

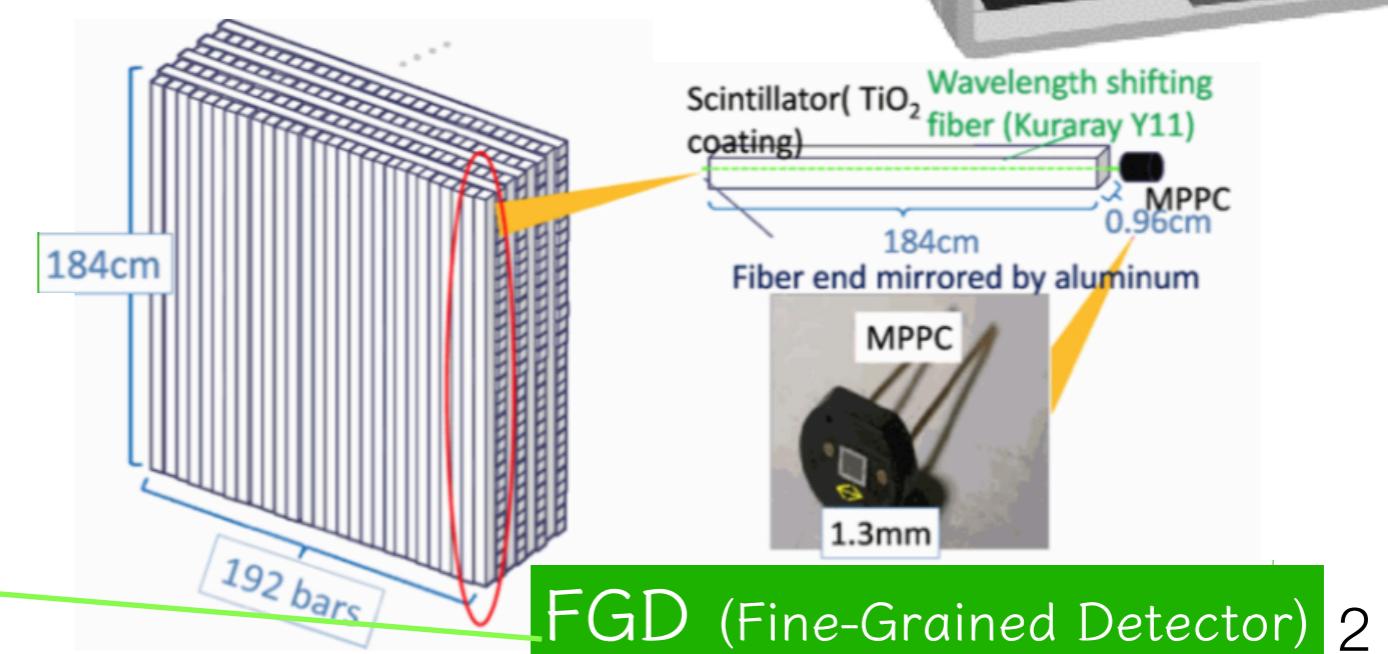
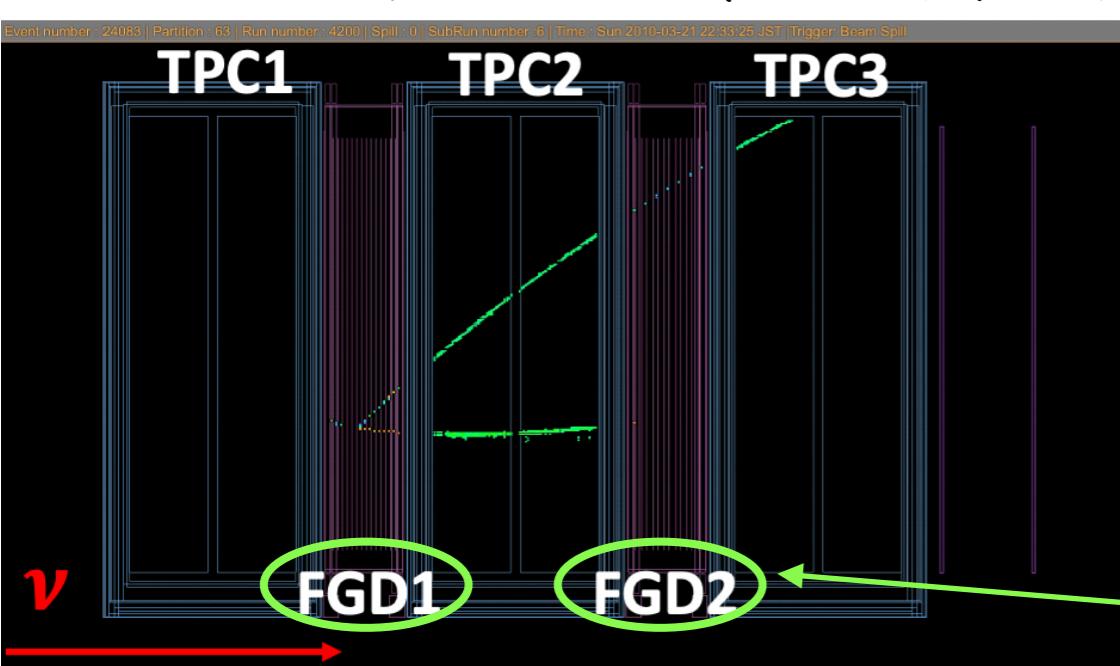
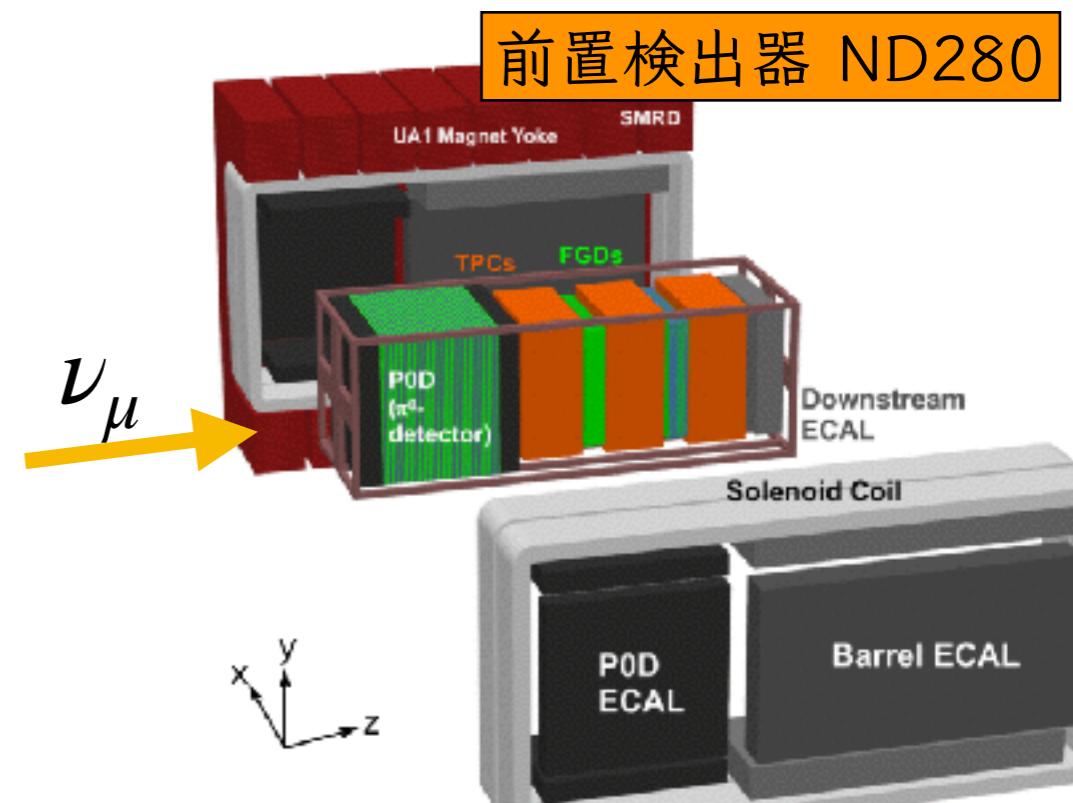
T2K 前置検出器アップグレード用
シンチレータキューブの画像解析による
自動検査システム開発

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, 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

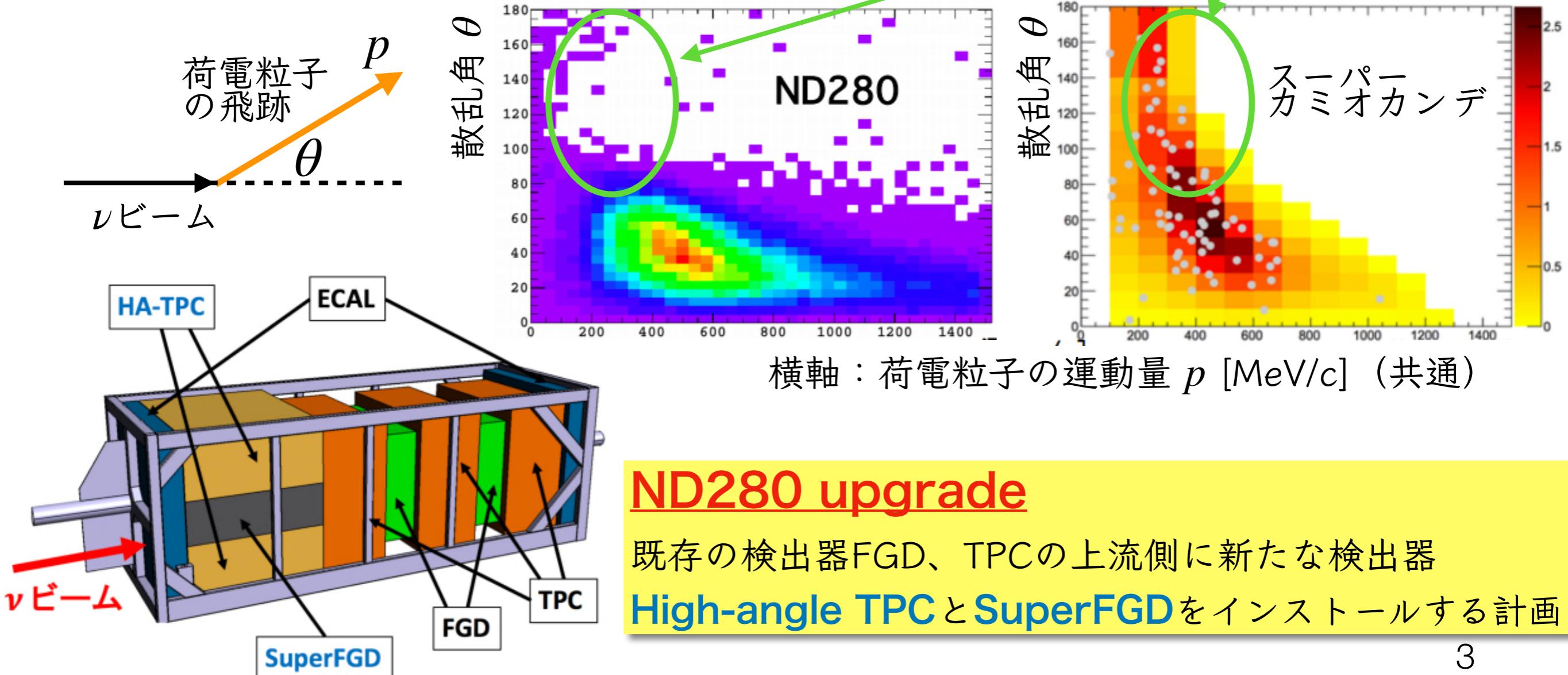


前置検出器 ND280 upgrade

現在のND280 における問題点：

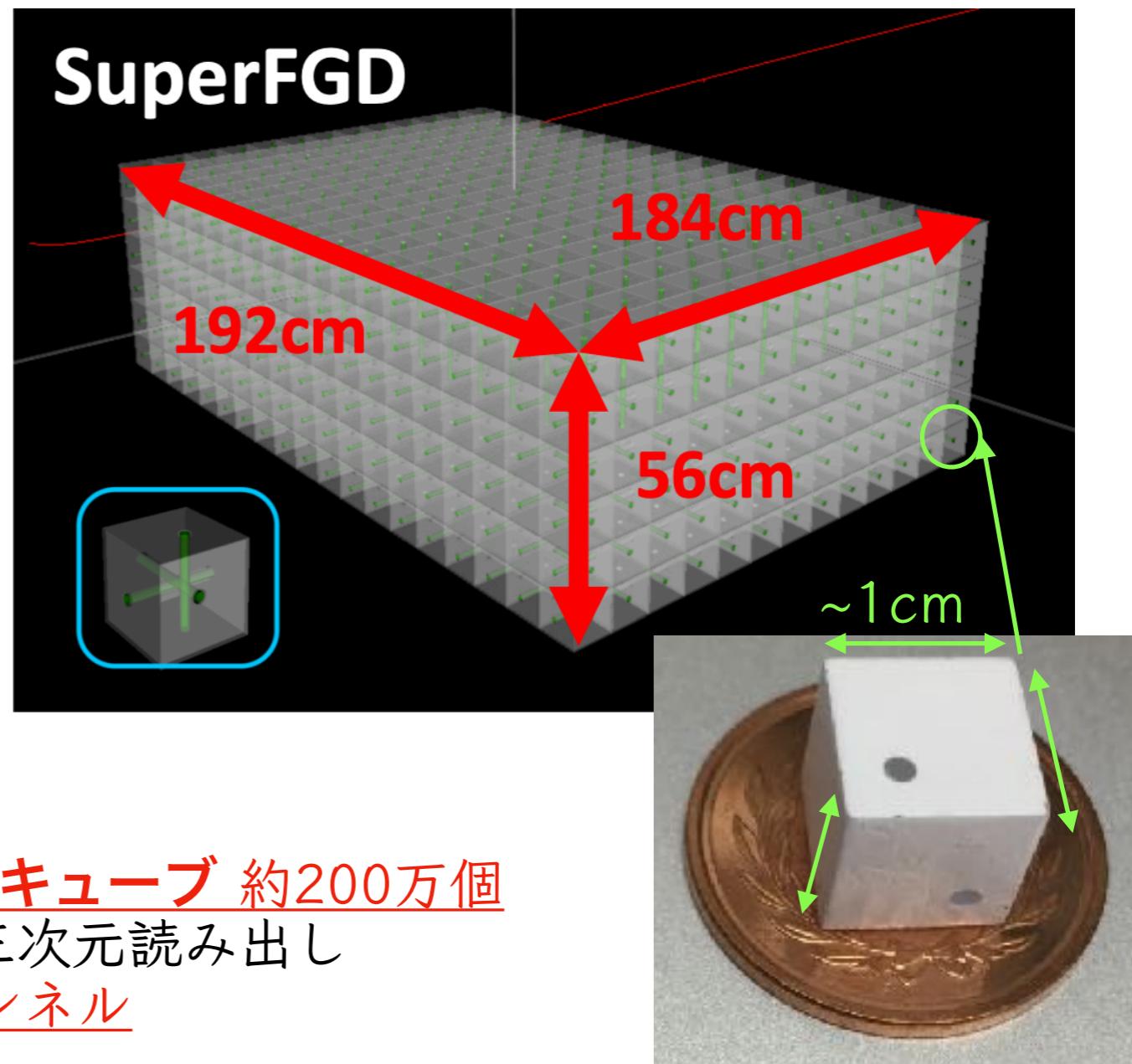
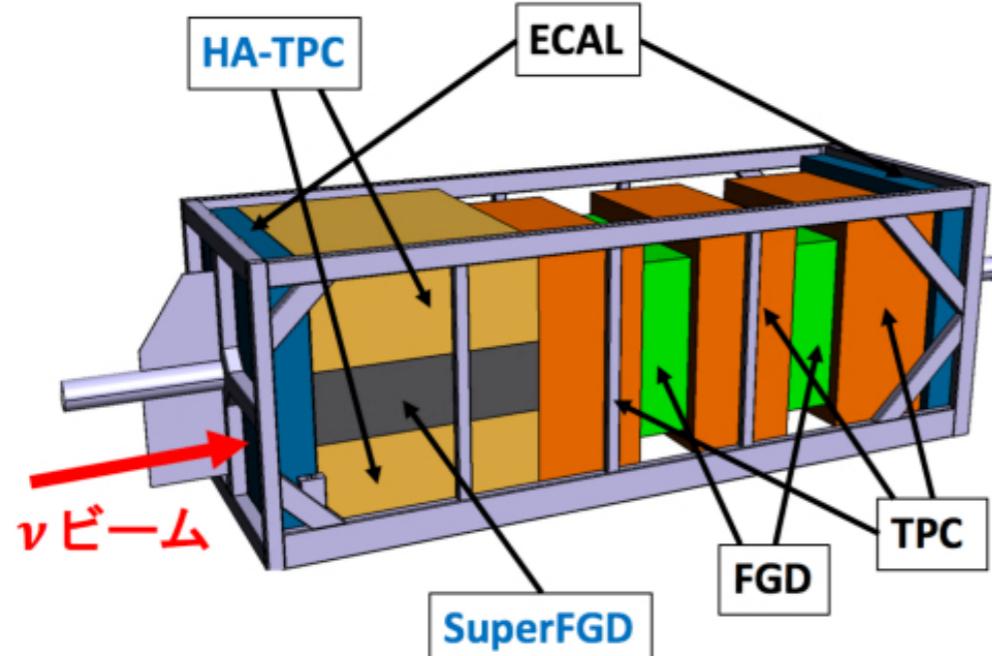
- 大角度散乱に対する検出効率が低い
(スーパー・カミオカンデでは 4π に対し acceptance をもつ)
- 低運動量の荷電粒子の飛跡検出が難しい

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



Super-FGD

Super Fine-Grained Detector



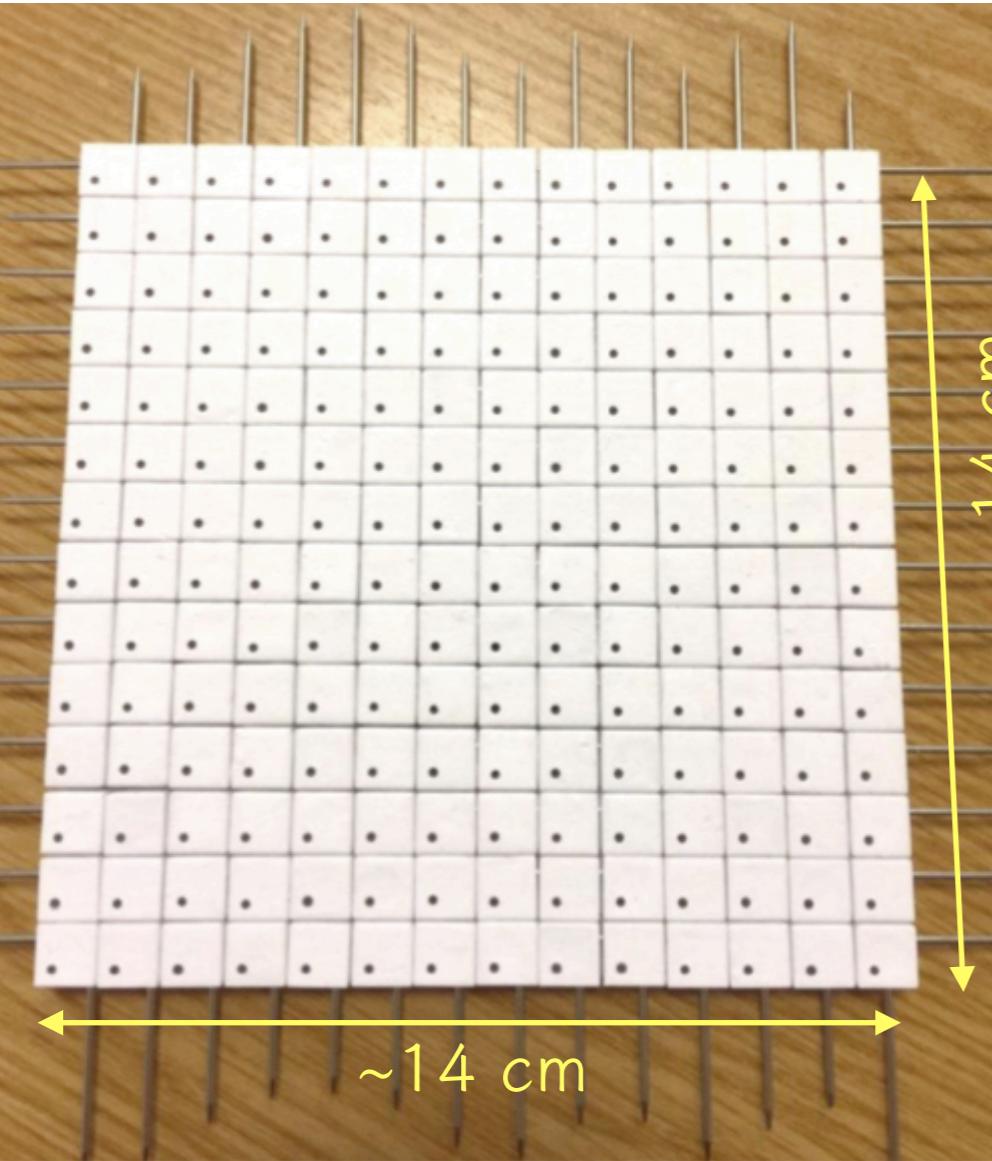
- 1立方センチメートルのシンチレータキューブ 約200万個
- $\phi 1\text{ mm}$ 波長変換ファイバーにより三次元読み出し
- ピクセル光検出器 MPPC 約6万チャンネル

