

EIC-ePIC実験におけるBTOF検出器のための 長尺フレキシブル基板(FPC)の精度評価

奈良女子大学 理学部 数物科学科 数物連携コース

高エネルギー物理学研究室

B4 奥野愛理・中野日向子

目次

1. 研究背景
2. 実験目的
3. BTOFのためのFPC
4. 実験手法
5. 導通テスト
6. カメラを用いた配線幅の測定
7. まとめ

1.研究背景

2.実験目的

3.BTOFのためのFPC

4.実験手法

5.導通テスト

6.カメラを用いた配線幅の測定

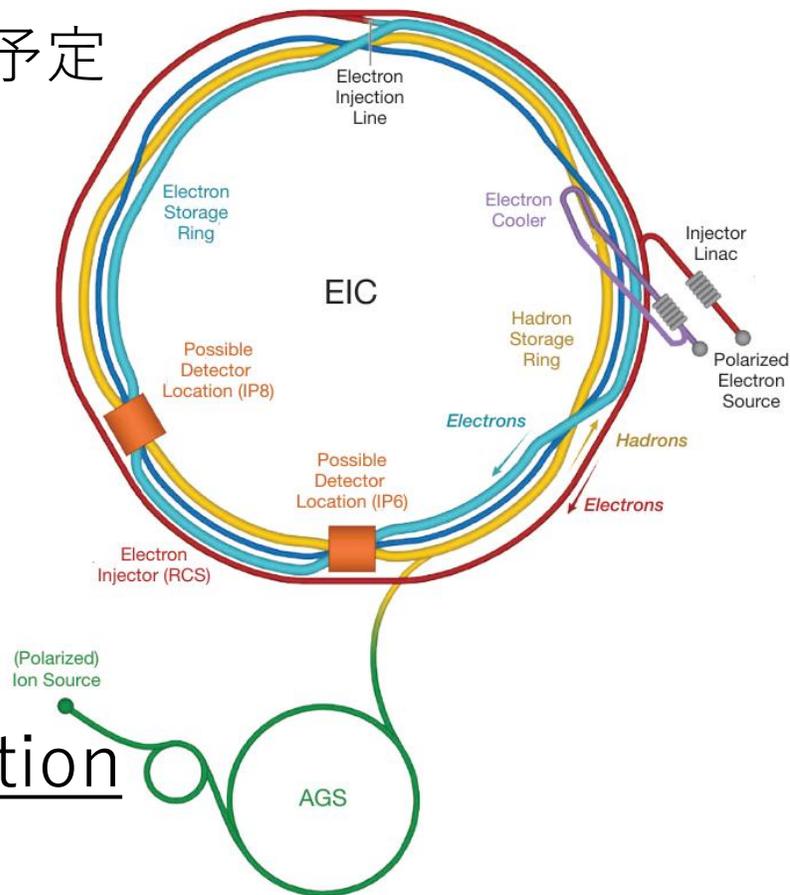
7.まとめ

Electron-Ion Collider (EIC)

ブルックヘブン国立研究所(BNL)に建設、2032年稼働開始予定の偏極電子+陽子及び原子核衝突型加速器

- 陽子の三次元的な内部構造の理解
 - 原子核内部でのグルーオン飽和の発見と研究
 - 核子・原子核のスピンの理解及びフレーバー構造の理解
- を主な目的とする

- 衝突エネルギー：20-140GeV
→ 陽子質量 ~ 1 GeV
- 衝突イオン範囲：陽子～ウラン
→ 主な原子核 (p, Cu, Au)



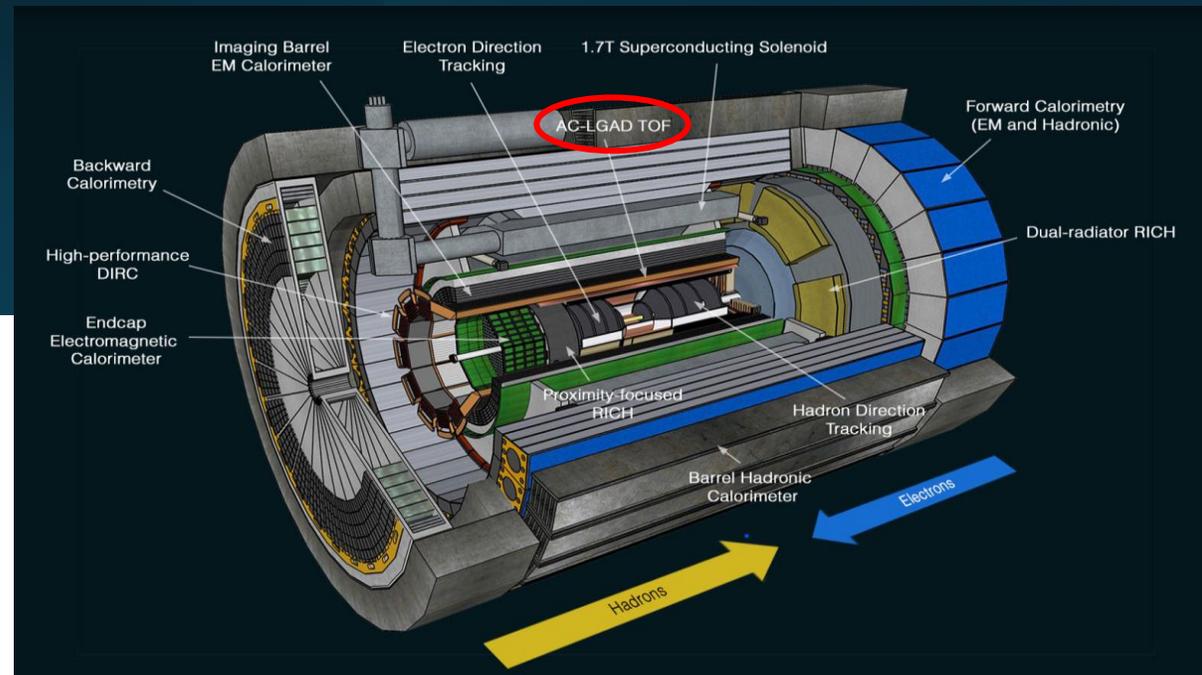
The Electron-Proton/Ion Collider(ePIC)Collaboration

EICにおいて、物理を理解するための検出器を開発する国際コラボレーション

ePIC実験

The ePIC Detector

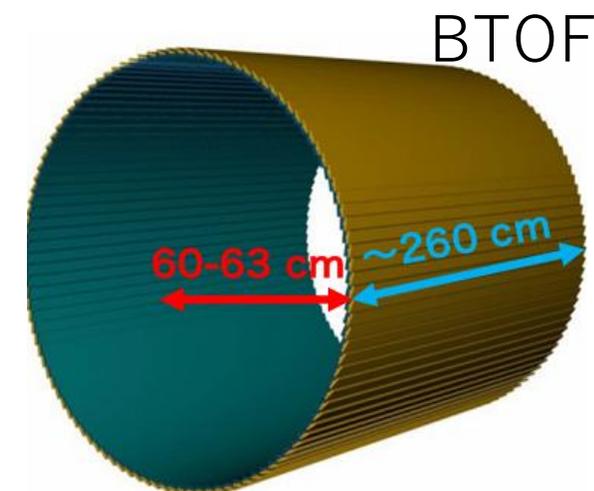
約10メートルの長さの円筒形バレル検出器



Barrel Time of Flight (BTOF) Detector

ePIC検出器の内層にある時間分解能や位置分解能を持つシリコン型半導体検出器

BTOF検出器で取得したデータを解析するために
Flexible Printed Circuits (FPC) を用いて検出器の外側に
信号を送る



EIC | ePIC Collaboration

1.研究背景

2.実験目的

3.BTOFのためのFPC

4.実験手法

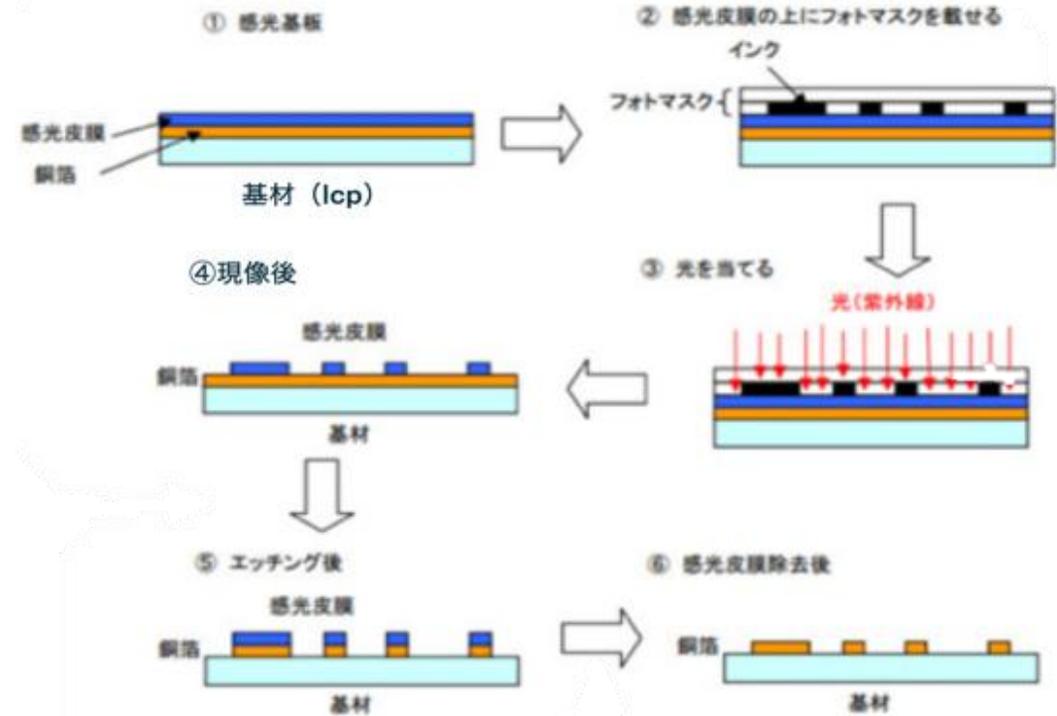
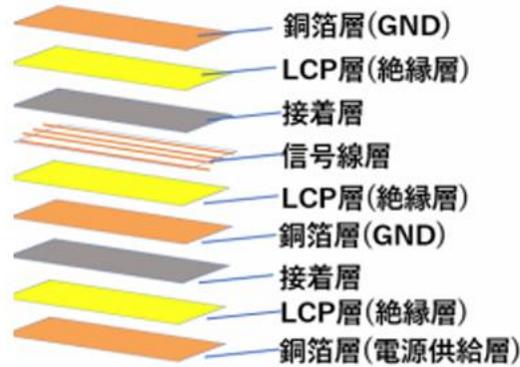
5.導通テスト

6.カメラを用いた配線幅の測定

7.まとめ

本研究で扱うFPCとは

検出器からの大量のデータを伝送するための送電線（フレキシブル基板）



ex) BNLで行われていた
sPHENIX実験のINTT検出器
(シリコンストリップ型中間飛
跡検出器) で使われていたFPC

2026/3/2

実験目的

sPHENIX実験のINTT検出器で使用されていたFPCは信号線本数124本が信号線幅130 μm 、信号線間隔130 μm ピッチで均等に並んでいた



FPCが与える飛跡粒子への影響を小さくするため、より低体積・低質量なFPCを使用したい



今回の研究に使用したFPC

- 信号線126本が信号線幅50 or 70 or 100 μm 、信号線間隔50 or 70 or 100 μm ピッチで均等に並んでいる
- 1枚のシートにバスエクステンダーが6本プリントされている



目的

新しく製作したFPC（線幅50 μm 、線幅70 μm 、線100 μm ）を比較して、EICのePIC実験において、どの線幅のFPCが検出器に搭載するのに最適かを確認する

1.研究背景

2.実験目的

3.BTOFのためのFPC

4.実験手法

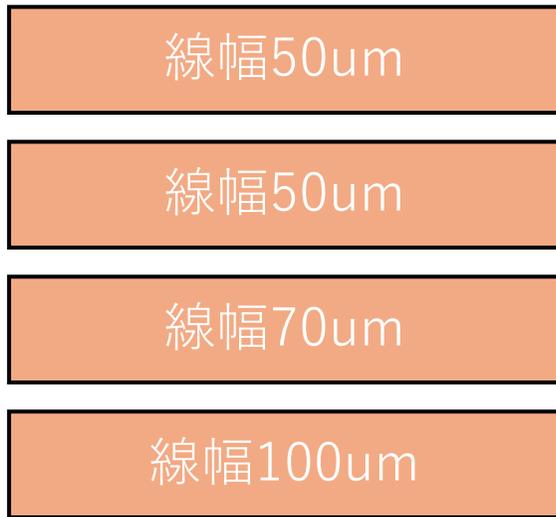
5.導通テスト

6.カメラを用いた配線幅の測定

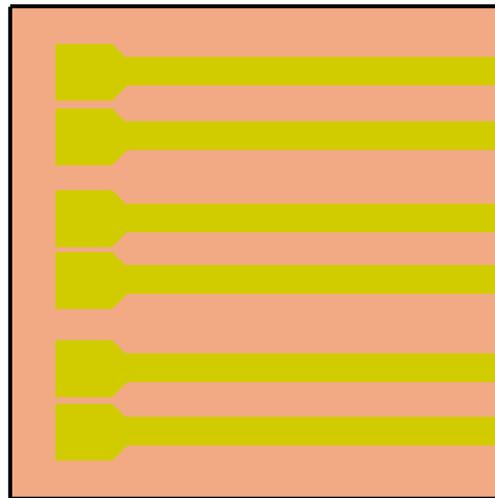
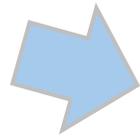
7.まとめ

新しく製作したFPC

線幅とは
ex) 70umのシートの場合(拡大図)



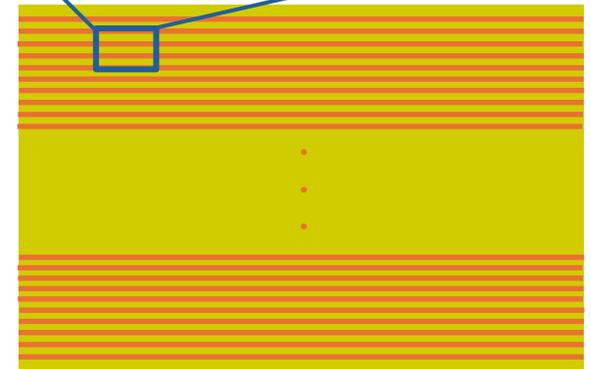
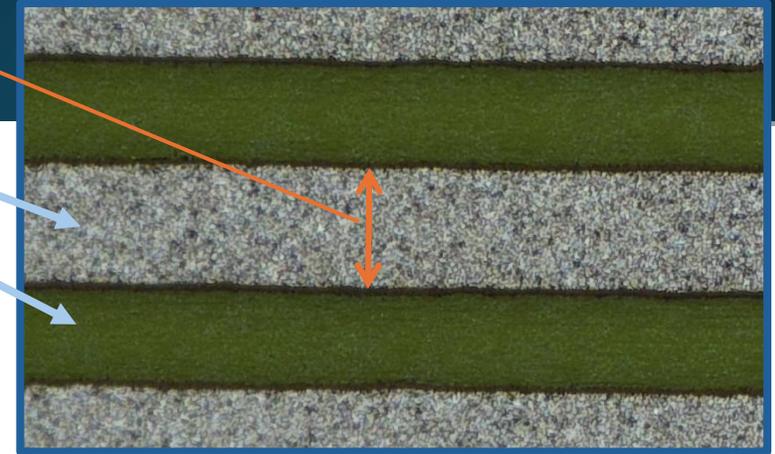
50um:2枚、70um:1枚、100um:1枚
の計4枚のシート



1枚のシート上に6本のFPCがある

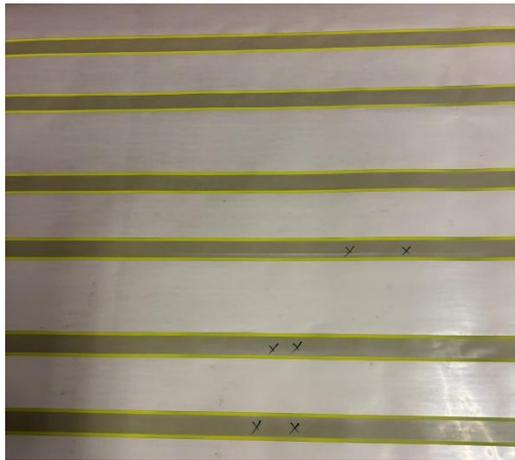
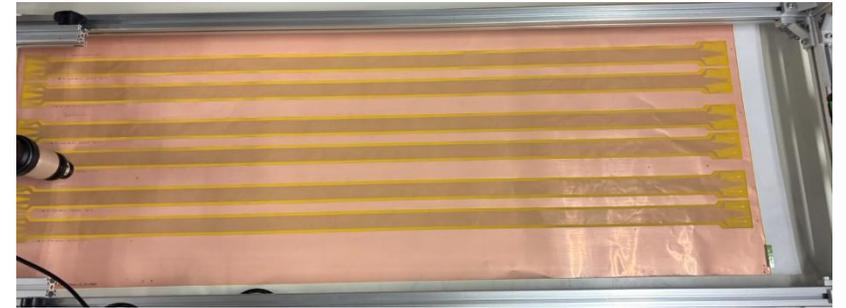
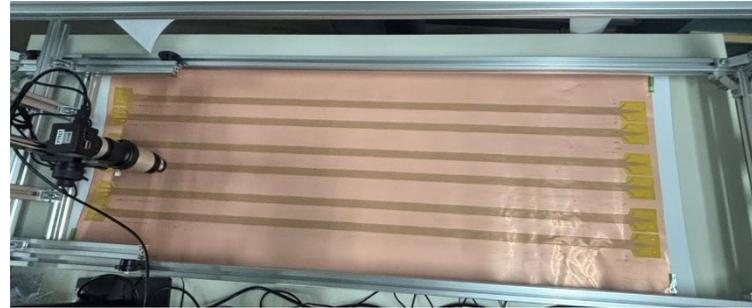
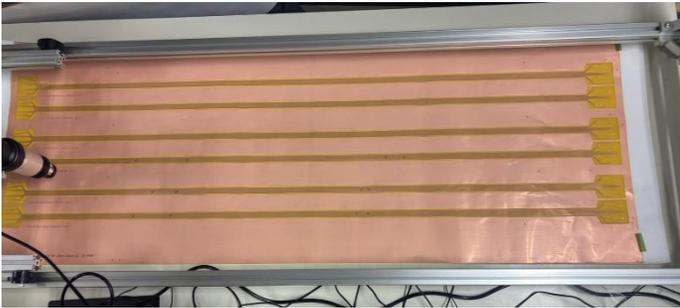
信号配線(銅線)
基板の素地

