

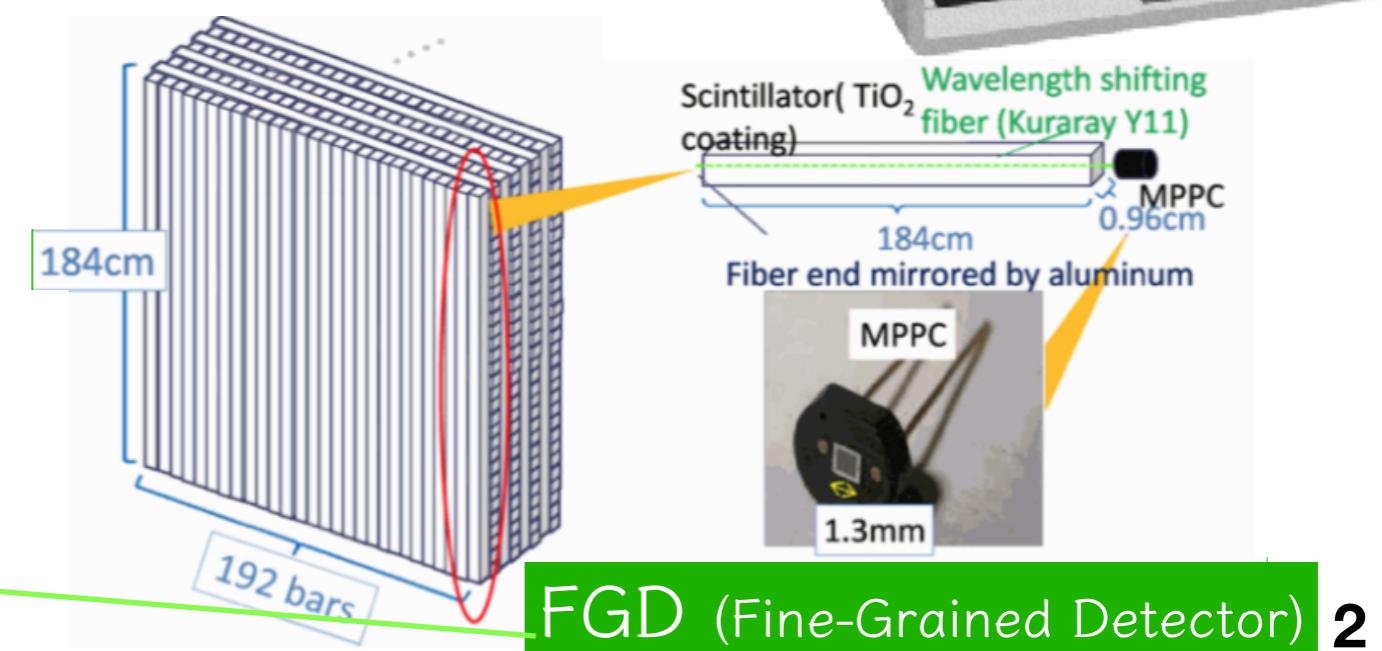
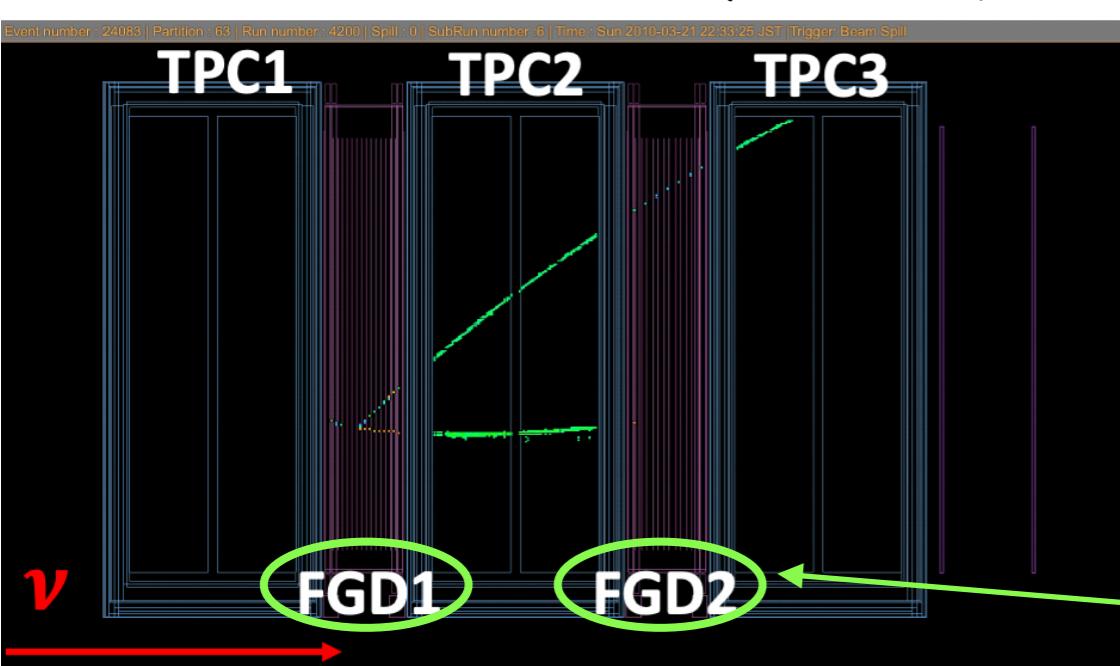
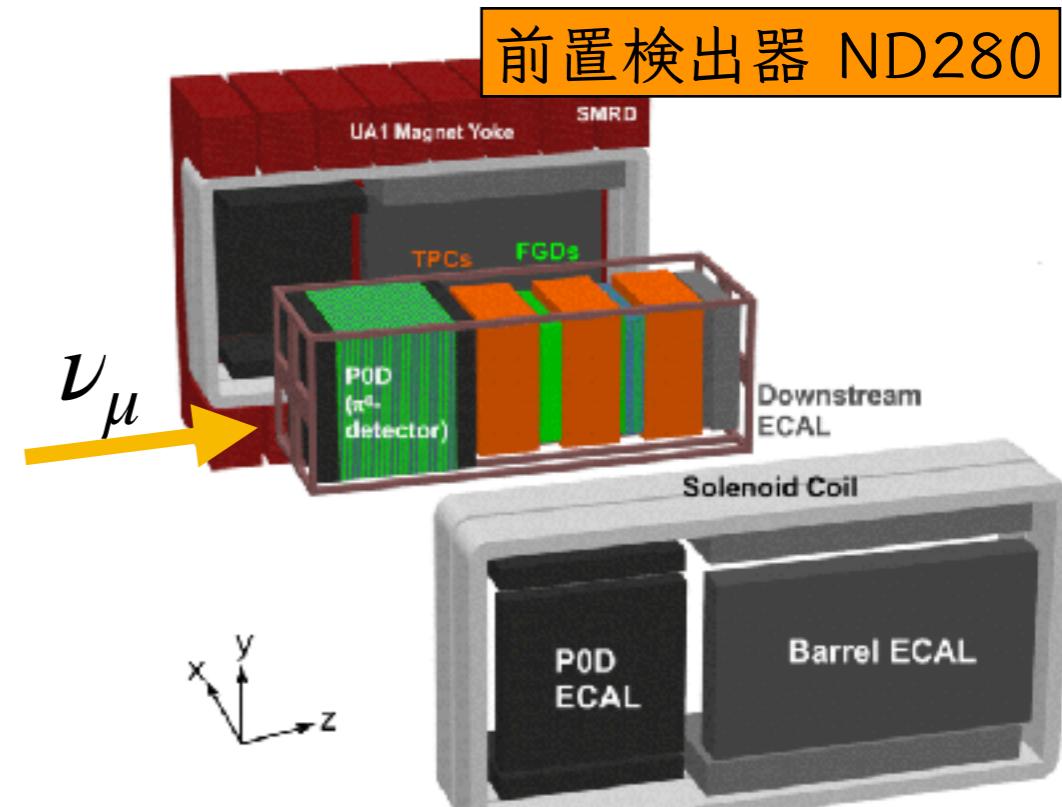
T2K 前置検出器アップグレード用
シンチレータキューブの画像認識による
自動検査システム開発

京大理, 東大理^A, 首都大理^B, KEK素核研^C, 総研大^D
谷真央, 栗林宗一郎, 木河達也, 市川温子, 中家剛, 江口碧^A, 鞠谷温士^A,
岩本康之介^A, 横山将志^A, 在原拓司^B, 栗田口唯人^B, 角野秀一^B, 小川智久^C,
松原綱之^C, 中平武^C, 藤井芳昭^C, 小林隆^C, Jakkapu Mahesh^D,
他T2K Collaboration

T2K 実験概要

- T2K: 長基線ニュートリノ振動実験

- J-PARC で生成した大強度ニュートリノビームを、前置検出器・後置検出器（スーパーカミオカンデ）で測定
- ニュートリノ振動におけるCP対称性の破れの証拠をとらえる
- 系統誤差の主要因：ニュートリノの反応断面積の不定性が大きい
 - → 前置検出器 ND280 等によってニュートリノ反応の正確な理解を目指す

