

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540276
 研究課題名（和文） 系統誤差 0.5%を実現する原子炉ニュートリノ振動測定装置の開発
 研究課題名（英文） Development of a Reactor-Neutrino Oscillation Detector
 that Achieves 0.5% Systematic Uncertainty
 研究代表者
 久世 正弘（KUZE MASAHIRO）
 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：00225153

研究成果の概要：

次世代の原子炉ニュートリノ実験によるニュートリノ振動パラメータ測定では、測定器に起因する系統誤差を非常に小さくコントロールすることが肝要である。本研究では、キャリブレーション装置の要求性能をシミュレーションによって算出し、実際にその性能を満たす3次元駆動装置のプロトタイプを設計、製作して要求性能を満たすことを確かめた。これにより系統誤差 0.5%を実現する実機への道が拓け、所期の目的を達成した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：物理学（素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理）

キーワード：ニュートリノ振動、原子炉、KASKA、キャリブレーション、ロボットアーム

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動とはニュートリノの種類（フレーバー）が飛行中に変化する現象であるが、3種類のフレーバー間で3種類の振動現象が存在する。そのうち2種類はすでにスーパーカミオカンデ、カムランド等の実験によって発見され、振動（フレーバー混合）の大きさを表す振動角（ θ_{12} , θ_{23} ）は大きな値を持っていることが確かめられた。

これに対し、未発見の最後の振動の大きさ（ θ_{13} ）は実験的上限値が与えられているのみであり、これがゼロであるのか、どの程度の大きさなのかは素粒子の標準模型を構築

する上での大問題である。

また、クォークセクターではCPの破れ（小林・益川行列）が実験的にも確立しているが、レプトンセクターでのCPの破れはまだ観測されていない。これを観測するためにはすべての振動角が有限であることが必要条件であり、将来の大規模ニュートリノ振動実験の計画立案のためにも θ_{13} の大きさを知ることが喫緊の課題である。

CP対称性の破れは、よく知られているようにビッグバン直後の宇宙で粒子と反粒子が対消滅した後に物質のみが残った僅かな非対称性の鍵を握る現象であり、 θ_{13} 角測定は

現代物理学の根本的課題の解決につながる成果と期待されている。

θ 13 測定には加速器を用いた長基線振動実験で μ ニュートリノから電子ニュートリノへの変化を検出する方法と、原子炉から発生する反電子ニュートリノの欠損を測定する方法があり、2つの方法で独立に測定することにより、より多くの物理的情報を引き出せることがわかっている。

加速器実験では日本の T2K 実験等が計画されており、原子炉実験ではフランスの Double Chooz 実験が準備中である。原子炉実験の次世代実験として、日本の柏崎刈羽原子力発電所を用いる KASKA 実験計画があり、その詳細な検討が進められている。

2. 研究の目的

原子炉ニュートリノ振動実験では微小な欠損量を測定するため、高感度で θ 13 を検出するには測定誤差が 1% を切る精度の実験が必要になる。そのため、統計誤差（原子炉の出力、測定器の体積等から決まる測定事象の数に起因する誤差）も系統誤差（測定方法の不定性に起因する誤差）も 0.5% を実現する新しい実験の設計を行っている。

