「測定器開発室優秀修士論文賞」概要

2025 年　　2 月　　25 日

著者	ふりがな 氏　名	おおたに　なおき 大谷　尚輝
表題	原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定のための 新型シンチレーショントラッカーの開発	

☑ 本論文の内容に捏造・改ざん・盗用はない（チェックをお願いします）

論文概要　（全体で 4 ページに収まるようにページを増やして構いません）

研究の背景(第 1 章~第 4 章)

宇宙における物質と反物質の非対称性は物理学の重要な未解決問題の 1 つであり，その解決のための有力候補がレプトンでの CP 対称性の破れである．レプトンでの CP 対称性の破れは，ニュートリノ振動におけるニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いを測定することで精査できる．

T2K 実験は，J-PARC 加速器で生成したニュートリノビームを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで検出するニュートリノ振動実験であり，現在 90%の有意度で CP 対称性の破れを示唆している．T2K 実験は，2027 年までに3σの有意度での CP 対称性の破れの実証を目指しており，そのためには系統誤差の削減が必須である．現在，系統誤差の主要因となっているのがニュートリノと原子核の反応モデルの不定性である．特に，主な信号モードである CCQE 反応$(\nu_\mu + n \to \mu^- + p)$のバックグラウンドとなる 2p2h 反応$(\nu_\mu + n + p \to \mu^- + p + p)$の理論モデルの不定性が問題となっている．2p2h 反応では終状態に 2 つの陽子が放出されるが，それらの陽子の運動量が低く飛跡が短いため，既存のシンチレータ検出器では位置分解能が不十分で検出が困難である．そのため，十分な精度での測定例がなく，複数あるモデルのうちどれが正しいか分かっていない．この問題を解決するために，J-PARC において，原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定実験である NINJA 実験を行っている．原子核乾板はサブミクロンという非常に高い位置分解能を持つため，他実験では観測不可能な$200\ \mathrm{MeV}/c$程度の低運動量の陽子も捉えることができる．

図 1 に NINJA 実験の検出器配置を示す．ECC とは，原子核乾板と標的物質(水，鉄)を交互に重ね合わせた検出器であり，ニュートリノが ECC の標的物質と反応することで放出された荷電粒子を原子核乾板で検出する．また，ニュートリノ反応で放出されたミューオンは下流のミューオン検出器で同定を行う．原子核乾板は優れた位置分解能を持つ一方で時間情報を持たず，実験中に生じた全ての飛跡が蓄積され，そのほとんどがニュートリノ反応とは関係のない宇宙線によるものである．そのため，ミューオン検出器で検出されたミューオンの飛跡を ECC と直接接続しようとすると，原子核乾板内の飛跡の候補が多すぎてマッチングできず，原子核乾板に蓄積された飛跡の中でどれがニュートリノ反応によるものか分からない．そこで，優れた位置分解能と時間情報を持つシンチレーショントラッカーを間に設置して飛跡のマッチングを行う．

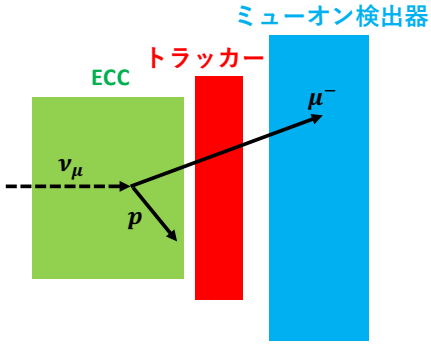

図 1. NINJA 実験の検出器の配置

NINJA 実験では，これまで 2 回の物理ランを行ってきたが，統計量が少なく，今後統計量を増やす

ことが課題である．そこで，本研究では，過去の1 m × 1 mのトラッカーよりも大きな1.3 m × 1.4 mの新型トラッカーを開発した．それにより，2025 年秋に開始予定の次回の物理ランで用いる標的物質の質量を約 1.8 倍に増やして，より多くの統計量でのデータ取得を可能にした．

新型シンチレーショントラッカーの開発(第 5 章~第 10 章)

① デザインと位置検出の原理(第 5 章)