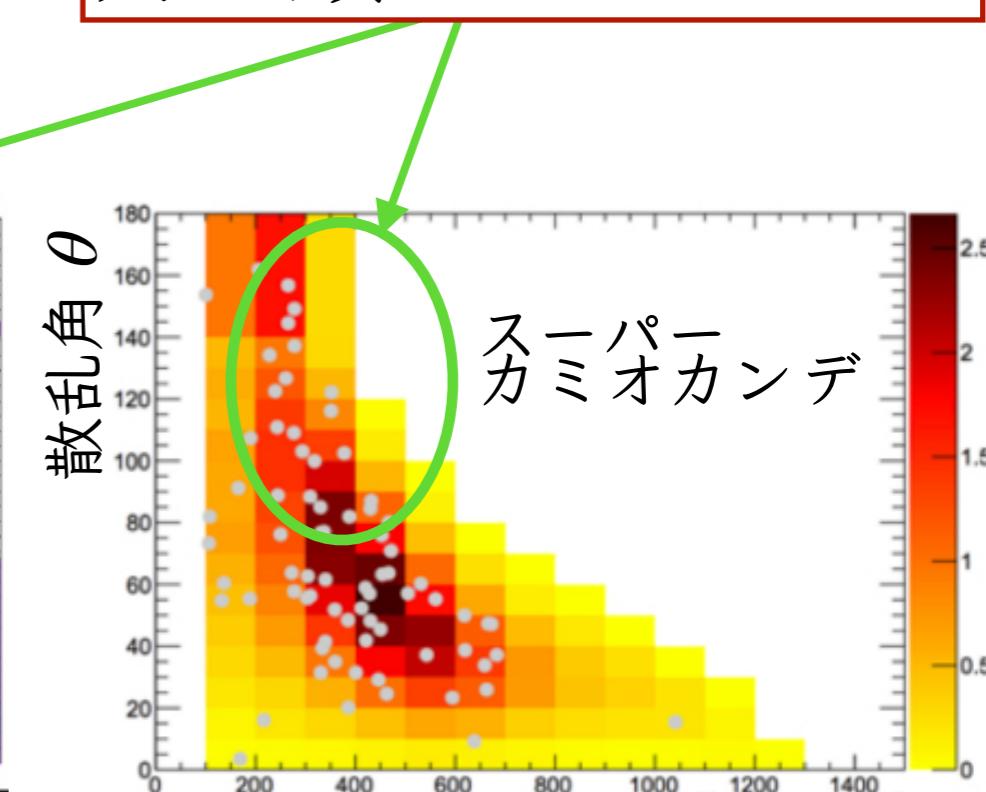
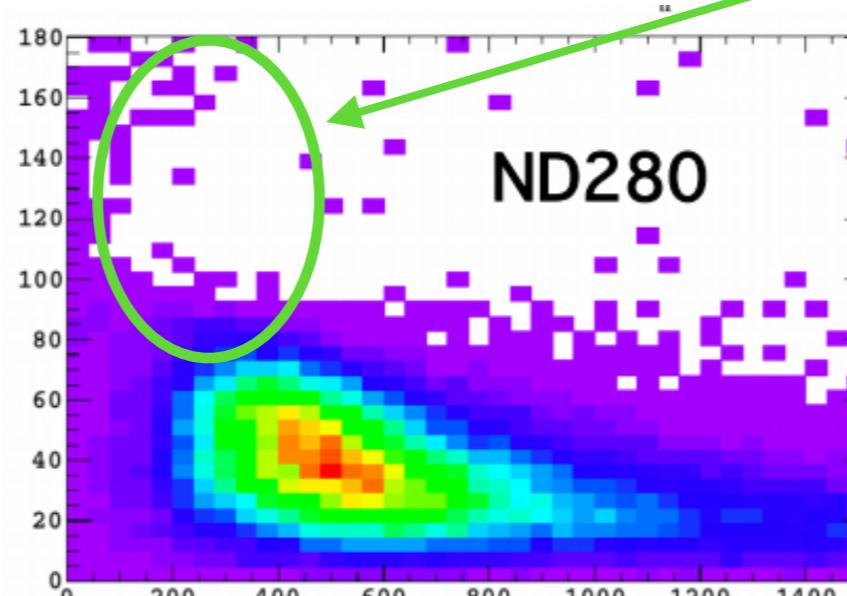
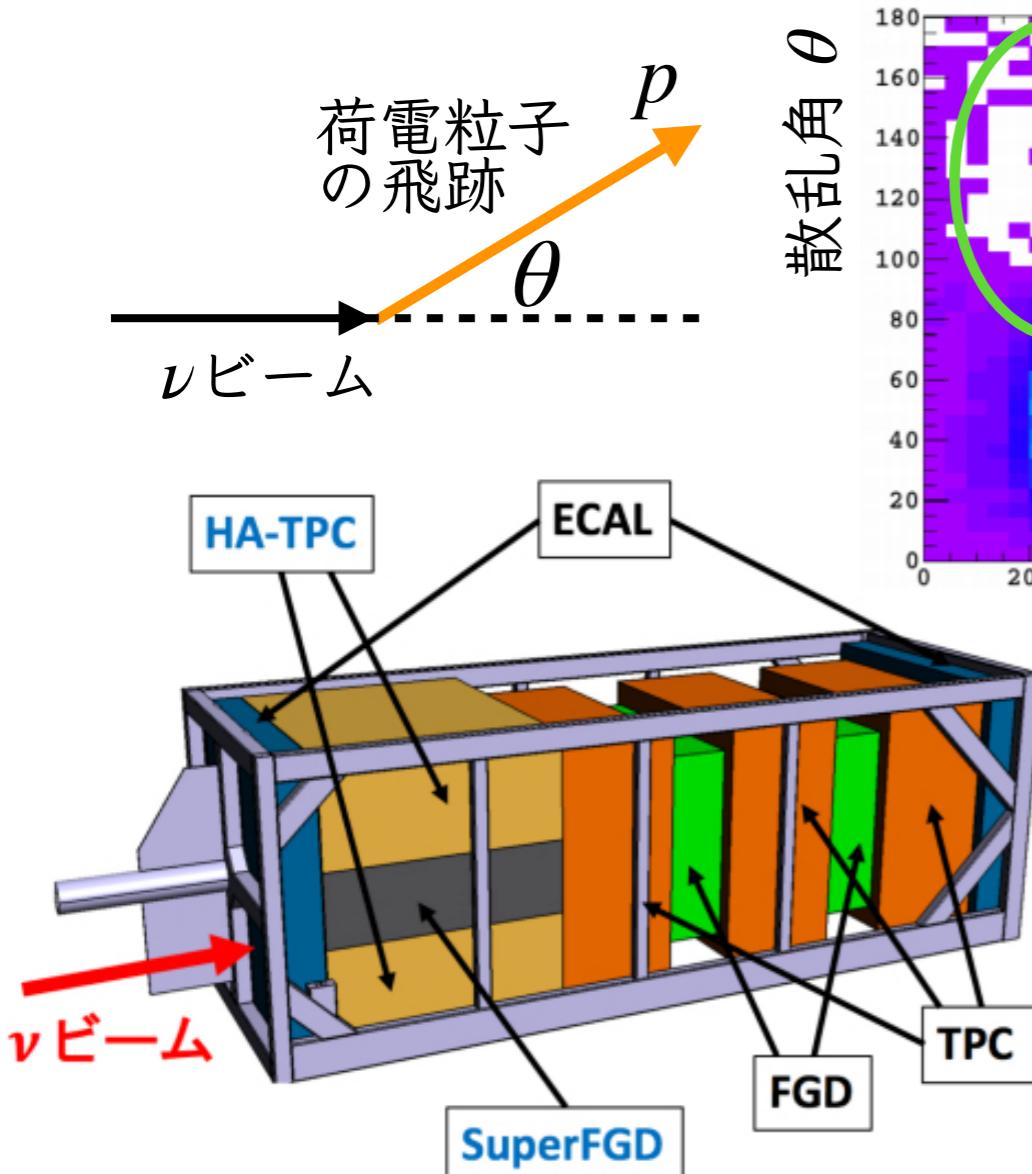


前置検出器 ND280 upgrade

現在のND280 における問題点：

- 大角度散乱に対する検出効率が低い
(スーパー・カミオカンデでは 4π に対し acceptance をもつ)
- 低運動量の荷電粒子の飛跡検出が難しい

低運動量・大角度散乱の
粒子に対する振る舞いが
大きく異なる



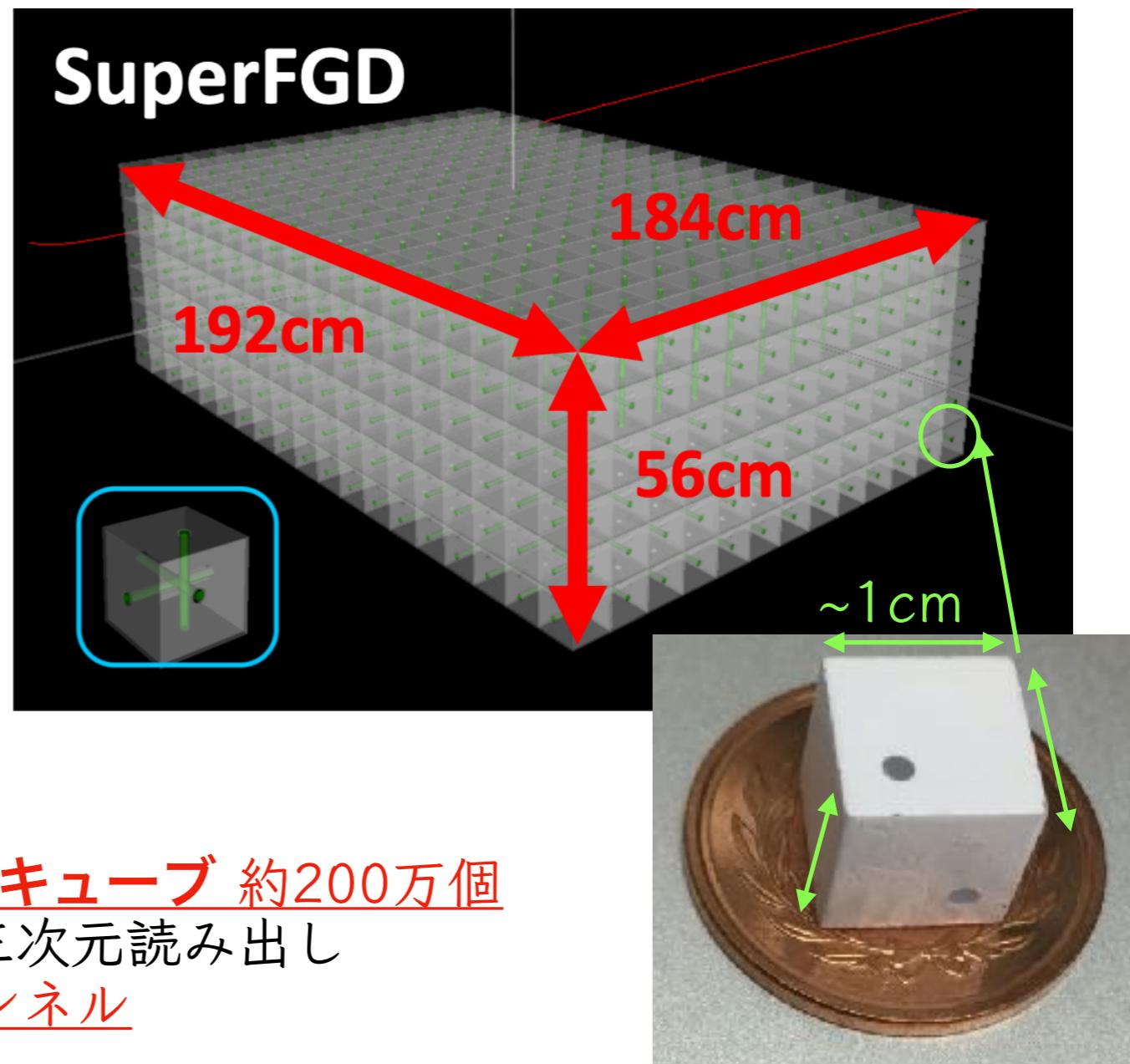
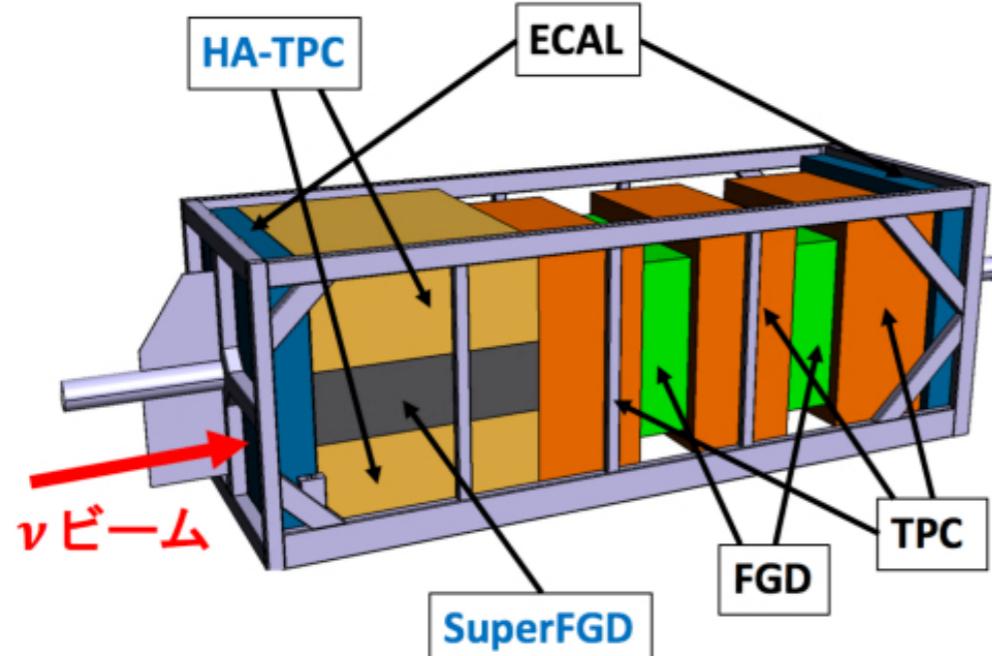
横軸：荷電粒子の運動量 p [MeV/c] (共通)