70um

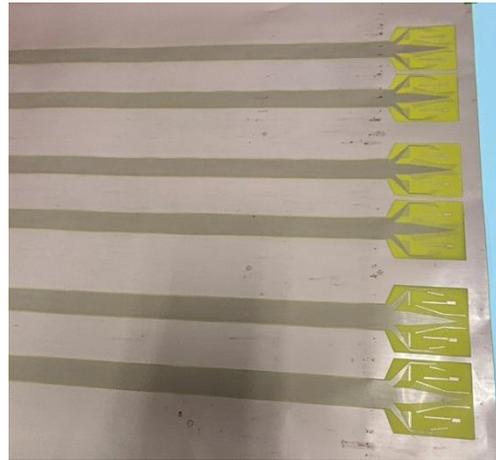


FPC1本内に126本の
銅線が走っている

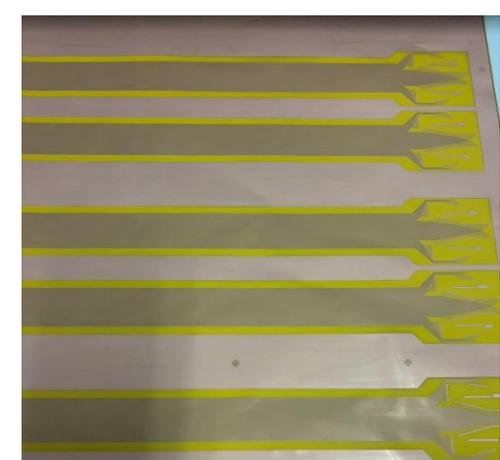
FPCの外観



50um



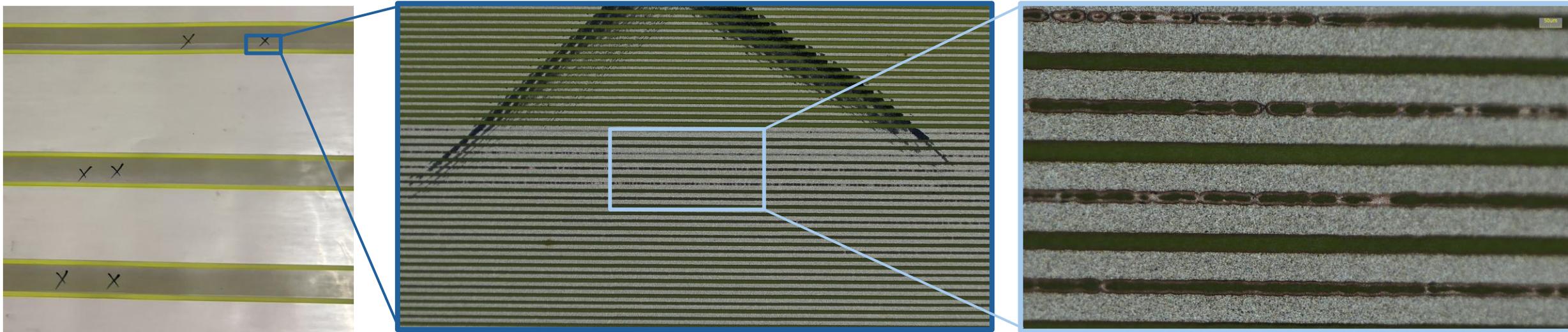
70um



100um

新しく製作したシートの全体像(上)とFPC部分の拡大(下)
100umに比べ、70um、50umとFPCが細くなっていることが分かる

線幅50umのFPCの不具合



- ショート箇所の両端に×印がついていた
- 長いものだと10cm以上のショート箇所が見られた
- FPC計12本（6本×2シート）のうちショートが見られたのは6本
- 拡大してみると、溶けるべき銅箔が溶かされていないところがあることがわかる

1. 研究背景
2. 実験目的
3. BTOFのためのFPC
4. 実験手法
5. 導通テスト
6. カメラを用いた配線幅の測定
7. まとめ

実験手法

それぞれの線幅のFPCを、抵抗値の一意性、断線・ショートの本数、線幅の一意性の観点で比較・評価するため、以下の2種類の方法で測定を行った。

導通テスト

- すべての銅線の抵抗値を測定し、一意性を評価
- 断線・ショート箇所の確認

カメラを用いた配線幅の測定

- キャリブレーションを行い、線幅の実寸を確認
- 先行研究から引き継いだソフトウェアを使った線幅解析

1.研究背景

2.実験目的

3.BTOFのためのFPC

4.実験手法

5.導通テスト

6.カメラを用いた配線幅の測定

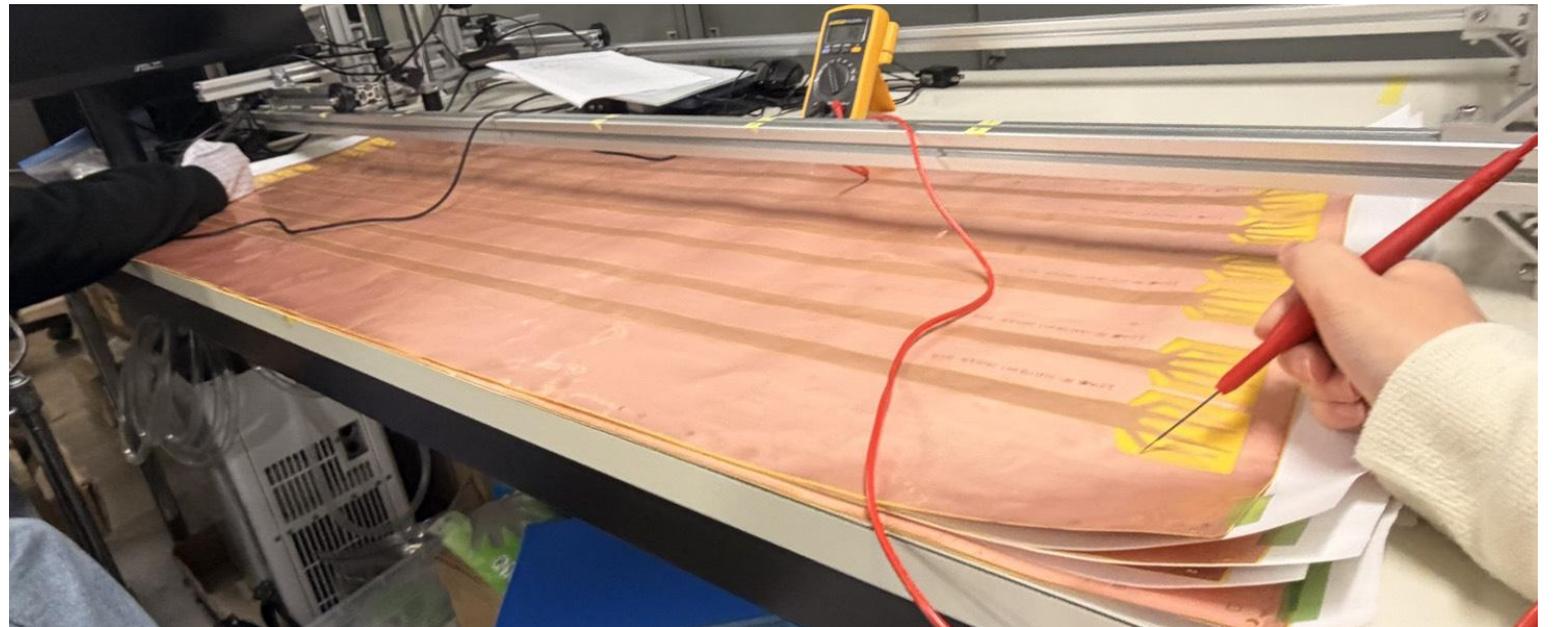
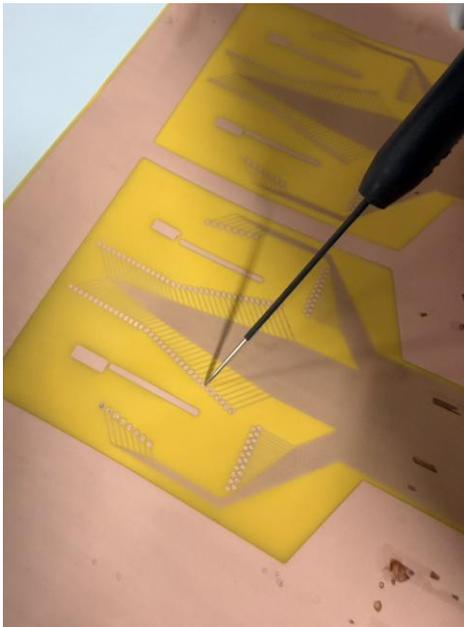
7.まとめ

導通テスト

目的

量産に足る品質であるか評価する：

- それぞれの銅線の抵抗値の一様性を調べる
- ショート・断線などの問題箇所の把握



シート上のFPCの通し番号

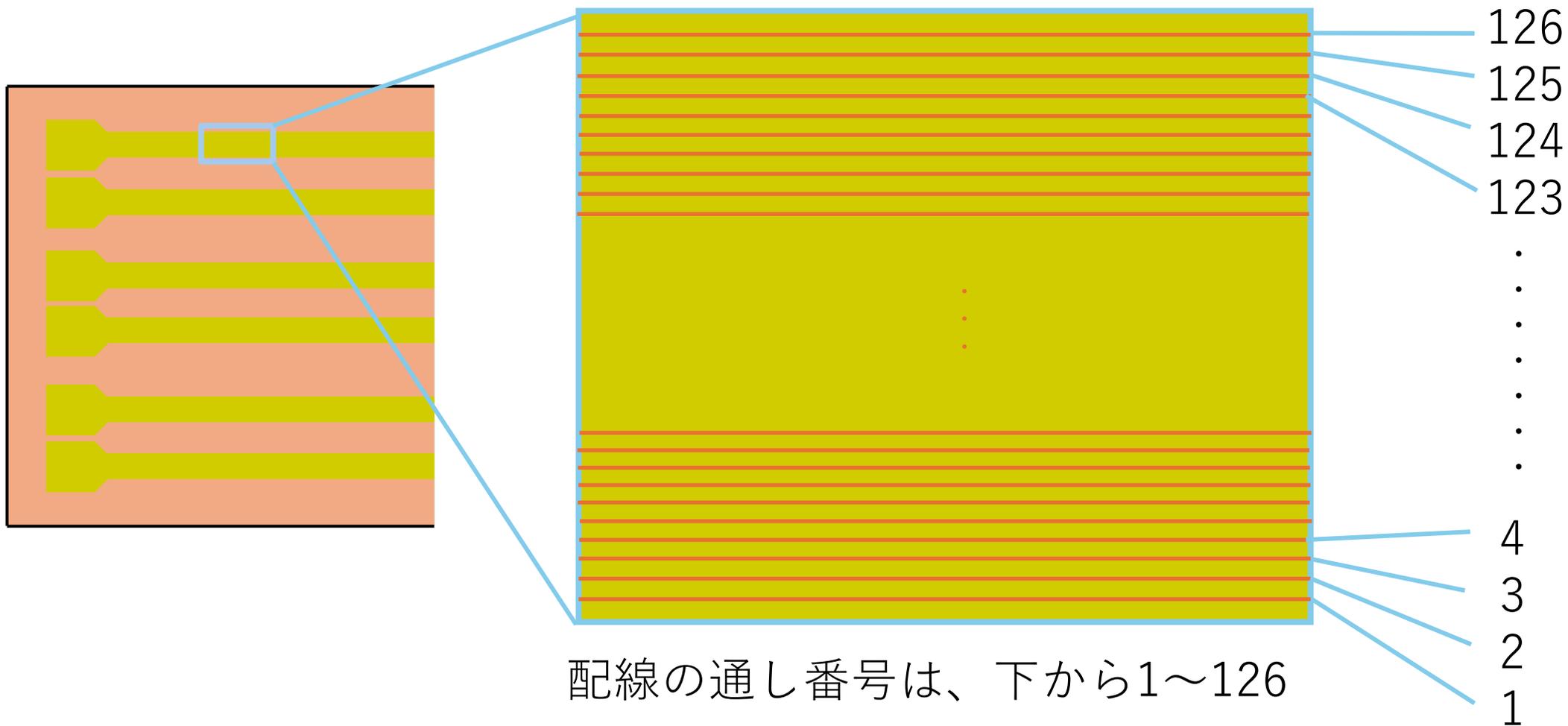
計4枚のシートそれぞれにおいて、
右写真の上から順に1本目～6本目と
決めた

50umのシートは2枚とも1～3本目に
×印が付いていた

- 1本目
- 2本目
- 3本目
- 4本目
- 5本目
- 6本目



配線の通し番号



配線の通し番号は、下から1~126

導通テストの手順

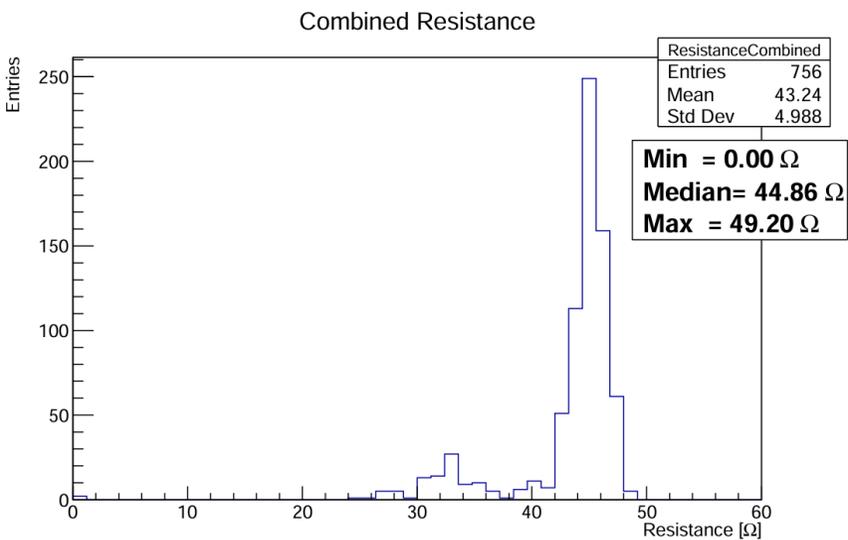
1. 同じ銅線の両端の端子にプローブを置く
 - 導通していれば、抵抗値を記録
 - 断線していれば、その箇所も記録
 - 断線：テスターに「OL(Over Limit)」と表示された場合
2. 右端に置いているプローブだけを一つ次の端子において導通していないかを確認する
 - 導通していなかったときは左端も一つ進めて導通確認
 - ショートしていれば、右端のプローブを次の端子に進め何か所連続でつながっているかを確認して記録
 - ショート：テスターに抵抗値が表示された場合

