

令和元年6月5日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02094

研究課題名（和文）荷電レプトンフレーバー非保存探索実験の革新的検出器開発による新展開

研究課題名（英文）New development of an experiment searching for charged lepton flavor violation with innovative detector R&D

研究代表者

川越 清以（KAWAGOE, KIYOTOMO）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：40183785

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 28,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設（J-PARC）において、世界最高強度のパルスミュオンビームと革新的な検出器を用いたCOMET実験によってミュオン-電子転換過程を探し、素粒子の標準模型を超える物理を発見することである。予算的な施設建設の遅れにより、COMET実験そのものは実験遂行に至らなかったが、本研究の大きな課題である革新的検出器の開発で十分な成果が得られた。すなわち、測定器の中核をなすストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータの開発は、ビームテスト実験による性能評価も含めて完了し、トリガースステムの開発も進展した。実機製作に向けた準備は整った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグス粒子の発見によって素粒子の標準模型は完成し、標準模型を超える物理の発見が素粒子物理の最大の課題となっている。LHCでそのような新現象が発見されない現状において、大強度ミュオンビームを用いた荷電レプトンフレーバー非保存過程の探索が標準模型を超える物理をの探索方法として有力視され、世界的な競争になっている。本研究の成果は、日本のJ-PARCで行うCOMET実験第二期計画で最高の探索性能を出すために必須の測定器開発であり、この成果によって、この分野で日本が世界のトップに立つことが可能になった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to search for muon-electron conversion process by the COMET experiment using the world's highest intensity pulsed muon beam and innovative detector at the High Intensity Proton Accelerator Facility (J-PARC) in Tokai to discover physics beyond the standard model of elementary particles. Due to the delay of the facility construction due to a budget problem, the COMET experiment itself has not started its operation yet, but sufficient results have been obtained in the development of the innovative detector, which is a major issue in this research. The development of the straw tube tracking detector and the electromagnetic calorimeter, which are the core of the experiment, was completed including the performance evaluation by the beam test experiment, and the development of the trigger system also progressed. The preparation for the detector production is ready.

研究分野：素粒子実験

キーワード：COMET実験 ミュオン電子転換過程 J-PARC カロリメータ ストローチューブ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学における近年の大きな進展は、欧州合同原子核研究機構(CERN)のLHC加速器におけるATLAS実験とCMS実験が2012年にヒッグス粒子を発見したことである。ヒッグス粒子の発見により、素粒子の標準模型(SM: the Standard Model)は完成した。素粒子物理学は新たな局面に突入し、現在の最重要課題は標準模型を超える物理(BSM: Beyond the Standard Model)の発見である。しかし、LHC加速器の実験でBSMの兆候は未だ見えていない。BSMの発見に向けて、2015年から始まる重心系エネルギー13-14 TeVで稼働するLHC加速器の実験が期待された一方、注目を浴び有力視された研究が、大強度ミュオンビームを用いた荷電レプトンフレーバー非保存(CLFV: Charged Lepton Flavor Violation)過程の探索である。

大強度ミュオンビームを用いたCLFV過程の探索では、スイスPSI研究所のSINDRUM-II実験が μ^-e 転換過程の上限値 $Br(\mu^- \rightarrow e^- \gamma) \leq 7 \times 10^{-13}$ (90% CL) を提出した。一方、PSI研究所のMEG実験は μ^+e^+ 崩壊を探索し、最新の上限値は $Br(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) \leq 5.7 \times 10^{-13}$ (90% CL)である。MEG実験では、 6×10^{-14} の感度を目指したアップグレード計画を遂行中である。また、米国フェルミ国立加速器研究所(FNAL)のMu2e実験は、 μ^-e 転換過程で本研究課題で推進するCOMET実験と同じ感度を目指しており、Phase-IIと同時期に計画されている。このように、CLFV過程の探索実験は厳しい国際競争の状況下にある。これらの状況を踏まえ、我が国がCLFV過程の探索で国際的にトップの成果を創出するために、本研究を提案した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設(J-PARC)において、世界最高強度のパルスミュオンビームと革新的な検出器を用いてミュオン-電子(μ^-e)転換過程を探索し、BSM物理を発見することである。 μ^-e 転換過程は、原子核(N)に束縛されたミュオンが電子に変わる現象($\mu^-N \rightarrow e^-N$)で、CLFV過程の一つである。CLFV過程はSMで禁止されており、BSMを発見するために非常に有力である。本研究の μ^-e 転換過程探索は、J-PARC E21実験としてJ-PARC実験審査委員会で採択されたCOMET(Coherent Muon to Electron Transformation search)実験で遂行する。本研究のCOMET実験では、SINDRUM-II実験の上限値を第1期のPhase-Iで100倍、第2期のPhase-IIで10,000倍向上し、最終的に 3×10^{-17} の1事象発見感度(SES: Single Event Sensitivity)で μ^-e 転換過程を探索してBSMの発見を目指す。本研究で開発する検出器は、Phase-IIにおける探索性能を最大限に発揮するために不可欠である。