ND280 upgrade

既存の検出器 FGD、TPC の上流側に新たな検出器
High-angle TPC と **SuperFGD** をインストールする計画

Super-FGD

Super Fine-Grained Detector

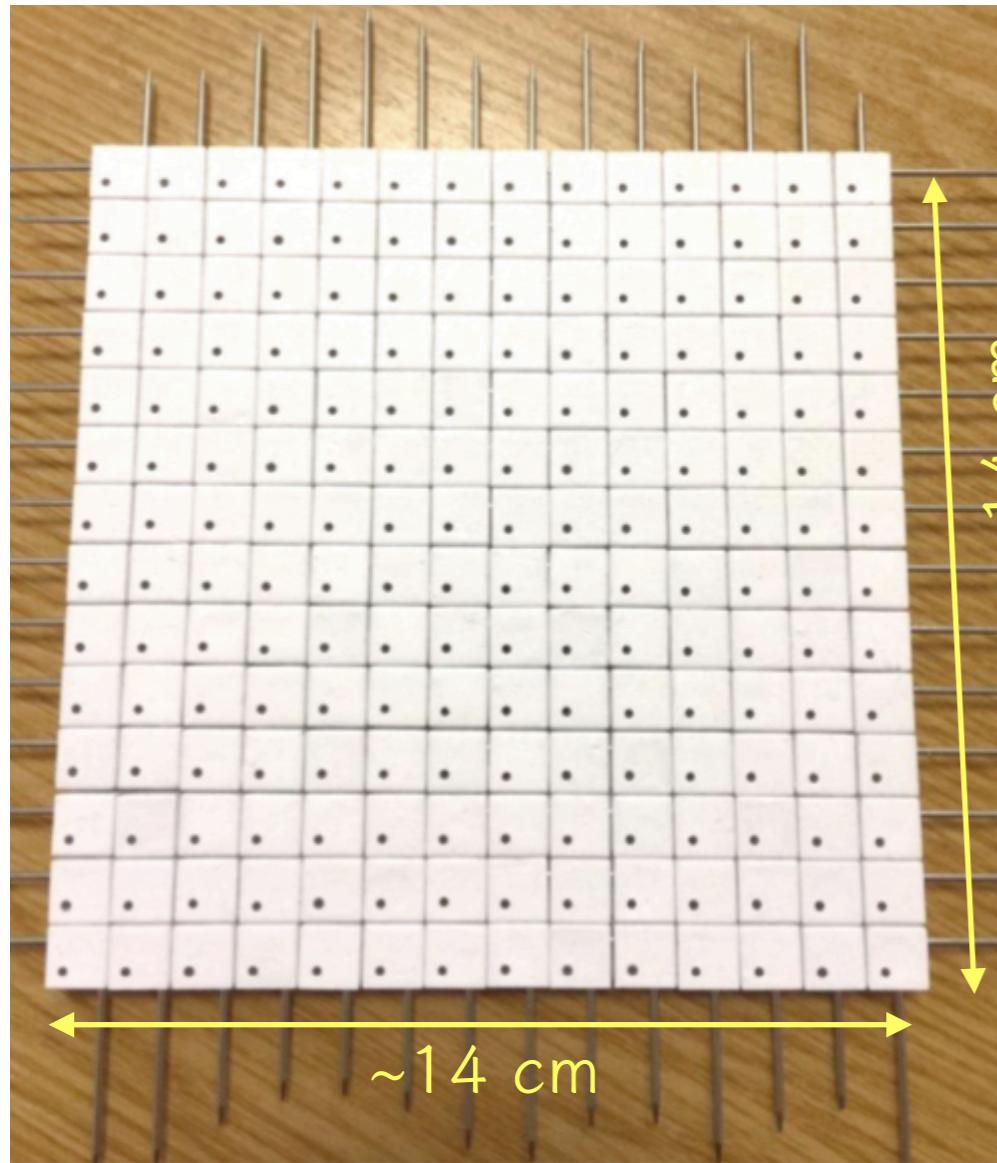


- 1立方センチメートルのシンチレータキューブ 約200万個
- $\phi 1\text{ mm}$ 波長変換ファイバーにより三次元読み出し
- ピクセル光検出器 MPPC 約6万チャンネル
- シンチレータキューブ (以降キューブと呼ぶ) はINR(ロシア)にて製造
 - ポリスチレンベースのキューブを成形
 - 薬液に浸けて表面を発泡させ、反射層化 (ケミカルエッティング)
 - $\phi 1.5\text{ mm}$ のドリルで穴あけ

精度 σ : $\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ (外形)、 $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ (穴位置)

大量的キューブを積層していく際に、表面の発泡化の度合い・穴位置のズレ・穴の傾き等わずかな形状の違いによるズレが蓄積し、ファイバーが通らなくなるおそれがある → **個々のシンチレータキューブの形状に関する事前チェックが必要**

現行のロシアでの Quality Check



- $14 \times 14 (=196)$ 個のキューブを正方形に並べ、2方向から金属の棒 ($\phi 1.4$ mm) を通す
- 金属棒が上手く通らなければ、該当部のキューブの穴の周囲にドリルの際に生じたバリ等を取り除いて再度試験を行う
- それでも金属棒がなめらかに動かなければ、それは bad cube であると判断
 - キューブが大き過ぎて隣のキューブと干渉する
 - 穴の位置・方向等が微妙にズれている

<金属棒試験の欠点>

- 時間かかる
 - 定量的な bad cube の判断が難しい、
 - 個人差が出る (複数人での並行作業)
- カメラによりキューブ面を撮影し、画像解析により必要な情報を抽出、定量的にキューブの良し悪しを高速で判断できる自動システムの開発

この面のチェックの後、キューブを90度回転させて第3の穴についてもチェック

図の正方形(キューブ196個)につき、30~60分
: 200万個なら7500 hour ~ 938日(8h/day)
4人での並行作業なら235日程度

1cube 5秒なら200万個で約116日
(24時間連続稼働の場合)
マンパワーも大幅削減

画像解析を用いたQuality Check

大まかな手順

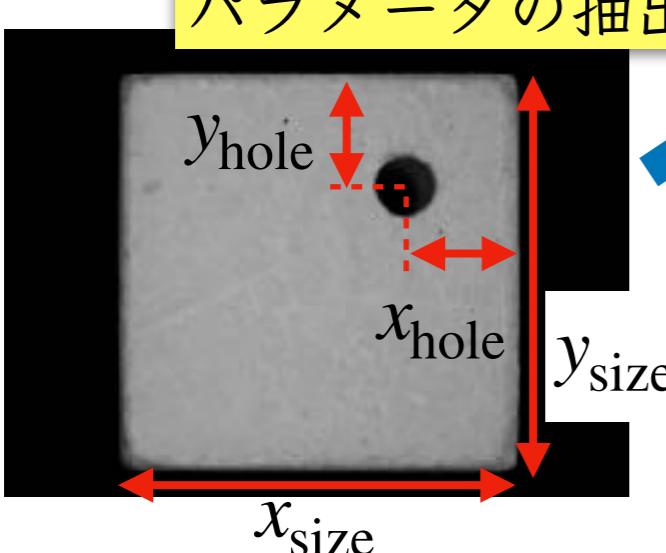
- キューブを固定・6面を撮影
- 6枚の画像から選別のためのパラメータを抽出
- 予め用意した条件を参照、各パラメータが許容範囲内かどうかチェック
- 選別結果により、キューブを分ける