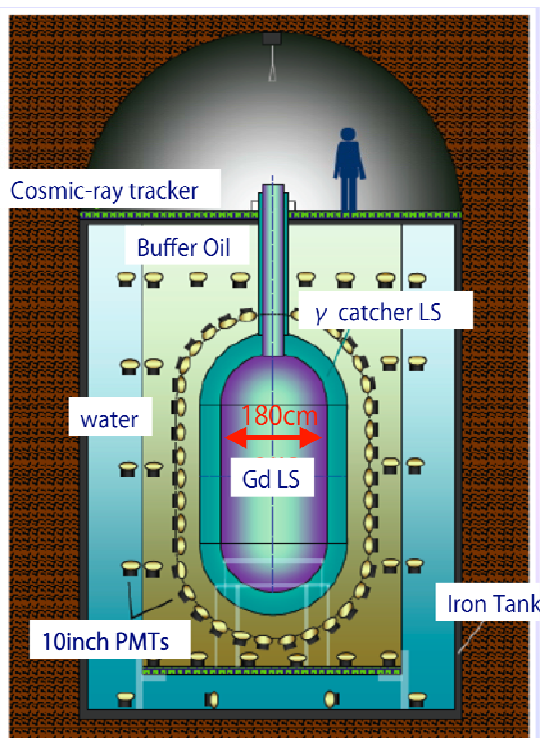
系統誤差には様々な要因があり、原子炉の出力や反応断面積に関する不定性は前置検出器（振動が始まる前の距離で測定）と後置検出器（振動が大きくなる距離で測定）の事象数の比を取ることで取り去ることができる。残る要因は、二つの測定器の性能の差に起因するものとバックグラウンドの推定に関わるものが主になる。

このうち、前者の誤差に関しては、如何に二つの測定器が同一の性能を持つように制御できるか、即ち測定器較正（キャリブレーション）が決定的に重要になる。従来の大型液体ニュートリノ測定器では測定器中心軸に沿ってキャリブレーション装置（放射線源や光源）を移動する 1 次元駆動装置を備えたものが殆どであったが、KASKA のような次世代実験では 3 次元駆動装置が必要となる。

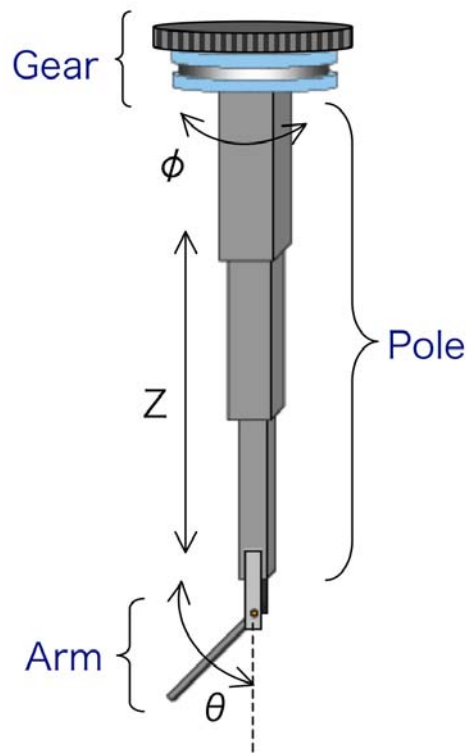
本研究の目的は、0.5% の系統誤差を実現させるために、原子炉ニュートリノ測定装置に必要な 3 次元キャリブレーション装置を設計し、期待される性能を発揮させることを実証することにある。また、装置の性能が θ 13 測定にどのように影響するか、実際の装置に即したシミュレーションを行い確かめることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

KASKA 測定器のデザインを右上に示す。中央の GdLS と書かれた領域がターゲットボリュウム（ガドリニウムを含む液体シンチレータ）であり、この部分のキャリブレーション装置の開発が目的である。