これを最後の銅線まで繰り返す



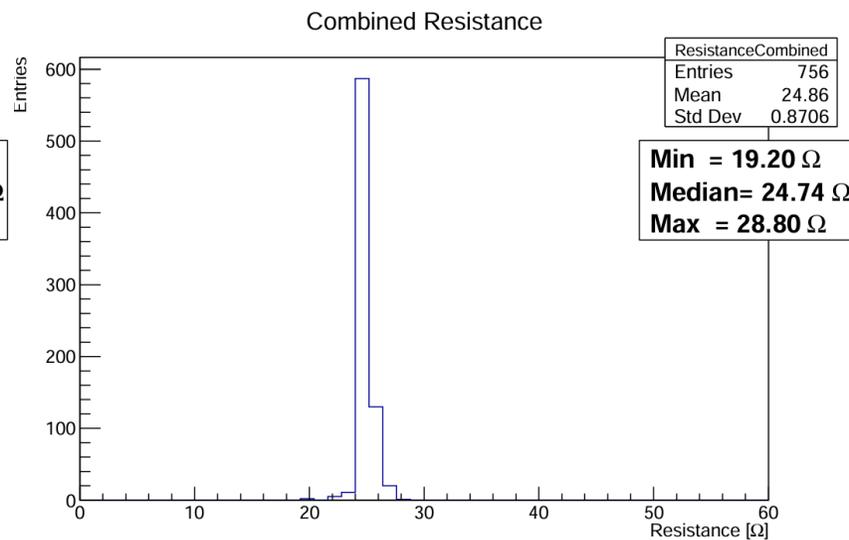
抵抗値のヒストグラム

※FPC6本の合計のエントリー



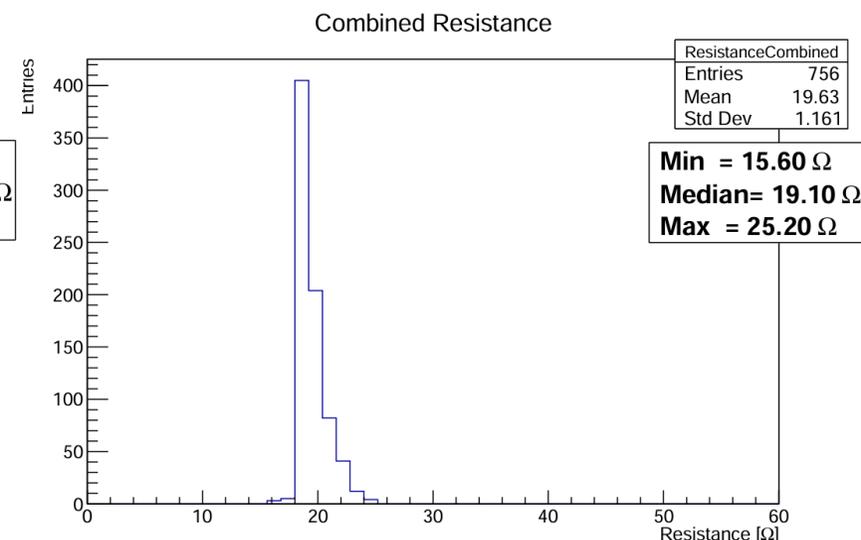
50um

抵抗値は45Ω前後
断線・ショート多数あり



70um

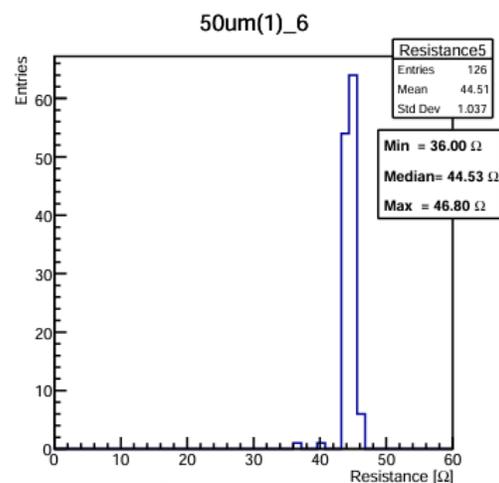
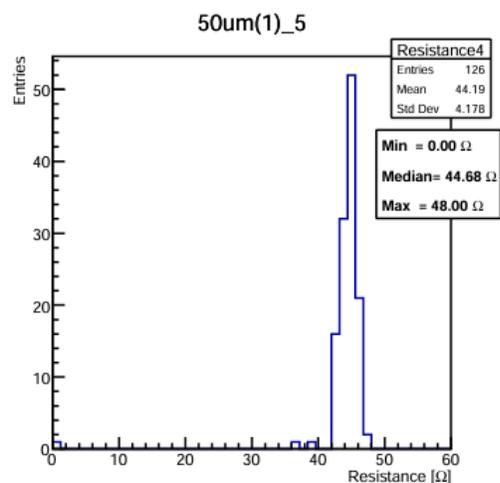
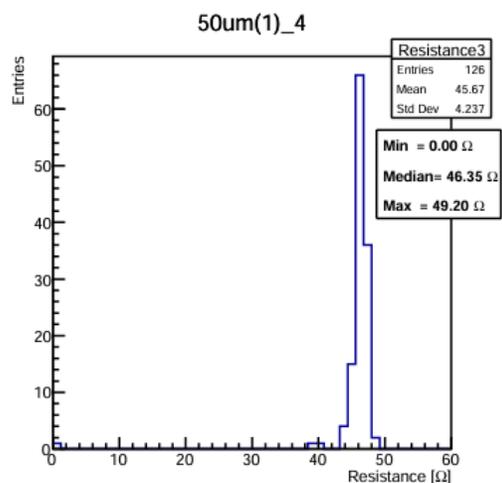
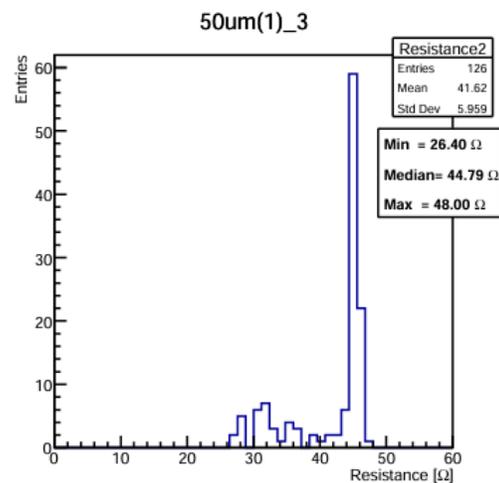
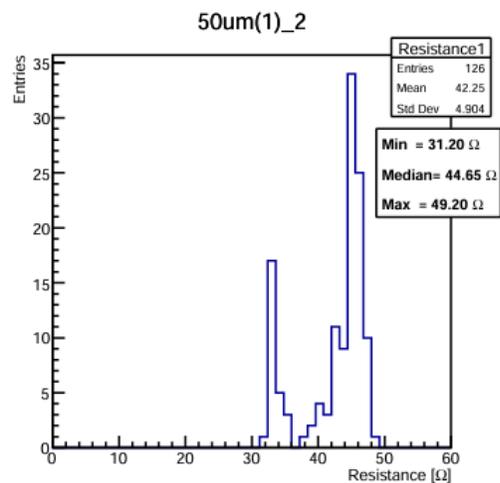
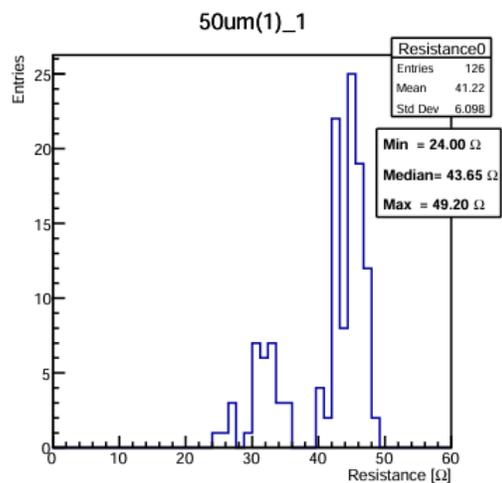
抵抗値は24Ω前後
断線・ショート無し



100um

抵抗値は19Ω前後
断線1カ所あり

配線50umの結果



抵抗値は45 Ω 前後になった

- 2本(50um(1)_4,5本目)は断線が1カ所
- 3本(50um(1)_1,2,3本目)はショートしている箇所が多数

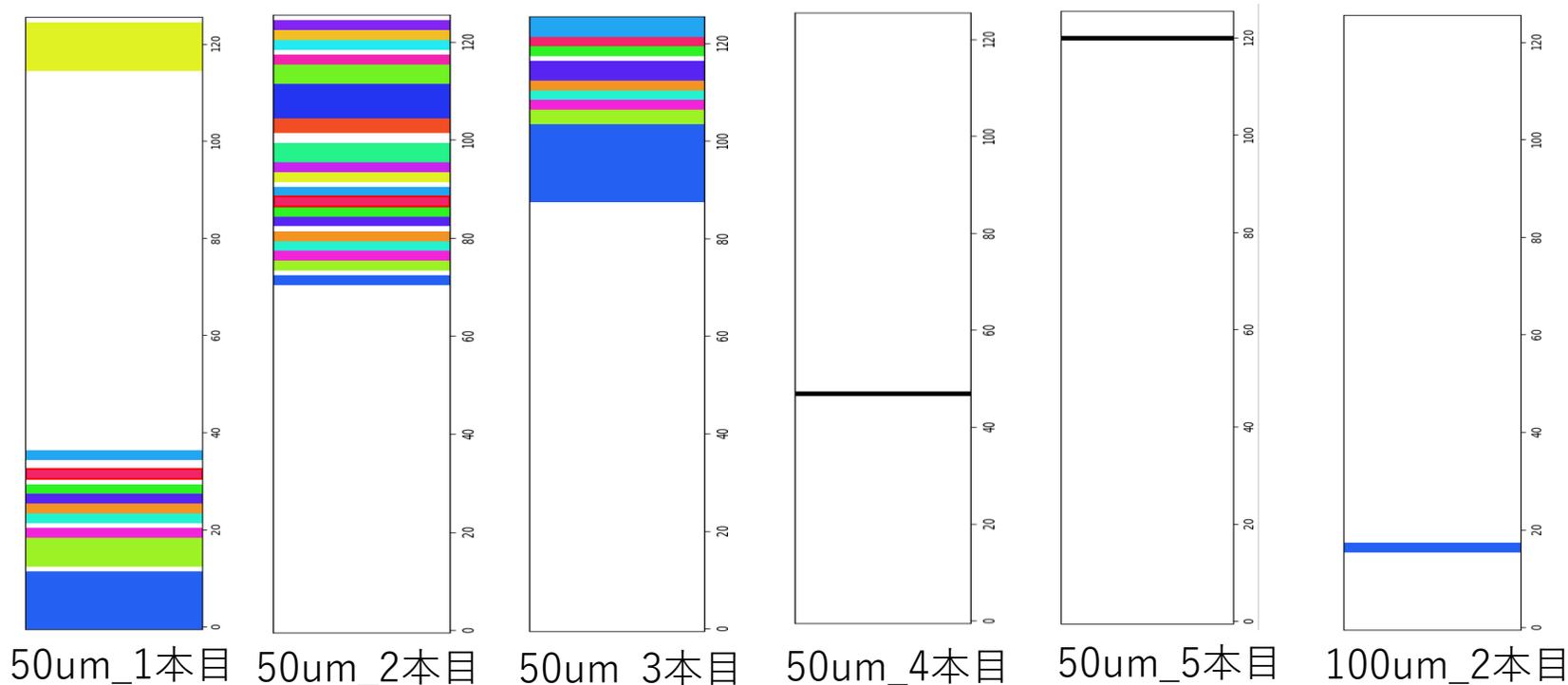
50um(1)_1本目
 ショート：10カ所
50um(1)_2本目
 ショート：19カ所
50um(1)_3本目
 ショート：9カ所

ショート・断線MAP

縦軸：配線番号



- 正常な銅線を白、断線を黒、ショート箇所は隣り合った別のショートと見分けがつくよう、白と黒以外のランダムに系統の違う色を使用
- 縦軸が配線番号で下から1~126番目までを表している



配線50um

- ショートは配線の両端に集中
- 最大、配線16本連続でショート
- 配線2本のショートが多い

配線70um

- ショート・断線なし

配線100um

- 2本連続のショート1箇所

導通テストの結果

線幅50um

→検査した6本のFPCの中で3本でショート、2本で断線が見られ、問題がないFPCは1本のみだった

線幅70um

→検査した6本のFPCの中で断線、ショートの問題が見られるものはなかった

線幅100um

→検査した6本のFPCの中で1本で1箇所のみショートが見られ、他のFPCに問題は見られなかった

考察：

- 技術的な改善がないと、線幅50umのFPCは量産に耐えないといえる
- 線幅が細いほど体積、質量が減るため、検出器に導入することを考えると、導通テストの結果からは70umの配線幅のFPCを使うのが最善ではないかといえる
- 製造上の難易度により、配線幅が太くなるほど歩留まりはよくなると思っていたが、線幅100umでショートが見られたことより、一定の割合で断線やショートを含むFPCができるのではないか

実験手法

導通テスト

- すべての銅線の抵抗値を測定し、一様性を評価
- 断線・ショート箇所の確認

カメラを用いた配線幅の測定

- キャリブレーションを行い、線幅の実寸を確認
- 先行研究から引き継いだソフトウェアを使った線幅解析

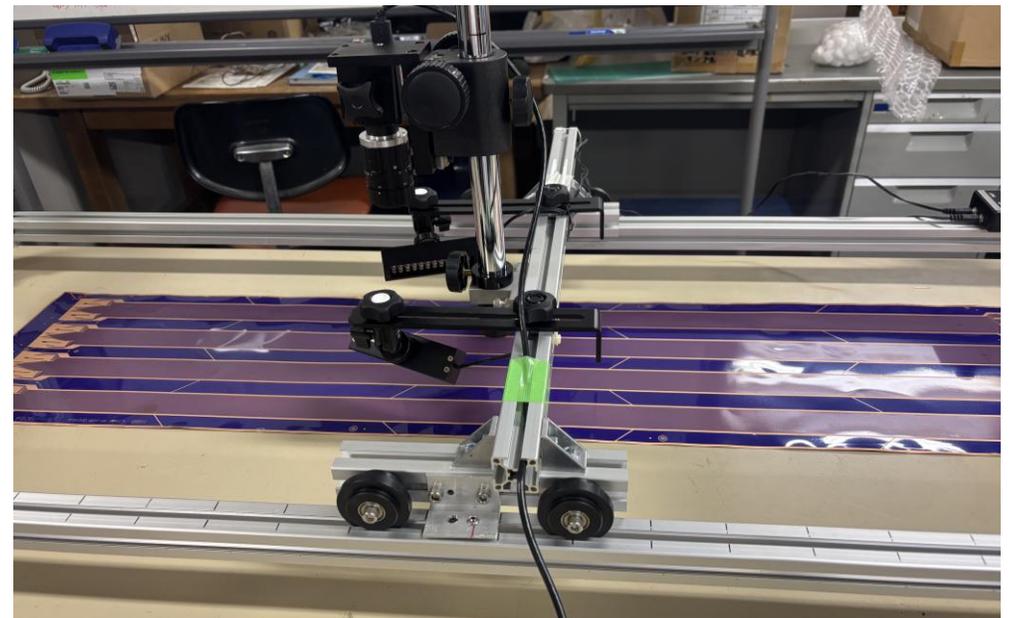
1. 研究背景
2. 実験目的
3. BTOFのためのFPC
4. 実験手法
5. 導通テスト
6. カメラを用いた配線幅の測定
7. まとめ

カメラを用いた配線幅の測定

目的

- 拡大して、FPCを見ることで銅線の様子の確認
- 線幅の一様性を評価

BNLで行われていたsPHENIX実験のINTT検出器で使用されたFPCケーブルの歩留まりを改善するための先行研究に使われた装置とソフトウェアを再起動して改善を加えた



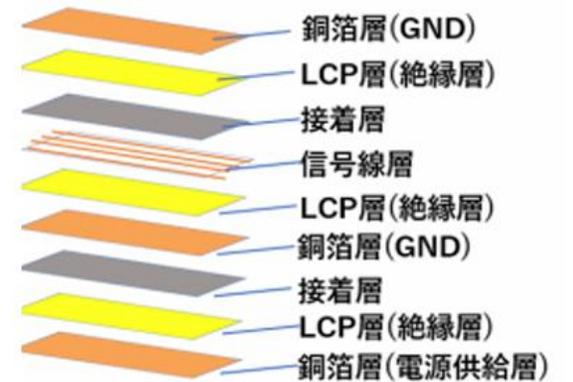
カメラを用いた配線幅の測定

目的

- 拡大して、FPCを見ることで銅線の様子を確認
- 線幅の一様性を評価

線幅の一様性を測る理由：

信号線が上下をグラウンドで挟まれたストリップライン構造



例えば、配線が2本の時の対称ストリップラインのインピーダンス近似式は

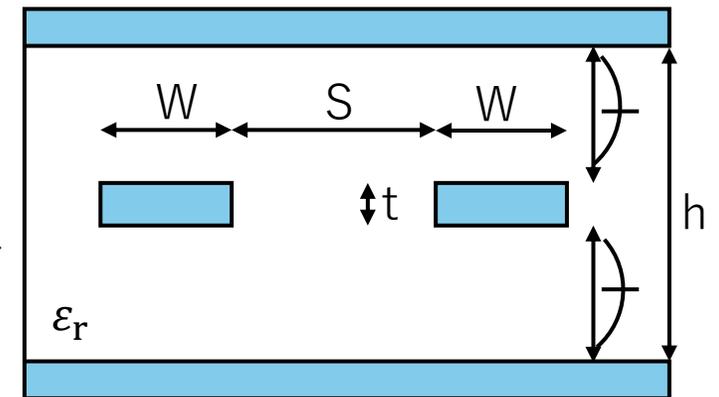
$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{4h}{0.67(0.8W+t)} \right]$$

$$Z_{diff} = 2Z_0 \left(1 - 0.748e^{-2.9\frac{S}{h}} \right)$$

Z_0 : 信号線が1本の時の特性インピーダンス、 Z_{diff} : 信号線2本の差動インピーダンス

線幅Wが広い → インピーダンス Z_{diff} 低下

線幅Wが狭い → インピーダンス Z_{diff} 上昇



カメラを用いた配線幅の測定

線幅の一様性を測る理由：

配線が2本の時の対称ストリップラインのインピーダンス近似式は、

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{4h}{0.67(0.8W+t)} \right]$$