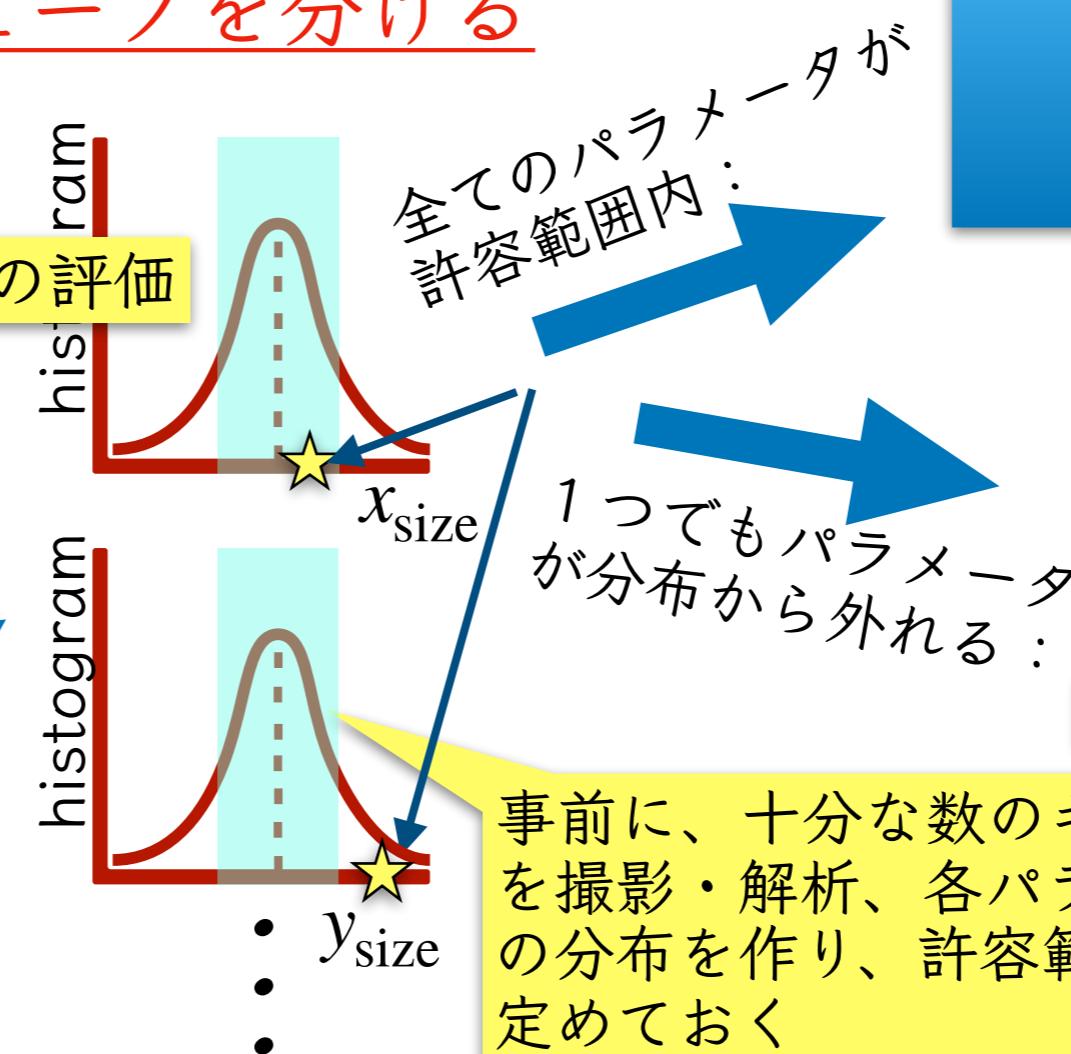
ELP 社 800万画素 Webcam



パラメータの評価



パラメータの抽出



Good Cubes



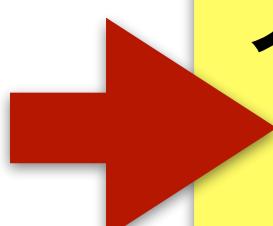
Bad Cubes

事前に、十分な数のキューブを撮影・解析、各パラメータの分布を作り、許容範囲内を定めておく

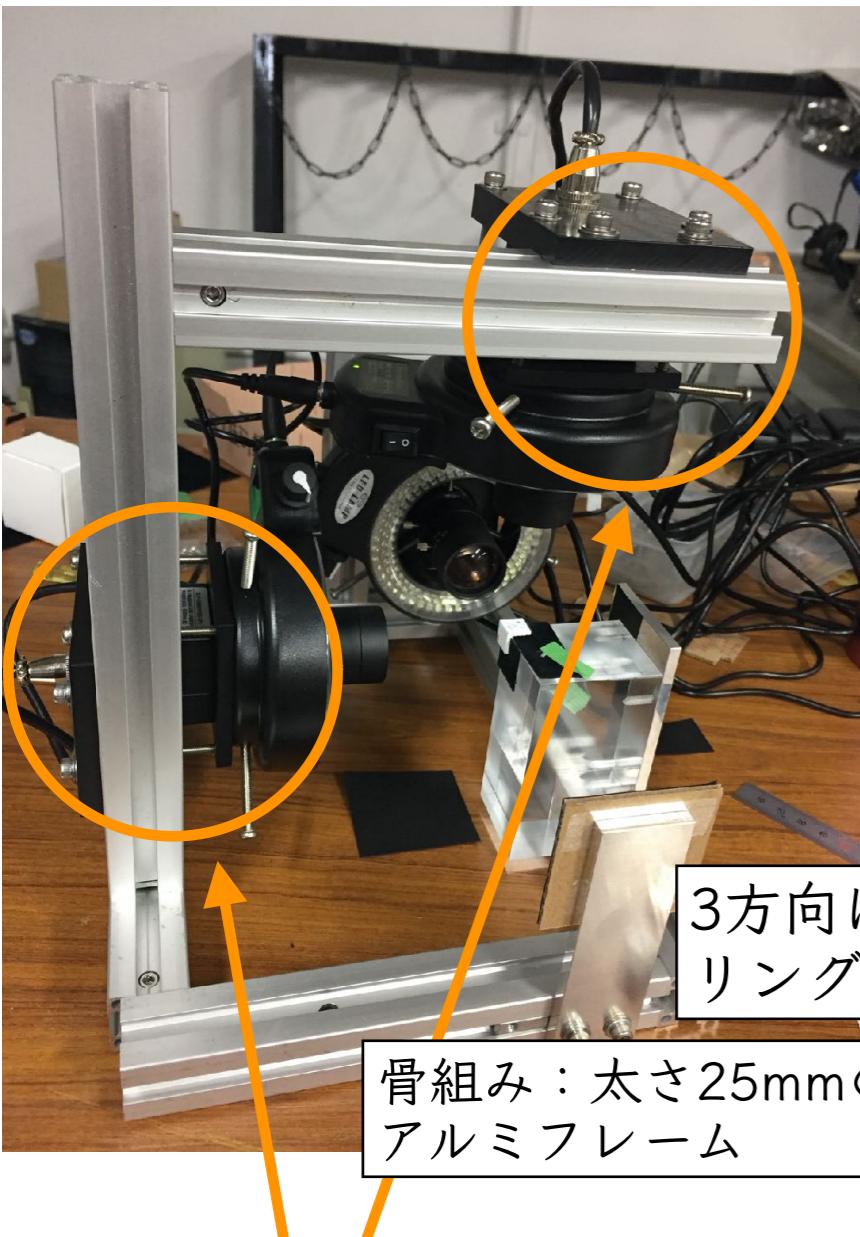
本研究の目的

- キューブ画像の解析
 - 画像解析による必要なパラメータの抽出法開発
 - 十分な統計量(数百~?)のパラメータを用いた分布生成、許容範囲の決定
- 撮影システムの開発
 - カメラの画素数を最大限に活用する撮影セットアップ
 - 大量(約200万個)の撮影に耐える再現性
 - 短時間(~数秒/キューブ)でのスムーズな撮影
 - キューブの6面全てを同条件で撮影

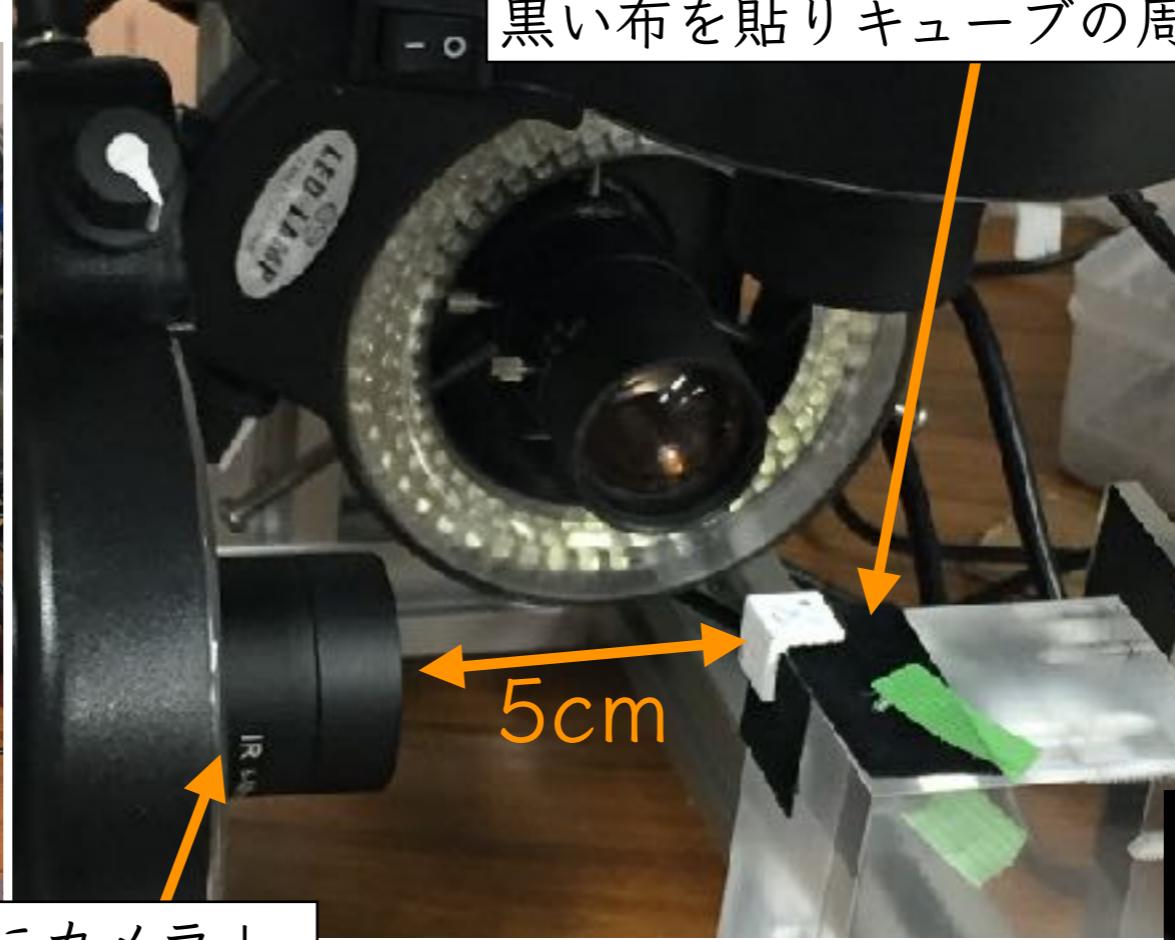
プロトタイプ検出器の組み上げによる、本システムの原理検証

- 
- 約12000個 のキューブを用いた Super-FGD の プロトタイプ検出器の製作を計画
 - 組み上げ前に本システムを用いた Quality Check を予定
 - この12000個の試験により、本システムが200万個の試験にて使用可能かどうかの検証を行う。

現行の撮影システム



カメラを水平・垂直に固定するため、専用のカメラジグを作成（スズノ技研）



3方向にカメラ+リングライト設置

骨組み：太さ25mmのアルミフレーム

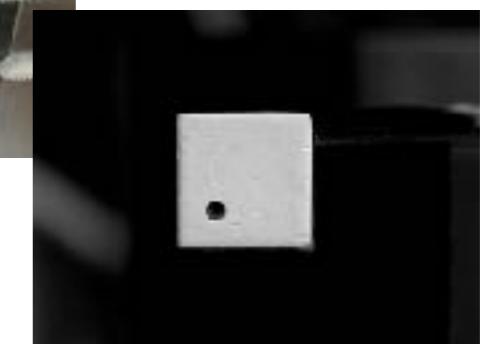
- 3方向からの三面同時撮影
- 焦点距離5cmでの撮影
- 各カメラはリング状のLED、拡大レンズ(右図)を装備
- 手でキューブを回転し、残りの三面の撮影