過去のトラッカーは棒状のシンチレータを並べた構造となっていたが, 同じ構造のまま面積を大きくするとシンチレータの数だけチャンネル数が増えてしまう．そこで，チャンネル数を増やさずにトラッカーを大型化するために, 図 2 のような新たなデザインのトラッカーを考案した. 新型トラッカーは 1 枚の散乱体入りプラスチックシンチレータから成り，溝に埋められた波長変換ファイバーと光検出器 MPPC によって，通過した荷電粒子により発生するシンチレーション光を検出する．散乱体入りシンチレータを用いることで，シンチレーション光を局在化させ，荷電粒子の通過位置に近いチャンネルほど検出光量が大きくなることを用いて位置再構成を行う．これにより，ファイバーの間隔 10 mm よりもはるかに高い精度で位置再構成ができ，チャンネル数を増やすことなくトラッカーの大型化を実現した．

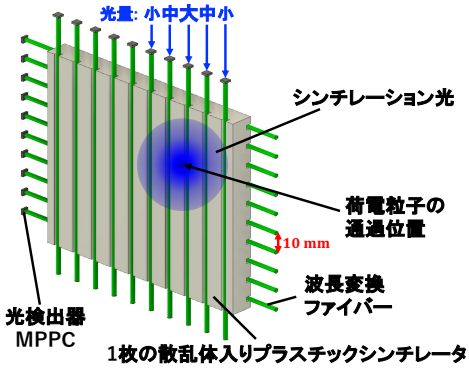

図 2. 新型トラッカーのデザインと位置検出の原理

② 光量確保およびシンチレーション光の局在化のための工夫(第 6 章)

要求位置分解能 4.6 mm を達成するためには，十分な光量の確保とシンチレーション光の局在化が重要である．そこで，ファイバーの端面にアルミ蒸着加工を施すといった十分な光量の確保のための工夫を考案し，Geant4 を用いたシミュレーションと宇宙線を用いた測定により，光量の向上率と加工の容易性の検証を行った．その結果，実測値で約 5.6 倍光量が向上することが分かり，その結果を元にデザインの詳細を決定した．また，散乱体入りシンチレータサンプルを用いた宇宙線測定によりシンチレーション光の局在化の検証を行った結果，散乱長が約 1 mm という結果が得られ，シンチレーション光を十分に局在化できていることを確かめた．

③ 1 粒子ヒットイベントの位置再構成方法(第 7 章)

1 粒子が新型トラッカーにヒットするイベントについて，光量重心を用いた位置再構成を考案した．例えば，各ファイバーで観測された光量の分布が図 3 のようなイベントの位置再構成を考える．横軸はファイバーの位置であり，各ビンの高さは各チャンネルの検出光子数を表す．このイベントの場合，光量重心は53.1 mmと求まる．ただし，光量重心は真の位置と完全には一致しないため，Geant4 を用いたシミュレーションにより光量重心の平均値と真の位置の対応関係を事前に求めておき，その対応

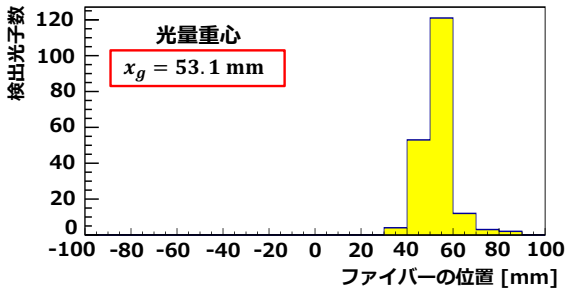

図 3. 1 粒子ヒットイベントの光量の分布の例

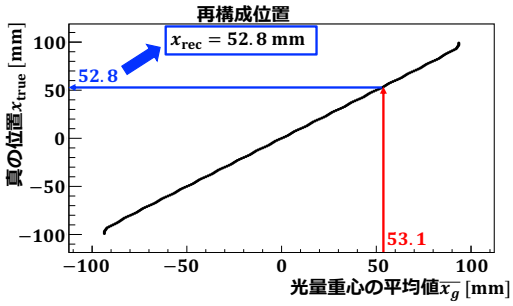

図 4. 光量重心の平均値と真の位置の対応関係

関係を用いて再構成位置を求める．この例の場合，再構成位置は図 4 のように52.8 mmとなる．Geant4を用いたシミュレーションにより，この再構成手法でうまく位置を再構成できることを確かめた．