3. 研究の方法

本研究のミュオン-電子転換過程の探索は、J-PARCハドロン実験施設で建設中の世界最高強度のパルスミュオンビームを用いるCOMET実験で行う。Phase-I実験で、ストローチューブ飛跡検出器とLYSO結晶電磁カロリメータで構成する検出器を導入し、ミュオンビームを用いて探索実験で要求される高分解能検出器を開発する。その開発と並行して、ミュオンビームの研究とミュオン-電子転換過程探索の初期の結果を提出する。最終的には、Phase-II実験で用いる検出器の建設へと移行し、究極の発見感度を有する実験を実現させる道筋をつける。以上が当初計画していた研究方法であった。

COMET実験における μ^-e 転換過程の探索では、J-PARCハドロン実験施設で建設中の世界最高強度のパルス状負電荷ミュオンビームとミュオンを静止させるアルミ標的を用いる。ミュオンが原子核標的に入射して静止すると、ミュオン原子が形成される。基底状態のミュオンが $\mu^-N \rightarrow e^-N$ の反応を起こせば、運動エネルギー $E_e = m_\mu - B_\mu$ (m_μ はミュオンの質量、 B_μ はミュオン原子の束縛エネルギー)の電子が放出される。この電子が μ^-e 転換過程の信号である。COMET実験で用いるアルミ標的の場合、 $E_e \approx 105$ MeVである。したがって、 μ^-e 転換過程の探索では、このエネルギー領域の電子を検出するための高性能検出器を開発することが成功の鍵を握る。

バックグラウンド(BG)は、ミュオン起源とビーム起源に分けることができる。ミュオン起源で優位なBGは、ミュオン原子で束縛されているミュオンが電子と二つのニュートリノへの崩壊(DIO: Decay In Orbit)を起こして放出される電子である。この電子のエネルギースペクトルは、105 MeVの信号領域に侵入するため、BGの抑制のために高分解能の検出器が要求される。ビーム起源のBGは、ビームに混ざっているパイ中間子が標的に静止して、標的原子核に捕獲されて光子を放出するものである(RPC: Radiative Pion Capture)。RPCの光子が電子-陽電子対生成を起こし、その電子がBGとなる。また、ビーム中のミュオンが崩壊し(DIF: Decay In Flight)、放出される電子がBGとなる。ビーム起源のBGを抑制するため、パルス状の一次陽子ビームを用い、ビームパルス間の限られた時間領域でのみ測定を行う。この手法では、ビームパルス間の陽子の漏れが非常に少ないことが要求される。