キューブ台座（アクリル、スズノ技研）
黒い布を貼りキューブの周囲をマスキング

リアコンバータ

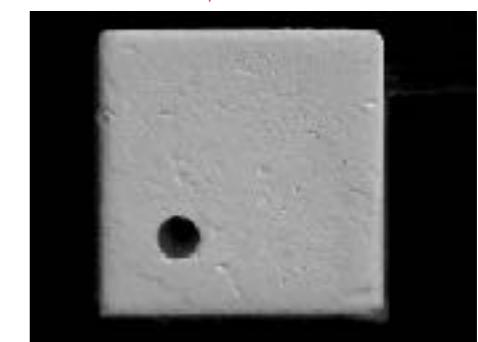


X2 TV EXTENDER JAPAN



使用前

約2倍の分解能



使用後

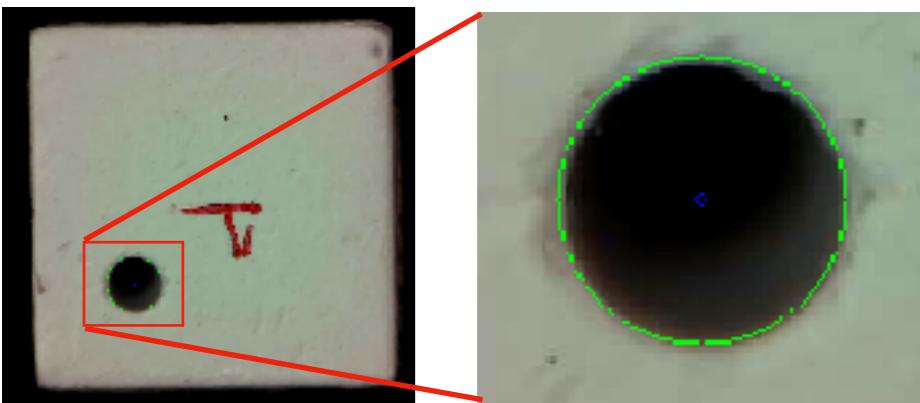
1 pixel ~ 15 μm

パラメータの取得

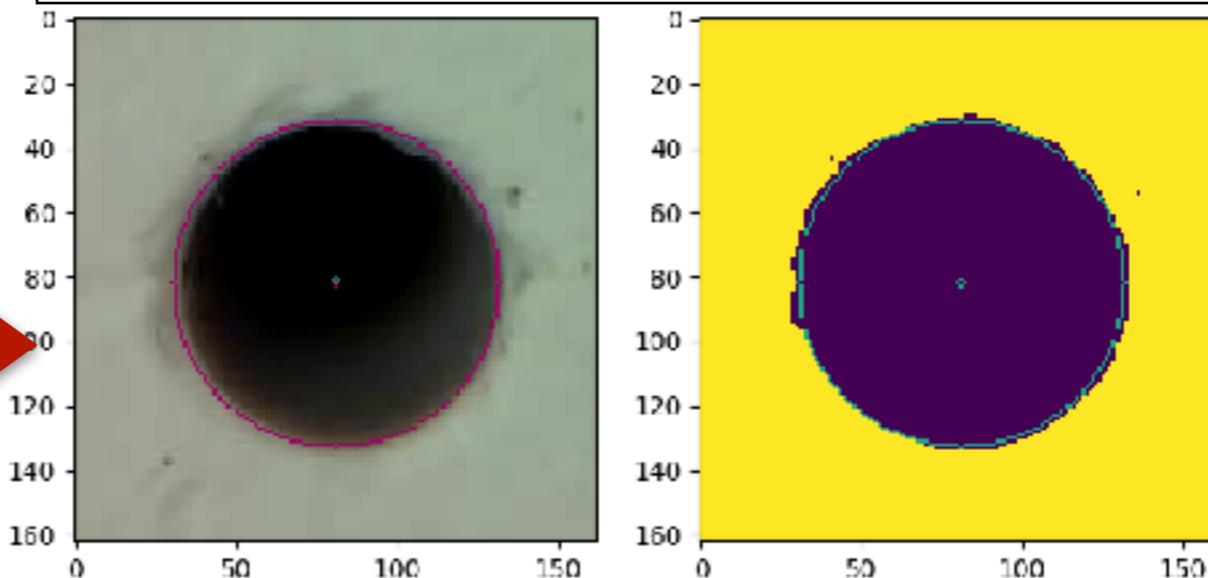
解析コード: 主に python + openCV (オープンソース
画像処理モジュール)

- 穴検出

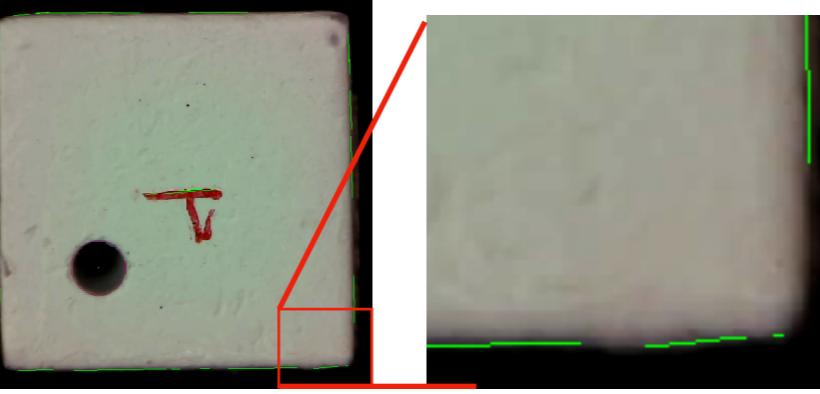
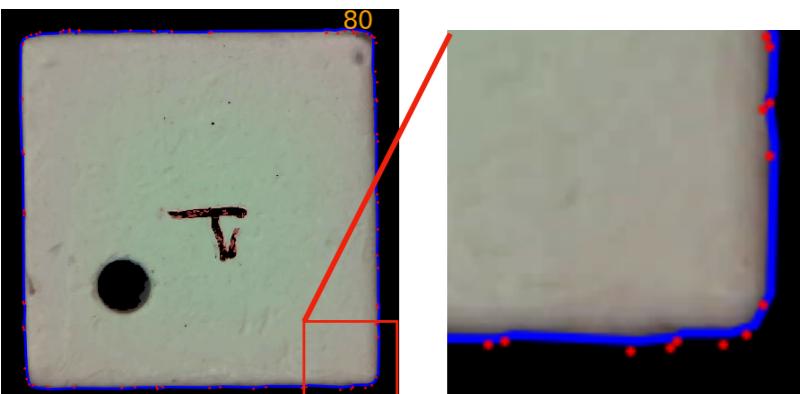
openCV 上の円検出関数による
大まかな穴検出



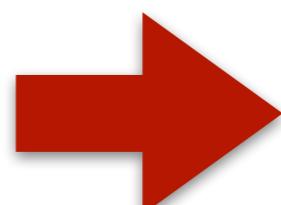
χ^2 最小化による詳細な穴位置検出 (後述)



- 辺検出・キューブのサイズ算出



openCV 上の関数を用いた
輪郭検出、直線検出



撮影時の傾き補正 (後述)、
表面のバンプ(凹凸)検出

キューブ穴位置の検出 - カイニ乗値の最小化 -

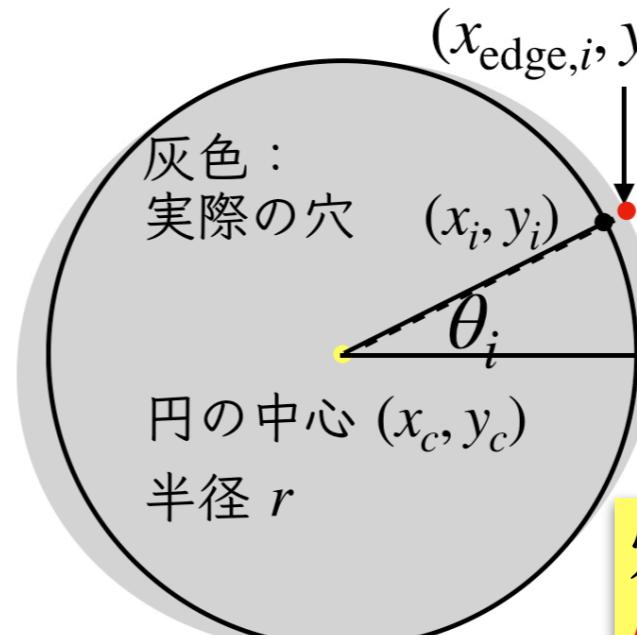
穴のエッジを検出し、それを田でフィッティングすることで正確な穴の中心を求める。

$$E_{\text{sum}}(x_c, y_c, r) = \sum_i \left(|x_i - x_{\text{edge},i}|^2 + |y_i - y_{\text{edge},i}|^2 \right)$$

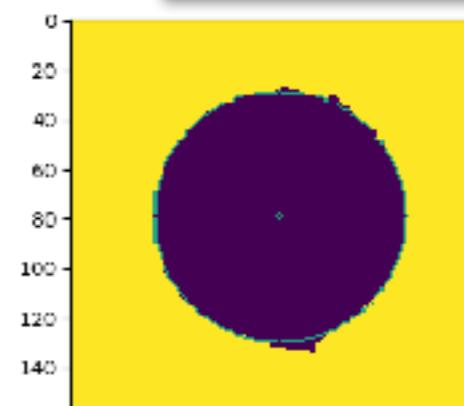
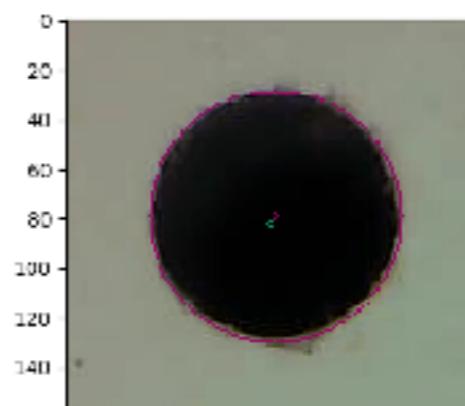
$$x_i = x_c + r \cos \theta_i, y_i = y_c - r \sin \theta_i$$

E_{sum} が最小となる (x_c, y_c, r) を求める。

- $x_{\text{edge}}, y_{\text{edge}}$ は穴のエッジ上の点
- (x_c, y_c, r) の初期値は二値化画像から得た中央値を使う。
- 今回は $\theta_i = 0, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \dots, \frac{15}{8}\pi$ で E_{sum} を計算。

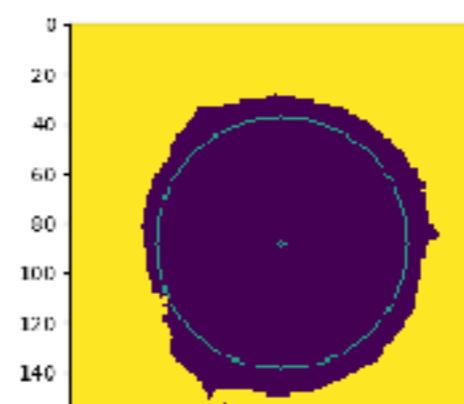
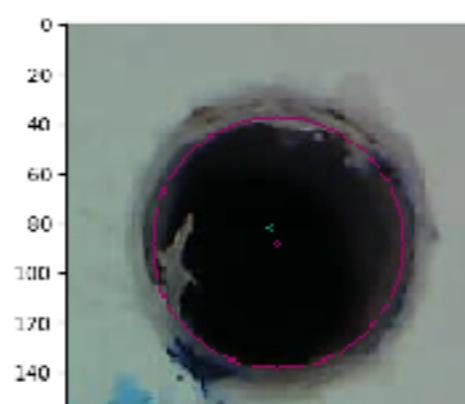


穴の状態に関わらず、
穴位置の最適化に成功!



