

## 修士論文

# 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 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

学生番号 0530-31-4286

谷 真央

2021年1月27日

## 概要

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  $1 \text{ cm}^3$  のキューブ状のプラスチックシンチレータを 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、各シンチレータキューブに 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 を構成するシンチレータ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  $20 \mu\text{m}$ 、ファイバーを通す穴の位置には約  $80 \mu\text{m}$  のばらつきがある。このシンチレータキューブを 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、シンチレータキューブを撮影し、その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 つのシンチレータキューブにつき 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。シンチレータキューブの大きさと穴の位置を  $10 \mu\text{m}$  程度の精度で抽出し、それをもとに使用可能なシンチレータキューブを選別する独自の画像解析アルゴリズムを開発し、試運転により有用性を実証した。

さらに、現在、進行中の検出器の組み上げ手法ではシンチレータ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。そのため、薄いシートにシンチレータキューブを並べ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。この手法ではシンチレータ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、はじめにシンチレータ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、隣り合うシンチレータキューブでの穴の位置が揃うような並べ方を検証した。

シンチレータキューブを、穴の位置のズレの傾向によって分類し、ズレの傾向の近いシンチレータキューブを同じ列に並べることでファイバーが通りやすくなると考えられる。適切な分類を行うことで、シンチレータキューブの穴の位置が揃い、全ての穴にファイバーを通すことができることをトイモンテカルロシミュレーションによって確認した。また実際にシンチレータキューブを本検査システムで検査・分類し、分類にしたがって組み上げの際の基本単位となる  $8 \times 8$  個のシンチレータキューブのセットを 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。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>ニュートリノ</b>	<b>1</b>
1.1	ニュートリノ	1
1.2	ニュートリノ振動	1
1.3	これまでのニュートリノ振動実験	4
1.4	ニュートリノの未解決問題	5
<b>第2章</b>	<b>T2K 実験</b>	<b>8</b>
2.1	T2K 実験	8
2.2	ニュートリノビーム	8
2.2.1	J-PARC	8
2.2.2	ニュートリノビームの生成	9
2.2.3	Off axis 法	9
2.3	前置検出器	11
2.3.1	INGRID	11
2.3.2	ND280	11
2.3.3	WAGASCI / Baby MIND 検出器	12
2.4	後置検出器 スーパーカミオカンデ	14
2.5	T2K のビームエネルギーにおけるニュートリノ反応	15
2.6	T2K 実験のこれまでの測定結果	17
2.7	T2K 実験の今後の課題	18
2.7.1	ND280 アップグレード計画	19
<b>第3章</b>	<b>Super FGD</b>	<b>22</b>
3.1	Super FGD	22
3.1.1	プラスチックシンチレータキューブ	22
3.1.2	波長変換ファイバー	23
3.1.3	光検出器 MPPC	24
3.1.4	信号読み出しの電子学	25
3.2	期待される性能	25
3.3	シンチレータキューブ組み上げまでの流れ	27
3.3.1	シンチレータキューブの品質検査	27
3.3.2	釣り糸を用いた仮組み上げ	28

3.4	シンチレータキューブ組み上げの現状・問題点	29
3.4.1	現在の組み上げにおける懸念事項	30
3.4.2	画像解析を用いた品質検査, 超音波溶着によるシンチレータキューブの組み上げ	31
<b>第4章</b>	<b>シンチレータキューブ品質検査システム開発</b>	<b>34</b>
4.1	検査システムの概要	34
4.2	検査システムに要求される性能	34
4.3	検査システムの全体像	35
4.4	キューブ撮影台の開発	37
4.4.1	回転円盤	37
4.4.2	キューブ台座	38
4.5	必要となるハードウェアとその制御	42
4.5.1	カメラ	42
4.5.2	ステッピングモーター	42
4.5.3	サーボモーター	44
4.5.4	Arduino を用いたモーター類の制御	46
4.6	検査システムの組み上げ	47
<b>第5章</b>	<b>画像解析ソフトウェアの開発</b>	<b>50</b>
5.1	画像解析の概要	50
5.2	画像処理ライブラリ OpenCV とキューブ画像の取得	51
5.3	OpenCV 標準関数による画像処理	51
5.3.1	画像の前処理	52
5.3.2	キューブの輪郭検出	53
5.3.3	ハフ変換を用いた図形検出	54
5.4	シンチレータキューブ検査のための詳細な画像解析	58
5.4.1	画像の回転補正	59
5.4.2	表面の出っ張りの検出	60
5.4.3	穴の縁の円フィット	61
5.4.4	パラメータ抽出	66
5.5	撮影条件に合わせたパラメータの補正	66
5.6	測定精度の評価	68
<b>第6章</b>	<b>検査システムの試運転と測定したパラメータの評価</b>	<b>72</b>
6.1	検査システムの試運転	72
6.1.1	ロシアにて検査済のキューブを用いた試運転	72
6.1.2	未検査キューブを用いた試運転	74
6.2	超音波溶着の際にパラメータのばらつきが及ぼす影響	75
6.2.1	トイモンテカルロシミュレーションによる検証	78

<b>第7章</b>	<b>シンチレータキューブの並べ方の最適化</b>	<b>83</b>
7.1	超音波溶着のための並べ方の最適化 . . . . .	83
7.2	穴の位置のばらつきを考慮したキューブの間隔の決定 . . . . .	83
7.3	ファイバーを通すためのキューブの並べ方に関する設計 . . . . .	87
7.4	トイモンテカルロシミュレーションを用いた並べ方の最適化 . . . . .	89
7.4.1	水平方向の穴の位置の16通りの分類 . . . . .	89
7.4.2	水平方向の穴の位置の64通りの分類 . . . . .	91
7.5	実際のキューブを用いた並べ方の検証 . . . . .	92
7.5.1	キューブを並べるためのジグの準備 . . . . .	92
7.5.2	検査システムによるキューブの分類 . . . . .	94
7.5.3	キューブの検査・分類と、整列の結果 . . . . .	96
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>102</b>
	謝辞	103
	参考文献	105
<b>付録A</b>	<b>モーターの動作原理</b>	<b>110</b>
A.1	5相ステッピングモーターの動作原理 . . . . .	110

# 第1章 ニュートリノ

## 1.1 ニュートリノ

ニュートリノは中性レプトンであり，4つの相互作用のうち重力相互作用と弱い相互作用のみ行う。

ニュートリノは原子核の $\beta$ 崩壊における電子のエネルギースペクトルが連続であることから，1930年にパウリによってその存在が予言された<sup>[1]</sup>。その後1956年にライネスとコーワンによって原子炉からの反電子ニュートリノが初めて検出され<sup>[2]</sup>，また1962年にはレーダーマン，シュワーツ，シュタインバーガーにより， $\pi$ 中間子の崩壊によって生成されるミューニュートリノの存在が確かめられた<sup>[3]</sup>。さらに2000年にはDONUT実験によってタウニュートリノが発見された<sup>[4]</sup>。現在では，標準模型におけるレプトンはこれら3世代のニュートリノとそのフレーバーに対応する3世代の荷電レプトンによって構成される。

## 1.2 ニュートリノ振動

標準模型においてニュートリノは質量をもたないとされているが，1958年にポンテコルボによって<sup>[5]</sup>，1962年に牧二郎，中川昌美，坂田昌一らによって<sup>[6]</sup>，仮にニュートリノが質量をもつ場合，時間発展にともない自身のフレーバーを周期的に変化させる現象（ニュートリノ振動）が起こりうることを示された。

ニュートリノが質量をもつとき，ニュートリノの質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ )とフレーバーの固有状態 $|\nu_l\rangle$  ( $l = e, \mu, \tau$ )は $3 \times 3$ ユニタリ行列 $U_{li}$ によって以下のように関係づけられる。

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1,2,3} U_{li} |\nu_i\rangle. \quad (1.1)$$

このユニタリ行列は提唱者の名前をとって Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) 行列と呼ばれる。行列の各成分は混合角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ ，複素位相 $\delta$ を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}, \quad (1.2) \end{aligned}$$

この行列において  $s_{ij}, c_{ij}$  はそれぞれ  $\sin \theta_{ij}, \cos \theta_{ij}$  を意味している。また複素位相  $\delta$  は、 $\delta \neq 0, \pi$  である場合にレプトンにおいて CP 対称性の破れを引き起こすことから CP 位相とも呼ばれ、しばしば  $\delta_{\text{CP}}$  と書かれる。

以下、ニュートリノ振動について考える。

エネルギー  $E_i$  をもつニュートリノ質量固有状態  $|\nu_i(t)\rangle$  の時間発展は以下のシュレディンガー方程式

$$\begin{aligned} i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_i(t)\rangle &= \mathcal{H} |\nu_i(t)\rangle \\ &= E_i |\nu_i(t)\rangle \end{aligned} \quad (1.3)$$

を解くことにより、

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \quad (1.4)$$

と表される。このときフレーバー固有状態  $|\nu_l(t)\rangle$  の時間発展は以下のようになる。

$$\begin{aligned} |\nu_l(t)\rangle &= \sum_i U_{li} |\nu_i(t)\rangle \\ &= \sum_i U_{li} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \\ &= \sum_i U_{li} e^{-iE_i t} \sum_{l'} (U^\dagger)_{il'} |\nu_{l'}\rangle \\ &= \sum_{i,l'} U_{li} e^{-iE_i t} U_{l'i}^* |\nu_{l'}\rangle. \end{aligned} \quad (1.5)$$

ここで、時間  $t$  の間にニュートリノが真空中を距離  $L$  だけ飛行し、そのフレーバーが  $\alpha$  から  $\beta$  へ遷移する場合を考える。このような遷移の不変振幅  $\langle \nu_\alpha(0) | \nu_\beta(t=L) \rangle$  は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \langle \nu_\alpha(0) | \nu_\beta(t=L) \rangle &= \left\langle \nu_\alpha(0) \left| \sum_{i,l'} U_{\beta i} U_{l'i}^* e^{-iE_i L} \right| \nu_{l'}(0) \right\rangle \\ &= \sum_{i,l'} U_{\beta i} U_{l'i}^* e^{-iE_i L} \langle \nu_\alpha(0) | \nu_{l'}(0) \rangle \\ &= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-iE_i L}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

ニュートリノは質量が十分小さいことから、そのエネルギー  $E_i$  について以下の近似が成り立つ。

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E}, \quad (1.7)$$

ここで  $m_i, p_i$  はそれぞれニュートリノ質量固有状態  $|\nu_i\rangle$  に対応する質量とその運動量を表し、 $p, E$  は  $t=L$  で測定されるニュートリノの運動量およびエネルギーである。

この遷移が生じる確率  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  は不変振幅  $\langle \nu_\alpha(0) | \nu_\beta(t=L) \rangle$  を用いて以下のように書ける.

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \left| \langle \nu_\alpha(0) | \nu_\beta(t=L) \rangle \right|^2 \\
&= \left( \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-i\left(p + \frac{m_i^2}{2E}\right)L} \right) \left( \sum_j U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i\left(p + \frac{m_j^2}{2E}\right)L} \right)^* \\
&= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-i\left(p + \frac{m_i^2}{2E}\right)L} (U_{\beta i} U_{\alpha i}^*)^* e^{+i\left(p + \frac{m_i^2}{2E}\right)L} \\
&\quad + \sum_{i \neq j} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-i\left(p + \frac{m_i^2}{2E}\right)L} (U_{\beta j} U_{\alpha j}^*)^* e^{+i\left(p + \frac{m_j^2}{2E}\right)L} \\
&= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta i} U_{\alpha i}^*)^* + \sum_{i \neq j} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta j} U_{\alpha j}^*)^* e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}}, \tag{1.8}
\end{aligned}$$

ここで  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  であり, ふたつのニュートリノ質量固有状態に対しそれらの質量の二乗差を意味する. この式の第2項はさらに以下のように計算される.

$$\begin{aligned}
\text{第2項} &= \sum_{i>j} \left\{ U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta j} U_{\alpha j}^*)^* e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} + U_{\beta j} U_{\alpha j}^* (U_{\beta i} U_{\alpha i}^*)^* e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \right\} \\
&= \sum_{i>j} \left\{ U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta j} U_{\alpha j}^*)^* e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} + \left( U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta j} U_{\alpha j}^*)^* e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \right)^* \right\} \\
&= \sum_{i>j} 2 \operatorname{Re} \left\{ U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta j} U_{\alpha j}^*)^* e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \right\} \\
&= \sum_{i>j} \left\{ 2 \cos \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) - 2 \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \operatorname{Re}(i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \right\} \\
&= \sum_{i>j} \left\{ 2 \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \right. \\
&\quad \left. - 4 \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) + 2 \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \operatorname{Im}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \right\}. \tag{1.9}
\end{aligned}$$

以上より, 振動確率  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  は以下のように表される.

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta i} U_{\alpha i}^*)^* + \sum_{i>j} 2 \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \\
&\quad - 4 \sum_{i>j} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) + 2 \sum_{i>j} \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \operatorname{Im}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}). \\
&= \delta_{\alpha\beta} \\
&\quad - 4 \sum_{i>j} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) + 2 \sum_{i>j} \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right) \operatorname{Im}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}). \tag{1.10}
\end{aligned}$$

ここで、飛行時間  $t = L$  に依存しない項について、フレーバーの変化はないと考えられるので以下のようにクロネッカーのデルタでおいた<sup>1</sup>。

$$\sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta i} U_{\alpha i}^*)^* + \sum_{i>j} 2 \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) = \delta_{\alpha\beta}. \quad (1.14)$$

式 1.10 のように、ニュートリノ振動確率は PMNS 行列  $U$ 、質量二乗差  $\Delta m_{ij}^2$ 、距離とエネルギーの比  $E/L$  に依存する。これらのうち  $E/L$  は観測するニュートリノによって決定するパラメータであり、測定すべきパラメータは PMNS 行列を構成する 3 つの混合角  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$  と複素位相  $\delta_{\text{CP}}$ 、そして 2 つの質量二乗差  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\Delta m_{32}^2$  である<sup>2</sup>。これらをまとめてニュートリノ振動パラメータとも呼ぶ。

### 1.3 これまでのニュートリノ振動実験

ニュートリノ振動は 1998 年にスーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ観測によって発見された<sup>[7]</sup>。図 1.3 に示した測定された大気ニュートリノの天頂角分布を見ると、ニュートリノ振動を仮定しない場合のシミュレーションと比較して  $\nu_\mu$  が減少していることがわかる。その後、2001 年に公表された太陽ニュートリノ観測実験 SNO (Sudbury Neutrino Observatory) での観測<sup>[8]</sup>により、太陽より飛来するニュートリノがシミュレーションと比較して少ない問題 (太陽ニュートリノ問題) がニュートリノ振動で説明できるということが解明された。これらの結果より、ニュートリノが質量をもつことが明らかとなり、以後世界各地でニュートリノ振動パラメータの測定が行われるようになった。各パラメータの測定の現状は以下のとおりである。また現在の測定値を表 1.1 にまとめた。

- $\theta_{12}$ ,  $\Delta m_{21}^2$ : スーパーカミオカンデおよび SNO での太陽ニュートリノ観測や、KamLAND<sup>[9]</sup>により原子炉から飛来する反電子ニュートリノがニュートリノ振動によって消失する事象を観測することによって測定が行われている。

<sup>1</sup>PMNS 行列  $U$  のユニタリ条件

$$\sum_i U_{\beta i} (U^\dagger)_{i\alpha} = \delta_{\beta\alpha} \quad (1.11)$$

と、この式において  $\alpha$  と  $\beta$  を入れ替えた式の積をとると、左辺は

$$\begin{aligned} \sum_i U_{\beta i} (U^\dagger)_{i\alpha} \sum_j U_{\alpha j} (U^\dagger)_{j\beta} &= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* \sum_j U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \\ &= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\alpha i} U_{\beta i}^* + \sum_{i>j} \{U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^* + U_{\beta j} U_{\alpha j}^* U_{\alpha i} U_{\beta i}^*\} \\ &= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* (U_{\beta i} U_{\alpha i}^*)^* + \sum_{i>j} 2 \operatorname{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

となる。また、右辺についてはクロネッカーのデルタの定義より

$$\delta_{\beta\alpha} \delta_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} \quad (1.13)$$

であるので、式 1.14 が成り立つことがわかる。

<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} \Delta m_{31}^2 &= m_3^2 - m_1^2 \\ &= m_3^2 - m_2^2 + m_2^2 - m_1^2 \\ &= \Delta m_{32}^2 - \Delta m_{21}^2 \end{aligned} \quad (1.15)$$

であるから独立な質量二乗差は 2 つ。

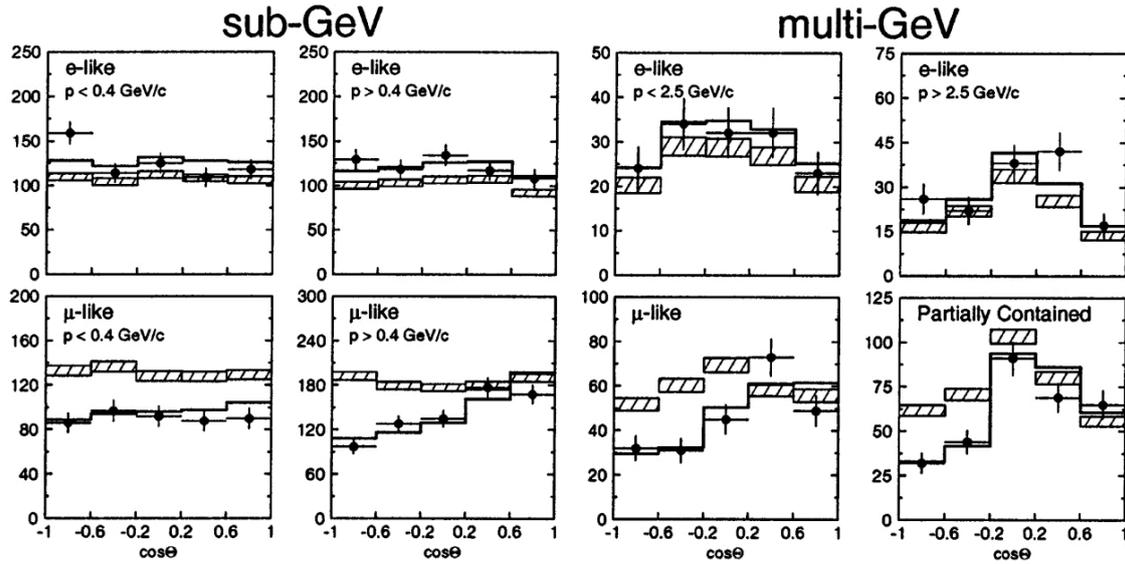


図 1.1 スーパーカミオカンデで測定された大気ニュートリノのエネルギー・運動量ごとの天頂角分布 [7]. 図中 e-like とあるものが電子ニュートリノ候補事象,  $\mu$ -like とあるものがミューニュートリノ候補事象である. 斜線部がニュートリノ振動を仮定しない場合, 実線が仮定する場合のシミュレーション結果, 点が観測結果.

- $\theta_{23}, |\Delta m_{32}^2|$ : T2K 実験や NO $\nu$ A 実験などの加速器ニュートリノ実験, スーパーカミオカンデや IceCube 実験 [10] などの大気ニュートリノ実験によりミューニュートリノがニュートリノ振動によって消失する事象を観測することで測定が行われている.
- $\theta_{13}$ : 2011 年に T2K 実験においてミューニュートリノが電子ニュートリノに変化する事象より  $\sin^2 2\theta_{13}$  が有限値をとることが示唆されたのち, 現在では Daya-Bay 実験, RENO 実験, Double-Chooz 実験といった原子炉ニュートリノ実験により精密に測定されている.
- $\delta_{CP}$ : 加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験により測定が行われている. ニュートリノにおいて CP 対称性が破れているかどうかは  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$  を比較することで検証される. 特に, 両者の確率の差

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e) \quad (1.16)$$

をとると,  $\delta_{CP}$  の現れない項は打ち消し合い,  $\sin \delta_{CP}$  に比例する項のみが残るので, CP 対称性の破れの検証が可能となる. 2019 年において T2K 実験は  $\delta_{CP} \neq 0, \pi$  を  $2\sigma$  の信頼度で示唆していた [11] が, 2020 年の T2K のデータと NO $\nu$ A のデータを組み合わせるとニュートリノの質量が順階層 (後述) の場合には  $1\sigma$  の範囲に  $\delta_{CP} = \pi$  が含まれており, その値は未知である.

## 1.4 ニュートリノの未解決問題

前述のとおり標準模型においてニュートリノは質量をもたないとされる. しかし現在ではニュートリノ振動の発見により, ニュートリノが質量をもつことが明らかとなった. これによりニュートリノは標準理論を超えた物理で記述されることが明確になり, それに伴い様々な未解決問題が残されている.

表 1.1 順階層および逆階層のときの各振動パラメータの最新測定結果<sup>[12]</sup>. 最適値と、括弧内に  $3\sigma$  の範囲を示した.

	順階層	逆階層
$\sin^2 \theta_{12}$	0.304 (0.269 - 0.343)	0.304 (0.269 - 0.343)
$\sin^2 \theta_{23}$	0.573 (0.425 - 0.616)	0.575 (0.419 - 0.617)
$\sin^2 \theta_{13}$	0.02219 (0.02032 - 0.02410)	0.02238 (0.02052 - 0.02428)
$\delta_{\text{CP}}/\text{rad}$	3.43 (2.09 - 6.44)	4.92 (3.36 - 6.14)
$\Delta m_{21}^2/(10^{-5}\text{eV}^2)$	7.42 (6.82 - 8.04)	
$ \Delta m_{32}^2 /(10^{-3}\text{eV}^2)$	2.517 (2.435 - 2.598)	

まずニュートリノの質量の起源がまだ解明されておらず、混合角を精密に測定することはニュートリノの質量について理解するために非常に重要である. また  $\theta_{23}$  に関しては最大混合 ( $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ ) である可能性が残されており、その場合にはレプトンの世代間において新たな対称性の存在が示唆されている<sup>[13]</sup>.

さらに、混合行列の複素位相  $\delta_{\text{CP}}$  の値は宇宙の物質反物質非対称性の謎を解明する上で特に重要なパラメータである. 現在クォークにおける CP 対称性の破れは K 中間子や B 中間子を用いた様々な実験で確認されているが、それだけでは宇宙の物質反物質非対称性を説明できないことが知られている<sup>[14]</sup>. そこで、宇宙初期に重いニュートリノが崩壊しバリオン数を生成するレプトジェネシス機構の可能性が示唆されている<sup>[15]</sup>. そのためにはレプトンにおける CP 対称性の破れが必要であり、ニュートリノ振動を通して CP 対称性の破れを発見することはレプトジェネシス機構の解明のための重要な手がかりとなる.

またニュートリノ振動実験では各質量固有状態に対応する質量  $m_1, m_2, m_3$  の絶対値を求めることはできない. 現在は太陽ニュートリノの測定により、 $m_1$  と  $m_2$  の大小関係のみ決定しているものの、真空中のニュートリノ振動では質量二乗差の絶対値は測定可能であるがその符号を求めることはできず、図 1.2 のように、ニュートリノの質量について  $m_1 < m_2 < m_3$  である順階層と  $m_3 < m_1 < m_2$  である逆階層の 2 つの可能性が考えられている. 階層性を決定することは  $\delta_{\text{CP}}$  を測定しその値を決定する際にも必要であり、地球の内部を通過したニュートリノにおけるニュートリノ振動について精密に測定することで階層性を決定できると考えられている.

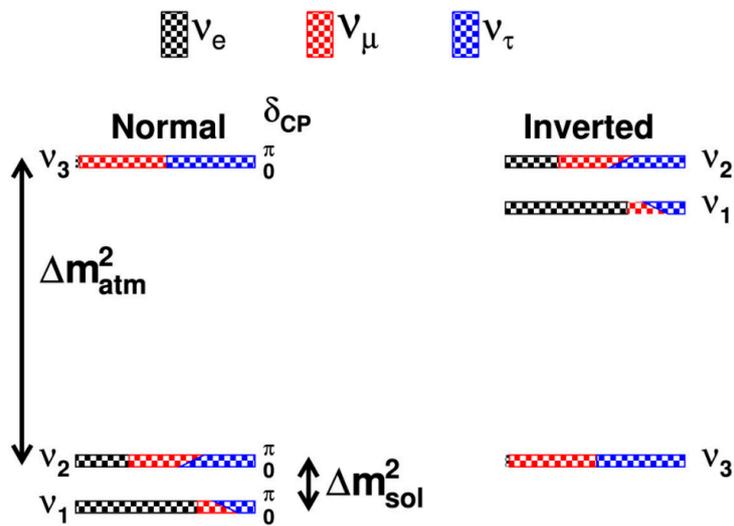


図 1.2 ニュートリノの質量階層性<sup>[16]</sup>. 左が順階層で右が逆階層.  $\delta_{CP}$  の値に応じた各フレーバーの混合の割合も同時に示されている.

## 第2章 T2K 実験

### 2.1 T2K 実験

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、図 2.1 に示すように、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で生成されたニュートリノビームを、施設内に置かれた前置検出器および 295 km 離れた岐阜県神岡町にある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る。T2K では主に、ミューニュートリノ (または反ミューニュートリノ) の消失モードを用いた  $\theta_{23}$ ,  $|\Delta m_{32}^2|$  の測定, ミューニュートリノ (または反ミューニュートリノ) から電子ニュートリノ (または反電子ニュートリノ) への振動モードを用いた  $\delta_{CP}$  の測定が行われている。



図 2.1 T2K 実験の概要図 [18].

### 2.2 ニュートリノビーム

#### 2.2.1 J-PARC

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、図 2.2 に示すような、3つの陽子加速器: 線形加速器 LINAC (Linear Accelerator), 3 GeV シンクロトロン RCS (Rapid Cycling Synchrotron), 30 GeV シンクロトロン MR (Main Ring), および物質・生命科学実験施設, ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設からなる複合研究施設である。ニュートリノビーム生成のための陽子ビームはまず負水素イオン  $H^-$  として LINAC で 400 MeV まで加速されたのち、RCS に入射され、炭素薄膜に電子をはぎ取られ陽子となる。RCS に先に入射された周回ビームに入射ビームを合わせることでビーム強度を上げることができるが、はじめから正の電荷の粒子を LINAC で加速させ RCS の周回ビームに合わせようとする同一の磁場で2つの異なる軌道のビームを1つの軌道に乗せることはできないという問題がある。そのため、負水素イオン  $H^-$  として RCS に入射し、1つの軌道に乗せた後電子をはぎ取り陽子にするという手法をとっている。陽子ビームは RCS で 3 GeV まで加速され、その後さらに MR で 30 GeV

まで加速されたのちニュートリノビームラインに取り出され、ニュートリノビームを生成するための炭素標的に入射される。陽子ビームは2.48秒ごとにスピルという単位で標的に打ち込まれており、さらに各スピルは8つのバンチからなる。



図 2.2 J-PARC の全体図 [19].

## 2.2.2 ニュートリノビームの生成

炭素標的に入射された陽子はハドロン反応を起こし、 $\pi$  粒子をはじめとした様々なハドロンが生成される。その中でも、生成された荷電  $\pi$  粒子は3台の電磁ホーンが発生させる強力な磁場によって収束される。 $\pi^+$  粒子を収束する磁場が発生するように電磁ホーンに電流を流すと、収束された  $\pi^+$  粒子は下流の全長 94 m の崩壊領域内で、以下のようにミューオンとニュートリノに崩壊する（ニュートリノモード）：

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu. \quad (2.1)$$

1.3 節で述べたように、ニュートリノにおける CP 対称性の破れの検証のためには  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  を比較する必要があるので、反ニュートリノビームの生成も必要となる。電磁ホーンに流す電流の向きをニュートリノモードとは逆にすることで、磁場の向きを反対にして、 $\pi^-$  粒子を収束することで以下のように反ニュートリノビームを得る（反ニュートリノモード）：

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (2.2)$$

## 2.2.3 Off axis 法

T2K ではニュートリノ検出器をビーム軸からずれた角度で配置している。検出器をビーム中心軸上に配置する方法を On axis 法といい、検出器をビーム軸からあえてずれた位置に配置する方法を Off axis

法という。図 2.3 に T2K のビームラインの模式図を示す。

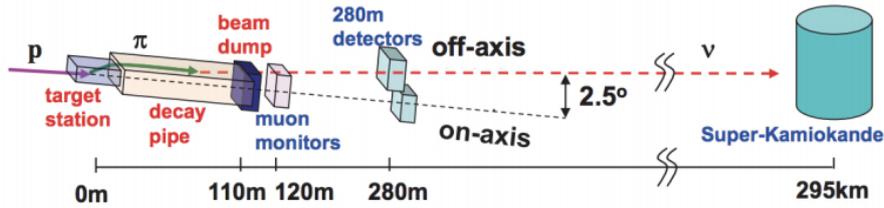


図 2.3 T2K ビームラインおよび検出器の配置の模式図 [20].

T2K の利用するニュートリノビームのエネルギー  $E_\nu$  は、ニュートリノの質量が十分軽いこと、ニュートリノが  $\pi$  粒子の二体崩壊から生成されていることから以下のように求められる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta_\nu)}, \quad (2.3)$$

ここで  $E_\pi$ ,  $p_\pi$ ,  $m_\pi$  はそれぞれ  $\pi$  粒子のエネルギー、運動量、質量であり、 $m_\mu$  はミューオンの質量、 $\theta_\nu$  は  $\pi$  粒子とニュートリノの運動量のなす角である。図 2.4 左のように、 $\theta_\nu$  をゼロより大きな値にすることで、 $p_\pi$  に対して  $E_\nu$  は平坦な分布になる。したがって  $\pi$  粒子の運動量分布が幅をもっている、図 2.4 右のようにエネルギー幅の小さいニュートリノビームを得ることができるようになる。

また式 1.10 からわかるようにニュートリノ振動確率はエネルギー  $E_\nu$  と飛距離  $L$  に依存している。T2K では炭素標的からスーパーカミオカンデまでの距離 295 km を考慮し、振動確率が最大となるエネルギー  $E_\nu \sim 0.6$  GeV となるような Off axis 角  $2.5^\circ$  を採用している。

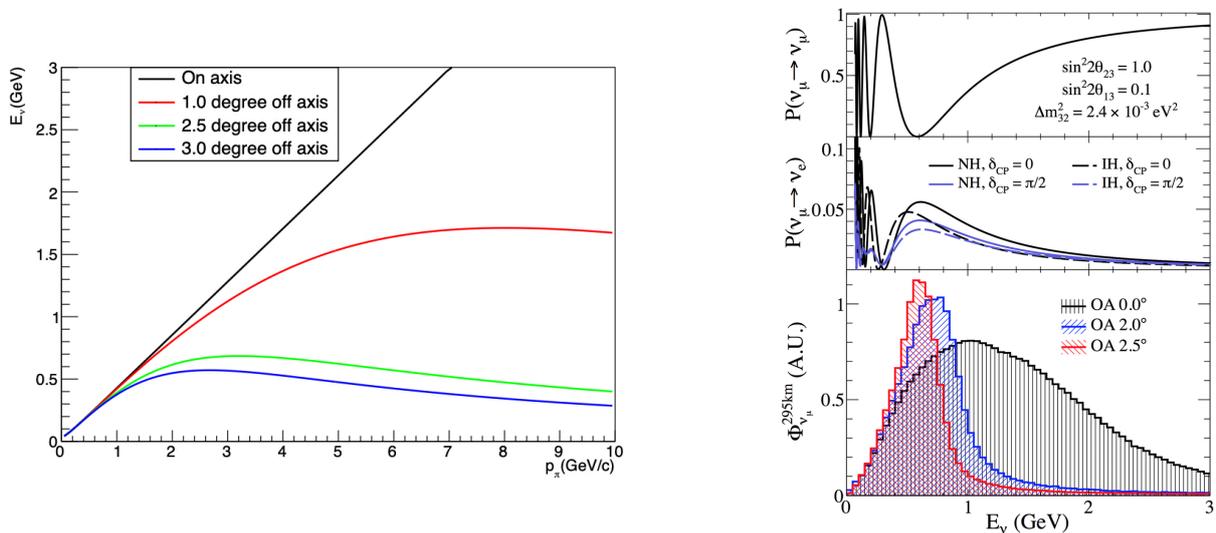


図 2.4  $\pi$  粒子の運動量及び Off axis 角と得られるニュートリノのエネルギーの関係 (左). また Off axis 角  $0^\circ$ ,  $2.0^\circ$ ,  $2.5^\circ$  のときのニュートリノビームのエネルギー分布 (右下) と、各振動パラメータの値を仮定した場合のニュートリノ振動確率 (右上, 右中). NH, IH はそれぞれ順階層, 逆階層を仮定していることを表す。

## 2.3 前置検出器

ニュートリノ振動パラメータを測定する上で、ニュートリノ・原子核反応の不定性およびニュートリノビームのフラックスの不定性が、系統誤差の主要因となっている。そのため、ニュートリノ振動が生じる確率が十分小さく、ニュートリノ振動の効果を無視できるニュートリノ生成直後にその反応断面積とエネルギー分布、フラックスを精密に測定することが重要である。T2K では炭素標的より 280 m 下流に INGRID, ND280, WAGASCI / Baby MIND からなる前置検出器群を配置している。

### 2.3.1 INGRID

INGRID (Interactive Neutrino GRID) は図 2.5 のような、ニュートリノビーム軸上に配置された鉄とプラスチックシンチレータからなるモジュールをビーム軸上の点を中心に鉛直方向および水平方向に 7 台ずつ並べた十字型の検出器であり、ニュートリノビームのプロファイルをモニターするのに用いる。各モジュールは細長いシンチレータが縦横に 24 枚ずつ並べられたシンチレータトラッカー 11 層と厚さ 6.5 cm の鉄板 9 層のサンドイッチ構造をしており、周囲を veto トラッカーで覆われている。

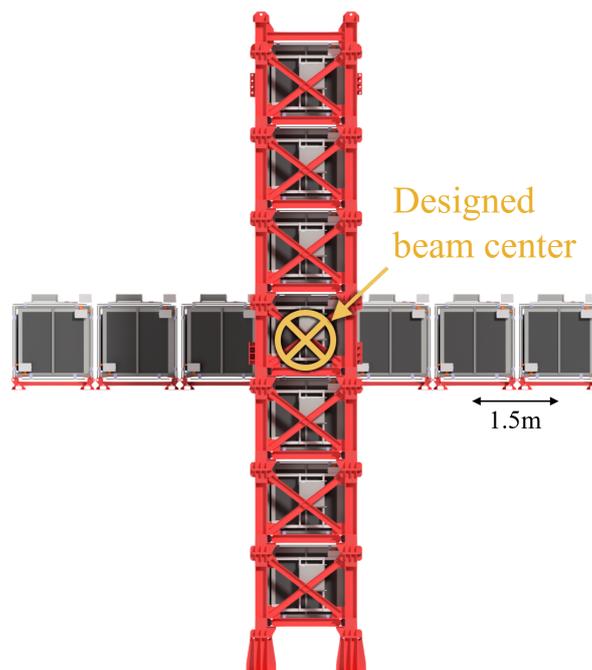


図 2.5 on-axis 検出器 INGRID の概略図<sup>[21]</sup>。十字の中心部分がビーム軸に対応する。

### 2.3.2 ND280

後述するスーパーカミオカンデと同じ方向である Off axis 角  $2.5^\circ$  の位置に、図 2.6 に示す検出器群 ND280 が配置されている。これによりニュートリノビームのフラックス、エネルギー分布、原子核との反応断面積を精密に測定し、測定結果とシミュレーションからスーパーカミオカンデで検出される事象を精度よく予測する。

ND280 は電磁石と複数の検出器から構成されており、その構成要素は以下のとおりである<sup>[22]</sup>。

- **UA1 magnet** : ソレノイドコイルとヨーク等からなる, 検出器全体に 0.2 T の磁場を印加する大型常伝導電磁石. ニュートリノ反応で生成される荷電粒子の飛跡が曲がることにより, 電荷と運動量が測定可能となる. かつて CERN において UA1 実験, NOMAD 実験にて使用されており [23], CERN より寄贈されたものである.
- **P0D ( $\pi^0$  Detector)** : 厚さ 0.6 mm の鉛薄膜層とシンチレータの層, 水標的層からなるシンチレータトラッカーである. 特に水標的での  $\pi^0$  生成断面積の測定が可能であり, スーパーカミオカンデにおける電子ニュートリノ出現事象測定の際にバックグラウンドとなる, 終状態に荷電レプトンが生成されない (中性カレント)  $\pi^0$  生成反応の測定に用いられる.
- **FGD (Fine Grained Detector)** : 断面積約  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  の棒状シンチレータを鉛直方向に並べた層と水平方向に並べた層が交互に配置された構造をもつ, ND280 の主なニュートリノ反応標的でもあるシンチレータトラッカーである. FGD 内で生じたニュートリノ反応から放出される荷電粒子は主にこの FGD とガス検出器 TPC によって飛跡再構成が行われる. FGD は後述する 3 台の TPC の間に 1 台ずつ設置されており, 上流側である FGD1 は 30 層のシンチレータからなるが, 下流側である FGD2 は 14 層のシンチレータ層と 6 層の水標的層からなる. このため FGD2 においてはニュートリノと水の反応断面積が測定可能である.
- **TPC (Time Projection Chamber)** : 2 台の FGD の前後と間に合計 3 台設置されており, FGD 内で生じたニュートリノ反応で生成された荷電粒子が入射すると, UA1 magnet が印加する磁場によって曲げられた飛跡を検出することで荷電粒子の電荷, 運動量を測定する. また荷電粒子のエネルギー損失を測定することにより, 粒子識別を行うことができる.
- **ECAL (Electromagnetic Calorimeter)** : P0D の周囲, TPC および FGD の周囲と, ND280 の最下流部に配置されている電磁カロリメータ. ニュートリノ反応で生成される電子と  $\gamma$  線による電磁シャワーを検出し, エネルギーを測定する. 各モジュールは鉛層とシンチレータ層のサンドイッチ構造となっている.
- **SMRD (Side Muon Range Detector)** : UA1 magnet のヨークは厚さ 48 mm の鉄板 16 枚を 17 mm ずつ隙間をあけて鉛直方向に積層した構造をしており, この隙間の一部に厚さ 7 mm のシンチレータが挿入されている. これらのシンチレータ群は SMRD と呼ばれ, ND280 内で大角度散乱が生じた際に TPC に入射しなかったミューオンを測定するのに用いられている.

現在の ND280 では主に FGD 内で生じたニュートリノ反応から放出される荷電粒子の飛跡を FGD 及び TPC で再構成する. ミューオンのような比較的長い飛跡を残すものに関しては, TPC によって精密に測定が行われ, 陽子のような飛跡の短いものや反応点の再構成は主に FGD によって行われる.

### 2.3.3 WAGASCI / Baby MIND 検出器

ND280 とは異なる角度である Off axis 角  $1.5^\circ$  の位置に, T2K-WAGASCI 実験で用いられる検出器群が配置されている.

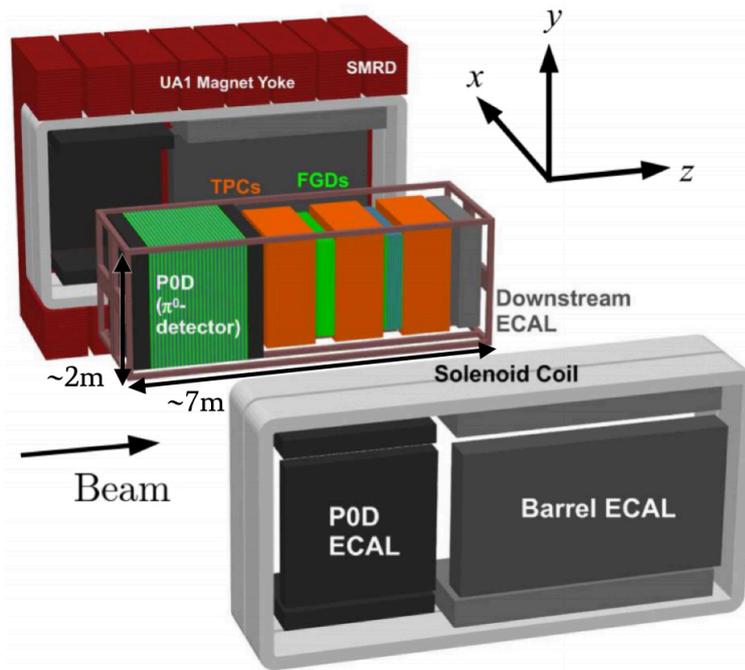


図 2.6 ND280 の概略図<sup>[17]</sup>. ECAL, UA1 magnet のソレノイドコイルおよびヨークを展開した様子.

T2K-WAGASCI 実験では、水を主な標的物質とし、3次元格子状にプラスチックシンチレータを並べた構造の WAGASCI (Water Grid and Scintillator) モジュール、プラスチックシンチレータの多層構造をしたプロトンモジュール、これらの標的モジュールで生じたニュートリノ反応で生成したミューオンのうちビーム軸に対して横方向に散乱したものの運動量を測定する Wall MRD (Muon Range Detector)、ビーム下流に配置された鉄コア電磁石を搭載したミューオン検出器 Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector) が用いられる。

ND280 では主な標的物質がプラスチックであるのに対し、WAGASCI では後述するスーパーカミオカンデと同じ水を主な標的物質として利用していることから、ニュートリノ反応の測定に際し標的物質の違いに起因する系統誤差を削減することができる。

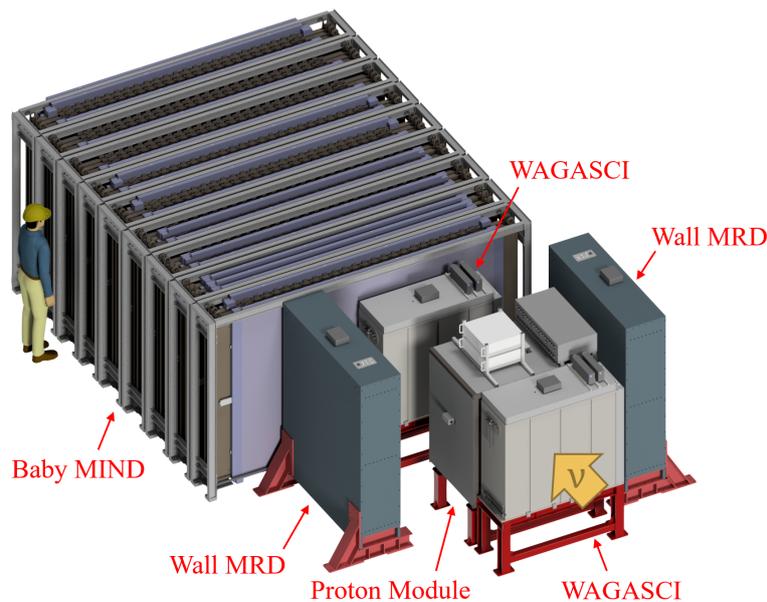


図 2.7 T2K-WAGASCI 実験で用いられる検出器群.

