

平成 2 5 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

(継続事業)

「液晶表示用ガラス欠陥検査装置を高度化する画像処理組込みソフトウェアの
開発と事業化」

研究開発成果等報告書

平成 2 6 年 3 月

委託者 東北経済産業局

委託先 (株)インテリジェント・コスモス研究機構

目次

第1章 研究開発の概要.....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1) 研究の目的.....	1
2) 目標.....	1
①液晶表示用ガラス欠陥検査装置と高解像度光学系の開発.....	1
②液晶表示用ガラス欠陥検査用ソフトウェアの開発.....	1
1-2 研究体制	2
1) 研究組織.....	2
2) 管理体制.....	2
3) 研究者氏名	3
4) 協力者氏名	3
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口.....	4
第2章 本論.....	5
2-1 高解像度光学系の開発	5
1) 光学系の研究・開発.....	5
2) 光路切り替えのシャッター機構開発.....	14
3) 高解像度光学ユニットの開発	20
4) 装置化	27
2-2 液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発	38
1) 欠陥の観察と特徴抽出手法の確立	38
2) カメラ画像のずれ量計測システム開発.....	59
3) 欠陥の検出システム開発.....	69
最終章 全体総括.....	101
1) 高解像度光学系の開発	101
2) 液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発.....	102

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究の目的

液晶等のFPD用ガラス基板の欠陥は、製品品質を左右する重要な問題である。この欠陥は面方向で数十 μm から数百 μm 、厚み方向で数 μm から数十 μm あり、10数種類以上あると言われている。現状、上記の欠陥の検査は目視により行われているが、個人差による検査品質のバラツキ問題、及び検査労務費増によるコスト競争力の低下等の課題を抱えている。そのため、過去より検査の自動化が試みられている。しかし、制限された平面情報を元に欠陥の有無判定を行う方式を採用していたため、欠陥の分類、分別が困難であり、精度、信頼性において目視検査を凌駕するレベルには到達しておらず、自動化への移行はそれ程進んでいない。

本研究開発は、新たに開発する高解像度光学系と新手法を用いた高精度画像処理システム技術の適用により、従来困難であった欠陥の分類、分別の自動化を可能とする液晶表示用ガラス欠陥検査装置の実現を目指す。

2) 目標

①液晶表示用ガラス欠陥検査装置と高解像度光学系の開発

カメラ台数を増やさずに高解像度な画像取得を行う光学系の新規開発とこの光学系を搭載した液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発を行う。

また、2台のラインカメラを一組として2視点の画像から欠陥の特徴と位置を検出することにより、キズの種別と表裏のキズの位置の誤検出を防止することで、欠陥認識精度の向上を計る。

【開発目標】：欠陥の検出サイズ（キズ幅）最小10 μm の判別を可能とする液晶表示用ガラス欠陥検査装置を開発する。

②液晶表示用ガラス欠陥検査用ソフトウェアの開発

欠陥の分類を行う手法としては、欠陥の特徴を把握し、その種類ごとにパターン化する方法がある。パターン化する手法としてレーザー顕微鏡や光学干渉顕微鏡などを用いて1 μm 以下の精度で画像を取得し、取得した画像の欠陥を観察し特徴を数値化する特徴抽出手法を確立する。数値化されたデータをパラメータとして、ハフ変換／エッジ検出法／輝度差法をソフトウェア化し、キズ／へこみ／気泡／カレット／ゴミ／汚れ等の形状や輝度の類似する特徴を分類する。

①の高解像度光学系で取得した画像を使用し、形状的な特徴はハフ変換で、鮮明さの特徴はエッジ検出法で、影の出方の特徴は輝度差法で、それぞれ抽出する欠陥検出システムを開発する。また、検出した欠陥がワークのどの位置に発生しているかを示すことが必要であるため、カメラの取り付けばらつきを補正するために、位相限定相関法（POC）をソフトウェア化し、位置補正情報を取得するための計測システムを開発する。

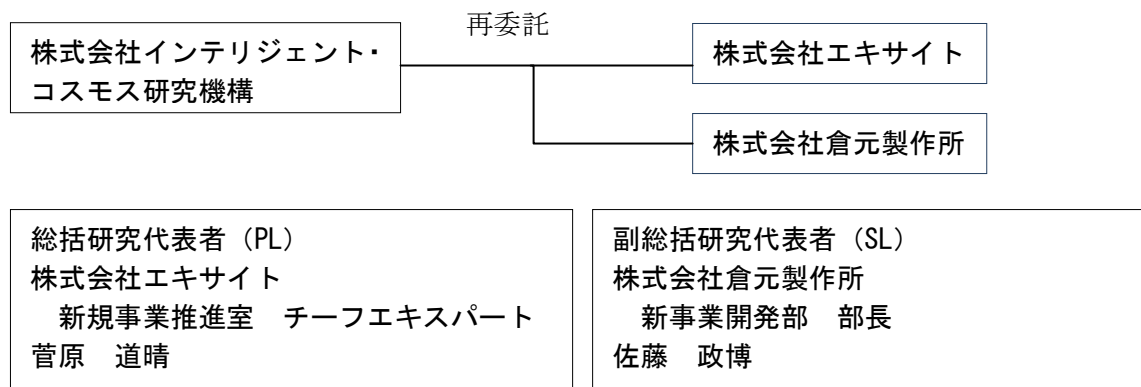
また、①で開発する高解像度光学装置と画像処理ソフトウェアとの組み合わせで構成する液晶表示用ガラス欠陥検査システムの評価・検証を行う。

なお、評価と検証の中では、事業化にあたって欠陥分類以降の工程に必要となる仕分け機構についても検討する。本機構は、ガラス欠陥検査装置以降に再研磨工程・洗浄工程・廃棄の3つに工程分けを行うために必要となるが、液晶表示用ガラス欠陥検査装置と連動することが必須となるため、本項目において検討を行う。

【開発目標】：装置による液晶用ガラス基板の不良品誤検出率0.1%以下の達成

1-2 研究体制

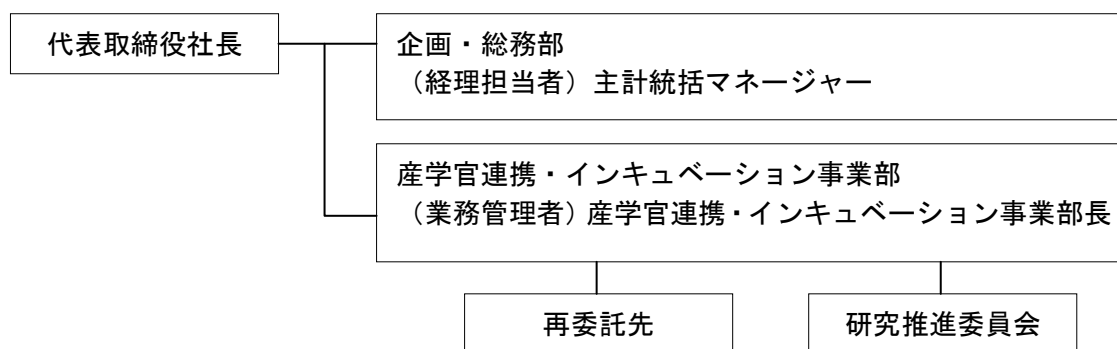
1) 研究組織



2) 管理体制

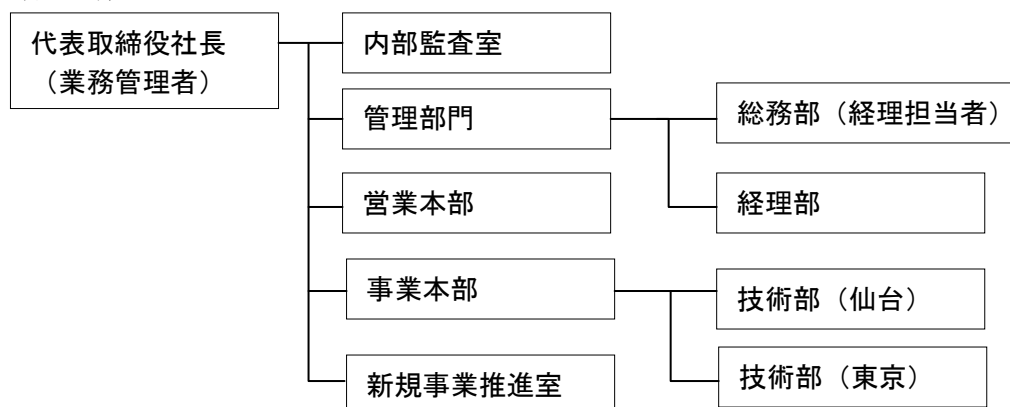
①事業管理者

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

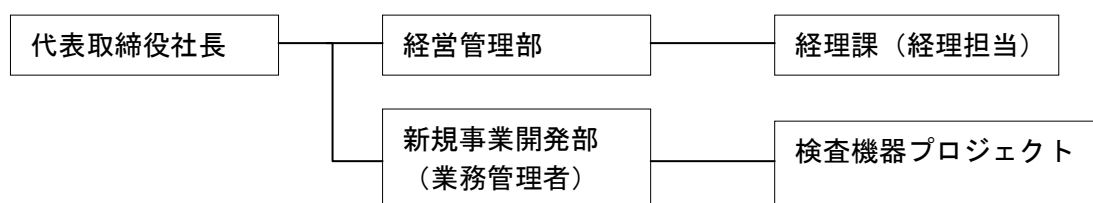


②再委託先

株式会社エキサイト



株式会社倉元製作所



3) 研究者氏名

株式会社エキサイト

氏名	所属	実施内容
菅原 道晴 三瓶 仁寛 吉田 篤志 本多 晃	新規事業推進室 チーフエキスパート 技術部 技術部 技術部	PL

株式会社倉元製作所

氏名	所属	実施内容
佐藤 政博 斎藤 尚之 高橋 誠	新事業開発室 部長 検査機器プロジェクト 技術主事 検査機器プロジェクト	SL

4) 協力者氏名

氏名	主な指導・協力事項
青木 孝文	欠陥画像から特徴を抽出し分類を行う技術の指導
大寺 康夫	高解像度化を実現するための光学設計の指導
鹿野 満	表示装置の評価に対する協力
太田 晋一	装置の評価に対する協力
植野 晴海	光学機器の設計、製造の協力
門澤 文夫	フィルム欠陥検査装置販売におけるニーズ提案

1－3 成果概要

1) 高解像度光学系の開発

- ・光学系の研究・開発

光学実験機を使用して原理の確認を行い、ガラス欠陥検出に最適な光学系の仕様を見出した。

- ・光路切り替えのシャッター機構開発

照明切り替え方式を採用し、 $50\mu\text{s}$ で切り替え可能なシャッター機構を開発した。

- ・高解像度光学ユニットの開発

光学系の研究・開発で確認した仕様を満たし、4光路切り替え可能な光学ユニットの開発を行った。

- ・装置化

LED照明ユニットと高解像度光学ユニット改を液晶表示用ガラス検査搬送装置に搭載して、液晶表示用ガラス欠陥検査装置として組み上げる目標に対し、期間内に全ての光学系調整は完了できなかった。1ユニット分のみ光学系調整を完了させ、(キズ幅) 最小 $10\mu\text{m}$ 以下の欠陥検出および欠陥の表裏判別可能な検査装置が確立できた。残り今後4ユニット分の光学調整を行うことで、 $1300\times1100\text{mm}$ (G5サイズ) 全面の検査が行える液晶表示用ガラス欠陥検査装置とすることが出来た。

2) 液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発

- ・欠陥の観察と特徴抽出手法の確立

欠陥を観察して特徴を把握するためには欠陥を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で観察することが必要であるため、宮城県産業技術総合センターの各種測定器機を使用して欠陥の観察を実施した。その観察結果から欠陥の特徴を把握した。

- ・カメラ画像のずれ量計測システム開発

カメラ位置の調整では不可能な微妙な位置ズレ調整を可能とするために、位相限定相関法 (POC) を用いて2枚のカメラ画像からずれ量を計測するソフトウェアを開発した。

装置化したガラス欠陥検査装置にカメラ画像のずれ量計測システムを搭載し、カメラ画像のずれ量計測の精度 $7.015\mu\text{m}$ ($8.5\mu\text{m}$ 以内) を達成した。

- ・欠陥の検出システム開発

露光時間を変えて2回撮像することでダイナミックレンジを疑似的に広げ、輝度が低いキズを撮像できる状態を保ちながら、輝度が高いカレットを露出オーバーしないで撮像できるようになった。

装置化したガラス欠陥検査装置に欠陥の検出システムを搭載し、評価を行っている。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

組織 (株)インテリジェント・コスモス研究機構

産学官連携インキュベーション事業部

氏名 多賀 雄次

電話 022-279-8811

E-mail y-taga@icr-eq.co.jp

第2章 本論

2-1 高解像度光学系の開発

1) 光学系の研究・開発

光学実験機を使用した原理確認

明視野の透過光環境での撮影

顕微鏡などで試料を観察する場合は、明視野での観察が一般的である。よって、最初に明視野の透過光環境で撮影を行った。明視野の透過光環境では、試料を均一な入射光で照らした時、試料の各部分において光の吸収率が異なる為に透過光の像にコントラストが付くことにより観察が可能となる（図1）。

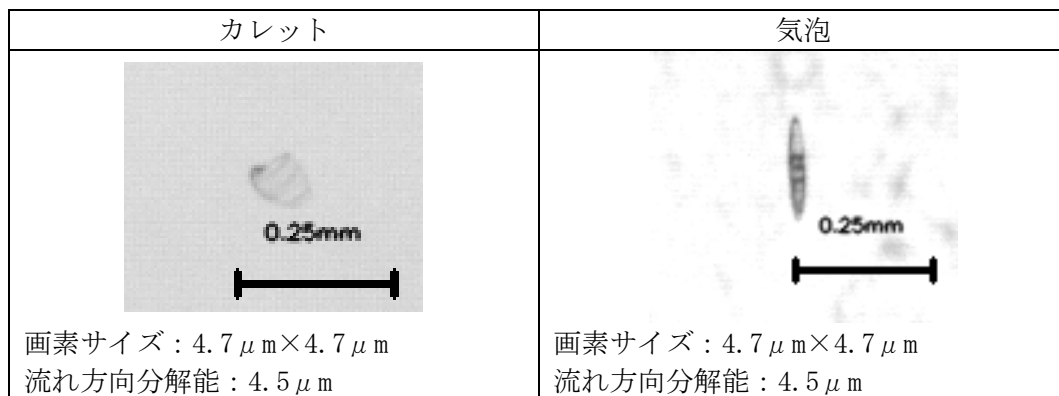


図1 明視野の透過光環境で撮影した画像

明視野の透過光の撮影は、ラインカメラを固定し、光源（LED 照明）とガラス試料が一体となってスライドするように設置して実施した。拡散板で拡散させた LED 照明の光とラインカメラが同軸上の際のガラス試料を撮影する（図2、図3、図4）。

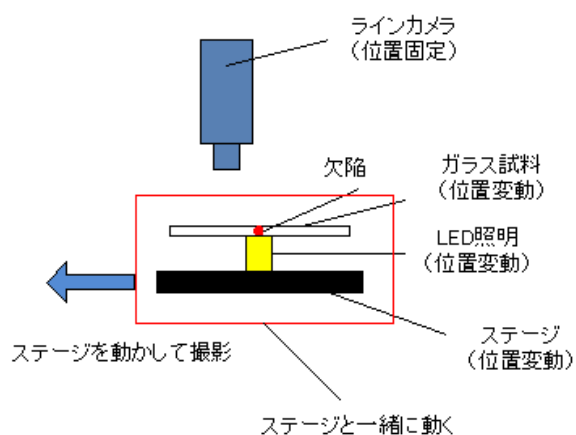


図2 明視野の透過光環境の撮影図

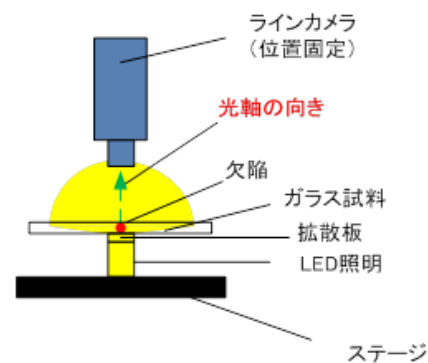


図3 明視野の透過光環境の光軸の向き



図 4 明視野の透過光環境の実験の様子

明視野の透過光環境で実験を進めた際、カレット、ゴミ、汚れ、気泡は撮影できたが、浅い（薄い）キズは、光の吸収率の変化が小さく、輝度変化が小さくなるため、撮影できないことが判明した。キズは光の透過率によって観察するよりも、拡散光で観察する方が適しているため、暗視野の透過光環境での撮影方法に切り替えた。

暗視野の透過光環境での撮影

暗視野の透過光環境では、試料に角度をつけた入射光を照らしたときの拡散光を撮影する（図 5）。

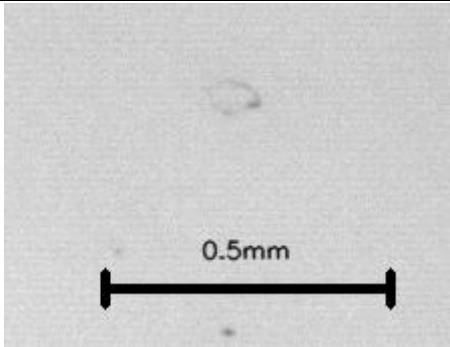
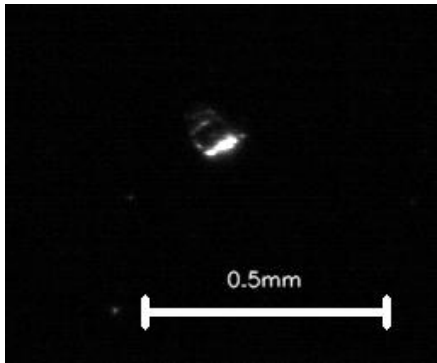
明視野	暗視野
 画素サイズ：$3.5\mu\text{m} \times 3.5\mu\text{m}$ 流れ方向分解能：$3.0\mu\text{m}$	 画素サイズ：$3.5\mu\text{m} \times 3.5\mu\text{m}$ 流れ方向分解能：$3.0\mu\text{m}$

図 5 明視野と暗視野で撮影した画像の比較

暗視野の透過光の撮影は、ラインカメラと LED 照明を固定し、ガラス試料がスライドするように設置して実施した。ガラス試料上の欠陥で拡散した光が、ラインカメラに入射した光を撮影する（図 6、図 7、図 8）。

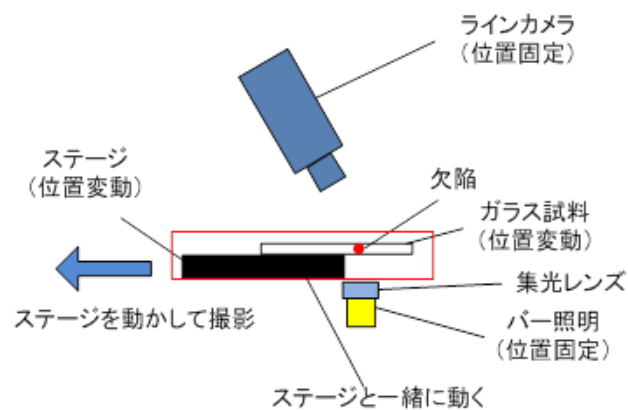


図 6 暗視野の透過光環境の撮影図

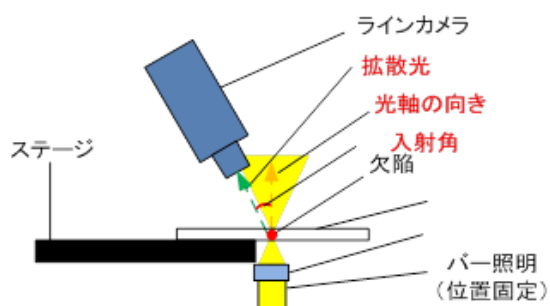


図 7 暗視野の透過光環境の光軸の向き

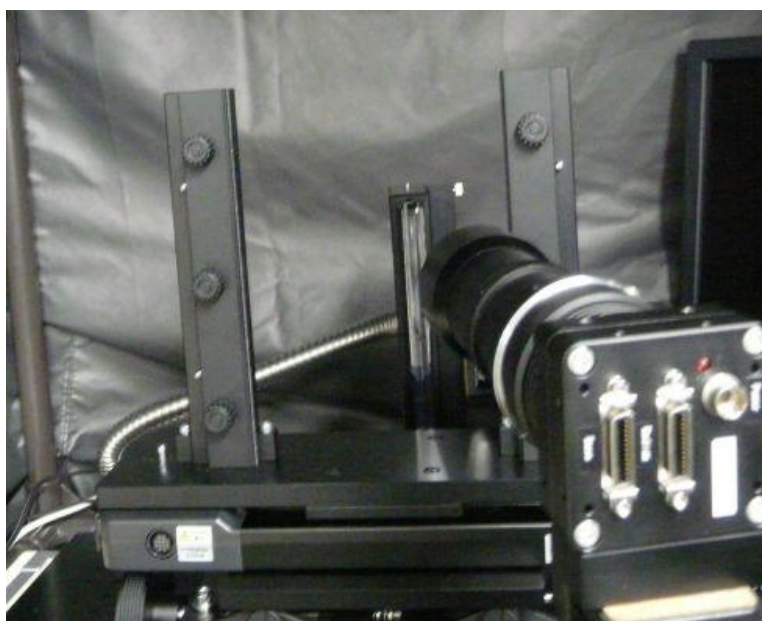


図 8 暗視野の透過光環境の実験の様子

暗視野で実験を行ったところ、明視野の透過光環境では撮影できなかった欠陥（キズ）が、暗視野の透過光では撮影できることが確認できた(図 9)。

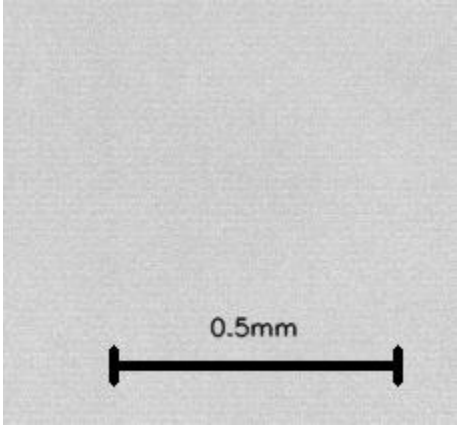
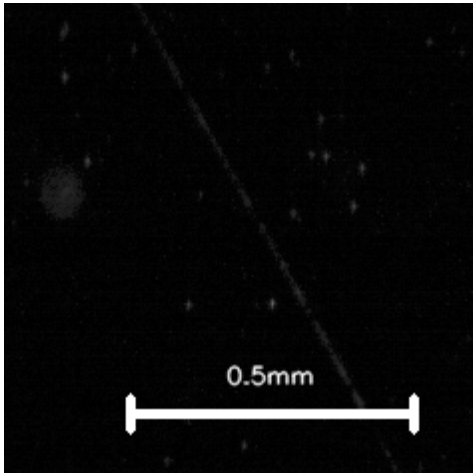
【キズ】 [No1-9]キズ幅：1.6 μm (TFT グレード NG)	
明視野の画像	暗視野の画像
 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm	 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm

図9 明視野では撮影できないが、暗視野では撮影できる欠陥（キズ）

カメラの選定

画素サイズ

欠陥の分類では、画素サイズが小さいほど、使用できる画像の情報量が多くなるため、分類の精度を向上させることができる。例えば、30 μm の欠陥を分類する場合、同じ光学倍率 1.0x のレンズを使用すると、画素サイズ 4.7 μm のカメラでは $30 \div 4.7 \div 6$ 画素分の情報であるのに対し、画素サイズ 3.5 μm のカメラでは $30 \div 3.5 \div 8$ 画素分の情報を取得することができるため、欠陥の情報量が増えることによって、欠陥の分類の精度が上がることを期待される。

スキャンレート

ラインセンサカメラの場合、スキャンレートを速くすることによって搬送速度を上げることができるため、タクトタイムを短縮することができる。一方、スキャンレートが速くなると、カメラの露光時間が短くなり、取得する画像が暗くなってしまう(図 10)。画像が暗くなる恐れはあるが、光源の出射光量を上げることにより、スキャンレートの短縮分をカバーできる。よって、スキャンレートの速いカメラを選定することができる。

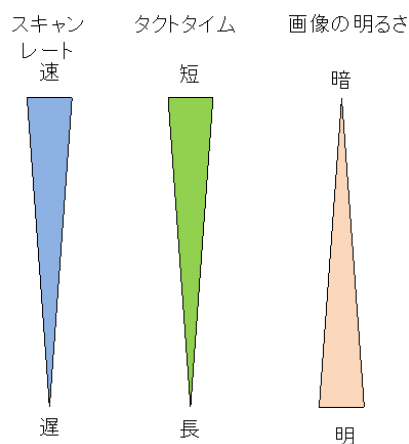


図10 スキャンレートと画像の明るさの関係

検証の内容

以上のことより、カメラの仕様は、以下の条件が必要となる。

- ・画素サイズが小さい
- ・スキャンレートが速い

23 年度の研究では、以下の 3 種類のカメラを使用して検証を行った。

	TL-2048UCL	TL-7400UCL	PCL08F
イメージセンサ	CCD	CCD	CMOS
有効画素数 (pixels)	2048	7400	8192
画素サイズ (μm)	10.0 (H) $\times$ 10.0 (V) (10.0 μm pitch)	4.7 (H) $\times$ 4.7 (V) (4.7 μm pitch)	3.5 (H) $\times$ 3.5 (V) (3.5 μm pitch)
受光素子長 (mm)	20.48	34.8	28.672
スキャンレート (kHz)	23.8	12.71	39



図 11 TL-2048UCL、TL-7400UCL のカメラ



図 12 PCL08F のカメラ

CCD と CMOS のカメラを比較した場合、一般的には CCD カメラの感度が高く、低ノイズである。CMOS カメラの PCL08F を使用してガラス試料の欠陥画像を取得したところ、欠陥を分類するために必要十分な画像であることを確認できた。よって、CMOS の画素サイズ 3.5 μm 、スキャンレート 39kHz のラインカメラ (PCL08F) を選定した。

カメラレンズの仕様

光学倍率と被写界深度の関係

一般的には、光学倍率が高いレンズほどピクセル分解能が上がり、画像の情報量が多くなるため、欠陥の分類には光学倍率が高いレンズが必要とされている。本研究において、画素サイズが $3.5\mu\text{m}$ のカメラを選定したため、 $10\mu\text{m}$ の欠陥を認識するためには、光学倍率 $1.0\times$ 以上のレンズが必要となる。一方、光学倍率が高くなると、被写界深度が浅くなり(図 12)、焦点が合う範囲が狭くなる。被写界深度が浅すぎると、ガラスの表面に焦点を合わせた場合、裏面には焦点が合わない。よって、ガラス両面の撮影ができる光学系を開発する必要がある。

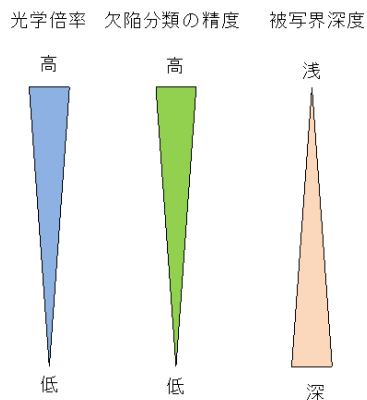


図 12 光学倍率と被写界深度の関係

検証の内容

光学倍率 $1.0\times$ のレンズを使用して、 $3.5\mu\text{m}$ のピクセル分解能で $10\mu\text{m}$ の欠陥を認識できた。

但し、今回使用したレンズでは、被写界深度が浅い (0.5mm) ため、ガラスの表面に焦点を合わせると、裏面に焦点が合わない。検査を行うガラス基板の厚さは最大 0.7mm であるため、少なくとも 0.7mm 以上の被写界深度が要求される。

ガラスの表面に焦点を合わせた表面の画像と、裏返した際に焦点が合わない画像の比較を図 13 に示す。

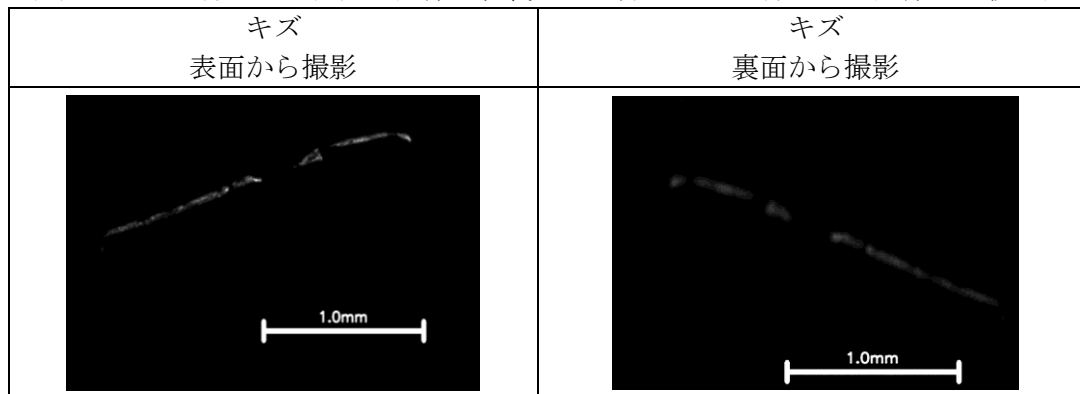


図 13 裏面の焦点が合わない画像

選定した光学系による欠陥の撮影

光学実験環境の条件

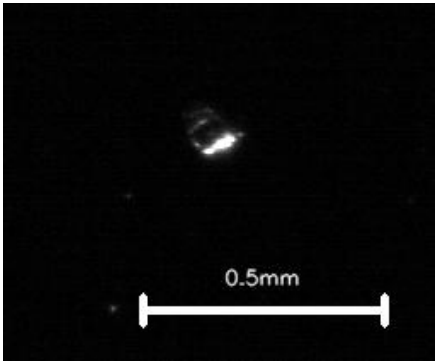
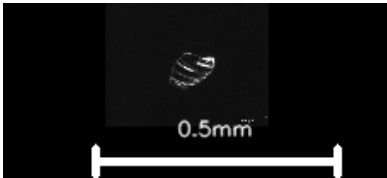
光学実験環境の条件を以下に示す。

カメラの画素サイズ	3.5 (H) × 3.5 (V) μm
流れ方向分解能	3.0 μm
カメラの角度	30.0°
光源での照度	120lux (検出不可の場合は光量最大 560lux にて撮影)
ガラス面での照度	11.9lux(光源での照度 120lux 時) ※球面の照度計で計測したため、光が当たらない部分があり、低くなっている
レンズ	光学倍率 1.0x
撮影環境	暗視野の透過光

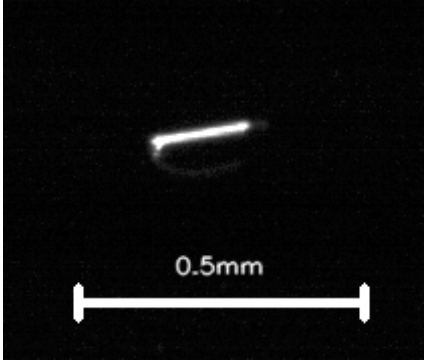
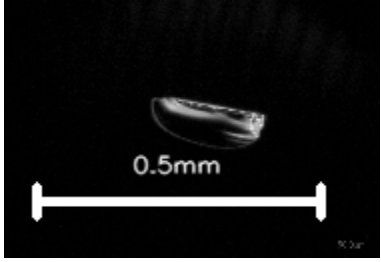
光学実験機とマイクロスコープの画像の比較

光学実験機で撮影した画像と、マイクロスコープで撮影した画像の比較を以下に示す。マイクロスコープは、光学顕微鏡に撮影用のカメラを組み合わせたもので、欠陥の特徴分析のために使用した。