良い状態の穴

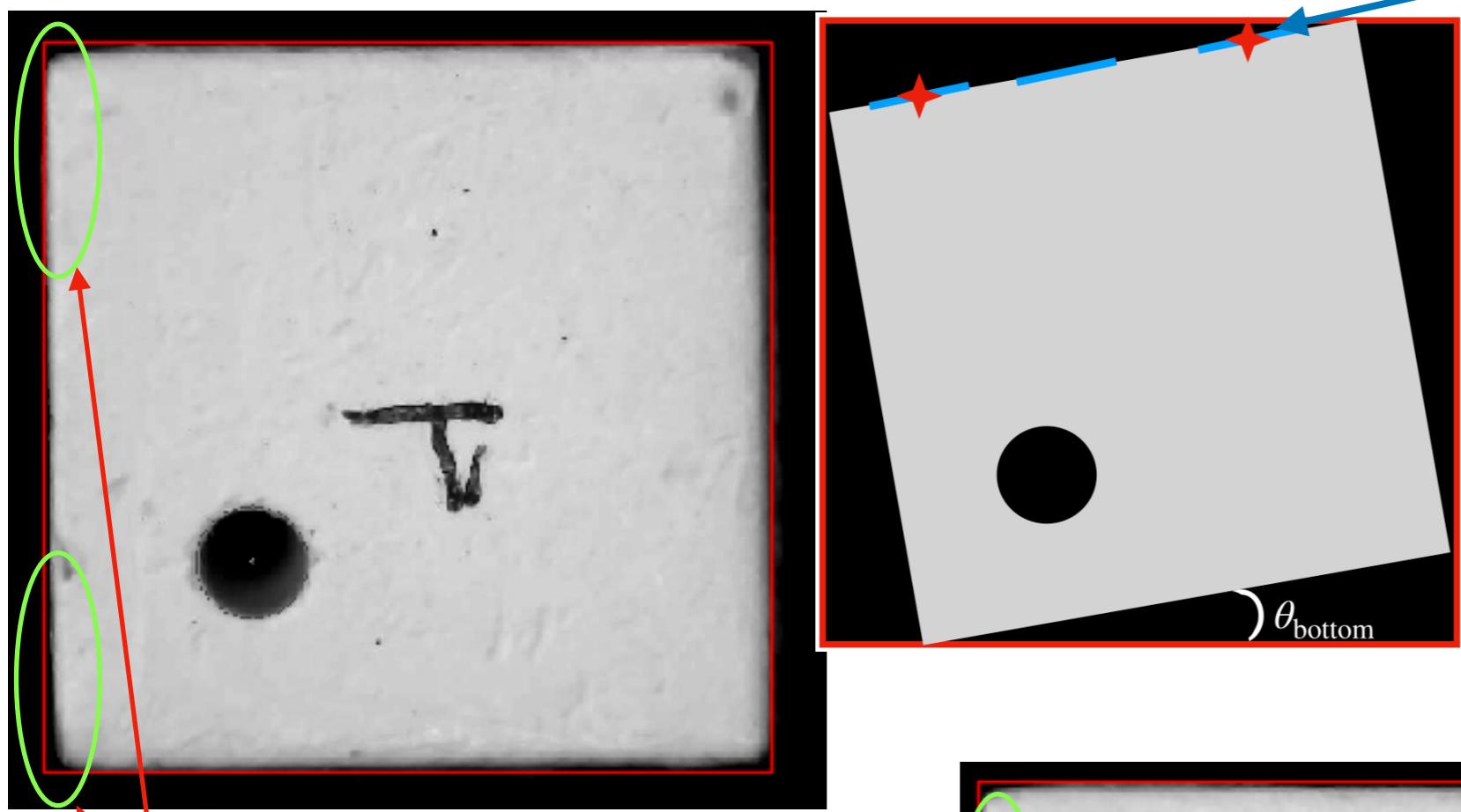
$(x, y, r):(364.1, 230.1, 52.4)$ $E_{\text{sum}}:$
 $\rightarrow(363.8, 229.4, 51.1)$ $50.5 \rightarrow 13.1$



悪い状態の穴

$(x, y, r):(652.1, 254.1, 52.4)$ $E_{\text{sum}}:$ 最適化前のもの
 $\rightarrow(652.1, 253.8, 58.1)$ $626.5 \rightarrow 106.1$

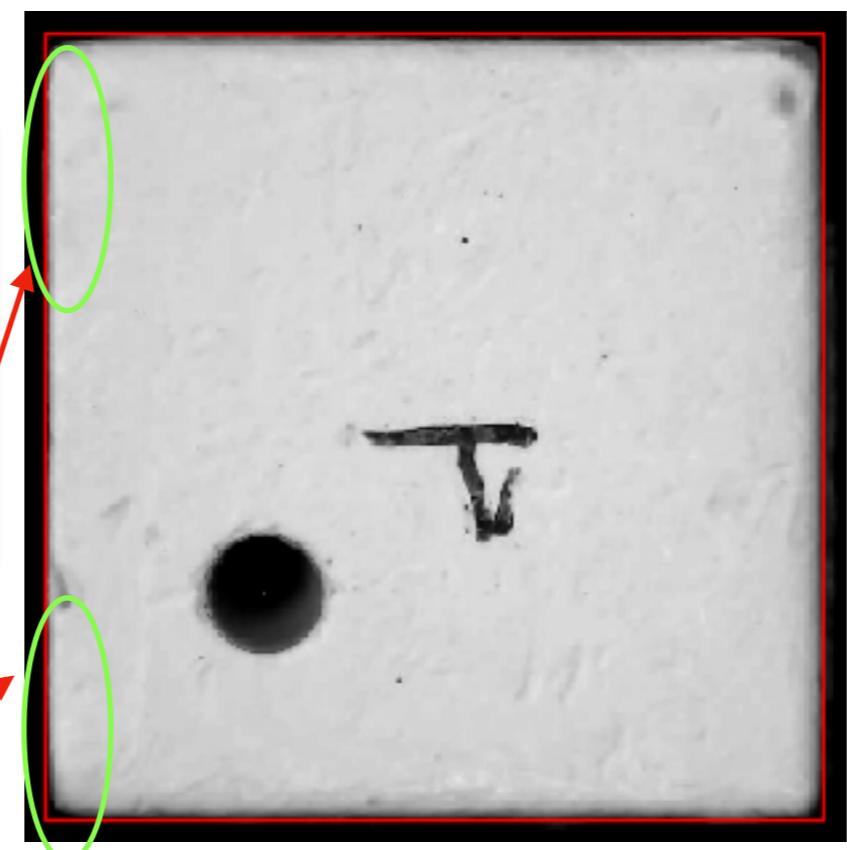
キューブの傾き補正



- 各辺ごとに、関数により複数の直線(青線)を検出
- それらの中心 \star を結ぶ直線の傾き $T = \tan \theta$ を求める
- 4つの辺について傾きを求め、平均 \bar{T} を得る
- 平均の傾き角 $\bar{\theta} = \arctan \bar{T}$ を求め、座標・画像の回転

緑の丸: キューブが傾いているので、下の方では赤線とキューブ辺の間に隙間ができている。穴の相対位置は辺の座標を基準に決めるので、辺の正確な位置検出が重要

回転後: 補正により、隙間は解消された

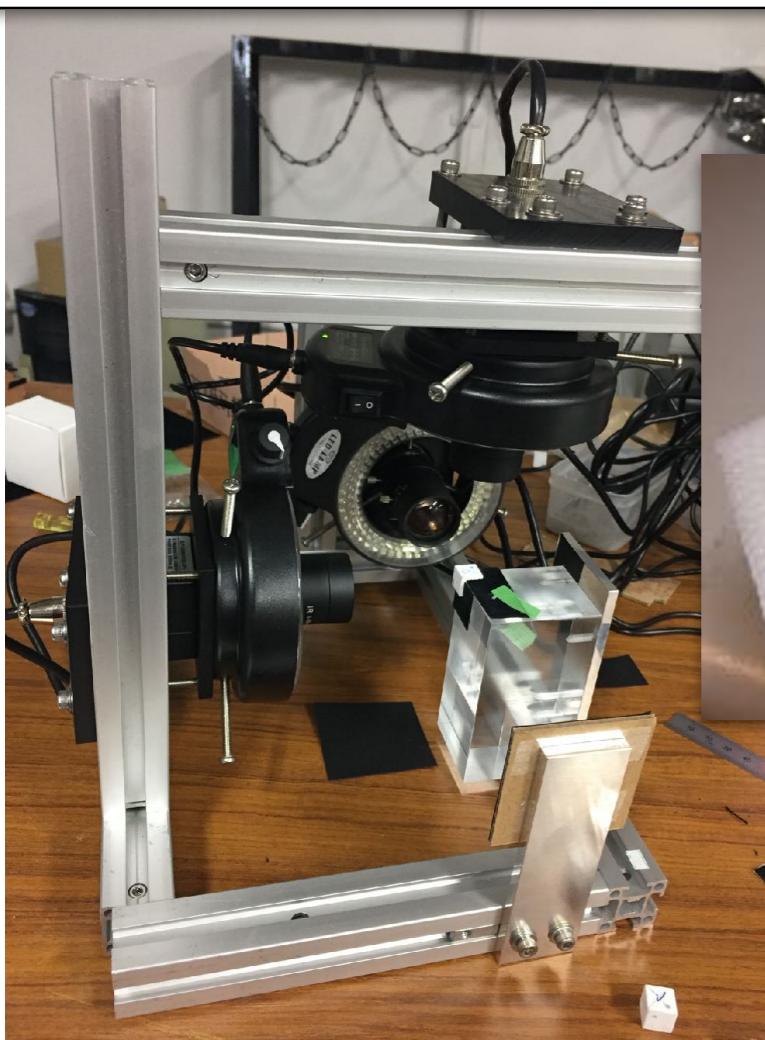


キューブの検出サイズ
(単位 pixel):
回転前: (667, 665)
→回転後: (661.0, 667.7)
1 pixel ~ 15 μm
x方向のサイズは補正された
y方向は過剰に回転してしまった? 統計をためて
詳しい確認が必要

この画像の場合 $\bar{T} = 0.0139$, $\bar{\theta} = 0.796^\circ$ に対応

現行の撮影システムの問題点

- キューブを設置→撮影→回転→撮影→選別の繰り返し
- 問題点：
 - 確実に回転しないと6面撮影できない
 - 選別ミスの可能性
 - 各キューブにつき上記操作の繰り返し：時間がかかる



