

学位論文

ミュオグラフィ像における背景ノイズ低減による
活動的火山内部におけるマグマ動態の検出

(Reduction of background noise in muographic images for
detecting magma dynamics in an active volcano)

平成 27 年 12 月博士（理学）申請

東京大学大学院理学系研究科

地球惑星科学専攻

草茅 太郎

論文要旨

最近のミュオグラフィ観測技術は、複数台のミュオン検出器と放射線遮蔽体を用いて背景雑音を低減することで改善されてきた。それゆえに、ミュオグラフィ像を得るために従来必要とされてきた手動による解析過程が格段に軽減された。この最新のミュオグラフィ観測技術をより効果的に活用するために、低背景雑音ミュオグラフィの自動解析ソフトウェアが将来、特に活動的火山内部におけるマグマ動態のリアルタイム検出に役立つと考えられる。低背景雑音ミュオグラフィ観測装置に焦点を当てた本研究では、それに特化した解析ソフトウェアの開発を行うことにより、実際の火山活動の時間スケールに近い時間で透視画像出力が可能となり、将来、他の地球物理学的観測結果との対比がより容易になることが期待される。

本論文では、将来の活動的火山内部のリアルタイムでのマグマ動態の検出とその可視化データベースの作成を目指した低背景雑音ミュオグラフィの解析ソフトウェア開発に焦点を当てて論ずる。特にこの中で、「R 法」を考案することにより、解析ソフトウェアの高速化を実現した。R 法では、最上流と最下流の 2 台のミュオン検出器でミュオン飛跡の決定を行い、残りのミュオン検出器を飛跡の直線性の判定のみに用いる。このアルゴリズムにより、すべてのミュオン検出器の検出位置を用いて最小二乗法で決定する従来方法と比べてミュオグラム（対象ボリウムを透過した後のミュオンイベントを 2 次元角度空間内にプロットしたマトリクスで、デジタル X 線レントゲン写真と等価）生成において格段の速度向上を実現した。また、ミュオグラムを、ミュオグラフィ観測装置の幾何学的構造に基づいて解析し、対象ボリウムの密度長（平均密度×ミュオン透過経路の長さ）を、ミュオグラフィ観測装置の角度空間上に表すことのできるモジュールも開発した。

さらに、活動的火山のミュオグラフィ観測に有用なモジュール群を開発し、与えられた条件下でのミュオグラムの合成を容易にした。ミュオグラムを合成することにより、ミュオグラムのリアルタイム性は失われるが、ミュオグラムの統計精度の向上につながるため、よ

り高い精度で火山内部の密度構造を議論できるようになる。本研究では、ミュオグラム合成のために与える条件として、噴火時間間隔をパラメータとして採用した。

本論文ではケーススタディーとして、我が国で最も活動的な火山の1つである桜島のミュオグラフィ観測によって得られたデータを適用し、開発した解析ソフトウェアの性能評価を行った。特定の噴火条件下（この場合は噴火時間間隔が10時間以上）において、30枚のミュオグラム（900分間観測相当）を合成した結果、火山噴火直後について、昭和火口底近傍及び昭和火口底直下で、ミュオンフラックスの減少をそれぞれ最大99% C.L.を超える統計的有意度で観測した。このミュオンフラックスの減少は、噴火に関連した大きな物質量の移動を示唆している。ミュオンフラックスの減少の時空間的推移より、物質の移動は鉛直方向であることが結論付けられ、さらにこの鉛直方向の物質移動については、物質が火道内を昇降するマグマであると仮定された。さらに、噴火前後に移動したマグマの物質量と噴火間隔は相関しており、噴火間隔が長いほどより多くの物質が上昇していたことが示唆される。

一方で、測定された桜島の絶対密度分布は想定より低めだった。R法を用いる場合、観測装置に内蔵される放射線遮蔽体の影響により入射したミュオンが散乱し、ミュオンの飛跡決定精度を制限して、ミュオグラフィ観測装置の見かけ上の角度分解能が悪化する。この角度分解能悪化の結果として、過大にミュオンフラックスが観測されることが測定される絶対密度の低下につながる結果となる。このことはモンテカルロシミュレーションにより確認した。シミュレーションの結果によると、このミュオグラフィ観測装置の見かけ上の角度分解能の悪化は、ミュオン検出器の位置分解能を1 cm程度に向上させることで、ほぼ無視できるレベルにまで軽減できることを見出した。このように本論文ではミュオグラフィ観測技術の将来の改善や高度化のために必要なことについても論じている。

Abstract

The muography technique has been recently improved through hardware development utilizing multiple detectors and radiation shields to reduce background noise; hence a removal of a manual analysis process from users. To take advantage of this updated muography technique more efficiently, software for automatic low-background-noise muography analysis is useful in particular to detect the magma dynamics in an active volcano. In this work, which focuses on a low-background-noise telescope, a specialized analysis software was developed to output muographic images at a nearly practical time scale of volcanic activity that is expected to compare with other geophysical observations in future real-time scenarios.

In this thesis, the development of an analysis software for low-background-noise muography is discussed, focusing on the real-time detection of magma dynamics in an active volcano in the future and the generation of a visual database of muography. In particular, an “R-method” was developed to speed up the analysis software. In the R-method, a muon trajectory is reconstructed by connecting two detection points at each of two muon detectors that are aligned at the most upstream and the most downstream positions, while the remainder of the muon detectors are only used to judge the linearity of the muon trajectory. This algorithm yielded a significantly faster analysis software performance in generating a muogram (a matrix of muon events that traversed the target volume in the two-dimensional angular space, which is equivalent to digital radiography) relative to the conventional least squares method using all detection points with each muon detector. Modules that analyze a muogram based on the geometrical structure of a muography telescope were also developed to plot the density length (average density \times muon’s traversed path length) of a target volume in an angular space.

Furthermore, a group of modules that was useful for the muographic observation of an active volcano was also developed for the effortless integration of muograms under a set of

given conditions. Although the real-time properties of a muogram are lost by integrating individual muograms, the statistical precision of the muogram is improved, and thus, the density distribution inside the volcano can be calculated with a higher precision. In this work, the time interval between each volcanic eruption was used as the condition for integrating muograms.

In this thesis, a case study of the developed analysis software is conducted by evaluating its performance by applying muographic data measured at the Sakurajima volcano, which is one of the most active volcanoes in the world. As a result of integrating 30 muograms (equivalent to a 900-minute measurement) under the given conditions (i.e., a time interval between each eruption of ≥ 10 h), a reduction in the muon flux was respectively measured at a statistical confidence level of more than 99% at a maximum in the vicinity of the Showa crater floor and directly beneath it, right after the volcanic eruptions. This reduction suggests the transfer of a substantial quantity of substance in conjunction with eruptions. With regard to the vertical orientation of the substance transfer, it was assumed to be ascending and descending magma inside the conduit. Furthermore, the amount of magma that was transferred before and after the eruptions correlated with the time intervals between eruptions, which implies that more substances ascended for longer intervals between eruptions.

On the other hand, the absolute density distribution within the Sakurajima volcano measured in this work was lower than expected. When employing the R-method, the radiation shields inside the muography telescope scatter incoming muons and limit their tracking precision, which subsequently results in the degradation of the apparent angular resolution of the telescope. As a consequence of this degradation, an excessively measured muon flux resulted in the lowering of the observed absolute density within a muographic image. This has been confirmed by performing Monte Carlo simulations. Based on the results of these simulations, it was revealed that this degrading apparent angular resolution of the telescope could be resolved to be almost negligible by improving the positional resolution of

the muon detector to be 1 cm. Therefore, need for future upgrade and improvement of the muography technique were also confirmed.

目次

第 1 章	イントロダクション	10
1.1.	歴史的背景	10
1.2.	ミュオグラフィの原理	11
1.2.1.	宇宙線ミュオンの生成	11
1.2.2.	ミュオンの伝搬	14
1.3.	ミュオグラフィ研究の現状と問題点	16
1.4.	本研究で用いた実験セットアップ	18
1.5.	本論文の構造	24
第 2 章	フロントエンド解析モジュール	26
2.1.	背景	26
2.2.	ミュオグラム生成部	28
2.3.	ミュオグラム連結部	42
第 3 章	バックエンド解析モジュール	44
3.1.	背景	44
3.2.	ミュオグラム-ミュオンフラックス変換部	45
3.3.	ミュオンフラックス-密度長変換部	48
第 4 章	シミュレーターモジュール	52
4.1.	背景	52
4.2.	経路長生成部	53
4.3.	透過ミュオンフラックス生成部	56
第 5 章	活動的火山観測に向けたモジュール開発	59
5.1.	背景	59
5.2.	噴火イベントセクターモジュール	59
5.3.	合成ミュオグラム表示モジュール	65

第 6 章 議論：桜島におけるケーススタディー	69
6.1. 背景	69
6.2. 噴火イベントセレクターおよび、合成ミュオグラム表示モジュールの適用結果 ...	71
6.3. 昭和火口底近傍における透過ミュオンフラックスの変化	80
6.4. マグマ動態の観測期間依存性	99
6.5. マグマ動態の噴火間隔依存性	101
6.6. 桜島におけるフラックス-密度分布変換結果	105
6.6.1. 桜島観測における背景ノイズの取り扱いについて	106
6.6.2. 鉛遮蔽体によるミュオン散乱イベントの R 法による再構築精度の評価	107
6.6.3. 再構築精度の閾値（R 値）依存性に対する定量的評価	111
第 7 章 結論	115
謝辞	118
参考文献	119
付録 A オープンエアミュオンエネルギースペクトルのデータテーブル ...	124
付録 B アクセプタンスの導出方法	129
B.1. 有感面積の数式	129
B.2. 立体角の数式	130
付録 C パッキング開始位置と足し合わせるビン数に対する deviation index 分布	131
付録 D ソースコード	140
D.1. ミュオグラム生成部	140
D.2. 経路長生成部	148
D.2.1 設定ファイル	148
D.2.2 前段プログラム	149
D.2.3 後段プログラム	153

第1章 イントロダクション

1.1. 歴史的背景

高エネルギーミュオンの強い透過力を利用して巨大物体内部を透視撮像する技術であるミュオグラフィは、オーストラリアの物理学者 George (1955)が行ったオーストラリア・スノーウィーマウンテン坑道内での宇宙線検出実験がきっかけとなって始まった。George はミュオンの検出にガイガーカウンターを用いたが、ガイガーカウンターではミュオンの到来方向を記録できなかったため、厳密にはミュオグラフィとは言えないが、坑道内部と外部で測定されたミュオンフラックスの比をとることにより、検出器上部の岩盤の密度長(コラム密度)を 163 ± 8 meter water equivalent (m.w.e.: 10^2 g cm⁻²)と決定した。この密度長は、コアサンプリングの結果 175 ± 5 m.w.e. と誤差の範囲内で一致したことで、高精度密度決定技術としてのミュオグラフィの可能性を示した。George (1955)による観測実験の13年後の1968年、アメリカの物理学者 Alvarez *et al.* (1970)がカフラー王のピラミッドの内部に隠された部屋などが無いかを調べるためにミュオグラフィ観測を行った。Alvarez *et al.* (1970)が用いた素粒子検出器はスパークチェンバーと呼ばれ、ミュオン通過に伴って直線上の発光が起こることでミュオンの到来方向を決定できる機器であった。これが世界で最初のミュオグラフィ実験であったと言える。しかし、ピラミッド内部に隠された部屋などの新たな構造の発見につながらなかったため、ミュオグラフィの有効性を実証できなかった。

日本では、数多くある活火山の内部構造を調べるために地震学・地球電磁気学・測地学など様々な手法が用いられてきたが、ここ10年ミュオグラフィが手法の1つとして利用され始めている。このきっかけになったのが、Tanaka *et al.* (2007)による浅間山火山の山頂付近のミュオグラフィである。Tanaka *et al.* (2007)は原子核乾板を用いて浅間山山頂内部の密度構造の透視撮像に世界で始めて成功した。この成果は、急速に世界に広まり、フランスの西インド諸島に位置する La Soufrière of Guadeloupe 火山溶岩ドーム内部の空間的密度異方性の観測 (Lesparre *et al.* 2012)、イタリアのシチリア島に位置する Etna 火山山頂にあるスコリア丘内部の密度構造 (Carbone *et al.* 2013)など、ミュオグラフィの実績が積み上げられてきている。ミュオグラフィは火山以外への応用も急速に進んでおり、洞窟探査 (Oláh

et al. 2012), 二酸化炭素の回収・貯留モニタリング (Kudryavtsev *et al.* 2012), 火星探査 (Kedar *et al.* 2012)などのプロジェクトが現在進行している。

Tanaka *et al.* (2007)がミュオグラフィ観測に初めて成功した後、観測装置は原子核乾板だけでなくプラスチックシンチレータと高感度光センサを組み合わせた電気方式も開発され、現在では火山内部の密度構造の時間依存性を捉えられるまでになってきている (Tanaka *et al.* 2014)。しかし、現状ではミュオグラフィのデータ取得および解析に要する時間が、実際の火山活動の時間スケールに比べて長くかかり、リアルタイムでの火山学的議論に貢献できていない。ミュオグラフィデータ取得に要する時間は、観測装置の口径（有感面積）に反比例するため、時間短縮のためには観測装置の構造そのものを根本から改良し、大口径化するが、観測装置そのものの低価格化を図り、装置の大量配置による口径の拡大が必要となるが、これらについての議論は本論文の趣旨から外れるのでここでは立ち入らない。一方で、解析速度の高速化については、低雑音型ミュオグラフィ観測装置の登場に伴って原理的には可能になりつつある。なぜなら、これまで解析的に取り除く必要が合ったミュオグラフィ観測データにおける雑音成分を、ハードウェア的に雑音成分を除去できるようになったからである (Tanaka *et al.* 2014)。本研究では、後者の解析速度改善に焦点を当て、将来の Web ベースでの自動解析ソフトウェア実現に向けて、低雑音型ミュオグラフィ用解析ソフトウェアの開発を行った。

本研究で開発した解析ソフトウェアのアルゴリズムを将来 Web サイトに実装することで、(A)対象ボリウムのミュオン撮像図（ミュオグラム）のリアルタイム提供、および(B)ユーザーが指定する観測期間におけるミュオグラム抽出をオンラインで、かつリアルタイムに提供できるようになるため、活動的火山におけるリアルタイムミュオグラフィデータベース構築の実現につながる。

1.2. ミュオグラフィの原理

1.2.1. 宇宙線ミュオンの生成

ミュオン (μ) は、現代の素粒子標準模型では第 2 世代の荷電レプトンとして位置づけられており、その静止質量 (106 MeV) は電子のおよそ 207 倍である。平均寿命 (τ) は 2.2 μ s

である。電荷は-1（反ミュオンならば+1）で、スピンは 1/2 である。また、物質中で強い相互作用はしないため、物質を透過する力が強い。それに対して、例えば陽子の静止質量は電子のおよそ 2000 倍であるにもかかわらず、物質中で強い相互作用をするためミュオンに比べると物質を透過する力が弱い。

宇宙線ミュオンは、高エネルギーの 1 次宇宙線が大気中の原子核（窒素や酸素）と相互作用して生成した中間子が崩壊して生成される。1 次宇宙線とは、超新星爆発などで亜光速に加速された陽子やヘリウム原子核などの粒子であり、1 次宇宙線が大気中の原子核と相互作用して生成される粒子を 2 次宇宙線と呼ぶ。ミュオンは、2 次宇宙線であるパイオン (π) やケイオン (K) が以下のような崩壊モードで崩壊することで生成される。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu, \quad (2)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \quad (3)$$

$$K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu, \quad (4)$$

$$K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \bar{\nu}_e (\nu_e), \quad (5a)$$

$$K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu), \quad (5b)$$

$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-. \quad (6)$$

荷電パイオンと荷電ケイオンは、それぞれ約 100%と 63.5%の確率でミュオンとミューニュートリノ (ν_μ) に崩壊する（平均寿命は荷電パイオンが 26 ns, 荷電ケイオンが 12 ns である）。中性ケイオンも、寿命の短いもの ($\tau = 90$ ps) は、約 69.2%の確率で 2 つの荷電パイオンに崩壊し、寿命の長いもの ($\tau = 51$ ns) は約 40.5%の確率で荷電パイオンと電子（あるいは陽電子）と電子ニュートリノ、約 27.0%の確率で荷電パイオンとミュオンとミューニュートリノに崩壊し、これらの荷電パイオンが最終的にミュオンに崩壊する。ミュオンの平均寿命は $\tau = 2.2 \mu\text{s}$ なので、光速 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) で運動しても $c\tau = 660 \text{ m}$ しか移動できな

い。この移動可能距離を崩壊長と呼ぶ。しかし、相対論的エネルギー E （運動エネルギー \gg 静止質量）を持つミュオンは、 $Em^{-1}c^{-2}$ 倍に崩壊長が伸びる。ここで、 $mc^2 = 106 \text{ MeV}$ はミュオンの静止質量である。例えば $E = 5 \text{ GeV}$ のミュオンの崩壊長は $\sim 30 \text{ km}$ であり、大気上空の高度 $10 \sim 20 \text{ km}$ 程度で生成された宇宙線ミュオンの多くは地上に飛来することが可能である。

宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルは先行研究でよく測定されており（e. g., Pak *et al.* 1961; Jokisch *et al.* 1979; Allkofer *et al.* 1985），それを説明する数値モデルについてもよく研究されている（e. g., Bull *et al.* 1965; Maeda 1973; Thompson and Whalley 1975; Matsuno *et al.* 1984）。本研究では、先行研究で測定されたミュオンのエネルギースペクトル測定実験のデータ（DEIS 実験（Allkofer *et al.* 1985），BESS 実験（Haino *et al.* 2004），KIEL-DESY 実験（Jokisch *et al.* 1979），L3+C 実験（Achard *et al.* 2004），MUTRON 実験（Matsuno *et al.* 1984）をまとめ、低雑音型ミュオグラフィ（1.4 節参照）の解析ソフトウェアに組み入れた（付録 A）。

また、本研究では、宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルが方位角に依存しないと仮定した。それは、宇宙線ミュオンが地球に向かって等方的に入射する 1 次宇宙線によって生成されるからである。1 次宇宙線は 1 kpc ($1 \text{ parsec} = 3 \times 10^{16} \text{ m}$) 程度の厚さを持つ銀河系に対して、その数千倍以上の距離を移動してきていることが分かっている。これは、銀河系内の磁場が不均質で、荷電粒子である 1 次宇宙線が、不均質磁場によって進行方向を何度も曲げられて銀河系内を伝播することによる。すなわち、1 次宇宙線は特定の方向から到来するのではなく、銀河系内の磁場にトラップされた荷電粒子の一部が少しずつ地球に対して等方的に染み出してくる、とも解釈できる。ただし、数 GeV 以下の 1 次宇宙線が地球の磁気圏に入ると、荷電粒子である 1 次宇宙線は地球磁場で進行方向を曲げられるため、磁場の向きとなす角度が大きい方向から入射した 1 次宇宙線は地球大気上層に到達できなくなる（東西効果）（Gruppen 2005）。しかし、地表に到達できる相対論的ミュオンは、比較的高エネルギーの 1 次宇宙線によって生成されるため、地球磁場の影響は小さく、地表に対して大角度（大仰角）で進入してくるミュオンについては方位角方向についてほぼ等方的に到来する。

一方、火山などの巨大物体のミュオグラフィ観測を行う場合、地表に対して小角度（低仰角）で進入してくる水平に近いミュオン（水平ミュオン）を通常用いる。水平ミュオンは

鉛直上方から到来するミュオンと比べて地表に届くまでに長距離を運動するため、地球磁場の影響をより長い時間受ける。しかし、100 m を超える山体を透過できる 50 GeV の運動エネルギーを持つミュオンの地球磁場による曲率半径は約 4200 km であり（地表付近の地球磁場を 40000 nT と仮定。参考: IGRF-12 (Thébault *et al.* 2015), 地球磁場の影響はほとんど無いと考えられる。

1.2.2. ミュオンの伝搬

高エネルギーのミュオンの物質中でのエネルギー損失過程は、大きく分けて電離過程 (Ionization) と放射過程 (Radiative loss) である。Groom *et al.* (2001) によると、ミュオンが物質中で、単位長さ・単位密度 dx あたりに失うエネルギー dE は、

$$-\frac{dE}{dx} = a(E) + b(E)E. \quad (7)$$

ここで、 $a(E)$ 、 $b(E)E$ はそれぞれ電離過程、放射過程による単位密度長あたりのエネルギー損失を表す。式 (7) の積分

$$R(E) = \int_0^E [a(E') + b(E')E']^{-1} dE' \quad (8)$$

から、密度長¹（コラム密度） $R(E_c)$ を透過するために必要な最小のエネルギー E_c （透過最小エネルギー）が導ける。 E_c は Groom *et al.* (2001) により、様々な物質について表にまとめられており、本研究ではこの表を補間した。

対象ボリウム²が存在しない場合の（オープンエア）、仰角 θ におけるミュオンエネルギースペクトルを E_c から無限大の範囲で積分することで単位面積・単位時間・単位立体角あ

¹ 密度長 = 平均密度 × 経路長

たりの透過ミュオンフラックス $N_\mu(E_c, \theta)$ が得られる。 E_c を $R(E_c)$ に変換した、密度長 $R(E_c)$ の透過ミュオンフラックス $N_\mu(R(E_c), \theta)$ を Fig. 1.1 に示す。 Fig. 1.1 に示される関係を用いれば、 $N_\mu(R(E_c), \theta)$ からミュオン経路に沿った密度長 $R(E_c)$ を一意に対応づけられる。 この密度長を、対象ボリウム内のミュオンの経路長で除することで、透過経路に沿った平均密度を求めることができる。

しかし、 N_μ と $R(E_c)$ を一意に関係づけられる $R(E_c)$ の上限が存在する。 10 km.w.e. 以上の厚さの岩盤に対しては、 $N_\mu(R(E_c), \theta)$ が大きく減少し、ニュートリノ起因のミュオンフラックスが優位になる (Patrignani *et al.* 2016)。 従って、10 km.w.e. 程度までの山体がミュオグラフィの適用限界である。

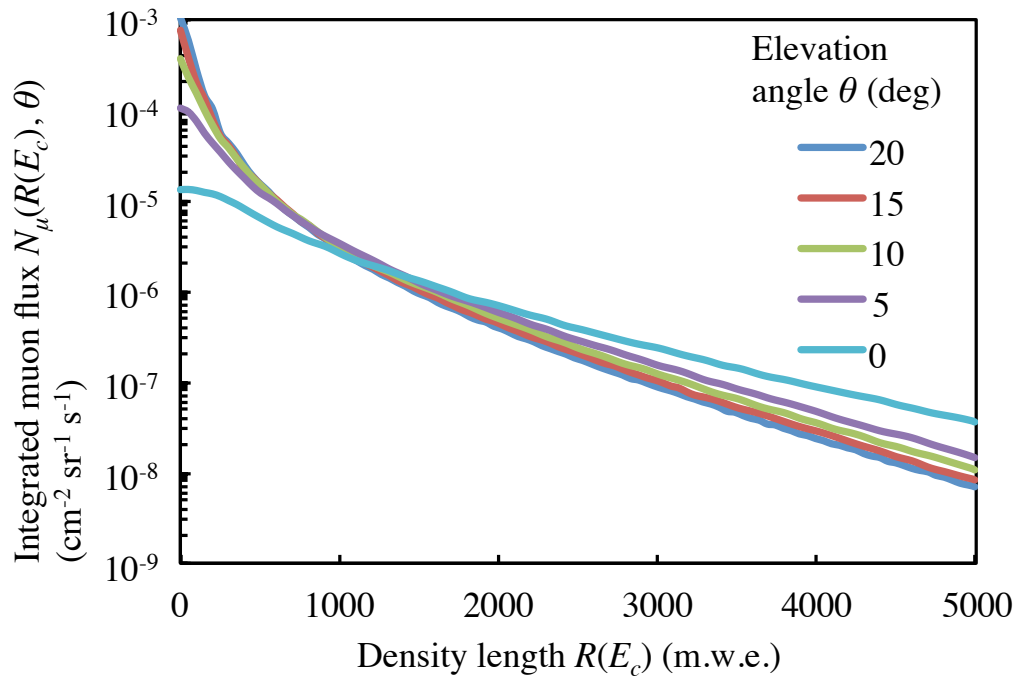


Fig. 1.1: Integrated muon flux $N_\mu(E_c, \theta)$ after traversing a given thickness of rocks for each elevation angle. Integration of muons that can traverse a given density length as a function of incoming elevation angles is shown. The unit of a given thickness of rocks is “m.w.e.” that is an abbreviation of “meter water equivalent”.

² 粒子線物理学の分野では、周囲の放射線を遮るために実装する鉛等で作られた構造物を遮蔽体と慣例的に呼んでいる。本研究ではミュオン以外の放射線を遮るために実装するものを放射線遮蔽体もしくは単に遮蔽体と呼ぶこととする。

1.3. ミュオグラフィ研究の現状と問題点

日本が世界をリードして実証してきた火山透視撮像法（ミュオグラフィ）（Nagamine *et al.* 1995）は、2007 年以降、急速に観測機器および解析手法の開発が進み、これまでは 1 回の観測で 1 枚の画像しか得られなかった電氣を用いない原子核乾板写真方式から（Tanaka *et al.* 2007b）、高感度光センサ等を用いることで 1 回の観測で複数枚の画像を得られる電氣方式へと進化してきた（Tanaka *et al.* 2009b）。

しかし、現在はデータ取得からミュオグラフィ透視撮像の画像を得るまでを瞬時に行えておらず、リアルタイムな火山活動状況の把握に十分な貢献ができていない。それに対し、最近の地球物理学的観測に関連する研究では、例えばリアルタイムな地表面変動データ（例えば、ハイレート GPS）を数秒でインバージョン解析して、地下のマグマの移動を推定する手法（Cannavò *et al.* 2015）が開発されるなど、解析結果をリアルタイムに出力することを目指している傾向が見られることから、リアルタイムに解析結果を比較検討できるよう、ミュオグラフィも同様に結果をリアルタイムに提供できるようにすることが必要だと考えられる。

ここで、「リアルタイム提供」とは以下のことを意味するものとする。

活動的火山における 1 日 1 枚以上のミュオグラフィ透視画像のリアルタイム提供。

そのためには、次の 2 点を解決する必要がある。

- (1) 人の手を介さない処理（背景ノイズ低減）、
- (2) 時間分解能の向上に見合った高速処理。

第 1 点目についてであるが、これまでは背景ノイズの除去は手動で行っていた。それは、この作業にノウハウを要したためである。しかし、Carbone *et al.* (2014) が想定したような、複数の低エネルギー粒子（電子や陽電子）が偶発的に複数のミュオン検出器で同時に検出されることでミュオンと誤認されるイベントがつくる背景雑音の問題について、Tanaka *et al.* (2014) による複数のミュオン検出器と放射線遮蔽体を組み合わせたカロリメータ型のミュオグラフィ観測装置の開発で大きく改善した。そこでは、背景雑音のレベルが 1/1000 以下にま

で低減されたために、解析時において背景雑音を別途見積もる必要が無くなり、自動解析ソフトウェアの開発が現実的となった。

第2点目を解決するためには、ミュオグラフィデータを高速で解析できるアルゴリズムを実装したソフトウェア開発が必要である。特に、ここでカギを握るのが、ミュオンの飛跡決定プロセス（トラッキング）の高速化である。水平に近い角度（低仰角）から到来するミュオンのイベントレートは $1 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ ステラジアン (sr)}$ あたり約 10 Hz である。つまり、1 日に約 100 万本のミュオンの飛跡が記録されることになる。今後、例えば、第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン 2014 の「極低雑音・大口径ミュオン検出器リニアアレイによる、火山ダイナミクス統合研究計画」において計画されているような観測装置の大口径化が進むと、解析すべきミュオンの飛跡は 1 日 1 億本を超えることになる。仮に大口径ミュオグラフィ観測装置で得られる大量のデータがオンラインデータベース化された場合、飛跡の数が膨大であるためにトラッキングのオンライン化と高速自動化は益々重要となる。

この状況は、例えば、Tanaka *et al.* (2003) で示されているような従来の観測装置に比べて複雑化が進み、そのために解析コストが増える低雑音型ミュオグラフィ観測においてはさらに重大な問題となる。従来のミュオグラフィ観測装置は、ミュオンの通過位置を決定できる機器（ミュオン検出器）2 台から構成されていたため、シグナルを出力するプラスチックシンチレータストリップの組み合わせだけでトラッキングすることができた。しかし、本研究で用いた観測装置は背景雑音を容易に低減できる一方で、6 台のミュオン検出器でミュオン飛跡の決定を行わなければならないため、トラッキングに必要な計算時間が大きく増大する。そこで、特にトラッキングに要する計算コストを低減させることを目指して本研究ではトラッキングアルゴリズムの簡素化を重要な開発要素と位置付けた。

本研究では低雑音型ミュオグラフィ観測におけるミュオンのトラッキングアルゴリズムの簡素化とその有効性の検証をコアとして、観測装置から直接出力されるデータからミュオグラフィ画像の生成までの一連の過程をモジュール化することで、低雑音型ミュオグラフィの解析ソフトウェアの自動化を目指し、開発を進めた。また、開発したソフトウェアを我が国固有数の活動的火山である桜島の観測において得られたミュオグラフィデータに適用する事でその検証を行った。

1.4. 本研究で用いた実験セットアップ

本研究で用いた実験セットアップは、Tanaka *et al.* (2014)により開発されたミュオグラフィ観測装置である。検出器内において通過した荷電粒子の位置を検出できるセグメント型ミュオン検出器（以降、単にミュオン検出器と呼ぶ）6台と放射線遮蔽体5台を用いて、ミュオンの到来方向を決定できるように設計されている。1台のミュオン検出器には、荷電粒子の通過で微弱な発光をする細長い長方形のプラスチックシンチレータストリップと微弱光を光電効果によって電子に変換し高電圧によってその電子を増幅する光電子増倍管（Photomultiplier Tube: PMT）を接続したシンチレーションカウンタを縦横に何本も配列することで、正方形の交差部分がいくつも存在している（Fig. 1.2 参照）。荷電粒子がミュオン検出器を通過するとき、ある縦横1組のシンチレーションカウンタが同時に信号を出力するため、それらの交差部分を荷電粒子が通過したことが分かる。複数のミュオン検出器を平行に並べ、荷電粒子を検出した交差部分（以降、反応点と呼ぶ）を3次元空間内で直線上に結ぶことができればそのイベントはミュオンであると判定する。

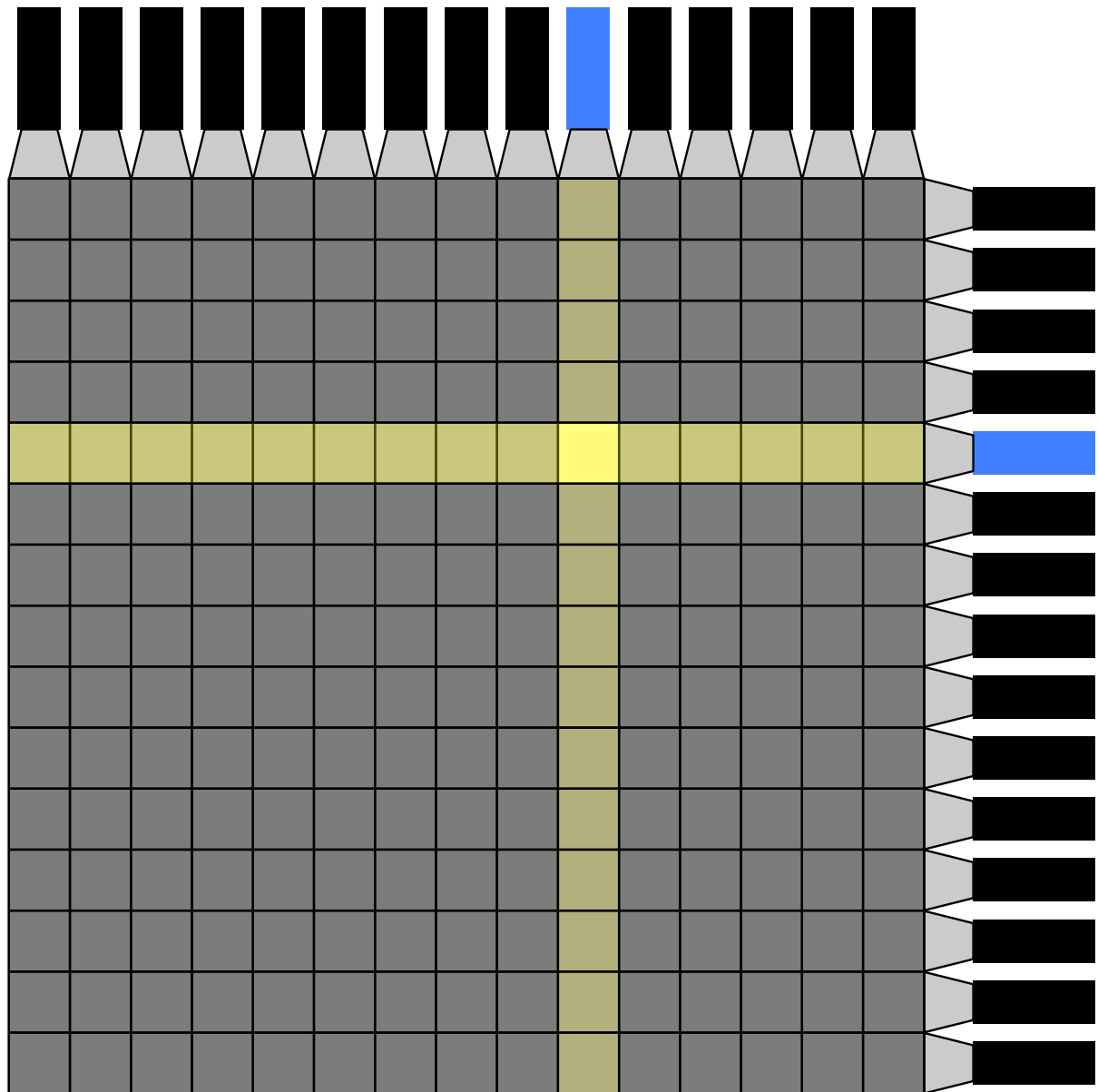


Fig. 1.2: Schematic view of a muon detector seen from the normal direction of the active area. Plastic scintillator strips are aligned to intersect perpendicularly and photomultiplier tubes (PMTs) are connected at one end. For example, when both of the yellow-colored plastic scintillator strips detect muon, the blue-colored PMTs simultaneously output signal, and a muon passing point is identified as the intersection of two plastic scintillators.

本研究で用いたミュオグラフィ観測装置の詳細な説明に入る。ここでは、ミュオグラフィ観測装置を構成する6つのミュオン検出器を上流側から下流側に向かって第1層, 第2層, …, 第6層と呼ぶこととする (Fig. 1.3)。また, 1つのミュオン検出器は, 長さ 1500 mm × 幅 100 mm × 厚さ 20 mm のプラスチックシンチレータストリップ (ELJEN 製 EJ-200) と光電子増倍管 (浜松ホトニクス製 R7724) を接続したものを, 縦 15 本 (X 方向), 横 15 本 (Y 方向) に直行させて配列されている。従って, ミュオン検出器の面に垂直な向きに対する有感面積は $1500 \times 1500 \text{ mm}^2$ である。また, ミュオン検出器同士の間隔は 610 mm であり, 両端のミュオン検出器である第1層と第6層の間隔は 3050 mm である。そのため, ミュオグラフィ観測装置としての視野角は方位角範囲 $-460 \text{ mrad} \leq \phi \leq 460 \text{ mrad}$, 仰角範囲 $0 \text{ mrad} \leq \theta \leq 460 \text{ mrad}$ となり, 角度分解能は方位角・仰角ともに 33 mrad となる³。

各ミュオン検出器間には, 電磁成分 (電子・陽電子・ガンマ線) やハドロン成分 (陽子・中間子など) の遮蔽体として, 厚さ 15 mm のステンレス板で覆われた縦 1500 mm × 横 1500 mm × 厚さ 50 mm の鉛板が 2 枚ずつ挿入され, ミュオン検出器の有感領域と同じ大きさの領域を遮蔽体が覆っている。これが 6 層ある各ミュオン検出器間に挿入されるため, 遮蔽体の厚さは総計で鉛が 500 mm, ステンレス 300 mm となる。電子に対する放射長 (電子の運動エネルギーが物質中で典型的に $1/e$ になる長さ) は, 鉛とステンレス (鉄ニッケルクロム合金) でそれぞれ 5.6 mm と 18 mm なので, 全体で鉛 500 mm とステンレス 300 mm の厚さに対しては, 水平方向で約 100 放射長, 仰角 25° ・方位角 25° の方向で最大となって約 126 放射長となる。ミュオン以外の荷電粒子がこの遮蔽体を通り抜けると, ミュオンとして誤認識される可能性がある。

³ ただし, ミュオン検出器の面に垂直な方向を方位角 0 mrad, 仰角 0 mrad とする。

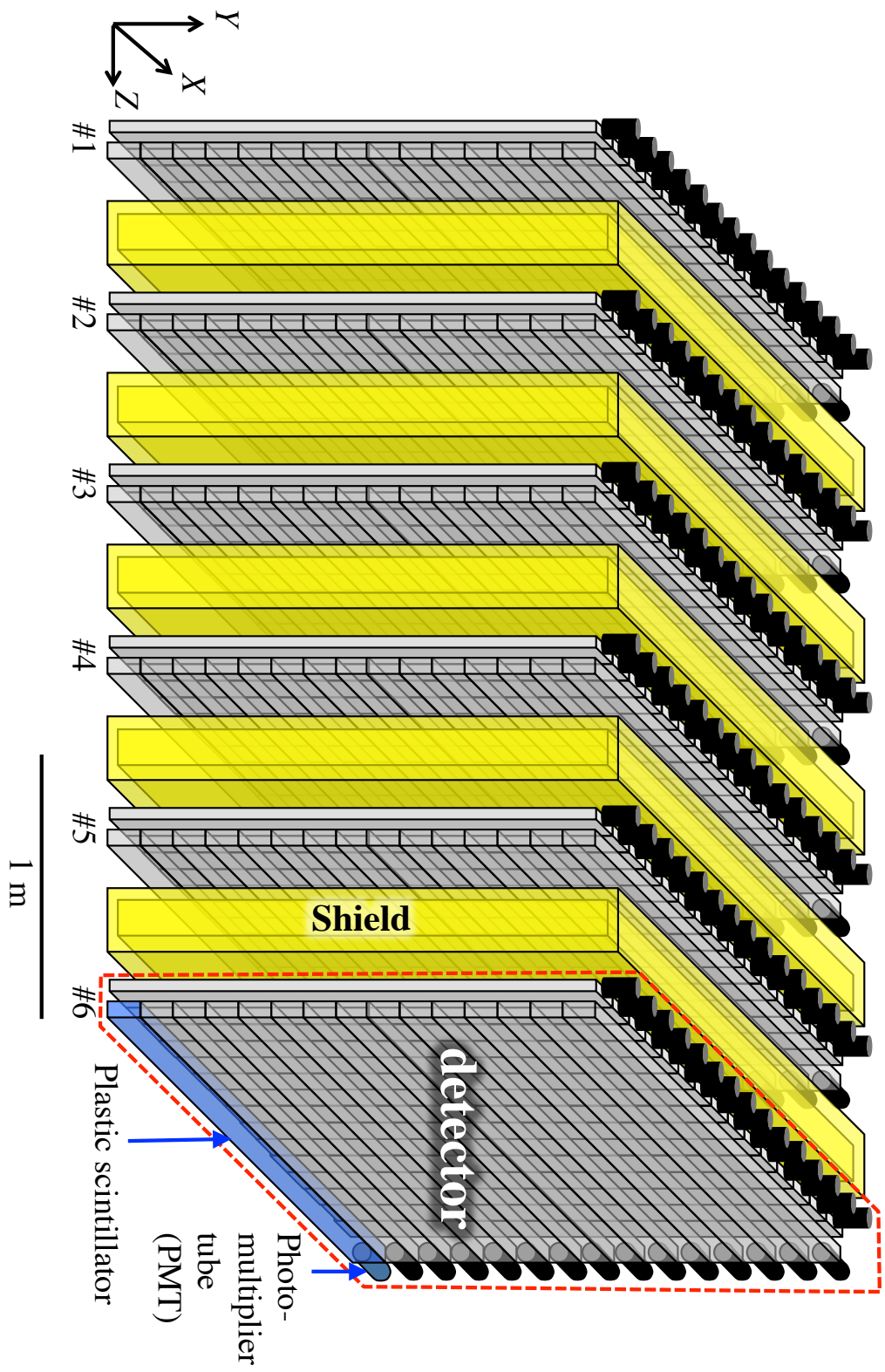


Fig. 1.3: Schematic view of a muography telescope with radiation shields inserted between muon detectors.

粒子伝搬シミュレーションコードとして国際的に用いられている Geant4 (Agostinelli *et al.* 2003) を用いて、100 GeV の電子が鉛の中をどれだけ進めるかモンテカルロシミュレーションを行った。結果が Fig. 1.4 である。図は厚み D (mm) の鉛ブロックを電子及び陽電子がいくつ透過できるかを示している。電子のエネルギーは 100 GeV、入射した電子数は 100 イベントである。入射エネルギーが電子の静止質量より十分高いため、入射した電子はすぐに電子・陽電子の対生成を起こし、多重化するため数が増えるが、厚さ 50 mm 程度を境にしてエネルギー損失により電子が停止する効果が勝って、急激に数が減っていき、厚さ 200 mm 程度より厚くなると元の入射電子数より数が減る (多重度 < 1)。Fig. 1.4 に見られるように、100 GeV の電子は、厚さ 300 mm 程度より厚くなると 1/100 程度に減衰する事がわかる。ただし、ガンマ線は厚さ 300 mm より厚くても一定量残存するために、稀に引き起こされる対生成プロセスによって電子や陽電子が発生する。

ミュグラフィ観測装置で検出した各ミュオンが通過した反応点の位置と時刻情報は、電子回路 (Uchida *et al.* 2009) によって処理され、前もって設定されたデータ取得時間間隔 (Δt) でミュオンのイベントが記録された時刻 (t)、ミュオンを検出したミュオン検出器の番号 (i)、各ミュオン検出器におけるミュオンの反応点の位置座標 (x_i, y_i) の 4 つのパラメータから構成されるミュオン検出データが出力される。出力例を Table 1.1 に示す。

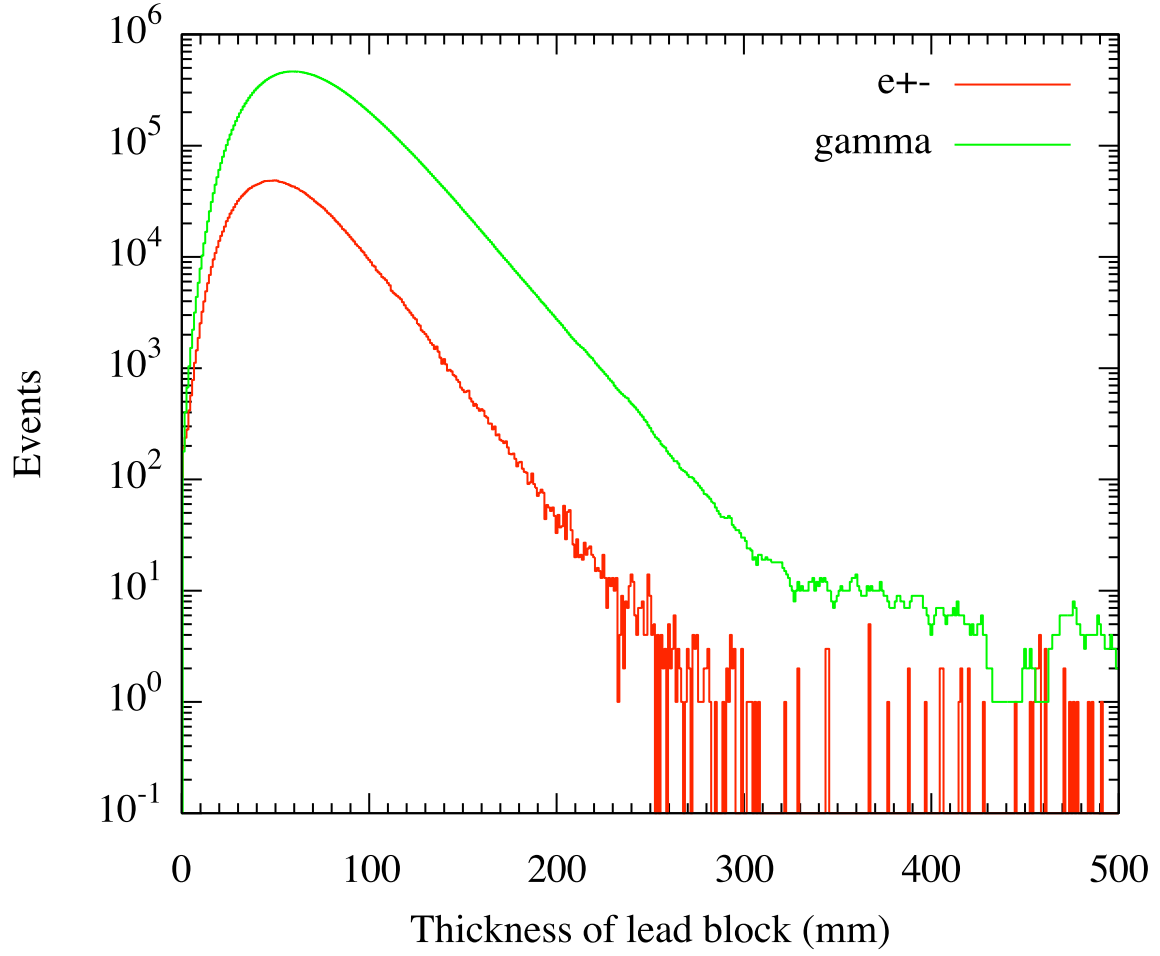


Fig. 1.4: Multiplicity of high-energy electrons in lead. The horizontal axis is thickness of lead block in mm and the vertical axis is the number of electrons and positrons (red line), and gamma rays (green line). In this particle propagation simulation, one hundred 100-GeV electrons were injected and only the electrons/gamma rays above 500 keV are shown.

Table 1.1: Output example of the primary data for tracking. “Time” shows the time elapsed from beginning of the measurement. “ P_{jXmin} ” and “ P_{jYmin} ” show the minimum ID numbers and “ P_{jXmax} ” and “ P_{jYmax} ” are maximum ID numbers of plastic scintillator strips that are output from the j -th muon detector (X and Y planes). The allocation of ID numbers (j) is shown in Fig. 1.3.

Time,	P_{1Xmin} ,	P_{1Xmax} ,	P_{1Ymin} ,	P_{1Ymax} ,	P_{2Xmin} ,	P_{2Xmax} ,	P_{2Ymin} ,	P_{2Ymax}
1675739006624,	3,	3,	4,	4,	4,	4,	6,	6,

Table 1.1 (cont.):

P_{3Xmin} ,	P_{3Xmax} ,	P_{3Ymin} ,	P_{3Ymax} ,	P_{4Xmin} ,	P_{4Xmax} ,	P_{4Ymin} ,	P_{4Ymax} ,
4,	4,	7,	7,	5,	5,	9,	9

Table 1.1 (cont.):

P_{5Xmin} ,	P_{5Xmax} ,	P_{5Ymin} ,	P_{5Ymax} ,	P_{6Xmin} ,	P_{6Xmax} ,	P_{6Ymin} ,	P_{6Ymax} ,
5,	6,	10,	11,	5,	5,	12,	12

1.5. 本論文の構造

本論文は①本研究の歴史的・技術的背景（本章），②開発したソフトウェアの内容（第2～5章），そして③開発したソフトウェアを2014年-2015年の桜島火山の噴火活動に対して適用した結果とその議論（第6章）の3本柱によって構成されている。本研究を行う上で用いた方法の詳細や既発表データのコンパイル結果およびソフトウェアのソースコードは付録にまとめた。

本論文の主たる部分を占めるソフトウェアの開発については，（第2章）ミュオグラフィ観測装置から出力されるミュオン検出データを解析してミュオグラフィ1次データ（ミュオグラム）に変換するフロントエンド解析モジュール，（第3章）ミュオグラムを解析して平均

密度の空間分布（ミュオグラフ）に変換するバックエンド解析モジュールおよび(第4章)ミュオンフラックスを数値モデリングするシミュレーターモジュール，そして(第5章)活動的火山のミュオグラフィ観測で解析を補助する噴火イベントセクターモジュールおよび解析結果の可視化を行うモジュールで構成されている。

第2章 フロントエンド解析モジュール

2.1. 背景

Fig. 1.1 に示されるように、対象ボリウム透過後のミュオンフラックスは、ミュオンの透過経路に沿った物質の平均密度と経路長との積（密度長）の関数として減衰する。よって、対象ボリウム透過後のミュオンの数を到来方向ごとにまとめあげ、2次元ヒストグラムにすることで、方位角（ ϕ ）、仰角（ θ ）の角度空間に対象ボリウムの透視撮像図を作ることができる。この2次元ヒストグラムは、（ ϕ, θ ）空間におけるミュオグラムと呼ぶ。ミュオグラムは、X線レントゲン写真に相当し、対象の外形と内部構造の両方の影響を受けた透過強度の濃淡で表される。

第1章で示したように、宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルは仰角に依存するが、方位角にはほぼ依存しない⁴。そのため、対象ボリウムが存在せず空が見通せている場合のミュオグラム（オープンエアのミュオグラムと呼ぶ）は方位角方向に一様となり、仰角とミュオグラム明度⁵は正に相関するはずであるが、実際得られるミュオグラムはそうならない。これは、ミュオグラフィ観測装置の持つ幾何学的構造に基づく、仰角 θ 、方位角 ϕ 方向に依存するアクセプタンス⁶が存在するからである。例として、Fig. 2.1 に実際の観測で得たオープンエアのミュオグラムを示す。これには、第3章で詳説するミュオグラフィ観測装置の有感面積と立体角の積で求まるアクセプタンスの効果が反映されている。

⁴ 地磁気の影響を受けるため東西方向から到来するミュオンフラックスに非対称性が生じるが、高エネルギーミュオンではその影響は無視できるほど少ない(Tsuji *et al.* 1998)。

⁵ ここではミュオグラムとして記録されたミュオン数の大小を写真（フォトグラフ）に例えて明度と呼ぶ事にする。

⁶ ミュオグラフィ観測装置の有感面積(cm^2) \times 立体角(sterad: sr)。詳細は付録Bを参照。

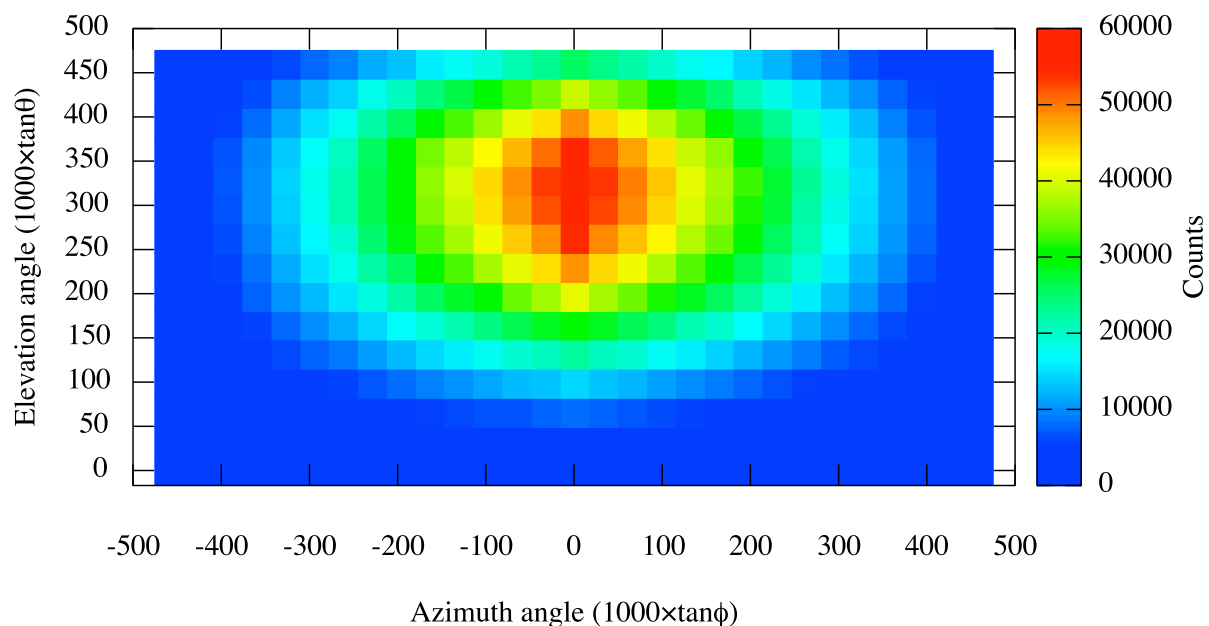


Fig. 2.1: Example of an open-air muogram observed in an angular space of azimuth (ϕ) and elevation (θ) angles. The geometrical acceptance of the muography telescope is reflected in this image.

ミュオグラフィ観測装置とミュオン生成点（典型的には標高 10～20 km の地球大気上層部）の間に対象ボリウムが存在する場合、観測して得られるミュオグラムはオープンエアのミュオグラムから変化する。この変化は、一部のミュオンが対象ボリウムを通過しきれずに停止し、観測されるミュオン数が減少、すなわちミュオグラム明度の低下として現れる。対象ボリウム内部の密度構造（密度の空間分布）が一様の場合には、ミュオンの透過経路が長いほど、その方向のミュオグラム明度⁷は低下する。

1.4 節で述べた実験セットアップを用いることで、設定したデータ取得時間間隔 (Δt) ごとに、ミュオグラムが以下のフォーマットで出力される。(1 列目) ミュオンのイベントが記録された時刻 (t) (単位: ns), (2 列目以降) ミュオンを検出したミュオン検出器の番号を i , シグナルを出力したシンチレーションカウンターの番号を j として、各ミュオン検出器におけるミュオンの反応点の位置座標 (x_i, y_i) の最小値, 最大値が P_j として出力される

⁷ 光学写真の明度は光子数の大小に依存することのアナロジーとして、ミュオグラムの明度はミュオン数の大小に依存する、と本論文では表現する。

(Table 1.1) . シグナルを検出しなかった検出器は null を出力する (Table 1.1 では空文字列) . あるミュオンイベントに対して, 反応点の位置座標 (x_i, y_i) の最小値と最大値が共に同一番号であった場合, そのミュオン検出器において 1 組の直交するプラスチックシンチレータストリップでのみミュオンが検出されたことを意味する. 以上の情報を計算機上で処理し, 自動的にミュオグラムを生成するソフトウェアがフロントエンド解析モジュールのミュオグラム生成部である. 以下の節ではミュオグラムを生成するアルゴリズムについて説明する.