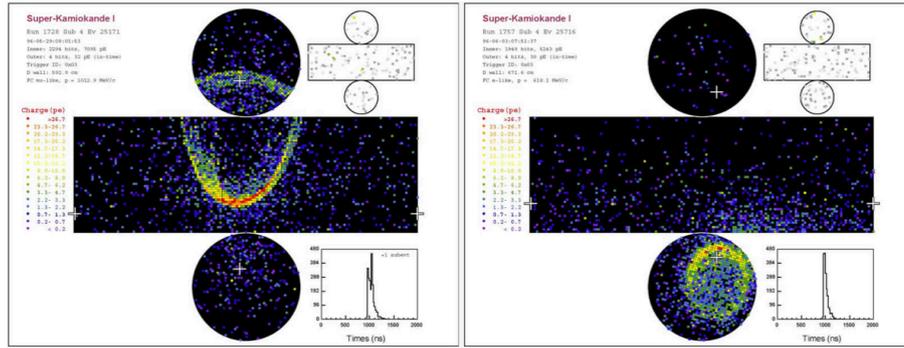
## 2.4 後置検出器 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ (SK) は、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下 1000 m に位置する水チェレンコフ検出器である。大統一理論のもとで予言されている陽子崩壊現象の探索や大気ニュートリノおよび太陽ニュートリノの観測を常時行っているほか、T2K の後置検出器としても用いられている。

直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒型水タンクの中に 5 万トンの超純水が蓄えられており、タンクの壁には約 13000 本の光電子増倍管が設置されている。また検出器内部は、水中で生じたニュートリノ反応等により生成される荷電粒子のチェレンコフ光を検出する内水槽と、宇宙線ミューオンなど外部から直接飛来する荷電粒子のチェレンコフ光を検出し veto としての役割をもつ外水槽に分かれている。実際の物理測定に用いられる有効体積は、内水槽のさらに壁から 2 m 内側の領域で、約 2 万 2 千トンである。なお近年では、アルゴリズムの改良によって壁から 50 cm 内側の領域が有効体積として使用可能となっている [24]。

ニュートリノ振動を測定する上で、ニュートリノのフレーバーを正しく識別することが重要である。SK ではニュートリノ反応から生じる荷電レプトン (ミューオン、電子) の識別を高効率で行うことができる。図 2.8 に示すように、ミューオンは質量が大きく制動放射が起こりにくいため水中をまっすぐ進み鋭いチェレンコフリングを描くが、電子の場合、電磁シャワーが生じることによりチェレンコフリングはミューオンのそれと比べぼやけたものとなる。

2020 年 8 月に超純水に硫酸ガドリニウムが添加された (5 万トンの超純水に対し Gd 元素の重量比で 0.01 %)。ガドリニウムは中性子を吸収し  $\gamma$  線を放出するという特性を持っており、この  $\gamma$  線の引き起こす電磁シャワーを検出することで、ニュートリノ反応から生じる中性子の検出が行えるようになった。SK では検出した荷電粒子の電荷を特定することができないので、それがニュートリノによる反応で生じたものなのか反ニュートリノによるものなのか区別できなかった。しかし反ニュートリノによる反応



(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo

図 2.8 SK で観測されたチェレンコフリング [25]. 左がミューオンによるもので、右が電子によるもの。

のほうが中性子を放出する傾向が強く、中性子を検出することでニュートリノ反応と反ニュートリノ反応を統計的に区別することができるようになった。

## 2.5 T2K のビームエネルギーにおけるニュートリノ反応

T2K のニュートリノビームは前述のように  $E_\nu \sim 0.6 \text{ GeV}$  がピークとなるようなエネルギーを採用している。このエネルギーに対応するドブロイ波長は約  $1 \text{ fm}$  であり、主にニュートリノと原子核またはニュートリノと原子核中の核子との反応が生じる。

反応が  $W^\pm$  粒子によって媒介され、終状態に荷電レプトンが放出される反応を荷電カレント反応 (CC : Charged Current) といい、 $Z^0$  粒子によって媒介され、終状態に荷電レプトンではなくニュートリノが放出される反応を中性カレント反応 (NC : Neutral Current) という。

以下に、T2K のビームエネルギー領域で生じると考えられている主な反応について述べる。

- 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE : Charge Current Quasi Elastic)

T2K のビームのエネルギー領域では式 2.4 で表される CCQE 反応 (図 2.9) が最も支配的な反応であり、主な信号としている。

$$\nu_l + N \rightarrow l + N' \tag{2.4}$$

ここで  $l$  は荷電レプトン、 $N, N'$  は核子を表している。ニュートリノの場合は中性子と反応して終状態に陽子を放出し、反ニュートリノの場合は陽子と反応し終状態に中性子を放出する。CCQE はレプトンと核子の二体反応であり、ニュートリノの飛来する方向を仮定すると終状態のレプトンのエネルギー、運動量、散乱角を測定することで、以下のようにニュートリノのエネルギーを再構成することができる：

$$E_\nu = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \tag{2.5}$$

ここで、 $m_N, m_l$  はそれぞれ核子、荷電レプトンの質量であり、 $E_l, p_l, \theta_l$  はそれぞれ荷電レプトンのエネルギー、運動量、散乱角である。なおこの式では自由核子との散乱を表しているが、原子

核中の核子との散乱の場合には，原子核内での核子の運動や原子核の束縛エネルギー  $E_b$  も考慮する必要がある．

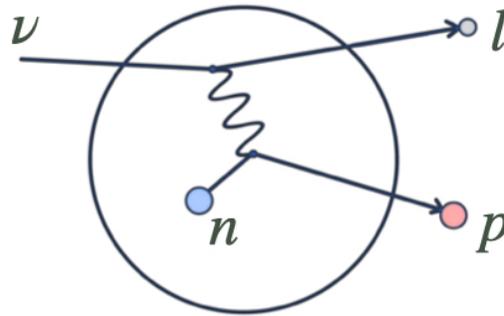


図 2.9 CCQE 反応.

- 2particle 2hole (2p-2h) 反応

2p-2h 反応 (図 2.10) は，T2K の信号モードである CCQE 反応と似た反応であるが，核子 2 つが反応に関与し，終状態に荷電レプトンの他に核子が 2 つ放出される．CCQE 反応と 2p-2h 反応は実験的には，放出される核子でしか区別できないため，陽子を観測できない SK では，両者を区別することができず背景事象となる．2p-2h 反応を CCQE 反応と誤認するとニュートリノのエネルギーの再構成を正しく行うことができず，系統誤差の要因となる．また前置検出器においても，2p-2h 反応で放出される陽子は低運動量であり測定が非常に困難である．2p-2h 反応はその測定データが少ないため，正確な理論モデルの決定には至っておらず，SK における 2p-2h 反応の見積もりには大きな不定性が存在している．

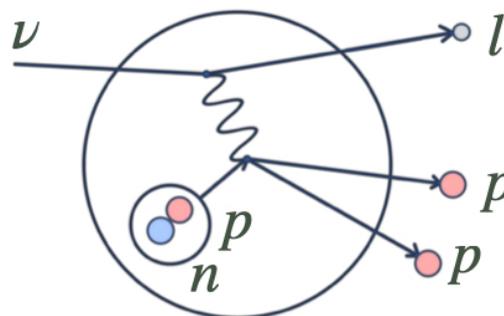


図 2.10 2p-2h 反応.

- CC Resonance

ニュートリノと核子が共鳴を起こすことで中間状態に  $\Delta$  粒子が生成される反応である． $\Delta$  粒子の大部分は強い相互作用によって核子と  $\pi$  粒子に崩壊する． $\Delta^+$  や  $\Delta^0$  では 0.5% 程度は  $\gamma$  線を放射し陽子や中性子となる [27]．このとき  $\pi$  粒子や  $\gamma$  線の検出に失敗すると CCQE 反応と区別がつか

なくなるため振動解析の際の系統誤差の要因となる。

$$\nu_l + N \rightarrow l + \Delta \rightarrow l + N' + \pi \text{ (または } \gamma\text{)}. \quad (2.6)$$

### ● CC Coherent Pion Production

ニュートリノから原子核に移行する運動量が小さく、対応するドブロイ波長が原子核の大きさ程度である場合、原子核全体との反応が生じることがある。このような過程では原子核の状態は変化せず終状態に  $\pi$  粒子が生じる。放出された  $\pi$  粒子の検出に失敗すると CC Resonance と同様に CCQE 反応と区別がつかなくなる。

### ● 中性カレント散乱

前述のとおりニュートリノと核子または原子核が  $Z^0$  粒子を介して相互作用する反応である。式 2.7 は、特に弾性散乱の場合の反応式である。このように終状態で荷電レプトンが生成されないため反応の同定が難しい。また、終状態に  $\pi^\pm$  粒子や  $\pi^0$  粒子が放出される場合、 $\pi^\pm$  の場合には  $\mu^\pm$  と誤って検出したり、 $\pi^0$  の場合には崩壊で生成される  $2\gamma$  の信号を電子によるものと誤認すると電子ニュートリノの荷電カレント散乱と区別がつかなくなり、振動解析の際に背景事象となる。

$$\nu + N \rightarrow \nu + N \quad (2.7)$$

### ● 深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering)

数 GeV 程度のエネルギーの高いニュートリノでは、核子を構成するクォークと相互作用するようになる。この場合、反応に関与したクォークの強い相互作用によって終状態に複数のハドロンが生じるため CCQE 反応の背景事象にはなりにくい。

## 2.6 T2K 実験のこれまでの測定結果

T2K 実験開始時 (2009 年 4 月) より 2020 年 2 月 12 日までに蓄積したデータ量 (POT (Protons on Target)) という単位が用いられ、炭素標的に打ち込まれる陽子数で表される) およびこれまでのビーム強度を図 2.11 に示す。2020 年 2 月 12 日までの蓄積されたデータ量はニュートリノモードで  $1.99 \times 10^{21}$  POT, 反ニュートリノモードで  $1.65 \times 10^{21}$  POT, 合計  $3.64 \times 10^{21}$  POT である。またビーム強度は 515kW にまで達している。

2020 年までのデータを用いた T2K での  $\sin^2 \theta_{23}$  および  $\Delta m_{32}^2$  (順階層, 逆階層の場合は  $|\Delta m_{31}^2|$ ),  $\delta_{CP}$  の測定結果を図 2.12 に示す。ベストフィットの値で  $\sin^2 \theta_{23} = 0.546$  ( $1\sigma$  の範囲:  $0.50 - 0.57$ ),  $\Delta m_{32}^2 = 2.49$  ( $1\sigma$  の範囲:  $2.408 - 2.548$ )  $\times 10^{-3}$   $eV^2$  である。 $\delta_{CP}$  については、2019 年までの測定結果では CP 対称性が成り立つ  $\delta_{CP} = 0$ ,  $\pi$  は 95 % の確度で棄却されていたが、最新結果では 90% の確度で棄却するに留まった。

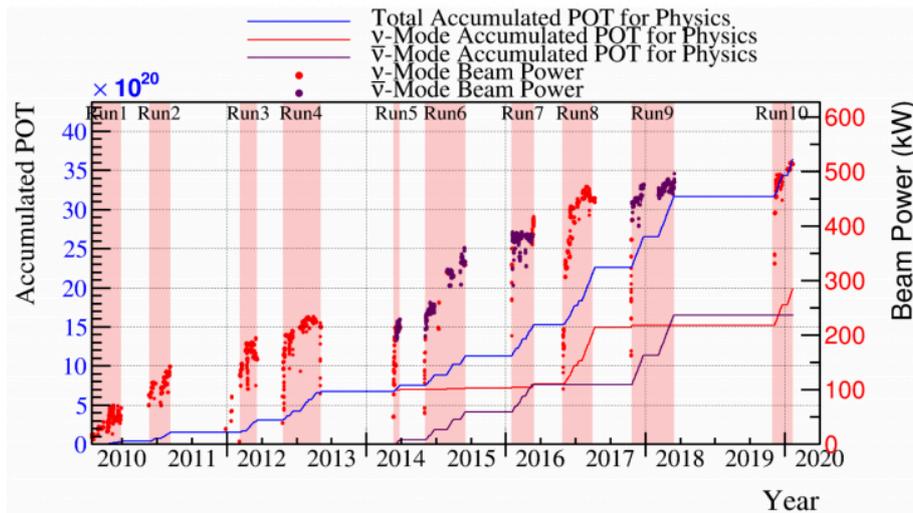


図 2.11 T2K のこれまで蓄積したデータ量 (POT, 左の目盛り) とこれまでのビーム強度 (kW, 右の目盛り). 赤の実線, 紫の実線はそれぞれニュートリノモード, 反ニュートリノモードにおける POT を表し, 青の実線はそれらの合計の POT を表す. また赤の点, 紫の点はそれぞれニュートリノモード, 反ニュートリノモードでのビーム強度を表す.

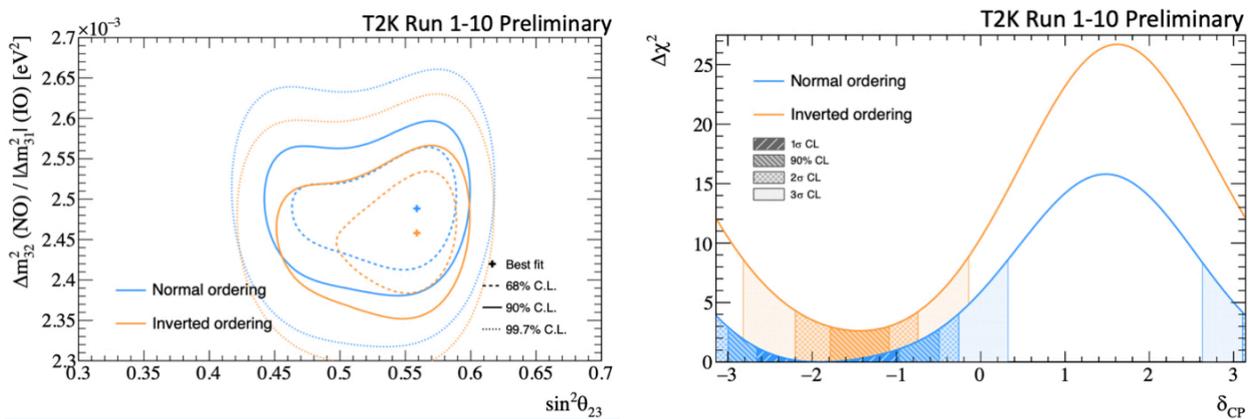


図 2.12 2020 年までのデータを用いた  $\sin^2 \theta_{23}$  および  $\Delta m_{32}^2$  (順階層, 逆階層の場合は  $|\Delta m_{31}^2|$ ) (左),  $\delta_{CP}$  (右) の測定結果. 水色が順階層の場合, 橙色が逆階層の場合. 縦軸は  $\chi^2$  が最小の点との差  $\Delta\chi^2$  である.

## 2.7 T2K 実験の今後の課題

T2K はこれまで世界最高精度でニュートリノ振動のパラメータを測定してきたが, ニュートリノにおける CP 対称性の破れの検証のためには統計量が不十分である. そのため J-PARC では加速器のアップグレードが行われる予定である. MR のビーム繰り返し周期を現在の 2.48 秒から 1.32 秒まで短くすることで, ビーム強度を現在の 515 kW から 750 kW にまで向上させる計画である. このような短い繰り返し周期を達成するために, 2021 年に主電磁石システムのための電源が導入される. その後も段階的にビームを強化し, 2028 年までにビーム強度を 1.3 MW にまで高めることを目標としている. また, 新たな

な後置検出器として、SK の 8 倍程度の有効体積をもつ水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデの建設が進められており、2027 年の実験開始が予定されている。

### 2.7.1 ND280 アップグレード計画

統計量の増大に伴い、相対的に系統誤差の影響が大きくなる。とくに表 2.1 のようにニュートリノ原子核反応の反応断面積の不定性に起因する系統誤差が大きい。これを削減するためには、前置検出器群によるニュートリノ反応の精密測定が必須であるが、現行の ND280 は以下の問題を抱えている。これらの問題の原因となっている現行の FGD での飛跡検出の様子を図 2.13 に示す。

- 現行の ND280 における主なニュートリノ反応標的でありメイントラッカーである FGD は、断面積約  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  棒状のシンチレータを鉛直方向に並べた層と水平方向に並べた層をビーム軸に垂直に交互に配置した構造であり、反応点や飛跡の再構成のためには、鉛直方向の層と水平方向の層に少なくとも 3 層ずつ、合計 6 層以上のシンチレータでヒットが検出される必要がある。したがって、前方に散乱した荷電粒子の飛跡は多くの層にヒットを残すと考えられるので、検出器の感度は高くなる一方、荷電粒子が大角度で散乱され、散乱角が棒状のシンチレータに平行な角度に近くなるほど多くの層にヒットを残すことができず、それらに対する感度は低くなる。後置検出器の SK は全方向に対してほぼ一様な感度をもつので、ND280 の結果から SK で観測されるイベントを予測する際に、この違いが系統誤差の要因となる。
- FGD は上記のような構造をしているため、前方散乱であっても再構成のためには 6 層分 (約 6 cm) 以上の飛跡が必要である。陽子の場合、エネルギー損失から計算すると運動量で約  $600 \text{ MeV}/c$  に相当する。そのため  $600 \text{ MeV}/c$  未満の低運動量の陽子に対する感度が著しく小さくなる。また横方向に散乱したものに対してはさらに感度が落ちる。
- 電子ニュートリノの反応で生じる電子は検出器内で電磁シャワーを起こす。また  $\pi^0$  粒子が 2 本のガンマ線に崩壊したとき、これらのガンマ線も電磁シャワーを起こす。電子ニュートリノの反応を再構成する際、FGD ではガンマ線からの電磁シャワーを電子によるものと区別することが難しく、外部からのガンマ線による背景事象の混入が原因で電子ニュートリノ反応を正確に測定することが難しいという問題がある。

表 2.1 SK においてチェレンコフリングが 1 つ検出される事象に対する主な系統誤差と全体の系統誤差 (単位は%)。

	ミューニュートリノ事象		電子ニュートリノ事象	
	$\nu$ モード	$\bar{\nu}$ モード	$\nu$ モード	$\bar{\nu}$ モード
フラックスおよび反応断面積への制限	2.1	2.3	2.0	2.3
前置検出器で制限しきれない反応断面積の不定性	0.6	2.5	3.0	3.6
SK 検出器および SK での 2 次反応の不定性	2.1	1.9	3.1	3.9
全体の系統誤差	3.0	4.0	4.7	5.9

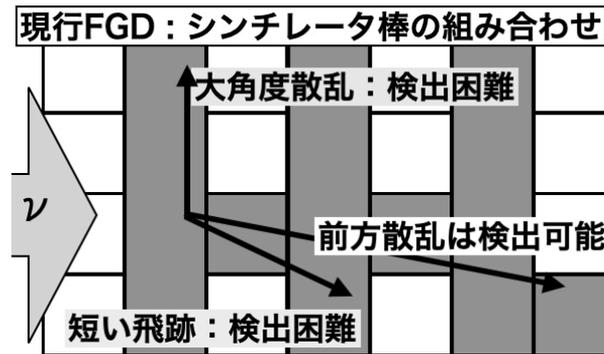


図 2.13 現行 FGD での飛跡検出の概念図. 現行 FGD は棒状のシンチレータが垂直方向と水平方向に並べられており, 大角度に散乱した粒子, 低運動量の粒子の検出が困難である.

これらの問題を解決するため, ND280 のアップグレードが計画されている. ND280 アップグレードでは現行の ND280 の P0D の部分をニュートリノ反応標的であり検出器である Super FGD と, その上下に 2 台設置される High Angle TPC, これらの検出器を囲うように設置される Time of Flight 検出器で置き換える<sup>[28]</sup>. Super FGD と High Angle TPC を導入したときの ND280 のトラッカー部分を図 2.14 に示す.

#### ● Super FGD

大きさ約  $1 \text{ cm}^3$  のプラスチックシンチレータキューブを 3 次元方向に約 200 万個並べた直方体型のニュートリノ検出器である. 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, 波長変換ファイバーおよび光検出器 MPPC で読み出す. 従来の FGD に比べ, 大角度に散乱した荷電粒子の飛跡にも感度があり, また低運動量粒子の  $3 \text{ cm}$  程度までの短い飛跡も検出可能となる. さらに電磁シャワーを高い位置分解能で再構成することで, 電子ニュートリノ反応による電磁シャワーをガンマ線によるものと高確率で区別できる. 詳細は第 3 章で述べる.

#### ● High Angle TPC

現在の ND280 に使用されている TPC のデザインを踏襲したものを Super FGD の上下に配置することで, Super FGD と併せて大角度に散乱した粒子の飛跡再構成を行う. 高抵抗薄膜電極を用いた Micromegas 検出器<sup>[29]</sup> が採用され, より短いトラックの検出が可能になるほか, フィールドケージのデザインが見直され, より大角度に散乱した粒子, 後方散乱した粒子の検出が可能となる.

#### ● Time of Flight 検出器

図 2.15 のように, Super FGD と High Angle TPC を覆う 6 つの面に, 大きさ  $200 \times 1 \times 12 \text{ cm}^3$  (側面),  $230 \times 1 \times 12 \text{ cm}^3$  (ビーム上流部・下流部) のシンチレータバーを並べた検出器である. Super FGD 内でニュートリノ反応が生じてから, 生成された荷電粒子がシンチレータバーを通過するまでの時間差を精密に記録し荷電粒子の速度を測定することで, より精度のよい粒子識別が可能となる. また検出器外部から飛来する荷電粒子に対する veto としての役割ももつ.

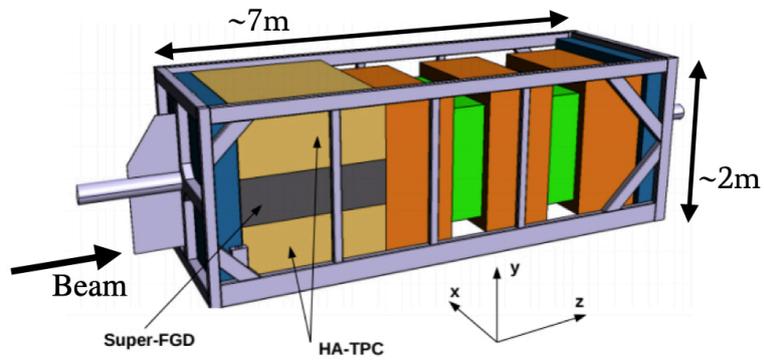


図 2.14 ND280 アップグレード計画で新たに導入される Super FGD と High Angle TPC.

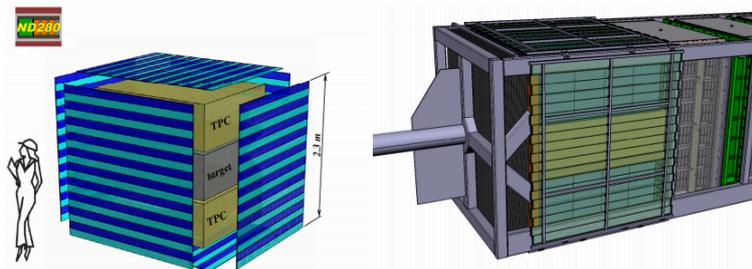


図 2.15 Super FGD と High Angle TPC を囲うように設置される Time of Flight 検出器.

## 第3章 Super FGD

### 3.1 Super FGD

2.7.1節で述べたように、現行のND280における問題を解決するため、ND280のアップグレード計画が進められている。本章ではアップグレードの際に新たに導入される検出器のひとつであるSuper FGDについて述べる。

図3.1に示すSuper FGDは約 $1\text{ cm}^3$ のプラスチックシンチレータキューブを $192 \times 184 \times 56$ 個、3次元方向に積層した直方体型のニュートリノ検出器である。各シンチレータキューブに3方向から波長変換ファイバーを通し、シンチレータキューブ内部を通過した荷電粒子により生じるシンチレーション光を集め、波長変換ファイバーの先端に取り付けられた光検出器MPPCで読み出す。プラスチックシンチレータ自体がニュートリノ反応標的となり、内部で生じたニュートリノ反応で生成された荷電粒子の3次元飛跡を再構成することができる。以下、検出器の構成要素について述べる。

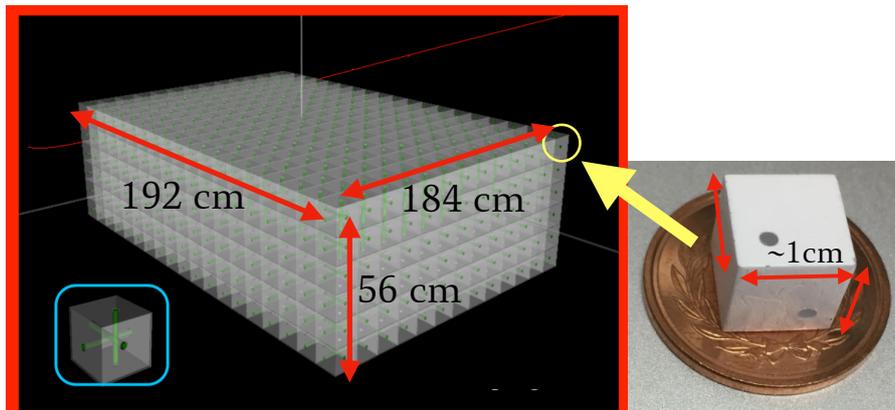


図 3.1 Super FGD の概念図（左）とそれを構成するプラスチックシンチレータキューブ（右）。

#### 3.1.1 プラスチックシンチレータキューブ

シンチレータとして、図3.1右のような、約 $1 \times 1 \times 1\text{ cm}^3$ の大きさのプラスチックシンチレータを用いる。ポリスチレンに1.5%のPTPと0.01%のPOPOPが添加されたものを材質としている。シンチレータキューブの表面には反射層が形成されており、これにより内部で生じたシンチレーション光の収集効率を高めている。また隣接するシンチレータと光学的に分離し、シンチレータキューブ単位の高い位置分解能での飛跡再構成を可能とする。この反射層は、成形されたシンチレータの表面を薬品処理し発泡化させることで形成されている。発泡化させたシンチレータキューブの各面には2つの辺から約

3 mm のところに直径 1.5 mm のドリルで穴が開けられており、これらの穴に波長変換ファイバーを通すことで3方向から光を読み出す。

本章の後半でシンチレータキューブの製造、組み上げについて述べる。

### 3.1.2 波長変換ファイバー

シンチレータキューブ内で生じたシンチレーション光は波長変換ファイバーの最内部（コア）に入射すると吸収され、より長い波長の光として等方的に放出される。これらのうち全反射条件を満たすものがファイバー先端まで伝搬し、ファイバーの片方の先端に取り付けられた光検出器 MPPC で読み出される。MPPC の有感領域に合うように光の波長を変換することにより、光の検出効率を高めている。Super FGD では現行の ND280 で用いているものと同じクラレ社の波長変換ファイバー Y-11 (200) [30] を使用する。このファイバーは壁面（クラッド）が屈折率の異なる材質2層で形成されており（マルチクラッド）、図 3.2 のように壁面が1層のファイバー（シングルクラッド）に比べ全反射の条件が緩くなる。シングルクラッドでは、ファイバー中心軸に対して放出される角度が  $20.4^\circ$  以下の光のみ全反射の条件を満たし伝搬されるが、マルチクラッドではファイバー中心軸に対する放出角が  $26.7^\circ$  までの光が全反射の条件を満たし伝搬される。このファイバーの特性を表 3.1 に示す。

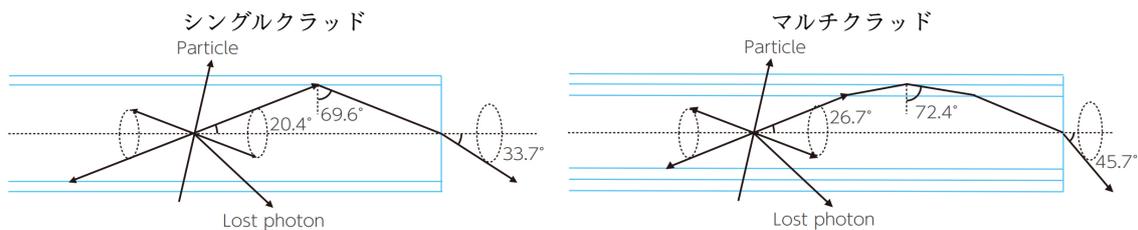


図 3.2 シングルクラッドとマルチクラッドでの全反射条件の違い [31].

表 3.1 クラレ社 Y-11 (200) の特性

項目	特徴
ファイバーの型	断面は円形, マルチクラッド
直径	1.0 mm
材質	コア: ポリスチレン クラッド (内層): アクリル樹脂 (ポリメタクリル酸メチル樹脂) クラッド (外層): フッ素樹脂
屈折率	コア: 1.59, クラッド (内層): 1.49, クラッド (外層): 1.42
密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	コア: 1.05, クラッド (内層): 1.19, クラッド (外層): 1.43
吸収波長のピーク	430 nm
発光波長のピーク	476 nm
減衰長	> 3.5 m

### 3.1.3 光検出器 MPPC

浜松ホトニクスが開発している MPPC<sup>[33]</sup> (Multi-Pixel Photon Counter) は、アバランシェフォトダイオード (APD) という光検出器をマルチピクセル化した半導体検出器で、高い光子数計測能力をもつ。MPPC の概念図を図 3.3 に示す。

APD はしきい値となる電圧 (ブレイクダウン電圧) より高い逆バイアス電圧をかけたとき、光子が入射するとそれにより生成される光電子が内部で雪崩増幅を起こすことにより、光量に関係なく飽和した出力が発生する。APD のこのような状態をガイガーモードという。このときのゲインは  $10^5 \sim 10^6$  程度にもなり、これにより 1 光子の微弱な信号でも高効率で検出可能となる。また、このような放電が継続している間は光子の検出を行うことができないため、APD にクエンチング抵抗を直列接続することにより、放電を短時間で停止し次の光子検出に備える。

このような APD とクエンチング抵抗の組を平面上に数千個並列接続したものが MPPC である。ある APD ピクセルで光子が検出されたときに出力される電荷  $Q_i$  は、印加電圧  $V$ 、ブレイクダウン電圧  $V_{BD}$  を用いて以下のように表される。

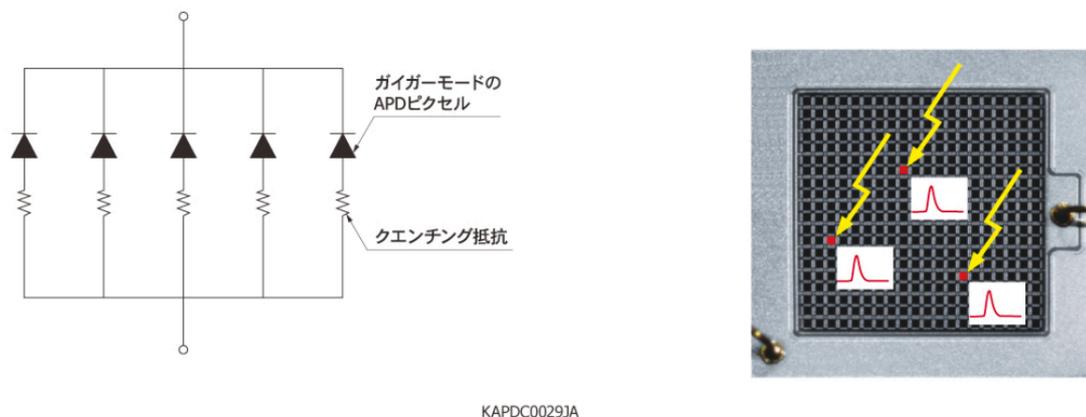
$$Q_i = C(V - V_{BD}), C \text{ は定数.} \quad (3.1)$$

$N$  個の APD ピクセルで光子が検出されたときの MPPC 全体の出力電荷  $Q$  は

$$Q = NQ_i \quad (3.2)$$

となる。このように、MPPC の出力は雪崩増幅が発生したピクセルの個数に比例するので、ピクセルの密度を適切に選ぶことで非常に高い光子数計測能力を得ることができる。また MPPC は磁場の影響を受けないので、ND280 内部でも使用可能である。

Super FGD の読み出しでは図 3.4 のような表面実装型の MPPC S13360-1325PE<sup>[34]</sup> を使用する。Super FGD では狭いスペースに約  $1 \text{ ch/cm}^2$  の高チャンネル密度で、約 6 万個という膨大な数の MPPC を設置する必要がある。そのため表面実装型の MPPC をプリント基板上に  $8 \times 8$  個搭載したものを並べるといった方法を採用する。この MPPC の特性を表 3.2 に示す。



KAPDC0029JA

図 3.3 MPPC の構造 (左) と光子数計測のイメージ (右) [32].

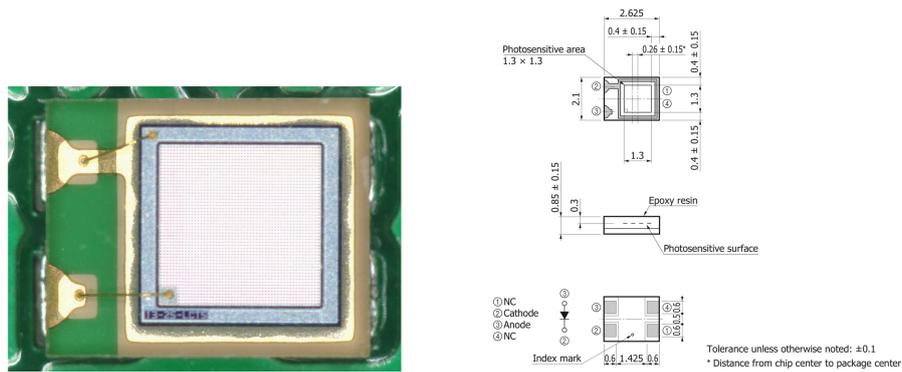


図 3.4 MPPC S13360-1325PE の写真（左）と大きさ（右）。

表 3.2 MPPC S13360-1325PE の特性. 温度 25°C のもと、ブレイクダウン電圧より 5 V 高い電圧を印加したときの測定結果.

有効受光面サイズ	1.3 mm × 1.3 mm
ピクセルのピッチ	25 µm
ピクセル数	2668
開口率	47 %
パッケージタイプ	表面実装型
ブレイクダウン電圧	53 ± 5 V
感度が最大となる波長	450 nm
光子検出効率	25 %
ゲイン	$7.0 \times 10^5$
ダークカウント	~ 70 kcps
クロストーク率	1 %

### 3.1.4 信号読み出しのエレクトロニクス

Super FGD において MPPC の電気信号を読み出すための回路として CITIROC<sup>[35]</sup> (Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip) を用いる. この回路では, まず MPPC からの信号を 2 つのプリアンプで増幅し, ファストシェイパーとスローシェイパーにより波形整形を行う. ファストシェイパーからの信号が予め定めたしきい値を超えたときにデータ取得のためのトリガーを発行する. このときにファストシェイパーの信号から時間情報を得て, スローシェイパーの信号から電荷の情報を得る. CITIROC では 1 枚で 32 チャンネルの MPPC の読み出しを行うことができる. Super FGD では約 6 万個という大量の MPPC の読み出しを行う必要があり, 各フロントエンドボードに 8 枚の CITIROC を実装する予定である.

## 3.2 期待される性能

Super FGD は, 現在の ND280 でのニュートリノ反応標的でありメイントラッカーである FGD と比較して以下のような特長がある. 図 3.5 に現行の FGD と Super FGD それぞれの場合での飛跡検出のようすを示す.

- 2.7.1節で述べたように、FGDは断面積約 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の棒状シンチレータをビーム軸に垂直に鉛直方向に並べた層と水平方向に並べた層を交互に配置した構造をしており、荷電粒子の飛跡再構成のためには鉛直方向の層と水平方向の層でそれぞれ3層ずつ、合計6層以上でヒットが検出される必要がある。荷電粒子の散乱角が垂直に近づくほど、多くの層にヒットを残すことができなくなり、検出効率が低くなる。

その一方でSuper FGDではビーム軸方向だけでなくビーム軸に垂直な方向にもシンチレータが積層されている。したがって大角度に散乱した粒子に対しても、複数のシンチレータにヒットが残るので、検出効率が高い。

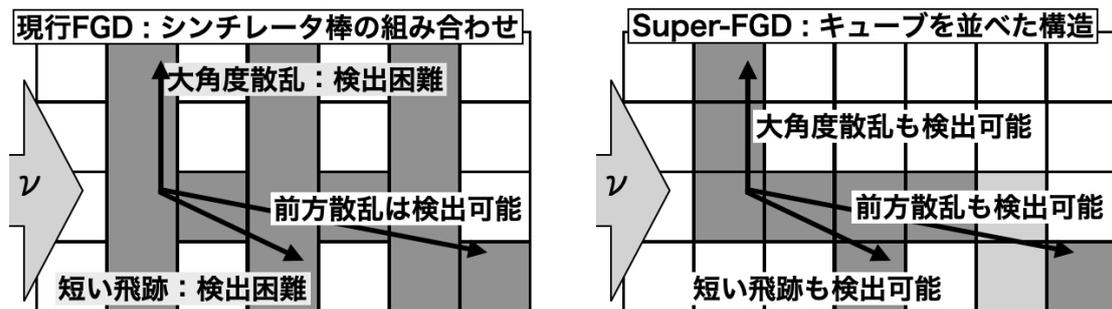


図 3.5 飛跡検出の概念図。左は現行の FGD によるもので、右が Super FGD のものである。現行 FGD では検出の難しかった、大角度に散乱した荷電粒子や飛程の短い低運動量荷電粒子が検出可能となる。

- FGDでは飛跡検出のために6層以上にヒットが必要であり、これは距離に換算すると約6cmである。陽子の場合、エネルギー損失から計算すると運動量約600 MeV/cに相当する。したがって、前方散乱であっても必然的に600 MeV/c未満の運動量をもつ陽子に対する検出効率は低くなる。

Super FGDではひとつのシンチレータキューブにヒットがあればその3次元座標を特定することができるので、飛跡検出のために必要なシンチレータのヒット数がFGDに比べて少ない。具体的には3つ以上のシンチレータにヒットがあれば飛跡として検出可能である。これは約3cmの距離に対応し、陽子の場合、運動量約300 MeV/cに相当する。2.5節で述べたように、T2Kで用いる信号モードであるCCQE反応と、背景事象として存在すると考えられている2p-2h反応を区別する際、2p-2h反応で放出される低運動量陽子の検出が必要である。

図3.6のように、現在のFGDではこのような低運動量陽子の検出を行うことができないため、2p-2h反応の正確な測定ができていないが、Super FGDでは低運動量陽子に対する検出効率が高いため、2p-2h反応の測定を行うことができると考えられている。

- ニュートリノ原子核反応により終状態に $\pi^0$ 粒子が生成され、それが2本のガンマ線に崩壊することがある。また電子ニュートリノの反応では終状態に電子が生成される。これらガンマ線や電子は検出器内で電磁シャワーを起こす。電磁シャワーは、電子や陽電子となって通過した領域やコンプトン散乱等が生じた点は検出器で観測されるが、ガンマ線として通過した領域は検出されないためヒットが離散的となる。

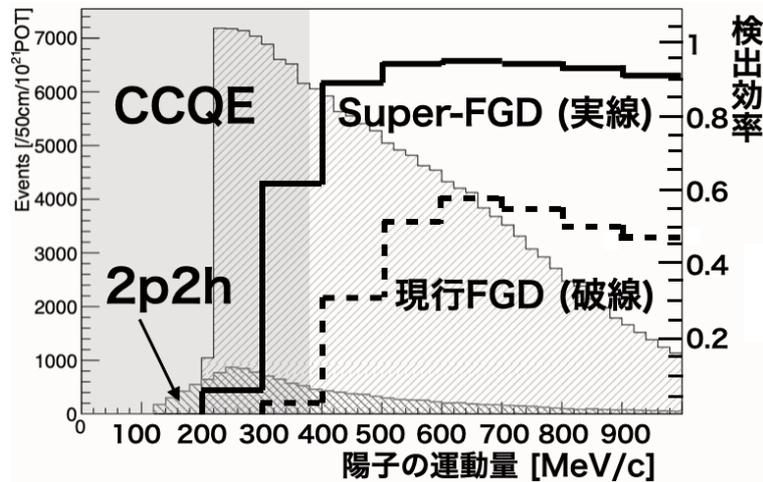


図 3.6 CCQE 反応と 2p-2h 反応で生じる陽子の運動量分布と、それに対する FGD, Super FGD の検出効率.

電子ニュートリノによる反応を測定する際、FGD ではガンマ線由来の信号と電子ニュートリノ由来の電磁シャワーの区別が難しくバックグラウンドの混入が問題であった、Super FGD ではガンマ線が電子陽電子対生成を起こした際に、電子と陽電子の飛跡と、対生成が生じる反応点が検出できるので、それらの情報から電磁シャワーの方向を知ることができる。したがってバックグラウンドが減り、電子ニュートリノ反応を精度良く測定できる。

### 3.3 シンチレータキューブ組み上げまでの流れ

シンチレータキューブはロシアの UNIPLAST 社<sup>[36]</sup>で製造されている。UNIPLAST では PTP と POPOP の添加されたポリスチレンを射出成形によりキューブ状にし、薬品処理による表面の発泡化、3 方向からの穴あけ、穴あけの際に穴の内部に詰まった切りくずの除去まで行っている。

UNIPLAST で製造されたシンチレータキューブはロシア科学アカデミー原子核研究所 (INR, Institute for nuclear research) まで運ばれ、品質検査と仮組み上げが行われる。

#### 3.3.1 シンチレータキューブの品質検査

シンチレータキューブには製造時に生じる個体差がある。大きさや穴の位置の分布をガウシアンでフィットしたときの標準偏差は大きさについて  $\sigma = 23 \mu\text{m}$ 、穴の位置について  $\sigma = 80 \mu\text{m}$  程度である。このようなシンチレータキューブを 3 次元的に大量に積層していくと、僅かな形状の違いによるずれが蓄積し、最終的に波長変換ファイバーを通すことができず検出器が組み上がらない、という問題がある。そこで、各シンチレータキューブを組み上げる前に形状について品質検査を行い、予め使用可能なものとそうでないものに分類する必要がある。

シンチレータキューブに開けられた穴は直径 1.5 mm であり、波長変換ファイバーの直径は 1 mm であるので、隣同士のシンチレータで穴の位置が 0.5 mm 以上ずれるとファイバーを通すことができない。またファイバーに応力がかからないようにするためには検出器の端から端までで穴の位置が 0.5 mm 以

上ずれないことが望ましい。Super FGD の最長辺では 192 個のシンチレータキューブを並べるので、その場合、ひとつのシンチレータでの穴の位置のズレを  $\sigma$  とすると、このような条件を満たす  $\sigma$  は

$$\begin{aligned} \frac{192\sigma}{\sqrt{192}} &< 0.5 \text{ mm}, \\ \sigma &< 30 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned} \quad (3.3)$$

となるので、穴の位置のずれが 30  $\mu\text{m}$  未満のシンチレータキューブを使用すれば、原理的にはファイバーに応力がかかることなく検出器の組み上げが可能となる。したがって、穴の位置のばらつきが 80  $\mu\text{m}$  程度である現在のシンチレータキューブ製造の精度では検出器の理想的な組み上げは不可能である。しかしこの条件を満たすようなシンチレータのみを使用する場合、全体のシンチレータキューブのうち半分以上が使用不可となってしまふ。そこで品質検査を行い、個々のシンチレータキューブの大きさと穴の位置を測定することで、ある程度波長変換ファイバーに応力がかかることを許しつつも、途中で折れたりキズがつくことなく全て通すことができるようにシンチレータキューブを選別し並べる必要がある。

INR でのシンチレータキューブの品質検査は、以下のような工程で行われる。

まず、シンチレータキューブを 14  $\times$  14 個穴の向きが揃うように並べる。図 3.7 のように、水平方向の縦の穴 14 個と横の穴 14 個全てに対して合計 28 本の直径 1.4 mm のステンレス製の棒を通す。このとき、各列、各行の 14 個のシンチレータキューブの水平方向の穴の位置が揃っていれば、穴の直径は 1.5 mm なので、それらを通すステンレス棒には大きな応力がはたらくことはなく、容易に抜き差し可能となるはずである。その一方で、穴の位置がずれていたり、シンチレータキューブの大きさが大きすぎるなどして隣同士で干渉し合うと、ステンレス棒に対し垂直方向に大きな応力がはたらく抜き差しするのに力かける必要が生じる。このとき応力がはたらく箇所を特定し、そこにある不良キューブを取り除く。そしてそこに別のシンチレータキューブを挿入し再度ステンレス棒を通す。これによって水平方向の 2 方向の穴については検査が完了する。この操作を行ったあと、横の穴に通した 14 本のステンレス棒を抜き、縦に通したステンレス棒を軸として各シンチレータキューブを 90° 回転させる。その後、横から 14 本のステンレス棒を再び通し、残りの穴に対しても同様の検査を行う。

このような品質検査を複数人で並行作業で行っている。全体に対して約 5 % のシンチレータキューブを不良であるとして取り除いている。検査にかかる時間は、この 14  $\times$  14 個のシンチレータキューブに対して、不良品が何個入っているかによるが、後述の釣り糸を通す時間まで含めて 30 分から 2 時間程度である。

### 3.3.2 釣り糸を用いた仮組み上げ

Super FGD では最終的には各シンチレータキューブの穴に直径 1 mm の波長変換ファイバーを通し、その先端を MPPC の受光面と合わせることで検出器自体の組み上げが完了する。波長変換ファイバーを通す際に、途中でファイバーに対して垂直方向に応力が加わりファイバーが折れてしまったりキズがついたりすると、そこから光が漏れてしまうため光の収集効率が大幅に落ちる。そこで波長変換ファイバーを通す前に、シンチレータキューブの 3 次元的位置合わせを行う必要がある。そのために仮組み上げとして、釣り糸を用いた手法が採用されている。

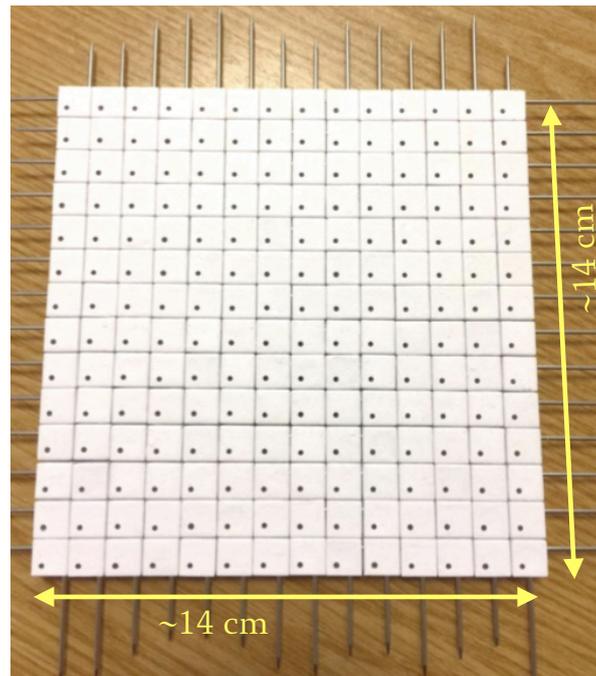


図 3.7 INR で行われているシンチレータキューブの品質検査. 縦と横からステンレス棒が通されている.