COMET 実験 Phase-II の検出器は、5 層のストローチューブ飛跡検出 (STR) と電磁カロリメータ (ECAL) で構成する。高分解能を要求するために真空中で動作させ、1T の検出器用ソレノイド電磁石内に設置する。STR は、 $12\ \mu\text{m}$ 又は $20\ \mu\text{m}$ 厚の PET 材にアルミを蒸着した材料を用い、直径 5mm 又は 9.75mm のストローチューブを整列させたものである。1 層につき 4 面のストローチューブ面があり、直交する二つの方向それぞれに 2 面ずつ配置する。チェンバースは Ar/CO₂ を用いることを検討している。低物質量化とチューブ径を小さくすることにより、運動量分解能 $150\ \text{keV}/c$ を目指す。電磁カロリメータ (ECAL) は、 $20 \times 20 \times 120\text{mm}^3$ の LYSO (Lu_{2-x}Y_xSiO₅) 無機結晶シンチレータを用い、直径約 1m 内の領域に敷き詰める。磁場中で動作させるため、光検出器にはアバランシェフォトダイオード (APD) を用いる。信号電子のエネルギー 105 MeV に対して、エネルギー分解能 5 % 以下を要求する。ECAL は、トリガーとタイミングを検出器システムに提供する役割も果たす。粒子同定は、STR で測定する運動量 p と ECAL で測定するエネルギー E を組み合わせ、主として E/p を用いる。パイ中間子とミュオンが ECAL 内で崩壊すると、電子とは異なるタイミングと波形を持つ信号を出す。したがって、タイミングと波形の情報を用いて、BG を抑制することができる。

本研究では、まず Phase-II 実験に用いる検出器の試作機の開発を行う。STR の開発では、ストローチューブのチューブ径と PET 材の厚みが異なるものを製作して真空中での基礎特性を評価し、実機に用いるデザインを確定する。開発要素として、特に、ストローチューブの変形度、ガスリークのレート、フィードスルーの開発、支持構造体の設計が重要である。ECAL の開発では、LYSO 結晶と APD をモジュール化して真空中に設置し、読み出し回路は真空の外に設置するため、APD と読み出し回路を接続するフィードスルーを検討する必要がある。また、APD のゲイン調整、ゲイン変動のモニタリング、LYSO の自発光を用いた較正が開発要素としてあげられる。STR と ECAL の検出器試作機を開発を成功させ、Phase-I でミュオンビームを用いて試験を行う。試験の結果、試作機の開発段階では気がつかなかった開発要素が出てくると予想する。したがって、その結果を Phase-II 検出器 実機のデザインへと反映させ、開発と建設に活用する。Phase-I では、試作機の試験をするとともに、ミュオンビームを詳細に研究する。特に μ -e 転換過程の探索でビーム起源の BG となるものを定量的に調べることが重要である。得られた結果から、シミュレーションも導入して BG を軽減する対策を検討し、Phase-II に向けたビームラインの設計と検出器の開発にフィードバックをかける。さらに Phase-I では、ミュオン静止標的を導入して検出器試作機を用いた μ -e 転換過程の探索を行う。Phase-I における μ -e 転換過程の探索は、本研究とは別に開発が進んでいる Phase-I 用検出器を主に用いるが、Phase-II 用検出器試作機による独立した結果自身は重要であり、かつ、独立した二つの結果に整合性が成り立つことを見ることも重要である。Phase-II 用検出器試作機で実際に探索を行うことにより、Phase-II における発見感度を向上するために必要な情報を得ることができると考えている。

4 . 研究成果

予算的な施設建設の遅れにより、COMET 実験そのものは、実験遂行には至らなかったが、本研究の大きな課題である検出器の開発は大きく進展しており、実機の製作に向けた準備は完了した。

- (1) **ストローチューブ飛跡検出器の開発** : (2015 年度) 検出器の最小構成単位であるストローチューブ 1 本の基礎特性を研究し、検出器の実機に使用できることを示した。さらに、実機に相当するサイズの試作機を製作し、東北大学電子光物理学研究センターの電子ビームを用いて、ビーム試験による性能評価を行った。(2016 年度) 信号の読み出し等に課題は残ったものの、検出器として予想どおり動作させることに成功した。前年度に製作した検出器の試作機に加え、すべての波形を記録する読み出し電子回路の試作機を開発して組み合わせ、実験室での試験とビーム試験を行った。低ノイズでの波形取得、ゼロサプレッション、デジタイゼーション等の開発に成功した。本測定器の開発要素の課題を大部分解決した。検出器の前方・後方にシンチレーションファイバー検出器を配置し、全ての検出器を真空中で動作させたビーム試験で取得したデータを用いて、性能評価を行った。(2017 年度) 本実験での使用を想定する混合ガスを用いて、予想される X-T 曲線と期待する $150\ \mu\text{m}$ 以下の位置分解能を得ることができた。読み出し・波形記録回路である ROESTI の較正手法を研究し、1 nsec 以下の時間分解能を達成できる見通しが立った。(2018 年度) ビーム試験データの解析による性能評価を完了させた。特に、X-T 曲線と位置分解能の理解に重点を置き、実機設計に必要な動作の理解に到達した。その結果に基づいて実機の基本設計を完了させ、建設を開始した。ストローチューブの量産は完了した。電極フィードスルー部の固定手法ほか、残されていた開発・設計が完了し、建設が進行中である。信号読み出し・波形記録回路である ROESTI については、放射線耐性・ファームウェア・較正手法に関する開発を完了させ、試作機を製作した。その性能試験が進行中であり、大きな問題がなければ実機として採用する。