- 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



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

- $14 \times 14 (=196)$ 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
- 金属棒がなめらかに動かなければ、そこに bad cube があると判断
 - キューブが大きく隣のキューブと干渉する
 - 穴の位置・方向等がずれている

<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 (複数人の並行作業)

→ キューブを撮影し、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

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

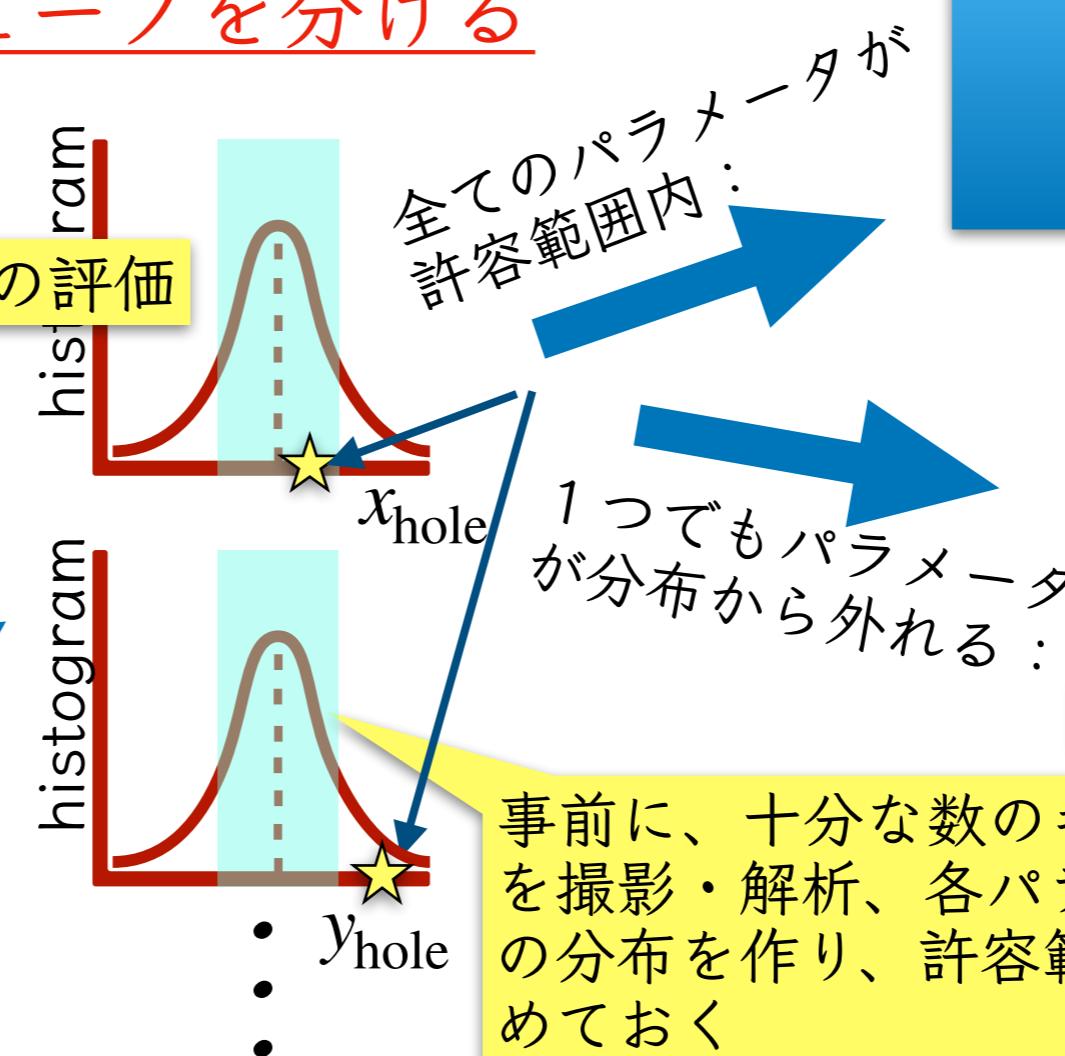
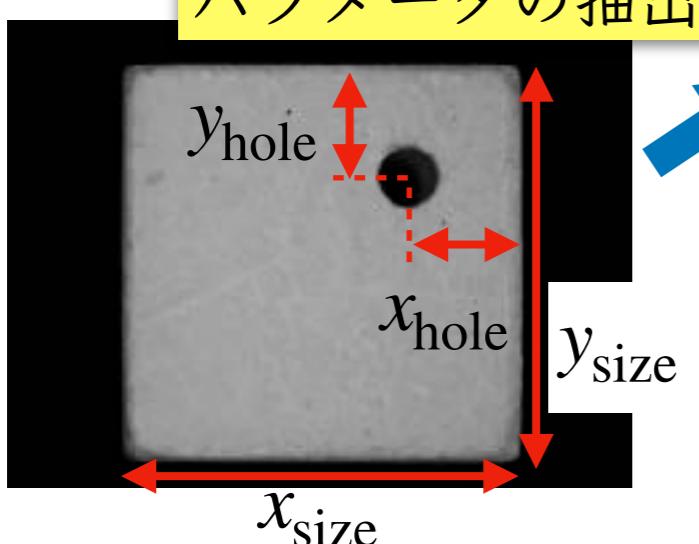


ELP 社 800万画素 Webcam



パラメータの評価

パラメータの抽出



Good Cubes

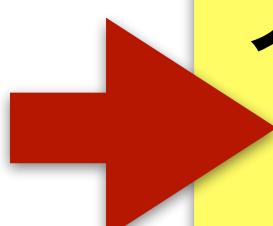


Bad Cubes

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(500キューブ～)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。

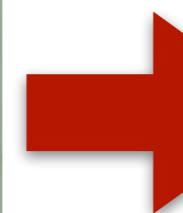
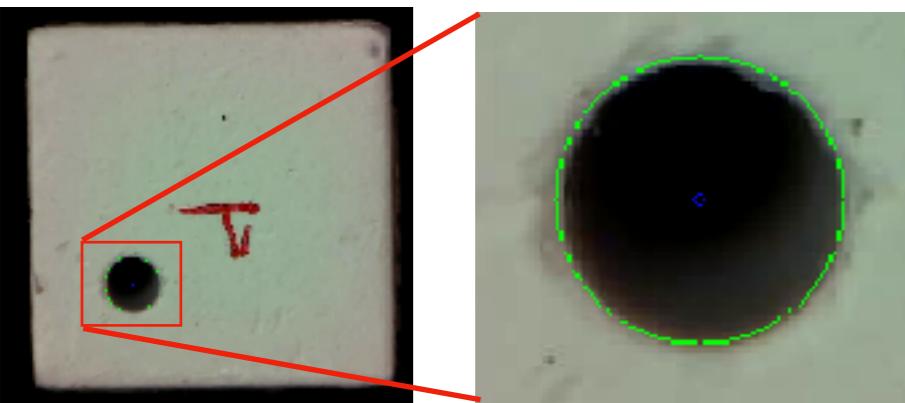
前回の報告：キューブ画像の解析



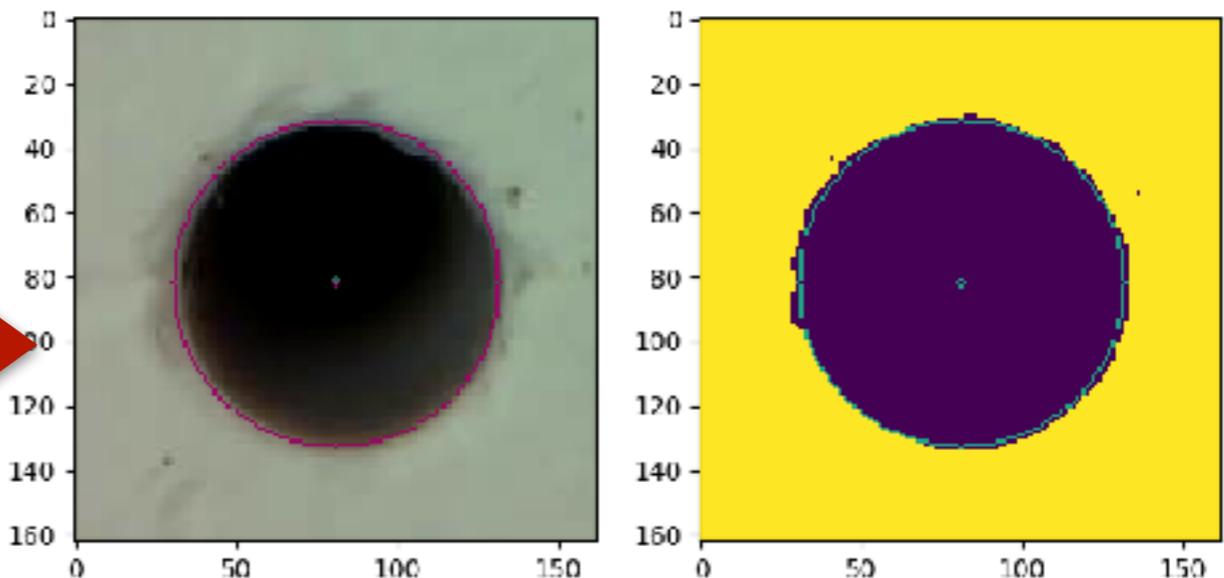
解析コード：主に python + openCV (オープンソース
画像処理モジュール)

- 穴検出

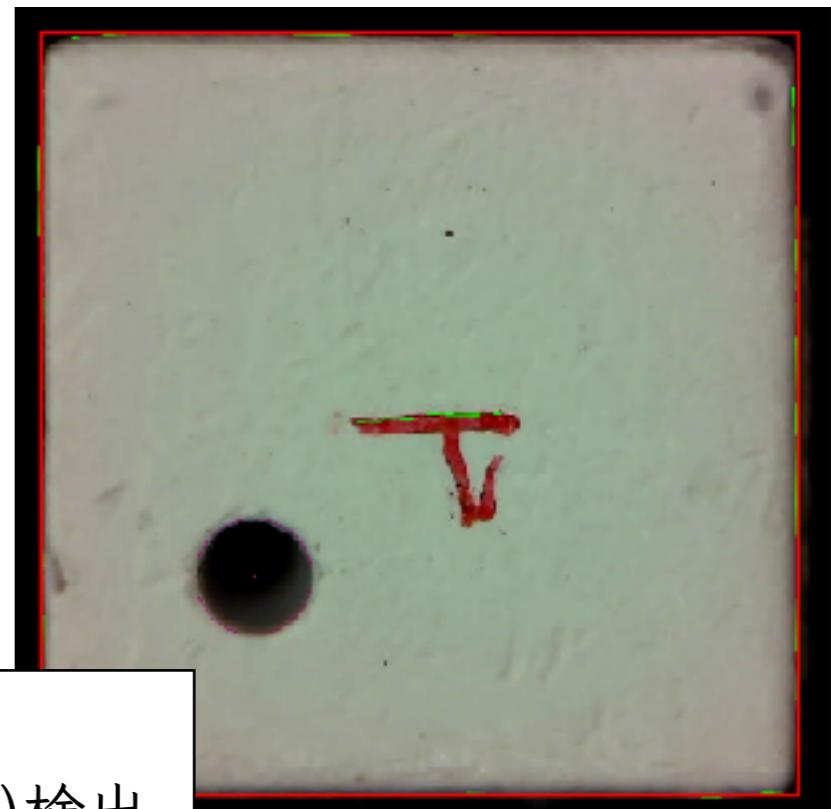
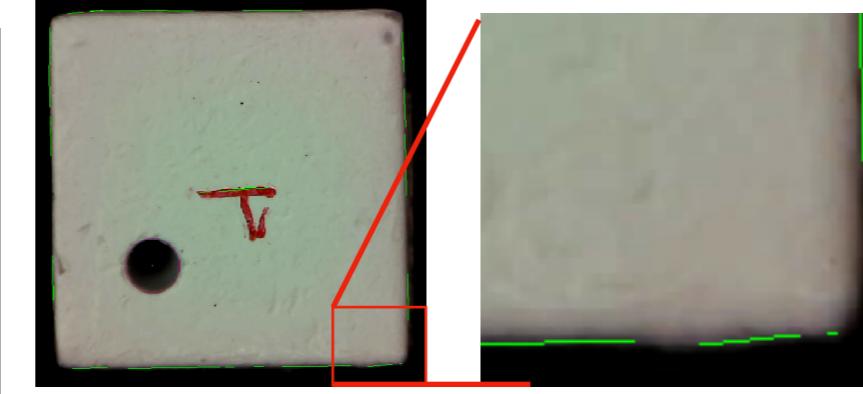
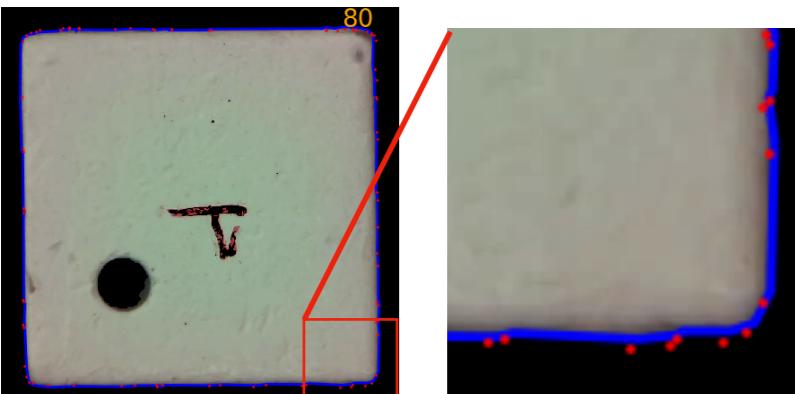
openCV 上の円検出関数による
大まかな穴検出



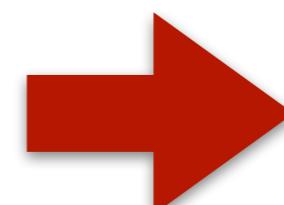
円フィッティングによる詳細な穴位置検出



- 辺検出・キューブのサイズ算出

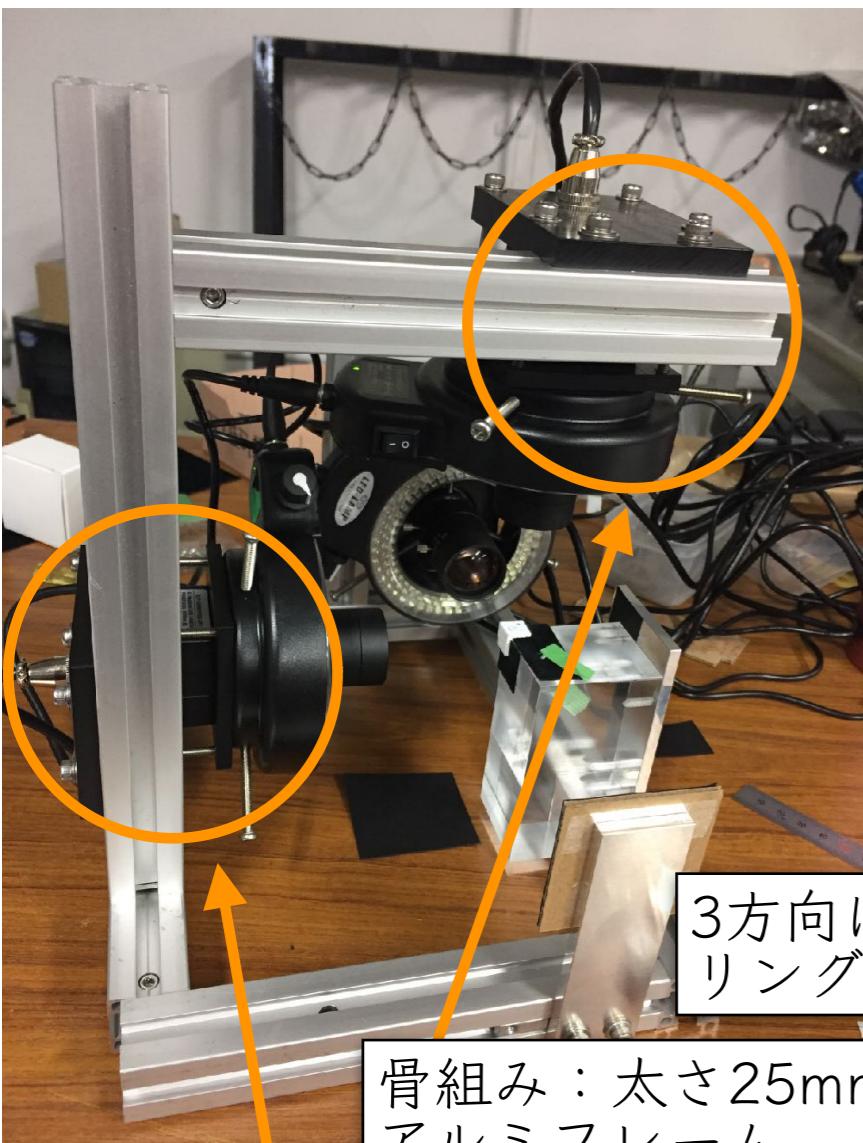


openCV 上の関数を用いた
輪郭検出、直線検出

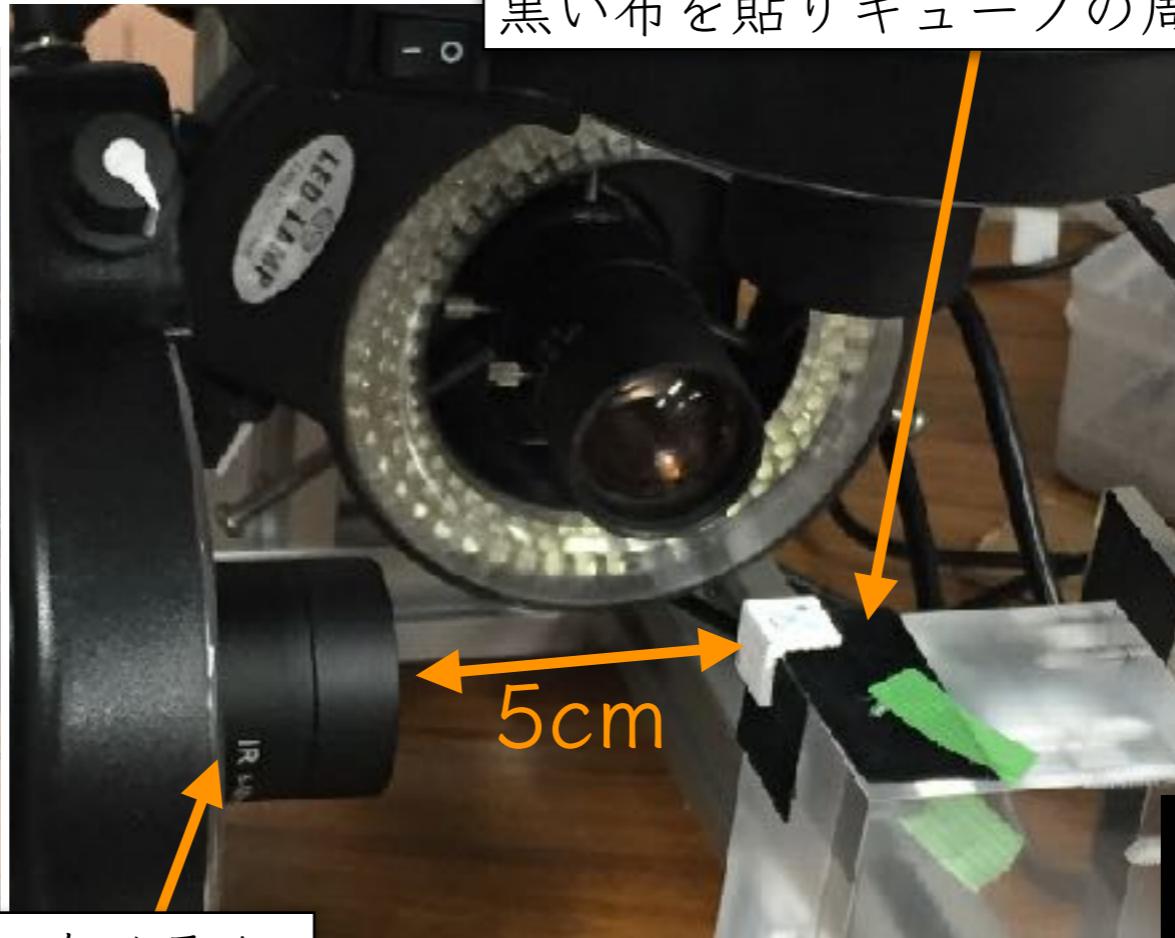


撮影時の傾き補正、
表面のバンプ(凹凸)検出

前回の報告：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製作（スズノ技研）

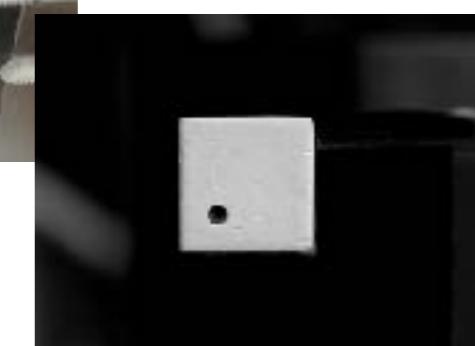


- 3方向からの三面同時撮影
- 焦点距離5cmでの撮影
- 各カメラはリング状のLED、拡大レンズ（右図）を装備
- 手でキューブを回転し、残りの三面の撮影

リアコンバータ

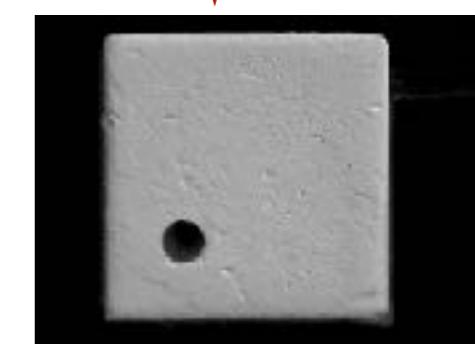


X2 TV EXTENDER JAPAN



使用前

約2倍の分解能

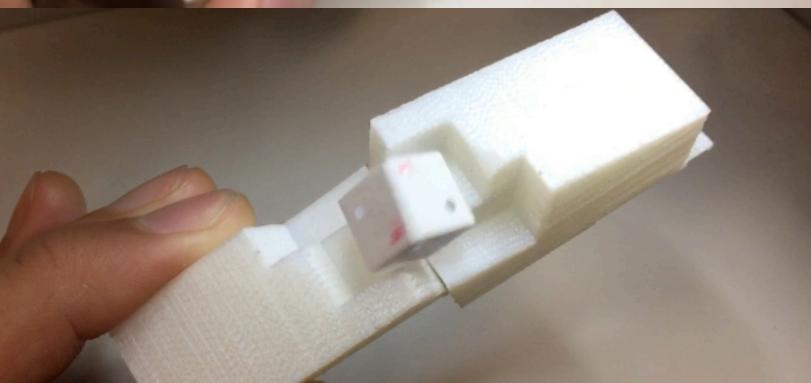
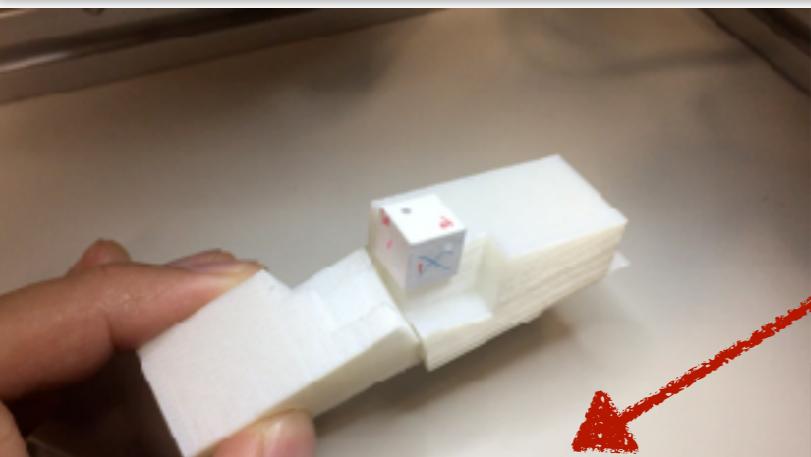