④ 陽電子ビームによる性能評価(第 8 章)

シミュレーションでは位置再構成がうまくいくことを確かめられたが，シミュレーションは理想的な状況下のものであるため，実際に小型試作機を用いてビーム照射試験を行うことが必要だと考えた．そこで，実測による位置再構成手法の検証に加え，最適な散乱体濃度を決定するために，散乱体の濃度を変えた 3 種類の新型トラッカー小型試作機(10 cm × 10 cm)を用いて陽電子ビーム照射試験を東北大学先端量子ビーム科学研究センターで行った．その結果，うまく位置再構成が行えることが確かめられた．最も散乱体の濃度が高い小型試作機の位置分解能が最も良いことが分かり，実機で用いるシンチレータの散乱体濃度をその濃度に決定した．系統誤差を含めた位置分解能は，垂直入射のときで 1.4 mm，入射角45°のときで 1.8 mm という結果となり，要求位置分解能 4.6 mm よりも十分小さい分解能で再構成できることが分かった．

また，新型トラッカー実機では，複数のシンチレータをオプティカルセメントで貼り合わせて一体化したものを用いる．そこで，貼り合わせによって生じる境界の光学的効果を調べるために，4 枚のシンチレータを貼り合わせた小型試作機についても陽電子ビーム照射試験を行い，1 枚のシンチレータから成る小型試作機と位置再構成結果を比較した．その結果，貼り合わせによってシンチレータの境界が生じることが位置分解能に与える影響は十分小さいことを確かめられ，新型トラッカー実機を複数のシンチレータを貼り合わせて製作しても問題ないことが分かった．

⑤ 多粒子ヒットイベントの場合も含めた位置再構成方法とニュートリノ反応シミュレーションを用いた性能評価(第 9 章~第 10 章)

これまでは 1 粒子ヒットイベントにおける位置再構成のみを考えてきたが，実際には約 80%のニュートリノ反応イベントで 2 粒子以上が同時にヒットする．そこで，次のような多粒子ヒットの場合も含めた位置再構成方法を考案した．まず，1 粒子ヒットだと仮定してχ^2を計算する．

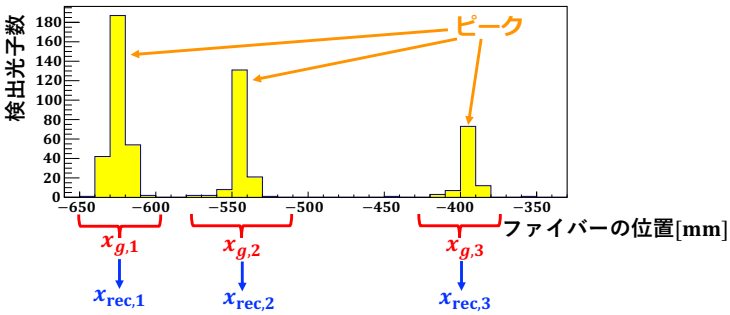

図 5. 多粒子ヒットイベントの光量の分布の例

多粒子ヒットの場合は光量の分布が 1 粒子ヒットの場合と大きく異なるため，χ^2が大きくなる．このことを用いて，χ^2が閾値よりも大きい場合は多粒子ヒットイベントと判定し，小さい場合は 1 粒子ヒットイベントと判定する．次に，1 粒子ヒットイベントと判定された場合は③で説明した方法を用いて位置再構成を行う．また，多粒子ヒットイベントと判定された場合は，図 5 のように，光量の分布におけるピークを探索し，各ピークの周りで光量重心を計算し，光量重心の平均値と真の位置の対応関係を用いて再構成位置を求める．ニュートリノ反応シミュレーションを用いて実際の状況での新型トラッカーの位置分解能を見積もったところ，要求位置分解能 4.6 mm よりも良い分解能 1.2 mm で再構成が可能であることが分かった．

