# T2K 実験新型ニュートリノ検出器のためのシンチレータキューブ 品質検査システムの開発

京都大学大学院理学研究科 高エネルギー物理学研究室

#### 谷 真央

#### 2021年2月27日

### 1 はじめに

T2K 実験は, J-PARC 加速器で生成されたニュートリノビームを, 生成点から 280 m の位置に置かれた前置検出 器および 295 km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデで測定する長基線ニュートリノ振動実験であり, ニュート リノにおける CP 対称性の破れの発見等を目標としている.

ニュートリノにおける CP 対称性の破れの検証のために,ニュートリノ・原子核反応の不定性の削減が重要課題で あり,これを解決するため前置検出器のアップグレードが行われる.その際に新たに導入される Super FGD は,約 1 cm<sup>3</sup>のキューブ状のプラスチックシンチレータ(以降,単にキューブと呼ぶ)を3次元方向に約200万個並べた ニュートリノ検出器であり,ニュートリノ反応で生成される荷電粒子によるシンチレーション光を,各キューブに3 方向から開けられた穴に通した波長変換ファイバーと光検出器 MPPC で読み出す.従来の飛跡検出器 FGD に比べ, 大角度に散乱した荷電粒子の飛跡や,低運動量粒子の短い飛跡に対しても高い感度をもつ.Super FGD の概念図と キューブの写真を図1に示す.



図1 Super FGD の概念図(左)とそれを構成するプラスチックシンチレータキューブ(右).

Super FGD を構成するキューブは製造時に形状の個体差が生じる.特に,大きさには約 20 µm,ファイバーを通 す穴の位置には約 80 µm のばらつきがある.このキューブを 3 次元的に大量に積層し Super FGD を組み上げる際, 単に並べるだけでは穴の位置が揃わず全てのファイバーを通すことができないという問題が生じる.そこで組み上げ る前にキューブの形状について品質検査を行う必要がある.現在,人の手による品質検査が行われているが,この検 査手法では定量的な評価が行えず,また膨大な時間と労働力が必要になるという問題がある.そこで,キューブを撮 影し,画像解析に基づいて自動で品質検査を行う手法を開発した.

また、現在進行中の Super FGD の組み上げ手法ではキューブとファイバーが互いに支え合うような状態となり、

ファイバーに大きな応力がかかり折れてしまうおそれがあるという問題があ る.そのため、図2のように薄いシートにキューブを並べて超音波溶着によっ て固定し、板状にしたものを積層し、最後にファイバーを通すという新しい組 み上げ手法を開発している.この手法ではキューブが固定され独立には動かな いので、ファイバーに大きな応力がかからないことが期待される.ただし、は じめにキューブを固定してしまうので、予めそれらの穴の位置を揃えなければ ファイバーを通すことができない.そこで、開発した自動システムによる品質 検査の結果をもとに、隣り合うキューブでの穴の位置が揃うような並べ方を検 証した.



# 2 シンチレータキューブ自動検査システムの開発

図 2 シートにシンチレータキ ューブを固定したもの.

まず,再現性の高いシンチレータキューブ撮影台の製作と,1つのキューブ ューブを固定したもの. につき5秒程度の短時間で6面の撮影,画像解析,選別までを自動で行う検査システムを開発した.自動検査システムと撮影点の写真を図3に示す.



図3 シンチレータキューブ自動検査システム(左)と撮影点1でのキューブ撮影の様子(右).

キューブを撮影台に乗せ装置を 45°回転させると、その撮影台は3台のカメラが設置された撮影点1に移動する. そこでキューブの3つの面が撮影される.その後さらに装置を 45°回転させると、図4のようにキューブが撮影台の 上で転がることで、キューブの残りの3面が撮影可能となり、撮影点2で用意された別のカメラ3台によって撮影さ れる.このようにして得られた6枚の画像に、後述する独自の画像解析アルゴリズムを適用することで、キューブの 大きさ、ファイバーを通す穴の位置を測定する.その結果に基づき使用可能なキューブとそうでないものに選別する. 撮影点2からさらに装置を 45°回転させるとキューブが撮影台から落下し、床に置かれた箱に入る.その途中経路に 設置された選別弁が画像解析の結果に基づいて動き、キューブはそれに誘導されるように選別結果ごとに異なる箱に 回収される.

