

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14315

研究課題名(和文)宇宙線ミュオンを用いた非破壊検査装置の開発

研究課題名(英文)Development of non-destructive inspection device using cosmic-ray muon

研究代表者

武内 陽子 (Takeuchi, Yoko)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発本部開発第一部電気電子技術グループ・研究員

研究者番号：40780987

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、宇宙線ミュオンで建物等の大規模構造物内部を非破壊検査する技術に注目し、我々が開発した絶縁層にセラミックを用いたガス電子増幅フォイル(セラミック製GEM)を搭載した小型ミュオン非破壊検査装置のプロトタイプ機の開発を目指した。まず検出器が長期運用に耐えられる様、一番の故障要因であったセラミック製GEMの放電対策を行った。改良を重ねた結果、試作品サイズで放電数を従来の10分の1以下に抑えることに成功し、実用サイズに大型化しても同様の性能を達成した。次にこのセラミック製GEM改良品を用いたミュオン非破壊検査装置のプロトタイプ機を設計・製作し、基礎評価に問題ないことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型で安定した長期運用が可能な宇宙線ミュオン非破壊検査装置が完成すれば、設置場所の範囲が広がり、さまざまな大規模構造物の非破壊調査を行うことができると予想される。その目標の第一歩として、セラミック製GEMの放電対策を施した実用サイズの製作に成功したことで、装置としての信頼性が向上し、上記目標に近づいた。また、本研究で開発した改良セラミック製GEMは従来の有機フィルム絶縁層GEMと比べ、放電による絶縁破壊がしにくい特徴がある。こうした特徴から、原子核ビーム実験などの他分野で実際に使用され始め、他分野への波及的効果が大いに見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Cosmic-ray muon radiography is a non-destructive inspection for large scale structures (e.g. pyramid scan and underground exploration). We have developed cosmic-ray muon detector using gas electron multiplier (GEM) with ceramic layer (ceramic-GEM) for muon radiography. In this study, we improved the ceramic-GEM anti-discharge characteristics, and then, built the muon detector combined with new ceramic-GEM. As a result, We obtained the following achievements; (1) new manufacturing process of new ceramic-GEM with discharge tolerance than that of the previous GEM, (2) production of large size of new ceramic-GEM, (3) demonstration of performance of prototype detector mounted new ceramic-GEM.

研究分野：素粒子宇宙物理学

キーワード：宇宙線 非破壊検査 ガス放射線検出器 ミュオン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙ミュオンは、高エネルギー陽子などの宇宙線が地球大気に衝突すると大量に生成され、地上に 1 cm^{-2} あたり毎分 1 カウントの頻度で降り注ぐ。この宇宙線ミュオンの透過率を利用して、宇宙線ミュオンラジオグラフィという対象物内部をレントゲン写真のように非破壊で観測できる方法が確立しつつある。近年では、宇宙線ミュオンラジオグラフィによる火山内部の構造調査や、ピラミッド等の遺跡調査、原子炉等の建物内部の調査が世界中で行われている。今後、宇宙線ミュオンラジオグラフィによって様々な方向から火山や建物などの詳細な内部構造を効率よく得られれば、噴火予想や考古学の発展だけでなく、建物の点検効率の向上にも期待できる。

上記の測定には、高度な測定技術が必要不可欠である。私はガス電子増幅フォイル(GEM)を用いた飛跡取得方法に着目した。図 1(a)にその検出器の概要を示す。GEM は図 1(b)のような構造をしており、表裏の電極間に高電場を印加することで、穴一つ一つが比例計数管の様に電子増幅を行うことができる。GEM はミュオンと検出器内部の封入ガスとの相互作用で飛跡上に発生した微小な電子雲を飛跡情報を保ったまま電子を最高数万倍まで増幅する。また、信号読み出しができるほどに増幅した電子を最高 $100 \mu\text{m}$ ピッチ程度の信号読み出し用のピクセルと、電子が各ピクセルに到達する時間差情報を観測することで高分解能の 3 次元飛跡を得られる。さらにターゲットがガスであるため装置は安価で軽量化が可能になるなどの利点が挙げられる。この方法が立証できれば、ミュオンの飛来方向を高精度で捉え、かつリアルタイム観測ができる小型の観測装置が開発でき、宇宙線ミュオンラジオグラフィの更なる高度化・実用化に期待ができる。