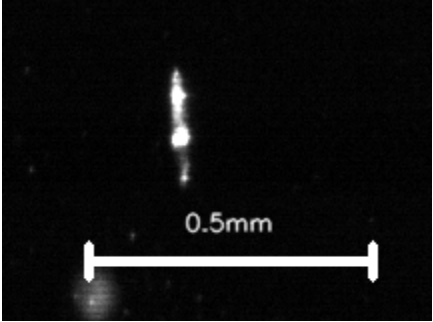
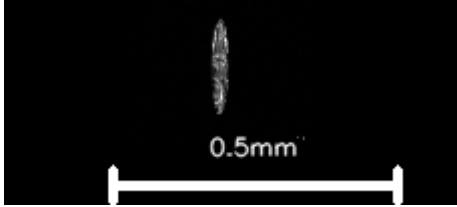
【カレット】 [No1-4] 最長部分の長さ：104.0 μm

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：120lux	 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm

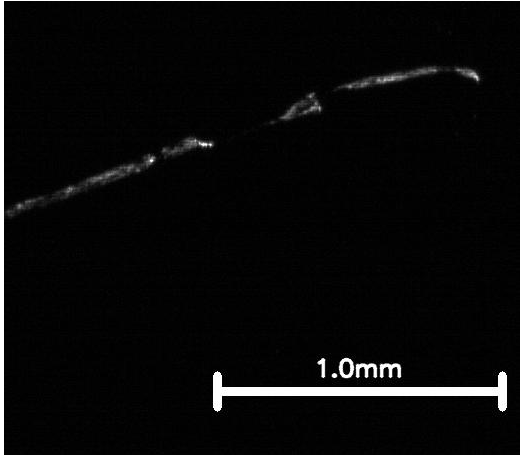
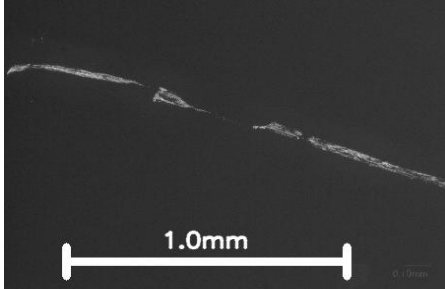
【カレット】 [No3-3] 最長部分の長さ：215.2 μm

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm $\times$ 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：120lux	 画素サイズ：3.5 μm $\times$ 3.5 μm

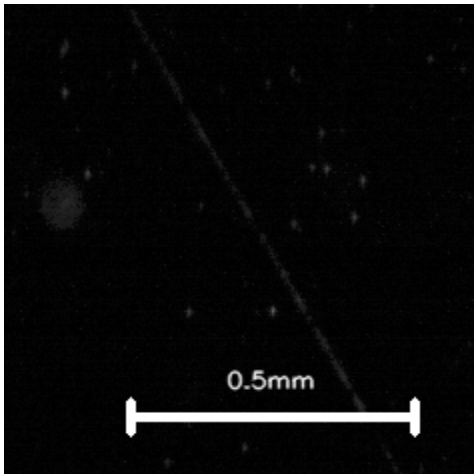
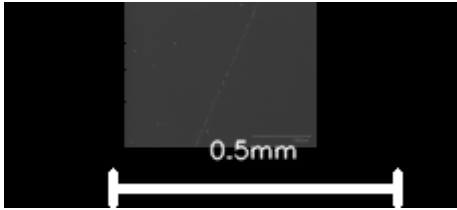
【気泡】 [No1-5] 最長部分の長さ：172.0 μm

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm $\times$ 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：120lux	 画素サイズ：3.5 μm $\times$ 3.5 μm

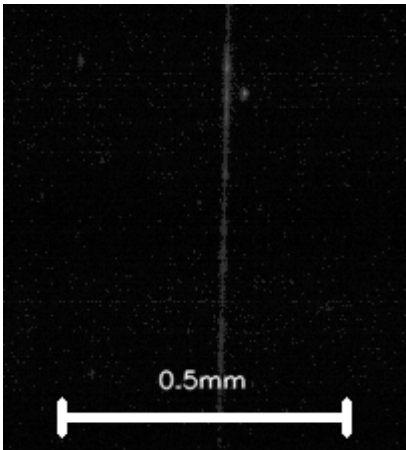
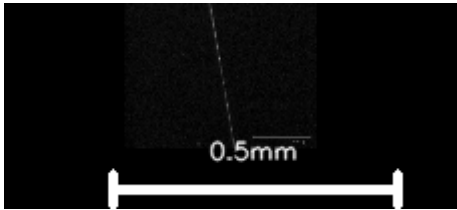
【キズ】 [No4-14] キズ幅：69.2 μm (CF グレード NG)

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm $\times$ 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：120lux	 画素サイズ：3.5 μm $\times$ 3.5 μm

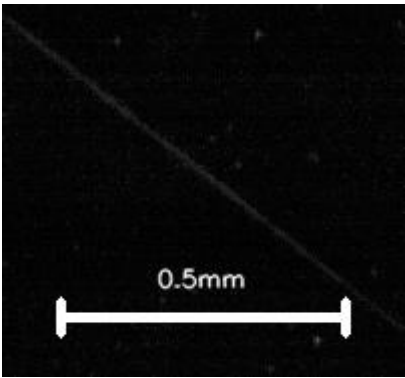
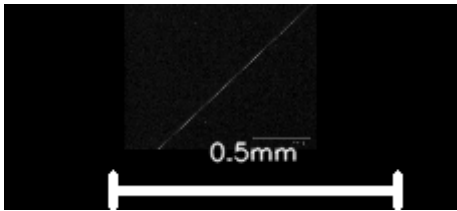
【キズ】 [No1-9]キズ幅：1.6 μm (TFT グレード NG)

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：560lux ※照度 120lux で未検出	 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm

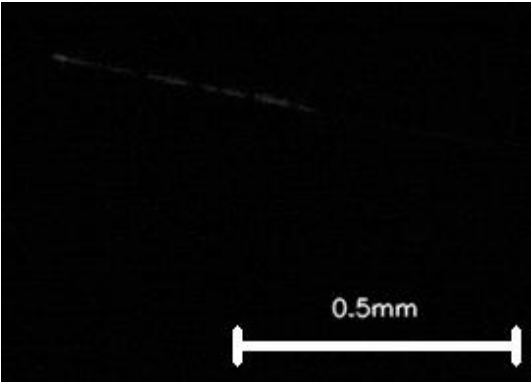
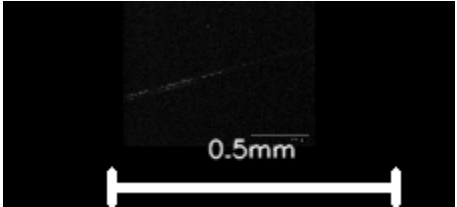
【キズ】 [No1-10]キズ幅：2.4 μm (CF グレード NG)

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：560lux ※照度 120lux で未検出	 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm

【キズ】 [No1-11-1]キズ幅：1.6 μm (CF グレード NG)

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：560lux ※照度 120lux で未検出	 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm

【キズ】 [No1-14]キズ幅：4.0 μm (太い方：4.0 μm 、2本計：9.6 μm)
(TFT グレード NG)

光学実験機の画像	マイクロスコープの画像
 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm 流れ方向分解能：3.0 μm 照度：120lux	 画素サイズ：3.5 μm × 3.5 μm

上記のように、キズ幅 10 μm 以下の欠陥の画像を確認できたことから、本年度の開発目標である光学実験機を用いて 10 μm のターゲットをラインセンサカメラで認識できることの原理確認を達成した。

2) 光路切り替えのシャッター機構開発

光ファイバーによる結像の現実性確認

光路を切り替える方法として、液晶シャッターや電気的スキャナーなどシャッターの検討を行うに当たり、光ファイバーによる結像の現実性を確認した。確認方法としてイメージングファイバーを明視野状態に設置し、結像状態を確認した(図 14、図 15)。

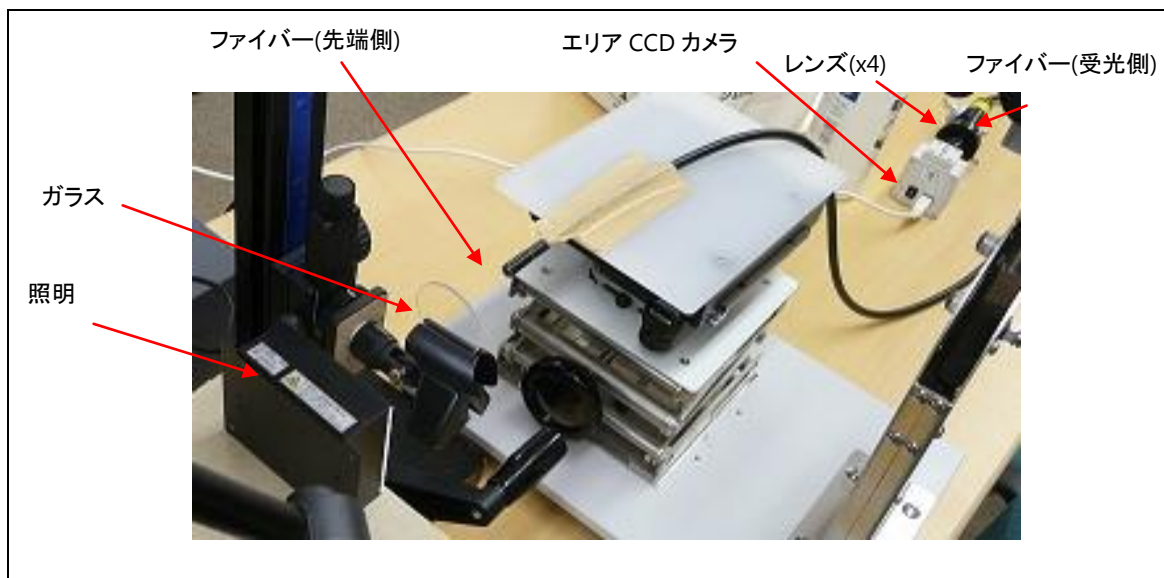


図 14 イメージングファイバーの実験の様子

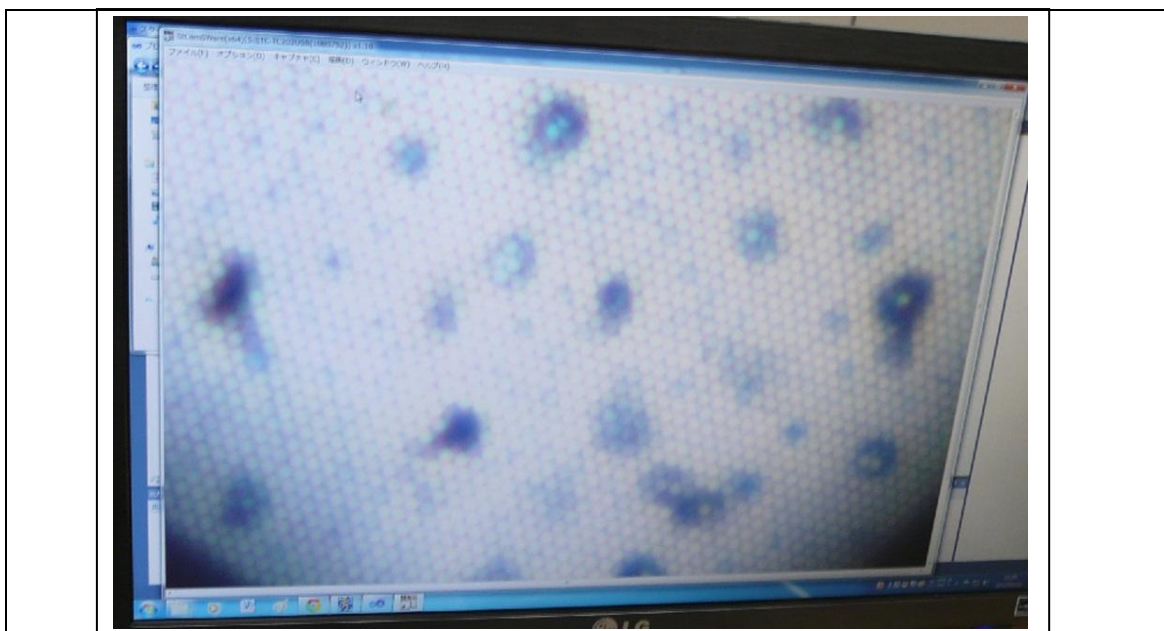


図 15 結像状態の写真

ファイバーの形状が蜂の巣状に撮像され、ダストや汚れおよびファイバーの欠損が黒く映る結果となった。一般的なファイバー径は調査の結果、約 $160\ \mu\text{m}$ のため、 $160\ \mu\text{m}$ 以下の欠陥は濃淡情報しか得られないこと、ファイバーの欠損を無くすることは不可能であること、また液晶シャッターや電氣的スキャナーなどの物理的に動作するシャッター機構は応答速度が $50\ \mu\text{s}$ 以下のものは存在しないことが調査で分かったことと、これらのことからファイバーによる結像は現実的でないことが確認できたため、物理的なシャッター切り替え機構の開発を断念し、別の方式を模索した。

照明切り替え方式の検討

照明側を切り替える方式は、 $50\ \mu\text{s}$ でストロボ発光する光源を用い、ビームスプリッターやミラーで高速に光路を切り替える方法を検討し、照明が切り替わった際に隣の光路に影響が出ないかの照明の残像検証を行った (図 16)。

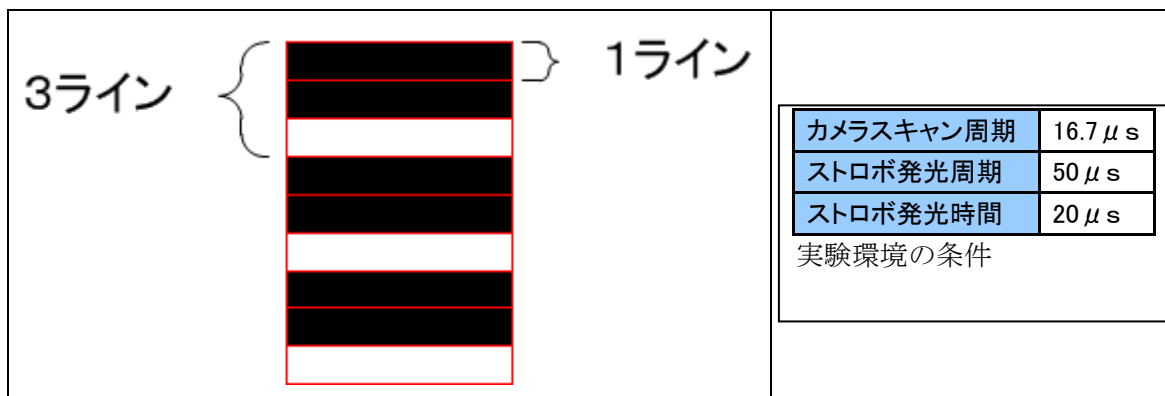


図 16 残像検証の結果

ストロボ光源の発光周期をラインカメラの3ライン分とし、残像の影響を確認した結果、1ラインのみに光っている画像を繰り返し取得できることを確認した。この結果より、50 μ s 以内で残像の影響無く、照明の切り替えが可能であることを確認できた。

光量減衰の検証

光路の切り替えに使用するビームスプリッタによる光量減衰の影響を確認した。4光路を同一光量にするためにNDフィルタを挿入し、各光路の光量レベルを同等にする方法を検討した。

NDフィルタやビームスプリッタを使用しない場合のラインセンサーで受光する光量を100%とした場合、検討した光学系は各光路12.5%減衰するため、仮想環境を作製し、欠陥が検出可能かどうかを確認した。実験の方法はラインセンサカメラとワーク間に12.5%のNDフィルタを挿入し、欠陥の検出確認を行った（図17、図18）。

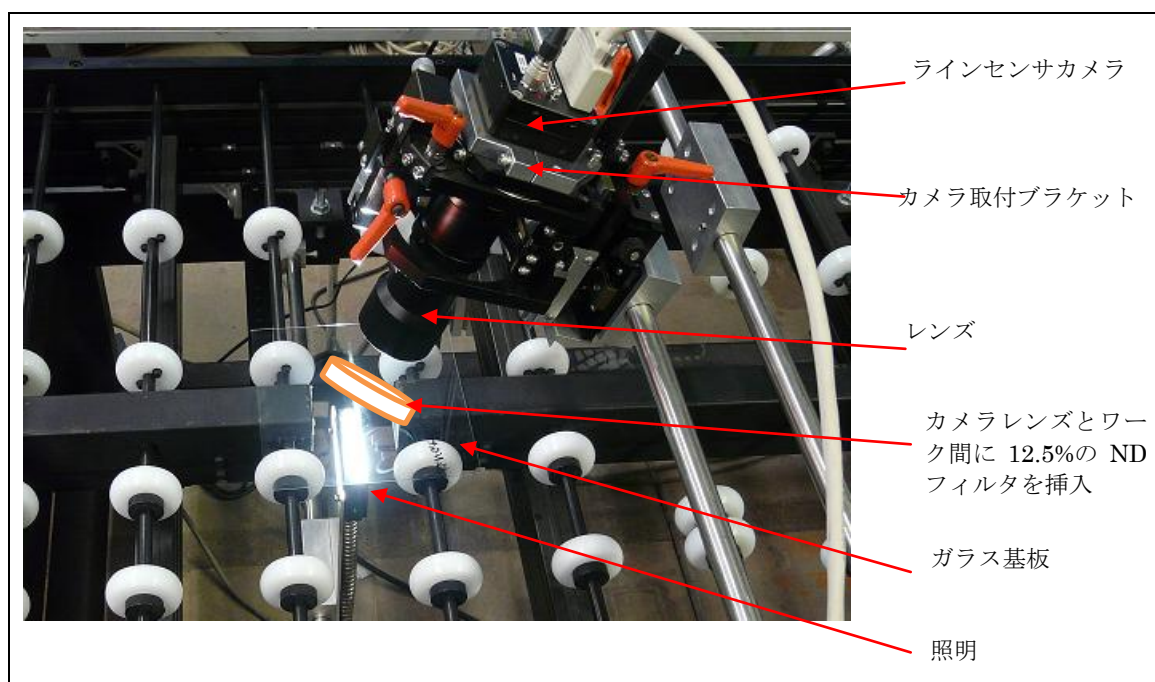


図 17 12.5%減光実験の様子

カメラの画素サイズ	3.5(H) × 3.5(V) μm
ステージ速度	2.4m/min
スキャン周期	87.6 μs
流れ方向分解能	3.5 μm
カメラの角度	25.0°
光源での照度	720klux(口金より 100mm) (根元では 999klux 以上)
ガラス面での照度	180klux ※球面の照度計で計測したため、光が当たらない部分があり、低くなっている
レンズ	光学倍率 1.0x

図 18 光学実験環境の条件

線幅 1.6 μm のキズおよび 2.4 μm のキズが未検出であり、9.6 μm のキズで一部のみ検出する結果となった (図 19)。このため、ビームスプリッタの透過率を可変することで光量を増やす方法を検討した。

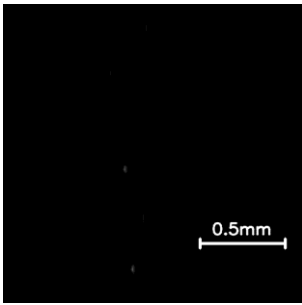
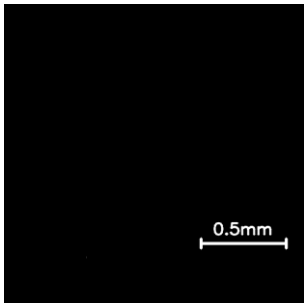
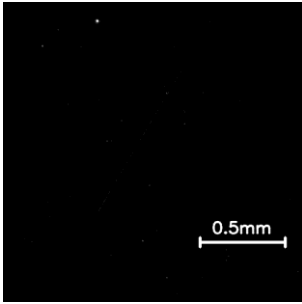
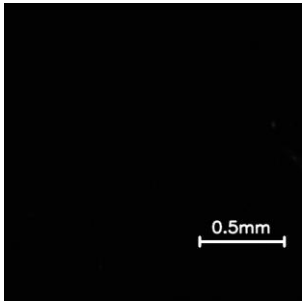
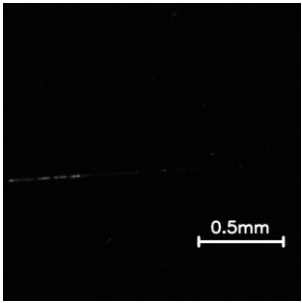
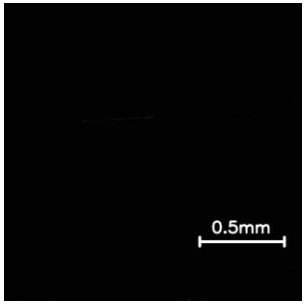
	ND フィルタなし	12.5% ND フィルタ	結果
キズ幅 : 2.4 μm			未検出
キズ幅 : 1.6 μm			未検出
キズ幅 : 9.6 μm			一部のみ

図 19 12.5%ND フィルタでの検出確認

ラインセンサカメラとワーク間に 25.0%の ND フィルタを挿入し、欠陥の検出確認を行った結果、12.5%と同様、線幅 $1.6\mu\text{m}$ のキズおよび $2.4\mu\text{m}$ のキズが未検出であり、 $9.6\mu\text{m}$ のキズで一部のみ検出する結果となった（図 20）。

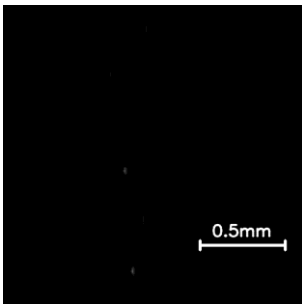
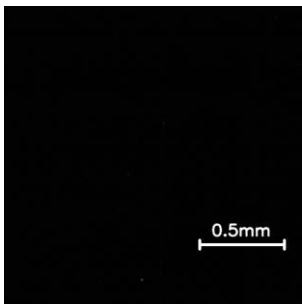
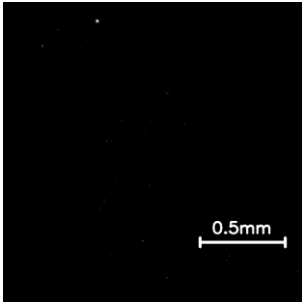
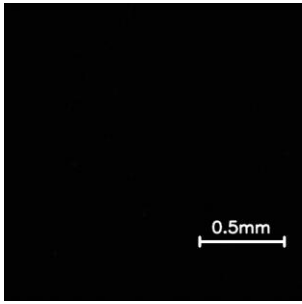
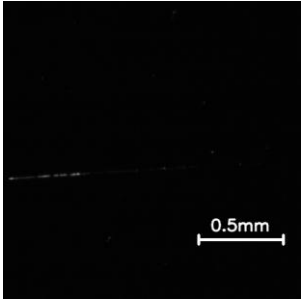
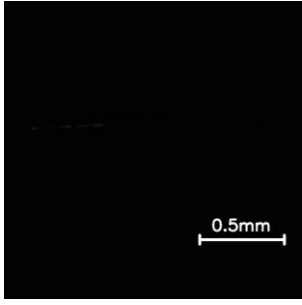
	ND フィルタなし	25.0% ND フィルタ	結果
キズ幅： $2.4\mu\text{m}$			未検出
キズ幅： $1.6\mu\text{m}$			未検出
キズ幅： $9.6\mu\text{m}$			一部のみ

図 20 25.0%ND フィルタでの検出確認

25.0%の減光率で未検出となったが、ビームスプリッタを使用した光学構想の構造上、減光率をこれ以上下げることはできないため、カメラの階調精度をこれまでの 8bit(256 階調)から 10bit(1024 階調)に変更し、低階調を引き伸ばすことにした（図 21）。引き伸ばしは取得した 1024 階調の 0 から 125 階調を 0 から 256 階調へ復調する作業を行うことで、未検出であった欠陥が検出可能な状態となった（図 22）。

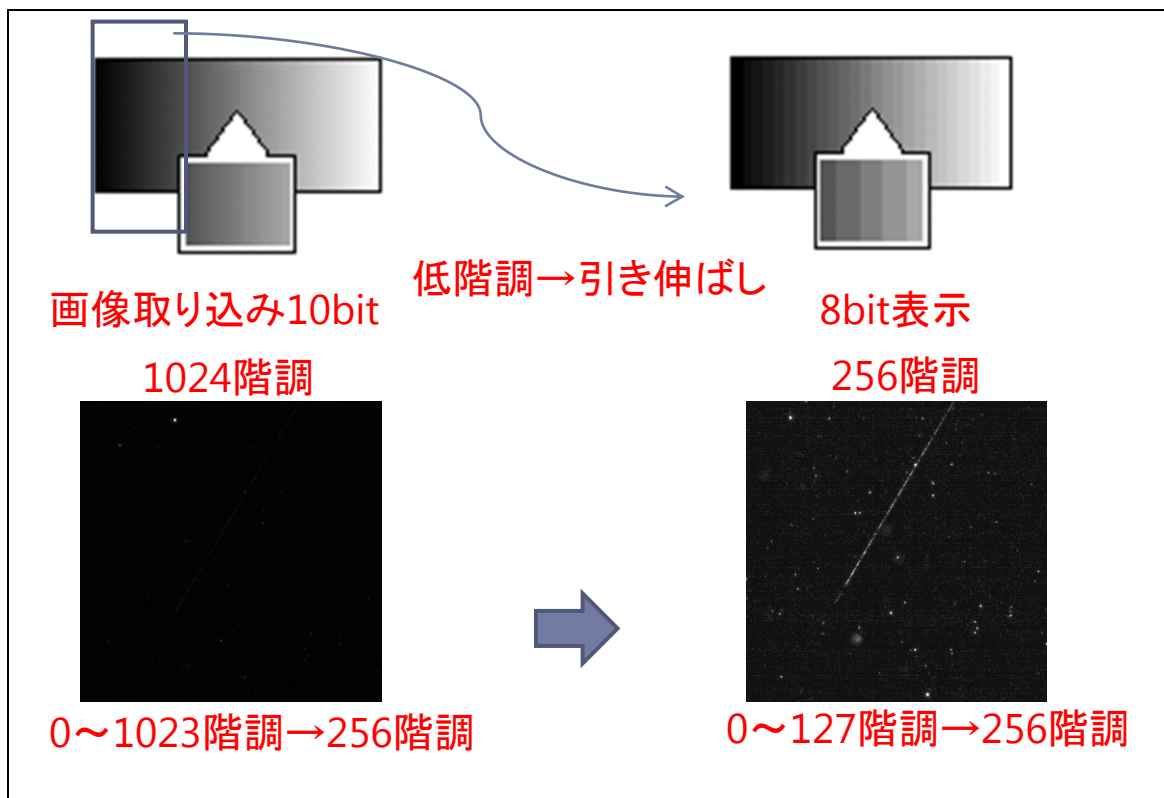


図 21 10bit 画像の階調変換イメージ

	ND フィルタなし 10bit	ND フィルタ 25% 10bit	ND フィルタ 12.5% 10bit
キズ幅： 2.4 μ m			
キズ幅： 1.6 μ m			
キズ幅： 9.6 μ m			

図 22 10bit(0 から 128 階調を 256 階調へ変換)での欠陥検出像

10 ビット化による低コントラスト欠陥の検出が可能であったため、照明の切り替え方式の実現性が高くなった。

標準の光学部材を用いた現象確認および原理の確認

標準の光学部材を用い、ラインセンサカメラのカメラシャッター周期を $50\ \mu\text{s}$ とし、各光源を $50\ \mu\text{s}$ で切り替えるようにした。撮影はファイバータイプで高速に切り替えることが可能な光源が無いため明視野撮影とし、ガラス基板にアルファベットを印字した透明テープを貼り、検出像を確認した（図 23）。

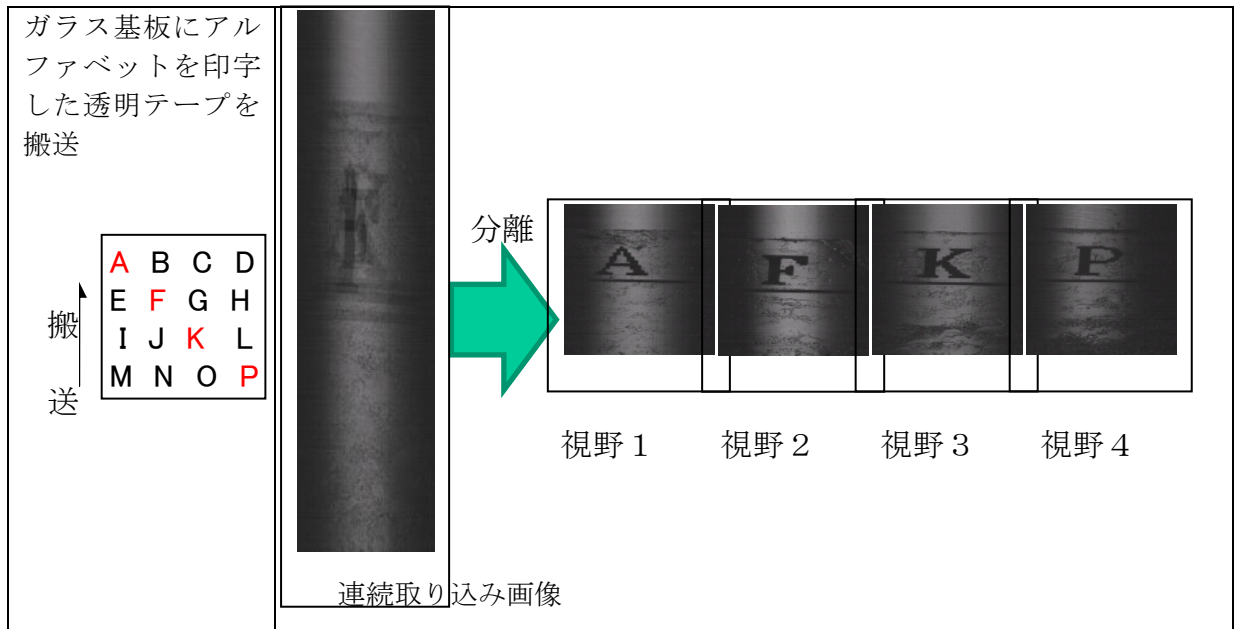


図 23 原理確認の画像

連続して取り込んだ結果、アルファベットの文字 A, F, K, P が重なった像を取得した。この取り込んだ画像を 4 つの視野へ分離した結果、テープに印字したアルファベットの文字が読み取れたため、 $50\ \mu\text{s}$ 以内に 4 光路切り替え可能なシャッター機構を開発することは達成した。

3) 高解像度光学ユニットの開発

光学系ユニット化の設計

光学系ユニットを設計するに当たり、光学倍率 $1.0\times$ の場合は隣り合うエリアが重複できないこと、4 光路での光路長を合わせることができないことが調査の結果判明したため、光学倍率を下げることを検討した。昨年度より検証した暗視野光学系は散乱光を検出する構造のため、分解能以下の非常に小さい欠陥を検出可能な特徴がある。光学倍率を下げることによって、隣り合うエリアが重複でき、4 光路での光路長を合わせることができ、欠陥の検出能力に関して調査を行った（図 24、図 25、図 26）。画像取り込みの条件は

搬送速度を 17.5mm/sec とし、カメラの露光時間による流れ方向分解能を変更している。また表示階調は 10bit 画像取り込み後、0 から 127 階調を 256 階調に復調している。