使用後

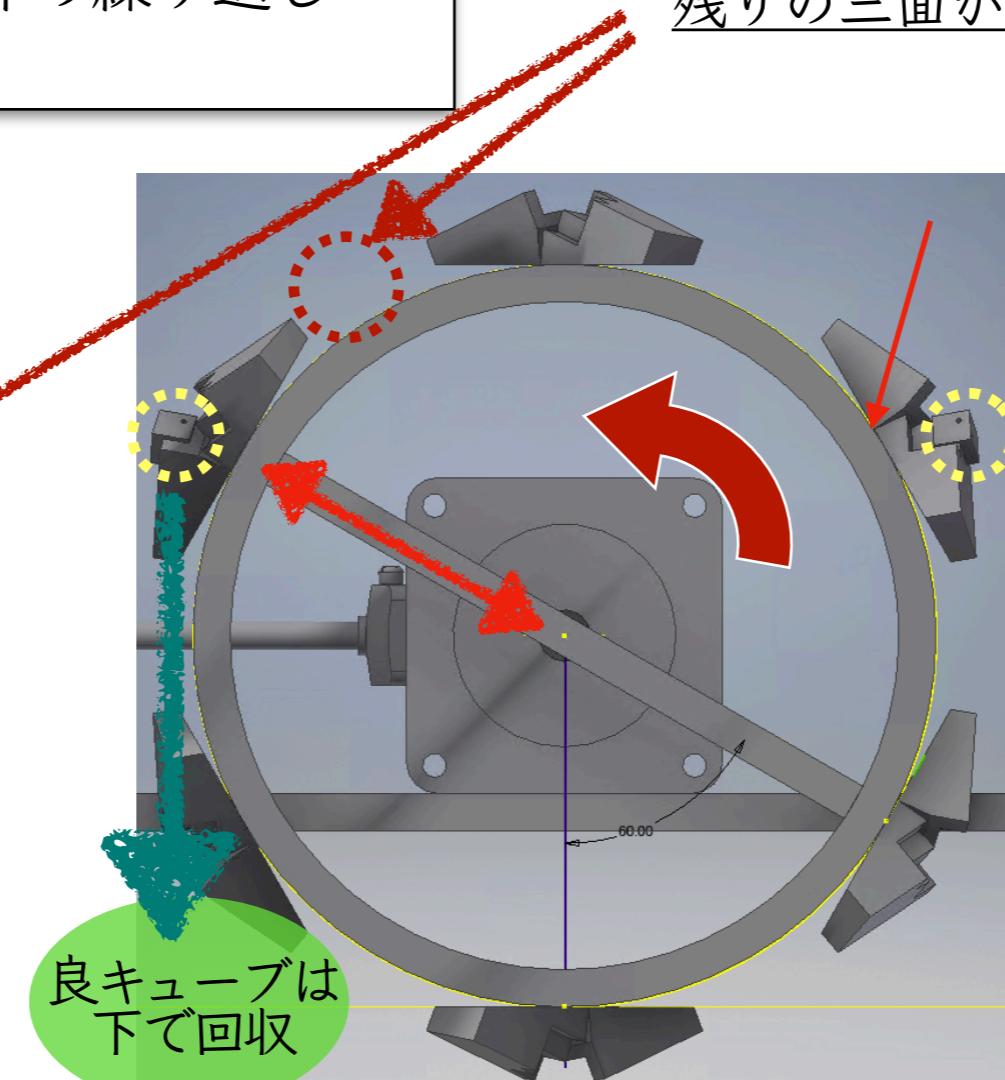
1 pixel ~ 15 μm

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
 - 人間が行うので選別ミスの可能性
 - 各キューブにつき上記操作の繰り返し：
時間がかかる



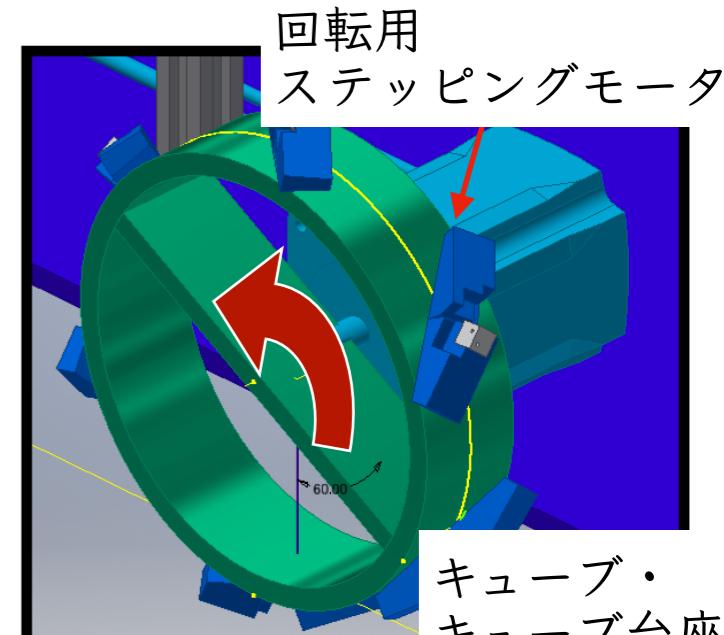
手元の PC 操作で、
回転→静止→撮影→回転→静止→撮影…
を行う



撮影システムの改良

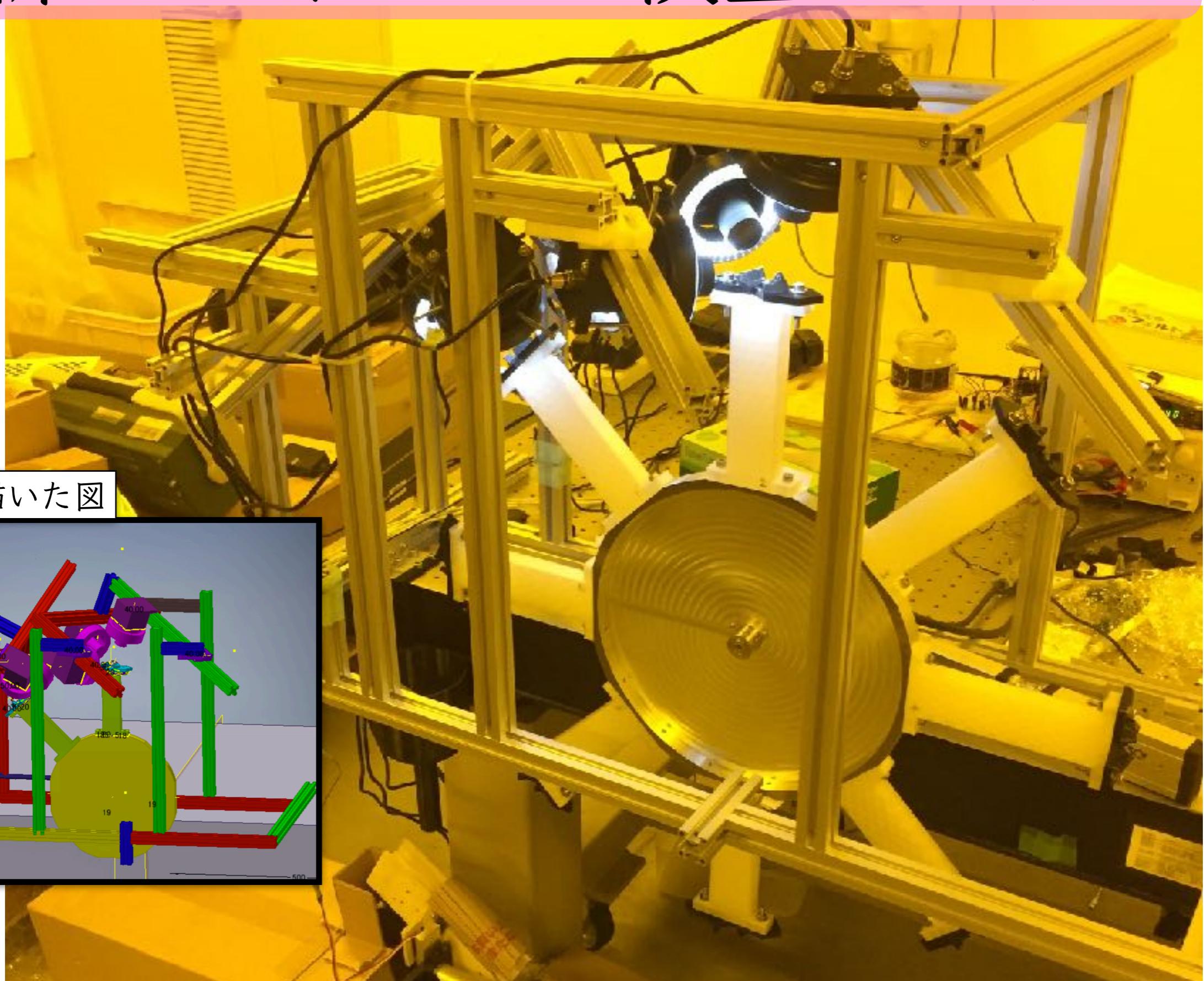
- 2つの台座が向かい合う形。
- カメラを更に3台用意 (合計6台)、残りの三面
を別の場所で撮影。
- キューブを転がして向かい側に移動させれば
残りの三面が現れる。

新しいキューブ台座案



キューブ・
キューブ台座
10

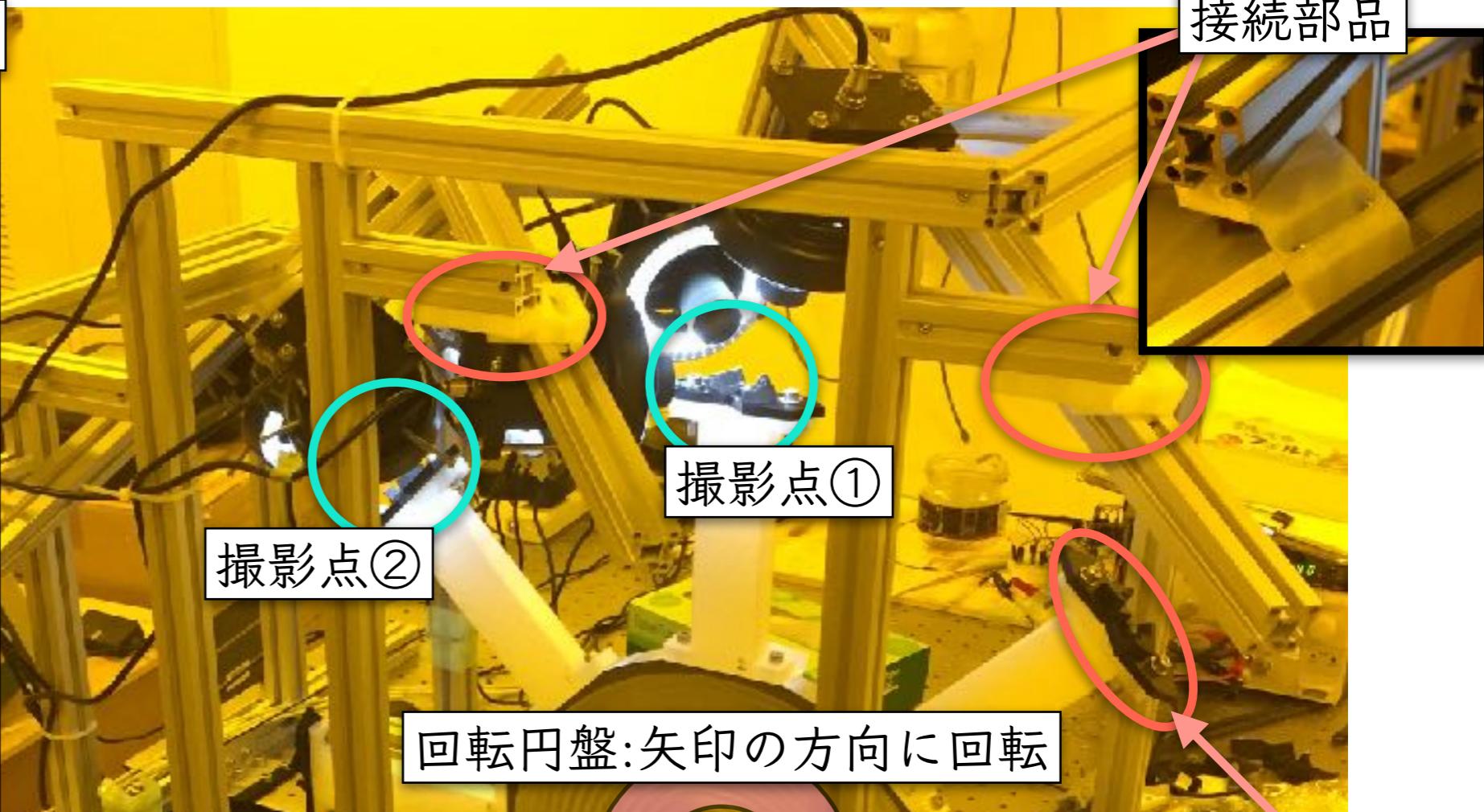
新しいキューブ検査システム



CAD で描いた図

新しいキューブ検査システム

6台のカメラ(+リング LED)



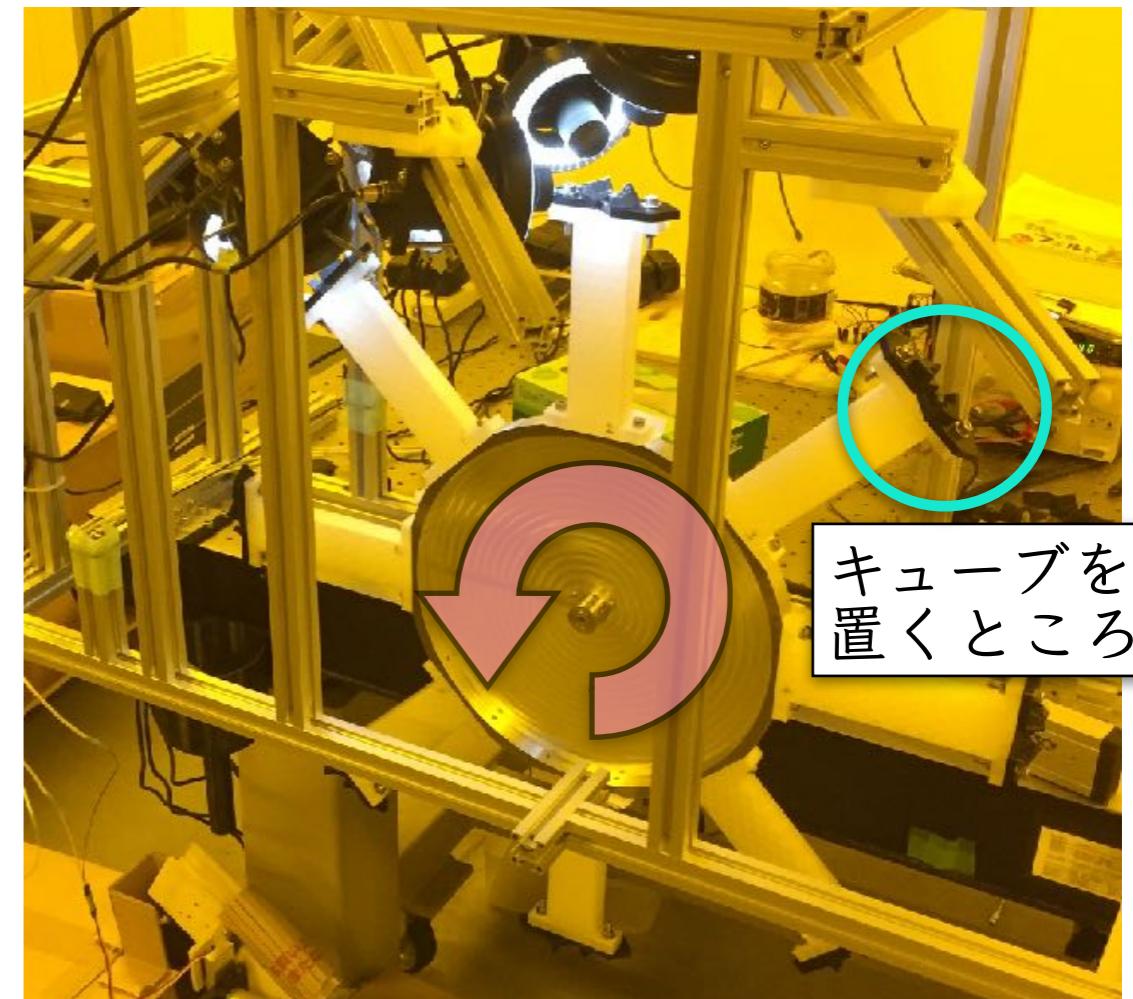
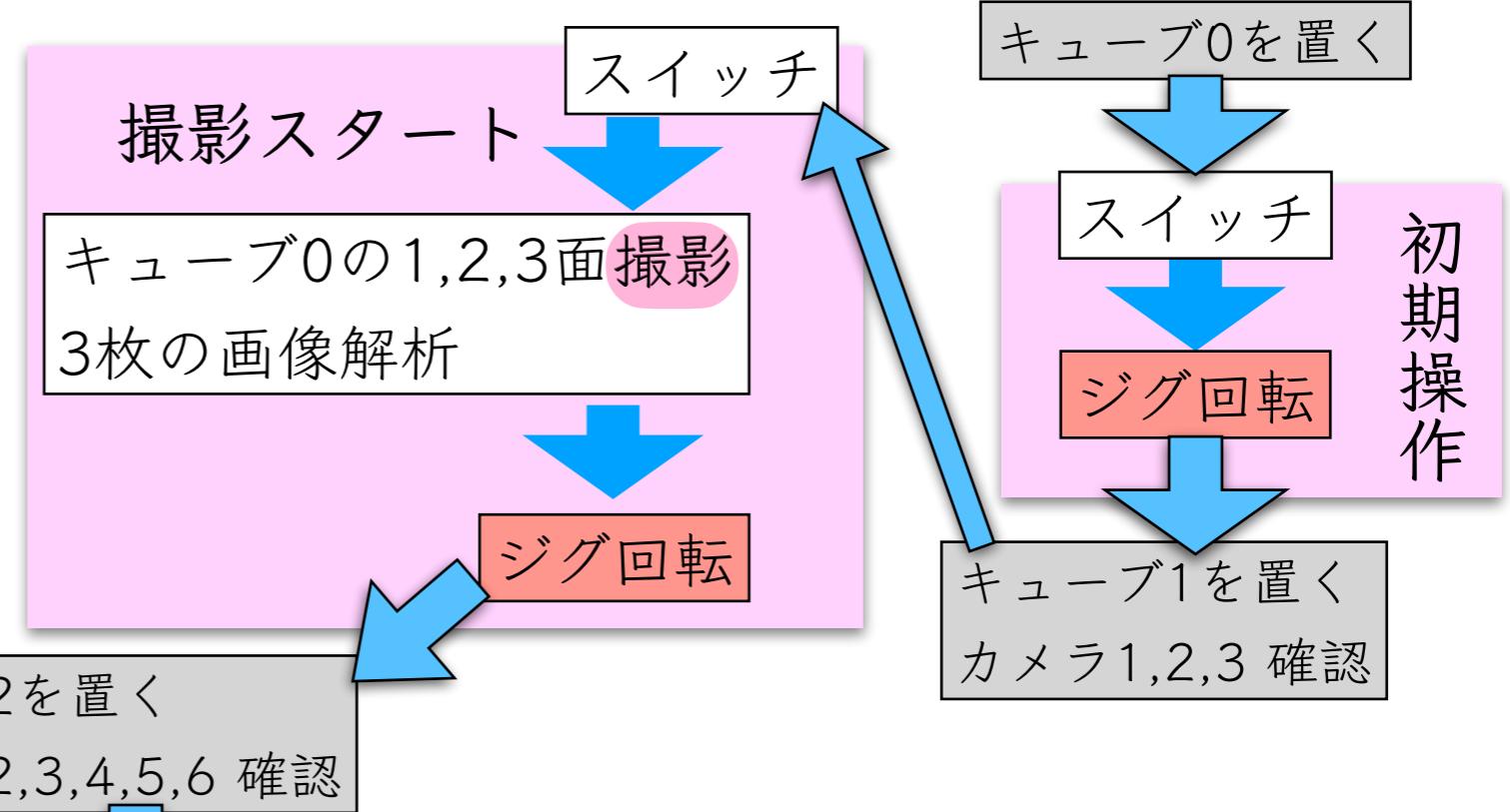
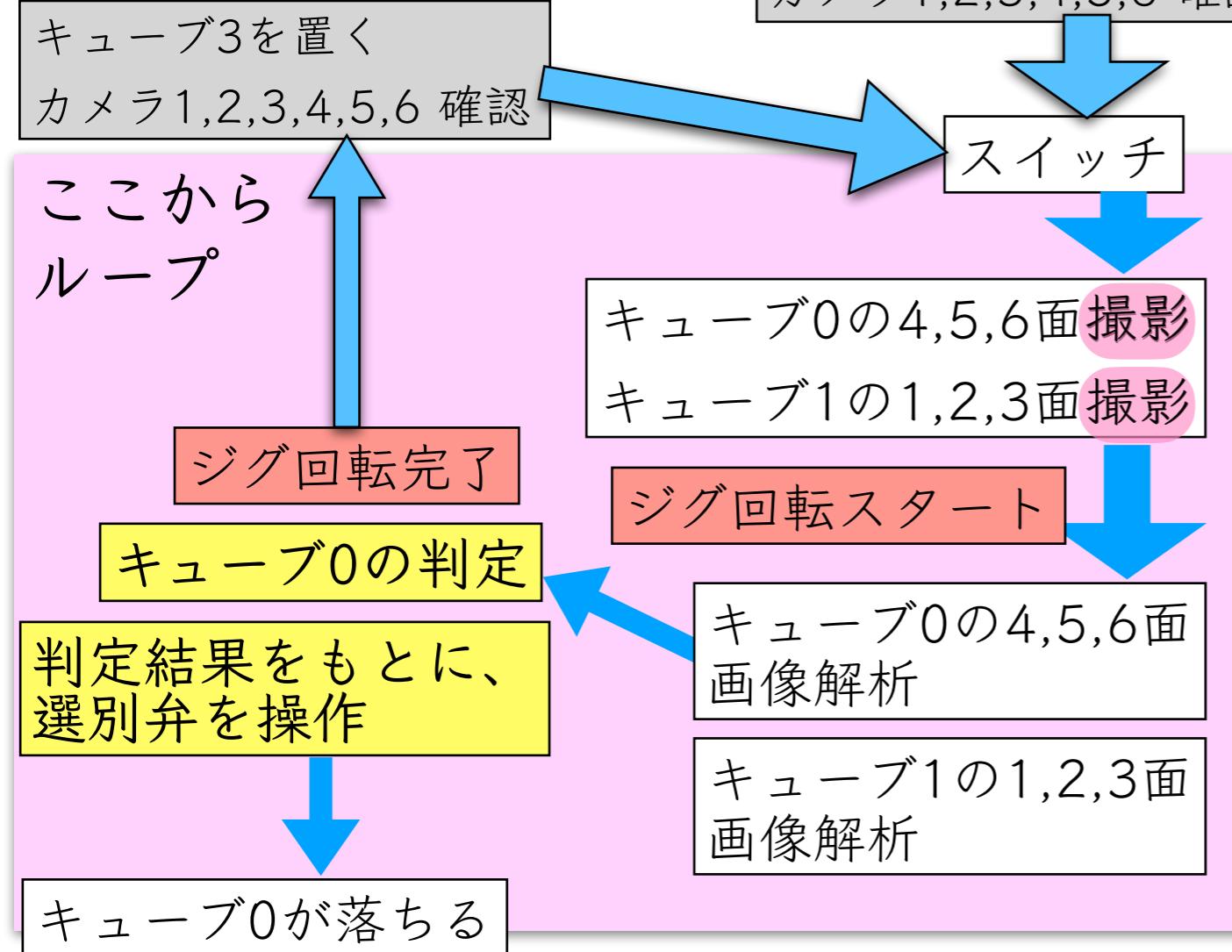
サーボモータで
落ちてくる
キューブを選別