この方法では、直径 1.3 mm のプラスチック製の釣り糸をシンチレータキューブに通すことでシンチレータキューブの位置合わせを行う。全てのシンチレータキューブを釣り糸を用いて直方体に組み上げた後で、釣り糸を波長変換ファイバーで 1 本ずつ置き換えていく。

品質検査の結果、使用可能と判断されたシンチレータキューブはその場で釣り糸による仮組み上げが順次行われる。品質検査が完了した 14 × 14 個のシンチレータキューブからまず横の穴に通した 14 本のステンレス棒を抜き、代わりに 1 本の釣り糸をキューブを縫うように左右から交互に通していく（図 3.8 左）。全てのキューブに釣り糸を通した後、縦の穴に通しているステンレス棒を抜く。このようにして 192 個のシンチレータキューブを 1 本の釣り糸で 1 列に並べる<sup>1</sup>（図 3.8 中）。このようなシンチレータキューブ列を 184 個横に並べ、横からも釣り糸を通すことでシンチレータキューブを 2 次元的に組み上げる（図 3.8 右）。最後にこのシート状のシンチレータキューブを積み重ね、鉛直方向にも釣り糸を通すことで 3 次元的に組み上げる。

### 3.4 シンチレータキューブ組み上げの現状・問題点

シンチレータキューブは 2019 年 5 月から 2021 年 1 月 18 日までに 210 万 8 千個が製造され、192 × 184 シンチレータキューブシートは Super FGD で必要とされる 56 層の 2 次元組み上げが全て完了した。この時点ではまだ鉛直方向には釣り糸は通されていない。鉛直方向にも釣り糸を通した後、日本に輸送され、2021 年 6 月頃までには釣り糸と波長変換ファイバーの入れ替え作業と MPPC およびエレクトロニクスの取り付けが行われる。Super FGD の建設スケジュールを図 3.9 に示す。

<sup>1</sup>14 × 14 = 196 であるが、Super FGD の最長辺には 192 個のシンチレータキューブが並べられるため、4 個取り除く



図 3.8 品質検査後，ステンレス棒を抜き，釣り糸を通してシンチレータキューブ列を作る（左，中）．シンチレータキューブ列を並べて横からも釣り糸を通しシート状に組み上げる（右）．

		2018		2019				2020				2021			
		Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Scintillator cubes	R&D														
	Mass production														
Cube assembly procedure	R&D														
	Test with 10%														
WLS fiber	Procurement														
	QC and preparation														
Optical coupling	Prototype														
	Connector production														
	MPPC-PCB production														
MPPC	Procurement														
	MPPC mounting on PCB														
	MPPC QC														
SFGD mechanics	Design														
	Prototype test														
	Fabrication														
SFGD FEB	Design														
	ASIC/FPGA procurement														
	FEB prototype														
Backend electronics	FEB production and test														
	Design and prototyping														
Calibration	Production														
	Design														
DAQ	Production														
	Design														
	Final system														
Assembly and integration	System test														
	Cube assembly														
	MPPC, electronics integration														
	Commissioning on surface														
	Installation and commissioning														

図 3.9 Super FGD 建設のスケジュール．

### 3.4.1 現在の組み上げにおける懸念事項

現在ロシアで行われているシンチレータキューブの品質検査と釣り糸を用いた組み上げ手法には、いくつかの懸念事項が存在する。

まず、前述のように品質検査はすべて手作業で行っている。ステンレス棒にかかる応力から個人の感覚で不良シンチレータキューブを除去しているため、各シンチレータキューブの定量的な評価が行えていない。特に、隣り合うものとの干渉によってしか不良シンチレータキューブの特定が行えないため、14 × 14 での検査の段階で問題がなくても、検出器の組み上げの際に別のシンチレータキューブと隣り合ったとき、例えば両者が平均よりも大きなキューブであった場合には干渉がおきてしまう可能性がある。さらに複数人での並行作業のため判断に個人差が生じるおそれがある。また手作業での検査のため時間がかかる。先に述べたように 14 × 14 個のシンチレータキューブの検査に最長で 2 時間程度かかるので、ひとつのシンチレータキューブにつき最長で 30 秒以上かかることになる。さらに手作業で行うということはそれだけの労働力が常に必要であるということであり、非常に効率が悪い。

組み上げに際しても懸念事項がある。まず釣り糸を用いた手法で最終的に  $192 \times 184 \times 56$  個のシンチレータキューブを組み上げることができるという確証はない。現在、 $192 \times 184$  個のシンチレータを平面状に組み上げることはできている。また3次的に組み上げる場合にも、これまでに  $20 \times 30 \times 8$  個や  $6 \times 6 \times 200$  個といった小型の検出器の組み上げは成功している。しかし Super FGD の実機を組み上げる際には、シンチレータキューブを大量に積層することで僅かなズレが蓄積していくことが考えられ、これにより組み上げることができない可能性がある。

また、もし組み上げられたとしても、釣り糸を波長変換ファイバーと入れ替えたとき、検出器はシンチレータキューブと波長変換ファイバーが互いに支え合う状態になる。このとき波長変換ファイバーに力がかかるおそれがあり、前述のようにファイバーが折れてしまうと光の収集に影響が出る。特に、検出器の外側は箱で覆われるものの、中心部では支持具がないため、中心部分で最大  $3-4$  mm 程度の重力によるたわみが生じ、その分ファイバーに負荷がかかると考えられている。また、支持具が内部に含まれていないので検出器全体が連続体のようにふるまうと考えられており、地震が起きた際のシミュレーションは計算量が膨大になる問題から十分に行われておらず、耐震性についても疑問視されている。

### 3.4.2 画像解析を用いた品質検査、超音波溶着によるシンチレータキューブの組み上げ

前節のように人の手による品質検査には問題がある。さらに釣り糸を用いた検出器の組み上げにも問題が生じ検出器の組み上げを行うことができないと判断された場合に、別の方法で速やかに検出器の組み上げを行うことができるように、代替手段として新たに、画像解析に基づく品質検査手法および超音波溶着を用いた組み上げの手法の開発を行っている。

#### 画像解析を用いた品質検査

カメラでシンチレータキューブの各面を撮影し、得た画像からシンチレータキューブの大きさや穴の位置などのパラメータを抽出し、その情報を元に使用可能なキューブとそうでないものに分類する手法を開発した。画像から得たパラメータを利用するので定量的に各シンチレータキューブを評価することができる。また撮影から画像解析、シンチレータキューブの分類まで全て自動で行うことのできる検査システムを製作することで、すばやく検査を行うことができ、必要となる時間、労働力が大幅に削減される。品質検査システムのために必要となるハードウェアと検査システム全体の組み上げについては4章で、画像からパラメータを抽出するための画像解析の手法については5章でそれぞれ述べる。

#### 超音波溶着を用いた組み上げ手法

図3.10に示すように、厚さ  $0.2$  mm の薄いシートの上に  $24 \times 32$  個のシンチレータキューブを並べて固定したシートモジュールを大量に製作し、このシートモジュールを積層したところに3方向から波長変換ファイバーを通すことで検出器を組み上げる手法を現在開発している。この薄いシートはシンチレータキューブと同じポリスチレン製で、超音波溶着の手法を用いてシートにシンチレータキューブを固定する。超音波溶着はプラスチックの接手法の1つであり、2つの接合したいプラスチック製品の上からホーンを用いて超音波振動を伝達させることで、両者の境界の部分が摩擦により熱され、その部分の

材質が溶解し、互いに混じり合い接合される（図 3.11）。接着剤を用いた接着を行うと、接着剤によってシンチレータが劣化するおそれがあり、また接着の程度によっては接着面に凹凸が生じ、組み上げに影響を及ぼすおそれがある。一方で超音波溶着ではシンチレータの劣化や溶着面の凹凸が生じにくい。

このような溶着手法により、図 3.12 のように専用のジグに並べたシンチレータキューブの上からポリスチレンシートを乗せ、両者を接合することでシートモジュールを製作する。なお、このシートにはシンチレータキューブの穴位置に対応する適切な位置に穴が開けられており、シートモジュールに垂直な方向にもファイバーを通すことができる。

シートモジュールを単位とした組み立て手法では、この単位での組み上げが可能であることを示すことさえできれば、シートモジュール間でキューブの大きさや穴の位置のズレが伝搬することがないので、同様の工程を繰り返すことで Super FGD のように大型の検出器であっても組み上げが可能であることを示すことができる。またシートに各シンチレータキューブが固定されており、シンチレータキューブは独立には動かないので、波長変換ファイバーに大きな応力がかかることが少なくなり、ファイバーが折れてしまう可能性が小さくなると考えられる。さらに各層にシートが入っていることによりこれが支持具となり、検出器全体の堅牢性が大幅に向上する。

ただし、予めシンチレータキューブの位置を固定してしまうので、シートモジュール上で隣同士のシンチレータキューブ間で穴の位置が揃っていないとファイバーを通すことができない。そのため事前に上記の画像解析によるシンチレータキューブの品質検査を行い、使用可能なものを適切に並べる必要がある。シンチレータキューブの並べ方については7章で述べる。

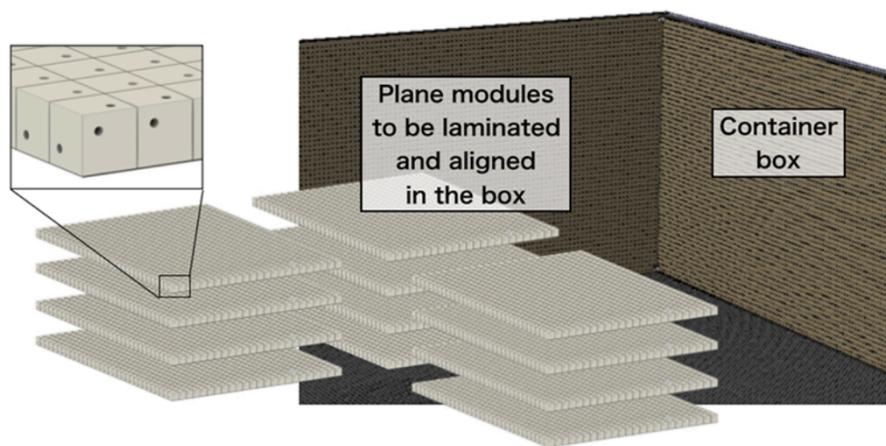


図 3.10 シートモジュール単位でシンチレータキューブを組み上げる手法。

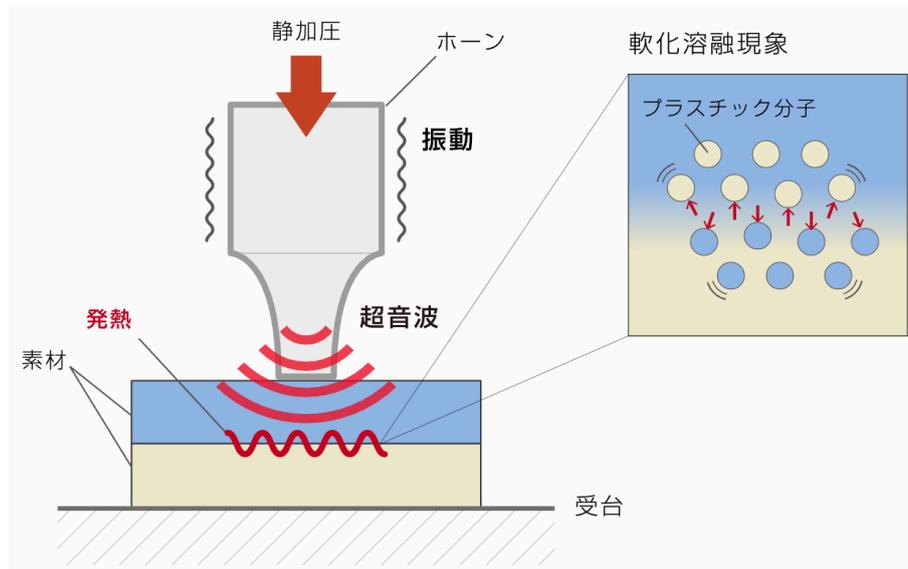


図 3.11 超音波溶着の原理 [37].

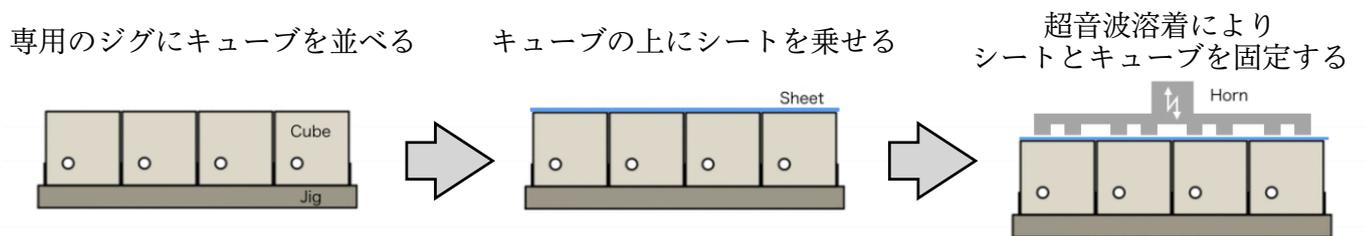


図 3.12 シートモジュール製作の流れ.

## 第4章 シンチレータキューブ品質検査システム開発

### 4.1 検査システムの概要

3.4.2節で述べたように、高速で定量的なシンチレータキューブの品質検査を行うために、画像解析に基づく自動検査システムの開発を行った。大まかに以下のような流れでシンチレータキューブの検査を行う。

- シンチレータキューブを撮影台に配置
- シンチレータキューブの6面を撮影
- 6面の画像を解析，シンチレータキューブの大きさや穴の位置等のパラメータを抽出
- 予め設けた選別条件によってシンチレータキューブを選別・分類
- 分類にしたがってシンチレータキューブを移動

本章ではこれらの操作を自動で行うために必要となるハードウェアとその制御，また検査システム全体の組み上げについて述べ，画像解析の手法については次章で述べる。なお，以降シンチレータキューブを単にキューブと呼ぶ。

### 4.2 検査システムに要求される性能

自動検査システムに要求される性能は大きく以下の2つに分類される。

まず，撮影および画像解析の精度についての要求である。約  $1\text{ cm}^3$  のキューブの大きさや，直径約  $1.5\text{ mm}$  の穴の位置を正確に測定するためには  $O(10\ \mu\text{m})$  の精度が必要とされる。そのため，キューブの6面を等しい条件で撮影可能かつ再現性の高い撮影台の製作，高画素数な画像の撮影を行う必要がある。もしキューブが理想的な直方体であり，穴が各面に垂直に開いているならば，3面のみの撮影で大きさや穴の位置を測定することができる。しかし実際のキューブは表面が発泡処理されており凹凸があり，穴が傾いて開けられてしまっているものもある。このようなキューブの個体差を正確に測定するために，今回は6面全ての撮影を行う。また1ピクセルあたり  $10\ \mu\text{m}$  程度となるような撮影のためには，最低でも200万画素以上のカメラと，その画素数いっばいにキューブを写すことのできるレンズが必要である。

次に，検査時間および自動化についての要求である。現行のロシアの検査では  $14 \times 14$  のキューブに対し30分から2時間程度かかっており，その作業全てが人の手によって行われている。1日あたり8時間労働を仮定すると約938日かかる。実際には複数人での並行作業となっており，4人での並行作業な

ら235日程度である。また複数人で検査を行う場合、人によって検査基準が異なってしまのおそれがある。検査を自動で行うことができれば基準が統一され定量的な分類が行えるだけでなく、大幅に労働力を抑えることができ、かつ検査にかかる時間も短縮する。もし3.3.2節や3.4.1節で述べたように釣り糸による組み上げが頓挫する場合には本システムを用いて速やかに再検査を行い、超音波溶着を用いた組み上げ手法に移行する必要がある。3ヶ月程度の短時間で200万キューブを検査するには、24時間連続稼働を仮定すると、1キューブあたり5秒程度での検査・分類を行う必要がある。

### 4.3 検査システムの全体像

図4.1、図4.2にキューブ自動検査システム全体の写真を示す。前節で述べたように、キューブ6面の等しい条件での撮影、キューブの移動の自動化のために、高精度な位置決めが可能なステッピングモーター（後述）を用いた回転機構を採用し、装置全体を光学台に固定した。装置の横幅、光学台の面からの高さはそれぞれおよそ900mm、600mmである。

キューブを撮影台に乗せ装置を45°回転させると、3台のカメラが設置された撮影点1に移動し3面を撮影する。その後さらに装置を45°回転させると、撮影台の上でキューブが転がり（後述）撮影点1とは異なる角度に3台のカメラが設置された撮影点2に移動し、残りの3面を撮影する。撮影の際のカメラの焦点距離は、後述するカメラの補助レンズを使ったときにキューブを画面全体に大きく写すことができる5cmとした。最後に45°回転させるとキューブが撮影台から落ち、床に置かれた箱に入る。その際、後述するサーボモーターに取り付けられた選別弁が画像解析の結果に基づいて動き、キューブはそれにしたがって分類ごとに異なる箱に回収される。現状ではこれらの操作のうちキューブを撮影台に乗せ、キューブの撮影を行う合図となるキーを入力するところは人の手で行い、それ以降の回転・画像解析・選別は全てこの合図をもとに自動で行われる。図4.3に検査システム全体のフローチャートを示す。

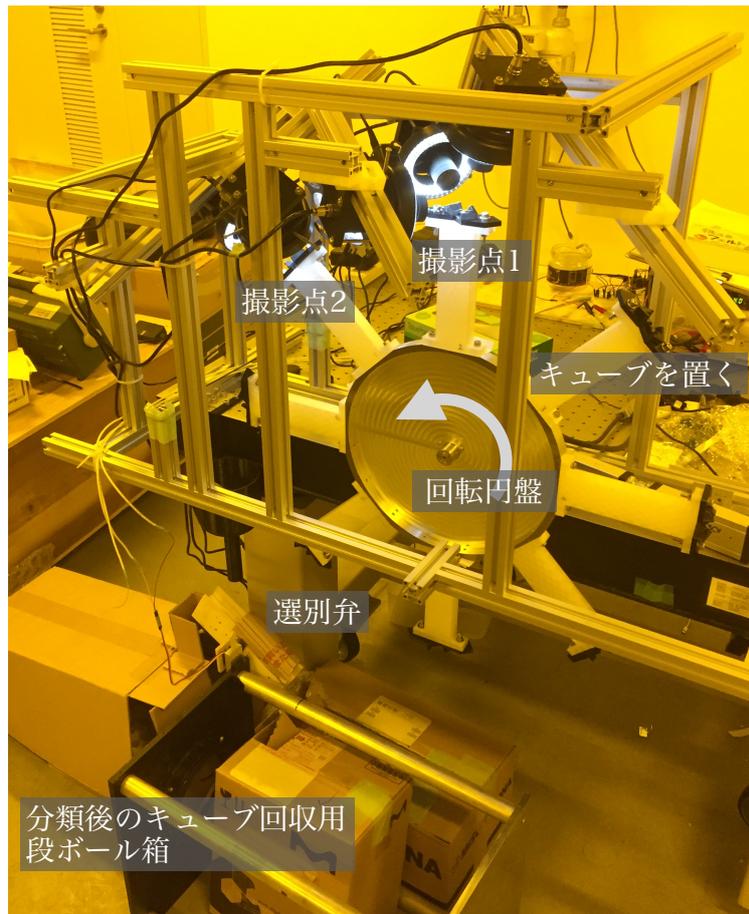


図 4.1 シンチレータキューブ自動検査システム. この実験室は波長変換ファイバーの保管庫として使われており, 波長変換ファイバーやシンチレータの劣化を防ぐため, 短波長領域の光を出さない特殊な照明が使われている. 部屋全体が黄色く見えるのはこのためである.

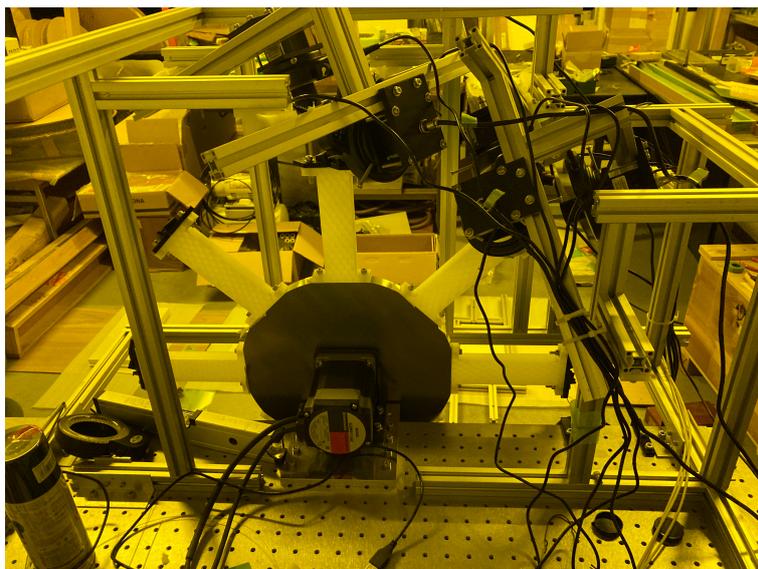


図 4.2 自動検査システムを背後から見た図. モーターで円盤を回転させる.

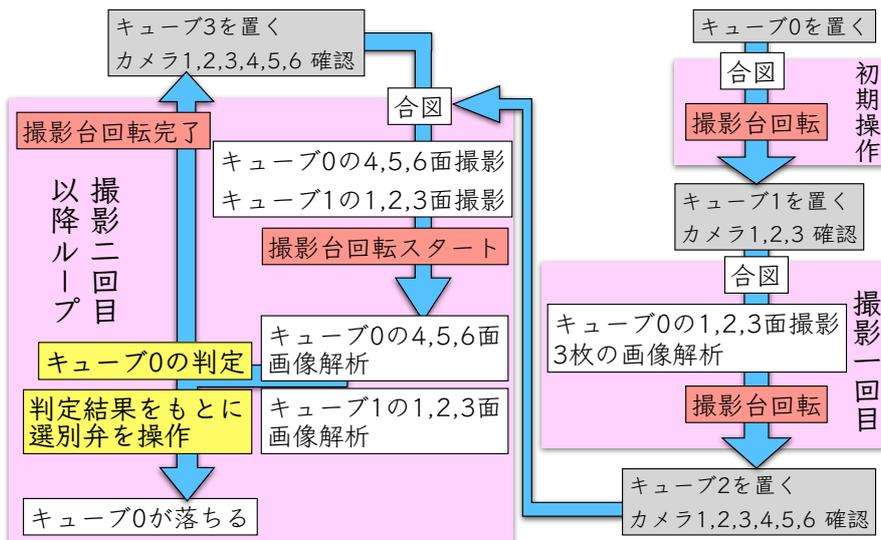


図 4.3 自動検査システムによるキューブ検査のフローチャート．キューブ0を置くところから始まる（右上）．

## 4.4 キューブ撮影台の開発

### 4.4.1 回転円盤

モーターの回転により撮影台・キューブを移動させるための回転円盤の写真を図 4.4 左に示す．直径 310 mm のアルミニウム円盤の周囲 8 箇所には長さ 160 mm の PLA 樹脂の部品が取り付けられており、その先端にキューブ台座（後述）が設置されている．装置の回転には 5 相ステッピングモーター（後述）を使用しており、 $0.36^\circ$  ごとに回転角を制御することができる．一定の角度ごとに撮影台を設置することで、常に同じ角度回転させるたびにカメラの前に撮影台が現れるようにする．そのため撮影台を設置する角度は、回転軸を中心とする正多角形の頂点となる位置である必要がある． $360^\circ = 0.36^\circ \times 100$  なので、四角形、五角形、八角形、十角形、... と 100 の約数の正多角形に対応する角度でなければ回転角との整合性が取れない．今回はキューブを撮影台に置くための場所の確保と、カメラを互いにぶつからないよう 6 台設置する都合から回転円盤には八角形を採用し、直径を 630 mm と決定した．直径は小さいほど慣性モーメントが小さくなるため回転が安定するが、カメラを配置するスペースと、5 cm の焦点距離を確保する必要からこのような直径とした．また、円盤全体の質量も小さいほど慣性モーメントが小さくなるので、できるだけ軽いほうが望ましいが、製作精度を確保する必要もあるため材質にはアルミニウムを用いた．その上でモーター接続部とキューブ台座設置部を除く平面の部分に切削加工を施し、円盤の厚さを 5 mm にまで薄くすることで軽量化を図った．

業者へ発注する際に直径を必要な長さの半分で依頼してしまったが、足りない長さを 3D プリンタで製作した延長部品（図 4.4 右、材質は PLA 樹脂）で補うことにより、結果的に外側の質量が小さくなったことで慣性モーメントが小さくなり、回転がより安定した．

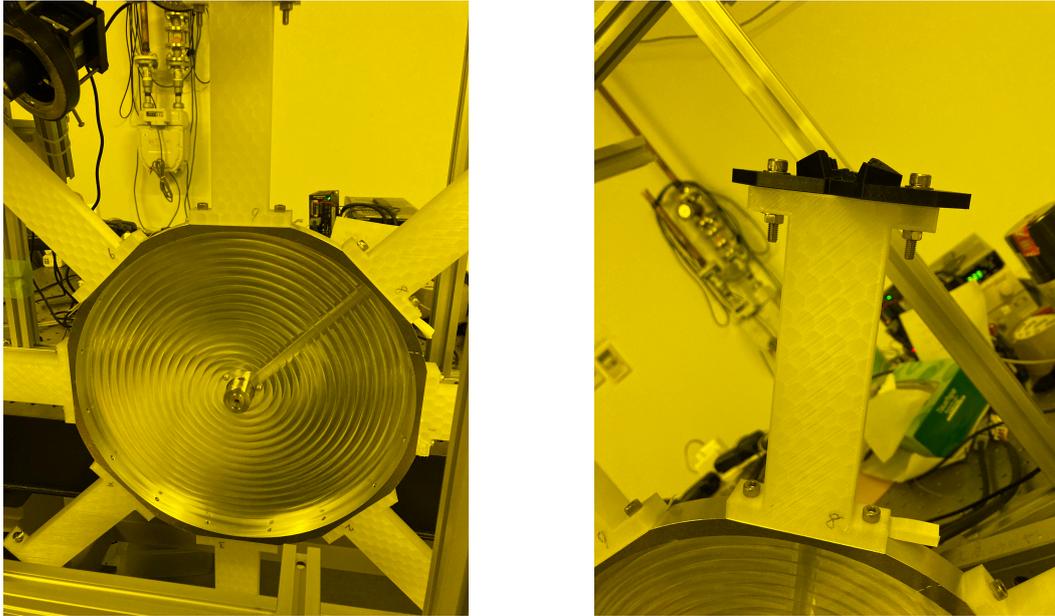


図 4.4 左は回転円盤と延長部品。同心円状の模様のように見える部分が切削加工を行った部分。右は回転円盤の延長部品と後述するキューブ台座を組合せた、キューブの撮影台。

#### 4.4.2 キューブ台座

図 4.5 に撮影の際にキューブを配置する場所となる部品の写真を示す。これは 3D CAD 上でデザインしたのち (図 4.6), 3D プリンタで製作したものである。材質には PLA 樹脂を用いた。なおこれ以降, システム全体においてキューブを置き撮影するための部品と回転円盤の延長部品を合わせて撮影台と呼び, 図 4.5 や図 4.6 のような, 撮影台の先端に位置する, キューブを置くための特殊な形状の部品をキューブ台座と呼ぶことにする。

キューブの面を撮影するにあたり, まず決まった位置にキューブが正しく配置される必要があるので, 底面および 2 つの側面に壁を用意し, 3 つの方向からキューブを支えるような形状とした。このような形状にすることで, キューブを手で台座に置く際に, 重力により自然と壁にもたれるようにキューブが移動し, 自動的に高精度な位置決めが行われる。二箇所の撮影点でキューブの 6 面すべての撮影を行うためには, 撮影点 1 で 3 面の撮影をした後 (図 4.7), キューブを回転させて残りの 3 面が現れるようにする必要がある。本キューブ台座を用いたキューブ撮影の原理を図 4.8 に示す。本キューブ台座は, キューブを設置する部分を向かい合わせに 2 つ用意し, システム全体の回転に合わせて台座が傾きキューブが 2 つの設置部分の間を転がりながら移動することで, 自動でキューブが回転し, それまで壁に隠れていた残りの 3 面が現れ撮影可能となる。なおこれらの壁はキューブ自身よりも大きいと撮影の際に影となり悪影響を及ぼすので, キューブより 2 mm 程度小さく設計した。

また画像解析の際に白いキューブ部分を背景から抜き出すために, 背景は予め黒くしておく必要がある。台座の壁部分も黒くする必要があり, 水性アクリルスプレーや, ビロード状の反射の少ない黒布の貼り付けを試したが (図 4.9), 実際のカメラでの写りや, 後述するキューブの転がり, 手間のかかり方などを考慮して, 材質に黒色の PLA 樹脂を使用することにした (図 4.10)。

また、キューブの表面は薬品処理によって発泡化されており弾性があり、台座との間に大きな摩擦が生じやすく、キューブが台座にくっついてしまいうまく転がらないという問題がある。そのため、台座のキューブと接する面に常温で硬化するフッ素樹脂スプレー<sup>[38]</sup>を塗布し、キューブが滑りやすくなるようにした。さらに台座の壁の部分を凹凸のある形状にすることで、キューブと壁との接触面積が小さくなるようにした。

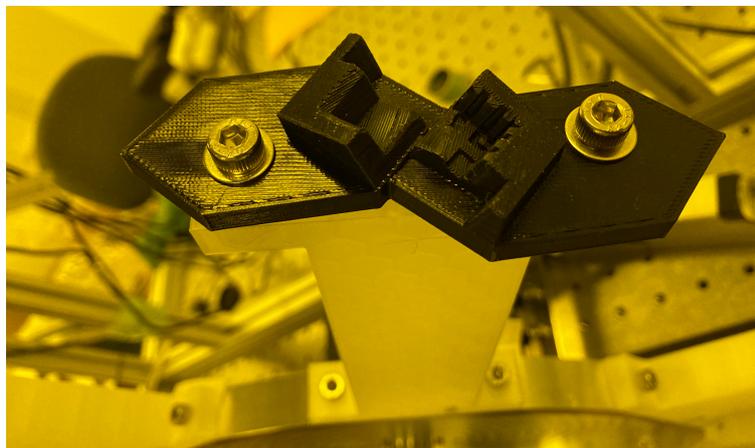


図 4.5 キューブ台座。2つのキューブ配置部分はフッ素樹脂スプレーが塗布されている。

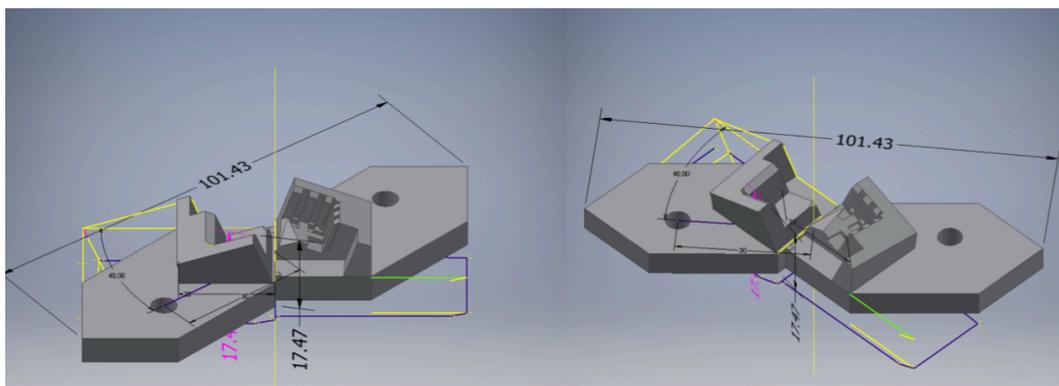


図 4.6 キューブ台座の3D CAD図。

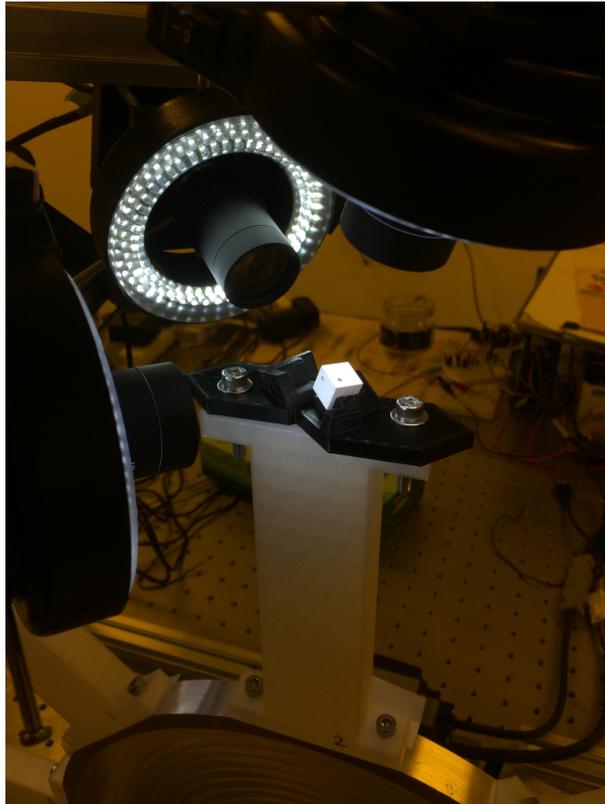


図 4.7 撮影点1でのキューブ台座. キューブが乗っており, リング LED を備えたカメラが3方向からキューブを撮影する.

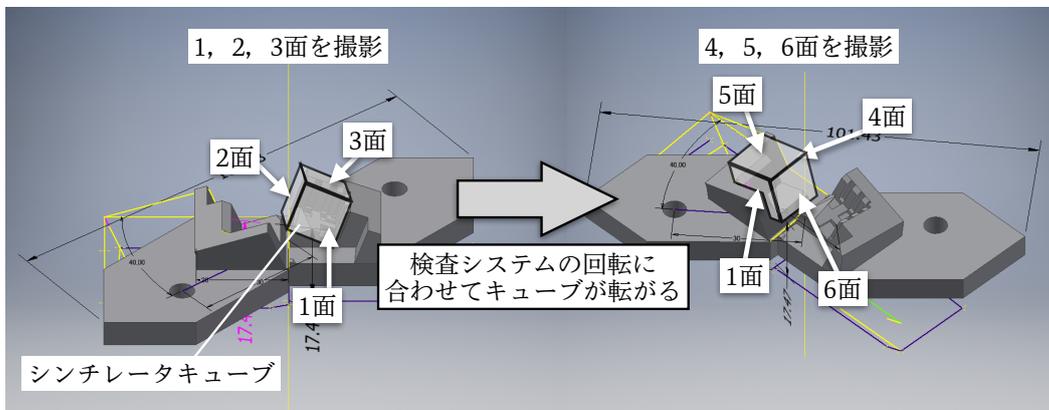


図 4.8 キューブ台座を用いたキューブ撮影の原理. 撮影点1で1, 2, 3面の撮影を行った後, 検査システムの回転にあわせてキューブが転がりながら移動し, 撮影点2で残りの4, 5, 6面を撮影する.

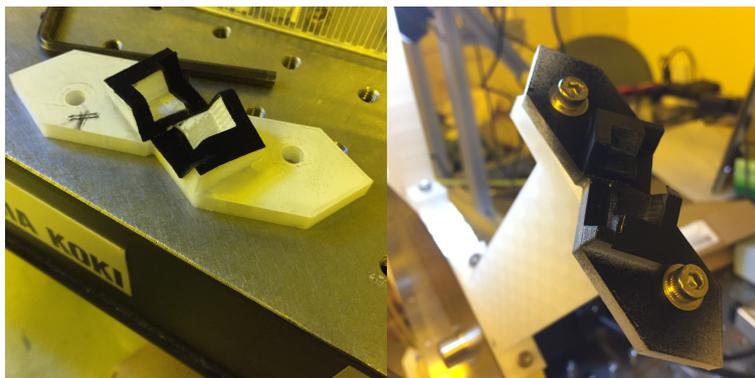


図 4.9 キューブ台座の試作. 反射の少ない布を貼ったもの(左)とスプレーで塗装したもの(右). 布や紙を貼る場合, 台座・キューブの動きに影響がないようにしつつ細かな隙間にも貼る必要があり, 非常に手間がかかる. スプレーで塗装する場合, キューブ設置部分に塗料がかかるとキューブの滑りに影響が出るので設置部分の養生が必須であり, やはり手間がかかる.

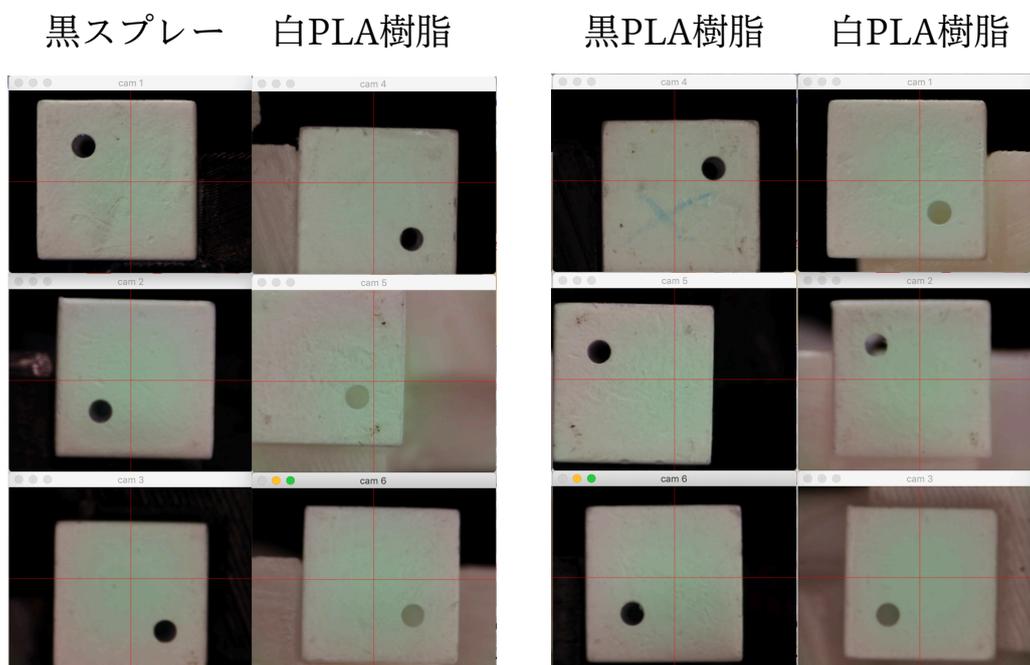


図 4.10 黒スプレー, 黒PLA樹脂を用いたときのキューブの写り方(左, 中). なおこの画像を撮影した段階ではカメラの位置は最適化されておらず, キューブの一部が画面からはみ出している. どちらの場合も白PLA樹脂を使用した場合に比べ, キューブの外側が画像解析に使用可能な程度に十分黒くなっている.

