

# 論文審査の結果の要旨

氏名 阿久津 良介

本論文は9章からなる。第1章はイントロダクションで、ニュートリノ物理学の基礎と本論文の主題であるニュートリノ反応に伴う中性子測定的重要性が、先行研究に関する現状・課題とともに述べられている。中性子の測定によってニュートリノと反ニュートリノの弁別が可能になるが、反応によって生成する中性子数の予測に不定性が大きく、その数を正確に決定すべきとする。

第2章は本研究でデータを利用した T2K 実験の加速器側でのニュートリノビーム生成について述べられている。本研究は、ニュートリノを多く含むビーム (FHC) と反ニュートリノを多く含むビーム(RHC)についてそれぞれ解析される。第3章では、T2K 実験の後置検出器であるスーパーカミオカンデ(SK)実験について述べられている。特に本論文の結果の系統誤差源となる装置較正について詳しく述べられている。

第4章から6章で本論文の主要な研究方法が述べられる。第4章では本研究で用いるモンテカルロ(MC)計算の詳細が述べられる。特に、T2K 実験ではこれまで扱われてこなかったニュートリノ反応に伴う中性子の反応を取り入れた”hybrid neutron MC”を新たに開発した。第5章は T2K 実験データの選別方法が述べられる。装置の運転状況から、SK データにおいてひとつのミュー粒子が生成されるニュートリノ反応事象の選別までが述べられる。第6章で、本論文の主題である、ニュートリノ反応に伴う中性子事象の選別方法が詳しく議論される。信号事象の MC 計算と、加速器運転のない期間の背景事象データを駆使して中性子事象を選別する方法を議論し、その検出効率と背景事象混入率を求めた。実際の測定に近い状況を再現できるアメリカシウム-ベリリウム線源を用いた検証も行い、先に見積もった中性子検出効率を検証した。また、SK 実験装置の9年間にわたる性能変動も考慮し、その補正方法と系統誤差も見積もった。

第7章で、開発した解析手法を T2K 実験データに適用する。初めにひとつのミュー粒子が生成されるニュートリノ反応事象選別を行った。各種選別パラメータの分布と選別後の事象数が実験と MC 計算でよく一致しており、この選別が正しく機能していることを示した。一方で、ニュートリノ事象に伴う中性子事象の選別を行ったところ、選別後の中性子事象数が MC 計算よりも少ないことが明らかになった。中性子選別の基本的な測定量では、実験と MC 計算の間に明らかな違いは見られず、中性子数の不足が実験装置の理解不足ではないことを示した。生成中性子の運動方向を比較したところ、中性子数の欠損はニュートリノビーム進行方向に強く見られ、物理過程が起源であることを示唆した。

第8章で本論文の結論である平均中性子多重度を求めた。これは、背景事象数と検出効率を補正した中性子の真の生成数に対応する。この値はニュートリノ核子反応での中性子生成、反応原子核内のカスケード効果、原子核から脱出したハドロンと水分子の二次反応(SI)の包括的な測定結果である。12種類の系統誤差源を議論し、SIにおける中性子-酸素反応断面積と事象選別過程の不定性が中性子検出効率に与える不定性が最も大きいと結論した。測定された多重度は、基準となる NEUT モデルの予想に対して 40%少なかった。主要な誤差は統計誤差で、FHC ビームで 2.75 シグマ、RHC ビームで 2.69 シグマの欠損であった。不一致の原因を検討し、核子による SI 反応を今後詳しく理解する必要があることを示した。特に低エネルギー中性子の生成に原因があるとした。

第9章はまとめと展望である。上記結果を整理したのち、40%の不一致が将来のハイパーカミオカンデ実験における CP 位相測定に与える影響を見積もった。今回の測定はまだ統計誤差に支配されており、2020 年から始まる SK-Gd 実験において統計誤差を大きく改善できることを展望した。また、中性子ビームを用いた SI 反応の研究で主要な系統誤差を削減することで誤差を低減し、今後のモデルの改良、将来のニュートリノ・反ニュートリノ事象同定精度向上への提言を行った。

ニュートリノ反応に伴う中性子の測定は、今後一層重要性を増していく。本研究では、世界で初めて加速器ニュートリノビーム反応に伴う水中での中性子数を決定した。現行モデルの不完全さを定量的に示し、その原因を示したことで今後のモデル改良への道筋を示した。本研究が将来のニュートリノ研究に大きく貢献することが期待できる。

なお、本論文の内容は T2K グループにおける共同研究であるが、T2K 実験におけるニュートリノ反応に伴う中性子事象を検出する研究は初めてであり、論文提出者が主体となって解析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。