

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06135

研究課題名（和文）大強度パルスミュオンビームで解き明かす荷電レプトン間のフレーバー混合

研究課題名（英文）Study on the charged lepton flavor mixing using the high-intensity pulsed muon beam

研究代表者

三原 智 (Mihara, Satoshi)

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・教授

研究者番号：80292837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 160,260,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では cLFV 過程の一つであるミュオン電子(μ -e)転換過程の10-16の分岐比感度での探索に必要な大強度パルスミュオンビーム実現を目指して研究を実施した。本研究で進めるビーム診断用検出器を用いてJ-PARC COMET実験施設で生成されるパルスミュオンビームの詳細を調べその大強度化を実現することを目指していたが、施設建設の遅れが原因で大強度化の実現には至らなかった。しかしながら陽子ビームによる中間子生成計測と陽子ビーム時間構造の計測を実施し、ビーム時間構造についてビームパルスからの漏れ出し具合を表すビームエクステンクション係数が10-10程度以下であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミュオンはその生成エネルギーの低さと寿命の長さから、陽子加速器による大量生成が可能で精密測定に適した素粒子である。本研究では、この点に着目し大強度パルスミュオンビームを生成し、それにより素粒子の標準模型では許されていない荷電レプトンにおけるフレーバー混合の破れを探索するCOMET実験の実現を目指した研究を進めた。この目的のため、LYSO結晶カロリメーターを開発製作しその性能評価を行った。研究の終盤には、陽子ビームにより生成されたパイ中間子を使用してパルスミュオンビームの時間構造を決定づける陽子ビームの時間構造の測定を行い、十分な性能が発揮されていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have been working to realize a high-intensity pulsed muon beam necessary to search for the muon-electron (μ -e) conversion process, one of the cLFV processes, with a branching ratio sensitivity better than 10-16. The aim of this study was to investigate the details of the pulsed muon beam produced at the J-PARC COMET experimental facility using a beam diagnostics detector, but the realization of the high-intensity pulsed muon beam was not achieved due to the delay in the construction of the facility. However, the pion production measurement and the proton beam time structure measurement were carried out, and the beam time structure was confirmed to have a beam extinction factor of less than 10-10, which indicates the degree of leakage from the beam pulse.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：量子ビーム ミュオン 荷電レプトン フレーバー混合

1. 研究開始当初の背景

cLFV 探索は、LHC 実験が直接的に標準模型を超える新物理の探索を行うのに対し、広範囲のエネルギースケールで新物理の可能性を探るものであり、その到達範囲は LHC 実験のそれを凌駕する (図 1)。研究開始当初の素粒子物理研究の現状を俯瞰するに、ヒッグス粒子の精密測定、高エネルギー新粒子探索、クォーク・ニュートリノセクターにおけるフレーバー構造の解明、暗黒物質 探索等の研究はいずれも素粒子物理を標準模型の枠組みを超えてより統一的に理解するための試みであり、cLFV 探索はこれらに勝るとも劣らない新物理の在り方を精査する高感度のプローブと考えられていた。実際の所、現在最高感度の cLFV 探索であるスイス・PSI 研究所における $\mu^+ e^+$ 探索実験(MEG 実験)に続き、 $\mu^- e$ 転換事象探索に関しては本研究で進展を図る COMET 実験、及び DeeMe 実験が国内で準備中であり、米国 FNAL 研究所では mu2e 実験が準備中であった。さらには MEG 実験のアップグレードである MEG II 実験、 $\mu^+ e^+ e^-$ 探索を行う mu3e 実験もスイスで準備中であった。これらはいずれも激しい国際競争のさなかにあり、先陣を切って目標感度を実現するべく施設・実験装置の開発・建設が行われている状況にあった。