撮影した画像はオープンソース画像処理モジュール openCV を用いて画像解析を行った.はじめに openCV に標 準実装されている関数を用いて,キューブの穴と輪郭を検出した.その上でさらに検出精度を向上させるために,撮 影時のキューブの傾きの補正や,穴の縁を円でフィッティングすることでより詳細な穴の位置検出を行うといった独



図4 キューブ撮影台(CAD図)を用いたキューブ撮影の原理.撮影点1で1,2,3面の撮影を行った後,検査 システムを回転させると,撮影台の上でキューブが転がりながら移動し,残りの4,5,6面が現れる.撮影点2 でこれらの面を撮影することで,6面全ての画像を取得する.

自の画像解析アルゴリズムを開発し適用した.これにより、キューブの大きさと穴の位置を 10 μm 程度の精度で抽 出することが可能となった.これらのパラメータに条件を設けることでキューブの選別を行う.

すでに人の手による検査が行われたキューブを用いて本検査システムの試運転を行うと、人の手による品質検査 の結果を 80 % 以上の割合で再現する結果となった.結果を再現していないものについても、人の手による非定量 的な検査によって不適切に選別されたキューブを本システムによって正しく選別できている可能性がある.しかし、 Super FGD の組み上げのためにキューブに課すべき適切な条件は明らかでないので、明確な解釈はできない.

その一方で、未検査のキューブを用いて本システムの試運転を行うと、キューブの製作時期によって、大きさや穴 の位置のばらつきが異なっていることが確認された.薄いシートにキューブを固定して検出器を組み上げる方法の場 合、穴の位置のばらつきが大きいとキューブを無作為に並べてしまうと穴の位置が揃わず、ファイバーを通すことが できない.そこでキューブの各面の穴の位置のばらつきを考慮した並べ方を行うことによって、ファイバーを通すこ とができるようになるか、トイモンテカルロシミュレーションによって試験を行った.さらに実際のキューブをトイ モンテカルロシミュレーションと同様の方法で並べたときに、ファイバーを通すことができるかどうか確認した.

## 3 シンチレータキューブの並べ方の最適化

キューブには3方向から波長変換ファイバーを通す.まずシートに対して垂直方向の穴の位置が揃っていないと, シートにキューブを固定したものを複数枚重ねた際に,それらに対して垂直方向にファイバーを通すことができない. そのため,この穴の位置が確実に揃うよう,図5のように等間隔に位置決めピンを立てた形状のキューブ整列ジグを 用いてキューブを並べることとした.



図5 キューブ整列ジグ. 位置決めピンをキューブの穴に挿すことでキューブを並べる.

次に,残りの2つの穴についても位置を揃える必要がある.穴の位置の2次元分布は図6左のようになっている. この2次元分布を図中A,B,C,Dとあるように複数の領域に分けることで,穴の位置の平均からのズレの傾向に よってキューブを分類することを考えた.2つの穴それぞれについて穴の位置で4通りに分類すると,キューブは全 16通りに分類されることになる.このように分類したキューブを図6右のように並べると,キューブ列ごとに穴の位 置のズレの傾向が同じになるのでファイバーが通るようになることが期待される.



図 6 キューブの穴の位置の 2 次元分布(左)と,穴の位置のズレの傾向でキューブを分類し,分類ごとにキューブを並べる概念図(右).

トイモンテカルロシミュレーションを用いて,図6右のようにキューブを8×8個並べた場合に隣り合うキューブ 間での穴の位置の差を計算すると,99.98 %の8×8個のキューブセットで隣り合うキューブ間での穴の位置の差が 小さく,正しくファイバーが通ることが確認された.また,穴の位置の分類を更に細かくし,8通りの分類で同様の 計算を行うと,99.998 %以上の割合で正しくファイバーを通すことができることが確認された.このような並べ方 を行うことで,Super FGDを構成する全てのキューブにファイバーを通すことができるようになると考えられる.

最後に,実際のキューブを穴の位置のズレによって分類し,トイモンテカルロシミュレーションと同様にキューブ を並べ,実際にファイバーを通すことができるかどうか確認した.図5のキューブ整列ジグを用いて図7のように 8×8個のキューブセットを5個製作すると,これら全てで穴の位置が揃い,全てのファイバーを通すことができた. また,分類を行わず無作為にキューブを並べた場合についても同様にキューブセットを5個製作した.それらのう ち,3個では穴の位置が揃っておらずファイバーが通らない箇所があった.ファイバーに応力がかかる箇所は全ての キューブセットで見られた.以上のことから,穴の位置のズレによってキューブを分類すると,統計的に有意にファ イバーが通りやすくなることが確認できた.



図 7 整列ジグを用いて分類後のキューブを並べている様子(左,中).並べたキューブをシートに溶着する代わ りにマスキングテープで固定し,2方向からファイバーを通した様子(右).