

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	なかじま やすひろ 中島 康博
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) A Measurement of Neutrino Charged Current Interactions and a Search for Muon Neutrino Disappearance with the Fermilab Booster Neutrino Beam (フェルミ研究所ブースターニュートリノビームを用いたミューニュートリノ荷電カレント反応の測定およびミューニュートリノ消失事象の探索)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 中家 剛 教授 市川 温子 准教授 小林 達夫 准教授

理 学 研 究 科

京都大学	博士（理学）	氏名	中島 康博
論文題目	A Measurement of Neutrino Charged Current Interactions and a Search for Muon Neutrino Disappearance with the Fermilab Booster Neutrino Beam		
(論文内容の要旨) 本論文では、米国フェルミ国立加速器研究所ブースターニュートリノビームを用いて行った、GeV[10^9 eV]エネルギー領域でのニュートリノ荷電カレント反応の測定、およびその結果を用いたミューニュートリノ消失事象の探索について報告されている。近年の加速器を用いたニュートリノ振動実験では、GeV領域のニュートリノビームが広く利用されているが、このエネルギー領域ではニュートリノ反応モデルの不定性が大きく、ニュートリノ振動測定の主要な系統誤差の一つになっている。本論文では、世界初の炭素標的での荷電カレント反応の断面積測定を行い、このエネルギー領域でのニュートリノ反応の理解を飛躍的に向上させた。また、ミューニュートリノ消失の探索では、近年のLSND実験やMiniBooNE実験によってその存在が示唆されているステライルニュートリノに対し、世界最高感度で強い制限を与えた。 本論文の荷電カレント反応測定は、フェルミ研で行った SciBooNE 実験 (FNAL-E954) からの結果である。SciBooNE 実験では、フェルミ研 8GeV ブースターで生成される大強度 GeV エネルギーのミューオンニュートリノを、陽子標的から 100m 下流に設置したニュートリノ検出器で測定した。検出器はプラスチックシンチレーターを用いた全感知型飛跡検出器を中心に構成されており、その主成分は炭素である。 物理解析においては、ニュートリノ荷電カレント反応により生じるミュー粒子の飛跡構成法を開発し、ミュー粒子の検出効率と運動量測定精度を向上させた。また、イベントトポロジーの異なる 3 つのサンプルを同時にフィットする手法を開発することで、0.25GeV から 3GeV までの広いエネルギー領域において高統計のサンプルを使用することに成功した。さらに、ニュートリノフラックスやニュートリノ反応モデルによる系統誤差を精密に見積もることで、断面積のエネルギー依存性を測定した。これは炭素標的での GeV 領域でのニュートリノ荷電カレント反応断面積の世界初の測定結果である。この測定は、終状態の粒子のうち、ミュー粒子のみを解析に用いたことが大きな特徴である。そのため、測定結果はハドロン終状態のモデルに依存せず系統誤差が小さく抑えられている。これは、GeV 領域のニュートリノ反応を理解する上で、たいへん重要な結果である。 また、本論文では、SciBooNE 実験において測定された荷電カレント及び中性カレント 1π 生成反応断面積の絶対値の評価を行った。この絶対値の評価は、本研究で行ったニュートリノフラックスの系統誤差の精密な評価により初めて可能となった。1π 生成は、ニュートリノ振動の測定においてバックグラウンドとなる重要な反応であり、本結果はニュートリノ振動実験における感度向上に大きく貢献している。 最後に、本荷電カレント反応の測定結果を使って、SciBooNEの下流 440mにある MiniBooNE測定器でのニュートリノ反応数、およびその系統誤差の精密な見積もりを行った。これにより、当初 15%以上あったMiniBooNE実験におけるニュートリノフラックスと断面積による系統誤差を 5-10%程度まで減少させることに成功した。また、SciBooNE-MiniBooNE間でのミューニュートリノ消失探索に対しては、質量二乗差 Δm^2 が $0.5 < \Delta m^2 < 30 \text{ eV}^2$ の領域で世界最高感度を達成した。測定データと比較した結果、優位なミューニュートリノ消失信号は見つからず、$10 < \Delta m^2 < 30 \text{ eV}^2$ の領域で、世界最高感度でステライルニュートリノモデルに対する強い制限を与えた。			