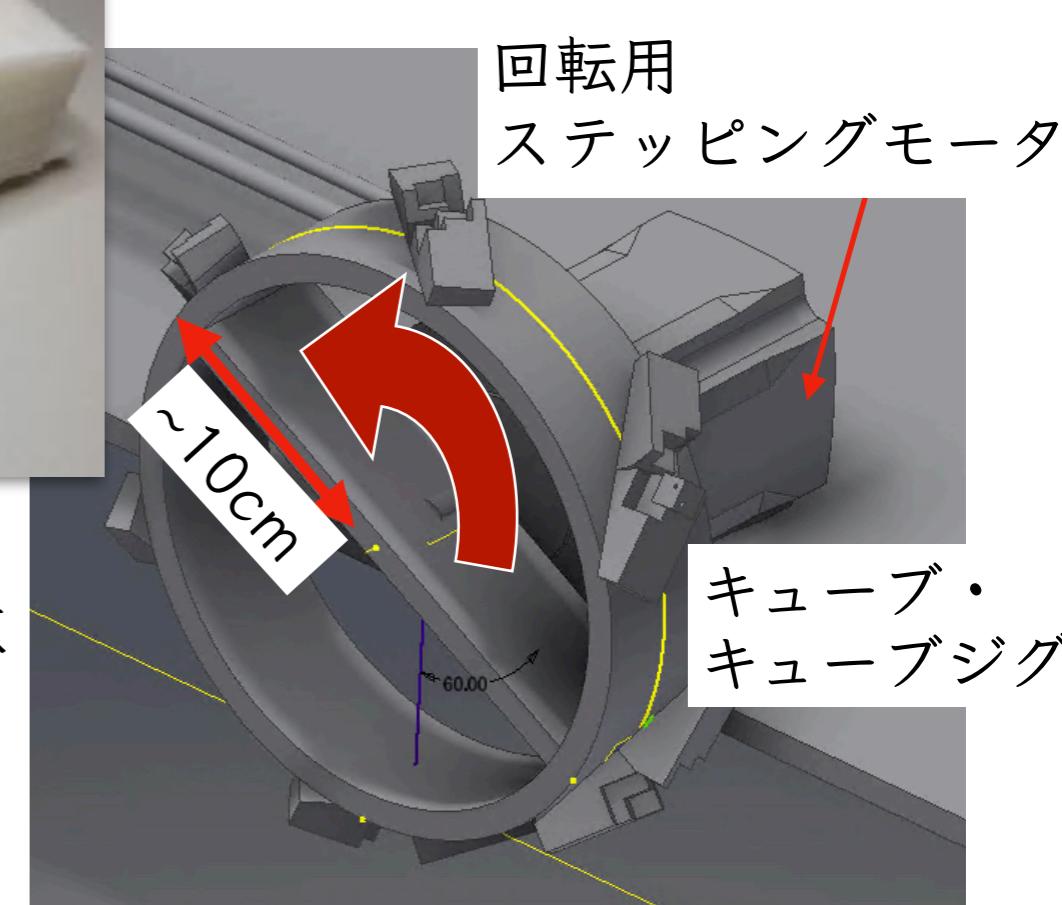
現行の撮影システム

新しい撮影システム

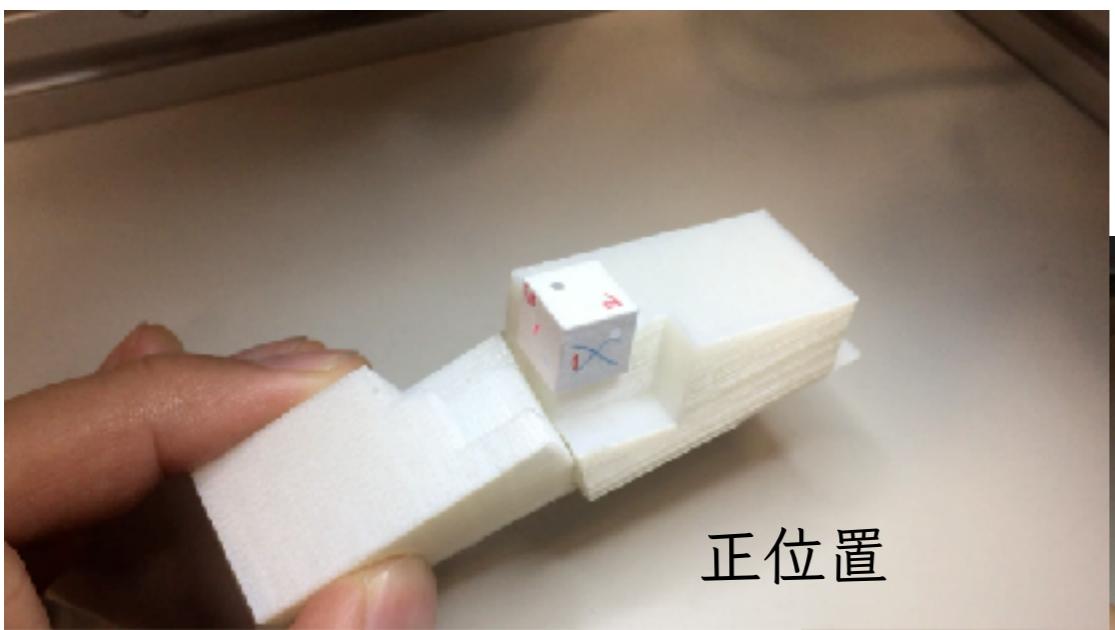
- 2つの台座が向かい合う形。
- カメラを更に3台用意 (合計6台)、残りの三面を別の場所で撮影。
- キューブを転がして向かい側に移動させれば残りの三面が現れる。



新しいキューブ台座を複数台用意して回転させる。台座を回転させることで、自然にキューブが向かいの台座に移る(次ページ)



回転のようす

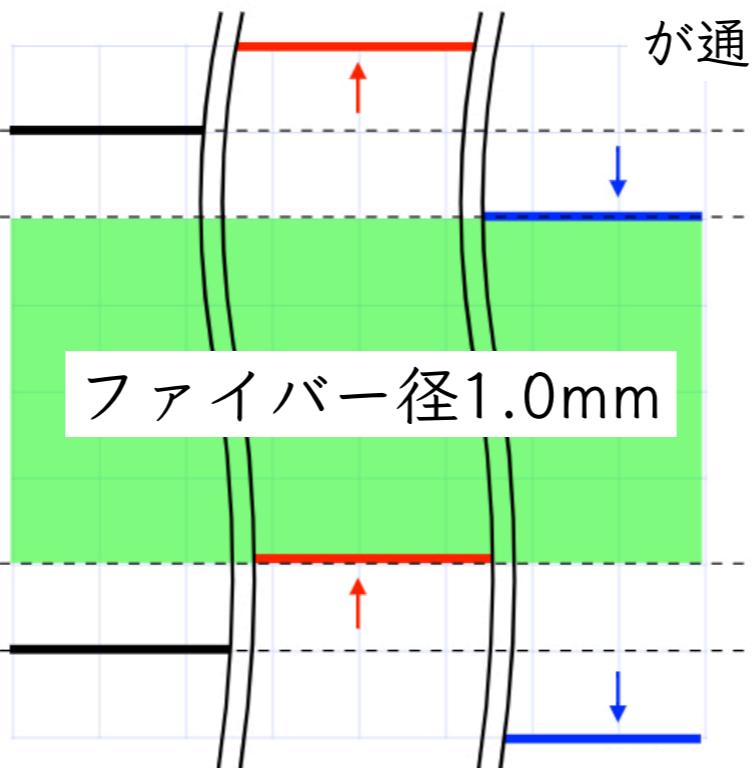
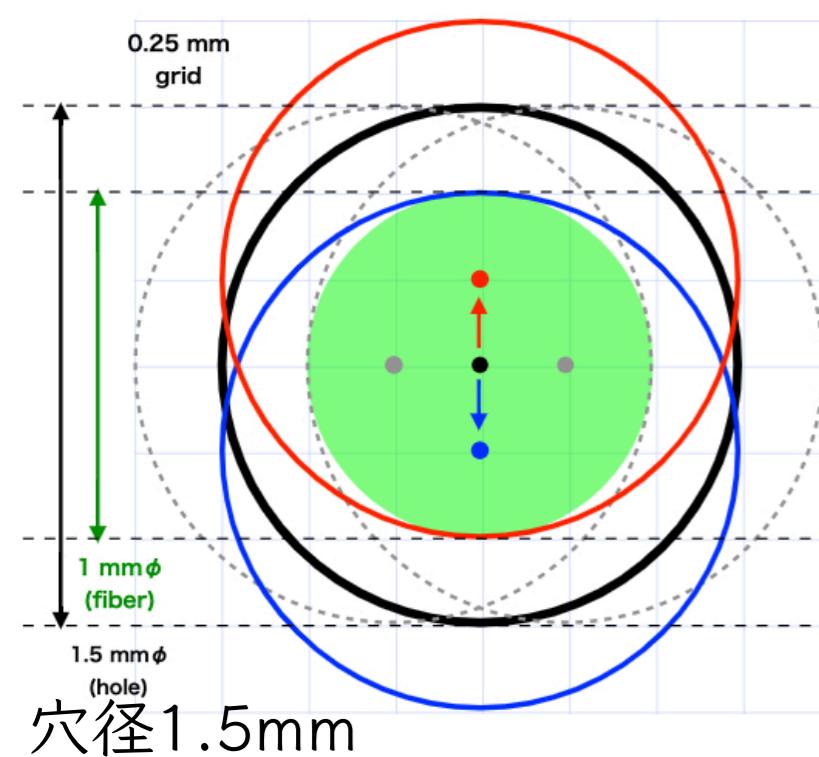


まとめと今後の展望

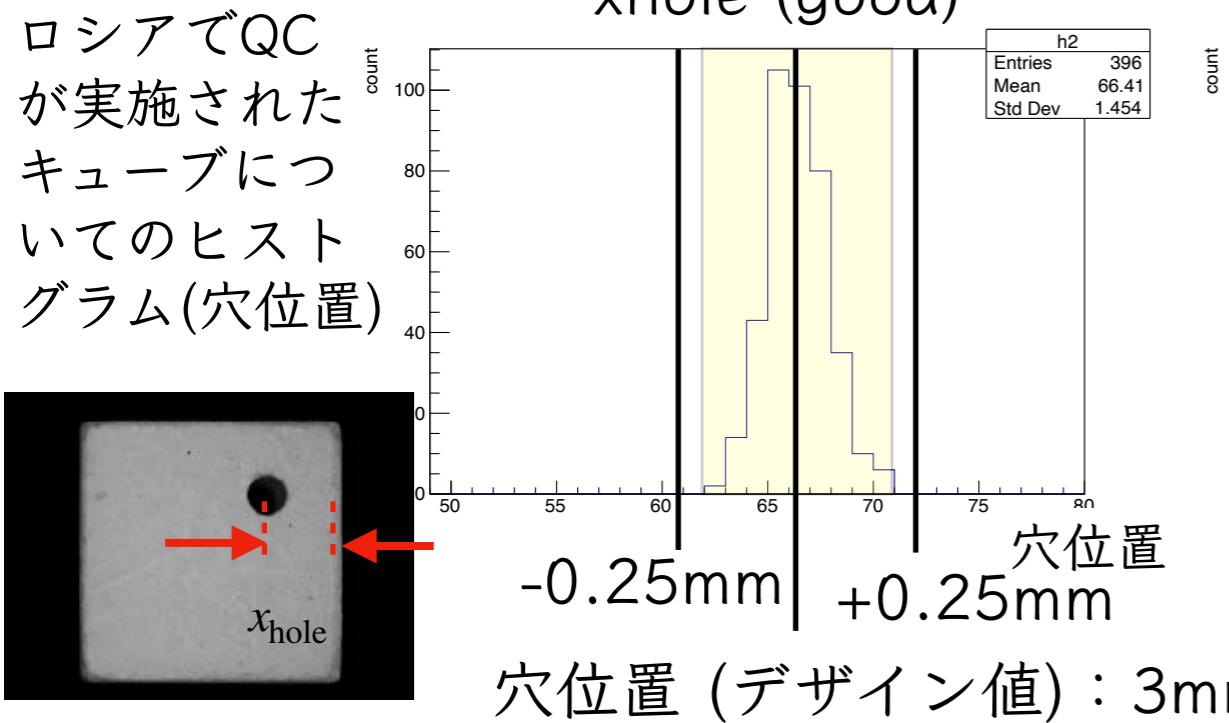
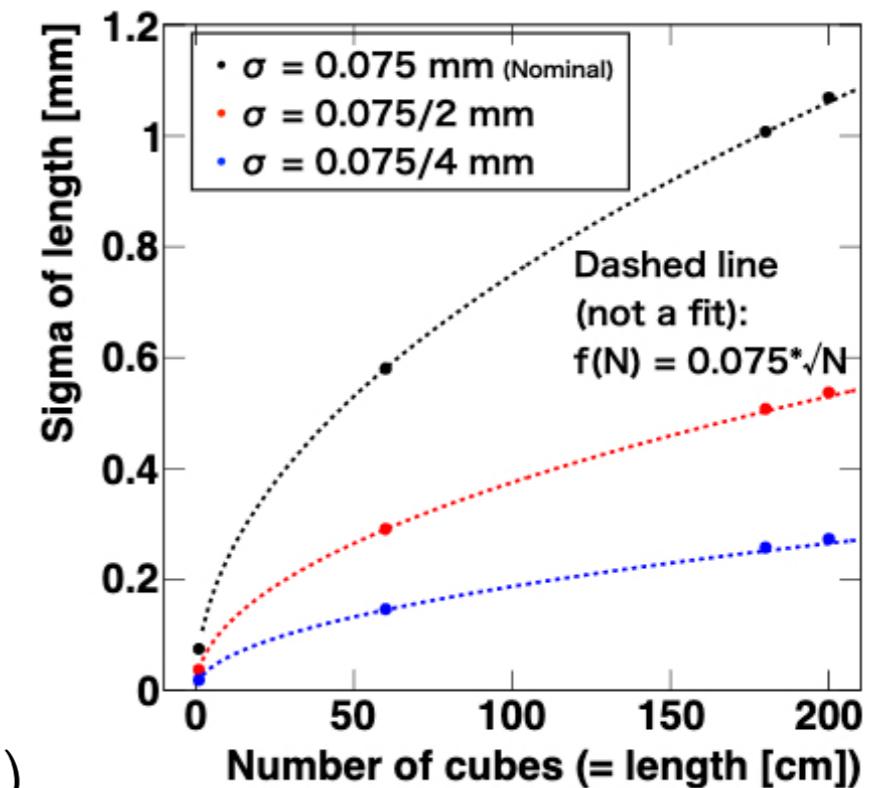
- **T2K 実験の高度化**に向けた前置検出器 ND280 の**アップグレード**が進行中
 - 新検出器 Super FGD の素子となる1立方センチメートルシンチレータキューブの品質検査が必要
 - キューブ検査のための撮影システムの開発、画像解析の手法の開発を行っている
- **12000 個のキューブ**を用いた**プロトタイプ検出器**の組み上げ
 - 初めの数百程度のキューブの情報から、各パラメータの分布生成、許容範囲の決定
 - 短時間で試験可能な再現性のあるシステムを用いたキューブ撮影・解析を目指す
 - 本システムによる試験の結果をもとに200万個の試験で使用可能かどうかを判断、最終的な撮影システム・解析アルゴリズムへのフィードバックを行う