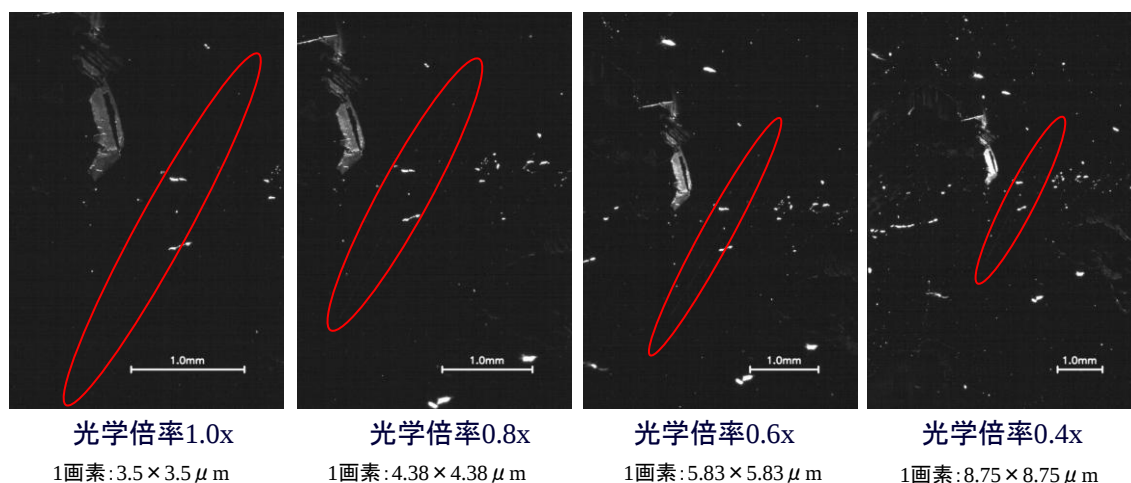


図 24 光学倍率変更による欠陥の検出確認 (キズ幅 $1.6 \mu\text{m}$)

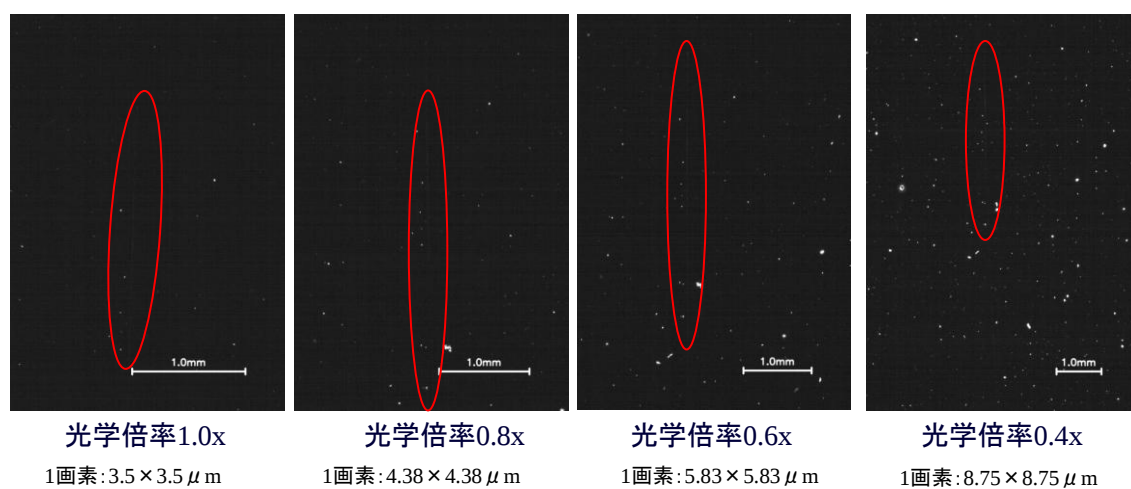


図 25 光学倍率変更による欠陥の検出確認 (キズ幅 $2.4 \mu\text{m}$)

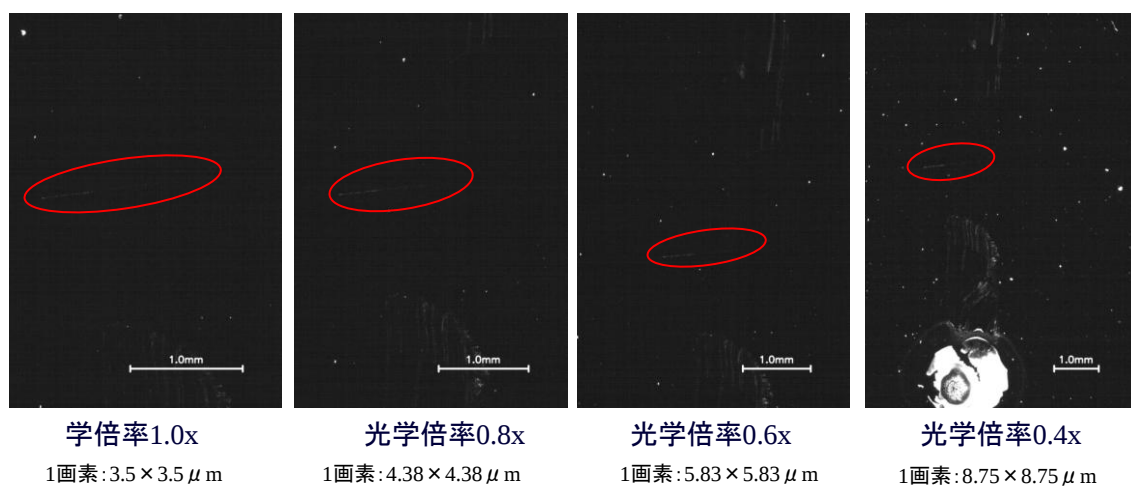


図 26 光学倍率変更による欠陥の検出確認 (キズ幅 $9.6 \mu\text{m}$)

画像を確認した結果、光学倍率が 0.4 倍の場合でも欠陥を十分検出することが可能であることが確認できた。散乱光の信号強度に関しては倍率が下がるにつれ、欠陥の信号が高くなることが確認できた(図 27)。

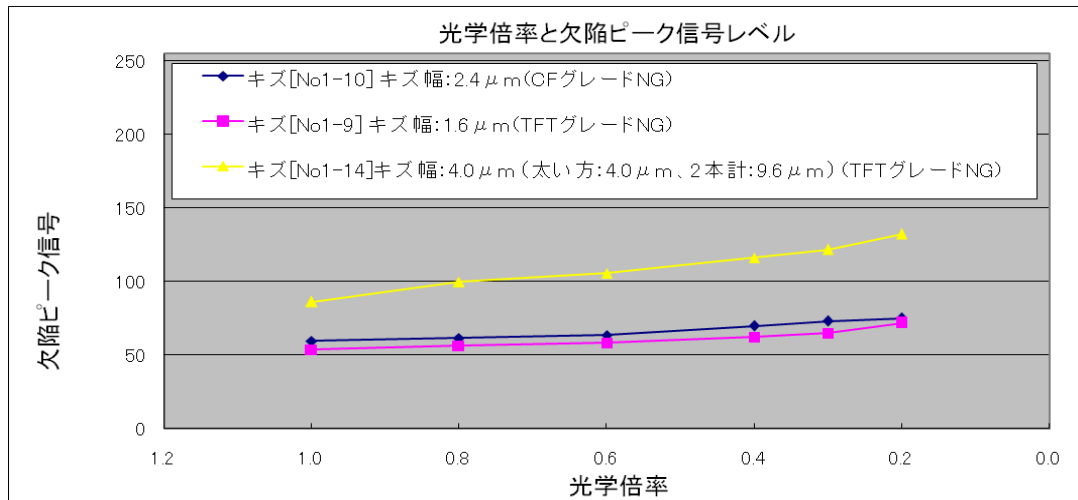


図 27 光学倍率による欠陥信号の確認

レンズの設計上、光学倍率は 0.4 倍以下でなければ隣り合うエリアが重複できないため、0.4 倍以下で検討した。尚、光学倍率を下げすぎると解像度が低下するため 0.4 倍で設計した。また欠陥の表裏を判別する機能が必要であるため、対向位置に同一光学系を配置する構成にした。

開発する高解像度光学ユニットを使って各エリアを 1 ピクセル 3.5 μm の精度で欠陥を検出できることを確認という目標に対して、1 μm 以下の欠陥を観察可能な高精度光学ユニットを開発でき、設計した高解像度光学ユニットの納品を完了し (図 28)、高解像度光学ユニットを搬送装置に取り付けた (図 29)。

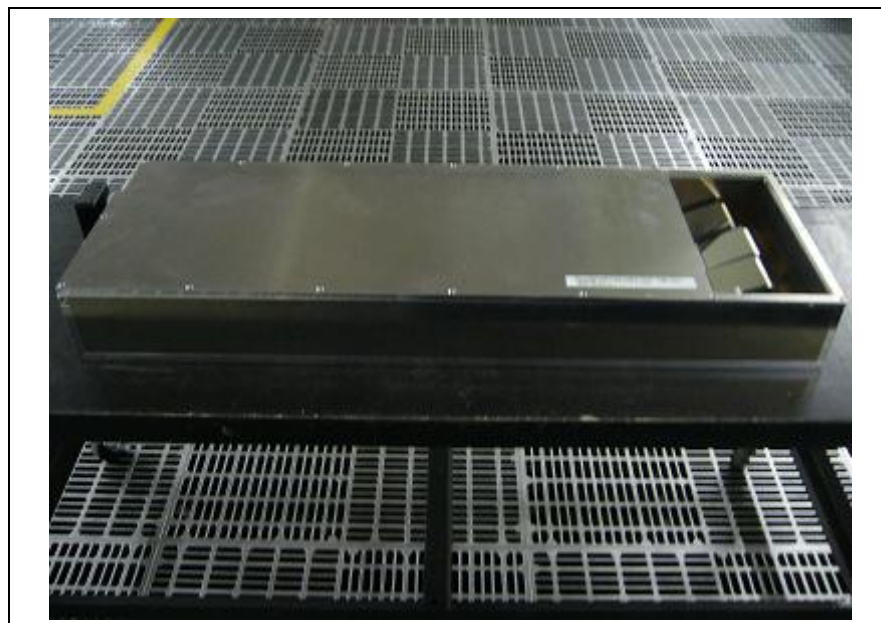


図 28 光学系ユニットの外観 (片側)

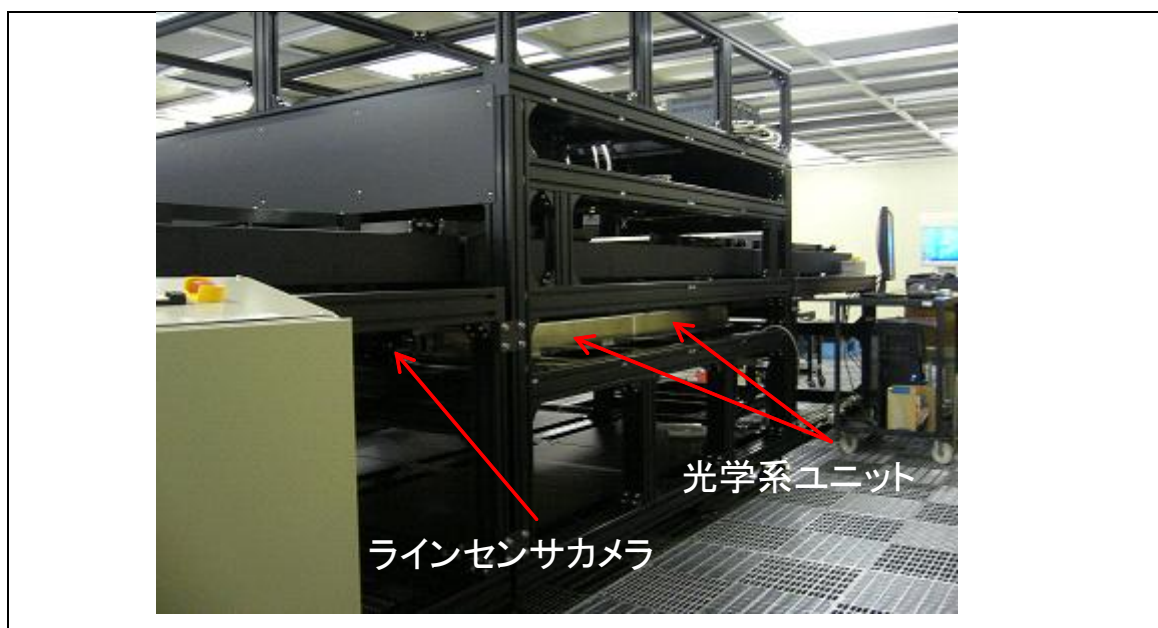


図 29 高解像度光学系ユニットを搭載した検査装置

実際の高解像度光学ユニットを用いて、4 光路の切り替え動作の確認を完了した (図 30)。

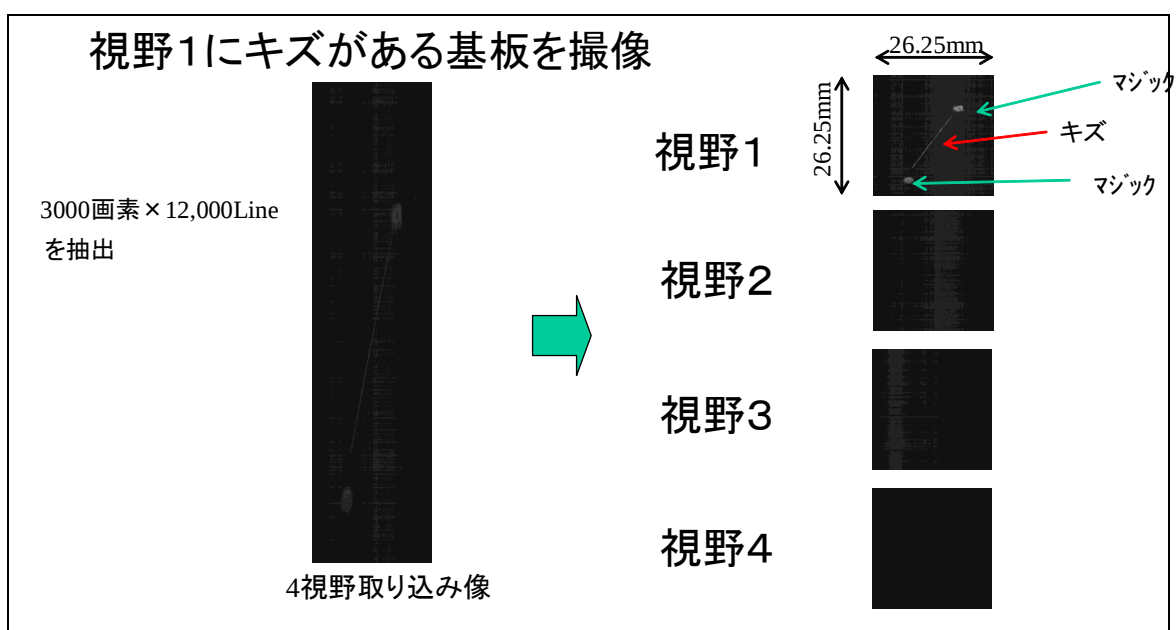


図 30 4 光路切り替え確認

高解像度光学系ユニットの検出感度検証

高解像度光学ユニットを使って検出感度の検証を行った結果、線幅 $1.6\mu\text{m}$ のキズの検出に至らない結果となった。そこで線幅 $1.6\mu\text{m}$ のキズを検出するために必要なカメラ受光量を調査した結果、少なくとも 1.8 倍の受光量が必要であることが分かった (図 31)。受光量が低い原因として、レンズとガラス間の距離が遠いこともあげられる。

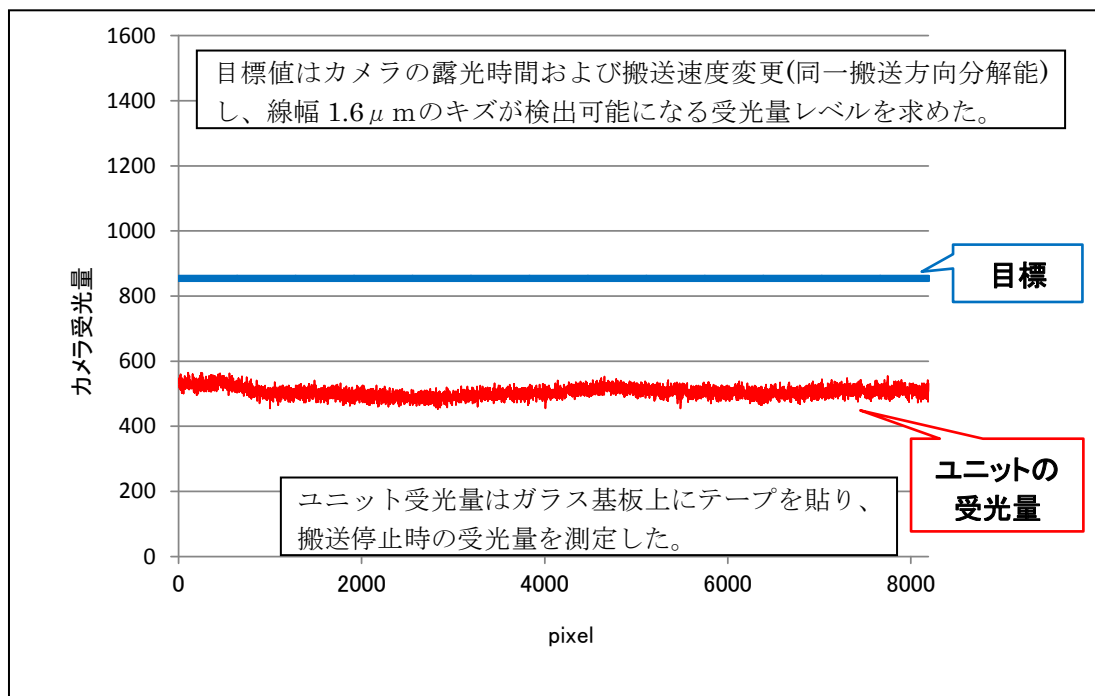


図 31 高解像度光学系ユニットの検出感度検証

高解像度光学系ユニットの各視野の見え方検証

高解像度光学ユニットを使って、各視野で同じ欠陥を取込み比較すると、欠陥の見え方が異なることを確認した(図 32)。原因は、ガラス搬送シャフトにおける検査エリアの間隔とカメラの視野間隔を合わせ込むため、各視野で先端ミラーの角度も異なる設計としたことによるものと判断した。また、各視野においてビームスプリッタを介する頻度が異なり、受光量に差が生じさせているためと判断した。

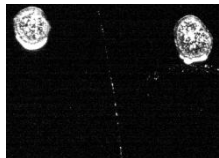
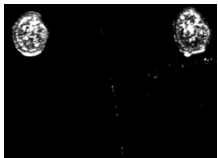
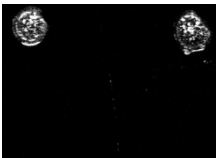
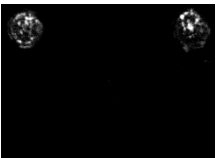
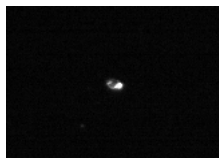
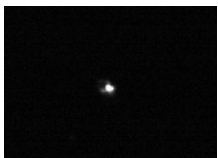
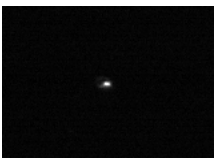
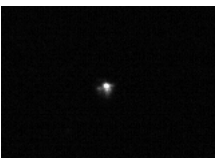
	視野 1	視野 2	視野 3	視野 4
反射角度	64.5°	60.4°	53.5°	46.2°
キズ				
カレット				

図 32 各視野の欠陥の見え方

高解像度光学系ユニット改の開発

光学系の課題を解決するためにレンズとガラス間距離短く変更し、ガラス搬送シャフトにおける検査エリアの間隔を、カメラの視野間隔と合わせ、先端ミラーの角度を統一し、各視野においてビームスプリッタを通る回数を全視野等しくする高解像度光学系ユニット改の試作を行った。搬送装置上で受光量を計測した結果、目標値より高い受光量を得られることを確認した(図 33)。

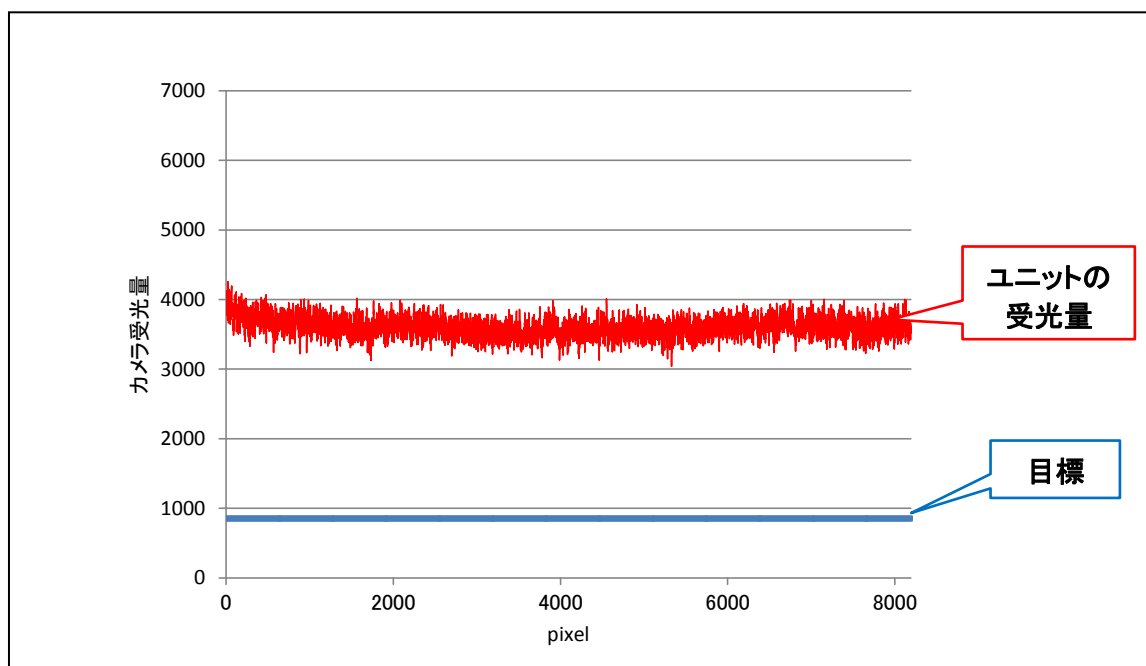


図 33 高解像度光学系ユニット改 試作の検出感度検証

高解像度光学系ユニット改 1 ユニットの検出感度確認

高解像度光学ユニット改 1 ユニットを製作後、線幅 $1.6\mu\text{m}$ のキズの検出を行った結果、鮮明に検出できることを確認した (図 34)。

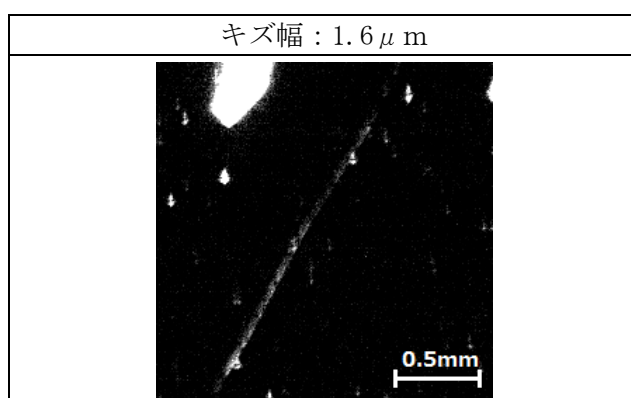


図 34 高解像度光学系ユニットによる線幅 $1.6\mu\text{m}$ のキズ検出確認

高解像度光学系ユニット改 全ユニットの製作

高解像度光学ユニット改 1 ユニットで線幅 $1.6\mu\text{m}$ のキズが鮮明に検出できたことから、 $1300 \times 1100\text{mm}$ (G5 サイズ) の基板サイズに対応した高解像度光学ユニット改を製作した。

欠陥の測長について

暗視野光学系における欠陥の測長が可能かどうかの調査を行った。暗視野光学系の原理は照明の光を直接カメラに入射せず、散乱光を検出する原理である（図 35）。暗視野光学系の特徴は分解能以下の非常に小さい欠陥を検出可能であるが、光学倍率 0.4x において、実寸と検出画素との相関関係を調査した（図 36）。

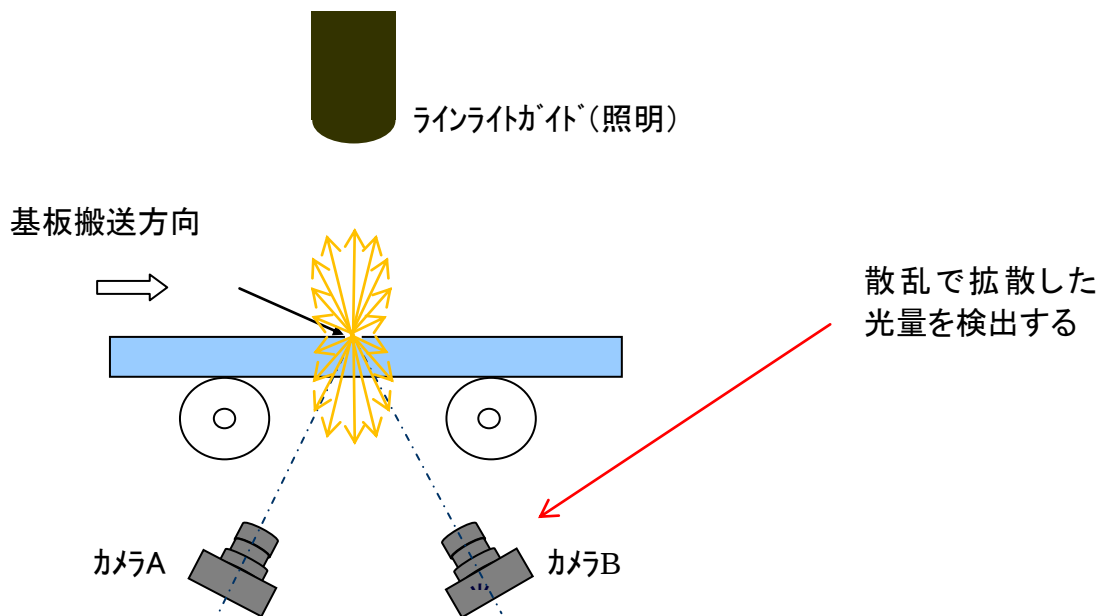


図 35 暗視野光学系の原理模式図

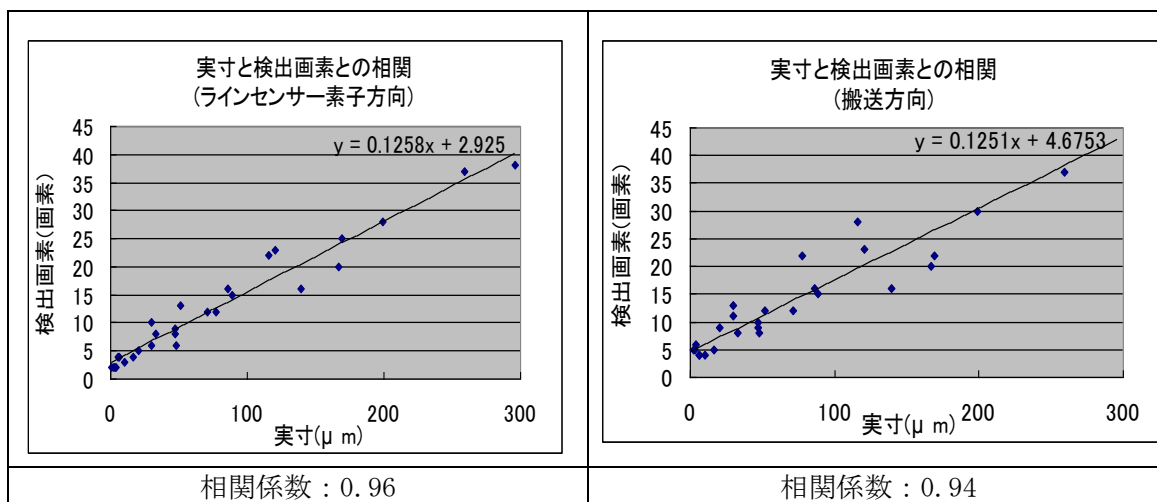


図 36 実寸と検出画素との相関関係

ラインセンサの素子方向および搬送方向のどちらも相関係数が非常に高く、暗視野光学系における測長は可能と思われる。ただし、相関の直線よりやや外れている欠陥も存在するため、欠陥のピーク信号値と欠陥実寸差との関係を調査した（図 37）。

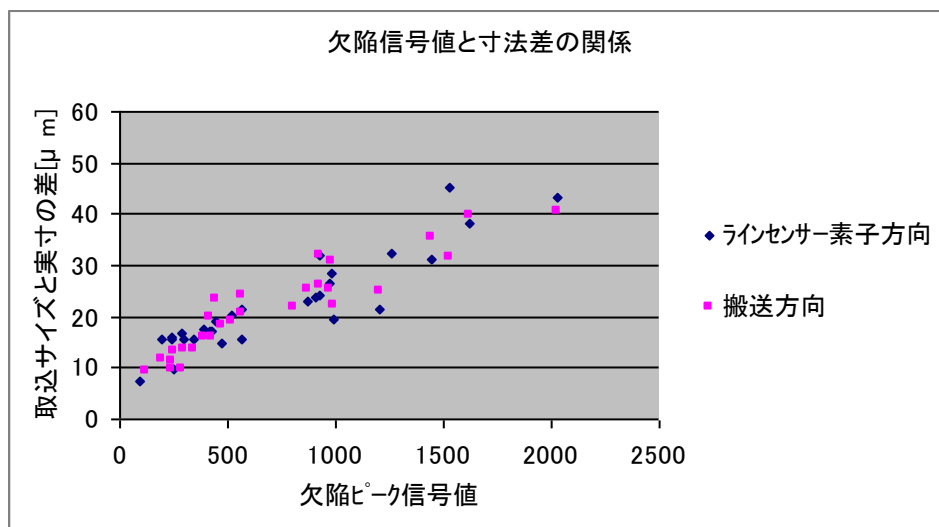


図 37 欠陥信号値と寸法差の関係

欠陥を検出するためにカメラの階調を 10bit で取り込み、0～128 階調を 256 階調に復調している。グラフの横軸はピーク信号が 0～256 の場合、そのままの値を使用し、飽和する場合は 0～1024 階調を 256 階調に変換し、ピーク信号値を 8 倍にした。結果は信号値が高い程、実寸差が生じることがわかり、信号値の振幅のみではなく周波数解析等で測長精度が向上すると推測される。

4) 装置化

光学系の取り付け位置の検討

搬送装置の設計に役立てるために高解像度光学ユニットの取り付けに関して、配置を検討した。まずカメラの焦点はガラス基板の表面と裏面でどちらの欠陥信号値が高いかを調査した（図 38）。

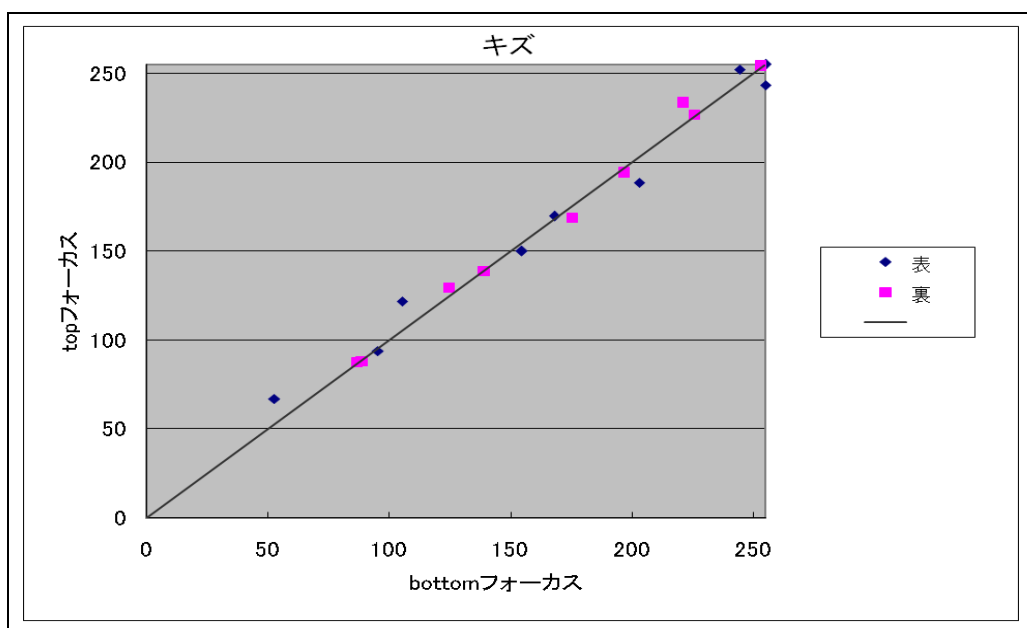


図 38 カメラ焦点位置による検出感度の確認

表面と裏面のどちらにカメラの焦点を合わせても検出感度の差異はほとんどないことが確認できた。次に欠陥面がガラス基板の表面と裏面でどちらの欠陥信号値が高いかを調査した（図 39）。