## 4.5 必要となるハードウェアとその制御

### 4.5.1 カメラ

キューブを撮影するためのカメラは図 4.11 に示したような ELP 社の 800 万画素ウェブカメラ ELP-USB8MP02G-SFV(5-50) [39] を用いた。このカメラは USB を介して PC から制御可能である。焦点は自動では合わず焦点距離と絞りを手動で調節する必要がある。しかし今回は決まった位置に置かれたキューブの撮影が目的であるため、一度焦点距離を決定してしまえばその後焦点を合わせる時間がかからないので、このようなカメラが適している。

このウェブカメラは PC に接続すると、任意のムービー収録・再生ソフトから呼び出すことで簡単に取り扱うことができるが、ターミナルからでも画像処理ライブラリ OpenCV 等を用いることによって映像を取り出すことができる (5.2 節参照)。

撮影に際しカメラの画素数は十分であるが、被写体であるキューブの大きさが約  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  と小さく、画面いっぱいにキューブを写し、かつキューブに焦点を合わせる、ということができない。そこでカメラに倍率 2 倍の補助レンズ [40] (リアコンバータと呼ばれる) を追加した。これによって画面を 2 倍にまで拡大し、画面いっぱいにキューブを写すことができるようになった。これにより、1 ピクセルあたり約  $15\ \mu\text{m}$  での撮影を行うことができる。これは撮影要件に対し妥当な分解能である。

またキューブ表面は発泡由来の凹凸があり、照明を 1 方向からのみ当てると、その反対方向に陰ができてしまい、常に同じ条件での撮影ができない。この問題を軽減するために、図 4.11 のようなリング状に並べられた LED 照明を用いた。これをカメラに装着することにより、キューブの表面に対し全方向から等しく光を当てることができる。

しかしキューブの 3 面を同時に撮影するためには、3 面に同時に照明を当てなくてはならない。すると図 4.12 のようにあるカメラから見て、照明が当たっている側面ではキューブのエッジが強調されてしまっているのに対し、照明の当たっていない側面ではキューブのエッジがぼやけて見えてしまうという問題が生じた。キューブの大きさと穴の位置を得る際に画像からキューブのエッジの位置を検出する必要があり、エッジの写り方が照明の有無で異なってしまうと正しいエッジの位置が検出できない。

この問題はソフトウェアで対処することにした。詳細は 5.5 節にて述べる。

### 4.5.2 ステッピングモーター

撮影台を正確にカメラの正面へ移動させ、常に同じ位置で撮影するために、回転角を精度よく調整可能なステッピングモーターを採用した。今回のステッピングモーターでは回転角に対する誤差  $0.05^\circ$  であり、この誤差は蓄積しない。この誤差によってキューブの撮影位置の誤差は最大で  $0.28\text{ mm}$  と計算され、これは撮影に際し十分な位置精度である。

ステッピングモーターは、中央に配置された永久磁石とその周囲に配置された複数の電磁石からなり、図 4.13 のように周囲の電磁石に流す電流を調整することで中央の永久磁石を回転させる。電磁石にはパルス信号を与えることで電流が流れ、このパルス信号とモーターの回転角が比例するので、高精度位置決めが可能となる。今回オリエンタルモーター株式会社の 5 相ステッピングモーター AZM911AC およ



図 4.11 ELP 社ウェブカメラ ELP-USB8MP02G-SFV(5-50mm) (左) とリング状 LED 照明 (右)



図 4.12 照明の当たり方の違いに起因するエッジの見え方の違い。写真右側と上側にカメラが配置されており、照明が当たっているため、この面から見るとキューブの右と上のエッジが鋭く見える。左と下の面には照明が当たっていないのでエッジはぼやけて見える。

びドライバ AZD-AD<sup>[41]</sup> を用いた (図 4.14)。5 相ステッピングモーターの動作原理については付録 A.1 に示す。

#### ステッピングモーターの制御

ステッピングモーターはオリエンタルモーター社の専用ソフトウェア MEXE02<sup>[43]</sup> を用いて運転の際の回転角度や回転速度、回転し始めるときと回転を終えるときの回転加速度と加速にかける時間等のパラメータを設定することができる。今回の用途では、撮影台の上でキューブが滑らかに転がる必要があるためキューブが転がる地点では回転速度を変えず回転が安定していること、回転で移動後撮影する必要があるため撮影点で滑らかに静止すること、1つのキューブの検査をなるべくすばやく行うために一度の動作が3秒程度で完了することを要求したパラメータ設定とした。

パラメータを設定し、MEXE02 からドライバに書き込むことで、それ以降 MEXE02 を介さずに設定した運転を行うことができる。ドライバの端子に合図となるパルス信号を入力することで設定した回転が行われるので、検査システムの他の機器と同期させることができる。パルス信号は後述する Arduino

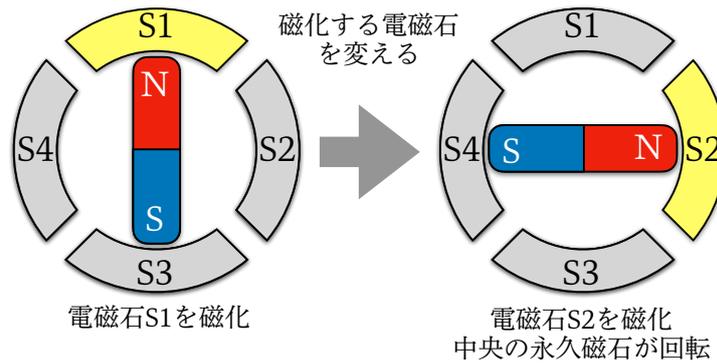


図 4.13 ステッピングモーターの原理<sup>[42]</sup>。中央に配置されているのが永久磁石，周囲に配置されている S1, S2, S3, S4 が電磁石を表す。S1 が磁化されているときは永久磁石の N 極が S1 に引き寄せられ（左），その状態で S1 の磁化を解除し S2 を磁化すると永久磁石の N 極が S2 に引き寄せられるように回転が生じる（右）。

表 4.1 オリエンタルモーター株式会社製 5 相ステッピングモーター AZM911AC の仕様・特性

軸タイプ	片軸
電磁ブレーキ	無し
励磁最大静止トルク	4 N・m
ローター慣性モーメント	$2200 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
分解能	0.36°/パルス
停止時保持トルク	通電時 2 N・m
電源入力 電圧	単相 100 – 120 V
電源入力 電圧許容範囲	-15 ~ +6 %
電源入力 周波数	50/60 Hz
電源入力 電力	6.4 A
制御電源	DC 24 V ± 5 % 0.25 A

を用いて供給した。

### 4.5.3 サーボモーター

検査後のキューブを使用可能であるものと使用不可であるものに分類し，別々の段ボールで回収するために，キューブの落下経路に選別のための弁を用意した。選別弁の制御には Tower Pro 社のマイクロサーボモーター SG90<sup>[44]</sup> を用いた（図 4.15）。

サーボモーターという語は広く制御機能を持ったモーターを指す場合もあるが，ここでは左右に約 90 度ずつのみ回転可能であり，後述する PWM（Pulse Width Modulation）というパルス信号で制御し，また，モーターに内蔵された制御部で現在の位置を検出しフィードバック制御を行うモーターについて述べる。

PWM は図 4.16 のように，パルス波の周期とパルス幅の比（デューティー比）を変化させることで擬似的に電圧の変化を表現することができる信号である。

サーボモーターの場合，PWM 信号によって回転角度を指定することができる。サーボモーター SG90

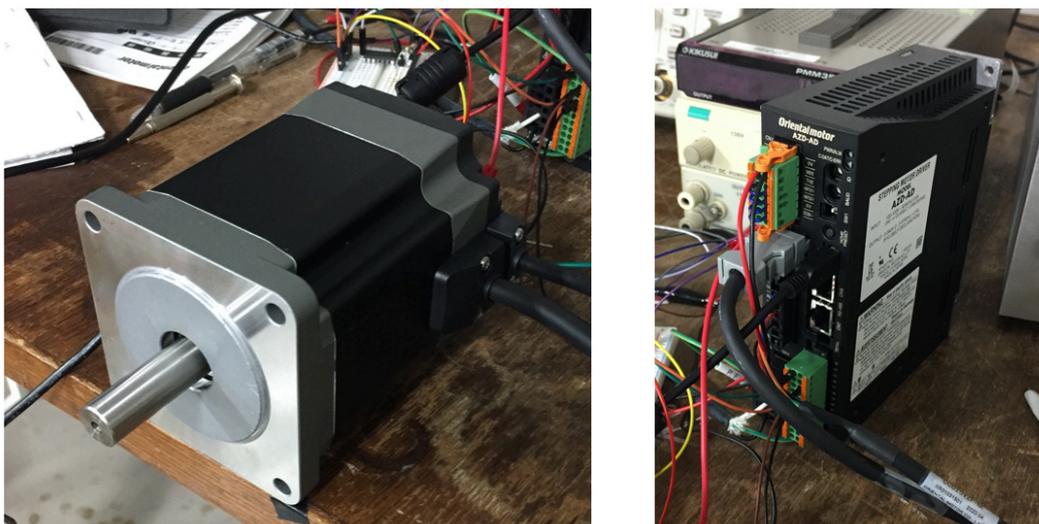


図 4.14 オリエンタルモーター株式会社製 5 相ステッピングモーター AZM911AC とドライバ AZD-AD. 予め専用ソフトウェアでドライバに必要なモーターの動作を書き込むと、ドライバの該当する端子にパルス信号を入力することで、動作を呼び出すことができる。



図 4.15 Tower Pro 社製マイクロサーボモーター SG90.

のデータシートより抜粋した制御信号のタイミングチャートを図 4.17 に示す。周期は 20 ms で固定されており、4.8 V のパルスでパルス幅 0.5 ms から 2.4 ms の間で変化させる。パルス幅 0.5 ms がアームを完全に左に回転させる場合（約  $-90^\circ$ ）に対応し、2.4 ms がアームを完全に右に回転させる場合（約  $+90^\circ$ ）に対応する。その中間のパルス幅を指定することで  $-90^\circ$  から  $+90^\circ$  までの任意の回転角にアームを回転させることができる。また、回転角の分解能は SG90 の場合パルス幅で 10  $\mu\text{s}$  に固定されており、 $2.4 \text{ ms} - 0.5 \text{ ms} = 1.9 \text{ ms}$  で約  $180^\circ$  の回転を制御していることから、回転角で約  $0.95^\circ$  と計算される。今回、キューブを選別し、段ボールにキューブを誘導する目的で利用する。段ボールは使用可能なキューブ、使用不可なキューブ、再検査の必要があるもの、のそれぞれに対応して 3 個程度用意することを考えており、その場合には 3 箇所のみ振り分ければよい。したがって十分な回転角の分解能であると言える。

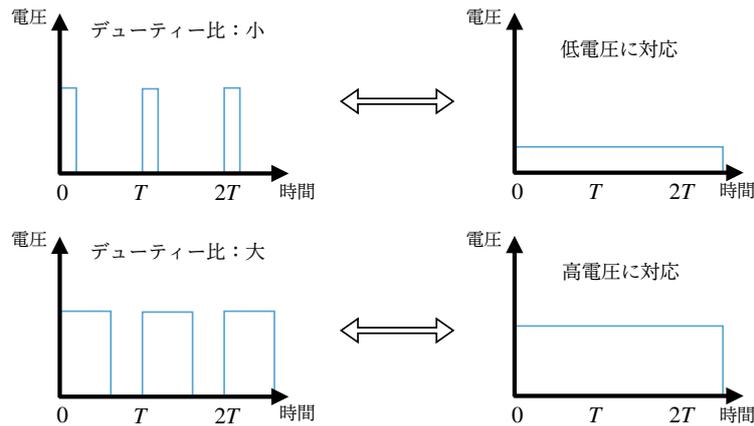


図 4.16 PWM 信号の概念図.

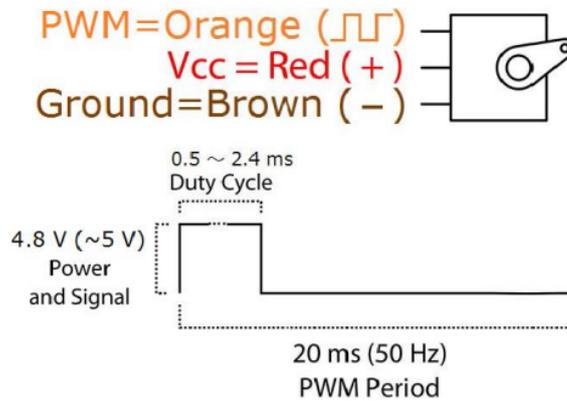


図 4.17 SG90 の各端子の説明（上）と，制御信号のタイミングチャート（下）<sup>[45]</sup>．赤の端子に電源電圧を印加し，茶色の端子をグラウンドに接続する．橙色の端子に PWM 信号を与える．

#### 4.5.4 Arduino を用いたモーター類の制御

システムの回転，キューブの撮影，画像解析，検査後キューブの選別弁のすべてを同期させるためには，使用する全ての機器を1台のPCから制御する必要がある．ステッピングモーターとサーボモーターはPCからの信号を直接受け取ることはできないので，Arduinoを介した制御を行った．Arduinoは入出力ピンを備えた回路基板に搭載されたマイコンに専用の言語<sup>[49]</sup>を用いて記述されるプログラムを書き込むことでハードウェアの制御などを容易に行うことができるオープンソースシステムである．PC上のArduinoのための開発環境でプログラムを記述し，PCとArduinoボードをUSBで接続しプログラムをマイコンに書き込むと，PCからArduinoの各入出力ピンを操作することができる．ピンにモーターを接続することでPCからモーターを制御することが可能となる．

今回は純正 Arduino Uno<sup>[50]</sup> と同等の機能が搭載されたマルツエレクトリック製の Arduino 互換ボード，Marduino Uno R3<sup>[51]</sup> を使用した（図 4.18）．

作成した制御回路の回路図を図 4.19 に示す．

表 4.2 Tower Pro 社 SG90 の仕様

重量	9 g
外形寸法	22.2 × 11.8 × 31 mm
PWM サイクル	20 ms
制御パルス	0.5 – 2.4 ms
制御角	± 約 90°
トルク	1.8 kgf · cm (0.17 N · m)
分解能	10 μs
動作速度	0.1 s/60°
動作電圧	4.8 V(～ 5 V)
温度範囲	0 – 55°C

### ステッピングモーターの制御

前述の通り，ステッピングモーターのドライバには専用ソフトから運転のためのパラメータ情報を書き込んでおり，運転を行う際にはドライバの端子に合図となるパルス信号を送ればよい。

Arduino から出力できる電圧が 5 V であるのに対し，ドライバ駆動のためのパルス信号として 24 V の電圧が必要である．そこで図 4.19 の右側のような，トランジスタを 2 つ使用したレベル変換回路<sup>[48]</sup>を作成した．このようなレベル変換回路を用いることにより，Arduino から 5 V の電圧を印加したときのみ，ドライバに 24 V の電圧が印加される。

### サーボモーターの制御

Arduino 言語にはサーボモーター制御のためのクラスが予め用意されており，今回それを用いて制御した。



図 4.18 マルツエレクトリック製の Arduino 互換ボード。

## 4.6 検査システムの組み上げ

回転円盤および撮影台を取り付けたステッピングモーターを光学台に固定し，さらに，キューブを撮影する位置にカメラを 25 mm 角アルミフレームにより固定することでシステム全体を組み上げた。

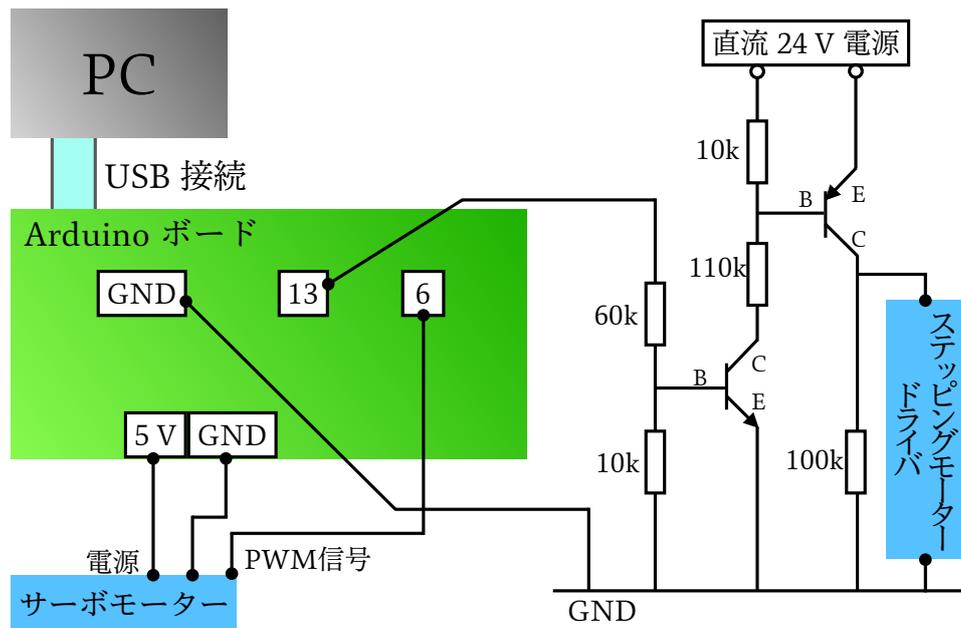


図 4.19 Arduino とモーターの接続。Arduino 上の 6, 13 とあるところが今回使用した出力ピンで、ここから 5V の信号を各モーターに与える。ステップングモーターのドライバ駆動のためにレベル変換回路も作成した (右)。

### カメラの固定

再現性のある撮影のためにはカメラを固定する必要がある。そのためまず、図 4.20 のようなアルミフレームにカメラを固定するための専用器具を製作した。次に、回転円盤に取り付けられた撮影台に配置されたキューブを正面から撮影するためにはカメラをキューブの向きに合わせて固定する必要がある。撮影台上のキューブの面は傾いているため、カメラを取り付けたアルミフレームを別のアルミフレームに対して斜めに固定可能な器具を CAD で設計し、3D プリンタで製作した。写真を図 4.21 に示す。

### キューブ落下地点の対処

キューブ落下地点の写真を図 4.22 に示す。

検査後のキューブが重力で落下する際、キューブ表面の弾性が原因で撮影台に吸い付き自然に落下しない場合がある。そこで落下し始める点にゴム紐を張り、キューブ表面にわずかに触れることで落下を促す構造にした。

キューブは落下地点に取り付けられた漏斗型のキューブ受けに落下する。この漏斗型キューブ受けも 3D プリンタで製作した。落下の際の衝撃を和らげるため、キューブ受け内部にはフェルトを貼った。

キューブ受けを通過したキューブはさらにその下に取り付けられた選別弁によって選別され、異なる段ボールに回収される。この選別弁はサーボモーターのアームに木材でできた滑り台状の部品を取り付けることで製作した。

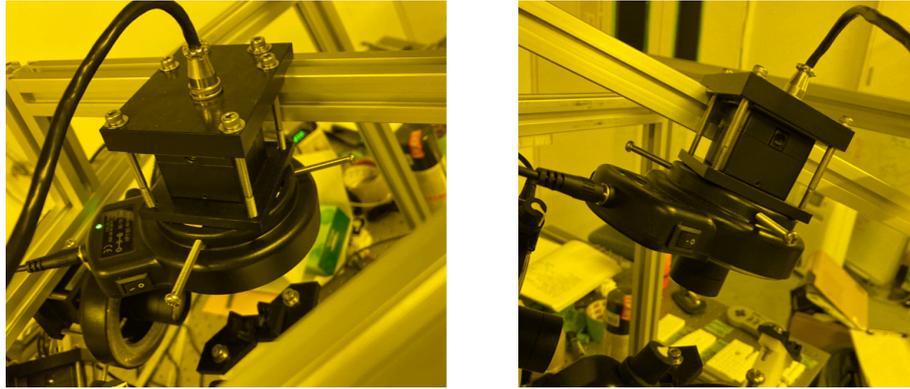


図 4.20 カメラを固定する器具.

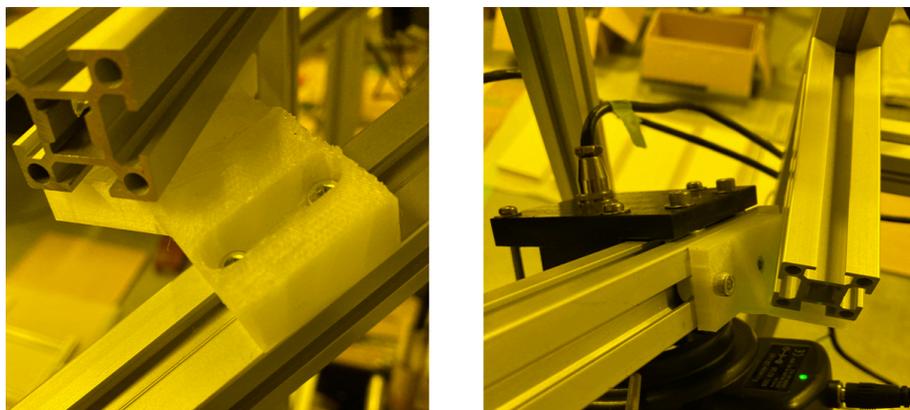


図 4.21 アルミフレーム同士を互いに斜めに固定する器具. 6台のカメラに対応して最適な形状のものを6つ製作した.

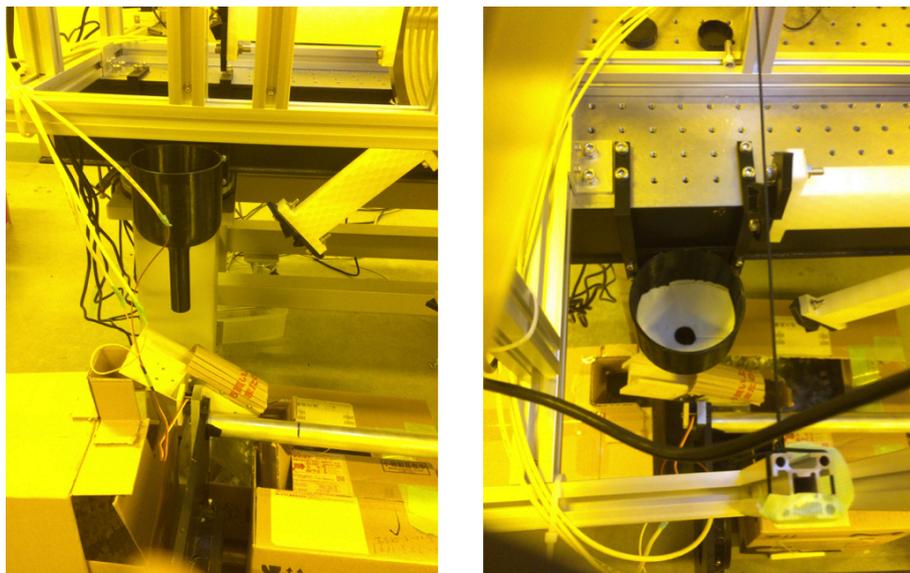


図 4.22 キューブ落下地点. 横から見た様子(左)と上から見た様子(右). 右の写真に写った黒い線がキューブ落下を促すゴム紐, 各写真中央の黒い部品が漏斗型キューブ受け. その下にサーボモーターと木材でできた選別弁が配置されている.

## 第5章 画像解析ソフトウェアの開発

### 5.1 画像解析の概要

キューブの形状に関する品質を検査するにあたり、最も重要なパラメータはキューブの大きさと波長変換ファイバーを通すための穴の位置である。キューブの大きさや穴の位置のばらつきが大きいと、キューブを並べた際に隣同士で干渉するおそれがある。また隣同士のキューブで穴の位置が大きくズレるとファイバーを通すための空間ができず、最後までファイバーが通らず最終的に検出器が組み上がらないという問題があるため、これらのパラメータを予め測定しそれにもとづきキューブを分類する必要がある。

カメラを制御して画像を取得し、画像解析を用いてこれらのパラメータを得るために、画像処理ライブラリ OpenCV（後述）を用いた。キューブの画像解析の大まかな流れを図 5.1 に示す。まず OpenCV に実装されている標準関数を用いて、キューブの外形および穴の位置を検出した。次にこれらの情報を用いて穴の位置、キューブの大きさを正確に抽出するために、独自に開発したアルゴリズムを用いて詳細な画像解析を行った。

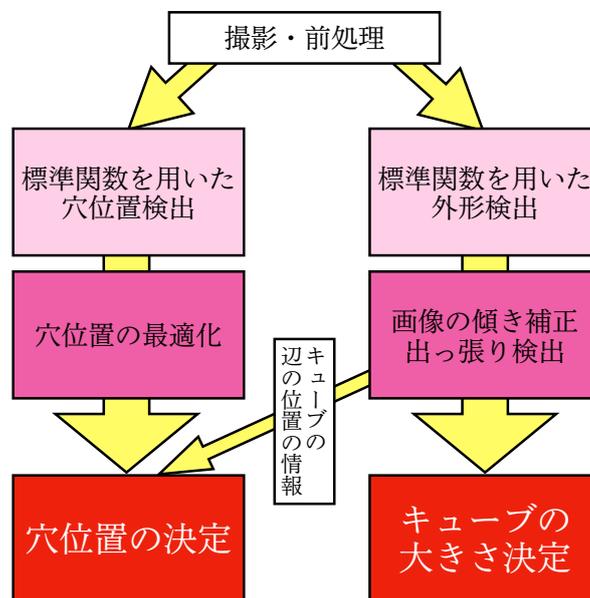


図 5.1 画像解析の流れ.

## 5.2 画像処理ライブラリ OpenCV とキューブ画像の取得

### オープンソース画像処理ライブラリ OpenCV

OpenCV<sup>[52]</sup> (Open Source Computer Vision Library) はインテルが開発したオープンソースの画像処理ライブラリである。

OpenCV では、画像を行列として読み込む。行列の各成分は画像のピクセルに対応しており、グレースケール画像のときは 0 から 255 の整数値をとり輝度を表現する。カラー画像のときは RGB (赤, 緑, 青) の 3 成分で読み込まれ、各成分が 0 から 255 の整数値をとることでそのピクセルの色を表現する。この行列に演算を行うことによって様々な画像処理を実現する。

### OpenCV でのカメラの制御, キューブの撮影

OpenCV では保存されている画像を読み込んで解析や加工を行うだけでなく、標準実装されている VideoCapture クラスを用いることで、PC に接続されているカメラから画像データを取得することもできる。今回はこのクラスを用いてキューブの画像を撮影した。

カメラから指定した秒数ごとに画像データを取得することで、カメラの映像をリアルタイムでモニターすることができる。今回は 6 つのカメラを同時に PC に接続し、それぞれのカメラから 1 ms ごとに画像データを取得し、指定したキーを入力すると各カメラの画像をファイルに保存する、という方法でキューブの撮影を行った。4.3 節で述べたように、検査システムにおける回転・画像解析・キューブの選別の一連の操作はキューブ撮影のためのこのキー入力を合図として自動で行われる。

## 5.3 OpenCV 標準関数による画像処理

画像解析は図 5.1 のように大まかに 2 段階に分かれており、初段として OpenCV に標準実装されている関数を用いた解析を行う。

キューブはカメラのレンズ軸に対して各キューブ面が垂直になるような配置で撮影しているため、画像ではキューブは白い四角形のように見える。しかし実際にはキューブの表面は発泡化処理がされており凹凸があるので、キューブと背景の境界部分は完全な直線ではない。画像に写ったキューブと背景との境界線となる実際の曲線をキューブの輪郭と呼ぶことにする。また、それを四角形で近似した際の 4 つの辺の部分をキューブの辺と呼ぶことにする。キューブの表面の凹凸、特に出っ張った部分の度合いが大きいと、キューブを並べたときに隣同士で干渉するおそれがあるので、検出しておく必要がある。今回、標準関数を用いて、キューブの輪郭を検出、またキューブの辺を直線として検出する。このとき、輪郭を検出する際には表面の出っ張りまで輪郭として検出される。またキューブの辺を直線として検出すると、直線から出っ張った部分が無視されて辺が検出される。直線として検出した際の向かい合う辺の座標の差をとることで、出っ張りを無視したキューブの大きさを得ることができる。また、このようにキューブと背景との境界線を、輪郭検出と直線検出の 2 通りの方法で検出し、それらの差をとることで表面の出っ張りを評価することにした。実際にはキューブの大きさを得る際に画像が傾いている場合

には補正する必要がある、出っ張りの評価もその後に行う必要がある。これらの詳細な画像解析については5.4節で述べる。

また、画像ではキューブの穴の部分は内部が黒い円のように見える。穴とキューブ表面の境界線を穴の縁と呼ぶことにする。標準関数を用いて、この穴の縁を円として検出することで穴の中心座標と半径を得る。その後5.4節で述べる詳細な画像解析を用いて穴の中心座標と半径の最適化を行う。最後に、検出したキューブの辺からの相対座標を求めることで、キューブ面内における穴の位置を得る。

この節では画像解析のための前処理について述べた後、OpenCVの標準関数を用いた、キューブの輪郭の検出、辺の直線としての検出、穴の縁の円としての検出について述べる。

### 5.3.1 画像の前処理

解析、特に標準関数を用いて画像から円や直線を検出するにあたり、カメラから取得した生画像をそのまま用いるのではなく、前処理する必要がある。

まず、カラーで取得した画像をグレースケール化する。これにより、各ピクセル3成分あった色の情報が輝度の1成分のみとなり扱いやすくなる。なお、画像のうちキューブの写った部分とその背景はそれぞれ白色、黒色に近い色で撮影されており、画像から特徴検出を行う際にも特定の色の情報が必要になることはないため、グレースケール化しても問題はない。

次に、ノイズの除去を行う。撮影の際に、カメラのセンサーの特定のピクセルに欠陥があり、入射する光に感度がなく常に黒く写ることや、カメラのセンサーに暗電流が流れ電荷が蓄積されることで、実際の画像に対して不自然に明るいピクセルが生じること、各センサーに入射する光量が少なく統計的なふらつきにより正確な色味を再現できないことがある。このような、実際と異なる明るさや色味が記録されている箇所をノイズと呼ぶ。元画像にノイズが乗っている場合、後述するエッジ抽出の際に影響を及ぼすことがある。そのため、フィルタを用いて画像を平滑化する必要がある。基本的な画像処理は、各ピクセルについて、そのピクセルと周辺のピクセル（ウインドウ）の重み付き平均をとること（フィルタ）によって行われる。重みの一様な平均値フィルタや、ウインドウ内の中央値を対象のピクセルに割り当てるメジアンフィルタなど、重みのつけ方によって様々なフィルタが存在する。今回はガウシアンフィルタと呼ばれるフィルタを用いて平滑化を行った。ガウシアンフィルタは、ウインドウの大きさと、ウインドウ内での重みの広がり（標準偏差）を指定することで計算されるガウシアン型の重みを用いて画像の平滑化を行う。今回は $5 \times 5$ のピクセルをウインドウとし、その中で重みの分布が2次元標準正規分布となるような標準偏差を用いた。

図5.2に撮影した元画像とそれをグレースケール化した画像、ガウシアンフィルタをかけた画像およびそれらの画像のうちキューブの穴部分を拡大したものを示す。元画像では穴の周辺部分や内部に赤みがかかった箇所、青みがかかった箇所がある。このようなピクセルが前述の正確な色味を再現できていない箇所である。この画像をグレースケール化すると、穴の内部のきわに近い部分が明るいピクセルになるなど、穴のきわの部分が不自然な輝度に見える。この画像に対してガウシアンフィルタをかけると、このような不自然なピクセルが平滑化される。このとき画面全体がややぼやけてしまうが、今回の用途では穴とキューブ表面の境界、キューブと背景の境界が検出できればよく、それ以上の細部の情報は必要としないので問題ない。

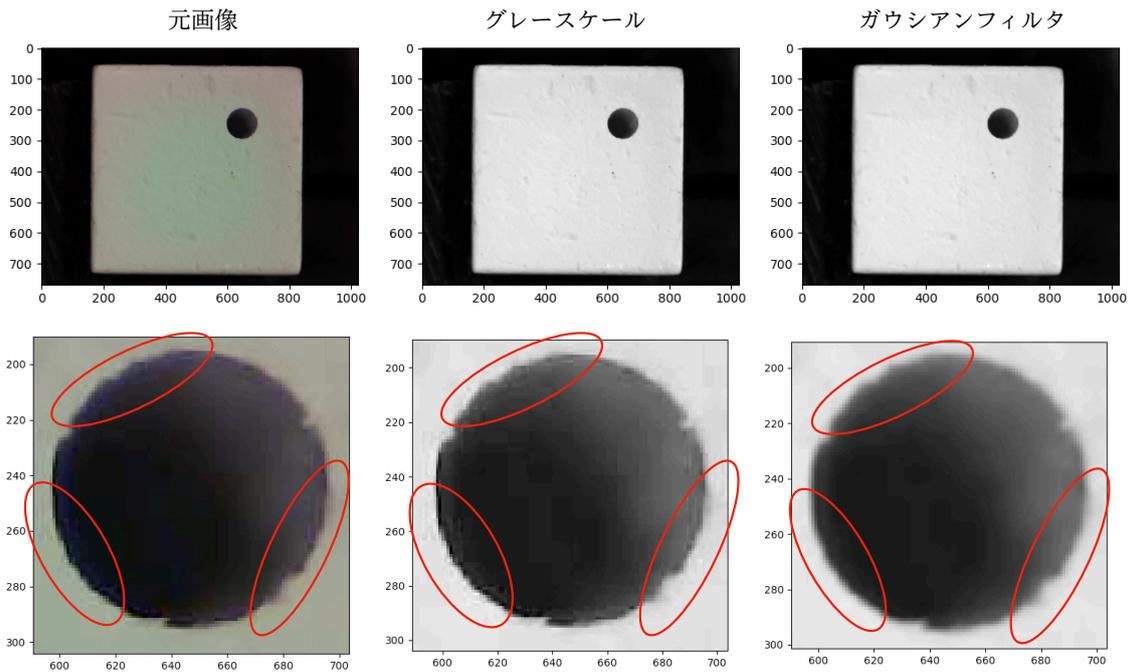


図 5.2 元の画像（左）とグレースケール画像（中），ガウシアンフィルタをかけた画像（右）．  
下は各画像の穴部分の拡大図．ガウシアンフィルタの効果により，赤線で囲った部分のノイズが取り除かれていることがわかる．

最後に，画像の二値化を行った．二値化処理はグレースケール画像に対し，その輝度にしきい値を設け，各ピクセルの輝度がその値以上であれば白（255），その値未満であれば黒（0）にする，という処理である．キューブのグレースケール画像では，キューブ面のピクセルは明るく（高輝度），穴の内部や背景となる部分のピクセルは暗く（低輝度）写っている．したがって，それらの中間の適切な輝度をしきい値として二値化した画像を用いることで，キューブの輪郭や穴の縁の検出を効率よく行うことができる．  
ここまでの処理を行ったキューブの画像に対し，輪郭検出と，辺および穴の縁の検出を行った．

### 5.3.2 キューブの輪郭検出

OpenCV にはアルゴリズム<sup>[54]</sup>を用いて二値化画像から白ピクセルと黒ピクセルの境界を検出する関数が標準実装されている<sup>[55]</sup>．この関数は二値化した画像の中から，白のピクセルが複数隣接した箇所を検出し，周囲の黒のピクセルとの境界線を出力するという処理を行う．この処理によって，境界線上のピクセルの座標を得ることができる．今回は輝度のしきい値 40 とした二値化画像から，この関数を用いてキューブの輪郭を検出した．また得られた境界線のデータは輪郭上の全てのピクセルが記録されているが，メモリの過剰な使用を避けるため，輪郭上の主要な頂点となるピクセルのみが残るような近似を行った．近似の様子を図 5.3 に示す．

この操作ではキューブ表面の引っ張りまで含めたキューブの輪郭が検出されるので，得られた境界線上のピクセルのうち  $y$  座標の最大値と最小値の差， $x$  座標の最大値と最小値の差をそれぞれ，そのキューブの面の引っ張りまで含めた縦方向，横方向の大きさと考えることができる．

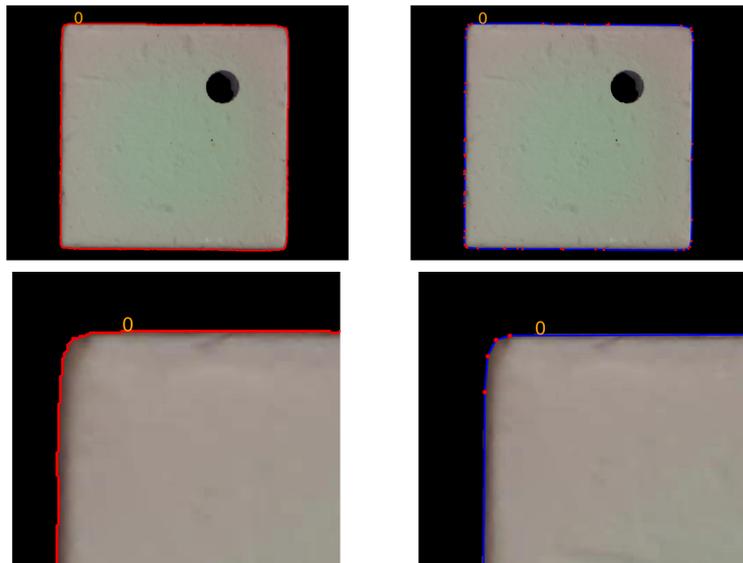


図 5.3 輝度 40 以下のピクセルを黒 (0) にした画像から抽出したキューブの輪郭. 赤の点が輪郭上の頂点で, 青の線は頂点を結んだ線分. 左は輪郭上の全てのピクセルを頂点として記録した場合で, 右はそれらの頂点のうち主要なもののみを残し, それらの間を線分で結んだ図. 下は各図左上を拡大した図.

### 5.3.3 ハフ変換を用いた図形検出

ハフ変換<sup>[58][59]</sup>と呼ばれる技術を利用して, 画像の中から円や直線を検出する関数が OpenCV には標準実装されている. これを用いて, キューブの辺を直線として検出し, 穴の縁を円として検出する操作を行った. 前述の通り, 辺を直線として検出する際には表面の小さな出っ張りは無視されるので, 検出した向かい合う辺の距離をとることで, そのキューブの面の出っ張りを含まない縦方向, 横方向の大きさを得ることができる. また穴の縁を円として検出することで, 画像上での穴の座標を得ることができる. キューブの辺の座標と穴の座標から, キューブ上での穴の位置がわかる.

ハフ変換による図形検出を行う際には, 前処理を行った画像に対してさらにエッジ化の処理を行う必要がある. エッジ化とは画像に写った物体の輪郭や模様のパixelのみを強調した画像を出力するという処理である. エッジ化前後の画像を図 5.4 に示す. 画像の中で, 隣接したピクセルで輝度が大きく変化しているところがエッジであると考えられるので, ノイズ除去の場合と同様に, 隣接したピクセルの輝度の差 (勾配) の大きさとその方向を計算するようなフィルタ (微分フィルタ) を用いることでエッジ化が実現される. このような計算を行うと, 付近のピクセルで輝度の差が大きいところでは画像上で明るいピクセルとして出力され, 輝度の差が小さいところでは暗いピクセルとして出力される. このような操作を行うことで, 画像に含まれる円や直線が明瞭になり, 解析によって検出することが可能となる.

画像をエッジ化する際, 各ピクセルの輝度が 0 から 255 まで全ての整数値を取りうる通常のグレースケール画像を用いると, 画面全体の輝度の差に依存せず全ての領域からエッジを検出することができる. その一方でグレースケール画像をさらに二値化までした画像を用いると, 二値化の際に設定した輝度のしきい値に大きく依存してしまい, 画面内の暗い部分の詳細や明るい部分の詳細を得ることができない

が、詳細を必要としない大まかな検出の場合には操作が単純になるという利点がある。詳細な輝度の情報が保存されたグレースケール画像と輝度をさらに二値化した画像のどちらの画像のエッジ化が適しているかは場合による。

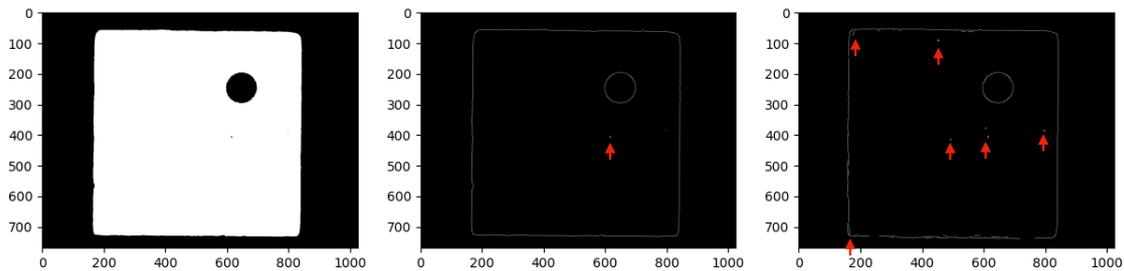


図 5.4 ガウシアンフィルタ後、輝度のしきい値 100 で二値化した画像（左）とそれをエッジ化した画像（中）。右はグレースケール画像をガウシアンフィルタ後二値化せずにエッジ化した画像。輝度 100 以下のピクセルで構成される細かいキズ等（赤矢印で示した）まで表示されている。二値化画像のエッジ化では、輝度のしきい値を調整することで、どの程度まで詳細にエッジ化するか決定できる。

今回の場合、キューブの辺を検出する場合にも穴の縁を検出する場合にも二値化した画像をエッジ化したものを使用した。

まず、キューブの辺を検出する場合にはキューブと背景の境界を検出すればよく、それ以上詳細な情報は必要ないので二値化画像をエッジ化したものが適している。次に、穴の縁を検出するとき、キューブのグレースケール画像では基本的にはキューブの表面は白く、キューブの穴内部は黒く写る。しかし穴が傾いているときは穴の内側の側面が灰色がかって見えることがある。また穴の縁がシャープなものはキューブの表面と穴の内部が完全に分離していて解析が容易であるが、穴が段階的に落ち込んでおり穴の縁がぼやけているものもあるなど、キューブによって穴の仕上がりが様々である。様々な穴の画像を図 5.5 に示す。これらの場合、通常のグレースケール画像をエッジ化すると、穴の縁の輝度が段階的に変化しているところが複数のエッジとして表現されてしまうことがある。このようになると、どのエッジを真の穴の縁として検出すべきか判断がつかない。そこで今回は二値化した画像をエッジ化した画像から、ハフ変換によって円検出を行うことによって穴の位置を大まかに検出し、その後解析によって穴の位置を最適化することにした。



図 5.5 穴の縁のシャープなもの（左）、穴の傾いたもの（中）、穴が段階的に落ち込んでおり穴の縁がぼやけて見えるもの（右）。

ここでは簡単のためハフ変換を用いた直線検出の原理について述べる。

図 5.6 のように、 $(x, y)$  平面上の点  $(x_0, y_0)$  を通る任意の直線は、直線と原点との距離  $\rho$ 、直線と  $x$  軸とのなす角  $\theta$  を用いて以下のように表現される。

$$\rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta. \quad (5.1)$$

この方程式は  $(\rho, \theta)$  平面上である曲線を表す。同様に  $(x, y)$  平面上の点  $(x_1, y_1)$  を通る任意の直線を  $\rho$  と  $\theta$  で表すと

$$\rho = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta \quad (5.2)$$

となり、これもやはり  $(\rho, \theta)$  平面上である曲線を表す。ここで、 $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$  を通る直線を考える。そのような直線を表す  $(\rho, \theta)$  の組は式 5.1 と式 5.2 の表す曲線の交点として求まる。

実際には画像上の各点ごとに  $(\rho, \theta)$  平面上に曲線が描かれ、それらの交点も大量に生じうる。大量に生じた交点の中でも、交わる曲線の数が多い交点  $(\rho_0, \theta_0)$  を選ぶことで、元の画像から直線

$$\rho_0 = x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 \quad (5.3)$$

が検出されたことになる。交わる曲線の数投票数といい、投票数にしきい値を設けることで直線の検出感度を操作することができる。

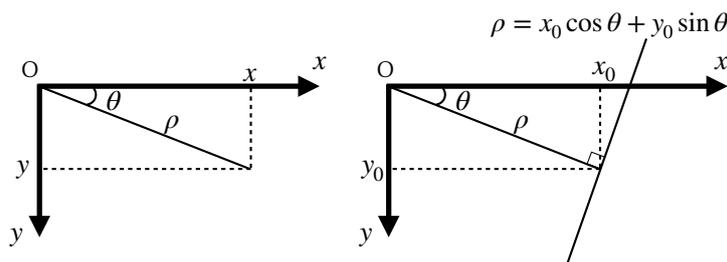


図 5.6  $(x, y)$  と  $(\rho, \theta)$  の関係 (左) と  $(x_0, y_0)$  を通る直線 (右)。

同様にハフ変換によって円の検出を行うこともできる。 $(x, y)$  平面上の点  $(x_0, y_0)$  を通る任意の円は円の中心  $(p, q)$  と半径  $r$  の方程式として以下のように書ける。

$$r^2 = (x_0 - p)^2 + (y_0 - q)^2. \quad (5.4)$$

この場合パラメータが3つあり、この式は  $(p, q, r)$  空間上のある曲面を表す。原理的には直線の場合と同様に画像上の各点を  $(p, q, r)$  で表し、曲面同士の交点を求めることで元の画像から円を検出することができる。この際に直線検出の場合と同様に、ある点で交わる曲面の数をその点に対する投票数といい、投票数にしきい値を設けて円の検出精度を操作できる。

しかしこの方法では計算量が膨大になる問題から OpenCV における円検出関数には、まずエッジの法線を考えそれらの交点から円の中心を検出した上で、半径についても調べるという改良された方法<sup>[60]</sup>が採用されている。

## 直線検出

ハフ変換を用いた直線検出の際の引数として、ハフ変換の際の $(\rho, \theta)$ に対するスキヤンの精度、直線とみなされるのに必要な点の数（投票数）のしきい値を与える。ここで投票数に対するしきい値は直線を構成する点の数に対する要求なので、検出可能な直線の長さの最小値をも表す。このとき、元の画像を二値化したものからそのまま直線検出を行うと、画像が大きすぎることが原因で投票数のしきい値の最適化が難しく誤検出や後段の回転補正時に使いにくいという問題が生じた。そのため、輪郭検出の情報から画像の中の各キューブ辺をエッジ化したピクセルが写っている場所をトリミングし、その範囲での直線検出を行った。直線検出のためのキューブ辺のトリミング箇所を図5.7に示す。投票数のしきい値としては、出っ張りの検出からの要求を満たすような値とした（後述）。

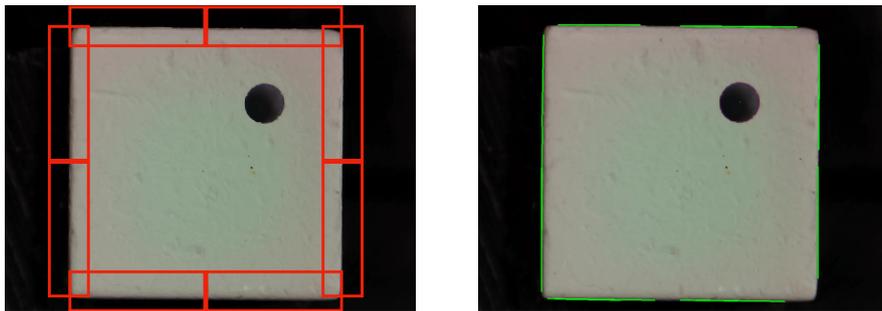


図 5.7 左図は直線検出のためのトリミング箇所。各赤枠内で直線検出を行う。また右図はハフ変換による直線検出の様子。検出された直線が緑で書かれている。

## 円検出

ハフ変換によって穴の縁を円として検出したものが図5.8である。ハフ変換によって円を検出する際、検出可能な円の半径の範囲を、状態の良い穴の半径の平均値である50ピクセルに対し $\pm 3$ ピクセルと、なるべく狭く設定することで誤検出を抑えた。さらに、円とみなされるのに必要な点の数（投票数）のしきい値は、穴の縁がシャープで円に近い場合は大きな値でも円と検出されるので、はじめ大きく設定した。円の検出に失敗した場合には徐々に小さくしながら試行することで、穴の縁の状態ごとに不必要に投票数のしきい値を下げずに円検出を行った。