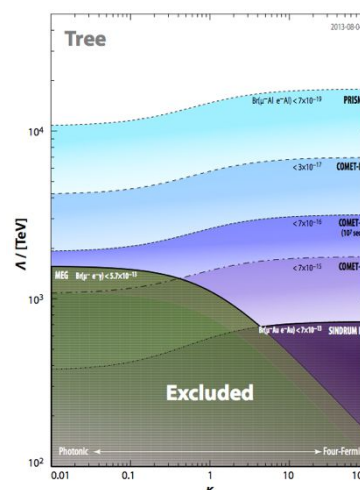


図 1 COMET 実験で到達できるエネルギースケール(縦軸)、横軸は反応に与える素過程の割合を示す。

2. 研究の目的

素粒子の荷電レプトンにおけるフレーバー混合過程、すなわちフレーバー数の保存を破る過程 (Charged Lepton Flavor Violation, cLFV 過程)はニュートリノ振動を考慮に入れたとしても素粒子標準模型内では厳しく制限される。しかしながら標準模型を超える TeV スケール物理が実存するならば、実験室でも十分観測にかかる頻度で生じ得ることが示唆されている。本研究では cLFV 過程の一つであるミュオン-電子 ($\mu^- e$) 転換過程を 10^{-16} 以下の分岐比感度で探索するために必要な大強度パルスミュオンビームを最適化し、ミュオンフレーバー物理を大きく進展させ、日本国内で世界トップレベルの国際共同実験を実現する。

3. 研究の方法

本研究は $\mu^- e$ 転換事象探索を行う COMET 実験において Phase II での最終目標感度 (10^{-16} 以下) 実現に不可欠なパルスミュオンビームを最適化する。このため研究開始までに開発した運動量計測用ストロー飛跡検出器とエネルギー計測用 LYSO カロリメータ検出器を必要な電子回路と共に製作してビーム診断が可能な検出器群(StrEcal 検出器)を立上げる。研究期間中にはこれによりミュオンビームの診断を実施し、ビーム中の粒子種別とその割合の計測、位相空間分布の決定を行くことを予定していた。その後、この結果を基に最適なコリメータシステムを設計し COMET 実験の実験感度を最大化する。また、Phase I においても最終的なミュオン収量を向上し探索感度を向上するための陽子標的の検討も進めることも目的とした、

4. 研究成果

当初の予定では、本研究で進めるビーム診断用検出器を用いて、J-PARC COMET 実験施設で生成されるパルスミュオンビームの詳細を調べ、その大強度化を実現することを目指していたが、施設建設の遅れによりビーム診断を行うことができなかった。また、ビーム診断に続いて実施を予定していた物理反応計測に関しても、本研究遂行期間内には完了することができなかった。このような状況ながら、パルスミュオンビーム実現を目指して以下のような研究を実施し、施設建設が完了すれば研究成果を導出できることを確認した。

(1) J-PARC 加速器により生成した大強度ミュオンビームを安定に実験室へ輸送するためには、実験室の輸送ソレノイド磁石出口から滑らかに磁場接続を行うための電磁石(ブリッジソレノイド磁石 BS 磁石)が必要であり、これを実現することは本研究の第一の目標であった。2021 年度には研究チーム内で工程管理を行うことで磁石製作のためのコストダウンを実現し、BS 磁石製作を完遂した。図 2 に完成した BS 磁石を示す。



図 2 滑らかな磁場接続のための BS 磁石

(2) 施設建設の遅れのため実際に COMET 実験を行うビームラインでの計測は実現できなかったが、2021 年 5 月に陽子ビームによる中間

子生成計測と陽子ビーム時間構造の計測を別ビームラインで実施し、標的前方へのパイ中間子生成データを取得した。この結果、生成断面積に関しては過去に得られたデータと矛盾が無いことを確認し、陽子ビーム時間構造に関しても、ビームパルスからの漏れ出し具合を表すビームエクステンション係数が 10^{-10} 程度以下であることを確認した。これにより COMET 実験の Phase-I ではビーム漏れ出しに起因する背景事象は問題とならないレベル以下であり、Phase-II ではミュオンビーム輸送中の散乱に起因する遅延粒子の除去を行えば目標感度を実現できることを示した。

(3) 本研究では結晶製造メーカーとの協力により LYSO 結晶の製造コスト削減を行った。最近の研究により LYSO に Ce をドープすることで 20% 程度の光量の増加が実現できるようになり、現在流通している LYSO 結晶の多くがこのタイプに置き換わりつつある。しかしながら COMET 実験で使用する LYSO 結晶は十分な光量が得られることがわかっているため従来の製造方法 (Ce をドープしない) に立ち戻り、かつ結晶インゴットからの切り出し時の効率を上げることで、結晶 1 本あたりの製造コストを低減させることに成功した。製造した、LYSO 結晶 64 個をアレイに組んだプロトタイプ LYSO 結晶カロリメーターを製作し、電子ビーム照射により要求性能である 105MeV 電子に対するエネルギー分解能 (5.0% 以下) について 3.9% を実現している事を確認した (図 3)。