選別の流れ

回転速度 ~ 5 sec/45°

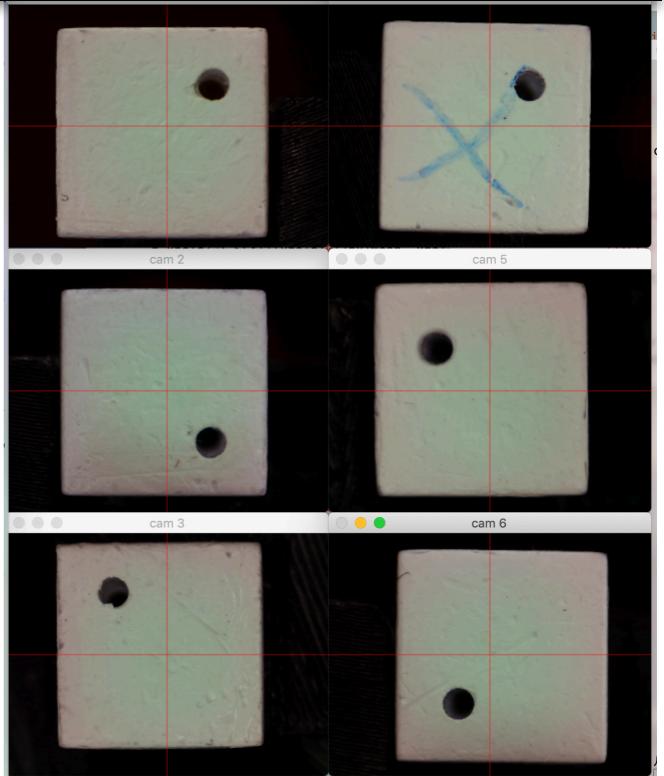
検査時間 ~ 6 sec/キューブ

12000個のキューブを20時間
で検査可能



カメラ・台座ごとの見え方の違い補正

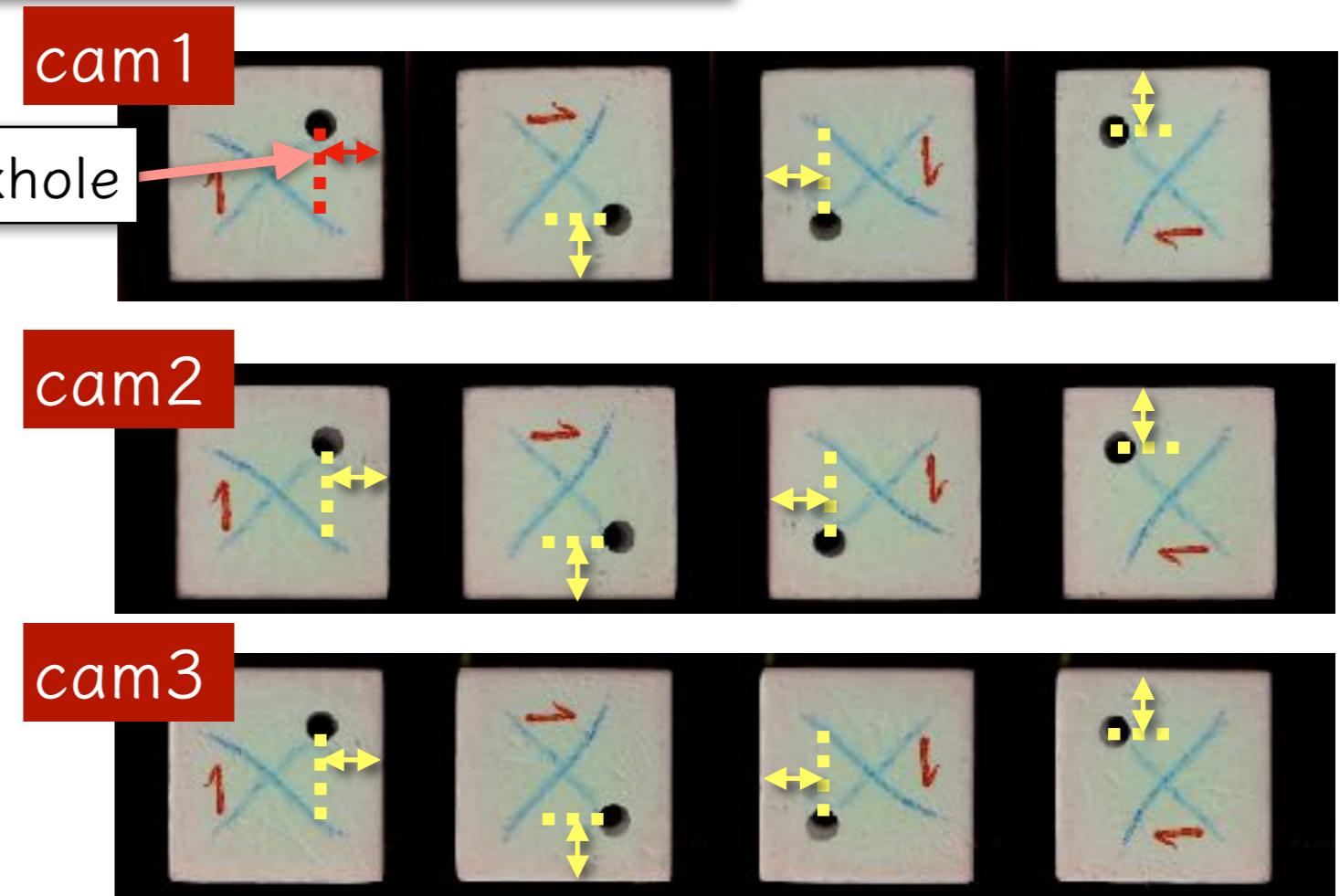
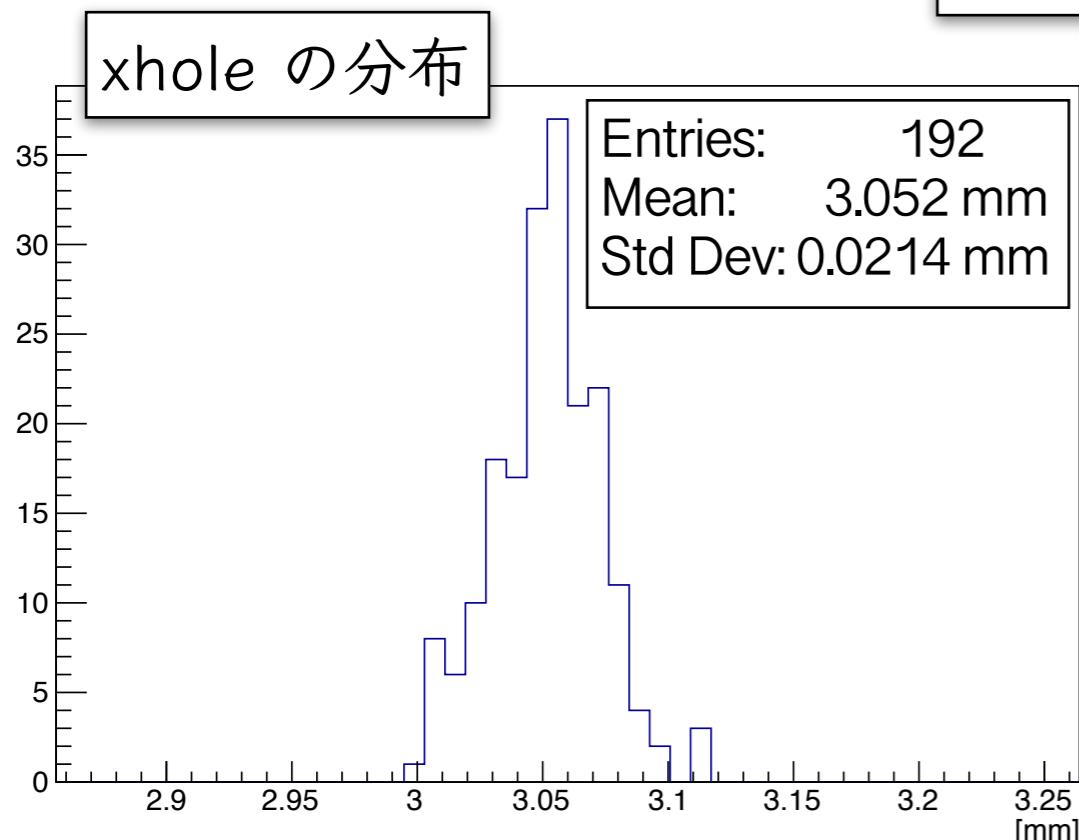
6台のカメラで撮影される画像



- 6つのカメラ、8個の台座で全く同じ写真は撮れない
- カメラ、台座に依存せずキューブの情報を抽出したい

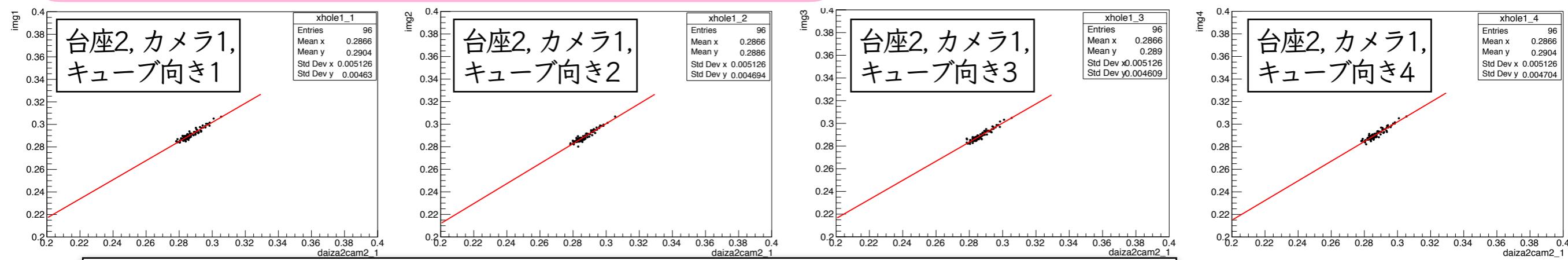
1つのキューブの1つの面をあらゆる条件で撮影し、抽出したパラメータが等しくなるような補正を行う。

キューブの向きによっても見え方が異なる

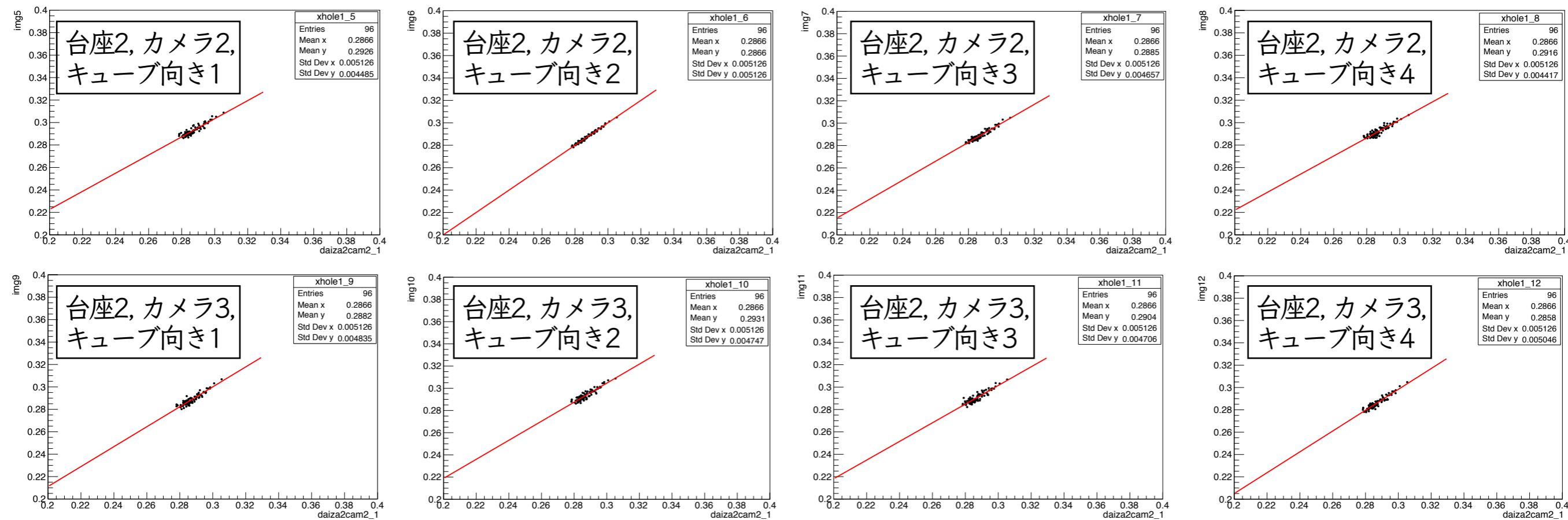


補正関数を求める

例：台座2、カメラ1,2,3について

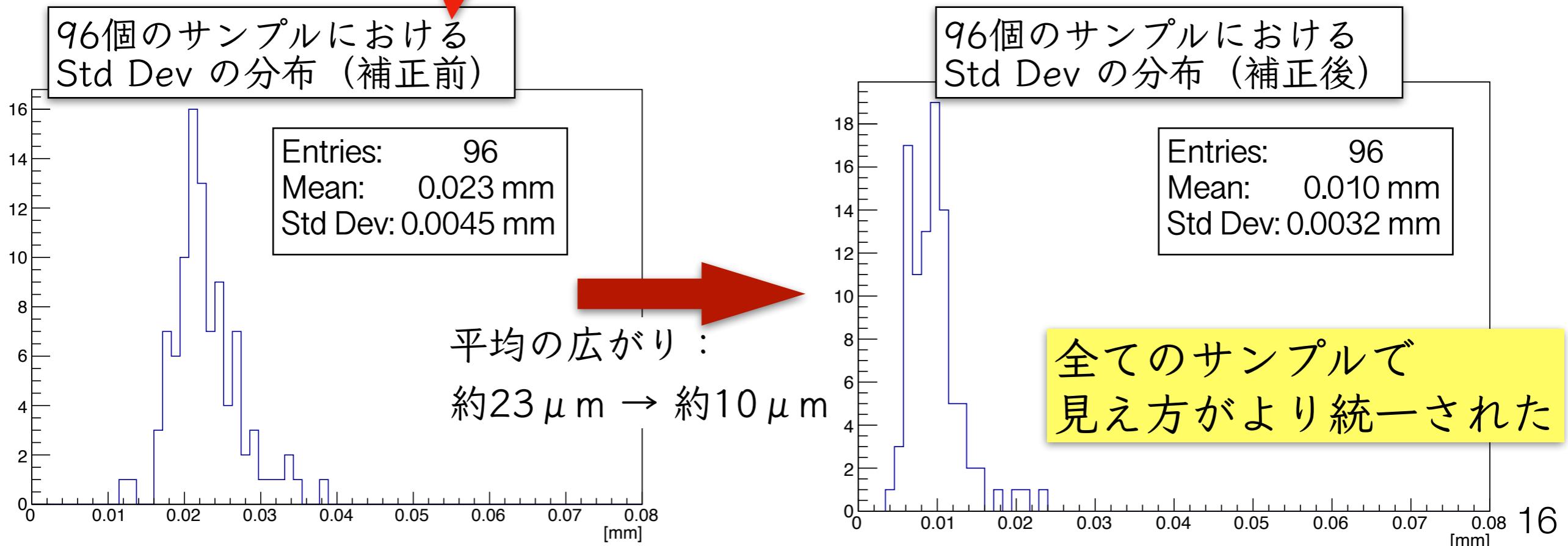
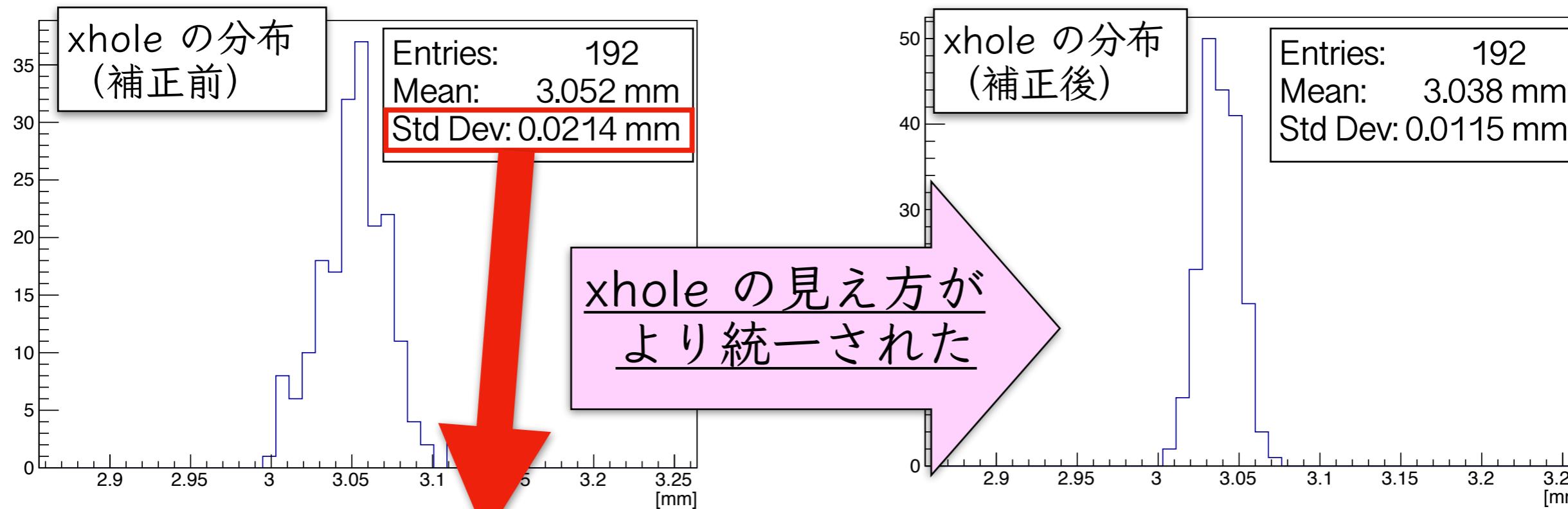


