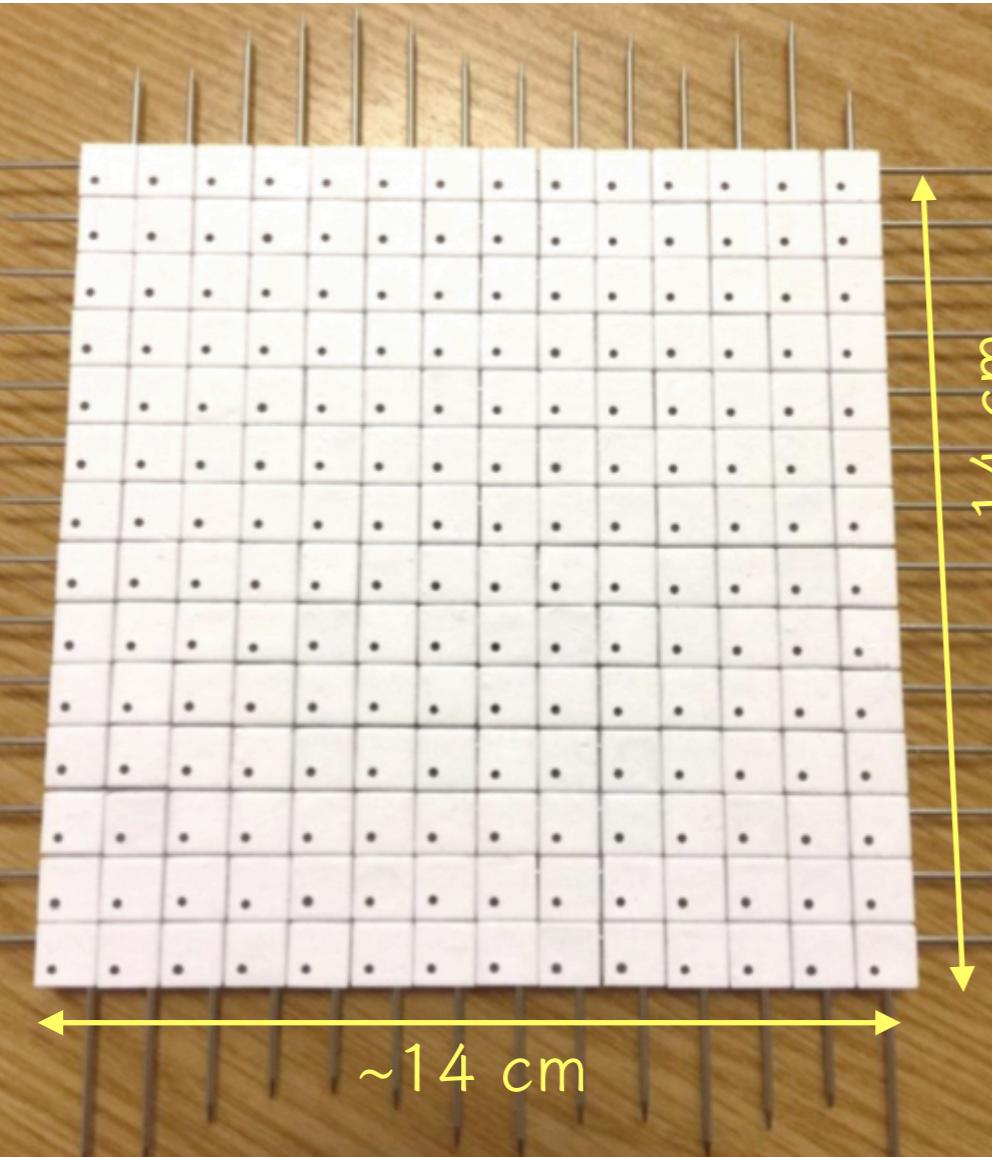


シンチレータキューブ検査

選別条件の決定

2020.10.13 京都大学 谷
木河さん、松原さん、小川さん

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、そこに不良キューブがあると判断
 - 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
- 定量的な不良キューブの判断が難しい
- 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



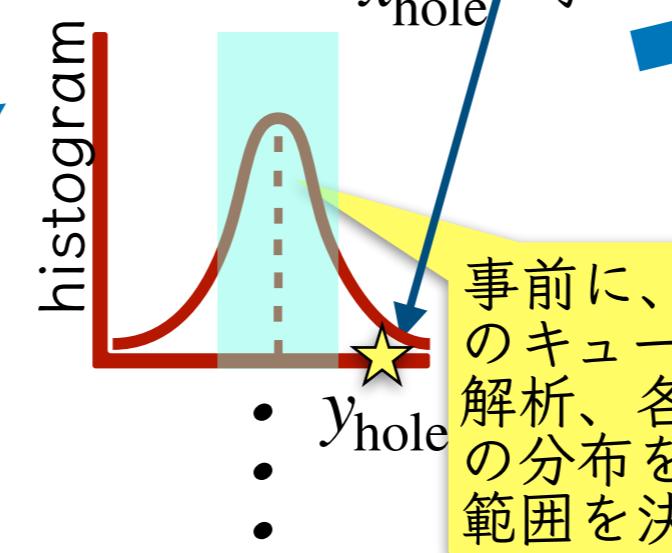
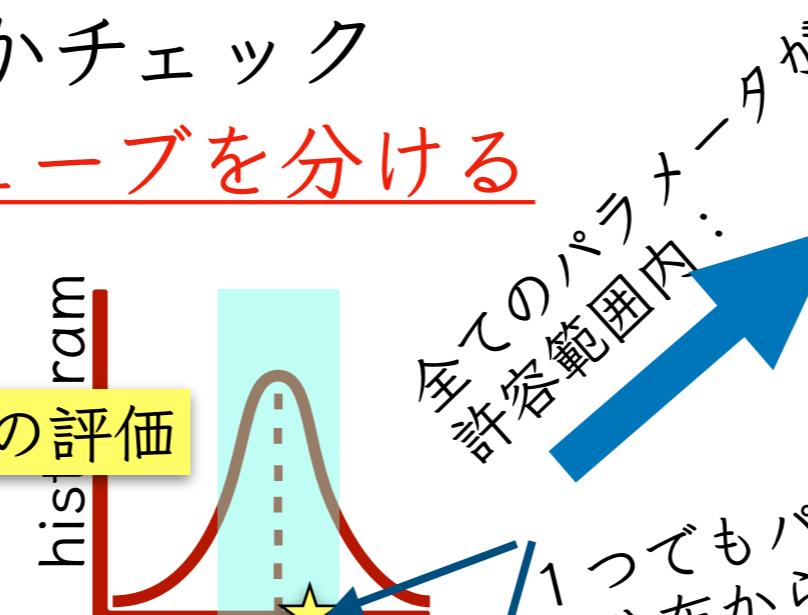
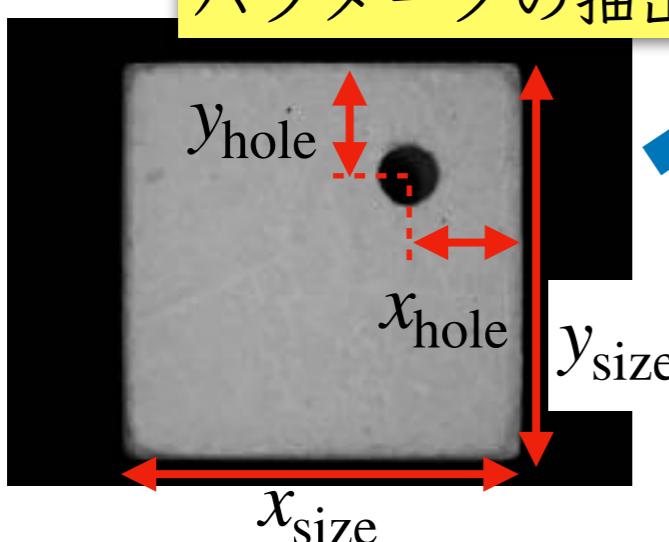
ELP 社 800万画素 Webcam



撮影

パラメータの評価

パラメータの抽出



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、許容範囲を決定



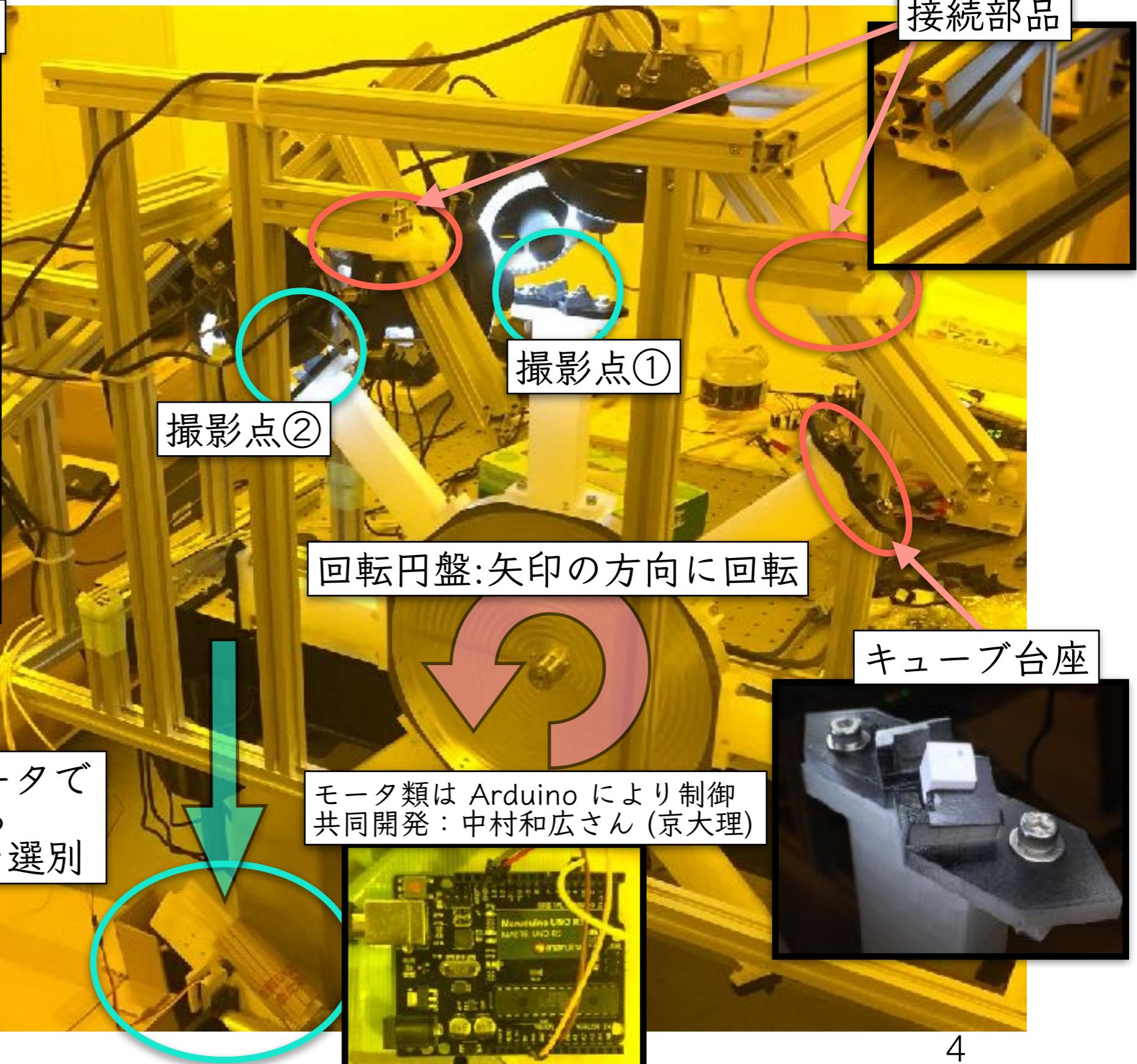
Bad Cubes

パラメータが許容範囲の端にある場合は再検査



新しいキューブ検査システム

6台のカメラ(+リング LED)



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

キューブ3を置く
カメラ1,2,3,4,5,6 確認

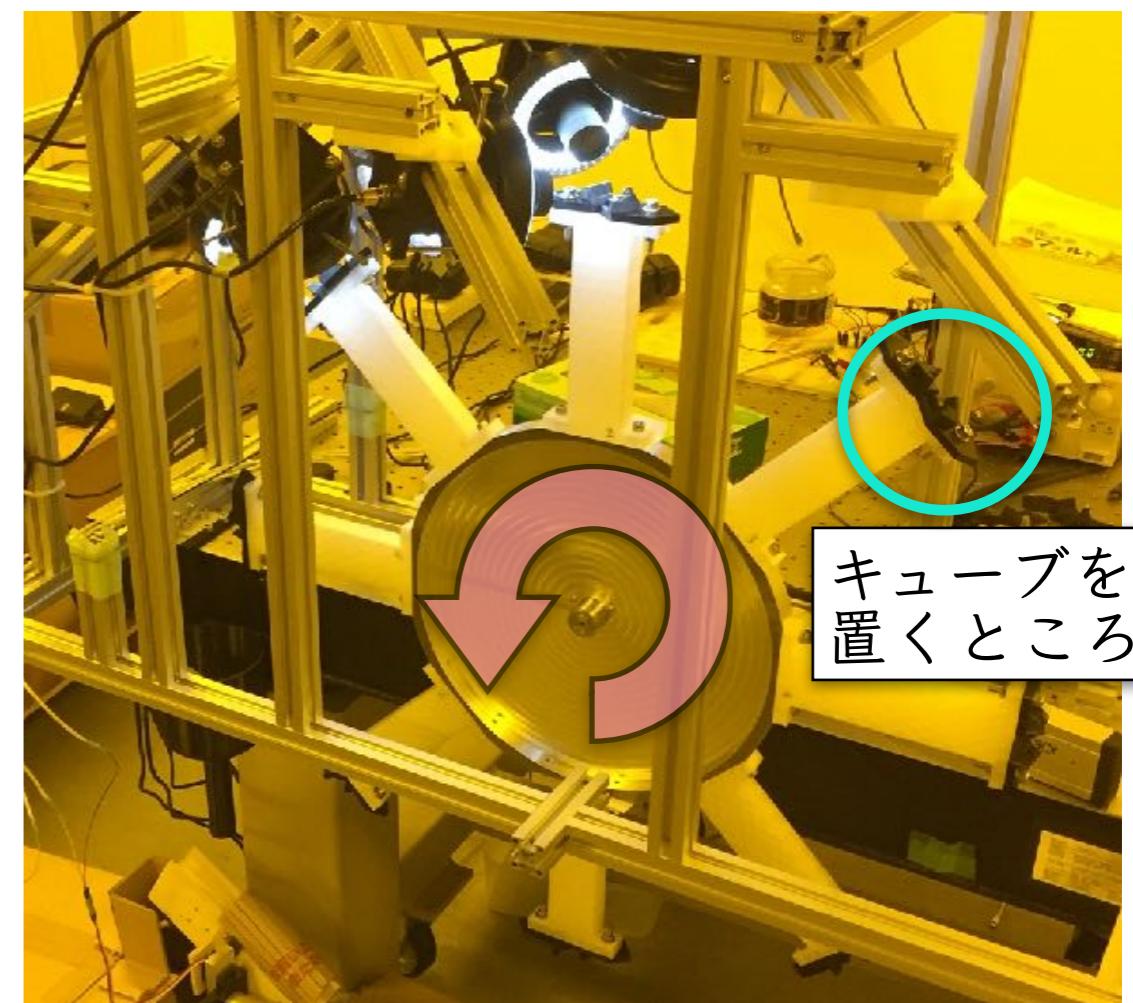
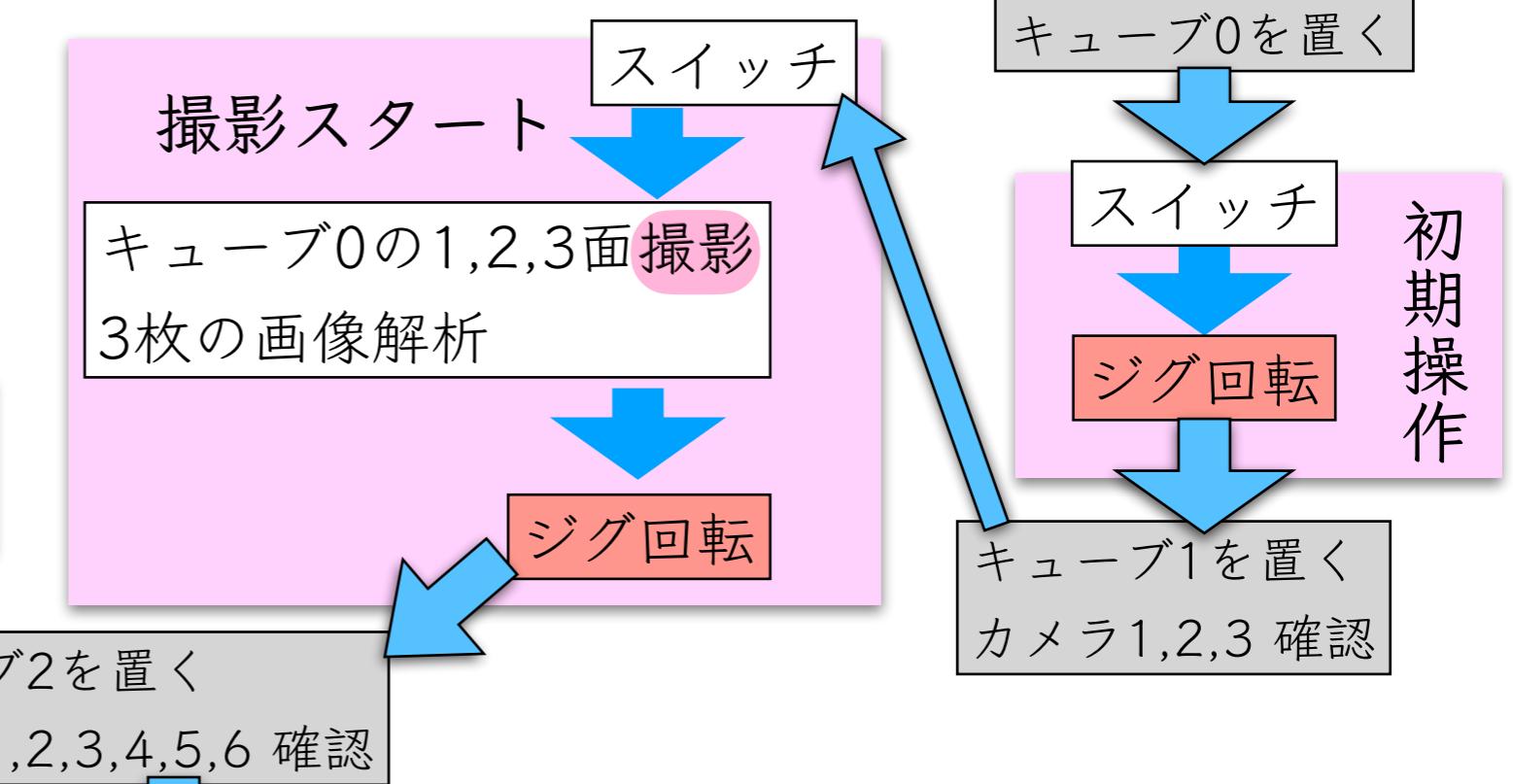
ここから
ループ