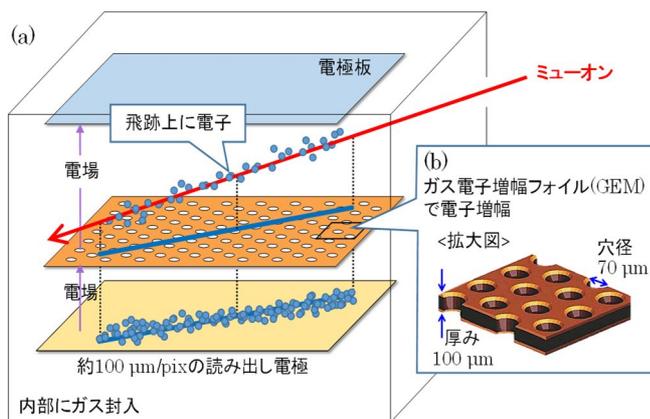


図 1 (a) GEM を用いたミュオン検出器の概要図
(b) GEM の拡大図

2. 研究の目的

本研究では、上記で提案した GEM を用いたミュオン非破壊検査装置の製作・開発を行う。特に、この装置の心臓部である GEM は長時間の測定に耐えられる様、放電などによる故障のリスクが低く、かつ安定した動作が求められる。したがって、放電等で破壊しにくい GEM の開発も行う。

3. 研究の方法

(1) 放電で破壊しない GEM の開発

GEM が破壊されるのは、主に GEM 両極間の高電場によって両電極に挟まれているポリマー等の有機物の絶縁体が炭化し、導通することが原因である。そこで、我々は絶縁層に無機物のセラミックを用いたセラミック製 GEM を開発中である。研究開始当初、セラミック製 GEM は放電が起きても炭化せず故障しにくい、連続放電が発生しやすく測定への悪影響を及ぼす問題点を抱えていた。そこで、本研究ではセラミック製 GEM の放電の原因となる箇所を特定し、放電が起こりにくいセラミック製 GEM の開発を目指すため、以下のことを行う。まず、放電原因を突き止めるため、顕微鏡観察や成分分析などを行い、原因箇所を特定する。また、その原因解決に有効な製作プロセスをいくつか提案し、1 cm 角サイズの改良プロセス品を試作する。試作品の動作確認のために、放射線源(鉄 55 線源)を用いて電子増幅率の測定や長期安定性などの測定を行う。提案した中から一番有効な製作プロセスで、実用サイズ(10 cm 角)品を製作する。実用サイズの加工精度についても膜厚測定器や光学顕微鏡を用いて調査および検証をする。

(2) セラミック製 GEM を用いたミュオン非破壊検査装置のプロトタイプ機の設計・製作

上記(1)で述べた改良セラミック製 GEM を組み込んだ小型ミュオン検出器のプロトタイプ機の装置設計および製作をする。GEM の電子増幅率などの基礎性能の調査および電子飛跡取得の両方が行える様、装置の各パーツを必要に応じて入れ替え可能な物を製作する。そしてそれらを用いて、放射線源(鉄 55 線源)由来の信号検出や宇宙線ミュオンの飛跡取得などをはじめとした性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) 放電で破壊しない GEM の開発

(1-) 放電箇所の原因調査

光学顕微鏡観察からセラミック製 GEM 表面の金電極の厚みにムラがあり、ところどころセラミック表面が露出していた。また、SEM による観察で孔内部にポンチ孔加工の際に発生した金電極の小さなゴミが多量に付着していることがわかった(図 2)。こうした孔内部の微小な浮