横軸はすべてカメラ2, 台座2, キューブの向き2での分布（基準）



- 16個のキューブ×6面 = 96個のサンプルについて、
xholeの値を基準となる条件でのxholeと比較、1次関数でフィッティング
- 6つのカメラ、8個の台座、4つの向きの全てについて行う

キューブ穴位置の補正

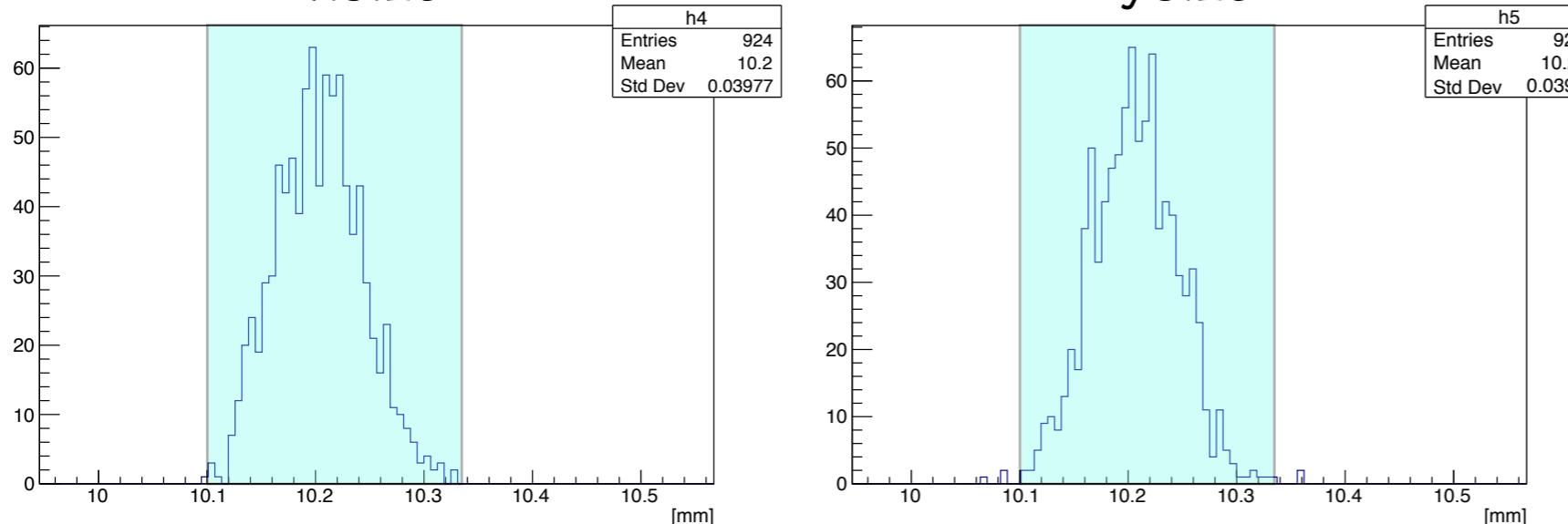


キューブ検査システム試運転

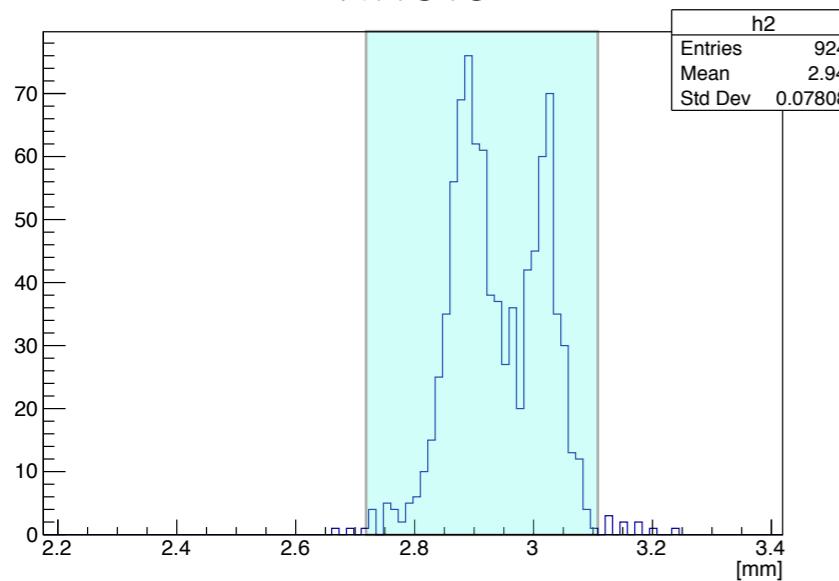
試運転として、ロシアにて検査済みのキューブを本システムに通す。
選別条件として、良品キューブの分布を参考にする。

良品キューブの分布 (青部分が選別領域)

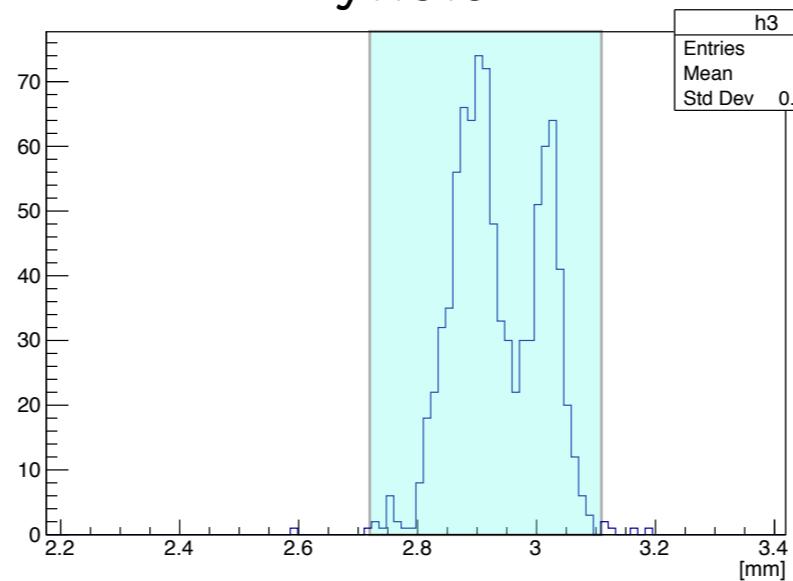
xsize ysize



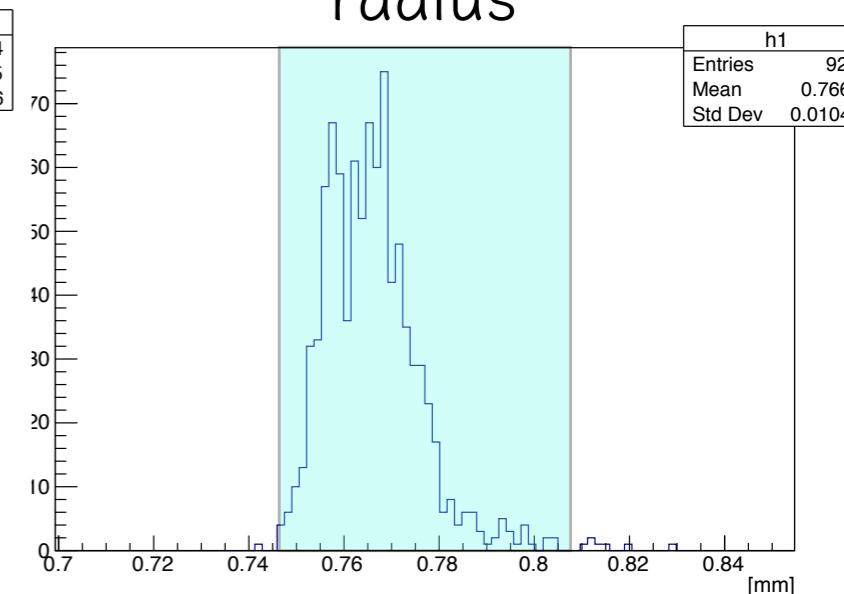
xhole



yhole



radius



ロシア方式良品キューブ：
検査時間 23分/154個 (9秒/個)
良品 123 /154 79.9%
不良品 23 /154 14.9%
再検査 8 /154 5.2%

ロシア方式不良品キューブ：
検査時間 46分/241個 (11.5秒/個)
良品 22 /241 9.1%
不良品 202 /241 83.8%
再検査 17 /241 7.1%

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
 - 1 キューブにつき10秒程度の短時間で検査可能な撮影システムの開発、画像解析の手法の開発を行った。
- **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
 - 溶着案での検出器組み上げの要請から、良品キューブを選別する条件を最適化する。
 - 良品キューブ選別後、プロトタイプ検出器を組み上げ、問題なくファイバーを通すことができることを実証する。
 - 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

キューブの選別条件の決定

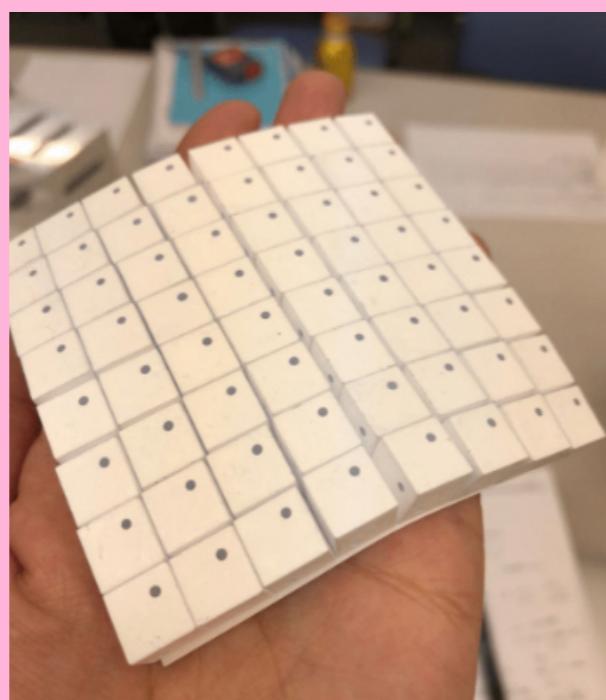
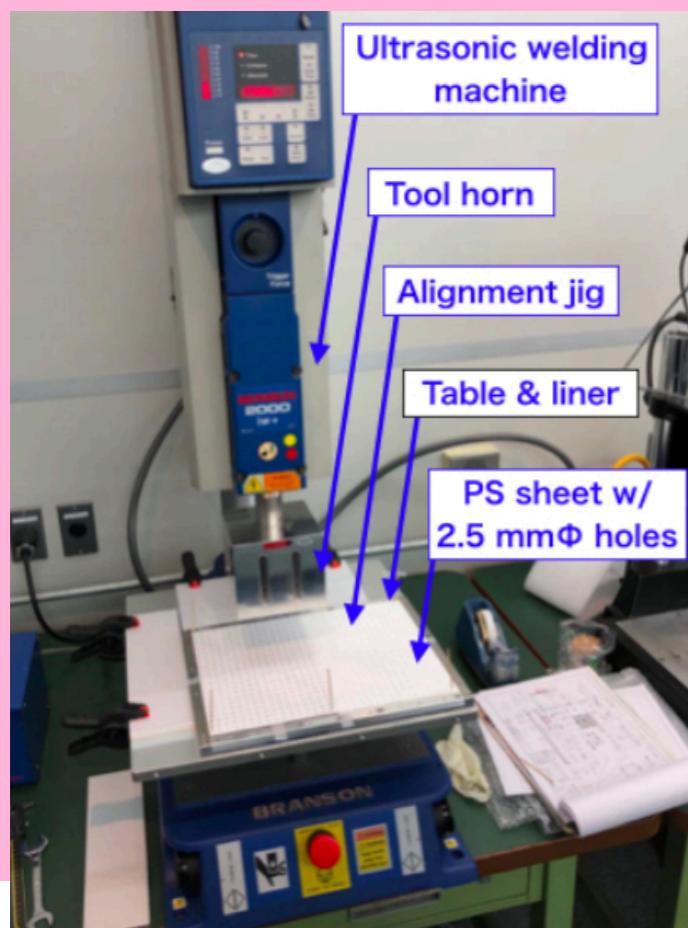
- 組み上げの為の条件をクリアした上で、なるべく多くのキューブが使用可能と判断される条件を求める。

溶着案（日本案）

キューブを同じ材質のシートに超音波を用いて溶着する。組み上げ後にファイバーを通す。

★キューブを“外形”で揃える

★穴の位置が揃っていないとファイバーが通らない

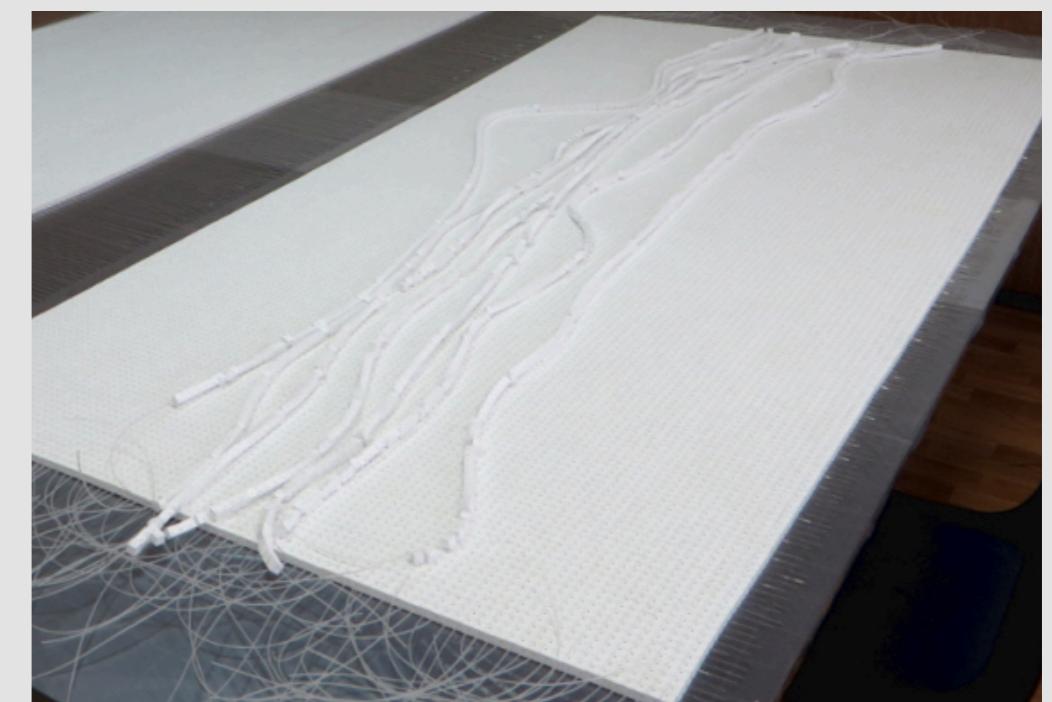


釣り糸案（ロシア案）

キューブを釣り糸を通して並べる。最後に釣り糸をファイバーに差し替える。

★キューブを“穴の位置”で揃える

★穴位置・キューブの大きさが揃っていないとファイバーに大きな負荷がかかる



キューブの選別条件の決定

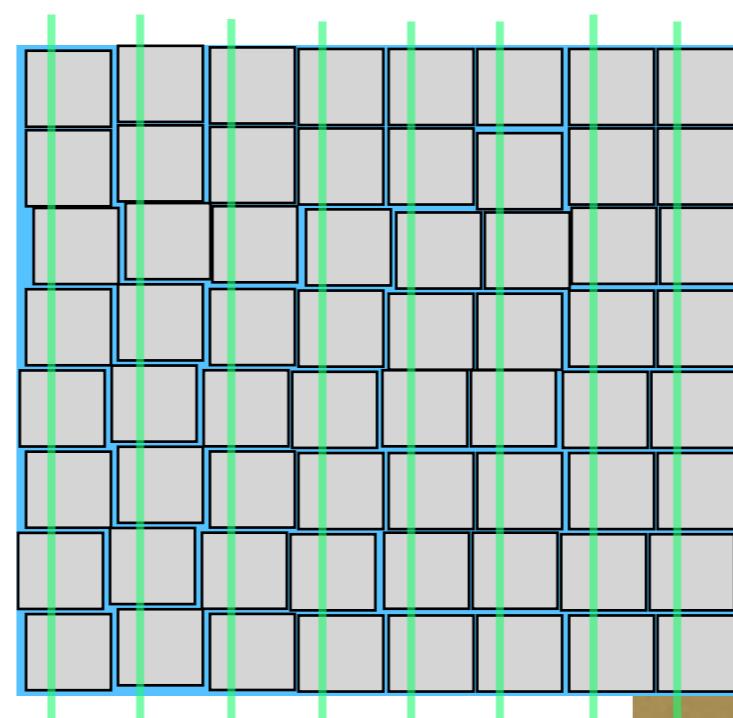
溶着は 8×8 キューブを単位として行う。

溶着ジグ内にキューブが収まり、かつ

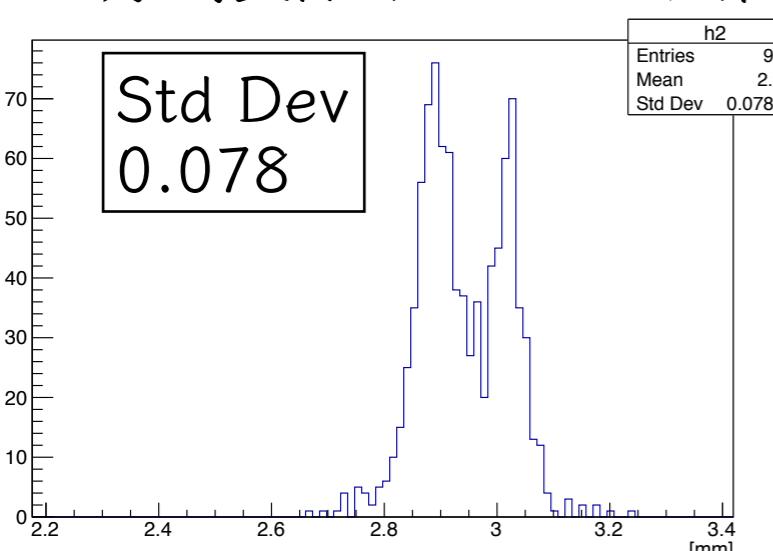
キューブ間でファイバーが通る為の穴の位置が揃う、という条件を課す。

ロシアから購入した12000個の未検査キューブはパラメータのばらつきが大きい。

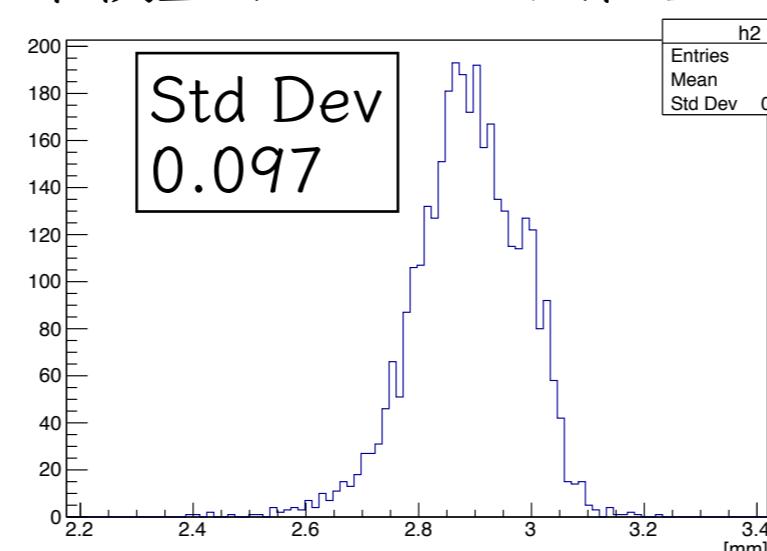
→ 現在、選別条件の最適化中。
最適化完了後に全数検査を実施予定。



ロシア方式良品キューブの穴位置



未検査キューブの穴位置



キューブ穴位置の検出 - カイニ乗値の最小化 -

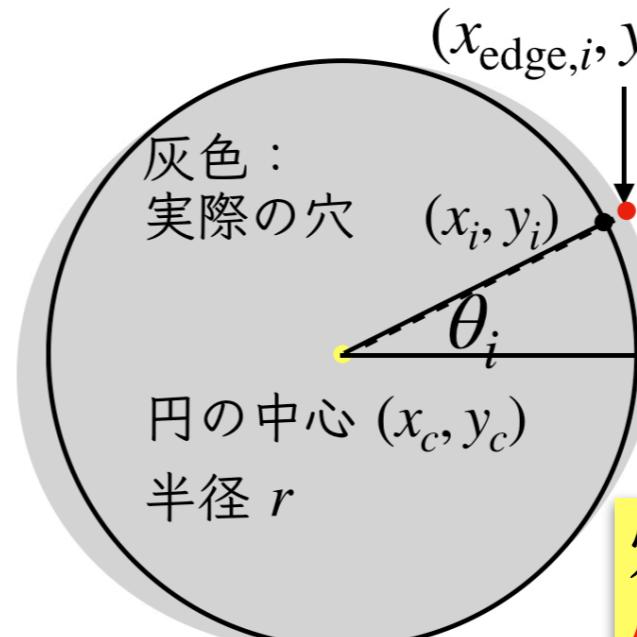
穴のエッジを検出し、それを円でフィッティングすることで正確な穴の中心を求める。

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

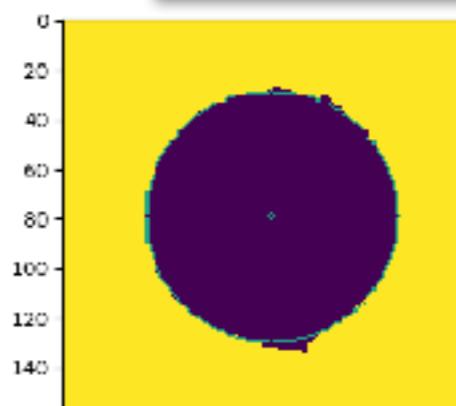
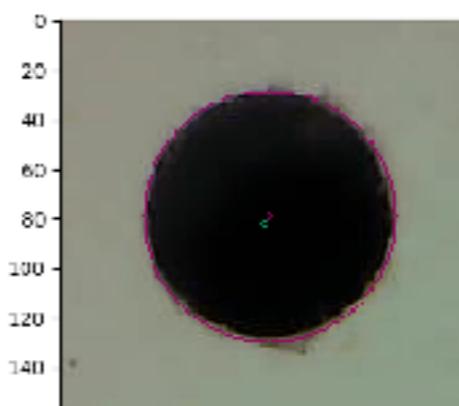
$$x_i = x_c + r \cos \theta_i, y_i = y_c - r \sin \theta_i$$