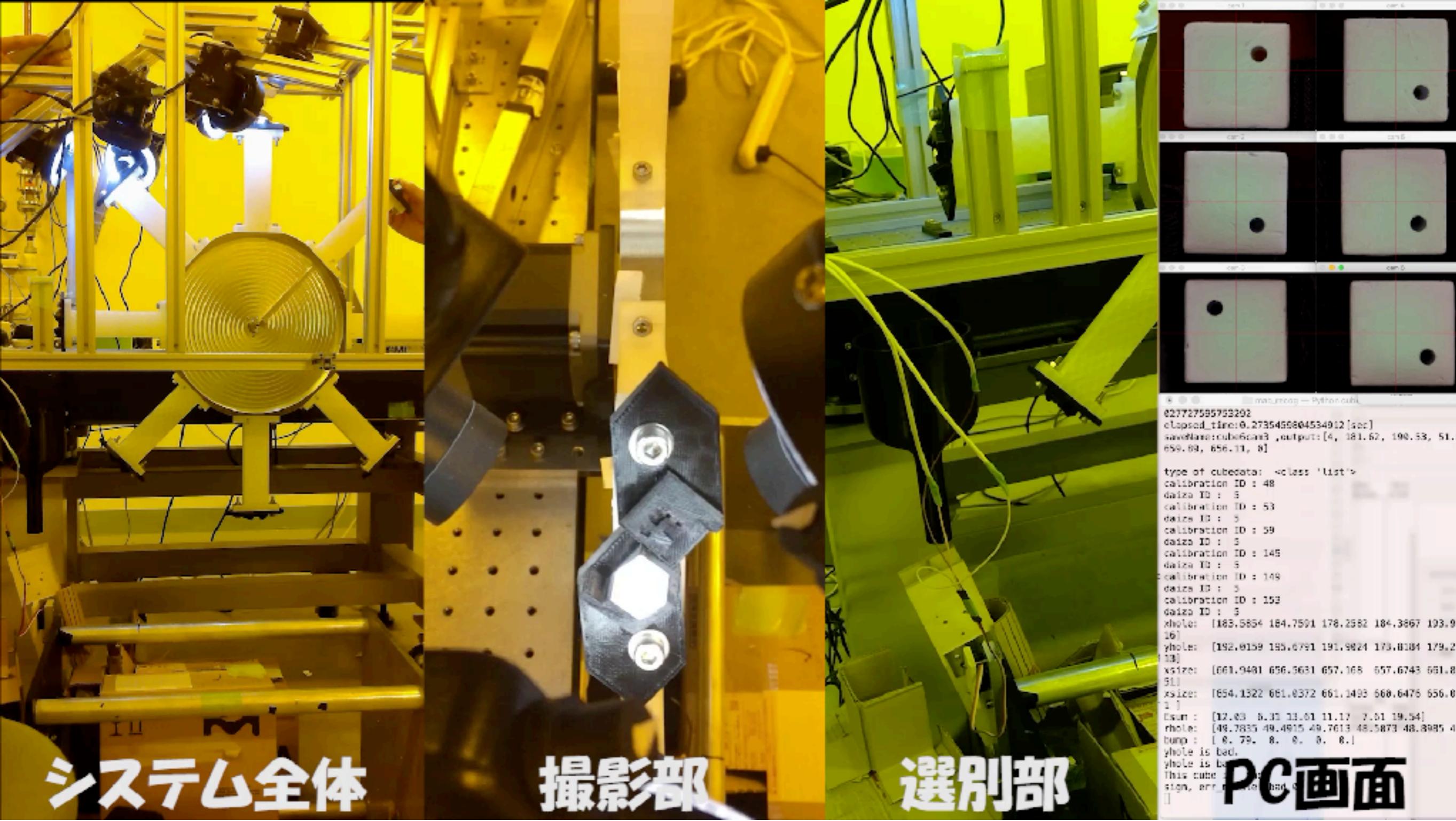
ジグ回転完了

キューブ0の判定

判定結果をもとに、
選別弁を操作

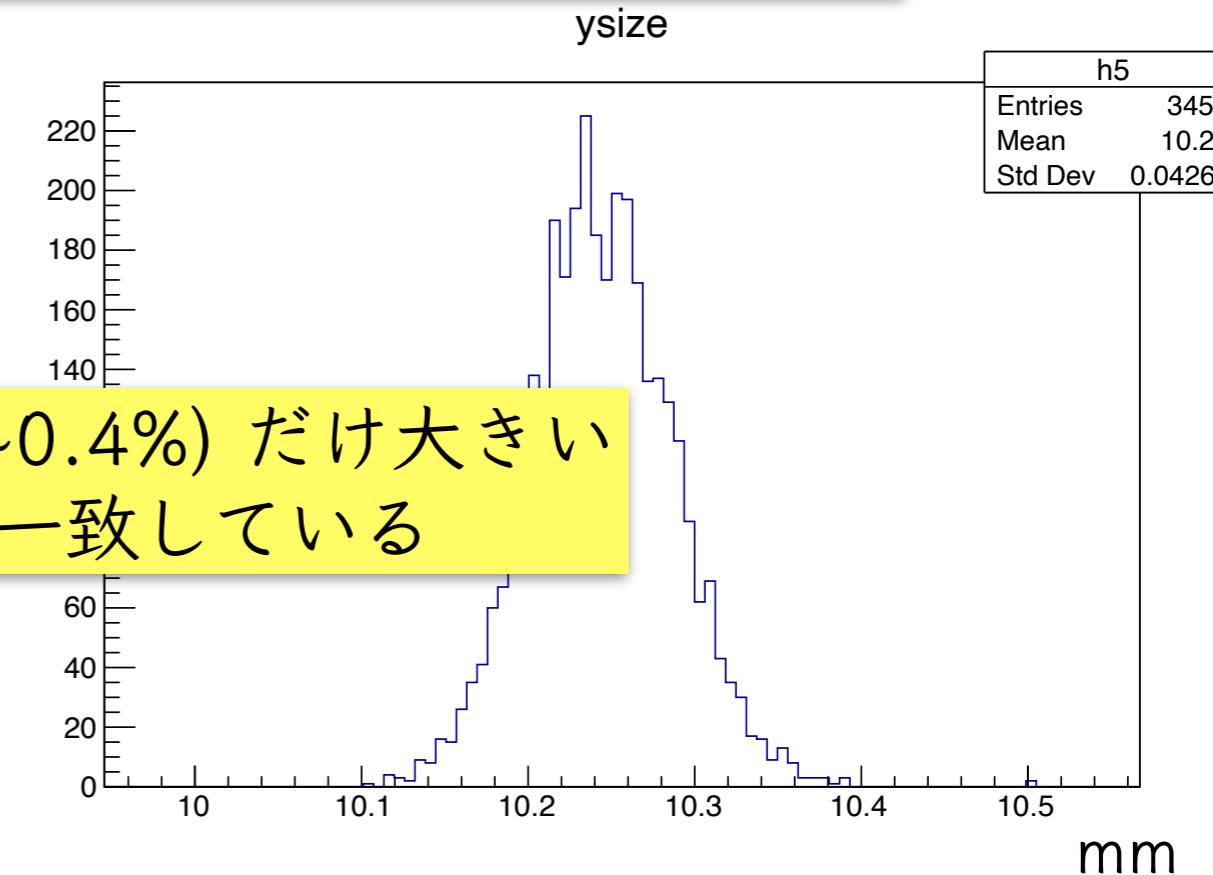
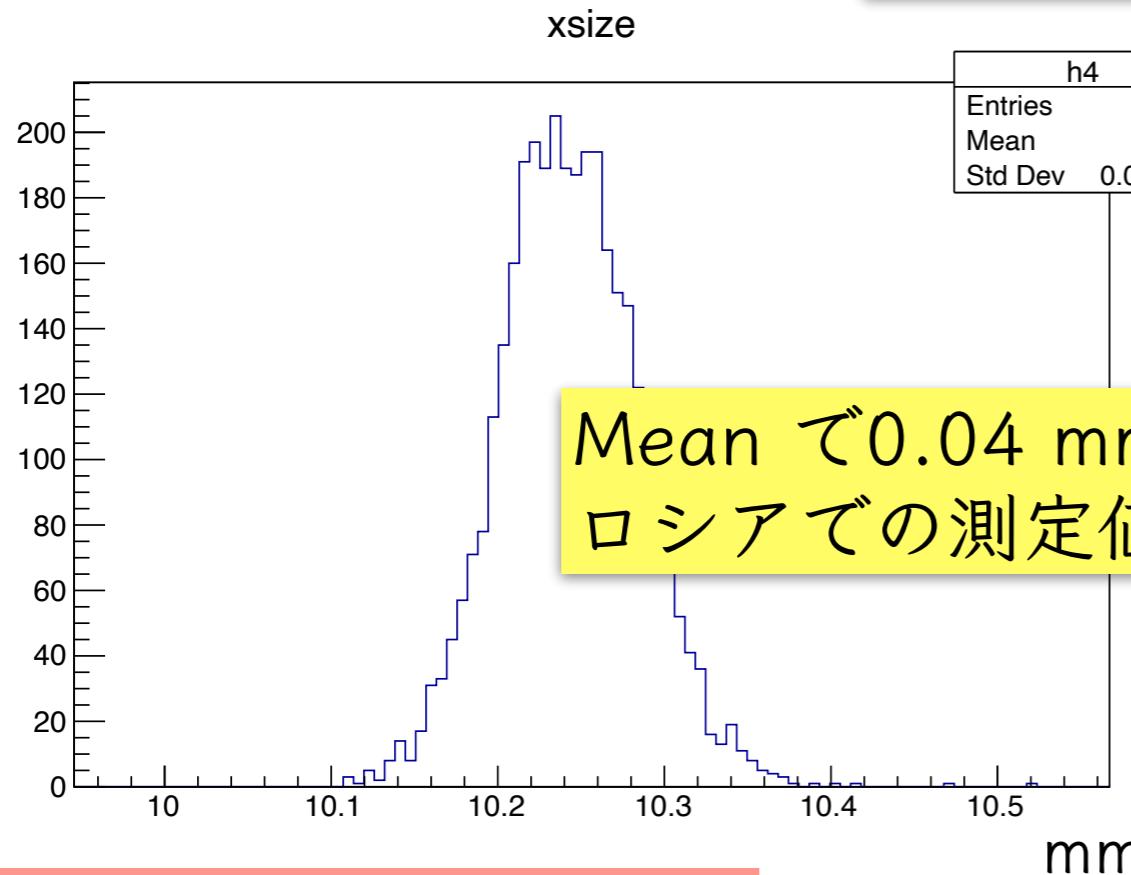
キューブ0が落ちる





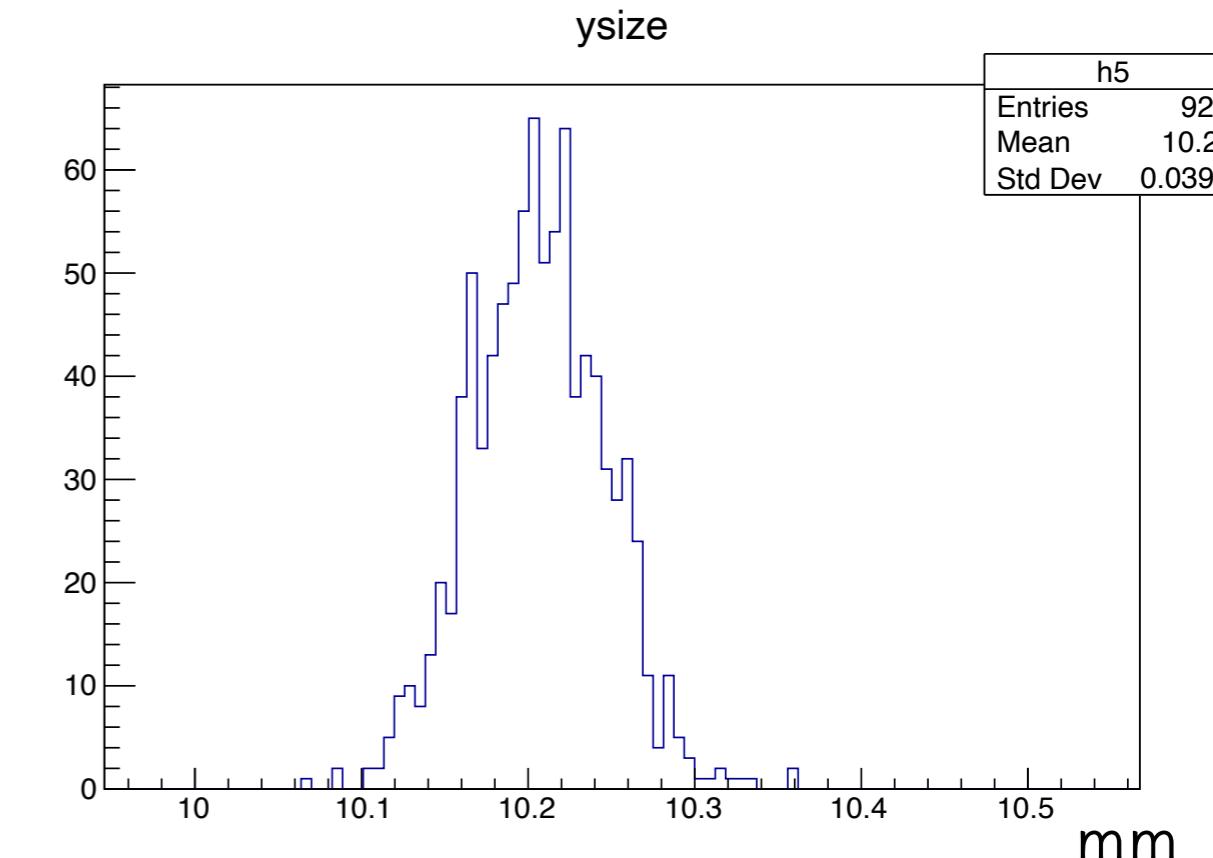
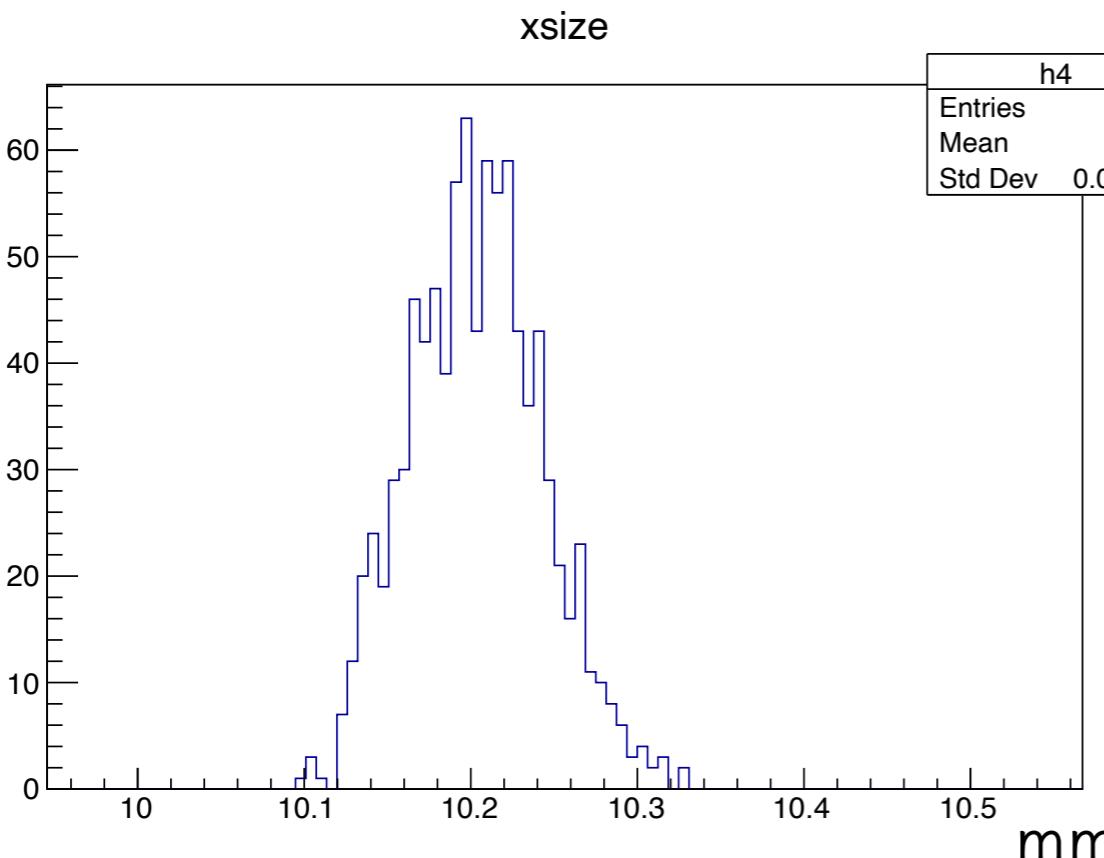
今回購入したキューブ

キューブの大きさの分布（縦、横）



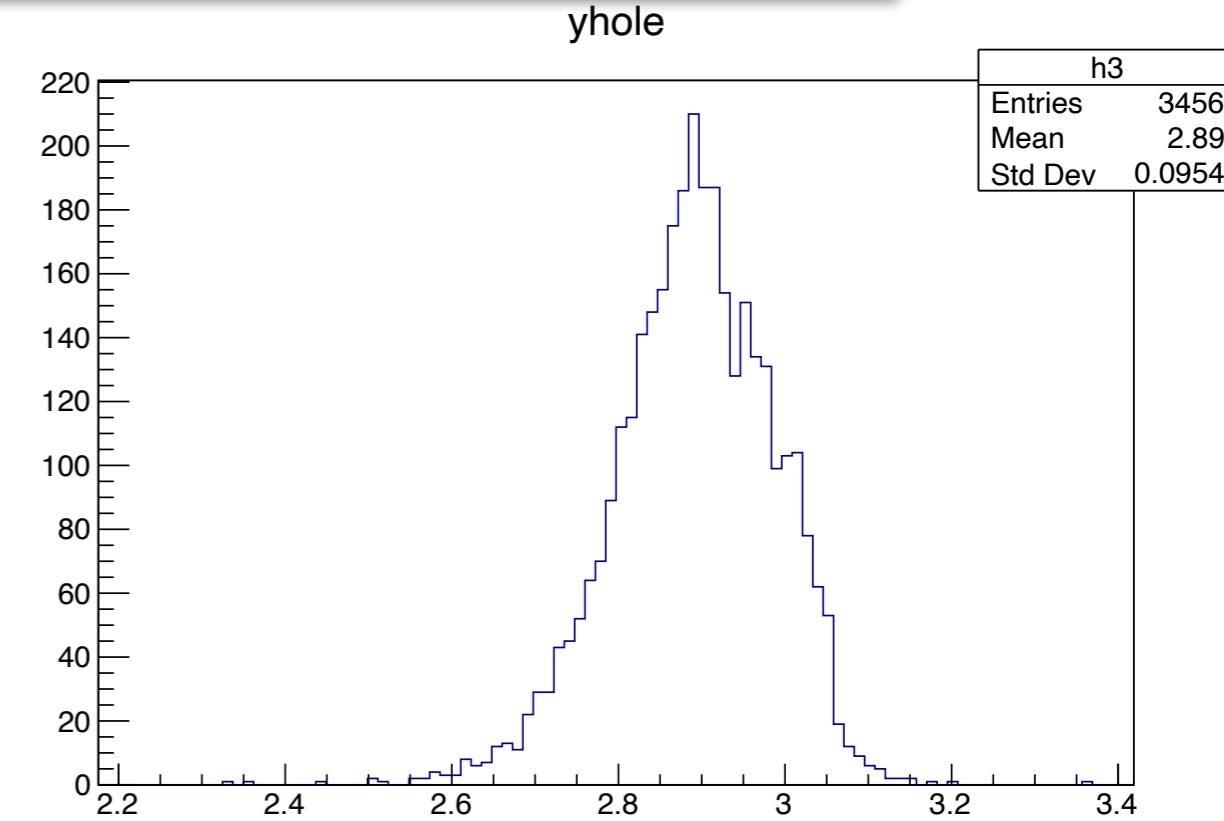
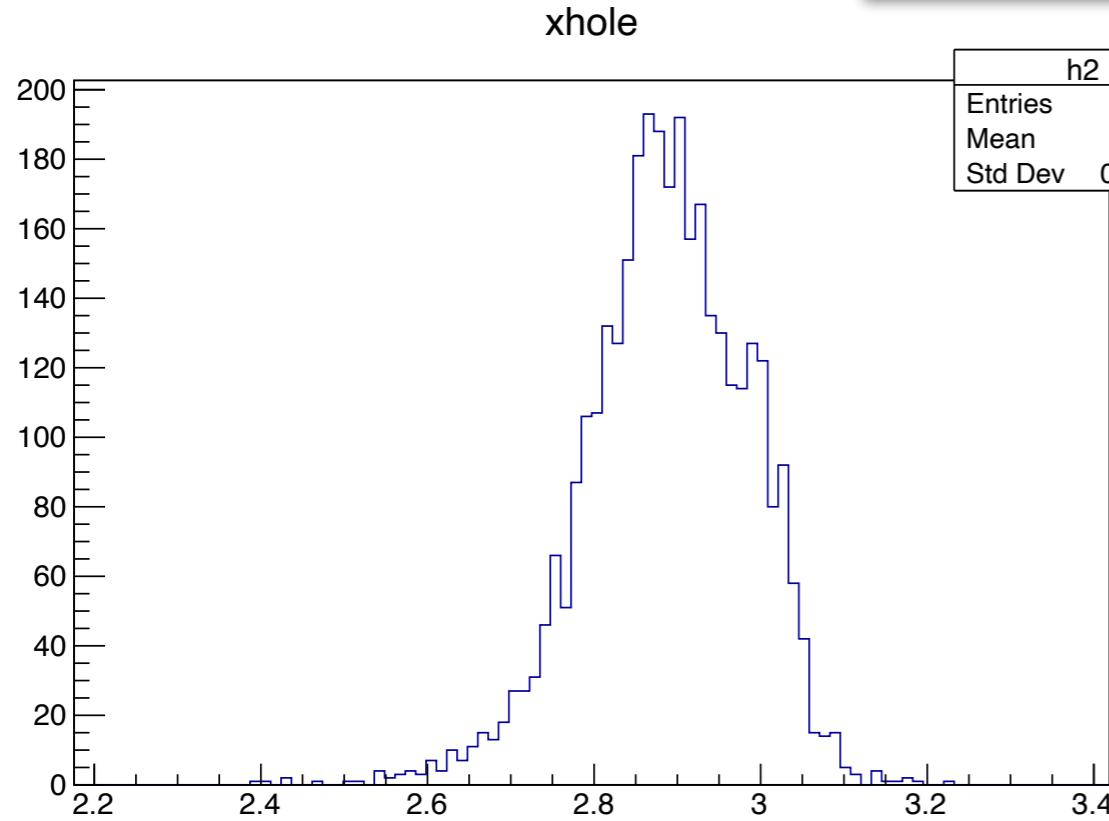
Mean で 0.04 mm (~0.4%)だけ大きい
ロシアでの測定値と一致している

ロシア式 good キューブ



今回購入したキューブ

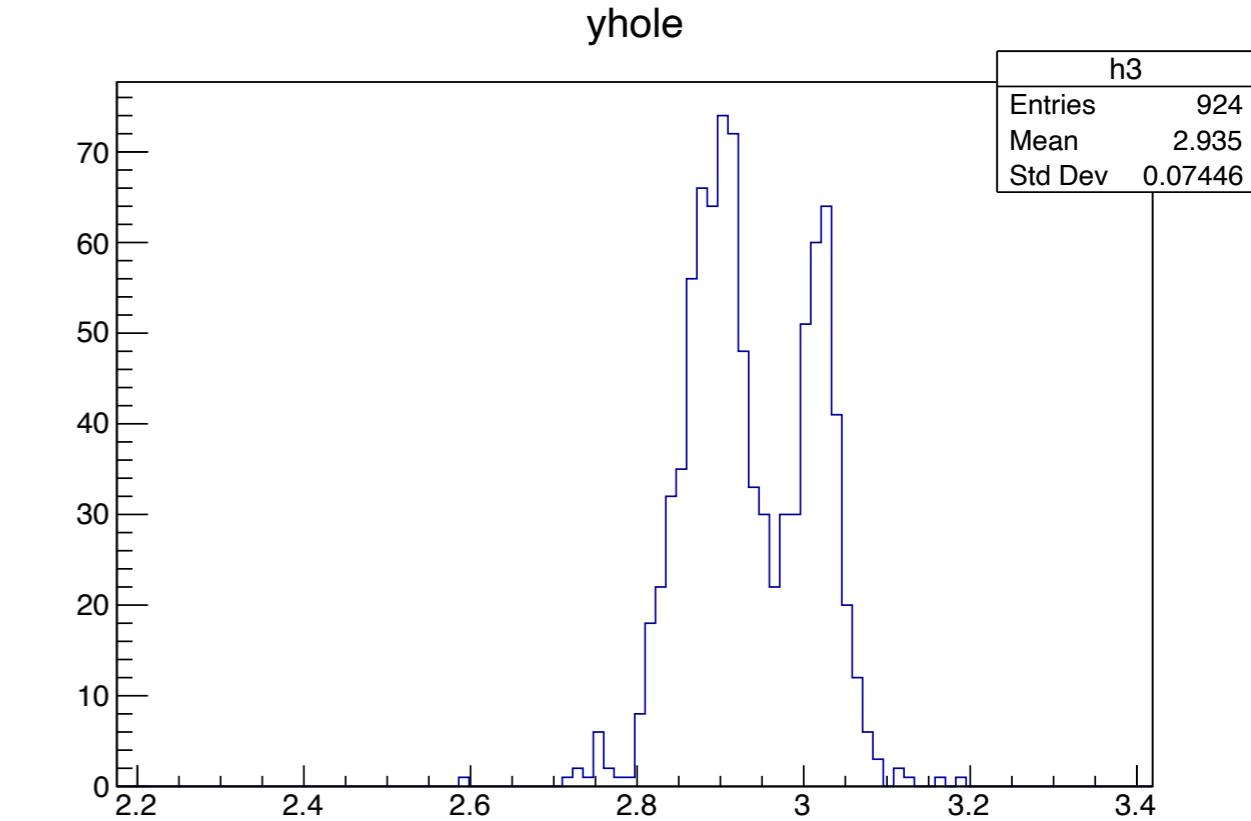
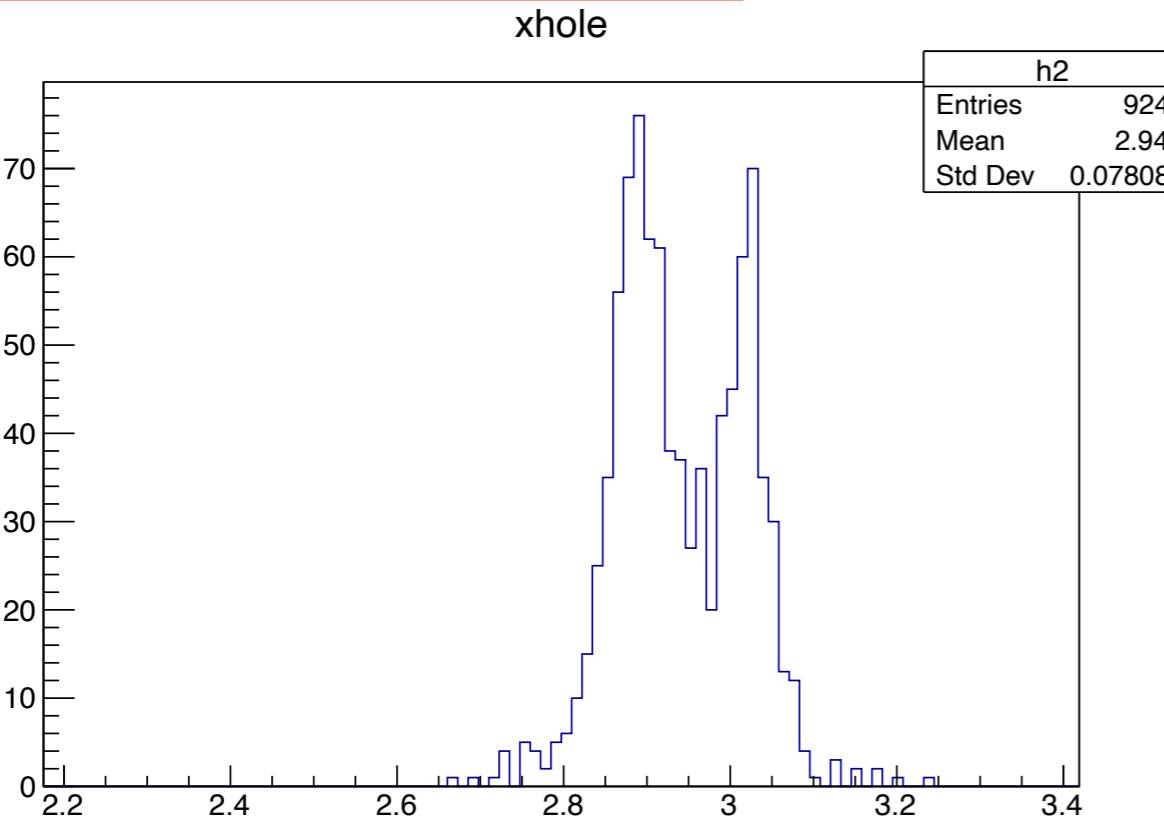
キューブの穴位置の分布（縦、横）



