

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03591

研究課題名（和文）次世代ニュートリノ実験における大強度ミュオン測定

研究課題名（英文）Measurement of high-intensity muons on the next-generation neutrino experiment

研究代表者

山本 和弘（Yamamoto, Kazuhiro）

大阪公立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：80303808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：長基線ニュートリノ振動実験T2Kは、現在の物質優勢宇宙の解明に向けてニュートリノのCP対称性の破れの発見を目指し高度化を行っている。その中で、J-PARCからスーパーカミオカンデに向けてニュートリノビームを打ち出す方向をリアルタイムで監視するミュオンモニター(MUMON)も、放射線損傷により加速器の増強に耐えられない現行機に代わり、後継候補として電子増倍管(EMT)の開発が進められている。大強度電子線を用いたテスト実験によりEMTが十分な放射線耐性と良好な信号応答線形性を持つことが確認され、さらに7個のEMTをJ-PARCに設置したところ、現行のMUMONと遜色ない性能を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質優勢宇宙誕生の謎を解くことは、現代物理学の最重要課題の1つである。それには素粒子のCP対称性の破れが必要であるが、測定の結果クォーク以外の源が必要と判明し、我々はT2Kニュートリノ振動実験でニュートリノのCP対称性の破れの発見を目指している。T2K実験の重要検出器の1つにニュートリノの発射方向を測定するミュオンモニターがあるが、ビーム強度増強による放射線増加により新たな検出器が必要となり、電子増倍管(EMT)を開発した。テスト実験の結果、EMTが将来に渡って十分な放射線耐性と優秀な性能を有していることを確認できた。これはニュートリノのCP対称性の破れの発見可能性を確かにする意義がある。

研究成果の概要（英文）：The long baseline neutrino experiment, T2K, is being upgraded aiming at observation of CP violation in the neutrino sector toward understanding the current matter dominated universe. Among upgrade of the experiment, the muon monitor (MUMON) which is making the real-time monitoring of the direction of the neutrino beam to the Super-Kamiokande detector from J-PARC is also one of the subjects for upgrade since the present detectors cannot be tolerated for the further accelerator upgrade, and so the electron multiplier tube (EMT) is newly being developed as a replacement. The fact that the EMT has a sufficient radiation tolerance and a good linearity of the signal response has been confirmed by the test experiment using a high-intensity electron beam, and seven EMTs installed at J-PARC showed a good performance comparable to the present MUMON detectors.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：電子増倍管 ニュートリノ ミュオン

## 1. 研究開始当初の背景

現在の物質優勢宇宙の謎を解明することは、現代物理学の最重要課題の1つである。物質優勢宇宙が出来上がるためには素粒子の CP 対称性の破れが破れている必要があるが、小林・益川が予言し中性 K 中間子や中性 B 中間子の粒子反粒子振動で測定されたクォークの CP 対称性の破れでは、現在の宇宙の物質量を全く説明できないことから、他の起源が求められた。そこで、ニュートリノによる CP 対称性の破れに注目が集まり、レプトジェネシスと呼ばれる機構による宇宙初期に存在したと考えられる重いニュートリノの崩壊を経由した物質と反物質の非対称性の出現可能性が理論的に研究された。T2K 実験では、ミュー型ニュートリノが電子型ニュートリノに振動する確率と反ミュー型ニュートリノに振動する確率の非対称性から CP 位相角  $\delta_{CP}$  を測定できる。ニュートリノ振動確率の CP 対称性を破る項は  $\sin \delta_{CP}$  に比例するので、 $|\delta_{CP}|$  が  $0$  か  $\pi$  でなければ CP 対称性は破れていることになる。2020 年、T2K 実験国際共同研究グループは  $\delta_{CP}$  の取り得る値の半分近くの領域を  $3\sigma$  の統計的信頼水準で排除する結果を公表した。しかも、質量順階層の場合、 $\delta_{CP}=0$  を  $3\sigma$  で排除した。また  $\delta_{CP}$  の最尤値が  $-\pi/2$  に近くなっており、CP 対称性が最大近くで破れていることを示唆している。