2.2. ミュオグラム生成部

ミュオグラム生成部は, 第 1 章で述べた実験セットアップから出力されるミュオンイベントの時刻 t と反応点の位置座標 (x_i, y_i) からミュオグラムを生成する. ミュオグラムは, あらかじめ決めた角度範囲 $(\pm\Delta\theta, \pm\Delta\phi)$ (ただし, 観測装置の角度分解能の倍数) をビン幅とする仰角 (θ) , 方位角 (ϕ) の角度空間における 2 次元ヒストグラムに記録されたミュオン数の分布である. ミュオグラム生成のためには, ミュオンの飛跡を決定する (トラッキング) 必要がある. 各ミュオンイベントについてトラッキングを行うことで, ミュオグラフィ観測装置に入射したミュオンの方向 $(\theta\pm\Delta\theta, \phi\pm\Delta\phi)$ を決定し, 2 次元ヒストグラム内で入射方向に対応するビンのミュオン数を 1 ずつ増やしていくことで, ミュオグラムが生成される. 本研究では, 以下のトラッキングアルゴリズム (R 法) を考案した (付録 D.1) .

1. トラッキング条件設定. Fig. 1.3 に示されるミュオグラフィ観測装置において, トラッキングに用いるミュオン検出器 (定義については 1.4 節参照) および反応領域の数を決める. ここで, 反応領域は, 信号を出力した X 方向と Y 方向のプラスチックシンチレータストリップが交差する部分である⁸. 本アルゴリズムではトラッキング条件として設定する「ミュオンの同時検出判定に用いるミュオン検出器の番号 i 」は 1~6 のうち好きな組み合わせを選ぶことができる (例: $i = (1, 4, 6)$ や $(1, 2, 3, 4, 5, 6)$) が, トラッキングに用いるミュオン

⁸ 実際の位置決定においてはプラスチックシンチレータストリップの幅 (Δx) に相当する不確定性を持つが, ここではプラスチックシンチレータストリップの交差部がミュオン検出器全体の有感面積に比べて十分小さい ($\sim 1/200$) ことから点と近似できる.

検出器が多いほど、偶発的な同時計数によってミュオンの飛跡として誤認識する確率を抑えられることが報告されている (Tanaka *et al.* 2014).

2. ミュオンの飛跡 (トラック) の直線性判定. 最上流 (Fig. 2.2 において detector #1) と最下流 (Fig. 2.2 において detector #6) のミュオン検出器における反応領域の中心 (ここでは、プラスチックシンチレータストリップの幅 (Δx) を 1 辺とする正方形の中心とし、反応点と呼ぶこととする) 同士を結んだ直線 (仮トラック) を引く. その直線と最上流と最下流以外の複数のミュオン検出器 (リダンダント検出器) の交点を中心とした半径 R の円を描き、リダンダント検出器における反応点はその円の内側にあるかの判定を行う. 判定は、上記条件 1 で設定した「ミュオン検出器の番号 i 」の組み合わせに対して行う. ここで R は自由に設定できる (Fig. 2.2) .

3. ミュオグラムの生成. トラッキング条件で設定した全リダンダント検出器の反応点だが、すべて仮トラックから半径 R の円の内側にある場合、仮トラックの入射角度を最上流と最下流のミュオン検出器の位置座標 (x_i, y_i) から求め、対応する仰角 θ , 方位角 ϕ のビンのミュオン数を 1 増やす.

上記の 1~3 の工程を、検出した全てのイベントに対して行い、仰角 θ , 方位角 ϕ の角度空間における 2 次元ヒストグラムを生成する (ミュオンイベントセレクション). トラックの直線性判定において、最も厳しい条件は $R = 1$, 直線性を一切問わない条件は $R = \infty$ である.

本トラッキング方式 (R 法) は先行研究で取り入れられたトラッキング方式 (最小二乗法) (Fig. 2.3) と比較して、最適値の探索を行う必要がない分大幅に計算コストを削減できる (1000 万本の飛跡解析について解析にかかる時間は数秒以下⁹). しかし、実際のミュオン到来方向と R 法により再構築されたミュオンの到来方向が大きく異なる事になれば、この方式を低雑音型ミュオグラフィの解析ソフトウェアのトラッキングアルゴリズムとして取り入れる事は不可能である. そのためにモンテカルロシミュレーションを用いて、実際のミュ

⁹ 使用した計算機は MacBook Air (Core i5 1.6 GHz (dual core), RAM 4 GB) である. 一方, Python の外部モジュール Scipy を利用した Levenberg-Marquardt 法では 1000 万本の飛跡解析に対して 5 時間の計算時間.

オン到来方向と R 法により再構築されたミュオンの到来方向の比較を行った。シミュレーション方法は以下の通りである。

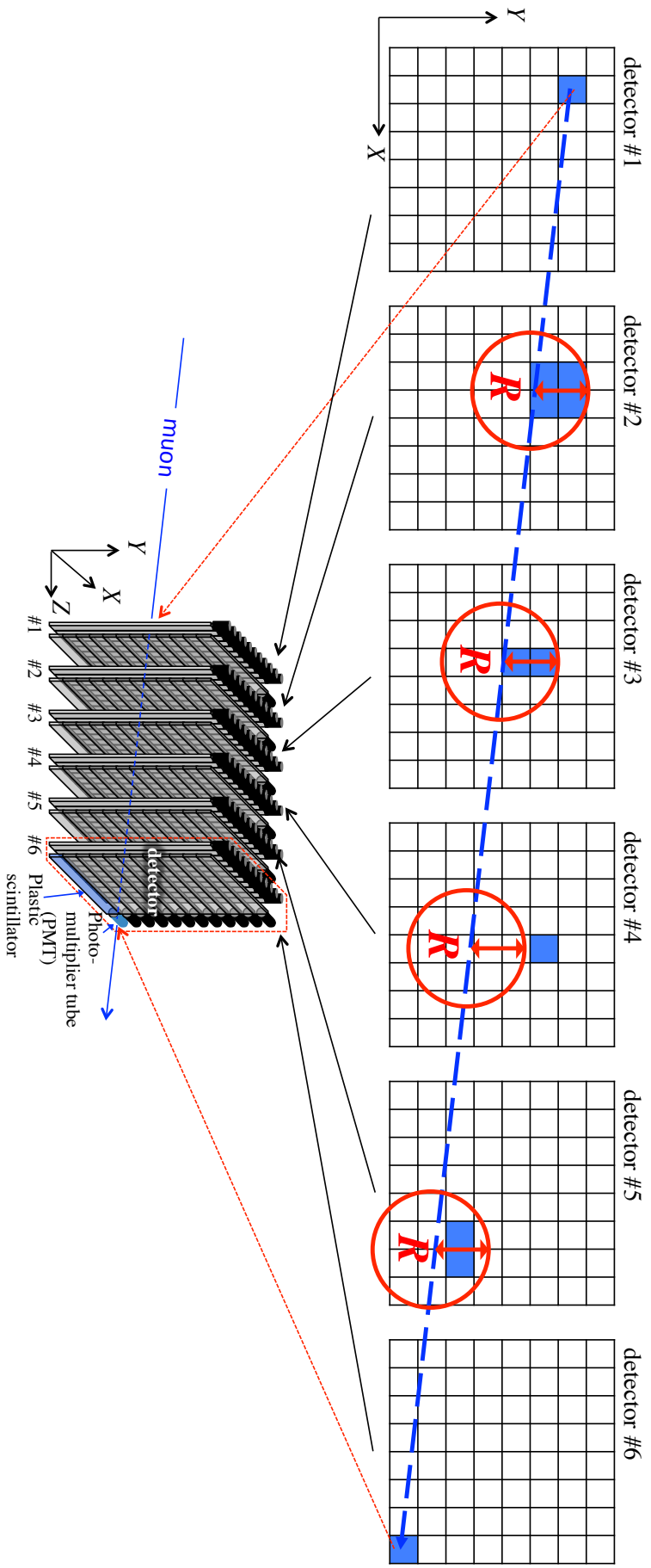


Fig. 2.2: Principle of the R-method. Blue-colored squares show the area surrounded by the minimum and maximum ID numbers of X - and Y -arrayed plastic scintillators that are shown in Table 1.1.

Fig. 1.3 に示されるように、真空中にミュオン検出器を 6 台配置し、最上流のミュオン検出器の中心から $\tan\phi, \tan\theta$ がそれぞれ ± 0.6 の範囲内でランダムな角度でミュオンを入射した。ミュオン伝搬に際して、ミュオンエネルギー損失、ミュオン崩壊は無視した。Fig. 2.4 に入射したミュオンイベント数の角度分布を示す。仰角、方位角方向ともに一様に入射したので、統計精度の範囲内で一様に分布している様子がわかる。

次に入射したミュオンと 6 台各々の検出器の交点をもとに、R 法を用いてミュオン飛跡の再構築を行った。用いたパラメータは $R = 1$ である。結果を Fig. 2.5 に示す。Fig. 2.6 には Fig. 2.4 と Fig. 2.5 の差分を示す。

Fig. 2.6 より、両者の差分は最大でも 30 程度であり、ミュオン到来方向の再構築における R 方に起因する誤差は最大でも 0.3% 以下で有る事を示す事が出来た。この誤差は現実的なミュオグラフィ観測期間によって得られる 1 ビンあたりのミュオンイベント数（数万イベント程度まで）に付随する統計誤差と比して十分小さな値である。この誤差が発生する要因は、検出器の反応領域が有限の大きさを持つからである。Fig. 2.7 に示すように R 法では検出器の反応領域の中心を反応点と定義しているが、実際の反応点は必ずしも中心だけとは限らない。R 法による誤差を低減させるためには、より位置分解能の良い検出器を用いる必要が有る。

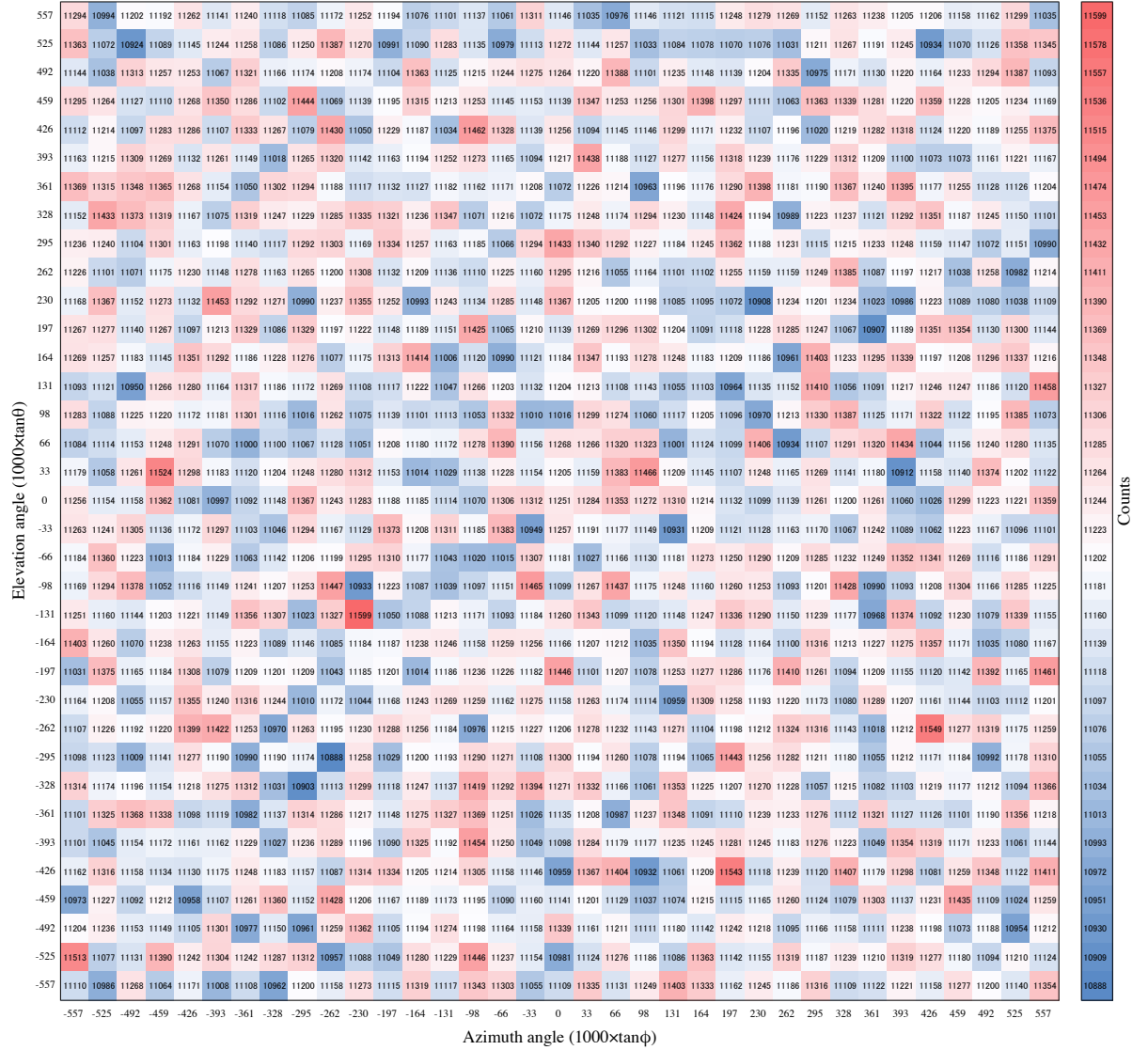


Fig. 2.4: Angular distribution of the muon generated for verification. Muons are generated randomly for each elevation and azimuth. The bin width of this 2-D histogram is 33 mrad that corresponds to the angular resolution of the muography telescope used in this work. The injection energy of muons is 10 TeV. The total number of injections is 15 millions. The most red and blue bins indicate $+3\sigma$ and -3σ deviations from average, respectively. The total number of bins is 1225.

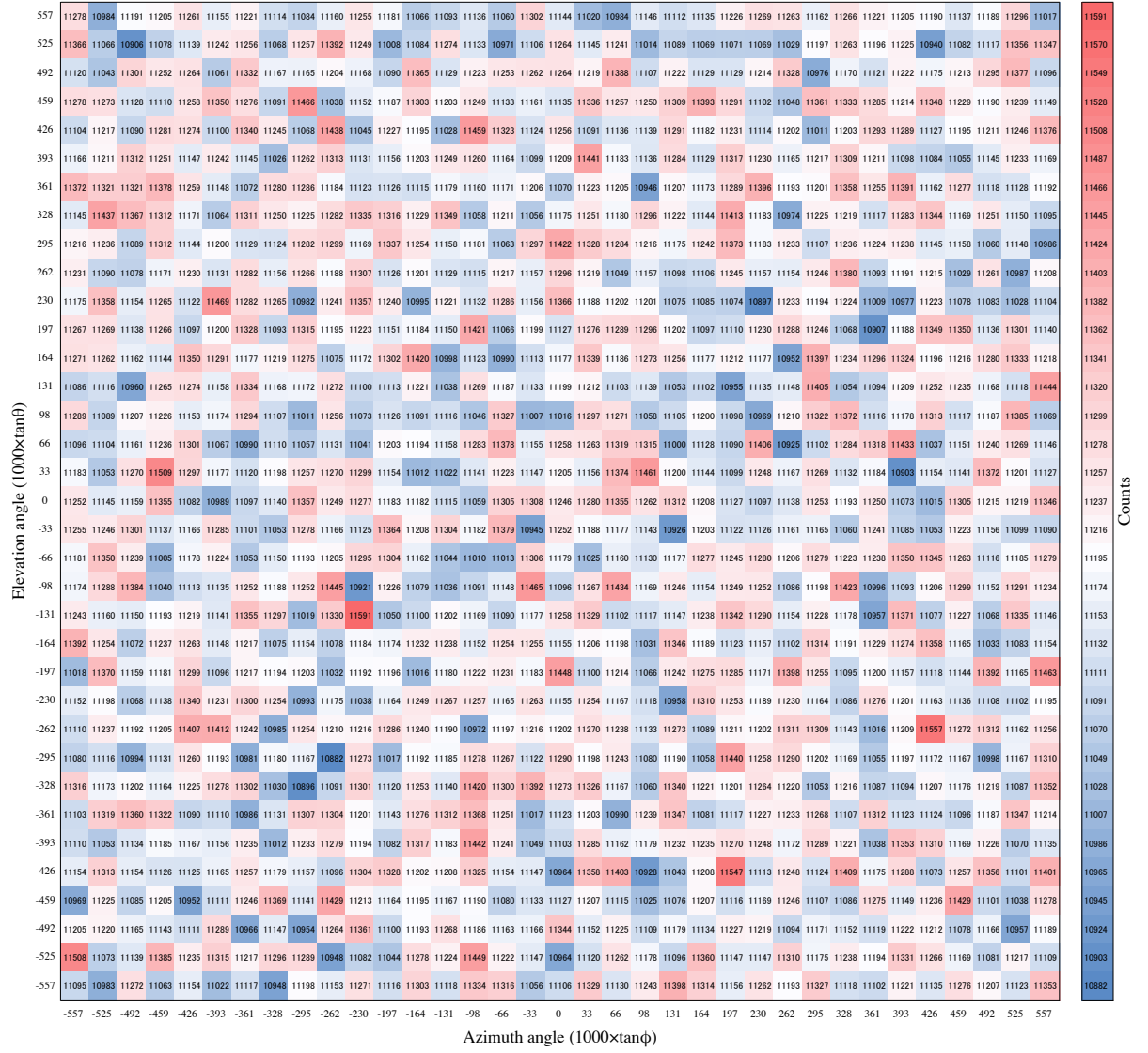


Fig. 2.5: Reconstructed angular distribution with the R-method. The bin width of this 2-D histogram is 33 mrad that corresponds to the angular resolution of the muography telescope used in this work. The most red and blue bins indicate $+3\sigma$ and -3σ deviations from average, respectively. The total number of bins is 1225.

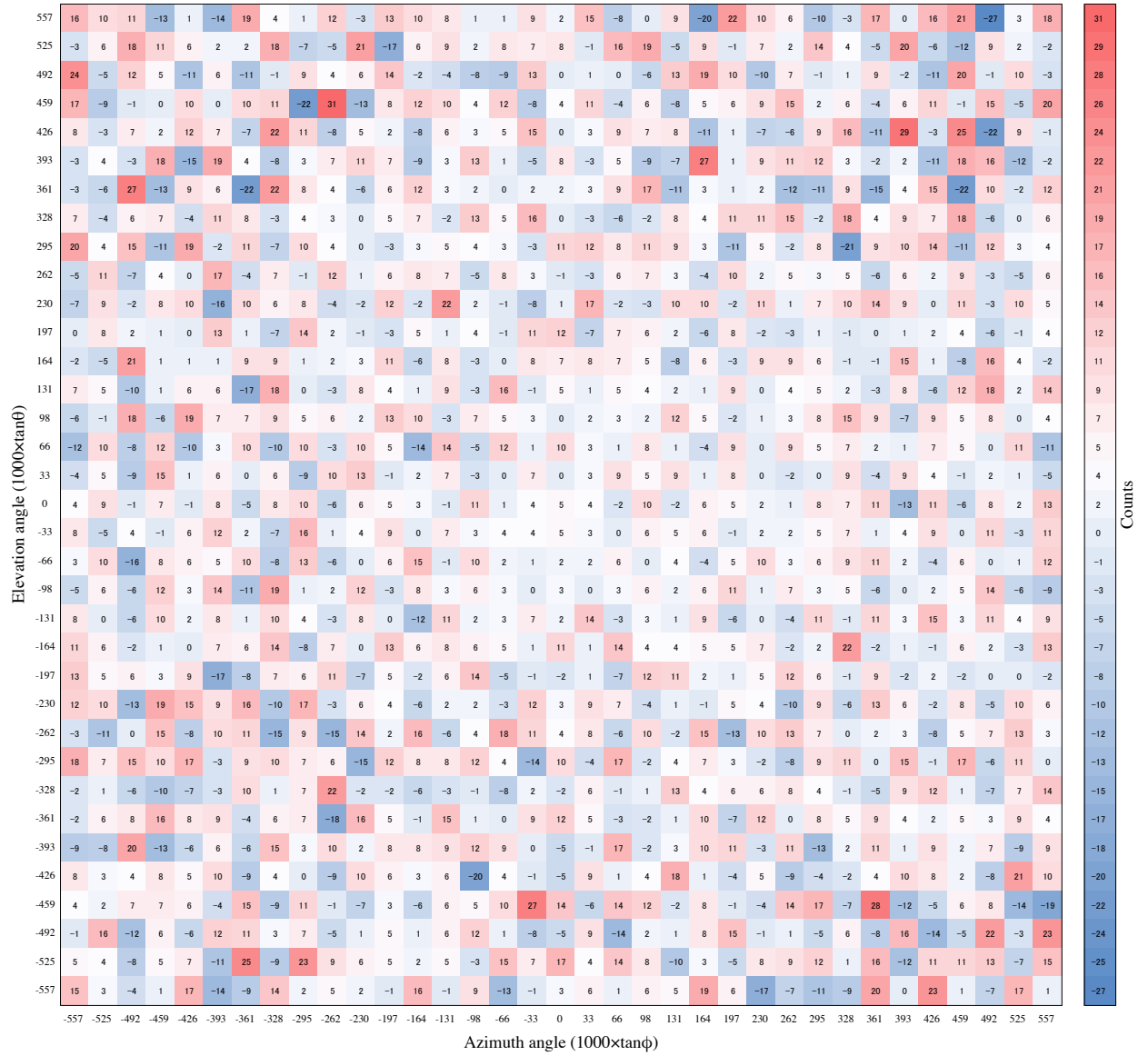


Fig. 2.6: Track reconstruction error. The angular distribution in Fig. 2.4 was subtracted by the reconstructed distribution in Fig. 2.5.

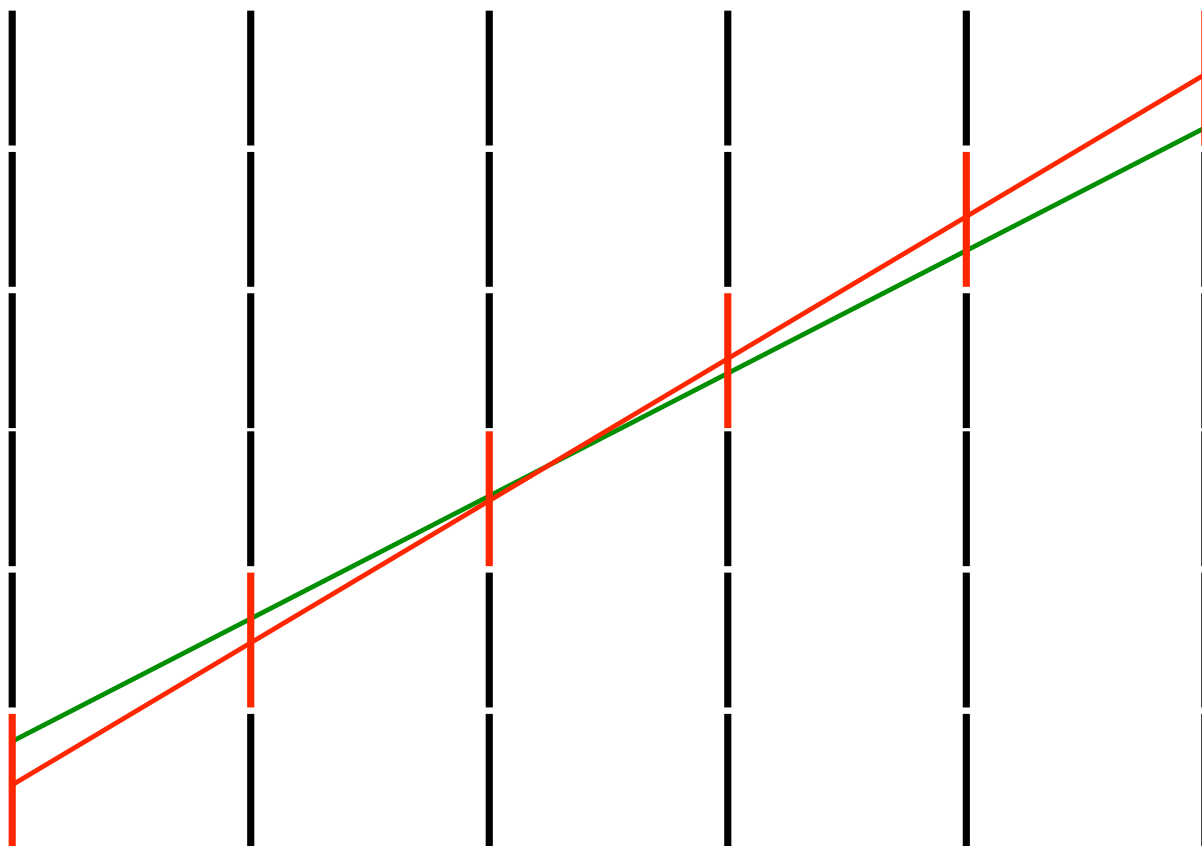


Fig. 2.7: Muon path and 6 muon detectors. In comparison to the original muon path (green) and the reconstructed muon path (red) are shown.

以下では、実験に用いたミュオグラフィ観測装置 (Tanaka *et al.* 2014) に組み込まれている鉛遮蔽体も考慮して、R 法と従来から用いられている最小二乗法による直線フィッティング (Menichelli *et al.* 2007) を比較する。本観測装置に組み込まれている鉛によって、数 GeV 程度の比較的低いエネルギーのミュオンは散乱されうるので、R 法でのトラッキングによる角度分解能と最小二乗法による直線フィッティングでのトラッキングによる角度分解能を比較する。そこで、物質内での粒子伝播のモンテカルロシミュレーションツール Geant4 (Agostinelli *et al.* 2003) を使い、ミュオグラフィ観測装置 (Tanaka *et al.* 2014) で用いられる鉛遮蔽体に相当する厚みを持った鉛 (厚さ 100 mm) を、ミュオン検出器に見立てて等間隔 (610 mm) に配置した 6 つの境界の間に配置した。鉛以外の空間は真空とした。この仮想ミュオン検出器は、ミュオンが散乱しても検出器面内におさまるよう、実際の観測に用いられたミュオン検出器よりも十分大きい面積 ($x \times y = 10 \times 10 \text{ m}^2$) に設定した。この仮

想的な観測装置に、最上流のミュオン検出器の中心からランダムな入射角（方位角、仰角ともに、それぞれ -0.20 ± 0.05 rad の範囲内）で、ミュオンエネルギースペクトル（Jokisch *et al.* 1979）に従ってミュオンを入射した。入射したミュオンの飛跡をトラッキングするために、まず、仮想ミュオン検出器が実際の観測装置の位置分解能 $\Delta x = 10$ cm を持つと仮定して離散化したミュオンの反応点の位置座標 (x_i, y_i) ($i = 1 \sim 6$) を得た。得られた反応点の位置座標に、最小二乗法による直線フィッティングと R 法（パラメータ $R = 10$ cm）をそれぞれ適用した。最小二乗法の実行においては、 x 方向について、 $\chi_x^2 = \sum_{i=1}^6 [\delta x_i^2 / \sigma_{xi}^2]$ が最小となるような到来方位角 ϕ を求めた。ここで、 δx_i は、 i 番目のミュオン検出器における反応点の位置座標 x_i とフィッティング直線に基づいた i 番目のミュオン検出器における位置座標 \hat{x}_i の x 方向の差分を表す。 σ_{xi}^2 は、 i 番目のミュオン検出器における反応点の x 方向の位置分解能を表す。本研究では、最小二乗法によるフィッティングで、6 つの反応点の位置座標から 2 つのパラメータ（直線の傾きと切片）を推定したため、反応点の座標とフィッティングで得た座標の距離（残差）の重み付き二乗和が自由度 4 の χ^2 分布に従うと考えた。また、ミュオンの鉛遮蔽体内の散乱異方性は無視できるため、 χ_x^2 と χ_y^2 は同じ分布になると期待できる。したがって、以下では χ_x^2 値を自由度（ndf = 4）で除した χ_x^2/ndf で議論を行う。

Fig. 2.8 にはミュオン 100000 イベントの入射に対して、R 法と最小二乗法によるフィッティングによりトラッキングできたイベント数を、 χ_x^2/ndf の上限値の関数として示した。 χ_x^2/ndf の上限値は低いほど直線性の良いイベントを抽出していることにはなるが、 χ_x^2/ndf の上限値を 0.8 とした場合には、トラッキングできるイベント数が 7 割程度に落ちており、角度決定精度が良くなるかわりに検出効率が 3 割程度低下してしまうことを意味している。この角度決定精度については、次に、ミュオンの散乱角度の標準偏差で議論する。

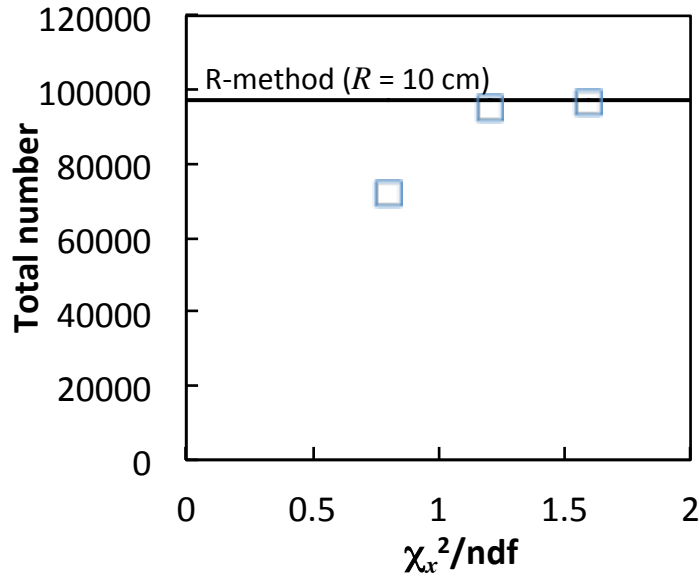


Fig. 2.8: Total number reconstructed by least square methods as a function of reduced chi-square value ($\text{ndf} = 4$) with lead shields. The horizontal line represents the total number reconstructed by R-method ($R = 10$ cm) .

Fig. 2.9-Fig. 2.12 は、R 法と最小二乗法による直線フィッティングでそれぞれセレクションされた全てのミュオンイベントのうち散乱イベント¹⁰として誤ってトラッキングされるイベントの割合を示している。Fig. 2.9 (R 法) , Fig. 2.10-Fig. 2.12 (最小二乗法) の縦軸は、散乱割合である。散乱角度の標準偏差は、R 法と最小二乗法に対してそれぞれ 42 mrad ($R = 10$ cm; Fig. 2.9) , 34 mrad ($\chi^2_x/\text{ndf} \leq 0.8$; Fig. 2.10) , 38 mrad ($\chi^2_x/\text{ndf} \leq 1.2$; Fig. 2.11) , 41 mrad ($\chi^2_x/\text{ndf} \leq 1.6$; Fig. 2.12) と求まった。これら標準偏差をまとめた図を Fig. 2.13 に示した。Fig. 2.13 に示されているように、R 法 ($R = 10$ cm) の角度決定精度は、 $\chi^2_x/\text{ndf} \leq 1.6$ のときの最小二乗法による直線フィッティングと同等である。一方、 χ^2_x/ndf が小さいと角度決定精度は良くなるが、トラッキングできるイベント数が減るという問題がある。

¹⁰ シミュレーションで、ミュオンを入射した角度からのずれを、ここでは散乱角と定義する。ただし、散乱角が検出器の角度分解能の範囲内であれば、直線と判定される。ここでは、角度分解能を超えて、直線から外れたイベントを散乱イベントと定義することとする。

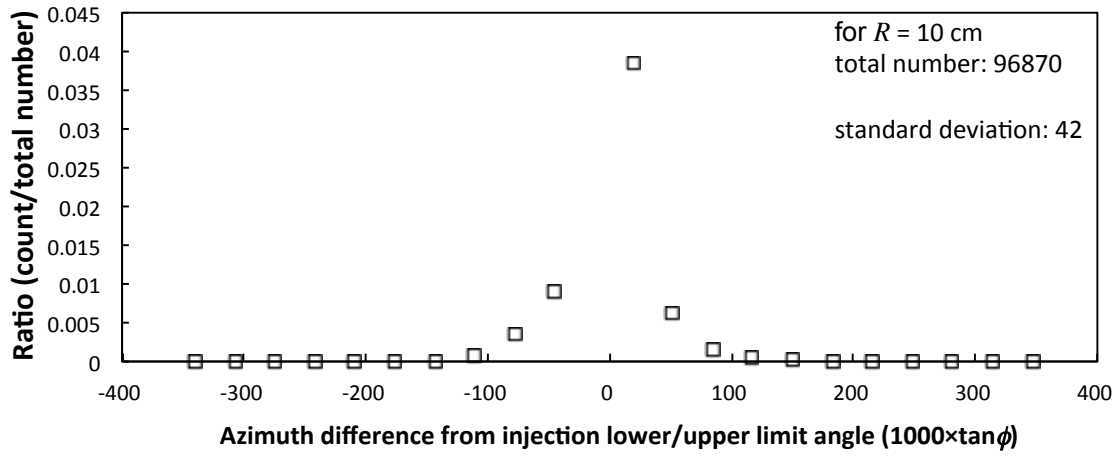


Fig. 2.9: Ratio of mistracked scattering-event count to total number reconstructed by R-method for $R = 10$ cm as a function of azimuth difference from lower limit angle (negative) or upper limit angle (positive) of injection with lead shields. The standard deviation of data are shown in unit of $1000 \times \tan(\text{angle})$.

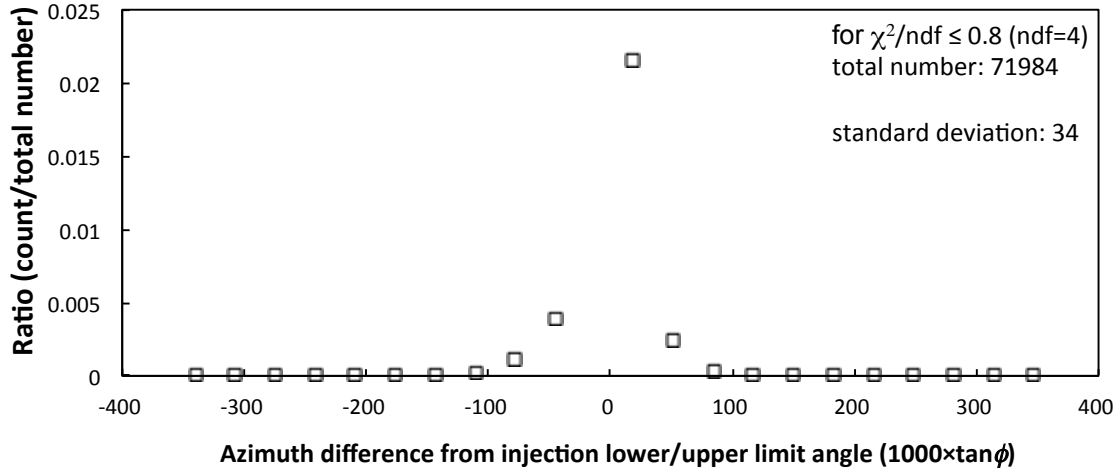


Fig. 2.10: Ratio of mistracked scattering-event count to total number reconstructed by least square methods for reduced chi-square value ≤ 0.8 (ndf = 4) as a function of azimuth difference from lower limit angle (negative) or upper limit angle (positive) of injection with lead shields. The standard deviation of data are shown in unit of $1000 \times \tan(\text{angle})$.

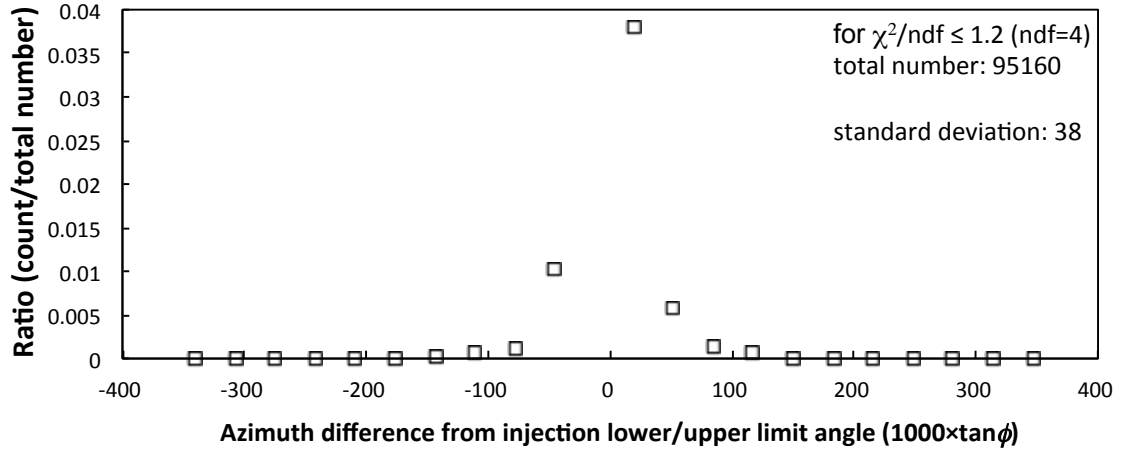


Fig. 2.11: Ratio of mistracked scattering-event count to total number reconstructed by least square methods for reduced chi-square value ≤ 1.2 (ndf = 4) as a function of azimuth difference from lower limit angle (negative) or upper limit angle (positive) of injection with lead shields. The standard deviation of data are shown in unit of $1000 \times \tan(\text{angle})$.

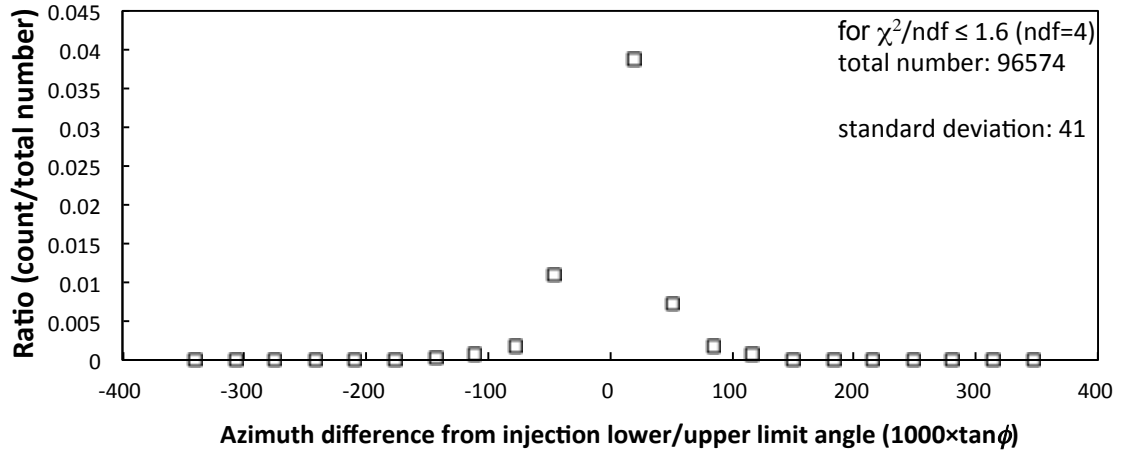


Fig. 2.12: Ratio of mistracked scattering-event count to total number reconstructed by least square methods for reduced chi-square value ≤ 1.6 (ndf = 4) as a function of azimuth difference from lower limit angle (negative) or upper limit angle (positive) of injection with lead shields. The standard deviation of data are shown in unit of $1000 \times \tan(\text{angle})$.

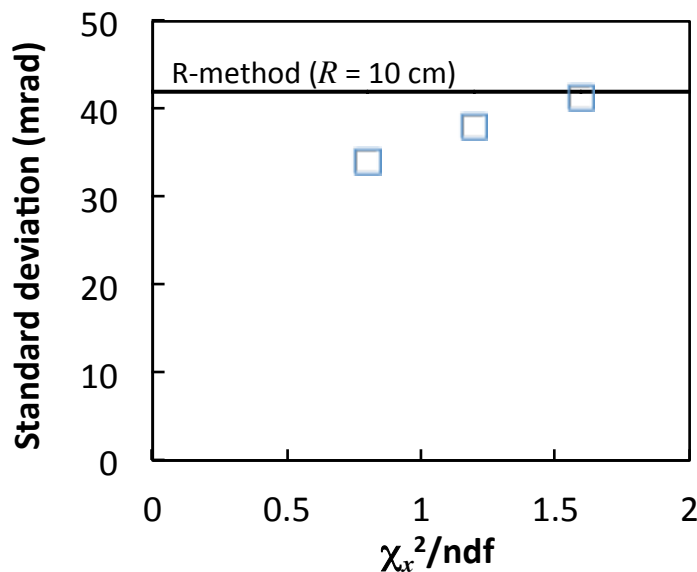


Fig. 2.13: Standard deviation of azimuth difference from the injection angle reconstructed by least square methods as a function of reduced chi-square value ($\text{ndf} = 4$) with lead shields. The horizontal line represents the standard deviation of azimuth difference from the injection angle reconstructed by R-method ($R = 10$ cm).

仮に将来、ミュオグラフィ観測装置の大口径化が図られると、単位時間に記録されるミュオンイベント数が増加し、その結果解析に要する計算コストが増大する。従って、トラッキング速度の高速化はこの時点で検討すべき重要事項である。以上で述べた結果より、今回用いた実験セットアップにおいては、R法によるミュオン飛跡再構築法による誤認率は6%程度（Fig. 2.9）、従来の最小二乗法（ $\chi^2_x/\text{ndf} \leq 0.8$ ）による誤認率は3.5%程度（Fig. 2.10）と、いずれも十分に小さかったことから、本研究開発においては、より解析時間の短いR法を採用することにした。

2.3. ミュオグラム連結部

宇宙線ミュオンのフラックスは人為的にコントロールすることができないため、観測装置の有感面積を増大させる事で実用的なミュオグラフィ観測が可能となる。しかし、ミュオグラ

フィ観測装置の有感面積が常に十分で有るとは限らないため、観測者が要求するデータ取得時間間隔 Δt では、統計的に意義のあるミュオグラムが取得できない場合が有る。本研究では、ユーザーがミュオグラムを生成したい期間について開始時刻と終了時刻を指定することで、2.2節で生成したミュオグラムのビンごとのミュオン数を足し合わせるミュオグラム連結部を開発した。ミュオグラム連結部を用いることで、対象ボリウム内部の密度構造の変化の度合いに即してビンあたりのミュオン数が統計的に有意な数になるまでミュオグラムを足し合わせ、ミュオグラフィイメージにおいて解析に最適な時間間隔（露光時間） Δt の見当をつけることが可能になる。

さらに、本研究ではミュオグラム連結部を活動的火山観測に特化させるため、別途作成する噴火時刻リスト（time table）を組み合わせることで、噴火前後 t 時間について対象ボリウムの特定の領域を透過してきたミュオン数を足し合わせる機能を持たせた。ここで、噴火時刻リストとは、噴火年月日と時刻が「Year/Month/Day Hour:Minute」のフォーマットで書き込まれたテキストリストである（詳細は第5章を参照）。上記噴火間隔（ t ）は、ユーザーが自由に入力できる。

このようにして連結された（足し合わせられた）ミュオグラムはミュオグラフィイメージを作成するために基本となる画像であり、生成されたミュオンイベント数のマトリックスは次章で示すバックエンド解析モジュールへと渡される。

第3章 バックエンド解析モジュール

3.1. 背景

第2章で述べたように、ミュオグラムは幾何学的な外形状と内部密度構造の情報が縮退している対象ボリユームの投影図である。バックエンド解析モジュールは、ミュオグラムから対象ボリユームの外形情報を取り除き、ミュオグラフィ画像（ミュオグラフ）を作成する機能を持っている。対象ボリユームが存在しない場合のミュオンフラックス、すなわちオープンエアのミュオンフラックスとあるエネルギーのミュオンが透過できる物質の密度長の関係は、先行研究の結果を用いると精度良く計算できて（1.2 節参照）、対象ボリユームの外形は地形図や設計図などから定量的に分かる場合が多いので、密度を仮定した対象ボリユームを透過するミュオンフラックスは計算機上でシミュレートできる。そのため、観測装置の幾何学的構造に強く依存する「ミュオンイベント数」よりは、それを取り除いた形で「ミュオンフラックス」を用いるほうが便利である（詳細は第4章参照）。ミュオンフラックスは、1.4 節で述べた実験セットアップの幾何学的構造から計算できるミュオグラフィ観測装置のアクセプタンスを用いる事で、ミュオグラムから導出できる。計算機でシミュレートされたミュオンフラックスと実際測定されたミュオグラムから導出されたミュオンフラックスは直接比較することができ、対象ボリユームの外形情報を取り除いた形でミュオグラムを比較できるようになる。この方法は例えば、Heritage Innovation Preservation (HIP) Institute が進めているエジプトピラミッドのミュオグラフィ観測結果の解析（Heritage Innovation Preservation Institute 2016）にも取り入れられている。

ミュオグラムに含まれる対象ボリユームの外形と内部の密度分布の縮退を解く別の方法は、実験セットアップの幾何学的なアクセプタンスでミュオグラムをミュオンフラックスに変換し、さらに Fig. 1.1 の関係を用いて、ミュオンの経路に沿った密度長（コラム密度）に変換することである。一旦密度長が求めれば、地形図などの外形情報から求められる「ミュオンの経路長」を用いて、ミュオンの経路に沿った平均密度を求められるからである。ミュオンの経路に沿った平均密度という物理量は、あまりなじみのない物理量のため、ミュオンフラックスのような物理量より分かりにくい場合があるが、ミュオグラフとして1枚の画像

にまとめられる長所があるために、これまでのミュオグラフィ研究で頻繁に用いられてきた (Tanaka *et al.*, 2007, 2009; Lesparre *et al.*, 2012). このようにして生成された仰角 (θ), 方位角 (ϕ) の角度空間におけるミュオンの経路に沿った平均密度の 2 次元分布を、ミュオグラフあるいはミュオグラフィ画像と呼んでいる.

以下では、今回開発したバックエンド解析モジュールを構成する「ミュオグラム-ミュオンフラックス変換部」「ミュオンフラックス-ミュオグラフ変換部」について述べる.

3.2. ミュオグラム-ミュオンフラックス変換部

ミュオグラム-ミュオンフラックス変換部は、観測された仰角 (θ), 方位角 (ϕ) ごとのミュオン数とその角度に対応するミュオグラフィ観測装置のアクセプタンスおよび観測時間を入力することで、ミュオンフラックスおよびその統計誤差を計算する. 具体的には、(A) ミュオン数、(B) 観測時間、(C) ミュオグラフィ観測装置の幾何学的アクセプタンスの 3 つの量を入力値とし、各ビンのミュオン数と幾何学的アクセプタンスに対応した (1) ミュオンフラックス¹¹および (2) 統計誤差の上限値・下限値を出力する (Feldman and Cousins 1998). ここで、ミュオンの計数がポアソン分布に従うことがよく知られていることから (竹上ら 2013), ミュオンの計数値の統計誤差としては、少数の計数でも取り扱えるように Feldman and Cousins (1998) によりテーブル化されている値を用いた. ミュオグラフィ観測装置の幾何学的アクセプタンスは、ミュオンの入射する仰角 (θ), 方位角 (ϕ) に依存する有感面積 (S), およびプラスチックシンチレータストリップの幅 (Δx) と最上流と最下流のミュオン検出器間の距離 (l) により得られる対象ボリウムを見込む立体角 (Ω) との積で決定される. ここで、本論文ではこのアクセプタンスを ($S \times \Omega$) と定義する¹².

本研究では、ミュオグラムからミュオンフラックスへの変換のために、アクセプタンスの自動計算サブルーチンを開発した. アクセプタンスの計算の詳細は付録 B を参照のこと.

¹¹ ミュオンフラックスの単位は $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

¹² アクセプタンスの単位は $\text{cm}^2 \text{ sr}$.

(1) 有感面積

(A) ミュオンのトラッキングに利用するプラスチックシンチレータストリップの総面積を計算する。ミュオンの入射方向がミュオン検出器の面の法線方向からずれるほど、トラッキングに利用できるプラスチックシンチレータストリップの本数が減少する。

(B) トラッキングされたミュオンの入射方向（最上流と最下流のミュオン検出器における反応点同士を結んだ直線方向）とミュオン検出器の面の法線方向がなす角 ϕ を用いて $\cos\phi$ を計算する (Fig. 3.1)。

(C) (A) と (B) を乗ずることで、有感面積を導出する。

(2) 立体角

(A) 最下流のミュオン検出器のグリッド¹³中心から最上流のミュオン検出器のグリッドの面積を見込む立体角を計算する。

(1) と (2) を乗ずることで、ミュオグラフィ観測装置の幾何学的アクセプタンスを導出する。

¹³ ここでグリッドとはX方向とY方向に配列したプラスチックシンチレータストリップが重なっている部分のことをいう。

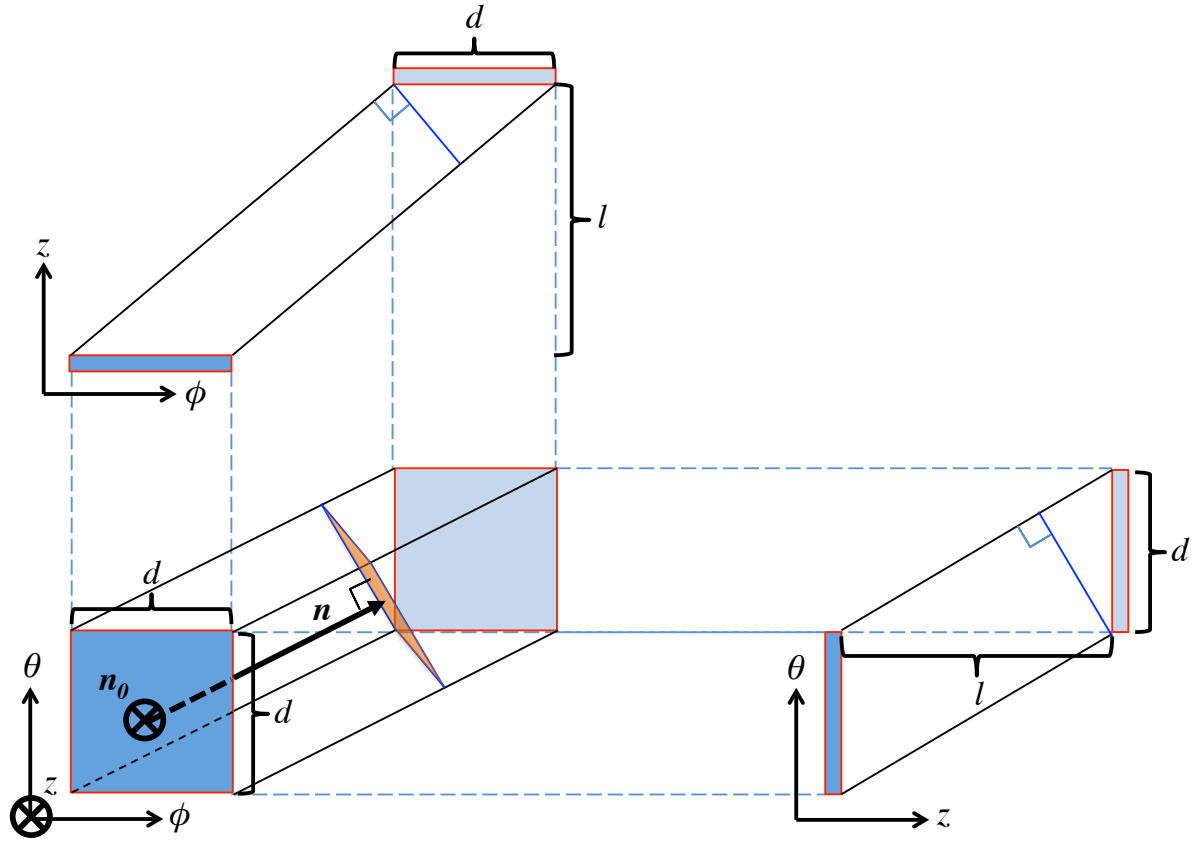


Fig. 3.1: Schematic view of an effective area of a muon detector.

統計誤差の計算法については、20 以下の少数統計に対しては、Feldman and Cousins (1998)による誤差計算法を採用した。Feldman and Cousins (1998)は、ポアソン分布の少数統計に対する統計誤差の上限値・下限値の両方を表にしており、ポアソン過程にしたがうと考えられるミュオンイベントもこの表に従うと考えた。

アクセプタンス $A(\theta, \phi)$ が計算できれば、ミュオグラム内の各ミュオン数をアクセプタンスと観測時間で除することで、ミュオグラムからミュオンフラックスの2次元ヒストグラムに変換できる。Fig. 3.2 に出力結果例を示す。この変換したミュオンフラックスの2次元ヒストグラムは、第4章の「シミュレーターモジュール」の出力結果と直接比較できる。

3.3. ミュオンフラックス-密度長変換部

各到来方向から対象ボリウムを透過したあとのミュオンフラックスをミュオグラフ、すなわちミュオグラムから外形情報を取り除いた画像に変換するためにまず必要なことは、ミュオンの到来方向ごとにミュオンフラックスを、対象ボリウム内におけるミュオンの経路に沿った密度長に変換することである。それは、いったん密度長が導出されれば、外形情報からミュオンの透過経路に沿った平均密度を求めることが可能だからである。そのためには、

(A) 様々な天頂角（あるいは仰角）において観測されたオープンエアのミュオンのエネルギースペクトル（オープンエアミュオンエネルギースペクトル）、および (B) ある密度長を透過できるミュオンの最小エネルギー（最小透過ミュオンエネルギー）の2つの情報が必要である。

本研究では、オープンエアミュオンエネルギースペクトルについて先行研究の観測結果をデータベース化した（詳細は付録 A を参照）。また、最小透過ミュオンエネルギー (E_c) については、Groom *et al.* (2001) による continuous slowing down approximation range (CSDA range) のモンテカルロシミュレーション計算結果を利用した¹⁴。CSDA range は、あるエネルギーで物質に入射したミュオンが停止するまでに移動できる物質の密度長なので、逆に物質の密度長が与えられれば、その密度長に対応する最小透過ミュオンエネルギーを得られる。CSDA range は、窒素や鉛といった単純な物質からポリマーなどの化合物や地球大気といった混合物まで様々な物質に対してテーブル化されており (Patrignani *et al.* 2016)、岩石を主に構成する化合物 SiO_2 に対しても最小透過ミュオンエネルギーを正確に見積もることができる。ミュオンフラックスから密度長に変換するアルゴリズムは以下のようになる。

¹⁴ このモンテカルロシミュレーションでは、電離損失、制動放射、直接対生成、光核反応によるミュオンエネルギー損失過程が考慮されている。

- (1) オープンエアミュオンエネルギースペクトルを最小透過ミュオンエネルギー E_c 以上について積分して積分ミュオンフラックス $N(E_c)$ のテーブルを作成¹⁵.
- (2) CSDA range $X(E)$ のテーブルを作成.
- (3) (2) を用いて $E_c(X)$ のテーブルを作成
- (4) (3) を (1) の $N(E_c)$ に代入して, $N(X)$ のテーブルを作成.
- (5) (4) を用いて, 3.2 節で得たミュオンフラックスの 2 次元ヒストグラム $N(\theta \pm \Delta\theta, \phi \pm \Delta\phi)$ を CSDA range $X(\theta \pm \Delta\theta, \phi \pm \Delta\phi)$ に変換する.

Fig. 3.3 には, 上記ミュオンフラックス-密度長変換部の流れ図を示す. このようにして出力された $(\pm\Delta\theta, \pm\Delta\phi)$ の 1 ビンごとに示される密度長は, 正確には一般的なコラム密度ではなく, 対象ボリウムをこの角度範囲で切り取り取り出した, 典型的には角錐台状の物体の平均的な密度長を表している. 従って, ミュオンフラックス-密度長変換部により密度長が導出されれば, これを次章で述べる平均経路長で除することで, この角錐台状物体の平均密度が導出される.