ロシア式 good キューブ

mm

mm



mm

8

mm

キューブの選別条件の決定

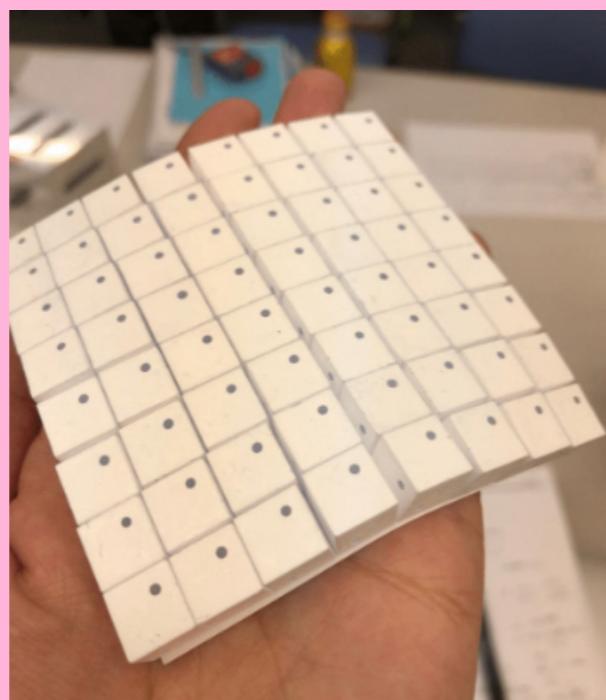
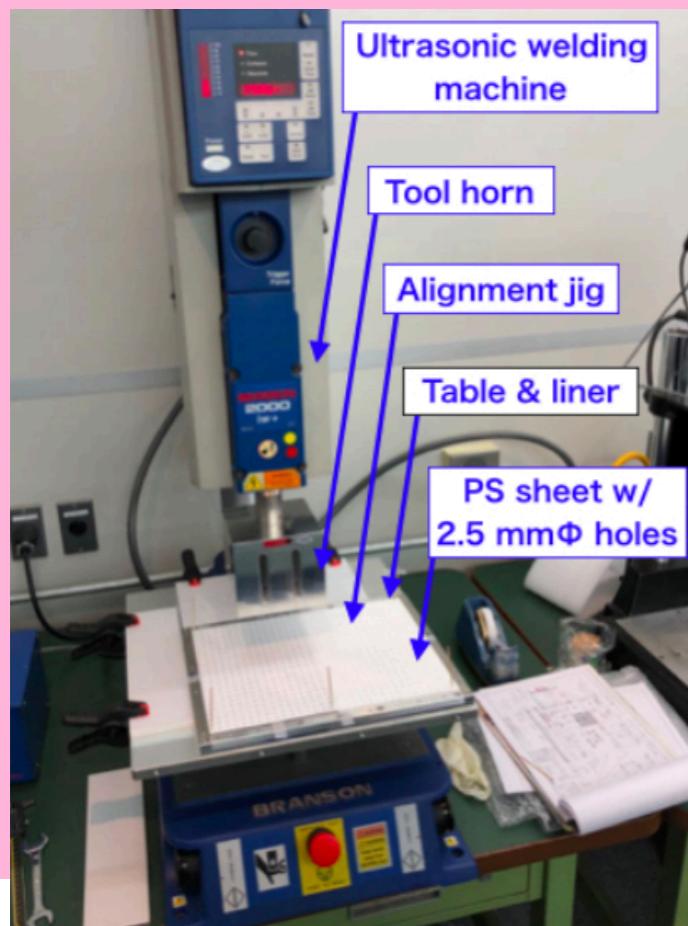
- 組み上げの為の条件をクリアした上で、なるべく多くのキューブが使用可能と判断される条件を求める。

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

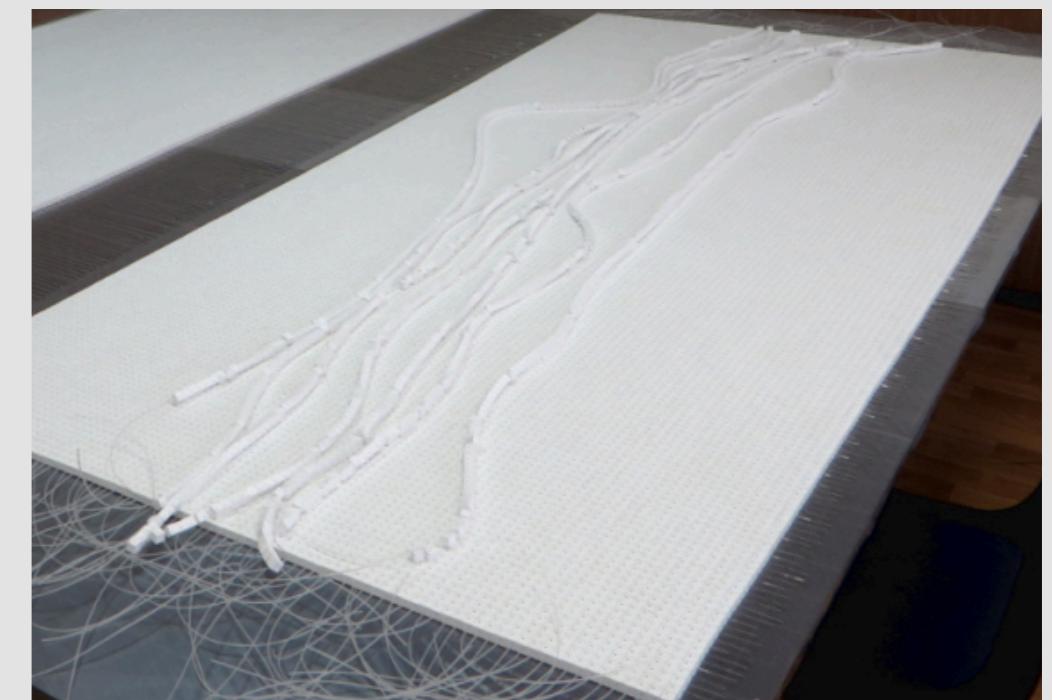


釣り糸案（ロシア案）

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。

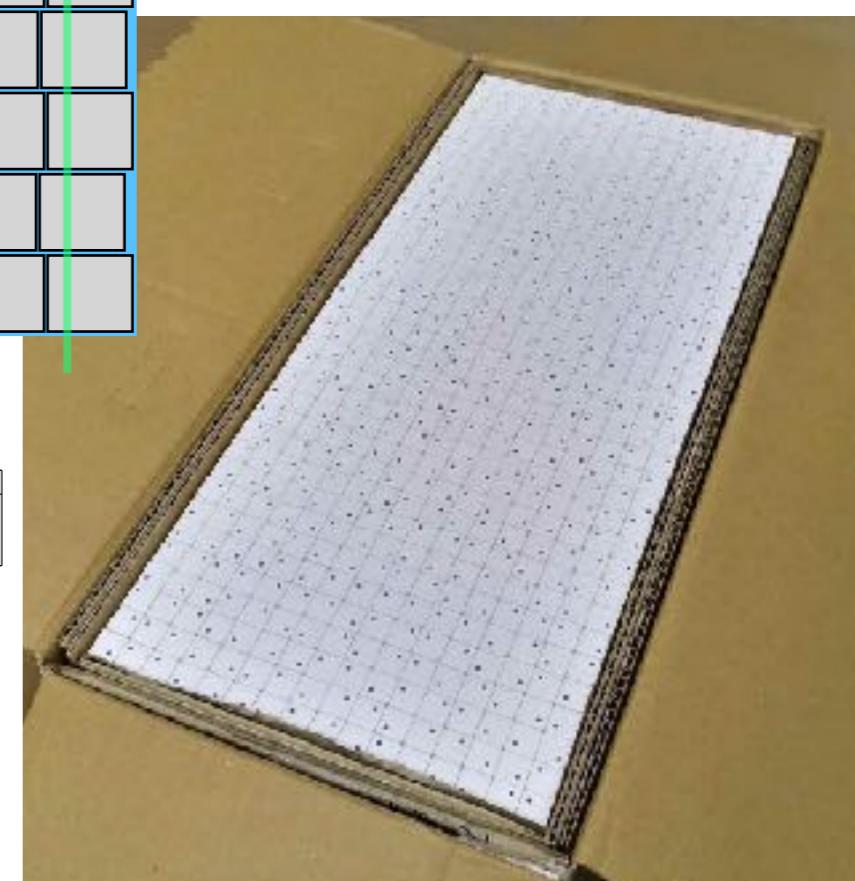
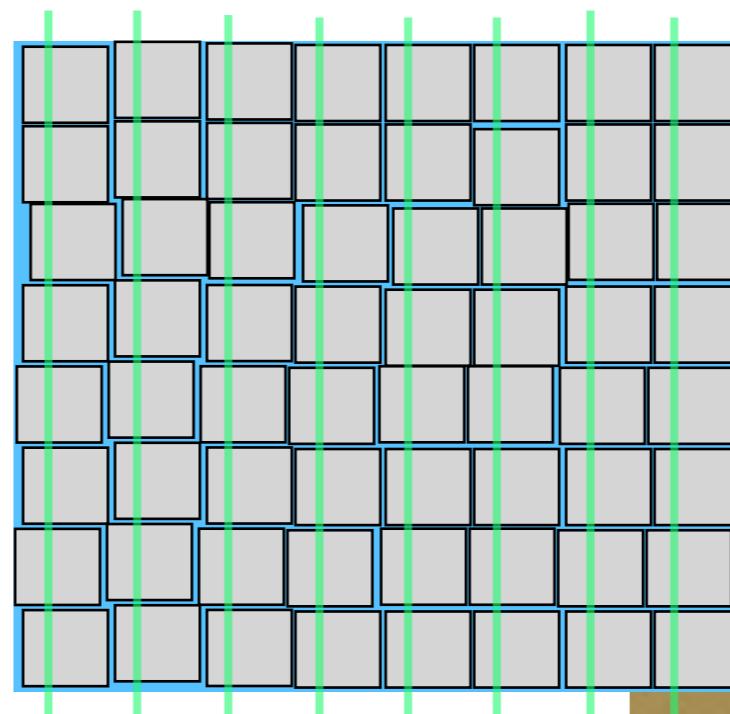
溶着ジグ内にキューブが収まり、かつ

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。

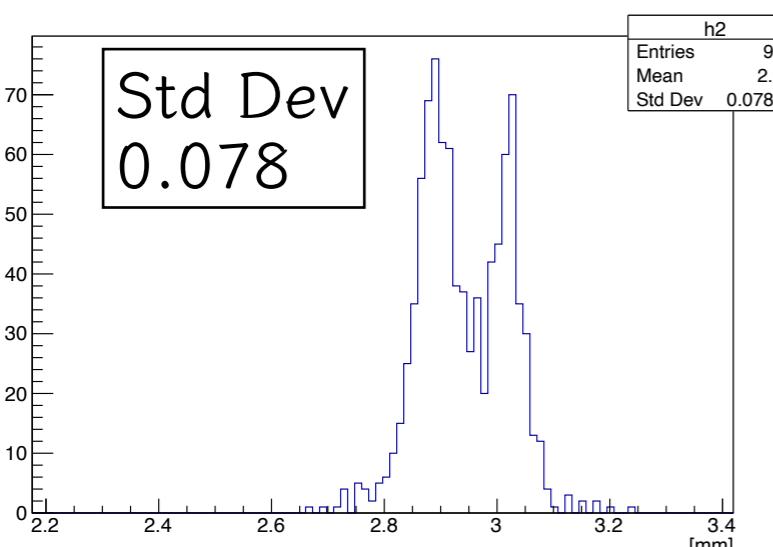
ジグは以前のキューブを基準に製作、
相対的に小さい

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。

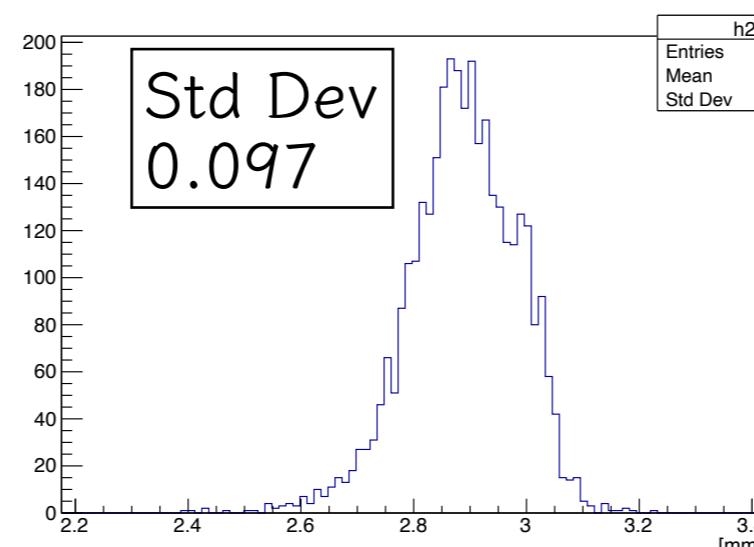
→ ロシア方式良品キューブ基準の
選別ではなく、
選別条件の最適化



ロシア方式良品キューブの穴位置



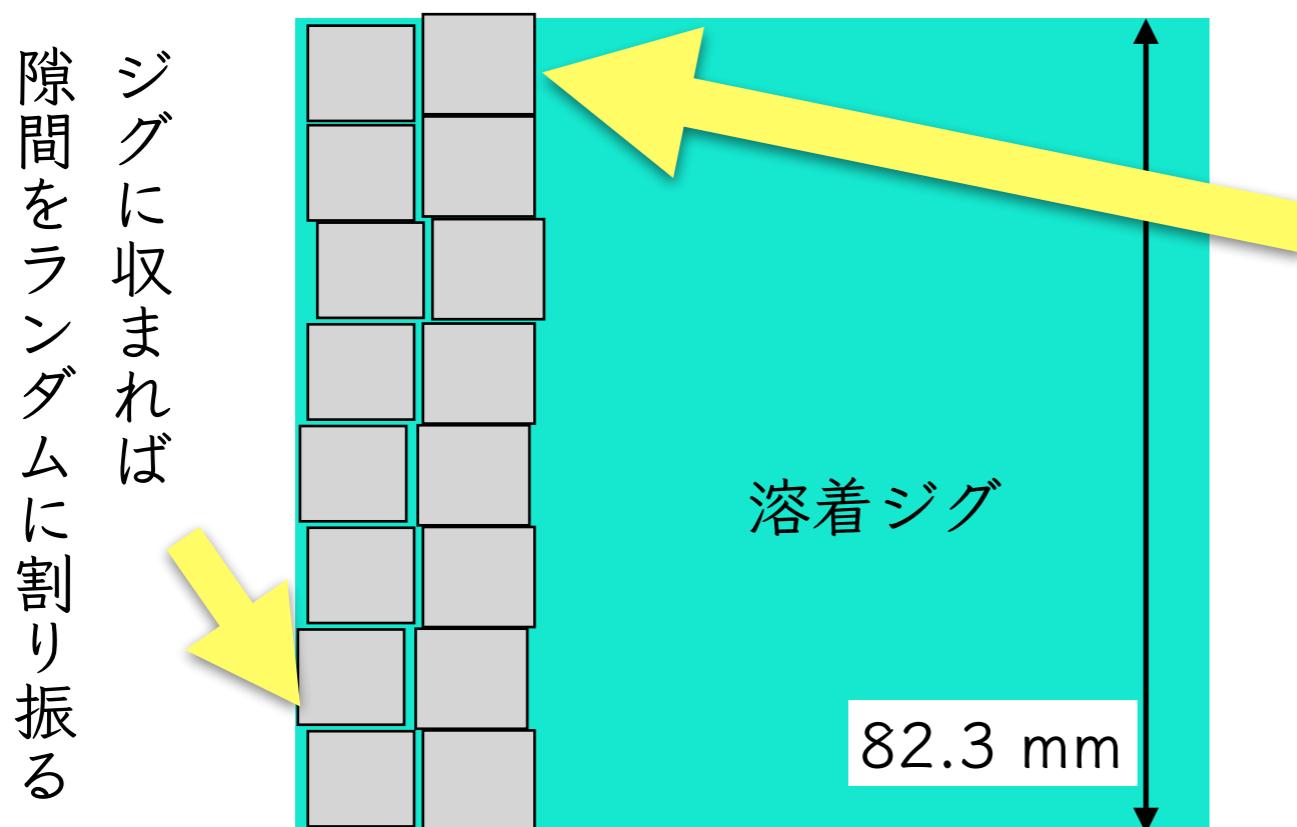
未検査キューブの穴位置



キューブの選別条件の決定

Toy MC を実行した。

- ・ 溶着ジグの大きさを決める。(82.3×82.3 mm)
- ・ 今回のキューブ 576 個分の分布に従うよう、乱数により大きさ・穴位置・穴径の値を抽出、模擬キューブを大量に作成。
- ・ 作成したキューブから64個を乱数により選び、8×8に並べる。
- ・ 8個分の長さを記録する。
 - ・ 一箇所でもジグの幅より大きければ失敗
 - ・ 隙間ができる場合は、乱数によりキューブ間に割り振る



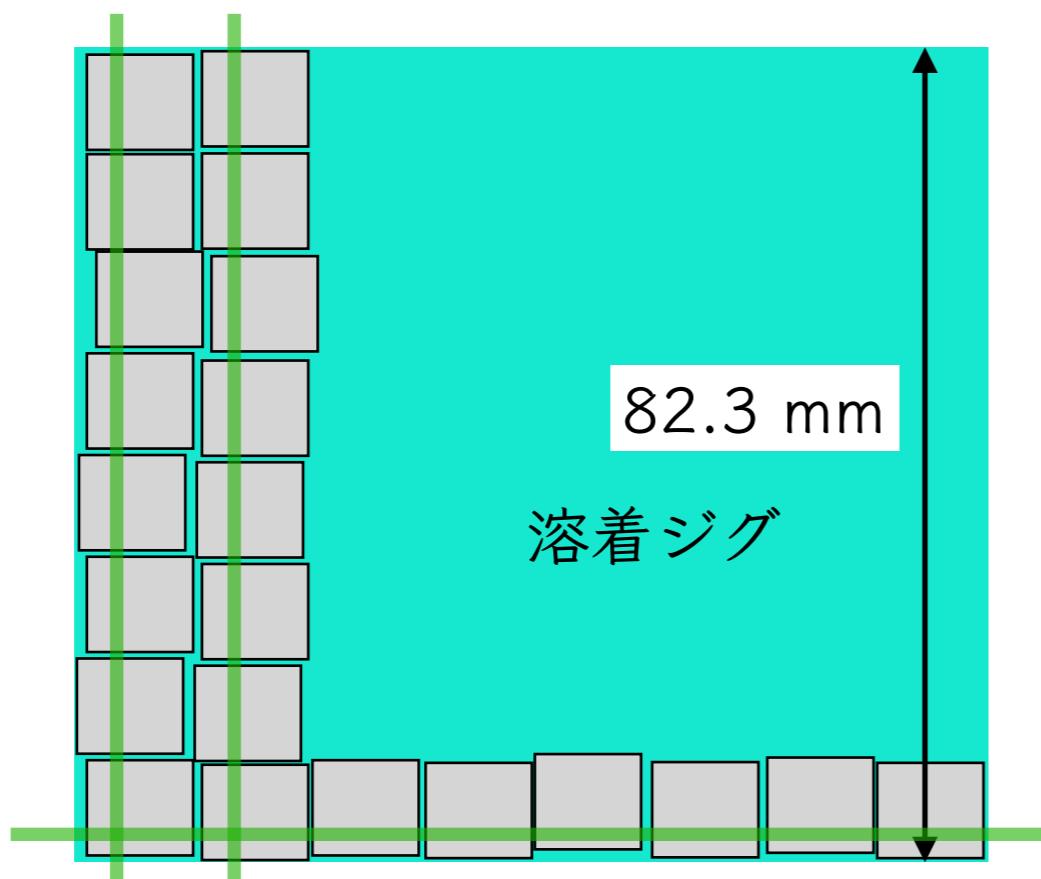
キューブが大きすぎてはみ出ていれば失敗と数える。

キューブの選別条件の決定

Toy MC を実行した。

- 穴径~1.5 mm、ファイバー径1.0 mm
- キューブを8個並べたときに、互いに穴位置がずれてファイバーが通る隙間が無くなったら失敗
- 縦も横も全てファイバーが通れば成功

キューブの選別条件を変えながら、成功率の変化を調べる。



Processing analysis.C...

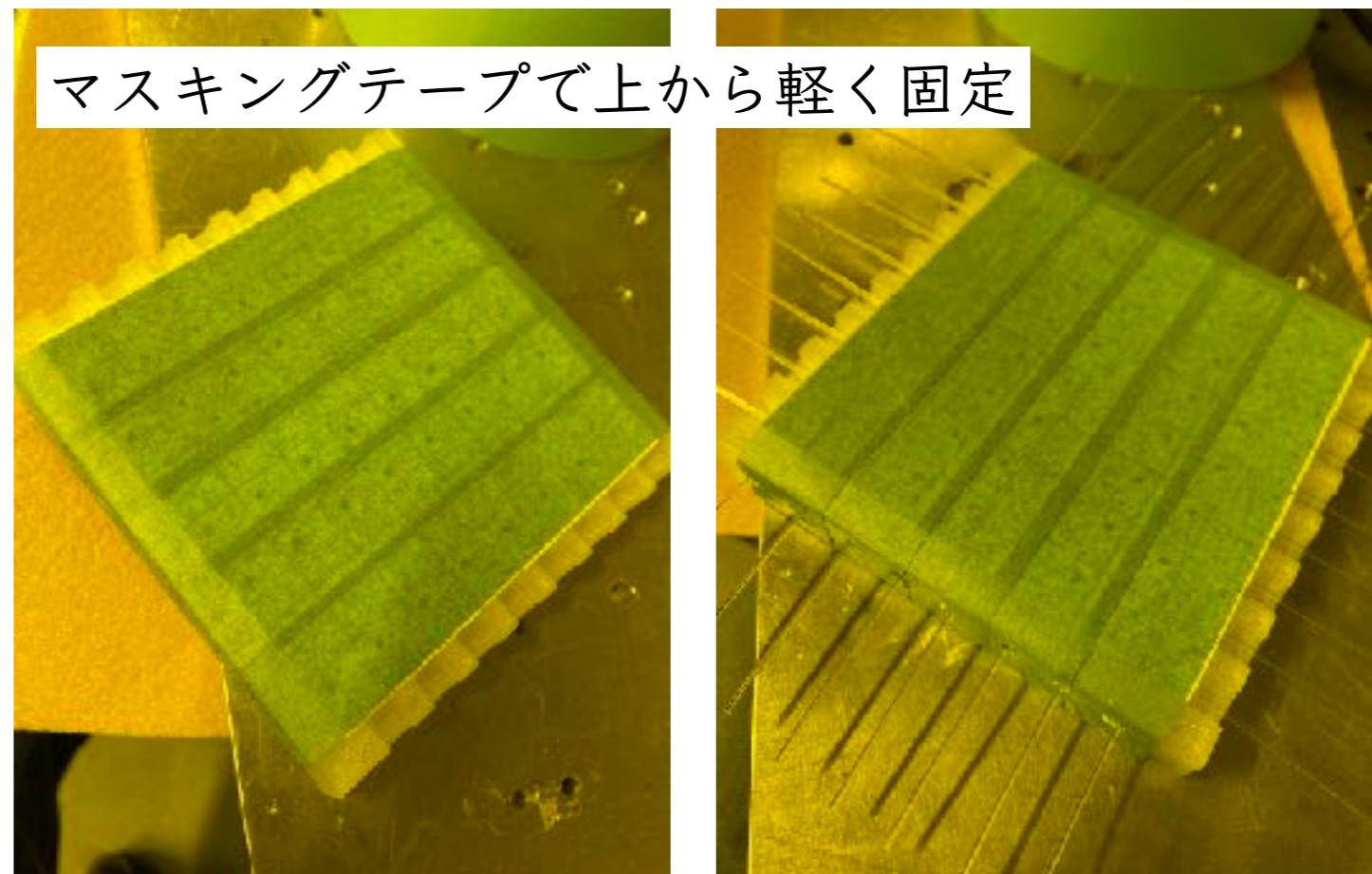
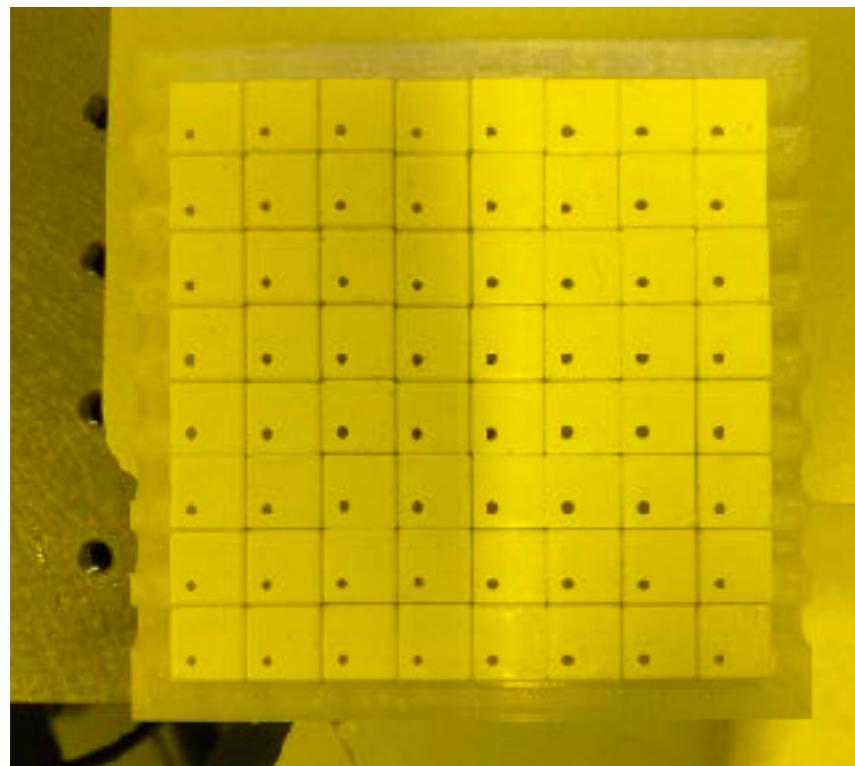
```
*****
simulated cube : 30000
good cube      : 13755
good rate       : 45.85%
*****
miss : 1667 /10000, 16.67%
OutOfRange : 18 /10000, 0.18%
clear  : 8315 /10000, 83.15%
time  : 1601889651
```