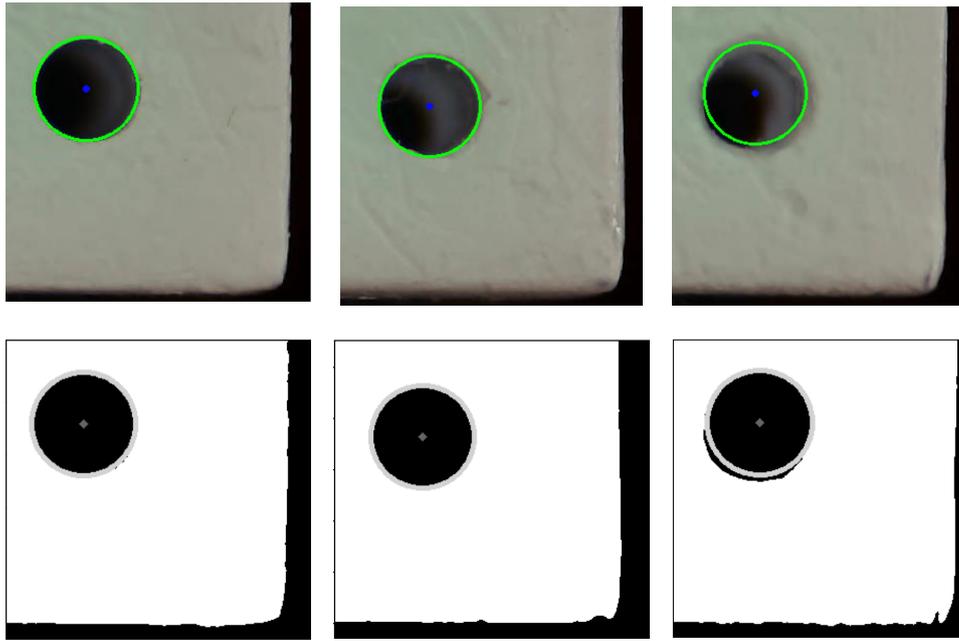


図 5.8 ハフ変換による円検出を図 5.5 の各画像に行った様子。穴付近を拡大した。緑のぼやけた穴（右）は十分には精度良く検出ができていないように見える。下図はそれぞれの二値化画像。

#### 5.4 シンチレータキューブ検査のための詳細な画像解析

前節までで、OpenCV の標準関数を用いたキューブ画像の解析を行ったが、より正確なパラメータ抽出のため、以下のような独自のアルゴリズムを開発し、それを適用した。大まかには、次のような流れで解析を行う。

1. 画像に対する回転補正
2. キューブ表面の引っ張りの検出
3. 穴の縁の円フィッティング

(a) フィッティングする円の初期値の設定

円の中心 ハフ変換で検出した円の情報をもとに画像での穴の周囲をトリミングし、その画像から円の中心を求め、初期値とする

円の半径 初期値としてハフ変換で検出した円の半径を使用する

(b) 画像から、フィッティングすべき穴の縁上のピクセルを検出

(c) 穴の縁上のピクセルの円フィッティング実行

まず、画像に対する回転補正を行った。キューブを撮影台にのせてカメラで撮影する際に、両者が平行になるような微調整を行ったが、8つの撮影台と6台のカメラの組合せによってはキューブがカメラに対して $1^\circ$ 程度傾いて撮影されてしまうことがある。キューブの輪郭や辺の各座標の最大値と最小値からキューブの大きさを求める場合、キューブが画面に対して傾いていると座標の最大値や最小値をとる

ピクセルが変わってしまい、大きさを過大評価してしまうおそれがあるので、キューブの傾きを補正する必要がある。カメラのレンズ軸に対して垂直な面でキューブが $1^\circ$ 回転したときの座標の最大値と最小値の変化を考えると、両側の辺の座標がそれぞれ変化するので、実際の大きさより $\tan 1^\circ \times 2 \simeq 3.4\%$ だけ大きく検出してしまうことになる。その一方でレンズ軸に平行な面でキューブが $1^\circ$ 回転しているときには、カメラからの距離がキューブの大きさの $1.7\%$ だけ変化する。キューブの大きさが約 $1\text{ cm}$ なのでカメラからの距離の変化は約 $0.17\text{ mm}$ に相当する。しかし今回焦点距離は約 $5\text{ cm}$ としており変化分は約 $0.34\%$ と計算される。以上のことからレンズ軸に平行な面でのキューブの回転の影響は無視できると考え、レンズ軸に垂直な面でのキューブの回転による影響のみを考えた。

回転補正を行った後、キューブ表面の引っ張りを検出した。前述の通り、キューブの製造の際に、表面に薬品処理を行い発泡化させることで反射層を形成しているが、局所的に発泡化度合いが大きいと、その部分が出っ張ってしまい組み上げる際に隣接するキューブと干渉するおそれがある。そこで画像から出っ張っている部分を検出する必要がある。表面の引っ張りは正面のカメラから捉えることは難しいが、側面のカメラから見ると、その部分がキューブの外形の基本的な矩形からはみ出て見えるので、側面から撮影した画像から検出を行う。側面にこのような矩形からはみ出た部分があれば、前節までに検出した輪郭に反映される。その一方で4つの辺を直線として検出する際には、局所的な引っ張りは無視されるので、これらの座標の差をとることで引っ張りを検出する。

また、前述のようにハフ変換を用いた円検出では穴の縁がぼやけている場合、大まかな穴の位置しか得られていないので、後述する解析によって穴の位置を最適化する。

#### 5.4.1 画像の回転補正

回転補正のために、ハフ変換で検出した直線を使用した。ハフ変換で検出した直線の傾きは、その近傍のキューブ表面の状態に大きく依存するので、ハフ変換で検出した直線の傾き自体は使用せず、直線の中心の座標のみ使用し、以下のように画像の傾きを計算する。図5.9のように、キューブの各辺について2つずつ直線検出の範囲を考え、それぞれの領域で直線検出を行う。2つの領域から1本ずつ直線を選び、各直線の中心の座標 $(x_a, y_a)$ ,  $(x_b, y_b)$ を得る。このとき、2つの直線の中心の座標が十分離れている(100ピクセル、約 $1.5\text{ mm}$ に相当)という条件を課した。その後、それらを結ぶ直線を考え、次の式からその直線の傾き $T$ を求める。

$$T = \begin{cases} \frac{x_a - x_b}{y_a - y_b}, & \text{左右の辺に対して} \\ \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}, & \text{上下の辺に対して} \end{cases} \quad (5.5)$$

検出範囲を2つに分け条件を課したのは、2直線を結んだ際に、2直線の中心座標が近いとそれらの2点を結ぶ直線の傾きを求める際に精度が悪くなるためである。特に、キューブがほぼ回転しておらず補正の必要がない場合、式5.5の分子は理想的にはゼロになるはずだが直線検出の際の誤差によって $\pm 1 \sim 2$ ピクセル分程度の値をもってしまふことがある。このような場合に、2点間の距離が小さいと分母が小さくなり傾き $T$ を過大評価してしまう。その一方で、2点間の距離が大きければ分母が大きくなるので結果的にその辺での傾き $T$ はゼロに近い値になる。上の条件を満たす全ての2直線の組み合わせについ

てこの操作を行い、それらの傾きの平均を求める。

以上の操作をキューブの4つの辺全てについて行い、それらから得られる傾きの平均を、この画像の傾きとし、その傾きに対応する角度だけ回転させることで回転補正とした。実際のキューブ画像に補正を行った様子を図5.10に示す。

検出した直線の座標や穴位置の座標をこの角度だけ回転することで、これらの値の補正を行う。また画像自体を回転したあとに再び輪郭検出することで回転補正まで考慮した輪郭の座標を得る。

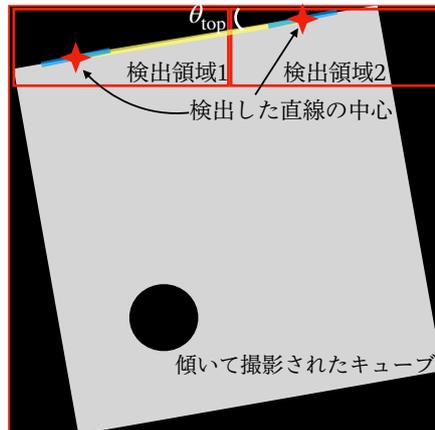


図 5.9 回転補正の概念図。傾き角は誇張して表現してある。隣り合う検出領域で検出した直線の中心を結んだ直線を黄色で示した。このような直線の平均の傾きはキューブ上面については  $\tan \theta_{\text{top}}$  で表される。

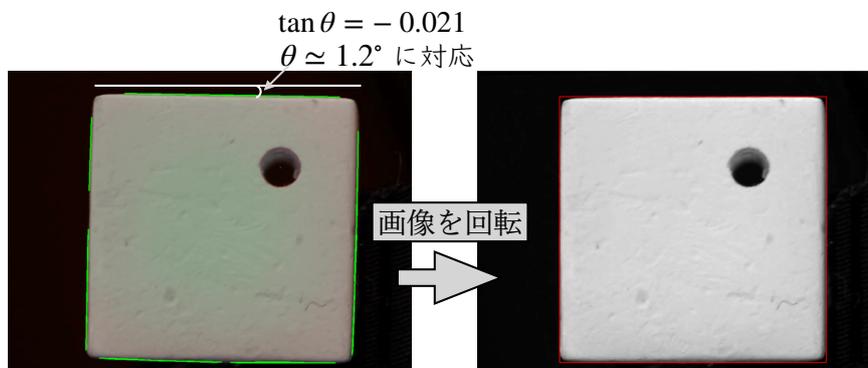


図 5.10 顕著に傾いて撮影されたキューブに回転補正を行った様子。右図の赤線は回転後の画像に輪郭検出を行い、輪郭の座標の最大値・最小値を用いて長方形を書き込んだもの。

#### 5.4.2 表面の引っ張りの検出

標準関数を用いて検出したキューブの輪郭と4つの辺の座標を回転補正したのち差をとると、辺に対して輪郭が外部に出ている場合はそこに出っ張りがあると考えることができる。あるキューブ画像に対し辺を直線検出した画像と輪郭検出した画像を図5.11に示す。4つの辺を直線として検出する際、検出可能な直線の長さ（投票数）のしきい値が小さすぎると、局所的な出っ張りの側面を短い直線として検

出してしまうおそれがあるので、投票数のしきい値は典型的な出っ張りの大きさに対して十分大きく設定した。

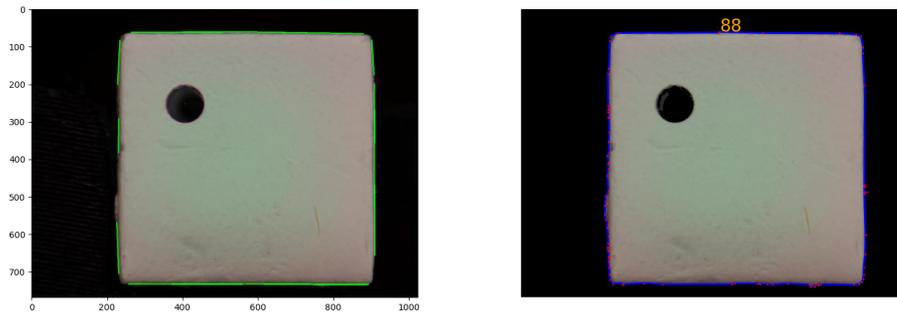


図 5.11 辺を直線検出した図（左、緑が検出した直線）と輪郭検出した図（右、青線が検出した輪郭、赤い点が輪郭の頂点）。輪郭検出ではキューブ左側面の出っ張りまで反映されている。

しかし、出っ張りと同様に製造時に現れたと思われる白い糸のようなものがキューブ表面から出ていることもある。白い糸の場合は組み立てに影響は無いので画像解析では検出する必要は無いが、上記の方法ではこれも出っ張りとして認識されてしまう。

この問題を解決するため、以下のような方法を考えた。まず、キューブの輪郭と4つの辺を直線として検出したものの情報から、輪郭が辺よりはみ出ている領域を探す。次に、この領域の周囲のピクセルの輝度を調べる。その領域において、予め設けたしきい値よりも明るいピクセルの割合を求める。大きな出っ張りであれば、この割合は100%に近づき、細い毛であれば0に近い値となる。各辺についてこの操作を行い、この割合のうち最も大きなものをそのキューブ画像が出っ張りを持つ可能性として出力した。図5.11のキューブ画像に対しでは、輪郭の座標と辺の座標の差をとったとき、図5.12のようにキューブの左側面と下側面に出っ張りと思われる白いピクセルが検出されている。このような領域として今回は、輪郭と辺の座標の差を高さ、最も差が大きいところの周囲 $\pm 20$ ピクセル（約0.6 mmに相当）を幅とする長方形を用いた。この割合が70%以上の場合に出っ張りが検出されたとしそのキューブは使用不可と判断する。50%以上70%未満の場合には出っ張りとは断言せず、そのキューブは再検査の対象とした。再検査の際に別の照明の当たり方で撮影されれば、1度目の検査とは異なる出っ張りの程度が出力される。2度の検査で再検査となれば実際に小さい出っ張りが検出されている可能性が高いのでやはり使用不可と判断する。

### 5.4.3 穴の縁の円フィット

前述のとおりハフ変換による穴位置検出では十分な精度が得られていないので、ハフ変換により検出された円を入力値とし、その最適化を行うことによって、詳細な穴の縁の検出を行った。

#### 輝度のしきい値決定

図5.5のように、穴の状態はキューブによって様々であるため、穴を精度よく検出するためには、穴を明確に定義することが必要である。今回、キューブの穴は1.5 mm径のドリルで開けられている。ま

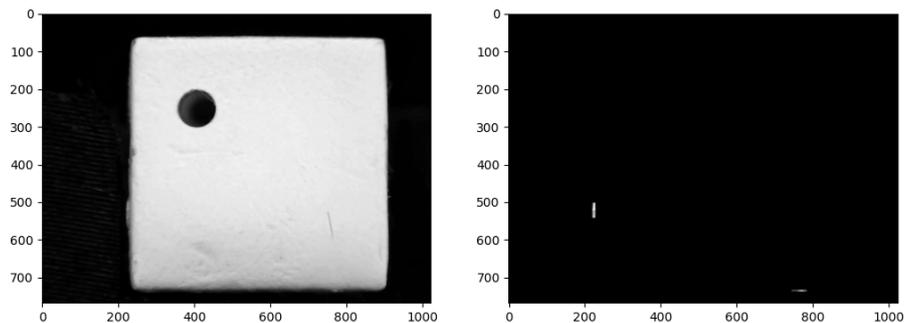


図 5.12 図 5.11 のキューブについて、グレースケール化した画像（左）と、出っ張りの周囲の領域のみを表示させた画像（右）. 解析の結果キューブ左側面と下側面に領域が設けられている. この画像の場合、白ピクセルの割合として、より値の大きい左側面での値 75.5 % が出力された.

たキューブ表面を発泡化させた後に穴を開けていることから、発泡部分が弾性を持っていることが原因で穴あけの際に再現性のあるキューブの固定が十分にできていないおそれがある. この場合、穴の位置精度が悪くなってしまいう問題がある. これらのことから穴の位置のばらつきは穴径のばらつきに比べ大きいと判断し、穴径よりも穴の中心位置を精度よく検出することを重視した.

穴は一般にキューブ表面の白色のピクセルから穴の内部のピクセルに向かうにつれて輝度が小さくなるので、どのような状態の穴に対しても画像を二値化したときにキューブ表面と穴が分離できるようなしきい値を定める. キューブに対する照明の当たり方や、カメラ間の特性の僅かな違いによってキューブ表面の輝度は画像ごとに微妙に異なってしまう. またキューブ表面から穴の内部のピクセルに向かうときの輝度の変化も穴の状態により様々である. したがってしきい値をすべての画像で統一されたある値にすると、ある画像に対してはこのしきい値が適切であるが、別の画像に対しては値が大きすぎたり小さすぎたりするおそれがある. このようなバイアスを取り除くために、画像ごとに適切なしきい値を定める必要がある.

画像ごとにしきい値を決定するために、各キューブ画像についてその表面の輝度を参照値として利用した. 図 5.13 のように、まずハフ変換で得た円の中心  $(x_c, y_c)$  と半径  $r$  から、円周上の 2 点  $(x_c, y_c - r)$  と  $(x_c - r, y_c)$  を得る. それらの点からさらに 20 ピクセル穴の中心から離れた点  $a = (x_c, y_c - r - 20)$  と  $b = (x_c - r - 20, y_c)$  の輝度を調べる. これらの点から、 $a$  については  $x$  方向に、 $b$  については  $y$  方向に  $\pm r$  ピクセルの  $1 \times 2r$  の領域をそれぞれ領域 A、領域 B とし、領域内の各ピクセルの輝度を調べ、領域ごとに平均を求める. キューブ表面の一部にキズやゴミが付いていると実際の表面の輝度よりも暗くなってしまいうことから、A と B で求めた輝度の平均のうち、大きい方をそのキューブ画像の参照値とする.

どのような穴についても、そのエッジが円となるようなしきい値として、得た参照値の 70 % の輝度をその画像のしきい値とした.

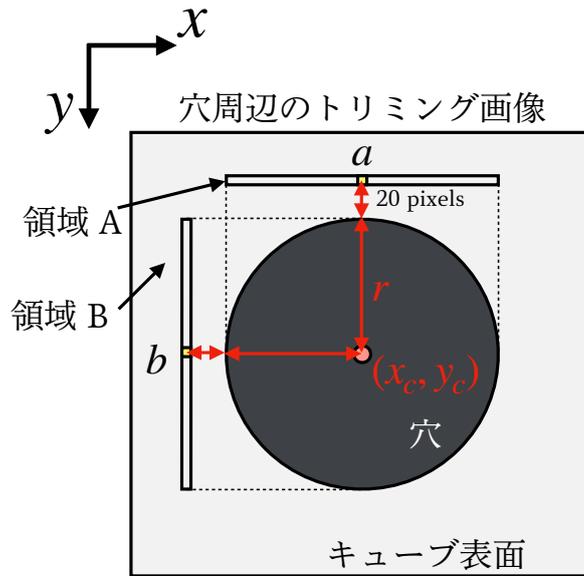


図 5.13 しきい値を決定するため、輝度の参照値を求める。キューブ表面の領域 A, B でそれぞれ輝度の平均値を求める。領域内にキズ等を含んでいると実際より暗くなってしまうことから、A と B でより明るい方を参照値として利用する。

### 穴位置中心の最適化

上で定めたしきい値によって画像を二値化し、キューブの表面と穴の境界を円でフィッティングすることによってその中心を求める。解析を行う画像に検出したいエッジとは異なるエッジが含まれていると誤検出の原因となるので、ハフ変換で検出した円の情報からその付近をトリミングした画像を用いた。

図 5.14 のように、エッジに対して中心  $(x_c, y_c)$ 、半径  $r$  の円を描き、角度  $\theta_i$  での円周上の点  $(x_i, y_i)$  と、穴の縁上の点  $(x_{\text{edge},i}, y_{\text{edge},i})$  の距離の 2 乗を計算し、それらを円周について和をとったもの  $E_{\text{sum}}(x_c, y_c, r)$  を考える：

$$\begin{aligned}
 E_{\text{sum}}(x_c, y_c, r) &= \sum_i \left( |x_i - x_{\text{edge},i}|^2 + |y_i - y_{\text{edge},i}|^2 \right) \\
 &= \sum_i \left( |x_c + r \cos \theta_i - x_{\text{edge},i}|^2 + |y_c + r \sin \theta_i - y_{\text{edge},i}|^2 \right).
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

ここで  $\theta_i$  は考えている半径方向の角度であり、今回はエッジ上の 16 点

$$\theta_i = \frac{\pi i}{8}, i = 0, 1, \dots, 15
 \tag{5.7}$$

について和をとった。この  $E_{\text{sum}}$  が最小となるような円の中心と半径  $(x_c, y_c, r)$  を求めればよい。

まず、初期値として用いる円の中心座標と半径を得る。半径としてはハフ変換で検出した円のものを用いた。円の中心座標は次のように求めた。まず穴付近をトリミングし、設定したしきい値での二値化を行った画像のうち、黒ピクセルの数を数える。次に、画像上から行ごとに黒ピクセルの数を数えていき、全体の半数を超えた行が黒ピクセル数の縦方向の中央値であり、円の中心の  $y$  座標  $y_c$  と考える。同様に横方向の黒ピクセル数の中央値を求め円の中心の  $x$  座標  $x_c$  と考える。

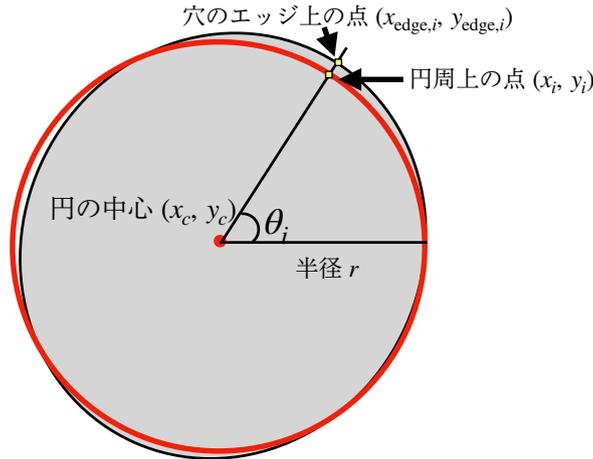


図 5.14 穴位置中心の最適化の概念図. 灰色の部分が穴の内部, 黒の曲線が穴の縁をエッジ化したものを表す. 赤の曲線がフィッティングのための円 (中心  $(x_c, y_c)$ , 半径  $r$ ) を表す. 角度  $\theta_i$  での円周上の点  $(x_i, y_i)$  とエッジ上の点  $(x_{\text{edge},i}, y_{\text{edge},i})$  を求め, それら 2 点間の距離を計算する. これを円周について和をとったものが  $E_{\text{sum}}(x_c, y_c, r)$  である.

次に, フィットすべきエッジの座標を得る. 前述のとおり今回は円を 16 分割した各角度に対応するエッジ上の 16 点を得た. 二値化後にエッジ化した画像において, 前段で調べた円の中心座標から, 角度  $\theta_i$  での半径方向に画像の輝度を調べていき, その直線上でエッジと判定されたピクセルがあればその座標を記録する.

ここで, 縦横に量子化された画像内での各ピクセルを調べるので, 図 5.15 のようにエッジ上を横切っているにも関わらずエッジのピクセルを検出できない場合がある. このような場合は, 調べるピクセルの始点を右または下に 1 ピクセル分ずらして再度上の操作を行うことで, 検出したいエッジ上の点に最も近いエッジのピクセルを検出することにした. また, 穴の状態が悪く, ある角度でエッジ上の点と判断された点が複数ある場合には円の中心から最も離れた点をその角度でのエッジ上の点とした.

このようにして得たエッジ上の 16 点に対して, 円フィッティングを行った. 円の中心と半径の初期値  $(x_c, y_c, r)$  で式 5.7 から  $E_{\text{sum}}$  を計算し, この値が最小となるような円の中心と半径を求める. 今回は以下のように  $E_{\text{sum}}$  の勾配を利用する勾配法によって最適化を行った.

ある円の中心と半径  $\mathbf{x} = (x, y, r)$  での  $E_{\text{sum}}$  の勾配

$$\nabla E_{\text{sum}} = \left( \frac{\partial E_{\text{sum}}}{\partial x}, \frac{\partial E_{\text{sum}}}{\partial y}, \frac{\partial E_{\text{sum}}}{\partial r} \right) \quad (5.8)$$

を求め, 予め設定した学習率  $\eta$  をかけて元の  $\mathbf{x}$  から引くことで更新する.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} - \eta \nabla E_{\text{sum}}. \quad (5.9)$$

この操作を指定したステップ数だけ繰り返すことで  $\mathbf{x}$  の最適値を求める. 今回は学習率として  $\eta = 0.01$ ,

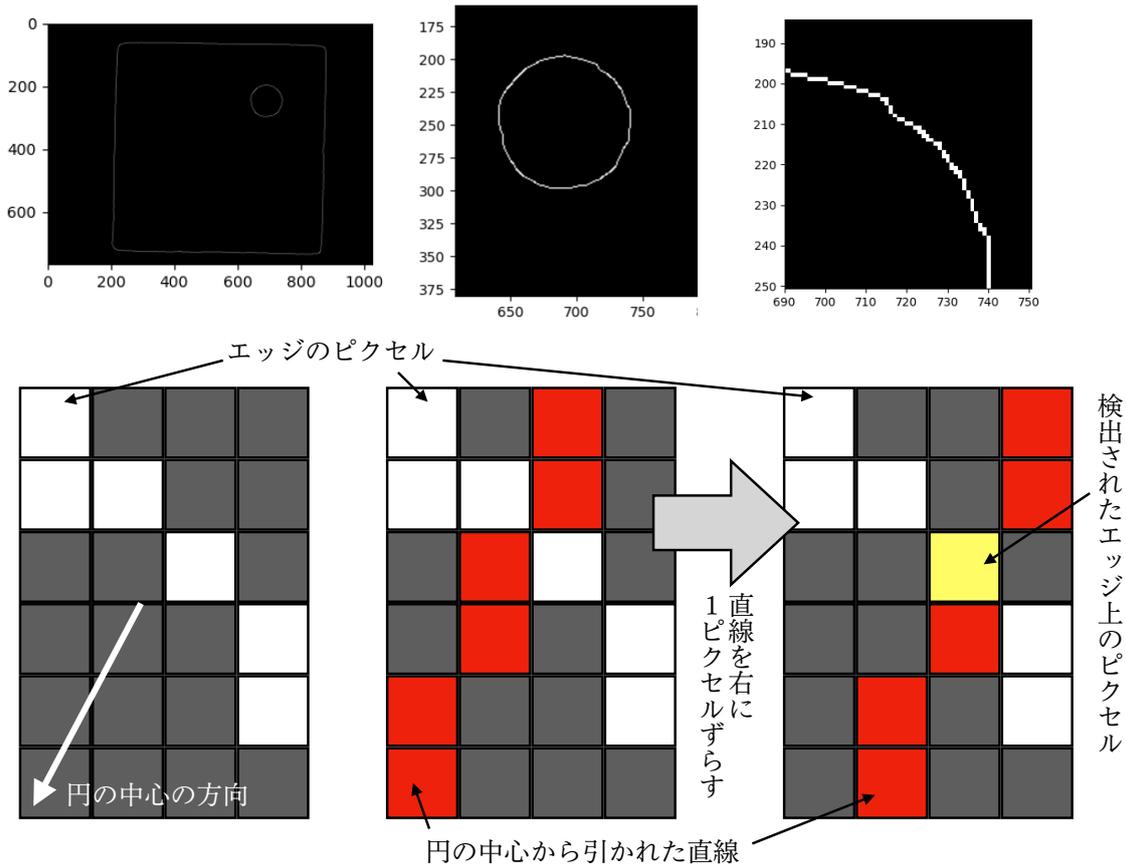


図 5.15 エッジ化画像の穴付近を段階的に拡大したもの（上）と、エッジ上のピクセルの検出方法（下）. 画像の量子化誤差によって、円の中心から引いた直線がエッジのピクセルを検出できない場合がある（下中）. そのような場合は直線を1ピクセル分ずらすことによってエッジ上のピクセルが検出可能となる（下右）.

ステップ数は50回とした.

図 5.5 の3つの画像に対して以上の操作を行った結果が図 5.16 である. また、円の中心, 半径,  $E_{sum}$  の変化について表 5.1 に示した.

左の画像, 中央の画像はハフ変換の段階で十分正確に円検出ができており, 最適化によりわずかに値が変化した. その一方右の画像はハフ変換で検出された円と画像から視認できる穴にずれがある. 穴の位置の最適化によって  $E_{sum}$  の値が大幅に小さくなり, 画像上でハフ変換で検出された円と最適化後の円を見比べても, 穴の縁がより正確に検出されている. それでも最小化後の  $E_{sum}$  の値は先の2つの画像のものに比べ大きい. したがって, 二値化の段階でエッジが円形をしていないと穴の位置の検出精度が悪くなるおそれがある.

表 5.1 図 5.5 の各画像に対する穴位置検出の結果 (円の中心, 半径の単位はピクセル数).

項目	左の画像	中央の画像	右の画像
ハフ変換で検出した円の中心, 半径	(649.5, 518.5), 50.3	(646.5, 521.5), 49.2	(652.5, 511.5), 50.3
$E_{sum}$ 最小化後の円の中心, 半径	(649.5, 516.7), 50.3	(646.6, 522.8), 49.6	(651.3, 514.8), 52.6
$E_{sum}$ の変化	20.59 → 9.10	22.53 → 7.58	127.76 → 29.04

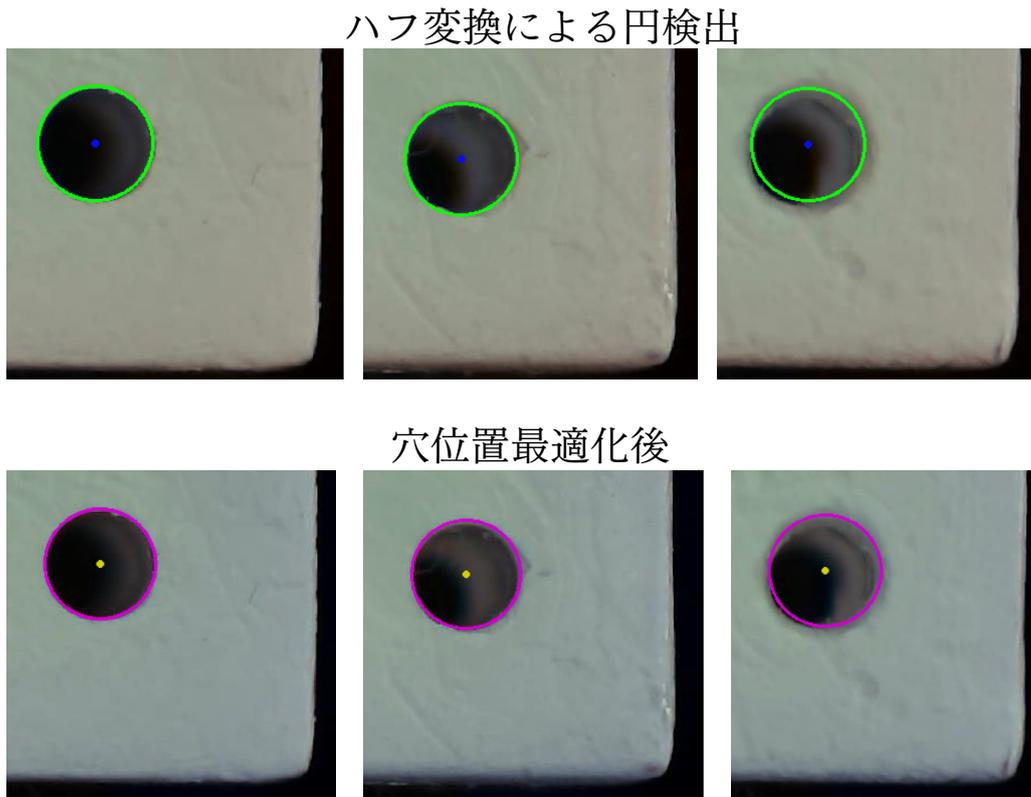


図 5.16 図 5.5 の各画像の穴位置最適化前後での比較。上が最適化前，下が最適化後。

#### 5.4.4 パラメータ抽出

以上の解析を行ったのち、キューブの穴位置と半径、キューブの大きさを出力した。キューブの大きさについては回転補正後の向かい合う縦の辺の辺の引っ張りを含めない位置の差を横方向の大きさ、横の辺の引っ張りを含めない位置の差を縦方向の大きさとした。キューブの穴位置については、最適化後の穴位置をそこから最も近い2辺から測った相対座標を使用し、横方向、縦方向の穴位置とした。しかしキューブを検査システムの撮影台に配置するときは無作為な向きとしているので、キューブの置き方によってあるパラメータが横方向としても縦方向としても捉えられてしまう。したがってここでは便宜的に縦と横を区別しているが、本質的な違いはない。半径には最適化後の値を用いた。穴の縁のエッジ化と穴位置の最適化が正しく行われているかの指標として  $E_{\text{sum}}$  の値も出力した。引っ張りの程度については、前述したように画像のなかで最も引っ張りがあると思われる領域における白ピクセルの割合として出力した。

### 5.5 撮影条件に合わせたパラメータの補正

4.5.1 節で述べたように、キューブを3方向から同時に撮影するにあたり、3方向から同時に照明を当てる必要がある。あるカメラで撮影する際に、別の方向から光が当たっていると、キューブの対応する辺に照明が反射し、辺がシャープに写る。その一方で光の当たっていない辺はぼやけて写るので、図 4.12 のように、光が当たっているか否かで辺の写り方が変わってしまう。さらに辺に光が当たっていないとき

には暗くなって写らない側面が、光が当たっているときには明るく写るので、光が当たると辺の位置が光が当たっていないときに比べて外側になってしまうという問題がある。またはじめに撮影台にキューブをどのような向きで置くかによって光の当たる側面が異なる。穴の位置によって4通りのキューブの向きがあるのでキューブを置く向きによっても光の影響に差が出る。

穴の位置を辺の位置から測る際に、基準となる辺に光が当たっているかどうかで結果が変わってしまうので何らかの方法でこの問題を解消する必要がある。なお、前述のようにキューブの大きさは向かい合う辺の位置の差から求めており、また照明はどのカメラでも画面内の左右のどちらかと上下のどちらかの2方向から当てられている。向かい合う辺は必ず片方のみ光が当たった状態になっているので、大きさを求める際には光の影響は少ないと考えた。

また、4章で検査システムについて述べたが、8個のキューブの撮影台と6台のカメラを使用している。それらは全て手作業で設置しており、それぞれのカメラと撮影台の組(8×6=48組)についてそれぞれの相対距離やカメラの画角内にキューブがどの程度正面に来るか、といったことを完全に一致させることは不可能である。したがってキューブの撮影はカメラと撮影台の組にも依存してしまう。それによりキューブの大きさの測定にも穴の位置の測定にも影響がある。図5.17はあるキューブの面を3つのカメラで、4通りの向きで回転させたものである。カメラごとに、キューブの光が当たる辺が異なっているのに加え、調整しきれない僅かな焦点距離やカメラの向きの違いが原因で、別のカメラで全く同一の写真を撮影することはできない。

キューブを置く向きによる光の当たり方の違いや、カメラと撮影台の組ごとの撮影状況の違いについても一挙に補正するような手法として、あるキューブのある面を全てのカメラと撮影台の組で4通りの向きで撮影して、それぞれの画像の解析結果を比較する、ということを行った。

16個のキューブの6面、全96個のサンプルに対して、各キューブの面につきカメラ6台×撮影台8個×キューブの向き(光の当たり方)4通り=192枚の画像を撮影した。まず、基準となるカメラと撮影台、キューブの向きの組合せを1つ選んだ。次にそれぞれの画像を解析することによってパラメータを抽出し、各組合せでキューブの大きさが同じになるようにピクセル数を規格化した後、各キューブの横方向の穴位置と縦方向の穴位置についてそれぞれ、カメラと撮影台、キューブの向きの組合せごとに、横軸、縦軸がそれぞれ基準となる組合せ、補正したい組合せで測定された穴位置となるような2次元分布を作成した。これらの2次元分布を図5.18に示す。

同じキューブの面の同じ穴位置の2次元分布なので、理想的にはこれらのデータは $y = x$ の直線に乗るはずである。しかし光の効果によって主に切片が変化し、カメラと台の相対距離の効果によって主に傾きが変化すると考えられる。したがってこの分布を直線でフィットしてその切片と傾きを用いることで、撮影した画像から抽出したパラメータに対するこれらの効果をまとめて補正することができる。

全192通りの画像から抽出したあるキューブのある面の横方向の穴位置について、このような補正を行う前後での穴の位置の測定値を詰めたヒストグラムを図5.19に示す。補正によって測定値の標準偏差が21.4  $\mu\text{m}$  から11.5  $\mu\text{m}$  にまで抑えられていることがわかる。また、全96個のサンプルに対してこのようにして得た測定値の標準偏差をヒストグラムにしたものが図5.20である。各サンプルでの測定値の標準偏差の平均値は補正によって23  $\mu\text{m}$  から10  $\mu\text{m}$  まで小さくなった。カメラのピクセルの位置分解

能は約  $15 \mu\text{m}$  であり，補正後の測定値の標準偏差はこれと同程度であり，照明の影響やカメラと撮影台の組合せによる撮影状況の違いが補正されている。

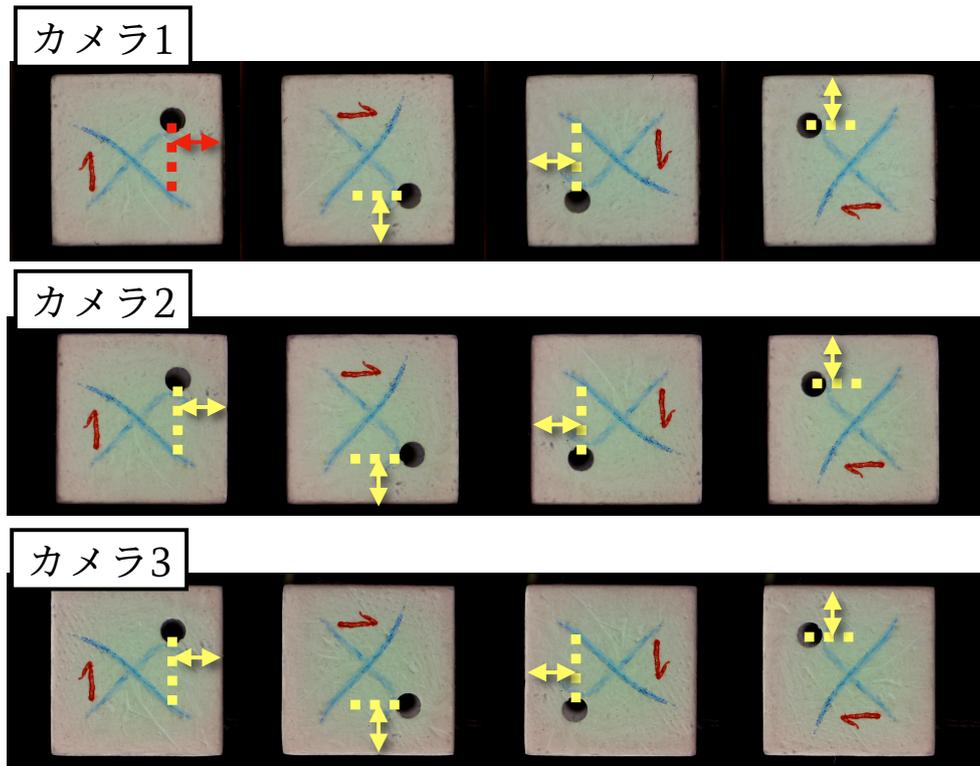


図 5.17 ひとつのキューブのある面を4つの向き，3台のカメラで撮影した様子．どの組合せで撮影しても矢印で示したところが同じ値になるような補正を行う。

## 5.6 測定精度の評価

4章と5章で述べてきた検査システムでキューブを撮影，画像解析して得られたパラメータが，実際に測定した値をどの程度再現するかについて述べる。

今回の画像解析では，キューブのそれぞれの面の横方向の大きさ，縦方向の大きさを抽出した．したがって各キューブ6面あることから大きさに関するパラメータは12個ある．これらに対応するキューブの大きさを得るために，各面のきわの部分に直接デジタルノギスを使って測定した．測定の様子を図5.21に示す．

キューブ10個の6面の横と縦の大きさについて，横軸をノギスで測った値，縦軸を検査システムで抽出した値として2次元分布にしたものが図5.22左である．実際の大きさと検査システムで抽出したピクセル数は比例すると考えられるので，この2次元分布を直線  $y = ax$  でフィットし，得られた比例定数でピクセル数を長さの単位に変換した．検査システムで得た値とノギスでの実測値の差を取り，1次元ヒストグラムにしたものが図5.22右である．残差分布の標準偏差から，本検査システムの測定精度とノギスでの測定精度を合わせた精度は  $39.8 \mu\text{m}$  であることが確認された．ノギスによってキューブの理想的

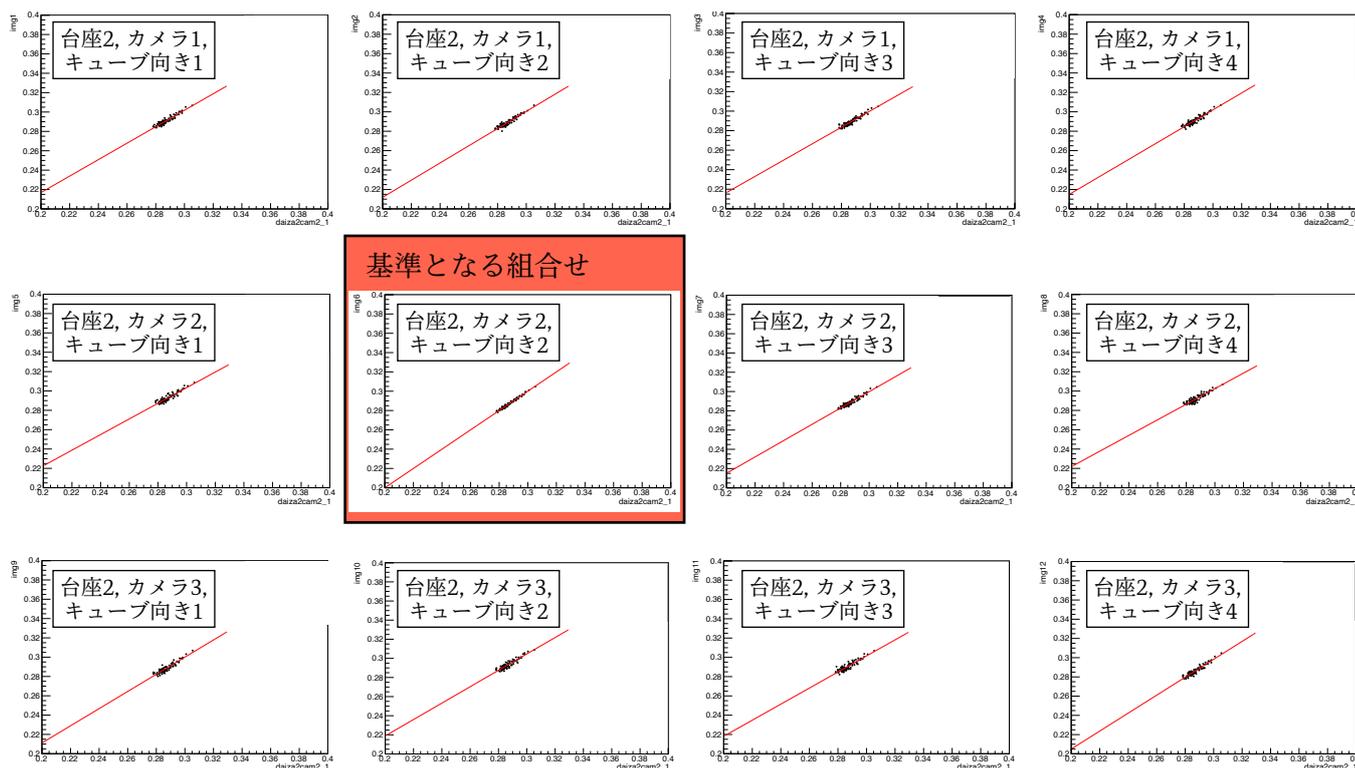


図 5.18 キューブの穴位置についての2次元分布の例。台座2, カメラ1, 2, 3, キューブの向き4通りでの12個の例を示した。基準となる組合せとして、台座2, カメラ2, キューブの向き2のものを選んだ。縦軸はそれぞれの組合せでの値である。データ点は直線  $y = x$  からは外れているものの、予想通りある直線上に乗っている。赤の直線はデータ点を1次関数でフィットしたものである。