¹⁵ 積分ミュオンフラックスとはオープンエアミュオンエネルギースペクトルを最小透過ミュオンエネルギー E_c から ∞ まで積分することで得られる, エネルギーの関数としてのミュオンフラックスである. 単位は $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$. ただし, 実際のオープンエアミュオンエネルギースペクトルのデータベースには 10 TeV 以上のデータが存在しないため, 積分範囲は 10 TeV 以下となる. ミュオンエネルギースペクトルのべき指数の値は-2 を下回っており, 利用するミュオンのエネルギーもおおよそ 1 TeV 程度までであることから, 10 TeV までを積分する場合と 10 TeV を超えて積分する場合で積分ミュオンフラックスの差は小さい.

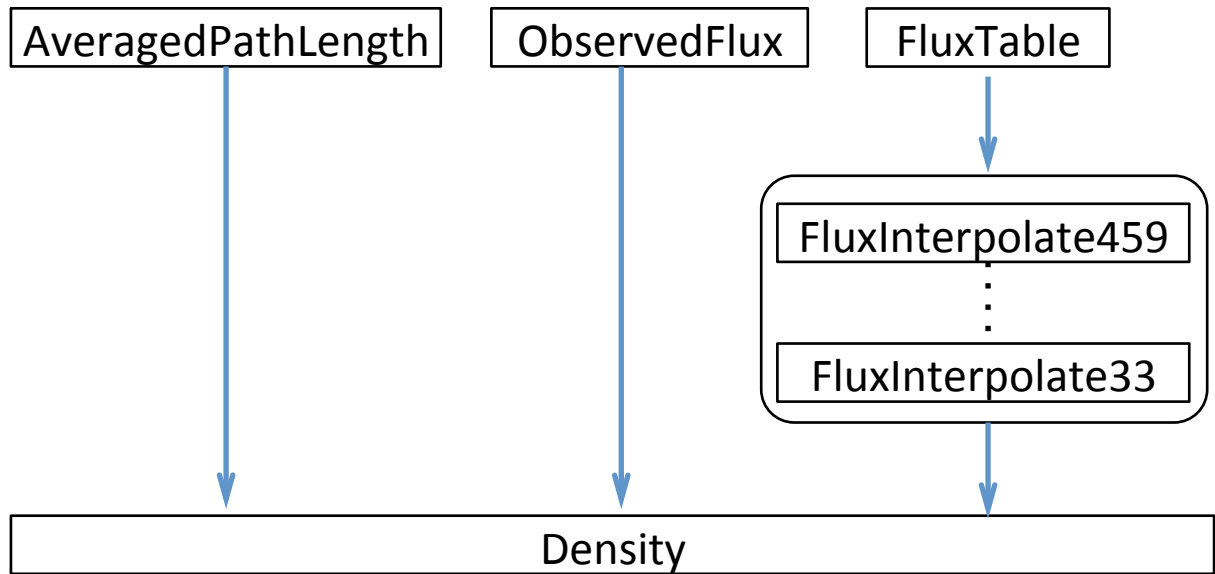


Fig. 3.3: Flow chart of the “muon flux – density length” part. The “AveragedPathLength” is the dataset of the averaged path lengths of the target volume as described in the next chapter. The “ObservedFlux” is the dataset of the muon flux traversing the target volume by the “muogram – muon flux” part as described in the previous section. The “FluxTable” is the dataset of the integrated muon flux ($\text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$) as a function of the path length through the target volume (m.w.e.) and elevation angle (mrad). The “Density” is the dataset of the density length along the muon path.

第4章 シミュレーターモジュール

4.1. 背景

3.3 節のミュオンフラックス-密度長変換部で得られる密度長分布には、対象ボリユームの平均密度情報だけでなく外形情報が縮退している。そのため、外形情報を取り除く必要があるが、3.2 節のミュオグラム-ミュオンフラックス変換部を用いて得られる角度分解能 ($\pm\Delta\theta$, $\pm\Delta\phi$) をビン幅として記録されるミュオンフラックスは、この角度範囲内で様々な経路を通ってきたミュオンフラックスの平均的な値を示している。そのため、このミュオンフラックスを変換した密度長も同様にこの角度範囲内における平均的な値を示す。従って、角度範囲 ($\theta\pm\Delta\theta$, $\phi\pm\Delta\phi$) の中で、1つの角度 (例えば (θ , ϕ)) を代表とした経路長を使って、経路に沿った平均密度を求めるのは不適切である。そのため、角度範囲 ($\theta\pm\Delta\theta$, $\phi\pm\Delta\phi$) の中にある、複数の経路長を平均化した「平均経路長」を定義する。平均経路長は、以下のようにして計算される量である。

(1) 外形情報 (たとえば地形図など) に基づいて、対象ボリユームを透過するミュオンの経路に沿った長さを θ , ϕ の関数 $L(\theta, \phi)$ として求める。このとき、ミュオンの経路は直線を仮定する。経路長を計算する際、角度ステップ ($\delta\theta$, $\delta\phi$) は細かいほうが良いが、対象ボリユームの外形情報の精度に制約される。たとえば、25000 分の 1 地図相当の 10 m メッシュの数値標高モデル digital elevation model (DEM) では、水平精度が 10 m 程度なので、1 km 離れた対象に対しては、10 mrad (1 km 離れたところで 10 m) 程度の角度ステップが限界である。

(2) 3.3 節のミュオンフラックス-密度長の関係を用いて、(1) で求めた経路長 $L(\theta, \phi)$ と仮定密度 ρ_{MODEL} (g cm^{-3}) の積で求まる密度長 $\rho_{\text{MODEL}}L(\theta, \phi)$ の物質を透過したあとのミュオンフラックスを、 θ , ϕ の関数 $N(\theta, \phi)$ として理論的に計算する。この計算時の仮定密度 ρ_{MODEL} は、対象ボリユームの典型的な密度を与えればよい。理由は密度長 $\rho L(\theta, \phi)$ に対して、 ρ が大きく変化しない場合、 $N(\theta, \phi)$ は近似的に指数関数 $\exp(-\rho L)$ に比例するからである。

(3) (2) で得たミュオンフラックス $N(\theta, \phi)$ をミュオグラフィ観測装置の角度分解能 ($\pm\Delta\theta$, $\pm\Delta\phi$) の範囲内で積分することで、積分ミュオンフラックス N を得る。

(4) (3)で得た N を 3.3 節のミュオンフラックス-密度長変換部を用いて、密度長 $R(\theta \pm \Delta\theta, \phi \pm \Delta\phi)$ に変換する。

(5) (4)で得た密度長 $R(\theta \pm \Delta\theta, \phi \pm \Delta\phi)$ を仮定した密度 ρ_{MODEL} で除すると平均経路長が得られる。

上記の計算においては、ミュオンが対象ボリウム内や対象ボリウムとミュオグラフィ観測装置の間にある地球大気では大きく曲がらないことを仮定する¹⁶。手順(1)で入力する経路長 $L(\theta, \phi)$ については、4.2 節の経路長生成部の出力結果を用いる。またミュオンフラックスの計算については、4.3 節を参照されたい。

上記手順で平均経路長を計算できれば、3.3 節のミュオンフラックス-密度長変換部で得られる密度長を平均経路長で除することで、対象ボリウムにおいて、角度範囲 $(\theta \pm \Delta\theta, \phi \pm \Delta\phi)$ で切り取った部分の平均密度が得られる。次節では、平均経路長の計算に必要な「経路長生成部」について説明する。

4.2. 経路長生成部

ミュオグラフィ観測における種々のパラメータを入力することで、対象ボリウムに様々な方向から入射するミュオンの経路長分布 (Fig. 4.1) (測定対象点の座標、観測点の座標、測定方向角、方位角・仰角範囲から求められる経路の長さの分布) を自動的に生成する経路長生成部を開発した。

¹⁶ Taira and Tanaka (2010)のモンテカルロシミュレーション結果によると、100-1000mの岩盤(SiO_2)を透過したミュオンの散乱角は典型的に12-13 mradであることが示されており、本研究で用いた実験セットアップの角度分解能(33 mrad)と比べて十分小さいと仮定できる。

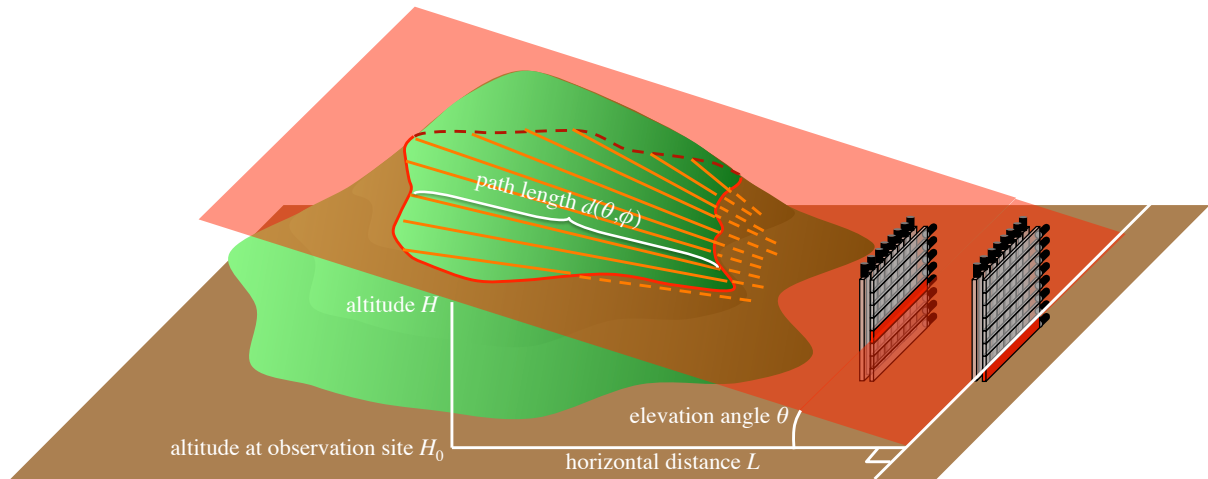


Fig. 4.1: Conceptual view of the path lengths of muon defined in the target volume. The actual muon detectors are negligibly small in comparison to a mountain.

経路長生成部に入力するパラメータは以下の6つである。

- (1) 測定点：測定対象点の座標,
- (2) 観測点：ミュオグラフィ観測装置を設置した座標,
- (3) 測定方向角：真東を0度とし、反時計回りに表現した観測点から見た測定点の角度。観測点からの角度を指定するか、観測点と測定点の座標から角度が計算される,
- (4) 方位角範囲：方位角方向の測定範囲。測定点と観測点を結んだ直線に対し、時計回り方向をプラス、反時計回り方向をマイナスで指定する。単位は度(degree)あるいは $\tan\phi$ で指定,
- (5) 仰角範囲：仰角方向の測定範囲。測定方向角の向きから見た鉛直上向きへの角度を正の仰角とする。単位は度(degree)あるいは $\tan\phi$ で指定,
- (6) 測定角度間隔：経路長を測定する際の角度ステップ($\delta\theta, \delta\phi$)。単位は度(degree)あるいは $\tan\phi$ で指定。

以上の6つのパラメータを入力することで、読み込んだ対象ボリュームの外形情報、たとえば火山を観測対象とする場合、digital elevation model (DEM)に対する経路長分布が出力される。今回開発した経路長生成部は、国土地理院のDEM (JPGIS (GML)形式)を、前段プログラム (conv_to_lat_lon.awk : 付録 D.2.2 参照)で“緯度(°), 経度(°), 標高(m)”の形式に加工し、その加工データを後段プログラム (conv_to_length_dist.awk : 付録 D.2.3 参照)に読み込ませて、観測対象の経路長分布を求める仕様になっている。プログラムは位置モード (XYZ モード) および緯度・経度モードの2つのモードで動かすことができる。それぞれのモードの違いは外形情報の座標の単位を、XYZ の3軸直交座標系の単位とするか、緯度経度標高の極座標系の単位とするかの違いである。同様に、角度についても度 (degree) あるいは $\tan \theta$ のどちらであっても測定方向角や方位角・仰角範囲を指定できるよう設計した。経路長生成部が読み込める対象ボリュームの外形情報は、緯度・経度・標高あるいは $X \cdot Y \cdot Z$ の形式のテキストファイルである。Fig. 4.2 に経路長生成例を示す。観測点から測定対象の測定点 (ここでは桜島の昭和火口) に向かって、仰角 θ , 方位角 ϕ 方向に放射状に直線を引き、対象ボリュームと引いた直線が重なる部分の距離 (経路長) が示されている (距離の単位は m)。距離が 0 m のところは、対象ボリュームを通っていない、つまり空であることを意味する。仰角および方位角の単位はどちらも mrad である。

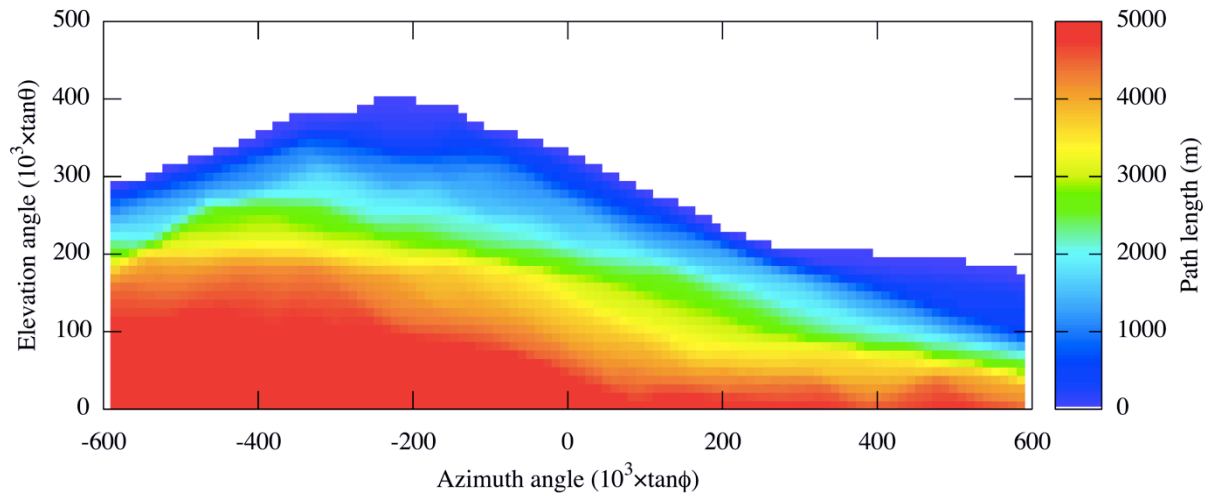


Fig. 4.2: Output example of the “path length generator” part. The horizontal and vertical axis shows the azimuth ϕ (mrad) and elevation angle θ (mrad), respectively. In this example, the digital elevation model (DEM) of Sakurajima volcano published in 2009 by Geospatial Information Authority of Japan were used. The direction to Showa crater is an azimuth angle of 0 mrad.

4.3. 透過ミュオンフラックス生成部

透過ミュオンフラックス生成部は、3.3 節のミュオンフラックス-密度長変換部でも使用される。この節では、ミュオグラフィ観測装置の幾何学的構造と観測対象の経路長分布から、実際の観測で期待されるミュオンフラックスを計算するために透過ミュオンフラックス生成部を開発した結果について述べる。ここで、ミュオンの対象ボリューム内部での散乱はミュオグラフィ観測装置の角度分解能に対して無視できると仮定した（4.1 節脚注参照）。まず、透過ミュオンフラックス生成部では、対象ボリュームを透過したミュオンフラックスの角度分布を出力するために（A）ミュオグラフィ観測装置の幾何学的構造、（B）4.2 節の経路長生成部によって得られる経路長分布、そして（C）3.3 節で述べた対象ボリュームの様々な厚みに対応する透過ミュオンフラックスを入力する。

(A) については、最上流と最下流のミュオン検出器間の距離、プラスチックシンチレータストリップの幅、ミュオン検出器 1 台に用いる X, Y 方向のプラスチックシンチレータストリップの本数（ただし、 X, Y 方向の本数が同じ場合に限る）、対象ボリウムに仮定する一様密度 (ρ_{MODEL}) を入力する。入力した値から、3.2 節で述べたミュオグラフィ観測装置の幾何学的アクセプタンス ($\text{cm}^2 \text{ sr}$) を計算する。観測装置の幾何学的アクセプタンス A は角度 (θ, ϕ) の関数である。以上のプロセスによって、ミュオグラフィ観測装置の幾何学的構造が考慮され、角度空間 (θ, ϕ) に対応する透過ミュオンフラックスが 2 次元ヒストグラムとして計算される。これに (B) と (C) を組み合わせることで、対象ボリウムに対して 2 次元ヒストグラムの各ビンで期待される透過ミュオンフラックスを計算できる。Fig. 4.3 に、透過ミュオンフラックス生成部の流れ図を示す。

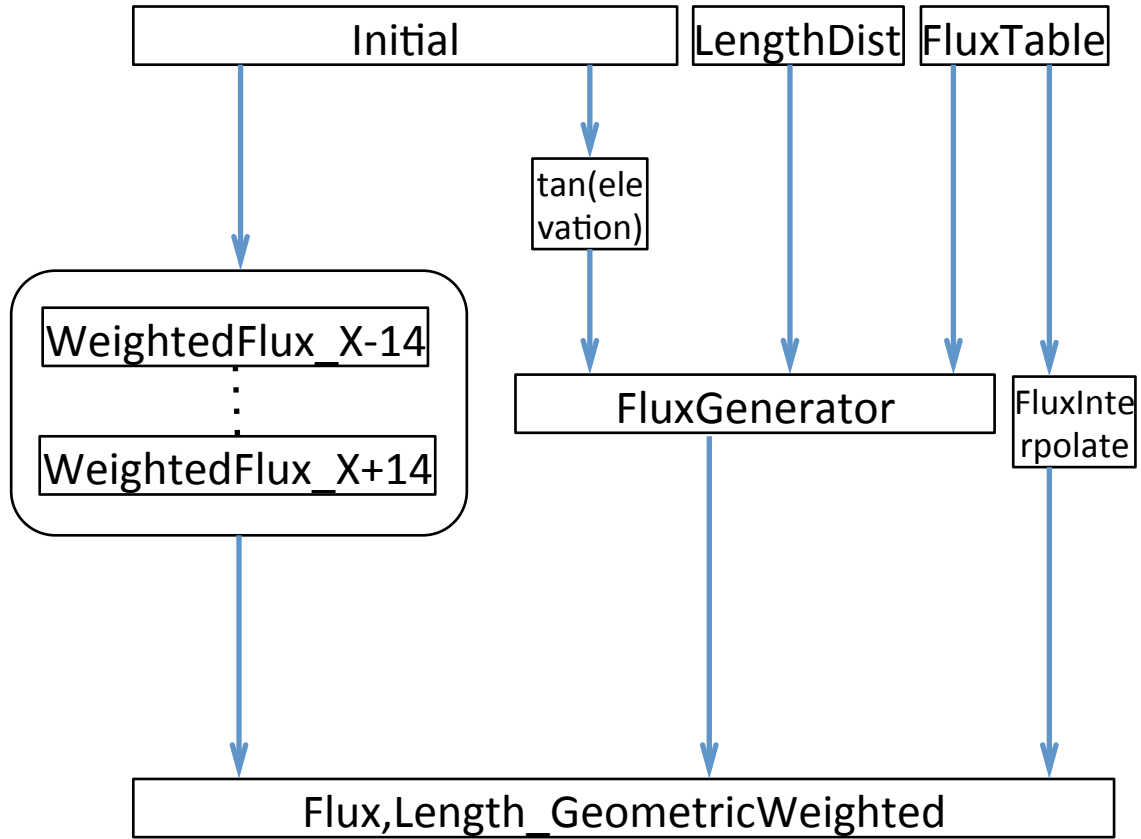


Fig. 4.3: Flow chart of the “traversed muon flux generator” part. The “Initial” is the set of initial parameters for calculation. Here, the parameters (1) the distance between the uppermost and lowermost stream muon detectors (in cm), (2) the width of a scintillator strip (in cm), (3) the number of X - (Y -) scintillator strips in a muon detector (only if the number of X - and Y -scintillator strips are same), (4) the number of scintillator strips to be used in simulation, and (5) the density to be assumed for the measurement target in simulation (in g cm^{-3}) are passed. The “LengthDist” is the data set of path length distribution obtained in the section 4.2. The “FluxTable” is the data set of open-air muon energy spectra (Appendix A). These values are passed to the “FluxGenerator”, and then the integrated muon fluxes expected in an actual measurement are calculated based on a geometric configuration of a muography telescope and a length distribution of a target. The “WeightedFlux” calculate geometric acceptances as a function of θ and ϕ (in $\text{cm}^2 \text{ sr}$) based on a geometric configuration of a muography telescope.

第5章 活動的火山観測に向けたモジュール開発

5.1. 背景

Tanaka *et al.* (2014)は、鹿児島県薩摩硫黄島で、小噴火が起きていた2013年6月～7月の観測において、マグマの昇降を示唆する火山内部の密度構造の時間変化を捉えることに成功した。このときの時間分解能は、3日間であったと報告されている。この時間分解能を、根本的に改善するためには、ミュオグラフィ観測装置の有感面積を大きくする以外の方法はないが、噴火による火山内部の密度構造変化が毎回同様であることを仮定できれば、各噴火時に得られるミュオグラムの統計が少なくても、複数の噴火イベントにおいて得られたミュオグラムを合成することで統計を増やすことができる。

本章では、噴火が繰り返し起こっている活動的な火山において、噴火時の短時間観測での複数のミュオグラムを合成することによる統計の向上を目指して、短時間である噴火イベントに対しても統計的揺らぎの少ないミュオグラムを生成するために有用となるモジュールの開発結果について述べる。

5.2. 噴火イベントセクターモジュール

噴火イベントセクターモジュールは、条件を与えて、それに合致する噴火のみを取り出し、ミュオンイベント数を足し合わせるツールである。ここで与える条件は、①1つ前の噴火との時間間隔、および②1つ後の噴火との時間間隔、の2つである。一般的な表計算ソフトウェアに組み込むことができるこのモジュールは、スプレッドシート上で上記条件を与えることで、特定の噴火時間間隔を持つ噴火イベントのみがリアルタイムに抽出されるようにデザインされている。たとえば、条件①あるいは条件②として短い時間間隔を与えると、連続的に起こった噴火イベントが抽出される。逆に、条件①あるいは条件②として長い時間間隔を与えると、噴火時間間隔の長い、時間的に孤立した噴火イベントのみを抽出することができる。Fig. 5.1に噴火イベントセクターモジュールの流れ図、Fig. 5.2, Fig. 5.3, Fig. 5.4にその出力例を示す。外部データとして、噴火日時データ（テキスト形式）を噴火イベント

セレクトアームモジュールに入力すると、1 つ前の噴火までの時間間隔と 1 つ後の噴火までの時間間隔が出力される (Fig. 5.2 コラム A 及び B) 。 また、噴火時を基準時刻 0 として、30 分の時間分解能で噴火前後 3 時間の範囲のミュオンイベント数が表示される¹⁷。そして、その中から、（入力した噴火イベントテーブルの範囲内で）与えた条件①、②の両方に合致する噴火イベントを全て抽出し、それらの時刻に対応するミュオンイベント数を足し合わせた結果が、68% C.L. の統計誤差棒つきでヒストグラムとして出力される (Fig. 5.3, Fig. 5.4) 。

¹⁷ すべての仰角のミュオンイベント数が出力されるわけではないので、出力されるミュオンイベント数については足し合わせたい仰角のミュオンイベント数をあらかじめ入力しておく必要がある。

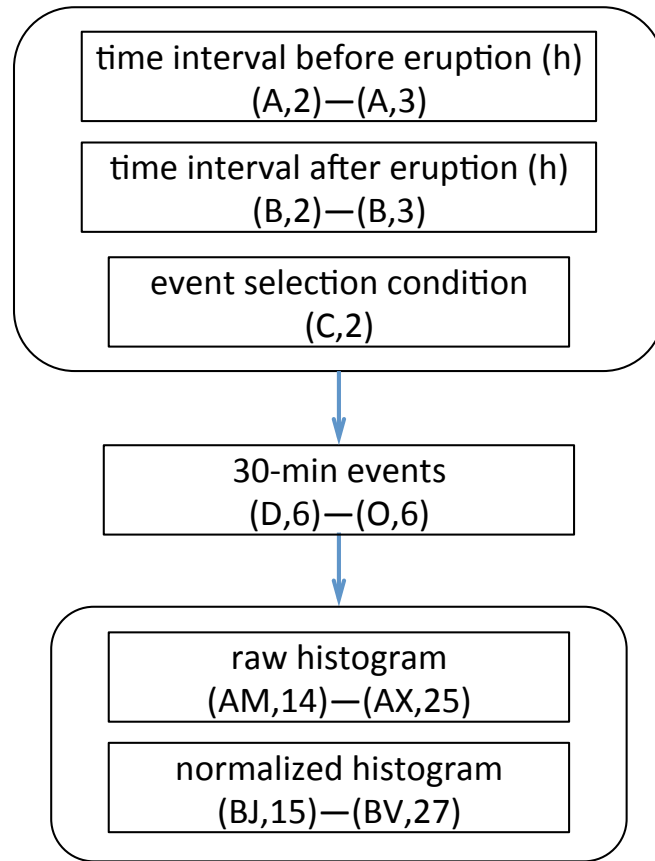


Fig. 5.1: Flow chart of the “eruption event selector” module. The “time intervals” between continuous two eruptions, an eruption and the previous or the next one, are the initial inputs. The “event selection condition” is used for selecting the events based on the time intervals. The “30-min events” is the event histogram of the muon events shown in a time range of 180 minutes before and after the eruption with an interval of 30 minutes. The “raw histogram” is the output of the total muon events and the “normalized histogram” is the output of the muon events per an eruption.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Interval (previous)	Interval (next)	"AND" or "OR"	"AND" 噴火前T1、噴火後T2 (噴火前min)<T1<(噴火前max) ∩ (噴火後min)<T2<(噴火後max) "OR" T1=T1=12 T<噴火前max U T<噴火後max (minに2つ、TはAND0711,12案件と同様)																
2	100000	100000	AND																	
3	10	10																		
4	4166.666667	4166.666667	2014/11/07 00:00																	
5	0.41666667	0.41666667	2014/11/07 00:00																	
6	Interval till previous interval till next: all eruption time				-165	-135	-105	-75	-45	-15	15	45	75	105	135	165				
7	0d 8h 45m	0d 5h 53m	2014/11/07 08:04																	
8	0d 5h 53m	0d 0h 49m	2014/11/07 13:57																	
9	0d 0h 49m	0d 0h 26m	2014/11/07 14:46																	
10	0d 0h 26m	2014/11/07 15:12																		
11	0d 2h 34m	2014/11/07 17:46																		
12	0d 3h 22m	2014/11/07 21:08																		
13	0d 6h 48m	2014/11/08 03:56																		
14	0d 0h 52m	0d 0h 46m	2014/11/08 08:48																	
15	0d 0h 46m	3d 22h 22m	2014/11/08 09:34																	
16	3d 22h 22m	0d 4h 45m	2014/11/12 07:56																	
17	0d 4h 45m	1d 11h 9m	2014/11/12 12:41																	
18	1d 11h 9m	0d 11h 47m	2014/11/13 23:50																	
19	0d 11h 47m	0d 9h 44m	2014/11/14 11:37																	
20	0d 9h 44m	2014/11/15 02:21																		
21	0d 1h 8m	2014/11/15 12:05																		
22	0d 1h 8m	0d 17h 32m	2014/11/15 13:13																	
23	0d 17h 32m	0d 3h 45m	2014/11/16 06:45																	
24	0d 3h 45m	0d 8h 55m	2014/11/16 10:30																	
25	0d 8h 55m	0d 1h 31m	2014/11/16 19:25																	
26	0d 1h 31m	3d 1h 7m	2014/11/16 20:56																	
27	3d 1h 7m	0d 2h 4m	2014/11/19 22:03																	
28	0d 2h 4m	3d 10h 58m	2014/11/20 00:07																	

Fig. 5.2: Example of the “eruption event selector” module (part1). The column C shows the eruption time in a format of “20##(year)/##(month)/##(day)/##(hour)/##(minute)”. The eruption selection conditions are (1) time between the previous and present eruptions and (2) that between the present and next eruptions. The numbers in (A, 2), (A, 3) and (B, 2), (B, 3) show the minimum and the maximum time interval in hour, respectively. In the columns A and B, only the eruption events that satisfy the condition are highlighted in red. The numbers in the columns between D and O show the time sequential muon events. Colors of the cells are reflected by the number of events in these cells.

normalization number of eruption events

39

all eruption 39 eruptions equivalent(39 eruptions) $-100000 < X < -10, 10 < X < 100000$ (h)

	-180	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	-165	165
median time	-165	-135	-105	-75	-45	-15	15	45	75	105	135	165	14.3	14.3
	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180		
event	15	13	17	16	16	16	20	4	9	14	15	12	10	157
upp error	4.32	4.3	4.81	4.8	4.8	5.3	2.78	3.79	4.32	4.32	4.29	3.81		
low error	3.68	3.72	4.21	3.67	3.67	4.17	1.66	2.67	3.7	3.68	3.17	3.22		

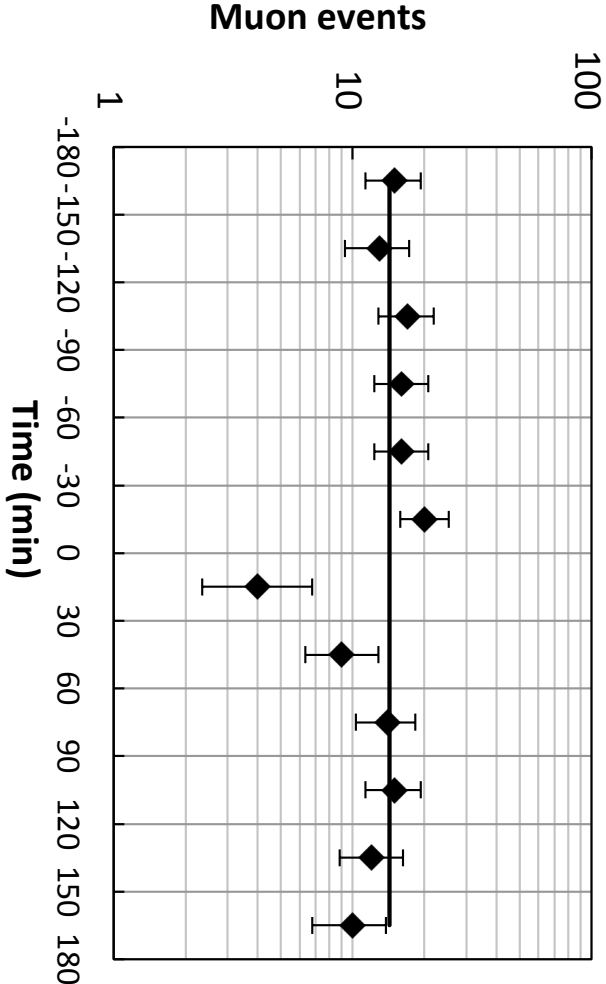


Fig. 5.3: Example of the “eruption event selector” module (part2). The histogram of the integrated muon events.

	-180	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	-165	165
median time (h)	-165	-135	-105	-75	-45	-15	15	45	75	105	135	165	0.37	0.37
	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180		
event	0.38	0.33	0.44	0.41	0.41	0.51	0.1	0.23	0.36	0.38	0.31	0.26	4.03	0.37
upp error	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.14	0.07	0.1	0.11	0.11	0.11	0.1		
low error	0.09	0.1	0.11	0.09	0.09	0.11	0.04	0.07	0.09	0.09	0.08	0.08		

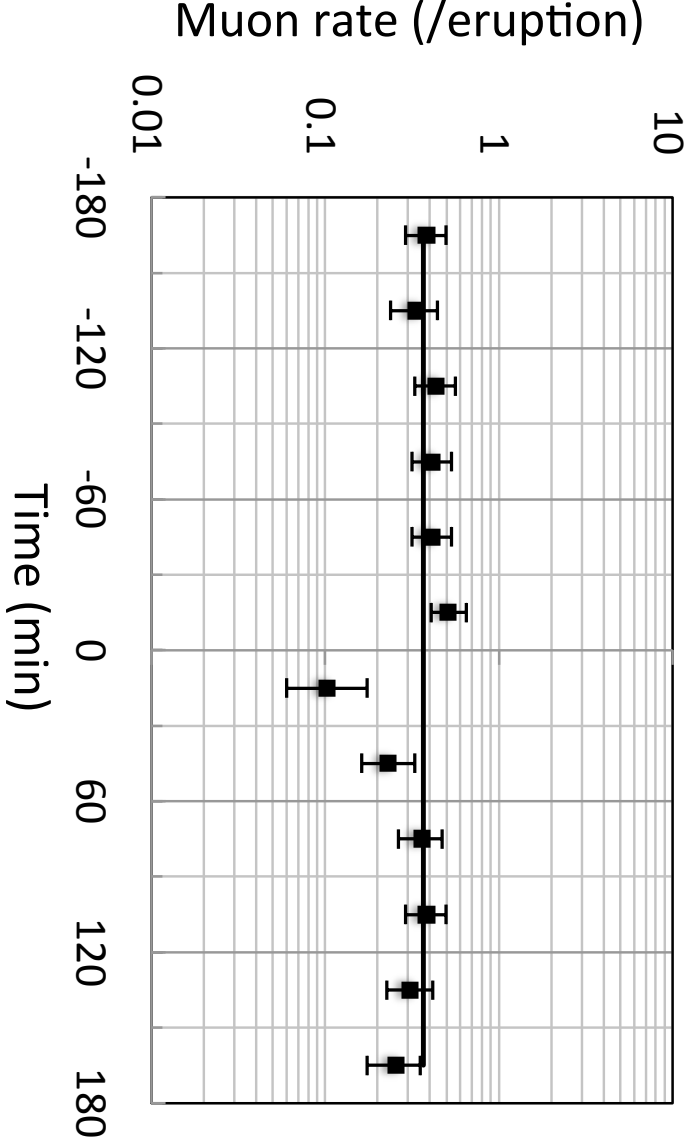


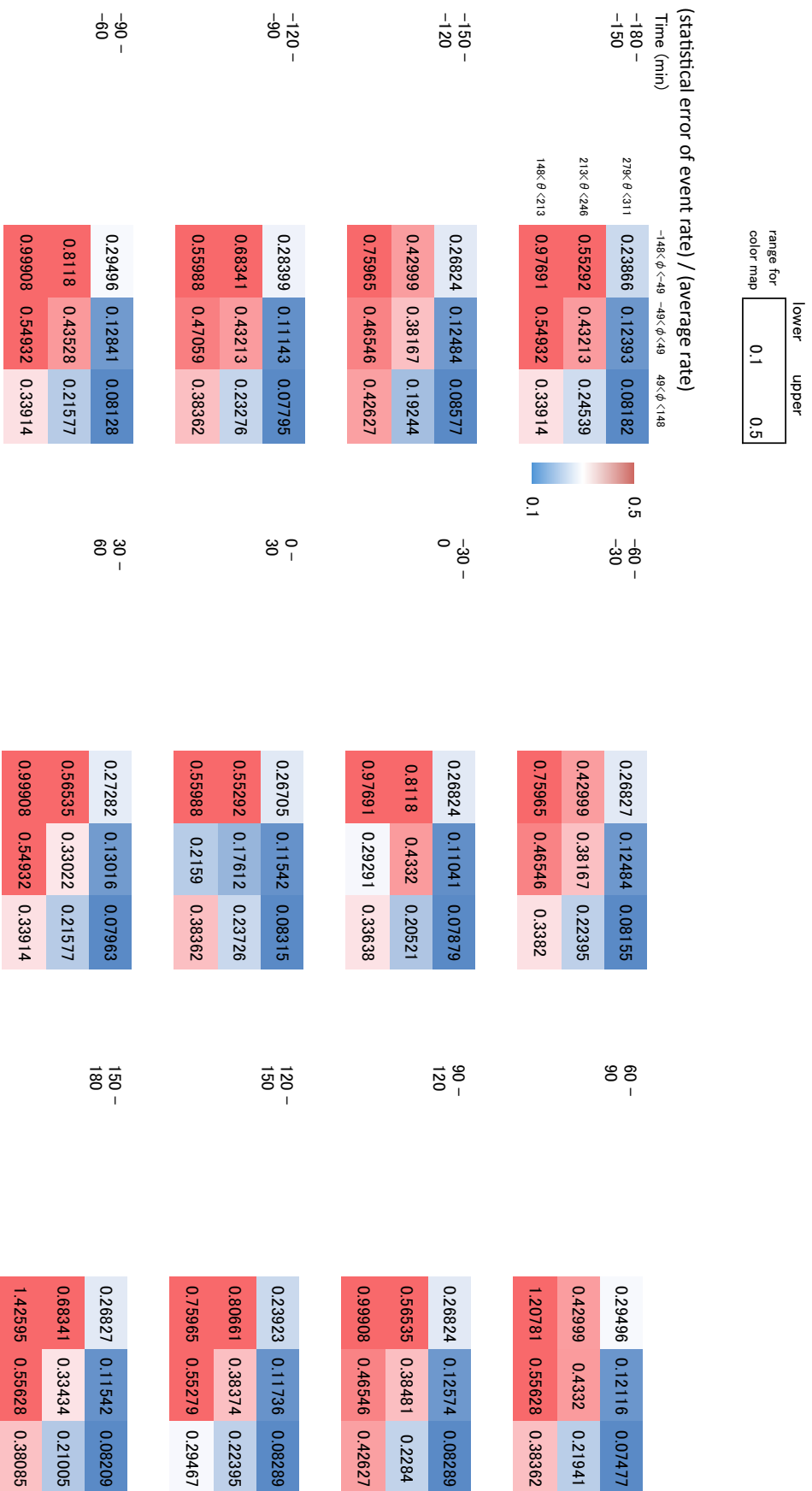
Fig. 5.4: Example of the “eruption event selector” module (part3). The histogram of integrated muon events normalized to an eruption.

5.3. 合成ミュオグラム表示モジュール

合成ミュオグラム表示モジュールは、噴火イベントセクターモジュールによって出力されたミュオンイベント数を仰角・方位角の角度空間における2次元ヒストグラムとしてまとめ、時空間変化を画像として見やすくするためのモジュールである。対象ボリユームのどの領域が他と比較してよく変化しているかを視覚的に表現する目的で開発した。合成ミュオグラム表示モジュールの出力例を Fig. 5.5, Fig. 5.6, Fig. 5.7 に示す。

Fig. 5.5, Fig. 5.6, Fig. 5.7 は出力されたスプレッドシートの切り抜きを示している。噴火前後の時間間隔の最小値, 最大値を指定し, カラーマップの色調の最小値, 最大値を入力すると, 条件に合致した噴火イベントに対するミュオグラムをすべて足し合わせ, その結果を指定した角度領域と角度分解能 (たとえば各々, $148 \text{ mrad} < \theta < 311 \text{ mrad}$, $-148 \text{ mrad} < \phi < 148 \text{ mrad}$, $\Delta\theta = \Delta\phi = 16.5 \text{ mrad}$) において, 与えられた時刻 (たとえば噴火時刻) 前後の与えられたタイムレンジ (たとえば前後3時間) において与えられた時間間隔 (たとえば30分) おきに相対ミュオグラムとそれに付随する統計誤差 (標準偏差) 「ミュオグラムの誤差表示」, および標準偏差を単位とした全観測期間で平均をとったミュオグラムと上記相対ミュオグラムとの差異「相対ミュオグラムの99% C.L. 表示」を出力する。ここで, 相対ミュオグラムとは指定した日時および時間間隔において測定されたミュオンフラックスの平均値を全観測期間で測定されたミュオンフラックスの平均値で除したものを2次元ヒストグラムにプロットしたものである。

「ミュオグラムの99% C.L. 表示」については, 相対ミュオグラムだけでは表現しきれない, 透過ミュオンフラックスの変化の有意度をユーザーが確認できるように出力されている。たとえば相対ミュオグラムの1ビンの値が全観測期間の平均値から大きく変化していたとしても, それが99% C.L. 以下の変化 (図中のビンの数値の絶対値が1以下) であれば, 統計的に有意な変化とは言えないものとして解釈する (絶対値が1を超える場合に色付けした)。この表示方法は Alvarez *et al.* (1970) で採用された標準偏差を単位として表示する方法をアレンジして, Feldman and Cousins (1998) により求められた99% C.L. 統計誤差を単位としている (ただし, Alvarez *et al.* (1970) の採用した方法では, 全観測期間の平均値ではなく, モンテカルロシミュレーションからの差異が用いられている)。



		lowerupper		range within 99% C.L.			
				-11			
((a) - 1)/(b)							
Time (min)							
-180 - -150	-148 < ϕ < -49		-49 < ϕ < 49		49 < ϕ < 148		
	279 < θ < 311		-0.507	0.0649	0.03572	-60 - -30	
	213 < θ < 246		-0.3085	0.17472	0.54103		
	148 < θ < 213		-0.0453	0.0027	-0.0242		
-150 - -120	0.0011		0.11111	0.48413	-30 - 0		
	-0.5195		-0.0895	-0.7845			
	-0.2206		-0.2399	0.36744			
-120 - -90	0.60924		-0.6077	-0.4247	0 - 30		
	-0.0085		0.17472	0.34655			
	-0.4861		-0.1114	0.22094			
-90 - -60	0.14061		0.28954	-0.0274	30 - 60		
	0.29958		0.32922	-0.3152			
	0.09311		0.0027	-0.0242			
	0.07324		0.11111	0.00428	60 - 90		
	-0.5195		-0.0895	0.2051			
	-0.2206		-0.2399	-0.1175			
	0.0011		-0.6661	-0.3222	90 - 120		
	0.29958		0.25676	-0.1147			
	-0.0453		-0.8417	-0.2172			
	0.40539		-0.3847	0.18988	120 - 150		
	-0.3085		-1.5121	-0.1644			
	-0.4861		-1.2605	0.22094			
	0.47595		0.37518	-0.2218	150 - 180		
	-0.1432		-0.4245	-0.3152			
	0.09311		0.0027	-0.0242			
	0.07324		-0.3847	0.06696			
	-0.0085		-0.1885	-0.0294			
	0.39814		0.19703	0.06154			

Fig. 5.7: Output example of the “event imager” module (part3).

第6章 議論：桜島におけるケーススタディー

6.1. 背景

鹿児島県の桜島は現在日本で最も活動度の高い火山で、2014年には656回、2015年には1252回の噴火が確認されている（鹿児島地方気象台 2016）。そのため、桜島は第5章で述べた活動的火山観測に向けたモジュール群の適用試験を行う上で、最適の火山であると判断した。特に、第5章の噴火イベントセクターモジュールの適用が期待できた。そこで、2014年11月7日から鹿児島県鹿児島市古里町に設置されているミュオグラフィ観測装置で得られたミュオンイベントに対して、前章までに述べてきたモジュール群を適用することで、開発したソフトウェアの有効性を検証した。

Fig. 6.1 に示すように、桜島におけるミュオグラフィ観測装置の設置場所は、桜島の昭和火口から南に水平距離でおよそ2.8 kmの地点で、ミュオグラフィ観測装置の有感面（の法線方向）が昭和火口を向くように設置されている。ミュオグラフィ観測装置の設置標高は150 mである。昭和火口、南岳A火口、B火口は観測装置の視野内に位置する。ミュオグラフィ観測装置は0.5°以下の精度で水平に設置された。ミュオグラフィ観測装置の総重量が20トン以上あることから、長期的な地盤沈下による傾きを防ぐ目的で厚さ1 cmの鉄板をミュオグラフィ観測装置の底面全体に敷いて、荷重を分散させている。

また、ミュオグラフィ観測装置は雨や火山灰などから保護するためにプレハブ内に設置され、さらにプレハブ内の結露が機器に侵入することを防ぐ目的でビニールシートで覆われている。さらに、落雷から機器を守るために、耐雷トランスを組み合わせた電研精機研究所製ノイズカットUPS（無停電電源装置）（RI-N型 単相5 kVA）を用いて、一時的な停電（数時間）や地面からのサージ電流などから機器を保護している。以下の節では、2014年11月7日～2015年4月30日の期間で得られたミュオグラフィ観測データに対するモジュール群の適用結果について述べる。

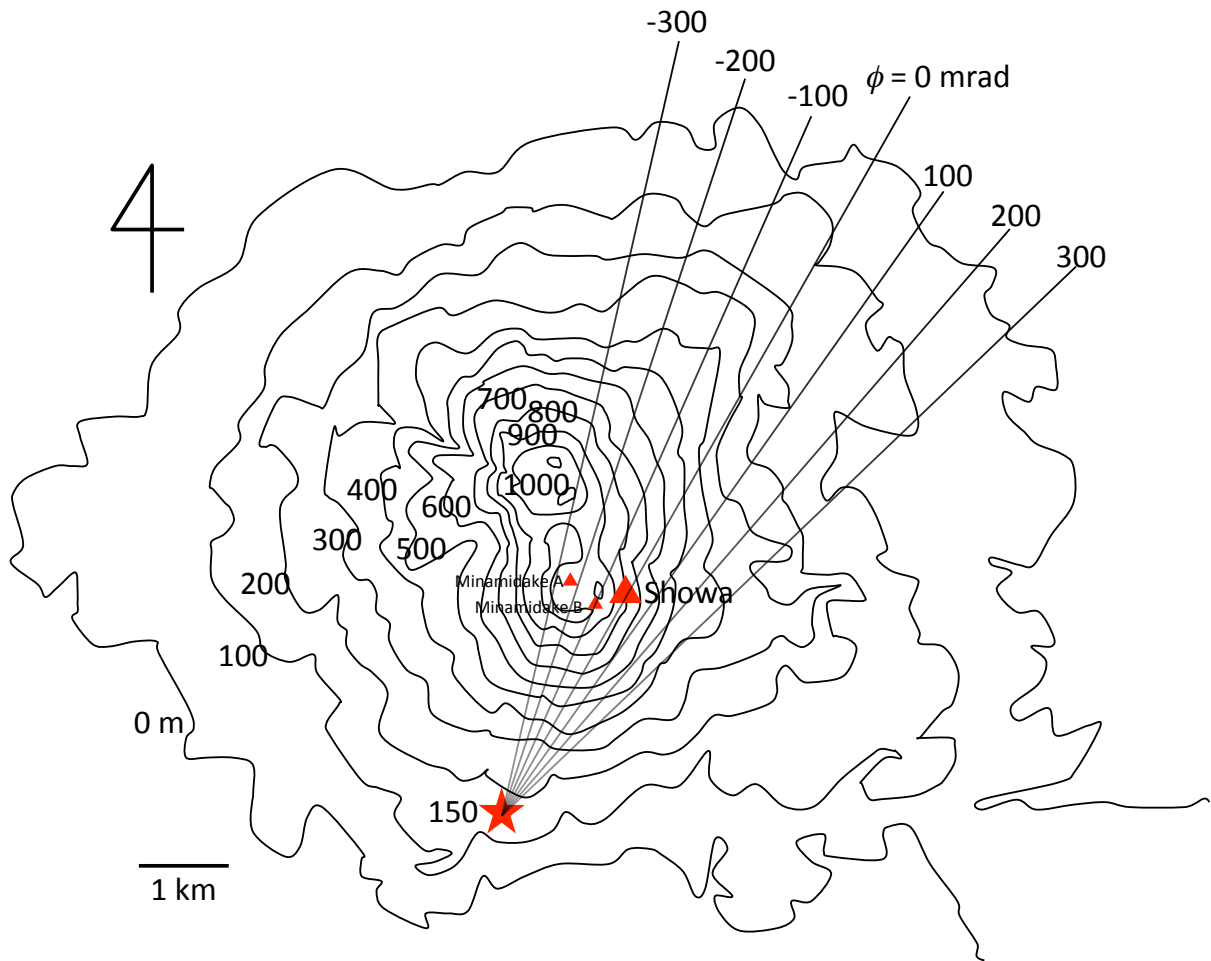


Fig. 6.1: Geometrical configuration of the present muographic measurement at the Sakurajima volcano. The star and triangles indicate the positions of observation site and the crater, respectively.

6.2. 噴火イベントセレクトーおよび、合成ミュオグラム表示モジュールの適用結果

以上までに述べたモジュール群を組み合わせた低雑音型ミュオグラフィ観測データ解析ソフトウェアを、桜島におけるミュオグラフィ観測で得られたミュオンイベントデータに適用した。合成ミュオグラム表示モジュールは噴火イベントセレクトーと連動しており、両者を切り離して議論することは難しい。噴火イベントセレクトーを併用することで、取り出したい噴火条件（この場合、噴火間隔）に合わせて、ミュオグラムを合成することができる。ミュオグラムを合成することにより、ビンあたりに記録されるミュオンイベントの統計精度が上がり、その結果画像のコントラストを向上させることができるので、他の観測手段によって得られた特徴的なイベント（例えば視覚観測による噴火事象など）のタイミング前後に設定されたタイムレンジの範囲内でミュオグラムを時系列的に表示することで、そのイベントとミュオグラムとの時間的な対応付けを視覚的に行うことが可能である。

合成ミュオグラム表示モジュールにおいて、1 万枚以上に及ぶミュオグラムに対して、ユーザーがどの条件のミュオグラムを合成するかについては、大きな自由度があるが、本研究では、一例として合成によって最も変化が出ることを期待して、噴火時間間隔を条件として抽出し、合成することとした。観測期間中、桜島においては昭和火口を中心にして、噴火を続けていたため、2014 年 10 月時点の昭和火口底近傍に相当する方向領域（方位角 $-49 \leq \phi \leq 49$ mrad; 仰角 $213 \leq \theta \leq 246$ mrad）（九州地方整備局大隅河川国道事務所 2015）に注目してミュオグラムの変化、具体的にはミュオンイベントレートの平均からの大きなずれを生じる条件を探索した。

具体的には、2014 年 11 月 7 日～2015 年 8 月 11 日の全期間平均でのイベントレート (N_{ord}) と、各時間間隔におけるイベントレート (N_{erup}) との差異を Feldman and Cousins (1998) によりテーブル化されている 99% C.L. 統計誤差の upper error で規格化したもの（ここでは deviation index と呼ぶ）の統計的有意度を評価する。ただし、この 99% C.L. 統計誤差は、正規分布のパラメータとして現れる標準偏差（あるいは分散）とは性質が異なり、ポアソン分布をもとにしていることに注意が必要である（例えば 68.3% C.L. の統計誤差を 3 倍しても、正規分布のように 99.7% C.L. 統計誤差には一致しない。）。仮に噴火に伴い火口直下の密度構造が変化する典型的時間スケールを 30 分間とすると、観測期間中に起こった 1221 回の噴

火イベントに対応して最大 610 時間程度が密度変化している可能性があるが、この時間は全観測期間（6648 時間）と比べて十分短いため、全期間平均のイベントレート N_{ord} はおよそ噴火をしていない時（ここでは平常時と呼ぶ）のイベントレートとなる。そのため deviation index は、平常時のイベントレートと噴火時のイベントレートとの差異を表す指標となる。この deviation index が最大となるときの噴火時間間隔を選び出すこととした。この作業には、本研究で開発した噴火イベントセクターモジュールを利用した。Fig. 6.2 は昭和火口底近傍（方位角 $-49 \leq \phi \leq 49$ mrad; 仰角 $213 \leq \theta \leq 246$ mrad）に注目して噴火直後 30 分間のイベントレートを噴火時間間隔の関数として表した図である。噴火間隔が短い噴火イベントほど多数回発生するので（Fig. 6.21 参照），結果として，合成ミュオグラムの統計精度が向上する。噴火時間間隔が 9.5 時間以上となる噴火イベントに対して，全期間平均値からのずれが 99% C.L. の統計誤差を超えて統計的に有意になり，結果，噴火間隔 10 時間以上のミュオグラムを合成すると昭和火口底近傍における透過ミュオンフラックスの変化に対する deviation index が最大（-1.5）となることが分かった¹⁸。このようにして得られた先見情報をもとに，変化が最も大きくなる領域のサイズおよび位置を特定することにした。そのため本研究で用いた方法は以下のとおりである。

2 次元ヒストグラムにおけるビンのパッキングプロセス，すなわち隣同志のビンを足し合わせるプロセスにより，ビンあたりのイベント数が上昇し，統計精度が向上する反面，角度分解能は低下する。すなわち，桜島内部で変化している領域がパッキングしたのちの角度分解能の範囲内に入っていれば，よりイベント数が増える分，高い統計精度で変化を議論できるが，ビン幅が見たい領域より大きくなってしまうと，その領域における平均的な密度変化が小さくなるため，透過ミュオン強度の変化も合わせて小さくなる。また，パッキングを開始するビン ID がずれると，パッキング後のビン領域が実際変化している領域からずれる可能性があり，これによっても透過ミュオンフラックスに対する密度構造の変化による効果が薄れる。そこで，本研究では，足し合わせるビンの数とパッキングの開始位置を変化させる

¹⁸ 必ずしも統計的に最も有意な変化が最も大きな密度変化を示しているとは言えない。たとえば，噴火間隔 10 時間を超える噴火におけるイベントレートの一部は，中心値で見ると，噴火間隔 10 時間のイベントレートよりも小さく，平常時のイベントレートとの差がより大きくなっている（すなわち密度変化が大きい）が，得られたミュオンイベント数が少ないので，統計誤差が大きく，統計的有意度は低くなる。

ことで、上述の変化の統計的有意度および絶対値が最大となる領域のサイズと位置を探索した。以下にその結果を述べる。

Fig. 6.3 は、噴火間隔 10 時間以上の噴火イベントの前後 180 分のタイムレンジに記録されたすべてのミュオグラムを 30 分おきに 30 枚合成し、それぞれの合成ミュオグラムの 2014 年 11 月 7 日～2015 年 8 月 11 日の全観測期間の平均（1 分間に規格化）ミュオグラムからのずれを 99% C.L. 統計誤差を単位として示したものである。この図は前章の Fig. 5.7 すなわち「相対ミュオグラムの 99% C.L. 表示」に対応するものである。この図から、ミュオグラムのどの領域が統計的に有意にずれているかを判断することができる。

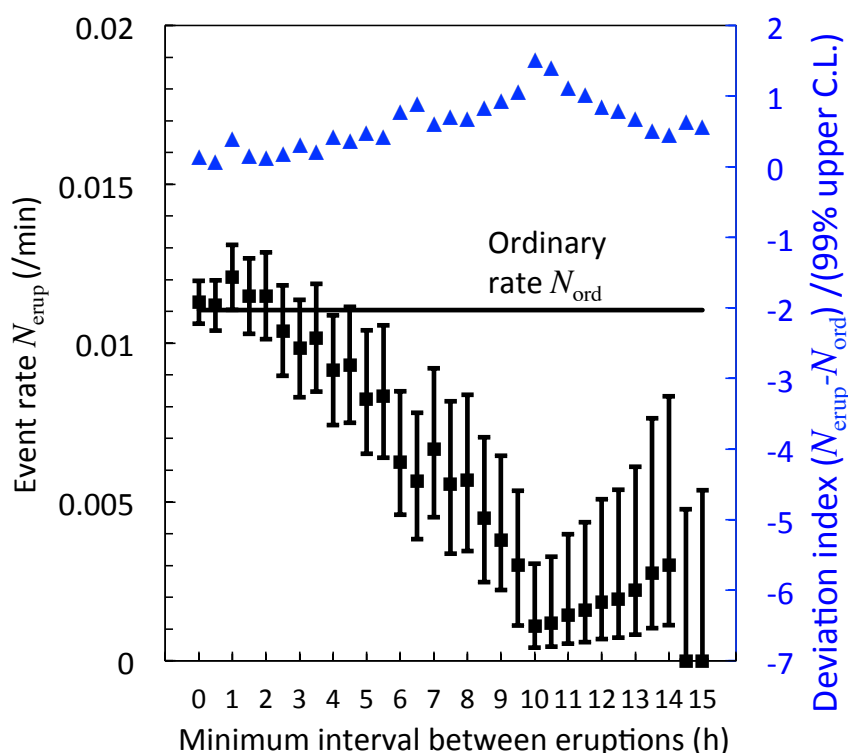


Fig. 6.2: Muon event rate right after eruptions N_{erup} as a function of the time interval between eruptions for bin IDs $-1 \leq X \leq 1$, $Y = 7$. The deviation index $(N_{\text{erup}} - N_{\text{ord}}) / (99\% \text{ upper C.L.})$ that is compared to the ordinary event rate N_{ord} without eruptions is also shown, where the 99% upper C.L. is the 99% upper C.L. of statistical error of N_{erup} . The squares (■) and triangles (▲) represent the event rate and the deviation index, respectively.