8+8=16箇所全て確認する

キューブの選別条件の決定

3D プリンタで溶着ジグの模型を製作した。

- ファイバーを通す穴が空いている
- 0.1 mm の精度は出せないので、やや小さく印刷されたものの内側をやすりで削って微調整・凹凸をなくした
- 6個のノギスで内寸を測定すると、平均は約82.25 mm (実際は82.3)
- 選別条件を満たすキューブ300個程度から64個選んで並べ、実際にファイバーを通してみる。



キューブの選別条件の決定

20 セット作った結果

ジグに収まるかどうか

- * 最後の1つがきつく強引に入れた：2回
- * 何行かややきつい：7回
- * ぴったり：10回
- * やや余裕あり：1回

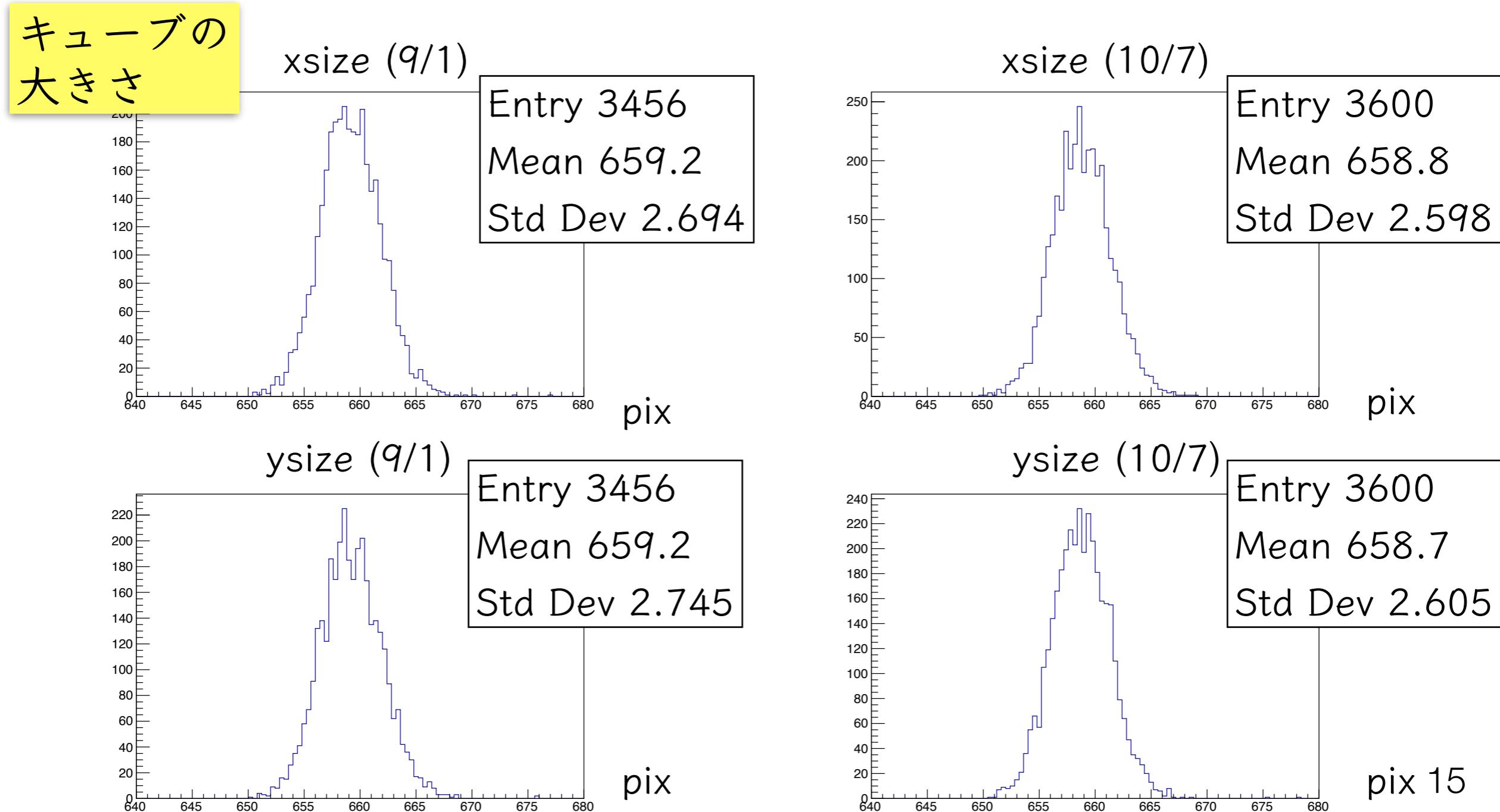
ファイバーの通り具合

- * 問題なく通った：18回
- * 1本のみややテンションがかかる：2回

実際のジグはこれより微妙に大きいはずなので、ジグに収まらない割合はかなり低いはず

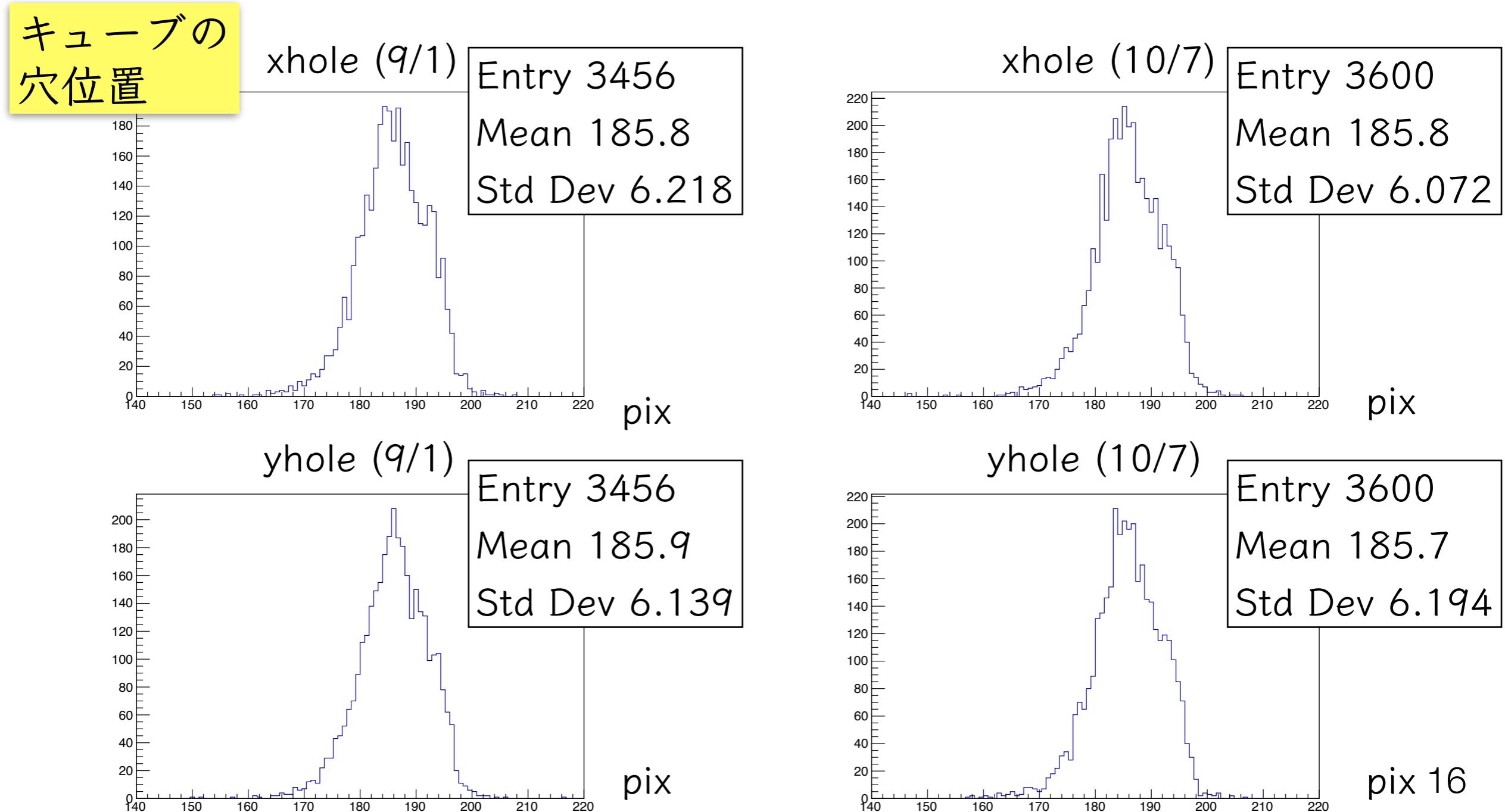
システムの再現性について

- 購入キューブの分布を、9月1日撮影分と10月7日撮影分で比較した。
- Mean 値で 0.006 mm (0.06%) 小さくなっていた。
- $\sigma = (\text{Std Dev})/\sqrt{(\text{Entry})}$ とすると、~10 σ の違い。
- 現状では問題のない範囲。



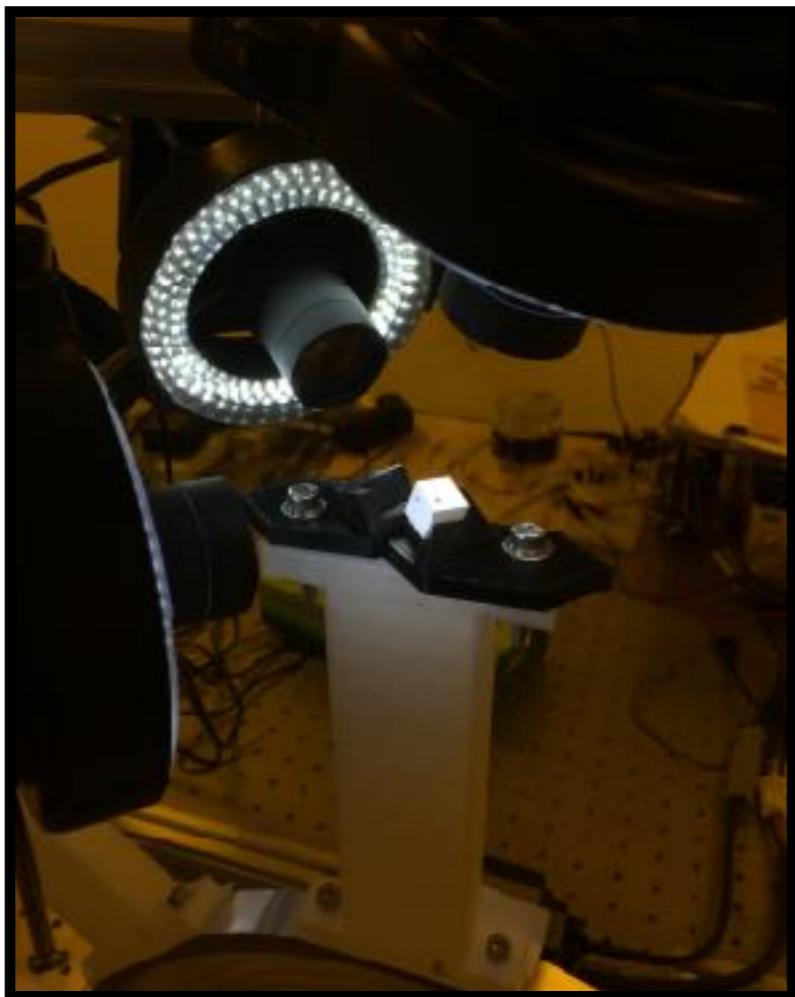
システムの再現性について

- 購入キューブの分布を、9月1日撮影分と10月7日撮影分で比較した。
- yholeについて $\sigma = (\text{Std Dev})/\sqrt{(\text{Entry})}$ とすると、 $\sim 2\sigma$ の違い。
- 穴位置については有意な違いは見られなかった。



システムの再現性について

- 考えられる要因
 - カメラに取り付けた LED ライトの調子が安定していない。
 - キューブの置き方で見え方が変わる？
 - 何度も検査にかけたせいで、実際に表面が削れて小さくなったり？
(何度も落としたりすると、角の部分から表面の層が剥げていく)



まとめ

- super FGD 用シンチレータキューブの検査システム。
- 昨年製造されたキューブと今年製造されたキューブで大きさ・穴位置が異なる。
- Toy MC をもとに、溶着案の要求に応える選別条件を決定。
- その選別条件により、プロトタイプ検出器用12000個のキューブの検査を実施する。
- 検査システムの再現性について
 - 変化が今の程度であれば、12000個の検査では問題にならない。
 - 時間が経つにつれ変化してしまうなら、検査数~ $O(1M)$ の長期間検査では影響が出るかもしれない。

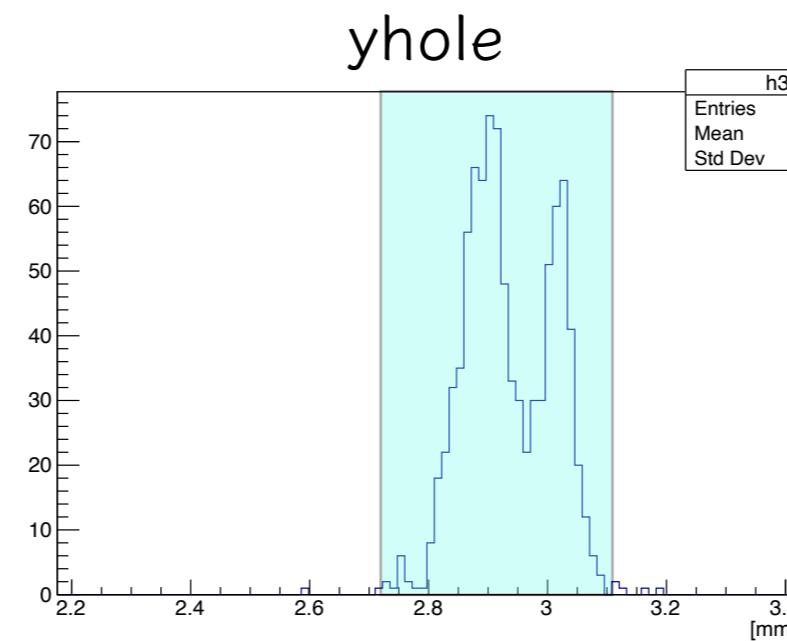
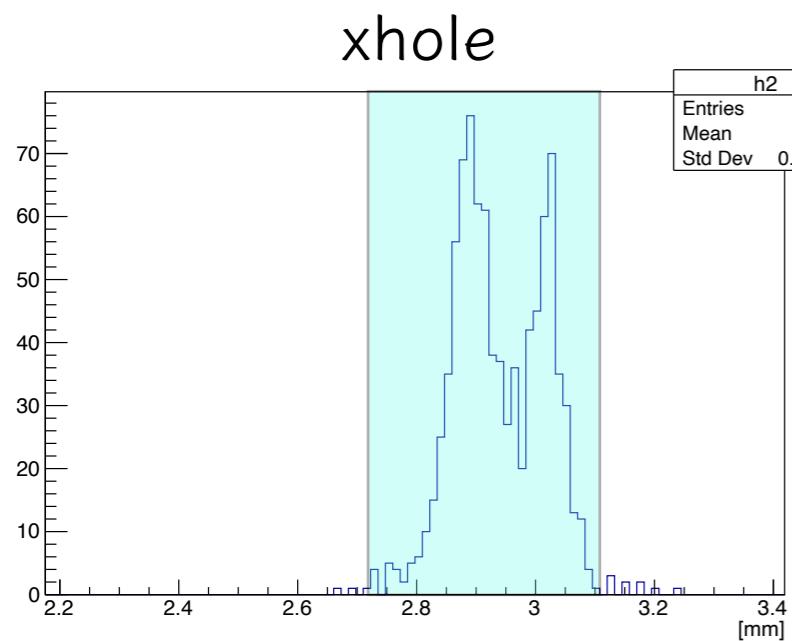
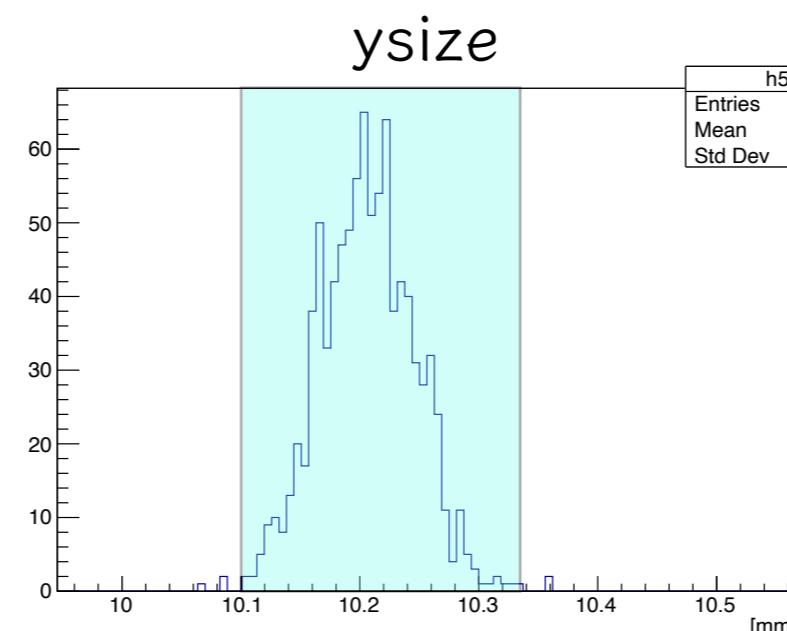
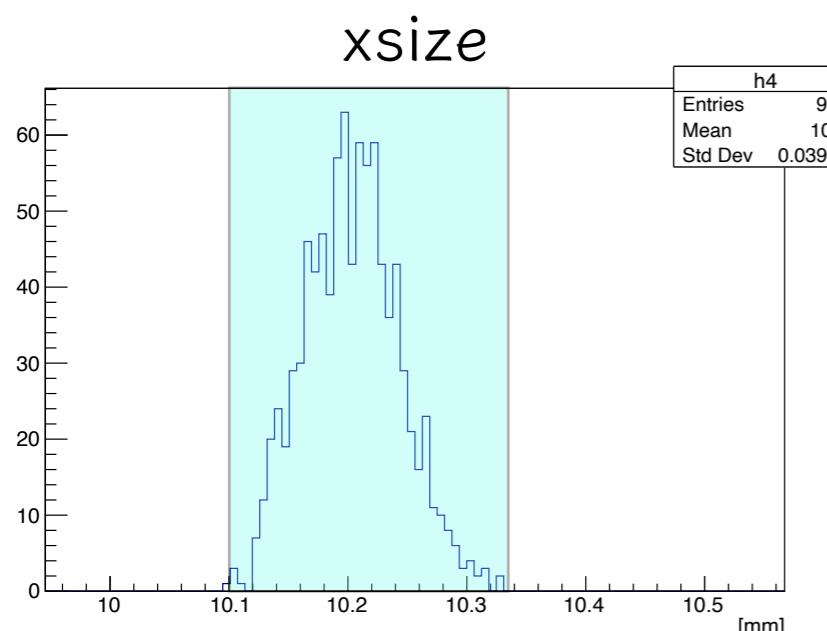
back up

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、ロシア方式良品キューブの分布を参考にする。

ロシア方式良品キューブの分布（青部分が選別領域）



ロシア方式良品キューブ：

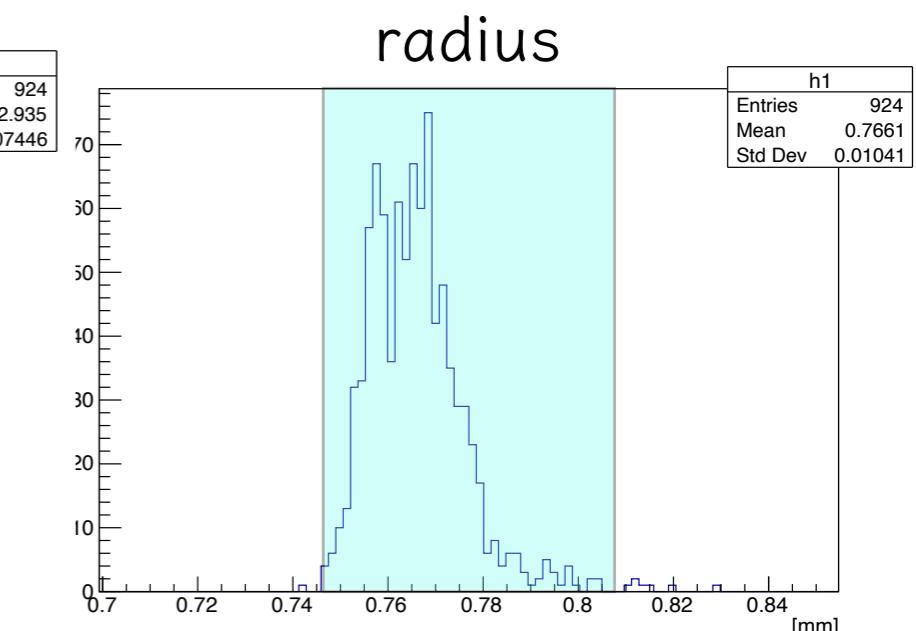
検査時間 23分/154個 (9秒/個)

良品	123 / 154	82.5%
不良品	23 / 154	17.5%
再検査	8 / 154	5.2%

ロシア方式不良品キューブ：

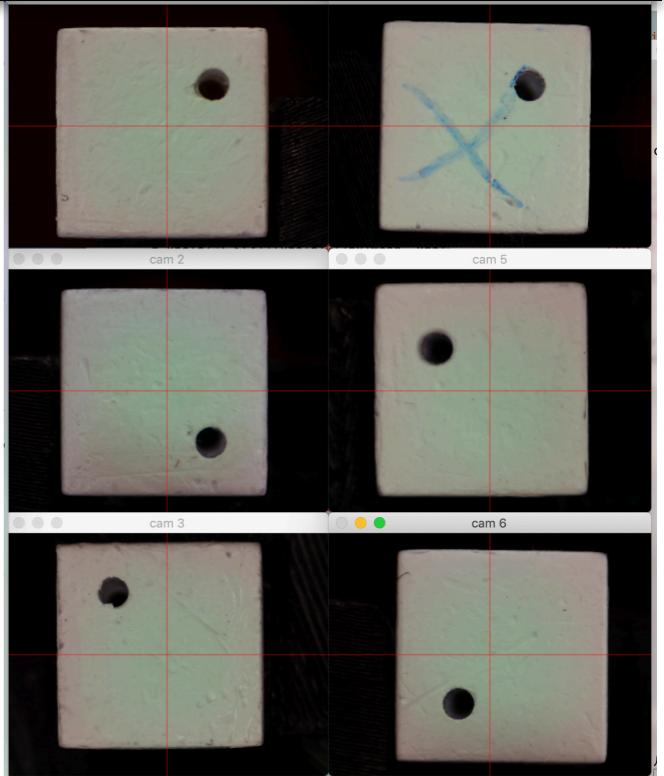
検査時間 46分/241個 (11.5秒/個)