back up

パラメータ(穴位置)の許容範囲の決定



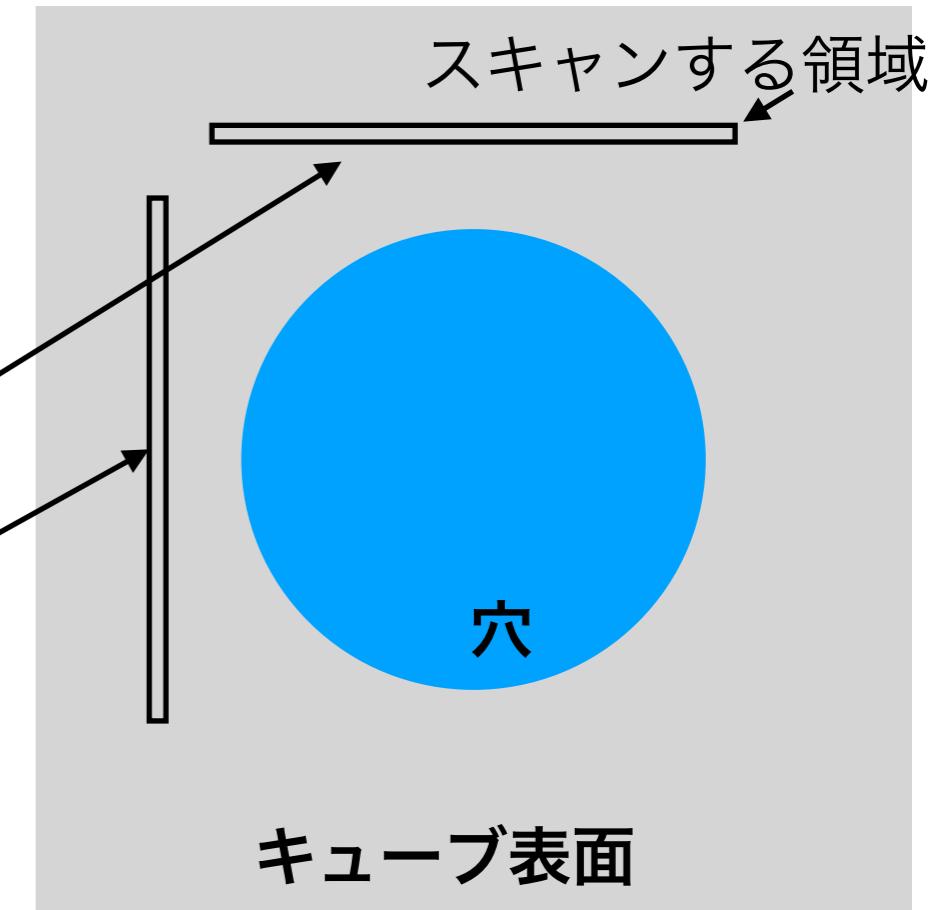
穴の位置が平均より ± 0.25 mm よりはずれていた場合、ファイバーは通らない。それ未満のズレの場合でも、キューブ表面の膨らみや穴の傾きによりファイバーが通らないことが懸念される。



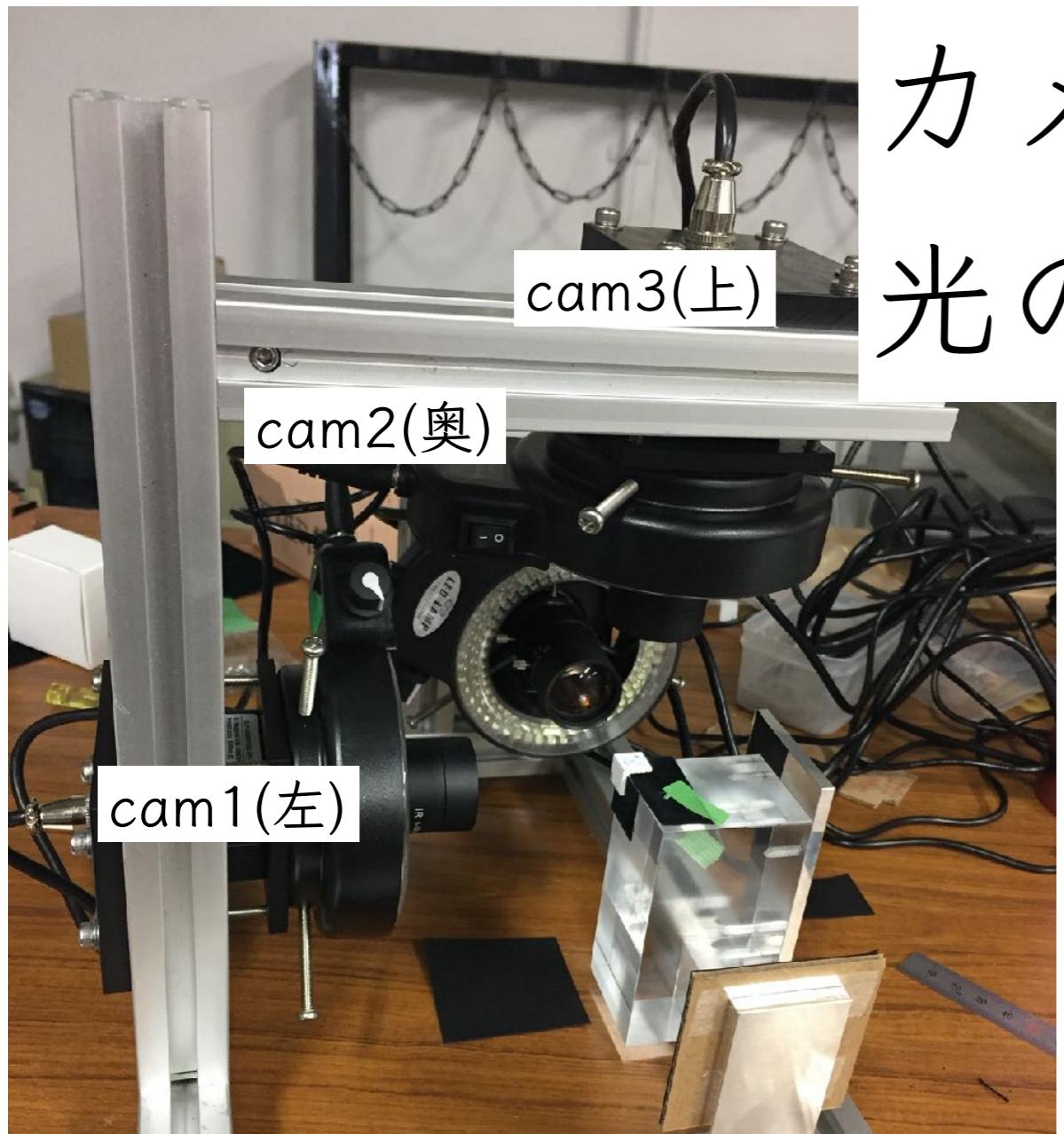
穴位置の許容範囲は ± 0.25 mm を目安に、最終的には分布の形を見て判断する

画像の二値化

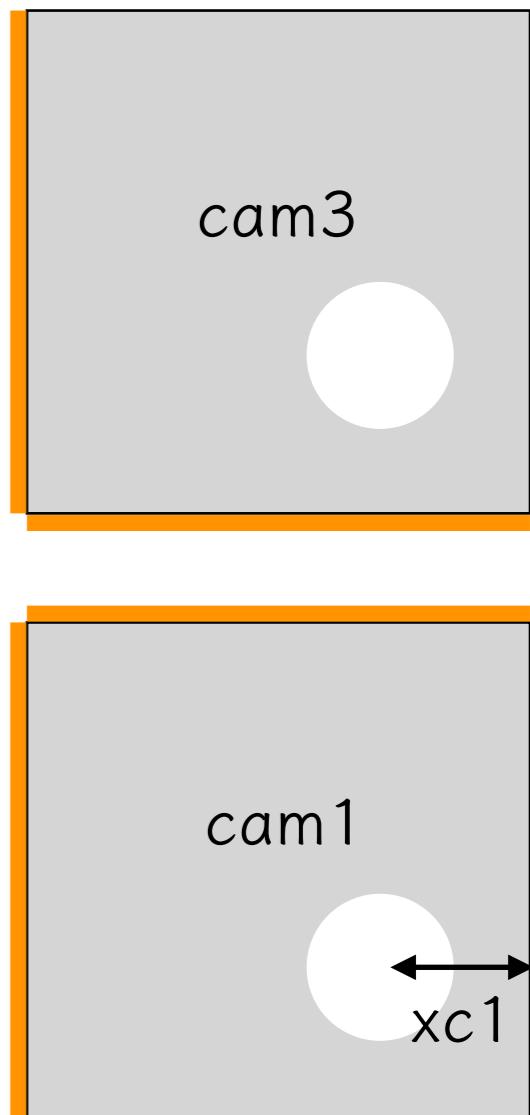
- 二値化のための threshold の決め方
- 穴の周囲の色の平均を参照値とする。
- 参照値の候補をふたつ (orそれ以上) 用意する
 - x方向にスキャンした平均
 - y方向にスキャンした平均
- キューブ表面の傷・印等の影響を減らすため、候補のうち、最も白いもののを参照値として採用する。



今回は以前提案していただいたように、参照値の 30% カットの値を threshold として用いた



カメラ毎の 光の当たり方



- オレンジの部分に、別方向からの光が当たる。
- 穴の辺からの位置が撮影状況によって変わってしまう
(本来は $xc1=xc2$ のはずなのに、 $xc2$ のほうが大きく見えてしまう)
- 同一の面をそれぞれのカメラで撮影、同一の辺長・穴位置について光の有無によって有意な違いがあるか確認。