(a)

-180-150min
(data/average-1)/(error of data/average)

y \ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	-0.279	-0.012	-0.044	0.3064	-0.081	-0.188	0.1401	0.0176	0.4419	0.218	0.6502	-0.555	-0.577	-0.059	-0.043	0.3462	0.0807	0.1495	-0.344	0.3155	-0.289	0.3005	-0.17	0.1142	0.2177	-0.492	0.4331	-0.07	-0.162
13	-0.27	0.4178	-0.005	-0.052	-0.809	0.3329	-0.127	0.1422	-0.835	-0.178	0.5655	0.2876	-0.086	0.056	0.5109	0.76	-0.076	-0.295	-0.178	0.555	-0.116	-0.108	-0.148	0.1636	-0.164	-0.368	-0.031	0.1682	0.1468
12	-0.162	0.1816	-0.31	0.2371	-0.279	0.4775	-0.152	-0.302	-0.334	-0.088	0.5244	-0.121	-0.614	0.1173	0.8052	0.3821	0.0126	0.4341	-0.469	0.0916	-0.826	0.2255	0.0644	-0.511	0.3839	0.5402	0.4647	-0.108	0.1628
11	-0.03	0.4288	0.357	-0.037	0.2915	-0.423	-0.319	0.3633	0.2644	-0.262	-0.505	-0.074	0.8248	0.2268	0.1654	0.0013	0.1824	-0.411	-0.334	0.1283	0.0386	0.5378	-0.215	0.3759	-0.388	0.499	-0.351	0.3078	0.0134
10	-0.393	0.0632	-0.354	0.2419	0.0389	0.2346	0.202	0.1391	-0.065	0.1849	-0.732	-0.475	-0.341	0.2782	-0.226	0.0689	-0.315	0.1791	-0.048	0.5333	-0.181	-0.404	0.3488	0.5169	-0.424	0.3894	-0.066	0.1469	-0.144
9	0.2173	-0.156	-0.027	-0.021	-0.313	0.0603	-0.1	0.1285	-0.087	-0.074	-0.183	-0.589	-0.082	-0.532	0.0697	0.3561	-0.233	0.4674	-0.25	-0.031	-0.612	-0.632	0.2969	0.2973	0.4105	-0.084	-0.183	0.1143	0.0344
8	-0.027	-0.042	-0.077	-0.081	-0.098	-0.101	-0.095	-0.125	-0.165	-0.027	-0.263	-0.13	-0.23	-0.741	-0.218	0.5269	0.2162	0.094	0.1309	0.4201	-0.072	-0.347	0.4345	0.0547	0.7142	0.1832	0.3597	-0.291	0.2042
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	-0.062	0.0973	-0.086	0.0715	-0.113	0.0157	-0.219	0.1019	-0.362	0.2907	0.0719	-0.144	0.3548	-0.072	0.3589	-0.433	-0.358	0.1593	0.0282	0.2256	-0.109	0.2001	0.1719	0.2971	0.2014
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	-0.026	-0.02	0.1432	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	0.1108	0.1009	0.1262	-0.016	-0.127	-0.195	-0.213	0.1213	0.4391	0.0458	0.0427	-0.075	-0.125	0.6313	0.0417
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	0.1459	-0.023	0.1555	0.1393	0.1498	0.1195	-0.056	0.1148	0.0918	-0.132	-0.002	-0.005	0.105	-0.052	-0.11	-0.016	-0.017	-0.071	-0.227	-0.088	-0.272	-0.237	0.1008	0.0802	-0.145
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	-0.015	-0.041	-0.026	-0.043	-0.07	0.1144	0.1004	0.0906	-0.143	0.0338	0.1885	-0.162	0.0442	0.0305	-0.137	-0.123	0.0949	-0.052	0.2719
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	0.1424	-0.046	-0.038	0.2612	-0.039	-0.038	-0.047	-0.031	-0.027	-0.014	-0.008
2	1E-03	-0.007	0.1599	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	-0.02	-0.028	-0.038	0.1421	-0.034	-0.049	-0.07	-0.051	-0.061	-0.059	-0.066	-0.07	-0.049	-0.059	-0.042	0.1273	0.2619	-0.035	0.1475	-0.013	-0.006
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	-0.053	-0.074	-0.072	0.2381	0.0945	-0.11	-0.12	0.0688	-0.098	-0.103	-0.089	-0.102	-0.102	-0.073	-0.058	-0.058	0.1316	-0.038	-0.026	-0.009	-0.003

(b)

-150-120min
(data/average-1)/(error of data/average)

y \ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0.1009	-0.162	-0.169	-0.054	0.4697	0.2312	0.6359	-0.399	-0.223	0.8323	0.7671	0.0054	0.3383	0.2555	0.2556	-0.374	0.2191	-0.217	0.4004	0.1013	0.0201	0.3035	-4E-04	0.3391	-0.37	0.3816	0.1431	0.0712	0.0235
13	-0.089	-0.756	0.1717	0.4602	-0.389	-0.259	-0.302	0.0053	-0.48	0.4017	0.1632	0.4328	0.576	0.105	-0.489	-0.489	-0.61	-0.058	0.5779	-0.048	-0.412	0.3708	0.3087	-0.146	-0.254	0.0187	0.1547	0.3463	-0.401
12	-0.353	0.0876	0.1523	0.2371	-0.557	-0.165	-0.341	0.2046	-0.909	-0.537	-0.168	0.3482	0.6204	0.1599	0.3394	-0.013	-0.192	0.261	0.1703	-0.012	-0.597	0.4832	-0.652	0.2763	0.0926	0.1937	-0.346	0.0052	-0.281
11	-0.182	-0.015	0.357	-0.146	0.2122	0.2791	-0.093	0.2166	0.0518	-0.035	0.1773	-0.393	-0.22	0.0514	-0.269	-0.134	0.8681	-0.466	-0.115	0.0747	-0.326	0.1622	-0.141	0.182	-0.151	0.3531	-0.149	0.1301	-0.134
10	-0.146	0.1767	-0.163	0.1358	-0.081	0.4062	-0.151	0.3209	-0.896	-0.195	0.2103	-0.283	0.226	-0.284	0.4745	-0.119	-0.114	-0.266	-0.618	-0.156	0.1884	-0.253	-0.491	-0.075	-0.166	-0.031	0.5759	0.0522	-0.333
9	-0.114	-0.156	-0.245	-0.237	-0.133	-0.101	-0.336	-0.178	0.0557	0.1652	0.1757	0.0199	-0.194	0.4905	-0.684	0.2382	0.1678	0.6007	0.0313	-0.146	-0.003	0.1364	-0.033	0.0986	-0.188	-0.356	0.4556	0.4519	0.0344
8	-0.027	0.1351	0.1074	-0.081	-0.098	0.0883	-0.095	-0.125	-0.165	-0.245	-0.041	0.2711	-0.054	-0.226	-0.218	-0.127	-0.009	-0.714	0.2565	-0.533	-0.007	-0.193	-0.191	0.2754	-0.253	0.1832	-0.384	0.1868	0.0913
7	-0.021	-0.032	0.1257	-0.059	0.0957	-0.09	0.0888	0.3236	-0.113	0.0157	-0.219	-0.053	-0.362	-0.246	-0.21	0.2075	-0.489	-0.191	-0.474	-0.012	-0.256	0.6428	0.0262	-0.06	-0.457	0.0474	-0.21	0.1895	0.2914
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	-0.026	-0.02	-0.032	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	-0.043	-0.279	0.1262	-0.187	0.4238	-0.195	0.0264	-0.067	0.3752	-0.142	0.2902	-0.453	-0.125	0.3225	-0.363
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	-0.029	0.1502	-0.017	-0.037	-0.024	0.1195	-0.056	-0.068	0.0918	0.3175	-0.213	-0.218	0.105	0.1029	-0.11	-0.187	-0.446	-0.25	-0.227	-0.089	-0.272	-0.237	-0.474	-0.308	0.1957
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	0.1823	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	0.1521	-0.026	-0.043	0.248	-0.068	-0.086	0.2286	-0.143	-0.169	-0.155	0.0395	-0.156	-0.173	-0.137	0.0703	-0.093	-0.052	-0.036
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	0.1505	-0.022	-0.029	-0.028	-0.033	-0.046	-0.038	0.1291	-0.039	-0.038	0.1312	-0.031	-0.027	-0.014	-0.006
2	1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	-0.02	-0.026	-0.038	-0.034	-0.049	-0.07	-0.051	-0.061	0.1218	-0.066	-0.07	-0.049	0.1215	-0.042	-0.052	-0.05	-0.035	-0.027	-0.013	0.1622	
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	0.1479	-0.047	-0.053	-0.074	-0.072	-0.084	-0.093	0.0813	0.0727	0.0688	-0.098	0.0867	-0.089	-0.102	0.0871	0.1105	-0.058	-0.058	-0.047	-0.038	-0.026	-0.009	-0.003

(c)

-120-90min (data/average-1)/(error of data/average)																													
y \ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	-0.055	0.3998	-0.169	-0.054	-0.586	-0.003	0.2076	-0.215	0.5072	-0.32	-0.463	-0.218	0.2911	-0.198	-0.107	0.5095	-0.348	0.1496	0.0629	-0.228	0.1892	0.7754	-4E-04	-0.252	-0.041	-0.492	-0.082	0.3805	0.1696
13	-0.089	-0.517	0.2492	0.1857	-0.21	0.2811	0.3846	0.2075	-0.741	0.1288	0.1084	0.0815	0.161	0.9599	0.0269	-0.315	-0.186	0.4561	-0.514	0.2986	0.206	-0.025	-0.238	-0.074	0.0731	-0.599	0.3919	0.054	0.0145
12	-0.012	0.1816	0.2977	0.2371	0.283	-0.03	-0.238	-0.222	-0.126	0.4428	-0.59	-0.071	-0.101	-0.391	-0.33	-0.102	0.1902	-0.219	-0.717	0.6473	0.3128	-0.274	0.1309	-0.326	0.0926	-0.103	0.1194	-0.237	-0.281
11	-0.03	0.0876	0.1163	0.1569	-0.308	-0.174	-0.093	-0.122	0.1249	-0.108	-0.417	-0.261	-0.113	0.5522	0.6607	-0.275	-0.833	-0.25	0.2337	0.2267	0.3589	0.4874	-0.141	0.3759	-0.229	-0.409	0.4622	0.3831	-0.612
10	-0.146	-0.533	-0.012	-0.131	-0.453	-0.11	-0.015	-0.073	-0.482	-0.596	-0.13	0.2525	-0.239	-0.264	-0.226	0.455	0.0237	-0.266	0.2942	0.0047	0.3192	0.1155	-0.326	0.1416	0.1061	-0.031	-0.941	-0.467	0.2322
9	0.0778	0.0438	-0.027	-0.237	-0.313	-0.337	-0.1	-0.178	-0.087	-0.231	-0.183	-0.093	0.7375	-0.306	-0.228	-0.386	-0.563	-0.252	0.0313	0.1332	0.1701	0.2528	0.4162	0.0152	-0.115	-0.084	0.3182	-0.386	0.2577
8	-0.027	-0.042	-0.077	-0.081	-0.098	-0.101	-0.095	0.0688	-0.165	-0.027	0.1125	0.1651	0.0854	-0.069	-1.223	0.2436	0.7818	0.3125	-0.73	0.0217	0.1769	0.0184	0.0383	0.1312	0.1222	-0.139	-0.054	-0.02	0.3062
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	-0.092	-0.09	0.0888	0.2118	0.0785	0.1627	0.1435	-0.053	-0.121	0.2907	-0.21	0.1057	-0.156	0.3822	0.1356	0.3166	-0.356	0.5871	0.0282	0.2256	-0.275	-0.127	-0.329	-0.274	0.2014
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	0.1479	-0.02	-0.032	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	-0.043	-0.279	-0.008	-0.016	0.2451	-0.055	-0.805	-0.172	0.1441	0.3524	-0.26	0.2095	-0.01	-0.482	-0.363
5	-0.005	0.1599	-0.018	-0.012	-0.029	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	0.1195	-0.056	-0.066	-0.096	0.0637	-0.002	0.1442	0.228	-0.057	-0.11	0.2297	-0.071	0.0879	-0.227	-0.091	-0.237	-0.211	0.2058	-0.145	-0.008
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	-0.021	-0.026	-0.043	0.248	0.1144	-0.086	0.0906	0.0547	0.0336	-0.155	0.0395	0.1878	-0.173	0.059	0.0703	0.2323	-0.052	-0.013	-0.008
3	1E-010	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	0.003	0.1619	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	0.1513	-0.028	-0.028	-0.033	-0.046	-0.038	-0.051	0.039	0.1382	-0.047	-0.031	-0.027	-0.014	-0.006
2	1E-013	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	0.1528	-0.026	-0.038	-0.034	0.1417	-0.049	-0.07	-0.051	0.1199	-0.059	-0.066	-0.07	0.040	0.2555	-0.042	-0.052	-0.05	-0.035	-0.027	-0.013	0.1622
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	-0.053	-0.074	0.1117	-0.084	-0.093	0.2204	-0.12	0.0688	-0.093	-0.103	-0.089	0.2255	-0.102	-0.073	-0.058	-0.058	-0.047	-0.038	-0.278	-0.099	-0.003

(e)

60-30min

(data/average-1)/(error of data/average)	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
y\ x	14	0.3248	-0.012	-0.044	-0.429	0.0921	0.0809	-0.01	-0.215	-0.395	-0.23	0.1690	-0.382	-0.247	0.196	-0.697	0.8068	-0.348	-0.138	0.2047	-0.056	-0.051	0.3792	-4E-04	-0.151	-0.506	0.1285	-0.224	-0.248	0.1696
13	-0.27	0.1566	0.4005	-0.45	-0.389	-0.259	0.5094	0.5078	0.458	-0.244	-0.378	0.1345	0.111	-0.366	-0.723	-0.259	0.1819	-0.357	0.4331	0.0732	-0.259	0.0466	-0.793	-0.001	0.4209	0.2512	0.4590	-0.053	0.0145	
12	-0.162	-0.22	1.095	0.6013	0.488	0.0512	-0.152	0.505	-0.563	-0.335	-0.341	-0.224	-0.149	-0.197	0.3773	0.0742	0.3587	-0.379	-0.079	-0.873	0.2083	0.3361	-0.945	-0.079	-0.206	-0.366	0.4065	-0.589	0.0455	
11	0.0044	-0.015	-0.318	-0.146	-0.308	-0.174	-0.2	0.5553	-0.853	-0.108	-0.417	-0.393	-0.388	-0.134	-0.363	-0.629	-0.09	-0.58	-0.011	0.0747	-0.077	0.4874	-0.455	-0.358	0.2194	0.1568	0.1165	0.1301	-0.134	
10	0.0204	0.1787	0.218	0.0159	-0.25	-0.272	-0.015	-0.353	0.3136	-0.791	0.3572	0.3908	0.3619	0.1675	-0.387	0.1141	0.3383	-0.213	-0.048	0.0047	0.5148	0.8251	-0.174	-0.558	0.254	-0.031	0.394	-0.053	-0.333	
9	-0.114	0.0438	-0.245	0.2508	-0.313	-0.337	0.061	-0.178	-0.087	0.0543	-0.045	0.0199	0.1148	-0.532	-0.013	0.4684	0.6086	-0.497	-0.191	0.3373	0.2795	-0.991	-0.7	-0.062	0.0338	0.2147	0.3182	-0.101	0.0344	
8	-0.027	-0.042	-0.077	-0.081	-0.088	0.0883	0.093	-0.125	-0.165	-0.027	0.2348	-0.13	-0.23	0.059	0.0219	-0.127	-0.595	0.1697	-0.144	-0.239	0.2923	0.2723	0.1795	-0.025	0.4951	-0.549	-0.262	0.3654	-0.489	
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	-0.092	0.0973	-0.088	0.3236	-0.113	0.2798	-0.219	-0.278	-0.121	0.073	-0.407	0.1057	0.0771	0.0335	0.1356	0.3166	-0.17	-0.406	-0.676	0.0703	0.5225	-0.328	0.3306	-0.454	-0.227	
6	-0.008	-0.006	-0.003	-0.013	0.1517	-0.026	-0.02	-0.032	-0.03	0.1413	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	-0.043	-0.055	-0.008	0.1194	-0.127	0.1665	0.1273	-0.067	0.0583	0.1286	-0.051	0.0263	-0.255	0.0187	-0.363
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	-0.029	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	-0.062	0.1242	-0.068	-0.096	0.0637	-0.213	-0.005	0.105	-0.052	-0.348	-0.445	-0.017	0.3795	0.0879	-0.548	-0.272	0.2965	0.2129	0.0802	0.0532	
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	-0.068	-0.086	0.2286	-0.143	0.0336	-0.155	0.0395	-0.156	0.1758	0.2008	0.0703	-0.093	-0.052	-0.036	
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	0.2735	-0.046	-0.038	-0.051	-0.039	-0.038	-0.047	-0.031	-0.027	-0.014	-0.008	
2	1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	-0.02	-0.026	-0.038	-0.034	-0.034	-0.049	-0.07	-0.051	-0.081	-0.059	-0.066	-0.07	0.13	-0.059	-0.042	0.1273	-0.05	0.1413	-0.027	-0.013	-0.006	
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	-0.053	-0.074	-0.072	-0.084	-0.093	0.0813	0.0727	-0.125	0.0903	-0.103	-0.089	-0.102	-0.102	-0.073	-0.058	0.1226	0.1316	-0.038	-0.026	-0.009	-0.003	

(f)

30-0min

(data/average-1)/(error of data/average)	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
y\ x	14	-0.055	-0.012	-0.169	-0.289	0.0039	0.0809	0.2791	-0.215	0.1555	0.1654	-0.049	0.8225	0.3502	0.0721	-0.173	-0.374	-0.606	0.3423	-0.255	0.1013	0.1892	-0.458	-4E-04	-0.252	-0.139	-0.073	-0.082	-0.521	0.0235
13	0.2743	-0.178	-0.103	-0.143	0.2376	-0.259	0.4479	0.3925	-0.322	0.5525	0.1632	0.0815	0.3526	-1.219	0.2561	0.2929	0.4639	0.2108	0.1729	0.2441	-0.116	0.0466	-0.064	-0.226	0.1429	-0.266	-0.031	-0.364	0.2546	
12	-0.012	-0.376	-0.428	-0.79	0.4292	-0.678	0.1581	-0.302	-0.061	0.1368	0.3892	-0.121	-0.007	0.2847	0.1433	-0.057	1.2266	0.6382	-0.185	0.4734	0.4133	0.2255	-0.945	-0.326	0.3152	-0.025	-0.051	-0.237	0.1628	
11	-0.376	0.3557	0.2842	0.1569	-0.449	0.2029	-0.2	0.057	-0.026	-0.527	-0.174	-0.462	0.3241	0.1403	-0.223	-0.323	-0.658	-0.148	0.1382	0.0221	-0.262	0.0436	0.134	0.5537	-0.099	-0.142	0.1938	0.2232	0.3341	
10	-0.146	-0.533	0.218	0.1398	-0.25	-0.272	-0.529	-0.353	-0.065	-0.195	0.3572	0.0465	0.0846	0.1675	0.3026	-0.071	-0.114	0.2588	0.4296	-0.103	0.055	0.1753	0.4694	0.2742	0.0275	-0.031	-0.161	0.2398	0.2322	
9	-0.114	0.0438	-0.245	-0.237	-0.082	0.0803	-0.338	-0.178	0.4514	0.2637	0.2689	0.1211	-0.461	0.0671	-0.45	-0.553	-0.483	-0.252	0.1363	-0.328	-0.126	0.1384	0.4735	-0.314	0.6945	-0.17	0.1743	-0.101	-0.286	
8	-0.027	-0.042	-0.077	-0.081	-0.088	0.0883	-0.095	0.0688	0.1816	0.2462	-0.263	-0.13	-0.498	-0.226	0.123	0.0724	-0.275	-0.275	0.1946	0.367	-0.207	-0.05	0.1795	0.4097	-0.44	-0.139	-0.054	0.2749	0.0913	
7	-0.021	0.1436	-0.054	-0.059	0.0957	-0.09	-0.088	-0.122	0.0785	0.1627	0.2625	-0.053	0.1715	-0.246	0.2794	0.2075	0.3548	-0.191	-0.348	0.3905	0.1418	-0.406	-0.054	-0.58	0.453	-0.037	-1.051	0.1995	-0.051	
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	-0.026	-0.02	-0.032	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	-0.043	-0.279	-0.008	0.1194	0.0196	0.0822	-0.56	-0.172	-0.133	0.2851	0.2085	0.1214	-0.255	-0.113	-0.122	
5	-0.005	-0.011	0.1547	-0.012	-0.029	-0.023	-0.017	-0.037	0.1498	-0.062	0.1242	0.1148	-0.096	-0.132	-0.213	-0.218	-0.273	-0.276	-0.11	-0.016	-0.017	-0.25	-0.051	-0.27	-0.091	0.1939	-0.211	-0.078	-0.145	
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	0.1144	-0.086	0.0906	-0.143	0.1785	0.045	-0.162	-0.156	0.1758	-0.137	0.2108	0.0949	0.1273	-0.036	
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	-0.033	-0.046	-0.038	-0.051	-0.039	-0.038	-0.047	-0.031	-0.027	-0.014	-0.008	
2	1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	0.1528	0.1479	-0.038	0.1421	-0.034	-0.049	0.1129	0.1281	-0.081	-0.059	-0.066	-0.07	-0.049	0.1215	-0.042	-0.052	-0.05	-0.035	-0.027	-0.013	-0.006	
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	0.1312	-0.053	0.1098	0.1117	-0.094	0.0945	0.0813	-0.12	-0.125	-0.098	-0.107	-0.102	-0.102	0.2347	-0.102	0.0871	0.1105	-0.058	-0.058	-0.047	-0.038	-0.026	-0.009

(g)

0.30min																													
(data/average-1)/(error of data/average)																													
y\ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0.1009	-0.012	0.1648	-0.054	0.0039	-0.188	0.0676	-0.137	-0.008	0.1654	-0.127	0.451	-0.247	-0.059	-0.697	0.5616	-0.268	-0.062	0.4004	0.5691	0.478	0.0425	-0.478	-0.056	0.2177	-0.192	0.0374	-0.248	0.0235
13	0.0539	0.0572	0.087	-0.143	-0.301	0.2063	-0.319	0.0748	0.2764	1.228	0.3718	-0.583	0.3959	-0.147	-0.119	-0.611	-0.131	-0.487	-0.443	0.352	0.0824	-0.337	0.0941	-0.679	-0.164	0.1024	-0.135	-0.193	0.2546
12	0.3998	0.4944	-0.016	-0.059	0.8902	-0.402	-0.424	-0.07	-0.73	-0.209	0.3892	-0.556	0.0836	-0.059	-0.33	-0.102	0.44	-0.167	-0.079	-0.066	0.3128	-0.274	-0.303	0.0709	0.0926	0.2571	-0.751	0.1072	0.0455
11	-0.182	-0.131	0.2842	0.4728	0.0232	-0.423	0.5376	0.057	0.1929	0.5495	-0.417	0.0432	0.0396	-0.231	-0.178	-0.524	0.0491	0.0479	0.0396	-0.502	-0.461	0.3301	0.2595	-0.272	0.3603	-0.229	0.4039	-0.19	0.1336
10	0.0204	-0.079	-0.012	0.1358	-0.091	0.1344	-0.015	-0.353	-0.065	0.1849	-0.13	0.189	-0.153	-0.063	-0.332	0.414	0.12	-0.06	-0.319	-0.782	-0.243	0.1155	0.1669	0.6288	-0.14	0.6015	0.0218	0.4664	-0.144
9	0.0778	0.0438	-0.027	-0.237	-0.082	-0.101	-0.336	0.1265	0.3681	-0.074	0.0719	0.2125	0.2031	0.2955	-0.228	-0.641	0.3227	-0.027	0.0313	-0.146	0.0557	0.0761	0.1049	0.0896	0.0338	-0.257	-0.284	-0.579	-0.295
8	-0.027	0.1351	-0.077	0.1039	-0.098	-0.101	-0.095	-0.125	0.0372	-0.245	-0.041	-0.373	-0.054	0.1697	-0.374	-0.242	0.1465	0.0152	0.1946	0.4722	-0.207	-0.268	-0.611	-0.568	-0.018	0.3151	0.2883	-0.291	-0.047
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	-0.092	-0.09	0.0888	-0.122	-0.113	-0.191	-0.006	-0.053	-0.362	-0.246	-0.719	-0.86	-0.033	0.0335	-0.233	-0.088	-0.087	-0.406	-0.226	-0.401	-0.187	-0.328	-0.614	0.1025	-0.494
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	0.1479	-0.02	-0.032	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	-0.265	-0.279	-0.179	0.2287	0.0196	-0.585	0.2184	-0.421	0.2228	-0.044	-0.15	0.2889	-0.811	-0.482	-0.122
5	-0.005	-0.011	-0.016	-0.012	0.1469	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	-0.062	-0.056	-0.086	-0.096	-0.132	-0.213	-0.128	0.228	-0.052	0.032	0.3301	-0.17	0.1849	0.2031	-0.27	0.0523	-0.507	-0.537	-0.078	0.0532
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	0.1577	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	-0.068	0.1004	-0.098	-0.143	-0.169	0.3885	-0.162	-0.156	0.0305	0.059	0.0703	0.094	0.1273	0.1405	-0.008
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.008	0.1585	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	-0.033	-0.046	-0.038	-0.051	-0.039	-0.038	0.1329	0.0715	0.1475	0.1577	-0.008	-0.008
2	-1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	0.1562	-0.017	-0.022	-0.026	-0.038	-0.034	0.1417	-0.040	-0.07	0.1281	-0.061	-0.059	-0.066	-0.07	0.13	-0.059	0.1355	-0.052	-0.05	-0.035	-0.027	-0.013	-0.006	-0.006
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	0.1269	-0.074	-0.072	-0.084	0.0913	-0.12	-0.125	-0.098	-0.103	0.2347	-0.102	0.0871	0.1105	-0.058	-0.058	-0.047	-0.038	-0.026	-0.009	-0.003	-0.003

(i)

60.90min
(data/average-1)/(error of data/average)

y\ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	-0.279	-0.162	-0.743	-0.429	-0.303	-0.091	-0.01	0.5615	-0.006	-0.23	0.1699	-0.141	-0.247	0.3136	0.4186	-0.374	-0.268	-0.711	-0.517	0.1763	0.3394	-0.684	0.2245	-0.252	0.2177	-0.073	0.3237	-0.246	0.1696
13	-0.548	0.4178	0.3305	-0.143	0.5177	0.2811	-0.319	-0.141	-0.65	0.4017	0.0524	0.3852	0.444	-0.541	0.1664	0.2468	-0.131	0.2108	0.4331	-0.048	-0.187	-0.025	0.0169	0.2408	-0.08	0.18	0.0647	-0.053	0.1468
12	-0.162	-0.01	-0.109	-0.231	-0.557	0.0512	-0.341	-0.302	0.1845	0.0823	-0.168	0.0753	-0.246	0.4443	0.3384	-0.335	-0.224	0.5984	-0.132	-0.29	0.0435	-0.139	-0.47	0.4632	0.3152	0.2571	-0.348	0.0052	-0.281
11	-0.376	0.1806	0.2046	0.0625	0.2122	0.0283	-0.452	0.2865	-0.026	-0.429	-0.333	-0.807	-0.388	-0.087	0.8444	0.0034	-0.466	0.4161	0.2267	0.3589	0.4874	0.2595	-0.519	0.0671	0.1568	-0.249	-0.323	0.0134	
10	0.1521	0.0632	-0.012	0.1358	0.0389	-0.478	-0.015	0.0388	0.2292	-0.313	0.2103	0.1172	-0.498	-0.332	0.1672	0.0689	-0.642	-0.725	0.34	-0.782	-0.061	-0.632	-0.578	0.3375	-0.518	0.116	0.331	-0.467	0.1255
9	0.0778	-0.156	-0.245	-0.021	0.0768	-0.101	-0.336	-0.433	0.2759	-0.074	0.1757	-0.221	0.2031	-0.017	0.3682	-0.468	-1.489	-0.027	-0.191	0.0797	-0.003	0.1953	0.2969	0.4859	-0.042	-1.146	0.0071	-0.101	-0.295
8	-0.027	-0.042	-0.077	0.1039	-0.098	-0.101	-0.095	0.0688	0.1816	0.1253	0.2348	0.1651	-0.054	0.059	-0.091	-0.127	-0.179	-0.916	-0.002	-0.381	-0.139	-0.691	0.3738	-0.025	-0.253	0.2515	0.0406	-0.291	-0.047
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	0.0957	-0.09	-0.088	-0.122	0.0785	-0.191	-0.219	-0.278	-0.121	0.073	0.1819	0.1057	-0.033	-0.072	0.2181	-0.247	0.2808	0.1108	-0.41	0.4364	0.0407	-0.037	-0.329	0.1025	-0.227
6	-0.008	-0.006	-0.013	0.1517	-0.026	-0.02	-0.032	0.1451	-0.035	-0.059	0.1242	0.2272	-0.11	0.0454	0.1108	0.3248	-0.008	0.3301	0.0196	0.0622	-0.369	-0.067	-0.035	-0.044	-0.26	-0.186	-0.611	0.1318	0.1712
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	-0.029	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	-0.062	-0.056	0.1148	-0.096	-0.132	-0.002	-0.218	-0.273	0.1029	0.052	-0.187	-0.189	-0.523	0.2011	0.2743	-0.091	-0.507	0.1008	-0.078	-0.145
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	0.1566	-0.014	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	-0.068	-0.086	0.0906	0.1971	0.1785	0.045	0.0395	0.0442	-0.173	-0.137	-0.123	0.0949	0.1273	-0.036
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	-0.033	0.1324	-0.038	-0.051	-0.039	0.1382	0.1312	-0.031	-0.027	-0.014	-0.008
2	1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	0.1562	-0.017	-0.02	-0.026	-0.038	-0.034	-0.034	-0.049	0.1129	0.1281	-0.081	-0.059	-0.066	-0.07	-0.049	-0.059	-0.042	-0.052	-0.05	-0.035	-0.027	-0.013	-0.006
1	0.1626	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	-0.053	-0.074	-0.072	0.1016	-0.093	0.0813	-0.12	-0.125	0.0903	-0.103	-0.089	-0.102	0.0871	-0.073	-0.058	-0.058	-0.047	-0.038	-0.026	-0.009	-0.003

(j)

90.120min
(data/average-1)/(error of data/average)

y\ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
14	-0.279	-0.162	-0.169	-0.2278	0.0039	0.3082	-0.179	-0.137	0.5703	-0.334	-0.477	-0.066	-0.1	-0.127	0.4706	-0.085	0.1558	0.1496	-0.171	-0.14	-0.563	-0.031	0.1552	0.3391	0.1388	-0.325	0.1431	-0.248	-0.182	
13	0.0539	-0.33	0.087	-1.047	0.1017	0.4888	0.0336	0.0053	0.1563	-0.454	-0.515	-1.031	0.6187	-0.044	-0.604	-0.046	0.0299	-0.487	0.7598	-0.241	0.018	0.5445	0.1683	-0.001	0.2146	-0.368	0.1547	0.064	-0.153	
12	-0.652	0.1816	-0.016	0.1707	0.283	0.2163	-0.07	0.268	-0.061	0.1368	-0.168	-0.33	-0.296	-0.544	-0.022	0.1168	0.3996	-0.271	0.2178	-0.066	0.3635	0.6413	0.2581	-0.079	0.0121	-0.188	0.0359	0.1072	0.1628	
11	-0.03	0.1806	-0.182	0.2438	-0.449	0.4291	-0.319	-0.324	0.0518	-0.108	-0.333	0.4658	-0.011	-0.65	-0.269	-0.275	0.5531	0.0002	0.2803	0.1769	0.3589	-0.281	-0.215	-0.109	-0.229	0.2215	0.2644	0.1301	-0.134	
10	0.1521	0.1787	0.1103	0.1358	0.1507	0.0215	-0.151	-0.785	0.2292	-0.313	-0.036	-0.03	0.3619	0.8317	-0.739	-0.462	-0.263	0.804	0.5167	0.444	-0.851	0.0563	-0.031	0.072	-0.186	0.4631	0.183	0.1469	0.1255	
9	-0.114	0.0438	-0.027	-0.237	0.2027	0.0603	0.389	0.1265	0.0557	0.1652	-0.045	0.1211	-0.082	0.2855	-0.013	-0.018	-0.483	0.2797	0.3828	0.4341	-0.255	-0.551	0.6896	0.4659	-0.188	0.7725	0.3182	0.0127	-0.295	
8	0.1475	-0.042	-0.077	0.2402	0.0066	-0.101	-0.065	-0.125	-0.165	-0.027	-0.263	-0.13	-0.054	-0.425	-0.091	-0.242	0.069	0.3125	-0.638	-0.239	0.1171	-0.428	-0.035	-0.473	0.3841	0.3151	-0.262	0.0881	-0.223	
7	-0.021	-0.032	0.054	-0.059	0.0957	0.0973	-0.088	0.0715	-0.113	0.0157	-0.219	0.1019	-0.121	0.1877	0.0719	-0.144	-0.156	0.0335	0.3589	0.3905	0.0684	0.2186	0.2486	-0.155	-0.275	0.3421	-0.614	0.1025	0.0882	
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	-0.026	0.1528	-0.032	0.1451	0.1413	-0.059	-0.056	-0.1	0.0809	-0.154	-0.043	0.1009	0.2359	0.2297	0.0196	-0.195	0.2184	0.0301	-0.652	-0.044	0.2085	0.2889	0.433	0.1318	-0.122	
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	-0.029	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	0.1195	-0.056	0.1148	0.0918	-0.132	-0.213	-0.005	0.105	-0.052	0.052	-0.016	-0.017	0.0699	0.0879	0.45	0.0523	-0.237	-0.211	-0.078	-0.145	
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	-0.068	0.1004	-0.098	-0.143	-0.169	0.3028	0.1837	-0.156	0.0305	0.2008	-0.123	-0.093	-0.052	-0.036	
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	-0.033	-0.046	-0.038	-0.051	-0.039	-0.038	-0.047	0.1444	-0.044	-0.027	-0.014	-0.008
2	1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	-0.02	-0.026	-0.038	-0.034	-0.034	0.13	-0.07	0.1281	-0.081	-0.059	0.1184	-0.07	-0.040	-0.059	-0.042	-0.052	0.1288	-0.035	-0.027	-0.013	-0.006	
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	0.1479	-0.047	-0.053	-0.074	-0.072	-0.084	-0.093	-0.11	-0.12	0.3215	-0.098	-0.103	0.0977	-0.102	0.0871	0.1105	0.1222	0.1226	-0.047	-0.038	-0.028	-0.009	-0.003	

(k)

120.150min																													
(data/average-1)/(error of data/average)																													
y\ x	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	-0.055	-0.652	-0.169	0.3064	0.255	0.3062	0.5876	0.5615	0.5072	0.1654	0.0289	0.8225	0.2305	-0.059	-0.687	-0.154	0.5114	-0.217	-0.59	0.1013	0.3394	-0.031	-4E-04	0.1914	-0.37	0.5296	-0.082	-0.07	-0.182
13	0.2743	0.0572	-0.33	-0.242	-0.21	-0.031	0.4479	-0.219	-0.104	0.5032	0.2695	-0.26	-0.443	0.5544	0.2561	-0.204	-0.42	0.1591	0.8465	-0.802	0.894	-0.337	0.0169	0.3149	0.4638	-0.368	0.1547	0.3463	0.1668
12	-0.253	0.0676	-0.016	0.2371	-0.118	-0.116	0.2285	0.2927	-0.194	0.0823	0.2476	0.2596	-0.599	0.202	0.8232	0.1168	0.2755	0.5581	0.5732	-0.012	-0.525	-0.734	-0.47	-0.58	-0.206	0.0513	-0.348	0.3734	0.1628
11	0.2029	-0.26	-0.46	0.1569	0.1242	0.567	0.004	-0.029	-0.383	0.2022	-0.417	-0.462	-0.822	-0.134	0.4405	-0.907	-0.44	-0.303	0.0396	-0.257	0.2564	-0.081	-0.215	0.2486	-0.099	0.1568	-0.149	0.2232	0.1336
10	0.0204	0.0632	0.3134	0.3361	-0.453	-0.478	-0.015	0.0391	0.3136	-0.313	0.8111	0.1172	0.0846	-0.402	0.1672	-0.318	-0.018	0.3142	0.1036	0.0047	-0.181	-0.332	0.1669	0.3989	-0.903	0.9622	0.1055	-0.302	-0.626
9	0.0778	0.0438	-0.245	-0.237	0.2027	-0.101	0.061	-0.178	-0.268	0.1652	-0.183	-0.221	-0.194	0.1459	-0.081	-0.468	0.3227	0.0788	-0.134	0.0797	0.2254	-0.322	-0.259	0.6589	0.269	-0.684	-0.284	-0.386	0.0344
8	-0.027	-0.047	-0.067	-0.061	-0.098	-0.101	0.2306	0.0688	-0.165	-0.027	0.2348	0.0348	0.3919	0.1697	-0.218	-0.024	-0.179	-0.714	0.2565	0.2004	-0.007	-0.347	-0.191	0.5955	-0.175	-0.824	-0.384	0.0891	0.2042
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	-0.092	-0.09	-0.088	0.0715	0.0785	0.2788	-0.006	0.1019	0.1715	0.2907	-0.055	-0.309	0.0771	0.1292	0.0532	-0.012	0.7582	0.6428	0.3173	0.3687	-0.109	-0.127	-0.005	-0.127	-0.227
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	0.1479	-0.02	0.1432	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	0.0891	-0.11	0.0454	-0.265	-0.279	-0.179	-0.187	-0.802	0.1865	0.4631	-0.067	-0.133	-0.356	0.0427	0.1214	-0.125	0.1318	-0.122
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	-0.029	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	-0.062	-0.056	-0.0891	-0.06	0.0454	-0.265	-0.279	-0.179	-0.187	-0.802	0.1865	0.4631	-0.067	-0.133	-0.356	0.0427	0.1214	-0.125	0.1318	-0.122
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	-0.014	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	-0.068	-0.068	-0.098	0.0547	0.0336	-0.15	0.0395	0.042	-0.173	0.059	-0.123	0.2233	-0.052	-0.038
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	-0.013	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	-0.033	-0.046	0.2699	-0.051	-0.039	0.1382	-0.047	-0.131	0.0274	-0.014	-0.008
2	-0.013	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	-0.016	-0.017	-0.02	-0.026	-0.038	-0.034	-0.034	0.2629	-0.051	-0.061	-0.059	-0.066	0.1129	-0.049	-0.059	0.1355	-0.052	-0.055	-0.055	-0.027	-0.013	-0.006	
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	0.1269	-0.074	0.072	-0.084	-0.093	0.2224	0.2128	0.0888	-0.068	0.0867	-0.089	-0.102	-0.102	0.073	-0.073	-0.058	-0.058	-0.047	0.139	-0.026	-0.009

本研究で生成したミュオグラムのビン数は 406 であるので、99% C.L. 程度（ビンの中の絶対値が 1 以上）の deviation は 1 枚のミュオグラム中に統計的に通常 2~3 ビン程度あっても不思議ではない。ただし、系統的に負の deviation、あるいは正の deviation が一か所に集まっている部分があれば（例えば Fig. 6.3(g) のビン ID $0 \leq X \leq 1, Y = 7$ ），そのような領域ではより大きな空間スケールで密度構造が変化している可能性があるため、より荒い角度分解能のミュオグラムにするかわりに統計精度を上げることで議論できる可能性がある。

一般的にはミュオグラムに記録されている 1 ビンあたりのイベント数が統計的に十分であるとは限らない。たとえば、本研究で用いたミュオグラフィ観測装置の有感面積では 30 分×30 枚 = 900 分（15 時間）のデータ取得時間では密度長にして 1 km. w. e. を超える厚みを持つ、対象ボリウムに対しては、1 ビンあたり十分な統計を得られない¹⁹。そこで、合成ミュオグラム表示モジュールのパッキング（ミュオグラムの角度分解能をひきかえにしてイベント数を増やして統計精度を上げること）機能を利用して、統計精度を上げ、より高いミュオグラムコントラストで議論を行うことが有用である。

実際のミュオグラフィ観測では、変化している領域の大きさや度合は未知であるので、パッキングを開始するビン ID や足し合わせるビン数を調整しながら、もっとも deviation index が大きくなる場所を探索する。あらゆる組み合わせでパッキングを行っても、deviation index が大きくならない場合は、パッキング後のビン幅に相当する空間スケールで密度構造の変化は起きていないと結論付けられる。本研究ではパッキングプロセスにより大きくなった deviation index として有効な値の閾値を ± 1 と設定した。この閾値以下の deviation index については、統計的有意度が低いものとし、密度構造に変化があったとは言いきれないこととした。Fig. 6.3 に対して足し合わせるビンの数及びパッキング開始位置を変化させながら相対ミュオグラムの 99% C.L. 表示を行った結果については画像の分量が多いため、付録 C にその結果を示す。ただし、本研究では仰角方向にパッキングは行わないこととした。理由はミュオグラムのビン数が方位角方向に対しては 29 個であるのに対して、方

¹⁹ 本研究で用いたミュオグラフィ観測装置は、薩摩硫黄島の観測で 3 日間程度の時間分解能であったと報告されている (Tanaka *et al.* 2014)

方位角方向に対しては、実際使えるビン数が 6 ビン程度²⁰であるから、パッキングすると鉛直方向の情報が大きく失われることが懸念されたからである。Fig. 6.4 には Fig. 6.3(g) すなわち、噴火直後から 30 分の間のミュオグラムについて昭和火口底方向の方位角 ($X = 0$) と仰角 ($Y = 7$) を含むビン ID に対する deviation index のみ、足し合わせるビンの数およびパッキング開始位置の関数として表示した結果を示す。

Beginning of azimuth ID for sum	-14	-0.72	-1.6	-1.1	-1.8	-0.93
	-13		-0.82	-1.5	-0.99	-1.6
	-12			-0.70	-0.63	-1.2
	-11				-1.0	-0.75
	-10					-0.69
		1	2	3	4	5
Number of azimuth bins to be summed up						

Fig. 6.4: Deviation index as a function of the number of the packed bins. A detailed method to derive this matrix is shown in Appendix C.

Fig. 6.4 に示されるように、開始するビン ID が ($X = 14$) , 足し合わせるビン数が 4 の時に、ビン ID ($-2 \leq X \leq 1, Y = 7$) の方向に最も強い deviation index (-1.8) を認めた (Fig. C.1(part7) 参照)。従って、噴火直後から 30 分の間に上記ビン ID に対応する方向において、99% C.L. を超える統計的に有意な透過ミュオンフラックスの減少があったと考えられる。上記ビン ID ($-2 \leq X \leq 1, Y = 7$) に対応する方向 ($-82 \text{ mrad} \leq \phi \leq 49 \text{ mrad}, 213 \text{ mrad} \leq \theta \leq 246 \text{ mrad}$) は昭和火口底部に相当する (Fig. 6.14, Fig. 6.15 参照)。また、足し合わせるビン数が 5 ビンの場合 (Fig. C.1(part11)) , 強い deviation が認められなかったことから、仮に

²⁰ ミュオグラムには仰角方向には実際 14 ビン存在するが、ミュオグラム下方 4 ビンは山体が厚すぎてほとんど透過してくるミュオンイベントを観測できないことと、上方 4 ビンは稜線上であり、山体内部の情報を含まないので、実際使えるのは 6 ビンである。

昭和火口の位置において密度構造の変化があったとして、その空間スケールはおおよそ方位角方向に 400 m 程度となる。

一方、開始するビン ID が ($X = 13$)、足し合わせるビン数が 3 の時に、ビン ID ($-1 \leq X \leq 1, Y = 7$) の方向に次に強い deviation index (-1.5) を認めた (Fig. 6.4)。この deviation index も統計的に有意であると判断できる²¹。そこで、上記 2 つのビン領域 (ビン ID ($-2 \leq X \leq 1, Y = 7$) 及び ($-1 \leq X \leq 1, Y = 7$)) に噴火直後から 30 分間と全観測期間にそれぞれ記録されたミュオンイベントの中心値の比を計算した。この比が 1 から離れるほどその方向における密度変化が大きいと判断される。結果は 4 ビンパッキングの値がやや大きな変化を示したものの、68% C.L. の統計誤差の範囲内で一致し、4 ビン、3 ビンでそれぞれ $0.086^{+0.15}_{-0.054}$ と $0.10^{+0.17}_{-0.063}$ であった²²。この結果から言えることは、方位角方向に足し合わせたビン数が 4 (これは昭和火口位置で方位角方向 400 m の距離に相当) のときの変化が最も統計的に有意となるが、ビン数が 3 (昭和火口位置で方位角方向 300 m の距離に相当) の時の透過ミュオンフラックスの減少割合はビン数が 4 の時と区別がつかない。すなわち、密度が変化している領域の幅が 400 m なのか 300 m なのかについては判断できないということを意味している。

以上の結果より、ビン ID ($-2 \leq X \leq 1$) 及び ($-1 \leq X \leq 1$) の範囲両方に対応する方位角方向および、ビン ID ($Y = 7$) に対応する仰角方向の周辺 ($Y = 9, 8, 6, 5$) において、噴火イベントセレクトの適用を再び試み、桜島昭和火口の直上・内部・直下の 3 つの仰角領域に対して噴火前後におけるミュオンイベントレートの比較を行った。ビン ID ($Y = 7$) に対応する仰角方向周辺についてもミュオンイベントレートの比較を行った理由は、今回、大きな統計的有意度で透過ミュオンフラックスが変化した方向が昭和火口の方向であること、噴火イベントに際してのみその変化が見られたことから、この変化が鉛直方向のマグマ頭位の変化を反映している可能性があると考えたからである。次節では、噴火前後の昭和火口底近傍における透過ミュオンフラックスの変化について、より詳細に議論する。

²¹ deviation index の大小は統計的有意度の大小を示すのであり、必ずしも透過ミュオンフラックスの変化 (密度変化) の度合いの大小を表すものではないことに注意が必要である。

²² 2 ビン (ビン ID: $0 \leq X \leq 1, Y = 7$) については $0.0^{+0.17}_{-0.0}$ であり、同じく 68% C.L. の統計誤差の範囲内で一致する。

6.3. 昭和火口底近傍における透過ミュオンフラックスの変化

6.2 節において、明らかに統計的に有意な変化が見られた時間スケールは噴火直後から 30 分以内であった。この節では、合成ミュオグラム表示モジュールの適用結果をもとに、再び噴火イベントセクターモジュールを用いて、ビン ID ($-2 \leq X \leq 1$, $Y = 7$) に対応する方向（仰角 $213 \text{ mrad} \leq \theta \leq 246 \text{ mrad}$, 方位角 $-82 \text{ mrad} \leq \phi \leq 49 \text{ mrad}$ ）に対して、噴火後 30 分間のミュオンイベント（イベントレート）を噴火時間間隔の関数としてプロットし、ミュオグラムを合成すると昭和火口底近傍における透過ミュオンフラックスの変化の統計的有意度が最大となる噴火間隔を特定した。結果を Fig. 6.5 に示す。ビン ID ($-2 \leq X \leq 1$, $Y = 7$) に対応する方向についても、噴火時間間隔が 10 時間以上の時にイベント減少の統計的有意度が最大となることがわかる。従って、ビン ID ($-1 \leq X \leq 1$) 及び、ビン ID ($-2 \leq X \leq 1$) 両方の方位角領域に対して、イベントレートを桜島昭和火口の直上・内部・直下の 3 つの仰角領域（それぞれ仰角 $246 \leq \theta \leq 311 \text{ mrad}$; 仰角 $197 \leq \theta \leq 213 \text{ mrad}$; 仰角 $148 \leq \theta \leq 213 \text{ mrad}$ ）について示した。結果を Fig. 6.6~Fig. 6.13 に示す。

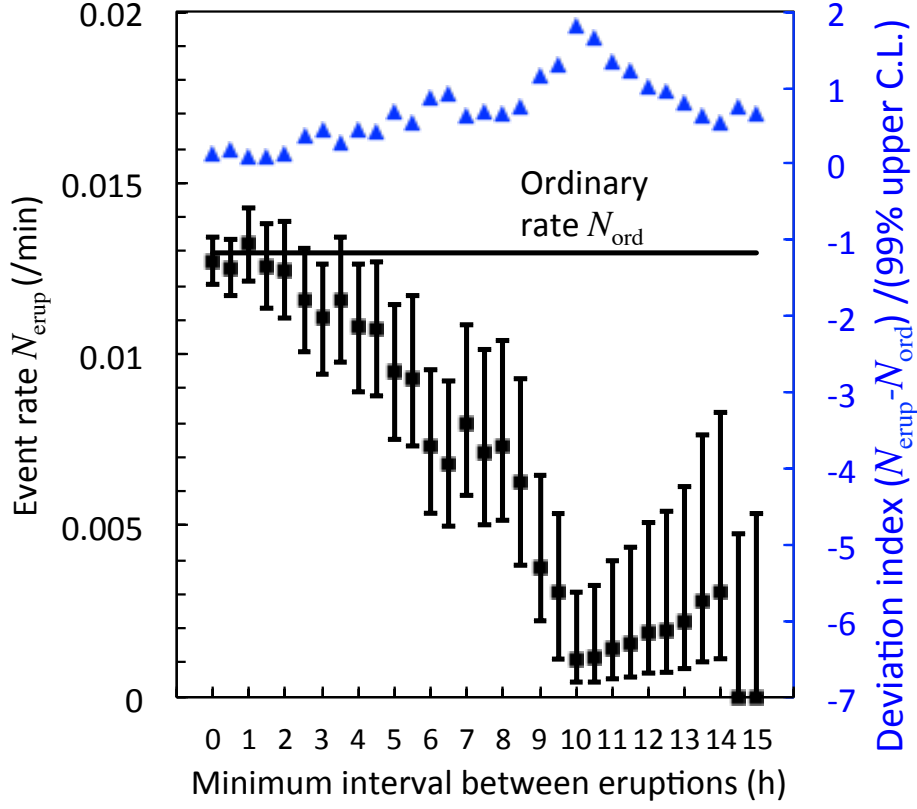


Fig. 6.5: Muon event rate right after eruptions N_{erup} as a function of the time interval between eruptions for bin IDs $-2 \leq X \leq 1$, $Y = 7$. The deviation index $(N_{\text{erup}} - N_{\text{ord}}) / (99\% \text{ upper C.L.})$ that is compared to the ordinary event rate N_{ord} without eruptions is also shown, where the 99% upper C.L. is the 99% upper C.L. of statistical error of N_{erup} . The squares (■) and triangles (▲) represent the event rate and the deviation index, respectively.

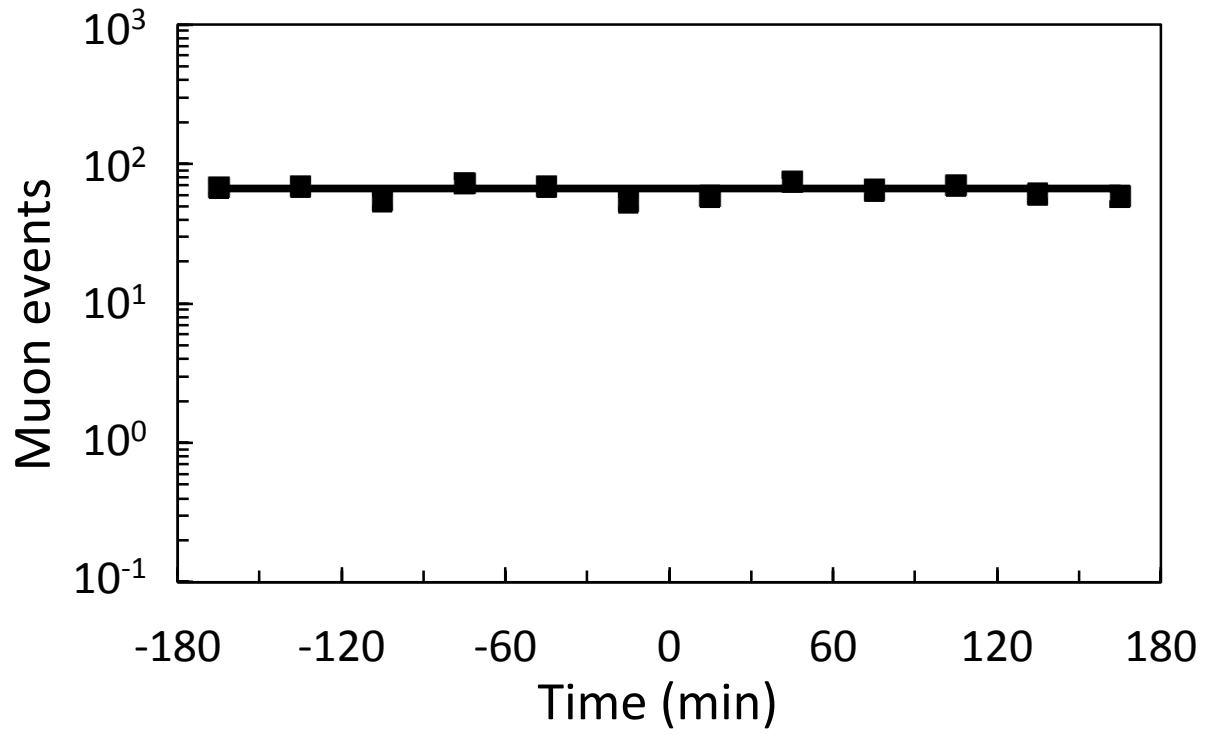


Fig. 6.6: Open-air muon events observed directly above the Showa crater ($279 \leq \theta \leq 311$ mrad, $-48 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period. The statistical errors of the events are within the data points (■).