良品	22 / 241	12.4%
不良品	202 / 241	87.6%
再検査	17 / 241	7.1%



カメラ・台座ごとの見え方の違い補正

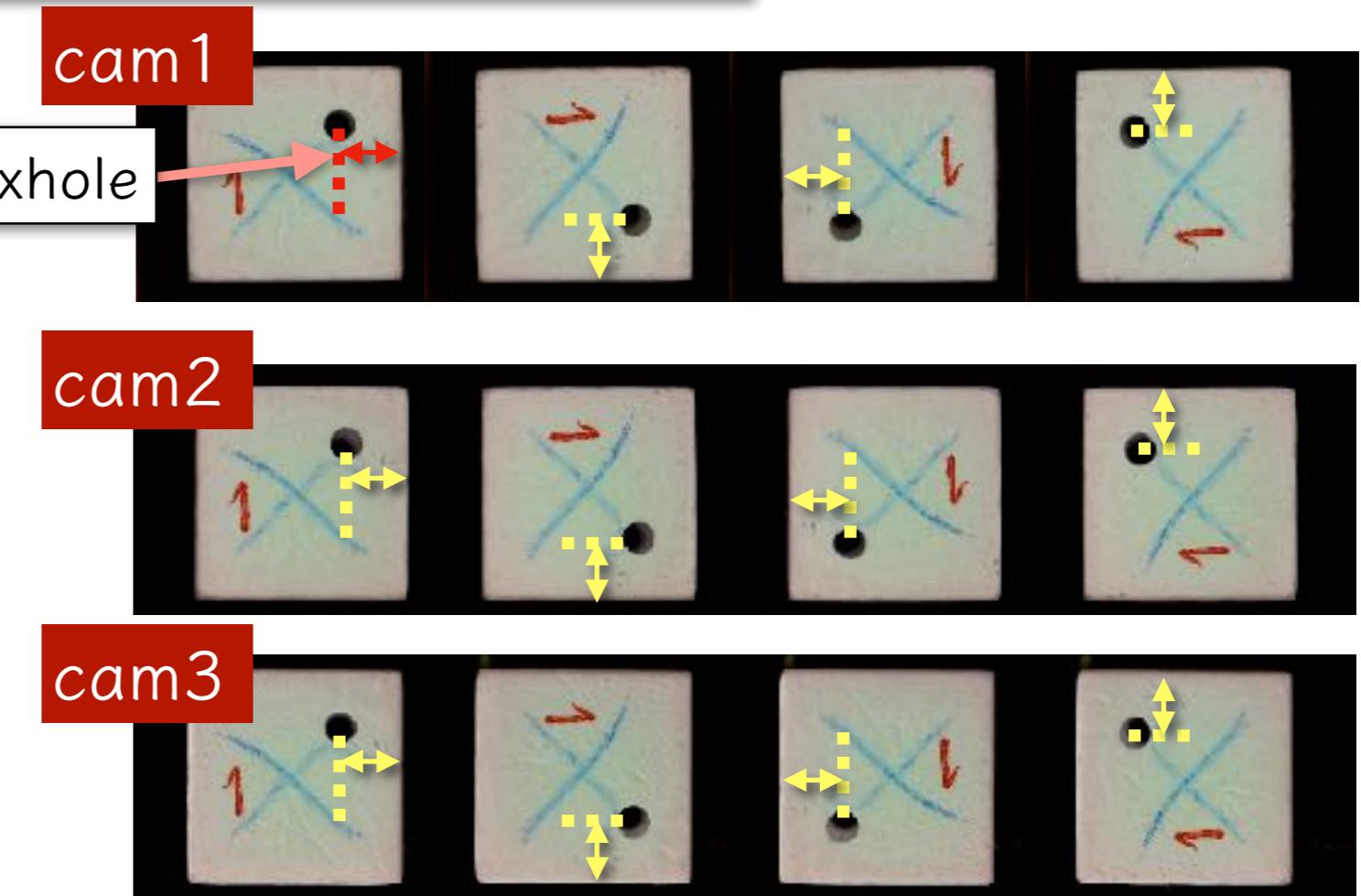
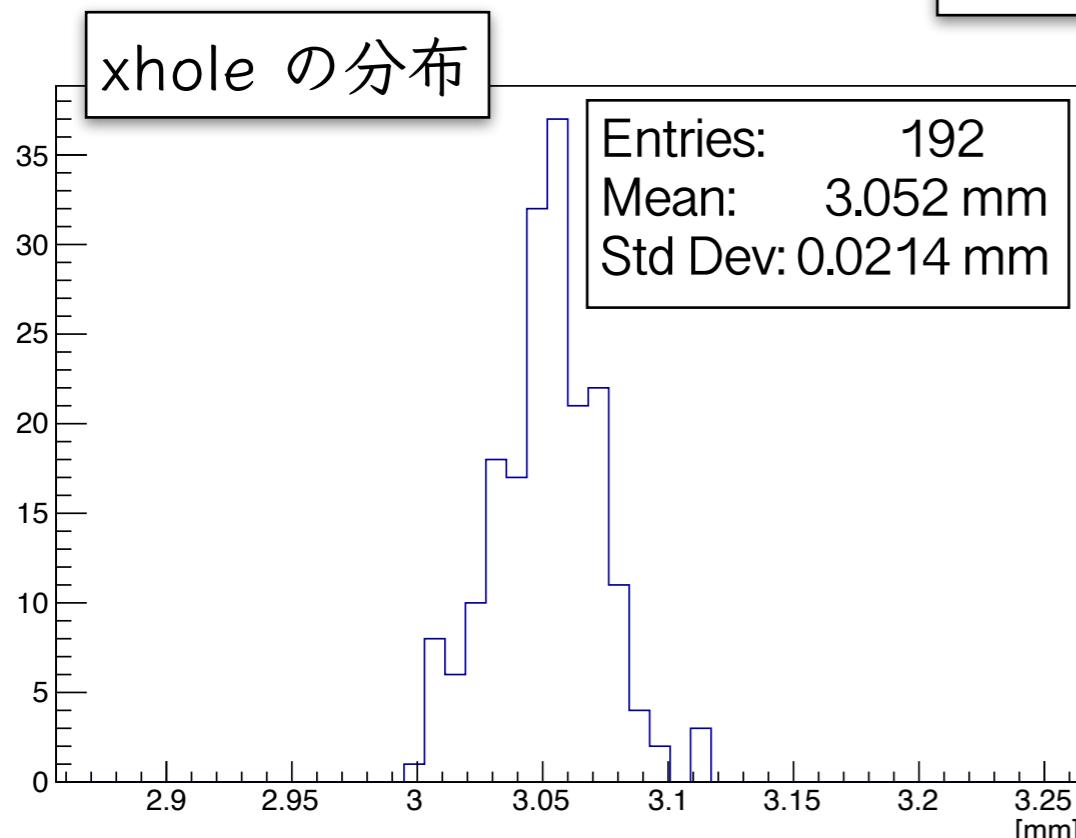
6台のカメラで撮影される画像



- 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

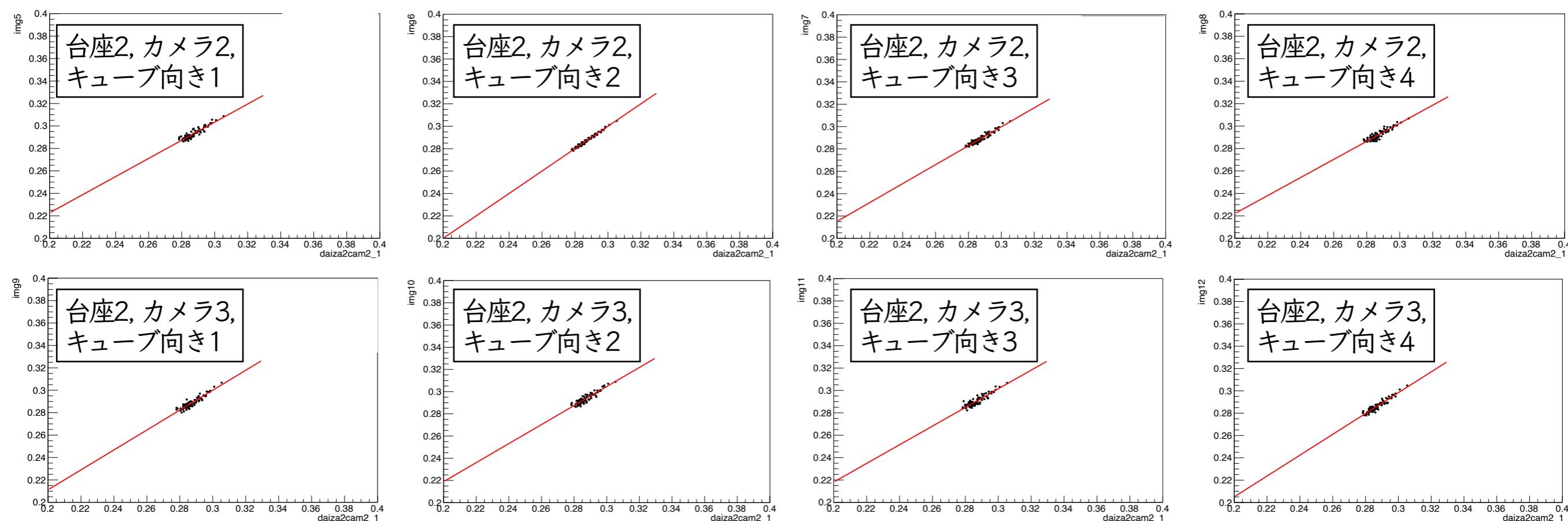
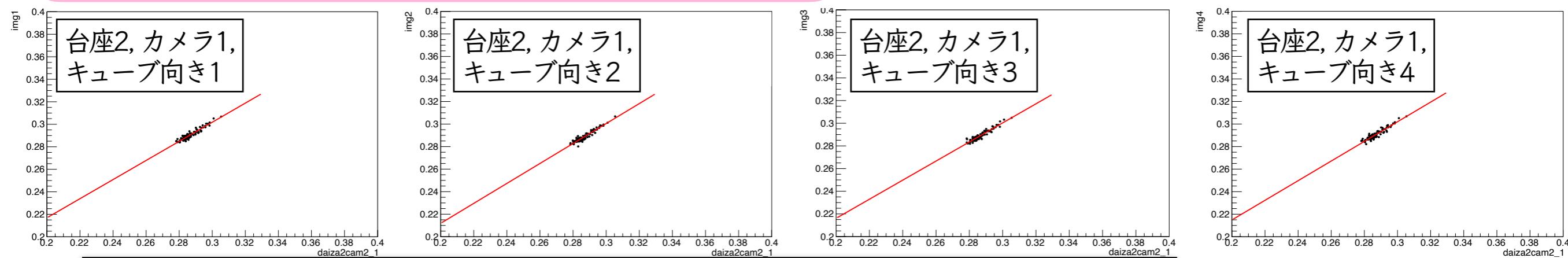
1つのキューブの1つの面をあらゆる条件で撮影し、抽出したパラメータが等しくなるような補正を行う。

キューブの向きによっても見え方が異なる



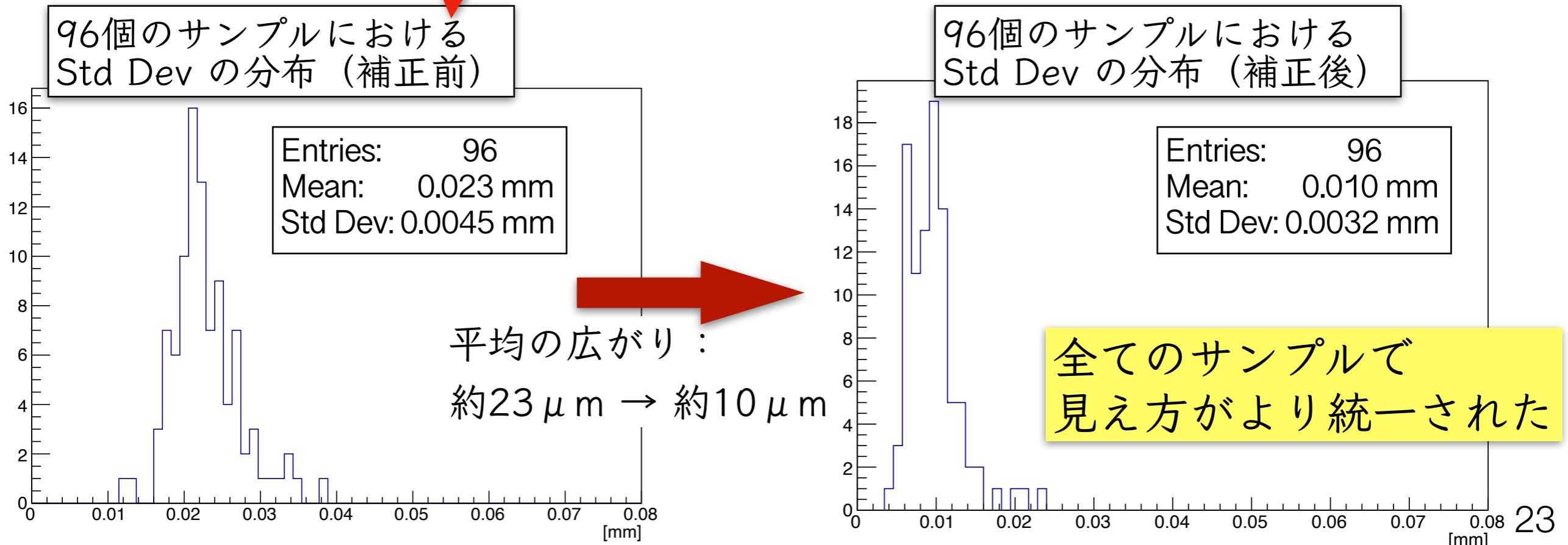
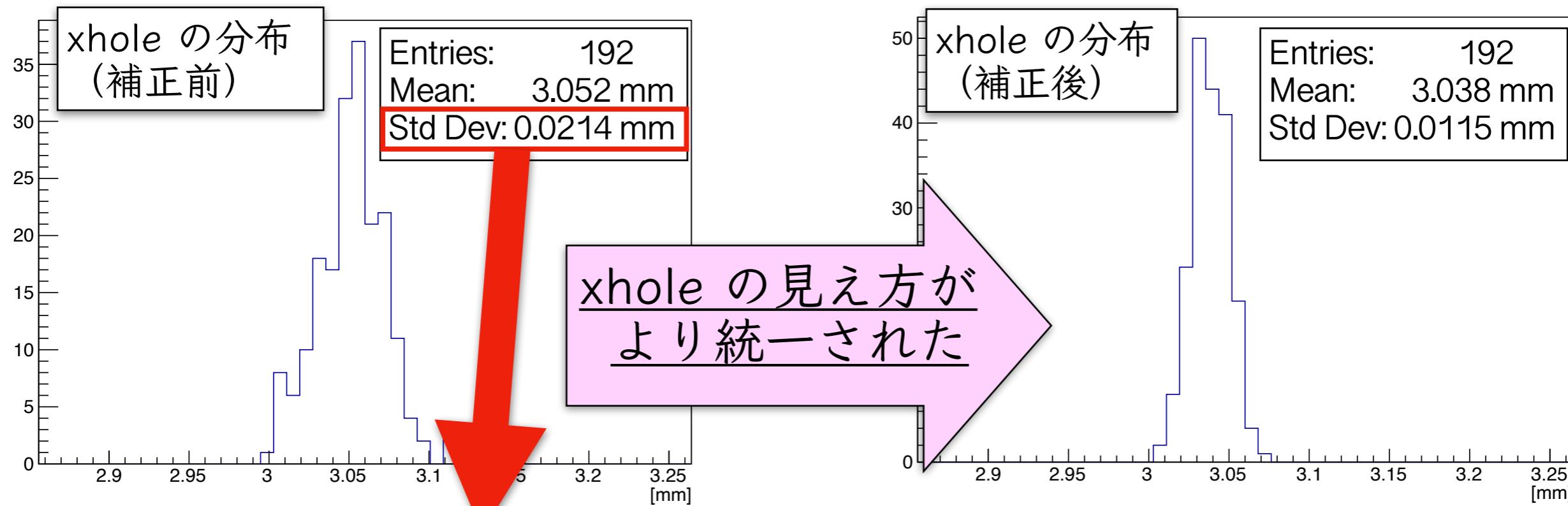
補正関数を求める

例：台座2、カメラ1,2,3について



- 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

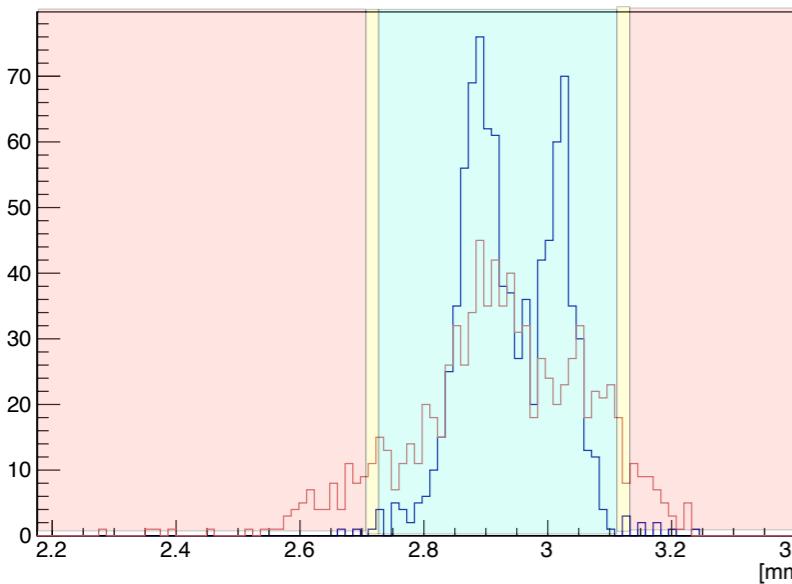
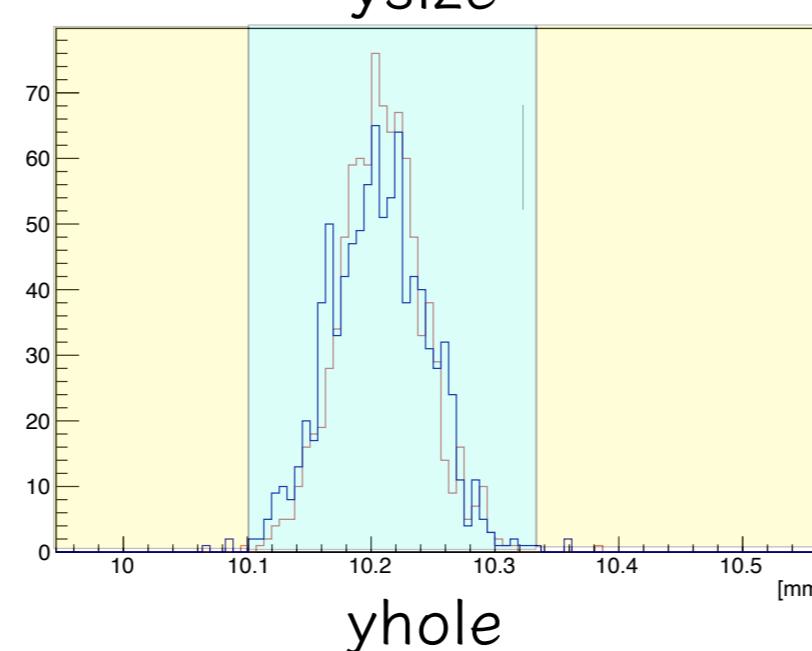
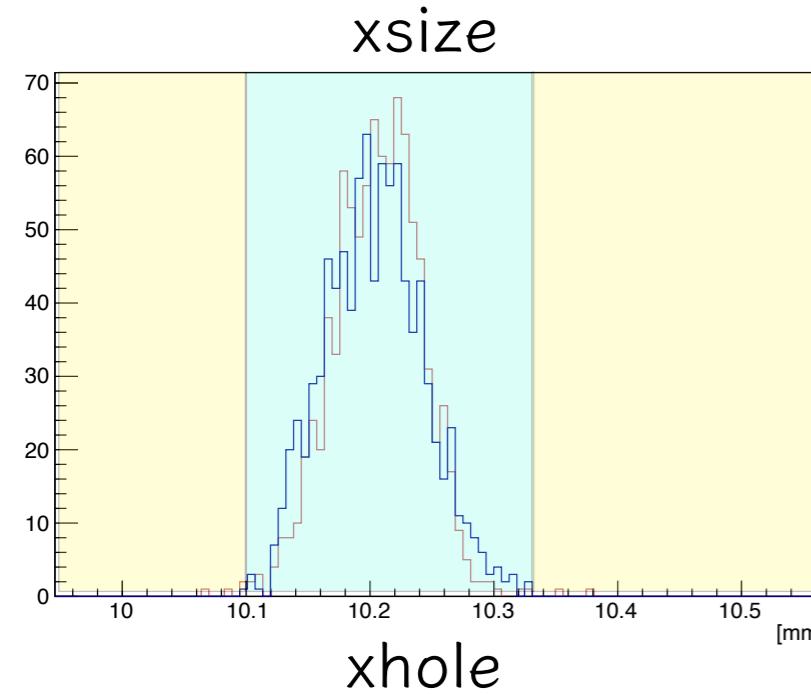


キューブ検査システム試運転

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、ロシア方式良品キューブの分布を参考にする。

ロシア方式良品/不良品キューブの分布（青部分が選別領域）



青：選別領域、赤：排除領域、黄：再検査領域

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 82.5%
不良品	23 / 154 17.5%
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 12.4%
不良品	202 / 241 87.6%
再検査	17 / 241 7.1%

キューブ穴位置の検出 - カイニ乗値の最小化 -

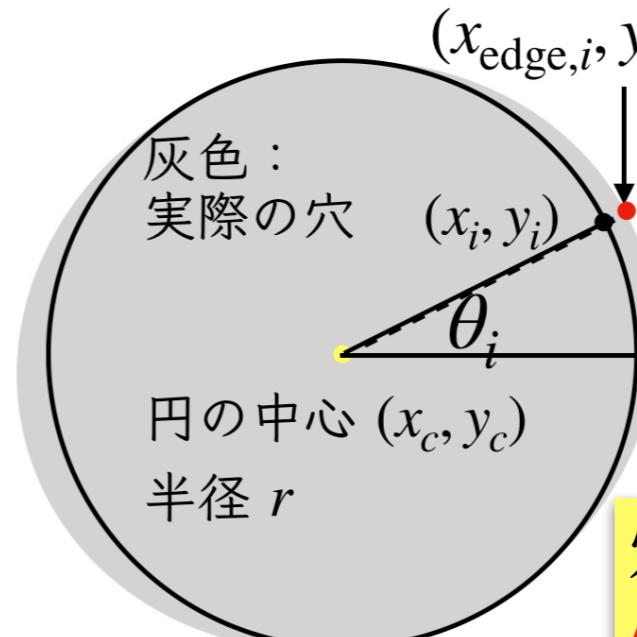
穴のエッジを検出し、それを円でフィッティングすることで正確な穴の中心を求める。

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

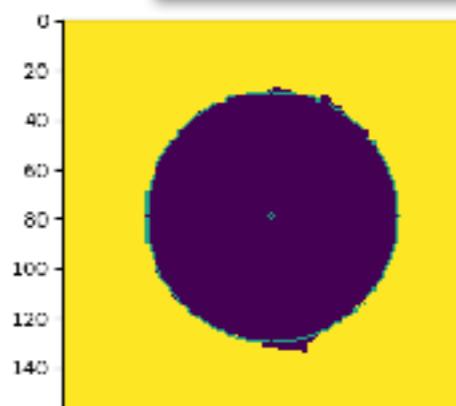
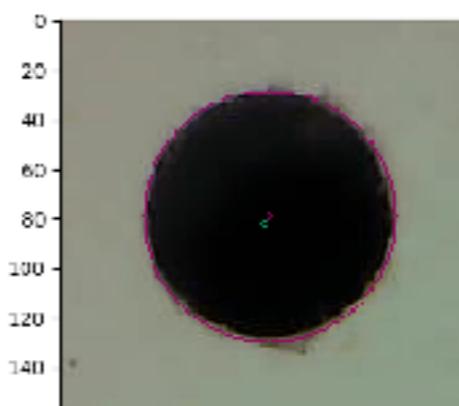
$$x_i = x_c + r \cos \theta_i, y_i = y_c - r \sin \theta_i$$

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。

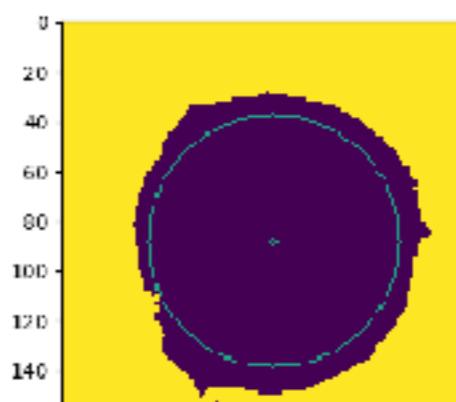
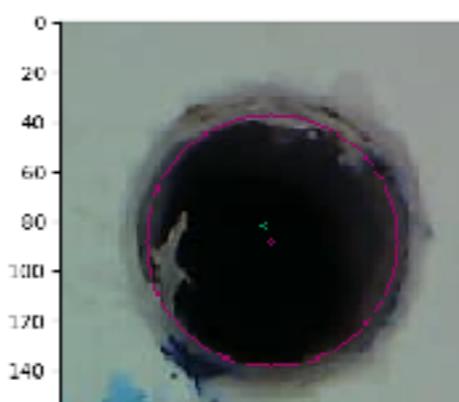


穴の状態に関わらず、
穴位置の最適化に成功!