な大きさを測定できていると仮定すると、本検査システムの測定精度は要求値である  $10 \mu\text{m}$  よりも大きいという結果となった。

撮影条件ごとのパラメータの補正は前節で述べたように適切に行えているので、ノギスでの測定で得られるキューブの大きさと画像解析から得たキューブの大きさでは測定方法が異なることにより、互いに一意に値を関連付けることが不適切である可能性がある。ノギスで測定する際にはキューブ表面の発泡部分になるべく力をかけないようにして測定したが、ノギスの構造上全く力をかけずに測定することは不可能である。キューブに力がかかることにより実際よりやや縮んで測定されている可能性がある。その一方で画像から大きさを得る際にはキューブを両側から押すような力は一切かからないという違いがある。

また、画像解析でキューブの大きさを得る場合にはまずキューブと背景の境界を検出する。このとき光の当たり方によって境界となるピクセルは変動する。前節では、向かい合う辺は片方には光が当たっておりもう片方には光が当たっていないことから、キューブの大きさに対する光の影響は少ないと考えたが、この仮定が誤っている可能性がある。

以上の結果が組み上げにどのように影響するかについては次章以降で述べる。

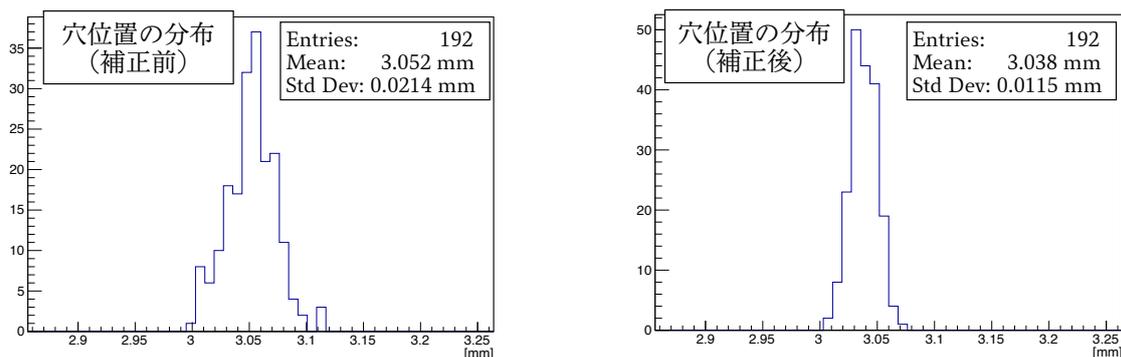


図 5.19 あるキューブのある面について、カメラ、撮影台、向きの 192 通りの組合せで撮影した画像から抽出した穴位置のヒストグラム。横方向の穴位置のヒストグラムのみ示した。横軸はキューブの大きさから得た規格化定数をピクセル数にかけて長さの単位にした。左が補正前、右が補正後。

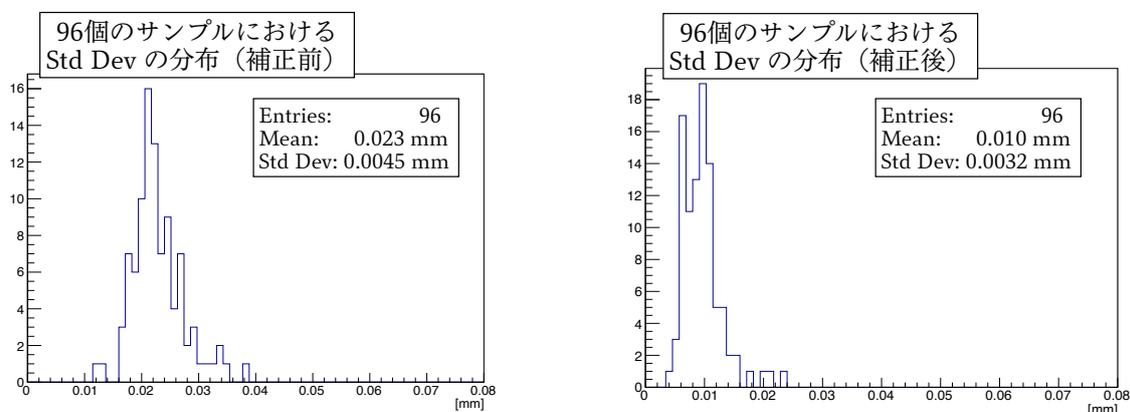


図 5.20 全 96 個のサンプルに対して図 5.19 のようにして求めた、各組合せでの測定値の標準偏差についてのヒストグラム。左が補正前、右が補正後。

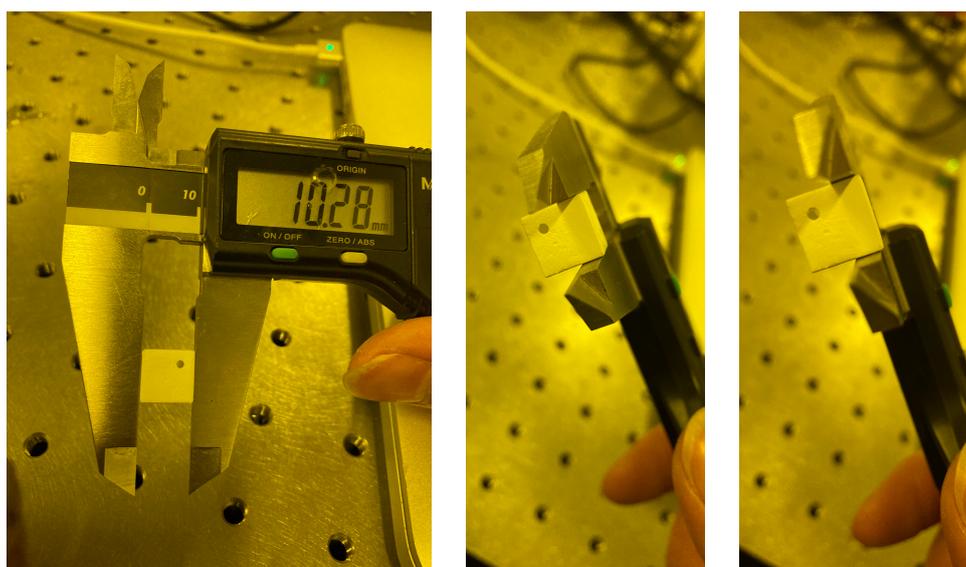


図 5.21 キューブ面の横方向の大きさの測定の様子 (左)。キューブのきわの部分直接ノギスではさむ (中, 右)。

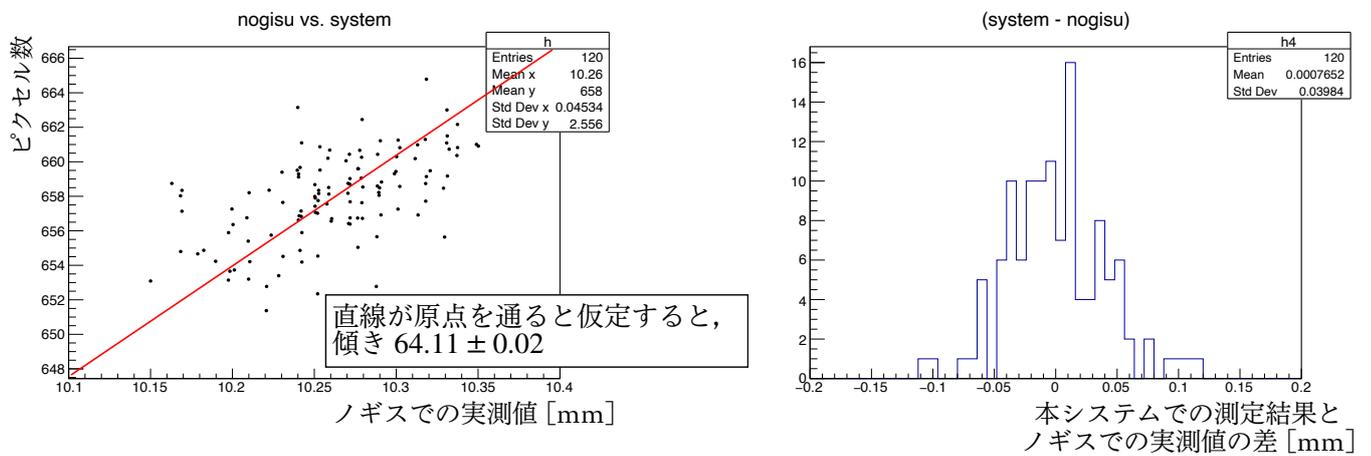


図 5.22 キューブ各面の大きさについて、実測値と検査システムで得た値の2次元分布(左). 検査システムで得た値であるピクセル数を、フィットの結果を用いて長さの単位に直し、それらの差を1次元ヒストグラムにしたもの(右).

## 第6章 検査システムの試運転と測定したパラメータの評価

### 6.1 検査システムの試運転

4章と5章で述べてきた、画像解析を用いたシンチレータキューブ自動検査システムの試運転を行った。試運転として、まず現在ロシアで行われている人の手での品質検査（ロシア方式品質検査とよぶ）により、使用可能と判断されたキューブ（良キューブとよぶ）と使用不可と判断されたキューブ（不良キューブとよぶ）を用いた。ロシア方式品質検査が行われたキューブを本システムでも検査することで、本システムがロシア方式品質検査の結果を再現できるかどうか確認した。本システムでキューブの画像を撮影し、画像解析によりキューブの大きさ、穴の位置を測定する。ロシア方式品質検査での良キューブと不良キューブそれぞれについて測定したパラメータを分布にし、それらを比較してロシア方式品質検査を再現するようなパラメータに対する条件を得ることを考える。測定したパラメータに対する条件を元にロシア方式品質検査における良キューブと不良キューブを十分に高い確率で識別することができれば本システムがロシア方式品質検査を再現できる、ということになる。

次に、品質検査の行われていないキューブの検査を行った。それらのパラメータの分布に対し、上で求めるロシア方式品質検査を再現するような条件を適用したときに、検査済みのキューブと同様にそれらのキューブを選別できるかどうか確認した。

#### 6.1.1 ロシアにて検査済のキューブを用いた試運転

ロシア方式品質検査における良キューブ 154 個、不良キューブ 241 個を本検査システムによって、大きさ、穴の位置を測定した。測定したキューブ大きさ、穴の位置についてのヒストグラムを図 6.1 に示す。青の実線で描かれたヒストグラムがロシア方式検査での良キューブ、赤の実線で描かれたものが不良キューブのものである。領域の色分けについては後述する。ここで横方向、縦方向とは、はじめに撮影されたキューブの 3 つの面については、正面から見たときに穴が右上にくるような向きに置いたときの水平方向、鉛直方向をそれぞれ指し、残りの 3 面については、向かい合う面での水平方向、鉛直方向に対応する方向をそれぞれ横方向、縦方向としている。しかし、5.4.4 節で述べたようにキューブを検査システムの撮影台に配置するときのキューブの向きが無作為である。したがってヒストグラム上では横方向と縦方向で別々に表示しているが、本質的な違いはない。

これらのヒストグラムには、各キューブの 6 面の画像から得られる測定値がすべて含まれている。良キューブであれば、6 面それぞれでの測定値はすべて平均値からのズレが小さく、不良キューブであれば、6 面それぞれでの測定値のうち、1 つ以上のパラメータの平均値からのズレがある基準値より大きいと考えられる。

ヒストグラムを見ると、ロシア方式品質検査での良キューブと不良キューブでは大きさの分布に大きな違いは見られないものの、穴の位置の分布に関しては両者に明確な違いが見られた。

これらの良キューブと不良キューブの分布を参照して、以下のように選別条件として分布に適切な上限と下限を設けることで良キューブと不良キューブを分類した。

- 良キューブ

- 6面の画像から得たキューブの横方向、縦方向の大きさ全てについて、10.10 mm より大きく 10.33 mm 未満かつ、
- 6面の画像から得た横方向、縦方向の穴の位置全てについて、2.73 mm より大きく 3.11 mm 未満

- 不良キューブ

- 6面の画像から得た横方向、縦方向の穴の位置のいずれか1つ以上について、2.71 mm 以下、または 3.13 mm 以上

図 6.1 において、青で示した領域が良キューブとみなすパラメータの範囲で、赤で示した領域が不良キューブとみなす範囲である。また黄で示した領域は再検査の対象とする範囲である。まず、大きさに関しては大きな違いがないので不良キューブとみなすしきい値は設定していない。代わりに、分布から大きく外れたものは正しく画像解析が行われていないおそれがあるので再検査すべきキューブと判断した。次に穴の位置に関しては、分布の形に大きな違いがあるので、良キューブの分布の上限と下限にしきい値を設定することで良キューブと不良キューブを分類する。またこれらのしきい値の $\pm 10 \mu\text{m}$ の領域は検査の際に生じる誤差を考慮し再検査領域とした。なお、本来穴の位置は縦と横を組み合わせ2次元的に評価すべきであるが、この段階では縦と横をそれぞれ独立に評価してしまっている。穴の位置の2次元的な評価については7章で述べる。分類の結果を表 6.1 に示す。ロシア方式の良キューブを本システムで検査したときに、上のような選別条件において良品として分類されたキューブの割合が 82.5 %、同様にロシア方式の不良キューブを本システム検査したときに上の選別条件で不良品として分類した割合が 87.6 % と、どちらも高い割合でロシア方式検査での分類を再現する結果となった。図を見ると穴の位置の分布では不良キューブの分布の端の部分しか排除できていないように見えるが、実際には6面の画像から測定されたパラメータ6個のうち、ひとつでも基準に満たなければそのキューブは不良とみなされるので、このような高い排除率が得られている。

また、本システムでの検査において、ロシア方式良キューブのうち選別条件によって不良品と分類されたものが 17.5 %、ロシア方式不良キューブのうち良品と分類されたものが 12.4 % ある。これらはロシア方式品質検査を再現できていないが、ロシア方式検査が隣接するキューブとの相対的な大きさの違いや穴の位置のズレに基づいた検査であることから、定量的な評価を行えていないことによって、本来は良キューブであるのにも関わらず不良キューブとされてしまっていたもの、あるいはその逆のキューブを、本検査システムで正しく評価しているという可能性がある。しかし依然として、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。

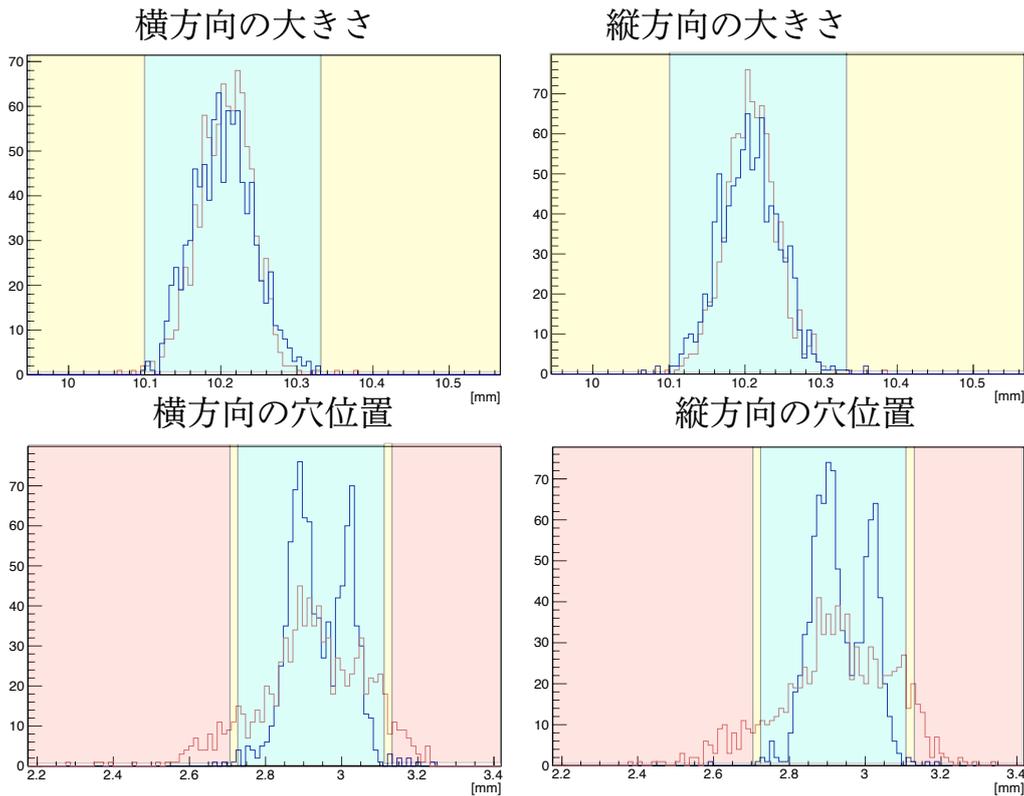


図 6.1 ロシア方式品質検査を実施済みのキューブの大きさのヒストグラム（上）と穴の位置のヒストグラム（下）. 青の実線がロシア方式での良キューブ、赤の実線がロシア方式での不良キューブのヒストグラムを表す. また青、赤の領域はそれぞれ、これらのヒストグラムに基づき設定した、良キューブ、不良キューブのパラメータの範囲. 黄の領域は再検査を行う必要のある範囲.

本検査システムでのキューブ品質検査は、ロシア方式品質検査の結果を十分に再現する結果となった。したがってキューブを釣り糸を用いて組み上げる場合には本検査システムは十分使用可能であることがわかった。

また、今回の試運転では1つのキューブの検査にかかる時間は約10秒だった。この試運転では撮影台にキューブを乗せ、カメラの映像を確認し、合図となるキーを入力する行程に余計な時間がかかってしまっていたが、これらの行程をスムーズに行うことで1キューブあたり5～6秒程度での検査が可能であることをその後の運転で実証している。4.2節で述べたように、200万個のキューブの検査を3ヶ月程度の短期間で完了するためには1キューブあたり5秒程度での検査・分類を行う必要がある。スムーズな品質検査を行うことで、このような検査時間についての要求に応えることができる。

### 6.1.2 未検査キューブを用いた試運転

次に、品質検査の行われていないキューブ600個を本システムで検査し、大きさ、穴の位置を測定した。得られたヒストグラムを図6.2に示す。

このヒストグラムに対し、ロシア方式検査を再現する選別条件を適用することによって、未検査キューブ

表 6.1 ロシア方式品質検査での良キューブ，不良キューブの分布に対ししきい値を与えることで本検査システムによって分類した結果（単位は％）．1度目に再検査と分類されたものは2度目の検査を行い，それにより良品または不良品と判断されれば，そちらに分類し直した．表中の再検査は，2度目の検査においても再検査と分類されたものを表す．

	ロシア方式良キューブ	ロシア方式不良キューブ
良品と分類	82.5	12.4
不良品と分類	17.5	87.6
再検査	5.2	7.1

ブを選別できるかどうか確認した．

前節の選別条件を適用すると，全体の半数以上が不良品と分類されてしまった．図 6.1 の良キューブのヒストグラムと図 6.2 を比較すると，大きさに関しても穴位置に関しても後者のほうが分布のばらつきが大きい．また大きさについては平均値も  $20 \mu\text{m}$  程度大きい．これらの違いによって，前節の選別条件に対し多くのキューブが不良品と分類された．同じ選別条件を適用したのでは使用可能なキューブを適切に選別できるとは言えない，という結果となった．

ロシア方式品質検査を行ったキューブは 2019 年に製作されたもので，今回検査したキューブは 2020 年春頃に製作されている．製造時期によってキューブの形状が異なっていることが予想される．実際に製造時期ごとのキューブの大きさの変動がロシアにて確認されている（図 6.3）．なおこのような場合でも，ロシア方式品質検査では常に同時期に製作されたもの同士での比較を行うことで検査を行っているため，不良品と分類するキューブの割合が時期によって大きく変動することはない．しかし組み上げの段階では，製造時期の異なる全てのキューブを使用するので，不具合が生じる可能性があり，その場合はこのシステムを用いた定量的な品質検査が必要になる．

## 6.2 超音波溶着の際にパラメータのばらつきが及ぼす影響

6.1 節では釣り糸を用いた組み上げのための品質検査について述べた．その一方で超音波溶着による組み上げではキューブをシートに固定してしまうので，隣同士のキューブで水平方向の穴の位置が揃っていないとファイバーを通すことができない．今回の測定結果では特に穴の位置についてのばらつきが大きい．このようなばらつきの下，穴の位置を揃えた状態でキューブをシートに固定することができるかどうか確認する必要がある．

超音波溶着を用いた組み上げ手法では，シートにキューブを  $24 \times 32$  個並べて溶着したシートモジュールを大量に製作し，それを 3 次元的に積層することで検出器を組み上げる．シートにキューブを並べる際， $24 \times 32$  個のキューブをさらに  $8 \times 8$  個の単位に分割する．この単位を  $3 \times 4$  個並べて，単位ごとに溶着していくことでシートモジュールの製作が行われる（図 6.6）．

したがって，シートモジュールを製作したときにファイバーが全ての水平方向の穴に通るためには， $8 \times 8$  単位で並べたときに全ての穴にファイバーが通ることが必要である．

$8 \times 8$  単位でキューブを並べる際，その方法として次のようなものが考えられる．

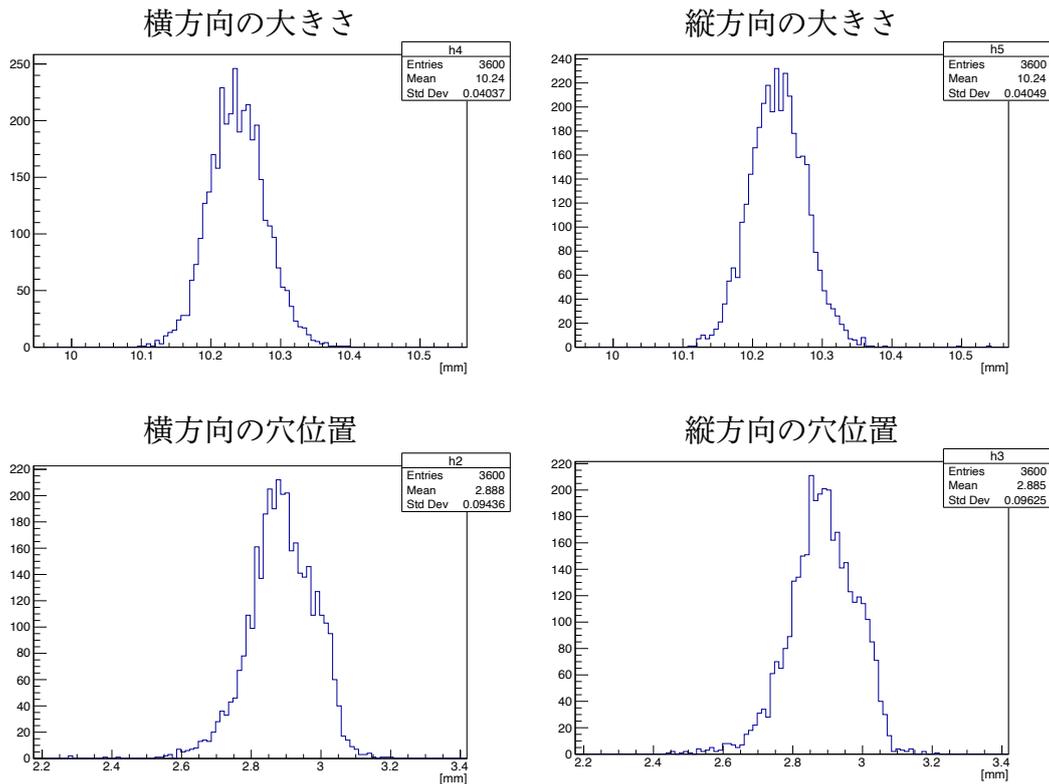


図 6.2 ロシア方式品質検査の行われていないキューブを本システムで検査したときのキューブの大きさのヒストグラム（上）と穴の位置のヒストグラム（下）。

1. 外枠を基準にした並べ方  $8 \times 8$  個のキューブが収まるような正方形の枠をつけたジグ用意し、その中にキューブを並べる。
2. シートに対して垂直方向の穴を基準にした並べ方 キューブの穴よりわずかに直径が小さく短いピンを底部にある間隔で  $8 \times 8$  個立てたジグを用意し、そのピンにキューブの穴を通していくことで並べる。
3. 上記 2 つの中間的な並べ方 キューブの穴より十分直径が小さく、かつファイバーよりは太いピンを底部にある間隔で立て、さらに枠もつけたジグを用意し、ピンにキューブの穴を通しつつ、枠にキューブが収まるように並べる。

並べ方 1 ではキューブを外枠を基準に並べる。この方法でキューブを並べることを想定して製作されたジグの写真を図 6.4 に示す。キューブ  $8 \times 8$  個分の領域ごとに金属製の薄い板で仕切られており、最も外側の太い金属枠とこれらの薄い板を基準にキューブを  $8 \times 8$  に並べる。当初はこのジグに図のようにキューブを並べて溶着し、シートモジュールを製作することを考えていた。この方法では、キューブを 8 個並べたときの全長が枠の大きさより小さすぎると、その平面内でキューブが動いてしまうので、隣り合うキューブ間で水平方向の穴の位置がずれてファイバーが通らなくなってしまう。また、キューブ 8 個の全長が枠より大きいと、枠の中にキューブを並べることができないので、キューブの大きさのばらつきまで考慮して適切な大きさの枠を用意する必要がある。ただし、仮に並べられたとしても、穴の位置に対する制限が無いので、ファイバーが通らないおそれがある。特にシートに対して垂直方向の

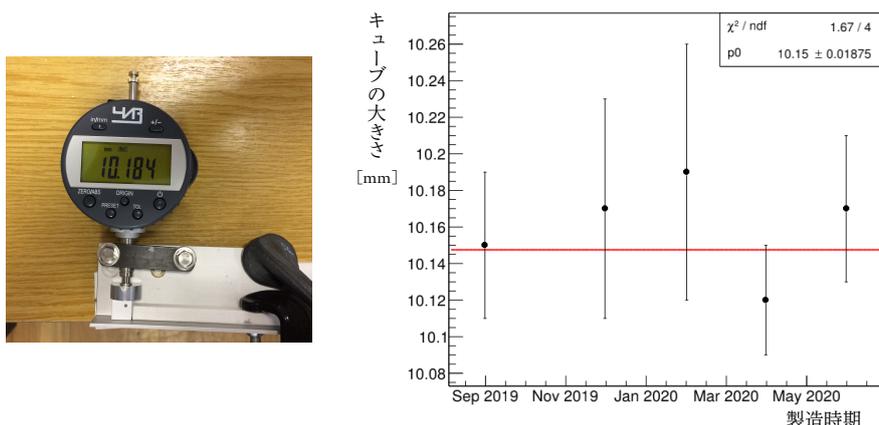


図 6.3 ロシアにて行われた製造時期ごとのキューブの大きさの測定。製造月ごとに、150個のキューブの3次元的な大きさが測定されている（左）。右のプロットは各製造月での大きさの測定値の平均を表し、誤差棒はばらつきの標準偏差を表す。2019年9月と2020年2月のデータを比較すると、2月の方が平均の大きさが大きく、測定値のばらつきも大きい。

穴に対する制限がないことから、シートモジュールを複数枚作成してそれらを重ねたときに、シートモジュールを貫く方向のファイバーが通らないことが懸念される。

並べ方2ではシートに対して垂直方向の穴を基準に並べる。この方法でキューブを並べることを想定したジグの写真を図6.5に示す。このジグを用いて実際にキューブの並べ方の検証を行った。並べ方の検証については7.5節で述べる。この方法では垂直方向の穴の位置を完全に固定するので、シートモジュールを貫く方向のファイバーを応力がかかることなく通すことができる。しかしピンの間隔が狭いと隣り合うキューブを並べることができない。また広すぎると、隣り合うキューブとの間に隙間ができてしまう。隙間があると、キューブは垂直方向の穴の周りで回転をする。この回転により水平方向の穴の位置も変動してしまうので、水平方向のファイバーが通らない確率が高まるおそれがある。このような回転への対策が必要になる。

並べ方3では並べ方2で使用するピンより細いピンで位置決めを行う。ファイバーより太いものを用いれば並べ方2と同様に、シートモジュールを貫く方向のファイバーは通すことができる。またピンを細くすることで、キューブは平行移動をすることができるようになり、並べ方2よりも狭い間隔でピンを立ててもキューブ同士が柔軟に移動することで、キューブを並べることができるようになる。しかし同時に、キューブの回転に加え平行移動も許すことになるので、ますます水平方向の穴の位置が変動してしまうおそれがある。

並べ方2, 3のようにシートに対して垂直方向の穴の位置は必ず揃える必要がある。その上で水平方向の穴の位置が揃うかどうかを調べる。今回は並べ方2のように垂直方向の穴の位置を固定したときの水平方向の穴の位置のズレを見ることにした。その際、上で述べたような固定した穴の周りでの回転の影響は無視して考える。回転の影響を無視したときに水平方向の穴の位置が揃うならば、回転への対策をすることで実際に全ての穴の位置を揃えた状態でキューブを組み上げることができるはずである。その一方で、回転の影響を無視してもなお水平方向の穴の位置が揃わないならば、無作為にキューブを並べたのではファイバーを通すことができないということになる。この場合は、各キューブの穴の位置の平

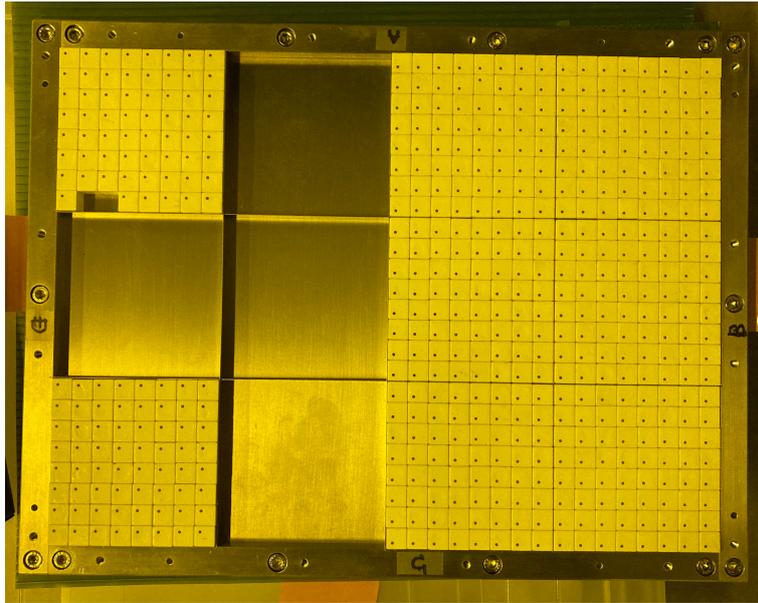


図 6.4 並べ方1の方針でキューブを並べるためのジグ。当初はこれを用いてキューブを溶着し、シートモジュールを製作する予定であった。

均からのズレを考慮してキューブを並べる、といった並べ方に対する工夫が必要になる。

個々のキューブの形状は様々であるから、キューブを並べたときのキューブ同士の隙間や水平方向の穴の位置のズレもキューブの組合せによって様々である。このような何通りものパターンを再現するため、トイモンテカルロシミュレーションを行うことによって、キューブを $8 \times 8$ に並べたときに全ての穴にファイバーを通すことができるか確認した。

### 6.2.1 トイモンテカルロシミュレーションによる検証

キューブの穴の直径は1.5 mmであり、ファイバーの直径は1 mmであるので、隣同士の穴の位置が0.5 mm以上ずれてしまうとファイバーを通すことができない。 $8 \times 8$ の単位において一箇所でもファイバーが通らないところがあると検出器を組み上げることはできないので、隣同士の穴の位置が0.5 mmずれるところが一箇所以上あるときはその $8 \times 8$ 単位は使用不可と判断する。このようなトイモンテカルロシミュレーションを大量に行うことで、使用不可となる $8 \times 8$ 単位の割合を求める。

#### キューブの生成

シミュレーション上でキューブを並べるにあたり、まず本検査システムで測定したキューブの大きさや穴の位置の分布からランダムに値を得ることで大量にキューブを生成した。

まず大きさについて、各キューブにつき6枚の画像から測定されるの横方向、縦方向の大きさを用いて、図6.7左のようにキューブの3次元的な大きさ height, width, depth を求める。例えば height の場合、この図の向きでは4つの側面の画像から測定されるキューブの縦方向の大きさの平均を計算し、これを height とする。各キューブについて height, width, depth を求め、3次元分布にしたものが図6.7右である。この3次元分布からランダムに値を得ることでキューブの大きさを再現する。

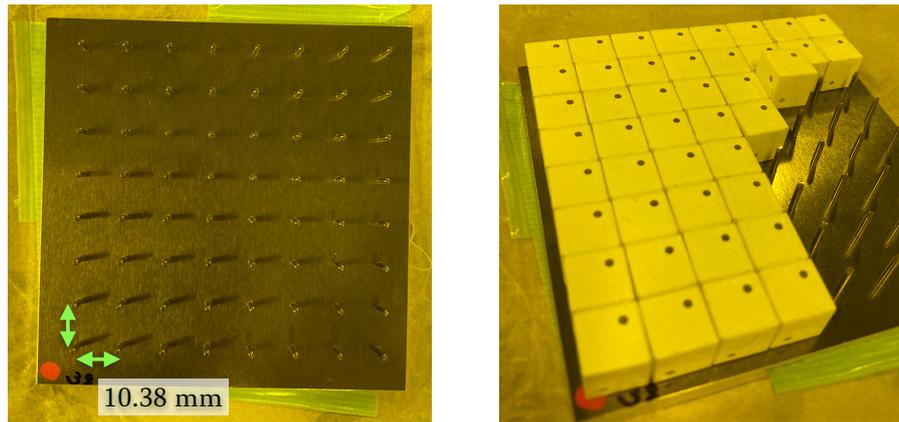


図 6.5 並べ方 2 の方針でキューブを並べるためのジグ．間隔 10.38 mm で位置決めのためのピンを立てている．

次に穴の位置について，各面ごとに測定される穴の横方向の位置（以後  $x_{\text{hole}}$  と呼ぶ）と縦方向の位置（以後  $y_{\text{hole}}$  と呼ぶ）を 2 次元分布にし（図 6.8），各面ごとに対応する 2 次元分布からランダムに値を得てそれを穴の位置とする．

#### キューブの整列，穴位置のズレの評価

生成したキューブを  $8 \times 8$  に整列させる．検出器の組み上げの際は，前述のようにシートに対して垂直方向の穴の位置はシートに垂直な方向のファイバーを確実に通すため，必ず揃える必要がある．したがって，この試験ではシートに対して垂直方向の穴の位置を基準にキューブを並べたときの水平方向の穴の位置のズレを見るので，図 6.9 のようにキューブを整列していく．まず各キューブについて天面と底面の穴の位置について平均を求め，それを垂直方向の穴の位置とする．次にこの穴の位置が一定間隔になるようにキューブを 2 次元的に配置していく．ただし，隣り合うキューブ同士の隙間や，それによる回転の影響は穴位置のズレを計算する際には考慮しておらず，今回のシミュレーションは垂直方向の穴の間隔には依存しない．

このように  $8 \times 8$  個のキューブの座標を固定した状態で，隣り合うキューブでの水平方向の穴位置のズレを調べる．その際に，各キューブは完全な直方体と仮定した．また，固定した垂直方向の穴の位置の周りで回転や平行移動をしてしまうと水平方向の穴の位置も変動してしまうが，今回のシミュレーションではキューブはこれらの運動をしない，という理想的な条件を仮定した．

このような  $8 \times 8$  個のキューブに対し，図 6.10 のように，隣同士での水平方向の穴のうち  $x$  方向（横方向）に空いた穴について平面内での位置の差  $\delta y$ ，鉛直方向での位置の差  $\delta z$  とし，

$$\sqrt{\delta y^2 + \delta z^2} \quad (6.1)$$

を計算する． $y$  方向（縦方向）に空いた穴についても同様に，平面内での位置の差  $\delta x$  として

$$\sqrt{\delta x^2 + \delta z^2} \quad (6.2)$$

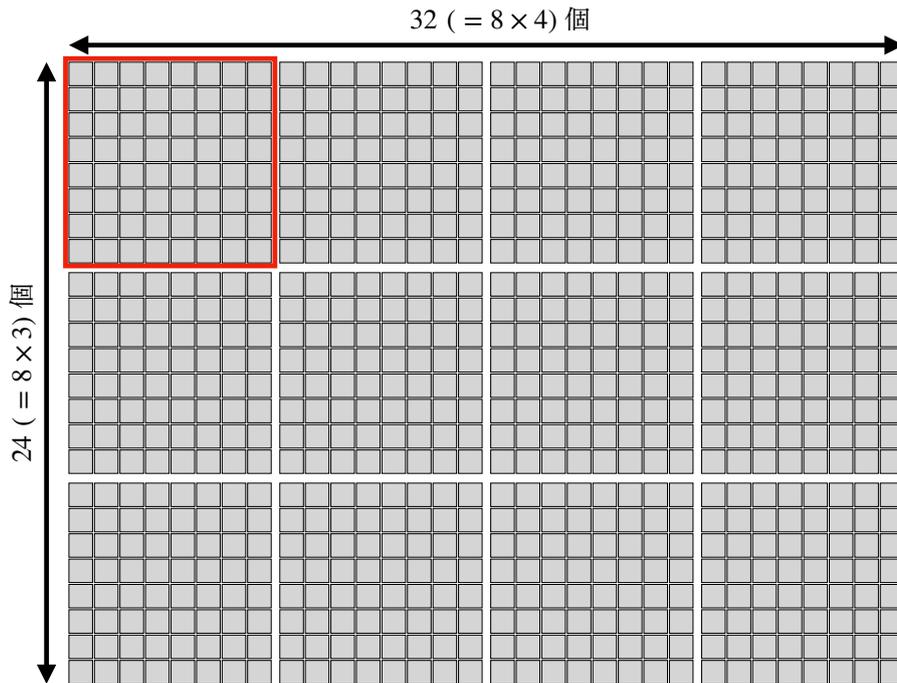


図 6.6 シートモジュールの概念図。灰色の小さな正方形がキューブを表す。赤線で囲った部分が $8 \times 8$ の単位である。このような単位を $3 \times 4$ 個並べてシートモジュールを製作する。

を計算する。これらが $0.5 \text{ mm}$ 未満ならばファイバーが通るが、一箇所でも $0.5 \text{ mm}$ 以上であればその $8 \times 8$ セットは組み上がらないということになる。

#### トイモンテカルロシミュレーションの結果

以上のような方法でキューブを1万個生成した。キューブ生成後に一切選別を行わない場合と、良キューブが80%程度となるような選別条件を適用した場合それぞれに対し、これらのキューブから64個ランダムに選び、 $8 \times 8$ に整列させ、このセットにおける穴位置のズレを調べる、という過程を5000回繰り返した。表6.2に結果を示す。

キューブの選別を行わない場合には、59.98%の $8 \times 8$ 個のキューブセットで穴の位置のズレが大きくファイバーが通らない箇所があり、組み上げ不可となった。仮に良キューブの割合が80%程度となるような選別を行ったとしても、25.54%のキューブセットで同様にファイバーが通らない箇所があり組み上げ不可となることがわかった。

Super FGDを組み上げる際には $8 \times 8$ 個のキューブセットを約3万個使用する必要がある。良キューブの割合をロシア方式品質検査と同等である95%程度の高水準に保ちつつ、3万個の $8 \times 8$ 個のキューブセットをその水平方向の穴全てにファイバーが通るように並べることは不可能であると結論づけた。そこで、キューブを並べる際に無作為に並べるのではなく、各面の穴の位置のズレの傾向から並べ方を工夫することを考えた。この並べ方の最適化については次章で述べる。

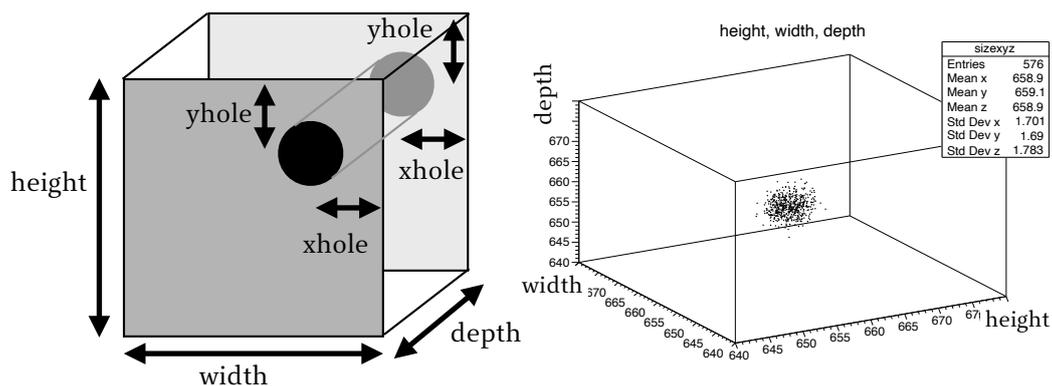


図 6.7 キューブの3次元的な大きさ height, width, depth の定義 (左) と、それらの3次元分布 (右). 分布の軸の単位はカメラのピクセル数である.

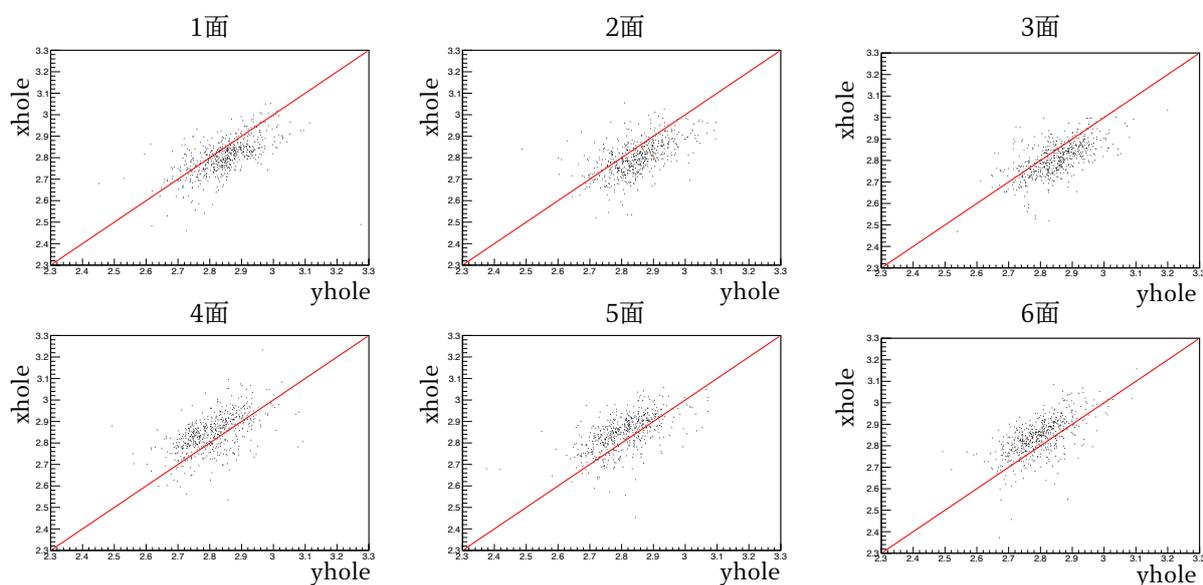


図 6.8 6つの面それぞれの穴の位置の2次元分布. 1面と4面, 2面と5面, 3面と6面がそれぞれ向かい合う面である.

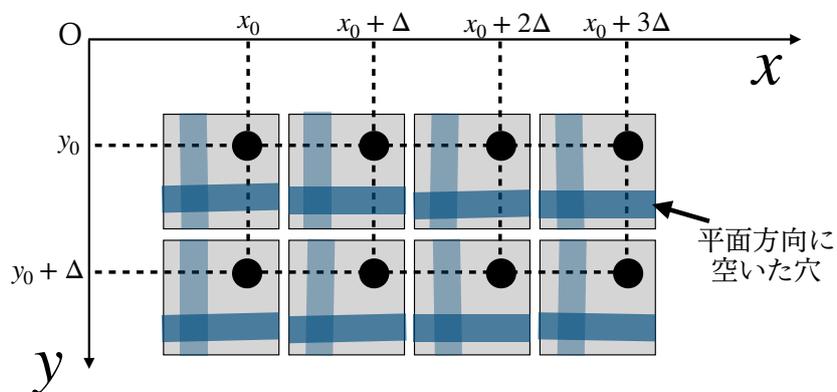


図 6.9 キューブ整列の概念図. シートに対して垂直方向の穴の位置を固定する. このように8×8個のキューブを整列させる.