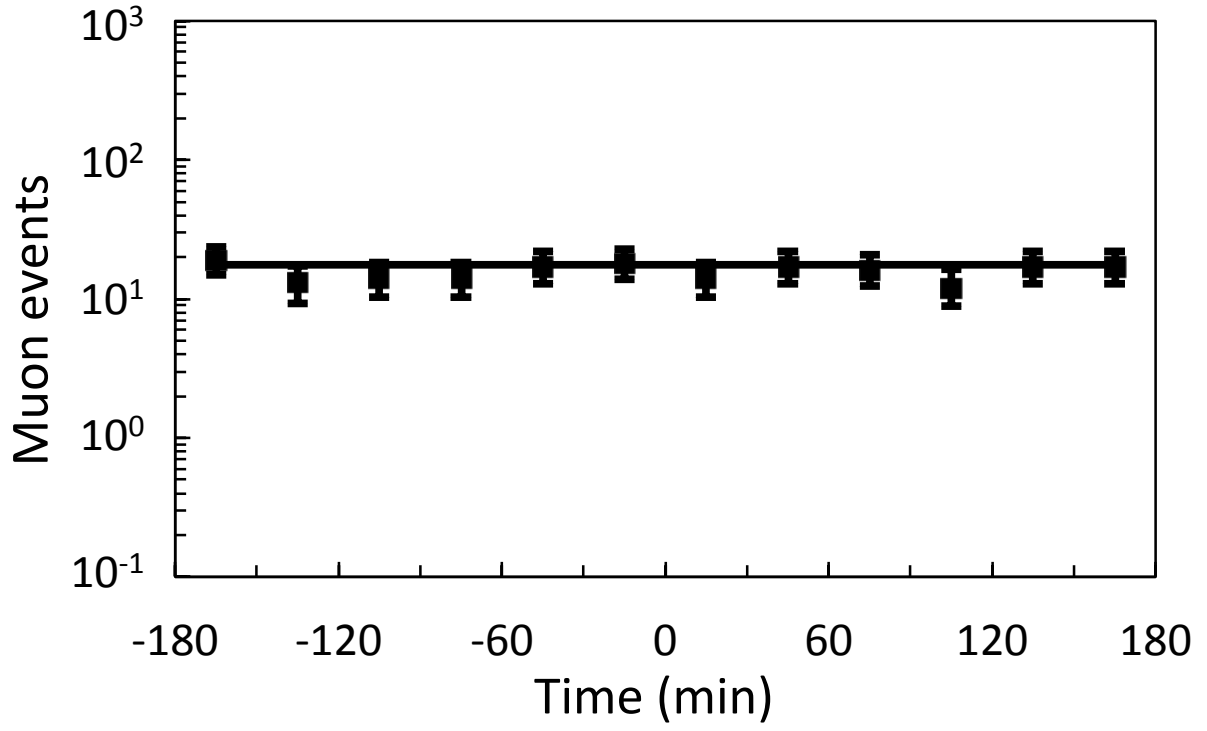


Fig. 6.7: Open-air muon events observed directly above the Showa crater ($246 \leq \theta \leq 279$ mrad, $-48 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period.

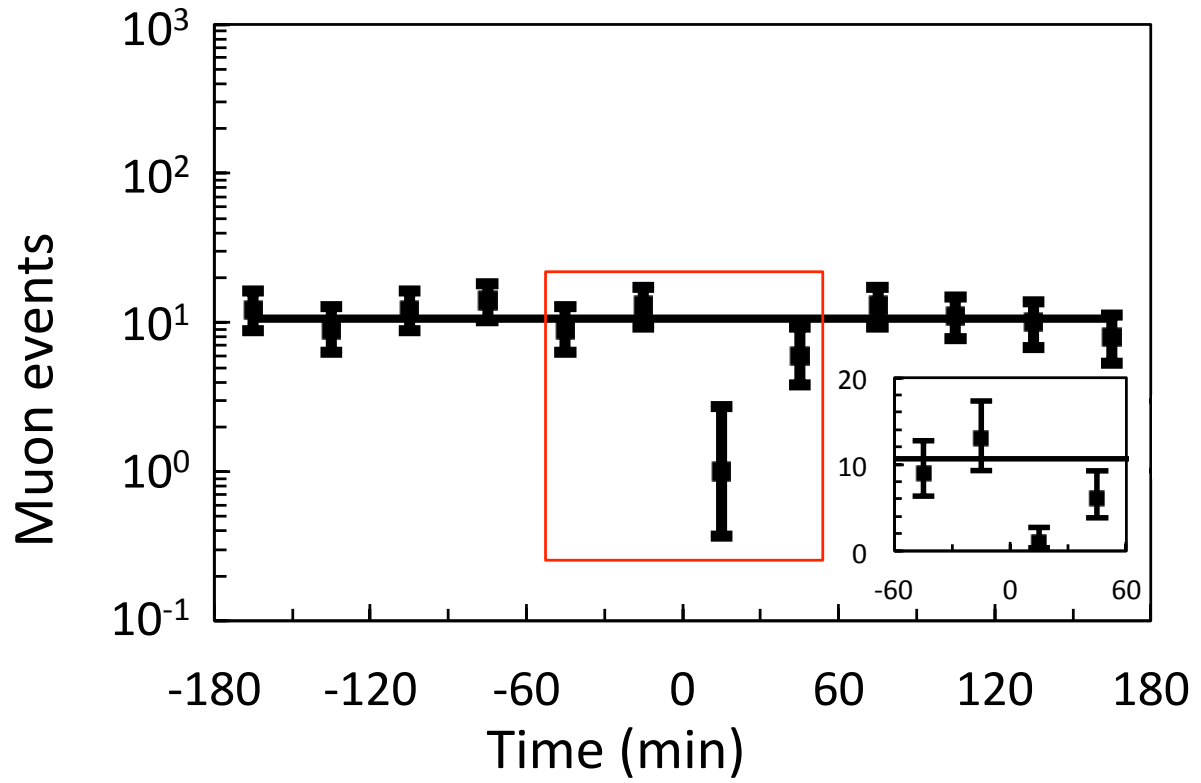


Fig. 6.8: Muon events observed in the vicinity of the Showa crater floor ($213 \leq \theta \leq 246$ mrad, $-48 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period. The inset shows the muon events observed in the time range between -60 and 60 minutes in the linear scale.

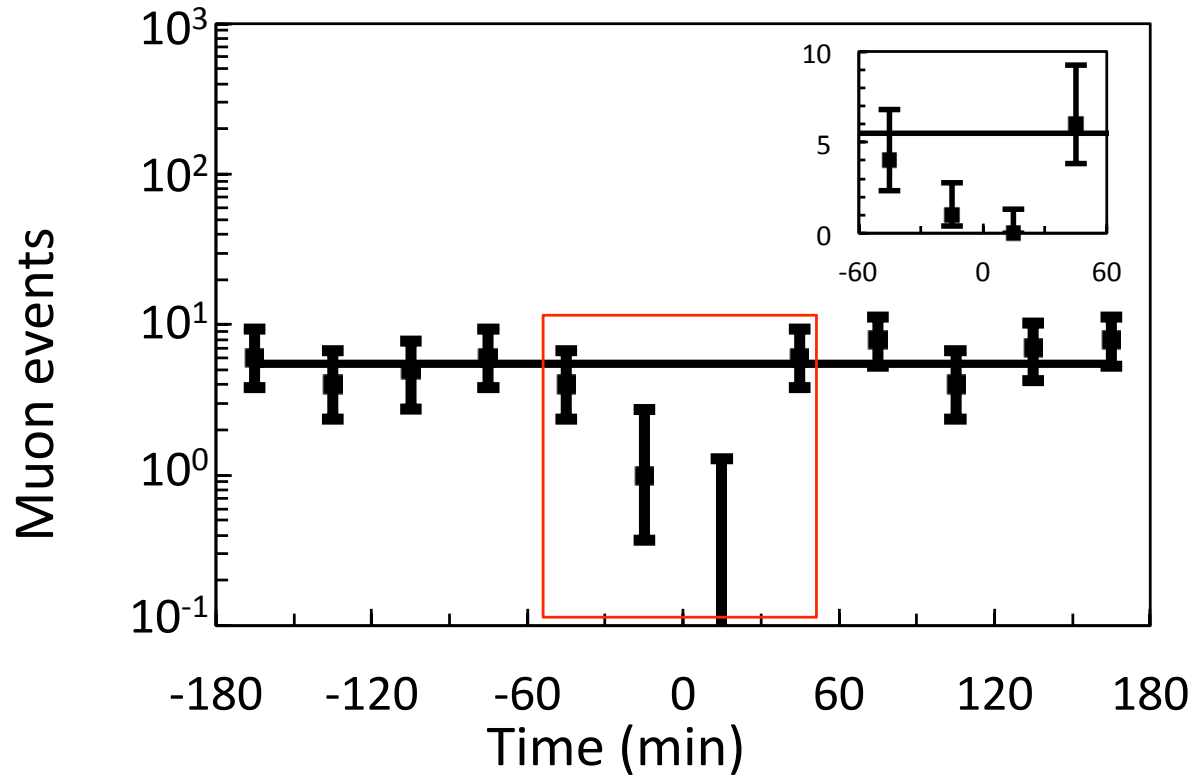


Fig. 6.9: Muon events observed directly beneath the Showa crater ($148 \leq \theta \leq 213$ mrad, $-48 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period. The inset shows the muon events observed in the time range between -60 and 60 minutes in the linear scale.

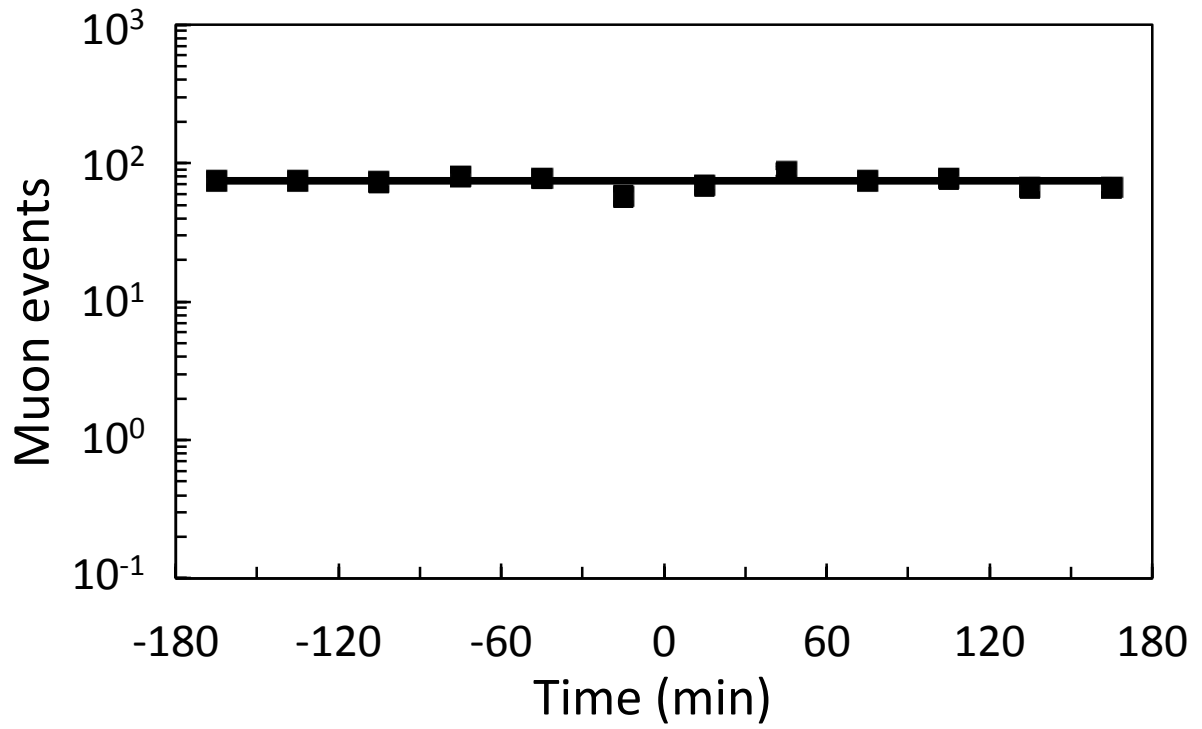


Fig. 6.10: Open-air muon events observed directly above the Showa crater ($279 \leq \theta \leq 311$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period. The statistical errors of the events are within the data points (■).

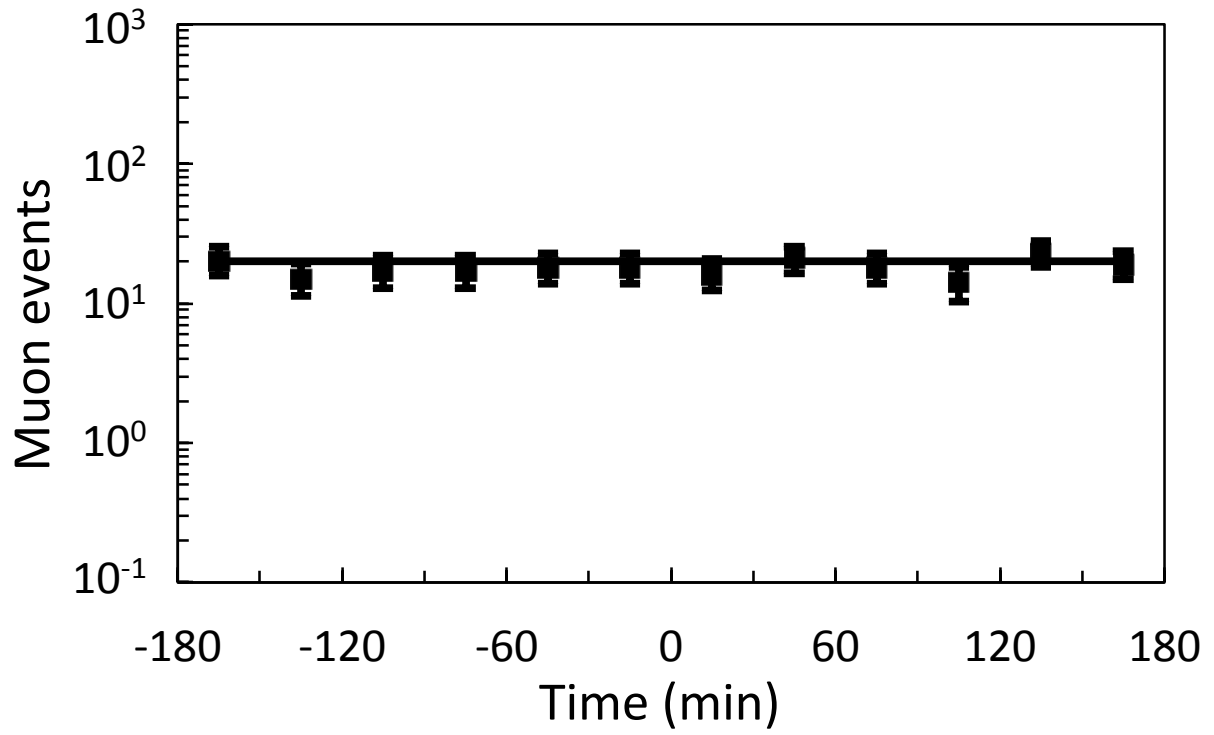


Fig. 6.11: Open-air muon events observed directly above the Showa crater ($246 \leq \theta \leq 279$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period.

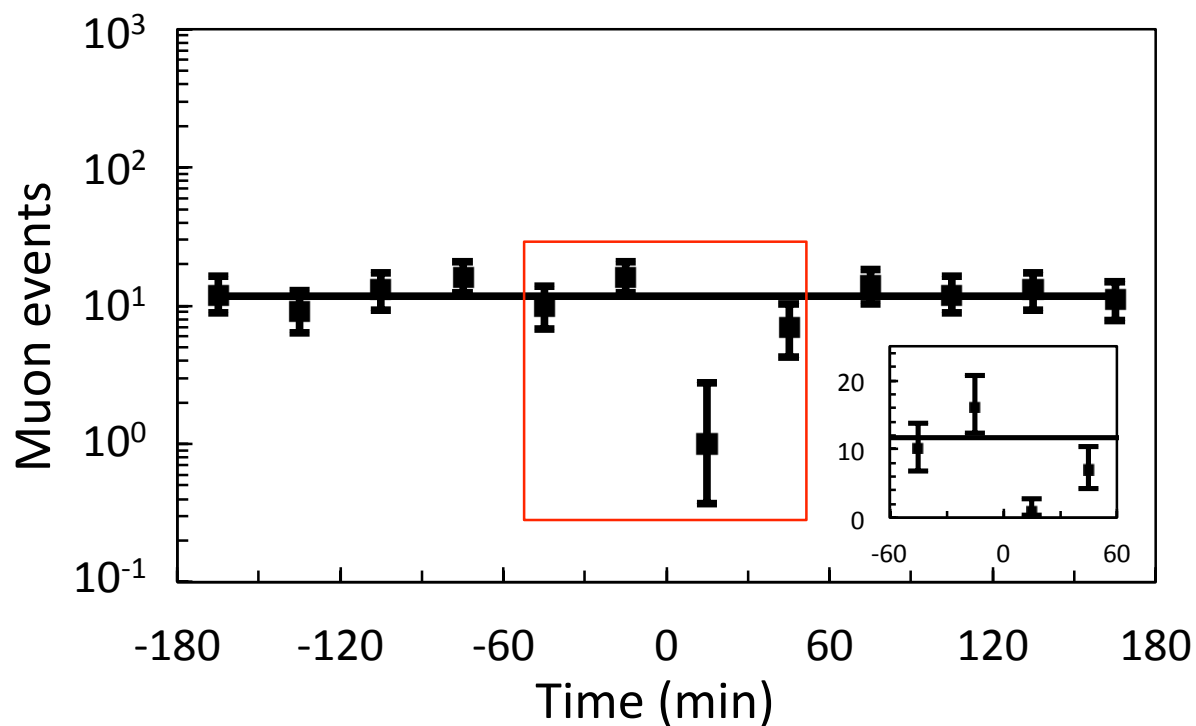


Fig. 6.12: Muon events observed in the vicinity of the Showa crater floor ($213 \leq \theta \leq 246$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period. The inset shows the muon events observed in the time range between -60 and 60 minutes in the linear scale. The 30-minute muon events right after the eruption deviates a deviation index of -1.8 from the average events.

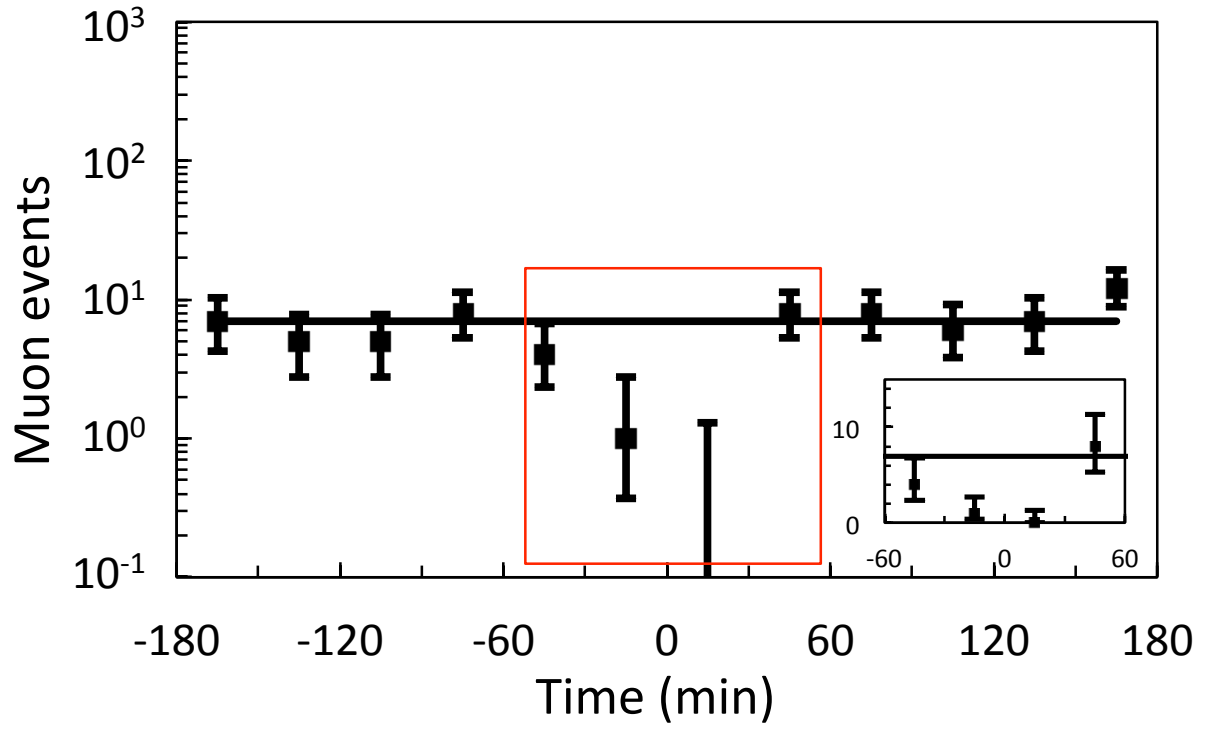


Fig. 6.13: Muon events observed directly beneath the Showa crater ($148 \leq \theta \leq 213$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 48$ mrad). The horizontal axis shows the time elapsed from eruptions. The width of a bin is 30 minutes. The straight line shows the average muon events over the entire observation period. The inset shows the muon events observed in the time range between -60 and 60 minutes in the linear scale. The 30-minute muon events right before and right after the eruption respectively deviate deviation indices of -1.0 and -1.53 from the average events.

本研究では便宜上、方位角 $-49 \leq \phi \leq 49$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 49$ mrad 両方の範囲において、仰角 $279 \leq \theta \leq 311$ mrad, $245 \leq \theta \leq 279$ mrad, $213 \leq \theta \leq 245$ mrad, $148 \leq \theta \leq 213$ mrad の4つの仰角領域をそれぞれ、昭和火口直上の空、昭和火口内部、昭和火口底近傍、昭和火口直下とラベリングすることとした。Fig. 6.6~Fig. 6.9, Fig. 6.10~Fig. 6.13 では、ミュオンイベントレートの時間変化をすべての仰角範囲において、平等に評価できるように、プロットをログスケールにし、表示桁数をそろえた。ただし、Fig. 6.9 および Fig. 6.13 については、十分な統計精度を得ることができないため、仰角方向の2ビンをパッキングした。Fig. 6.14, Fig. 6.15 には、それぞれ Fig. 6.6~Fig. 6.9, Fig. 6.10~Fig. 6.13 の方位角範囲、仰角範囲を実際の地形に対応させた図を示す (Fig. 6.14E~H, Fig. 6.15E~H)。先ず、この図からわかることは、昭和火口上部を通ってきたミュオンについては、岩盤の厚みが少ない分、減衰率が小さいため、イベントレートの絶対値は高い。しかし、この仰角範囲より到来するミュオンのイベントレートは他の仰角範囲からくるものと比べて、変化が小さく、全期間の平均値からのずれは統計誤差の範囲内である。

より深い仰角方向については、仰角方向1ビンでは十分な統計が得られなかったため、仰角方向2ビンのパッキングを行った(ビンID: $Y=6$ および $Y=5$; 仰角 $148 \leq \theta \leq 213$ mrad)。Fig. 6.8 と Fig. 6.9 あるいは、Fig. 6.12 と Fig. 6.13 を比較することにより、より深い部分を透過してきたミュオンフラックスは噴火に先立って減衰することがわかる。この比較結果より Fig. 6.6~Fig. 6.9, Fig. 6.10~Fig. 6.13 で示されたミュオンイベントレートの時間変化を以下のように解釈できる。噴火に伴って、物質が下方より上方に向かって移動する。時系列的には、より深い部分を物質が先に通過するわけであるから、その方向におけるミュオンの透過率が先に減衰する。その後昭和火口底近傍に物質が到達し、その方向におけるミュオンの透過率が続いて減衰する。図では噴火直後から30分の間には減衰率が最大となっていることから、少なくともこの間は物質が存在し続けていたことになる。噴火後30分から60分の間には全観測期間平均値に戻っていることから、この間(噴火直後から30分以内)に物質は消失(下降)したことが想定される。従って、この物質はマグマであることが予想される。

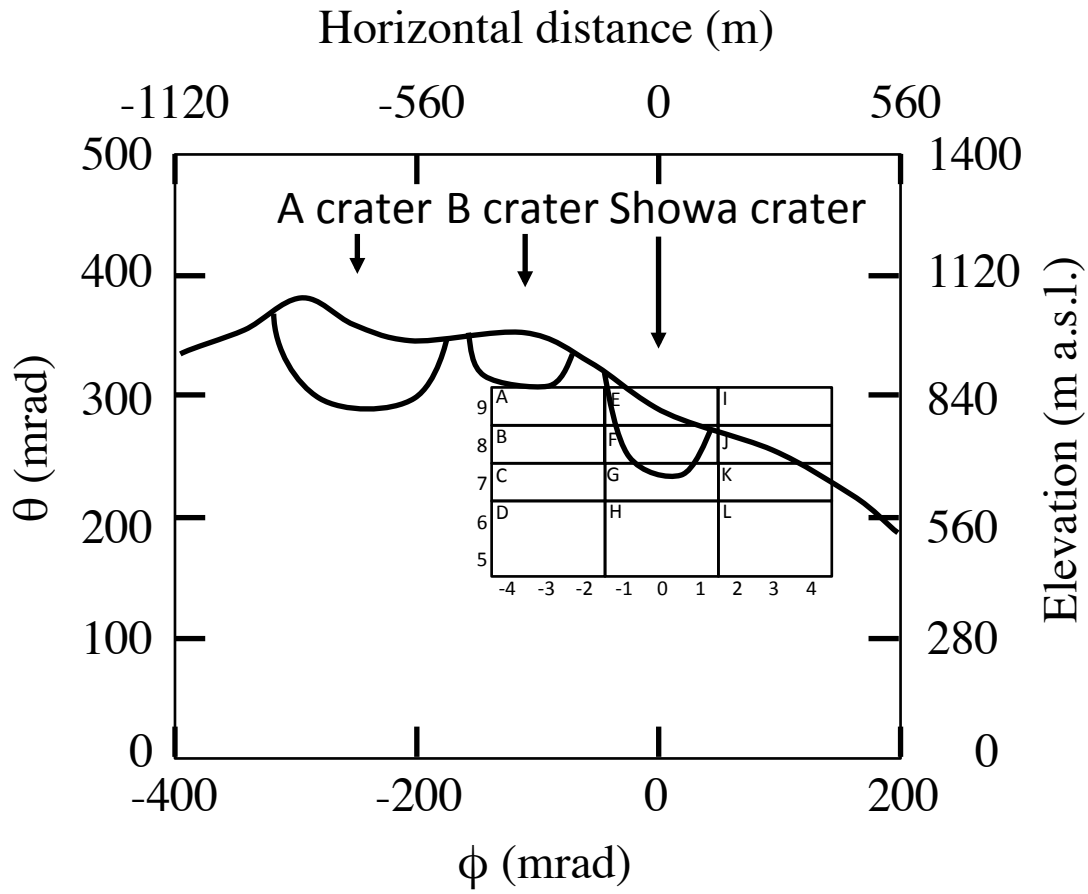


Fig. 6.14: Cross section of the Sakurajima volcano including the A, B and Showa craters. The regions E, F, G, and H respectively correspond to Fig. 6.6–Fig. 6.9. The numbers to the left of grids are Y -direction bin IDs and those to the bottom of grids are X -direction bin IDs.

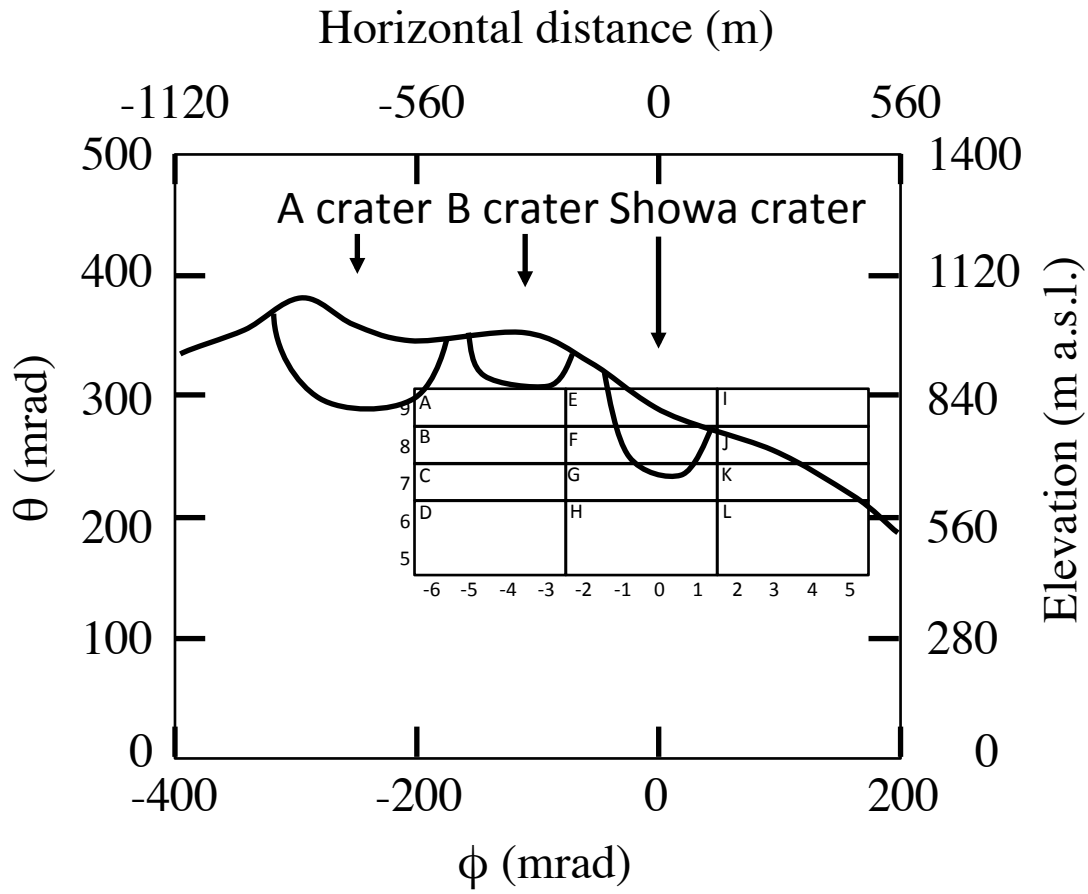


Fig. 6.15: Cross section of the Sakurajima volcano including the A, B and Showa craters. The regions E, F, G, and H respectively correspond to Fig. 6.10–Fig. 6.13. The numbers to the left of grids are Y-direction bin IDs and those to the bottom of grids are X-direction bin IDs.

Fig. 6.6～Fig. 6.13 の時間分解能が 30 分であることから、マグマの上昇、下降に本当に 30 分かかっていたのかについて、これ以上、時間的に詳細な議論に立ち入ることはできないため、Fig. 6.12, Fig. 6.13 を 10 分の時間分解能で、表示したものが、Fig. 6.16, Fig. 6.17 である。合成されるミュオグラム枚数が $1/3$ に減るため、結果としてミュオンイベントの統計精度は低下するがこの時間分解能でも比較的高い統計的有意度 (deviation index = -0.8 程度) で議論できる。Fig. 6.16, Fig. 6.17 いずれにおいても、ミュオンイベントレートの一時的減少が、噴火後 30 分から 40 分の間に全観測期間平均値に戻っていることから、マグマの下降に 30 分程度かかっていたことが示唆される。一方、Fig. 6.17 より、ミュオンイベントレートの一時的減少については、噴火直前から 20 分前の間に起こっていることから、マグマの上昇は下降よりもやや早い時間 (20 分以内) で起こっていたことが示唆される。ただし、統計精度が悪くあくまで示唆されるということしかここでは言えない。本研究では、2014 年 11 月 7 日～2015 年 4 月 30 日の観測期間において、噴火条件 (この場合、噴火間隔 10 時間以上) を満たすミュオグラムの数は 30 枚と限られているため、これ以上の時間分解能で議論を進めることは難しい。

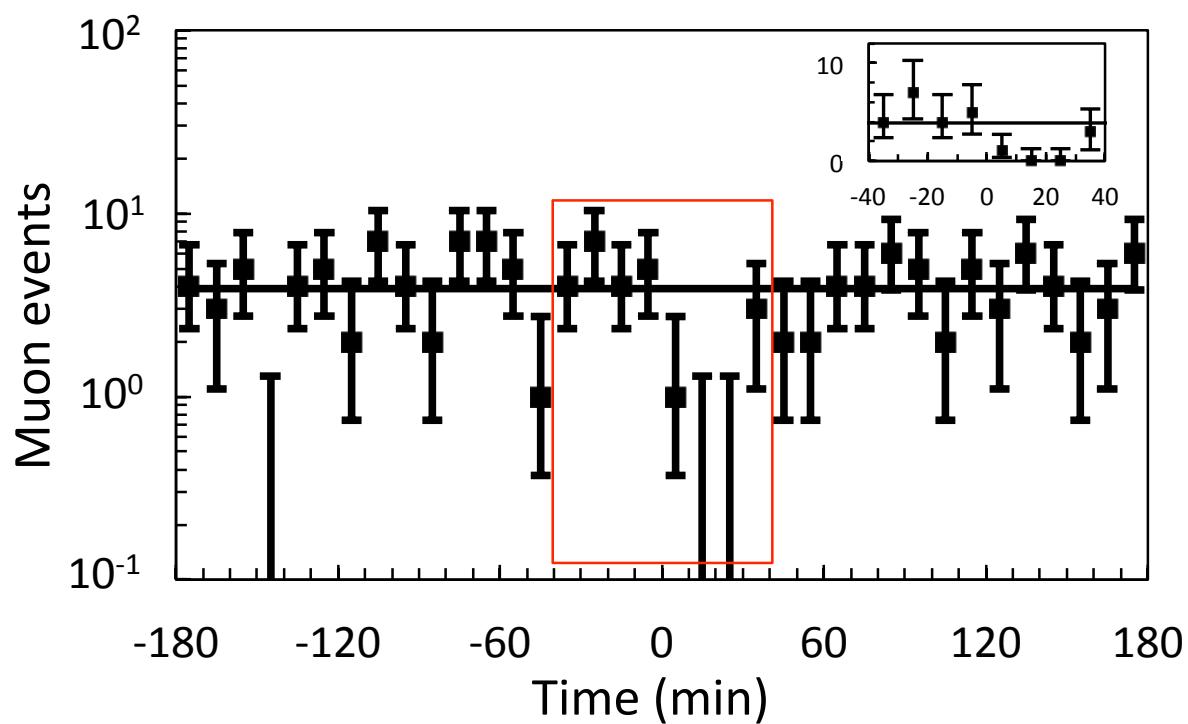


Fig. 6.16: Muon events in the vicinity of the Showa crater floor ($213 \leq \theta \leq 246$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 49$ mrad). The horizontal axis shows the time from the eruption. The bin width is 10 minutes. The straight line shows the muon events averaged over an entire period of the observation. The inset shows muon events in linear scale.

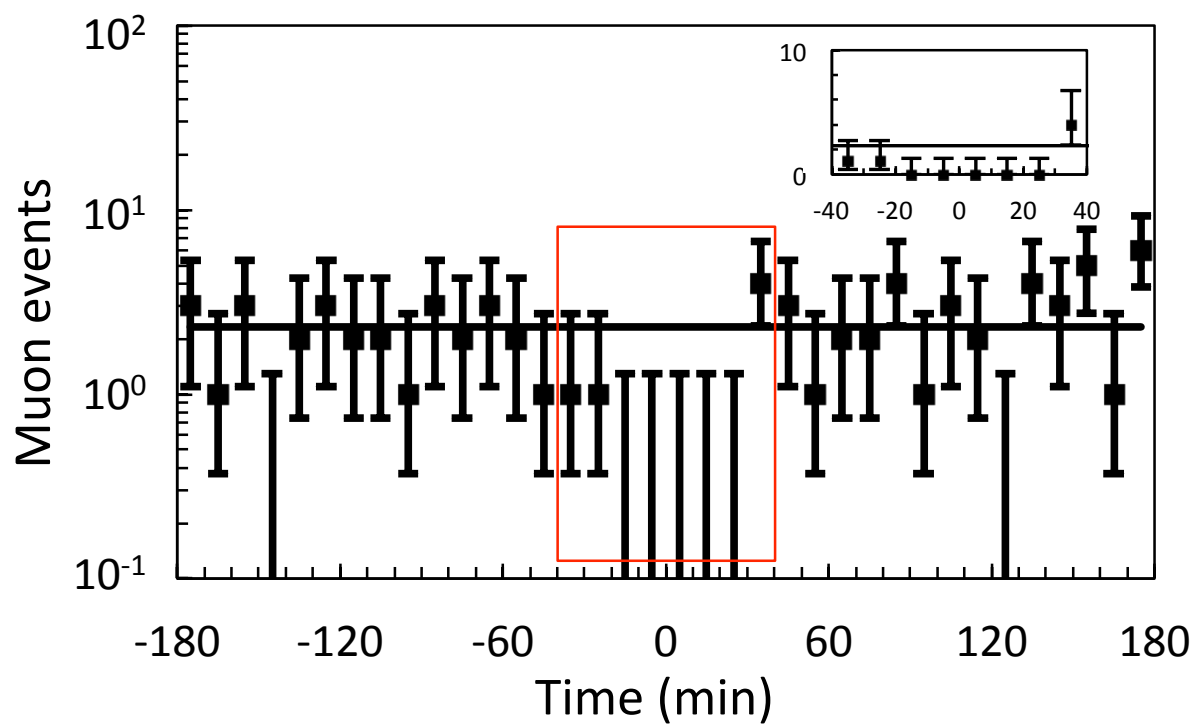


Fig. 6.17: Muon events directly beneath the Showa crater floor ($148 \leq \theta \leq 213$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 49$ mrad). The horizontal axis shows the time from the eruption. The bin width is 10 minutes. The straight line shows the muon events averaged over an entire period of the observation. The inset shows muon events in linear scale.

Fig. 6.14, Fig. 6.15 中の A~L の領域に対応するようにミュオンイベントレートの時間変化を面的に表示したものが Fig. 6.18, Fig. 6.19 である。図に示されるように噴火前後におけるミュオンイベントレートの統計的に有意な減少²³が見られるのは昭和火口底近傍および昭和火口直下のみであることがわかる。B 火口底下 (Fig. 6.18B) 及び昭和火口直下の左 (Fig. 6.18D および Fig. 6.19D) にそれぞれ噴火直前から 30 分前の間、および噴火直後から 30 分間に一時的なミュオンイベントレートの減少がみられるが、その統計的有意度は deviation index にして 0.8 未満であり、1 に満たず確かに変化があったとは言い難い。従って、この視野領域ではマグマの運動は昭和火口直下に限られていると結論付けられる。

²³ 縦軸が対数で表示されていることに注意が必要である。

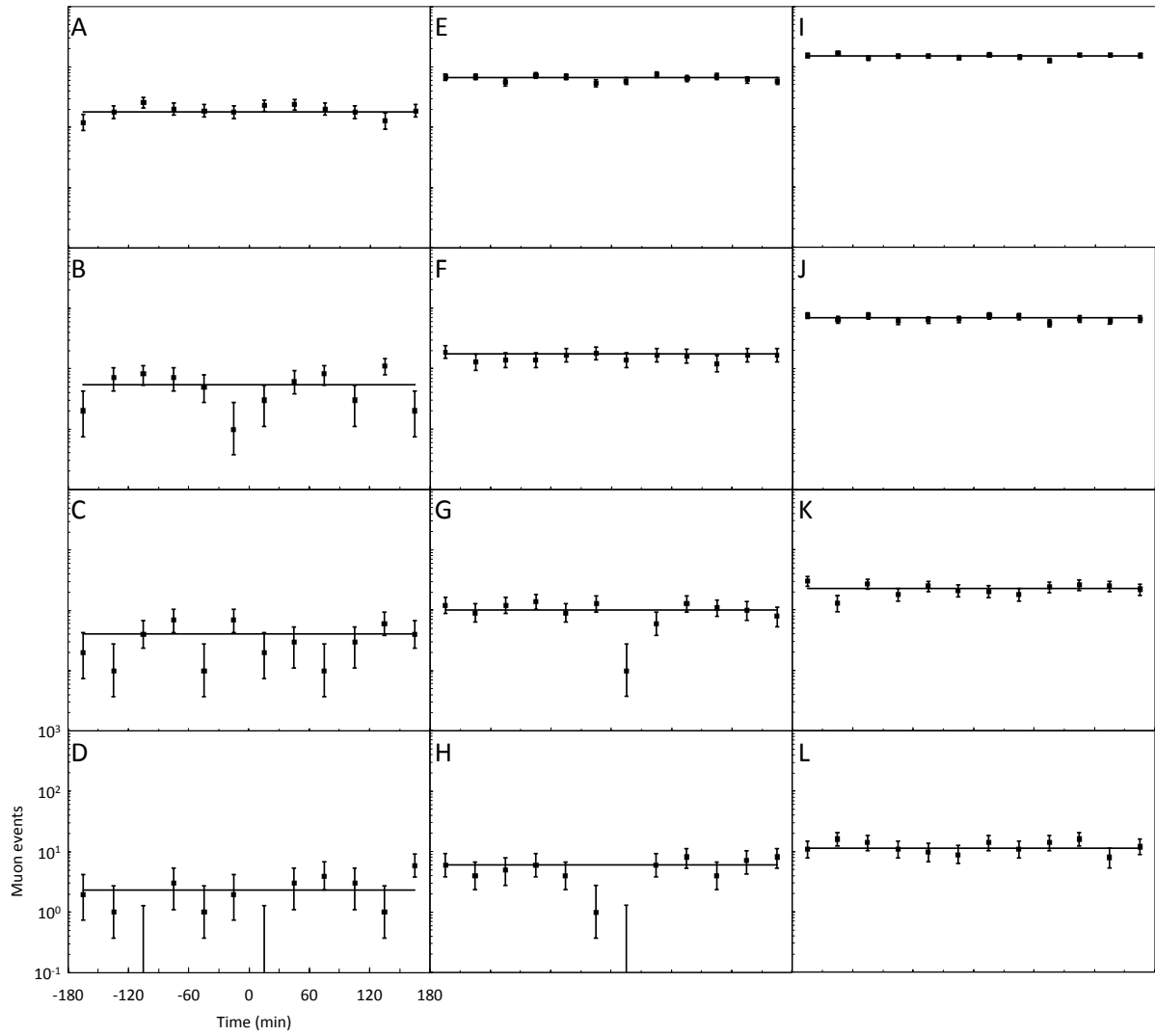


Fig. 6.18: Comparison of the time sequential muon events for different regions near the Showa crater. The alphabets correspond to those shown in Fig. 6.14.

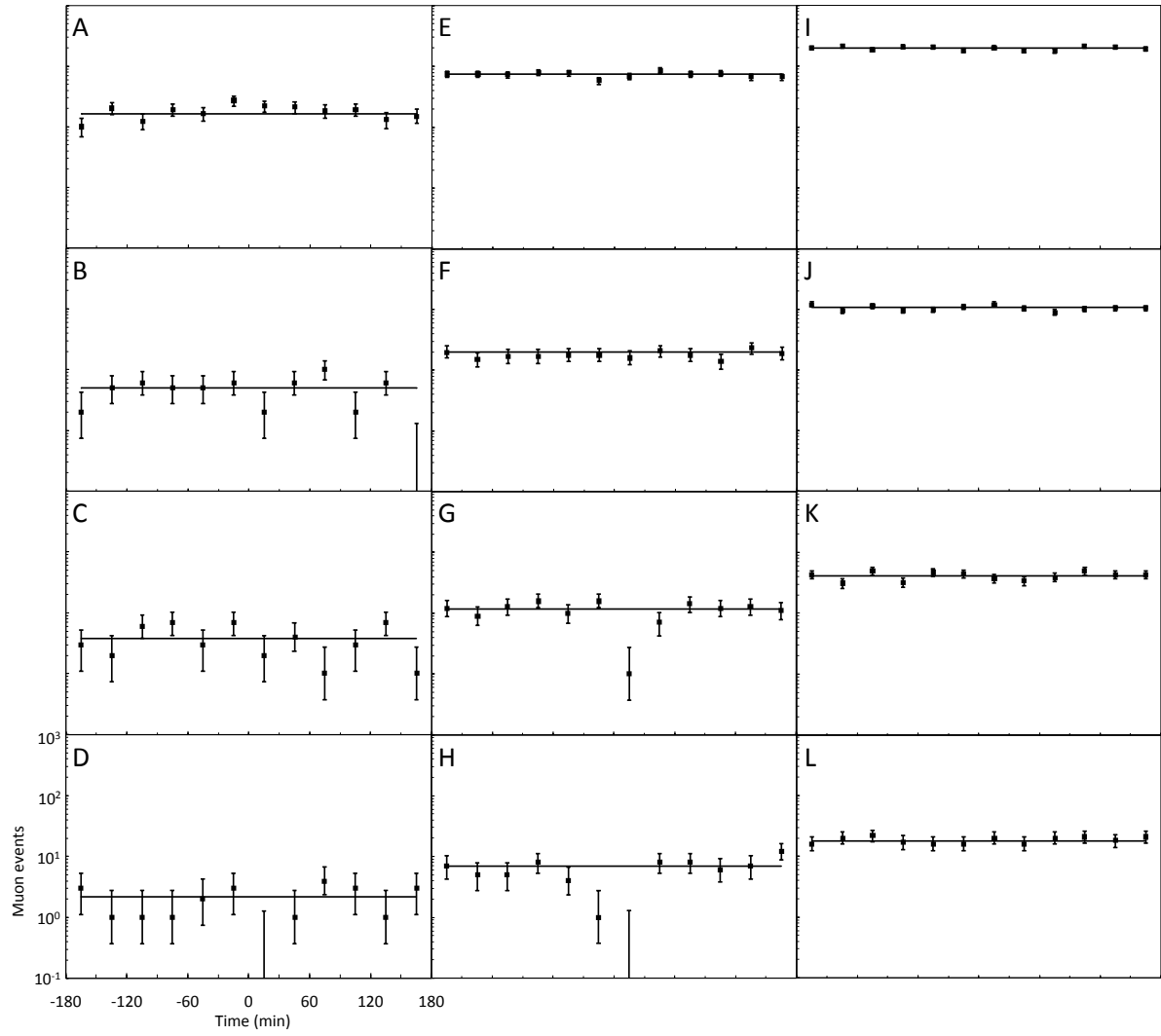


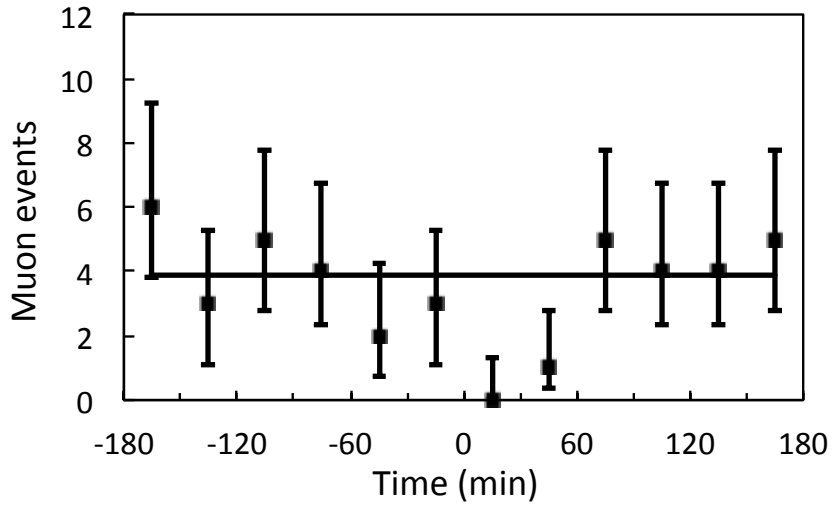
Fig. 6.19: Comparison of the time sequential muon events for different regions near the Showa crater. The alphabets correspond to those shown in Fig. 6.15.

6.4. マグマ動態の観測期間依存性

本節以降、前節までで示した噴火前後の一時的なミュオンイベントレートの減少はマグマの昇降によるものであると仮定する。本研究においては、特定の噴火条件（この場合、噴火間隔）に対して、マグマの運動が常に同じメカニズムで起こることを仮定して、ミュオグラムを合成した。Fig. 6.9 や Fig. 6.13 に示されるような噴火に伴うミュオンイベントレートの減少がどの時期に起こった噴火イベントに対しても起こっているのかを確かめた結果が Fig. 6.20 である。合成するミュオグラムの枚数が減るのでデータの統計的精度が落ちるが、方位角方向に 4 ビンパッキングした合成相対ミュオグラムの σ 値表示は昭和火口底近傍方向に対して 6 以上の数値を示しているため、この合成ミュオグラムを 3 等分することとした。マグマ動態の観測期間依存性を検証した期間は各々 1 ヶ月間強で以下のとおりである。① 2014 年 11 月 07 日-2014 年 12 月 20 日、② 2014 年 12 月 21 日-2015 年 01 月 27 日、③ 2015 年 02 月 06 日-2015 年 03 月 21 日。Fig. 6.13 と比べて、明らかに統計精度は劣化しているものの、噴火直後から 30 分間に観測された一時的なミュオンイベントレートの減少はそれぞれ deviation index にして①-0.82, ②-0.82, ③-0.49 の統計的有意度で確認された。2015 年 5 月以降、噴火間隔 10 時間以上の噴火イベントが極端に減少したことと²⁴、③のみ統計的有意度が低いことに、相関があるかもしれないが、本研究で用いたデータの統計精度に限界があり、これ以上の定量的な議論を行うことは難しい。今後、より有感面積の大きな観測装置で桜島のミュオグラフィ観測の精度を向上させていくことが求められる。

²⁴ 2015 年 5 月～8 月の 4 ヶ月間で噴火間隔 10 時間以上の噴火イベント数は 18 であった。

(a)



(b)

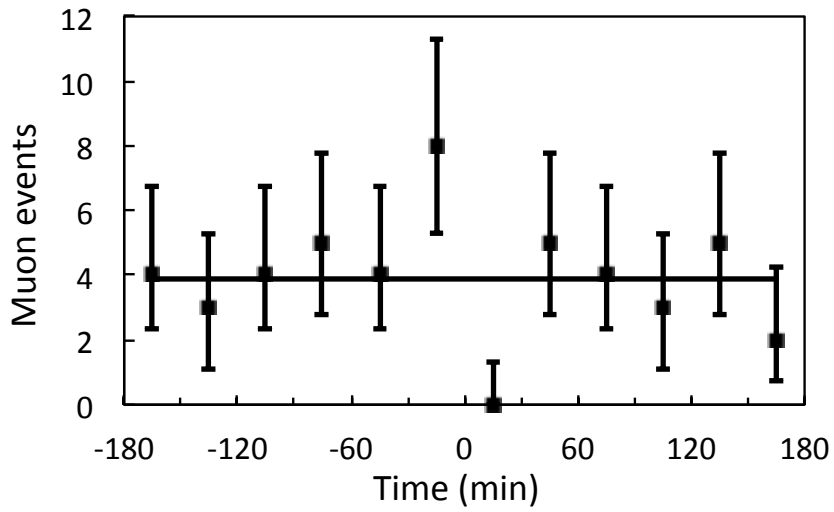


Fig. 6.20 (part1): Muon events in the vicinity of the Showa crater floor ($213 \leq \theta \leq 246$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 48$ mrad). (a) 07/11/2014–20/12/2014. (b) 21/12/2014–27/01/2015

(c)

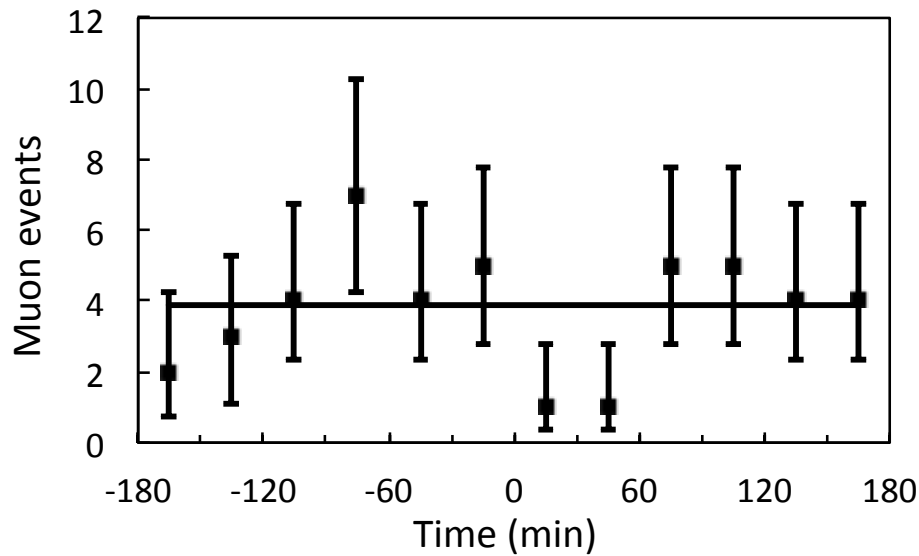


Fig. 6.20 (part2): Muon events in the vicinity of the Showa crater floor ($213 \leq \theta \leq 246$ mrad, $-82 \leq \phi \leq 48$ mrad). (c) 06/02/2015–21/03/2015.

6.5. マグマ動態の噴火間隔依存性

Fig. 6.2 および Fig. 6.5 において、噴火イベントセクターモジュールを、2014 年 11 月 7 日～2015 年 4 月 30 日の観測期間に桜島昭和火口付近に対するミュオグラフィデータに適用することにより、噴火前後に伴う桜島昭和火口内部の密度変化は噴火時間間隔が長いほど大きくなる傾向が統計的に有意に示された。そこで、2014 年 11 月 7 日～2015 年 4 月 30 日の期間内において記録されたすべての噴火イベントにおいて、①0～2 時間、②2～5 時間、③5～10 時間、④10 時間以上の 4 通りの異なる噴火間隔²⁵の頻度分布を作成し、それぞれの噴火間隔において、Fig. 6.13 に対応する噴火前後のミュオンイベントレートの時間変化を図示した。噴火間隔の頻度分布を Fig. 6.21 に示す。

²⁵ ここで、噴火間隔とはある噴火イベントの一つ前、あるいは一つ後の噴火までの時間の内、どちらか短いほうの時間として定義する。言い換えると、前の噴火と後の噴火の間に最低空いている時間である。

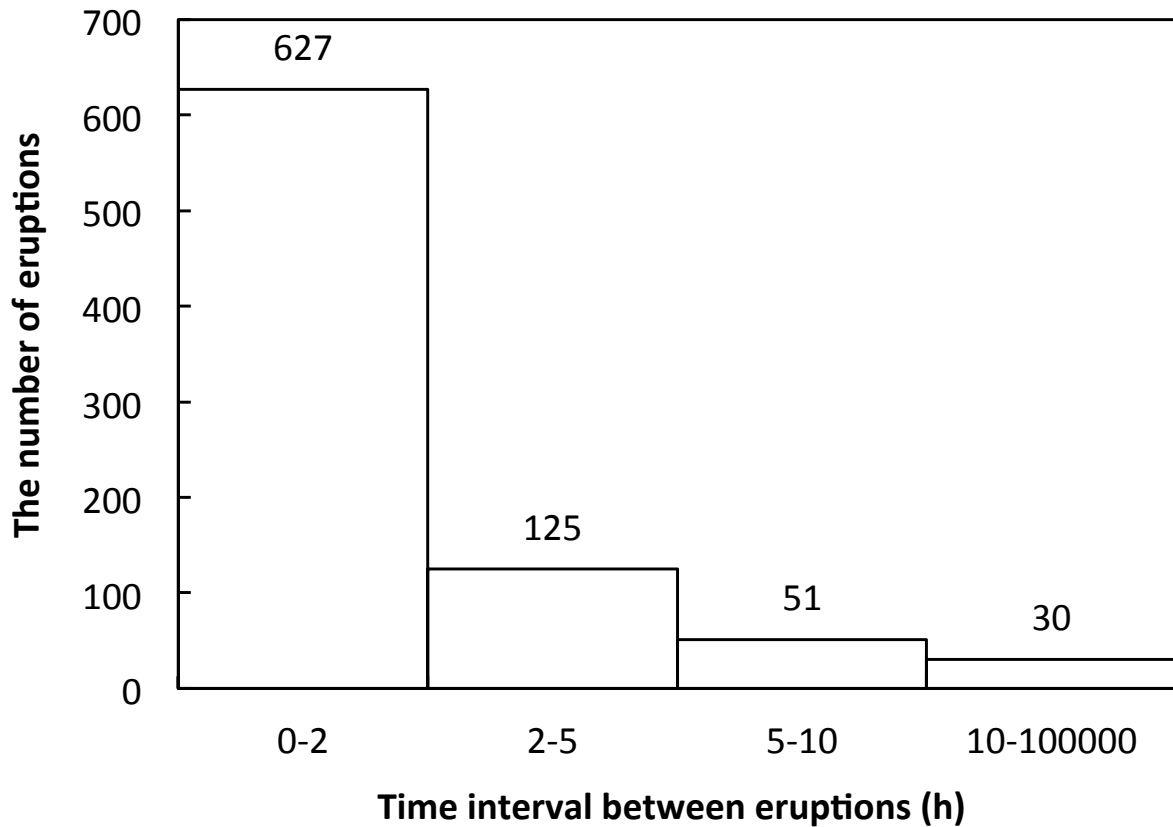


Fig. 6.21: Number of eruptions as a function of the time interval between eruptions: (1) 0–2 hours, (2) 2–5 hours, (3) 5–10 hours, and (4) ≥ 10 hours.