遊電極や電極面の不均一電界が放電の原因となっていると推定した。

(1 -) 製造プロセスの改良および試作

原因箇所を踏まえ、いくつか製造プロセスの見直しを行った。数種類のプロセスを試した結果、一番良いプロセス方法は、エッチングとめっき処理を組み合わせた方法であった。具体的にはセラミック製 GEM の製造工程の最後に行う金エッチング時間を延ばして孔内部の金属ゴミを除去した。しかし、このままでは、金エッチングによって電極部が薄くなり、部分的に絶縁不良を起こすことが考えられた。そこで最終工程に金めっき処理を追加し、金電極の厚みを従来と同等もしくはそれ以上に増加した。図 2 の改良品画像の様に SEM 観測で、ほぼすべての孔から金属ゴミの存在が見られなくなり、電極表面の金の減少も回避できた。その結果、電圧印加する際に、表面電極内での絶縁不良を阻止することができた。

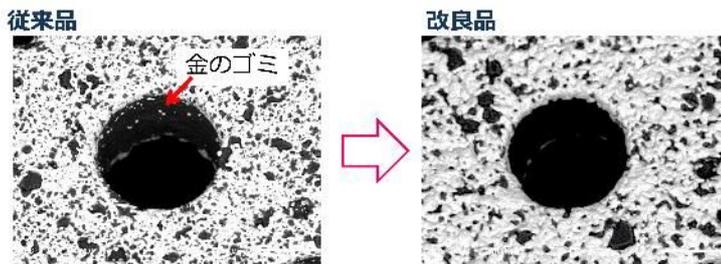


図 2 斜め方向からみた GEM 孔内部の SEM 画像

(1 -) 改良版セラミック製 GEM の性能評価

改良セラミック製 GEM の動作確認をするため、試作品を ArCO₂ ガスフローチェンバーに搭載し、鉄 55 線源から発生する X 線(5.9 keV)を用いて電子増幅率の挙動を確認した。測定の結果、電子増幅率は改良前のセラミック製 GEM(従来品)と同性能であることがわかった(図 3)。また、電子増幅率測定中に発生した放電数は 660 V 以下では従来品の 1/10 以下になった(図 4)。この結果を受け、試作品サイズの 1 cm 角から実用サイズの 10 cm 角セラミック製 GEM を製作した。これも上記結果と同様の性能を確認し、使用に耐えられるレベルであることがわかった。製作サイズが大きくなると、孔形状や絶縁体の厚みの不均一性が電子増幅率の場所依存性を生む。よって、実用サイズの GEM の加工精度(絶縁体の厚み、孔径・孔ピッチ)を測定した。設計値に対して、孔径と孔ピッチは 2% 以内、厚みに関しては 10% のズレが確認された。厚みの測定値は場所依存性があるため、この改良は今後の課題である。これら成果は、国際学会などの口頭発表で精力的に報告・議論を行った事で、セラミック製 GEM の利点が認められ、国外を含む多くの研究機関で用いられ始めた。また、μ-PIC などの他デバイスにセラミックが用いられるきっかけにもなった。