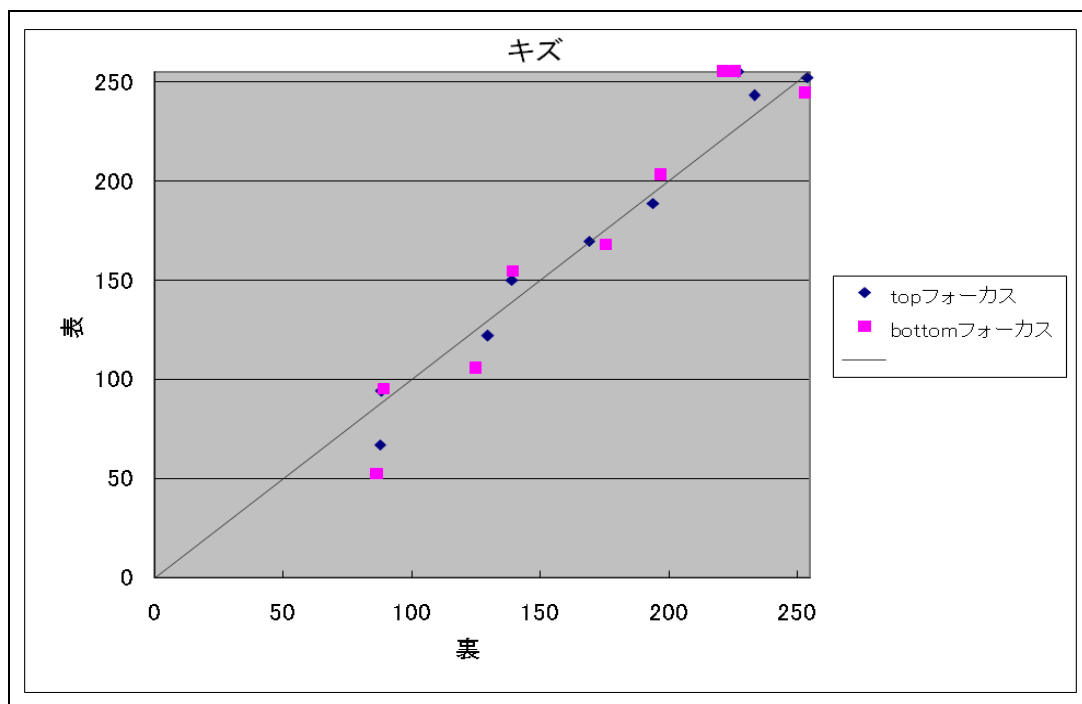


図 39 欠陥発生面による検出感度の確認

欠陥面がガラス基板のどちらにあっても検出感度の差異はほとんどないことを確認した。これらの調査結果から、光学系ユニットはガラス基板を挟んでどちら側にあっても検出性能は同一であることが確認できた。

搬送高さ精度の検証

液晶用ガラス基板の検査はガラス基板の表面と裏面で仕様が異なる。このため欠陥面がどちらにあるかを識別する必要がある。欠陥の表裏識別方法は対向する位置にカメラを配置し、視差の原理を用いて判別することを検討している（図 40）。このためガラス基板の厚み方向の変位量（以下、「高さ精度」と呼ぶ。）およびガラス基板の送り速度の変化量（以下、「送り速度」と呼ぶ。）を小さくすることが必要である。

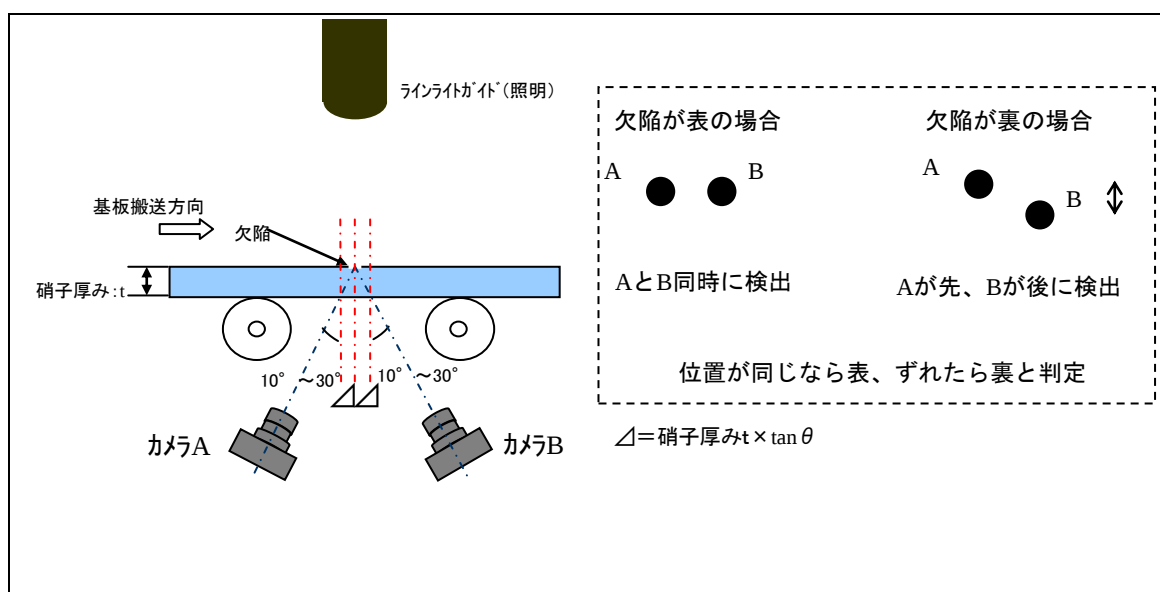


図 40 表裏判定原理

高さ精度の高い搬送装置を設計するに当たり、既存の搬送装置の高さ精度を測定し、設計に役立てることとした（図 41）。測定箇所は搬送装置の中間サポート位置、中間サポート間、シャフト上、シャフト間のガラス変位を共焦点レーザー変位計で測定した。

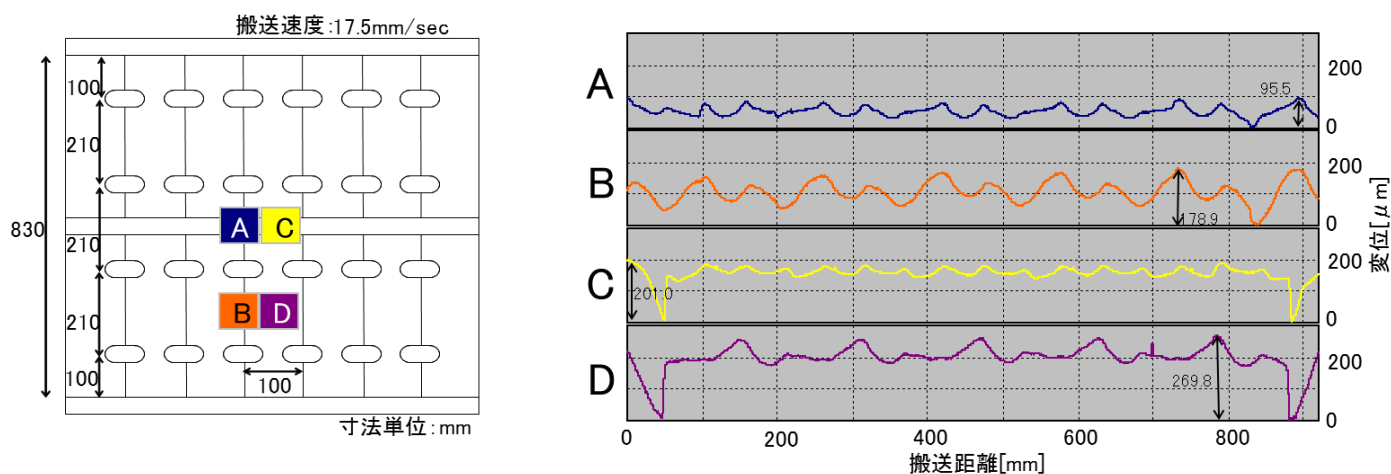


図 41 実験コンベアの高さ精度確認

測定した結果、A と C、B と D を比較するとシャフト直上で変位 (peak-peak) が小さいことがわかり、ガラス基板のたわみの影響でガラスの端面で差が生じている。またガラス基板が前後のローラーに乗っている場合は、シャフト間で高さ精度が優れていることがわかった。A と B、C と D を比較すると中間サポートの直上でシャフトによる偏芯が少ないため、高さ精度が優れていることがわかった。次に中間サポート上にてシャフト間前後の高さ精度を確認した（図 42）。

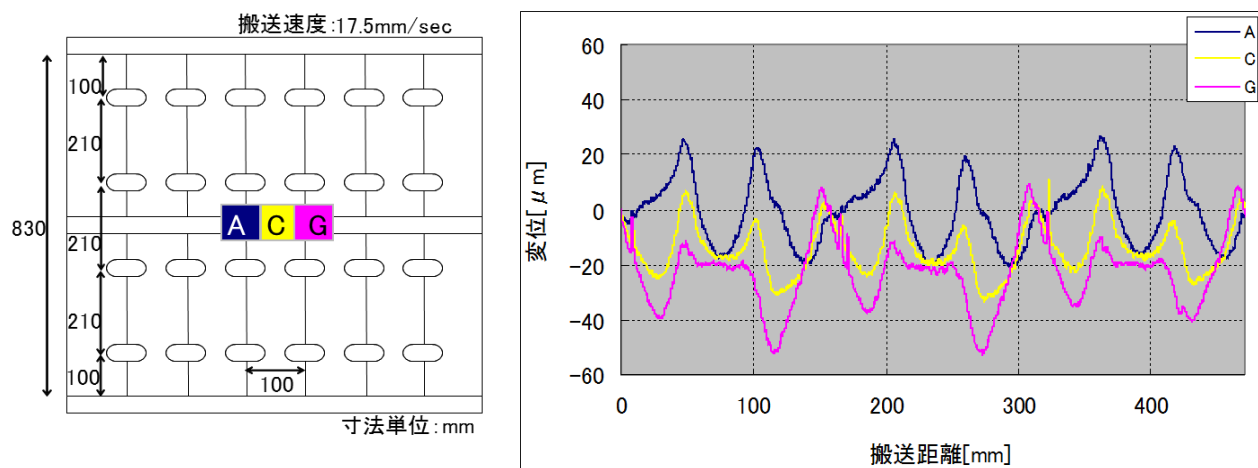


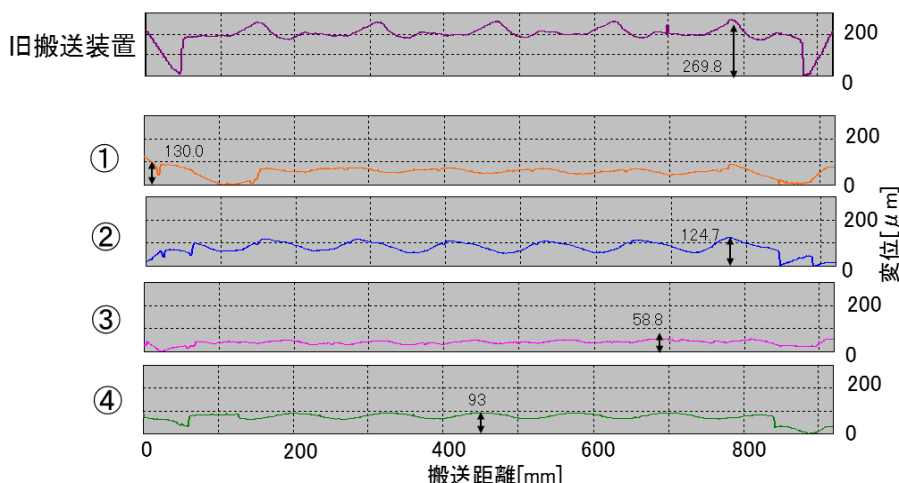
図 42 ローラー間前後の高さ精度

シャフト間の高さ精度は前後のローラーの相互作用によって決まるため、互いのローラーの中間値となることがわかった。これらのことから、搬送装置のローラー配置はシャフトを狭ピッチとし、シャフト間検査が望ましく、中間サポートを多用することで高さ精度が向上すると推測される。これらを反映させ、搬送装置の仕様を決定し、搬送装置を製作した(図 43)。



図 43 完成した搬送装置

設計した搬送装置を納品後、高さ精度を確認した(図 44)。測定基板は既存搬送装置と同じ $730 \times 920 \times 0.5\text{mm}$ のガラス基板を使用し、各視野の欠陥検出ポイントにて高さ精度を測定した。



計測機器仕様	
名称	共焦点型レーザー変位計
測定範囲	$\pm 0.3\text{mm}$
分解能	$0.01\text{ }\mu\text{m}$
直線性	$\pm 0.5\%$ of F.S.

図 44 搬送高さ精度の確認

高さ精度はガラス基板の厚みの $1/2$ 以下 ($250\text{ }\mu\text{m}$ 以内) を満足しているが、ガラス搬送中の始端と終端がローラー

からローラーへ渡りをする際、端部が片持ち状態になり、 $150\text{ }\mu\text{m}$ 程度タワミが生じ、欠陥の発生面(表裏判定)に誤判定が発生する恐れがあることが確認された。誤判定を防ぐには、タワミを $80\text{ }\mu\text{m}$ 以内に抑える必要がある。そのために、検査部付近のローラーの個数や配置を再構成した。

改造後、搬送高さ精度を測定し、 $45\text{ }\mu\text{m}$ の結果を得たため、搬送高さ精度の最適化は達成した(図 45)。

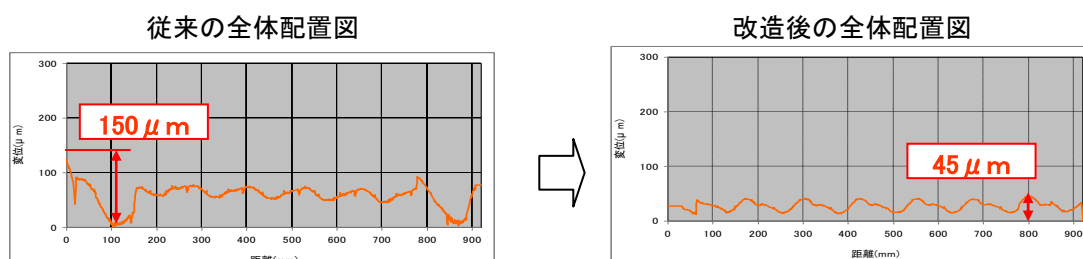
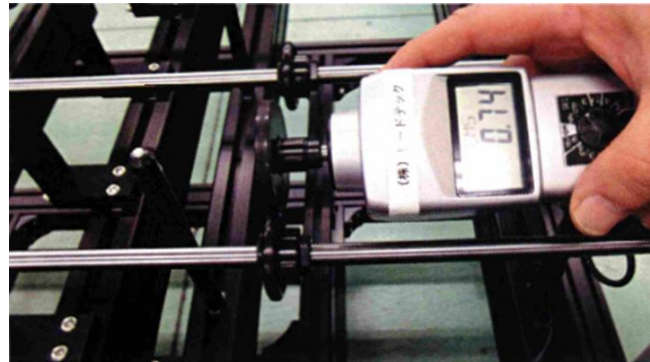


図 45 シャフトピッチ改造前後の測定値比較

次に搬送送り速度の検証を行った。

送り速度の検証

納品前の検証として搬送メーカーにてローラー上の回転速度を計測した。送り速度はデジタル速度計を用いて測定し 17.5mm/s(1050mm/min)時で± 0.57%の精度であることを確認した (図 46)。



単位：mm/min

	250mm/min	1050mm/min	5000mm/min
1 回目	252	1056	5004
2 回目	250	1044	5016
3 回目	250	1044	5016
4 回目	252	1050	5028
5 回目	250	1056	5016
最大	252	1056	5028
最小	250	1044	5004
最大誤差	2	6	28
平均	250.8	1050	5016
※精度 (%)	± 0.80	± 0.57	± 0.56

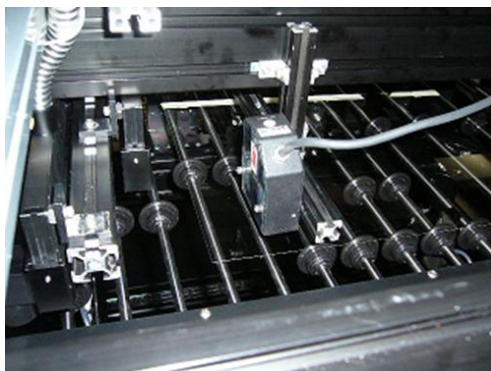
※(最大誤差/目標値)×100

図 46 デジタル速度計による送り速度の計測

納品後、レーザー変位計を用い、ガラス基板の送り速度を計測した (図 47)。

測定結果

単位：mm/min



	250mm/min	1050mm/min	5000mm/min
1 回目	250.1	1051	5005.8
2 回目	250	1050.4	5007.1
3 回目	249.9	1049.6	5006.4
最大	250.1	1051	5007.1
最小	249.9	1049.6	5005.8
最大誤差	0.1	1	7.1
平均	250	1050.3	5006.4
※精度 (%)	±0.04	±0.10	±0.14

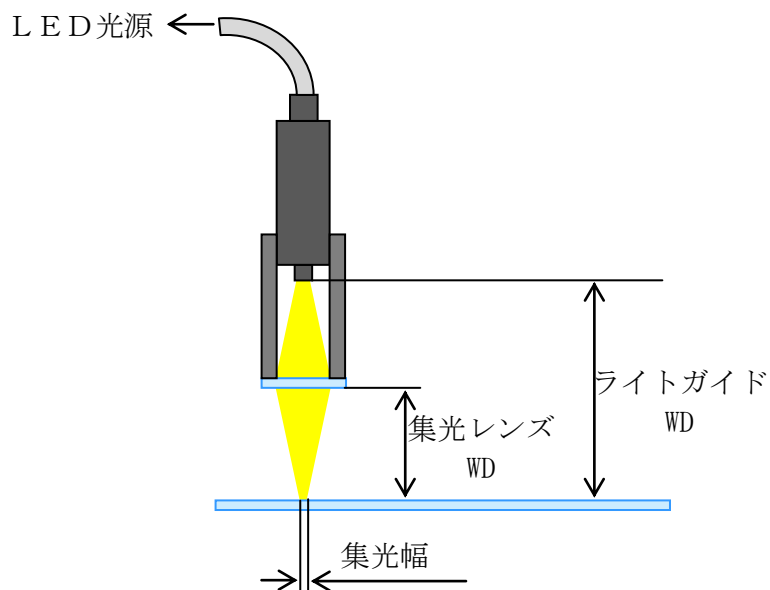
※(最大誤差/目標値)×100

図 47 レーザー変位計による送り速度の測定

開発するガラス検査搬送装置のガラス基板送り速度性能が 17.5mm/s ± 10% の精度であることを確認するという目標に対して ± 0.1% 以下のガラス基板送り速度性能が出せる搬送装置が完成した。

LED照明ユニットの搭載

光路切り替えのシャッター機構で開発した照明を搬送装置に搭載するに当たり、照明装置のライトガイド先端に装着される集光レンズの最適化を行った。集光レンズとして一般的にはシリンドリカルレンズが採用されているが、集光レンズ WD および集光幅が同一仕様のもので比較した結果、リニアフレネルに有意性が確認された。そこで異なる仕様のリニアフレネルにて受光量を比較した（図 48）。その結果、焦点距離 19 mm のリニアフレネルレンズが最も優位性があるため、LED 照明ユニットに採用した。



集光レンズ	焦点距離 (mm)	溝ピッチ (本/mm)	集光レンズ WD (mm)	ライトガイド WD (mm)	集光幅 (mm)	受光量 (ave)
シリンドリカルレンズ	50	－	50	81	2	374.97
リニアフレネルレンズ 1	50	10	50	86	2	487.31
リニアフレネルレンズ 2	9.6	8	15	41	1	599.04
リニアフレネルレンズ 3	19	8	30	74	1	678.20
リニアフレネルレンズ 4	20	10	30	77	1	617.14

図 48 集光レンズによる受光量比較

高解像度光学系の搭載

最適化された液晶表示用ガラス検査搬送装置にLED照明ユニットおよび高解像度光学ユニット改を搭載し、液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発は達成した（図 49）。



図 49 液晶表示用ガラス欠陥検査装置

高解像度光学系の視野幅確認

光学系部品の位置調整とキャプチャー画像取得を繰り返し実施し、1ユニット分の光学系のフォーカス調整を完了したため、光学系の視野幅を検証した。その結果、設計値の65mm以上を確保できていたことを確認した（図 50）。尚、ガラススケールをキャプチャーし、キャプチャー画像から分解能を測定した。次に表裏判別の検証を行った。

	視野幅 (mm)	分解能 (μm)
視野 1	70.697	8.630
視野 2	70.353	8.588
視野 3	70.738	8.635
視野 4	70.435	8.598

図 50 視野幅測定結果

高解像度光学系の表裏判別確認

対向するカメラの位置情報から表裏判別の検証を行った。表裏判別の原理は視差を用いるため、欠陥が表の場合の検出位置の差と裏の場合の検出位置の差を検証した(図 51)。0.6mm 厚のガラス基板で点キズを表面と裏面で検査し、位置座標を確認した。次に欠陥の重心座標を求めた結果、欠陥が裏面の時の視差の値は 0.723mm であった。ガラス基板の搬送高さ精度(最大 80 μ m)を考慮した場合の理論値は 0.6~0.785mm であることから、理論値内であることが確認できた(図 52)。

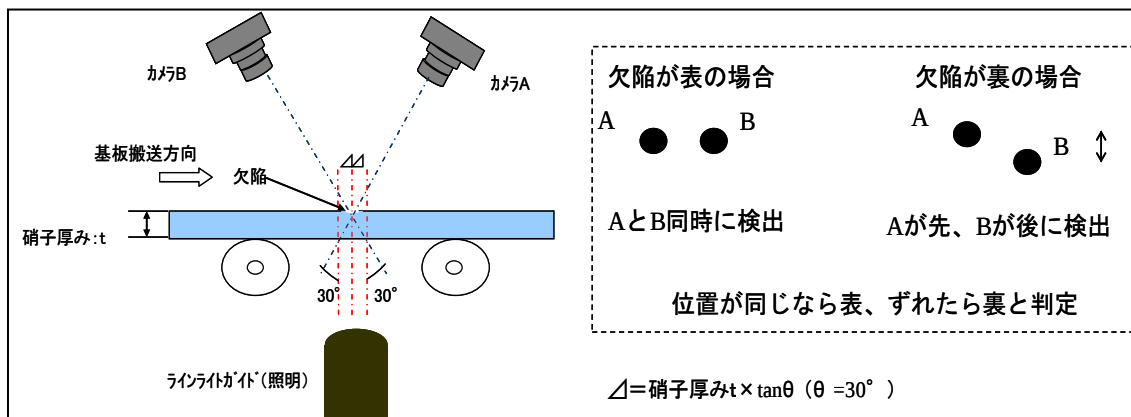


図 51 表裏判別原理図

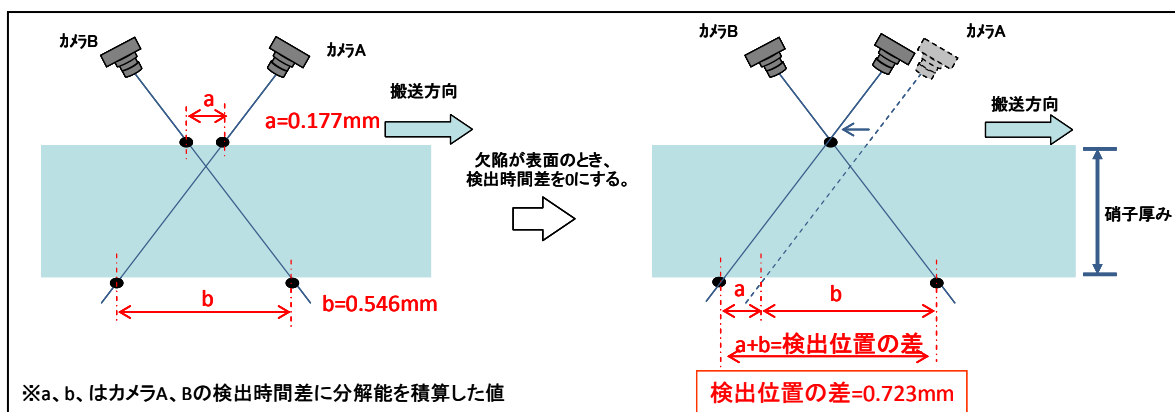


図 52 表裏判別の検証

高解像度光学系の欠陥検出確認

高解像度光学系にて欠陥の検出確認を行った。確認した欠陥は $10\mu\text{m}$ 以下の線キズ（図 53）、気泡（図 54）、へこみ（図 55）、カレット（図 56）、点キズ（図 57）および汚れ（図 58）である。全ての欠陥において欠陥が表裏どちらにあっても良好な検出ができた。

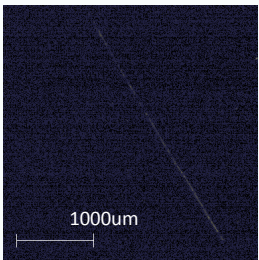
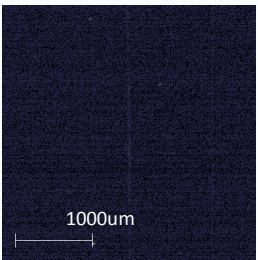
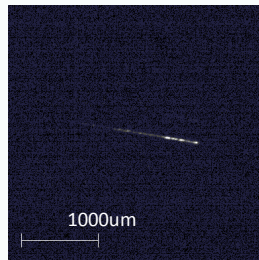
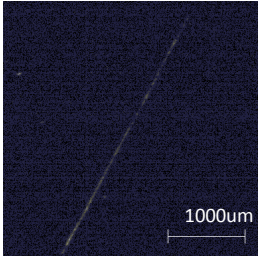
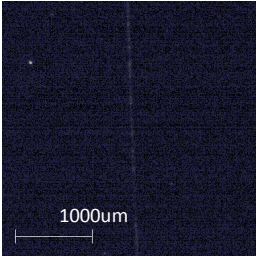
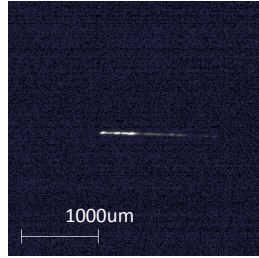
欠陥位置	キズ[No1-10]キズ幅： $2.4\mu\text{m}$ (TFTグレードNG)	キズ[No1-9]キズ幅： $1.6\mu\text{m}$ (CFグレードNG)	キズ[No1-14]キズ幅： $9.6\mu\text{m}$ (TFTグレードNG)
ガラス 上面			
ガラス 下面			

図 53 $10\mu\text{m}$ 以下の線キズの検出確認

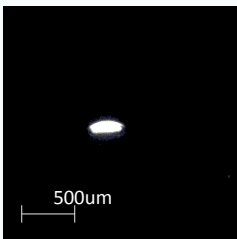
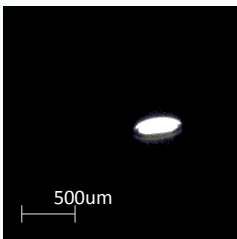
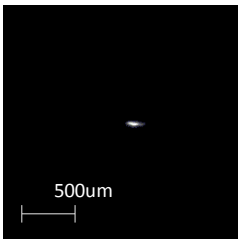
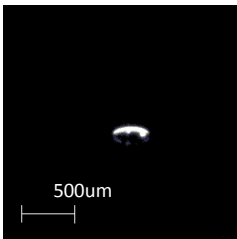
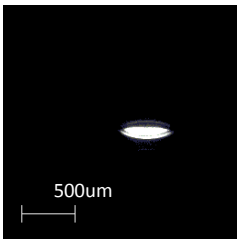
欠陥位置	気泡 幅： $200\mu\text{m}$	気泡 幅： $400\mu\text{m}$	気泡 幅： $500\mu\text{m}$
ガラス 上面			
ガラス 下面			

図 54 気泡の検出確認

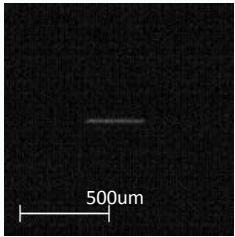
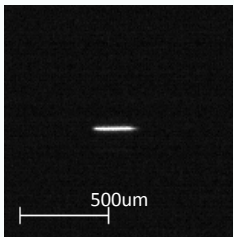
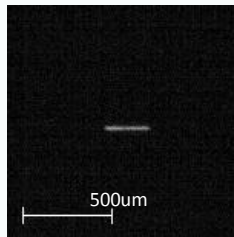
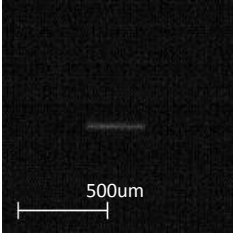
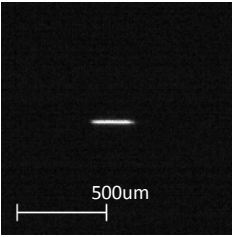
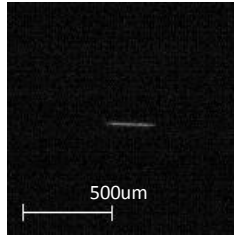
欠陥位置	へこみ 長さ：350um	へこみ 長さ：200um	へこみ 長さ：250um
ガラス 上面			
ガラス 下面			

図 55 へこみの検出確認

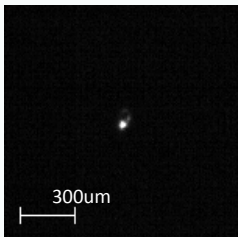
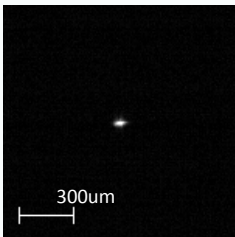
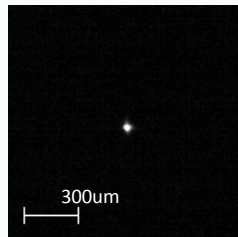
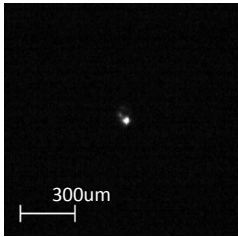
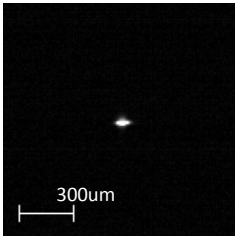
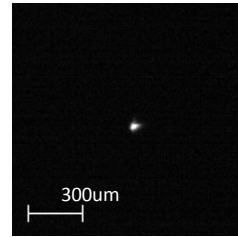
欠陥位置	カレット 幅：100um	カレット 幅：50um	カレット 幅：30um
ガラス 上面			
ガラス 下面			