NINJA 実験物理ランで予想される物理結果と今後の展望(第 11 章~第 12 章)

図 6 はニュートリノ反応シミュレーションにより見積もった，NINJA 実験物理ランで期待される陽子 2 本のイベントにおける 2 つの陽子のなす角度の分布である．CCQE 反応と比較すると 2p2h 反応は 2 つの陽子のなす角度が大きくなる傾向がある．このような特徴を用いて 2p2h 反応の存在の有無の検

証を行い，様々なモデルで行ったシミュレーションと比較することで 2p2h 反応モデルに制限を加えることができる．

本研究では新型トラッカーのデザインを決定し，要求位置分解能を満たすことを確認した．次のステップとして，新型トラッカー実機の製作に取り組む．そして，2025 年秋からは，本研究で開発した新型トラッカーと原子核乾板を用いた大統計でのニュートリノ反応精密測定を行う．それにより，2p2h 反応モデルの不定性を削減することで T2K 実験における系統誤差を削減し，2027 年までに3σの有意度での CP 対称性の破れの実証を目指す．そして，2027 年に開始予定のハイパーカミオカンデ実験における5σの有意度での CP 対称性の破れの発見へと繋げる．

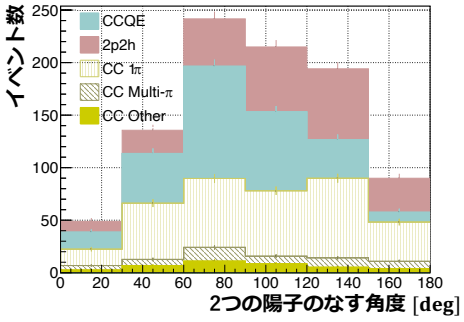

図 6. NINJA 実験物理ランで期待される陽子 2 本のイベントにおける 2 つの陽子のなす角度の分布

アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で 4 ページ以内に収まる範囲でページを増やして構いません。)

通常，プラスチックシンチレータを用いた荷電粒子の位置検出には，複数の棒状のシンチレータを並べた検出器が用いられ，どのシンチレータにヒットしたかによって位置を特定する．しかし，このタイプの検出器では，シンチレータの幅によって位置分解能が制限される．本研究で開発したトラッカーは，1 枚のシンチレータ板を用い，検出された光量の分布に基づく新しい検出原理で位置を特定する．これにより，ファイバーの間隔 10 mm よりもはるかに小さな位置分解能(1~2 mm)を実現し，チャンネル数を増やさずに検出器を大型化することを可能にした．同様の検出原理で十分な性能を達成したトラッカーの例はこれまでになく，測定器技術分野において大きな貢献を成し遂げられたと考えている．十分小さな位置分解能を達成するために，次のようなことを力を入れて取り組んだ．

まず，光量の向上のための工夫と適切な散乱体濃度の決定である．散乱体入りシンチレータは，散乱体による光の吸収の効果により，通常の散乱体が入っていないシンチレータよりも光量が小さくなる．そのため，できるだけ光量を高くする工夫をすることが重要であり，ファイバーの端面にアルミ蒸着加工を施すといった工夫により約 5.6 倍光量を向上させることができた．また，必ずしも散乱体の濃度が高ければ高いほど位置分解能が良くなるわけではなく，シンチレーション光の局在化具合が高くなることと散乱体による光の吸収で光量が低下することのバランスで最も位置分解能が良くなる散乱体濃度が決まることが予想される．そこで，複数の小型試作機を用いた陽電子ビーム照射試験により，適切な散乱体濃度を決定した．陽電子ビーム照射試験では，共同利用申込書の作成と課題採択説明会での発表を行うところから自ら行い，準備，当日のビーム照射試験の実施，データの解析などの一連のプロセスを主体的に行った．

また，光量の分布から位置を再構成する確立された手法はなかったため，位置再構成方法を一から考える必要があり，シミュレーションによる補正を組み込んだ光量重心ベースの位置再構成方法を新たに開発した．そして，その再構成手法がうまくいくことをシミュレーションおよび実測(陽電子ビーム照射試験)により確かめた．