これを確かめるには、さらに J-PARC で生成されるニュートリノビームの強度を高める必要があった。2020 年当時は J-PARC メインリング(MR)の陽子ビーム強度は 500 kW であったが、米国の Nova 実験との国際競争もあり加速器の電源強化によって 2027 年には 1.3 MW まで増強する計画があった。そこで問題になったのが、ニュートリノビームの強度と方向を間接的ではあるがリアルタイムに監視しているミュオンモニターの放射線劣化問題であった。ミュオンモニターは 49 個(=  $7 \times 7$ )のシリコン PIN フォトダイオード(Si)を基盤目状に並べたアレイで構成されているもので、ミュオンの強度増加に伴い放射線劣化による信号強度の低下が顕著になっていた。Si を頻繁に交換するわけにもいかないため、高い放射線耐性を持ち、さらに広いビーム強度範囲に渡って優秀な信号線形性と安定性を持つ新しい検出器の開発が急がれていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は T2K 実験におけるニュートリノビームの更なる増強を可能にし、ニュートリノの CP 対称性の破れを発見し測定できるようにすることである。そのためには前述したように、ニュートリノビームの強度と方向を監視しているミュオンモニターを更新する必要があった。ミュオンモニターに使われている Si を、高い放射線耐性と広いビーム強度範囲に渡って優秀な信号線形性と安定性を持つ新たな検出器の開発を行う必要があった。最初は放射線耐性が高いと言われていた高純度単結晶ダイヤモンド検出器の研究を行った。これはビーム強度が低いときは非常に安定な動作を見せたが、MR の陽子ビーム強度が 500 kW を超えたあたりから出力信号の低下が見られ、また価格も 1 個あたり 100 万円近くし、50 個近くを導入するにあたって容認できるものではなかったため採用を見送った。次に考えられたのが電子増倍管(EMT)である。これは小型の光電子増倍管のフォトカソードにアルミニウムを蒸着させ光電子を発生させなくしたもので、ミュオンがダイオードに当たって生成された電子を増幅することで信号を得るものである。このタイプのミュオンモニターは画期的で、世界で初めての試みである。J-PARC での実証試験の結果は、現行の Si よりも早い時間性能を見せ、581 ns のビームバンチ間隔もクリアに分けることができた。強度分布の不安定性も MR の陽子ビーム強度が 500 kW に至るまでは 1%以内に抑えることができ、出力信号の線形性も同様に 1%以内で安定していた。この EMT が将来の陽子ビーム強度 1.3 MW になったときも優秀な安定性と信号線形性を持つのかを確かめ、また放射線劣化を見せるのであればその原因は何かを探ることが本研究の具体的な目的である。こうして T2K 実験におけるニュートリノの CP 対称性の破れの発見に大きく寄与することができる。

## 3. 研究の方法

EMT が J-PARC の将来強度 1.2 MW になったときの信号の安定性と線形性を確かめるには、当時の J-PARC でのミュオン強度を遥かに上回るビームを照射できる施設が必要である。そこで、我々はミュオンではないが同じレプトンである電子を大強度で照射できる施設を求め、東北大学電子光理学研究センター(ELPH、現東北大学先端量子ビーム科学研究センター電子光理学研究部門)の電子シンクロトロン入射用線形加速器において約 90 MeV の電子ビームを用いてテスト実験を行った。1 pA の低強度から 10 nA の高強度までの各種強度の電子ビームを EMT に照射して、放射線耐性や安定性、信号の線形性等の調査を行った。EMT は構造上、EMT 本体とプリーダー回路に分かれており、それぞれ複数個を用意して照射の組み合わせを変えることで、放射線劣化が起こった場合、原因はどこのあるのか追及を行った。また、テスト実験では EMT に照射する電子ビームの強度を測定するための CT(Current Transformer)、OTR(Optical Transition Radiation Monitor)と、EMT と信号を比較するための参照用シリコン PIN フォトダイオード、および低強度のビーム強度モニターとビームプロファイルモニター用のシリコン検出器アレイも用いた。ELPH でのテスト実験は 2019 年から 2022 年に渡って 4 回行われ、上記

