

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102  
研究種目：若手研究  
研究期間：2018～2019  
課題番号：18K13619  
研究課題名（和文）ストリップ型シリコン検出器と超伝導磁石を用いたミュオンラジオグラフィーの新展開

研究課題名（英文）Development of silicon strip detector and superconducting magnet for Muon radiography

研究代表者  
音野 瑛俊（Otono, Hidetoshi）  
九州大学・先端素粒子物理研究センター・助教

研究者番号：20648034  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオンは素粒子標準模型における第2世代の荷電レプトンであり、電子の約200倍の質量を持つ。物質に対する高い透過力を利用し、宇宙から飛来する宇宙線と大気の相互作用で生成したミュオンを利用した構造物の透視（ミュオンラジオグラフィー）が発展してきた。本研究はストリップ型シリコン検出器を可搬型の超伝導磁石と組み合わせ、ミュオンの運動量情報を利用してミュオンラジオグラフィーの背景事象の除去や角度分解能の向上することを提案した。そしてストリップ型シリコン検出器を用いた飛跡検出器を作成し、安定した運転に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
シリコン検出器や超伝導磁石は構造の複雑さなどのために、これまでミュオンラジオグラフィーへの積極的な利用は検討されてこなかった。そこで素粒子実験分野でのこれまでの経験を生かし、既に開発されたシリコン検出器や超伝導磁石のスペアを駆使することで、ミュオンラジオグラフィーに新たな展開を提示した。本研究ではシリコン検出器の支持構造、冷却、電源、制御、データ取得システムを新たに開発した。今後の発展の基礎となる研究といえる。

研究成果の概要（英文）：The muon is the second generation of charged leptons, which is about 200 times heavier than the electron. Since the muons are highly penetrative, muon radiography has been developed by use of muons created in the earth's atmosphere as a result of the interaction of primary cosmic-rays. This research aimed to develop silicon-strip detectors operated inside transportable superconducting magnets, which would reject background events and improve angular resolution for the muon radiography. During this research period, a silicon-strip detector with a size of 24 cm square was successfully developed and commissioned.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ミュオンラジオグラフィー ストリップ型シリコン検出器

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の一つであるミュオンは物質との相互作用が小さいため、非常に高い透過力を持つ。そこで宇宙から飛来する宇宙線と大気の相互作用で生成したミュオンを利用した構造物の透視(ミュオンラジオグラフィー)が発展してきた。測定対象は火山、氷河、鉱山、洞窟などからピラミッドなどの人工物まで多岐にわたり、測定手法も写真乾板、ガス検出器、シンチレーション検出器などと対象物に応じた開発が進められている [K. Morishima, *et al.* *Nature* volume 552, 386-390 (2017)など]。近年になって火山のミュオンラジオグラフィーにおいて指摘されている課題は、透過ミュオンに対する背景事象の見積もりが密度分布に与える大きな不定性である [D. Carbone, *et al.*, *Geophys. J. Int.*, **196**, 633-643 (2014)など]。数 GeV から 1 TeV 程度の運動量を持つ透過ミュオンに対して、シミュレーションから示唆された主な背景事象は、宇宙線が火山や大気と相互作用して生成した 1 GeV 以下の陽子などであると考えられている。これらは図 1 のエネルギースペクトルにおいて点線で示されているが、実験的検証に至っていなかった。

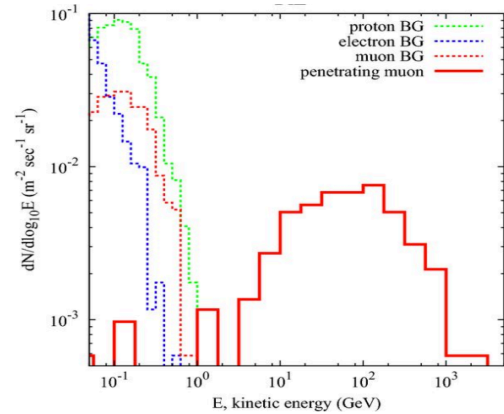


図 1：透過ミュオンと背景事象のエネルギースペクトル [R. Nishiyama, *et al.*, *Geophys. J. Int.*, 206, 1039-1050 (2016)]

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ミュオンの運動量および電荷測定によって、ミュオンラジオグラフィーの密度の精度と正確度を向上できる手法を確立することにある。ミュオンが岩石などを通過する際に散乱する平均角度は運動量と反比例の関係にある。運動量測定に基づいて低運動量のミュオンを除去することで、ミュオンラジオグラフィーの角度分解能の改善も実現する。運動量の測定には磁場を導入する。右図は磁場中をミュオンが 50 cm 通過する際に曲がる距離を示す。図 2 に示すように 100 GeV のミュオンは 1 テスラの磁場中においても 50 cm で 400  $\mu\text{m}$  しか曲がらない。すなわち十分な磁場と位置分解能を持つ検出器が必要となる。