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。

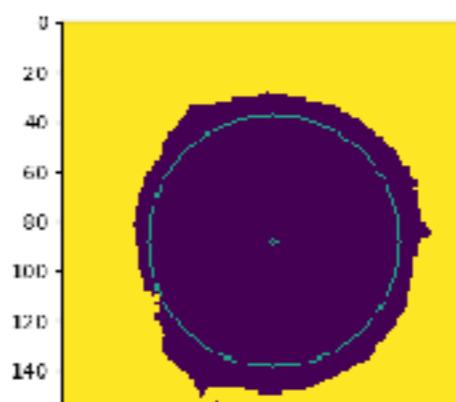
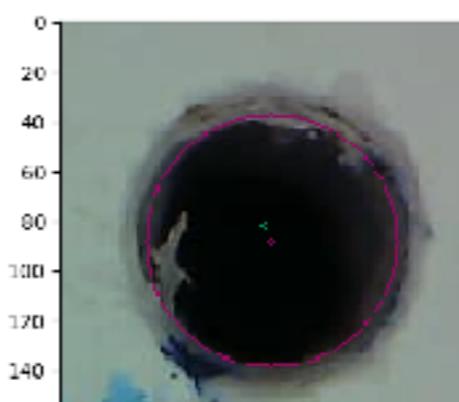


穴の状態に関わらず、
穴位置の最適化に成功!



良い状態の穴

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

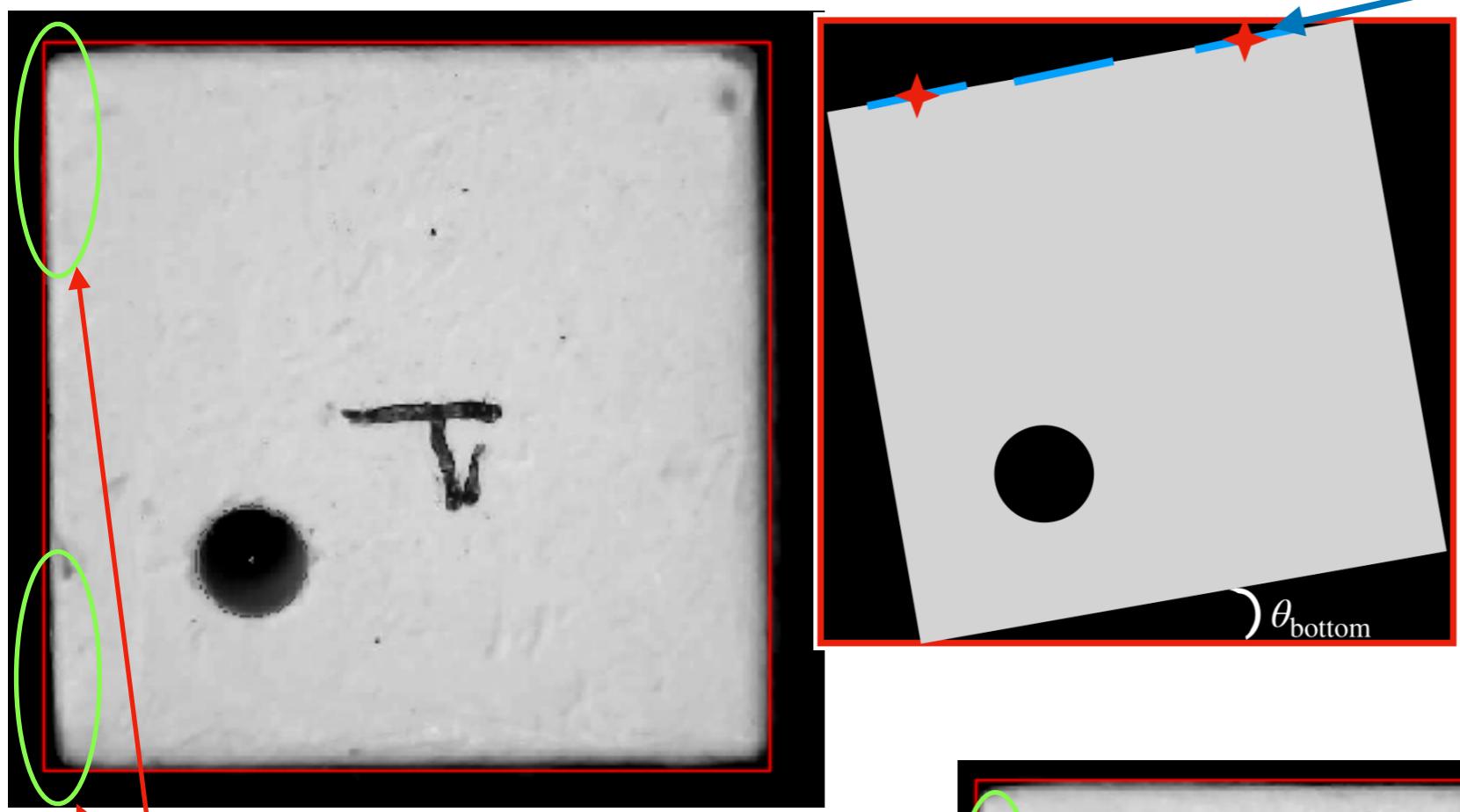


悪い状態の穴

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

* 画像上の円は最適化前のもの

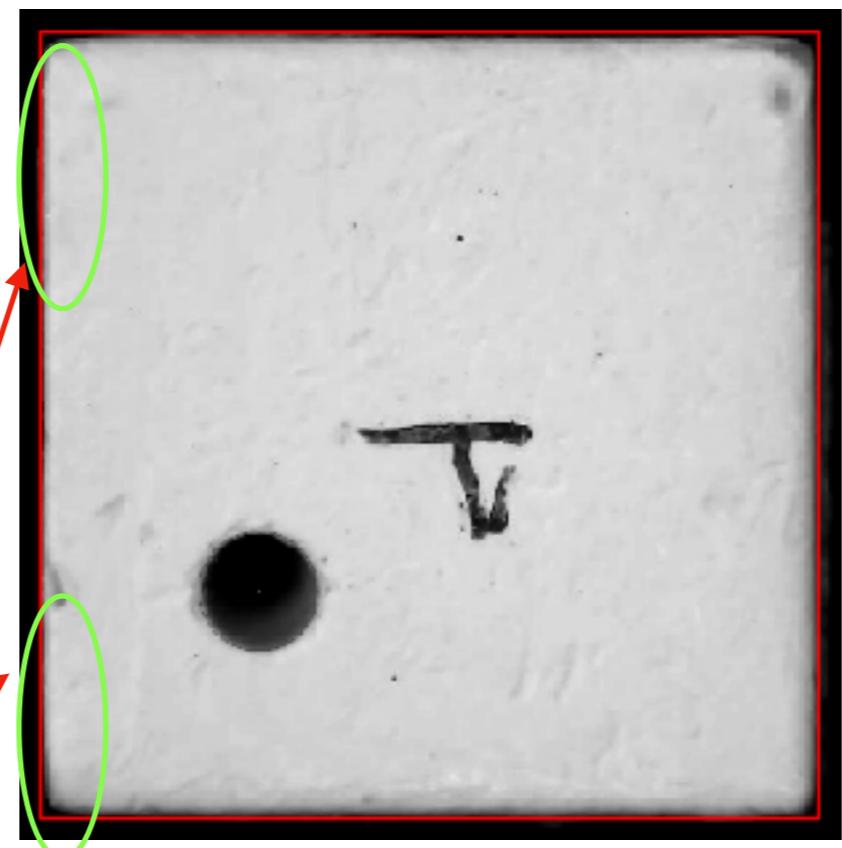
キューブの傾き補正



- 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

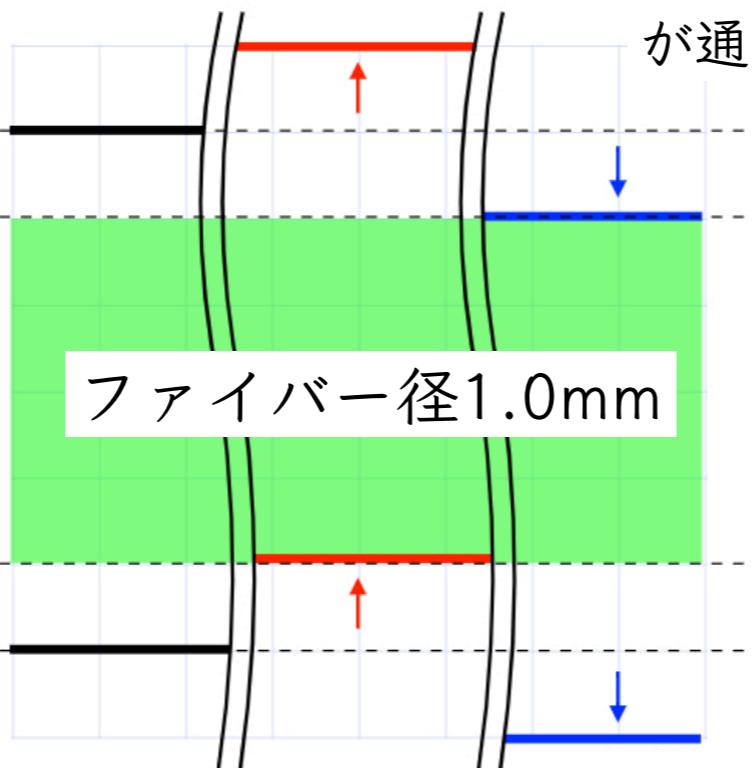
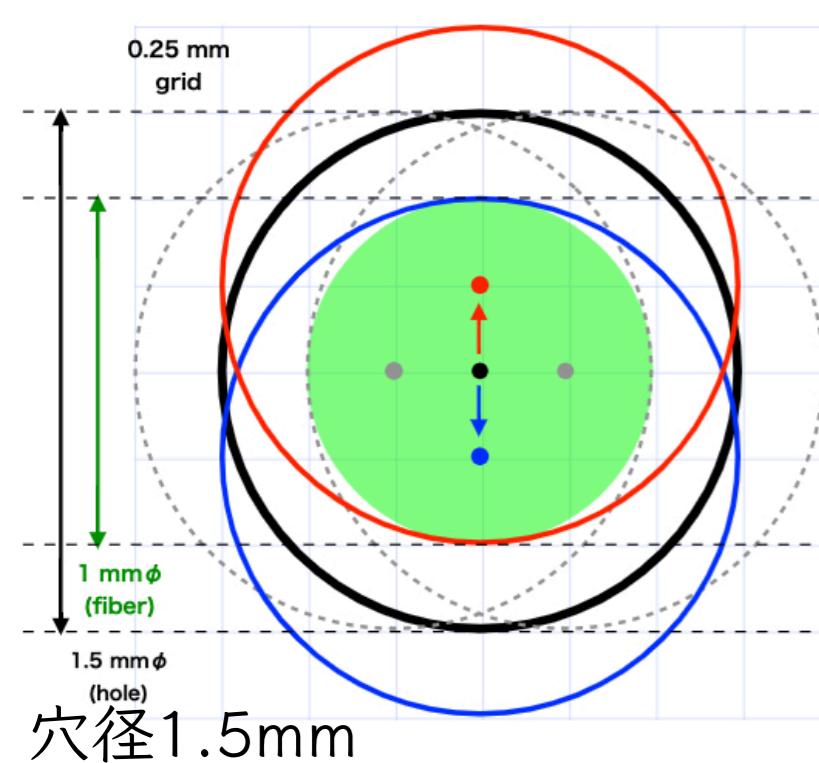
回転後: 補正により、隙間は解消された



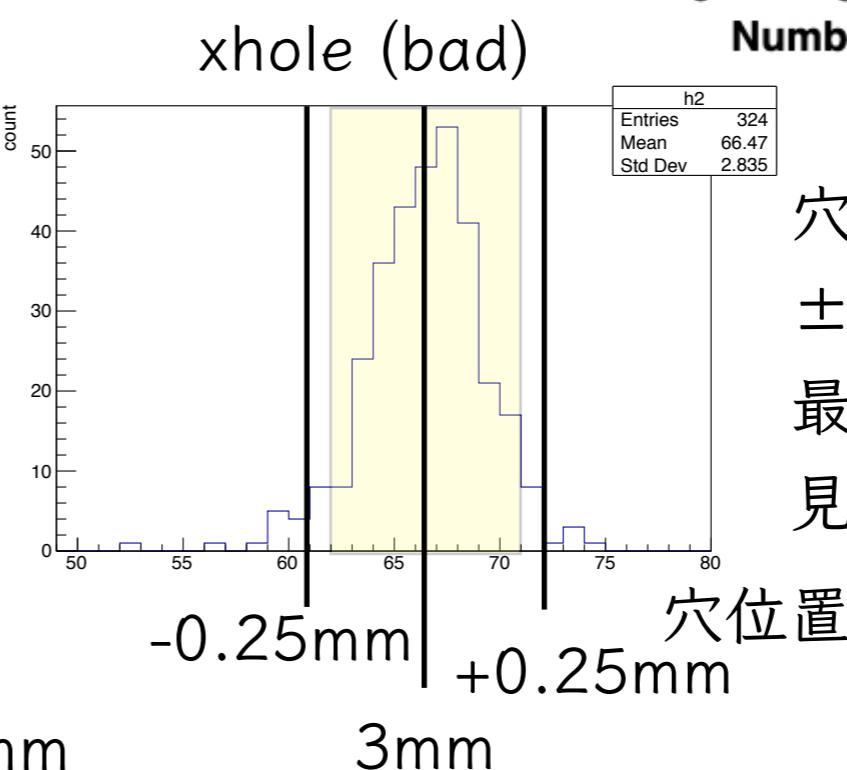
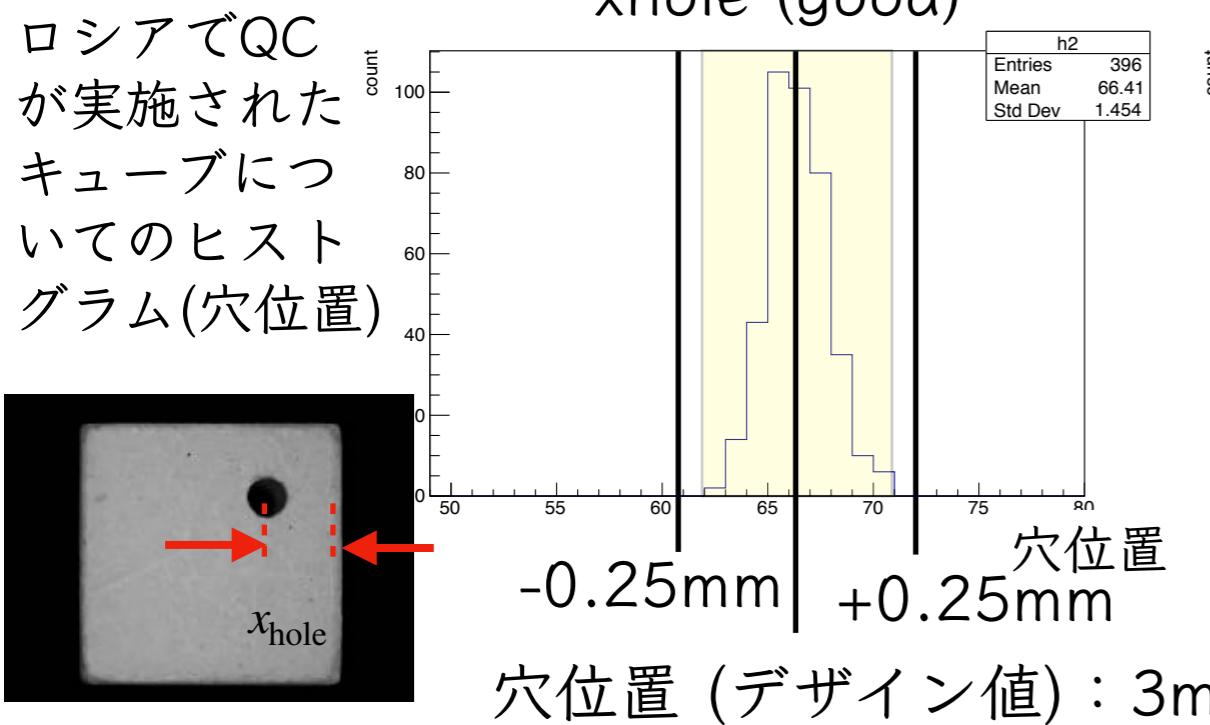
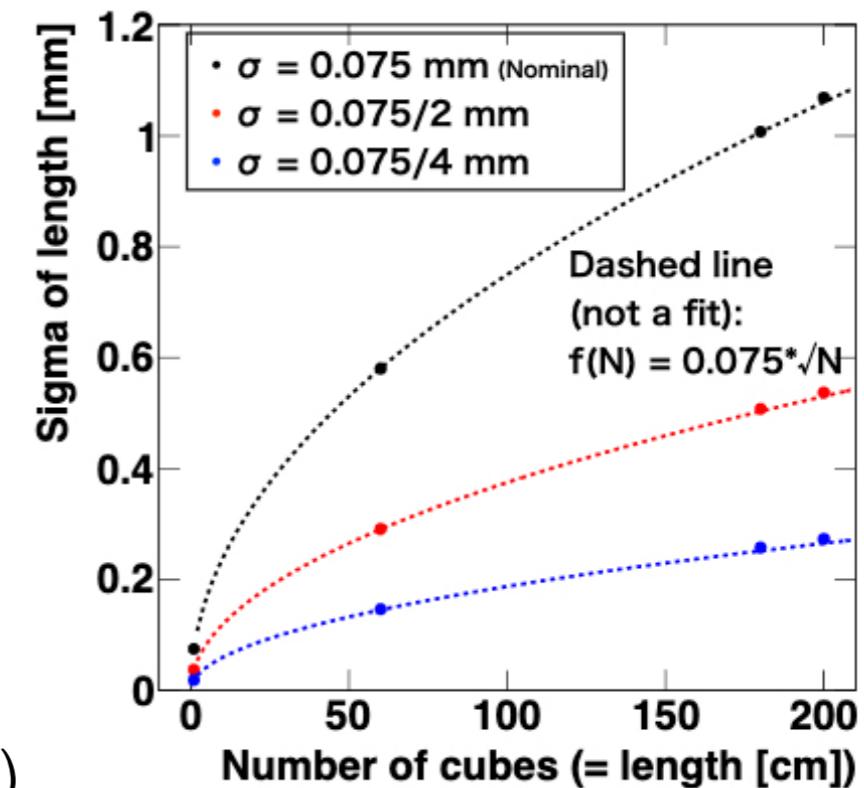
キューブの検出サイズ
(単位 pixel):
回転前: (667, 665)
→回転後: (661.0, 667.7)
1 pixel ~ 15 μm
x方向のサイズは補正された
y方向は過剰に回転してしまった? 統計をためて
詳しい確認が必要