の各性能を調査した。2023年にはJ-PARCニュートリノビームラインのミュオンピットに場所を移し、7個のEMTを横一列に並べて設置してデータを収集し、現行のSiと同じプロファイルが得られるかの確認も行った。

#### 4. 研究成果

ELPHでのデータ収集の結果、まず放射線耐性については高強度ビームをEMTに照射し続けることで、短時間でJ-PARCの将来強度1.3MW換算の放射線耐性を調べることができ、100日間の照射で約3%の信号強度の低下が観測された。ミュオンモニターの性能要求はニュートリノビーム強度を3%の精度で測定できることであるため、EMTは最低でも100日間使用できることが分かり、現行のシリコンPINフォトダイオードと比べると十分な放射線耐性を持っていることを示すため、ミュオンモニターの後継機として有望である結果となった。100日間の照射以降の放射線劣化もSiと比べて緩やかであり、信号の較正を行うことで交換を行わずともより長期間EMTが使用可能だと考えられている。これはビームタイムの中断を行わないようにするという点で重要である。次に、EMTの放射線劣化の原因について調査された。方法は前述のようにEMT本体とプリーダー回路の組み合わせを変えることで、片方だけを放射線劣化させたりするなど原因の切り分けを行い劣化の調査を行った。その結果、プリーダー回路への放射線劣化の影響は無くEMT本体の構造に劣化の原因があることが判明した。また、EMT本体のダイノードへの印加電圧をかけたものとかけていないものを比べたところでは両者に違いは見られず、印加電圧が原因でないことも分かった。さらに、カソードと1段目のダイノード間を短絡させた改造プリーダー回路を用いて劣化を測定したところ、通常のプリーダー回路と違いが無かったことからカソードも放射線劣化の原因ではないことが確認された。したがって、残る要因を考えるとダイノードの材料であるアルカリ金属とアンチモンの劣化が原因である可能性が高いことが分かった。次にEMTの信号応答の線形性について調べた。その結果、MRの強度500kWと1.3MWの時の1バンチ当たりのEMTの電荷量0.45nCと0.96nCの間において十分な線形性を保つことが確認された。これらを確認した後、EMTをJ-PARCニュートリノビームラインのミュオンピットに持ち込み、現行のミュオンモニターの中心の横一列に7個設置してデータを取得した。MRの陽子ビーム強度700kWでミュオンのプロファイルを現行のミュオンモニターの分布と比較したところSiの分布と重なり、EMTはSiと全く遜色の無い性能を発揮することが示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 K. Abe, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 83
2. 論文標題 Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using $3.6 \times 10^{21}$ protons on target	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	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） 10.1140/epjc/s10052-023-11819-x	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 K. Abe, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using $3.6 \times 10^{21}$ protons on target	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	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） 10.1103/PhysRevD.108.072011	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 K. Abe, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 Measurements of the $\nu_{\mu}$ and $\bar{\nu}_{\mu}$ -induced coherent charged pion production cross sections on $^{12}\text{C}$ by the T2K experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	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） 10.1103/PhysRevD.108.092009	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 K. Abe, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 108
2. 論文標題 First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	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） 10.1103/PhysRevD.108.112009	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 K. Abe, T. Honjo, T. Kobata, T. Okusawa, Y. Seiya, N. Teshima, K. Yamamoto et al. (The T2K Collaboration)	4. 巻 17
2. 論文標題 Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	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) 10.1088/1748-0221/17/10/P10028	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 K. Abe, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 103