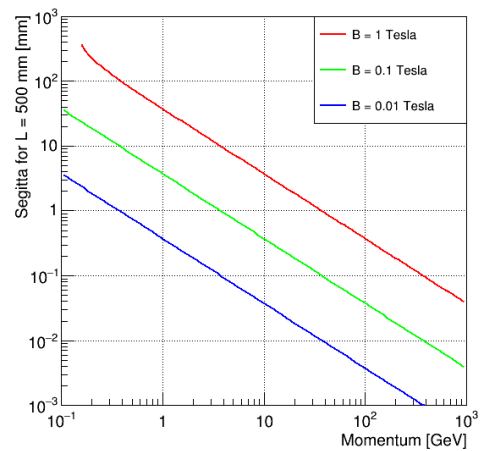


図 2：磁場中をミュオンが 50 cm 通過する際に曲がる距離

本研究は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が開発したが未使用のまま 10 年以上保管していた 0.9 テスラのソレノイド型超伝導磁石 (直径 85cm、奥行き 1m) [Y. Makida *et al.* (1995), *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol 5, 2, 658-661] に着目した。宇宙線中の反物質を探索する BESS 気球実験の予備機のため、屋外での使用を前提とした設計となっている。また、欧州原子核研究機構 (CERN) において Higgs 粒子の発見に成功した ATLAS 実験のストリップ型シリコン検出器 (SCT) のスペアモジュールを活用する。保管期間はこちらも 10 年以上である。SCT モジュールは 6 cm x 12 cm に 80  $\mu\text{m}$  幅のストリップを長手方向に持つシリコンウェハーを 40 mrad の角度で裏表に張り合わせた構造を持ち、計 1536 本のストリップを持つ。本研究では SCT モジュールを用いた飛跡検出器を構築する。

### 3. 研究の方法

SCT モジュールの支持構造、冷却、電源、制御、データ取得システムは新たに開発する必要がある。ATLAS 実験が開発したシステムは ATLAS 実験の動作環境に特化したものであり、ミュオンラジオグラフィへの応用は難しい。そこで、SCT モジュールを用いた飛跡検出器は、CERN において未知粒子の探索や高エネルギーニュートリノの測定を目指す FASER 実験へも応用できることに着目した。FASER 実験との共同研究を開始することにより、ミュオンラジオグラフィのための飛跡検出器をいち早く実現することを目指した。そして8つの SCT モジュールからなる 24cm 四方の有感面積を持つデザインを選択し、10 名を超える研究者らと分担してハードウェア及びソフトウェアの開発を進めた。私は開発責任者を務めている。

本研究では KEK の田窪洋介氏の協力を得て4種の電子回路を作成した。SCT モジュールを繋げるフレキシブルケーブル、そして4つのフレキシブルケーブルの電気回路を電源、制御、データ取得システムに分配するプリント基板（パッチパネル）を開発した。電源システムも担当し、シリコンの空乏化に用いる高電圧用のプリント基板と SCT モジュール上の集積回路の保護に用いるプリント基板も開発した。さらに CERN において実験室を整備し、支持構造、冷却、制御、データ取得システムとの統合試験を進めた。

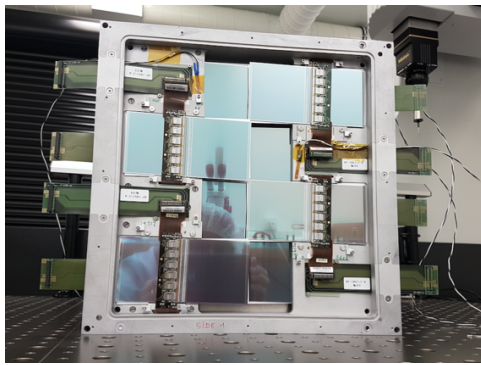


図 3：本研究で開発した飛跡検出器。支持構造に 8 つの SCT モジュールを収め 24cm x 24cm の面積を持つ。フレキシブルケーブルは SCT モジュールとパッチパネルを接続する。

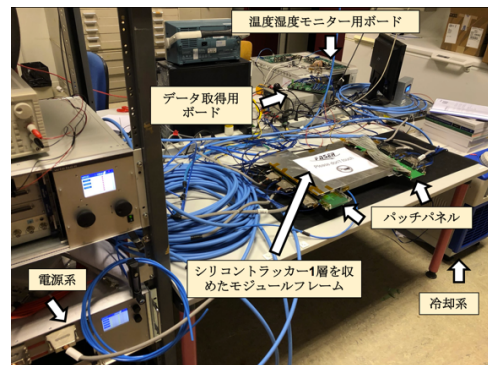


図 4：CERN での統合試験の様子。1つのパッチパネルは4つの SCT モジュールを、電源、制御、データ取得システムに接続する。

### 4. 研究成果

ATLAS 実験が保管していた約 200 個の SCT モジュールの全数検査を実施した。田窪氏が測定システムを整備し、ケンブリッジ大学の F. Keizer と S. Wotton が開発した読み出しシステム [F. Keizer et al 2018 JINST 13 P10028] を使用している。シリコンに印加する高電圧に対する電流測定、ノイズ、集積回路内に実装されたアンプの増倍率を評価した。10 年以上の保管にも関わらず、ほぼ全てのモジュールについて 99.5%以上のストリップが健全に動作していることを確認した。本研究の今後の展開においても重要な結果である。