$$Z_{diff} = 2Z_0 \left(1 - 0.748e^{-2.9\frac{S}{h}} \right)$$

Z_0 : 信号線が1本の時の特性インピーダンス、 Z_{diff} : 信号線2本の差動インピーダンス

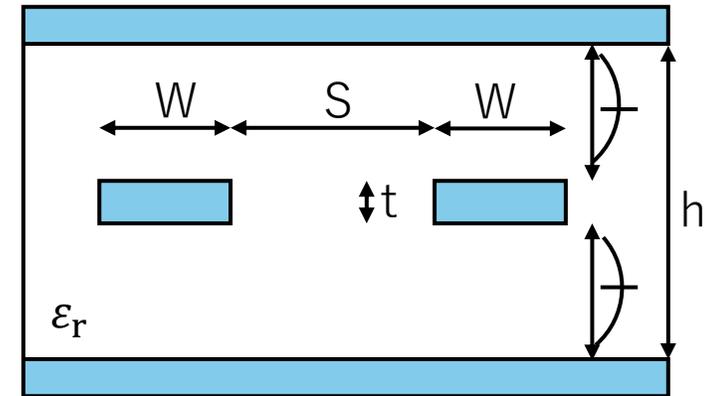
線幅Wが広い → 差動インピーダンス Z_{diff} 低下

線幅Wが狭い → 差動インピーダンス Z_{diff} 上昇

銅線の線幅が不均一だと、局所的にインピーダンスが変化し、

- 信号反射の発生
- 伝送損失の増加

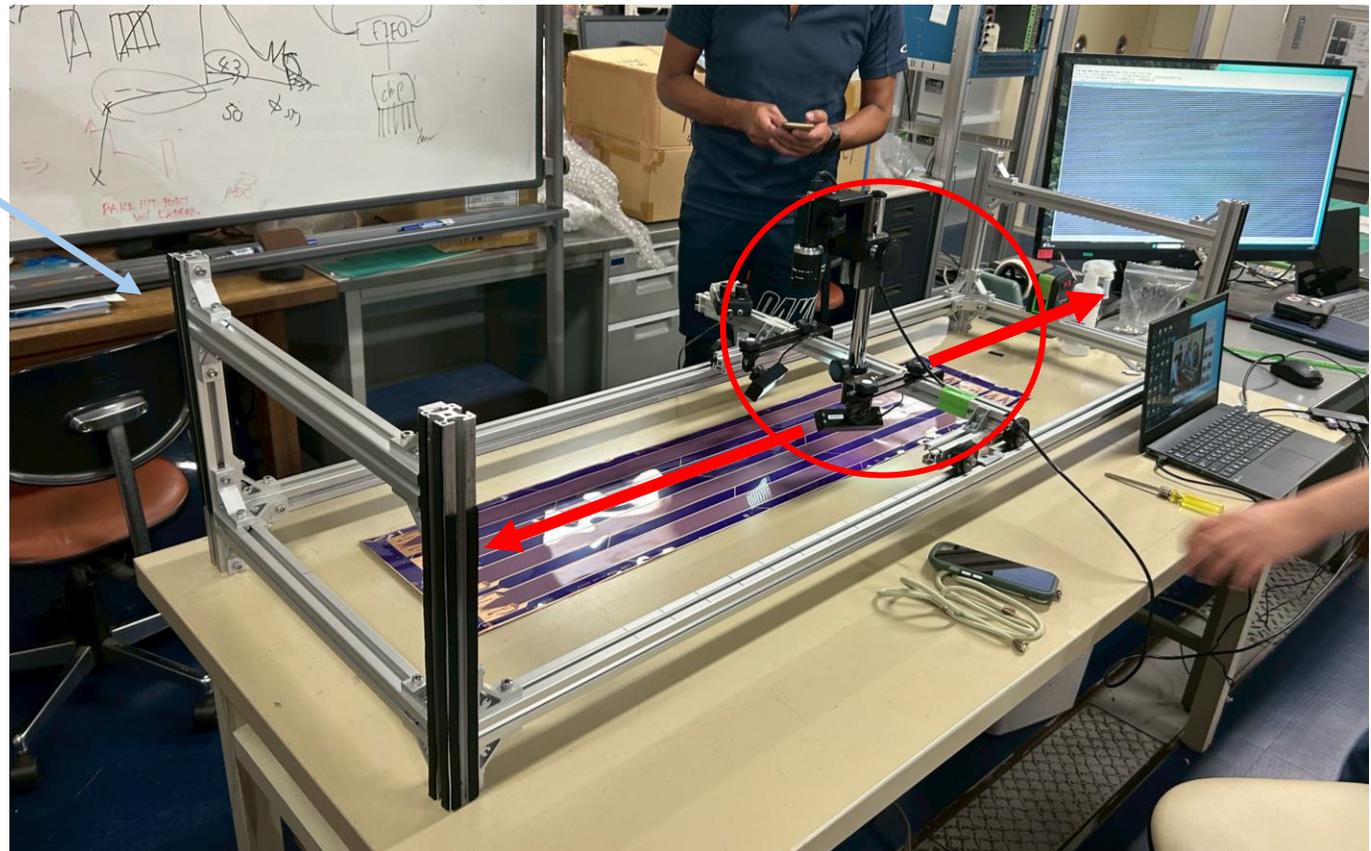
が起るため、配線の幅の一様性を調べたい



FPC検査ジグの組み立て

レールに沿って、車輪を付けたカメラをFPCの長軸方向に平行にスライドして写真を撮るジグ

このジグが使われた先行研究では、ジグを使うことで断線やショート箇所を探す際、平行にカメラを動かしながら拡大してみる事ができるようになった



FPC検査ジグのカメラの性能

先行研究で使用していたカメラでは、最小で50umの線幅を正確に計測する精度がなかったため、線幅の計測に使うカメラを選別し、導入した

カメラについて

品番：松電舎 4K962PT-H

画素数：約800万画素

フレームレート：60 fps

保存できる画像フォーマット：JPG、BMPなど

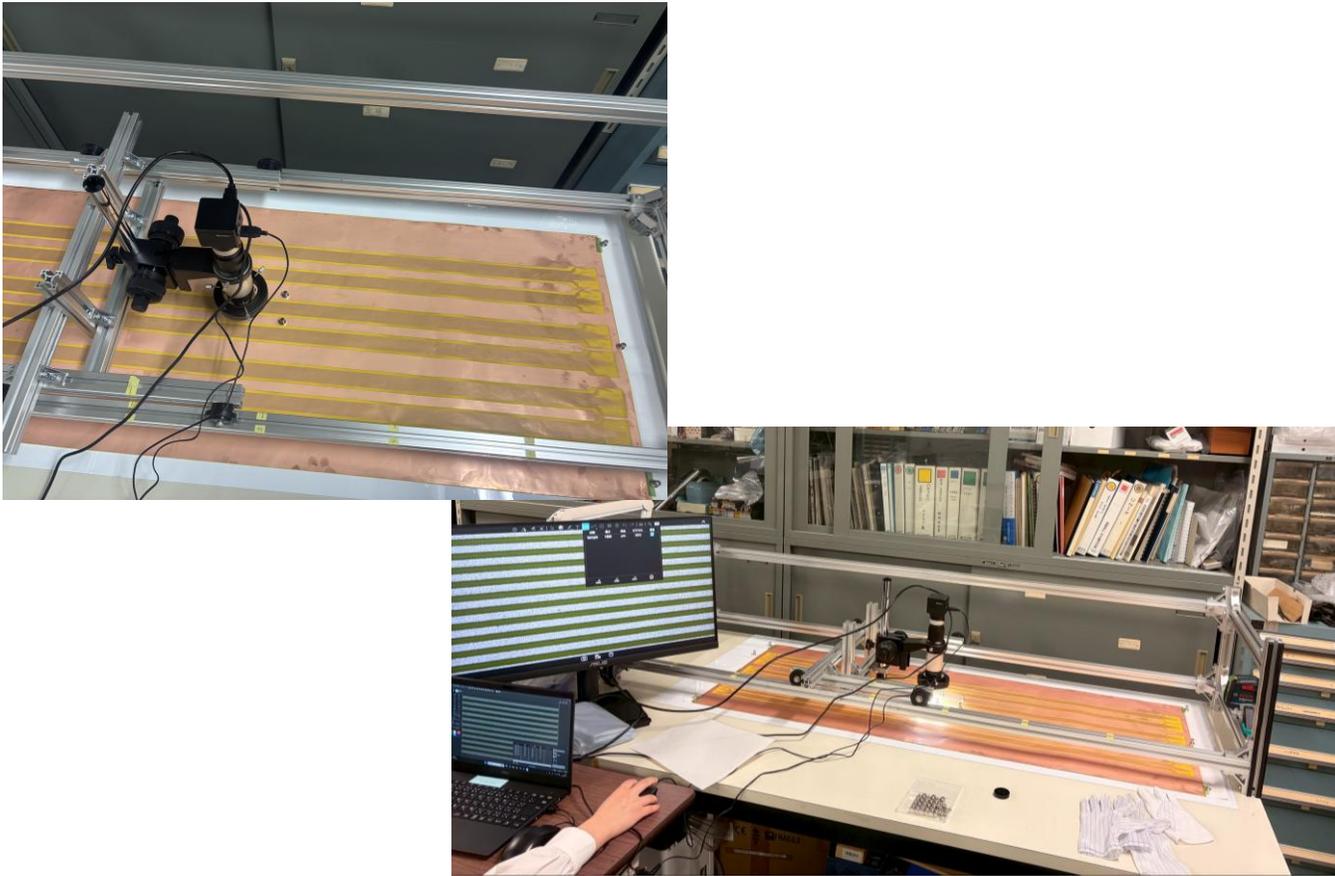
レンズについて

品番：松電舎 SDS-KFZH

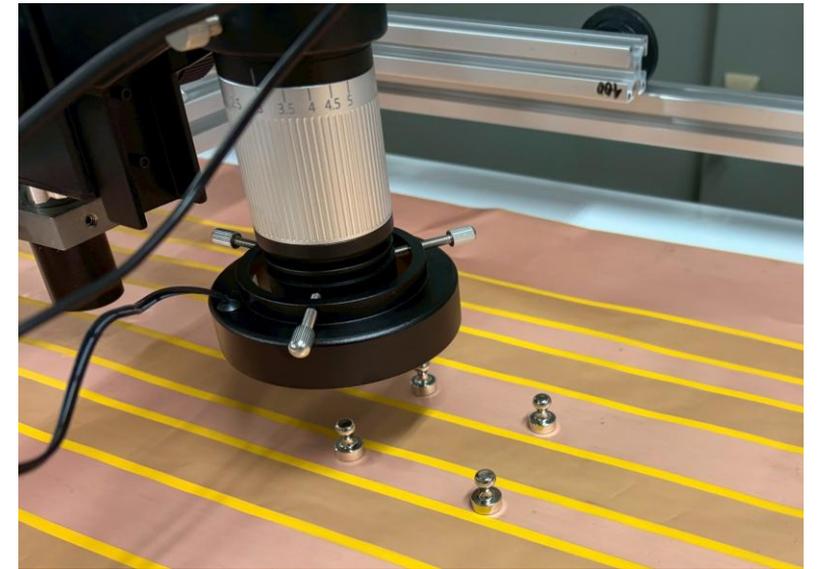
特徴：12段階で倍率を変えることができる



カメラを使った測定

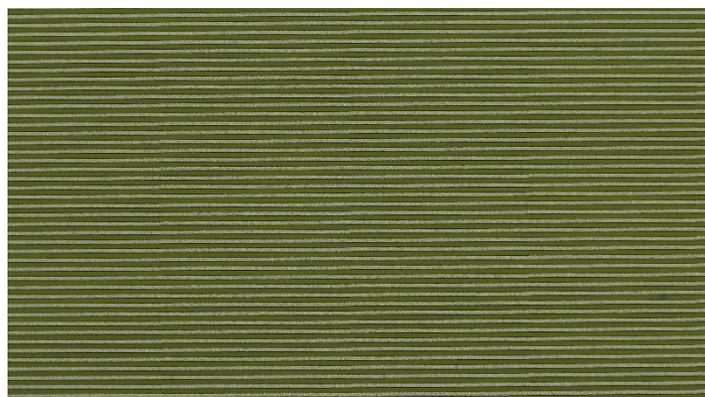


セットアップの様子

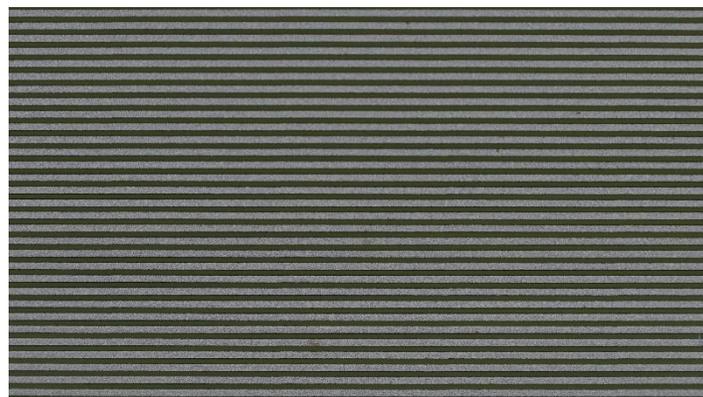


敷いてあるマグネットシートと
マグネットを使って、FPCのシート
が浮かないように抑えている様子

カメラでの測定



50um_x0.5



70um_x0.5



100um_x0.5



50um_x5.0



70um_x5.0



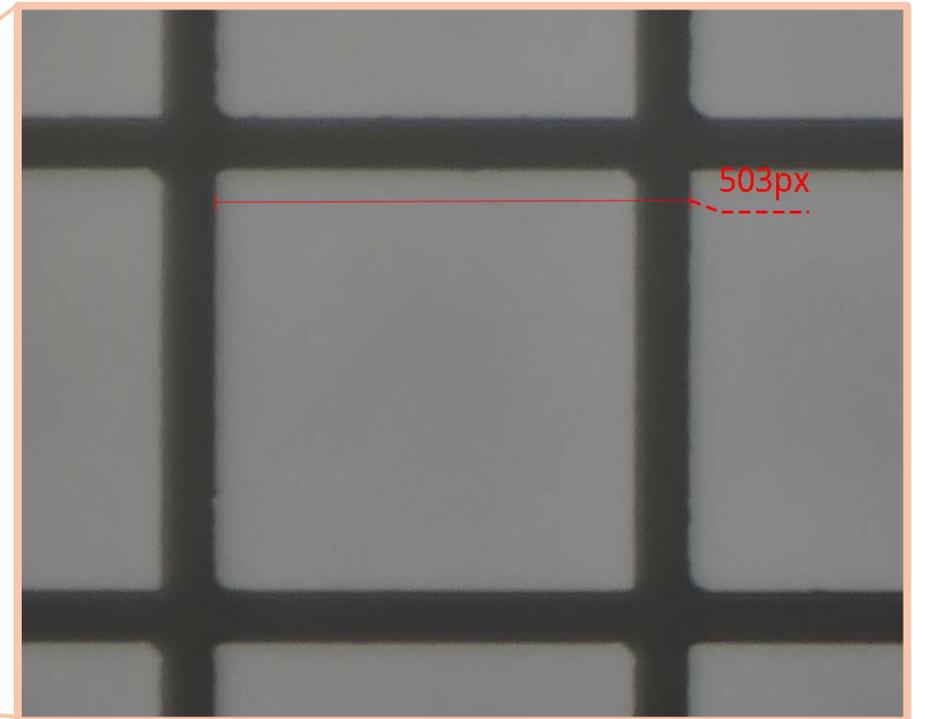
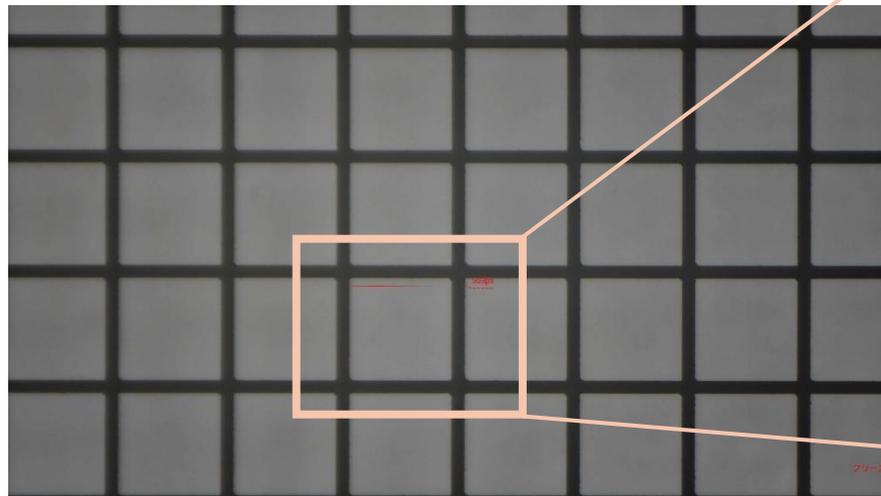
100um_x5.0

それぞれの線幅のFPCをカメラで拡大して撮影した様子

キャリブレーション

1ピクセルあたりが何umに相当するかの換算係数を求める
→カメラで撮影した画像内の線幅を求めることが可能

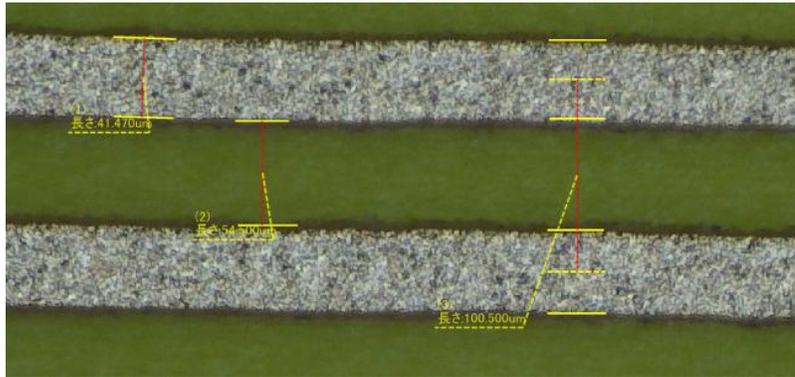
カメラについているソフトウェア(Micro Capture Pro)
と100umのマス目を使ってキャリブレーション