2. 論文標題 Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with $3.13 \times 10^{21}$ protons on target	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.103.112008	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 K. Abe, K. Yamamoto et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 103
2. 論文標題 First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single- $\pi^+$ production channel containing at least one proton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.103.112009	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10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山本健裕, 本條貴司, 清矢良浩, 山本和弘, 木河達也, 安留健嗣, 在原拓司, 関矢拓郎, John Nugent, 工藤悠仁, 南野彰宏, Giorgio Pintaudi, 他T2K Collaboration
2. 発表標題 T2K実験横方向ミュオン飛程検出器Wall MRDにおけるヒット時間情報較正装置の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤幸音, Megan Friend, Ian Heitkamp, 本條貴司, 市川温子, 石塚正基, 川村悠馬, 木河達也, 中平武, 中村輝石, 坂下健, 山本和弘, 他T2K Collaboration
2. 発表標題 電子増倍管によるT2K実験ビーム方向測定の実証試験
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川村悠馬, 市川温子, 石塚正基, 木河達也, 佐藤幸音, 中平武, 中村輝石, 坂下健, 清矢良浩, 本條貴司, 松原綱之, 山本和弘, 安留健嗣, Ian Heitkamp, Megan Friend, 他T2K Collaboration
2. 発表標題 T2Kミュオンモニターのための電子増倍管に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 笠間奏平, 市川温子, 瀧藤航一, 中村輝石, 川村悠馬, 清矢良浩, 本條貴司, 山本和弘, 山本達也, 石塚正基, 木河達也, 安留健嗣, 松原綱之, Megan Friend, 中平武, 他T2K Collaboration
2. 発表標題 T2K実験次期ミュオンモニター性能評価のための遷移放射光による電子ビームプロファイル測定
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村悠馬, 石塚正基, 市川温子, 笠間奏平, 木河達也, 佐藤雪音, 坂下健, 清矢良浩, 瀧藤航一, 中村輝石, 本條貴司, 安留健嗣, 山本和弘, 山本達也, Ferdinand Oderich, Megan Friend
2. 発表標題 T2Kミュオンモニター用電子増倍管のビームテストで用いるビームプロファイル測定用64素子Siフォトダイオードアレイの較正
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村妃南, 石塚正基, 市川温子, 中村輝石, 木河達也, 安留健嗣, 清矢良浩, 本條貴司, 山本和弘, 中平武, 松原綱之, Megan Friend, 他 T2K Collaboration
2. 発表標題 CTを用いたT2K実験ミュオンモニター試作機による正負を識別したミュオンの初観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本條貴司, 市川温子, 石塚正基, 笠間奏平, 木河達也, 松原綱之, Megan Friend, 中平武, 中村輝石, 中村妃南, 清矢良浩, 瀧藤航一, 安留健嗣, 山本和弘, 山本達也
2. 発表標題 J-PARCニュートリノビーム大強度化に対応するミュオンモニターの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本達也, 石塚正基, 市川温子, 笠間奏平, 木河達也, 清矢良浩, 瀧藤航一, 中村輝石, 中村妃南, 中平武, 本條貴司, 松原綱之, Megan Friend, 安留健嗣, 山本和弘
2. 発表標題 T2K実験ミュオンモニターに用いる電子増倍管の電子ビーム試験による初期不安定性及び放射線耐性の評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧藤航一, 市川温子, 中村輝石, 笠間奏平, 本條貴司, 中村妃南, 山本達也, 安留健嗣, 石塚正基, 木河達也, 松原綱之, Megan Friend, 清矢良浩, 山本和弘, 中平武, 他T2K Collaboration
2. 発表標題 T2K実験ミュオンモニターのための電子増倍管の温度依存性及び放射線損傷の検証
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村妃南, 石塚正基, 市川温子, 瀧藤航一, 中村輝石, 木河達也, 安留健嗣, 清矢良浩, 本條貴司, 山本和弘, 山本達也, 中平武, 松原綱之, Megan Friend, 他T2K Collaboration
2. 発表標題 T2K実験ビーム運転におけるCTを用いたミュオンモニターの実証試験
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------