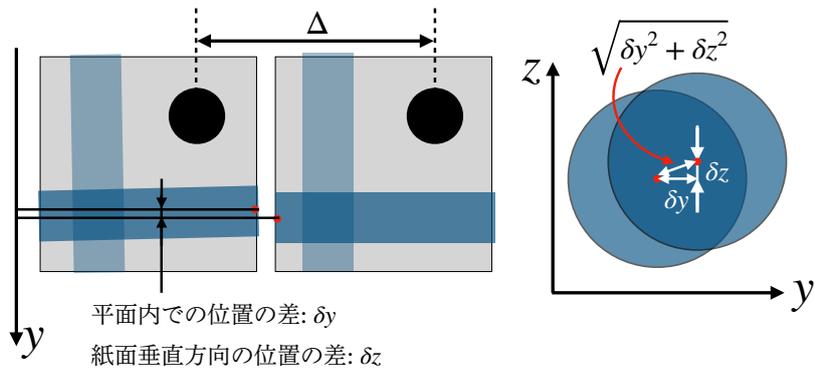


図 6.10 隣同士のキューブでの水平方向の穴の位置のズレ. 右は水平方向の穴を横から見た図.

表 6.2 隣り合うキューブで水平方向の穴位置のズレが 0.5 mm 以上のところが一箇所以上ある 8 × 8 セットの割合 (単位は %).

	キューブの選別なし	キューブの選別あり
良キューブの割合	100	80.59
組み上げ不可な 8 × 8 セットの割合	59.98	25.54

## 第7章 シンチレータキューブの並べ方の最適化

### 7.1 超音波溶着のための並べ方の最適化

6.2節で述べたように、超音波溶着を用いた組み上げを行うにあたり、キューブの製造時期によっては大きさや穴の位置のばらつきが大きく、無作為にキューブを並べて溶着してしまうと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、再度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、実際のキューブを本検査システムで検査して水平方向の穴の位置のばらつきによって分類し、トイモンテカルロシミュレーションと同様の方法で並べたときに、水平方向の穴にファイバーを通すことができるかどうか、確認した。

### 7.2 穴の位置のばらつきを考慮したキューブの間隔の決定

6.2節と同様に、キューブはシートに対して垂直方向の穴の位置を基準に並べる。今回は並べ方2の方針でキューブを並べることを考えることにした。したがって実際にキューブを並べる際には、底部にキューブの穴よりわずかに直径が小さく短いピンを一定間隔で立てたジグを用意する。このピンをキューブの垂直方向の穴に挿すことでキューブの位置合わせを行う。並べ方2では、ピンの間隔を、キューブが互いに干渉しないような大きな値とする必要がある。しかし間隔が広いとキューブの周囲に必要な以上に空間ができ、穴の周りでキューブが回転してしまうおそれがある。キューブが回転するとその分水平方向の穴も傾くので、さらに穴の位置のズレが大きくなってしまう。このような位置のズレがなるべく生じないよう間隔を必要最低限の値にする必要がある。

本検査システムで測定したキューブの3次元的な大きさ height, width, depth のそれぞれの分布は図7.1のようになっており、平均で10.24 mm, 最小, 最大でそれぞれ10.16 mm, 10.32 mmである。穴の位置のばらつきを無視すると、10.32 mmの間隔でキューブを配置すれば、理想的には最大のキューブが隣り合っても互いに干渉せずに並べることができる。その一方で、図7.2のように例えば平均的な大きさのキューブと最小のキューブが隣り合うと、両者の間には0.08 mmの隙間ができてしまう。

このような隙間を使って最小のキューブのみが回転してしまう場合が図7.3左で、周囲のキューブが連鎖的に最大限回転してしまう場合が図7.3右である。それぞれの場合で回転角は $\theta \sim \sin \theta = 0.0109, 0.124$ となる。この回転により、例えば図中赤点で示した水平方向の穴の位置は単一キューブの回転の場合、縦に0.03 mm, 横に0.05 mm変化する。連動した回転の場合に至っては縦に0.55 mm, 横に0.38 mm変化し、さらに隣り合うキューブも回転してしまうことから隣のキューブの穴の位置との差は縦にも横にも1.1 mm以上生じてしまう。このような回転の下では明らかにファイバーを通すことができない。

したがって、並べ方2の方針でキューブを並べる場合には、別途このような回転が生じないような工夫をする必要がある。

6.2節で述べたように、並べ方3では並べ方2よりも細かいピンで位置決めを行うことで、キューブはピンの周りでの回転だけでなく平行移動もできるようになる。この効果によって、ピンの間隔 $\Delta$ を並べ方2での最適値よりも小さくすることができるはずである。このとき、隣り合うキューブとの隙間が並べ方2に比べ少なくなることから、回転による水平方向の穴の位置の変動が減り、穴の位置のズレが小さくなる可能性がある。その一方でキューブの平行移動が発生することにより穴の位置のズレは大きくなる可能性もある。

これらは検証する必要があるが、シミュレーションで検証するには、ただキューブを並べるだけでも個々のキューブの形状のばらつきに加え、 $8 \times 8$ 個のキューブ全ての、互いに依存関係にある回転運動と平行移動まで再現しなくてはならない。このようなシミュレーションを行うことは技術的・時間的に困難であると判断した。並べ方2の方針であれば、キューブを並べるだけならば各キューブの運動を考える必要はない。回転を考えない場合に水平方向の穴の位置が揃うことが確認されるならば、実際にキューブを並べる際に回転が生じないような工夫をすることで、水平方向の穴の位置を揃えることができるはずである、と考え、今回は並べ方2の方針をシミュレーションで再現することにした。次節以降のトイモンテカルロシミュレーションを行う際には、このような回転による水平方向の穴の位置のズレは無視して考える。7.5節で実際のキューブを分類して並べる際に改めて議論する。

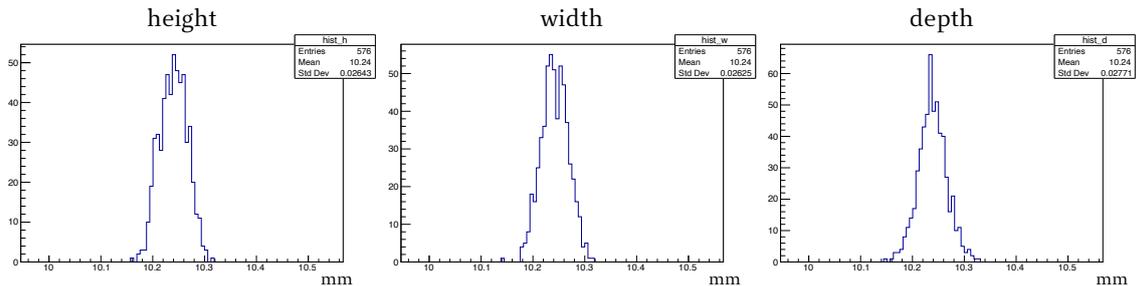


図 7.1 キューブの3次元的な大きさ height, width, depth の分布。

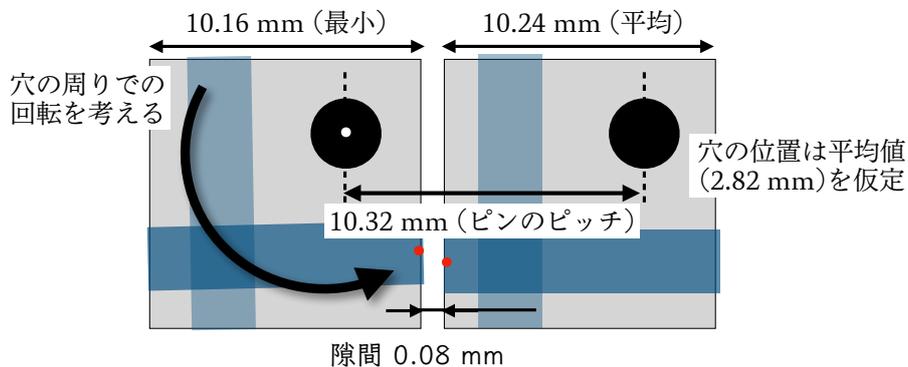


図 7.2 間隔 10.32 mm でキューブを並べたとき、平均の大きさのキューブと最小のキューブが隣り合った場合。穴の位置がどちらも平均値であると仮定すると2つのキューブの隙間は 0.08 mm となる。

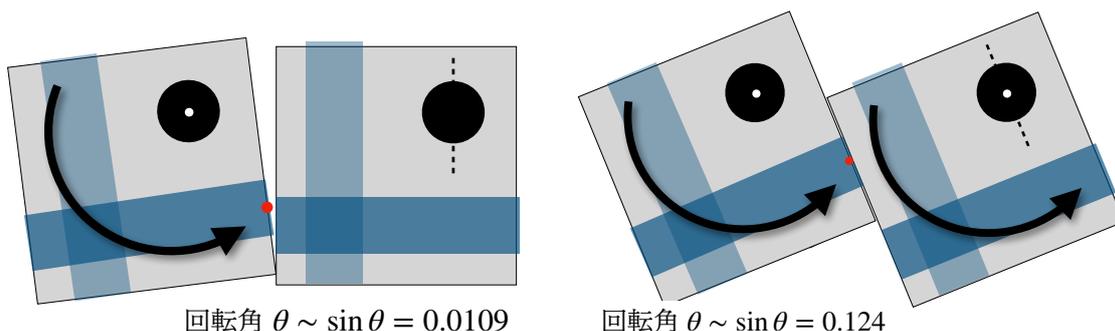


図 7.3 図 7.2 のようなキューブの配置のときに想定される，垂直方向の穴の周りでのキューブの回転．左は小さいキューブのみが回転する場合．右は周囲のキューブが一様に最大限回転してしまう場合．

### 隣り合うキューブの間隔の決定

キューブの位置決めを行うピンの間隔は，単純に考えるとキューブを置く間隔に対応するのでキューブの大きさ程度かそれよりやや大きければ，隣り合うキューブが互いに干渉することなく並べることができる．そのため，前述のとおりキューブの大きさのみを考える場合には間隔を最大のキューブの大きさである 10.32 mm とすれば全てのキューブを並べることができる．

しかし今回はシートに対して垂直方向の穴の位置を基準にキューブを並べる．この場合，6.1.2 節で述べたようにキューブの穴の位置のばらつきが大きい影響により，隣り合うキューブでの基準となる垂直方向の穴の位置によっては間隔 10.32 mm でも互いに干渉してしまい並べられないことがある．したがってこれらの穴の位置のばらつきも考慮する必要がある．ピンの間隔は図 7.4 のように，隣り合うキューブの大きさ width, depth と，垂直方向の穴の位置 xhole, yhole を用いて計算する．例えば，8 × 8 個のキューブセットにおいて横に並ぶキューブ 1 とキューブ 2 を固定するピンの間隔は

$$(\text{ピンの間隔}) > (\text{キューブ 1 の xhole}) + \{ \text{キューブ 2 の (width - xhole)} \} \quad (7.1)$$

を満たす必要がある．縦に並ぶキューブ組についても同様である．この式から，キューブ 1 の xhole とキューブ 2 の xhole が同程度であれば互いに打ち消し合い，ピンの間隔はキューブ 2 の width 程度で良いということになる．その一方，キューブ 1 の xhole がキューブ 2 の xhole に比べて大きいときはピンの間隔はキューブ 2 の width よりも大きくとる必要がある．今回は，キューブごとに各穴の位置の平均値からのズレを調べ，このズレが最も小さいものをシートに対して垂直方向となるように配置することにした．こうすることによって，どのキューブでも垂直方向の穴の位置は平均値からのズレが小さくなるので，条件式 7.1 においてキューブ 1 の xhole もキューブ 2 の xhole も平均に近い値となり，互いに打ち消し合う可能性が高まる．その結果，必要なピンの間隔をなるべく小さくすることができる．

トイモンテカルロシミュレーションによって 6.2 節と同様の手順でキューブを生成し，ランダムに 8 × 8 に並べ，あるピンの間隔に対して隣り合う 2 つのキューブについて条件式 7.1 が成り立っているかどうかを確認する．8 × 8 個のキューブセットに対して，この条件を満たさないキューブ組があると，そこではキューブ並べることができない．しかし実際にキューブを並べる際には，そのような箇所では問題の

キューブを条件を満たす別のキューブと取り替えれば並べることができるので、水平方向の穴にファイバーが通るかどうかとは無関係である。しかし、 $8 \times 8$ 個のキューブセットにおいてこのようなキューブ組が多ければ、いくつかのキューブを取り替えただけではそもそも $8 \times 8$ に並べることができない。当然このような場合は組み上げることはできないので、条件を満たさないキューブ組は少ないことが望ましい。現実的には、キューブを並べて大量の $8 \times 8$ 個のキューブセットを作るときに、90%程度のキューブセットでは全てのキューブ組が条件式7.1を満たしキューブをスムーズに並べることができ、残りの10%程度では数箇所条件を満たさないキューブ組があることを許す。このような箇所では、該当するキューブを別のキューブと取り替えて整列を行う。このようにすることで、取り替えの頻度をなるべく少なくしキューブの $8 \times 8$ での整列をスムーズに行いつつ、必要以上にピンの間隔を大きくしすぎることによるキューブの回転の影響を少なくする。

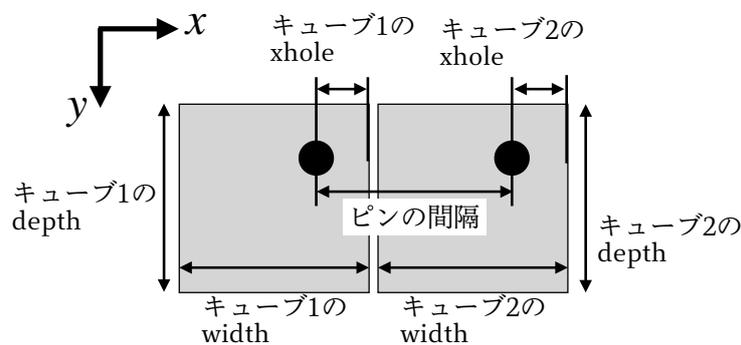


図 7.4 穴の位置のばらつきも考慮したときのピンの間隔。

今回はトイモンテカルロシミュレーションでキューブを10万個生成した。なおキューブを生成する時点では、各面の穴の位置  $x_{hole}$  と  $y_{hole}$  については相関をもたせていたが、向かい合う面の穴の位置の相関をもたせることができず、ランダムに生成してしまっていた。そこで図7.5のようにキューブ生成後に向かい合う面での穴の位置の差  $\sqrt{\Delta x_{hole}^2 + \Delta y_{hole}^2}$  を計算し、この値に制限をつけることで、生成したキューブのうち、実際のキューブに近いもののみを使用することにした。左図のように実際のキューブの測定結果から計算される向かい合う面での穴の位置の差は平均0.12 mm、値の大きなものでは0.3 ~ 0.4 mm 程度である。したがってシミュレーションでは右図のようにこの値が0.3 mm 未満であるもののみ使用することにした。測定値より分布の広がりが大きくなってしまっているが、実際より厳しい条件でシミュレーションを行っていると考ええる。

向かい合う面での穴の位置の差が全て0.3 mmであったキューブからランダムに $8 \times 8$ 個選んで並べ、全ての隣り合うキューブ組について条件式7.1を満たしているか確認する、という操作を1万回繰り返した。前章のシミュレーションに比べ統計量を増やしたのは、ピンの間隔を十分にとると条件式を満たさないキューブ組の数が少なくなり、その割合を正確に見積もることができなくなるからである。この結果を表7.1に示す。

キューブの大きさの最大値である10.32 mmをピンの間隔とするとほぼ全ての $8 \times 8$ 個のキューブセットで条件式を満たさないキューブ組があるという結果となった。また上述した実用の観点から考えると、ピンの間隔は10.38 ~ 10.40 mm程度が最適である、という結果になった。したがってピンの間隔

10.38 mm と 10.40 mm の 2 種類の 8 × 8 ジグを製作した。

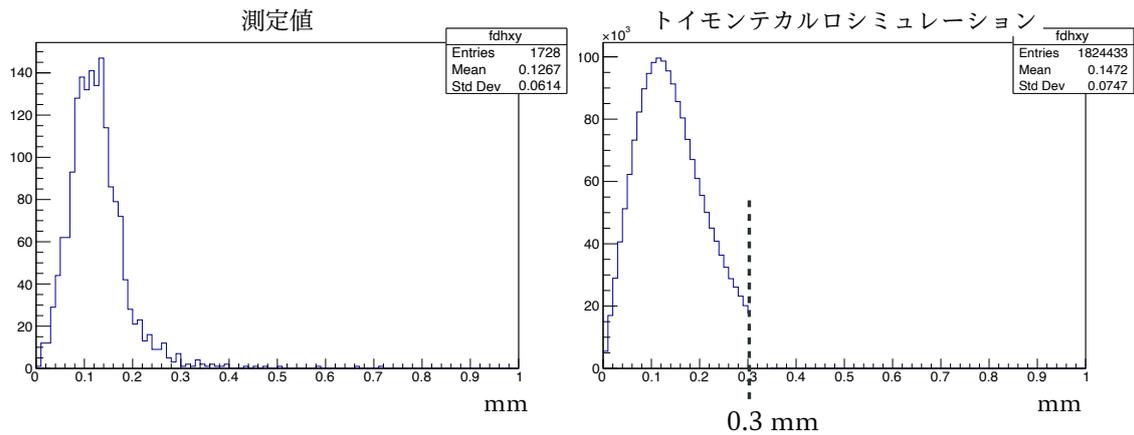


図 7.5 キューブの向かい合う面での穴の位置の差  $\sqrt{\Delta x_{\text{hole}}^2 + \Delta y_{\text{hole}}^2}$  のヒストグラム。左が本システムでの測定結果から計算したもの、右がシミュレーション。測定結果での値を参考に、シミュレーションでの値に対して上限 0.3 mm を与える。

表 7.1 トイモンテカルロシミュレーションにおいて、8 × 8 個のキューブセットを 1 万セット作成したときに、1 箇所以上条件式 7.1 を満たさないキューブ組があるキューブセットの割合。

ピンの間隔 [mm]	10.32	10.34	10.36	10.38	10.40
条件式を満たさないキューブ組がある 8 × 8 セットの割合 [%]	99.82	90.48	56.15	21.34	6.39

### 7.3 ファイバーを通すためのキューブの並べ方に関する設計

まず、図 7.6 左のように水平方向の穴の位置について 2 次元分布を作成した。今回はシートに対して垂直方向の穴の位置を基準にキューブを並べることから、図 7.6 右のように水平方向の穴の位置座標の水平成分  $y$  は、そのキューブの垂直方向の穴の位置からの距離とした。また水平方向の穴の高さについては、キューブの底面を基準としているので、位置座標の垂直成分  $z$  はキューブの辺からの距離とした。キューブの水平方向の穴の位置の平均を求め、各キューブの水平方向の穴が平均に対してどの方向にずれているのか、によってキューブを分類する。その上でズレの傾向の同じキューブを並べれば、それらの穴の位置は平均から同じ方向にずれているので、そのズレの程度が十分に小さくなるような分類をすれば、ファイバーが通るはずである。図 7.6 左では穴の位置を A, B, C, D の 4 通りに分類しているが、それぞれの領域の中でのばらつきと、向かい合う面での穴の位置のズレを考慮したときに生じる最大の穴の位置のズレが 0.5 mm 未満であれば、ファイバーを通すことができる。最大の穴の位置のズレが 0.5 mm 以上となってしまう場合には、穴の位置の分類を 4 分割よりもさらに細かくすることで、最大の穴の位置のズレを 0.5 mm 未満にすることが可能である。図 7.7 左は図 7.6 左の穴の位置の分類を模式的に示したものである。なお実際には水平方向の穴は縦と横に 2 本あるので、それぞれのズレの傾向から 2 つの穴について独立に分類する必要がある。上のような考えに基づき縦と横の穴についての分類

に従ってキューブを例えば図 7.7 右のように  $8 \times 8$  に並べれば、全ての穴にファイバーが通ると考えられる。また、シートモジュールを製作する際には図 6.6 のように  $8 \times 8$  個のキューブセットを  $3 \times 4$  個並べる。このとき、隣り合うキューブセット間で同じ列となるキューブの分類を一致させておくことで、シートモジュール単位でも全ての穴にファイバーを通することができる。

トイモンテカルロシミュレーションでは、 $8 \times 8$  個のキューブセットを大量に作成し各キューブセットにおいて隣り合うキューブでの水平方向の穴の位置のズレを調べる。一箇所でも穴の位置のズレが  $0.5 \text{ mm}$  以上あると、ファイバーが通らず検出器を組み上げることができない。このような  $8 \times 8$  個のキューブセットがどの程度の割合で生じてしまうかシミュレーションで確認する。なお、前述の通り穴の位置のズレを確認するには各キューブの回転による影響は考えていない。

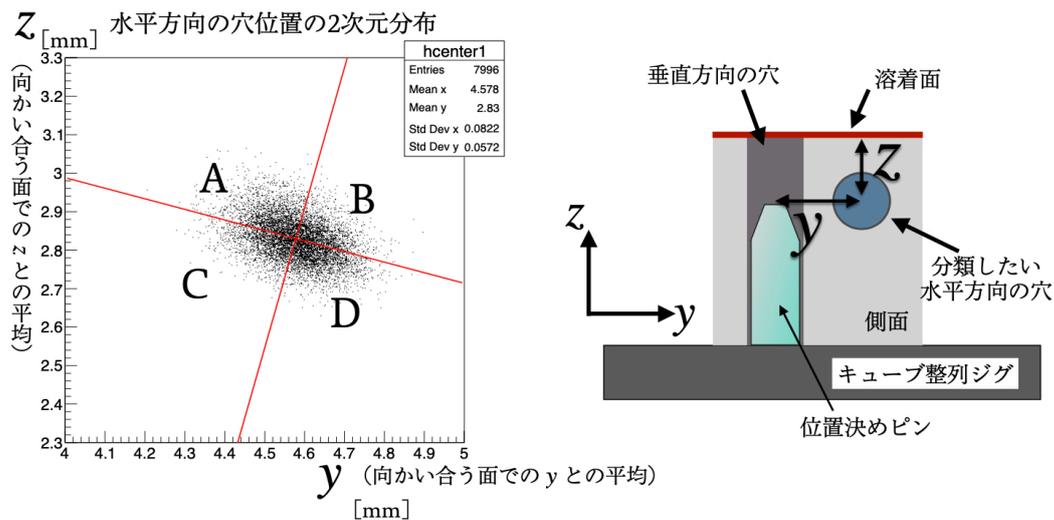


図 7.6 水平方向の穴の位置の 2 次元分布。縦軸と横軸はそれぞれ右に示した、キューブを横から見た図での水平方向の穴の位置  $z$ ,  $y$  である。なお、向かい合う面で同様に定義した穴の位置との平均をとっている。図中赤線は分布を 1 次関数でフィットしたものと、その直線に対して穴の平均位置で垂直に交わる直線であり、これらを用いて領域の分割を行う。

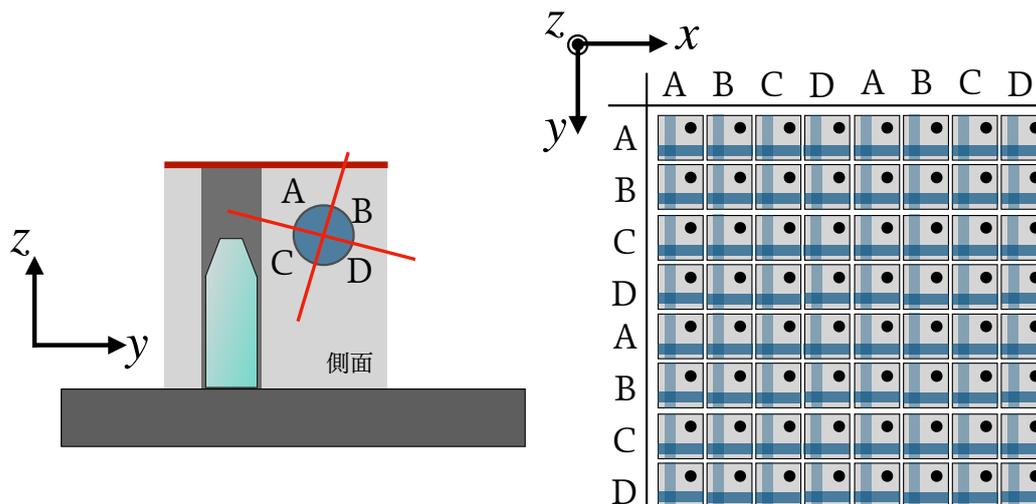


図 7.7 キューブの水平方向の穴の位置のズレによる分類の例. 右はこのような分類を行った場合の8×8個のキューブの並べ方. この例では, 穴の位置の2次元分布をA, B, C, Dの4つの領域に分割し, キューブを縦の穴の位置と横の穴の位置で全4×4=16通りに分類している.

## 7.4 トイモンテカルロシミュレーションを用いた並べ方の最適化

### 7.4.1 水平方向の穴の位置の16通りの分類

図7.8はトイモンテカルロシミュレーションで生成した10万個のキューブのうち, 向かい合う面での穴の位置の差が0.3 mm未満であるという条件を満たすものの水平方向の穴の位置の2次元分布を, 1次元フィットした結果の傾きの分だけ回転させ, さらに分布の平均値が中心が原点にくるような座標変換を行ったものである. 向かい合う面での位置の差の条件を満たすものは10万個のキューブのうち82154個であった. また図中橙色の曲線は, 長径と短径がそれぞれ対応する座標軸での標準偏差の2.3倍, 3倍であるような楕円である. この楕円に含まれない領域のキューブは, その水平方向の穴の位置が極端に平均から離れていると解釈できるので, キューブに対して, 水平方向の穴の位置がこの楕円の領域内である, という選別条件を課す. このような条件を満たすキューブは, 向かい合う面での穴の位置の差の条件を満たしたキューブ82154個のうち94.43%に相当する77577個であった. 全てキューブのうち, 使用可能なキューブの割合は95%程度であることが望ましいので, 95%に比べわずかに少ないものの妥当な条件である.

このような条件を満たすキューブの穴の位置を図7.8右のように4つの領域A, B, C, Dに分類する. 各領域内で, 最も穴の位置がずれるとき, その距離は左図中で橙色の矢印で示したように0.218 mmとなる.

水平方向の穴2つをそれぞれ4つの領域に分類することで, キューブを4×4=16通りに分類する. トイモンテカルロシミュレーションによって分類した結果を表7.2に示す. 全ての分類に同じだけの個数のキューブが含まれていれば最初から最後まで図7.7右下のような規則で全てのキューブを並べることができるが, 実際には分類ごとにキューブの個数に偏りが見られた. したがって全ての8×8個のキューブ

ブセットについてキューブを同じ規則で配置することはできないが、個数の多い領域のキューブにより、個数の少ない領域のキューブを補うように、部分的にキューブ列を置き換えることでこの問題は解消できる。

今回は分類ごとのキューブの個数については考えずに、図7.7右下のように8×8にキューブを並べ、隣りあうキューブとの水平方向の穴の位置のズレを調べた。16通りの各分類からキューブを4個ずつ無作為に選び、8×8にキューブを並べ、穴の位置のズレを調べる、という過程を1万回繰り返した。前述のように垂直方向の穴の周りでの回転の影響は考えておらず、回転への対処は別途行う必要がある。

キューブを分類する際、水平方向の穴の位置については向かい合う面での穴の位置の平均値が4分割した領域のどこに含まれるかによって分類していた。実際には図7.5からもわかるように、各キューブにおいて向かい合う面での穴の位置はずれているのでこのズレの分も考慮する必要がある。したがって、各領域内で最も穴の位置がずれるとき、その距離は0.218 mm であるが、ここにさらに向かい合う面での穴の位置のズレの影響も考えると、隣り合うキューブ間での穴の位置のズレが0.5 mm を超えてしまう場合がある。今回は、1万個の8×8個のキューブセットに対し、0.02%に相当する2個のセットで穴の位置のズレが0.5 mm を超えてしまう箇所があった。割合としてはかなり低いものの、200万個のキューブを組み上げる際には、8×8個のキューブセットは約3万個必要であるから、この方法でSuper FGDを組み上げる際には6箇所程度でファイバーが通らないことが予想される。したがってこの方法でSuper FGDを確実に組み上げることができるとは言えない。

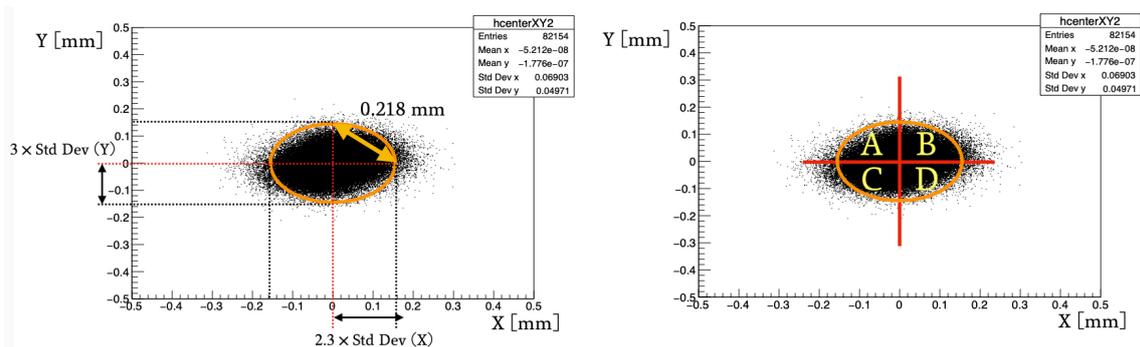


図 7.8 水平方向の穴の位置の2次元分布に対して、中心が原点にくるような座標変換を行ったものに対し、選別条件となる楕円を描いたもの（左）と、4分割した領域A, B, C, Dを明記したもの（右）。

表 7.2 トイモンテカルロシミュレーションにおいて、水平方向の穴の位置に対する楕円で選別条件を満たすキューブを16通りに分類したときの、各分類のキューブの個数。

	A	B	C	D
A	5099	8078	8005	5321
B	2523	3877	3604	2706
C	2502	3368	3746	2337
D	5222	7909	8057	5223

### 7.4.2 水平方向の穴の位置の64通りの分類

前節では、水平方向の穴の位置の2次元分布を4つの領域に分け、キューブを16通りに分類し8×8に並べたが、検出器組み上げのために必要な精度で穴の位置を揃えることができない可能性があることがわかった。穴の位置を分類する際、2次元分布をさらに小さな領域に分けることで、領域内での穴の位置のばらつきが押さえられるので、穴の位置のズレは小さくなると考えられる。そこで次に、図7.9、図7.10左のように2次元分布を8つの領域に分けることを考えた。このように領域を分けた場合では、領域内で最も穴の位置がずれるとき、その距離は図7.9中橙色の矢印で示したものであり、0.187 mmとなる。

今回は Super FGD の組み上げを想定し約3万個の8×8個のキューブセットでファイバーが通ることを確認するため、さらに統計量を増加してシミュレーションを行った。まずキューブを200万個生成し、向かい合う面での穴の位置のズレが0.3 mm未満である、という条件を課した。この条件を満たすキューブは200万個のうち164万3813個であった。さらに、これらのキューブのうち、水平方向の穴の位置が2次元分布において楕円の領域内に含まれているキューブは94.42%に相当する155万2042個であった。これらのキューブを64通りに分類したときの各分類のキューブの個数を表7.3に示す。16通りに分類したときと同様に、分類ごとにキューブの個数にばらつきが見られるが、個数の多い領域のキューブを別の領域にも部分的に配置することでこの問題は解消され则认为る。

今回もシミュレーションでは分類ごとの個数の偏りについては考えずに、図7.10右のように8×8にキューブを並べ、隣り合うキューブとの水平方向の穴の位置のズレを調べた。64通りの各分類からキューブを1つずつ無作為に選び、8×8に並べ、穴の位置のズレを調べるという過程を5万回繰り返した。なおここでも垂直方向の穴の周りでのキューブの回転の影響は考えていない。

5万個の8×8個のキューブセットに対し、穴の位置のズレが0.5 mmを超えてしまう箇所があるものは1つも無かった。16通りでの分類の際にはこのような8×8個のキューブセットは0.02%あったが、64通りの分類では、キューブの回転の効果を除いて、Super FGDを構成する約3万個のキューブセット全てにファイバーを通すことができると考えられる。

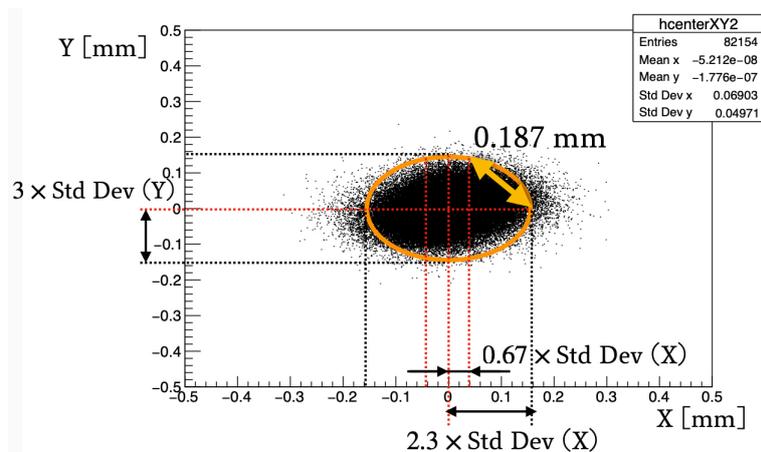


図 7.9 キューブの水平方向の穴の位置の2次元分布を8つの領域に分類するときの境界。

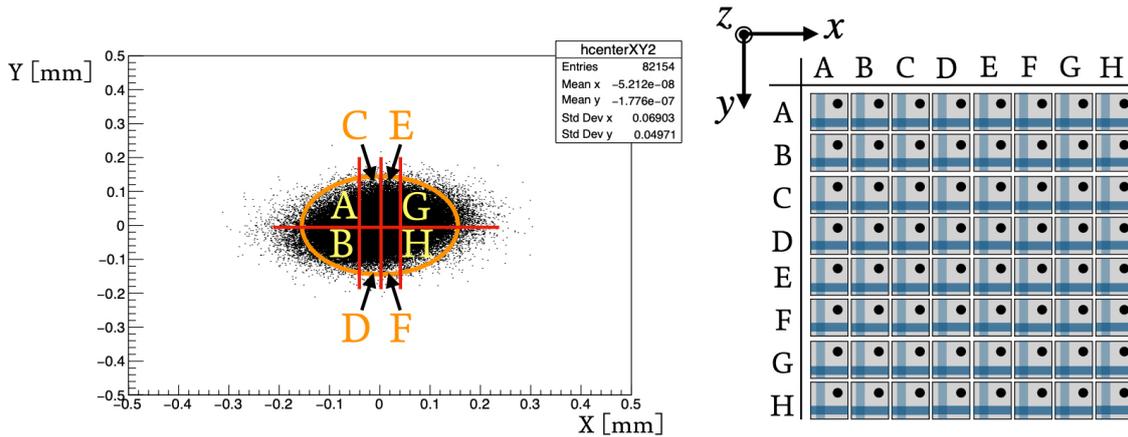


図 7.10 キューブの水平方向の穴の位置の 2 次元分布を 8 つの領域に分類したときの各領域 (左) と, 64 通りに分類したキューブでの 8 × 8 個のキューブセットの並べ方 (右).

表 7.3 トイモンテカルロシミュレーションにおいて, 水平方向の穴の位置に対する楕円での選別条件を満たすキューブ 164 万 3813 個を 64 通りに分類したときの, 各分類のキューブの個数.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	27470	57240	31059	41280	43274	29892	53612	27116
B	14067	26326	16510	19891	21312	14980	20457	11282
C	16091	27845	26735	34479	33418	27706	31927	19927
D	7777	11833	13740	16407	15498	13301	10499	7199
E	7352	11404	13931	15841	16977	13780	11931	8144
F	19946	33373	29475	34160	36099	27833	26651	17395
G	11900	23372	16288	22410	22682	17316	28530	15768
H	24640	51374	29674	40542	41567	29713	53856	27968

## 7.5 実際のキューブを用いた並べ方の検証

実際にキューブを本システムで検査と分類を行い, 前節までで議論した並べ方でキューブを 8 × 8 に並べ, 超音波溶着と同様にキューブ同士の相対位置を固定し, 水平方向の穴にファイバーを通すことができるか検証した.

### 7.5.1 キューブを並べるためのジグの準備

キューブを並べるためのジグについては, ピンの間隔が 10.38 mm のものと 10.40 mm のものを用意した. 完成したジグの写真を図 7.11 に示す. ジグは 10.38 mm または 10.40 mm 間隔に穴を開けたジュラルミン製の板に, 太さ 1.46 mm のステンレス製位置決めピンを立てている. ピンの太さの決定については後述する. 穴の間隔が狭いとキューブを並べられない可能性が高くなることから, 穴の間隔に対する公差は (0/ + 0.02) mm とした. 使用した位置決めピンの太さに対する公差は (0/ - 0.02) mm であ

り、これと比較すると穴の間隔の精度は同程度であるので、これ以上の精度を求めるためには位置決めピンもさらに精度の良いものを使用する必要がある。しかし今回の目的では、この精度で 10.38 mm と 10.40 mm を統計的に区別できることから、精度に関しては妥当であると考えた。

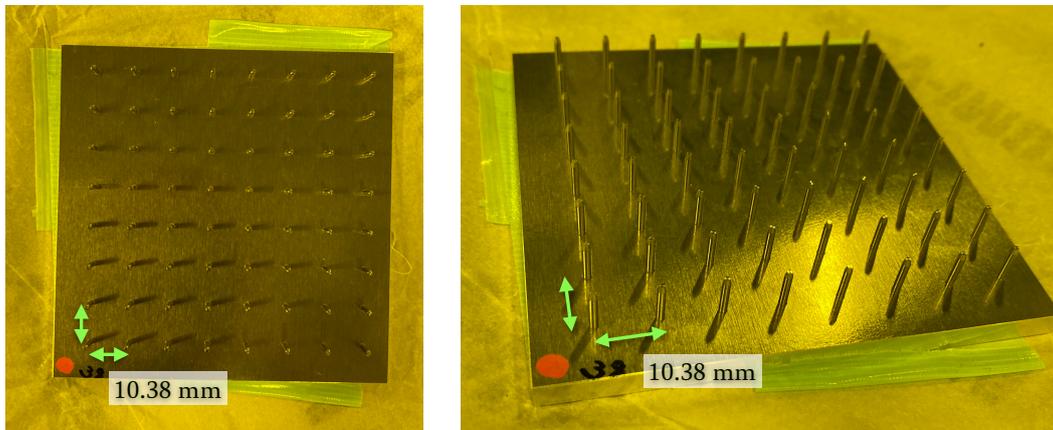


図 7.11 キューブを 8×8 に整列させるジグ。この写真はどちらも穴の間隔 10.38 mm のものである。

位置決めのためのピンの太さは、キューブの穴の直径よりもわずかに小さいものを選ぶ。その基準として、8×8個のキューブの穴にピンを通した状態で溶着し、溶着後はピンを抜く必要があることを考慮すると、ピンになるべく応力がかからない程度の太さにしなければならない。ピンの太さを決定するため、図 7.12 のように、0.01 mm おきに穴の直径が測定できるピンゲージ<sup>[61]</sup>を用いて、実際のキューブの穴の直径を測定した。



図 7.12 0.01 mm おきに穴の直径が測定できるピンゲージ（左）と、それを用いたキューブの穴の直径の測定（右）。

80個のキューブの3つの穴に 1.46, 1.47, 1.48 mm のピンゲージを通し、かかる応力を確認した。ただし 1.48 mm のピンゲージでは 10 個のキューブの検査をした段階で、6 割程度の穴に通すのにかなりの応力がかかったため、キューブの穴に対し太すぎると判断し、それ以降のキューブに対しては使用していない。1.46 mm と 1.47 mm のピンゲージはキューブの穴全てに通すことができた。1.47 mm では依然として応力がかかる穴が 1 割程度あったが 1.46 mm では応力がかかる穴はさらに少なくなった。1.46 mm では穴とピンゲージの間に隙間ができてしまうところは多くなってしまったが、ピンを立てた固定ジグ

から溶着後の8×8キューブをスムーズに取り出すために、ピンの太さは1.46 mmと決定した。

なお、キューブの穴は1.5 mmのドリルで開けているのでそれより小さな径にはならないはずだが、今回1.48 mmのピンゲージではきつすぎるという結果になった。これはキューブの穴のうち特に表面の部分が1.5 mmより小さくなっていることが原因であると考えられる。キューブの表面は発泡処理がされており、発泡した部分が柔らかく、ドリルの刃が発泡部分にうまく食い込まずに穴を開けることで、刃を抜いた後に穴の周囲の発泡部分が穴の縁にわずかにかぶさり、ドリルの径より穴の表面の部分が小さくなっていると考えた。実際にピンゲージを穴に通すとき、挿入し始めるときと貫通するときにも強い力が必要であった。

### 7.5.2 検査システムによるキューブの分類

16通りに分類する場合も64通りに分類する場合も、キューブの各面の穴の位置を調べ、最も平均からのズレが小さい面をシートに対して垂直に置き、残りの面の穴の位置にしたがって分類する必要がある。しかし、本検査システムは現状ではキューブを使用可能かどうかで分類し、異なる箱に落下させて回収することしかできない。このような回収の方法ではキューブのどの面が画像解析でのどの面に対応するかわからなくなってしまう。したがって穴の位置によって分類した並べ方を行うためには、解析結果をもとに、最も平均からのズレが小さい面が上に向くようにキューブを回転させたうえで、分類しなければならない。

このようなキューブの回転と分類の作業を短時間で間違えずに行うために、図7.13のようなUFACTORY社製の6軸ロボアーム xArm 6<sup>[62]</sup>を導入することを考えている。このロボアームは図7.13右のように6箇所 of 可動部分があり、複雑な動きを行うことができる。このロボアームを使用することにより、図7.14のようなキューブを回転し分類する機構を検査システムに追加することができる。ロボアームの先端に真空吸着機器を取り付け、検査後のキューブが落下する前にこのロボアームで吸着し、解析結果にしたがってキューブを回転させて向きを合わせ、分類ごとに仕切られたキューブ回収用のジグまで移動させる。このような機構を追加する場合、画像解析後のキューブを吸着するために、システム全体の回転を一度停止させなくてはならない。そのため、キューブひとつあたりの検査のための時間が3秒程度余計にかかる。これによりひとつあたりの検査時間は合計で8秒程度になってしまう。当初キューブひとつあたりの検査時間は5秒程度であることを要求していたが、その1.6倍程度の検査時間となってしまう。しかしこの場合でも200万個のキューブを検査・分類するのに5ヶ月程度で完了する。ロシア方式品質検査では1年9ヶ月程度かかったことを考えると、その4分の1程度の日数で検査を終えることができる。

8×8個のキューブセットにファイバーを通すことができるようなキューブの並べ方を実証するための試験を行う現段階ではロボアームの準備はできていないので、本システムで検査後のキューブを人の手で分類し、8×8に並べた。キューブを並べる際には、ピンの間隔が10.38 mmの整列用のジグを用いた。ピンの間隔が10.40 mmのジグも製作したが、後述する理由によって今回は使用しなかった。

また、前節で見たように、キューブを穴の位置で分類する際には16通りの分類では200万個のキューブを必ずしも組み上げることができるとは言えず、確実な組み上げのためには64通りの分類が必要になる。しかし、人の手でキューブを分類する都合上、多くのキューブの検査と分類を行うには時間がかか

り、分類やキューブの面を間違えるリスクが高まる。また16通りに分類する場合でも、99.98%の8×8個のキューブセットではファイバーを通すことができるという結果を得ているので、10個未満といった極端に少ない個数のキューブセットを作る場合にはかなりの高確率でファイバーを通すことができるはずである。したがって今回は16通りにキューブを分類し、8×8個のキューブセットを製作してキューブ同士の相対位置を固定したときに、水平方向の穴にファイバーが通ることを確認することにした。



図 7.13 UFACTORY 社製ロボアーム xArm 6. 左の写真ではアームの先端部分は物体を挟むための部品が取り付けられているが、今回の用途ではこの部品を取り外し、真空吸着用部品を取り付ける。右は xArm 6 を正面から見た図。図中 joint 1 から joint 6 がこのロボアームにおける可動部分。