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

パラメータ(穴位置)の許容範囲の決定



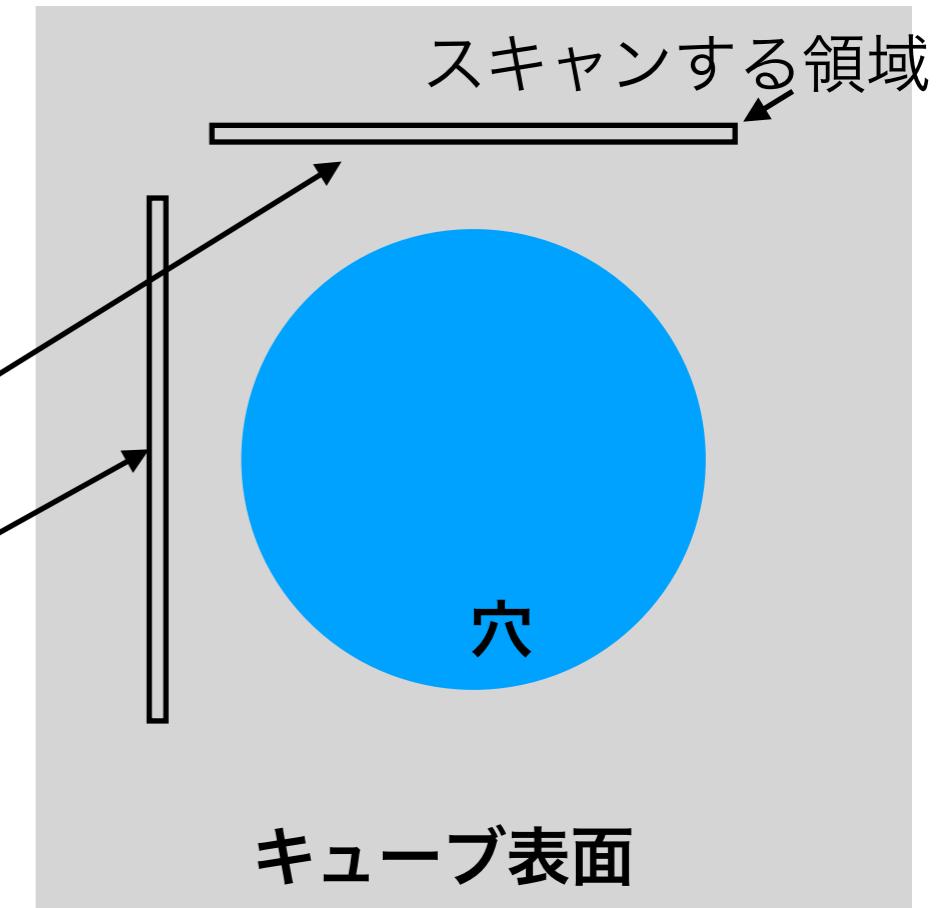
穴の位置が平均より ± 0.25 mm よりはずれていた場合、ファイバーは通らない。
それ未満のズレの場合でも、キューブ表面の膨らみや穴の傾きによりファイバーが通らないことが懸念される。



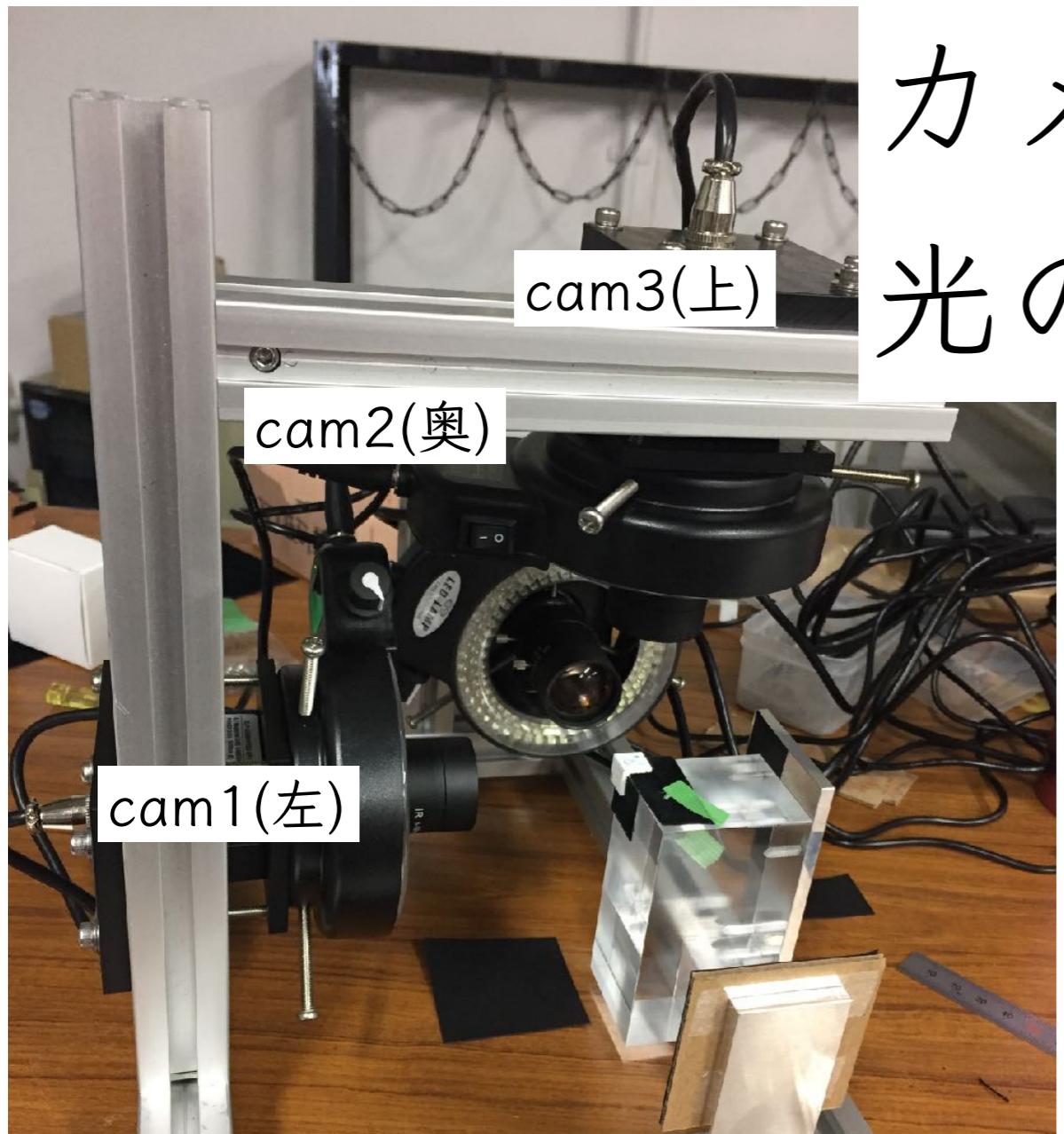
穴位置の許容範囲は ± 0.25 mm を目安に、最終的には分布の形を見て判断する

画像の二値化

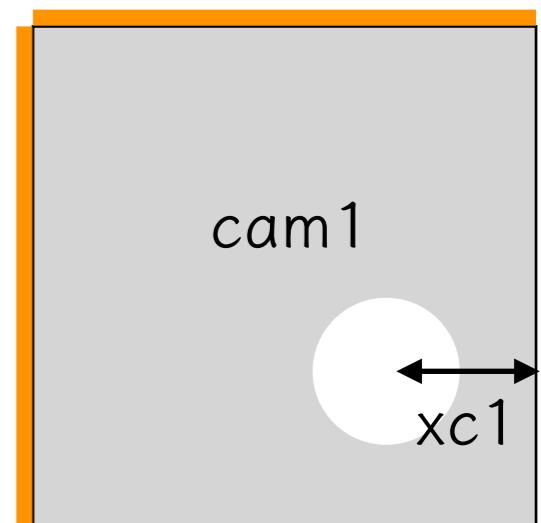
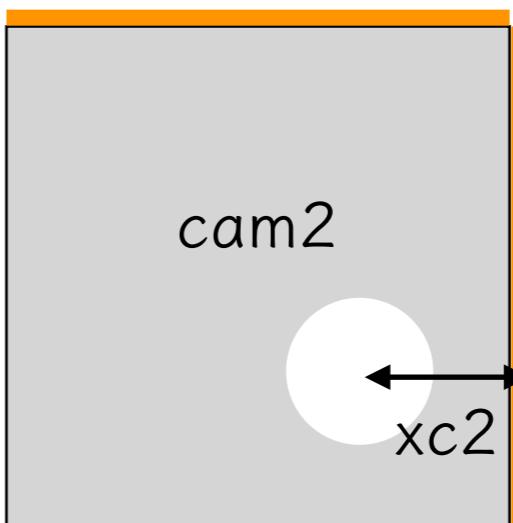
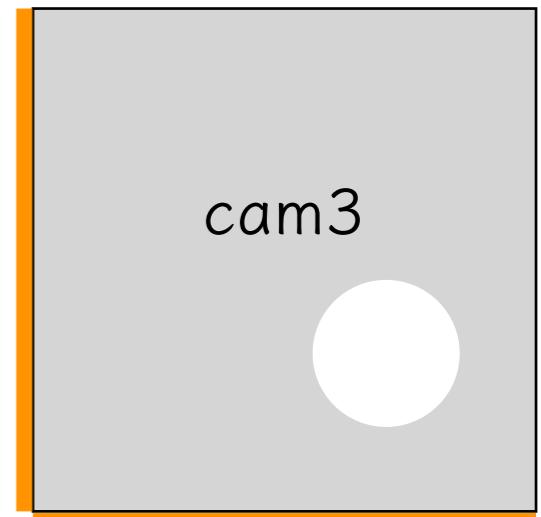
- 二値化のための threshold の決め方
- 穴の周囲の色の平均を参照値とする。
- 参照値の候補をふたつ (orそれ以上) 用意する
 - x方向にスキャンした平均
 - y方向にスキャンした平均
- キューブ表面の傷・印等の影響を減らすため、候補のうち、最も白いもののを参照値として採用する。



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。

回転円盤

- 半径
 - CAD 上での半径の値を勘違いしており、小さい半径の円盤を発注していた。
→正しい半径になるように追加の部品を作成した。
 - 急遽、アルミでスズノ技研さんに製作を依頼したが、重く円盤の慣性モーメントが大きくなり、扱いづらい。
 - 同様の形状のものを 3Dプリンタで作った。

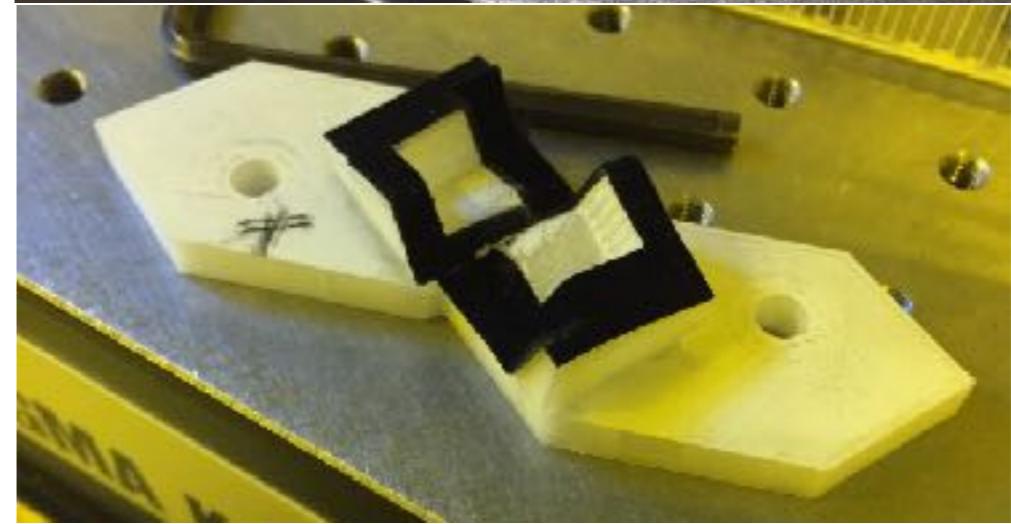
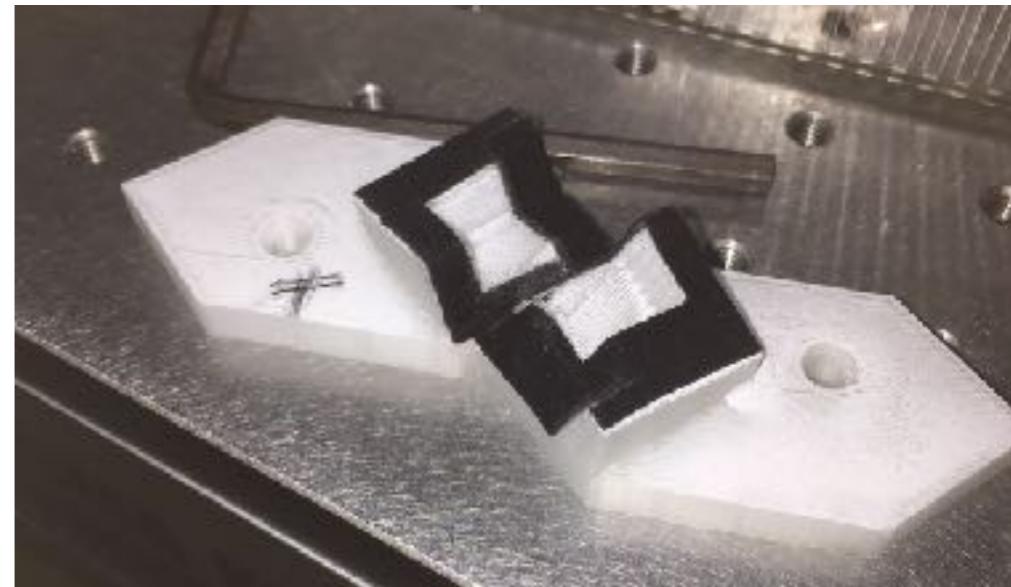


回転円盤

- 回転速度
 - 回転が不安定にならないか、停止が滑らかか
 - キューブがうまく転がるか
 - 大量検査のためになるべく短時間で
- 以上の条件を満たすよう、回転速度の最適化を行った。
- 現在の回転の様子：

キューブ台座：背景を黒くする

- 以前は東京技研さんでもらったほとんど反射のない布を貼った。
- 今回もそうするつもりだったが、形状が細かく複雑で、貼るのが困難
- 少しづれてしまうと下地の白が見えてしまう
- はみ出で貼るとキューブが台座にフィットしない

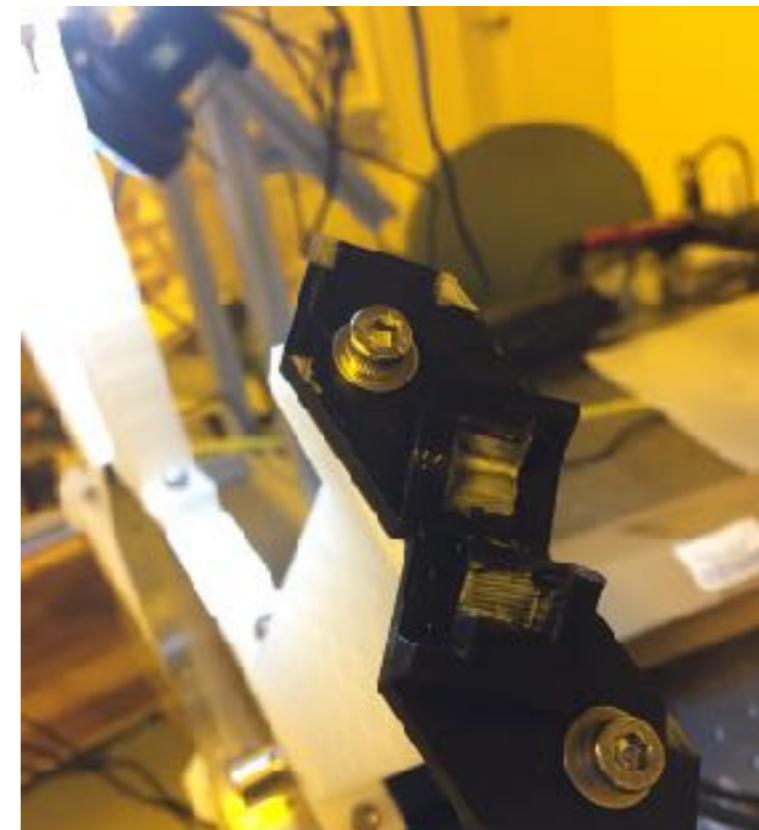
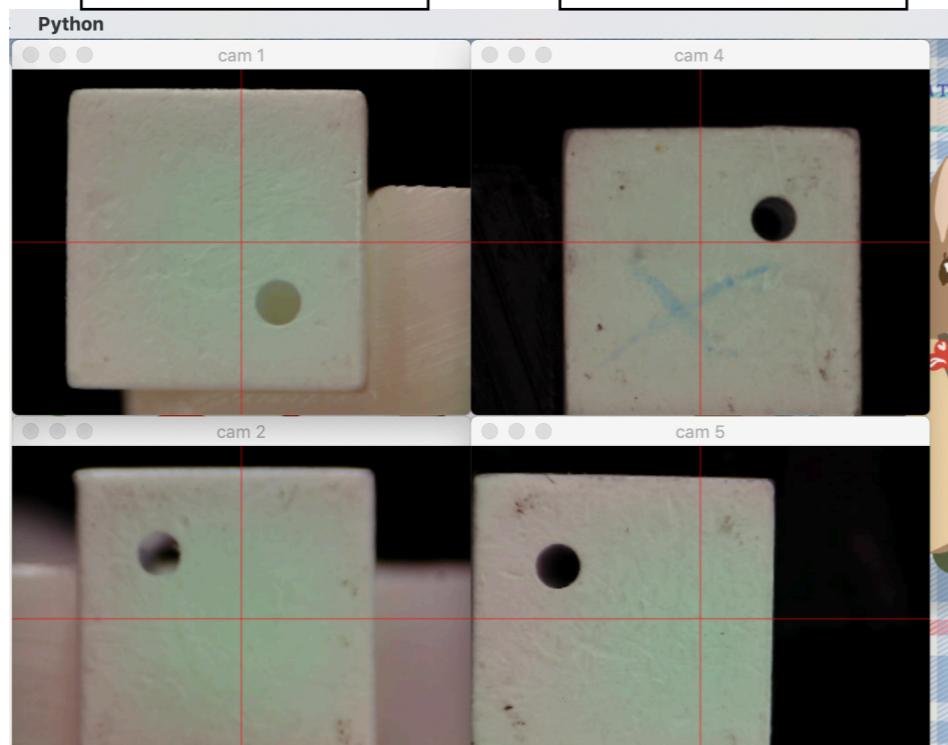


より簡単に黒くする

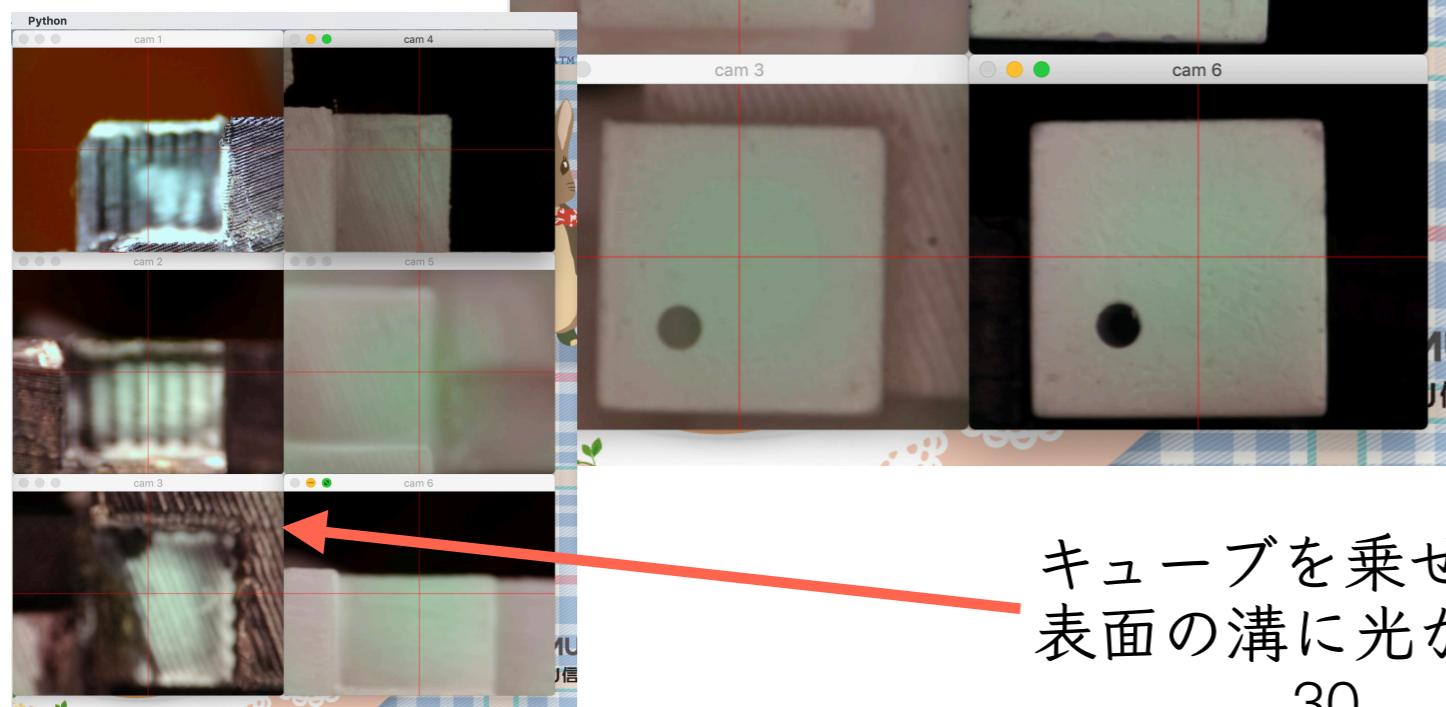
- 黒の 3D プリンタ素材
 - (つや消し黒の水性アクリルスプレー)
- これらが使えるか試してみた。