- (2) **電磁カロリメータの開発**：(2015年度)信号の波形情報を用いた粒子識別性能を検討するため、スイス・PSI 研究所の電子・ミュオン・荷電パイ中間子の混合ビームを用いて、初期試作機のビーム試験を行った。その結果、ある程度の粒子識別能力があることを示した。並行して、電磁カロリメータの検出器実機を想定した試作機を設計・製作した。特に、アバランシェ・フォトダイオード光検出器 (APD) の大型化、検出器モジュールのラッピング方法、読み出し電子回路、真空内での動作、等の開発項目を重点的に研究した。東北大学電子光理学研究センターの電子ビームを用いてビーム試験を行い、その試作機ではエネルギー分解能が向上することを示した。同時に、ストローチューブ飛跡検出器と組み合わせ、検出器システムとして動作させることに成功した。(2016年度)前年度に製作した検出器の試作機にさらに改良を加えた。APD 基板から前置増幅電子回路に至る、ほぼすべての読み出し系を改良し、真空と大気を分けるフィードスルーにも改良を加えた。さらに、波形を記録する読み出し電子回路は、開発を効率化させるため、ストローチューブ飛跡検出器用回路と大部分を共通化して開発を進めた。その結果、ビーム試験において、低ノイズで波形取得することに成功し、開発要素の本質的な部分クォ完了させた。さらに、ストローチューブ飛跡検出器と電磁カロリメータを組み合わせ、検出器システムの動作試験を行った。両検出器を動作させるためのスローコントロール系・低電圧分配器・データ収集システムの試作機を開発し、動作試験は真空中で行った。検出器システムとして、良好に動作させることに成功し、実機設計・製作へ向けて大きく前進した。(2017年度) APD 光検出器部・前置増幅回路を改良し、試作機を用いて行ったビーム試験のデータ解析を進めた。特に、ROESTI と同様に波形記録である EROS で取得した波形を用い、先進的な波形解析を導入することにより、エネルギー分解能・位置分解能・時間分解能で実機に要求する性能を満たすことを示した。ハードウェア面では、実機製作に向けた改良点を洗い出し、APD 光検出器部・前置増幅回路の最終デザインをほぼ終了させた。また、検出器の真空部と大気部を分けるフィードスルー基板もデザインを改良した。実機製作に向けて目処が立ったと言える。(2018年度)ビーム試験データの解析による性能評価を完了させた。試作機を用いた宇宙線・LED による較正手法を含め、基本的な開発を完了させた。実機建設のための低コスト化には工夫の余地がある。特に、相対的に廉価な LYSO 結晶を入手し、その性能評価を進め、良好な結果を得た。信号読み出しの開発では、前置増幅回路の開発を完了させた。また、波形記録回路は前述の ROESTI と開発要素を共有しており、開発を完了させた。
- (3) **トリガーの研究**：検出器の開発と並行して、本実験を想定したトリガーの研究も大きく進展した。アルゴリズムの最適化にまだ余地があるものの、十分な性能を発揮することを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

G. Adamov, K. Kawagoe *et al.*, COMET Collaboration, COMET Phase-I Technical Design Report, arXiv 1812.090018 [physics.ins-det] (査読なし)

<https://arxiv.org/abs/1812.090018>

K. Oishi, on behalf of the COMET Collaboration StrECAL group, Development of Electromagnetic Calorimeter Using LYSO Crystals for the COMET Experiment at J-PARC, PoS EPS-HEP2017 (2018) 800 (査読あり) DOI: 10.22323/1.314.0800