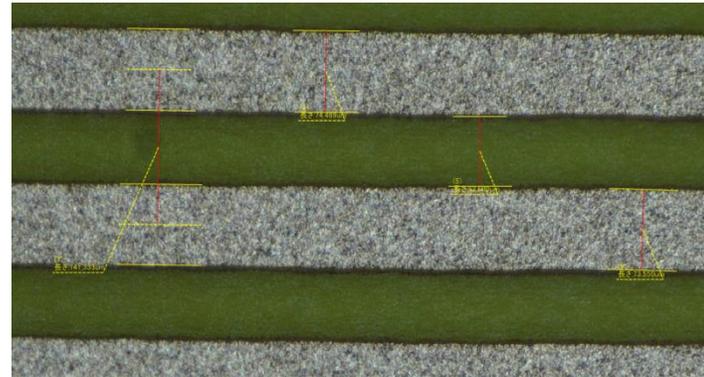
カメラを使ったFPC線幅測定

キャリブレーションの結果を使って線幅を測定した

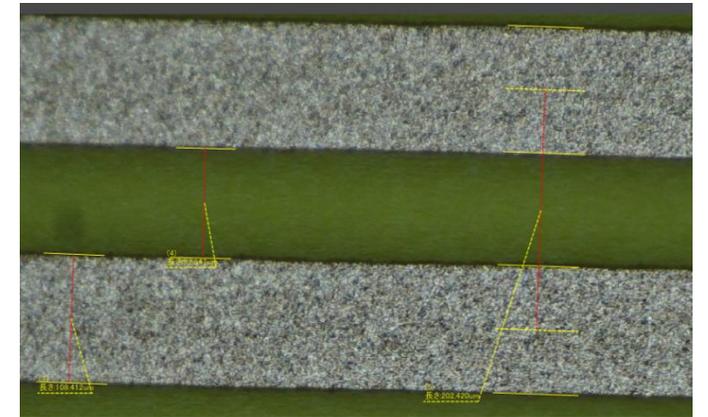
※配線測定部分が見やすいように拡大したもの



線幅50umのFPCの
線幅測定の様子



線幅70umのFPCの
線幅測定の様子



線幅100umのFPCの
線幅測定の様子

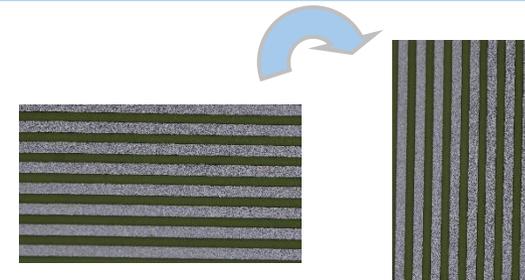
どの線幅のFPCにおいても測定した結果は設定値から5-10um程異なっていた

FPC線幅測定ソフトウェア

カメラで撮影した画像読み込み



配線の長軸方向が縦になるように右に90度回転



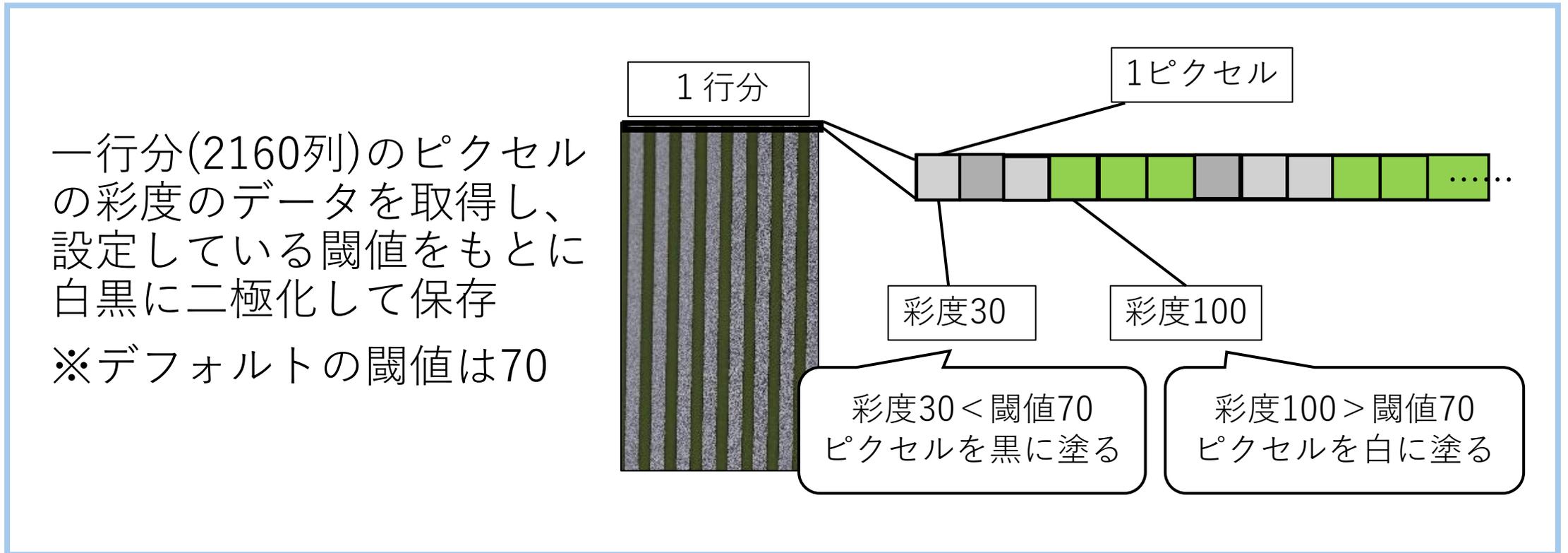
RGB画像からHSV画像に変換

RGB：Red,Green,Blueの三原色から表す方法

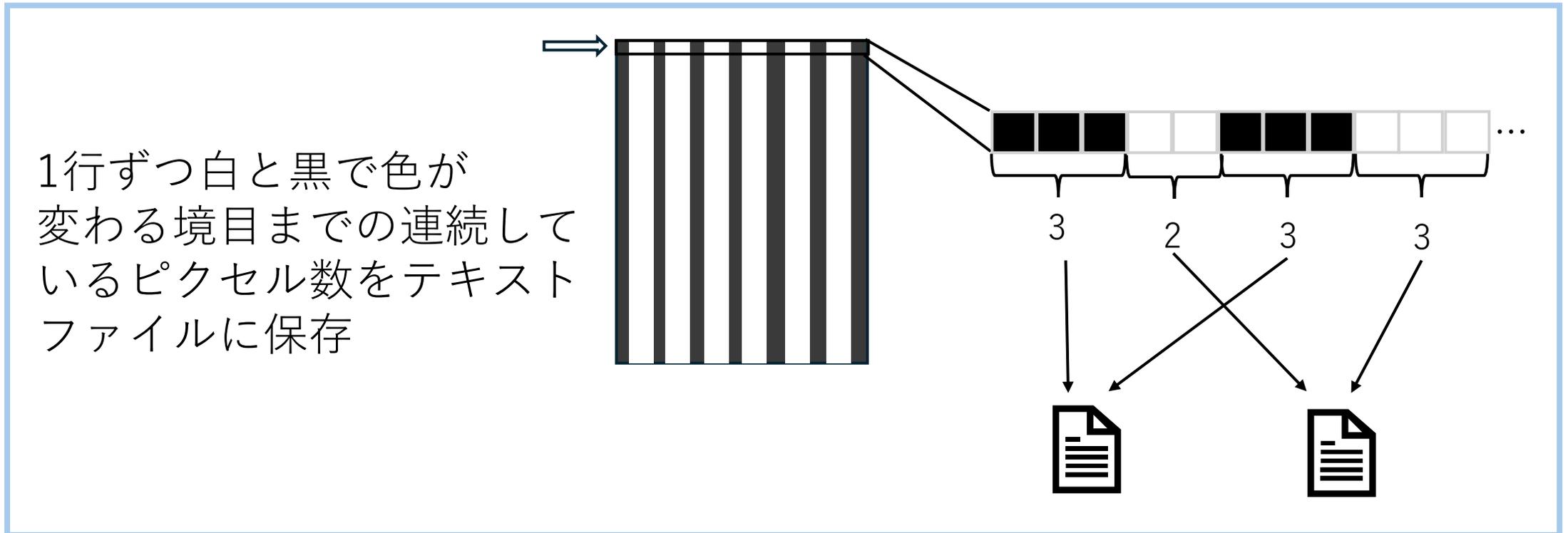
HSV：色相(Hue)、彩度(Saturation)、明度(Value)から表す方法



FPC線幅測定ソフトウェア



FPC線幅測定ソフトウェア



これをすべての行で行う（3860行2160列分）

ソフトウェアの線幅認識の可視化

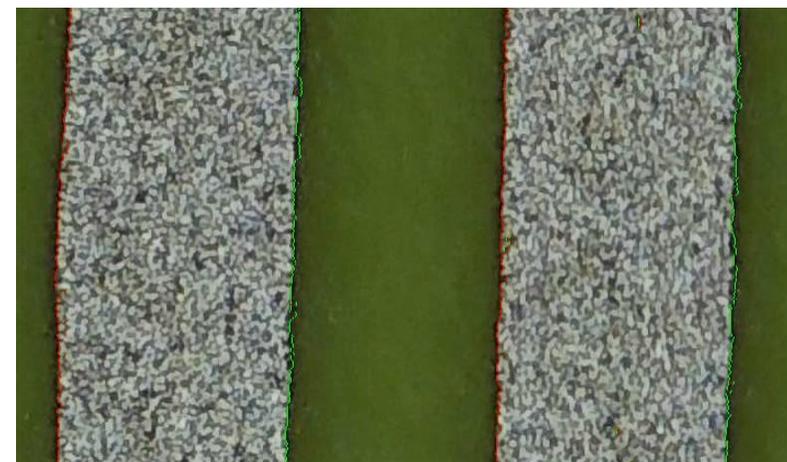
白黒二極化した際の黒から白に変わったと認識した1つ前のピクセルを緑、白から黒に変わったと認識した1つ前のピクセルを赤に塗りつぶすようにした



線幅50um



線幅70um



線幅100um

70umと比べて、緑のピクセルが、より実際の線端にフィットしている

結果：おおむね実際の線端に沿って認識

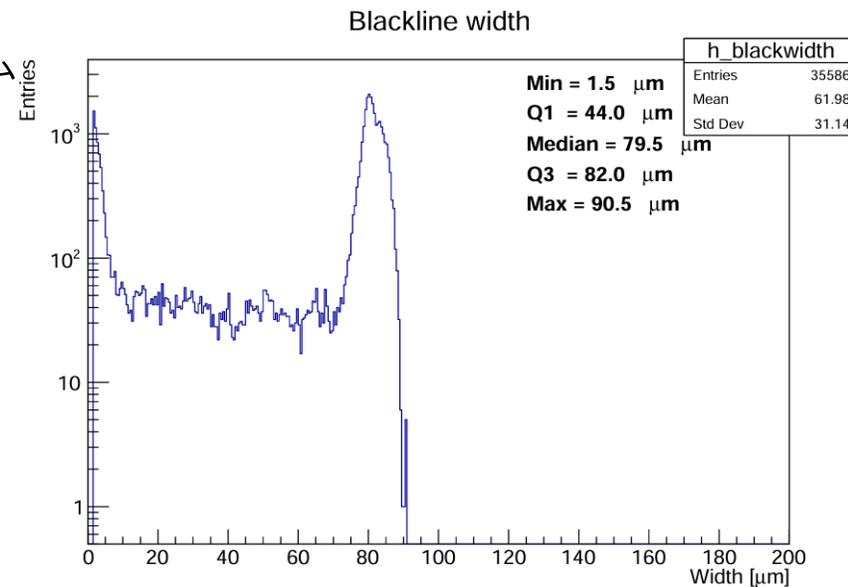
写真を撮る時の照明やピントの合い方によって線端の認識の精度が変わる可能性あり

FPC線幅測定のためのヒストグラム

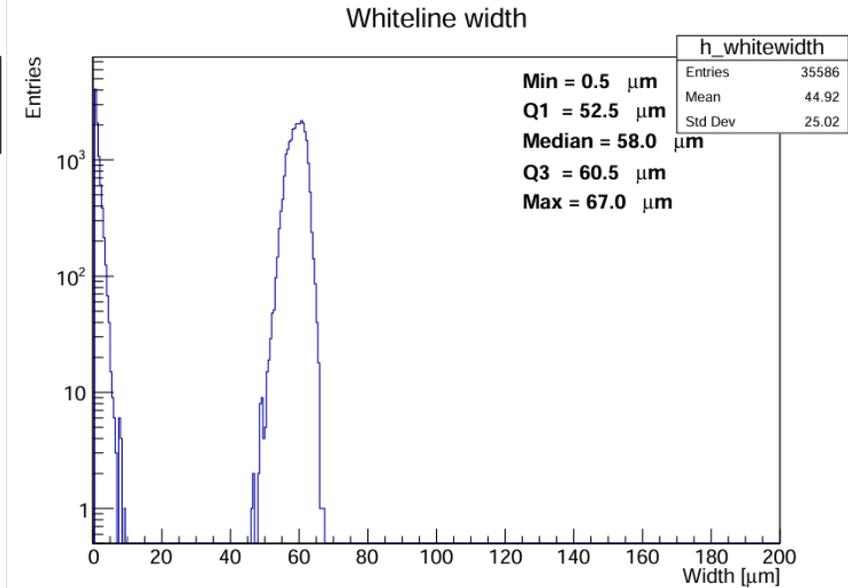
閾値70の時の線幅ヒストグラム



線幅70 μm



銅線部分の線幅ヒストグラム



配線の素地部分の
線幅ヒストグラム

- 線幅と思われる位置にピークが見えた
- 完全に線の方法を画角と平行にすることは難しいため、補正する必要がある

FPC線幅測定のはistogram



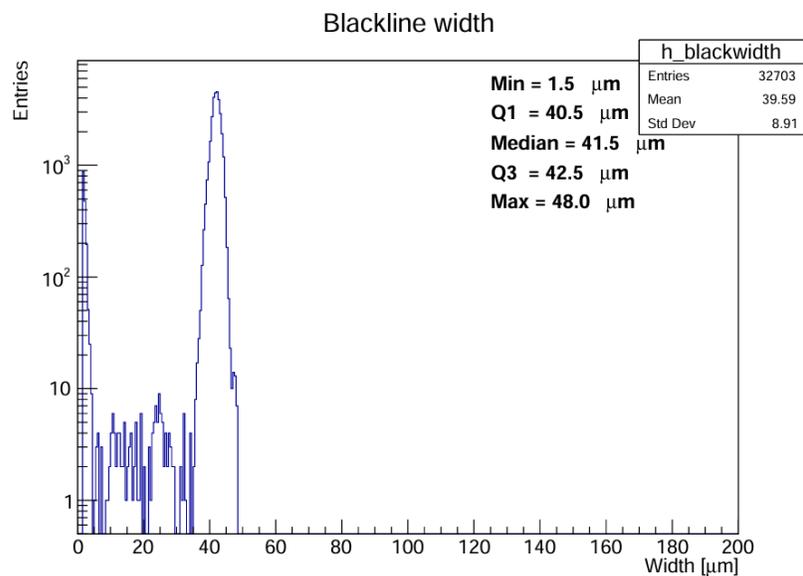
閾値を使って彩度を二値化のFPCの拡大写真



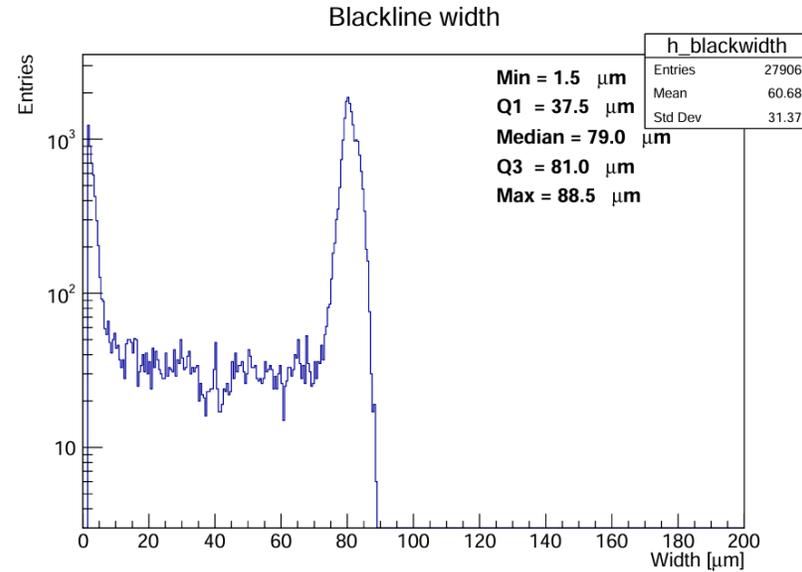
FPCを拡大した写真
銅線の部分に凸凹があり、
線幅ではないのに、線幅
として認識されている

異なる線幅のヒストグラムの比較

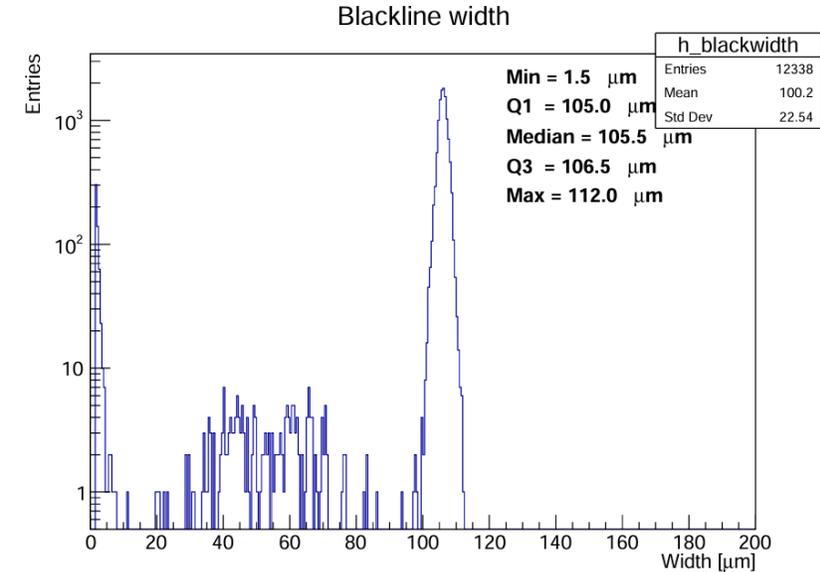
銅線の線幅ヒストグラム



線幅50um



線幅70um

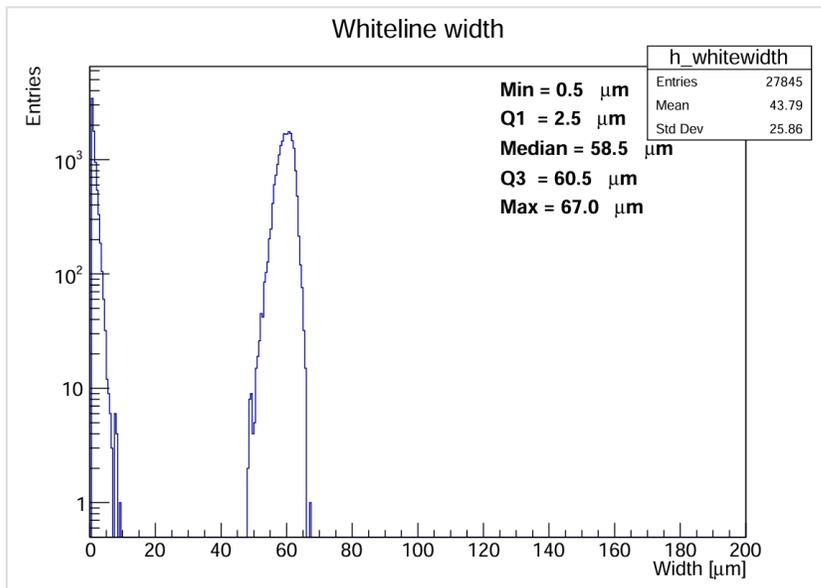


線幅100um

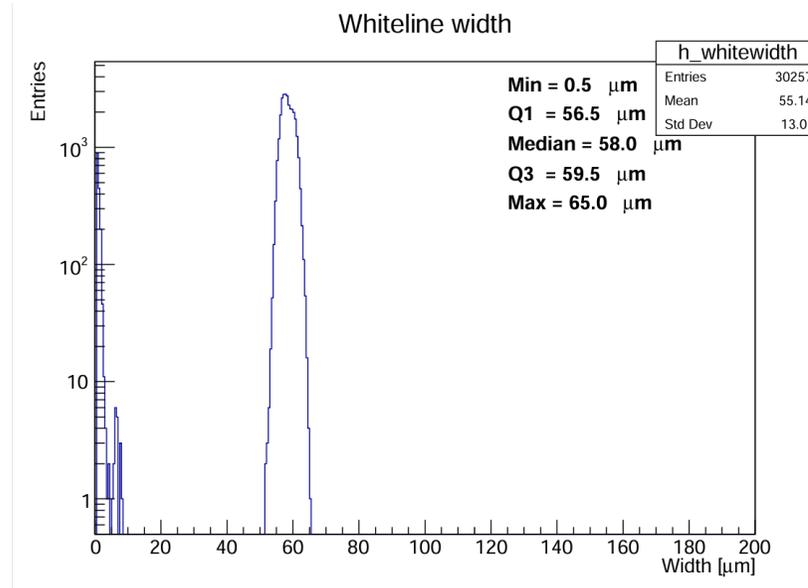
実際の線幅のピーク以外のエントリーのように、
ノイズや線端で何度も線幅がカウントされてしまうことによるエントリーが目立つ

異なる線幅のヒストグラムの比較

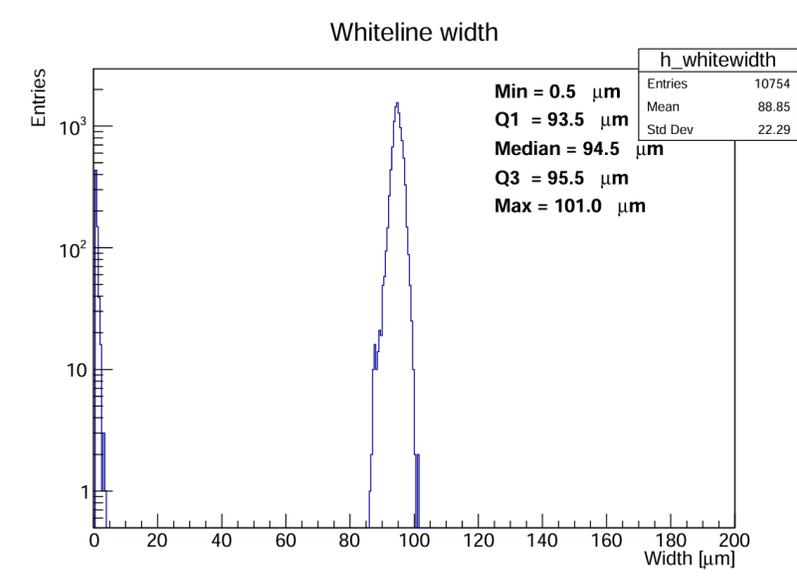
FPCの素地が見えてる部分の線幅ヒストグラム



線幅50um



線幅70um



線幅100um

銅線のように凹凸による影がないため、
銅線の線幅のヒストグラムに比べて0umからピークまでの間のエントリーが少ない

1. 研究背景
2. 実験目的
3. BTOFのためのFPC
4. 実験手法
5. 導通テスト
6. カメラを用いた配線幅の測定
7. まとめ

まとめ

導通テスト

抵抗値を測定して、ショート・断線の位置を確認した

- 線幅50umのFPCは、検査した6本の中で3本でショートが、2本で断線が見られ、問題がないFPCは1本のみだった
→技術的な改善がないと、量産に耐えないといえる
- 導通テスト結果の観点から70umの配線幅のFPCを使うのが最善ではないかといえる
- 100umでショートが見られたことより、一定の割合で断線やショートを含むFPCができるのではないかと考察できる