(4) 標的

COMET Phase-I ではグラファイトを陽子ビーム標的として使用する。本研究期間中には遠隔操作による標的交換システムの検討を進めるとともに、エンジニアリングランに使用するグラファイト標的の製作を行い、終了の評価を実施した。

(5) ミュオンビームモニター

上記に加えて、ミュオンビームを診断するためのモニター開発も実施した。当初予定していたシンチレーティングファイバーを用いたモニターとしては中国・中山大學との共同研究によりサンプリングタイプのモニターを製作した。ビームが利用できる状況になれば直ちに計測に書かれる準備画と通っている。また新しいタイプのモニターとして、SiC を利用したサンプリングタイプのモニターの研究も開始した。SiC モニターについては別研究として立ち上げ、引き続き開発が行われている。

< 引用文献 >

COMET Collaboration, COMET Phase-I technical design report, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz125>

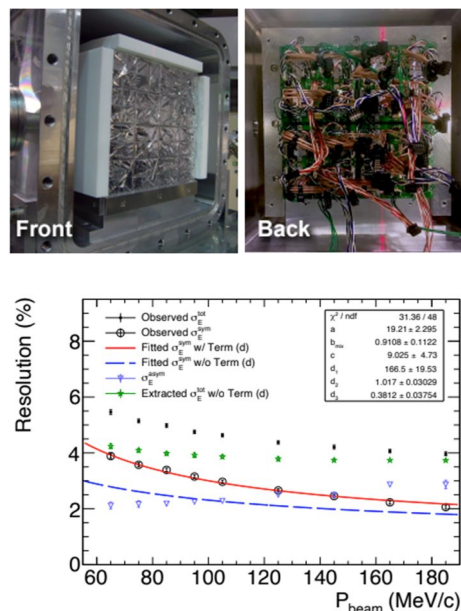


図3 LYSO 結晶カロリメーターと電子ビーム試験で得られた分解能

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Volkov A., Evtoukhovich P., Kravchenko M., Kuno Y., Mihara S., Nishiguchi H., Pavlov A., Tsamalaidze Z.	4. 巻 1004
2. 論文標題 Properties of straw tubes for the tracking detector of the COMET experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165242 ~ 165242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2021.165242	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mihara Satoshi	4. 巻 2319
2. 論文標題 Investigation of the last flavor violation in particle physics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 20001-1 ~ 20001-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037361	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Thanh Chau Tai, Gillies Ewen, Ikeno Masahiro, Lee MyeongJae, Mihara Satoshi, Shoji Masayoshi, Uchida Tomohisa, Ueno Kazuki	4. 巻 143
2. 論文標題 Fast Online Trigger using FPGA-based Event Classification for the COMET Phase-I	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PoS EPS-HEP2019	6. 最初と最後の頁 0 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.364.0143	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Abramishvili R et al.	4. 巻 2020
2. 論文標題 COMET Phase-I technical design report	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz125	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 該当する

1. 著者名 Rie Murayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Radiation tolerance of LYSO crystal for the COMET experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Gillies Ewen, Hamada Eitaro, Igarashi Youichi, Lee MyeongJae, Moritsu Manabu, Matsuda Yugo, Miyazaki Yuta, Nakai Yuki, Natori Hiroaki, Oishi Kou, Sato Akira, Uchida Yoshi, Ueno Kazuki, Yamaguchi Hiroshi, Yeo BeomKi, Yoshida Hisataka, Zhang Jie	4. 巻 955
2. 論文標題 Radiation hardness study for the COMET Phase-I electronics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 163247 ~ 163247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.163247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujii Y., Nishiguchi H., Mihara S., Hashimoto Y.	4. 巻 936
2. 論文標題 Development of the proton beam monitor based on the thin diamond crystal for the COMET Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 669 ~ 670
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.10.136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujii Y., Nishiguchi H., Mihara S., Hashimoto Y.	4. 巻 936
2. 論文標題 Development of the proton beam monitor based on the thin diamond crystal for the COMET Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 669 ~ 670
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.10.136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計19件(うち招待講演 6件/うち国際学会 14件)