図 56 カレットの検出確認

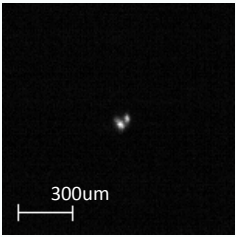
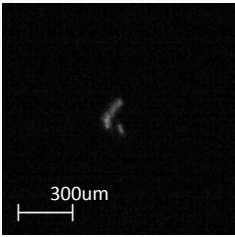
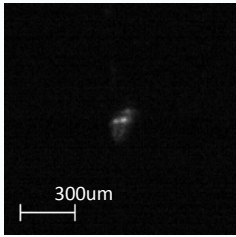
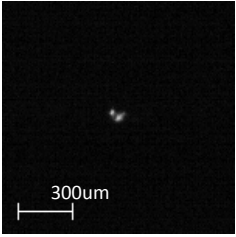
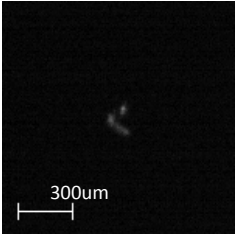
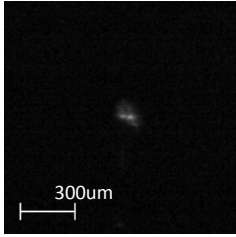
欠陥位置	点キズ 幅：100um (CFグレードNG)	点キズ 幅：150um (CFグレードNG)	点キズ 幅：200um (TFTグレードNG)
ガラス 上面			
ガラス 下面			

図 57 点キズの検出確認

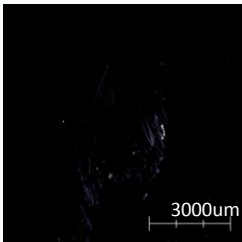
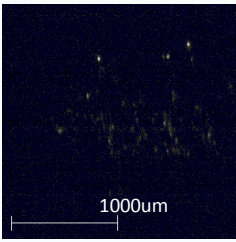
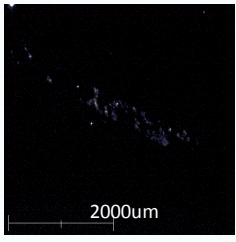
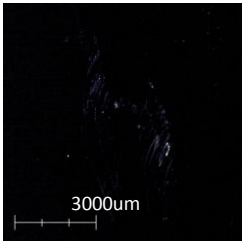
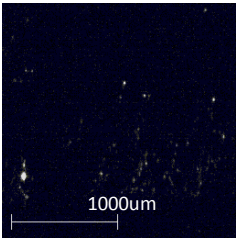
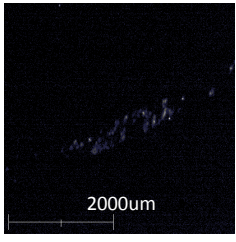
欠陥位置	汚れ 幅：3000um	汚れ 幅：1500um	汚れ 長さ：2000um
ガラス 上面			
ガラス 下面			

図 58 汚れの検出確認

LED照明ユニットと高解像度光学ユニット改を液晶表示用ガラス検査搬送装置に搭載して、液晶表示用ガラス欠陥検査装置として組み上げる目標に対し、期間内に全ての光学系調整は完了できなかったが、1ユニット分であるが光学系調整を完了させ、(キズ幅)最小10 μ m以下の欠陥検出および欠陥の表裏判別可能な検査装置が確立できた。残り4ユニット分の光学調整を行うことで、1300 $\times$ 1100mm(G5サイズ)全面の検査が行える液晶表示用ガラス欠陥検査装置が完成する。

2-2 液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発

1) 欠陥の観察と特徴抽出手法の確立

欠陥を観察して特徴を把握するためには欠陥を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で観察することが必要であるため、各種測定器機を使用して欠陥の観察を実施した。

レーザー顕微鏡は、レーザー光を照射し標本からの反射光を観察する。

同じ倍率の光学顕微鏡に比べて解像度が高く、三次元画像を作成できるため、欠陥の形状把握のために使用した(図 59)。



図 59 レーザー顕微鏡

表面形状粗さ測定器は、光の干渉を利用して標本の表面を三次元的に測定する。

レーザー顕微鏡よりも粗さ(高さ)の測定分解能が高いため、レーザー顕微鏡で測定できない標本の測定に使用した(図 60)。



図 60 表面形状粗さ測定器

マイクロスコープは光学顕微鏡に撮影用のカメラを組み合わせた測定器である(図 61)。



図 61 マイクロスコープ

マイクロスコープは、光源や光路の切り替えで以下の観察が可能である。

- ・ 落射明視野
- ・ 落射暗視野
- ・ 透過光
- ・ 微分干渉

白色光での観察には図 62 の 3 種類の観察方法がある。この中から本研究の「高解像度光学系」と同様に光軸と観察軸が同軸上でないことで一番近い観察結果が得られる「落射暗視野」での観察を実施した。観察結果で特にことわりがないものは「落射暗視野」での観察である。

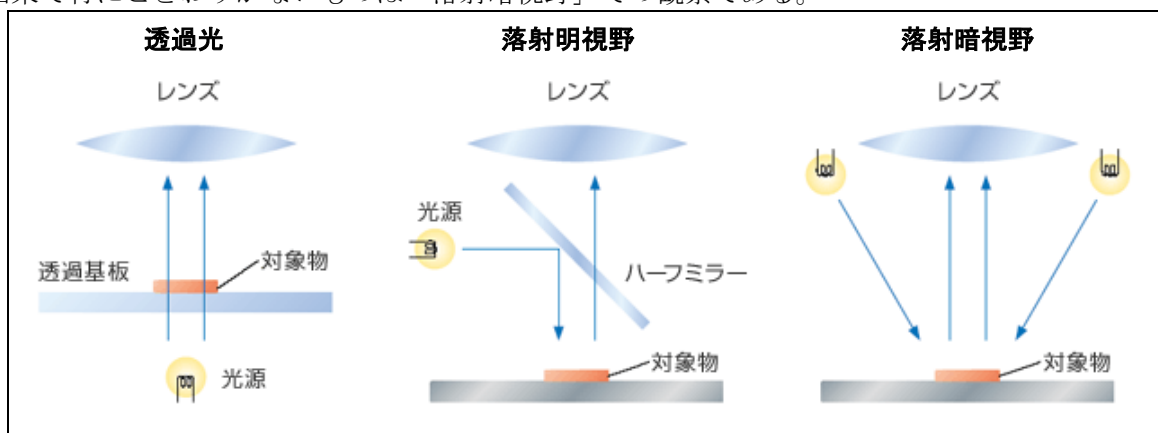


図 62 マイクロスコープでの観察方法(1)

微分干渉は偏光の干渉により標本の観察を行い、標本の屈折率や密度による観察が可能である。白色光での観察が困難な試料は「微分干渉」で観察を実施した。

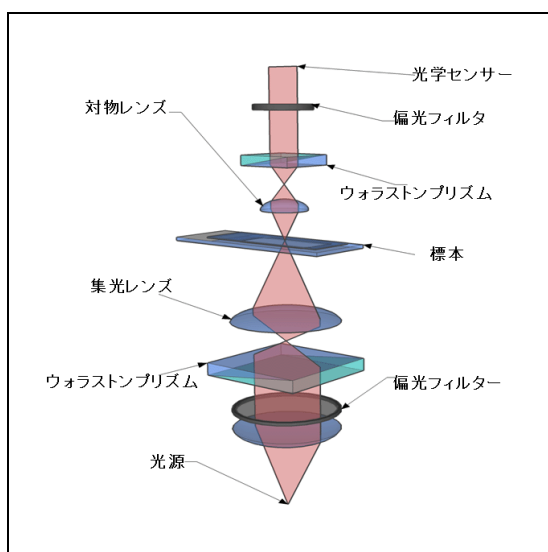
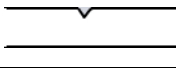
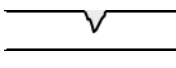
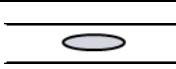


図 63 マイクロスコープでの観察方法(2)

以上の欠陥画像の観察で抽出した欠陥の特徴は以下の通りである。

欠陥\特徴	特徴
キズ	・線状のキズと、点状のキズに分けられる。 ・線状のキズの深さは一定ではなく、深さの違いが輝度となってあらわれるため、線の輝度は一定ではない。 ・点状のキズは拡大すると、ヒビが入った深いキズと、線状のキズが密集したようなキズがある。ヒビが入った深い傷を点キズ、浅いキズが密集しているものを面キズと分類する。 ・浅いキズは輝度が低い。 ・深いキズは輝度が高い。
へこみ	・へこみ自体の輝度は低く、輪郭は不明瞭である。 ・ガラスの表裏両面にへこみが生じていることもある。
カレット	・表面に付着したガラスの破片(屑)。 ・輪郭の輝度が高い。 ・厚みがある部分の輝度が高い。 ・平坦で透明な部分は背景輝度で観察できる。
気泡	・内部に封入された空気の泡。 ・ガラスの製造方法によって楕円形、または不定形となる。 ・輝度が高く、厚み(奥行)がある。
汚れ	・輝度は低い ・拡大すると点状 ・包絡すると一定以上の大きさになる。 →全体として見ると線状になるものを搬送痕に分類する。
ゴミ	※上記の欠陥を正確に分類することによって、上記以外の欠陥をゴミとする。

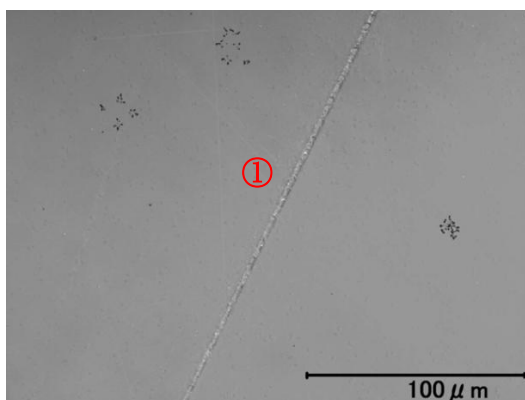
欠陥画像の観察で抽出した欠陥の特徴をもとに、欠陥を詳細に分類したものを以下に示す。

欠陥\特徴		断面	形状	存在場所	輪郭
キズ	線		線状	表面	明瞭
	点		不定形	表面	明瞭
	面		不定形	表面	明瞭
へこみ			円または楕円	表面	不明瞭
カレット			不定形	表面	明瞭
気泡			楕円または不定形	内部	明瞭
汚れ	汚れ		不定形	表面	不明瞭
	搬送痕		不定形	表面	不明瞭

欠陥の観察は、レーザー顕微鏡で形状の把握を行い、それがマイクロスコープでどのような輝度となって観察できるかを比較した。

キズ(線状)

レーザー顕微鏡での観察



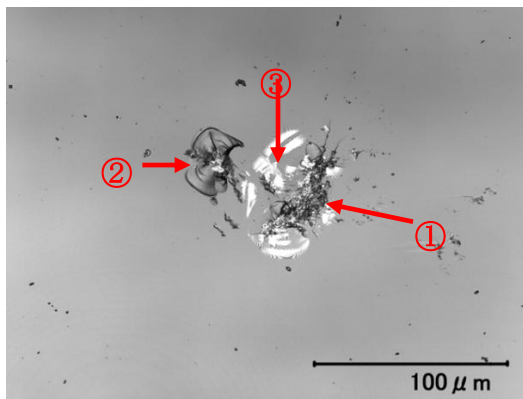
マイクロスコープでの観察



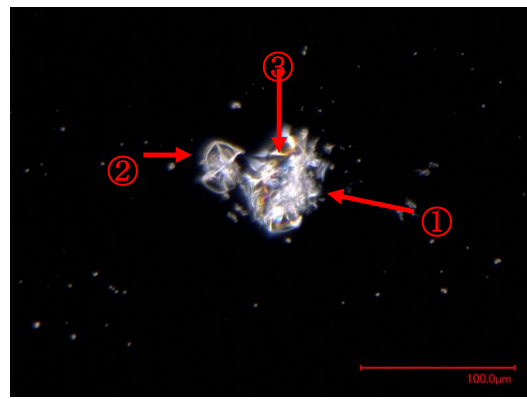
- ・キズの深さが一定ではなく、深さの違いが輝度となってあらわれるため、線の輝度は一定ではない(①)。
- ・浅いキズは輝度が低く、深いキズは輝度が高い。

キズ(点状)

レーザー顕微鏡での観察



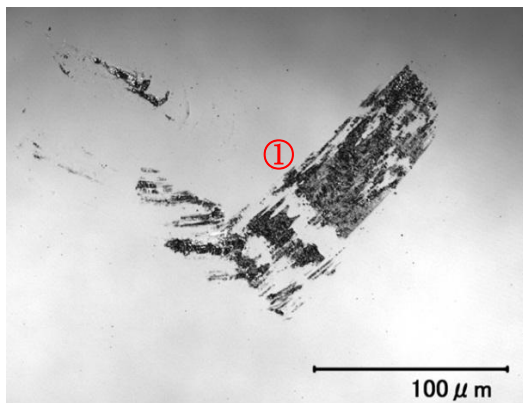
マイクロスコープでの観察



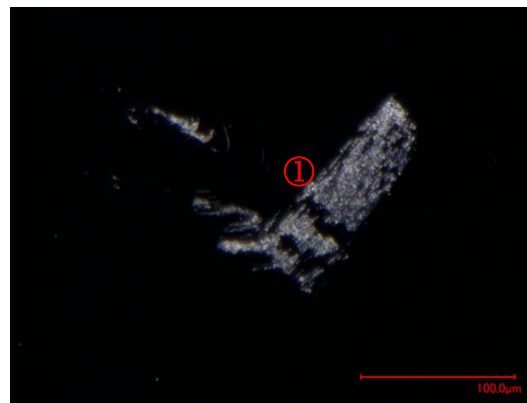
- ・深いキズは輝度が高く(①)、ガラス内部のヒビはそれよりは輝度が低い(②)。
- ・ガラス表面の歪みは輝度が低い(③)。
- ・線キズ同様、キズが深いと輝度は高くなる。

キズ(面状)

レーザー顕微鏡での観察



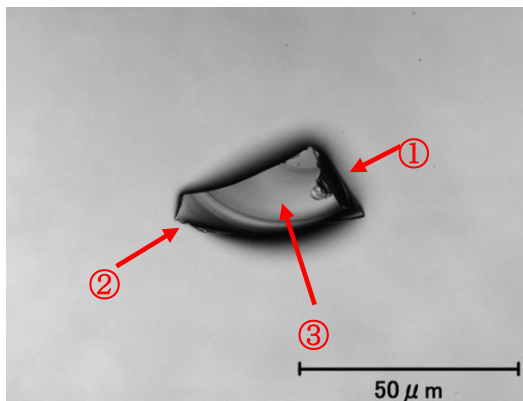
マイクロスコープでの観察



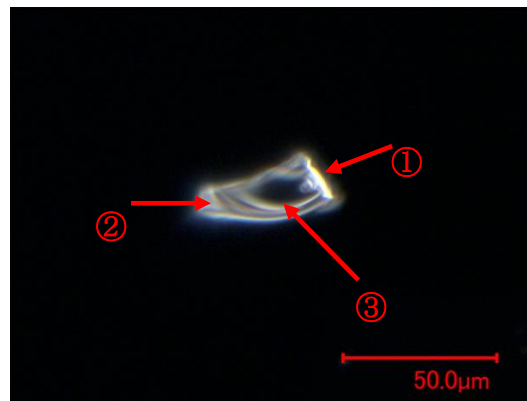
- ・浅いキズが密集しているが、深いキズはないので比較的輝度が低い(①)
- ・他のキズ同様、浅いキズは輝度が低く、深いキズは輝度が高いという特徴は共通している。

カレット

レーザー顕微鏡での観察



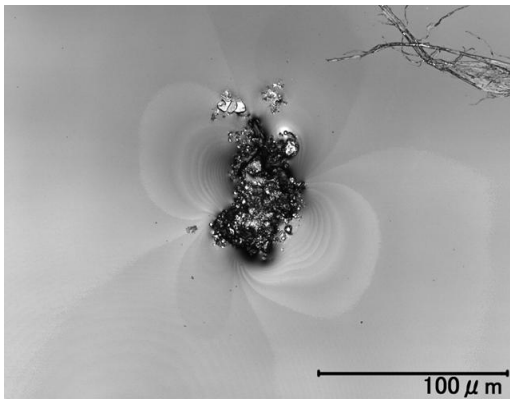
マイクロスコープでの観察



- ・厚い断面は輝度が高く、薄い断面は輝度が低い(①、②)。
- ・平坦で透明な部分は背景と同じ輝度で観察できる(③)。
- ・輪郭の輝度が高い。

気泡(不定形)

レーザー顕微鏡での観察



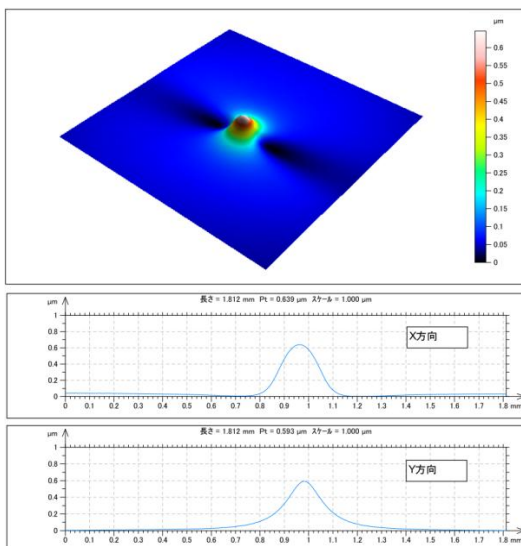
マイクروسコープでの観察



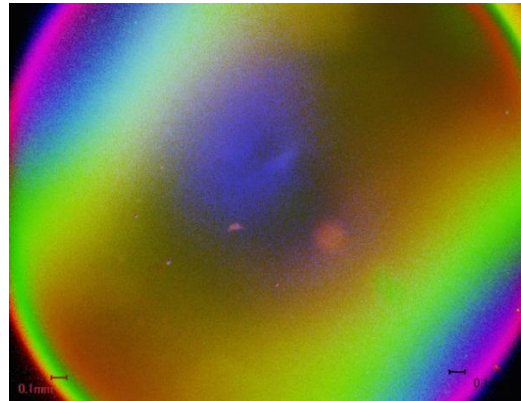
- ・ ガラスの製造方法によって楕円形、または不定形となる。
- ・ 不定形の気泡の場合、細かい泡の集合体であるが、輝度は散乱して細かいところまで観察できない。
- ・ 欠陥によっては厚み(奥行)がある。

へこみ

表面形状粗さ測定器での観察(※1)



マイクروسコープでの観察(微分干渉)(※2)



- ・ 形状は円形または楕円形で、輪郭は不明瞭。

※1：レーザー顕微鏡では観測不可能なため、表面形状粗さ測定器で観察。

※2：白色光で観察不可能であったため、偏光を使った微分干渉で観察。へこみ部分は明度ではなく彩度変化であるため、画像処理で分析するための画像は取得できなかった。

その他(汚れ、搬送痕)

マイクロスコープでの観察 (汚れ)



マイクロスコープでの観察 (搬送痕)

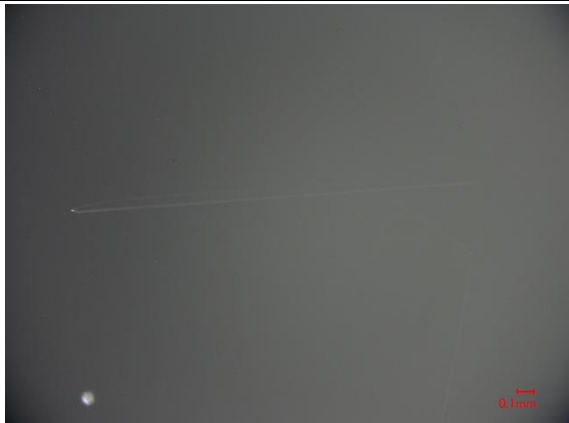
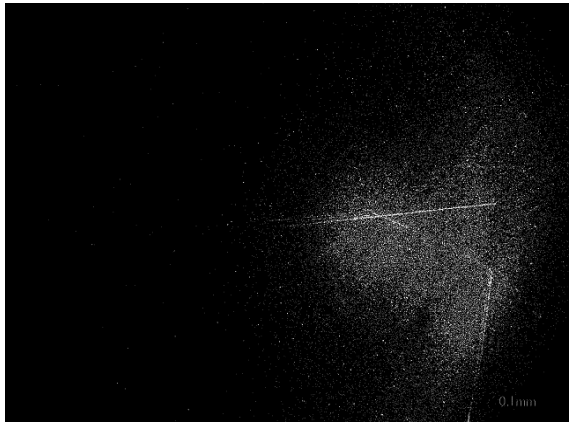


- ・ヨゴレはサンプルの中で一番細い線キズよりも低コントラストである。また、個々の欠陥(汚れ)は小さいが、包絡すると1mm以上になる。
- ・搬送痕は、ヨゴレの包絡した形状が線状になるものである。

欠陥はデジタルマイクロスコープの落射暗視野で観察が可能であったため、欠陥の特徴抽出手法を検討するための画像は取得できた。欠陥によって輝度が異なるため、光源の明るさやカメラのゲインを同一にして観察することは出来なかったが、本開発の光学系はワイドダイナミックレンジで画像を取得するため、マイクロスコープの観察画像と同等の画像が取得できる。

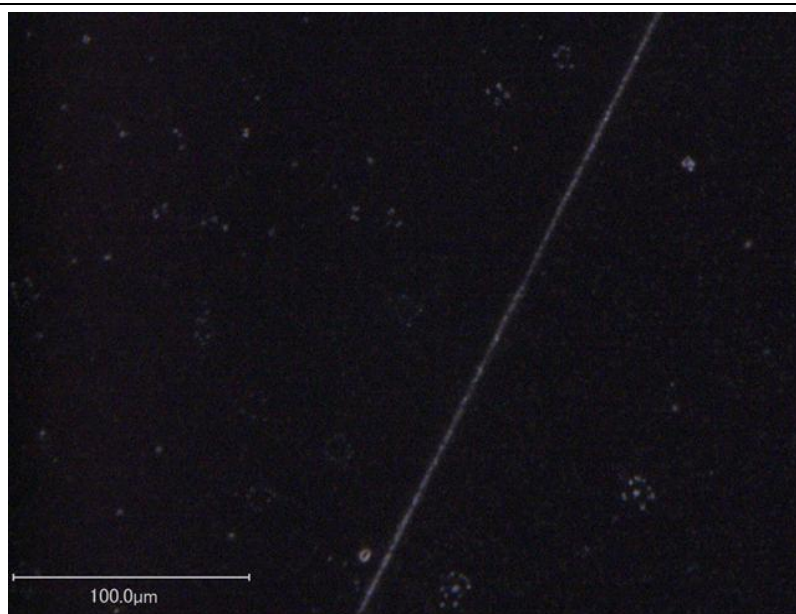
低コントラストの欠陥画像では、欠陥の輝度変化よりも背景の輝度変化が大きいため欠陥を認識できないことがある。欠陥を正しく認識するために前処理として背景輝度補正が必要である。

トップハット変換が、背景輝度補正に有効である実例を以下に示す。

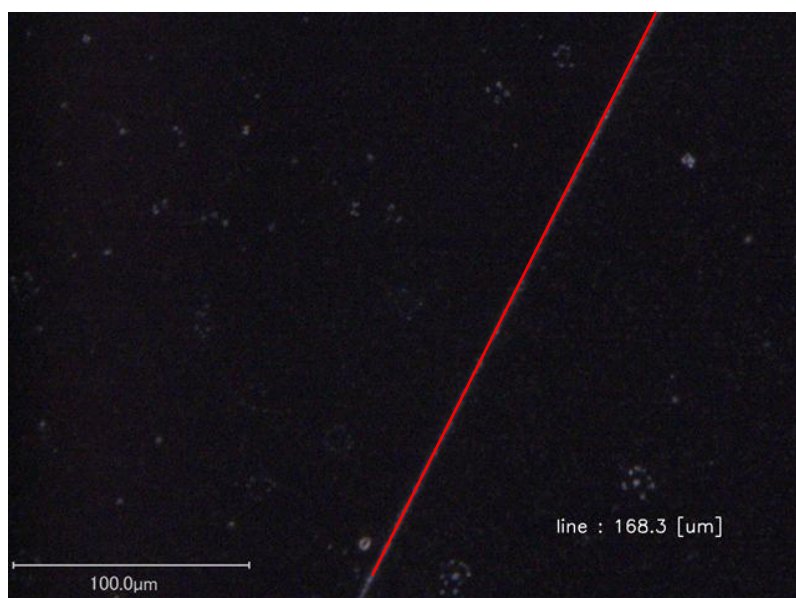
低コントラストの例として線キズの画像で説明する。	 A grayscale image showing a dark background with a faint, horizontal, slightly curved line representing a scratch. A small, bright circular artifact is visible in the lower-left corner. A red scale bar in the bottom right corner indicates 0.1mm.
欠陥の輝度変化よりも背景の輝度変化が大きいため、2値化しても、欠陥の全体が抽出できない。	 A binary (black and white) image of the same scratch. The background is mostly black, and the scratch is represented by a thin, light gray line. The line is not fully continuous, and some background noise is visible. A scale bar in the bottom right corner indicates 0.1mm.
トップハット変換による背景輝度補正を行ったあとに2値化を実施。 トップハット変換により広い範囲の欠陥抽出が可能になった。	 A binary image of the scratch after top-hat transformation. The background is now a uniform dark gray, and the scratch is a much more prominent, continuous, and bright white line. The circular artifact is also more clearly defined. A scale bar in the bottom right corner indicates 0.1mm.

ハフ変換により、直線(線分)の検出が可能であることを以下に示す。

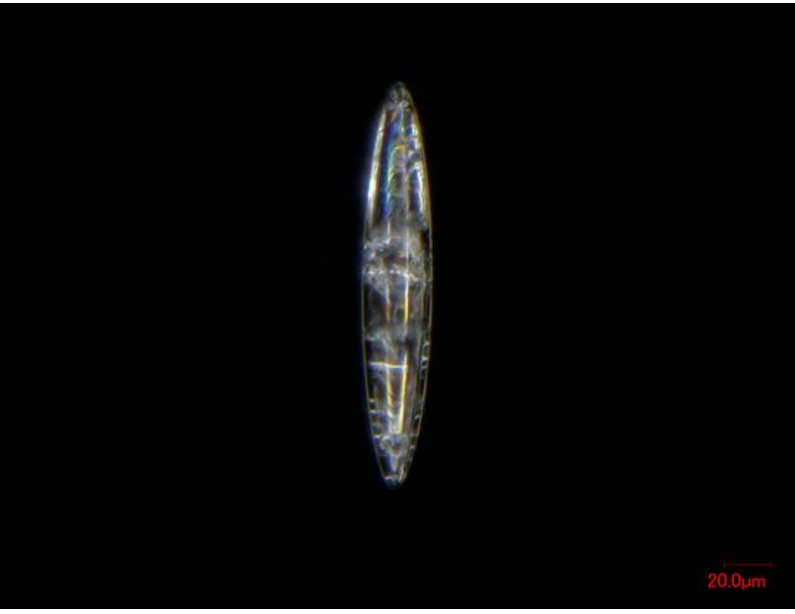
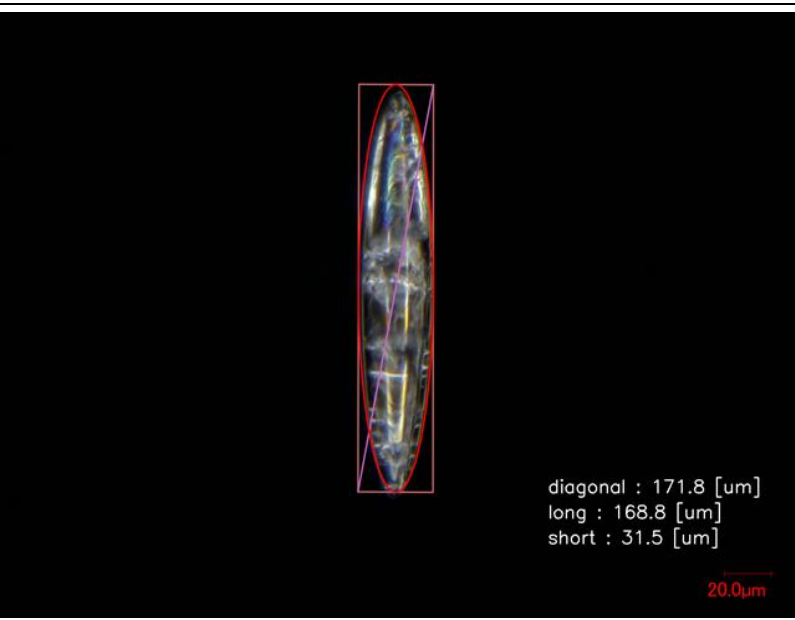
線キズの画像。



ハフ変換によって検出した線分を重ねて表示。



楕円フィッティングにより、楕円の検出が可能であることを以下に示す。

楕円形の気泡の画像。	 A micrograph showing a single, elongated, elliptical bubble against a black background. The bubble has a complex internal structure with various colors (blue, green, yellow, red) indicating different regions or phases. A red ellipse is fitted to the bubble's shape. A scale bar in the bottom right corner indicates 20.0 μm.
楕円フィッティングにより検出した楕円を重ねて表示。	 A micrograph showing the same elliptical bubble as in the first image. A red ellipse is fitted to the bubble's shape. The ellipse is overlaid with a blue rectangle. The following measurement data is displayed in the bottom right corner: - diagonal : 171.8 [um] - long : 168.8 [um] - short : 31.5 [um] A scale bar in the bottom right corner indicates 20.0 μm.