まとめ

カメラを用いた配線幅測定

拡大して、銅線の様子を確認し、配線幅の一様性を確かめる。

- ソフトウェアが認識した線幅のヒストグラムで実際の線幅と思われるピークを確認することができた
- 完全に線の方角を画角と平行にすることは難しいため、補正する必要がある
- 現状、ヒストグラムでショート・断線とノイズなどによる間違った線幅のカウントの判別ができない

今後行うこと

- 正しく線の端を認識するようにアライメント調節
- 完全に線の方角を画角と平行にすることは難しいため、補正を加える
- ショート・断線とノイズ・間違った線幅を判別するためにほかの手法（HSVの別のパラメータを使う、ソフトウェアにAIを導入するなど）を使うことを考える
- 位置によって線幅に違いがあるかを調べる

Back up

ピクセル数からumへの変換

白の線幅と黒の線幅のピクセル数をそれぞれテキストに書き込む



キャリブレーションから得たum/pixelを用いて線幅の長さ(um)を求める

倍率	um/pixel
0.5	2.00
1.0	1.00
2.0	0.50
3.0	0.33
4.0	0.25
5.0	0.20

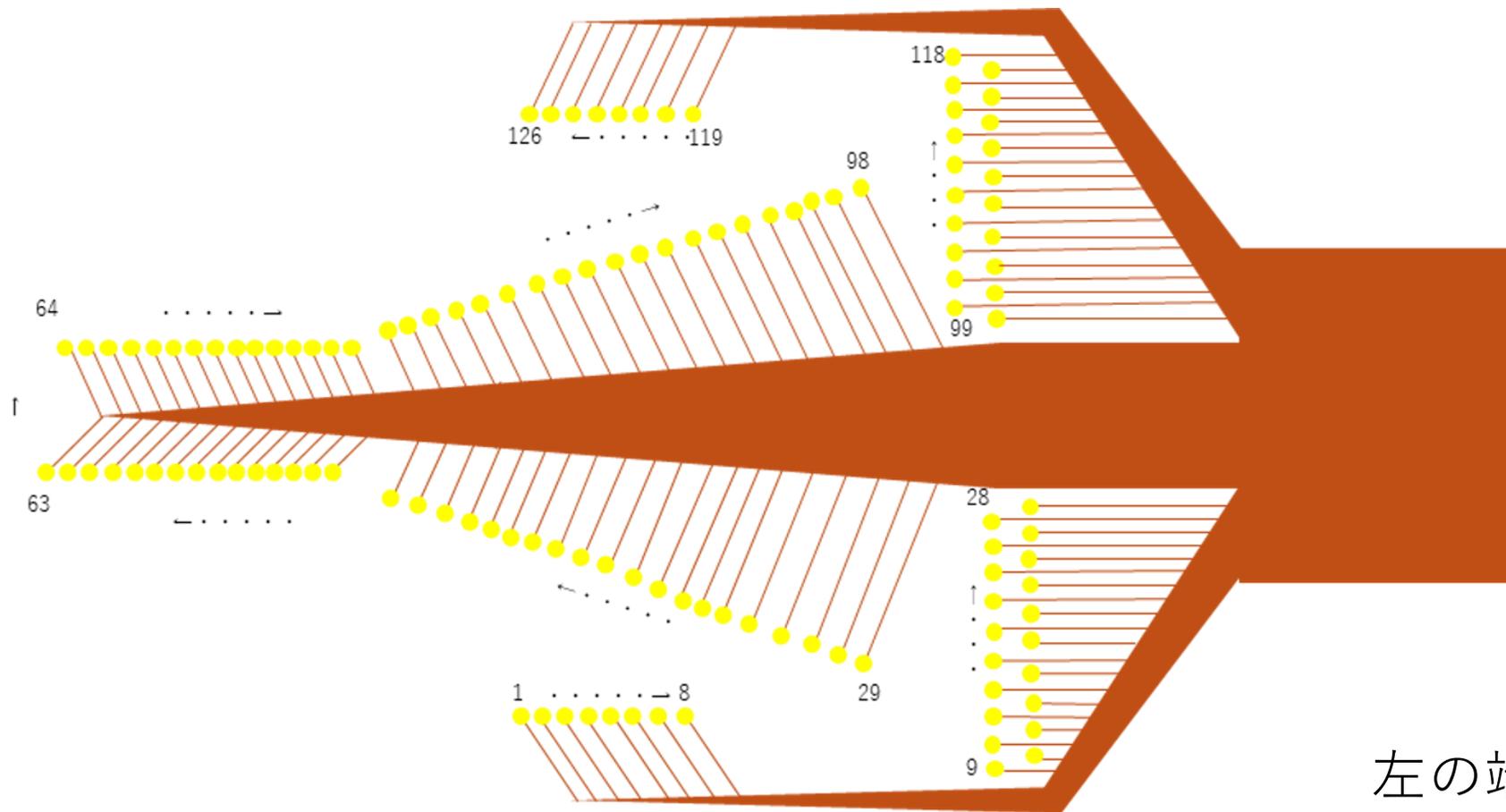
写真の情報

画像について

解像度：3860 × 2160 (pixel)

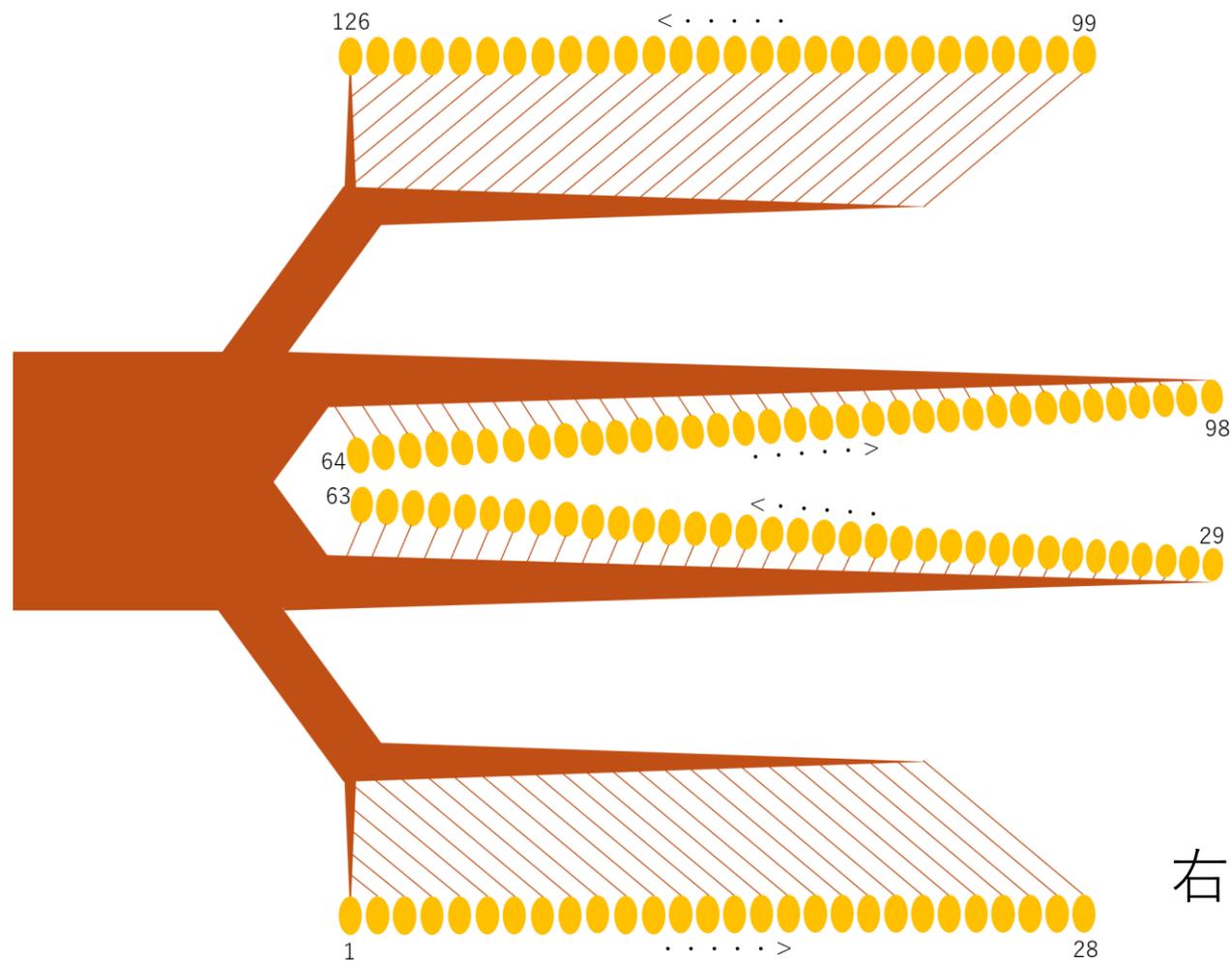
倍率	um/pixel	画角(um × um)
0.5	2.00	7680 × 4320
1.0	1.00	3840 × 2160
2.0	0.50	1920 × 1580
3.0	0.33	1260 × 526.666...
4.0	0.25	960 × 540
5.0	0.20	768 × 432

配線の通し番号



左の端子の様子

配線の通し番号



右の端子の様子

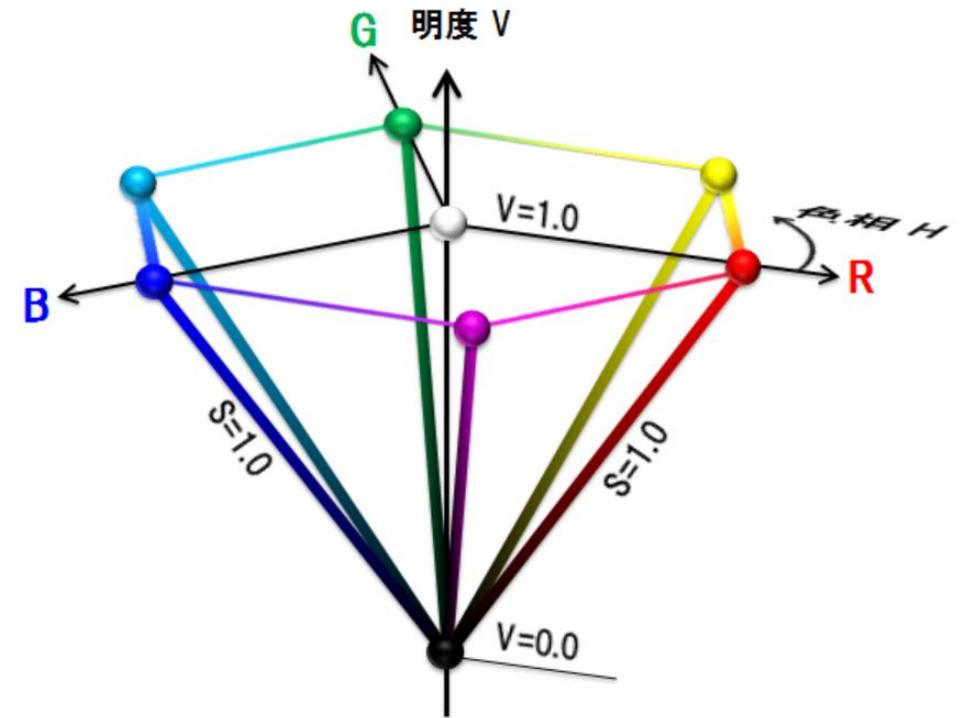
FPC線幅測定ソフトウェア

Saturation（彩度）を用いて線幅を測る理由

先行研究で使われていたソフトウェアでは最初から彩度を用いて解析しており、HSVのHue（色相）、Value（明度）のパラメータを使ってもうまく銅線の線幅だけが見えるような画像を取得できなかったためだと考えられる

※写真を撮る時点ではRGB画像だが、ソフトウェア内で最初にHSVに変換しており、RGBでは明るさの変化と色の変化が同時に変動するため、Hue、Saturation、Valueを分離できるためHSVを選んでいる

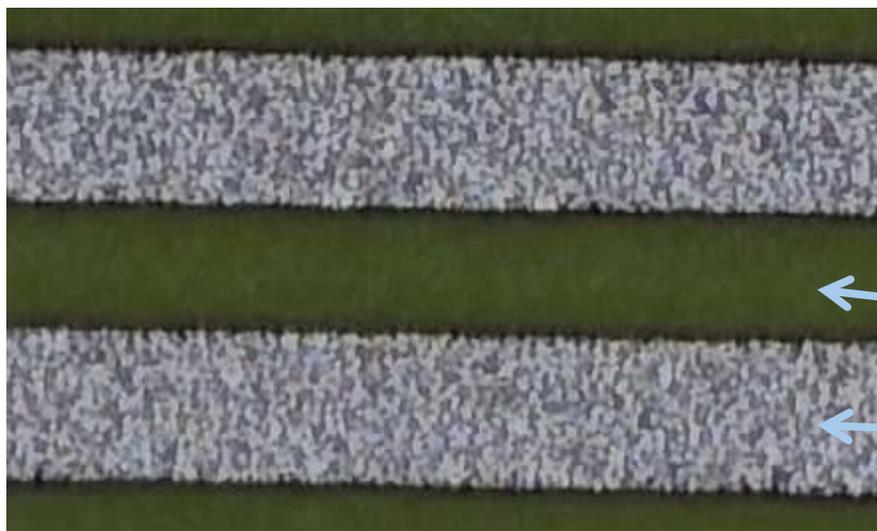
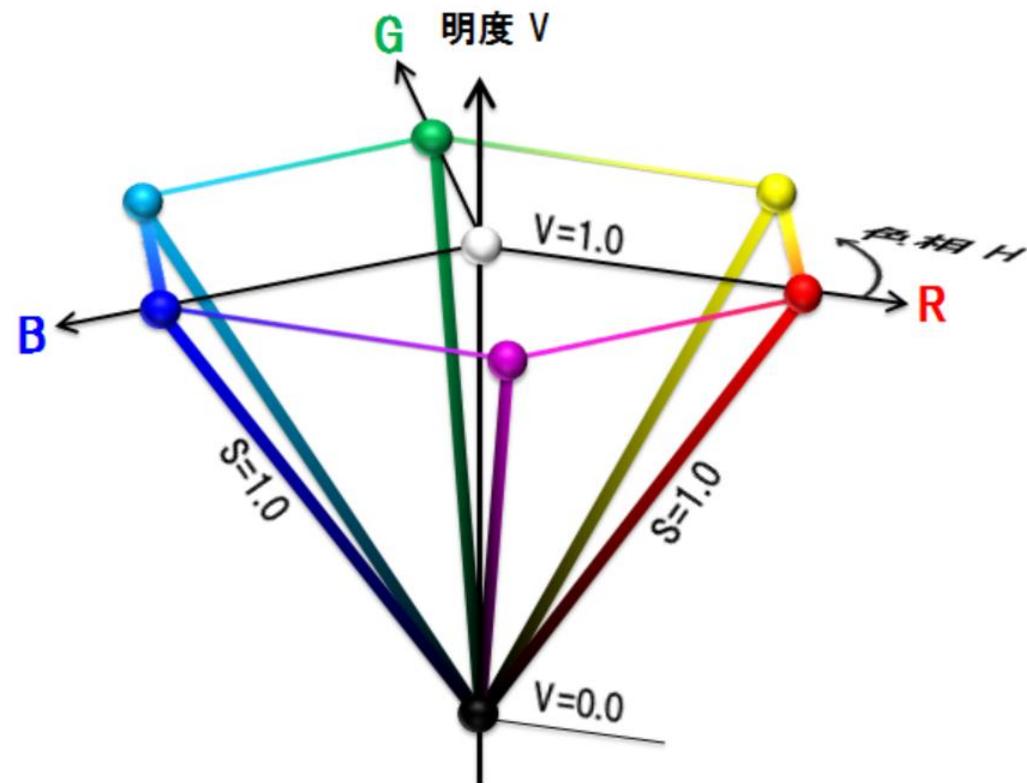
HSV（六角錐モデル）



HSV

- 色相 (Hue) 【(0,0,0)~(255,255,255)】
色の種類
- 彩度 (Saturation) 【0~1 or 0~255】
はっきり、クリアに見えるか
(白、グレー、黒が混ざるとくすむ)
- 明度 (Value) 【0~1 or 0~100】
明るさ (白っぽい→明、黒っぽい→暗)

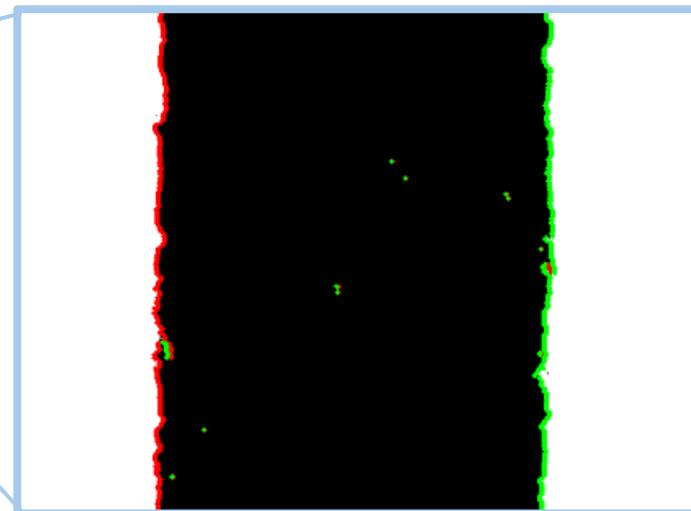
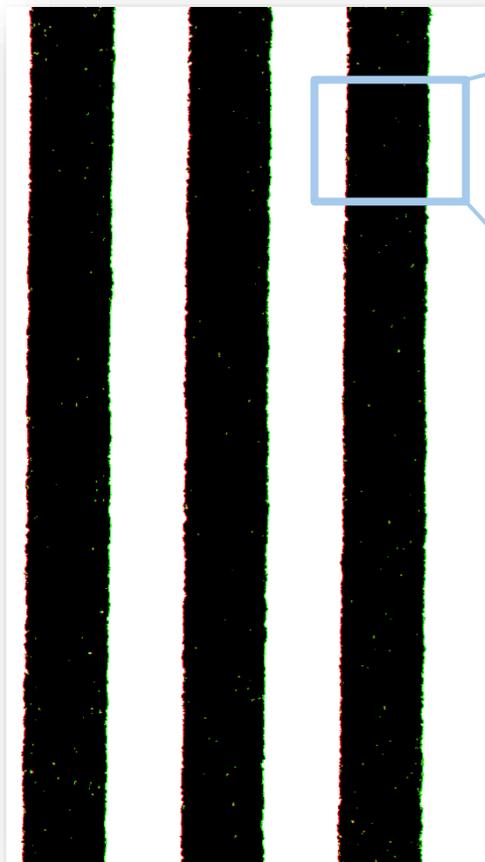
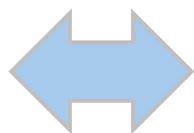
HSV (六角錐モデル)