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、ニュートリノ荷電カレント反応断面積の精密測定を行い、さらにその結果を用いたミューニュートリノ消失の探索により、ステライルニュートリノの存在に対し世界最高感度での強い制限を与えた、重要な結果である。ニュートリノ振動の測定は、ニュートリノ世代間混合の解明およびステライルニュートリノの探索に不可欠であるが、ニュートリノ反応断面積の不定性はその探索感度を制限する最大の要因となっている。特に、ステライルニュートリノは、近年の LSND 実験や MiniBooNE 実験からその存在の可能性が示唆されており、非常に注目を集めている。本研究では、米国フェルミ研で行った SciBooNE 実験において、GeV エネルギー領域のニュートリノ荷電カレント反応を炭素標的で世界で初めて測定した。この測定により、ニュートリノ反応モデルの精密な理解が進み、ニュートリノ振動実験の感度向上に貢献している。さらに、この結果を用いて、SciBooNE 測定器から下流 440m にある MiniBooNE 測定器でのニュートリノ反応数の精密な予測を行い、世界最高感度でのステライルニュートリノ探索を行った。

本論文には、ステライルニュートリノを含んだニュートリノ振動の物理、ニュートリノ原子核反応の物理が、これまでに世界で行われた様々な実験結果を俯瞰しつつ、大変分かりやすくまとめられている。実験に関しても、フェルミ研のニュートリノビームライン、SciBooNE 測定器、ニュートリノビームおよびニュートリノ反応シミュレーションに関して明確に記述されている。特に中島氏の貢献は、SciBooNE 実験の測定器制作、データ収集システム開発、物理解析、シミュレーション開発と実験全般に渡っており、本人の理解の深さが読み取れる。

荷電カレント反応の解析では、ミュー粒子の飛跡構成手法の開発、広いエネルギー領域での反応断面積測定を可能にしたニュートリノスペクトラムフィット手法の開発、およびニュートリノフラックスや反応モデルによる系統誤差の見積もりが中島氏の主な業績である。中島氏の開発した、ミュー粒子の飛跡構成法や系統誤差の見積もり手法は、その有用性から他のすべての SciBooNE 実験の物理解析でも共通して使われている。そして、炭素標的における世界初の GeV 領域での荷電カレント反応断面積測定も中島氏の大きな成果である。また、この測定にはミュー粒子のみを用いたため、得られた結果はハドロン終状態のモデルに依存せず、非常に信頼度の高いものとなっている。これにより、GeV 領域のニュートリノ反応モデルの正確な理解が進んだ。

また、ミューニュートリノ消失探索においては、SciBooNE 実験と MiniBooNE 実験両方のシミュレーションを統一的に取り扱うことで、SciBooNE の結果から MiniBooNE の測定に制限を加え、系統誤差を大幅に削減することに成功したことが、中島氏の特筆すべき業績である。ここからも、SciBooNE、MiniBooNE 双方の実験に対する、中島氏の深い理解が見て取れる。得られた結果はステライルニュートリノの存在を世界最高感度で制限するものであり、素粒子物理学の分野で高い価値を有している。

以上のように、共同研究ではあるが、本研究において中島氏の研究の独創性が十分に見てとれる。得られた結果は、炭素標的における世界初の GeV エネルギー領域での荷電カレント反応断面積測定、ニュートリノ振動実験の感度向上への貢献、およびステライルニュートリノへの制限と、素粒子物理学分野、特にニュートリノ物理学の研究に大きなインパクトを与えるものであり、本論文に対する注目度は非常に高い。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成23年1月21日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、申請者は多数の難問にも明確な解答をした。その結果合格と認めた。