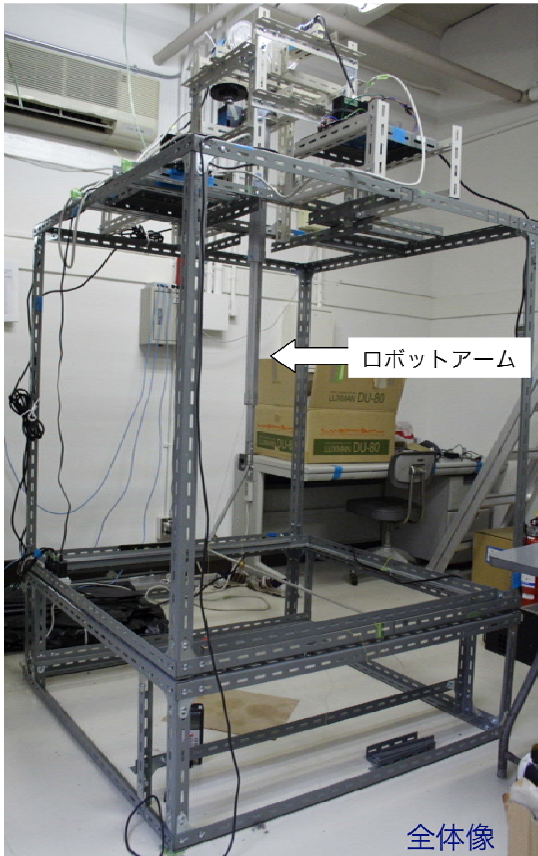
まず、3 次元的にキャリブレーションソース（放射線源または光源）をターゲットボリュウム内で自由に配置できるロボットアーム型キャリブレーションシステムの小型プロトタイプを設計し、製作した。下図にその仕組みを示す。



回転ギアを用いて ϕ 方向、伸縮するポールで Z 方向、角度の変えられるアーム部分で θ

方向の3軸の自由度を持つ。材質はシンチレータ溶媒との反応を避けるため、アルミニウムを用いた。

プロトタイプのは約 170cm で、実機のサイズのおよそ 3 分の 1 である。伸縮ボールと曲げアームの制御にはステンレスワイヤによる引っ張り機構（および自重による戻し）を採用した。回転ギアも含め、3 つのステッピングモータをマイコンで制御して動かしている。実際に製作したプロトタイプの写真を以下に示す。



このプロトタイプロボットアームを仮想ターゲット容器内の様々な位置に動かし、計算した目標位置との差の較正、および位置の再現性を計測した。位置測定にはレーザー距離計等を用いた。

次に、3次元キャリブレーションシステムによる検出器応答の位置依存性を、どれくらいの位置精度で求める必要があるか（即ち、上記ロボットアームの位置再現性の要求性能）を、Geant4を用いたKASKA検出器シミュレーションによって見積もった。

KASKA 実験の実機のジオメトリを Geant4 で再現し、想定している放射線源 (Co, Cs, Am-Be) からの γ 線をターゲット容器内の様々な場所で発生させ、再構成された γ 線エネルギーの位置依存性を求めた。位置依存性は 10% にも上り、キャリブレーションの必要性が確認された。

さらに、この放射線源が想定された位置か

らずれた場合を仮定し、それを知らずに較正を行ってしまった場合に、どれだけエネルギースケールがずれるかを算定した。そのずれは、ニュートリノ候補事象を選択するときのエネルギーカットのずれとなり、事象の選択効率の誤差となって最終的に $\theta 13$ の誤差となって現れる。

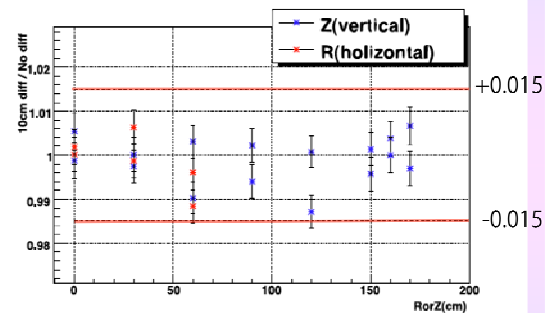
以上の見積りを、詳細なシミュレーションに基づいて行った。

4. 研究成果

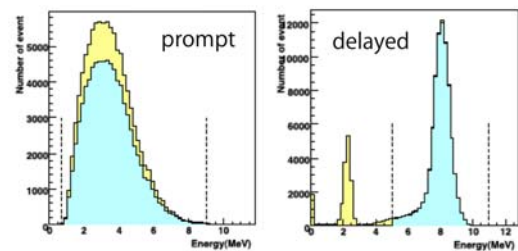
ロボットアームの位置の再現性は、3次元方向の絶対値にして 22mm となった。この数字の内訳を、3軸それぞれの移動に起因するものに分解するために、特定の座標移動における誤差を見積もるための実験も行った。