← 緑→彩度50-100→白に変換

← 白→彩度0→黒に変換

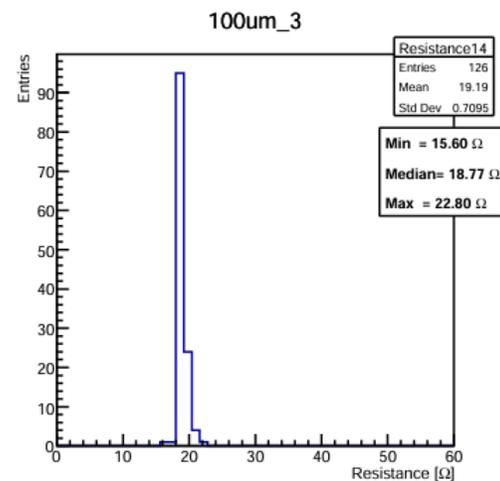
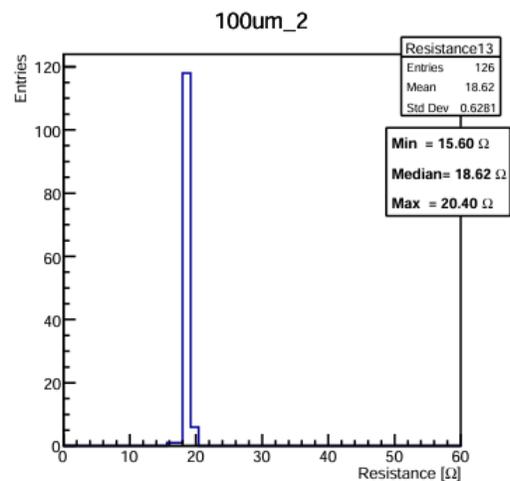
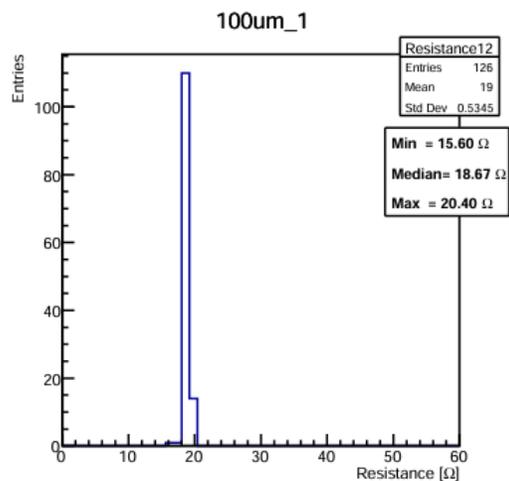
ソフトウェアが線端と検知する部分の可視化



上図のように、二値化した後のピクセルの情報を使って線端を感知していることがわかる。

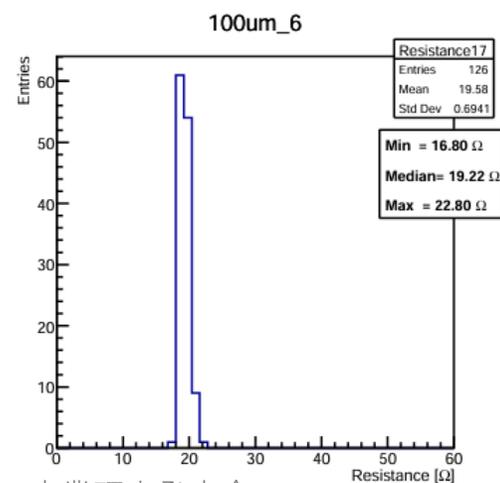
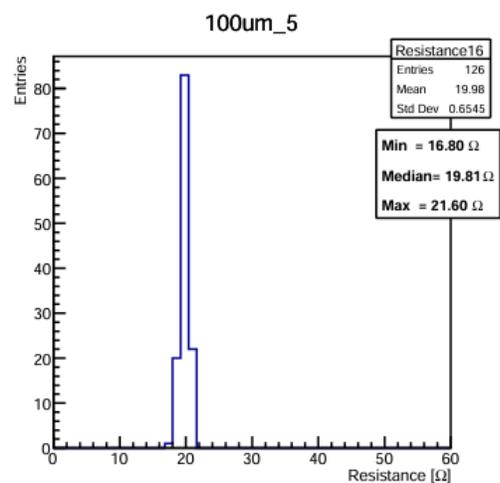
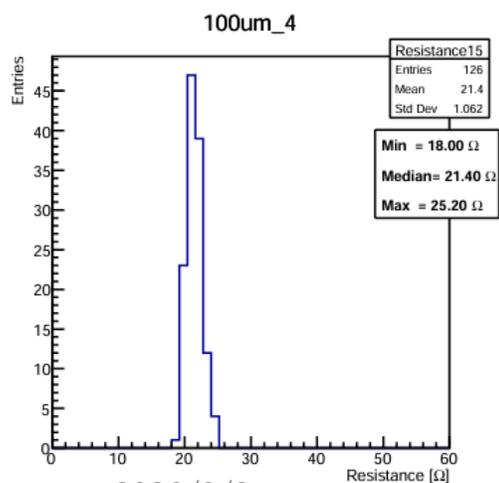
白→黒(赤)、黒→白(緑)にピクセルを塗った写真

導通テスト

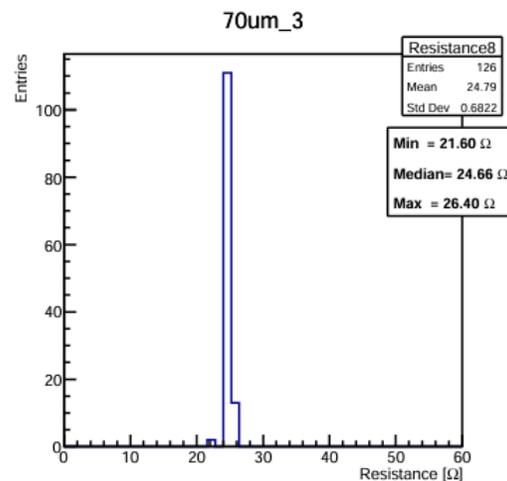
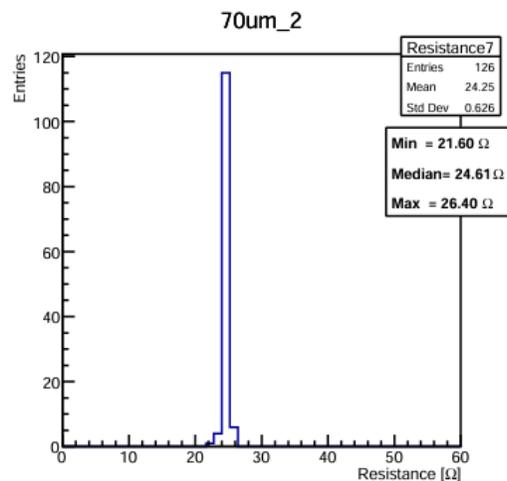
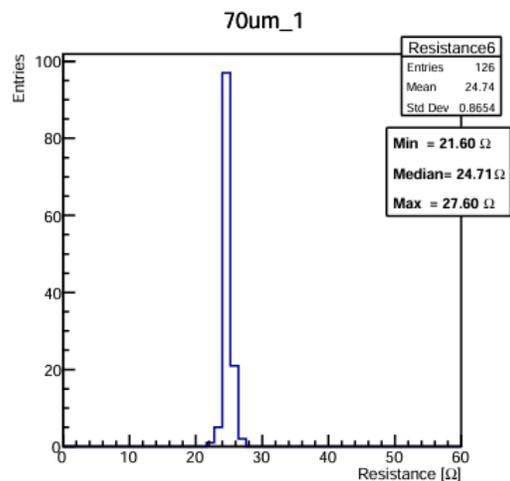


100um×6本の導通テスト結果

- 抵抗値は20Ω前後になった
- 100um_2本目の配線番号17,18がショートしていた

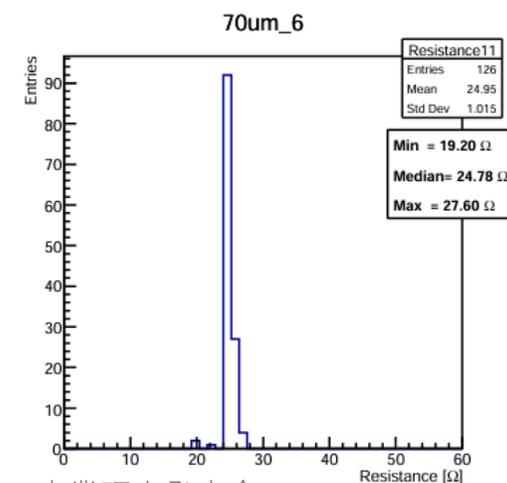
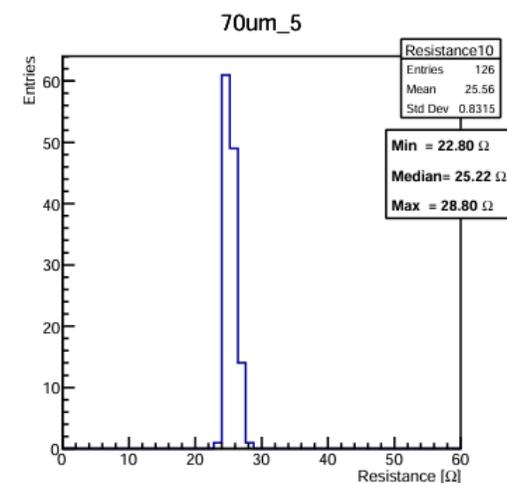
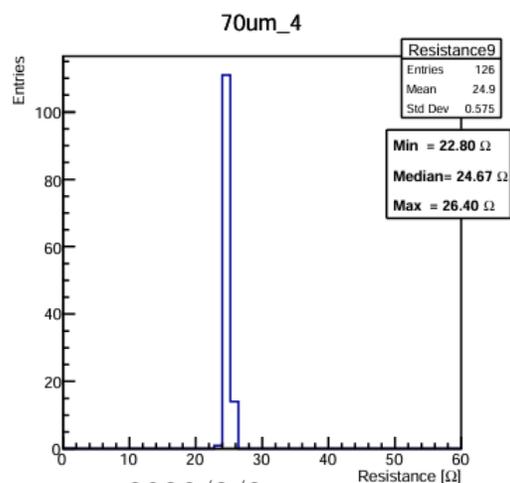


導通テスト



70um × 6本の導通テスト結果

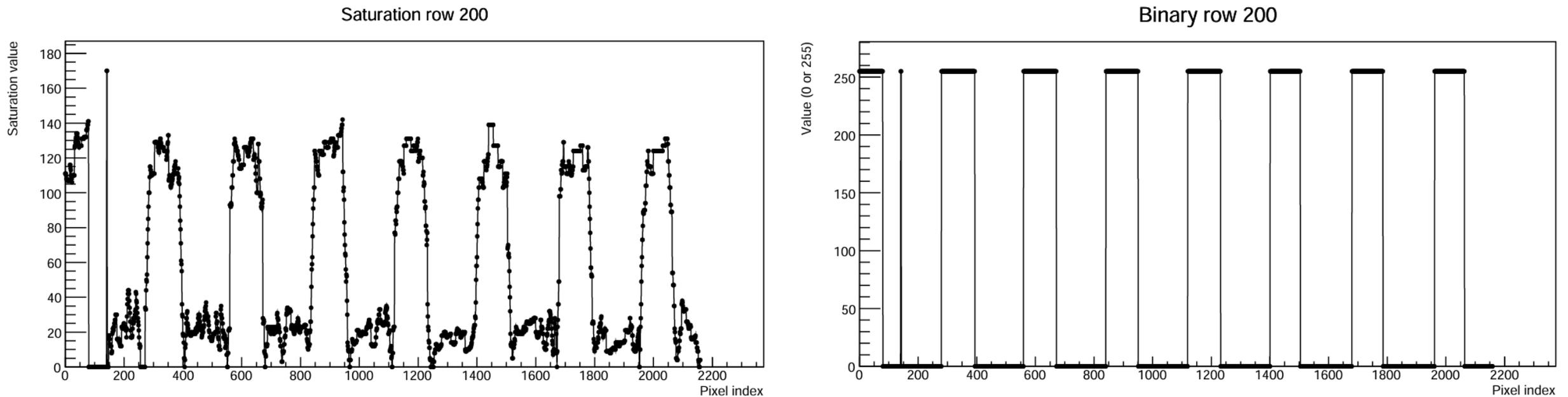
- 抵抗値はすべて24Ω前後になった
- ショート及び断線している銅線はなかった



FPC検査ジグのカメラの性能

線幅：70um
倍率：0.2

左のグラフから彩度の閾値を60-90にする必要があると考えられる



70umの倍率2.0の二値化前(左)と二値化後(右)の一行分の彩度分布

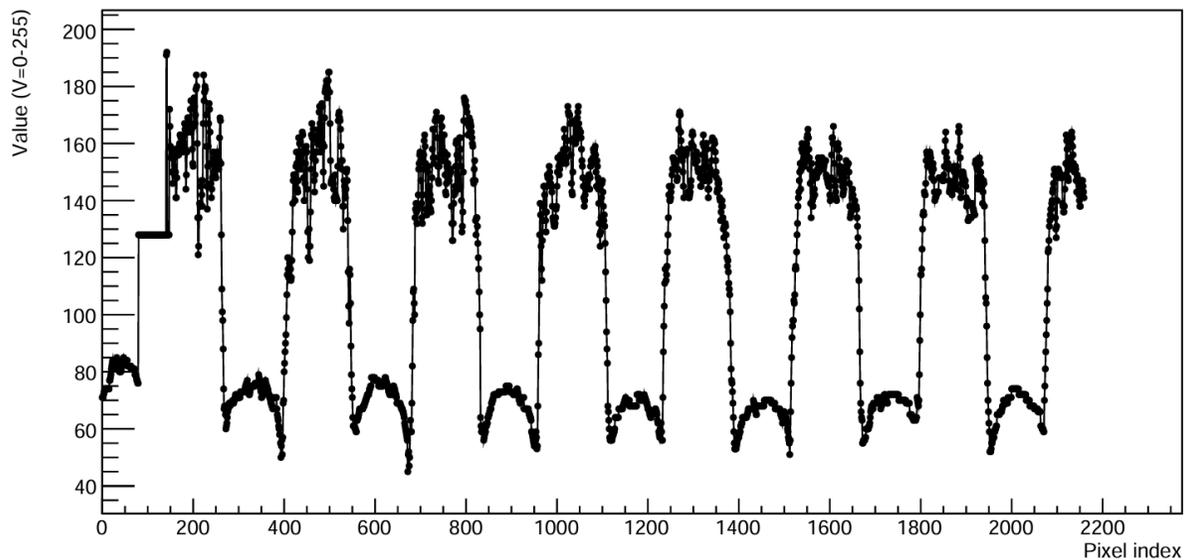
明度の閾値による影響

線幅 : 70um
倍率 : 0.2

閾値70

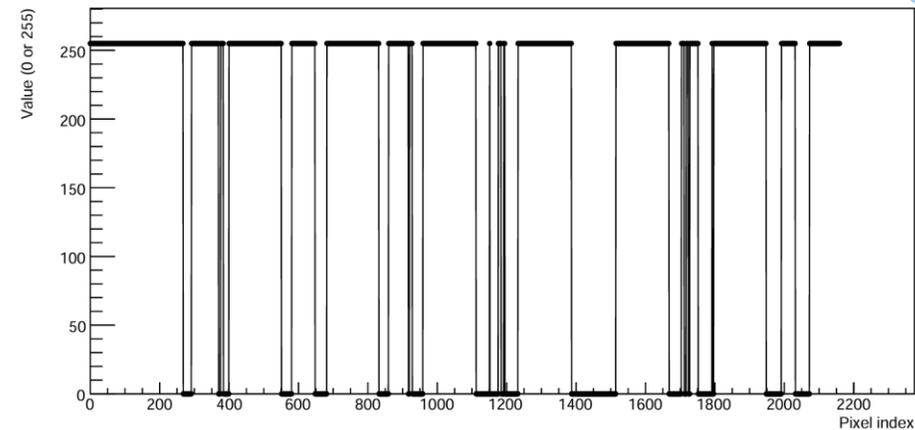
明度でも閾値を120あたりに取れば
二値化できるかもしれない

Value row 200



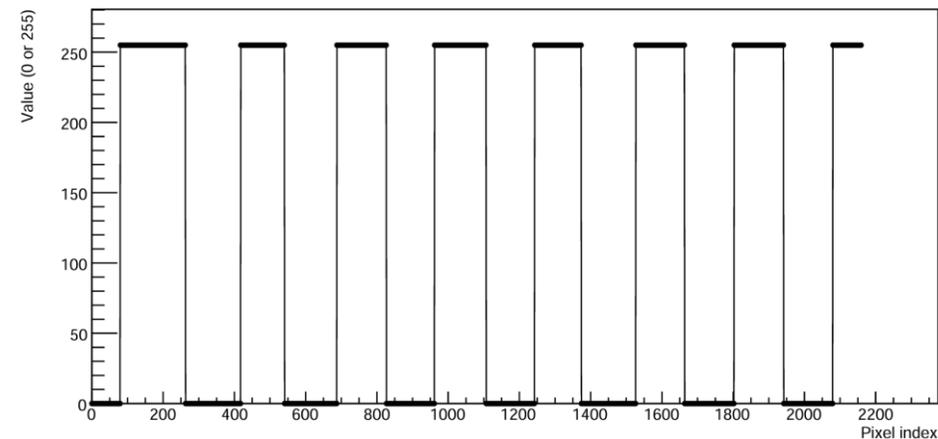
70umの倍率2.0の二値化前の一行分の明度分布

Binary row 200 (Value)

