論文審査の結果の要旨

氏名　草茅　太郎

本論文は７章からなる。第１章は、イントロダクションであり、ミュオグラフィとよばれる、宇宙線ミュオンを用いた巨大物体透視技術について歴史的背景が述べられるとともに、２次宇宙線としてのミュオンの生成及び伝搬の過程が簡潔に要約されている。また、初期のミュオグラフィにはミュオン検出層が 2 段であったものが、2014 年には 6 段の検出層を備えて、背景雑音の大幅な低減がなされるなどの技術的進展が解説されている。そして、現時点で克服すべき課題として、データ取得から透視画像生成のリアルタイム性の欠如が指摘されている。低背景雑音ミュオグラフィ観測装置に特化した高速解析ソフトウェアの開発こそが、将来の活動的火山内部のマグマ動態の検出に必須であると述べ、それを本論文の中心課題と位置づけている。

第 2 章から第 5 章では、開発したソフトウェアが述べられている。まず、第 2 章では、観測装置内に設けられた 6 層の検出面上のミュオン通過点座標にもとづいて、ミュオンの到来方向（飛跡）を決定する手法が論じられている。飛跡決定には、最小 2 乗法が標準的に用いられてきたが、1000 万を超える膨大な飛跡に対しては、リアルタイム処理ができなくなるという難点を指摘している。本論文では、この問題を克服するための手法（R 法）を考案している。R 法とは、最上流と最下流の 2 層のミュオン検出器でミュオン飛跡の決定を行い、残りの層のミュオン検出器は飛跡の直線性の判定のみに用いる手法である。この R 法の性能評価として、ミュオン伝搬に関するモンテカルロ・シミュレーションを行って、飛跡の決定精度や検出効率について、最小 2 乗法との統計的な比較検討をおこなっている。その結果、R 法の性能は最小 2 乗法よりやや劣るものの、遜色ないレベルであることを確かめている。格段の高速化が実現されている点は R 法が優れているので、実用的なミュオグラム（透視対象物体を透過して検出器に入射するミュオン数を、水平方位と仰角の２次元平面に描いてできる画像）生成には、R 法のほうが適していると結論している。第 3 章では、生成されたミュオグラムと対象物体の 3 次元形状情報から、透視対象の密度長（平均密度×ミュオン透過経路の長さ）の分布を、水平方位と仰角の２次元平面上に描く、バックエンドモジュールを開発している。さらに第 4 章では、3 章で述べたバックエンド解析で必要となる、ミュオン透過経路長をより正確に見積もるための補助的な手法が解説されている。第 5 章では、背景ノイズを凌駕するようなミュオン透過数が得られないときの対処法が示されている。そのような場合、一般には内部密度画像の変動は微弱で、統計的に有意な結論は得られない。しかし、類似の火山活動が何度も繰り返されるという特殊な条件下ならば、各画像を適切に重ね合わることにより、リアルタイム性を断念する代わりに、ミュオグラムの統計精度を向上させ、火山内部の有意な密度変化を検出できる可能性がある。このアイデアを実現すべく、本論文では、噴火履

歴に基づいて、特定の条件を満たす噴火イベントを抽出するモジュールと抽出された密度変化画像を足し上げるモジュールとを開発している。

第 6 章では、5 章で開発した手法を用いた桜島火山の観測と、その解析結果が示されている。観測が行われた期間には、桜島では年間数百回と高い頻度で噴火が発生していたが、そのなかで孤立的な噴火（その噴火の前後 10 時間以上にわたって、噴火が発生していないもの）に着目して、30 枚のミュオグラムを合成した。その結果、内部密度の特徴的な時間変化が、99%を超える統計的信頼度をもって認められた。すなわち、噴火開始からその後 30 分までの間では、火口底付近を透過するミュオン数が有意に減少しているのに対し、火口底下 100m 付近を透過するミュオン数の減少は噴火開始前 30 分から噴火後 30 分まで続いている。また、噴火開始後 30 分を経過すると、どちらの領域を透過するミュオン数も噴火開始 30 分前の平常値に復している。これらの結果を、地下深部から火道を上昇して噴火口底に達したマグマによって、ミュオン透過率が減少したためと解釈している。一方で、現在のミュオン検出装置の位置決定分解能（10cm)の下では、本論文の手法には難点もあることを、モンテカルロ数値実験で示し、ミュオン検出器の位置分解能を現在の 10cm から 1cm に向上させることが必要であることを指摘している。第 7 章は結論をまとめたものである。

以上のように、本論文はミュオンによるリアルタイム火山透視に必要となる技術開発に成功し、同技術を実際の火山観測に適用して、マグマの動きを可視化するという火山学的に重要な成果をあげた。したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。