その結果、アームの回転 (θ) 方向に 18mm、水平回転ギア (ϕ) 方向に 10mm、伸縮の Z 方向に 5mm の誤差を持つことがわかった。それぞれの要因（機械的な緩みやワイヤの重なり等）も特定され、この数字は今後改善の可能性もあることもわかった。

プロトタイプの大さと実機の大さの関係から、KASKA 実験での精度を見積もると、現時点から何も改善を行わない場合でも 60mm の精度で位置決めをできることがわかった。



また、シミュレーションの結果では、例えば位置決め精度が 100mm の誤差を持つとしても、エネルギースケールへの影響は 1.5% であり（上図）、これはニュートリノ事象の選択効率に換算して 0.2% の系統誤差につながるということがわかった（下図）。他の要因による系統誤差を 0.5% とした場合、 $\theta 13$ の感度に対する影響は 0.0144 \rightarrow 0.015 となり（次頁）、無視できる程度であると判明した。



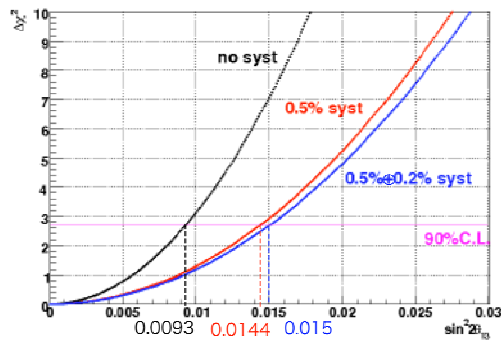
即ち、現在の設計でも 60mm の精度の 3次元キャリブレーションシステムの構築は可能であり、これはシミュレーションからの要

求精度 100mm を既に下回っている。

以上、シミュレーションとプロトタイプ製作双方の結果から、3次元キャリブレーションの要求精度に関しては0.5%の系統誤差を持つ原子炉ニュートリノ振動測定器の製作は可能であるという結論が得られ、計画実現に見通しがつけられた。よって本研究の所期の目的は達成されたと言える。

今後は、実際のハードウェアの液体シンチレータへの影響の見積りなど、より具体的な検討を進める段階に入ったといえる。さらに、キャリブレーション以外の系統誤差の要因、例えばバックグラウンドの見積りなどもシミュレーションにより詳細を見積もる必要がある。

現在建設中の Double Chooz 実験が平成 21 年度中には動き出すので、そのデータから、例えば見積りの難しい高速中性子起源のバックグラウンドなどについての新しい知見が得られるであろう。



(最終的な θ_{13} への感度予測の図)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

1. 吉野亜弥、古田久敬、石塚正基、久世正弘、「KASKA 実験におけるキャリブレーションシステムへの要求性能」、日本物理学会第 64 回年次大会、2009. 3. 30、立教大学 (東京都)

2. 吉野亜弥、古田久敬、久世正弘、「KASKA 実験におけるキャリブレーションシステムの研究」、日本物理学会第 63 回年次大会、2008. 3. 24、近畿大学 (東大阪市)

[その他]

吉野亜弥、「原子炉ニュートリノ実験における系統誤差軽減のためのキャリブレーションシステムの開発」、東京工業大学理工学研究科基礎物理学専攻修士論文、2009 年 2 月

ホームページ

<http://www-kuze.phys.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久世 正弘 (KUZE MASAHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00225153

(2) 研究分担者

末包 文彦 (SUEKANE FUMIHIKO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10196678

(2007 年度)

(3) 連携研究者

末包 文彦 (SUEKANE FUMIHIKO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10196678

(2008 年度)