楕円を検出することで楕円状の欠陥（気泡の一部、へこみ）を抽出できる。

ハフ変換で検出した線分の長さを計測することにより、線状の欠陥の長さの測定が可能である(図 64)。



図 64 ハフ変換による長さ計測

楕円フィッティングの楕円形の長辺の長さを測定することで、楕円の大きさ(長さ)が測定可能である(図 65)。

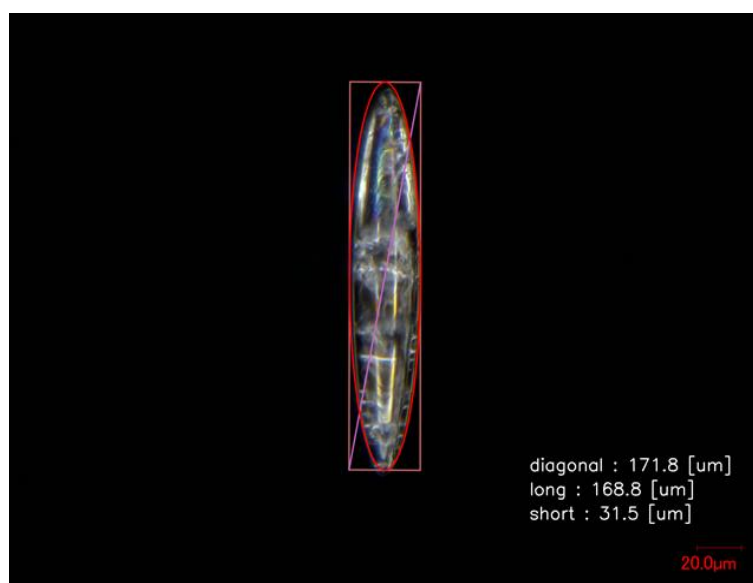


図 65 楕円フィッティングによる計測(1)

楕円フィッティングとは、最小二乗法による楕円のあてはめであるので、対象物が楕円以外でもあてはめを行うことが出来る。欠陥と形状が一致していないときでも楕円の長辺の長さを測定することで、欠陥の大きさを測定することが可能である(図 66)。

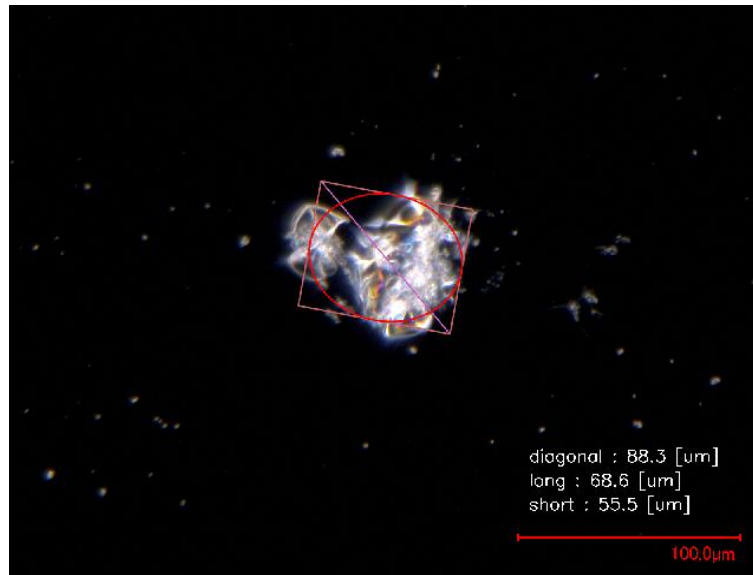
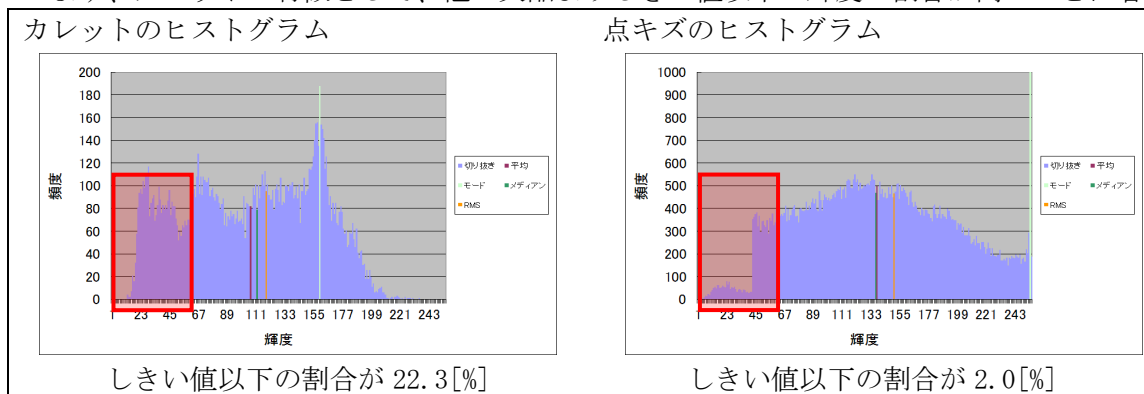


図 66 楕円フィッティングによる計測(2)

輝度ヒストグラムによる分析

欠陥の輝度ヒストグラムから、欠陥ごとの特徴の検討を実施した。

まず、カレットの特徴として、他の欠陥よりしきい値以下の輝度の割合が高いことに着目した。



カレットがしきい値の以下の輝度成分を多く含むのは、透明で平坦な部分を通して背景が見えることが原因である。ただし平坦な部分を含まない小さなカレットはしきい値以下の輝度をほとんど含まないため、他の抽出手法と組み合わせて総合的に判断する必要がある。

しきい値以下の輝度割合による、欠陥の確率密度を以下に示す(図 67)。

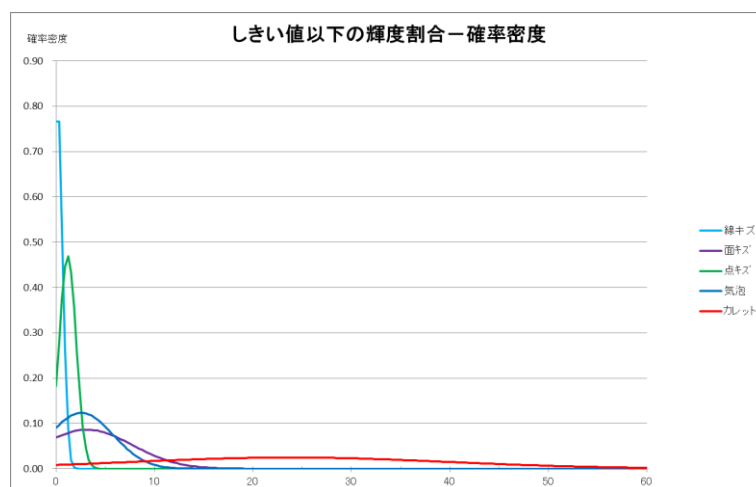


図 67 しきい値以下の輝度割合の確率密度

しきい値以下の輝度割合が 20[%] を越えるのはほぼカレットのみであり、それ以外の欠陥は確率密度による判断となる。

輝度ヒストグラムの分析としては、もうひとつの観点として輝度分布の標準偏差(σ)に着目した分析を行った。これは、輝度値そのものは撮影条件によって変わる可能性があるが、標準偏差は輝度範囲の傾向であるので個別の撮影条件の影響が少ないと判断したためである。

欠陥の標準偏差の確率密度を以下に示す(図 68)。

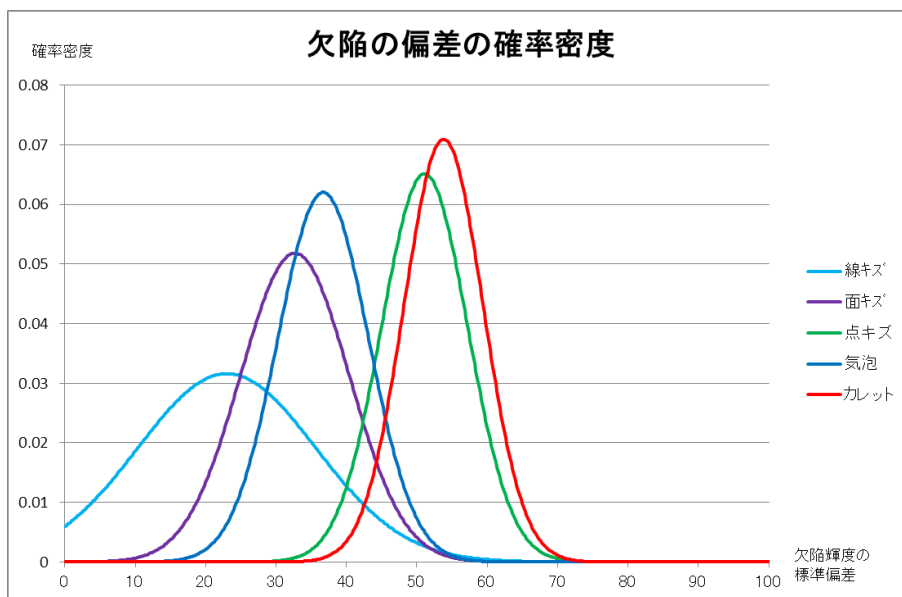


図 68 欠陥の偏差の確率密度

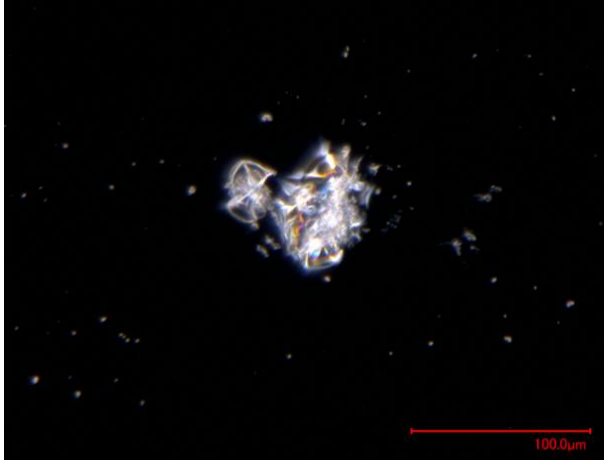
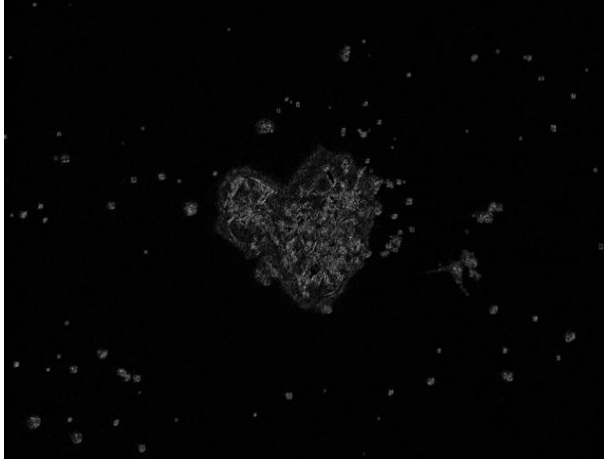
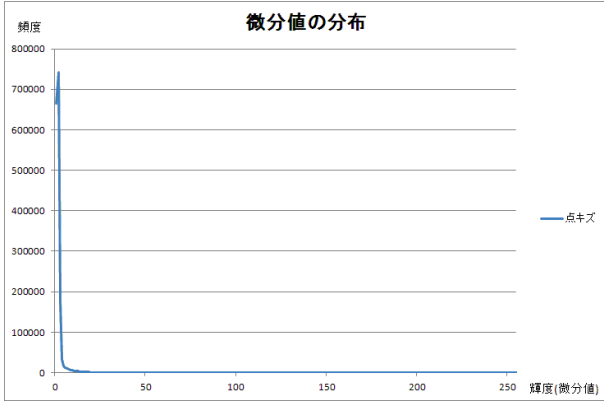
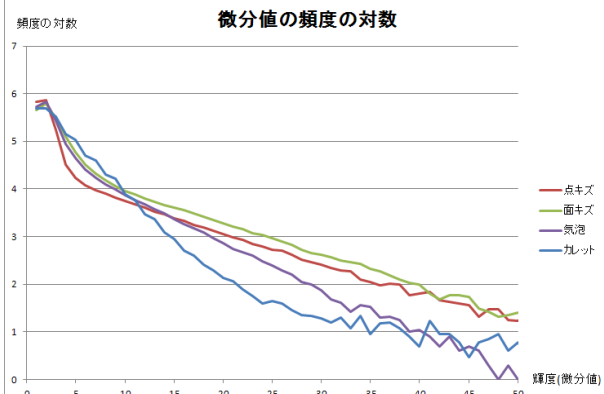
各欠陥の確率密度分布の平均値(それぞれの分布の最大値)は、大きくふたつの傾向に分けられる。ひとつは、線キズ、面キズ、気泡。もうひとつは点キズ、カレットである。

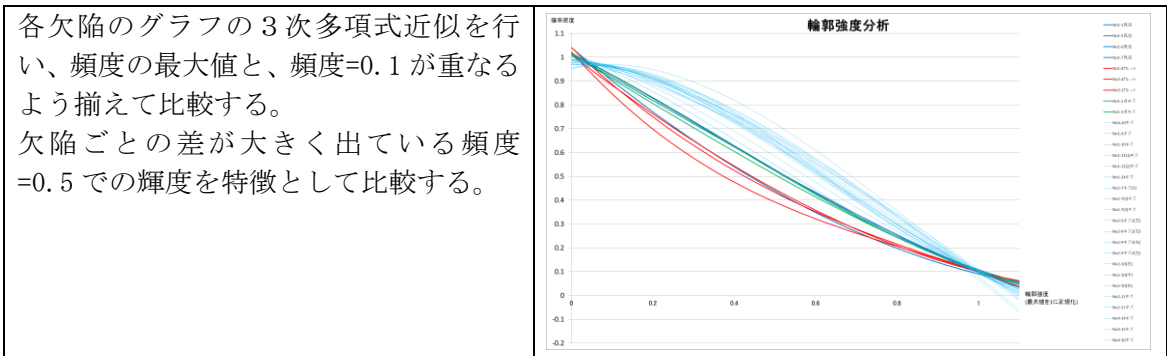
標準偏差 10 以下で線キズであることがほぼ特定できるが、それ以外の偏差では確率密度による判断となる。

輪郭強度(微分値)による分析

欠陥の輪郭強度の分布で、欠陥の分類できるのではないかという推測から、輪郭強度による分析を実施した。

分析手順を以下に示す。

例として点キズの画像で説明する。	
輪郭強度を得るために「sobel フィルタ」で処理する。	
輝度のヒストグラムを作成します。輝度は輪郭強度です。	微分値の分布 
頻度を対数化し、他の欠陥の分析結果を重ねて比較する。	微分値の頻度の対数 



以上の手順で比較した輪郭強度の確率密度を以下に示す(図 69)。

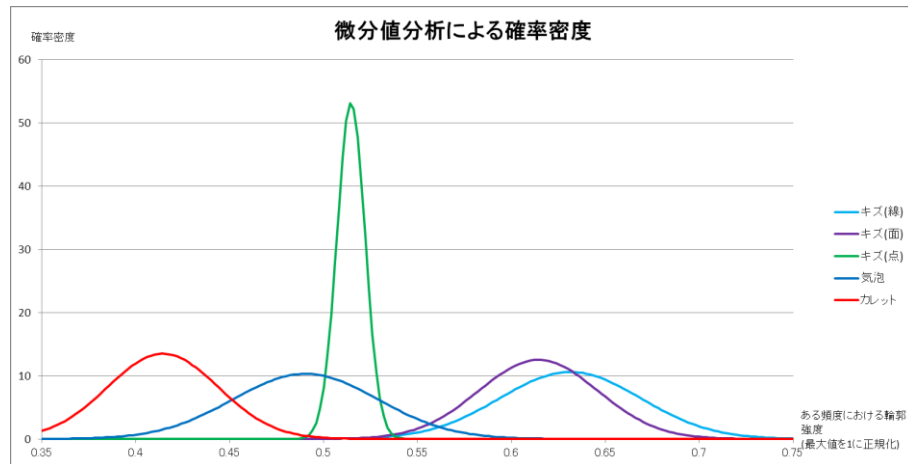
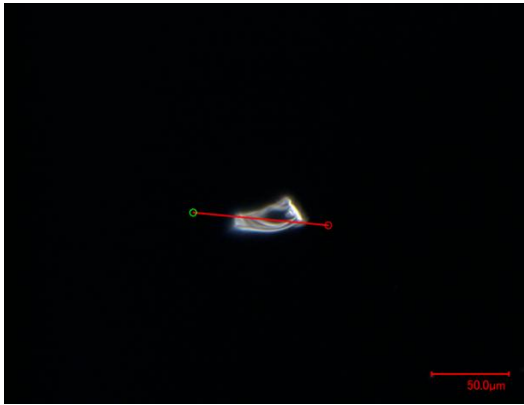
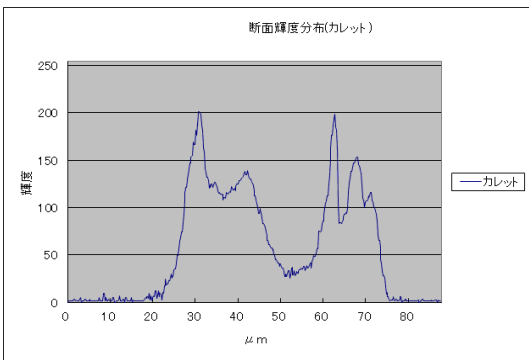
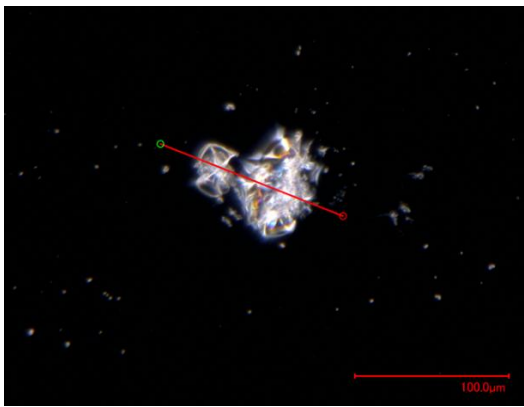
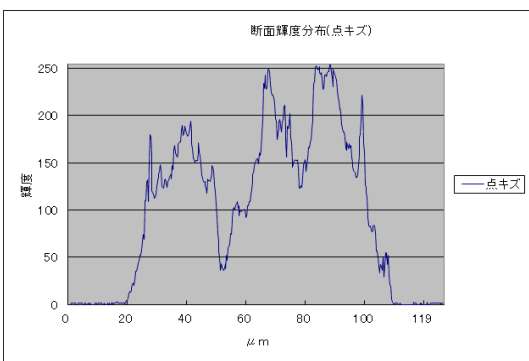
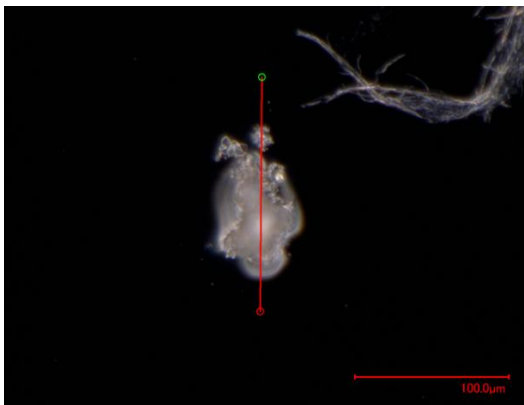
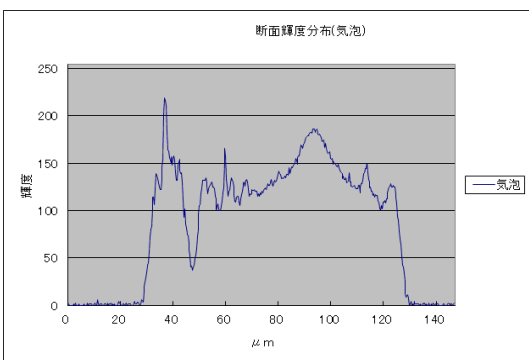


図 69 輪郭強度による確率密度

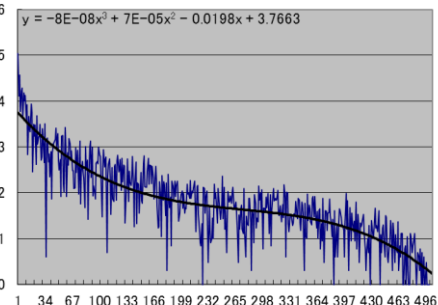
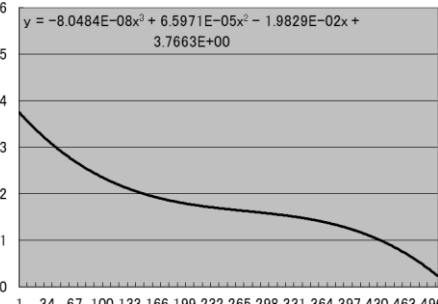
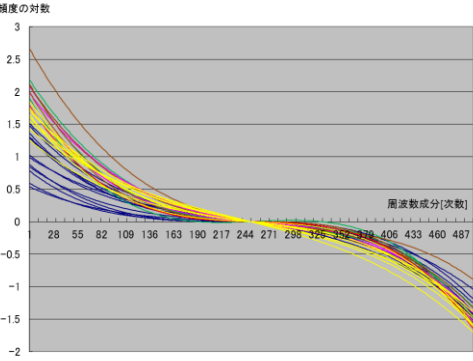
面キズと線キズの中心値と分散は、他の欠陥に比べて似た傾向にある。面キズは、長さが同程度の線キズが密集しているものであると考えられる。面キズと線キズの分離は困難であるが、キズとしての抽出は高い確率で可能である。点キズは他より分散が小さいので、この範囲にあるときは点キズである確率が高い。

断面輝度による分析

輝度差による分析として、ある線分に沿った欠陥の輝度（以降「断面輝度」と呼ぶ）の分析を行った。以下に欠陥画像と、断面輝度のグラフをいくつか示す。

	欠陥画像と断面観察を行う線分	断面の輝度
カレット		
点キズ		
気泡		

断面輝度のヒストグラムの形状を「波形」とみなして、FFT(高速フーリエ変換)による分析を実施した。
分析手順を以下に示す。

断面輝度の値から FFT により周波数分布を算出しグラフを描く。 データのスケールから、縦軸は対数とした。 3 次多項式近似を行い、3 次式の係数を算出する。	No1-2-点キス' 頻度の対数 $y = -8E-08x^3 + 7E-05x^2 - 0.0198x + 3.7663$  周波数成分[次数]
多項式近似した曲線を描く。	No1-2-点キス' 頻度の対数 $y = -8.0484E-08x^3 + 6.5971E-05x^2 - 1.9829E-02x + 3.7663E+00$  周波数成分[次数]
横軸(周波数成分)=250(※1)のとき縦軸(度数)=0となるようグラフを上下に移動して揃える。 各欠陥の横軸(周波数成分)=0のときの縦軸(度数)の値の傾向で特徴を判断する。 ※1：逆 FFT した結果、250 以上の値は無視しても断面輝度ヒストグラムの形状を保っていると判断した。	断面輝度分析  周波数成分[次数] - No1-9-キズ - No1-10-キズ - No1-11(1)-キズ - No1-11(2)-キズ - No1-14-キズ - No2-7-キズ(1) - No2-7-キズ(2) - No2-7-キズ(3) - No2-9-キズ1(右端) - No2-9-キズ1(左端) - No2-9-キズ2(右端) - No2-9-キズ2(左端) - No1-1-気泡 - No1-6-気泡 - No1-7-気泡 - No1-2-点キス - No1-3-点キス - No2-6-点キス - No1-4-割欠 - No3-1-割欠 - No3-2-割欠 - No3-4-割欠 - No2-10-面キス(右) - No2-10-面キス(左) - No2-12-面キス - No2-17-面キス - No4-14-面キス - No4-15-面キス - No4-16-面キス - No4-20-面キス

以上の手順により欠陥ごとの値を求め、その中心値と偏差から算出した確率密度を以下に示す(図 70)。

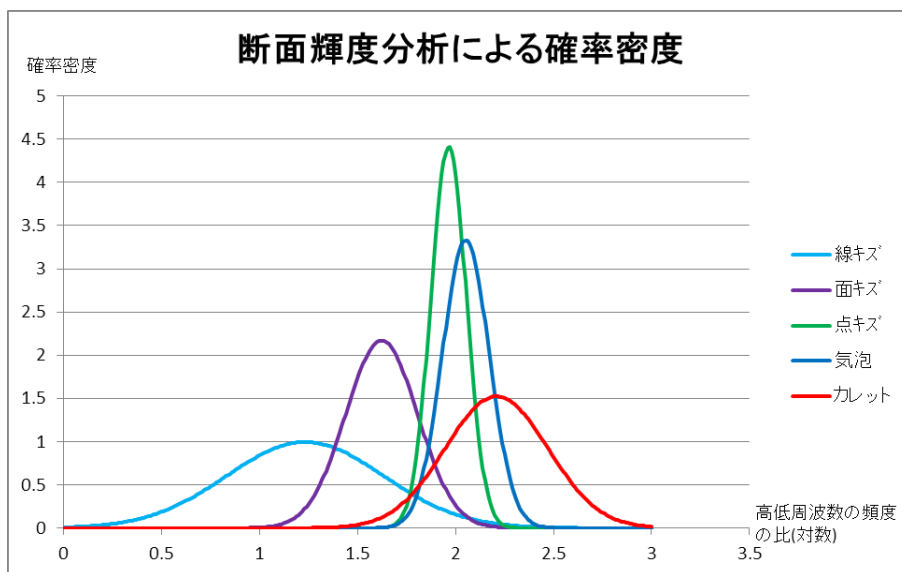


図 70 断面輝度による確率密度

横軸は低い周波数成分(0 次)と高い周波数成分(250 次)の頻度の対数の差、縦軸は確率密度である。

断面輝度のグラフでは、キズは相対的に高い周波数成分が多く、断面輝度ヒストグラムがギザギザしている。カレットや気泡は相対的に高い周波数成分少なく、断面輝度ヒストグラムが滑らかであった。

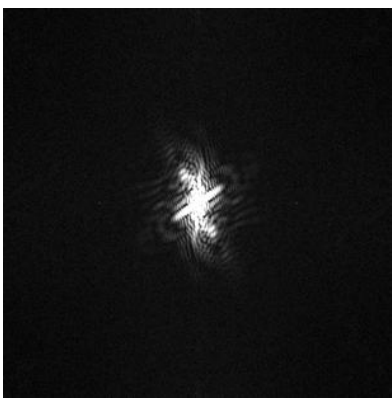
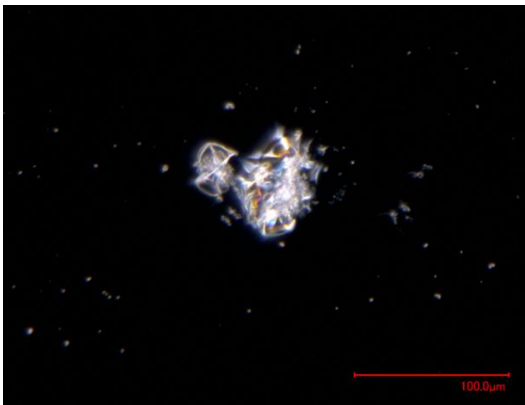
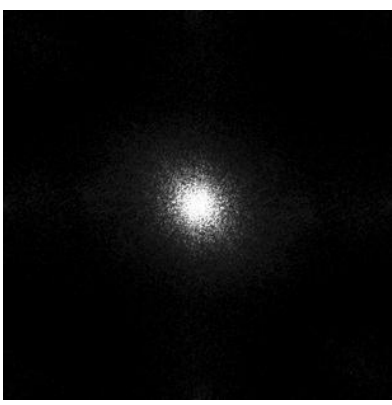
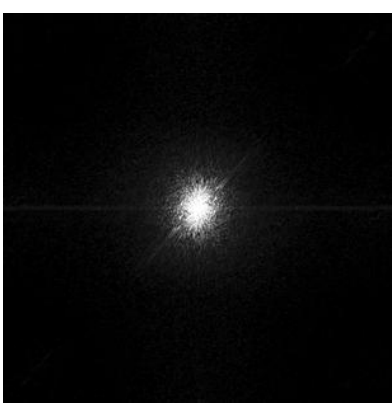
それらの断面輝度ヒストグラムの定性的な特徴が数値的にあらわれているので、分析手法として有効であると判断する。

線キズとカレットは明確に判断できる範囲があるが、他の欠陥は確率密度による判断となる。

周波数成分による分析

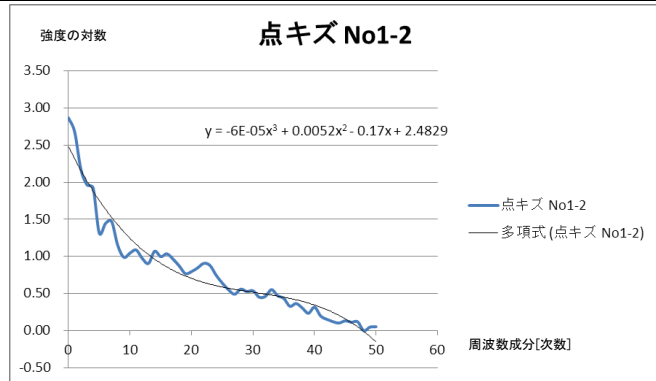
FFT(高速フーリエ変換)は、画像の2次元的な周波数分析を行う手法である。画像の周波数とは変化量の大きさであり、細かい変化は高い周波数成分、ゆるやかな変換は低い周波数成分となる。欠陥ごとに周波数成分分布に差があるという推測で、欠陥画像に対してFFTによる分析を行った。

欠陥画像とFFT(高速フーリエ変換)による周波数スペクトルの例を以下に示す。

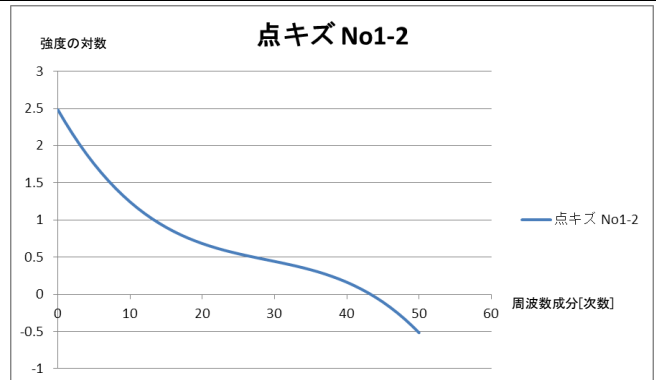
	欠陥画像	周波数スペクトル
カレット		
点キズ		
気泡		

FFT による周波数分析手順を以下に示す。

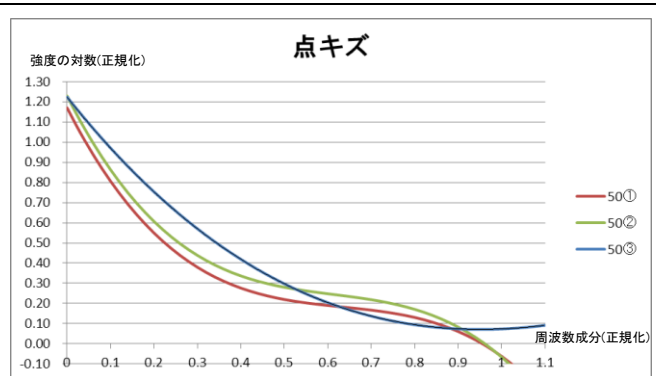
FFT による周波数分布を、原点からの距離ごとの頻度としてグラフ化する。縦軸は対数とする。
3 次多項式近似を行い、3 次式の係数を算出する。



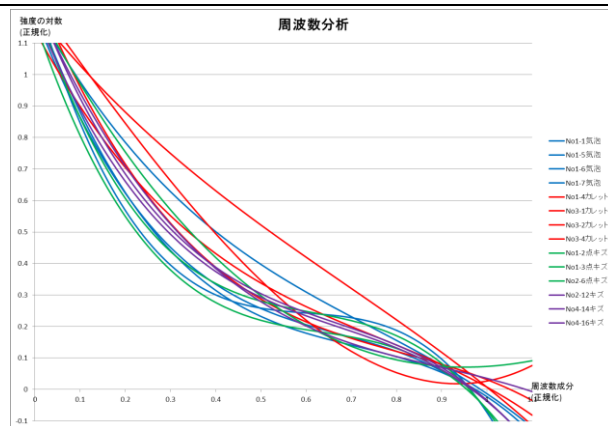
欠陥ごとに多項式近似した曲線を描く。



多項式近似した曲線を、欠陥ごとに重ね合わせて比較し、2 点を通るように縦の拡大/縮小、平行移動を行う。



縦軸(強度)=0.5 における横軸(周波数成分)の値を特徴量として比較した。



以上の手順により欠陥ごとの値を求め、その中心値と偏差から算出した確率密度を以下に示す。

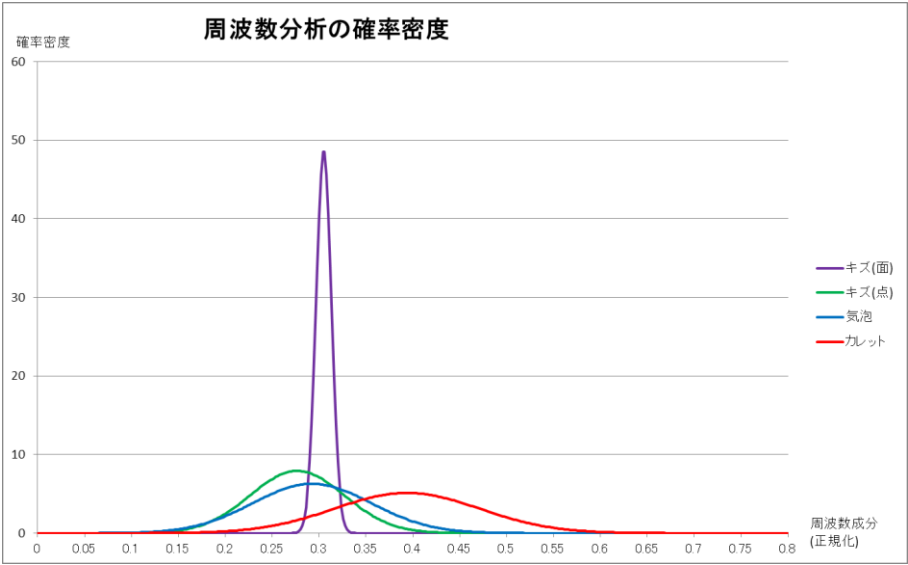


図 71 周波数分析による確率密度

横軸はある強度における周波数成分、縦軸は確率密度である。

線キズは、この分析では明確な傾向が認められなかったために除外した。他の欠陥抽出で線キズと線キズと判断した欠陥は、この分析は行わないものとする。

カレットは他の欠陥と中心値の傾向が異なるため、周波数成分が大きいところでは単独で確率が高い。

面キズの分散が小さいので、この範囲での面キズである確率は高い。ただし面キズと点キズ、気泡の中心値は近いので、他の分析方法との併用で判断する必要がある。

以上により、欠陥の特徴抽出手法を確立した。確立した特徴抽出手法と、それにより抽出できる欠陥を以下に示す。

欠陥\抽出手法		形状	輝度 分布	輝度 分散	断面 輝度	周波数	微分値	位置
キズ	線	◎		◎	○		◎	
	点			○	○	○	○	
	面			○	○	◎	◎	
へこみ		○						◎
カレット			◎	○	◎	○	◎	
気泡	楕円	◎		○	○	○	○	◎
	不定形							
汚れ	汚れ	○	○					
	搬送痕	○	○					