良い状態の穴

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

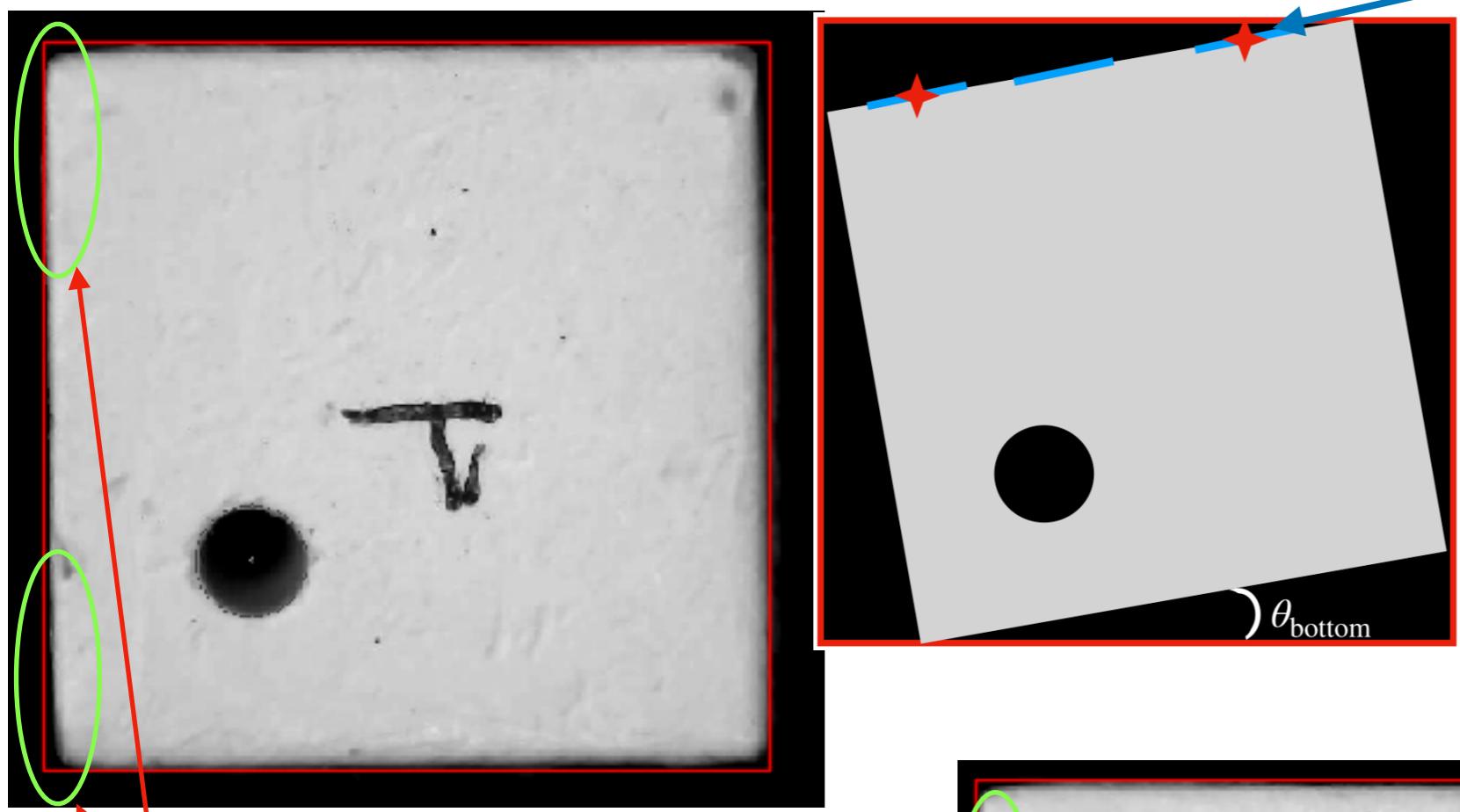


悪い状態の穴

$(x, y, r):(652.1, 254.1, 52.4)$ $E_{\text{sum}}:$ 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

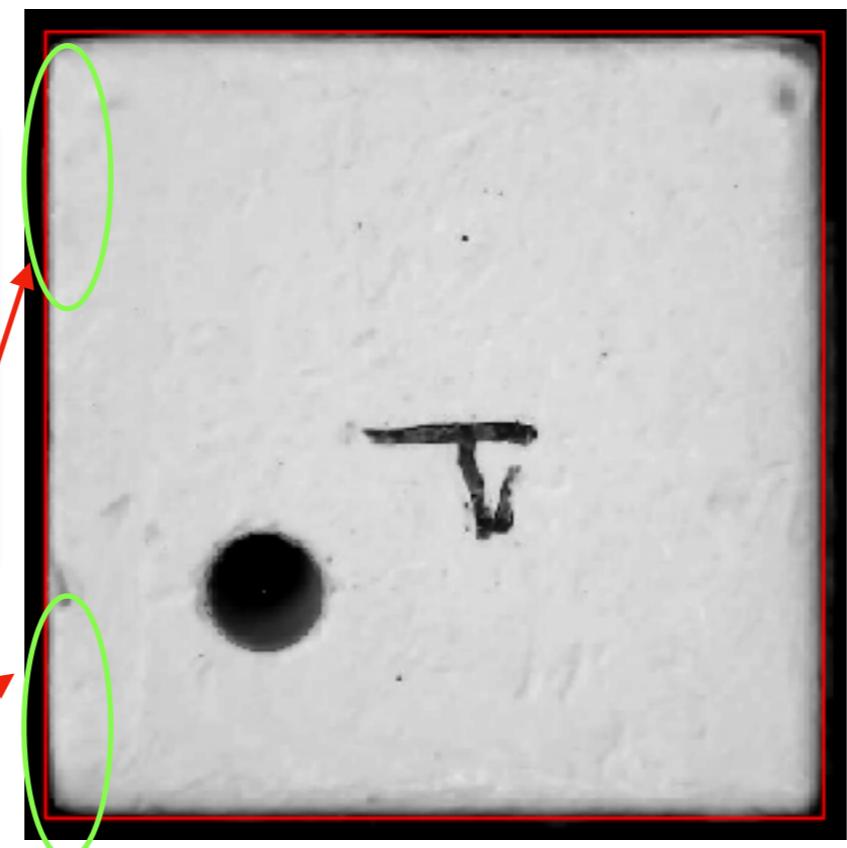
キューブの傾き補正



- 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

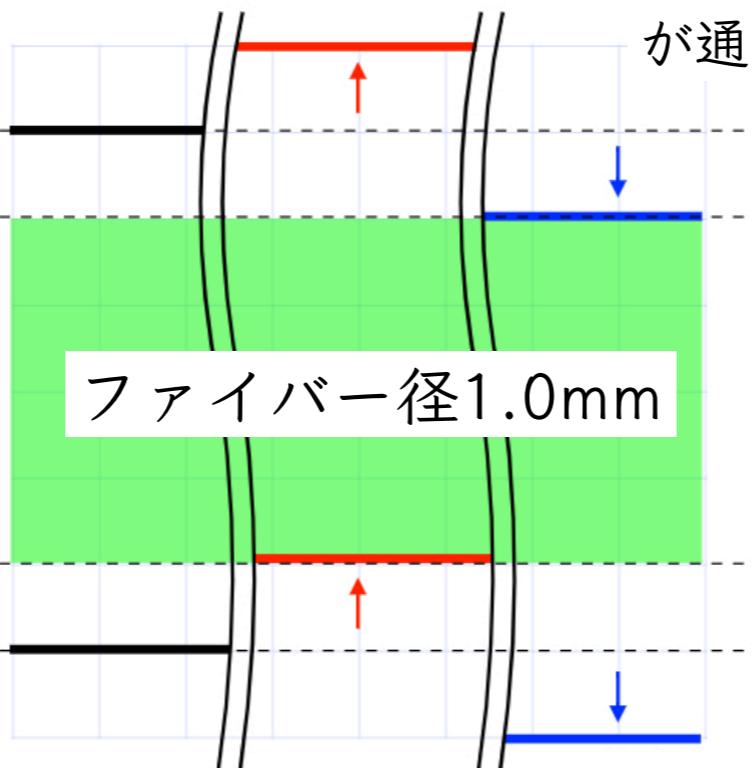
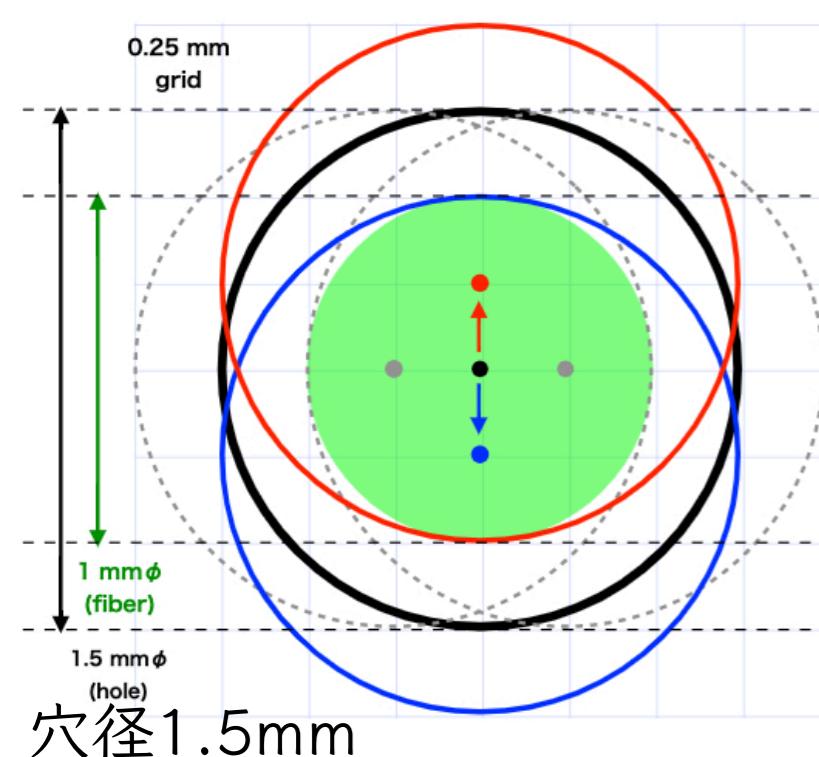
回転後: 補正により、隙間は解消された



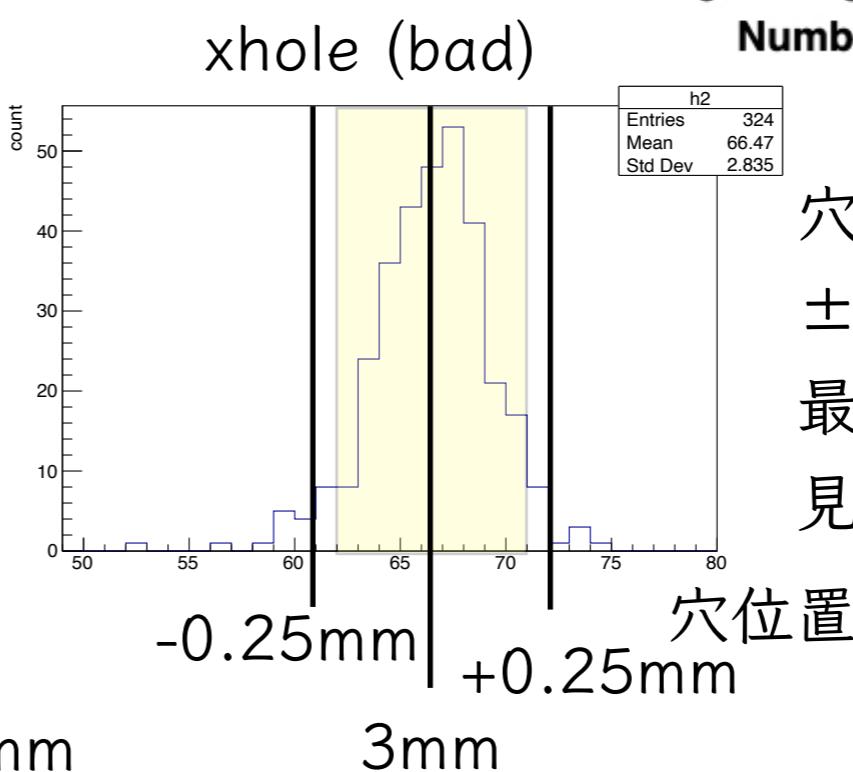
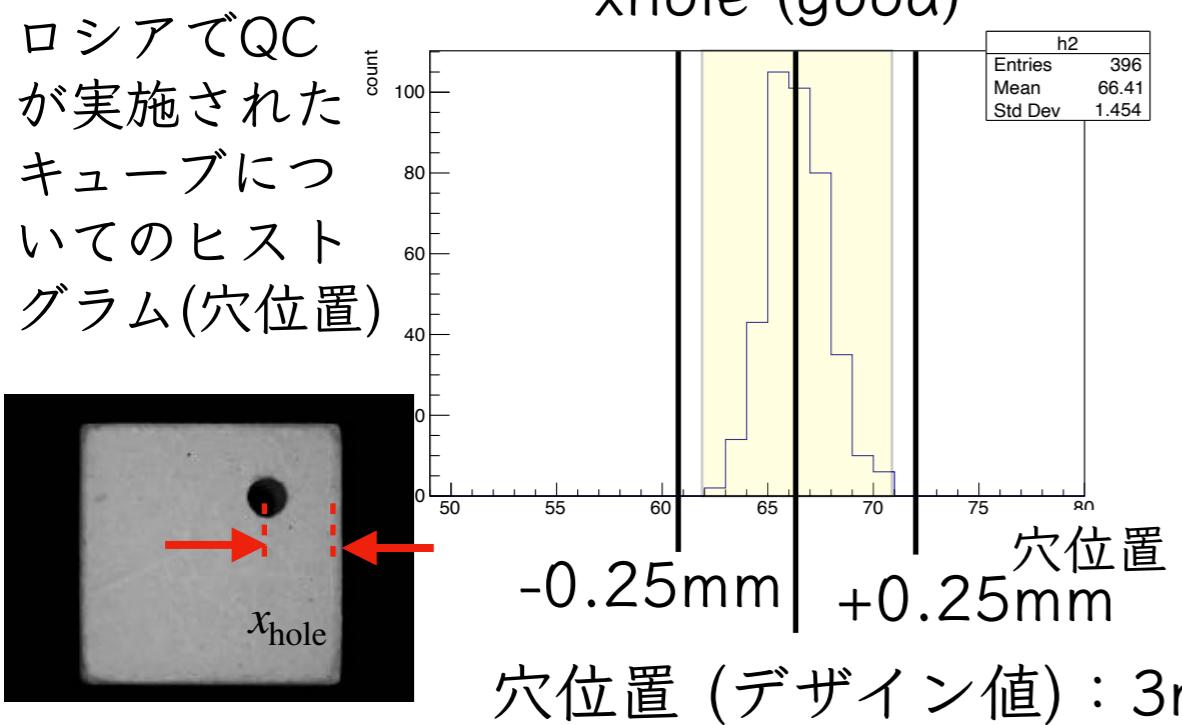
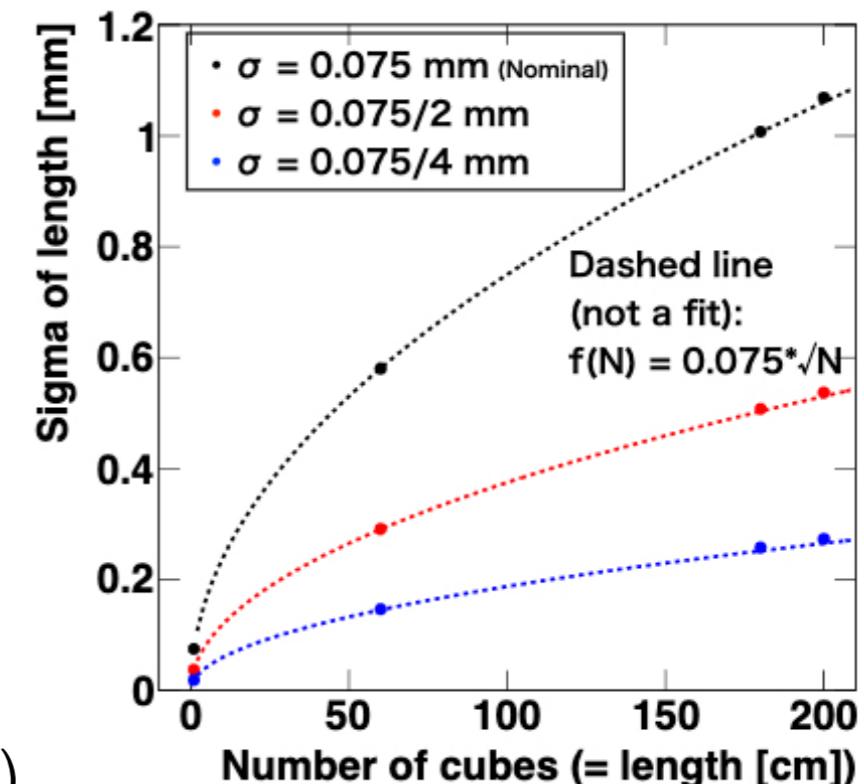
キューブの検出サイズ
(単位 pixel):
回転前: (667, 665)
→回転後: (661.0, 667.7)
1 pixel ~ 15 μm
x方向のサイズは補正された
y方向は過剰に回転してしまった? 統計をためて
詳しい確認が必要

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



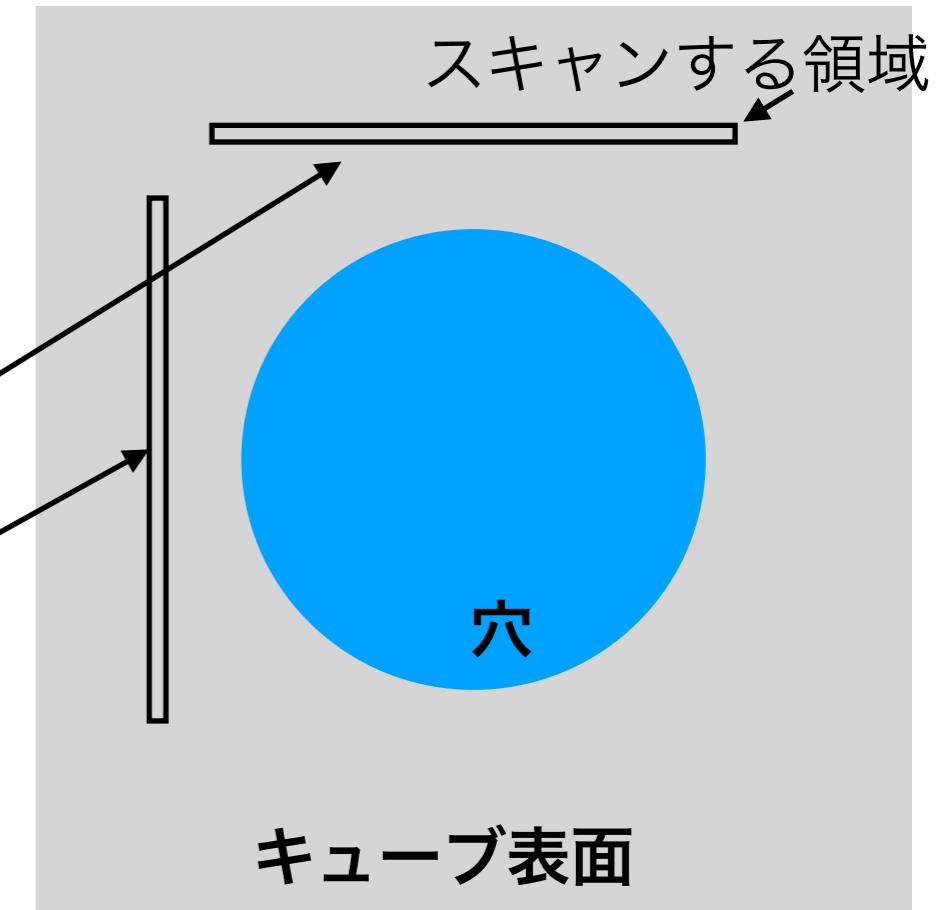
穴の位置が平均より ± 0.25 mm よりはずれていた場合、ファイバーは通らない。それ未満のズレの場合でも、キューブ表面の膨らみや穴の傾きによりファイバーが通らないことが懸念される。



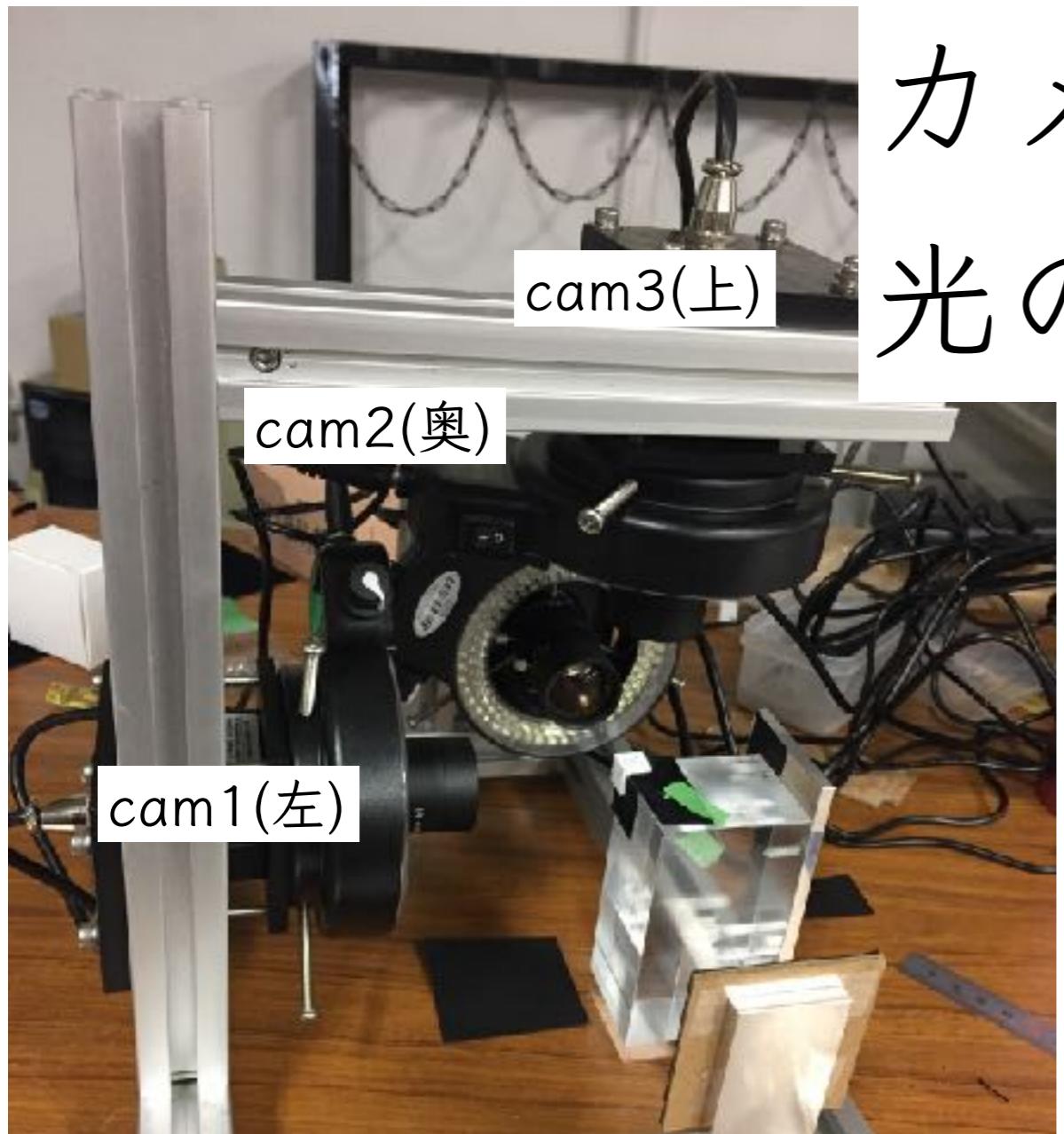
穴位置の許容範囲は ± 0.25 mm を目安に、最終的には分布の形を見て判断する

