary Science Institute.
- Parsons, R. A., Kanzaki, T., Hemmi, R., Miyamoto, H., Cold-based glaciation of Pavonis Mons, Mars: evidence for moraine deposition during glacial advance, *Progress in Earth and Planetary Science*, 7 (1), art. no. 13, DOI: 10.1186/s40645-020-0323-9, 2020
- Shimazoe, Kenji, Hiroyuki Takahashi, Boxuan Shi, T. Orita, Tetsuo Furumiya, Junichi Ooi, and Yoshihiko Kumazawa. 2012. "Dynamic Time Over Threshold Method." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 59: 3213 - 3217.
- Tanaka, H. et al., Imaging the conduit site of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-shinzan lava dome, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22311, 2007
- Tanaka, Hiroyuki K. M., Tomohisa Uchida, Manobu Tanaka, Hiroshi Shinohara, and Hideaki Taira. 2010. "Development of a portable assembly-type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma." *Earth, Planets and Space* 62: 119-129.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hemmi Ryodo, Miyamoto Hideaki	4. 巻 8
2. 論文標題 High-Resolution Topographic Analyses of Mounds in Southern Acidalia Planitia, Mars: Implications for Possible Mud Volcanism in Submarine and Subaerial Environments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 152 ~ 152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences8050152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hemmi Ryodo, Miyamoto Hideaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Distribution, morphology, and morphometry of circular mounds in the elongated basin of northern Terra Sirenum, Mars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-017-0141-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Parsons, R.A., Kanzaki, T., Hemmi, R., Miyamoto, H.	4. 巻 7
2. 論文標題 Cold-based glaciation of Pavonis Mons, Mars: evidence for moraine deposition during glacial advance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 13-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-020-0323-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Miyamoto, H., Niihara, T.	4. 巻 1
2. 論文標題 Simplified Simulated Materials of Asteroid Ryugu for Spacecraft Operations and Scientific Evaluations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Natural Resources Research	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11053-020-09626-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takemura. R., and Ishigami, G.	4. 巻 29
2. 論文標題 Traversability-Based RRT* for Planetary Rover Path Planning in Rough Terrain with LIDAR Point Cloud Data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 838-846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.20965/jrm.2017.p0838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yanagisawa. A., and Ishigami, G.	4. 巻 29
2. 論文標題 Development and Performance Evaluation of Planar Travel Distance Sensors for Mobile Robots in Sandy Terrain	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 . 887-886
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.20965/jrm.2017.p0887	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Deguchi. S., and Ishigami, G	4. 巻 30
2. 論文標題 Computationally Efficient Mapping for a Mobile Robot with a Downsampling Method for the Iterative Closest Point	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 65-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.20965/jrm.2018.p0065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 小池 幸人、洪 鵬、田中 宏幸、宮本 英昭
2. 発表標題 探査機搭載をめざした超小型ミュオグラフィ装置の原理実証モデルの開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miyamoto, H
2. 発表標題 Muographic interests in planetary sciences
3. 学会等名 Muographers 2019 Outer space muography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Taguchi, Keisuke Kameyama, Hideitsu Hino
2. 発表標題 Active learning with interpretable predictor
3. 学会等名 2019 International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口優介、亀山啓輔、日野英逸
2. 発表標題 強化学習を用いた複数データ選択のための能動学習
3. 学会等名 第38回IBISML研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hayato Watanabe, Hideitsu Hino, Shotaro Akaho, Noboru Murata
2. 発表標題 Retrieved Image Refinement by Bootstrap Outlier Test
3. 学会等名 the 18th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miyamoto, H.
2. 発表標題 Development of a compact Muography system based on scintillator-SiPM detectors
3. 学会等名 MUOGRAPHERS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上吉原 弘明、二宮 哲郎、吉原 有里、島添 健次、高橋 浩之、田中 宏幸、宮本 英昭
2. 発表標題 火星探査機搭載を目指した超小型ミュオグラフィ装置の開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kamiyosihara, H. et al
2. 発表標題 Compact muography instrument for future mars exploration: Experimental demonstrations
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	石上 玄也 (Ishigami Genya) (90581455)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 宏幸 (Tanaka Hiroyuki) (20503858)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	
研究分担者	尾崎 正伸 (Ozaki Masanobu) (90300699)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	
研究分担者	日野 英逸 (Hino Hideitsu) (10580079)	統計数理研究所・モデリング研究系・准教授 (62603)	