そして8つの SCT モジュールを支持構造に収めた飛跡検出器を製作し、安定した動作に成功した。SCT モジュールの設置位置は 3 次元測定器を用いて 10  $\mu\text{m}$  を切る精度で決定した。冷却系の性能は有限要素法を用いた 3 次元計算との良い一致を確認している。温度の異常を検知して電源にインターロックをかける安全機構も整備した。制御系を操作する GUI の準備や、デー

タ取得のタイミングや閾値のストリップごとの調整の自動化などソフトウェアの開発も順調に進んでいる。図5は1つのSCTモジュールについて、ノイズと増倍率の測定結果をストリップごとに片面ずつ示し、また全体の分布を示した。ノイズは1500等価雑音電荷(ENC)、像倍率は55 mV/fCを平均として取り、2006年に出版された測定結果[Nucl.Instrum.Meth.A 568 (2006) 642-671のFig25]を再現していることがわかる。

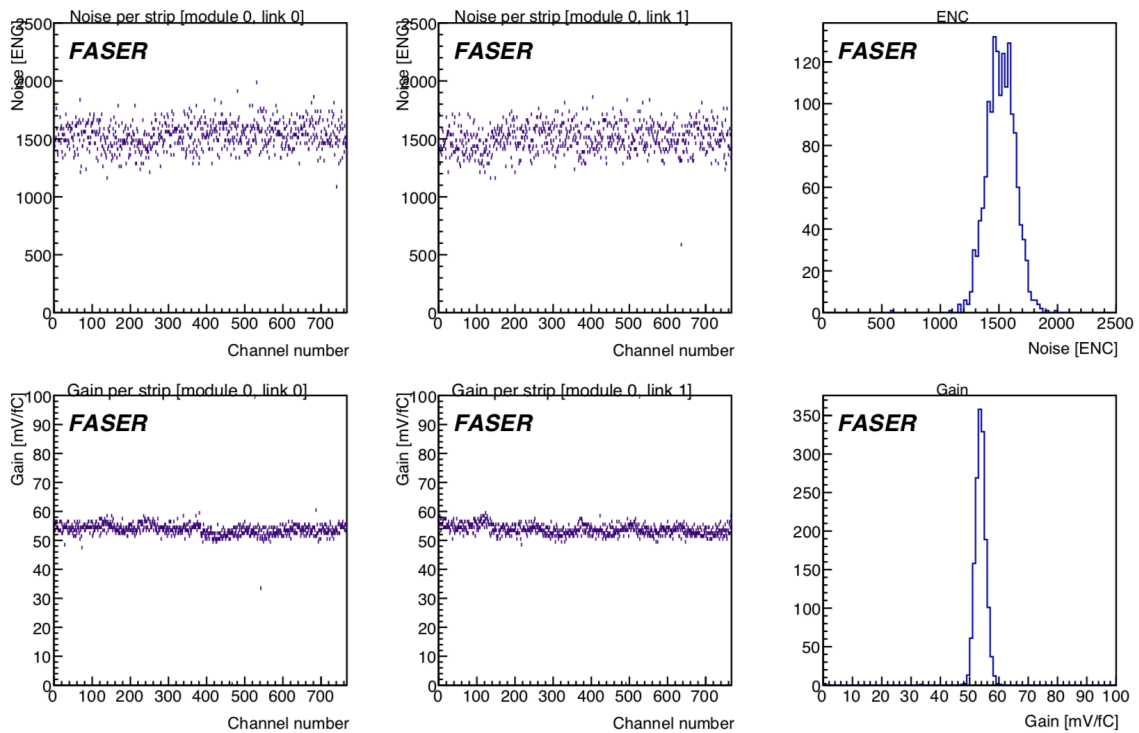


図5：本研究で開発した飛跡検出器についてノイズ及び集積回路内に実装されたアンプの像倍率の測定結果。1モジュールは片面768ストリップの6cm x 12cmのシリコン検出器を2枚貼り合わせた構造を持つ。典型的な1モジュールの測定結果を示した。

本研究で製作した4種の電子回路は、図3で示した飛跡検出器について10層分の量産が完了している。COVID-19のために支持構造の量産が遅れているが、製作が進み次第、図4のセットアップを用いて試運転を進める。そして複数台の飛跡検出器を同時運転することで粒子の飛跡を再構成し、FASER実験のために製作した永久磁石を用いることで宇宙線ミュオンの運動量測定を実現する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 音野瑛俊
2. 発表標題 FASER実験における新粒子探索：2020年のインストールに向けた準備状況
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田窪洋介
2. 発表標題 FASER 実験における新粒子探索 インストール直前の準備状況
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田窪 洋介  (Takubo Yosuke)  (50423124)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師    (82118)	