Fig. 6.22 には、Fig. 6.21 に示した 4 つの噴火間隔に対して噴火前後におけるミュオン透過率の変化（相対ミュオグラム）の時系列変化を示した。Fig. 6.15 に示した桜島南岳の山頂付近の対応図に重ね合わせた。統計揺らぎによる中心値の大きな変動は見かけ上大きなミュオン透過率の変化と区別がつかないので、時系列変化としては、ある程度大きな統計的有意度のもののみをプロットすることとした。Fig. 6.22 の作成で採用した統計的有意度の閾値は deviation index = 1 である。すなわち、図の表現において 99% C.L. 未満の変化は変化がなかったものとみなすこととした。この描画手法は Fig. 6.18 などにプロットされている異なる長さの誤差棒付きのヒストグラムの中心値の分布を誤差を考慮した形で視覚的にわかりやすく表現する目的で考案され、Tanaka *et al.* (2009a) でも採用されている。Fig. 6.22 に示されるように、噴火間隔が 10 時間以上の噴火イベントに対しては、透過ミュオンフラックスが 9 割程度減少している（大きな物質量的変化を示す）領域が昭和火口底直下から昭和火口底

近傍に向かって上昇し、噴火後 30 分以内にそれが昭和火口底近傍から消失しているのに対して、他の 3 つの噴火間隔に分類された噴火イベントに対しては、統計的に有意かつ顕著な減少が見られない。

この密度変化がマグマの昇降によるものと仮定すると、噴火時間間隔が長いほど運動するマグマの物質量が大きく、観測領域内でマグマの占める領域が大きくなった結果、より大きなミュオンイベントレートの減少につながった物と考えられる。この現象については、地下深部からのマグマ供給量が一定だと仮定すると、噴火時間間隔が長いほど火道下へのマグマ蓄積量が増え、噴火時に、より多くのマグマが上昇した結果であると解釈できる。

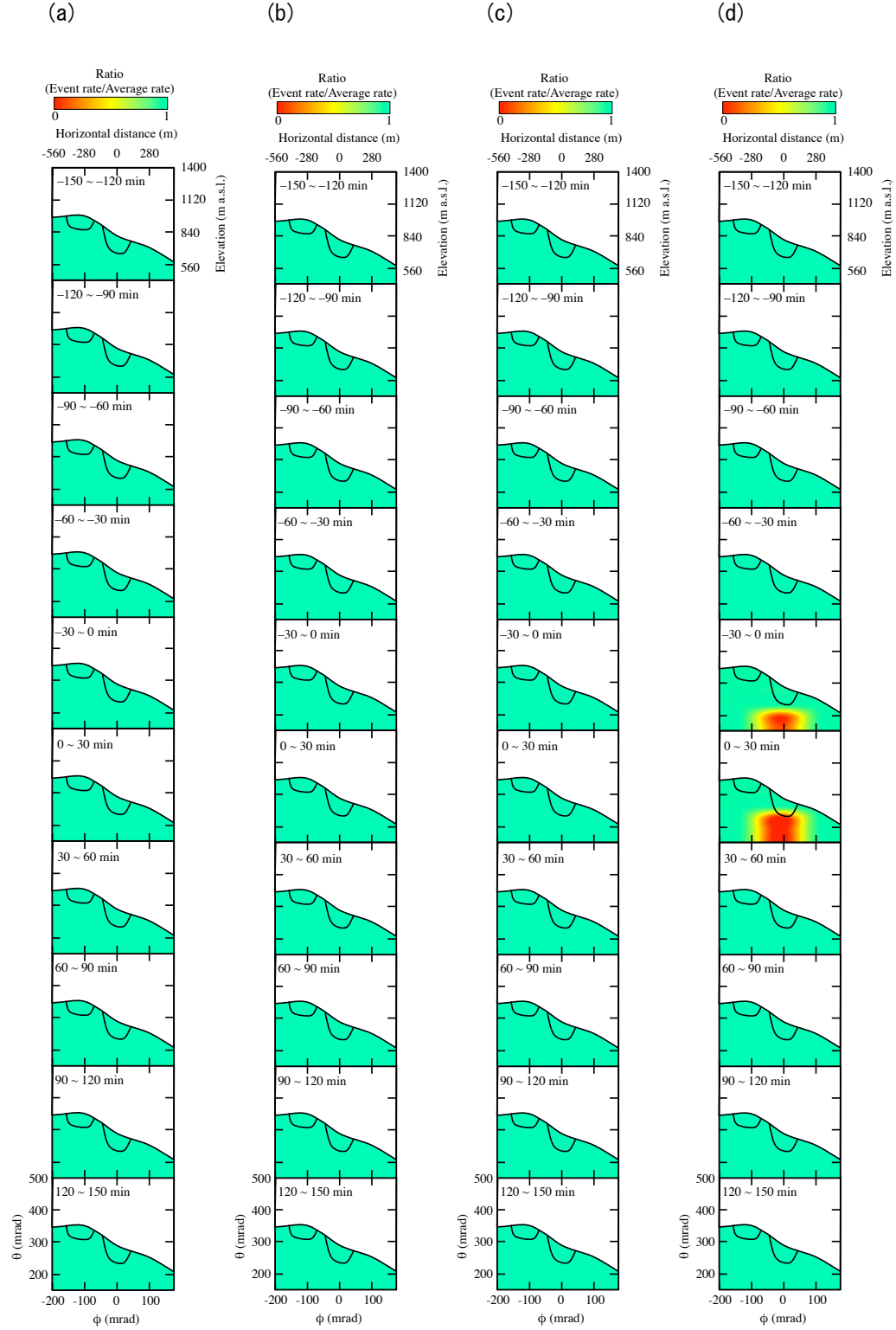


Fig. 6.22: Color map expression of the time sequential muogram as measured near the Showa crater for (a) 0–2 hours, (b) 2–5 hours, (c) 5–10 hours, and (d) ≥ 10 hours. The variations with a statistical confidence level more than 99% are plotted.

6.6. 桜島におけるフラックス-密度分布変換結果

本節では、第2章のフロントエンド解析モジュールを用いて2014年11月7日～4月30日までの観測期間に対して出力されたミュオグラム（Fig. 6.23）を、第3章のバックエンド解析モジュールを用いてミュオグラムのミュオンフラックス表示（Fig. 3.2）に変換後、さらに密度長に変換し、第4章のシミュレーターモジュールで出力される平均経路長分布によって桜島昭和火口近傍のミュオン経路に沿った平均密度分布を出力した結果を示す。

Fig. 6.24 にはバックエンド解析モジュールに、桜島におけるミュオグラフィ観測条件に合わせて、測定時間 measurement duration (s)に「23389800」、角度分解能 angular interval (mrad)に「32.78688525」（＝プラスチックシンチレータストリップの幅(cm)/最上流と最下流のミュオン検出器の間隔 (cm)）を入力して得られた桜島昭和火口近傍の平均密度分布の結果を示す。図の左方向は西側，右方向が東側に対応する。Fig. 6.15 に示したように，方位角方向でビン ID ($-1 \leq X \leq 1$) が昭和火口に，ビン ID ($-4 \leq X \leq -2$) が南岳 B 火口，ビン ID ($-10 \leq X \leq -6$) が A 火口の方に相当する。

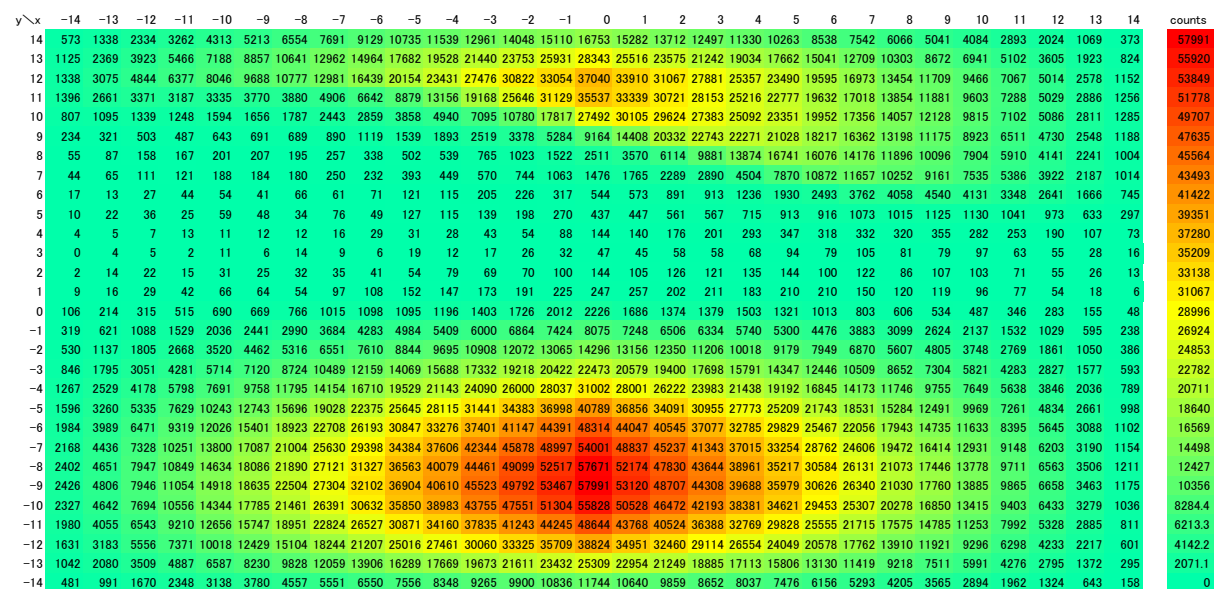


Fig. 6.23: Muogram of the Sakurajima volcano. The positive Y -direction bin IDs shows the direction towards the Sakurajima volcano.

$y \backslash x$ (mrad)	-459	-426	-393	-361	-328	-295	-262	-230	-197	-164	-131	-98	-66	-33	0	33	66	98	131	164	197	230	262	295	328	361	393	426	459
459	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
426	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
361	1.7337	2.0301	1.927	1.7734	1.6602	1.5908	1.4265	1.1465	1.1051	1.0328	1.182	1.3112	0.6876	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.6765	4.2526
328	2.5627	2.1119	1.4992	0.8356	0.4182	0.4603	0.5339	0.5511	0.5795	0.475	0.7444	1.0390	1.3278	1.3957	1.6139	2.4825	8.76	28.378	16.558	6.5594	7.6558	5.6559	7.0678	4.1281	3.2422	4.5725	4.0606	6.2995	6.1941
295	1.5129	0.7553	0.4657	0.4651	0.397	0.4371	0.4784	0.4701	0.4645	0.4139	0.4776	0.491	0.4974	0.8018	1.3293	1.8069	2.3244	4.1224	10.983	22.06	19.733	13.555	12.715	9.7523	8.2751	8.0615	6.7482	8.1154	7.3609
262	0.7551	0.7482	0.5677	0.5699	0.5066	0.5569	0.6126	0.593	0.5746	0.5168	0.6391	0.6239	0.5946	0.6864	0.649	0.8996	1.5733	1.9629	2.6855	4.0548	12.605	17.616	14.352	11.225	9.7975	8.6974	7.7795	8.3009	8.1086
230	0.5714	0.5876	0.4812	0.4874	0.4	0.4424	0.4787	0.4493	0.5079	0.434	0.5022	0.5093	0.4958	0.5552	0.5396	0.6236	0.6352	0.6656	1.1942	1.8777	2.9245	3.8822	6.5737	8.1976	8.1808	7.8571	6.8501	7.175	6.7543
197	0.6304	0.8469	0.6644	0.5803	0.5491	0.6757	0.5883	0.6594	0.666	0.5663	0.67	0.5896	0.612	0.672	0.6086	0.6957	0.6285	0.716	0.702	0.7688	1.5171	2.0964	2.9736	3.3669	4.0836	3.9662	3.8416	4.105	4.623
164	0.6096	0.5558	0.5085	0.6588	0.4905	0.5903	0.7217	0.5625	0.7141	0.5088	0.5935	0.586	0.5377	0.5538	0.5088	0.5626	0.5421	0.5913	0.5782	0.5364	0.6701	0.6432	0.7796	1.2086	1.5017	1.5258	1.5644	1.7294	1.9739
131	0.787	0.8985	0.9039	0.8106	0.9166	0.952	1.0029	0.9686	0.8472	0.8655	0.9384	0.858	0.8292	0.7687	0.6796	0.7276	0.694	0.6925	0.6232	0.5959	0.7304	0.7165	0.6827	0.3071	0.3504	0.4134	0.5779	0.8919	0.9844
98	inf	0.9637	1.0183	1.4185	0.9541	1.2073	0.9972	1.1902	1.3678	1.0382	1.2238	1.1512	1.0462	1.0238	0.9452	0.9683	0.9145	0.9328	0.8928	0.7949	0.9413	0.8462	0.8864	0.527	0.4586	0.5289	0.5224	0.6426	0.7378
66	0.9852	0.6328	0.6306	0.8355	0.6934	0.8246	0.8063	0.8278	0.8232	0.7801	0.6981	0.7725	0.7944	0.713	0.6358	0.7083	0.6467	0.6455	0.6105	0.5821	0.7007	0.6284	0.6786	0.4616	0.4249	0.4497	0.4375	0.5086	0.5096
33	0.578	0.6195	0.5825	0.572	0.5253	0.5868	0.6811	0.5702	0.5794	0.5263	0.5626	0.5469	0.545	0.5257	0.5214	0.4973	0.5353	0.5069	0.5199	0.4618	0.4458	0.4974	0.5144	0.4377	0.4368	0.4272	0.433	0.5887	0.6838

Fig. 6.24: Density distribution at the Sakurajima volcano.

結果として、得られた密度分布に対して全体的に以下の傾向が見られた。(A) 相対的に東側の密度が高い。一方で、A 火口、B 火口、昭和火口がある西側の $-300 \text{ mrad} < \phi < 0 \text{ mrad}$ の領域では相対的に密度が低い。(B) 低仰角 ($33 \leq \theta \leq 66 \text{ mrad}$) で相対的に密度が低く導出されている。さらに (C) 密度の絶対値が全体的に低めに導出されている。まず (B), (C) について、次節で検討する。

6.6.1. 桜島観測における背景ノイズの取り扱いについて

Fig. 6.23 のミュオグラムに見られるように、低仰角 (ビン ID: $1 \leq Y \leq 2$; $33 \leq \theta \leq 66 \text{ mrad}$) 方向からも相当数のミュオンイベントが観測されている。この方向には、Fig. 4.2 からわかるように厚さ 4 km を超える岩盤が存在するが、この方向から観測されたミュオンフラックスはおよそ $10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ である。密度 2.0 g cm^{-3} を仮定した厚さ 4 km の岩盤の場合、密度長が 8 km. w. e. になるため、期待されるミュオンフラックスは $10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ を下回る。この過剰ミュオンフラックスは、ミュオグラフィ観測装置内部に設置されている放射線遮蔽体 (厚み 鉛 50 cm+ステンレス 30 cm) による散乱イベントが誤った角度にトラッキングされた可能性がある。そこで、2.2 節のミュオントラッキング法 (R 法) において、鉛遮蔽体の挿入によるミュオン到来角度の決定精度の低下をモンテカルロシミュレーションにより以下の 2 つの方法により評価した。

(A) 鉛遮蔽体によるミュオン散乱イベントの R 法による再構築精度の評価

(B) 再構築精度の閾値 (R 値) 依存性の定量的評価

6.6.2. 鉛遮蔽体によるミュオン散乱イベントの R 法による再構築精度の評価

粒子伝搬モンテカルロシミュレーションパッケージ Geant4 (Agostinelli *et al.* 2003) を用いて、桜島における観測で実装した鉛遮蔽体に相当する厚みを持つ鉛ブロックを配置した空間にミュオン検出器に見立てた境界を等間隔 ($\Delta z = 610$ mm (うち鉛 100 mm, 真空 510 mm)) で 6 つ配置し、最上流のミュオン検出器の中心からランダムな角度 (方位角, 仰角がそれぞれ -0.20 ± 0.05 rad の範囲内でランダムになるように) で KIEL-DESY 実験 (Jokisch *et al.* 1979) で得られたミュオンエネルギースペクトル (付録 A 参照) に沿って、ミュオンを 100000 イベント入射した。Fig. 6.25 にシミュレーションにより発生させたミュオンの入射角度分布をヒストグラムとして示した。ヒストグラムのビン ID は、実際の観測で得られたミュオグラムのビン ID に合わせた (ただし、視野は実際よりやや大きくとった)。すなわち、ビン幅はミュオグラフィ観測装置の角度分解能 ± 33 mrad である。ビンに記録されているミュオンイベント数が同数となっていないのは、イベント発生 of 角度分布に比べてビン幅が大きく離散化されていることによる。Fig. 6.26 には、鉛を配置しなかった場合と、配置した場合で 100 イベント入射したミュオンの輸送経路のモンテカルロシミュレーション結果を図示した。ただし、本図では、表示をわかりやすくする目的で、ミュオンは方位角, 仰角がそれぞれ 0.0 ± 0.6 rad の範囲内でランダムになるように入射した。鉛遮蔽体によりいくつかのミュオンが大きく散乱している事がわかる。

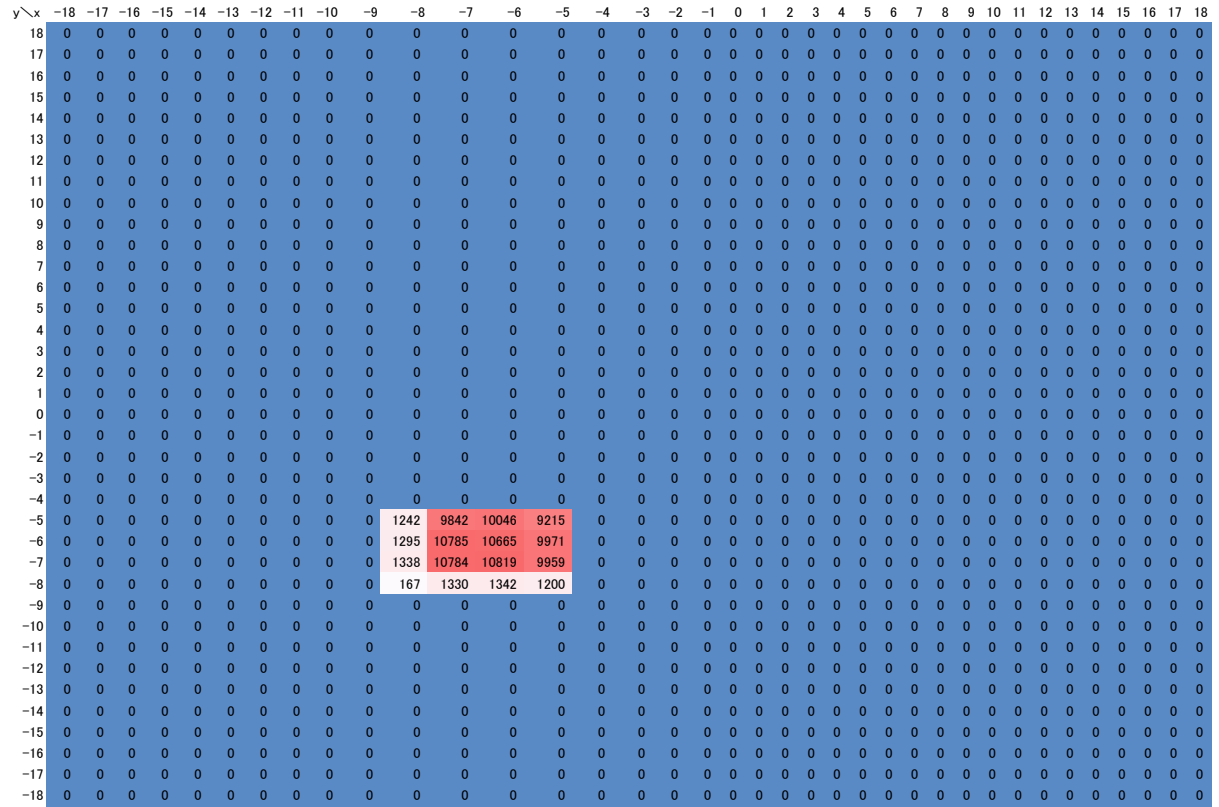


Fig. 6.25: Angular distribution of muons at generation in a Monte Carlo simulation. The width of bins (angular resolution) is same as that of the actual measurement at the Sakurajima volcano.

(a)

(b)

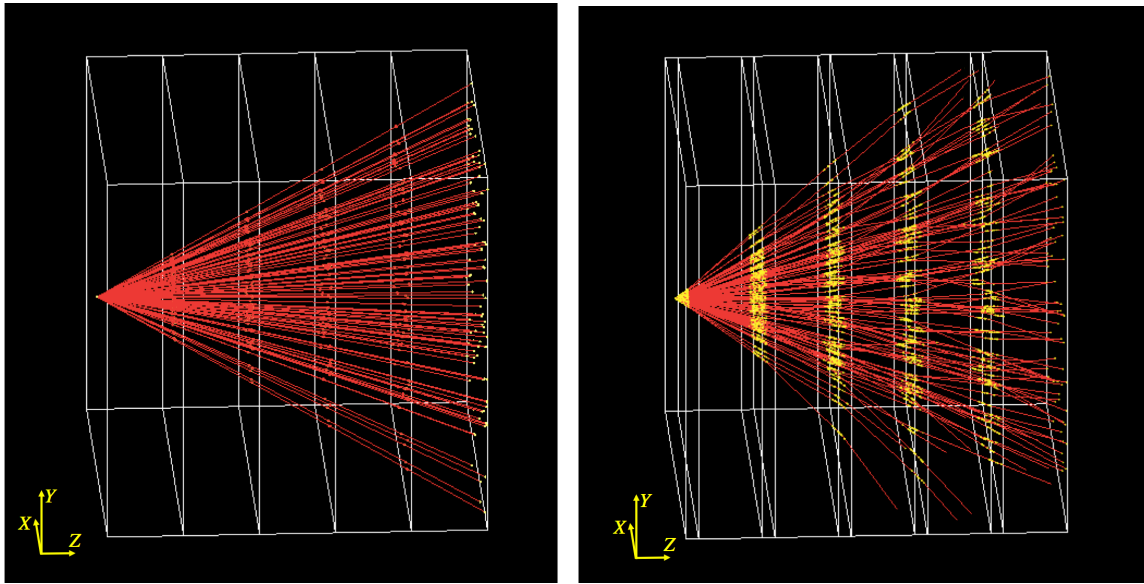


Fig. 6.26: Graphic displays of transportation of 1-GeV muons by the Monte Carlo simulations:
(a) without lead radiation shields and (b) with lead radiation shields. The red lines show the
trajectories of muons and the yellow points show the interaction points at the radiation shields.
Muons are injected along the Z direction to the X-Y plane.

Fig. 6.27 に発生させたミュオンイベントの R 法による飛跡の再構築結果を示す. この結果は鉛遮蔽体が配置された状態で得られた. 再構築に用いた閾値 (R 値) は 1 である. 鉛遮蔽体による散乱の影響により, 本来の到来方向のミュオンが減り, 到来角度範囲より広い角度領域にイベントがカウントされている. Fig. 6.28 に Fig. 6.25 と Fig. 6.27 の差分を示す. この差分は観測装置に到来したミュオンが誤った飛跡で再構築される数を示している. 以上の結果より, 本観測装置及び今回開発したソフトウェアによって生成されるミュオグラムにおいて, 2 ビン分誤認識されるミュオンイベントは 1 割程度, 3 ビン分誤認識されるミュオンイベントは 1~2% 程度であることが分かった. この結果は桜島とは反対の南側からおおよそ水平で入射したミュオンが, ミュオグラフィ観測装置内で散乱し, 誤った仰角に計数されたものであると考えると, Fig. 3.2 に示される, 桜島観測で得られたミュオグラム (フラックス表示) の結果と矛盾しない (例えば方位角方向 0 mrad, 水平方向から飛来するミュオンフラ

ックス $\sim 4 \times 10^{-6}$ に対して、2 ビン上方は $\sim 3 \times 10^{-7}$ 、3 ビン上方は $\sim 1 \times 10^{-7}$ 、ともにこの方向からのミュオン到来数の理論予想値は無視できるレベルである）。以上の結果より、低仰角（ $33 \leq \theta \leq 66$ mrad）で相対的に密度が低く導出されている理由は観測装置に実装した鉛遮蔽体の影響によるものであると推察できる。本来観測されるべきミュオン数にオフセットとしての背景雑音に加わると、計算される密度は実際の密度より低めに得られることが報告されている (Lesparre *et al.* 2012)。密度の絶対値が全体的に低めに導出されている理由についても、同様に山体稜線上方のオープンエア領域から到来する大強度ミュオンイベントがミュオグラフィ観測装置装置に実装された鉛遮蔽体により散乱し、誤った仰角として観測された結果である、と考えられる。その結果、Fig. 6.24 にみられるように、山体の稜線方向から水平方向（仰角 0 mrad の方向）に向かっていったん密度が上昇し、仰角 100 mrad で最大値をとった後、再び密度が減少する。

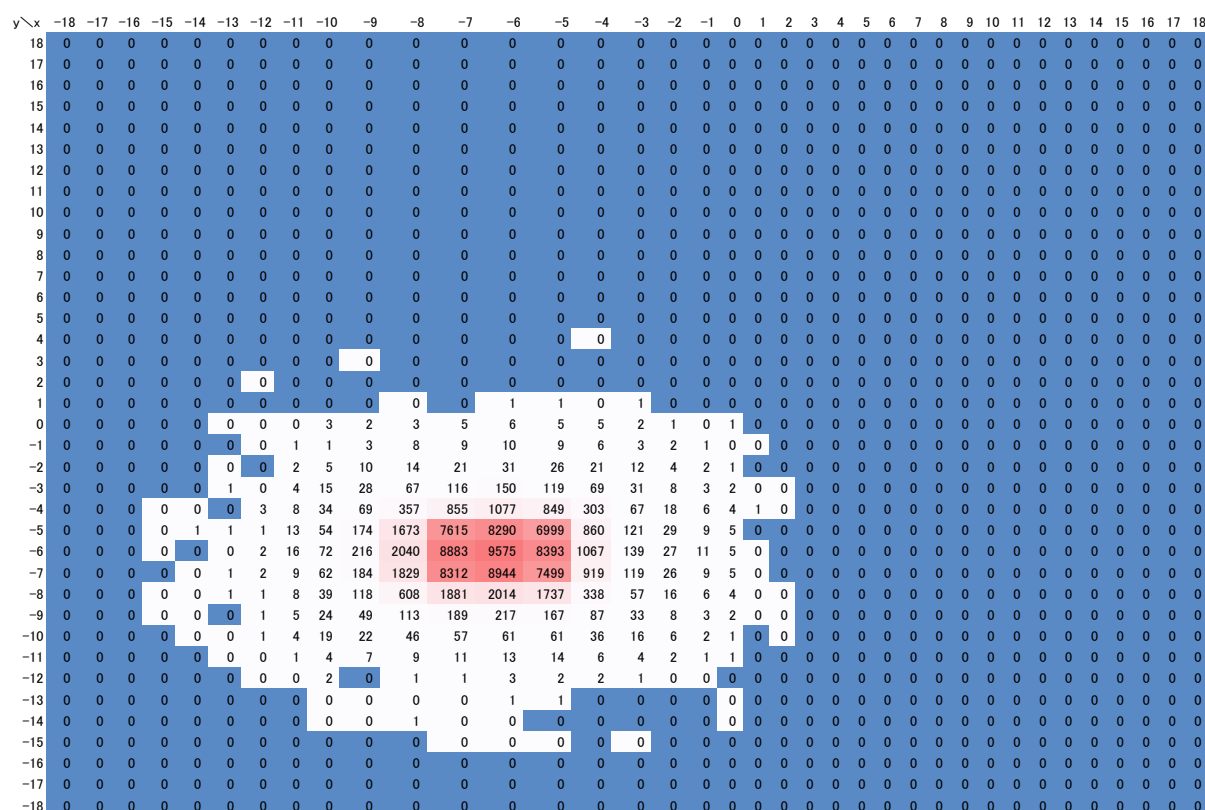


Fig. 6.27: Monte Carlo result of muon track reconstruction with the R-method. The width of bins (angular resolution) is the same as that of the actual measurement at the Sakurajima volcano.

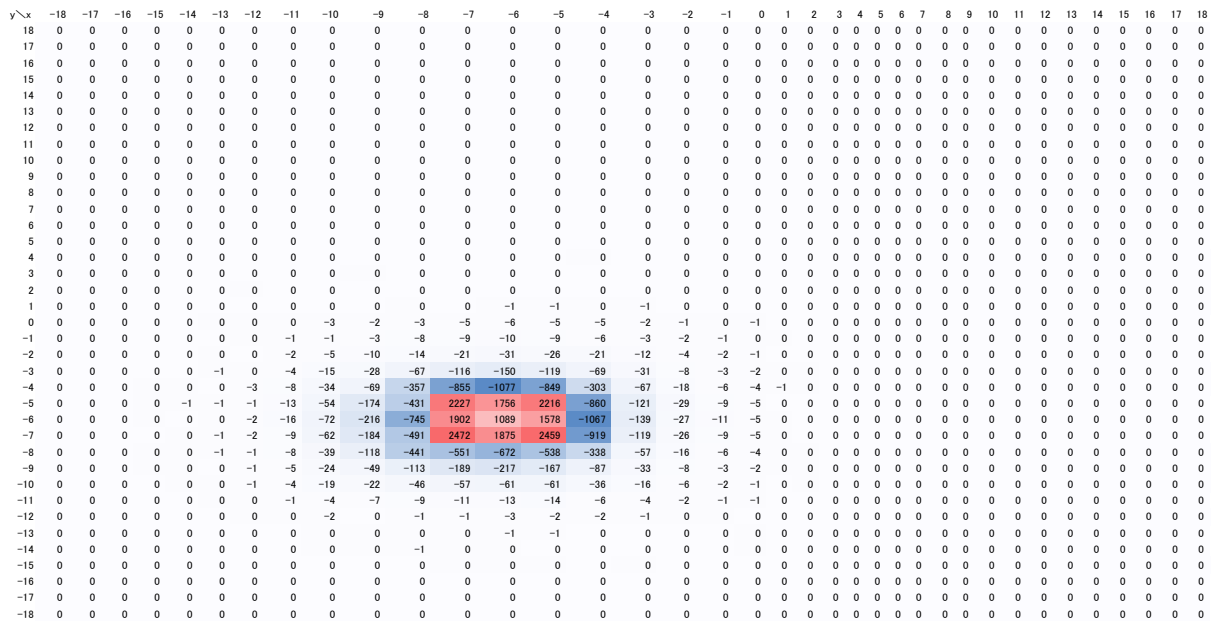


Fig. 6.28: Difference between original (Fig. 6.25) and reconstructed (Fig. 6.27) angular distribution.

6.6.3. 再構築精度の閾値 (R 値) 依存性に対する定量的評価

前述までの考察において，密度が低めに導出された理由が明らかとなった．ここでは，今後どのような観測装置をデザインすれば，この問題を低減できるかについて定量的に評価を行う．散乱イベントによるミュオン飛跡の誤認識を減らすためには閾値である R 値を小さくすればよいが，この値はミュオン検出器の位置分解能より下げることができない．従って，ここで行う評価の結果は今後どのレベルの位置分解能のミュオン検出器を開発することで，鉛遮蔽体の存在により新たに発生したこの種の雑音を低減できるかについての指標を与える．ここでは，検出器の位置分解能が無限に小さいと仮定して，仮想的に R 値を変えながら，誤認識されるミュオンイベントの定量的評価を行った．以下にシミュレーションの手順を示す．

(1) シミュレーション条件：ミュオグラフィ観測装置に天頂角 $75 \pm 10^\circ$ の範囲で飛来したミュオンが，天頂角 $75 \pm 1.9^\circ$ （角度分解能相当． R 法では $R = 1$ に相当）以内に飛

来したミュオンとして認識される数を, Geant4 (Agostinelli *et al.* 2003)によるモンテカルロシミュレーションで求めた. オープンエアミュオンのミュオンフラックスとしては KIEL-DESY 実験 (Jokisch *et al.* 1979)で得られた観測値を用いた²⁶. 入射天頂角を 1° 刻みで, 天頂角ごとに 3000 イベントのミュオンを入射した. 3000 イベントの入射ミュオンの内訳は, 1.12, 1.42, 1.79, 2.25, 2.83, 3.57, 4.50, 5.66, 7.13, 8.97, 11.3, 14.2 GeV の各エネルギーで 250 イベントずつである. 入射後, ミュオンエネルギースペクトルに基づき重みづけを行った.

(2) ミュオグラフィ観測装置のモデル: 1.4 節で述べた実験セットアップでは, 厚さ 14.2 cm の鉛遮蔽体 (鉛 10 cm と鉄 6cm を密度長の観点から鉛の厚さに換算) が 5 層用いられている (Fig. 1.3 参照). そこで, 61 cm 間隔で仮想的なミュオン検出器 (厚さ 0 cm) を 6 つ平行に並べ, その間に 14.2 cm の鉛を挿入する設定とした. ミュオン検出器と鉛の間には空気を設定した.

結果を Fig. 6.29 に示す. 横軸の R (cm) は, 入射したミュオンと 1 層目のミュオン検出器での反応点の座標を始点にして引いた天頂角 75° の直線から, 各層での反応点の水平・鉛直方向のずれのうち最大のずれをとったものである. すなわち, このずれが R 法における閾値 (R 値) よりも小さい場合はこの散乱イベントを棄却できない. 縦軸は, KIEL-DESY のミュオンフラックスで規格化されたミュオン数を, 横軸の R 以下で積分した値である. すなわち, R 法で棄却できない散乱によるノイズイベントのフラックスを示している. 本研究で用いた観測装置では 10 cm のシンチレーターの幅が R 値の下限値を事実上決定していることから, 本観測セットアップでは鉛遮蔽体による散乱効果が無視できないレベルであることがわかる.

²⁶ およそ水平方向のミュオンフラックスで 10 GeV 以下のデータが公開されているのは KIEL-DESY 実験による結果のみである.

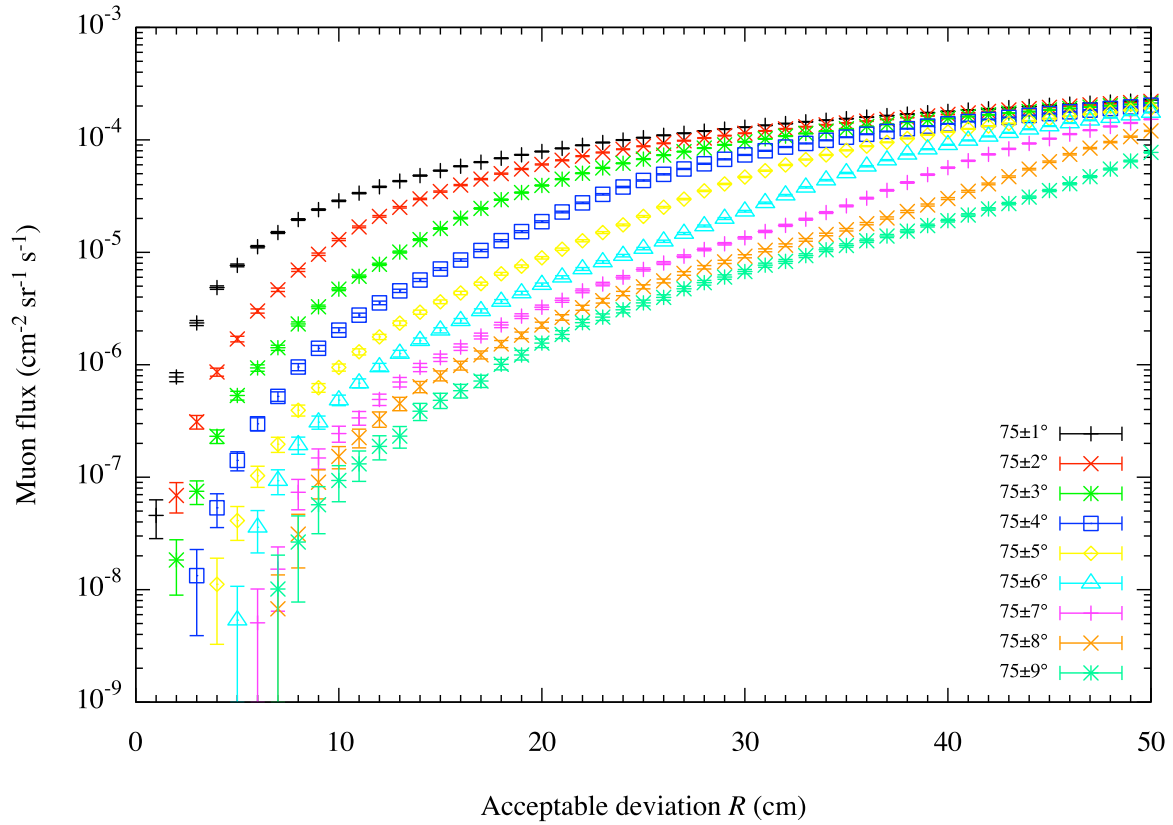


Fig. 6.29: Falsely recognized muon flux. The flux is shown as a function of the R parameter.

この問題の根本的解決方法は、ミュオントラッキングで採用する閾値（ R 値）をできるだけ小さくして観測できるようにすることだが、これは、現在用いているミュオン検出器の位置分解能がプラスチックシンチレータストリップの幅 10 cm に制約されるため、これより小さくできない。しかし、この問題は、現在、東京大学地震研究所とハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター（Wigner Research Centre for Physics of the Hungarian Academy of Sciences）が共同開発している高位置分解能ミュオグラフィ観測装置の開発により、将来大きく改善することが期待される（Tanaka and Varga 2016）。この国際共同研究で開発されるガス検出器（multi wire proportional chamber）の位置分解能は 1 cm であるため、 R 値を原理的には 1 cm まで低減させることが可能である。従って、Fig. 6.29 に示されるように、 $\pm 2^\circ$ 以上の角度分解能をミュオグラフィ観測装置に要求する限りにおいて、 R 値を 1 cm に設定すれば、散乱に伴うノイズイベントはゼロになることが期待され、本解析プログラムを用いた自動密度決定精度の大幅な向上が期待される。

一方, 2014 年 11 月 7 日～2015 年 4 月 30 日のミュオグラフィ観測により得られたミュオグラムを, バックエンド解析モジュールとシミュレーターモジュールを用いて密度分布に変換した結果, 桜島の火口近傍の傾向として, 相対的に A 火口, B 火口, 昭和火口の領域の密度が低くなっていることがわかった. これは, 過去の噴火で破砕した領域が低密度な領域として現れたと解釈できる.

第7章 結論

本研究では、Tanaka *et al.* (2014)によって開発された、複数台のミュオン検出器から構成される極低雑音ミュオグラフィ観測装置で取得されるデータを自動で解析するソフトウェアを開発した。ソフトウェアは大きく分けて前段部（フロントエンド解析モジュール）、後段部（バックエンド解析モジュール）に分かれ、それにシミュレーターモジュール、活動的火山観測に向けたモジュール群をなす噴火イベントセクターモジュール、合成ミュオグラム表示モジュールが付随するパッケージとなっている。極低雑音ミュオグラフィ観測装置は、透視画像に含まれる雑音成分の除去に対して高い性能を有する一方で、2台のミュオン検出器でミュオン飛跡を決定する従来方式（例えば Tanaka *et al.* (2001)）と比べて飛跡決定に用いる点数が増えるために、解析にかかる計算コストが増大する。そこで、プログラム前段部においては、最上流と最下流の2台のミュオン検出器のミュオン検出位置情報のみで飛跡を決定し、残りのミュオン検出器を用いて雑音成分を除去するR法を開発し、その計算コストを評価した。その結果、少なくとも本研究で用いたミュオン検出器の位置分解能においては、最小二乗法で直線フィッティングして飛跡決定する方法と比しても遜色のない飛跡決定精度（トラッキング精度）が得られることが確認できた。複数の反応点を最小二乗法でフィッティングする方法はこれまでも Menichelli *et al.* (2007)などにより、ミュオントラッキングに使用されてきたが、この方法は3次元空間内に独立に存在する複数点から飛跡の最適値を探索するため、計算コストが増大し、1000万本を超える飛跡を瞬時に解析することができず、将来のオンラインリアルタイム解析の実現の障壁となる可能性がある。一方、R法では、1000万本を超える飛跡も数秒以下で決定することができ、オンラインソフトウェアとして実用化できるレベルであることを確認した。

本解析プログラムでは前段部と後段部は、独立に実行することができ、活動的火山観測に向けたモジュール群と組み合わせることで、火山内部の透視画像（ミュオグラム）の評価を行うことができるデザインとなっている。本解析プログラムを検証するために、先ず、2014年11月7日～2015年4月30日の期間、桜島において、取得されたデータを用いて「前段部+活動的火山観測に向けたモジュール群」の性能を検証した。その結果、本ソフトウェアを用いることで昭和火口直下、および昭和火口底近傍において噴火イベントに伴うマグマ動態を

示唆するミュオグラムの時間依存性を高い統計精度で抽出できることを示した。特に本研究で示す事が出来た例として、特定の噴火条件下（噴火間隔が10時間以上）において30枚のミュオグラムを合成した結果があげられる（900分間観測相当）。噴火直前直後で昭和火口底近傍及び昭和火口直下においてミュオンイベントレートが99% C.L.を超える統計的有意度で減少した。このときのミュオンイベントレートの減少は、中心値で見ると、全期間の平均イベントレートと比較しておよそ1/7~1/10以下と大きく減少しており、観測測線上に大きな物質量が現れたことが示唆された。特にその時系列変化から物質が鉛直方向に運動していた事が示唆されたため、その物質をマグマであると仮定し、噴火前後に移動したマグマの物質量と噴火間隔との間には明らかな相関を見つけた。噴火間隔が長くなると、高い統計的有意度で昭和火口底近傍までマグマが上昇するすなわち多くの物質量が移動する様子が捉えられた。また、ミュオグラフィ観測装置の有感面積を、本研究で用いたミュオグラフィ観測装置の30倍に増やすことで、本論文で示した30枚合成ミュオグラム相当の統計精度を1枚のミュオグラム（30分間観測相当）で得られることが期待される。このことから、リアルタイムマグマ動態検出に必要な実際のミュオグラフィ観測装置の有感面積を見積もることができることを示した。本論文で示した解析結果を生成するアルゴリズムは自動解析ソフトウェアに即転用可能であり、本文中に示した図のほとんどをオンラインで自動的に生成することが可能である。今後、活動的火山におけるミュオグラフィデータベースの構築を進めていく上で本研究成果が活用されていくことが期待される。

本研究では次に、プログラム後段部とシミュレーターモジュールとを組み合わせることで、火山内部の密度分布（ミュオグラフィ画像）を出力し、その結果を評価した。2014年11月7日~2015年4月30日の期間、桜島において、取得されたデータを用いて、桜島内部の密度分布を出力したところ、想定していた密度よりも低い値が出力された。計算機シミュレーションにより、R法による密度決定精度に限界があることが明らかになった。これは、観測装置に内蔵される放射線遮蔽体の影響により散乱したミュオンが誤って異なる角度のミュオンイベントとして計数されてしまい、見かけ上の角度分解能を悪化させることによる。この結果、本来より過大なミュオンフラックスが観測されてしまうため、絶対密度が低めに得られてしまう。この問題は解析に用いるR法の閾値（R値）を下げる事で低減する事が出来る。計算機シミュレーションにより、R値を1cmと設定できれば、少なくとも現状のミュオグラ

μの角度分解能において、放射線遮蔽体の影響による見かけ上の角度分解能の悪化を抑え、密度決定精度の劣化はほぼ 100%抑える事が出来る事が明らかとなった。しかし、実際問題として、 R 値は観測装置に実装されているミュオン検出器の位置分解能より低く設定する事が出来ないため、今後、より位置分解能の高い検出器の実装が必要である。この問題については、現在、東京大学地震研究所とハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター (Wigner Research Centre for Physics of the Hungarian Academy of Sciences) が共同開発している 1 cm の高位置分解能ミュオグラフィ観測装置が今後解決できると期待される。

謝辞

本論文は、多くの方々のご協力のもとできあがったものである。

指導教員の田中宏幸先生には、修士課程の頃から研究の方針決定や実験の遂行などにおいて生じた問題を解決するために数多くのご助言をいただいた。特に実験データ解析においては、困難に直面するたびに方針についてご提案やご議論いただき、強く励まされた。深く感謝申し上げます。

大湊隆雄先生には、桜島でのミュオグラフィ観測実験において、観測機器の設置のために、適した土地の選定および土地借用などの諸手続きについてご協力いただいた。先生のご協力無しには、桜島での実験を遂行することはできなかった。このことについて感謝申し上げます。

審査員の大久保修平先生、永原裕子先生、小屋口剛博先生、大湊隆雄先生、田中宏幸先生からは、論文に対して有益なご指摘をいただいた。深く感謝申し上げます。

博士課程での研究生活においては、平成 25 年度に GCOE プログラム「地球から地球たちへ」による奨学制度、平成 25 年度から平成 27 年度に東京大学による学生支援制度、および公益財団法人尚志社による奨学制度など多くの支援をいただいた。これらに感謝申し上げます。

最後に、いつも支えてくれた両親に感謝申し上げます。

参考文献

- Achard, P. et al. (2004), Measurement of the atmospheric muon spectrum from 20 to 3000 GeV, *Phys. Lett. Sect. B Nucl. Elem. Part. High-Energy Phys.*, 598(1–2), 15–32, doi:10.1016/j.physletb.2004.08.003.
- Agostinelli, S. et al. (2003), GEANT4 - A simulation toolkit, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 506(3), 250–303, doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- Allkofer, O. C., G. Bella, W. D. Dau, H. Jokisch, G. Klemke, Y. Oren, and R. Uhr (1985), Cosmic ray muon spectra at sea-level up to 10 TeV, *Nucl. Phys. B*, 259(1), 1–18, doi:10.1016/0550-3213(85)90294-9.
- Alvarez, L. W. et al. (1970), Search for Hidden Chambers in the Pyramids, *Science (80-.)*, 167(3919), 832–839, doi:10.1126/science.167.3919.832.
- Bull, R., W. Nash, and B. Rastin (1965), The momentum spectrum and charge ratio of mu-mesons at sea-level-II, *Nuovo Cim. A*, XL(1), 365–384.
- Cannavò, F., A. G. Camacho, P. J. González, M. Mattia, G. Puglisi, and J. Fernández (2015), Real Time Tracking of Magmatic Intrusions by means of Ground Deformation Modeling during Volcanic Crises., *Sci. Rep.*, 5(January), 10970, doi:10.1038/srep10970.
- Carbone, D., D. Gibert, J. Marteau, M. Diament, L. Zuccarello, and E. Galichet (2013), An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy), *Geophys. J. Int.*, 196(2), 633–643, doi:10.1093/gji/ggt403.
- Carbone, D., D. Gibert, J. Marteau, M. Diament, L. Zuccarello, and E. Galichet (2014), An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy), *Geophys. J. Int.*, 196(2), 633–643, doi:10.1093/gji/ggt403.
- Feldman, G. J., and R. D. Cousins (1998), Unified approach to the classical statistical analysis of small signals, *Phys. Rev. D*, 57(7), 3873–3889.
- George, E. P. (1955), Cosmic rays measure overburden of tunnel, *Commonw. Eng.*, 455–457.

- Groom, D. E., N. V. Mokhov, and S. I. Striganov (2001), MUON STOPPING POWER AND RANGE TABLES 10 MeV–100 TeV, *At. Data Nucl. Data Tables*, 78(2), 183–356, doi:10.1006/adnd.2001.0861.
- Gruppen, C. (2005), *Astroparticle Physics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Haino, S. et al. (2004), Measurements of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer, *Phys. Lett. Sect. B Nucl. Elem. Part. High-Energy Phys.*, 594(1–2), 35–46, doi:10.1016/j.physletb.2004.05.019.
- Heritage Innovation Preservation Institute, ., . Arab Republic of Egypt Ministry of Antiquities, and . Cairo University Faculty of Engineering (2016), # *ScanPyramids – Results from the first measurements campaign in the Bent Pyramid*.
- Jokisch, H., K. Carstensen, W. Dau, H. Meyer, and O. Allkofer (1979), Cosmic-ray muon spectrum up to 1 TeV at 75° zenith angle, *Phys. Rev. D*, 19(5), 1368–1372, doi:10.1103/PhysRevD.19.1368.
- Jourde, K., D. Gibert, J. Marteau, J. De Bremond D’Ars, S. Gardien, C. Girerd, J. C. Ianigro, and D. Carbone (2013), Experimental detection of upward going cosmic particles and consequences for correction of density radiography of volcanoes, *Geophys. Res. Lett.*, 40(24), 6334–6339, doi:10.1002/2013GL058357.
- Jourde, K., D. Gibert, J. Marteau, J. de Bremond d’Ars, S. Gardien, C. Girerd, and J.-C. Ianigro (2016a), Monitoring temporal opacity fluctuations of large structures with muon tomography: a calibration experiment using a water tower tank, *Sci. Rep.*, 6:23054(November 2015), 1–11, doi:10.1038/srep23054.
- Jourde, K., D. Gibert, J. Marteau, J. de B. d’Ars, and J.-C. Komorowski (2016b), Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the La Soufrière of Guadeloupe volcano, *Nat. Publ. Gr.*, (August), 1–12, doi:10.1038/srep33406.
- Kedar, S., H. K. M. Tanaka, C. J. Naudet, C. E. Jones, J. P. Plaut, and F. H. Webb (2012), Muon radiography for exploration of Mars geology, *Geosci. Instrumentation, Methods Data Syst. Discuss.*, 2(2), 829–853, doi:10.5194/gid-2-829-2012.

- Kudryavtsev, V. a., N. J. C. Spooner, J. Gluyas, C. Fung, and M. Coleman (2012), Monitoring subsurface CO₂ emplacement and security of storage using muon tomography, *Int. J. Greenh. Gas Control*, 11, 21–24, doi:10.1016/j.ijggc.2012.07.023.
- Lesparre, N., D. Gibert, J. Marteau, J. C. Komorowski, F. Nicollin, and O. Coutant (2012), Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe volcano: Comparison with geological, electrical resistivity and gravity data, *Geophys. J. Int.*, 190(2), 1008–1019, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05546.x.
- Maeda, K. (1973), Energy and Zenith Angle Dependence of Atmospheric Muons, *Fortschritte der Phys.*, 21(3), 113–154, doi:10.1002/prop.19730210302.
- Matsuno, S. et al. (1984), Cosmic-ray muon spectrum up to 20 TeV at 89° zenith angle, *Phys. Rev. D*, 29(1), 1–23, doi:10.1103/PhysRevD.29.1.
- Menichelli, M. et al. (2007), A scintillating fibres tracker detector for archaeological applications, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 572(1 SPEC. ISS.), 262–265, doi:10.1016/j.nima.2006.10.317.
- Nagamine, K., M. Iwasaki, K. Shimomura, and K. Ishida (1995), Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 356(2–3), 585–595, doi:10.1016/0168-9002(94)01169-9.
- Oláh, L., G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, and et al. (2012), CCC-based muon telescope for examination of natural caves, *Geosci. Instrumentation, Methods Data Syst.*, 1(2), 229–234, doi:10.5194/gi-1-229-2012.
- Pak, W., S. Ozaki, B. Roe, and K. Greisen (1961), Momentum Spectrum of Muons, *Phys. Rev.*, 121(3), 1959–1961.
- Patrignani, C. et al. (2016), Review of Particle Physics, *Chinese Phys. C*, 40(10), 100001, doi:10.1088/1674-1137/40/10/100001.

- Taira, H., and H. K. M. Tanaka (2010), A potential space- and power-effective muon sensor module for imaging a volcano, *Earth, Planets Sp.*, 62(2), 179–186, doi:10.5047/eps.2009.06.005.
- Tanaka, H., K. Nagamine, N. Kawamura, S. N. Nakamura, K. Ishida, and K. Shimomura (2001), Development of the cosmic-ray muon detection system for probing internal-structure of a volcano, *Hyperfine Interact.*, 138(1–4), 521–526, doi:10.1023/A:1020843100008.
- Tanaka, H., K. Nagamine, N. Kawamura, S. N. Nakamura, K. Ishida, and K. Shimomura (2003), Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 507(3), 657–669, doi:10.1016/S0168-9002(03)01372-X.
- Tanaka, H. K. M., and D. Varga (2016), 第3世代ミュオグラフィの実現に向けた国際共同研究の始動, in 第953回地震研究所談話会, p. 1, Tokyo.
- Tanaka, H. K. M. et al. (2007a), High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 263(1–2), 104–113, doi:10.1016/j.epsl.2007.09.001.
- Tanaka, H. K. M., T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, H. Ohshima, T. Maekawa, H. Watanabe, and K. Niwa (2007b), Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 34(22), L22311, doi:10.1029/2007GL031389.
- Tanaka, H. K. M., T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara, and H. Taira (2009a), Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 36(1), 1–5, doi:10.1029/2008GL036451.
- Tanaka, H. K. M., T. Uchida, M. Tanaka, M. Takeo, J. Oikawa, T. Ohminato, Y. Aoki, E. Koyama, and H. Tsuji (2009b), Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at asama volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 36(17), L17302, doi:10.1029/2009GL039448.