凡例

◎：特徴が明確なもの

○：他の手法と組み合わせて判断が必要なもの

2) カメラ画像のずれ量計測システム開発

カメラ位置の調整では不可能な、微妙な位置ズレ調整を可能とするために、位相限定相関法（POC）を用いて2枚のカメラ画像からずれ量を計測するソフトウェアを開発する。（図 72）

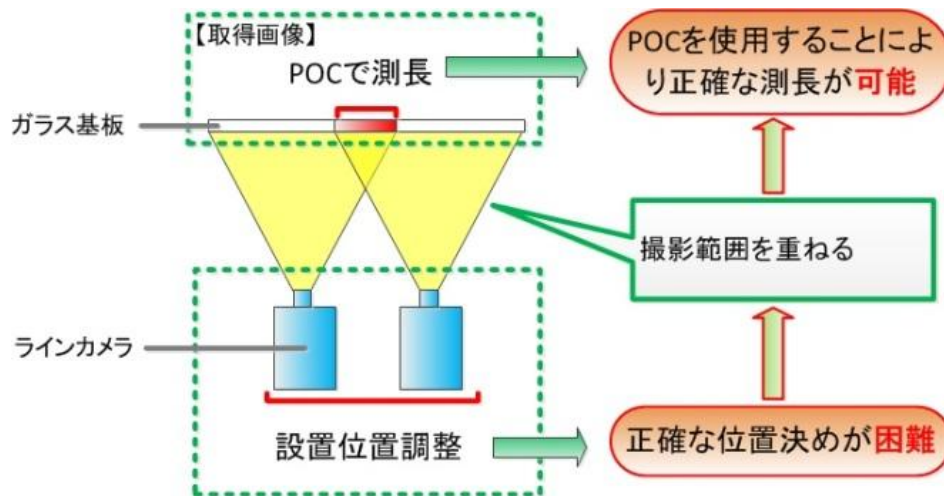


図 72 カメラ画像のずれ量計測システムの概要図

カメラ画像のずれ量計測システムの構成を下記に示す（図 73）。

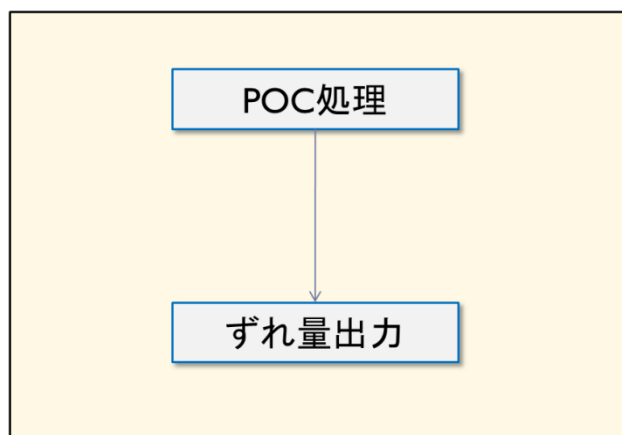


図 73 カメラ画像のずれ量計測システムの構成図

カメラ画像のずれ量計測システムのソフトウェアフローは下記の通りである（図 74）。

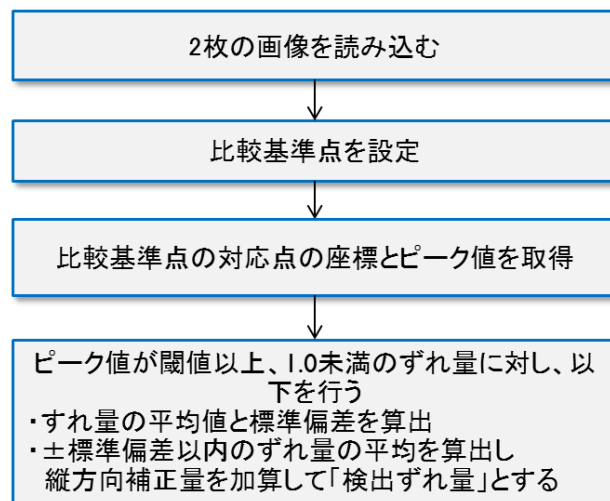


図 74 カメラ画像のずれ量計測システムのソフトウェアフロー

2つの画像のずれ量から、実際の長さを計測する原理を以下に示す。

隣接するエリア間で、範囲を重ねて撮影を行う（図 75）。

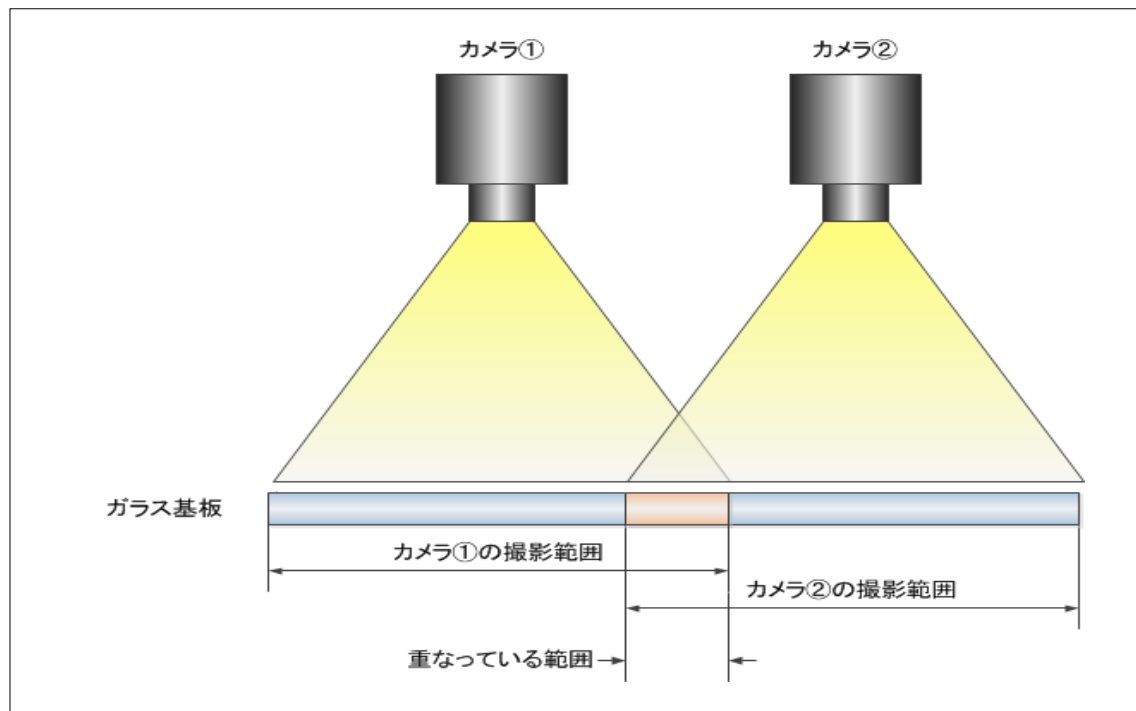


図 75 ラインカメラの撮影範囲

撮影した画像において、ずれ量を計測するための値を下記のように定義する（図 76）。

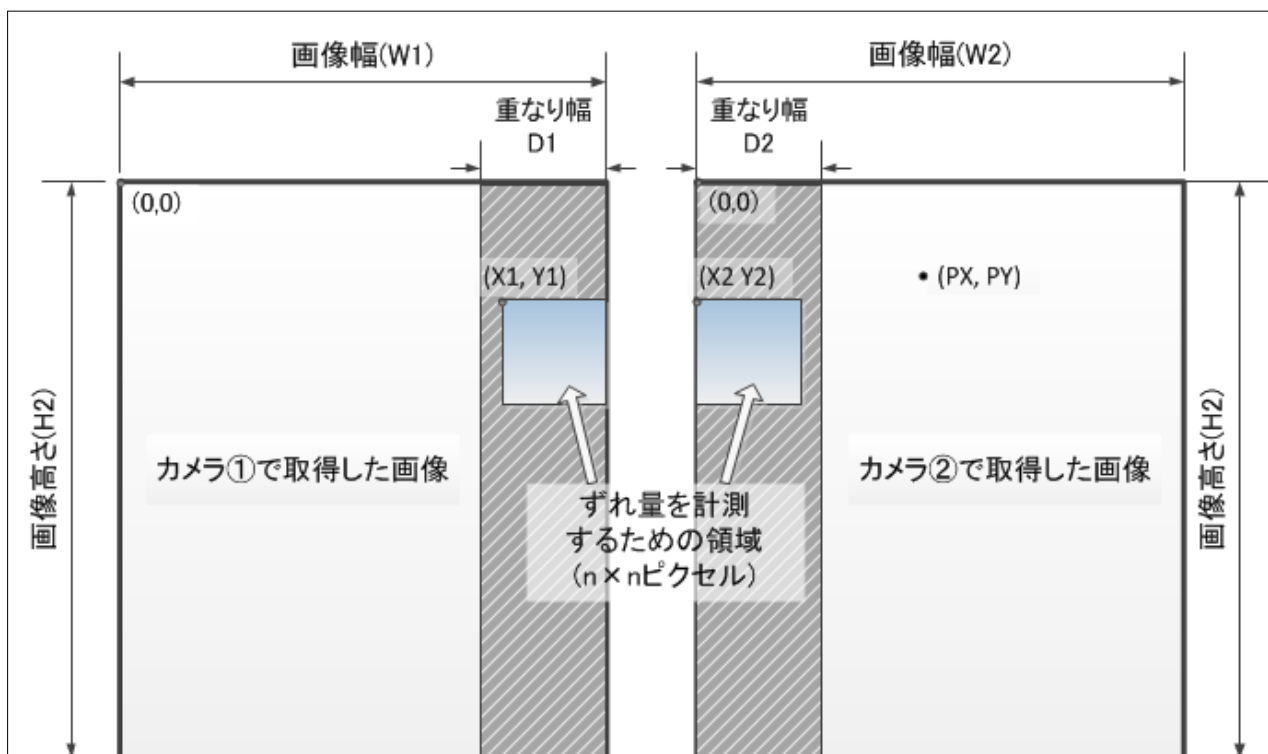


図 76 ずれ量計測のイメージ図

各値について、下記に説明を記載する。

- それぞれの画像の原点を左上とする。
- 画像幅はカメラ一台で撮影できる幅であり、すべてのカメラで同じなので、 $W1=W2$ である。
- 画像の高さもカメラによらず同じであるので、 $H1=H2$ である。

- ・隣接する画像同士の重なり幅は同じであるので、 $D1=D2$ である。
- ・重なり合った領域内にずれ量を計測するための領域をとる。
- ・その領域の開始座標をそれぞれ $(X1, Y1)$ と $(X2, Y2)$ として定義する。
- ・それらの領域は重なっている領域の横端（カメラ①画像の右端とカメラ②画像の左端）で、縦の位置は同じ位置にとる。すなわち、 $X1=W1-n$ 、 $X2=0$ 、 $Y1=Y2$ とする。

上記を踏まえた上で、計測したずれ量を $(\angle X, \angle Y)$ とすれば、 $(X2, Y2)$ はカメラ①側の原点からの座標は $(X1+\angle X, Y1+\angle Y)$ となる。同様にカメラ②側の原点は、カメラ①側の原点からの座標は $(X1+\angle X, \angle Y)$ となる。

以上から、カメラ②側の画像内の任意の座標 (PX, PY) の、カメラ①側の原点からの座標は $(X1+PX+\angle X, PY+\angle Y)$ となる。ピクセル単位で得られた座標値に、1 ピクセルのサイズを掛ければ実際の位置が得られる。

次に、図 76 の「ずれ量を計測するための領域」の中にずれ量検出点をとる。検出点ごとに、検出点を原点としたウィンドウ領域内で POC 処理を行い、ずれ量 $(\angle X, \angle Y)$ を測定する。その際に使用するパラメータの関係を下記に示す（図 77）

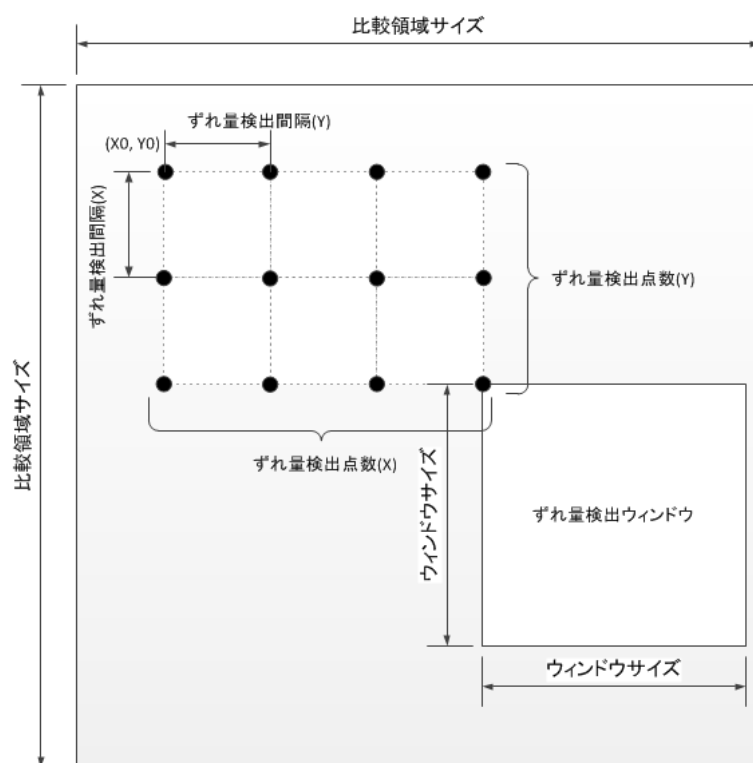


図 77 ずれ量検出パラメータの位置関係

各値について、下記に説明を記載する。

- ・ $(X0, Y0)$ は、ずれ量検出開始座標であり、ピクセル座標で設定する。
- ・ ずれ量検出点数はパラメータとして整数で指定する。
- ・ ずれ量検出間隔はパラメータとしてピクセル数を指定する。

ずれ量検出を行う各点を原点として、縦横がウィンドウサイズの領域で POC によるずれ量計測を行う。

そのため、ずれ量計測の右下の点からのずれ量検出ウィンドウは比較領域をはみ出してはならない。式で表すと下記の通り（数式 1）。

$$\text{ずれ量検出開始座標} + ((\text{ずれ量検出点数} - 1) \times \text{ずれ量検出間隔}) + \text{ウィンドウサイズ} \leq \text{比較領域サイズ}$$

数式 1 ずれ量検出ウィンドウサイズと比較領域サイズの関係

上記までの処理でずれ量の検出が可能であるが、実際の装置で行う場合、検出したずれ量の値に対し補正をする必要がある。下記にその詳細について記述する。

図 75 では模式的にカメラを描いたが、実際の装置では1台のカメラで光路切り替えにより4つのエリアを撮影する。そのため1台のカメラで撮影する4エリアは縦方向にずれが生じる。それを以下に示す(図 78)。

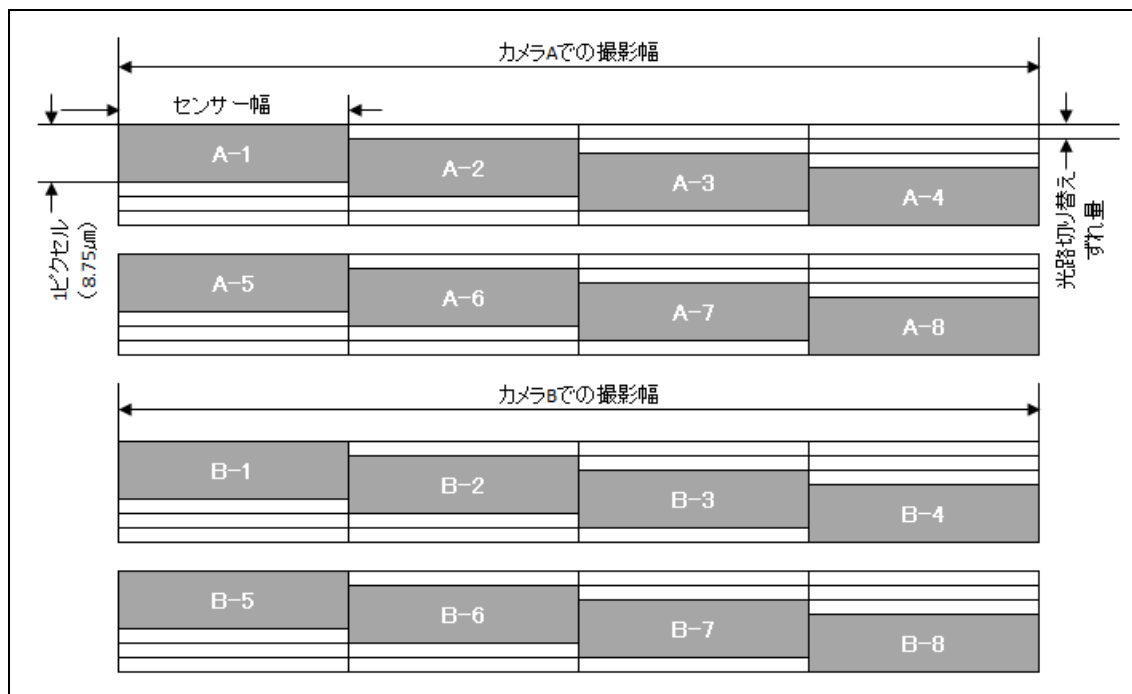


図 78 光学系の光路切り替えによる撮影

上図の灰色の部分で撮影した1ラインであり、それぞれのエリアの撮影データを縦に並べて画像とする。それを以下に示す(図 79)。

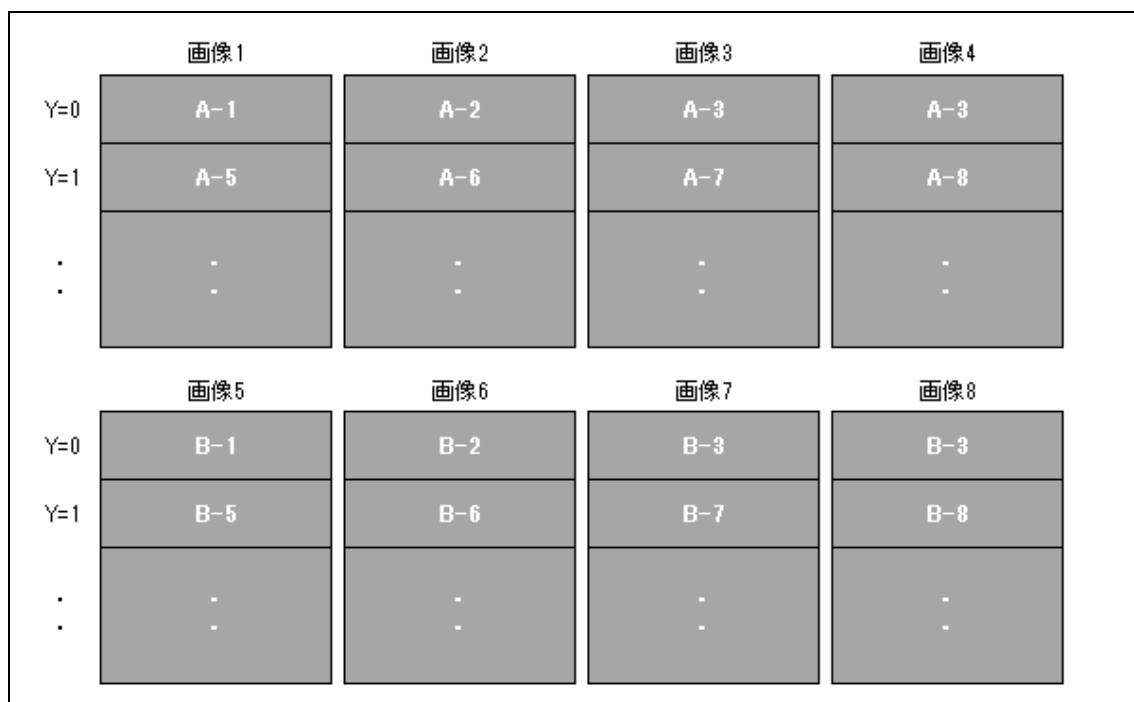


図 79 撮影画像

図 79 の「画像 1」と「画像 2」では、縦座標が同じであっても、写っている画像にはシャッター1 回分(1/4 ピクセル)のずれがある。「画像 1」と「画像 4」ではシャッター3 回分(3/4 ピクセル)のずれがある。そのため、POC で検出したずれ量に対し、光路切り替えによる画像間の撮影時間差によるずれを補正することが必要である。

開発したカメラ画像のずれ量計測システムで正しく計測できるか、標準画像を使用して検証を行った。

計測手順は以下の通り。

- ① 元になる画像を 10 倍に拡大
- ② 1～20 ピクセルずらす
- ③ 画像を 1/10 に縮小
- ④ POC を使って元画像とのずれ量を計測

使用した標準画像は以下の通り（図 80）。

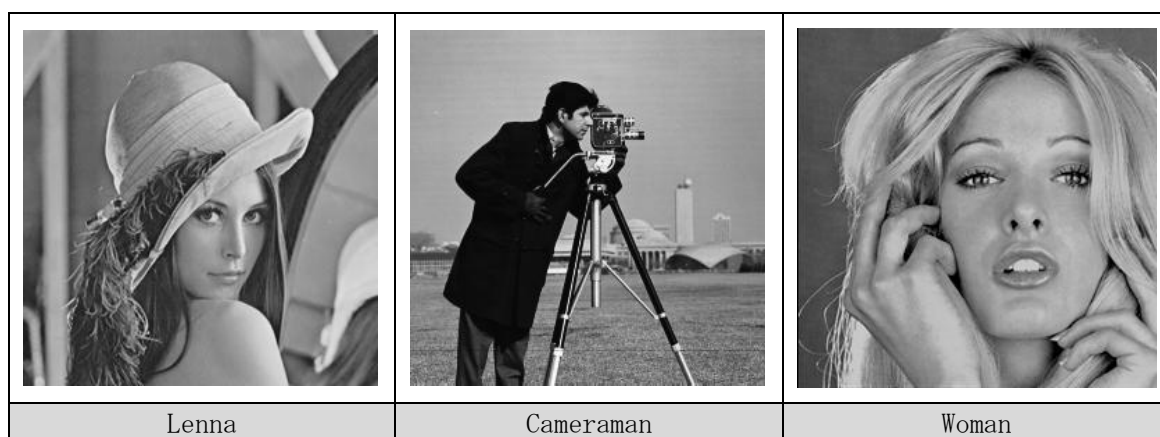


図 80 計測に使用した標準画像

標準画像「Lenna」でのずれ量計測結果

以下に計測した X 軸と Y 軸のずれ量を示す（図 81）。

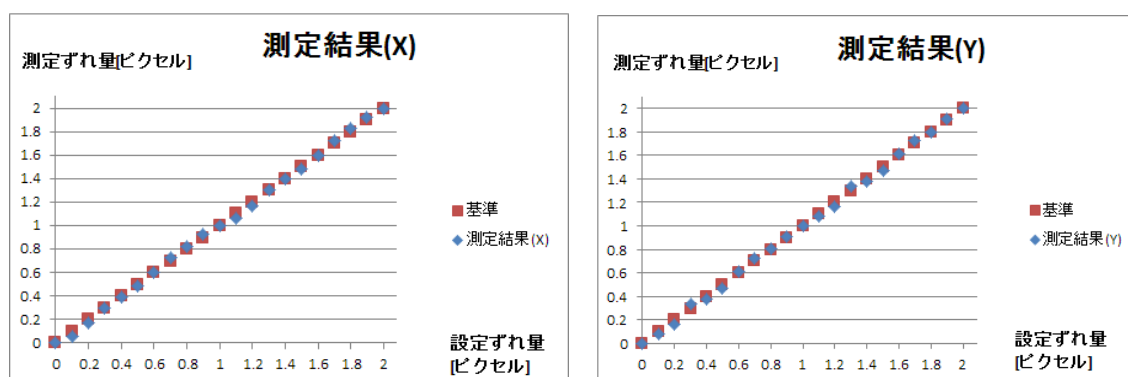


図 81 「Lenna」での X、Y 軸のずれ量測定結果

以下に設定したずれ量と計測したずれ量の誤差を示す（図 82）。

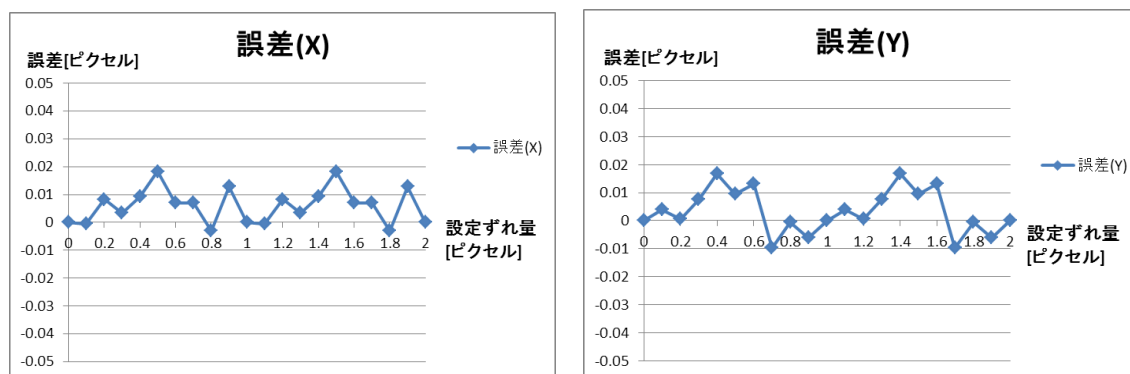


図 82 「Lenna」での X、Y 軸の測定誤差

図 82 の結果から、X、Y ともに誤差が 0.02 ピクセル内に収まっており、0.1 ピクセル単位のずれ量を計測できたことを確認できた。

標準画像「Cameraman」でのずれ量計測結果

以下に計測した X 軸と Y 軸のずれ量を示す（図 83）。

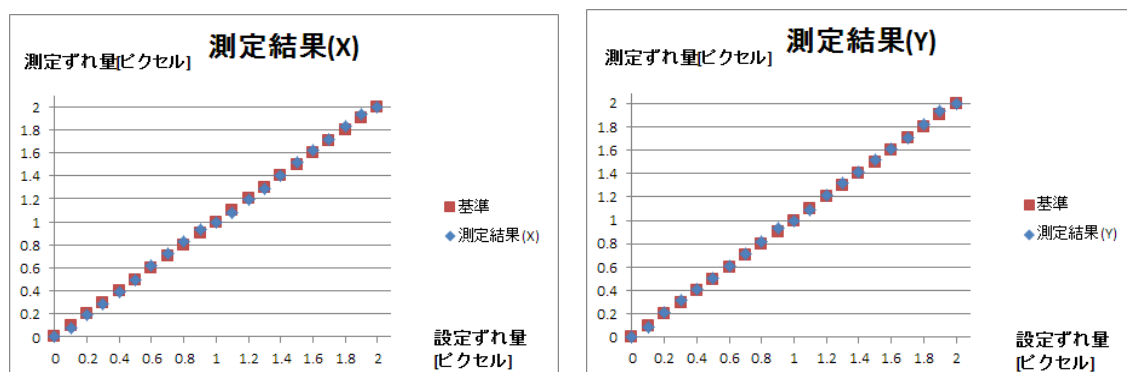


図 83 「Cameraman」での X、Y 軸のずれ量測定結果

以下に設定したずれ量と計測したずれ量の誤差を示す（図 84）。

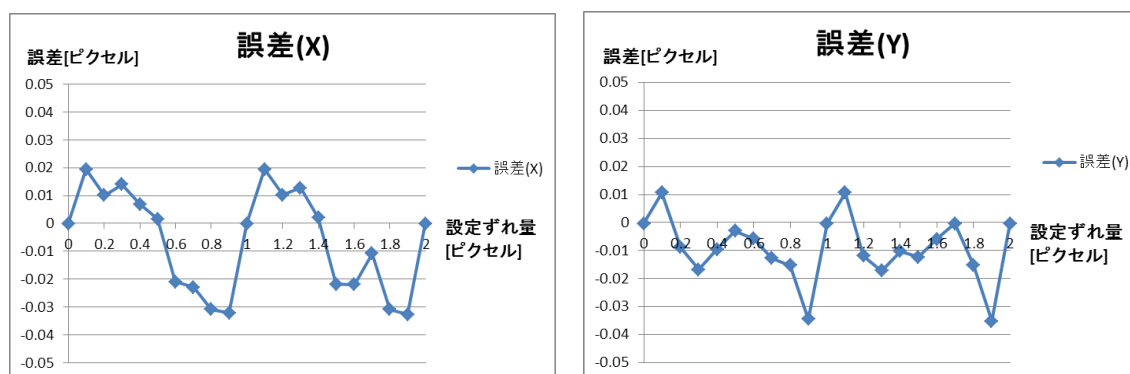


図 84 「Cameraman」での X、Y 軸の測定誤差

図 84 の結果から、X、Y ともに誤差が 0.04 ピクセル内に収まっており、0.1 ピクセル単位のずれ量を計測できたことを確認できた。

標準画像「Woman」でのずれ量計測結果

以下に計測した X 軸と Y 軸のずれ量を示す (図 85)。

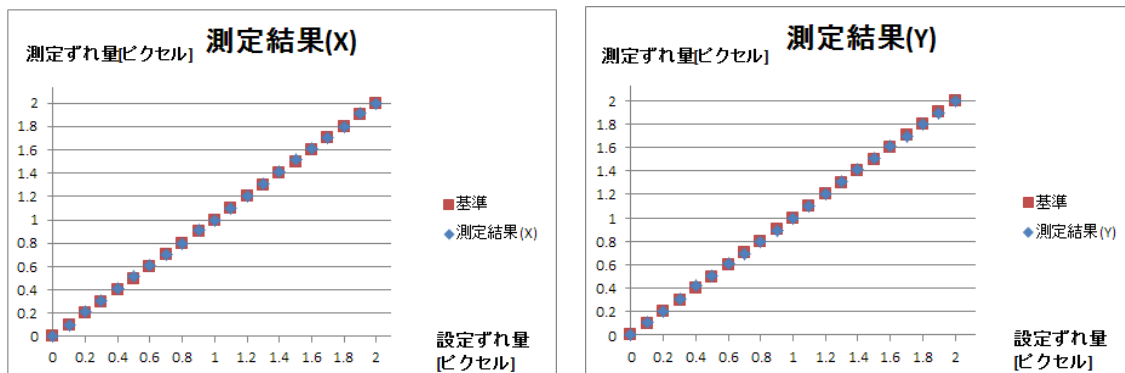


図 85 「Woman」での X、Y 軸のずれ量測定結果

以下に設定したずれ量と計測したずれ量の誤差を示す (図 86)。

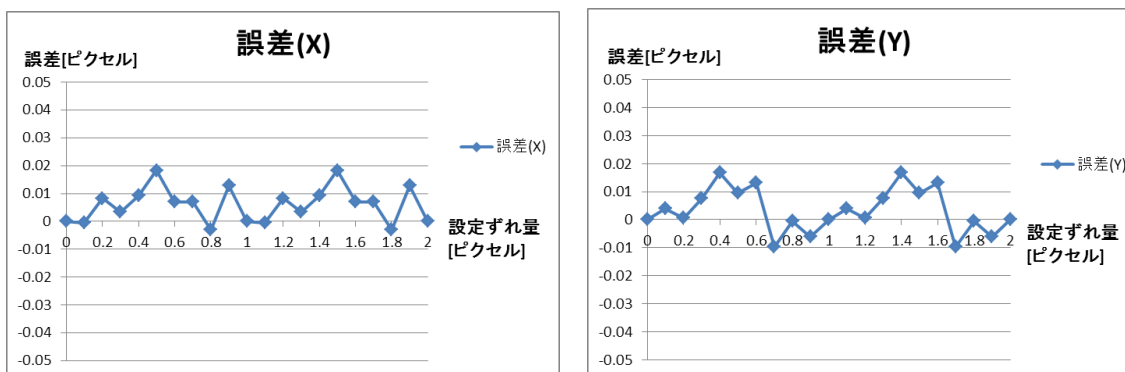


図 86 「Woman」での X、Y 軸の測定誤差

図 86 の結果から、X、Y ともに誤差が 0.02 ピクセル内に収まっており、0.1 ピクセル単位のずれ量を計測できたことを確認できた。

以上により、標準画像を使用した場合、カメラ画像のずれ量計測システムで正しく計測できることが検証できた。

今度は実際の装置のカメラを想定しデジタルカメラの実写画像を使用して、開発したカメラ画像のずれ量計測システムで正しく計測できるか検証を行った。

計測手順は以下の通り。

- ① デジタルカメラで連続撮影を行う
- ② POC でずれ量を計測
- ③ 画像を 10 倍に拡大
- ④ ②で計測したずれ量近傍で 1 ピクセルずつずらしながら 2 枚の画像の差分をとる
- ⑤ ②で計測したずれ量で、差分が最小になることを確認