K. Ueno, P. Evtoukhovitch, Y. Fujii, E. Hamada, S. Mihara, A. Moiseenko, H. Nishiguchi, K. Oishi, T. Saito, A. Samartsev, J. Tojo, Z. Tsamalaidze, N. Tsverava, Development of a Thin Wall Straw-Tube Tracker for COMET Experiment, EPS-HEP 2017 314 (2018) 524 (査読あり) DOI: 10.22323/1.314.0524

H. Nishiguchi, K. Noguchi, K. Oishi, S. Tanaka, J. Tojo *et al.*, Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum --The COMET straw tracker system, Nucl. Instr. Meth. A845 (2017) 269-272. (査読あり) DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.082

〔学会発表〕(計32件)

大石航、COMET Phase-II 実験のためのシミュレーションを用いた探索感度の研究、日本物理学会年次大会、2019

川島僚介、COMET 実験電磁カロリメータ用読み出し回路の性能評価、日本物理学会年次大会、2019

宮崎祐太、COMET 実験用トリガー検出器試作機の開発、日本物理学会秋季大会、2018

橋本奨平、COMET 実験用電磁カロリメータ試作機の性能評価、日本物理学会秋季大会、2018

橋本奨平、COMET 実験ストロー飛跡検出器用読み出し回路の性能評価、日本物理学会年次大会、2018

齊藤貴士、COMET 実験電磁カロリメータに用いる LYSO 結晶の性能評価、日本物理学会年次

大会、2018
中居勇樹、COMET 実験トリガー検出器の性能評価、日本物理学会秋季大会、2017
大石航、COMET 実験のための飛跡検出器・電磁カロリメータ試作機を用いた性能評価、日本物理学会秋季大会、2017
橋本奨平、COMET 実験ストレージチューブ飛跡検出器用読み出し回路の性能評価、日本物理学会秋季大会、2017
宮崎祐太、COMET 実験用トリガーフロントエンド回路の性能評価、日本物理学会秋季大会、2017
中居勇樹、COMET 実験に用いるトリガー検出器の開発、日本物理学会年次大会、2017
斉藤貴士、COMET 実験におけるビームテスト用シンチレーションファイバー検出器の開発、日本物理学会年次大会、2017
山口博史、COMET 実験用電磁カロリメータ試作機の開発、日本物理学会年次大会、2017
野口恭平、COMET 実験のための電磁カロリメータ試作機の性能評価、日本物理学会年次大会、2017
大石航、COMET 実験のためのストレージ飛跡検出器および電磁カロリメータの開発、日本物理学会年次大会、2017
Kou Oishi, Development of Electromagnetic Calorimeter Using LYSO Crystal for the COMET Experiment, EPS-HEP 2017
東城順治、J-PARC ミューオンによるフレーバー実験(招待講演) 日本物理学会秋季大会、2015
田中聡一、J-PARC COMET 実験用ストレージチューブ飛跡検出器のプロトタイプ性能評価、日本物理学会秋季大会、2015
大石航、J-PARC COMET 実験用検出器の粒子識別性能の研究、日本物理学会秋季大会、2015
大石航、J-PARC COMET 実験のための電磁カロリメータデザイン、計測システム研究会、2015
他、12件

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

九州大学 COMET 実験グループ <http://epp.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php?COMET>

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：東城 順治

ローマ字氏名：TOJO, Junji

研究協力者氏名：吉岡 瑞樹

ローマ字氏名：YOSHIOKA, Tamaki

研究協力者氏名：三原 智

ローマ字氏名：MIHARA, Satoshi

研究協力者氏名：西口 創

ローマ字氏名：NISHIGUCHI, Hajime

研究協力者氏名：深尾 祥紀

ローマ字氏名：FUKAO, Yoshinori

研究協力者氏名：上野 一樹

ローマ字氏名：UENO, Kazuki

研究協力者氏名：田中 真伸

ローマ字氏名：TANAKA, Manobu

研究協力者氏名：内田 智久

ローマ字氏名：UCHIDA, Tomohisa

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。