画像の二値化

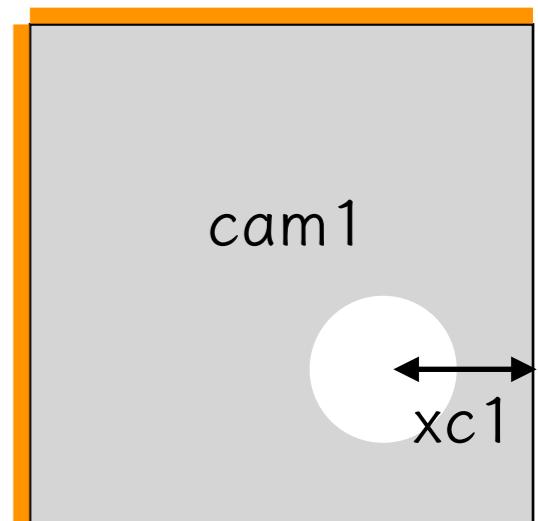
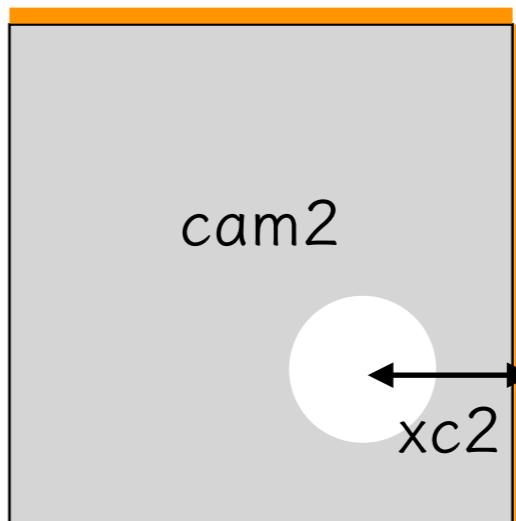
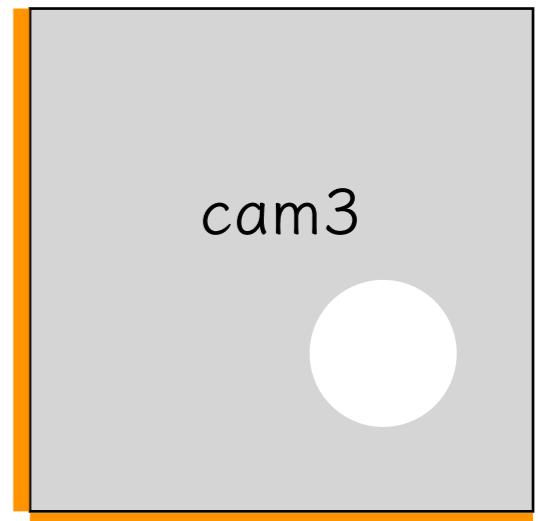
- 二値化のための threshold の決め方
- 穴の周囲の色の平均を参照値とする。
- 参照値の候補をふたつ (orそれ以上) 用意する
 - x方向にスキャンした平均
 - y方向にスキャンした平均
- キューブ表面の傷・印等の影響を減らすため、候補のうち、最も白いもののを参照値として採用する。



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。

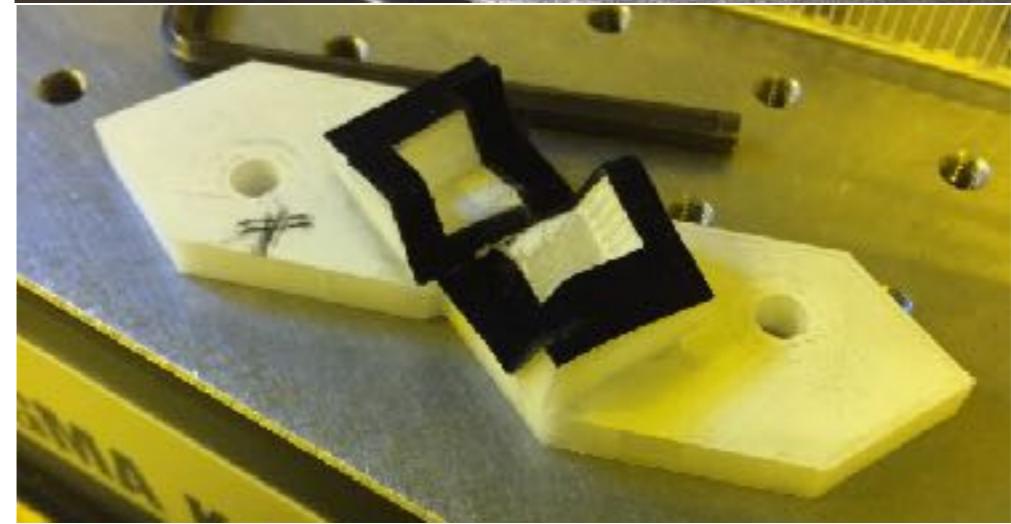
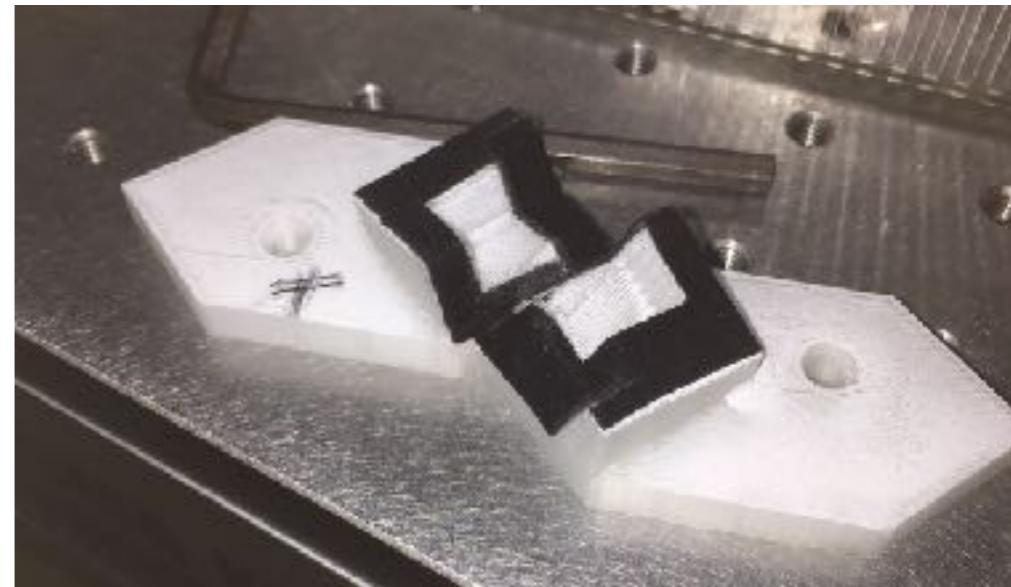


回転円盤

- 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

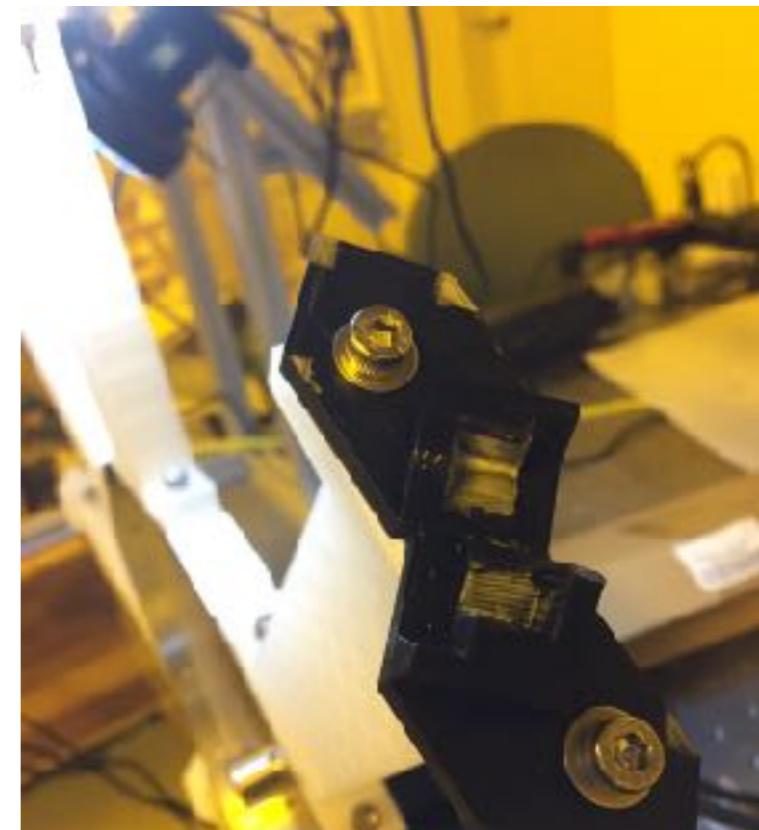
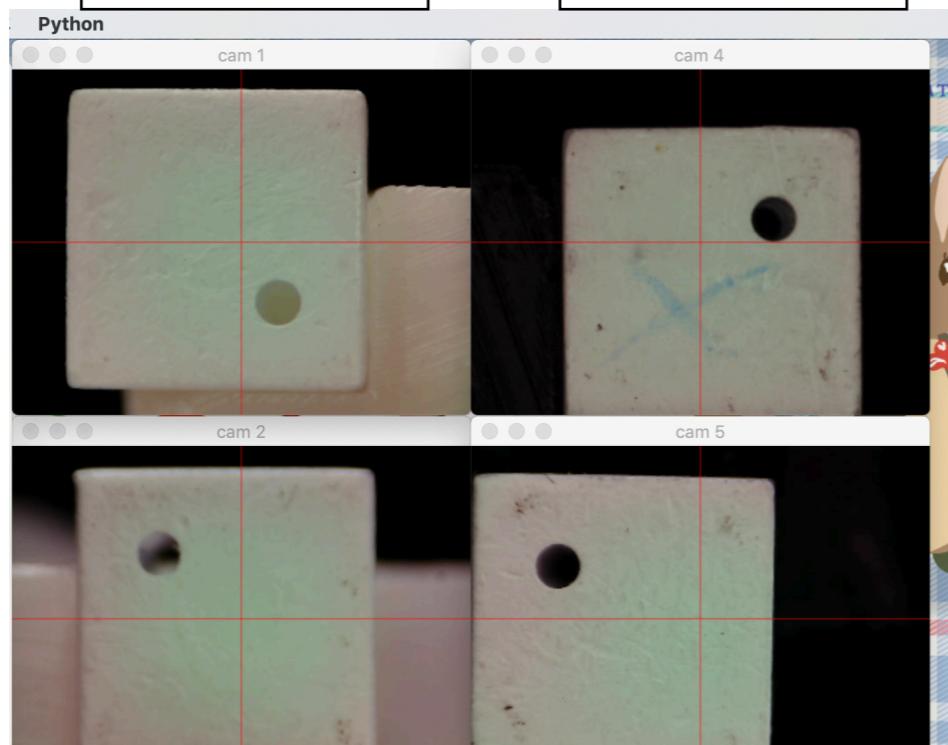


より簡単に黒くする

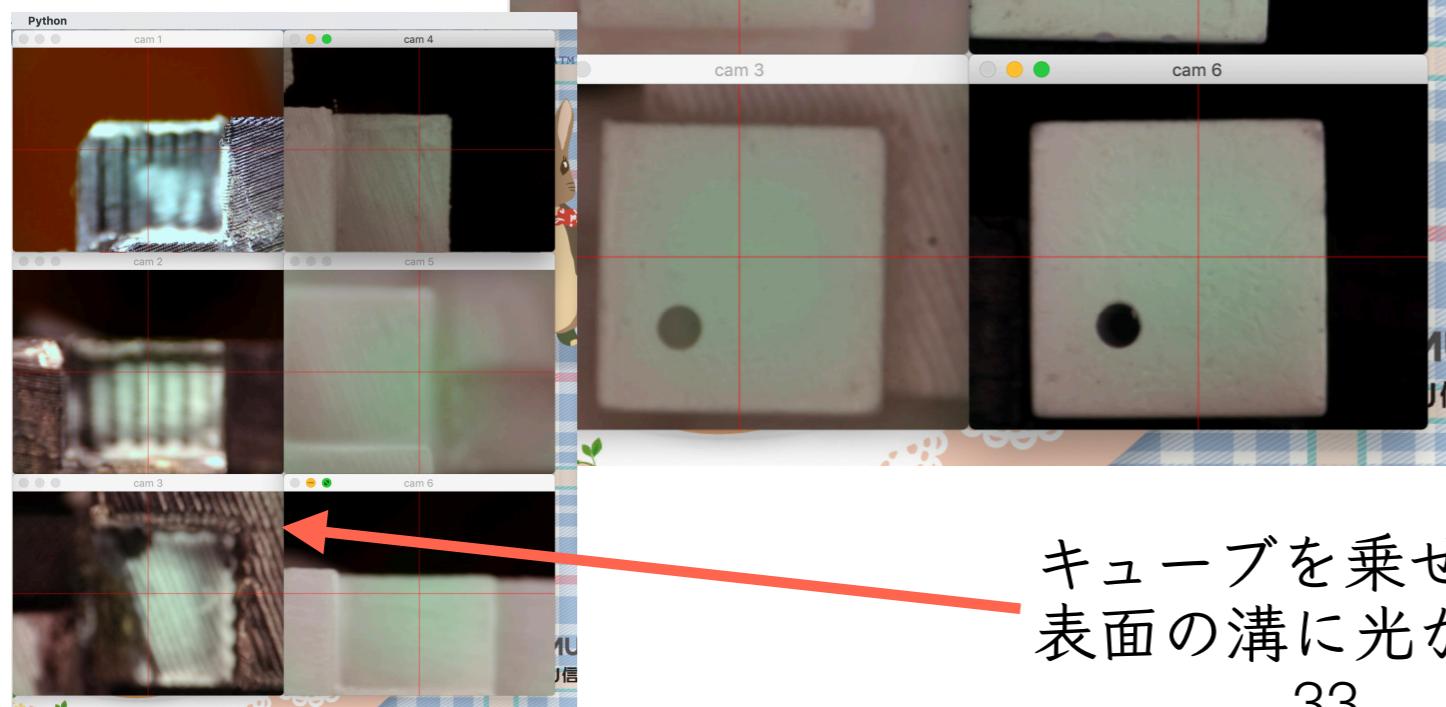
- 黒の 3D プリンタ素材
 - (つや消し黒の水性アクリルスプレー)
- これらが使えるか試してみた。

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

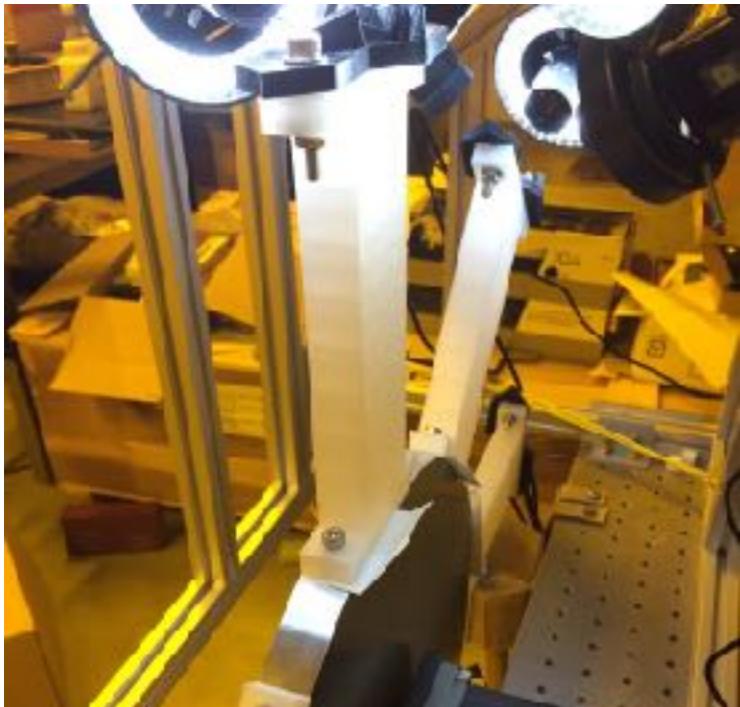


背景が黒のとき、三方向から光をあてると、
キューブの白と背景のコントラストにより、
黒の部分は詳細が写らなくなるらしい。

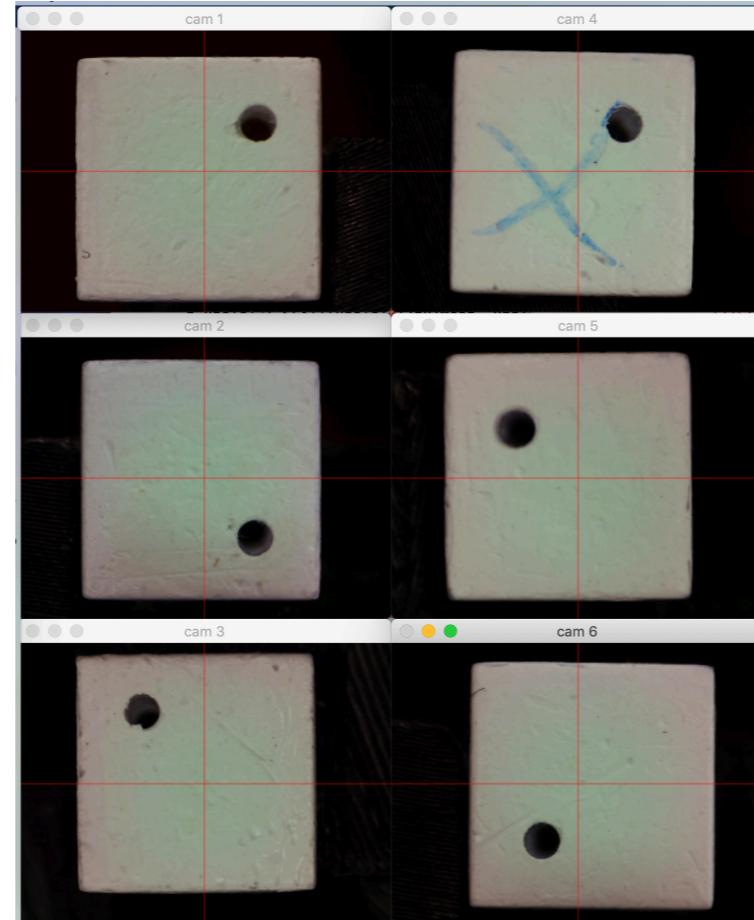
キューブを乗せずに撮影すると、
表面の溝に光が反射しているのが写る。

カメラ、台座の位置の微調整

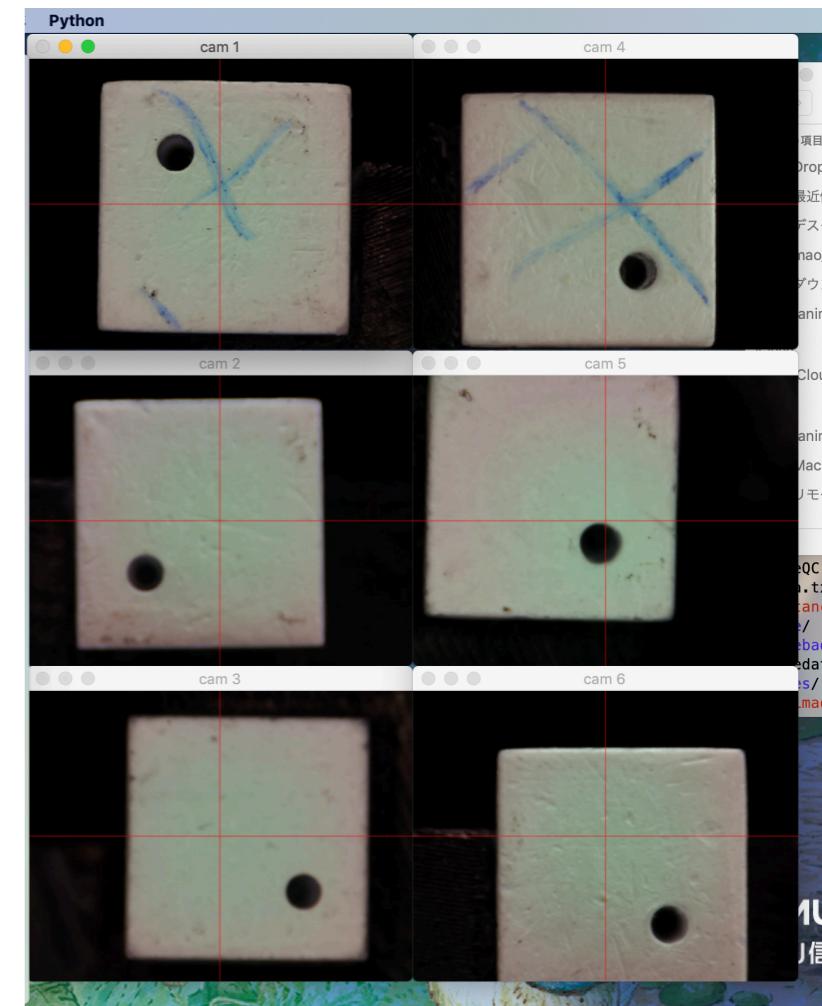
- CAD で描いた通りの位置にカメラを固定するも、キューブの正面を捉えてくれない。
→ 映像を見ながら、カメラの位置を微調整した。
- 微調整後も、台座によってはキューブの全体が映らない。
→ 映像を見ながら、台座の位置を微調整した。



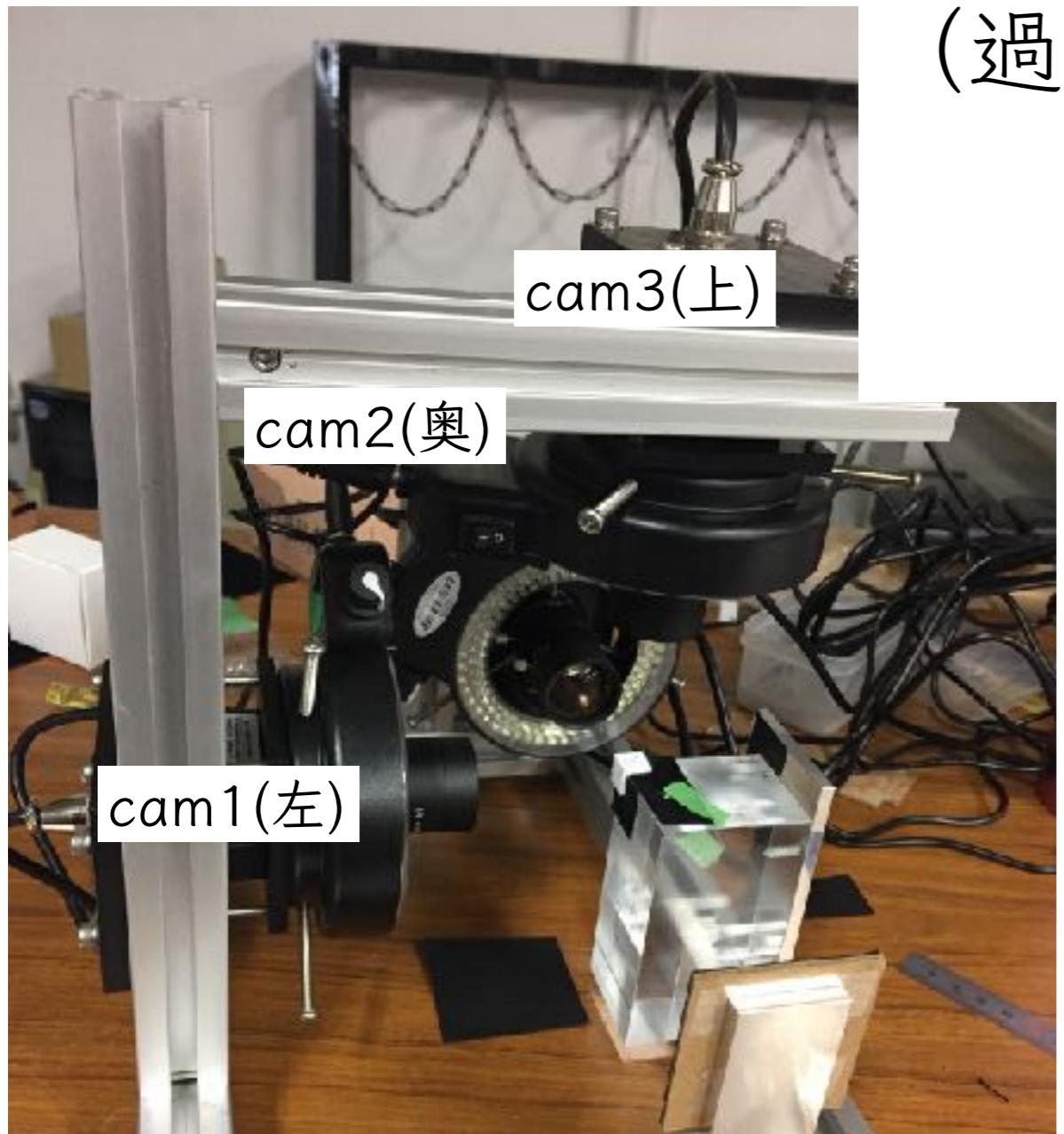
部品と円盤の間に
紙をはさんだ



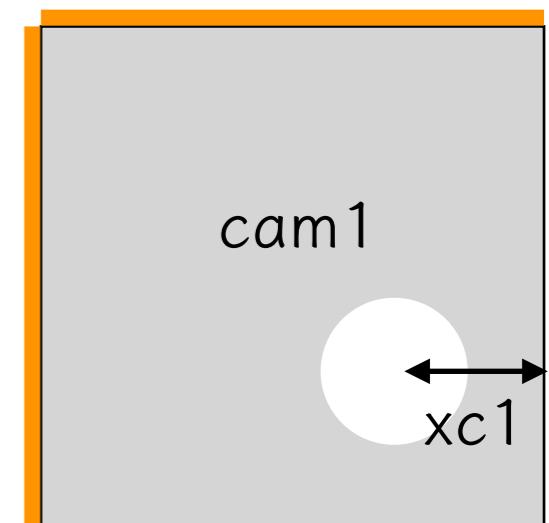
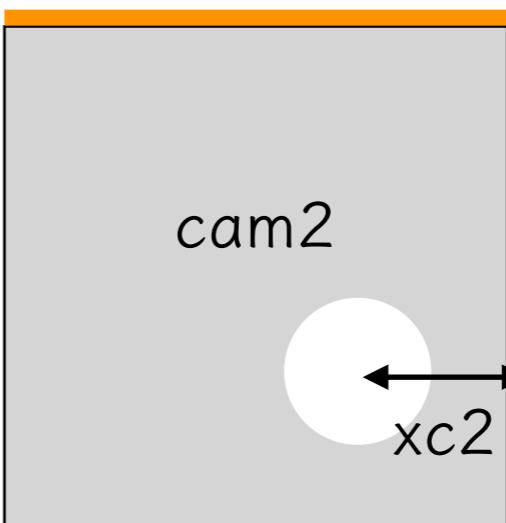
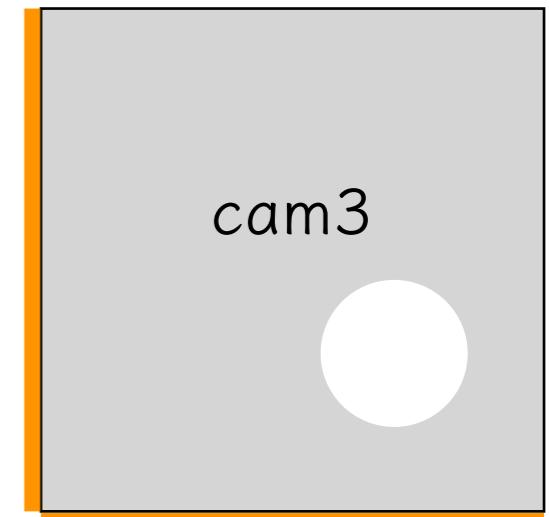
調整後のキューブの見え方