1. 発表者名 佐藤良紀, 上野一樹, 青木正治, 吉田学立, 樋口雄也, 杉田和正, 三原智, 藤井祐樹, 五十嵐洋一, 松本岳, 東城順治
2. 発表標題 COMET実験のトリガー検出器に用いる新型SiPMの中性子耐性評価試験
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口恭平, 五十嵐洋一, 上野一樹, 庄子正剛, 東城順治, 富澤正人, 西口創, 橋本義徳, 深尾祥紀, 藤井祐樹, 三原智, 武藤亮太郎, 吉田学立
2. 発表標題 COMET実験に向けた8 GeV陽子加速試験
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口恭平, 五十嵐洋一, 上野一樹, 庄子正剛, 東城順治, 富澤正人, 西口創, 橋本義徳, 深尾祥紀, 藤井祐樹, 三原智, 武藤亮太郎, 吉田学立
2. 発表標題 COMET実験の陽子ビーム実現に向けたエクステンション試験用検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Mihara
2. 発表標題 Investigation of the last Flavor Violation in Particle Physics
3. 学会等名 APPC2019(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Mihara
2. 発表標題 Prospects of Charged Lepton Flavor Experiments
3. 学会等名 Gordon Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ueno
2. 発表標題 Status of the SrEcal System for COMET Phase-I
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fukao
2. 発表標題 Irradiation Test of Scintillation and Clear Optical Fibers
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ueno
2. 発表標題 Design of Radiation Tolerant Electronics for StrEcal System in COMET Experiment
3. 学会等名 The European Physical Society Conference on High Energy Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ueno
2. 発表標題 Development of the StrECal System for COMET Phase-I
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishiguchi
2. 発表標題 Extinction Measurement of J-PARC MR with 8GeV Proton Beam for the New Muon-to-Electron Conversion Search Experiment - COMET
3. 学会等名 10th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Mihara
2. 発表標題 Searches for Muon to Electron Conversion at J-PARC
3. 学会等名 HQL 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mihara
2. 発表標題 cLFV/g-2/EDM Experiment
3. 学会等名 ICHEP 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mihara
2. 発表標題 Results and perspectives on Lepton Flavor Violation
3. 学会等名 LHC Days in Split (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本 奨平
2. 発表標題 COMET実験用電磁カロリメータ試作機の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島 僚介
2. 発表標題 COMET実験電磁カロリメータ用読み出し回路の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三原 智
2. 発表標題 Flavor and Precision Physics Experiments Overview
3. 学会等名 WIN2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石航、東城順治、三原智、西口創、上野一樹、他
2. 発表標題 Development of Electromagnetic Calorimeter Using LYSO Crystals for the COMET Experiment at J-PARC
3. 学会等名 European Physics Society Conference on High Energy Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤井祐樹、西口創、深尾祥紀、三原智、他
2. 発表標題 Development of the Diamond based Proton Beam Monitor for COMET Experiment
3. 学会等名 European Physics Society Conference on High Energy Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西口創
2. 発表標題 Search for Muon-to-Electron Conversion at J-PARC: COMET Experiment
3. 学会等名 European Physics Society Conference on High Energy Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本加速器学会、神谷幸秀、上坂 充、鎌田 進	4. 発行年 2018年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 596
3. 書名 加速器ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

COMET Experiment
<https://comet.kek.jp>

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
研究分担者	西口 創 (Nishiguchi Hajime) (10534810)	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・准教授 (82118)	
研究分担者	上野 一樹 (Ueno Kazuki) (20587464)	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・助教 (82118)	
研究分担者	五十嵐 洋一 (Igarashi Youichi) (50311121)	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・講師 (82118)	
研究分担者	吉田 誠 (Yoshida Makoto) (70379303)	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)	
研究分担者	深尾 祥紀 (Fukao Yoshinori) (80443018)	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・助教 (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	Joint Institute for Nuclear Research	Budker Institute of Nuclear Physics		
英国	Imperial College London			
ジョージア	Georgian Technical University			
ベラルーシ	National Academy of Science of Belarus			
中国	中山大学	Institute of High Energy Physics		
英国	Imperial College Londona			
韓国	Institute for Basic Science			
インド	Indian Institute of Technology Bombay			