- Tanaka, H. K. M., T. Kusagaya, and H. Shinohara (2014), Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano., *Nat. Commun.*, 5, 3381, doi:10.1038/ncomms4381.
- Thébault, E. et al. (2015), International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, *Earth, Planets Sp.*, 67(1), 79, doi:10.1186/s40623-015-0228-9.
- Thompson, M., and M. Whalley (1975), The production spectra of the parents of vertical cosmic ray muons, *J. Phys. G Nucl. Phys.*, 1(6), 48–50.
- Tsuji, S., T. Katayama, K. Okei, N. Sakurai, S. Tate, Y. Tsutsui, T. Wada, A. Yamamoto, I. Yamamoto, and Y. Yamashita (1998), An altazimuthal counter telescope with a magnet spectrometer II: Measurements of muons at sea level, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 413(1), 43–49, doi:10.1016/S0168-9002(98)00490-2.
- Uchida, T., H. K. M. Tanaka, and M. Tanaka (2009), Space Saving and Power Efficient Readout System for Cosmic-Ray Muon Radiography, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 56(2), 448–452, doi:10.1109/TNS.2009.2014866.
- Yokoo, A., M. Iguchi, T. Tameguri, and K. Yamamoto (2013), Processes prior to outbursts of vulcanian eruption at Showa Crater of Sakurajima Volcano, *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, 58, 163–181.
- 九州地方整備局大隅河川国道事務所 (2015), 平成 27 年土石流調査情報 (桜島地域) 第 4 報, 1–14.
- 鹿児島地方気象台 (2016), 桜島の噴火についての統計資料, Available from: http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/kazan_top.html (Accessed 31 December 2016)
- 竹上弘彰, 寺田敦彦, 野口弘喜, 上地優, 小野正人, 高松邦吉, 日野竜太郎, 伊藤主税, 奥村忠彦, 鈴木敬一, 大沼寛 (2013), オンサイト非破壊検査技術の開発—HTTRの内部構造可視化予備試験—.
- 中道治久, 青山裕 (2016), 地球物理学的多項目観測から見た噴火過程, *火山*, 61(1), 119–154.

付録A オープンエアミュオンエネルギースペクトルの データテーブル

本研究では、以下の各先行研究の実験で得られた宇宙線ミュオンの各天頂角に対するエネルギースペクトルデータをテーブル化し、まとめた。

Table A.1: Differential energy spectra of muons by the DEIS experiment (Allkofer *et al.* 1985).

The angle in this table is the zenith angle.

$M(p)$ [(GeV/c) ⁻¹ sr ⁻¹ sec ⁻¹ cm ²]	Error [(GeV/c) ⁻¹ sr ⁻¹ sec ⁻¹ cm ²]															
Momentum p [GeV/c]	79°	81°	83°	85°	86.5°	87.5°	88.5°	89.5°	79°	81°	83°	85°	86.5°	87.5°	88.5°	89.5°
11.7	8.34E-06	4.59E-06	2.78E-06	1.33E-06	6.17E-07	3.29E-07	1.78E-07	9.59E-08	8.43E-08	5.23E-08	4.56E-08	3.52E-08	2.89E-08	1.78E-08	1.10E-08	6.88E-09
14.2	6.47E-06	3.90E-06	2.43E-06	1.29E-06	6.63E-07	3.90E-07	2.21E-07	1.04E-07	5.70E-08	3.55E-08	2.75E-08	1.93E-08	1.82E-08	1.32E-08	9.11E-09	5.79E-09
17.9	5.13E-06	3.47E-06	2.17E-06	1.22E-06	6.21E-07	3.91E-07	2.19E-07	1.15E-07	4.36E-08	2.78E-08	1.87E-08	1.32E-08	1.29E-08	1.02E-08	7.58E-09	5.50E-09
22.55	3.75E-06	2.78E-06	1.85E-06	1.07E-06	5.94E-07	4.00E-07	2.16E-07	1.08E-07	3.30E-08	2.05E-08	1.33E-08	9.52E-09	9.86E-09	8.19E-09	6.37E-09	4.74E-09
28.35	2.66E-06	2.02E-06	1.41E-06	8.23E-07	5.17E-07	3.33E-07	2.01E-07	1.05E-07	2.48E-08	1.44E-08	9.17E-09	6.51E-09	7.39E-09	6.19E-09	5.18E-09	4.14E-09
35.7	1.84E-06	1.45E-06	1.07E-06	6.85E-07	4.47E-07	3.01E-07	1.82E-07	9.79E-08	1.82E-08	9.98E-09	6.63E-09	4.93E-09	5.82E-09	5.02E-09	4.31E-09	3.49E-09
44.95	1.21E-06	9.88E-07	7.74E-07	5.29E-07	3.63E-07	2.51E-07	1.60E-07	9.61E-08	1.30E-08	6.92E-09	4.72E-09	3.59E-09	4.43E-09	4.02E-09	3.44E-09	3.01E-09
56.6	7.96E-07	6.63E-07	5.34E-07	3.82E-07	2.77E-07	1.99E-07	1.33E-07	7.80E-08	9.07E-09	4.84E-09	3.37E-09	2.56E-09	3.27E-09	3.02E-09	2.74E-09	2.37E-09
71.25	4.87E-07	4.35E-07	3.56E-07	2.69E-07	1.96E-07	1.47E-07	1.03E-07	6.26E-08	6.23E-09	3.35E-09	2.39E-09	1.83E-09	2.35E-09	2.22E-09	2.09E-09	1.86E-09
89.7	2.98E-07	2.69E-07	2.30E-07	1.82E-07	1.38E-07	1.10E-07	7.91E-08	4.97E-08	4.26E-09	2.31E-09	1.66E-09	1.33E-09	1.73E-09	1.70E-09	1.61E-09	1.47E-09
112.95	1.69E-07	1.61E-07	1.44E-07	1.15E-07	9.28E-08	7.62E-08	5.59E-08	4.05E-08	2.81E-09	1.56E-09	1.17E-09	9.12E-10	1.24E-09	1.23E-09	1.20E-09	1.18E-09
142.2	9.97E-08	9.37E-08	8.56E-08	7.22E-08	6.10E-08	5.21E-08	4.02E-08	2.75E-08	1.90E-09	1.05E-09	7.87E-10	6.35E-10	8.91E-10	9.06E-10	8.92E-10	8.56E-10
179	5.25E-08	5.34E-08	4.94E-08	4.36E-08	3.78E-08	3.20E-08	2.67E-08	1.96E-08	1.22E-09	7.05E-10	5.29E-10	4.36E-10	6.17E-10	6.28E-10	6.41E-10	6.36E-10
225.35	2.96E-08	3.04E-08	2.80E-08	2.57E-08	2.31E-08	1.97E-08	1.65E-08	1.26E-08	8.14E-10	4.68E-10	3.53E-10	2.98E-10	4.31E-10	4.34E-10	4.47E-10	4.54E-10
283.7	1.67E-08	1.61E-08	1.56E-08	1.47E-08	1.37E-08	1.22E-08	1.02E-08	8.10E-09	5.44E-10	3.02E-10	2.34E-10	2.00E-10	2.92E-10	3.03E-10	3.12E-10	3.23E-10
357.15	8.65E-09	8.24E-09	8.49E-09	8.16E-09	7.18E-09	6.85E-09	6.28E-09	4.73E-09	3.49E-10	1.93E-10	1.54E-10	1.32E-10	1.88E-10	2.02E-10	2.17E-10	2.19E-10
449.65	3.79E-09	4.31E-09	4.31E-09	4.22E-09	4.01E-09	4.05E-09	3.49E-09	2.93E-09	2.05E-10	1.24E-10	9.70E-11	8.45E-11	1.25E-10	1.39E-10	1.45E-10	1.54E-10
566.1	2.02E-09	2.02E-09	2.24E-09	2.20E-09	2.00E-09	2.05E-09	1.72E-09	1.76E-09	1.34E-10	7.57E-11	6.22E-11	5.39E-11	7.85E-11	8.74E-11	8.97E-11	1.05E-10
712.65	1.08E-09	1.06E-09	1.09E-09	1.12E-09	1.01E-09	1.04E-09	9.41E-10	9.18E-10	8.68E-11	4.87E-11	3.85E-11	3.44E-11	4.95E-11	5.53E-11	5.90E-11	6.77E-11
897.15	4.88E-10	5.27E-10	5.95E-10	5.56E-10	5.27E-10	5.16E-10	4.48E-10	4.76E-10	5.17E-11	3.05E-11	2.54E-11	2.14E-11	3.18E-11	3.47E-11	3.63E-11	4.32E-11
1129.45	2.68E-10	2.63E-10	2.31E-10	2.52E-10	2.60E-10	2.50E-10	2.42E-10	2.50E-10	3.41E-11	1.91E-11	1.40E-11	1.29E-11	1.98E-11	2.14E-11	2.37E-11	2.80E-11
1421.9	1.23E-10	9.91E-11	1.11E-10	1.19E-10	1.04E-10	1.20E-10	1.35E-10	9.09E-11	2.05E-11	1.04E-11	8.62E-12	7.85E-12	1.12E-11	1.32E-11	1.56E-11	1.49E-11
2048.4	2.20E-11	3.08E-11	3.19E-11	3.91E-11	4.29E-11	4.29E-11	3.76E-11	3.23E-11	5.05E-12	3.40E-12	2.71E-12	2.63E-12	4.20E-12	4.63E-12	4.86E-12	5.24E-12
3246.5	4.66E-12	9.31E-12	8.47E-12	8.66E-12	9.31E-12	1.07E-11	9.12E-12	9.50E-12	1.76E-12	1.42E-12	1.06E-12	9.45E-13	1.50E-12	1.76E-12	1.82E-12	2.18E-12
5145.35	1.67E-12	1.84E-12	1.52E-12	2.89E-12	1.56E-12	1.75E-12	1.31E-12	3.27E-12	7.48E-13	4.48E-13	3.16E-13	3.86E-13	4.32E-13	5.08E-13	4.92E-13	9.08E-13
8154.8	5.58E-13	4.97E-13	3.61E-13	4.13E-13	7.08E-13	3.71E-13	4.69E-13	3.19E-13	2.79E-13	1.50E-13	9.97E-14	9.46E-14	1.90E-13	1.51E-13	1.92E-13	1.84E-13

Table A.2: Differential energy spectra of muons by the BESS experiment (Haino et al. 2004) at a zenith angle of 0 degrees.

			μ^+					μ^-					$\mu^+ + \mu^-$							
P_{lower}	P_{upper}	P_{mean}	Flux	ΔF_{stat}	ΔF_{sys}	modifier	F	$\Delta F_{\text{stat}} + \Delta F_{\text{sys}}$	Flux	ΔF_{stat}	ΔF_{sys}	modifier	F	$\Delta F_{\text{stat}} + \Delta F_{\text{sys}}$	Flux	ΔF_{stat}	ΔF_{sys}	modifier	F	$\Delta F_{\text{stat}} + \Delta F_{\text{sys}}$
(GeV/c)	(GeV/c)	(GeV/c)	($\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)		($\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)	($\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)		($\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)	($\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)		($\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)	(GeV/c) $^{-1}$)
0.576	0.621	0.599	1.34	0.02	0.03	10	1.34E+01	3.61E-01	1.25	0.02	0.03	10	1.25E+01	3.61E-01	2.59	0.028	0.042	10	2.59E+01	5.10E-01
0.621	0.669	0.645	1.33	0.02	0.03	10	1.33E+01	3.61E-01	1.22	0.02	0.03	10	1.22E+01	3.61E-01	2.55	0.028	0.042	10	2.55E+01	5.10E-01
0.669	0.72	0.694	1.32	0.02	0.03	10	1.32E+01	3.61E-01	1.19	0.02	0.03	10	1.19E+01	3.61E-01	2.51	0.028	0.042	10	2.51E+01	5.10E-01
0.72	0.776	0.748	1.27	0.02	0.03	10	1.27E+01	3.61E-01	1.15	0.02	0.02	10	1.15E+01	2.83E-01	2.42	0.028	0.036	10	2.42E+01	4.58E-01
0.776	0.836	0.806	1.26	0.02	0.03	10	1.26E+01	3.61E-01	1.13	0.01	0.02	10	1.13E+01	2.24E-01	2.39	0.022	0.036	10	2.39E+01	4.24E-01
0.836	0.901	0.869	1.23	0.01	0.03	10	1.23E+01	3.16E-01	1.08	0.01	0.02	10	1.08E+01	2.24E-01	2.31	0.014	0.036	10	2.31E+01	3.87E-01
0.901	0.97	0.934	1.21	0.01	0.03	10	1.21E+01	3.16E-01	1.06	0.01	0.02	10	1.06E+01	2.24E-01	2.27	0.014	0.036	10	2.27E+01	3.87E-01
0.97	1.04	1.01	1.16	0.01	0.02	10	1.16E+01	2.24E-01	1	0.01	0.02	10	1.00E+01	2.24E-01	2.16	0.014	0.028	10	2.16E+01	3.16E-01
1.04	1.13	1.08	1.1	0.01	0.02	10	1.10E+01	2.24E-01	0.96	0.01	0.02	10	9.60E+00	2.24E-01	2.06	0.014	0.028	10	2.06E+01	3.16E-01
1.13	1.21	1.17	1.07	0.01	0.02	10	1.07E+01	2.24E-01	0.91	0.01	0.02	10	9.10E+00	2.24E-01	1.98	0.014	0.028	10	1.98E+01	3.16E-01
1.21	1.31	1.26	1.02	0.01	0.02	10	1.02E+01	2.24E-01	0.88	0.01	0.02	10	8.80E+00	2.24E-01	1.9	0.014	0.028	10	1.90E+01	3.16E-01
1.31	1.41	1.36	9.78	0.1	0.21	1	9.78E+00	2.33E-01	8.53	0.1	0.18	1	8.53E+00	2.06E-01	18.31	0.141	0.277	1	1.83E+01	3.11E-01
1.41	1.52	1.46	9.38	0.1	0.2	1	9.38E+00	2.24E-01	8.01	0.09	0.17	1	8.01E+00	1.92E-01	17.39	0.135	0.262	1	1.74E+01	2.95E-01
1.52	1.63	1.57	8.72	0.09	0.18	1	8.72E+00	2.01E-01	7.53	0.08	0.16	1	7.53E+00	1.79E-01	16.25	0.12	0.241	1	1.63E+01	2.69E-01
1.63	1.76	1.7	8.59	0.09	0.18	1	8.59E+00	2.01E-01	7.22	0.08	0.15	1	7.22E+00	1.70E-01	15.81	0.12	0.234	1	1.58E+01	2.63E-01
1.76	1.9	1.83	7.85	0.08	0.17	1	7.85E+00	1.88E-01	6.72	0.07	0.14	1	6.72E+00	1.57E-01	14.57	0.106	0.22	1	1.46E+01	2.45E-01
1.9	2.04	1.97	7.41	0.07	0.16	1	7.41E+00	1.75E-01	6.28	0.07	0.13	1	6.28E+00	1.48E-01	13.69	0.099	0.206	1	1.37E+01	2.29E-01
2.04	2.2	2.12	7.03	0.07	0.15	1	7.03E+00	1.66E-01	5.71	0.06	0.12	1	5.71E+00	1.34E-01	12.74	0.092	0.192	1	1.27E+01	2.13E-01
2.2	2.37	2.28	6.38	0.06	0.13	1	6.38E+00	1.43E-01	5.36	0.06	0.11	1	5.36E+00	1.25E-01	11.74	0.085	0.17	1	1.17E+01	1.90E-01
2.37	2.55	2.46	6.01	0.06	0.13	1	6.01E+00	1.43E-01	4.92	0.05	0.1	1	4.92E+00	1.12E-01	10.93	0.078	0.164	1	1.09E+01	1.82E-01
2.55	2.75	2.65	5.45	0.05	0.13	1	5.45E+00	1.39E-01	4.62	0.05	0.1	1	4.62E+00	1.12E-01	10.07	0.071	0.164	1	1.01E+01	1.79E-01
2.75	2.96	2.86	5.02	0.05	0.12	1	5.02E+00	1.30E-01	4.09	0.05	0.09	1	4.09E+00	1.03E-01	9.11	0.071	0.15	1	9.11E+00	1.66E-01
2.96	3.19	3.08	4.62	0.05	0.11	1	4.62E+00	1.21E-01	3.69	0.04	0.08	1	3.69E+00	8.94E-02	8.31	0.064	0.136	1	8.31E+00	1.50E-01
3.19	3.44	3.32	4.17	0.04	0.1	1	4.17E+00	1.08E-01	3.31	0.04	0.07	1	3.31E+00	8.06E-02	7.48	0.057	0.122	1	7.48E+00	1.35E-01
3.44	3.71	3.57	3.79	0.04	0.09	1	3.79E+00	9.85E-02	3.06	0.04	0.06	1	3.06E+00	7.21E-02	6.85	0.057	0.108	1	6.85E+00	1.22E-01
3.71	3.99	3.85	3.37	0.04	0.08	1	3.37E+00	8.94E-02	2.7	0.03	0.06	1	2.70E+00	6.71E-02	6.07	0.05	0.1	1	6.07E+00	1.12E-01
3.99	4.3	4.14	3.02	0.03	0.07	1	3.02E+00	7.62E-02	2.37	0.03	0.05	1	2.37E+00	5.83E-02	5.39	0.042	0.086	1	5.39E+00	9.59E-02
4.3	4.63	4.47	2.74	0.03	0.06	1	2.74E+00	6.71E-02	2.11	0.03	0.04	1	2.11E+00	5.00E-02	4.85	0.042	0.072	1	4.85E+00	8.37E-02
4.63	4.99	4.81	2.41	0.03	0.06	1	2.41E+00	6.71E-02	1.87	0.02	0.04	1	1.87E+00	4.47E-02	4.28	0.036	0.072	1	4.28E+00	8.06E-02
4.99	5.38	5.18	2.11	0.02	0.05	1	2.11E+00	5.39E-02	1.66	0.02	0.04	1	1.66E+00	4.47E-02	3.77	0.028	0.064	1	3.77E+00	7.00E-02
5.38	5.79	5.58	1.87	0.02	0.04	1	1.87E+00	4.47E-02	1.46	0.02	0.03	1	1.46E+00	3.61E-02	3.33	0.028	0.05	1	3.33E+00	5.74E-02
5.79	6.24	6.01	1.63	0.02	0.04	1	1.63E+00	4.47E-02	1.24	0.02	0.03	1	1.24E+00	3.61E-02	2.87	0.028	0.05	1	2.87E+00	5.74E-02
6.24	6.73	6.48	1.44	0.02	0.03	1	1.44E+00	3.61E-02	1.13	0.02	0.02	1	1.13E+00	2.83E-02	2.57	0.028	0.036	1	2.57E+00	4.58E-02
6.73	7.25	6.98	1.21	0.02	0.03	1	1.21E+00	3.61E-02	0.96	0.01	0.02	1	9.60E-01	2.24E-02	2.17	0.022	0.036	1	2.17E+00	4.24E-02
7.25	7.81	7.52	1.06	0.01	0.02	1	1.06E+00	2.24E-02	0.83	0.01	0.02	1	8.30E-01	2.24E-02	1.89	0.014	0.028	1	1.89E+00	3.16E-02
7.81	8.41	8.1	9.11	0.13	0.21	0.1	9.11E-01	2.47E-02	6.93	0.11	0.15	0.1	6.93E-01	1.86E-02	16.04	0.17	0.258	0.1	1.60E+00	3.09E-02
8.41	9.06	8.72	8.07	0.11	0.19	0.1	8.07E-01	2.20E-02	6.08	0.1	0.13	0.1	6.08E-01	1.64E-02	14.15	0.149	0.23	0.1	1.42E+00	2.74E-02
9.06	9.76	9.4	7.06	0.1	0.16	0.1	7.06E-01	1.89E-02	5.15	0.09	0.11	0.1	5.15E-01	1.42E-02	12.21	0.135	0.194	0.1	1.22E+00	2.36E-02
9.76	10.5	10.1	5.67	0.09	0.13	0.1	5.67E-01	1.58E-02	4.54	0.08	0.1	0.1	4.54E-01	1.28E-02	10.21	0.12	0.164	0.1	1.02E+00	2.03E-02
10.5	11.3	10.9	4.9	0.08	0.11	0.1	4.90E-01	1.36E-02	3.85	0.07	0.08	0.1	3.85E-01	1.06E-02	8.75	0.106	0.136	0.1	8.75E-01	1.73E-02
11.3	12.2	11.8	4.38	0.07	0.1	0.1	4.38E-01	1.22E-02	3.24	0.06	0.07	0.1	3.24E-01	9.22E-03	7.62	0.092	0.122	0.1	7.62E-01	1.53E-02
12.2	13.2	12.7	3.58	0.06	0.08	0.1	3.58E-01	1.00E-02	2.74	0.06	0.06	0.1	2.74E-01	8.49E-03	6.32	0.085	0.1	0.1	6.32E-01	1.31E-02
13.2	14.2	13.6	3.07	0.06	0.07	0.1	3.07E-01	9.22E-03	2.31	0.05	0.05	0.1	2.31E-01	7.07E-03	5.38	0.078	0.086	0.1	5.38E-01	1.16E-02
14.2	15.3	14.7	2.49	0.05	0.06	0.1	2.49E-01	7.81E-03	1.97	0.04	0.04	0.1	1.97E-01	5.66E-03	4.46	0.064	0.072	0.1	4.46E-01	9.64E-03
15.3	16.4	15.8	2.13	0.04	0.05	0.1	2.13E-01	6.40E-03	1.68	0.04	0.04	0.1	1.68E-01	5.66E-03	3.81	0.057	0.064	0.1	3.81E-01	8.54E-03
16.4	17.7	17.1	1.76	0.04	0.04	0.1	1.76E-01	5.66E-03	1.4	0.03	0.03	0.1	1.40E-01	4.24E-03	3.16	0.05	0.05	0.1	3.16E-01	7.07E-03
17.7	19.1	18.4	1.49	0.03	0.03	0.1	1.49E-01	4.24E-03	1.15	0.03	0.02	0.1	1.15E-01	3.61E-03	2.64	0.042	0.036	0.1	2.64E-01	5.57E-03
19.1	20.6	19.8	1.22	0.03	0.03	0.1	1.22E-01	4.24E-03	0.96	0.03	0.02	0.1	9.60E-02	3.61E-03	2.18	0.042	0.036	0.1	2.18E-01	5.57E-03
20.6	23.9	22.1	9.57	0.09	0.22	1.00E-02	9.57E-02	2.38E-03	7.36	0.08	0.15	1.00E-02	7.36E-02	1.70E-03	16.93	0.12	0.266	1.00E-02	1.69E-01	2.92E-03
23.9	27.7	25.6	6.69	0.07	0.16	1.00E-02	6.69E-02	1.75E-03	5.04	0.06	0.11	1.00E-02	5.04E-02	1.25E-03	11.73	0.092	0.194	1.00E-02	1.17E-01	2.15E-03
27.7	32.1	29.7	4.52	0.06	0.1	1.00E-02	4.52E-02	1.17E-03	3.48	0.05	0.07	1.00E-02	3.48E-02	8.60E-04	8	0.078	0.122	1.00E-02	8.00E-02	1.45E-03
32.1	37.3	34.5	2.93	0.04	0.07	1.00E-02	2.93E-02	8.06E-04	2.26	0.04	0.05	1.00E-02	2.26E-02	6.40E-04	5.19	0.057	0.086	1.00E-02	5.19E-02	1.03E-03
37.3	43.3	40.1	2.01	0.03	0.05	1.00E-02	2.01E-02	5.83E-04	1.55	0.03	0.03	1.00E-02	1.55E-02	4.24E-04	3.56	0.042	0.058	1.00E-02	3.56E-02	7.21E-04
43.3	50.2	46.5	1.31	0.02	0.															

Table A.3: Differential energy spectra of muons by the KIEL-DESY experiment (Jokisch *et al.* 1979) at a zenith angle of 75 degrees.

zenith angle range $\theta=68^\circ - 82^\circ$

Momentum (GeV/c)	Intensity [cm ⁻² sr ⁻¹ sec ⁻¹ (GeV/c) ⁻¹]	Error (%)	Measured Number
1.12	2.973E-05	1.45	4782
1.41	3.111E-05	1.07	8751
1.76	3.263E-05	0.85	13876
2.29	3.168E-05	0.71	19604
2.85	3.068E-05	0.63	25368
3.57	2.848E-05	0.57	30900
4.49	2.606E-05	0.53	36244
5.66	2.332E-05	0.49	40920
7.12	2.021E-05	0.48	44192
8.95	1.705E-05	0.46	46468
11.26	1.373E-05	0.46	46910
14.17	1.070E-05	0.47	45497
17.83	8.029E-06	0.48	42596
22.44	5.708E-06	0.51	37938
28.23	3.964E-06	0.55	33075
35.52	2.637E-06	0.6	27560
44.7	1.712E-06	0.67	22421
56.25	1.064E-06	0.76	17488
70.79	6.479E-07	0.86	13465
89.09	3.751E-07	1.01	9771
112.13	2.208E-07	1.18	7241
141.12	1.234E-07	1.41	5027
177.62	6.632E-08	1.7	3440
223.56	3.735E-08	2.06	2408
281.39	1.869E-08	2.53	1559
354.18	9.689E-09	3.15	1008
445.81	5.436E-09	3.92	759
625.46	1.770E-09	3.87	793
990.22	3.982E-10	6.3	370

Table A.4: Differential energy spectra of muons by the L3+C experiment (Achard *et al.* 2004) at zenith angles of 51 and 56 degrees.

$0.600 < \cos \theta < 0.675$ ($47.55^\circ < \theta < 53.13^\circ$)

Momentum lower [GeV]	Momentum upper [GeV]	$\langle p \rangle$ [GeV]	$\Phi \cdot \langle p \rangle^3$ [GeV ² cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹]	$\Delta \phi$ stat [%]	$\Delta \phi$ syst [%]	Φ [GeV ⁻¹ cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹]
42	50	45.79	0.256	0.6	4.7	1.22E-04
50	58.5	54.05	0.269	0.6	4.3	9.21E-05
58.5	68.5	63.26	0.282	0.6	4	7.05E-05
68.5	81.5	74.65	0.29	0.6	3.7	5.20E-05
81.5	100	90.16	0.299	0.6	3.5	3.68E-05
100	132	114.6	0.307	0.5	3.3	2.34E-05
132	200	161.4	0.312	0.5	3.1	1.20E-05
200	300	243.2	0.3	0.8	3	5.07E-06
300	500	382.5	0.277	1.2	3.1	1.89E-06
500	1000	688.5	0.231	2	3.8	4.87E-07
1000	3000	1602	0.117	6.3	8.7	4.56E-08

$0.525 < \cos \theta < 0.600$ ($53.13^\circ < \theta < 58.33^\circ$)

Momentum lower [GeV]	Momentum upper [GeV]	$\langle p \rangle$ [GeV]	$\Phi \cdot \langle p \rangle^3$ [GeV ² cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹]	$\Delta \phi$ stat [%]	$\Delta \phi$ syst [%]	Φ [GeV ⁻¹ cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹]
42	50	45.79	0.256	1.4	5.6	1.22E-04
50	58.5	54.05	0.255	0.9	5.3	8.73E-05
58.5	68.5	63.26	0.273	0.8	5.1	6.82E-05
68.5	81.5	74.65	0.284	0.8	4.9	5.10E-05
81.5	100	90.16	0.294	0.7	4.7	3.62E-05
100	132	114.6	0.305	0.5	4.6	2.32E-05
132	200	161.5	0.316	0.6	4.5	1.21E-05
200	300	243.4	0.315	0.8	4.4	5.32E-06
300	500	382.7	0.297	1.3	4.4	2.03E-06
500	1000	689.3	0.243	2.3	4.8	5.11E-07
1000	3000	1604	0.153	5.9	9.4	5.95E-08

Table A.5: Differential energy spectra of muons by the MUTRON experiment (Matsuno *et al.* 1984) at a zenith angle of 89 degrees.

Momentum lower [GeV/c]	Momentum upper [GeV/c]	Weighted mean momentum value [GeV/c]	Muon number	Differential intensity [(GeV/c) ⁻¹ cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹]	Statistical error [(GeV/c) ⁻¹ cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹]
100	126	112	70142	5.69E-08	2.15E-10
126	158	141	60560	3.99E-08	1.62E-10
158	200	177	50136	2.41E-08	1.08E-10
200	251	223	40643	1.60E-08	7.94E-11
251	316	281	31519	9.88E-09	5.57E-11
316	398	354	23608	5.90E-09	3.84E-11
398	501	444	16946	3.37E-09	2.59E-11
501	631	559	11765	1.88E-09	1.73E-11
631	794	704	7893	1.02E-09	1.15E-11
794	1000	886	5628	5.29E-10	7.05E-12
1000	1259	1115	3114	2.71E-10	4.86E-12
1259	1585	1403	1858	1.31E-10	3.04E-12
1585	1995	1766	1104	6.23E-11	1.88E-12
1995	2512	2222	646	2.97E-11	1.17E-12
2512	3162	2797	350	1.29E-11	6.90E-13
3162	3981	3520	221	6.62E-12	4.45E-13
3981	5012	4431	135	3.25E-12	2.80E-13
5012	6310	5576	81	1.59E-12	1.77E-13
6310	7943	7018	47	7.33E-13	1.07E-14
7943	10000	8832	31	3.76E-13	6.75E-14
10000	12589	11116	13	1.18E-13	3.27E-14
12589	15849	13990	8	5.18E-14	1.83E-14
15849	19953	17606	7	3.50E-14	1.32E-14
19953	25119	22162	4	1.10E-14	5.50E-15

付録B アクセプタンスの導出方法

B.1. 有感面積の数式

ここでは有感面積を導出するために用いた導出方法について示す．有感面積 S_{eff} は下式を用いることで導出される．

$$\begin{aligned} S_{\text{eff}} &= S \times \cos \phi \\ &= d^2 \times \frac{l}{\sqrt{(\Delta n_\phi \times d)^2 + (\Delta n_\theta \times d)^2 + l^2}} \end{aligned} \quad (\text{B-1A})$$

$$S_{\text{eff total}} = S_{\text{eff}} \times (N_\phi - \Delta n_\phi) \times (N_\theta - \Delta n_\theta) \quad (\text{B-1B})$$

ここで、 S は、プラスチックシンチレータストリップの幅を d としたときの 1 グリッドの面積 d^2 、 ϕ は対象とする方位角方向のグリッド数の差 Δn_ϕ および仰角方向のグリッド数の差 Δn_θ で表される方向ベクトルとグリッド面の法線ベクトルがなす角、 l はグリッド面の法線方向で見た最上流と最下流のミュオン検出器間距離、 N_ϕ は方位角方向のグリッド数、 N_θ は仰角方向のグリッド数である．グリッド数は、方位角あるいは仰角方向に並べたプラスチックシンチレータストリップの数に等しい．上記パラメータは Fig. 1.2 に対応している．

B.2. 立体角の数式

ここでは立体角を導出するために用いた導出方法について示す．立体角 Ω は下式を用いることで導出される．

$$\begin{aligned}
 \Omega = & \arctan \frac{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi + 1)(\Delta n_\theta - \alpha_\theta + 1)d^2}{l \sqrt{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi + 1)d^2 + (\Delta n_\theta - \alpha_\theta + 1)d^2 + l^2}} \\
 & - \arctan \frac{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi)(\Delta n_\theta - \alpha_\theta + 1)d^2}{l \sqrt{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi)d^2 + (\Delta n_\theta - \alpha_\theta + 1)d^2 + l^2}} \\
 & - \arctan \frac{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi + 1)(\Delta n_\theta - \alpha_\theta)d^2}{l \sqrt{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi + 1)d^2 + (\Delta n_\theta - \alpha_\theta)d^2 + l^2}} \\
 & + \arctan \frac{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi)(\Delta n_\theta - \alpha_\theta)d^2}{l \sqrt{(\Delta n_\phi - \alpha_\phi)d^2 + (\Delta n_\theta - \alpha_\theta)d^2 + l^2}}
 \end{aligned} \tag{B-2}$$

ここで α_ϕ と α_θ は、それぞれミュオン検出時に最下流のミュオン検出器のグリッド面内の方位角・仰角方向での相対位置である．0 から 1 の値を取り、それぞれを 0.5 とすればグリッドの中心となる．計算時、 α_ϕ と α_θ を変えることによる立体角 Ω の変化は最大 10%程度 ($\alpha_\phi=0$, $\alpha_\theta=0$ と $\alpha_\phi=1$, $\alpha_\theta=1$ の場合) であるので、グリッド中心である $\alpha_\phi=0.5$, $\alpha_\theta=0.5$ として、最大でも 5%程度の変化として計算した．

付録C パッキング開始位置と足し合わせるビン数に対する deviation index 分布

以下では, Fig. 6.4 の作成過程を示す.

1. 方位角方向に足し合わせるビンの数を決める. ここでは 1~5 の 5 通りを選んだ.
2. 方位角方向のパッキング (足し合わせ) 開始位置となる X 方向のビン ID を決める. ここでは $X = -14 \sim -10$ を選んだ.
3. 足し合わせる領域が重ならないように, 手順 2 で決めた X 方向のビン ID から手順 1 で決めたビン数ごとに方位角方向にミュオグラムを足し合わせる. これを各仰角で行う. たとえば, 手順 1 の足し合わせるビン数を 2, 手順 2 の開始位置の X 方向のビン ID を -13 とすると, $X = -13$ と $X = -12$ にあるミュオグラムのカウント数を足し合わせて $X = -13 \sim -12$ の 1 つのビンとする. これを $X = -11 \sim -10$, $X = -9 \sim -8$, ..., $X = 13 \sim 14$ と続ける.
4. 手順 1-3 を, 観測期間 (2014/11/07~2015/04/30) における噴火直後から 30 分間のミュオグラムに対して行い, 同期間の平均ミュオグラムとの比を求め, その比の 1 からのずれを, Feldman and Cousins (1998) による 99% C.L. 統計誤差を単位とした deviation index 分布にする. これによって求めたミュオグラムの σ 値分布を Fig. C.1a から Fig. C.1o に示す.
5. Fig. C.1a から Fig. C.1o に対して, $X = 0$ を含み, $Y = 7$ となるビン ID の deviation index を取り出し, 横軸を手順 1 の足し合わせるビン数, 縦軸をパッキング開始位置となる X 方向のビン ID として表にすると Fig. 6.4 が得られる. たとえば, 足し合わせるビン数が 4, 開始位置が $X = -14$ の Fig. C.1g では, $X = -2 \sim 1$, $Y = 7$ の deviation index は -1.8 となるので, この値を Fig. 6.4 の横軸が 4, 縦軸が -14 の位置に deviation index -1.8 が記される.

0.30min
(data/average-1)/(error of data/average)

y\X	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0.1009	-0.012	0.1648	-0.054	0.0039	-0.188	0.0676	-0.137	-0.006	0.1654	-0.127	0.451	-0.247	-0.059	-0.697	0.5616	-0.268	-0.062	0.4004	0.5691	0.478	0.0425	-0.478	-0.056	0.2177	-0.192	0.0374	-0.248	0.0235
13	0.0539	0.0572	0.087	-0.143	-0.301	0.2063	-0.319	0.0748	0.2764	-1.228	0.3718	-0.583	0.3059	-0.147	-0.119	-0.611	-0.131	-0.487	-0.443	0.352	0.0824	-0.337	0.0941	-0.679	-0.164	0.1024	-0.135	-0.193	0.2546
12	0.3998	0.4944	-0.016	-0.059	0.6902	-0.402	-0.424	-0.07	-0.73	-0.209	0.3892	-0.556	0.0836	-0.059	-0.33	-0.102	0.44	-0.167	-0.079	-0.066	0.3128	-0.274	-0.303	0.0709	0.0926	0.2571	-0.751	0.1072	0.0455
11	-0.182	-0.131	0.2842	0.4728	0.0292	-0.423	0.2576	0.057	0.1929	0.5495	-0.417	0.0432	0.0396	-0.231	-0.178	-0.524	0.0491	0.0479	0.0396	-0.502	-0.461	0.3301	0.2595	-0.272	0.3603	-0.229	0.4039	-0.19	0.1336
10	0.0204	-0.079	-0.012	0.1358	-0.091	0.1344	-0.015	-0.353	-0.065	0.1849	-0.13	0.189	-0.153	-0.963	-0.332	0.4143	0.12	-0.06	-0.319	-0.782	-0.243	0.1155	0.1669	0.6288	-0.14	0.6015	0.0218	0.4664	-0.144
9	0.0778	0.0438	-0.027	-0.237	-0.082	-0.101	-0.336	0.1265	0.3681	-0.074	0.0719	0.2125	0.2031	0.2955	-0.228	-0.641	0.3227	-0.027	0.0313	-0.146	0.0557	0.0761	0.1049	0.0896	0.0338	-0.257	-0.284	-0.579	-0.295
8	-0.027	0.1351	-0.077	0.1039	-0.098	-0.101	-0.095	-0.125	0.0372	-0.245	-0.041	-0.373	-0.054	0.1697	-0.374	-0.242	0.1465	0.0152	0.1946	0.4722	-0.207	-0.268	-0.611	-0.568	-0.018	0.3151	0.2883	-0.291	-0.047
7	-0.021	-0.032	-0.054	-0.059	-0.092	-0.09	0.0988	-0.122	-0.113	-0.191	-0.006	-0.053	-0.362	-0.246	-0.719	-0.86	-0.033	0.0335	-0.233	-0.088	-0.087	-0.406	-0.226	-0.401	-0.187	-0.328	-0.614	0.1025	-0.494
6	-0.008	-0.006	-0.013	-0.021	0.1479	-0.02	-0.032	-0.03	-0.035	-0.059	-0.056	-0.1	-0.11	-0.154	-0.265	-0.279	-0.179	0.2297	0.0196	-0.585	0.2184	-0.421	0.2228	-0.044	-0.15	0.2889	-0.611	-0.482	-0.122
5	-0.005	-0.011	-0.018	-0.012	0.1459	-0.023	-0.017	-0.037	-0.024	-0.062	-0.056	-0.068	-0.096	-0.132	-0.213	-0.218	0.228	-0.052	0.052	0.3301	-0.017	0.1849	0.2011	-0.27	0.0523	-0.507	-0.037	-0.078	0.0532
4	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.006	-0.008	-0.014	-0.015	0.1577	-0.021	-0.026	-0.043	-0.07	-0.068	0.1004	-0.098	-0.143	-0.169	0.1885	-0.162	-0.156	0.0305	0.059	0.0703	0.0949	0.1273	0.1405
3	1E-101	-0.002	-0.002	-1E-03	-0.005	-0.003	-0.007	-0.004	-0.003	-0.009	-0.006	-0.008	0.1585	-0.016	-0.023	-0.022	-0.028	-0.028	-0.033	-0.046	-0.038	-0.051	-0.039	-0.038	0.1312	0.2751	0.1475	0.1577	-0.008
2	-1E-03	-0.007	-0.011	-0.007	-0.015	-0.012	0.1562	-0.017	-0.02	-0.026	-0.038	-0.034	0.1417	-0.049	-0.07	0.1281	-0.061	-0.059	-0.066	-0.07	0.13	-0.059	0.1355	-0.052	-0.05	-0.035	-0.027	-0.013	-0.006
1	-0.004	-0.008	-0.014	-0.02	-0.032	-0.031	-0.026	-0.047	0.1269	-0.074	-0.072	-0.084	-0.093	0.0813	-0.12	-0.125	-0.098	-0.103	0.2347	-0.102	0.0871	0.1105	-0.058	-0.058	-0.047	-0.038	-0.026	-0.009	-0.003

Fig. C.1 (part1): deviation index mode muogram summed up azimuthally every 1 bin from the bin ID $X = -14$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min

(data/average-1)/(error of data/average)

y\X	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	0.0672	0.0876	-0.139	-0.061	0.1198	0.2677	-0.211	0.0018	-0.234	0.6856	0.4019	-0.394	0.0669	-0.123														
13	0.0892	-0.057	-0.067	-0.19	-0.551	-0.104	0.1176	-0.491	-0.421	-0.03	-0.152	-0.434	-0.06	-0.255														
12	0.6842	-0.07	0.2345	-0.383	-0.621	-0.091	0.0169	-0.306	0.224	-0.103	0.0659	-0.162	0.2856	-0.468														
11	-0.242	0.7008	-0.285	0.2941	0.5811	-0.214	-0.14	-0.485	0.0686	-0.298	-0.069	0.0293	0.1213	0.308														
10	-0.048	0.1051	0.0483	-0.283	0.1119	0.0875	-0.816	0.1006	0.0467	-0.758	-0.09	0.5693	0.3435	0.4564														
9	0.107	-0.218	-0.161	-0.086	0.2735	0.2359	0.4563	-0.676	0.2101	-0.077	0.0928	0.1378	-0.178	-0.628														
8	0.1137	0.0422	-0.199	-0.22	-0.159	-0.34	0.115	-0.482	0.1287	0.4846	-0.334	-1.034	0.2654	0.0984														
7	-0.053	-0.113	-0.181	0.0012	-0.304	-0.053	-0.537	-1.579	0.0037	-0.277	-0.344	-0.499	-0.462	-0.379														
6	-0.015	-0.035	0.132	-0.062	-0.094	-0.156	-0.264	-0.544	0.0954	-0.402	-0.121	0.1777	0.125	-0.929														
5	-0.016	-0.03	0.1273	-0.054	-0.086	-0.124	-0.228	-0.431	0.1695	0.3314	0.1518	0.0068	-0.269	-0.095														
4	-0.004	-0.01	-0.011	-0.014	-0.029	0.1413	-0.069	-0.138	0.0219	-0.312	0.0744	-0.094	0.1139	0.1957														
3	-0.002	-0.003	-0.008	-0.011	-0.012	-0.014	0.1463	-0.045	-0.056	-0.079	-0.09	-0.078	0.351	0.2686														
2	-0.008	-0.018	-0.027	0.1428	-0.046	-0.072	0.1027	0.0719	-0.12	-0.136	0.0824	0.0938	-0.085	-0.039														
1	-0.012	-0.035	-0.063	-0.074	0.0676	-0.156	0.0067	-0.245	-0.201	0.1627	0.1741	-0.116	-0.084	-0.035														

Fig. C.1 (part2): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 2 bins from the bin ID $X = -14$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min

(data/average-1)/(error of data/average)

y\x	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0.1405	-0.037	-0.089	-0.117	0.031	0.1739	-0.516	0.2751	0.2498	0.7428	-0.33	0.1563	-0.125	-0.198														
13	0.1146	-0.413	-0.119	0.2562	-0.394	-0.129	-0.188	-0.517	-0.658	0.3191	-0.172	-0.764	-0.007	0.0673														
12	0.4524	0.5205	-0.727	-0.561	0.1656	-0.297	-0.277	0.2464	-0.175	0.1722	-0.406	0.1147	-0.224	0.1281														
11	0.1613	0.5026	-0.05	0.2364	0.1133	0.0582	-0.287	-0.327	0.062	-0.681	0.419	0.076	0.1785	-0.054														
10	-0.071	0.0449	0.1004	-0.31	0.0582	0.0438	-0.825	0.3832	-0.26	-0.723	0.1978	0.421	0.5079	0.3681														
9	0.0145	-0.272	-0.37	0.4165	0.0074	0.3173	0.0428	-0.097	0.0029	-0.066	0.1268	0.0895	-0.415	-0.753														
8	0.0735	0.0254	-0.196	-0.063	-0.237	-0.317	-0.128	-0.03	0.1607	0.2256	-0.683	-0.503	0.5427	-0.285														
7	-0.086	-0.151	0.027	-0.235	-0.16	-0.344	-0.823	-0.498	-0.162	-0.137	-0.448	-0.526	-0.712	-0.15														
6	-0.019	0.1308	-0.052	-0.064	-0.115	-0.21	-0.419	-0.403	0.2085	-0.116	-0.079	-0.146	-0.069	-0.531														
5	-0.028	0.1362	-0.04	-0.061	-0.118	-0.164	-0.344	0.09	0.0054	0.284	0.3093	-0.147	-0.395	-0.022														
4	-0.006	-0.012	-0.012	-0.022	0.1459	-0.047	-0.113	0.0457	-0.241	0.0692	-0.318	0.0789	0.1455	0.2357														
3	-0.004	-0.006	-0.01	-0.007	-0.015	0.1521	-0.038	-0.05	-0.061	-0.084	-0.091	0.1004	0.3635	0.1517														
2	-0.018	-0.022	0.1467	-0.037	-0.065	0.1148	-0.119	0.0789	-0.125	0.0739	0.0879	-0.102	-0.061	-0.019														
1	-0.022	-0.053	-0.057	0.0891	-0.146	-0.177	-0.015	-0.224	0.1624	0.0051	0.0637	-0.105	-0.064	-0.012														

Fig. C.1 (part3): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 2 bins from the bin ID $X = -13$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min
(data/average-1)/(error of data/average)

y\X	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14	0.186254119	-0.18835198	-0.05132336	0.314537172	-0.56587016	0.201008295	0.835069611	-0.31802665	0.100806575																		
13	0.13536495	-0.15060387	0.039256909	-0.65992902	0.024763914	-0.69823162	0.019641312	-0.54915005	-0.14142981																		
12	0.670238182	0.168351767	-0.74756091	-0.18691003	-0.18017172	0.121027507	0.091316039	-0.29757029	-0.09770267																		
11	0.061574322	0.170246386	0.38175409	0.112601683	-0.21994391	-0.2414287	-0.49401247	0.2382509	0.376387272																		
10	-0.04935917	0.136800222	-0.28225609	0.202793101	-0.8021254	0.2898687	-0.76451966	0.52340558	0.318489173																		
9	0.074580339	-0.32843273	0.264685649	0.175796322	0.166312364	-0.09220156	-0.03337241	0.154921663	-0.33631504																		
8	0.051995453	-0.05540569	-0.13938628	-0.53626787	-0.15437169	-0.00980917	0.295372401	-0.94551017	0.418008957																		
7	-0.10715479	-0.24012414	-0.08938794	-0.18772275	-1.11324321	-0.34149263	-0.25861835	-0.64286029	-0.79797277																		
6	-0.02776283	0.11482696	-0.09643931	-0.21479665	-0.52944208	-0.05572052	-0.09019328	-0.11459915	-0.20006734																		
5	-0.03312057	0.117555339	-0.07744369	-0.18557261	-0.44079584	0.044182106	0.298628725	0.151141797	-0.25803095																		
4	-0.00779308	-0.01753442	-0.02776283	0.12923889	-0.13930123	-0.03275155	-0.03154519	-0.22415137	0.17740506																		
3	-0.00438361	-0.00925428	-0.01412495	-0.02337923	0.128071452	-0.07841782	-0.1173832	-0.12907282	0.424171178																		
2	-0.01850855	-0.03458177	0.126903766	-0.09838758	0.046528842	0.031689939	0.021145836	0.046138361	-0.1115384																		
1	-0.02630163	-0.08377556	0.068003332	-0.22989573	-0.08977855	-0.32633504	0.215050856	0.017240498	-0.11056426																		

Fig. C.1 (part4): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 3 bins from the bin ID $X = -14$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min

(data/average-1)/(error of data/average)

y\x	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	0.074322045		-0.072638	0.018603881	0.081472202	-0.03147821	0.055132935	0.675115597	-0.21056841	-0.24919479																	
13	-0.01087175		-0.290731	-0.40963877	0.112189301	-0.48504623	-0.5922924	0.117809842	-0.47966886	-0.12464758																	
12	0.314149673		-0.08838244	-0.56047479	-0.01944741	-0.28480913	0.1471079	0.011320189	-0.08553021	-0.12636015																	
11	0.555392692		-0.02800222	0.551811854	-0.13044271	-0.53080034	0.079056921	-0.35097534	0.225114972	0.058220053																	
10	0.047709251		0.031426469	-0.08008868	-0.03618896	-0.30609988	-0.12949149	-0.52182577	0.435366392	0.748099388																	
9	-0.15297663		-0.39792972	0.322462669	0.405387465	-0.38473123	0.18988103	-0.01301791	0.135675487	-0.81336247																	
8	0.156194736		-0.29370154	-0.25930791	-0.31750957	-0.28799991	0.22724156	0.055729534	-0.8535836	0.373761031																	
7	-0.14465897		-0.04642207	-0.42618383	-0.30847835	-1.5120883	-0.16435453	-0.35092668	-0.54940549	-0.54400001																	
6	-0.04091365		0.106248594	-0.12322801	-0.26593871	-0.69845441	0.095511855	-0.39692959	0.043368079	-0.29773218																	
5	-0.04042658		0.114047312	-0.12274094	-0.22015439	-0.56207558	0.188107218	0.37979788	0.043844038	-0.41639848																	
4	-0.01217668		-0.01704735	-0.03701711	0.120283033	-0.18118901	-0.09251279	-0.04496027	-0.03120122	0.231396916																	
3	-0.00535774		-0.01509908	-0.01656029	0.147464949	-0.06039634	-0.08962037	-0.13540469	0.068784135	0.442700623																	
2	-0.02484043		0.134682889	-0.06331874	0.084008025	0.032861475	-0.18605968	0.026222686	0.053557301	-0.07403422																	
1	-0.04237485		-0.08962037	0.029737365	-0.24889135	-0.11555877	0.092951899	0.10189096	-0.16316752	-0.07257302																	

Fig. C.1 (part5): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 3 bins from the bin ID $X = -13$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min																											
(data/average-1)/(error of data/average)																											
y\x	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0.088893977		-0.17489128	0.022689848	0.107019921	-0.13884561	0.537452253	0.099684938	0.01861804	-0.10250334																	
13	-0.2840916		-0.04239026	-0.16037113	-0.19139746	-0.47908547	-0.30390133	-0.07748147	-0.54807725	-0.05388538																	
12	0.453629772		-0.58770558	-0.1875438	-0.27091235	0.011951834	-0.18213748	-0.090679	0.266788244	-0.40472793																	
11	0.627630794		0.00086263	0.220579346	-0.09844798	-0.36781683	-0.20279166	0.085364608	-0.06858333	0.366988124																	
10	0.032049507		-0.13458262	0.006529879	-0.57491378	0.151817657	-0.62487227	0.014705685	0.678449237	0.365057924																	
9	-0.26375343		-0.15070691	0.283036029	0.544225946	-0.21219122	-0.07824038	0.13427592	-0.07169858	-0.75528533																	
8	-0.0362668		-0.3209773	-0.17636998	-0.06565636	-0.24468638	0.435397346	-0.655609	-0.1721445	0.068590092																	
7	-0.20456824		-0.07063899	-0.25032344	-0.51972345	-0.88749515	-0.22212376	-0.41133386	-0.67342514	-0.59485715																	
6	0.120283033		-0.08182729	-0.14952964	-0.36432629	-0.61517681	-0.13792434	0.092315937	0.090131889	-0.9310276																	
5	0.122230901		-0.07695662	-0.14173656	-0.29564981	-0.04497258	0.285269802	0.282713547	-0.43847059	-0.04778756																	
4	-0.01509908		-0.01948269	0.134682889	-0.09010744	-0.01048876	-0.40962354	-0.03567287	0.126464581	0.286838709																	
3	-0.00876721		-0.01412495	-0.01802149	0.139729691	-0.07306008	-0.10715479	-0.12907282	0.327009154	0.263217382																	
2	-0.03312057		0.133128236	-0.0847497	0.075810998	0.022707955	-0.19482689	0.191905992	-0.13686589	-0.04578432																	
1	-0.06672821		-0.10471945	0.010210755	-0.06087403	-0.34386946	0.090201303	0.132828249	-0.14222363	-0.03799124																	

Fig. C.1 (part6): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 3 bins from the bin ID $X = -12$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min
(data/average-1)/(error of data/average)

y\X	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	0.120376401																											
13	0.018197414																											
12	0.51466629																											
11	0.452090304																											
10	0.056216391																											
9	-0.075869236																											
8	0.13729605																											
7	-0.166089925																											
6	-0.04919379																											
5	-0.045297252																											
4	-0.01412495																											
3	-0.00535774																											
2	-0.025814563																											
1	-0.046758454																											

Fig. C.1 (part7): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 4 bins from the bin ID $X = -14$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min
(data/average-1)/(error of data/average)

y\X	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	0.077166479																											
13	-0.229370092																											
12	0.688029739																											
11	0.510896655																											
10	-0.015303115																											
9	-0.202246793																											
8	0.087106821																											
7	-0.236227606																											
6	0.115216767																											
5	0.11365747																											
4	-0.01753442																											
3	-0.010715479																											
2	-0.039939513																											
1	-0.074521286																											

Fig. C.1 (part8): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 4 bins from the bin ID $X = -13$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min

(data/average-1)/(error of data/average)

y\x	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
14	-0.060662157				0.054305109				0.038840193				-0.151958573			0.784283239				-0.302885272				
13	-0.088317521				-0.537486422				0.019048402				-0.646600761			-0.121937338				-0.368977046				
12	0.14606455				-0.722882355				-0.047807803				-0.065149066			-0.033168923				0.06801975				
11	0.347767572				0.64324428				-0.240450863				-0.29873637			-0.267718554				0.099910072				
10	0.118886772				-0.100795413				-0.598703118				0.104356623			-0.611383376				0.659927463				
9	-0.316582501				0.187817789				0.547241516				-0.187046092			0.005872125				0.003947128				
8	-0.117121224				-0.335481036				-0.086243238				-0.166067092			0.144150069				-0.536930623				
7	-0.294188606				-0.242901499				-0.471715572				-0.630187573			-0.440961909				-0.677835453				
6	0.104298382				-0.155374446				-0.420339018				-0.199207143			-0.356153928				0.235131645				
5	0.103518248				-0.139301227				-0.351662539				-0.078353657			0.389628615				-0.190057325				
4	-0.020943891				-0.042861916				0.08595951				-0.088997334			-0.145752289				0.027628296				
3	-0.011689613				-0.023379227				0.135071439				-0.101309984			-0.168525261				0.302201468				
2	-0.045297252				0.105858566				0.044966914				-0.024549367			-0.026502257				0.025832163				
1	-0.097900513				0.008648568				-0.118293063				-0.446640649			0.274507893				-0.200671698				

Fig. C.1 (part9): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 4 bins from the bin ID $X = -12$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min

(data/average-1)/(error of data/average)

y \ x	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14		-0.097864458						-0.051638733				-0.236197329			0.371587294				0.427997162				0.039235728	
13		-0.342522022						-0.108087096				-0.225364192			-0.823297284				0.146962202				-0.580303158	
12		-0.111786262						-0.199460228				-0.404407024			0.071825052				-0.111876328				-0.034610369	
11		0.332151257						0.232677705				-0.180847934			-0.193884186				-0.18782714				0.169725869	
10		0.11584523						-0.180739151				-0.649503874			0.118248215				-0.383137607				0.644437756	
9		-0.565482583						0.332631339				0.270429446			-0.061166599				0.035254295				-0.204680923	
8		-0.131573953						-0.264785539				-0.31738367			0.121363457				-0.237537479				0.011480605	
7		-0.093684614						-0.347981304				-1.027554182			-0.448767512				-0.416841891				-0.937711556	
6		0.08908171						-0.17924074				-0.629290859			-0.033216968				-0.172297926				-0.198200794	
5		0.104298382						-0.178753673				-0.508498187			0.076876774				0.464474774				-0.41581229	
4		-0.023379227						0.128460627				-0.160245118			-0.147198632				-0.155040739				0.182929943	
3		-0.016073219						-0.022405093				0.121451806			-0.111538395				-0.174857135				0.402481785	
2		0.128849773						-0.101797051				0.019583708			-0.021034181				0.142450842				-0.163654589	
1		-0.110077194						-0.027673995				-0.157354727			0.004570707				0.060629536				-0.168525261	

Fig. C.1 (part10): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 4 bins from the bin ID $X = -11$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min																									
(data/average-1)/(error of data/average)																									
y\x	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14			-0.002377437							0.201069975				-0.239499503					0.670636588						-0.264699325
13			-0.27782413							-0.365206494				-0.288646241					-0.336324508						-0.411205054
12			-0.112186306							-0.449103256				0.019849015					-0.11045644						-0.184914028
11			0.470675345							0.212966606				-0.377237002					-0.205492513						0.28480753
10			0.1008908							0.003718878				-0.226674584					-0.556709102						0.637516014
9			-0.529505584							0.513417795				0.022501999					-0.007728499						-0.10945403
8			-0.193291954							-0.527980721				-0.139180939					0.139536941						-0.348059878
7			-0.137042578							-0.35354786				-1.179811286					-0.406306701						-0.89986204
6			0.078543471							-0.279089522				-0.827294121					-0.241884841						-0.012668163
5			0.090252476							-0.246456018				-0.189577578					0.351660564						-0.202953602
4			-0.026788698							0.1117081				-0.065951794					-0.214900849						0.09324331
3			-0.018508555							-0.030685235				0.087910912					-0.19677516						0.38003751
2			0.120283033							-0.13540469				0.110485607					-0.073763791						0.004352517
1			-0.124202143							-0.095247044				-0.269073653					0.215428164						-0.226973329

Fig. C.1 (part13): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 5 bins from the bin ID $X = -12$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

0_30min																									
(data/average-1)/(error of data/average)																									
y\x	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14			-0.172215292							0.136304415					-0.162074624					0.574206078					-0.058973163
13			-0.241101963							-0.205100323					-0.640463476					-0.076522798					-0.642033258
12			-0.131778155							-0.341446985					-0.084585414					-0.136559521					0.011496175
11			0.326501794							0.185058375					-0.369576932					-0.140540876					0.09564947
10			-0.082996388							0.038256606					-0.196220306					-0.490794131					0.813699217
9			-0.325562058							0.539882609					-0.062590396					0.046152878					-0.381717998
8			-0.231963917							-0.402287913					-0.078870831					-0.120756339					-0.091000745
7			-0.191338834							-0.523508032					-0.745779466					-0.495288092					-0.827455667
6			0.065270464							-0.359455615					-0.282827258					-0.152594118					-0.390241502
5			0.074639903							-0.30587822					-0.154072294					0.472526247					-0.441734063
4			-0.031172303							0.0968861					-0.12337104					-0.255840629					0.258001764
3			-0.020456824							0.137789825					-0.116896135					-0.207977707					0.484840132
2			0.115216767							0.046919321					-0.063608206					0.096046257					-0.176318337
1			-0.157322715							-0.131964568					-0.276886257					0.240914588					-0.177292471

Fig. C.1 (part14): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 5 bins from the bin ID $X = -11$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

O_30min																									
(data/average-1)/(error of data/average)																									
y\x	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14					-0.134175113					0.104923047					0.041879016					0.377489544					-0.00868649
13					-0.002855272					-0.38226017					-0.768374784					-0.117550596					-0.08893752
12					-0.449349816					-0.122565103					-0.091448637					-0.07655247					-0.018176506
11					0.15570783					-0.031065729					-0.255202098					-0.272623091					0.323558577
10					-0.242861905					-0.476237813					-0.032811205					-0.068803324					0.494403226
9					0.149426364					0.494278927					-0.144915278					0.066646105					-0.653607949
8					-0.298761594					-0.199045993					9.71757E-05					-0.459443727					0.266750558
7					-0.23469831					-0.593167944					-0.686641026					-0.58178789					-0.816613596
6					0.054728673					-0.479274153					-0.155451552					-0.177544653					-0.479620442
5					0.065270464					-0.413520077					-0.031895427					0.338918369					-0.246124196
4					-0.038965378					0.073859161					-0.203448193					-0.115109644					0.33224572
3					-0.022405093					0.12768225					-0.134430555					-0.213335446					0.501000059
2					0.105078489					0.023879538					-0.077279207					0.105672683					-0.130534017
1					0.017240498					-0.177667024					-0.080391061					0.019704117					-0.122253874

Fig. C.1 (part15): deviation index mode muograms summed up azimuthally every 5 bins from the bin ID $X = -10$ during 0–30 minutes after the eruption. The numbers corresponding to x and y in these figures respectively denote the x - and y -direction bin IDs.