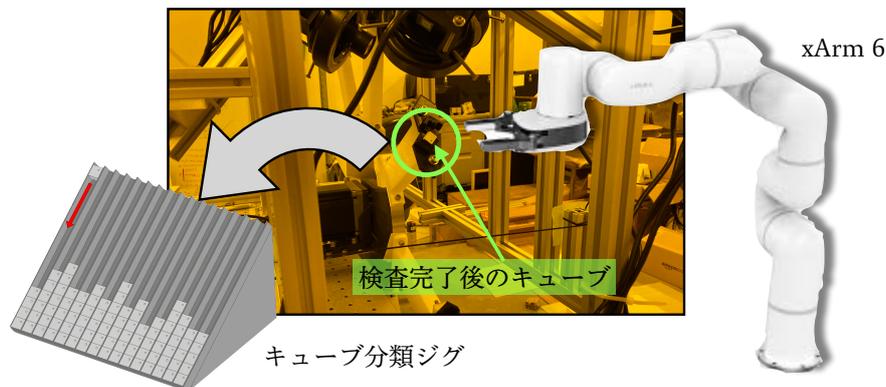


図 7.14 xArm 6 を用いたキューブ分類の流れ。現状の検査システムで検査されたキューブを落下する前に xArm 6 で吸着し、分類のためのジグまで運ぶ。

### 7.5.3 キューブの検査・分類と、整列の結果

#### キューブの検査・分類

キューブの分類は、図7.8右のように、水平方向の縦の穴、横の穴をそれぞれ4つの領域に分類することで、合計16通りの分類とする。本システムによるキューブの水平方向の穴の位置の測定値の2次元分布を図7.15に示す。左図の橙色の曲線のような楕円を考え、この楕円に含まれるキューブのみ選別するよう条件を与える。さらに楕円の内側の領域を右図のように4つの領域A、B、C、Dに分ける。このような操作を2つの水平方向の穴の2次元分布に対しそれぞれ行う。各キューブを2つの水平方向の穴についてそれぞれ分類し、それによって16通りに分類する。

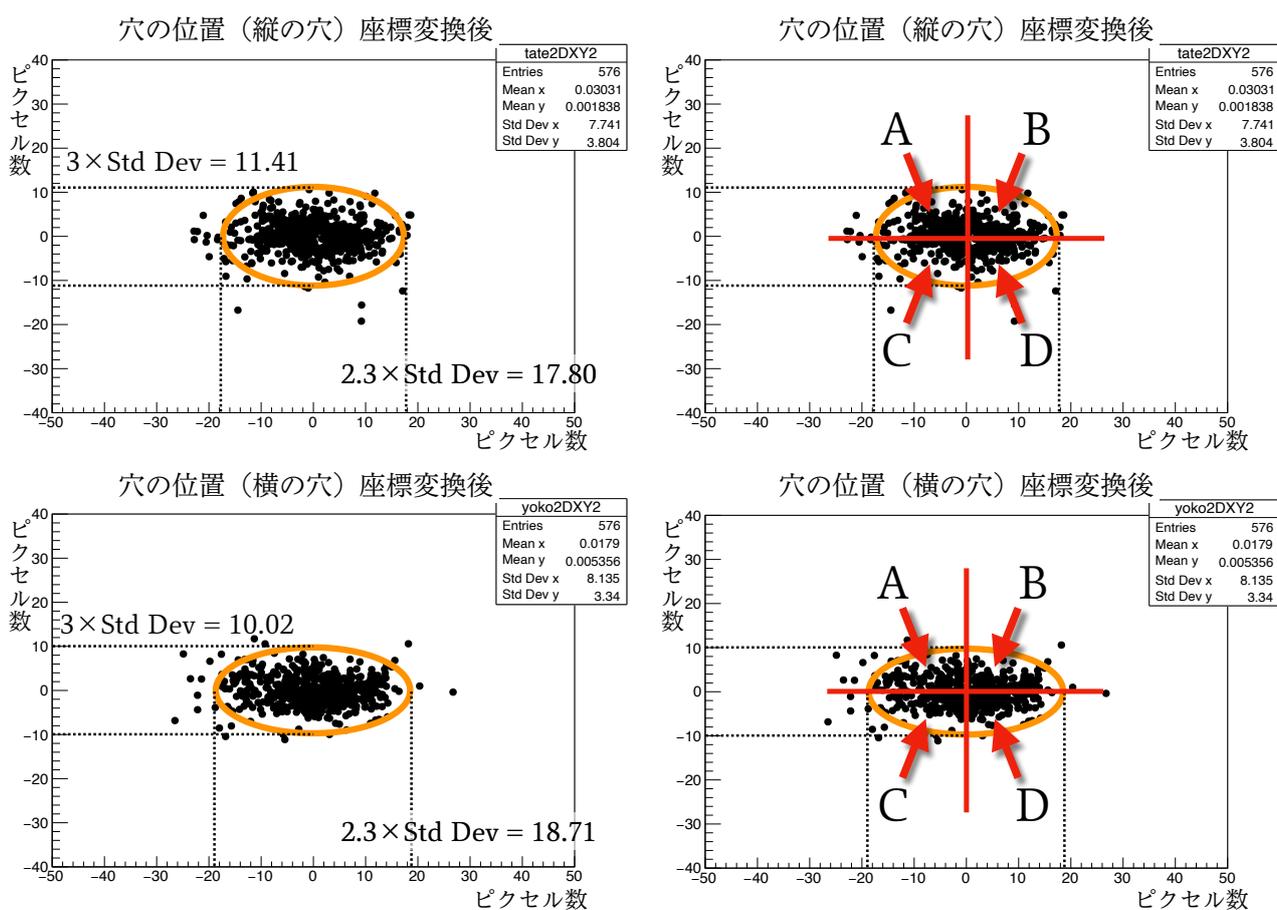


図 7.15 本システムで測定したキューブの水平方向の縦の穴、横の穴の位置分布を、座標変換により平均が原点に来るようにしたもの。上、下がそれぞれ縦、横の穴の分布である。左図の橙色の曲線ががキューブ選別のための楕円である。右図が縦の穴、横の穴それぞれの分布を4つの領域に分割したもの。A、B、C、Dが各領域の分類名である。

図7.16のように検査システムのそばに16通りに分類するためのトレイを用意し、各キューブの検査結果をディスプレイで確認して、それによって手でキューブの向きを合わせトレイに並べた。

今回、704個のキューブを検査し分類した。楕円の範囲内のキューブが627個、楕円の範囲外となったキューブが77個となった。楕円の範囲内のキューブの割合は89.1%であり、統計誤差の影響を考慮

しても 95 % には届かないという結果になった。キューブの製作時期の違いなどによって、はじめに参照した穴の位置の 2 次元分布が検査をすすめるにつれて実際と異なってきてしまう可能性がある。この場合、参照している 2 次元分布の平均値や、分布を 1 次関数でフィットした際の傾きが、本来と異なる値になってしまう。このような事態を防ぐため、検査を行いながら、参照する穴の位置の 2 次元分布を逐次アップデートする必要がある。

楕円の範囲内のキューブの各分類の内訳は表 7.4 のようになった。また実際に分類しトレイに並べた写真を図 7.17 に示す。

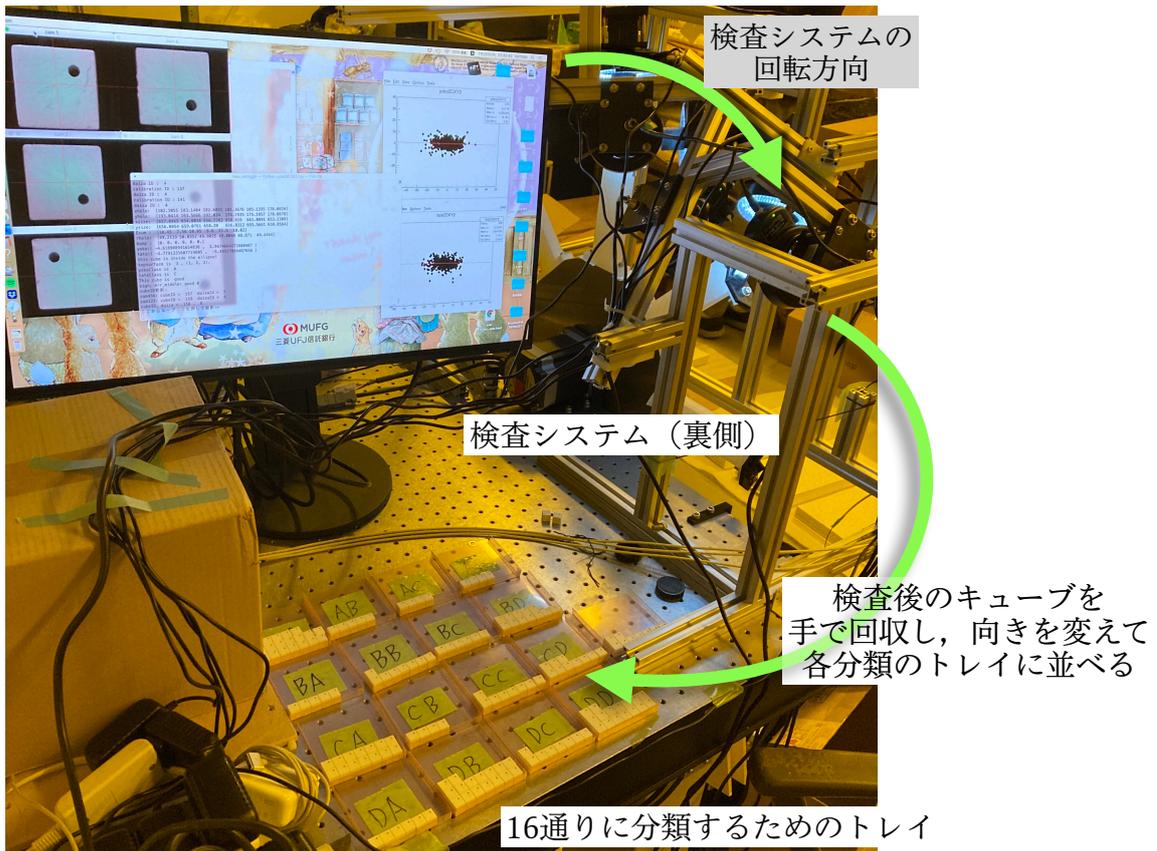


図 7.16 キューブ分類のためのセットアップ。

表 7.4 704 個のキューブのうち、楕円の範囲内のキューブ 627 個の分類の内訳。

	A	B	C	D
A	58	29	33	23
B	28	49	26	78
C	71	16	39	26
D	21	55	24	51

### キューブの整列

図 7.7 右下のように、16 通りに分類したキューブを 4 個ずつ使用し、図 7.11 のピンの間隔 10.38 mm の整列ジグ上に 8 × 8 に並べた。並べている様子の写真を図 7.18 に示す。図 7.17 の各分類からキューブ

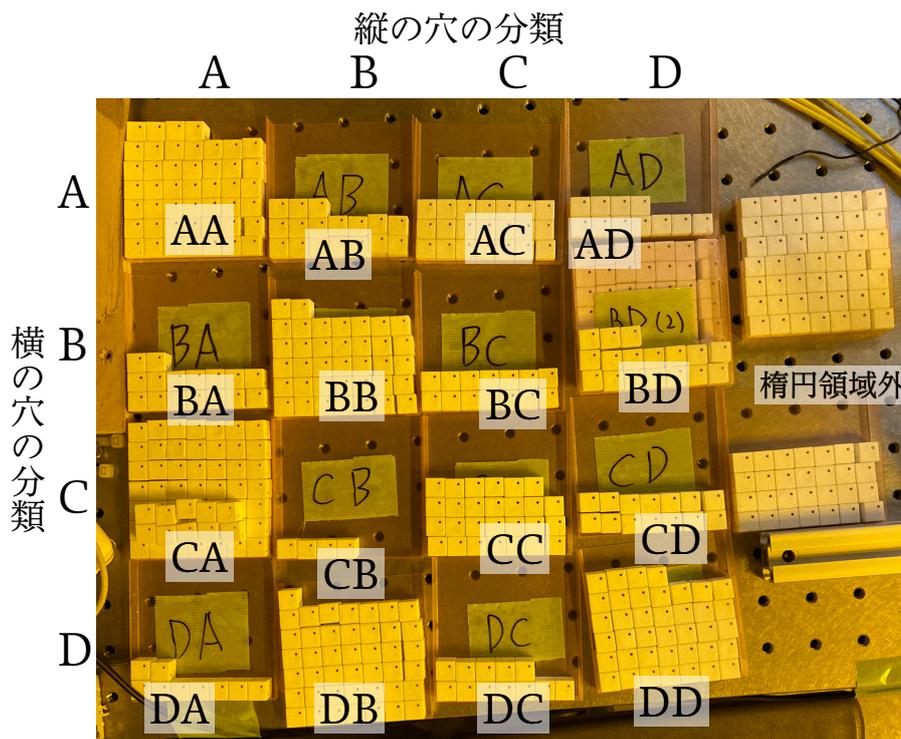


図 7.17 704 個のキューブを分類し、分類ごとにトレイに並べた様子。500 個程度のキューブを検査・分類し、 $8 \times 8$  個のキューブセットを 3 個製作したのち、200 個程度のキューブを検査・分類したので、この写真では各分類のキューブの個数はそれぞれ実際より 12 個少ない。

を 1 つずつとり、順番や向きを変えずに図 7.18 左のように  $4 \times 4$  に並べる。これを 4 回行うことでひとつの  $8 \times 8$  個のキューブセットが完成する。今回はキューブセットを 5 個製作した。そのうち、図 7.18 中にあるように、ジグのピンにキューブをはめる際にキューブ同士が干渉してしまい、並べることができないところが全部で 2 箇所あった。その場合には代わりに同じ分類で別のキューブを選ぶことで並べることが可能となった。この取り替えたキューブは別のキューブセットを作る際には隣と干渉せず使用可能であった。ピンの間隔 10.38 mm のジグを使用したときにこのような隣り合うキューブ同士が干渉してしまう箇所が多ければ、ピンの間隔 10.40 mm のジグを使用する予定であったが、このような箇所は全体で 2 箇所と少なかったことから、今回はピンの間隔 10.40 mm のジグは使用しなかった。

完成した  $8 \times 8$  個のキューブセットに対し、その水平方向の穴にファイバーを通すことができるかどうか、以下のような手順で確認を行った。各手順に対応する写真を図 7.19 に示す。

1. キューブセットの 4 つの辺に対し、平らな金属板を軽く押し当てることで一番外側のキューブの回転を防いだ。
2. 超音波溶着の代わりに、マスキングテープと養生テープで作った固定テープをキューブセットの上から貼ることで、キューブ同士の相対位置を固定する。マスキングテープを 8 本用意し、ずらしながら重ねることで、 $8 \times 8$  個のキューブセットを全て覆う太さにし、上から養生テープを貼って補強することで固定テープを製作した。

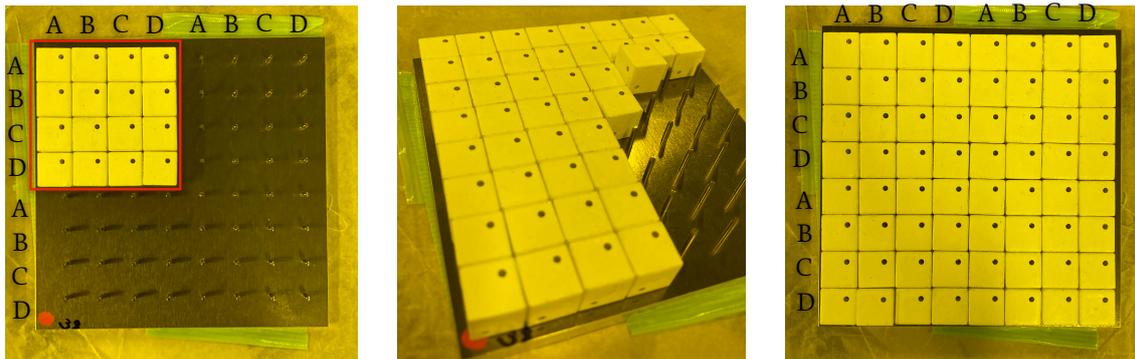


図 7.18 8×8ジグにキューブを配置している様子. 左では16個のキューブのみ配置してある. 中はキューブ同士が干渉してしまい1つのキューブにピンを通すことができず, 並べることができていない状態. この後このキューブは同じ分類の別のキューブと取り替えた. 右は8×8個のキューブセットが完成した様子.

3. 固定テープを上から手で満遍なく押さえることで, 全てのキューブが確実に固定テープによって固定されるようにした. その後固定テープの両端を折り返し, キューブの側面が見える状態にした.
4. 8×8個のキューブセットの2方向の水平方向の穴合計16箇所, に, 波長変換ファイバーを通すことができるか, また, ファイバーが通る場合どの程度の応力がかかるか確認した.

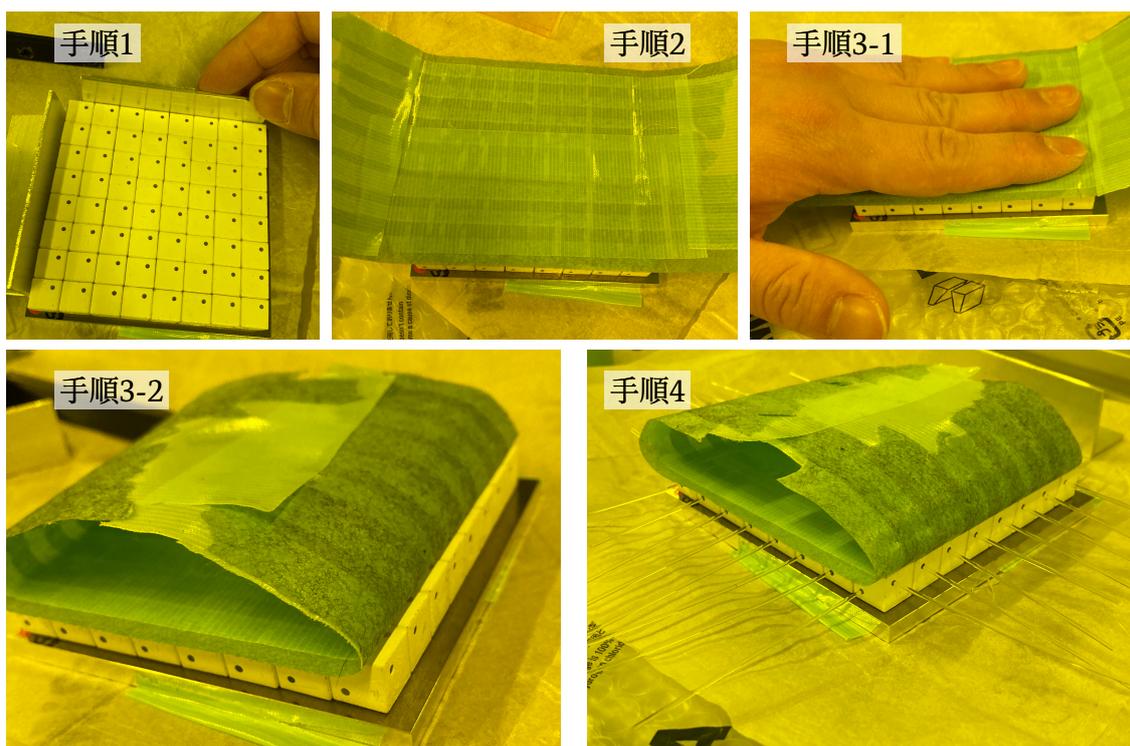


図 7.19 8×8個のキューブセットにファイバーを通すことができるかどうかの確認の手順。手順2の写真で現れる緑色のシート状のものが、マスキングテープと養生テープで作った固定テープ。手順4では水平方向の穴に波長変換ファイバーを通してている。この試験を行っている部屋は波長変換ファイバーとプラスチックシンチレータの保管庫として使われており、これらの保護の目的で特殊な照明を用いているので波長変換ファイバーは透明に見えている。

今回、このような手順で8×8個のキューブセットを5個製作しファイバーを通す試験を行った。これら5個のキューブセット全てについて16本全てのファイバーを通すことができた。そのうち4個についてはどのファイバーにもほとんど応力がかかっていなかった。残りの1個についても、16本のファイバーのうち1本にごくわずかに応力がかかるのみで、それ以外のファイバーは全てスムーズに通った。ファイバーが全てスムーズに通るキューブセットを通常の蛍光灯の下で撮影した写真を図7.20に示す。なお、今回全てのファイバーを通すことができ、7.2節で議論したキューブの回転の影響は有意には見られなかった。

また、楕円の範囲内のキューブを無作為に64個選び、向きを考えずに配置した8×8個のキューブセットについても5個作り、同様にファイバーを通す試験を行った。このように無作為に8×8にキューブを並べるときには、ジグのピンにキューブをはめる際に隣のキューブと干渉してしまう箇所が全体の1/4から1/3程度見られた。しかしほとんど全ての場合で、キューブの向きを変えて、別の穴を垂直方向の穴とすることで隣のキューブと干渉しなくなった。

このように組んだ5個のキューブセットのうち、3個では水平方向の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り、このような箇所は合計で6箇所であった。ま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。このような箇所は合計13箇所あった。キューブの分類を行った場合とキューブを無作為に選んで並べた場合について、8×8個のキューブセットにファイバーを通し

た結果を表 7.5 にまとめた。

なお全てのファイバーを通すことができたので、7.2 節で議論したキューブの回転による、水平方向の穴の位置のズレに対する影響は有意には見られなかった。

Super FGD を組み上げる際には  $8 \times 8$  個のキューブセットを約 3 万個用意する必要があるので、今回試験したキューブセットの個数 5 個では検出器の組み上げ可能性について議論するには統計が極端に少なすぎる。しかし、キューブの分類を行った場合には全てのキューブセットでファイバーを通すことができた。また、キューブの分類を行った場合とキューブを無作為に選んだ場合を比較するとファイバーが通らなかった箇所、ファイバーに応力がかかる箇所ともに、無作為の場合よりも分類を行った場合の方が統計的に有意に数が少ない。したがって分類を行うことでキューブを組み上げることができる確率は大きくなる可以说。

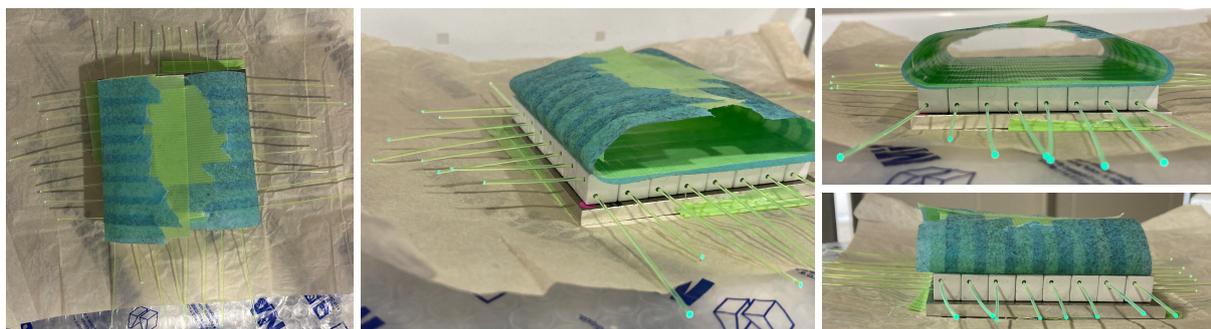


図 7.20 ファイバーを通した  $8 \times 8$  個のキューブセットの写真。左は真上から、中は斜め方向から、右上は手前側から、右下は向かって右側からそれぞれ撮影したものである。通常の蛍光灯の下で撮影しているので波長変換ファイバーが緑色に見える。

表 7.5 キューブの分類を行った場合とキューブを無作為に選んだ場合それぞれで  $8 \times 8$  個のキューブセットを製作した結果。

	番号	ファイバーが通らない箇所	ファイバーに 応力がかかる箇所
分類を行った場合	1	0	0
	2	0	0
	3	0	1
	4	0	0
	5	0	0
無作為の場合	1	0	3
	2	3	3
	3	1	4
	4	0	2
	5	2	1
合計		0 (分類あり) 6 (無作為)	1 (分類あり) 13 (無作為)

## 第8章 結論

ニュートリノ振動解析におけるニュートリノ・原子核反応の不定性由来の系統誤差の削減のために、T2Kの前置検出器に新たな検出器 Super FGD を導入する。Super FGD は約 200 万個のシンチレータキューブを 3 次元方向に積層したニュートリノ検出器であり、シンチレータキューブ内部を通過した荷電粒子によるシンチレーション光を、各シンチレータキューブに 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その先端に取り付けられた光検出器 MPPC で読み出す。

Super FGD を組み上げる際、シンチレータキューブの形状の個体差を予め検査し使用可能なものとそうでないものを選別する必要がある。本研究では個々のシンチレータキューブの 6 面全てを撮影し、画像解析を用いてその形状について 5 秒程度の短時間で検査、選別する自動システムを開発した。シンチレータキューブの大きさとファイバーを通す穴の位置を  $10\ \mu\text{m}$  程度の精度で抽出する独自の画像解析アルゴリズムを開発し、ロシアで行われている人の手でのシンチレータキューブ品質検査の結果を再現することを試運転で確認した。

また、シンチレータキューブをシートに超音波溶着により固定する方法で Super FGD の組み上げを行う場合には、シンチレータキューブをシートに固定してしまうので、予め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、各シンチレータキューブの水平方向の穴の位置の平均からのズレを測定し、平均からのズレの傾向によってシンチレータキューブを分類することで穴の位置が揃いファイバーが通るようになることをトイモンテカルロシミュレーションで確認した。水平方向の穴の位置によりシンチレータキューブを 16 通りに分類したときには、組み上げの際の基本単位である  $8 \times 8$  シンチレータキューブセットの 99.98 % でファイバーを通すことができ、64 通りに分類したときは 100 % のセットでファイバーを通すことができるという結果となった。これにより、Super FGD を組み上げる際にも全ての穴にファイバーを通すことができることが期待される。更に、実際のシンチレータキューブを本システムで検査し、水平方向の穴の位置の平均からのズレで 16 通りに分類し、その分類に従って  $8 \times 8$  に並べた。このような  $8 \times 8$  シンチレータキューブセットを 5 個製作したうちの 5 個全てで、16 本全てのファイバーを通すことができた。また分類に従って並べたときと分類をせず無作為に並べたときを比較すると、分類したときのほうが統計的に有意にファイバーが通りやすくなることを確認した。今回はシンチレータキューブの 16 通りの分類は人の手で行ったが、6 軸ロボアームを用いて自動化することでより確実かつスムーズに分類を行うことができるようになると期待される。

## 謝辞

修士課程の2年間にわたり本研究を進めるにあたって、多くの方々からお力添えを頂きました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

中家剛教授にはこのようなテーマでの研究を行う機会をいただきました。また時には研究についてのみならず、私の将来についての相談にも乗っていただきました。木河達也助教は、本検査システム開発のあらゆる点について指導して下さい、相談に乗って下さいました。さらに、ニュートリノの物理や検出器について何も理解していなかった私に根気強く教えて下さったことや修士論文をはじめとした多くの書類の添削をして頂いたことなど、何から何まで本当にお世話になりました。最後にはシンチレータキューブの検査・分類を夜中まで手伝って下さり、居室で修論を書く私の代わりに8×8セットの製作まで行ってくださいました。市川温子准教授には、私が研究についてどうしたらよいかわからず困っているときにいつも、問題の核心に迫るあまりにも的確なアドバイスを頂きました。東北大学へのご栄転、おめでとうございます。KEKの小川智久研究員は、本研究において最も重要な点のひとつである画像解析について、またトイモンテカルロシミュレーションについて、ソフトウェアのことを何も知らなかった私に教えて下さいました。また本検査システムを組み上げた際には京都まで足を運んでいただき、検査システムの最後の調整の際に助けていただきました。松原綱之助教は超音波溶着での組み上げの概念について教えて下さり、キューブの並べ方を最適化する際には親身に相談に乗って下さいました。また、そもそも1万個程度の大量のキューブをロシアから調達し、京都へ送ってくださったおかげで、このような研究をすすめることができました。

京都 T2K グループの先輩である栗林宗一郎さん、小田川高大さん、田島正規さんにはご自身の経験を元に、ソフトウェアやハードウェアに限らず、事務手続きの仕方に至るまで様々なアドバイスを頂いただけでなく、日常的な会話にも大いに付き合ってくださいました。芦田さん、平本さん、安留さんの真摯に研究に取り組む姿勢には尊敬の念を抱いております。修士論文や学振書類の執筆にあたり、先輩方の書類を参考にさせていただきました。T2K 実験の皆様、NINJA 実験の皆様、特に ND280 アップグレードグループの皆様、岩本さん、栗田口さん、Mahesh さん、在原くん、江口くん、鞠谷くん、皆様には研究についてアドバイスを頂いたこともありますし、何より皆様のおかげで東海村で楽しく過ごすことができました。またベトナムに行かせていただいた際には Son さんをはじめ多くの方のお世話になりました。私にとってベトナムは初めての海外であり、貴重な経験となりました。

株式会社東京技研の皆様には、本検査システムの構想の段階でご相談に乗っていただきました。大規模な検査システムを製作していただく計画は保留となってしまいましたが、皆様にご提案頂いたアイデアにヒントを得て本検査システムの開発を行うことができました。スズノ技研株式会社の皆様には、本検査システムのための多くの部品の製作をしていただいただけでなく、設計の段階でも様々なアドバイスを頂きました。京都大学の中村和広さんには、Arduino やサーボモーターについて、また 3D プリン

タの使い方について教えていただきました。さらにステッピングモーターのドライバの取扱説明書の解読の際にも非常にお世話になりました。秘書の皆様，事務室の皆様には物品購入や出張手続きをはじめとした様々な事務手続きの際に大変お世話になりました。佐々木さんは伝票処理のお願いのメールに対していつもすぐ返信してくださいました。

高エネルギー物理学研究室の皆様には研究室ミーティングや普段の研究生活において大いにお世話になりました。また私が検査システムの進捗報告をすると，いつも興味を持って聞いてくださいました。安留さんはファイルとオロナミンCを差し入れしてくださいました。中田くん（マイク）は修論執筆中に夏限定のジュースをおごってくれました。同期の大塚くん，小林くん，末野くん，菅島くん，辻川くん，フーくん，ヨハン，素敵な仲間がたくさんでき本当によかったです。

最後に，いつも悲観的な私を根気強く応援し続けてくれる家族に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] W. Pauli, “Dear radioactive ladies and gentlemen”, *Phys. Today* 31N9, 27 (1978).
- [2] F. Reines, C. L. Cowan, Jr., F. B. Harrison, A. D. McGuire, and H. W. Kruse, “Detection of the Free Antineutrino”, *Phys. Rev.* 117, 159 (1960).
- [3] G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, and J. Steinberger, “Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos”, *Phys. Rev. Lett.* 9, 36 (1962).
- [4] K. Kodama *et al.* (DONUT Collaboration), “Observation of tau neutrino interactions”, *Phys. Lett. B* 504, 218 (2001).
- [5] B. Pontecorvo, “Inverse beta process and nonconservation of lepton charge”, *Sov. Phys. JETP*, 7, 172–173 (1958).
- [6] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, “Remarks on the Unified Model of Elementary Particles”, *Prog. Theor. Phys.*, 28, 870 (1962).
- [7] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), “Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos.” *Phys. Rev. Lett.* 81.8 (1998).
- [8] S. N. Ahmed *et al.* (The SNO Collaboration), “Measurement of the Total Active 8B Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity”, *Phys. Rev. Lett.* 92, 181301 (2004).
- [9] T. Araki *et al.* (KamLAND Collaboration), “Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion”, *Phys. Rev. Lett.* 94, 081801 (2005)
- [10] M. G. Aartsen *et al.* (IceCube Collaboration), “Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillations at 6–56 GeV with IceCube DeepCore”, *Phys. Rev. Lett.* 120, 071801 (2018).
- [11] K. Abe, R. Akutsu *et al.* (The T2K Collaboration), “Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations”, *Nature* 580, 339–344 (2020).
- [12] Esteban, I., Gonzalez-Garcia, M., Maltoni *et al.*, “The fate of hints: updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations”, *J. High Energ. Phys.* 2020, 178 (2020).

- [13] ZZ. Xing, ZH. Zhao, “A review of  $\mu$ - $\tau$  flavor symmetry in neutrino physics”, Rep Prog Phys., 79(7):076201 (2016).
- [14] Glennys R. Farrar and M. E. Shaposhnikov, “Baryon asymmetry of the Universe in the standard model”, Phys. Rev. D 50, 774 (1994).
- [15] M.Fukugita and T.Yanagida, “Baryogenesis without grand unification”, Phys.Lett. B174 (1986).
- [16] X. Qian, P.Vogel, “Neutrino mass hierarchy”, Progress in Particle and Nuclear Physics, 83, 1-30 (2015).
- [17] K.Abe *et al.*, “The T2K Experiment”, arXiv:1106.1238 [physics.ins-det].
- [18] About T2K [<https://t2k-experiment.org/ja/t2k/>].
- [19] J-PARC 加速器施設 [<http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>].
- [20] C.Giganti, “Latest results from T2K and T2K Phase II”, arXiv:1803.11513 [hep-ex].
- [21] K. Abe *et al.*, “Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector”, arXiv:1111.3119 [physics.ins-det].
- [22] 青木茂樹, 中家剛, 塚本敏文, “T2K 実験 前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis”, 高エネルギーニュース, Vol29 (2010).
- [23] F. Vannucci, “The NOMAD Experiment at CERN”, Advances in High Energy Physics, 129694, 20 (2014).
- [24] M. Jiang *et al.* (The Super-Kamiokande Collaboration), “Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis With Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV”, Prog. Theor. Exp. Phys., 053F01 (2019).
- [25] スーパーカミオカンデ イベントディスプレイ  
[<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/eventdisplay.html>]
- [26] スーパーカミオカンデ 新生スーパーカミオカンデがスタート, ガドリニウムを加え, 新たに観測開始  
[<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/news/2020/08/sk-gd.html>]
- [27] M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) and 2019 update.
- [28] K. Abe *et al.*, “T2K ND280 Upgrade – Technical Design Report”, arXiv:1901.03750 [physics.ins-det].

- [29] G. Charpak, J. Derré, Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard, “Micromegas, a multipurpose gaseous detector”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 478, 1-2, 26-36 (2002).
- [30] kuraray Plastic Scintillating Fibers (Materials and Structures)  
[<http://kuraraypsf.jp/psf/>]
- [31] kuraray Plastic Scintillating Fibers  
[[https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf)]
- [32] 浜松ホトニクス MPPC とは  
[[https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what\\_is\\_mppc/index.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc/index.html)]
- [33] 浜松ホトニクス 技術資料 MPPC  
[[https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc\\_kapd9008j.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9008j.pdf)]
- [34] 浜松ホトニクス S13360-1325PE  
[<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/S13360-1325PE/index.html>]
- [35] Salleh AHMAD, CITIROC ASIC, TIPP 2014  
[[https://indico.cern.ch/event/192695/contributions/353181/attachments/277133/387721/Citiroc\\_ASIC.pdf](https://indico.cern.ch/event/192695/contributions/353181/attachments/277133/387721/Citiroc_ASIC.pdf)]
- [36] UNIPLAST  
[<http://uniplast-vladimir.com/>]
- [37] 株式会社カイジョー 超音波溶着の原理（メカニズム）  
[<https://www.kaijo.co.jp/odm/ultrasonic-welding-lab/about.html>]
- [38] ファインケミカルジャパン株式会社 NEW TEF コート  
[[https://www.fcj.co.jp/documents/catalog/catalog\\_fc102.pdf](https://www.fcj.co.jp/documents/catalog/catalog_fc102.pdf)]
- [39] ELP-USB8MP02G-SFV(5-50mm)  
[<http://www.webcamerausb.com/elp-8mp-3264x2448-sony-imx179-cctv-usb-camera-550mm-varifocal-cs-lens-hd-usb-industrial-box-inside-surveillance-usb-camera-webcam-p-240.html>]
- [40] Tokina リアコンバーター  
[<https://tokina.co.jp/fa/accessories/cat103/rear-converter.html>]
- [41] オリエンタルモーター株式会社 AZM911AC+AZD-AD  
[<https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=AZM911AC%2BAZD-AD>]

- [42] オリエンタルモーター株式会社 ステッピングモーターの基礎  
[[https://www.orientalmotor.co.jp/tech/webseminar/st\\_kiso/](https://www.orientalmotor.co.jp/tech/webseminar/st_kiso/)]
- [43] オリエンタルモーター株式会社 サポートソフト MEXE02  
[<https://www.orientalmotor.co.jp/download/software/mexe02/>]
- [44] 秋月電子通商 Tower Pro SG90 [<https://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-08761/>]
- [45] Tower Pro SG90 データシート [[https://akizukidenshi.com/download/ds/towerpro/SG90\\_a.pdf](https://akizukidenshi.com/download/ds/towerpro/SG90_a.pdf)]
- [46] MONOist Arduino で学ぶ基礎からのマイコンモーター制御  
[<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/series/2914/>]
- [47] MONOist H8 で学ぶマイコン開発入門  
[<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/series/2053/>]
- [48] バイポーラトランジスタ回路の設計  
[<http://doku.bimyo.jp/bipoler/>]
- [49] 武蔵野電波 Arduino 日本語リファレンス  
[<http://www.musashinodenpa.com/arduino/ref/index.php>]
- [50] マルツオンライン Arduino Uno Rev3(アルディーノ) 【A000066】  
[<https://www.marutsu.co.jp/pc/i/604593/>]
- [51] マルツオンライン Marduino Uno R3(Arduino Uno の互換ボード) 【MABTB-UNO-R3】  
[<https://www.marutsu.co.jp/pc/i/605620/>]
- [52] OpenCV  
[<https://opencv.org/>]
- [53] John F. Canny, “A Computational Approach To Edge Detection”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI8(6):679-698 (1986).
- [54] Satoshi Suzuki, Keiichi Abe, “Topological structural analysis of digitized binary images by border following”, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 30, 1, 32-46 (1985).
- [55] OpenCV-Python Tutorials OpenCV における輪郭 (領域)  
[[http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_contours/py\\_table\\_of\\_contents\\_contours/py\\_table\\_of\\_contents\\_contours.html](http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_contours/py_table_of_contents_contours/py_table_of_contents_contours.html)]

[56] OpenCV-Python Tutorials ハフ変換による直線検出

[[http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_houghlines/py\\_houghlines.html](http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_houghlines/py_houghlines.html)]

[57] OpenCV-Python Tutorials ハフ変換による円検出

[[http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_houghcircles/py\\_houghcircles.html](http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_houghcircles/py_houghcircles.html)]

[58] Paul V C Hough, “Method and means for recognizing complex patterns”, U.S.Patent, 3069654 (1962).

[59] Duda, Richard O. and Hart, Peter E., “Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures”, Association for Computing Machinery, 15, 1, 0001-0782 (1972).

[60] HK Yuen, J. Princen, J. Illingworth, J. Kittler, “Comparative study of Hough Transform methods for circle finding”, Image and Vision Computing, 8,1, 71-77 (1990)

[61] 新潟精機株式会社 鋼ピンゲージセット AA-1A

[[https://www.niigataseiki.co.jp/product/pin\\_line\\_aa.html](https://www.niigataseiki.co.jp/product/pin_line_aa.html)]

[62] UFACTORY xArm

[<https://www.ufactory.cc/pages/xarm>]

## 付録A モーターの動作原理

### A.1 5相ステッピングモーターの動作原理

5相ステッピングモーターの構造を図A.1に示す。中央の永久磁石に対応するのがローター、周囲の電磁石に対応するのがステーターである。

ローターの内部には永久磁石があり、ローター1とローター2はそれぞれN極、S極に磁化している。またローターの周囲は歯車のような形状をしており、歯は50個ずつあり、その間隔は $7.2^\circ$ である。ローター1とローター2は互いに歯を半ピッチずらした状態で固定されており、正面（図中シャフト側）から見るとローター1のN極の歯とローター2のS極の歯が交互に $3.6^\circ$ 間隔で合計100個備わったものと考えることができる。

ステーターは10極の磁極を持ち、向かい合う磁極は互いに同じ磁極になるよう導線が巻かれている。ステーターの各極はローターと同様に歯車のような歯の形状をしており、歯は各極に $7.2^\circ$ 間隔で4つずつ並んでいる。

5相ステッピングモーターの動作原理を図A.2に示す。ステーターのうち、ある向かい合う一対の磁極に電流を流しS極に磁化すると、ローター1のN極の歯がステーターの歯に引き寄せられる。このとき、ステーターの隣の磁極の歯とローター2のS極の歯は $0.72^\circ$ ずれるように配置されている。この状態からステーターの隣の磁極対の歯をN極に磁化すると、ローター2のS極の歯がステーターに引き寄せられるので、ローターは $0.72^\circ$ だけ回転することになる。この操作を繰り返すことによって、 $0.72^\circ$ ずつ回転を制御することができる。この操作のたびに回転する角度を基本ステップ角という。

ステーターにおいて電流を流す磁極を隣り合う磁極に変える際に、一度に完全に変更してしまうとこの変更のたびに、特に低速で運転する場合ローターは各停止位置ですぐ止まることができずその周辺で減衰振動を起こしてしまい、ぎこちない回転になってしまう。そこで隣り合う磁極に流す電流の割合を徐々に変えていくことにより、ローターは2つの磁極から受ける力が釣り合う位置が停止位置となるので、基本ステップ角より小さな角度での運転が可能となり、より滑らかな回転となる。

なお、今回使用した5相ステッピングモーターは分解能が基本ステップ角 $0.72^\circ$ の半分の $0.36^\circ$ となっている。これは隣り合う磁極に等しい電流を流したときの回転角に相当する。

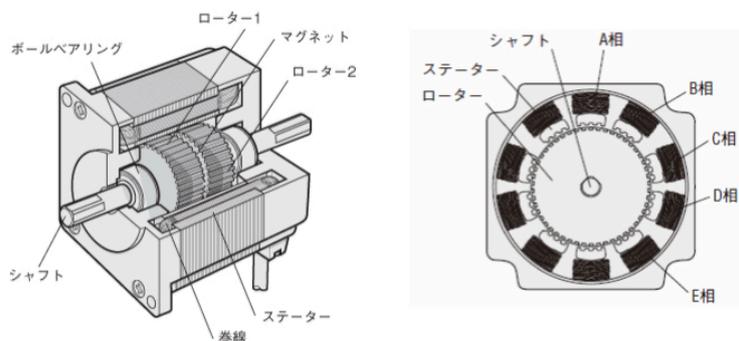


図 A.1 5相ステッピングモーターの構造 [42]。左図は回転軸に平行な面での断面図，右図は回転軸に垂直な面での断面図。図中A相，B相，C相，D相，E相はステーターの磁極を表し，向かい合う磁極と対をなす。

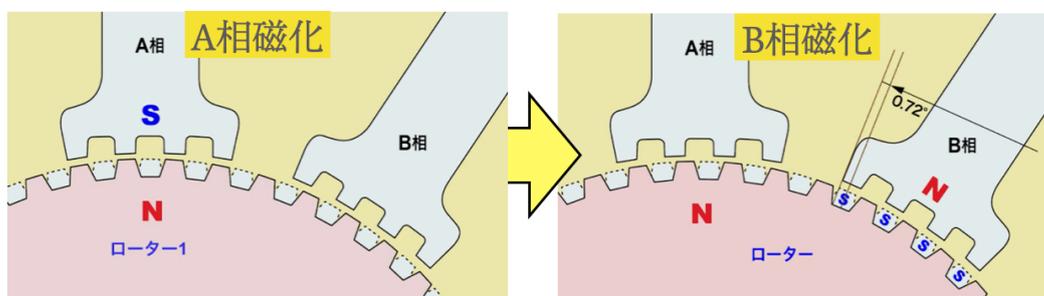


図 A.2 5相ステッピングモーターの動作原理 [42]。ステーターの磁極A相がS極に磁化されているとき，ローター1のN極の歯と引き寄せ合う（左）。次に，隣り合う磁極B相をN極に磁化すると，ローター2のS極の歯と引き寄せ合い，ローターは $0.72^\circ$ だけ回転する。