白プリント

黒プリント



黒プリント→台座部以外をマスキングして
テフロン処理(処理後は白く残る)→
余分な白い部分をマッキーで塗りつぶす

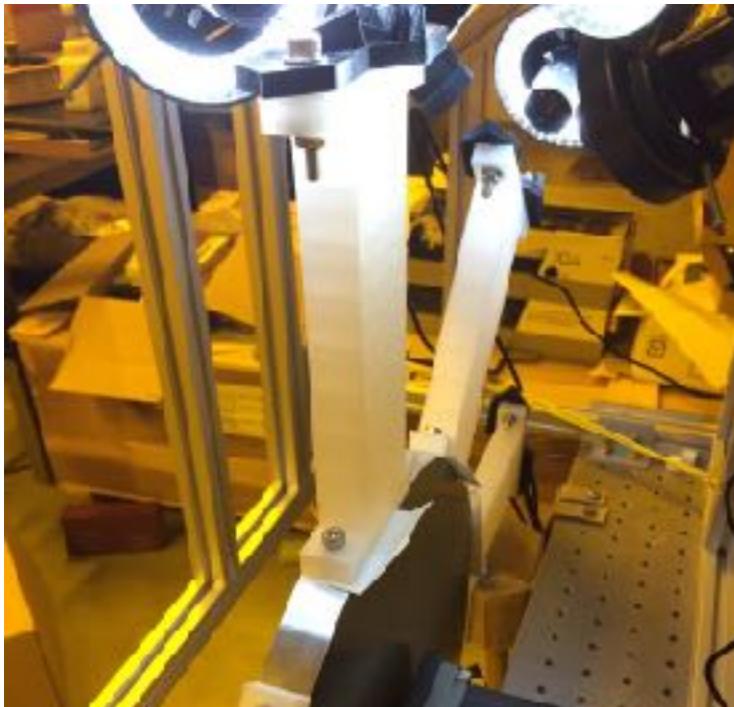


背景が黒のとき、三方向から光をあてると、
キューブの白と背景のコントラストにより、
黒の部分は詳細が写らなくなるらしい。

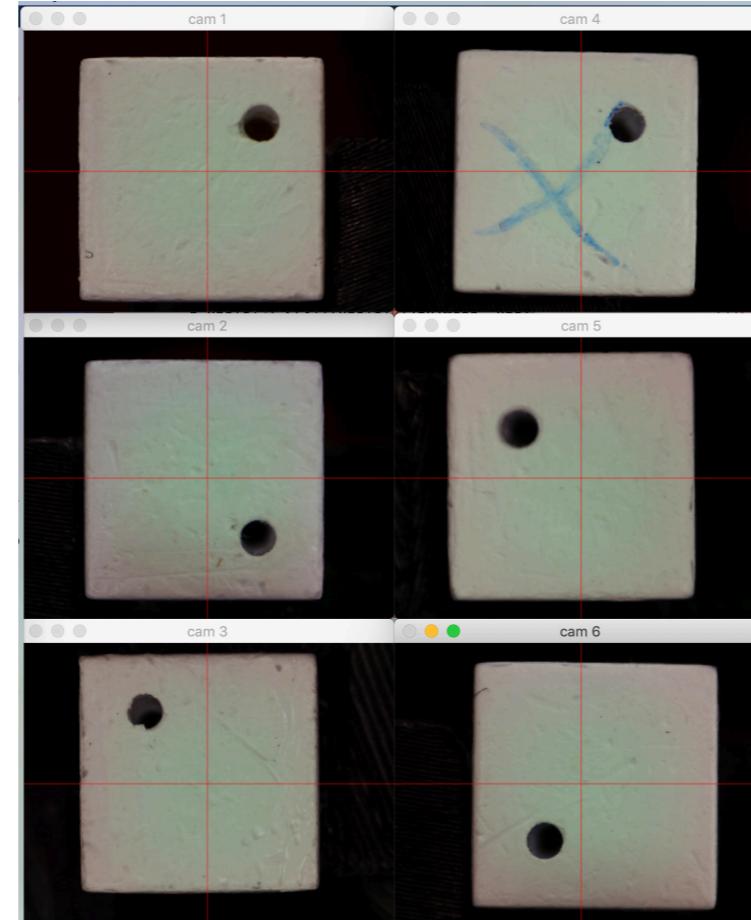
キューブを乗せずに撮影すると、
表面の溝に光が反射しているのが写る。

カメラ、台座の位置の微調整

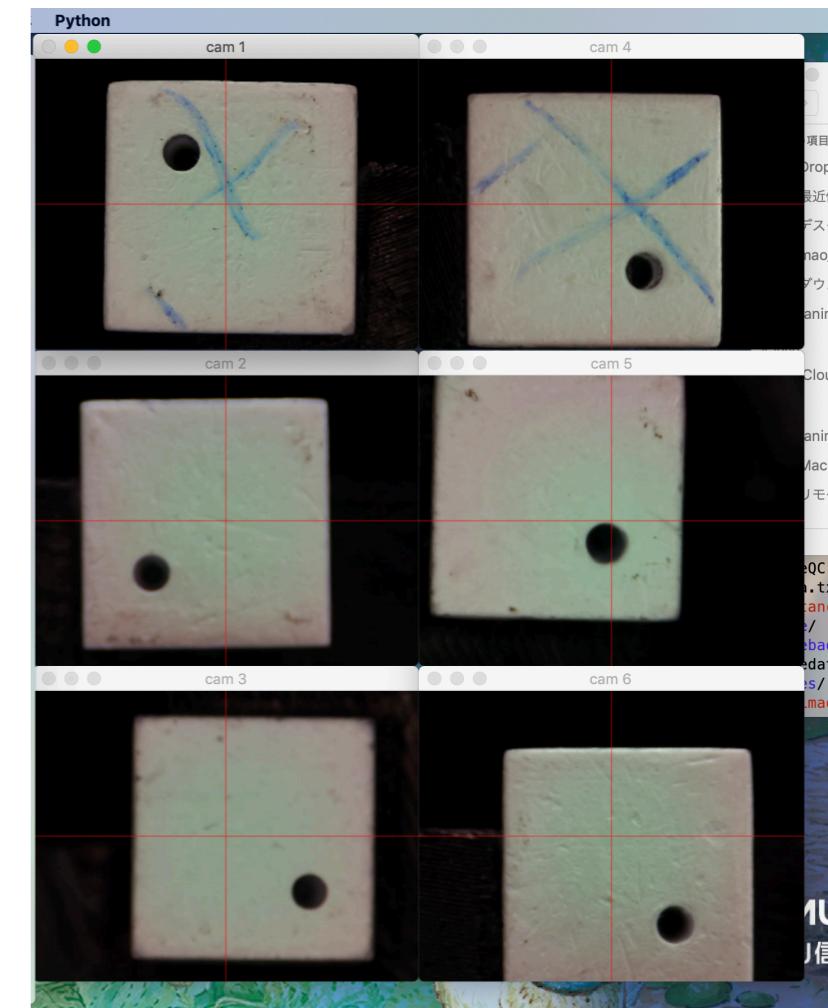
- CAD で描いた通りの位置にカメラを固定するも、キューブの正面を捉えてくれない。
→ 映像を見ながら、カメラの位置を微調整した。
- 微調整後も、台座によってはキューブの全体が映らない。
→ 映像を見ながら、台座の位置を微調整した。



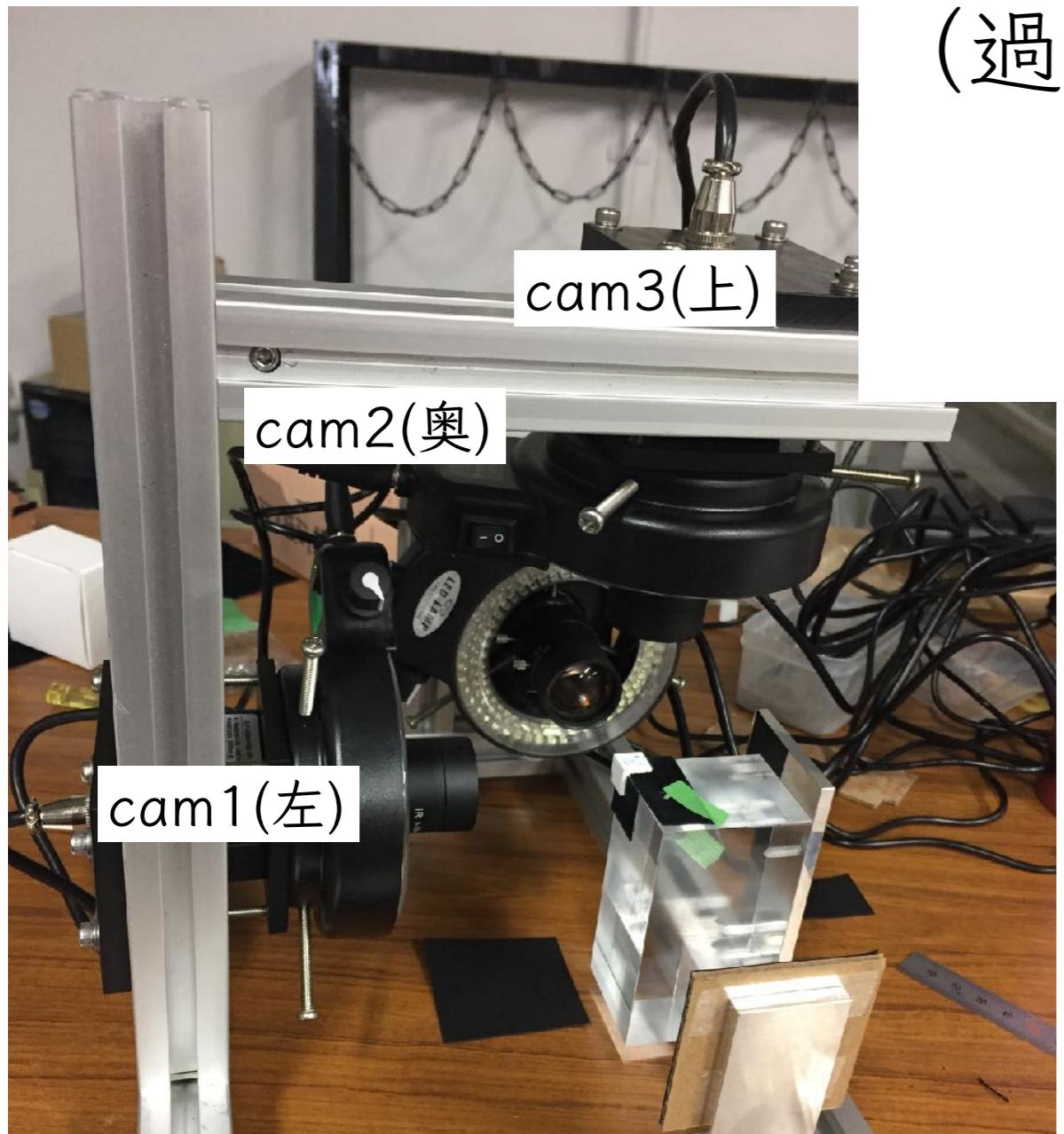
部品と円盤の間に
紙をはさんだ



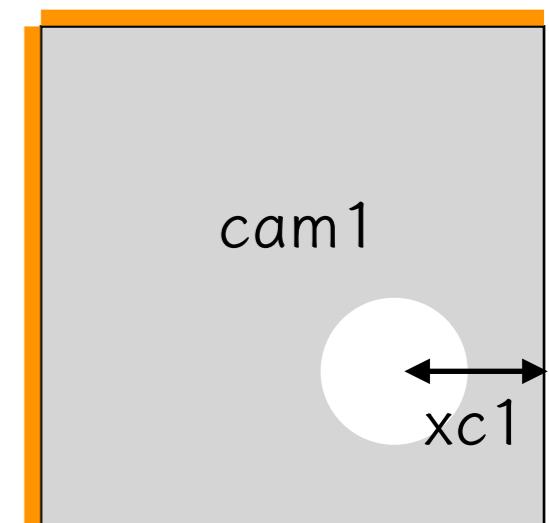
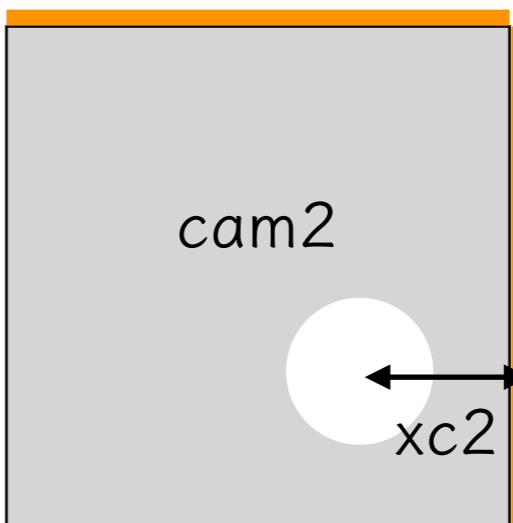
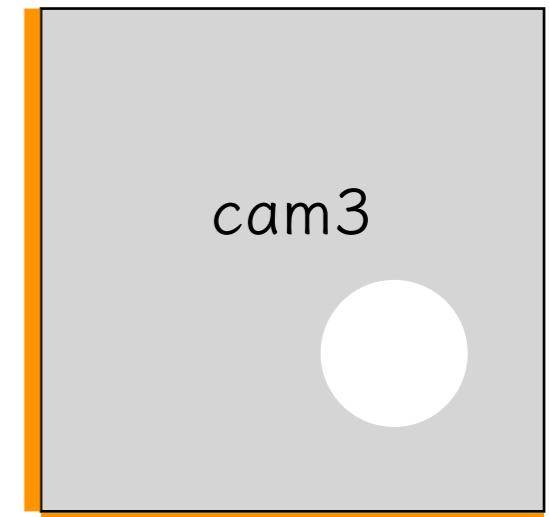
調整後のキューブの見え方



微調整する前の様子



(過去スライド)
カメラ毎の
光の当たり方

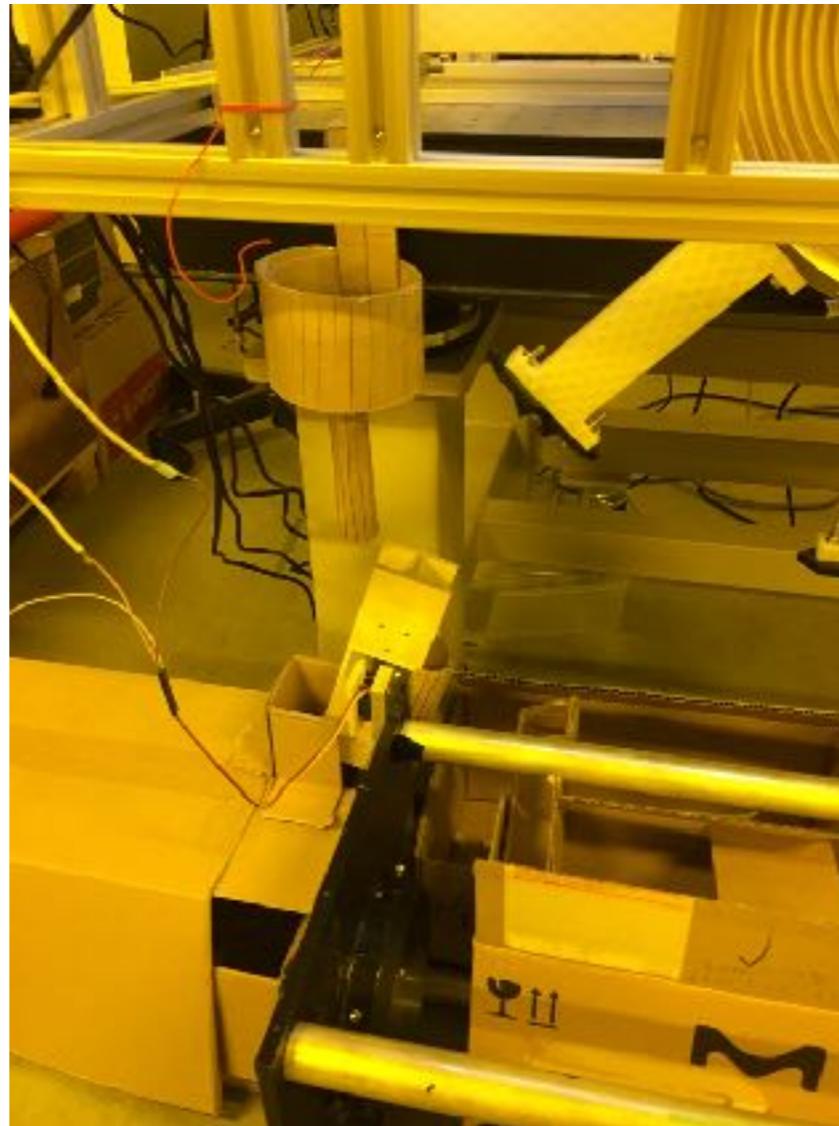
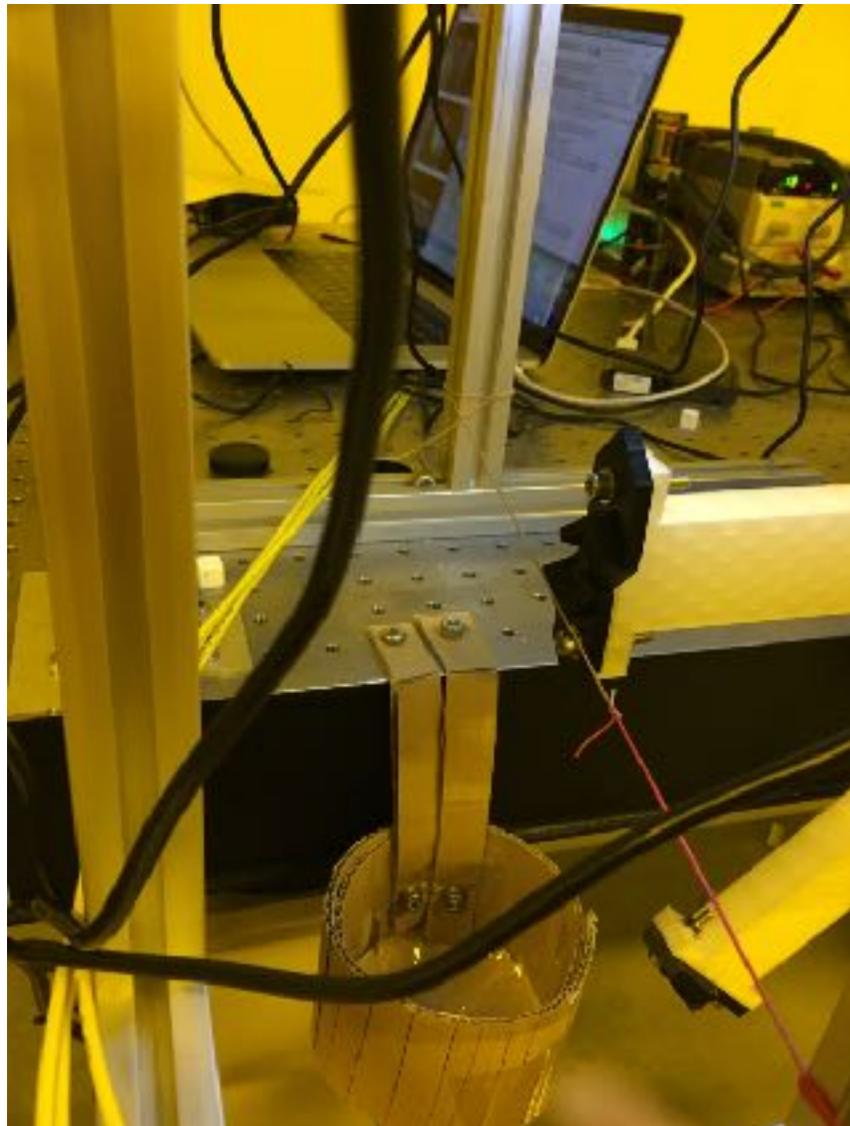


- オレンジの部分に、別方向からの光が当たる。
- 穴の辺からの位置が撮影状況によって変わってしまう
(本来は $xc1=xc2$ のはずなのに、 $xc2$ のほうが大きく見えてしまう)
- 同一の面をそれぞれのカメラで撮影、同一の辺長・穴位置について光の有無によって有意な違いがあるか確認。

キューブ検査の本番

- ロシアから購入した未検査キューブ12000個の検査を行う。
 - good と判断されたキューブのみを用いて、松原さんの溶着案により、シートモジュールを製作する。
 - 横から実際にファイバーを入れ、スムーズに通るか検証する。
 - (easiroc モジュールがあれば LED の光などを測定)
- 補正が出来ていることを確認し、今週後半～来週で検査を行う
 - 1キューブ10秒だと約33時間
 - 1キューブ5秒 だと約17時間
- 3人でシフトを組む：2時間シフトを4回まわせば8時間/日

回転ジグギャラリー



キューブが落下するところ；選別弁