付録D ソースコード

D.1. ミュオグラム生成部

ミュオグラム生成部では、「set the combination of planes」の項目において、トラッキングに用いるミュオン検出器の識別番号（Fig. 1.3を参照）を指定する。

たとえば、

```
plane_combination[1]=1  
plane_combination[2]=2  
plane_combination[3]=3
```

であれば、トラッキングを行うためには、Fig. 1.3においてミュオン検出器#1, #2, #3で同時に信号が検出されることが条件となる。このうち、いずれか1つのミュオン検出器でも信号を検出しなかった場合は、トラッキングは行われない。次に「linearcut2」の項目で、トラックの直線性判定を行う。「set the combination of planes」で定義したミュオン検出器の最上流と最下流（上記の場合は、それぞれ#1と#3のミュオン検出器）における反応点（プラスチックシンチレータストリップの幅を1辺とする正方形のグリッドの中心）同士を結ぶ直線を引き、引いた直線とリダンダント検出器（Fig. 2.2を参照）の交点を中心とする半径 R の円を描き、リダンダント検出器における反応部（プラスチックシンチレータストリップの幅を1辺とする正方形）がその円にかかるか判定する。

R の設定は、「Initialization」の項目中の「permissible_difference = 1」で定義される（この1は、プラスチックシンチレータストリップの幅）。「conv_x」「conv_y」で定義するミュオン到来方位角 ϕ 、仰角 θ において「delta_xy_linearcut2[conv_x, conv_y] += 1」によって2次元ヒストグラムのビンのミュオンイベント数を1ずつ増加させ、角度空間における2次元ヒストグラムを生成する。以下に、R法によるミュオグラム生成部のソースコード（プログラミング言語:AWK）を示す。シャープ記号（#）以降は全てコメント文扱いされる。

```

# Copyright (c) 2016, Taro Kusagaya.

# awk -f THISFILE TARGETFILES

#####
## Define functions ##
#####
function abs(x) {
    return (x < 0) ? -x : x # this function returns the absolute value of the integer or
real argument.
}

function sgn(x) { # this function returns the signature of the integer or real argument.
    if (x > 0) {
        return 1
    } else if (x < 0) {
        return -1
    } else {
        return 0
    }
}

function acos(x) {
    return atan2((1.-x^2)^0.5,x)
}

#####
## Initialization. This method is computed at beginning program ##
#####
BEGIN{

#####
## configure the reserved keywords ##
#####
FS = "[,]" # field separator when inputting string
#OFS = "\t" # field separator when outputting string
#RS = "\n" # record(break line) separator when inputting string; the default value
is "\n"(newline))
#ORS = "" # record(break line) separator when outputting string; the default value
is "\n"(newline))
SUBSEP = "@" # separator of array (array[1,2] -> array["1@2"])

#####
## detector geometry ##
#####
delta_x_max = 15 # max grid X num
delta_y_max = 15 # max grid Y num
plane_distance_from_end_to_end_Usu2012 = 1800.0 # distance between forward plane and
backward plane[mm]
plane_distance_from_end_to_end_SatsumaIwojima2013 = 610.0*5 # distance between
forward plane and backward plane[mm]
plane_distance_from_end_to_end_Shinmoedake2014 = 610.0*5 # distance between forward
plane and backward plane[mm]
plane_distance_from_end_to_end_Sakurajima2015 = 610.0*5 # distance between forward
plane and backward plane[mm]
plane_distance_from_end_to_end = plane_distance_from_end_to_end_Sakurajima2015 #
distance between forward plane and backward plane[mm]
thickness_of_aluminum_case = 1.0 # thickness of aluminum case[mm]

```

```

width_of_scintillator = 100.0 # width of plastic scintillator[mm]

#####
## set the combination of planes ##
#####
plane_combination[1]=1
plane_combination[2]=2
plane_combination[3]=3
plane_combination[4]=4
plane_combination[5]=5
plane_combination[6]=6
#plane_combination[7]=7
plane_end_front = plane_combination[1] # plane num of the forward plane
plane_end_back = plane_combination[length(plane_combination)] # plane num of the
backward plane

#####
## Initialization ##
#####
for (i=1; i<=length(plane_combination); i++) {
    if (i==1) {
        file_name_plane_combination = sprintf("%d",plane_combination[i])
    } else {
        file_name_plane_combination =
sprintf("%s-%d",file_name_plane_combination,plane_combination[i])
    }
}
OutFilename = sprintf("Hist_001_%s.csv",file_name_plane_combination)
i = 1

## checking the existence of "OutFilename" ##
if (HIST_MODE == "ON") { # for "Unzip_LinearCut_Zip_Rev2.sh"
    # nothing to do
} else {
    while ((getline < OutFilename) != -1) {
        close(OutFilename)
        i += 1
        OutFilename = sprintf("Hist_%03d_%s.csv",i,file_name_plane_combination)
        if ((getline < OutFilename) == -1) {
            close(OutFilename)
            break
        }
    }
}
old_file = ""
old_FILENAME = ""
calc_mode_every = "every_files"
calc_mode_all = "all_files"
calc_mode = calc_mode_all
stdev_scatt_calc_mode = "OFF" # "ON" or "OFF"
XYdev_calc_mode = "OFF" # "ON" or "OFF"
permissible_difference = 1 # this parameter is permissible difference of segment("1"
means that it allows a difference of one segment). This parameter is for "linearcut2"
accumu_counts_for_check_permissible_difference = 0

#####
## initialize arrays of counts ##
#####

```

```

for (i=0; i<2*delta_x_max-1; i++) {
  for (j=0; j<2*delta_y_max-1; j++) {
    delta_xy[i,j]=0
    delta_xy_monocut[i,j]=0
    delta_xy_linearcut1[i,j]=0
    delta_xy_linearcut2[i,j]=0
  }
}

#####
## initialize arrays of grid positions ##
#####
for (i=plane_end_front; i<=plane_end_back; i++) {
  gridXmin[i]=0
  gridYmin[i]=0
}

}

#####
## Process ##
#####
#####
## Data Format ##
#####
## Time P1Xmin P1Xmax P1Ymin P1Ymax P2Xmin P2Xmax P2Ymin P2Ymax P3Xmin P3Xmax P3Ymin
P3Ymax P4Xmin P4Xmax P4Ymin P4Ymax P5Xmin P5Xmax P5Ymin P5Ymax P6Xmin P6Xmax P6Ymin P6Ymax
P7Xmin P7Xmax P7Ymin P7Ymax ##
## $2 $3 $4 $5 $6 $7 $8 $9 $10 $11 $12 $13 $14
$15 $16 $17 $18 $19 $20 $21 $22 $23 $24 $25 $26 $27
$28 $29 $30 ##
#####
##
{

#####
## calc_mode == "every_files" ##

#####
##

#####
##

if (old_FILENAME != FILENAME && NR > 1 && calc_mode == "every_files") {

#####
## R Method ##
#####
printf("%nlinearcut2,permissible_difference,%f,grid%n",permissible_difference) >
OutFilename
for (i=0; i<2*delta_x_max-1; i++) {
  if(i==0) { printf("y%yx") > OutFilename }
  printf(",%d",i-(delta_x_max-1)) > OutFilename
}
printf("%n") > OutFilename

```

```

for (j=2*delta_y_max-1 - 1; j>=0; j--) {
    printf( "%d", j-(delta_y_max-1) ) > OutFilename
    for (i=0; i<2*delta_x_max-1; i++) {
        #if (j<2*delta_y_max-1 - 1) { printf("%d ",delta_xy[i,j]) }
        #else { printf("%d",delta_xy[i,j]) }
        printf(",%d",delta_xy_linearcut2[i,j]) > OutFilename
    }
    printf("\n") > OutFilename
}
}
old_FILENAME = FILENAME

#####

#####
## calc_mode == "every_files" ##
#####
if (FNR == 1 && calc_mode == "every_files") {
    if (old_file != OutFilename) {
        close(old_file)
        old_file = OutFilename
    }
    split(FILENAME,directory,"/")
    #print directory[length(directory)] # check
    split(directory[length(directory)],parts,"_|Mu|.csv")
    #print parts[1],parts[2],parts[3],parts[4],parts[5] # check
    for (i=1; i<=length(plane_combination); i++) {
        if (i==1) {
            file_name_plane_combination = sprintf("%d",plane_combination[i])
        } else {
            file_name_plane_combination =
sprintf("%s-%d",file_name_plane_combination,plane_combination[i])
        }
    }
    OutFilename = sprintf("%sHist%s.csv",parts[1],file_name_plane_combination)
    print OutFilename

#####
## initialize arrays of counts ##
#####
for (i=0; i<2*delta_x_max-1; i++) {
    for (j=0; j<2*delta_y_max-1; j++) {
        delta_xy[i,j]=0
        delta_xy_monocut[i,j]=0
        delta_xy_linearcut1[i,j]=0
        delta_xy_linearcut2[i,j]=0
    }
}

#####
## initialize arrays of grid positions ##
#####
for (i=plane_end_front; i<=plane_end_back; i++) {
    gridX[i]=0
    gridY[i]=0
}
}

```

```

#####
##

#####
##

## modify last two fields from characters to digits ##
last_one_field_temp = $29 + 0
last_zero_field_temp = $30 + 0

if ($0 !~ /^,Time/ && $0 ~ /^,/ &&
$3 != "" && $5 != "" && $3 == $4 && $5 == $6 &&
$7 != "" && $9 != "" && # $7 == $8 && $9 == $10 &&
$11 != "" && $13 != "" && # $11 == $12 && $13 == $14 &&
$15 != "" && $17 != "" && # $15 == $16 && $17 == $18 &&
$19 != "" && $21 != "" && # $19 == $20 && $21 == $22 &&
$23 != "" && $25 != "" && $23 == $24 && $25 == $26 &&
#$27 != "" && $29 != "" && $27 == $28 && last_one_field_temp == last_zero_field_temp
&&
NR >= 0 ) { # && 11 <= NF && NR <= 20 # 7 <= NR(Data starts)

  for (i=plane_end_front; i<=plane_end_back; i++) {
    gridXmin[i] = int($(4*(i-1)+3)) # PlXmin,P2Xmin,...
    gridXmax[i] = int($(4*(i-1)+4)) # PlXmax,P2Xmax,...
    gridYmin[i] = int($(4*(i-1)+5)) # PlYmin,P2Ymin,...
    gridYmax[i] = int($(4*(i-1)+6)) # PlYmax,P2Ymax,...
  }

  conv_x = int( $(4*(plane_end_front-1)+3) - $(4*(plane_end_back-1)+3) +
(delta_x_max-1) ) # (PlXmin-P7Xmin)
  conv_y = int( $(4*(plane_end_front-1)+5) - $(4*(plane_end_back-1)+5) +
(delta_y_max-1) ) # (PlYmin-P7Ymin)

#####
## R Method ##
## condition1:  $X_i_{calc} - n \hat{\sigma}^2 X_i_{obs} \hat{\sigma}^2 X_i_{calc} + n$ ,  $n=0,1,2,\dots$  ##
## condition2: include "monocut" condition -> this condition has been rejected ##

#####
#####
#### check X axis ####
linearcut2_X_linear_check = 1
for (i=1; i<=length(plane_combination); i++) {
  linearcut2_X_grid_check = 0
  X_i_calc = ( (gridXmin[plane_combination[i]]+gridXmax[plane_combination[i]])/2.0
* (plane_combination[length(plane_combination)] - plane_combination[i]) +
(gridXmin[plane_combination[length(plane_combination)]]+gridXmax[plane_combination[
length(plane_combination)]])/2.0 * (plane_combination[i] - 1) ) /
( plane_combination[length(plane_combination)] - 1 )

  for (j=gridXmin[plane_combination[i]]; j<=gridXmax[plane_combination[i]]; j++) {
    if (X_i_calc - permissible_difference <= j && j <= X_i_calc +
permissible_difference)
    {
      linearcut2_X_grid_check += 1
    }
  }
}

```

```

        break # cancel the remaining loops
    }
}

if (linearcut2_X_grid_check > 0) {
    linearcut2_X_linear_check *= 1
} else {
    linearcut2_X_linear_check *= 0
    break # cancel the remaining loops
}

}

#####
#### check Y axis ####
linearcut2_Y_linear_check = 1
for (i=1; i<=length(plane_combination); i++) {
    linearcut2_Y_grid_check = 0
    Y_i_calc = ( (gridYmin[plane_combination[1]]+gridYmax[plane_combination[1]])/2.0
* (plane_combination[length(plane_combination)] - plane_combination[i]) +
(gridYmin[plane_combination[length(plane_combination)]]+gridYmax[plane_combination[
length(plane_combination)]])/2.0 * (plane_combination[i] - 1) ) /
( plane_combination[length(plane_combination)] - 1 )

    for (j=gridYmin[plane_combination[i]]; j<=gridYmax[plane_combination[i]]; j++) {
        if (Y_i_calc - permissible_difference <= j && j <= Y_i_calc +
permissible_difference)
        {
            linearcut2_Y_grid_check += 1
            break # cancel the remaining loops
        }
    }

    if (linearcut2_Y_grid_check > 0) {
        linearcut2_Y_linear_check *= 1
    } else {
        linearcut2_Y_linear_check *= 0
        break # cancel the remaining loops
    }

}

if ( linearcut2_X_linear_check == 1 && linearcut2_Y_linear_check == 1)
{
    delta_xy_linearcut2[conv_x,conv_y] += 1
}
}
}

#####
## At the end of program, this method is computed. ##
#####
END{
    #####
    ## R Method ##
    #####
    printf("\nlinearcut2,permissible_difference,%f,grid%n",permissible_difference) >
OutFilename

```

```

for (i=0; i<2*delta_x_max-1; i++) {
    if(i==0) { printf("y%%x") > OutFilename }
    printf(",%d",i-(delta_x_max-1)) > OutFilename
}
printf("%n") > OutFilename
for (j=2*delta_y_max-1 - 1; j>=0; j--) {
    printf( "%d", j-(delta_y_max-1) ) > OutFilename
    for (i=0; i<2*delta_x_max-1; i++) {
        #if (j<2*delta_y_max-1 - 1) { printf("%d ",delta_xy[i,j]) }
        #else { printf("%d",delta_xy[i,j]) }
        printf(",%d",delta_xy_linearcut2[i,j]) > OutFilename
    }
    printf("%n") > OutFilename
}
}

```

D.2. 経路長生成部

D.2.1 設定ファイル

経路長生成部では、国土地理院の数値標高モデルである DEM データ (JPGIS (GML) 形式) を、前段プログラムで「緯度 (°), 経度 (°), 標高 (m)」のテキスト形式のデータに加工した後、後段プログラムで加工データから観測対象の経路長分布を計算する。まず、国土地理院の DEM データを以下のコマンドで緯度 (°), 経度 (°), 標高 (m) のテキストデータ形式に加工する。

```
gawk -f [前段プログラム (拡張子 awk)] [国土地理院の DEM (拡張子 xml)]
```

上記コマンドによって、dem_awk_done.dat というファイルが生成されるため、後段プログラム内で例えば以下のようなパラメータ設定を行い、

```
DetPlaneDist = 3050.0 # 1800.0 # 3050.0 # Plane distance in [mm]
```

```
ObsLon = 130.649862 # Longitude at observation station. Unit is [deg]
```

```
ObsLat = 31.556983 # Latitude at observation station. Unit is [deg]
```

```
ObsHeight = 151.0 # in [m]
```

```
TargetLon = 130.664769 # Longitude at target point. Unit is [deg]
```

```
TargetLat = 31.5791 # Latitude at target point. Unit is [deg]
```

```
TargetHeight = 815.0 # in [m]
```

次のコマンドで経路長分布を求めると、LengthDist.csv というファイルに経路長分布が出力される。

```
gawk -f [後段プログラム (拡張子 awk)] dem_awk_done.dat
```

ここで、上記パラメータについて説明する。DetPlaneDist はミュオグラフィ観測装置内の最上流と最下流のミュオン検出器面の間隔 (mm), ObsLon, ObsLat, ObsHeight はミュオグラフィ観測装置が位置する緯度 (°), 経度 (°), 標高 (m) を表し、TargetLon, TargetLat,

TargetHeight は観測対象方向上の任意の点における緯度 (°), 経度 (°), 標高 (m)を表す. 任意の点は目印になる山頂を設定するとよい.

D.2.2 前段プログラム

国土地理院の DEM データ (JPGIS (GML) 形式) を読み込む.

DEM データの例 :

```
<gml:lowerCorner>31.5 130.5</gml:lowerCorner>
```

```
<gml:upperCorner>31.58333333 130.625</gml:upperCorner>
```

```
<gml:high>1124 749</gml:high>
```

```
111.60
```

```
110.40
```

```
▪
```

```
▪
```

```
▪
```

JPGIS (GML) 形式では, 球面上の四角形領域の北西端と南東端の緯度経度で定義される面を経度方向, 緯度方向にそれぞれ一定数に分割 (上記の DEM データ例では, それぞれ 1124 分割と 749 分割) する.

```

# Copyright (c) 2016, Taro Kusagaya.

# YourPCName$ iconv -f SHIFT_JIS -t UTF-8 < DEM_ORIGINALFILE > DEM_OUTPUTFILE
# YourPCName$ awk -f THISFILE TARGETFILE

#####
## Define functions ##
#####
function abs(x) {
    return (x < 0) ? -x : x
}

#####
## Initialization. This method is computed at beginning program ##
#####
BEGIN{

    #####
    ## USER CONFIGURATION ##
    #####
    OutFilename = "dem_awk_done.dat"
    #####

    #####
    ## configure the reserved keywords ##
    #####
    FS = "[,]"
    SUBSEP = "@"
    CONVFMT = "%.15g"
    OFMT = "%.15g"

    #####
    ## Initialization ##
    #####
    DataStartLine = 0
    DataNum = 1

}

#####
## Process ##
#####
{

    if ($0 ~ /^<gml:lowerCorner>/) {
        print $0
        split($0, lowerCorner, "[<> ]")
        printf("%f %f",lowerCorner[3],lowerCorner[4])
        printf("%n")
        lowerCornerLat = lowerCorner[3]
        lowerCornerLon = lowerCorner[4]
    }

    if ($0 ~ /^<gml:upperCorner>/) {
        print $0
        split($0, upperCorner, "[<> ]")
        printf("%f %f",upperCorner[3],upperCorner[4])
        printf("%n")
    }
}

```

```

    upperCornerLat = upperCorner[3]
    upperCornerLon = upperCorner[4]
}

if ($0 ~ /^<gml:low>/) {
    print $0
    split($0, low, "[<> ]")
    printf("%d %d",low[3],low[4])
    printf("\n")
    NWgridX = low[3]
    NWgridY = low[4]
}

if ($0 ~ /^<gml:high>/) {
    print $0
    split($0, high, "[<> ]")
    printf("%d %d",high[3],high[4])
    printf("\n")
    SEgridX = high[3]
    SEgridY = high[4]
}

if ($0 ~ /^<gml:tupleList>/) {
    print $0
    DataStartLine = FNR+1
    print DataStartLine
}

if ($0 ~ /^<gml:startPoint>/) {
    print $0
    split($0, startPoint, "[<> ]")
    printf("%d %d",startPoint[3],startPoint[4])
    printf("\n")
    startPointGridX = startPoint[3]
    startPointGridY = startPoint[4]
}

if (NF == 2 && FNR >= DataStartLine) {
    Altitude[DataNum] = $2
    #print DataNum,Altitude[DataNum]
    DataNum += 1
}
}

#####
## At the end of program, this method is computed. ##
#####
END{
    i=1
    GridX = startPointGridX
    GridY = startPointGridY

    while (GridY<=SEgridY) {
        while (GridX<=SEgridX) {
            Longitude = lowerCornerLon + (upperCornerLon - lowerCornerLon)*GridX/(SEgridX -
(NWgridX - 1))
            Latitude = upperCornerLat - (upperCornerLat - lowerCornerLat)*GridY/(SEgridY -
(NWgridY - 1))

```

```

    if (i > length(Altitude)) { break }

    if (Altitude[i] >= 0.0) {
        printf("%.15g%t%.15g%t%.15g%n",Longitude,Latitude,Altitude[i]) > OutFilename
    }
    i++
    GridX++
}
if (i > length(Altitude)) { break }
if (GridX > SEgridX) { GridX = 0 }
printf("%n") > OutFilename # For Gnuplot's splot
GridY++
}
}

```

D.2.3 後段プログラム

コマンドラインで

```
awk -f [後段プログラム (拡張子 awk)] dem_awk_done.dat
```

を打ち込み、緯度、経度、標高の csv 形式の加工後 DEM データファイルを読み込む。続いて、

```
ObsLon = 130.649862 # Longitude at observation station. Unit is [deg]
```

```
ObsLat = 31.556983 # Latitude at observation station. Unit is [deg]
```

```
ObsHeight = 151.0 # in [m]
```

```
TargetLon = 130.664769 # Longitude at target point. Unit is [deg]
```

```
TargetLat = 31.5791 # Latitude at target point. Unit is [deg]
```

```
TargetHeight = 815.0 # in [m]
```

によって、ミュオグラフィ観測装置の位置と、そこから見る方位角 0° 方向の直線上の任意の位置を定義する。ミュオグラフィ観測装置の位置を始点として、この 2 点間を結ぶ直線の方法を

```
ZeroAzimuth = atan3(DistanceTargetY,DistanceTargetX) # zero azimuth angle in [rad]
```

によって、東方向を 0° として反時計回りの角度 (rad) として決める。一方で、国土地理院の DEM データの緯度、経度、標高から、ミュオグラフィ観測装置周辺の直交座標系 (X, Y, Z) における、1 辺約 10 m、高さ Z の四角柱を生成する。ただし、 X, Y は四角柱底面の中心の位置を指す。それらが以下のコードで設定される。

```
GridSizeX = GridDeg*(2*PI*RadiusEarth*cos($2*PI/180.0)/360.0) # unit is [m]
```

```
GridSizeY = GridDeg*(2*PI*RadiusEarth/360.0) # unit is [m]
```

```
DistanceX = ($1 - ObsLon)*(2*PI*RadiusEarth*cos(TargetLat*PI/180.0)/360.0) # unit is [m]
```

```
DistanceY = ($2 - ObsLat)*(2*PI*RadiusEarth/360.0) # unit is [m]
```

```
EstimHeight = $3
```

各四角柱に対して真東からの角度を以下で計算する.

```
azimuth_angle = ZeroAzimuth + atan3(-azi*DeltaAzi,1.0)
```

```
for (azi = -azi_max; azi <= azi_max; azi++){
```

```
for (ele = ele_min; ele <= ele_max; ele++) {
```

そのあと, 上記コードで方位角方向に直線を引き, その直線が XY 平面上で四角柱と交わるときに仰角方向に直線を引いて,

```
if (EstimStartZ_loop > EstimHeight)
```

上記コードにおいて, 直線が四角柱と交わっているか判定する.

```
Path[azi,ele] += UnitPathLeng
```

四角柱と交わっている場合, 上記コードで,

```
UnitPathLeng (=0.1m)
```

上記の UnitPathLeng ずつ足し合わせ, これを方位角範囲-azi_max から azi_max, 仰角範囲 ele_min から ele_max まで計算し, 四角柱の外に出た時点で計算をやめる. 以下にソースコードを示す.

```

# Copyright (c) 2016, Taro Kusagaya.

# YourPCName$ iconv -f SHIFT_JIS -t UTF-8 < ORIGINALFILE > OUTPUTFILE
# YourPCName$ awk -f THISFILE TARGETFILE

#####
## Define functions ##
#####
function abs(x) {
    return (x < 0) ? -x : x
}

function ceil(x) {
    if (x - int(x) == 0) { return x }
    else if (x > 0) { return int(x)+1 }
    else { return int(x) }
}

function tan(x) {
    return sin(x)/cos(x)
}

function atan3(y,x) {
    if (atan2(y,x) < 0) { return atan2(y,x)+2*PI }
    else { return atan2(y,x) }
}

function acos(x) {
    return (x == 0) ? PI/2.0 : atan3(sqrt(1-x**2),x)
}

#####
## Initialization. This method is computed at program beginning ##
#####
BEGIN{

#####
## Constant ##
#####
PI = 3.14159265358979 # Mathematical constant
RadiusEarth = 6371000.0 # Unit is [m]
GridDeg_5m_mesh = 0.4/3600.0 # unit is [deg/grid].(0.4[sec]/3600[sec/deg])
GridDeg_10m_mesh = 0.2/3600.0 # unit is [deg/grid].(0.2[sec]/3600[sec/deg])
GridDeg = GridDeg_10m_mesh

#####
## USER CONFIGURATION ##
#####
OutFilename = "LengthDist.csv"
#####

#####
## Configure the reserved keywords ##
#####
FS = "[ \t]"
#OFS = "\t"

```

```

#RS = "%n"
#ORS = ""
SUBSEP =
CONVFMT = "%.15g"
OFMT = "%.15g"

#####
## Initialization ##
#####

# The Obs point is same with Tanaka et al.(2009)
# The Target point is the summit
ObsLon_SatsumaIwojima1      = 130.29316896961
ObsLat_SatsumaIwojima1      = 30.789579776618
ObsHeight_SatsumaIwojima1   = 95.0
TargetLon_SatsumaIwojima1   = 130.30526409905
TargetLat_SatsumaIwojima1   = 30.793010825642
TargetHeight_SatsumaIwojima1 = 703.0

# The Obs point is same with Tanaka et al.(2009)
# The Target point is the opposite side of the summit
ObsLon_SatsumaIwojima2      = ObsLon_SatsumaIwojima1
ObsLat_SatsumaIwojima2      = ObsLat_SatsumaIwojima1
ObsHeight_SatsumaIwojima2   = ObsHeight_SatsumaIwojima1
TargetLon_SatsumaIwojima2   = 130.284352
TargetLat_SatsumaIwojima2   = 30.787101
TargetHeight_SatsumaIwojima2 = 67.7

# The Obs & Target point is from Tanaka et al.(2007)
ObsLon_ShowaShinzan         = 140.85933576385
ObsLat_ShowaShinzan         = 42.541295905167
ObsHeight_ShowaShinzan      = 187.0
TargetLon_ShowaShinzan      = 140.86436296768
TargetLat_ShowaShinzan      = 42.542540366473
TargetHeight_ShowaShinzan   = 398.0

# The Obs point is UVO(Usu Volcano Observatory, Hokkaido University)
# The Target point is the summit of Usu
ObsLon_Usul                 = 140.842305
ObsLat_Usul                 = 42.559545
ObsHeight_Usul              = 140.0
TargetLon_Usul              = 140.839231
TargetLat_Usul              = 42.543999
TargetHeight_Usul           = 733.0

# The Obs point is Candidate 1. land of Ministry of Land, Infrastructure, Transport
and Tourism(JPN).
# The Target point is the Showa Crater
ObsLon_SakurajimaShowaCrater1 = 130.64896
ObsLat_SakurajimaShowaCrater1 = 31.55831
ObsHeight_SakurajimaShowaCrater1 = 173.0
TargetLon_SakurajimaShowaCrater1 = 130.664769
TargetLat_SakurajimaShowaCrater1 = 31.5791
TargetHeight_SakurajimaShowaCrater1 = 815.0

# The Obs point is Candidate 2. personal land.
# The Target point is the Showa Crater

```

```

ObsLon_SakurajimaShowaCrater2      = 130.64456
ObsLat_SakurajimaShowaCrater2      = 31.55449
ObsHeight_SakurajimaShowaCrater2   = 110.0
TargetLon_SakurajimaShowaCrater2   = TargetLon_SakurajimaShowaCrater1
TargetLat_SakurajimaShowaCrater2   = TargetLat_SakurajimaShowaCrater1
TargetHeight_SakurajimaShowaCrater2 = TargetHeight_SakurajimaShowaCrater1

# The Obs point is that we located muon hodoscope. land of Ministry of Land,
Infrastructure, Transport and Tourism(JPN).
# The Target point is the Showa Crater
# The distance between the Obs location and the Target location is 2.84 km, that is,
the Showa Crater locates at tan(elevation)=0.234 .
ObsLon_SakurajimaShowaCrater3      = 130.649862
ObsLat_SakurajimaShowaCrater3      = 31.556983
ObsHeight_SakurajimaShowaCrater3   = 151.0
TargetLon_SakurajimaShowaCrater3   = TargetLon_SakurajimaShowaCrater1
TargetLat_SakurajimaShowaCrater3   = TargetLat_SakurajimaShowaCrater1
TargetHeight_SakurajimaShowaCrater3 = TargetHeight_SakurajimaShowaCrater1

# The Obs point is ERI Kirishima Volcano Observatory
# The Target point is the Shinmoedake Crater
ObsLon_Shinmoedake1                = 130.839384
ObsLat_Shinmoedake1                = 31.947372
ObsHeight_Shinmoedake1             = 1198.0
TargetLon_Shinmoedake1             = 130.882865
TargetLat_Shinmoedake1             = 31.911997
TargetHeight_Shinmoedake1          = 1239.0

# The Obs point is Shinyu Onsen
# The Target point is the Shinmoedake Crater
ObsLon_Shinmoedake2                = 130.854552
ObsLat_Shinmoedake2                = 31.903017
ObsHeight_Shinmoedake2             = 905.7
TargetLon_Shinmoedake2             = TargetLon_Shinmoedake1
TargetLat_Shinmoedake2             = TargetLat_Shinmoedake1
TargetHeight_Shinmoedake2          = TargetHeight_Shinmoedake1

# The Obs point is Yunono Onsen
# The Target point is the Shinmoedake Crater
ObsLon_Shinmoedake3                = 130.860533
ObsLat_Shinmoedake3                = 31.89164
ObsHeight_Shinmoedake3             = 821.7
TargetLon_Shinmoedake3             = TargetLon_Shinmoedake1
TargetLat_Shinmoedake3             = TargetLat_Shinmoedake1
TargetHeight_Shinmoedake3          = TargetHeight_Shinmoedake1

# The Obs point is Iwasaki Hotel
# The Target point is the Shinmoedake Crater
# The distance between 2 points is about 4.6 km
ObsLon_Shinmoedake4                = 130.835948
ObsLat_Shinmoedake4                = 31.900867
ObsHeight_Shinmoedake4             = 761.7
TargetLon_Shinmoedake4             = TargetLon_Shinmoedake1
TargetLat_Shinmoedake4             = TargetLat_Shinmoedake1
TargetHeight_Shinmoedake4          = TargetHeight_Shinmoedake1

# The Obs point is Nishikawa Group Candidate 1
# The Target point is the Shinmoedake Crater

```

```

# The distance between 2 points is about 6.4-6.5 km
ObsLon_Shinmoedake5      = 130.816592
ObsLat_Shinmoedake5      = 31.899736
ObsHeight_Shinmoedake5   = 710.5
TargetLon_Shinmoedake5   = TargetLon_Shinmoedake1
TargetLat_Shinmoedake5   = TargetLat_Shinmoedake1
TargetHeight_Shinmoedake5 = TargetHeight_Shinmoedake1

# The Obs point is Hotel Kirishima Heights
# The Target point is the Shinmoedake Crater
# The distance between 2 points is about 5 km
ObsLon_Shinmoedake6      = 130.871354
ObsLat_Shinmoedake6      = 31.867722
ObsHeight_Shinmoedake6   = 626.8
TargetLon_Shinmoedake6   = TargetLon_Shinmoedake1
TargetLat_Shinmoedake6   = TargetLat_Shinmoedake1
TargetHeight_Shinmoedake6 = TargetHeight_Shinmoedake1

# The Obs point is parking area at Hotel Kirishima Heights
# The Target point is the Shinmoedake Crater
# The distance between 2 points is about 5 km
ObsLon_Shinmoedake7      = 130.872319
ObsLat_Shinmoedake7      = 31.868661
ObsHeight_Shinmoedake7   = 609.5
TargetLon_Shinmoedake7   = TargetLon_Shinmoedake1
TargetLat_Shinmoedake7   = TargetLat_Shinmoedake1
TargetHeight_Shinmoedake7 = TargetHeight_Shinmoedake1

# The Obs point is parking area at Hotel Kirishima Heights
# The Target point is the opposite side of the Shinmoedake Crater
# The distance between 2 points is about 5 km
ObsLon_Shinmoedake8      = 130.872319
ObsLat_Shinmoedake8      = 31.868661
ObsHeight_Shinmoedake8   = 609.5
TargetLon_Shinmoedake8   = 130.86425
TargetLat_Shinmoedake8   = 31.832581
TargetHeight_Shinmoedake8 = 466.4

# The Obs point is parking area at Hotel Kirishima Heights
# The Target point is the opposite side of the Shinmoedake Crater
# The distance between 2 points is about 5 km
ObsLon_Shinmoedake_Test   = 130.75
ObsLat_Shinmoedake_Test   = 31.833444444112
ObsHeight_Shinmoedake_Test = 609.5
TargetLon_Shinmoedake_Test = ""
TargetLat_Shinmoedake_Test = 31.833444444112
TargetHeight_Shinmoedake_Test = ""

# The Obs point is Sasougawa-Dam 01A
ObsLon_Sasougawa_01A      = 136.548203
ObsLat_Sasougawa_01A      = 35.842680
ObsHeight_Sasougawa_01A   = 535
TargetLon_Sasougawa_01A   = 136.55 # modifying is necessary
TargetLat_Sasougawa_01A   = ObsLat_Sasougawa_01A # modifying is necessary
TargetHeight_Sasougawa_01A = 534.4 # this value is not necessary. just for reference.

# The Obs point is parking area(?) of B&B Pension Hakone
# The Target point is the Kamiyama peak in Hakone

```

```

# The distance between 2 points is 2.53 km
ObsLon_Hakone1      = 139.045152
ObsLat_Hakone1      = 35.244568
ObsHeight_Hakone1   = 629.5
TargetLon_Hakone1   = 139.020846
TargetLat_Hakone1   = 35.233386
TargetHeight_Hakone1 = 1437.7

# The Obs point is parking area of Hakone Country Club
# The Target point is the Kamiyama peak in Hakone
# The distance between 2 points is 3.01 km
ObsLon_Hakone2      = 138.994871
ObsLat_Hakone2      = 35.251323
ObsHeight_Hakone2   = 702.6
TargetLon_Hakone2   = TargetLon_Hakone1
TargetLat_Hakone2   = TargetLat_Hakone1
TargetHeight_Hakone2 = TargetHeight_Hakone1

# The Obs point is the cross point of 1350-m-altitude contour and the 2-dot dash line
that locates at the west of Heisei-Shinzan
# The Target point is the peak of Heisei-Shinzan
ObsLon_Unzen1       = 130.295877
ObsLat_Unzen1       = 32.761998
ObsHeight_Unzen1    = 1350.0+20.0
TargetLon_Unzen1    = 130.298855
TargetLat_Unzen1    = 32.761245
TargetHeight_Unzen1 = 1483.0

# The Obs point is another point from bitmap image (3).jpg
# The Target point is the peak of Heisei-Shinzan
ObsLon_Unzen2       = 130.297626
ObsLat_Unzen2       = 32.759400
ObsHeight_Unzen2    = 1350.0+20.0
TargetLon_Unzen2    = 130.298855
TargetLat_Unzen2    = 32.761245
TargetHeight_Unzen2 = 1483.0

DEM_mode = "GSI-DEM" # "CRIEPI-DEM" or "GSI-DEM" or "DirectXY-DEM"
ZeroAzimuth_mode = "DISTANCE-MODE" # "DISTANCE-MODE" or "ANGULAR-MODE"
ZeroAzimuth_for_ANGULAR_mode = 45.0*PI/180.0 # in [rad]. 0 is East, PI/2 is North,
PI is West and (3/2)PI is South.
DetPlaneDist = 3050.0 # 1800.0 # 3050.0 # Plane distance in [mm]
DetPosiDivisionAzi = 3 # division number of azimuthal detector position resolution
DetPosiDivisionEle = 3 # division number of azimuthal detector position resolution
DetPosiResoAzi = 100.0/DetPosiDivisionAzi # 100.0/3 # Azimuthal position resolution
in [mm]
DetPosiResoEle = 100.0/DetPosiDivisionEle # 100.0/3 # Elevational position resolution
in [mm]
DetGridNumAzi = 15 + 1 # 8 # 15 + 1
DetGridNumEle = 15 + 1 # 8 # 15 + 1
DeltaAzi = DetPosiResoAzi/DetPlaneDist # 20.0/1000.0 #DetPosiResoAzi/DetPlaneDist #
5.0/1000.0 # Interval of azimuthal angle for length distribution. unit is [tan(rad)]
DeltaEle = DetPosiResoEle/DetPlaneDist # 20.0/1000.0 #DetPosiResoEle/DetPlaneDist #
5.0/1000.0 # Interval of elevational angle for length distribution. unit is [tan(rad)]
UnitPathLeng = 0.1 # in [m]

#####
## For "DEM_mode" using longitude and latitude ##

```

```

#####
ObsLon      = ObsLon_Shinmoedake_Test      # Longitude at observation station. Unit
is [deg]
ObsLat      = ObsLat_Shinmoedake_Test      # Latitude at observation station. Unit
is [deg]
ObsHeight   = ObsHeight_Shinmoedake_Test   # in [m]
TargetLon   = TargetLon_Shinmoedake_Test   # Longitude at target point. Unit is [deg]
TargetLat   = TargetLat_Shinmoedake_Test   # Latitude at target point. Unit is [deg]
TargetHeight = TargetHeight_Shinmoedake_Test # in [m]
#####
## For "DEM_mode" using Descartes X and Y ##
#####
if (DEM_mode == "DirectXY-DEM") {
  ObsX       = 0.0      # Longitudinal X at observation station. Unit is [m]
  ObsY       = 0.0      # Latitudinal Y at observation station. Unit is [m]
  ObsHeight   = ObsHeight_Shinmoedake_Test   # in [m]
  if (OBS_X != "") {ObsX = OBS_X}      # for ShellScript
  if (OBS_Y != "") {ObsY = OBS_Y}      # for ShellScript
  if (OBS_Z != "") {ObsHeight = OBS_Z} # for ShellScript
  TargetX     = 0.0     # Longitudinal X at target point. Unit is [m]
  TargetY     = 0.0     # Latitudinal Y at target point. Unit is [m]
  TargetHeight = 0.0    # in [m]
}
#####
## For Shinmoe-dake crater filling ##
#####
ShinmoedakeCraterFilling = "OFF" # "ON" or "OFF"
#####
## For Sakurajima Showa crater truncate or filling ##
#####
SakurajimaTruncateShowaCrater = "OFF" # "ON" or "OFF"
Sakurajima_B_CraterFilling = "OFF" # "ON" or "OFF"

if (DEM_mode == "DirectXY-DEM") {
  DistanceTargetX = TargetX - ObsX # unit is [m]
  DistanceTargetY = TargetY - ObsY # unit is [m]
  #print "DircetXY-DEM mode",DistanceTargetX,DistanceTargetY # check
} else {
  DistanceTargetX = (TargetLon -
ObsLon)*(2*PI*RadiusEarth*cos(TargetLat*PI/180.0)/360.0) # unit is [m]
  #DistanceTargetX = 0
  DistanceTargetY = (TargetLat - ObsLat)*(2*PI*RadiusEarth/360.0) # unit is [m]
}
#print DistanceTargetX,DistanceTargetY # check

if (ZeroAzimuth_mode == "DISTANCE-MODE") {
  if (DistanceTargetX != 0.0) {
    ZeroAzimuth = atan3(DistanceTargetY,DistanceTargetX) # zero azimuth angle in [rad]
  } else {
    #print "ZeroAzimuth pi/2 or pi*3/2" # check
    if (DistanceTargetY >= 0) { ZeroAzimuth = PI/2.0 } # zero azimuth angle in [rad]
    else
      { ZeroAzimuth = PI*3.0/2.0 } # zero azimuth angle in [rad]
  }
  #print ZeroAzimuth # check
} else if (ZeroAzimuth_mode == "ANGULAR-MODE") {
  ZeroAzimuth = ZeroAzimuth_for_ANGULAR_mode
} else {

```

```

    print "Set ZeroAzimuth_mode correctly. Choose DISTANCE-MODE or ANGULAR-MODE."
    exit
}

#azi_max = ceil( (DetPosiResoAzi*DetPosiDivisionAzi*(DetGridNumAzi+1)/DetPlaneDist)
/ DeltaAzi )
#azi_max = 7*DetPosiDivisionAzi + 2
azi_max = 100 # 9

#ele_max = ceil( (DetPosiResoEle*DetPosiDivisionEle*(DetGridNumEle+1)/DetPlaneDist)
/ DeltaEle )
#ele_max =
ceil( (TargetHeight-ObsHeight)/sqrt(DistanceTargetX**2+DistanceTargetY**2)/DeltaEle
) + 1
#ele_max = ceil( 1.000/DeltaEle )
#ele_max = 7*DetPosiDivisionEle + 2
ele_max = 100 # 21+6 #100

ele_min = 0 #21-6 #0
#ele_min = -ele_max

input_file_list = ""
for (i = 1; i < ARGV; i++) {
    input_file_list = input_file_list " ARGV[i]
}
total_input_records_num = 0
if (ARGV > 2) {
    system("wc -l " input_file_list " | grep 'total' | sed -e 's/ */' | cut -d ' ' -f
1 > 'tmp_total_input_records_num.dat'")
} else {
    system("wc -l " input_file_list " | sed -e 's/ */' | cut -d ' ' -f 1 >
'tmp_total_input_records_num.dat'")
}
getline total_input_records_num < "tmp_total_input_records_num.dat"
close("tmp_total_input_records_num.dat")
}

#####
## Process ##
#####
## $1:Longitude[deg] ##
## $2:Latitude[deg] ##
## $3:Height[m] ##
#####
{
    if (NR%1000 == 0)
{printf("%4.1f%%t%d%t%d%r",NR/total_input_records_num*100,NR,FNR)} # FILENAME

    if (DEM_mode == "CRIEPI-DEM") {
        GridSizeX = 1.0 # unit is [m]
        GridSizeY = 1.0 # unit is [m]
        DistanceX = ($3 - ObsLon)*(2*PI*RadiusEarth*cos(TargetLat*PI/180.0)/360.0) # unit
is [m]. using typical grid width at TargetLat.
        DistanceY = ($4 - ObsLat)*(2*PI*RadiusEarth/360.0) # unit is [m]
        EstimHeight = $5
    } else if (DEM_mode == "GSI-DEM") {
        GridSizeX = GridDeg*(2*PI*RadiusEarth*cos($2*PI/180.0)/360.0) # unit is [m]

```

```

GridSizeY = GridDeg*(2*PI*RadiusEarth/360.0) # unit is [m]
DistanceX = ($1 - ObsLon)*(2*PI*RadiusEarth*cos(TargetLat*PI/180.0)/360.0) # unit
is [m]. using typical grid width at TargetLat.
DistanceY = ($2 - ObsLat)*(2*PI*RadiusEarth/360.0) # unit is [m]
EstimHeight = $3
} else if (DEM_mode == "DirectXY-DEM") {
GridSizeX = 10.0 # unit is [m]
GridSizeY = 10.0 # unit is [m]
DistanceX = ($1 - ObsX) # unit is [m]. using typical grid width at TargetLat.
DistanceY = ($2 - ObsY) # unit is [m]
EstimHeight = $3
#print $1,$2,$3,ObsX,ObsY,ObsHeight,DistanceX,DistanceY,EstimHeight # check
} else {
print "Set DEM_mode correctly. Choose CRIEPI-DEM or GSI-DEM."
exit
}

if (EstimHeight > 0.0) {

for (azi = -azi_max; azi <= azi_max; azi++) {

azimuth_angle = ZeroAzimuth + atan3(-azi*DeltaAzi,1.0)

if (azimuth_angle < 0.0 || 2.0*PI <= azimuth_angle) {
azimuth_angle = azimuth_angle + 6.0*PI
azimuth_angle = azimuth_angle % (2.0*PI)
}

if (0.0 < azimuth_angle && azimuth_angle < PI/2.0) {
EstimStartX = DistanceX - GridSizeX/2.0
EstimStartY = EstimStartX * tan(azimuth_angle)
if (EstimStartY < DistanceY - GridSizeY/2.0 || DistanceY + GridSizeY/2.0 <
EstimStartY) {
EstimStartY = DistanceY - GridSizeY/2.0
EstimStartX = EstimStartY * tan(PI/2.0 - azimuth_angle) # tan(PI/2.0 -
azimuth_angle) > 0.0.
}
} else if (PI/2.0 < azimuth_angle && azimuth_angle < PI) {
EstimStartX = DistanceX + GridSizeX/2.0
EstimStartY = EstimStartX * tan(azimuth_angle)
if (EstimStartY < DistanceY - GridSizeY/2.0 || DistanceY + GridSizeY/2.0 <
EstimStartY) {
EstimStartY = DistanceY - GridSizeY/2.0
EstimStartX = EstimStartY * (-tan(azimuth_angle - PI/2.0)) # tan(azimuth_angle
- PI/2.0) > 0.0
}
} else if (PI < azimuth_angle && azimuth_angle < PI*3.0/2.0) {
EstimStartX = DistanceX + GridSizeX/2.0
EstimStartY = EstimStartX * tan(azimuth_angle)
if (EstimStartY < DistanceY - GridSizeY/2.0 || DistanceY + GridSizeY/2.0 <
EstimStartY) {
EstimStartY = DistanceY + GridSizeY/2.0
EstimStartX = EstimStartY * tan(PI*3.0/2.0 - azimuth_angle) # tan(PI*3.0/2.0
- azimuth_angle) > 0.0
}
} else if (PI*3.0/2.0 < azimuth_angle && azimuth_angle < 2.0*PI) {
EstimStartX = DistanceX - GridSizeX/2.0
EstimStartY = EstimStartX * tan(azimuth_angle)

```

```

        if (EstimStartY < DistanceY - GridSizeY/2.0 || DistanceY + GridSizeY/2.0 <
EstimStartY) {
            EstimStartY = DistanceY + GridSizeY/2.0
            EstimStartX = EstimStartY * (-tan(azimuth_angle - PI*3.0/2.0)) #
tan(azimuth_angle - PI/2.0) > 0.0
        }
        } else if (azimuth_angle == 0.0) {
            EstimStartX = DistanceX - GridSizeX/2.0
            EstimStartY = 0.0
        } else if (azimuth_angle == PI) {
            EstimStartX = DistanceX + GridSizeX/2.0
            EstimStartY = 0.0
        } else if (azimuth_angle == PI/2.0) {
            EstimStartX = 0.0
            EstimStartY = DistanceY - GridSizeY/2.0
        } else if (azimuth_angle == PI*3.0/2.0) {
            EstimStartX = 0.0
            EstimStartY = DistanceY + GridSizeY/2.0
        } else {
            print "azimuth_angle(",azimuth_angle,) was not between from 0 to 2PI, then
program exit"
            exit
        }

        if (DistanceX - GridSizeX/2.0 - abs(DistanceX - GridSizeX/2.0)*1.0e-13 <=
EstimStartX && EstimStartX <= DistanceX + GridSizeX/2.0 + abs(DistanceX +
GridSizeX/2.0)*1.0e-13 &&
            DistanceY - GridSizeY/2.0 - abs(DistanceY - GridSizeY/2.0)*1.0e-13 <=
EstimStartY && EstimStartY <= DistanceY + GridSizeY/2.0 + abs(DistanceY +
GridSizeY/2.0)*1.0e-13 )
        {
            for (ele = ele_min; ele <= ele_max; ele++) {

                if (Path[azi,ele] == "") {
                    Path[azi,ele] = 0.0 # initialization
                }

                if (NAGAHARA_MODE == "ON" && ele < 0) { # For NAGAHARA-kun
                    #print "NAGAHARA MODE", ele # check
                    continue
                }

                EstimStartX_loop = EstimStartX
                EstimStartY_loop = EstimStartY
                if (ele == 0) {
                    EstimStartZ_loop = ObsHeight
                } else if (azi == 0 && (ZeroAzimuth == PI/2.0 || ZeroAzimuth == PI*3.0/2.0))
{
                    EstimStartZ_loop = ObsHeight + abs(DistanceY) * (ele*DeltaEle)
                } else {
                    EstimStartZ_loop = ObsHeight + sqrt(EstimStartX**2.0 + EstimStartY**2.0) *
cos(atan3(-azi*DeltaAzi,1.0))*(ele*DeltaEle)
                }

                if (EstimStartZ_loop > EstimHeight) { # if the paths are higher than EstimHeight,
break this "ele" loop

                    break
                }
            }
        }

```

```

    }

    # new 3 unit vector#
    UnitVectorX = UnitPathLeng *
cos( atan3(cos(atan3(-azi*DeltaAzi,1.0))*(ele*DeltaEle), 1.0) ) * cos(azimuth_angle)
    UnitVectorY = UnitPathLeng *
cos( atan3(cos(atan3(-azi*DeltaAzi,1.0))*(ele*DeltaEle), 1.0) ) * sin(azimuth_angle)
    UnitVectorZ = UnitPathLeng *
sin( atan3(cos(atan3(-azi*DeltaAzi,1.0))*(ele*DeltaEle), 1.0) )

    while ( ( (DistanceX - GridSizeX/2.0 <= EstimStartX_loop          &&
EstimStartX_loop          <= DistanceX + GridSizeX/2.0) ||
    (DistanceX - GridSizeX/2.0 <= EstimStartX_loop + UnitVectorX &&
EstimStartX_loop + UnitVectorX <= DistanceX + GridSizeX/2.0) ) &&
    ( (DistanceY - GridSizeY/2.0 <= EstimStartY_loop          &&
EstimStartY_loop          <= DistanceY + GridSizeY/2.0) ||
    (DistanceY - GridSizeY/2.0 <= EstimStartY_loop + UnitVectorY &&
EstimStartY_loop + UnitVectorY <= DistanceY + GridSizeY/2.0) ) &&
    ( (ObsHeight <= EstimStartZ_loop          && EstimStartZ_loop
<= EstimHeight) ||
    (ObsHeight <= EstimStartZ_loop + UnitVectorZ && EstimStartZ_loop +
UnitVectorZ <= EstimHeight) ) ) # && -PI/2.0 < atan3(DistanceY,DistanceX) - ZeroAzimuth
&& atan3(DistanceY,DistanceX) - ZeroAzimuth < PI/2.0 )# check
    {
        Path[azi,ele] += UnitPathLeng
        EstimStartX_loop += UnitVectorX
        EstimStartY_loop += UnitVectorY
        EstimStartZ_loop += UnitVectorZ
    }
}

}

}

}

}

}

#####
## At the end of program, this method is computed. ##
#####
END{

    #printf("#1000*tan(elevation[rad])%1000*tan(azimuth[rad])%n ") > OutFilename
    printf("%d,",2*azi_max+1) > OutFilename

    for (azi = -azi_max; azi <= azi_max; azi++) {

        if (azi < azi_max) {
            printf("%g",azi*DeltaAzi*1000.0) > OutFilename
        } else {
            printf("%g",azi*DeltaAzi*1000.0) > OutFilename
        }
    }

    printf("%n") > OutFilename

```

```

for (ele = ele_max; ele >= ele_min; ele--) {
    for (azi = -azi_max; azi <= azi_max; azi++) {

        if (azi == -azi_max) {
            printf("%g,",ele*DeltaAzi*1000.0) > OutFilename
            printf("%g,",Path[azi,ele]) > OutFilename
        } else if (-azi_max < azi && azi < azi_max) {
            printf("%g,",Path[azi,ele]) > OutFilename
        } else {
            printf("%g",Path[azi,ele]) > OutFilename
        }

    }
    printf("%n") > OutFilename
}
}

```