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

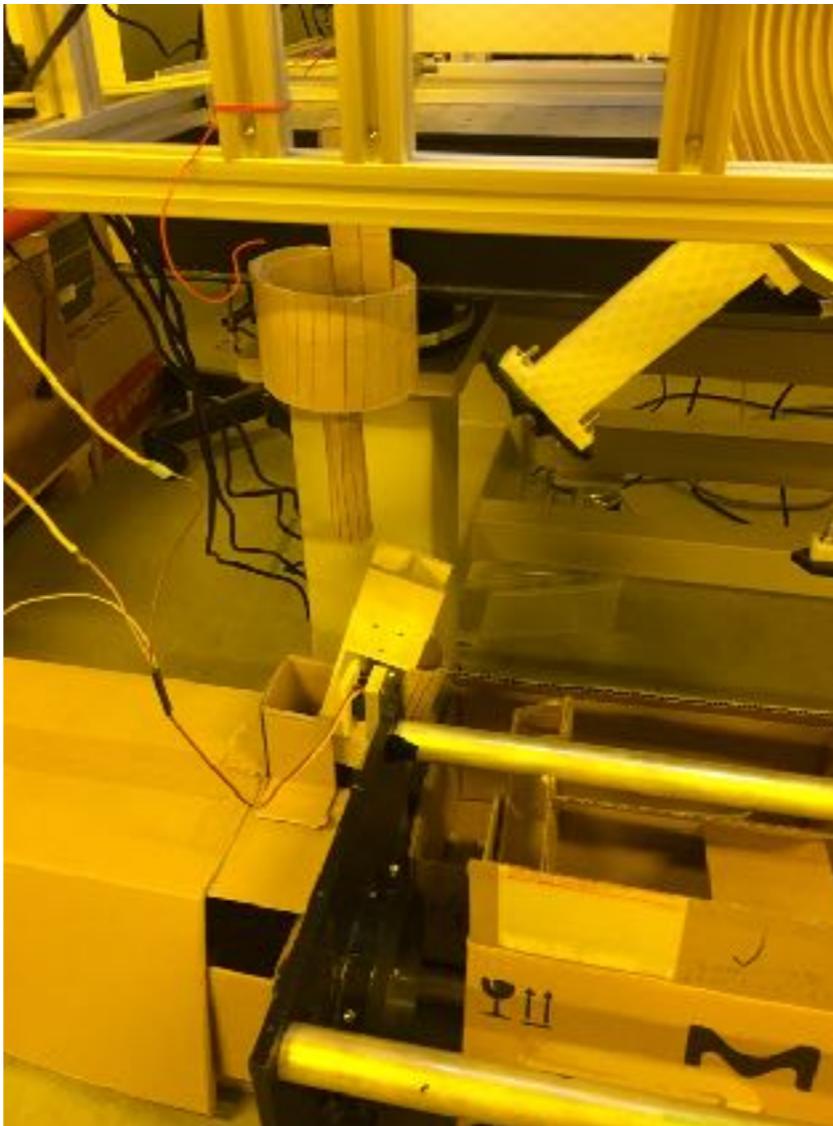
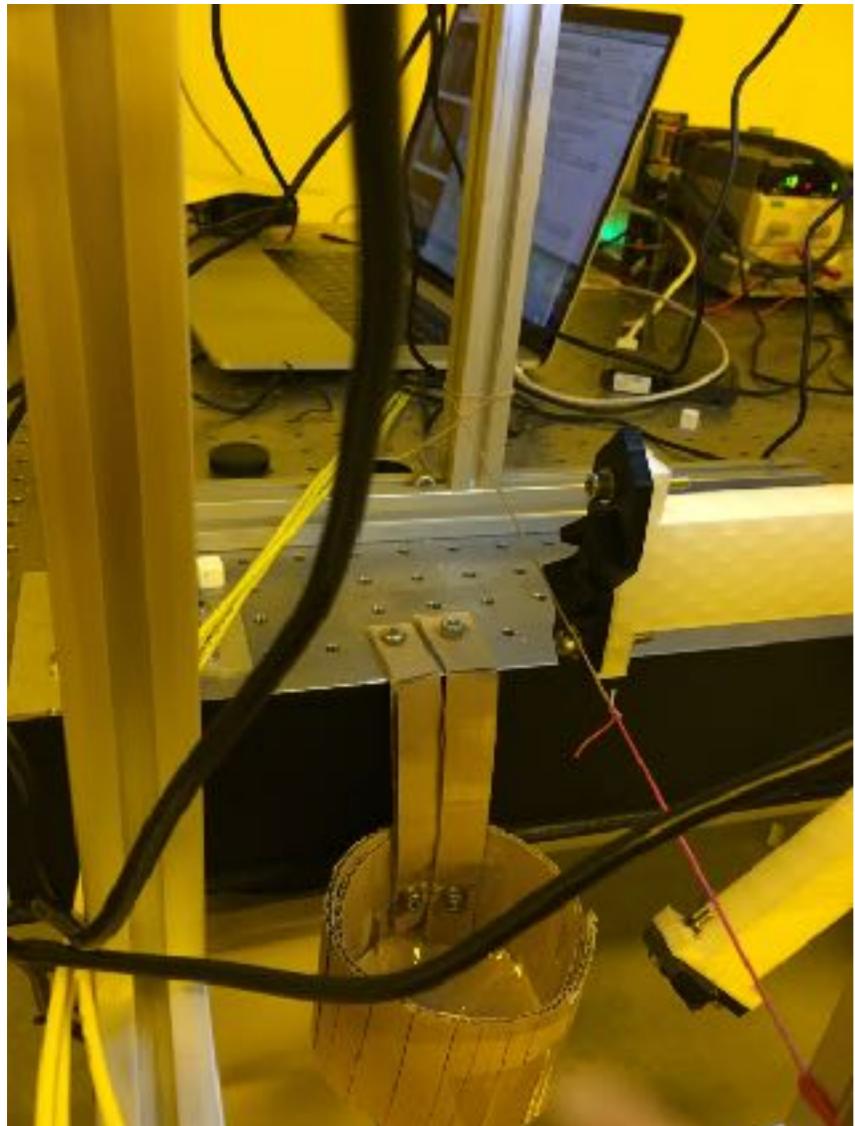


- オレンジの部分に、別方向からの光が当たる。
- 穴の辺からの位置が撮影状況によって変わってしまう
(本来は $xc1=xc2$ のはずなのに、 $xc2$ のほうが大きく見えてしまう)
- 同一の面をそれぞれのカメラで撮影、同一の辺長・穴位置について光の有無によって有意な違いがあるか確認。

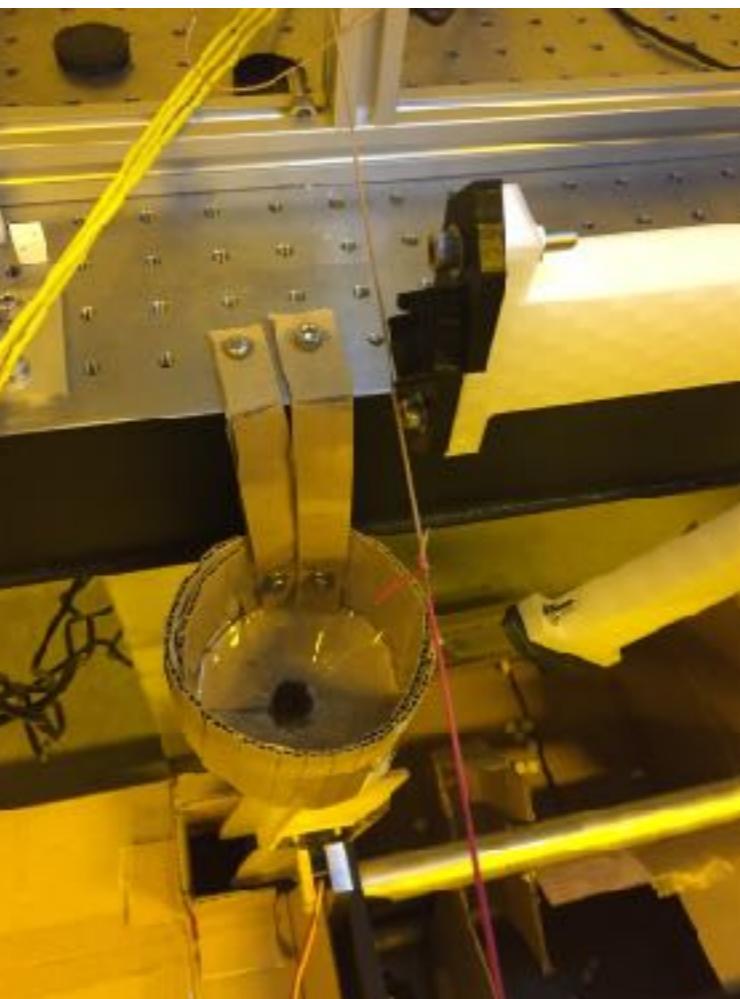
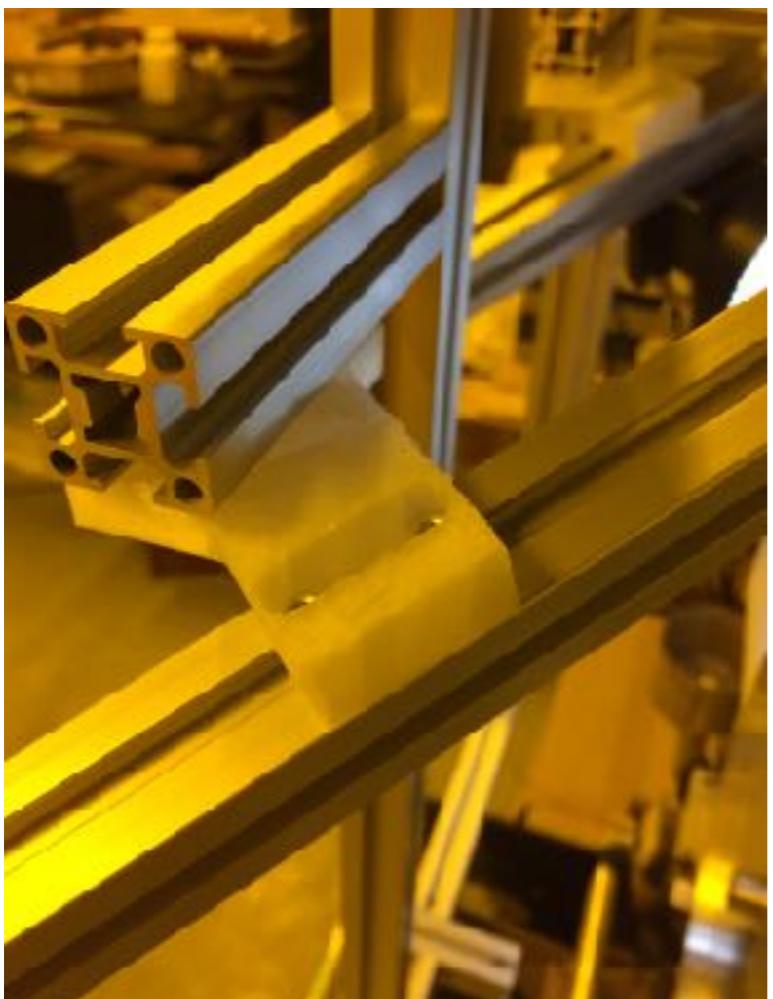
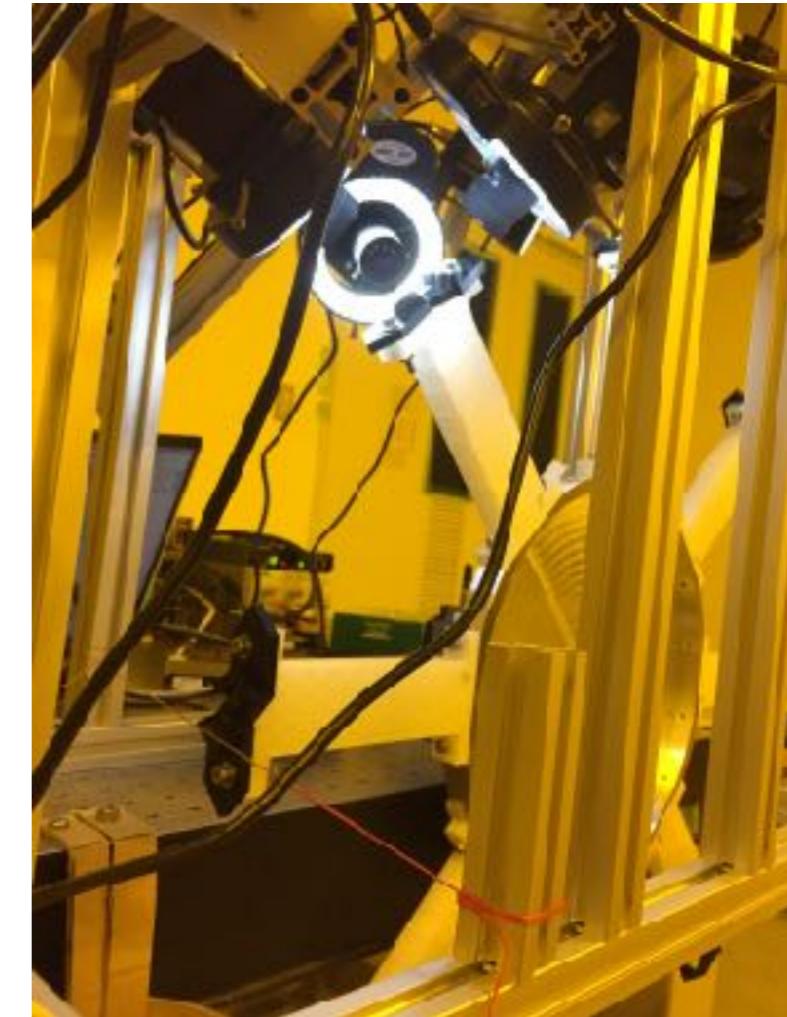
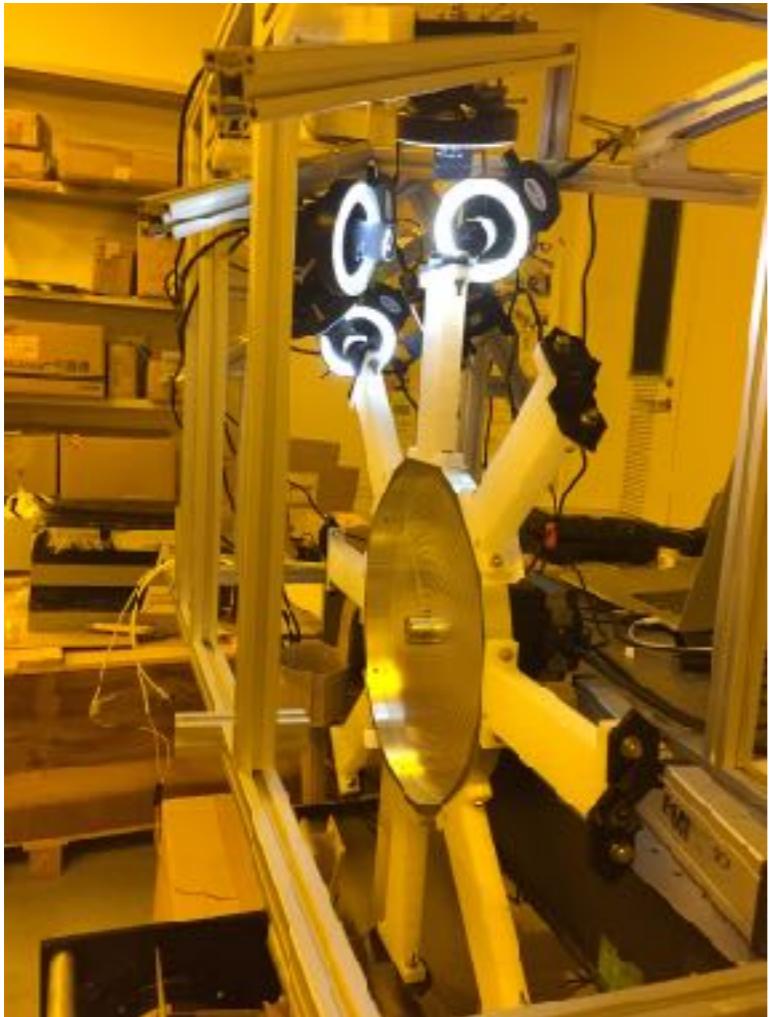
キューブ検査の本番

- 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



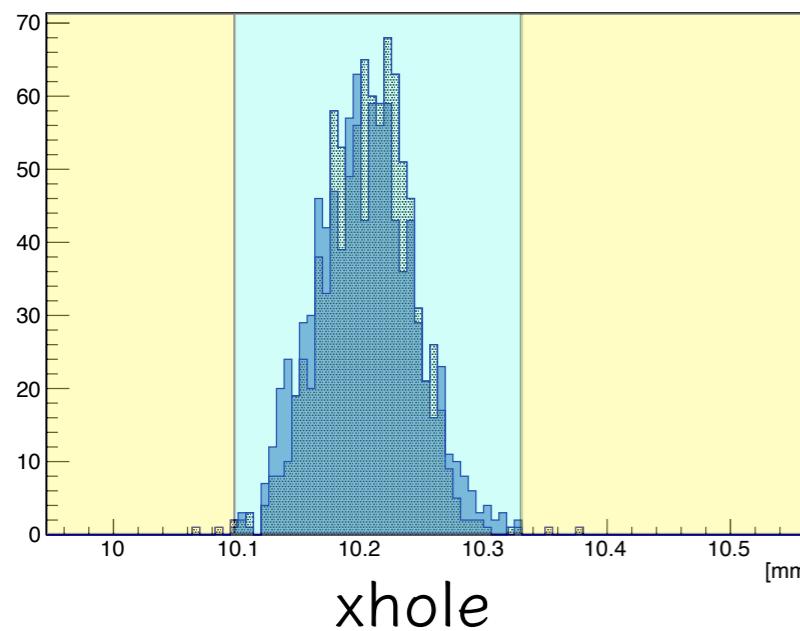
キューブ検査システム試運転

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。

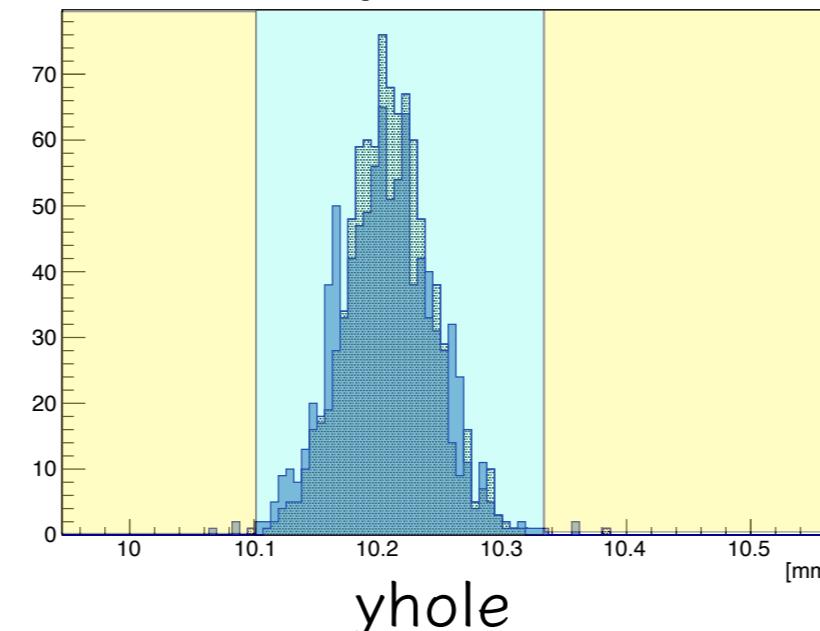
選別条件として、ロシア方式良品キューブの分布を参考にする。

ロシア方式良品/不良品キューブの分布（青部分が選別領域）

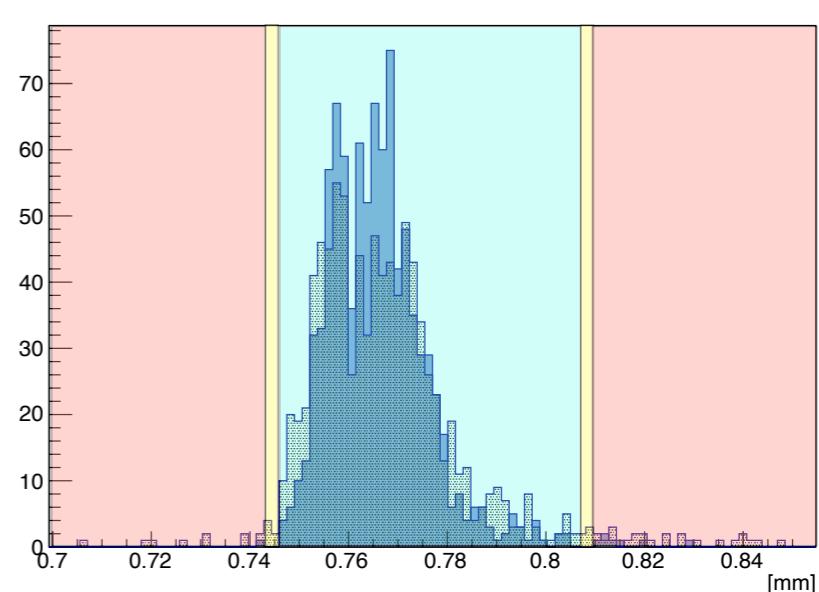
xsize



ysize



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 82.5%

不良品 23 / 154 17.5%

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 12.4%

不良品 202 / 241 87.6%

再検査 17 / 241 7.1%

青：選別領域、赤：排除領域、黄：再検査領域