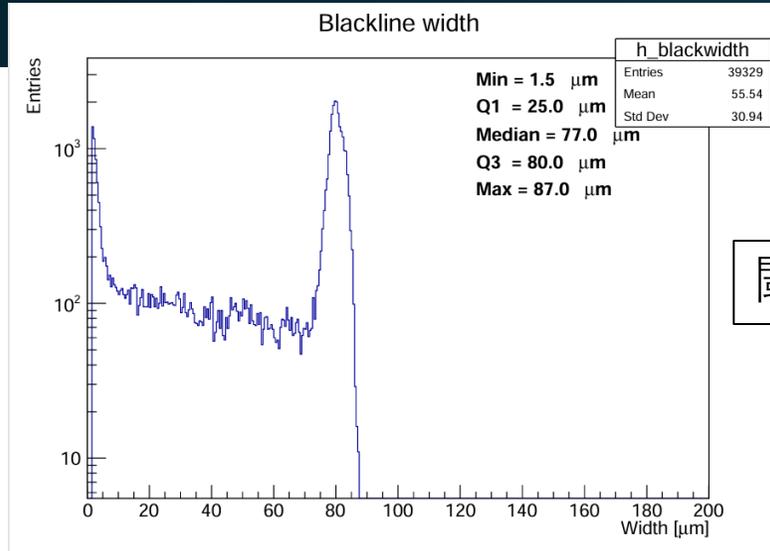


閾値120

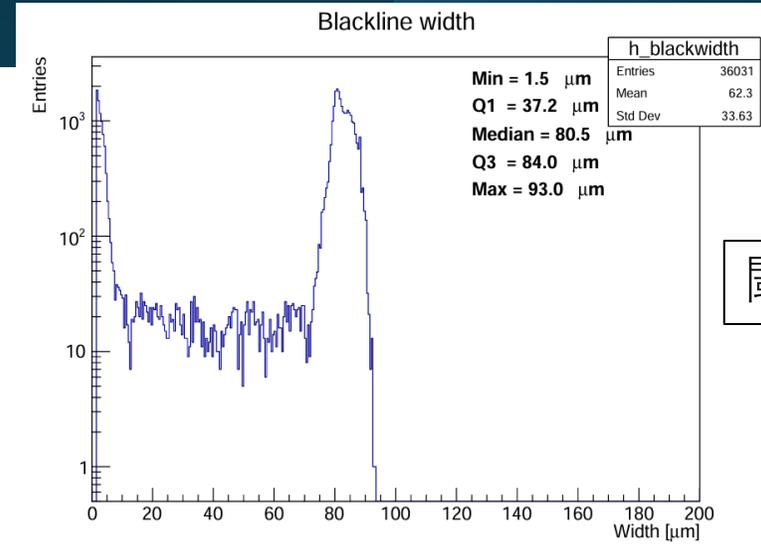
Binary row 200 (Value)



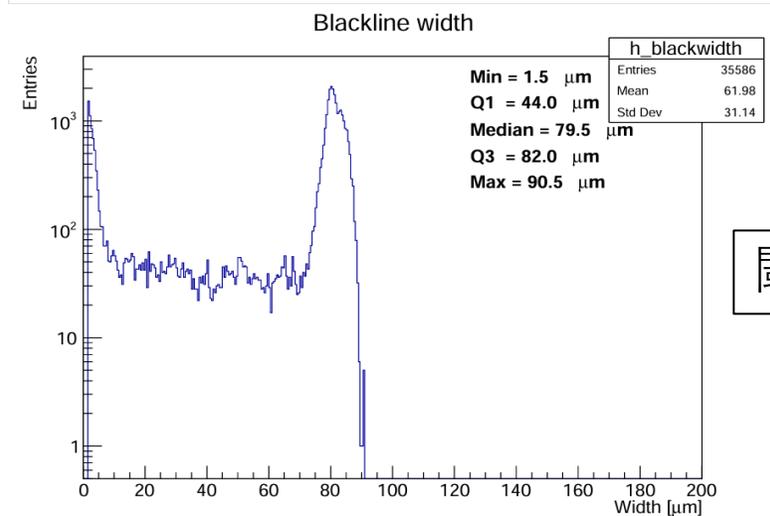
FPC線幅測定 of ヒストグラム



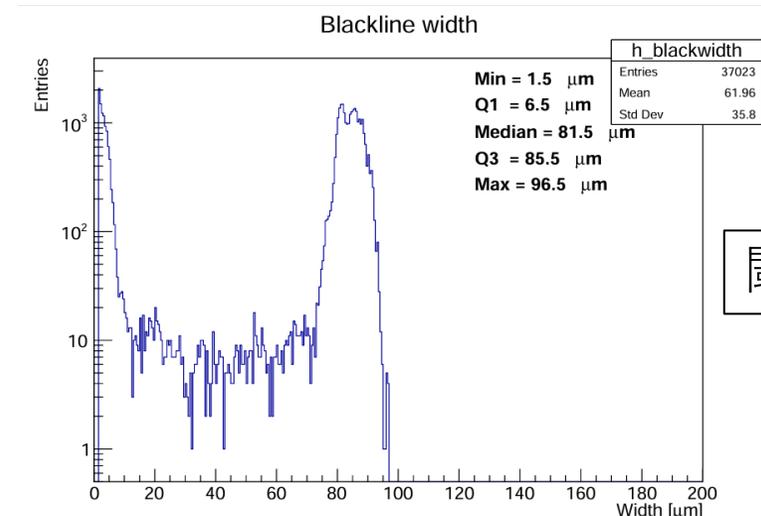
閾値60



閾値80



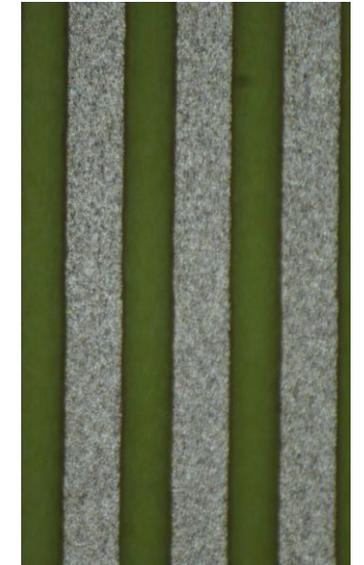
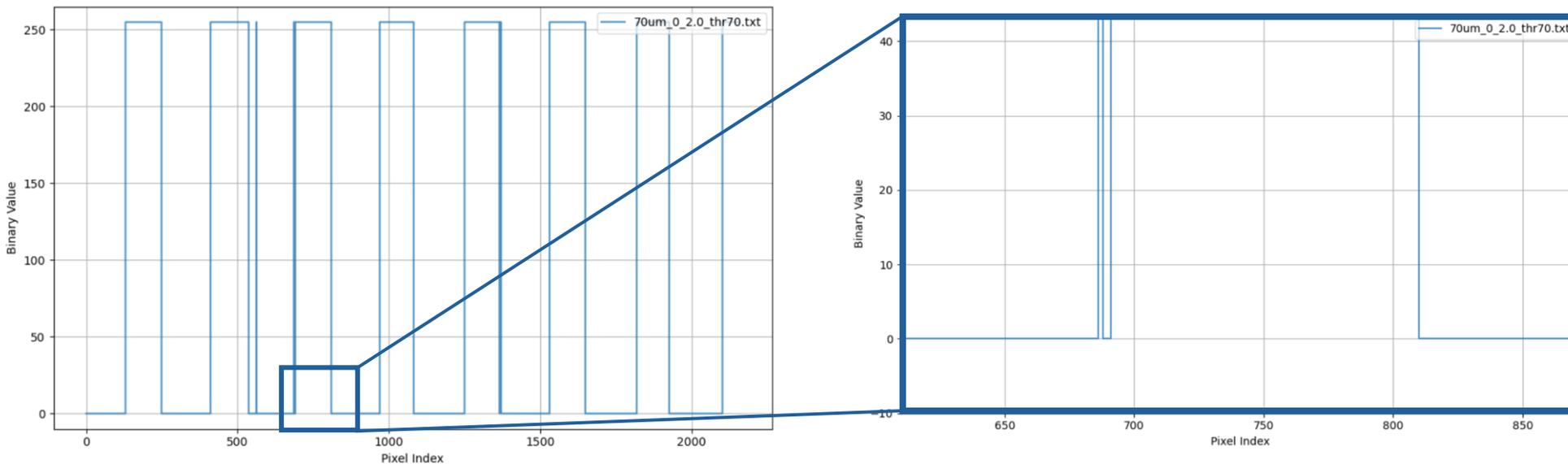
閾値70



閾値90

FPC検査ジグのカメラの性能

縦軸を白黒二極化した後の彩度の値、横軸をピクセル番号にしたグラフを作成



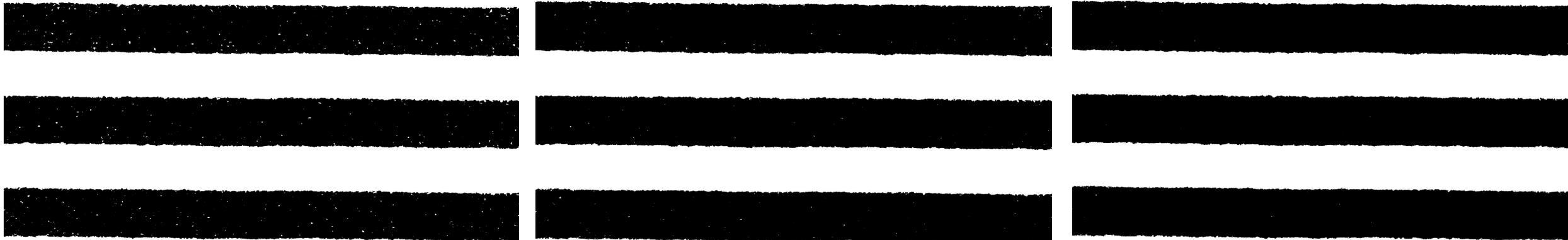
FPCを拡大したときの
写真

線幅の端に見えているところを拡大すると何度か線幅と認識しているところがあることがわかる
→線端が影により暗く映ることが線端で何度か線幅として認識されてしまうことが原因であると考えられるため、実際の線端を線端として認識するように調節する必要がある

彩度の閾値による影響

白黒二極化の閾値を変えて検証

→閾値を変えることでノイズが減ることがわかっていたため、ピークの見え方にどう影響するか見てみた



閾値 = 60の時

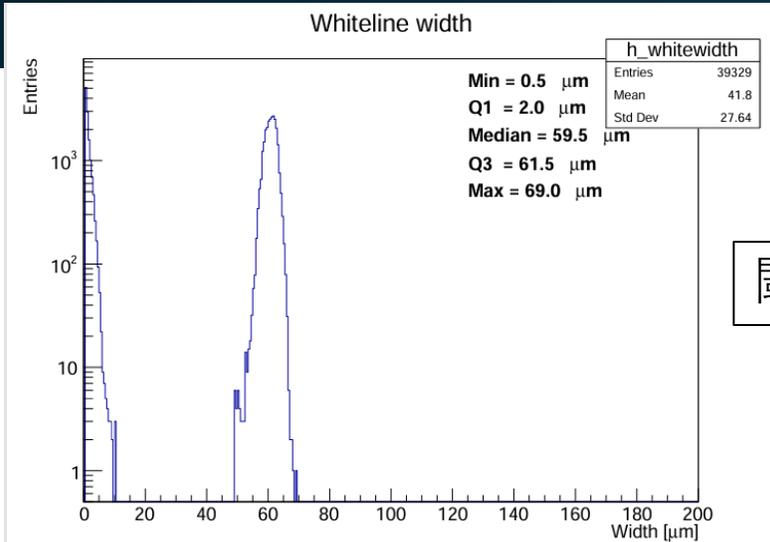
閾値 = 70の時

閾値 = 80の時

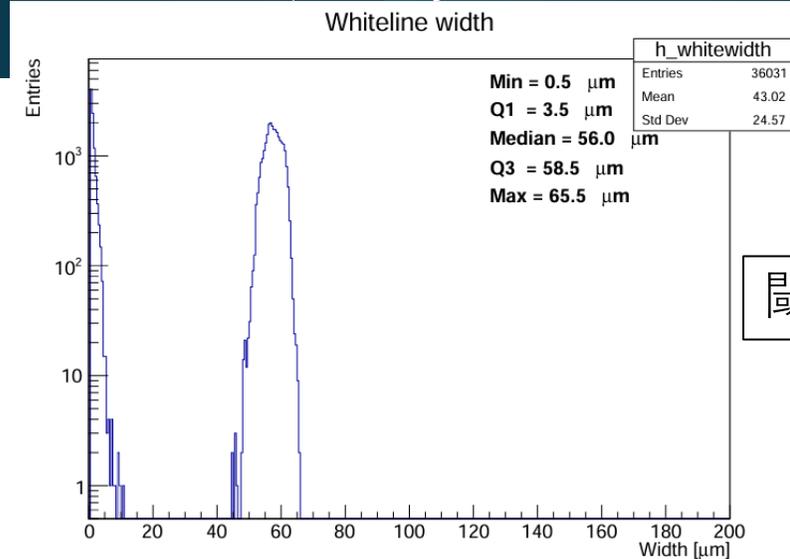
白黒二極化するうえでの閾値

彩度 \leq 閾値のとき黒、彩度 $>$ 閾値のとき白にする※黒の彩度は0で白の彩度は255

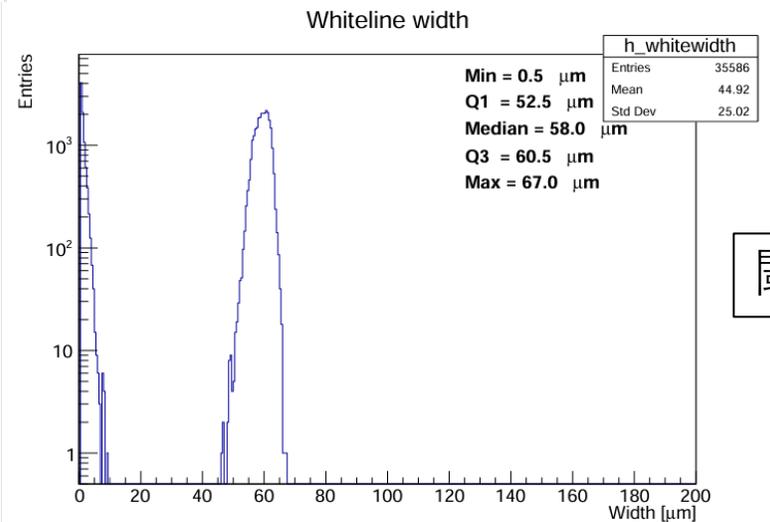
FPC線幅測定 of ヒストグラム



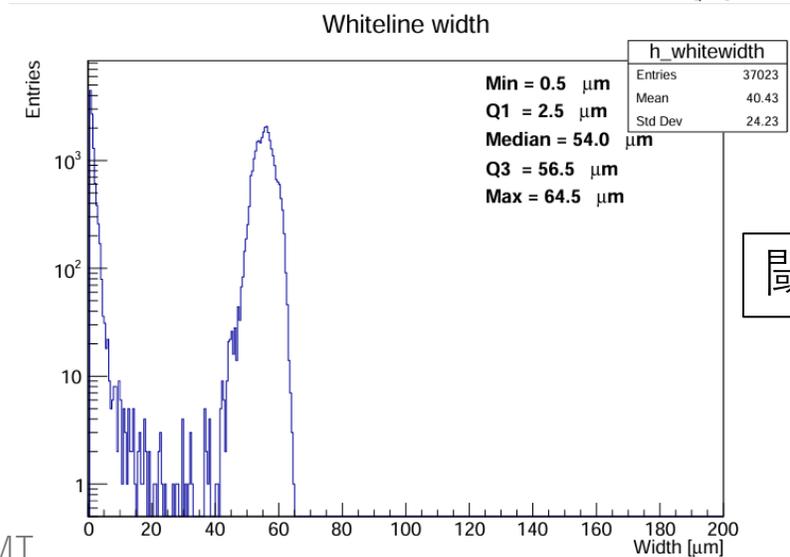
閾値60



閾値80



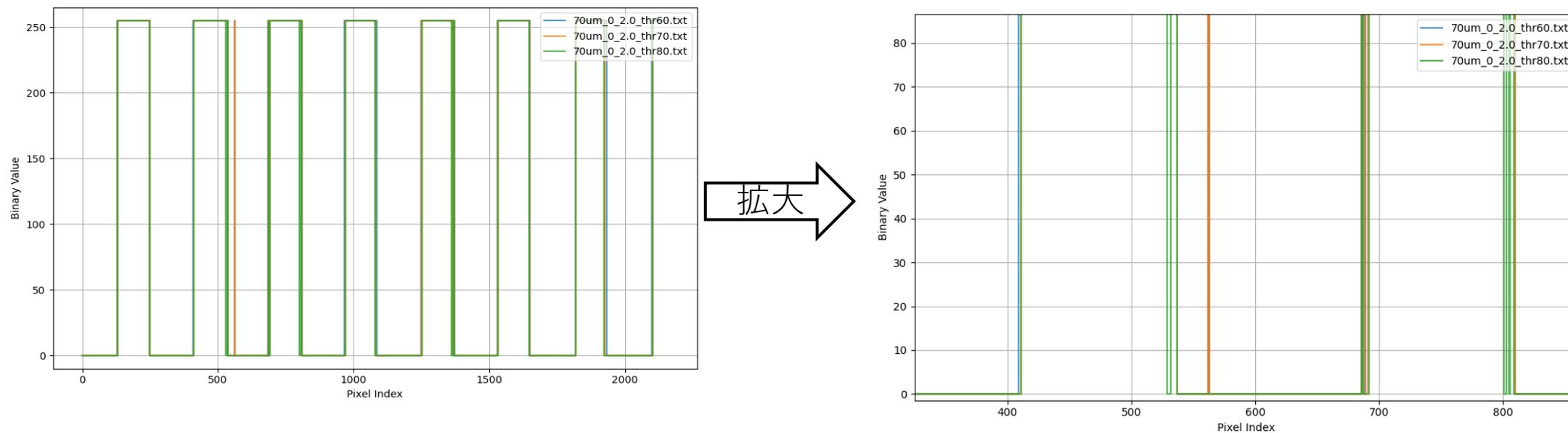
閾値70



閾値90

FPC検査ジグのカメラの性能

縦軸を白黒二極化した後の彩度の値、横軸をピクセル番号にしたグラフ
閾値60、70、80の時のグラフを重ねて表示している



拡大すると、本当の線幅の端の小さい範囲で何度か線端と認識されているところがあることがわかる