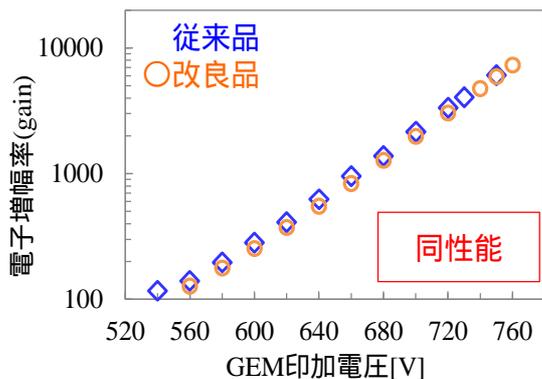


図 3 電子増幅率の比較

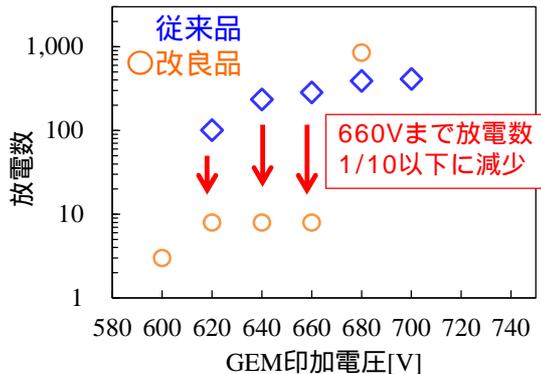


図 4 発生放電数の比較

(2) セラミック製 GEM を用いたミュオン検出器のプロトタイプ機的设计・製作・評価

プロトタイプ機は実用サイズ 10 cm 角 GEM が入り、さまざまな試験に対応できるように汎用性を持たせるため、パーツの入れ替えができるように設計および製作を行った。パーツを組み立てて、問題なくきちんと取り付けられること、およびガス漏れがないことを確認した。また、セラミック製 GEM を実際に搭載して動作確認ができるかを行い、GEM 印加電圧 700 V でも放電でセラミック製 GEM が壊れることもなく、放射線源(鉄 55 線源)の信号を検出した。本研究の研究期間において、プロトタイプ機は構造物の非破壊撮像までは至らなかったが、セラミック製 GEM の特性や有益な知見を得ることができた。今後、今回至らなかった宇宙線ミュオンを用いた非破壊撮像を達成すべく、宇宙線ミュオン検出のためにより感度を合わせた検出器の内部パラメータの調整等を行い、目標達成ができるよう研究を邁進していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KOMIYA Kazuki, TAKEUCHI Yoko, WAKABAYASHI Masaki, FUJIWARA Kohei, KONO Shigekatsu, HAMAGAKI Hideki, TAMAGAWA Toru	4. 巻 84
2. 論文標題 Development of Gas Electron Multiplier by Applying Technique of Low Temperature Co-Fired Ceramics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 936 ~ 940
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2493/jjspe.84.936	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoko Takeuchi, Kazuki Komiya, Toru Tamagawa, Yuanhui Zhou
2. 発表標題 Development and properties of 100um-square size LTCC-GEM
3. 学会等名 6th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, MPGD19（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoko Takeuchi, Kazuki Komiya, Toru Tamagawa
2. 発表標題 Development and properties of ceramic GEM for muography
3. 学会等名 Muographers2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小宮一毅, 武内陽子, 宇野彰二
2. 発表標題 LTCC-GEMを用いた中性子イメージング
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武内陽子, 小宮一毅, 玉川徹, 周圓輝, 加藤幸弘
2. 発表標題 LTCC-GEMの加工精度の測定
3. 学会等名 第15回Micro Pattern Gas Detector研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小宮一毅, 武内陽子, 宇野彰二, 小池貴久
2. 発表標題 LTCC-GEMの中性子検出器への応用
3. 学会等名 第15回Micro Pattern Gas Detector研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 説田暉, 越智敦彦, 石飛由介, 小宮一毅, 武内陽子
2. 発表標題 LTCC μ -PICの開発に向けた性能シミュレーション
3. 学会等名 第15回Micro Pattern Gas Detector研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武内陽子, 小宮一毅, 玉川徹, 周圓輝, 加藤幸弘
2. 発表標題 LTCC-GEMの加工精度の評価
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 説田暉, 越智敦彦, 石飛由介, 小宮一毅, 武内陽子
2. 発表標題 LTCC μ -PICの開発に向けた研究
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoko Takeuchi, Kazuki Komiya, Toru Tamagawa and Yuanhui Zhou
2. 発表標題 Development and properties of 100 mm-square size LTCC-GEM
3. 学会等名 6th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武内陽子、小宮一毅、玉川徹
2. 発表標題 放電抑制を向上させたLTCC-GEMの開発
3. 学会等名 第14回Micro Pattern Gas Detector研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武内陽子、小宮一毅、玉川徹
2. 発表標題 放電抑制を目指したLTCC-GEMの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----