使用した実写画像は以下の通り（図 87）。

No	写真 1	写真 2	撮影環境
1			カメラ : Canon EOS 7D レンズ : EF-S17-55mm F2.8 IS USM 絞り : f6.3 シャッター速度 : 1/320 秒 焦点距離 : 55mm ISO : 200 記録画素数 : 2592x1728 (スモール/ファイン) 画像中央部の 256x256 ピクセルを切り出し
2			カメラ : Canon EOS 7D レンズ : EF-S17-55mm F2.8 IS USM 絞り : f6.3 シャッター速度 : 1/5 秒 焦点距離 : 18mm ISO : 200 記録画素数 : 2592x1728 (スモール/ファイン) 画像中央部の 256x256 ピクセルを切り出し

図 87 計測に使用した実写画像

No. 1 写真の計測結果

ずれ量計測システムにより計測したずれ量は X:-0.2 ピクセル、Y:0.2 ピクセルであった。

10 倍に拡大した画像を 1 ピクセルずつずらして差分をとり、差が最も少なかったときの移動量の 1/10 が、ずれ量の検証結果である。拡大には Lanczos アルゴリズムを使用した。

最も差分が少なかった±1 の範囲の画像を下記に示す（図 88）。

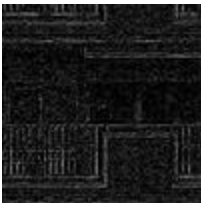
		X 方向移動量		
		-3	-2	-1
Y 方向移動量	+1			
	+2			
	+3			

図 88 X、Y 方向に移動した差分画像

X:-2 ピクセル、Y:2 ピクセル移動させたときの差分が最も少なかったので、移動量は X:-0.2 ピクセル、Y:0.2 ピクセルであり、ずれ量計測システムによる計測と一致した。

No. 2 写真の計測結果

ずれ量計測システムにより計測したずれ量は X:7.5 ピクセル、Y:0.3 ピクセルであった。

10 倍に拡大した画像を 1 ピクセルずつずらして差分をとり、差が最も少なかったときの移動量の 1/10 が、ずれ量の検証結果である。拡大には Lanczos アルゴリズムを使用した。

最も差分が少なかった±1 の範囲の画像を下記に示す（図 89）。

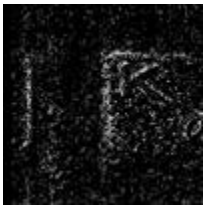
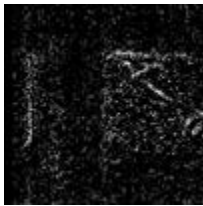
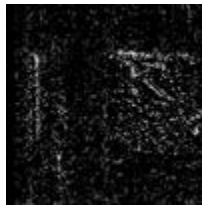
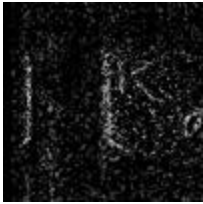
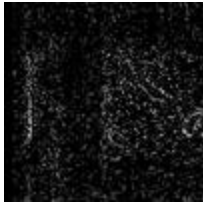
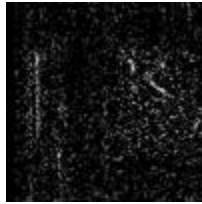
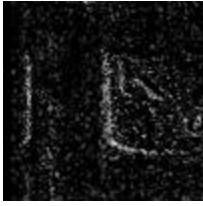
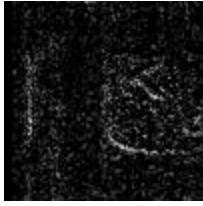
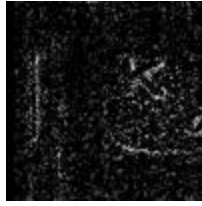
		X 方向移動量		
		+75	+76	+76
Y 方向移動量	+2			
	+3			
	+4			

図 89 X、Y 方向に移動した差分画像

X:75 ピクセル、Y:3 ピクセル移動させたときの差分が最も少なかったので、移動量は X:7.5 ピクセル、Y:0.3 ピクセルであり、ずれ量計測システムによる計測と一致した。

以上により、実際の装置のカメラを想定したデジタルカメラの実写画像を使用した場合、開発したカメラ画像のずれ量計測システムで正しく計測できることを検証できた。

次に、開発したカメラ画像のずれ量計測システムで正しく計測できるか検証を行った。高解像度光学系は 1 ユニット(4 エリア分)使用し、各エリア間で重なっている範囲を重ね合わせることで 1 枚の画像とし、重ね合わせた画像から計測したガラス基板の寸法と、既知の実測値とを比較することで評価を行った（図 90）。

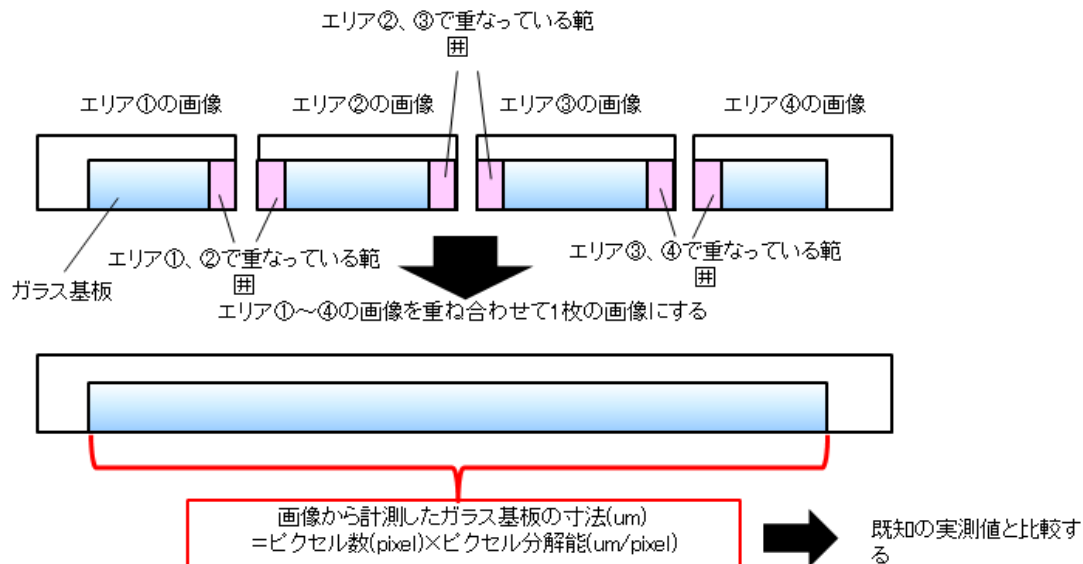


図 90 ずれ量計測の評価方法

検証には、実測値 199.9713mm のガラス基板を使用した（図 91、図 92）。

※各エリアはレンズやビームスプリッタの個体差などにより、倍率が微小に異なるため、ピクセル分解能にも微小な差が生じている

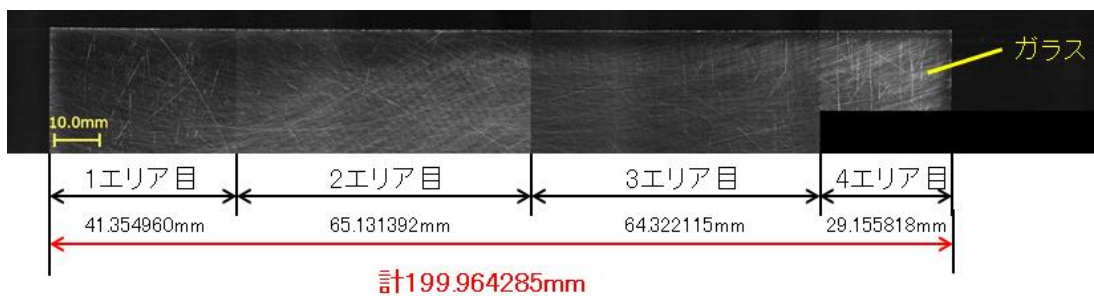


図 91 1ユニット分で撮像したガラス画像

エリア番号	ピクセル分解能	使用画素数	エリア内でのガラスの長さ
1	8.630um/pixel	4792pixel	41.354960mm
2	8.588um/pixel	7584pixel	65.131392mm
3	8.635um/pixel	7449pixel	64.322115mm
4	8.598um/pixel	3391pixel	29.155818mm
計		23216pixel	199.964285mm

図 92 各エリアの分解能と画素数

画像から計測したガラス基板の寸法は 1 エリア目が 41.354960mm、2 エリア目が 65.131392mm、3 エリア目が 64.322115mm、4 エリア目が 29.155818mm となり、合計で 199.964285mm となった。

以上により、実測値 199.9713mm との差が 7.015um となり、目標である位置ずれ量 8.5um（1 ピクセル範囲）以下を達成することができた。

3) 欠陥の検出システム開発

開発した高解像度光学系を使用して欠陥の画像を取得し、不良品の誤検出を 0.1%以内に抑えるソフトウェアを開発する。

欠陥の検出システムの構成を下記に示す（図 93）。

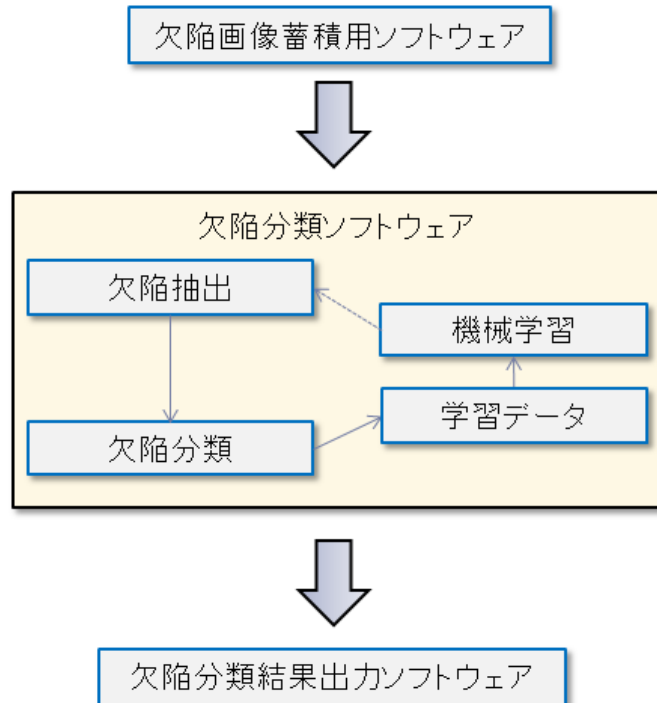


図 93 欠陥の検出システムの構成図

- ・ 欠陥画像蓄積用ソフトウェア：欠陥画像を蓄積するためのソフトウェア。
- ・ 欠陥抽出：確立した欠陥抽出手法をソフトウェアとして実装したもの。
欠陥の数値化を行う。
- ・ 欠陥分類：数値化した欠陥を分類し、検出結果と欠陥データを学習データとして保存する。
- ・ 機械学習：学習データを元に適切な欠陥抽出パラメータを求め、欠陥分類の精度を高める。
- ・ 学習データ：分類結果とパラメータを蓄積したデータ。
- ・ 欠陥分類結果出力ソフトウェア：取得した欠陥データを表示するソフトウェア。

欠陥画像蓄積用ソフトウェアのフローは下記の通りである（図 94）。

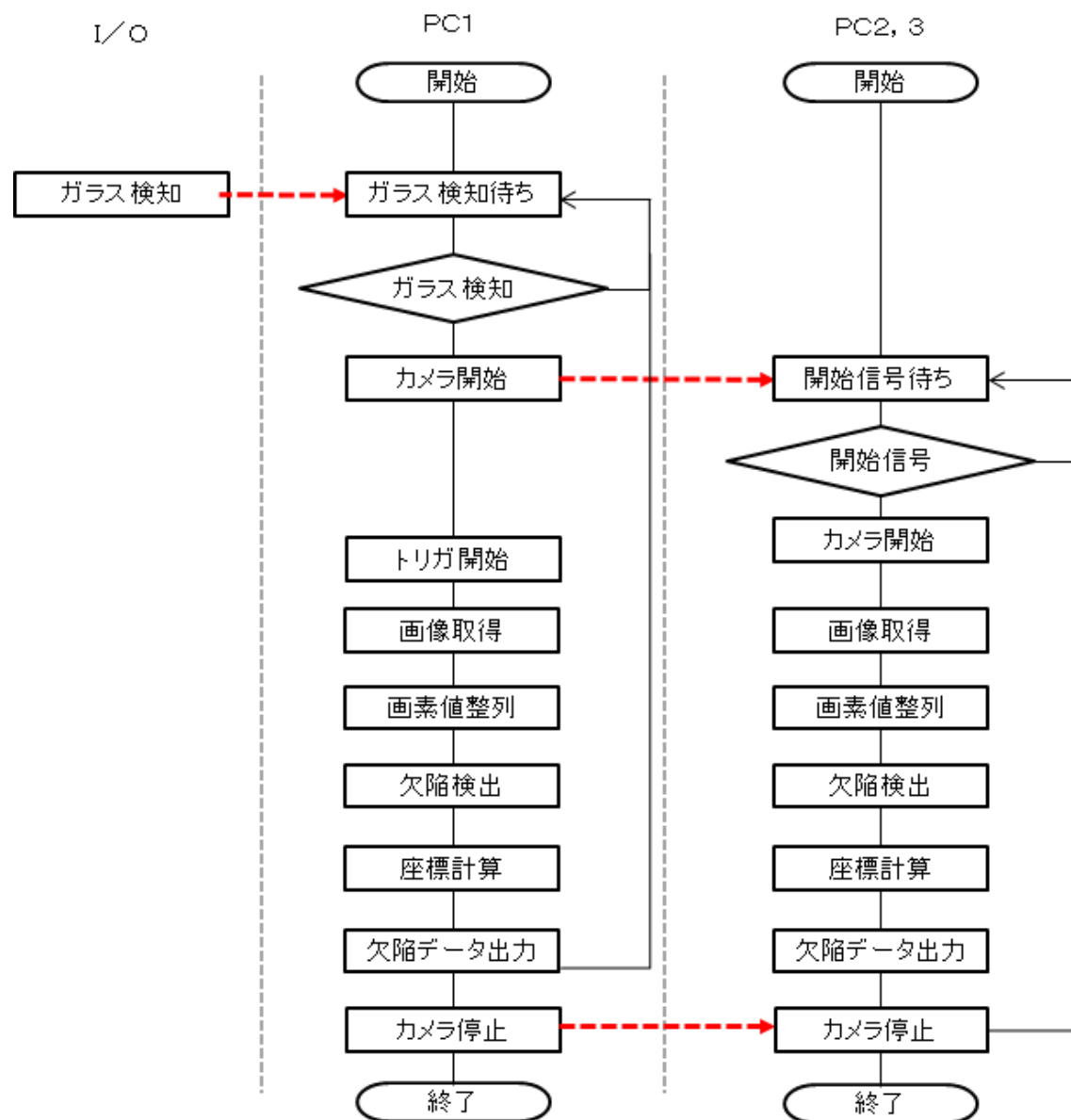


図 94 欠陥画像蓄積用ソフトウェアのフロー

PC を計 3 台使用し、ガラスが検知されると PC1 から PC2、3 へそれぞれ開始信号を送り、カメラを制御する。欠陥検出は各 PC で行い、欠陥検出が完了すると、PC1 から PC2、PC3 へ停止信号を送り、次のガラス検査の待ち状態となる。

高解像度光学系により、TFT グレードのキズなどの低輝度の欠陥を撮像できるようになった反面、カレットなどの高輝度の欠陥が露出オーバーしてしまう状態となった（図 95）。

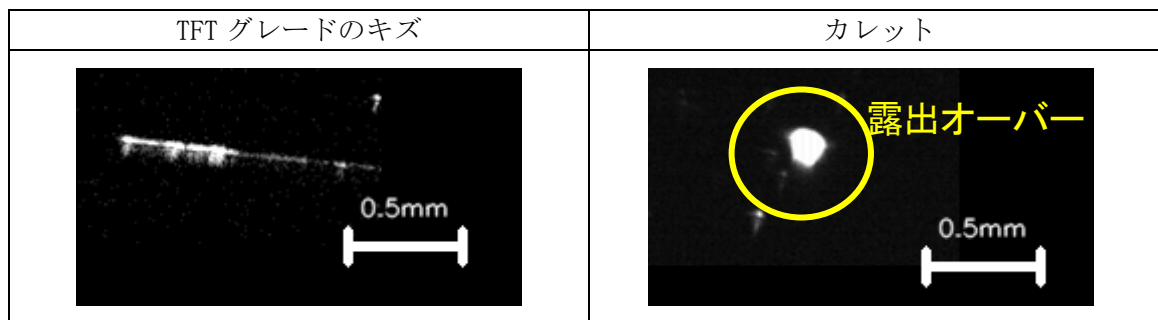


図 95 高解像度光学系で撮像した画像

露出オーバーすると、欠陥の情報を詳細に取得することができず、分類ができなくなるため、低輝度の欠陥が撮像できる状態で、かつ、高輝度の欠陥を露出オーバーしないで撮像する必要がある。そこで、以下のように 1 視野の撮像について、露光時間を調整し撮像するソフトウェアを開発した（図 96、図 97）。

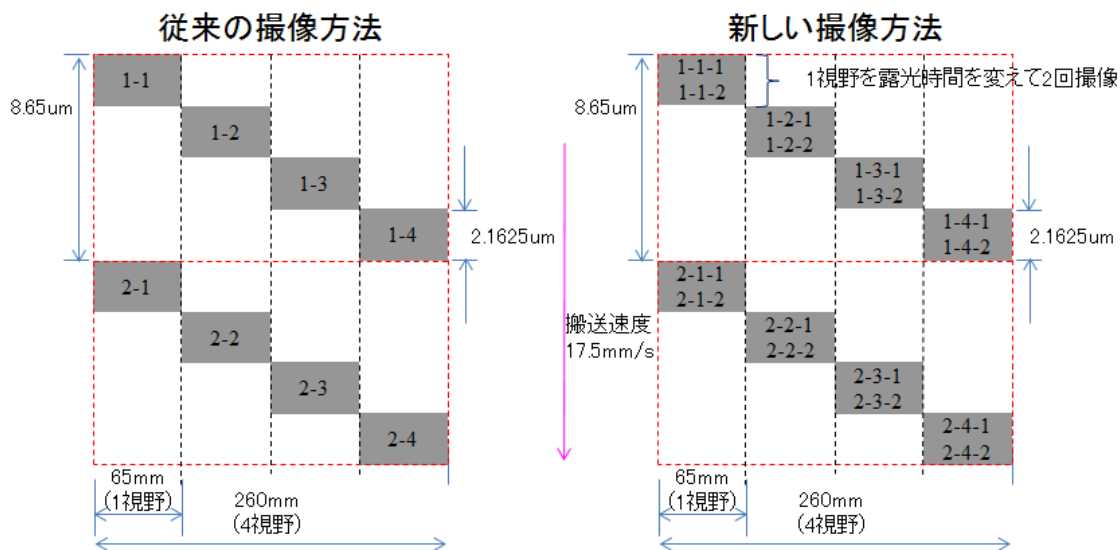
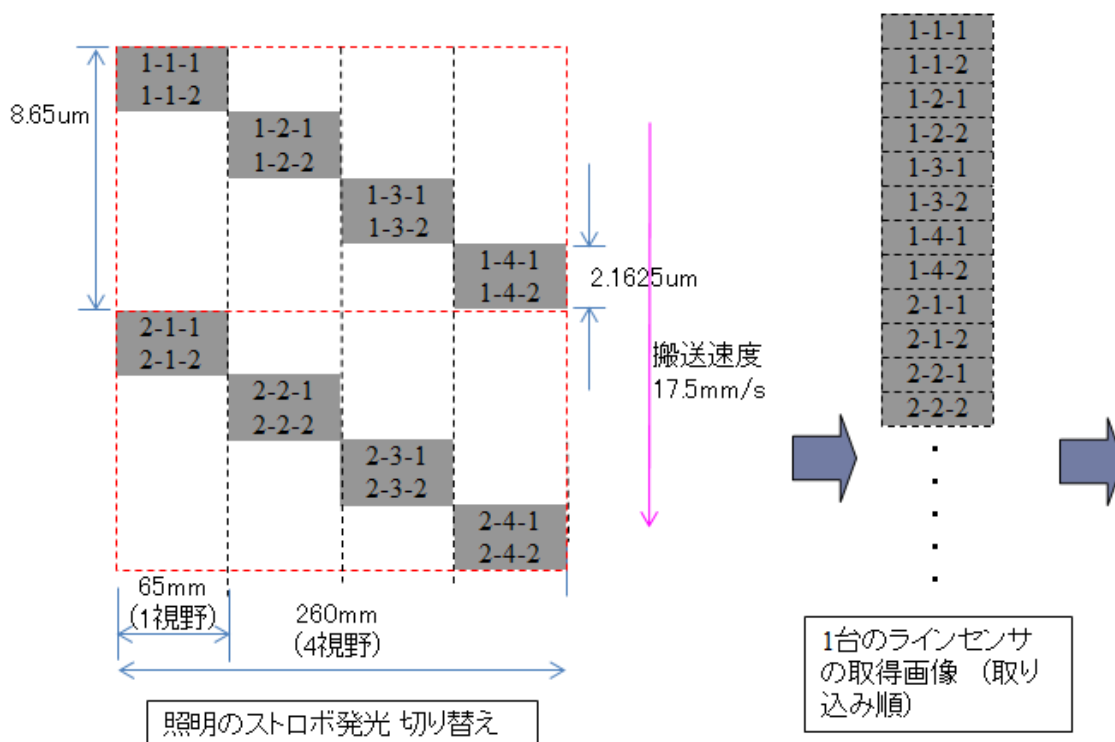


図 96 従来の撮像方法と新しい撮像方法



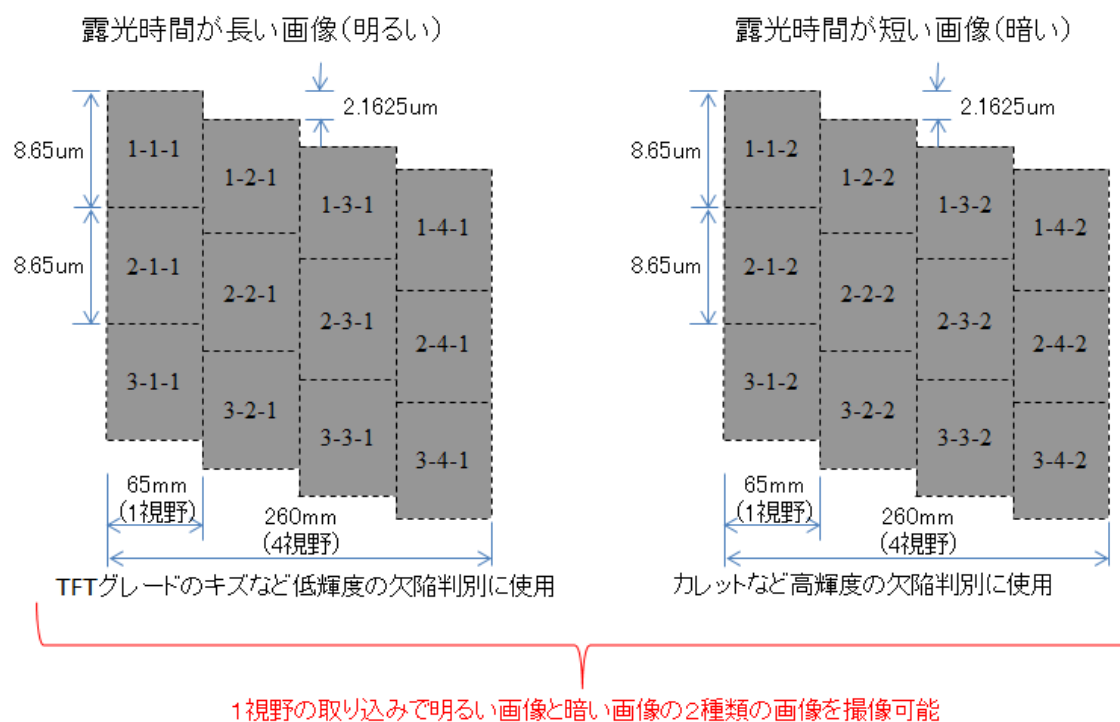


図 97 露光時間を調整し撮像する方法

上記のように露光時間を調整し撮像することで、以下のようなことが可能となった。

1. TFT グレードのキズなどの低輝度の欠陥は露光時間を長くすることで明るく撮像する（撮像できる状態にする）
2. カレットなどの高輝度の欠陥は露光時間を短くすることで暗く撮像する（露出オーバーを回避する）

実際に露光時間を調整し撮像した画像を以下に示す（図 98）。

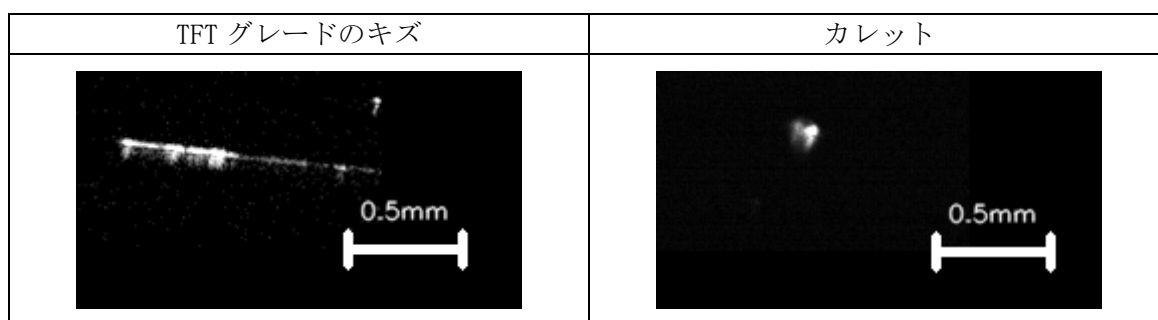


図 98 実際に露光時間を調整し撮像した画像

欠陥画像蓄積用ソフトウェアのスクリーンは下記の通りである（図 99）。



図 99 欠陥画像蓄積用ソフトウェアのスクリーンショット

欠陥画像蓄積用ソフトウェアを使用し、G5 サイズ(1300mm×1100mm) のガラス基板を搬送し、3 台の PC で計 5 個のユニットの欠陥画像を蓄積できることを確認した。

欠陥検出については欠陥画像蓄積用ソフトウェアを使用して 100%検出可能となった。

欠陥分類ソフトウェアのフローは下記の通りである（図 100）。

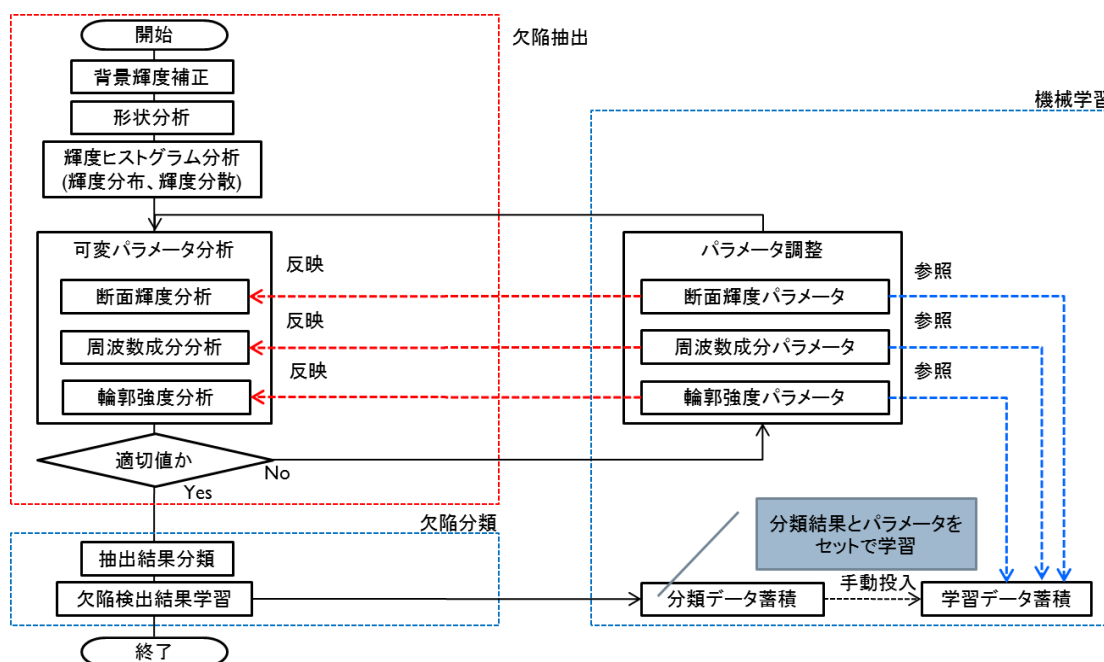


図 100 欠陥分類ソフトウェアのフロー

欠陥分類ソフトウェアでは、下記の条件を満たす処理を実装した。

- ① 必要な機能は OpenCV や FFTW といったライブラリと同等であること
- ② ユーザーインターフェースを、欠陥抽出用に設計する。
ライブラリは多機能である反面、ユーザーインターフェースが煩雑なものがあるので、利用性を考慮した設計とする。
- ③ エラー処理を組み込む
ライブラリでは、回復不可能なエラー処理が考慮されていない。
欠陥抽出では、メモリー不足などの回復不能エラーを検出し、ログへの記録と、異常終了せずに上位処理へステータスを返すものとする。

欠陥抽出の実装の確認は、①の機能の確認で検証した。
 欠陥抽出に使う画像処理アルゴリズムを下記に示す（図 101）。

欠陥抽出手法	画像処理アルゴリズム
背景輝度補正	統計処理
形状分析	2 値化 輪郭抽出 ガウシアンフィルタ 楕円フィッティング Sobel フィルタ Canny フィルタ ハフ変換
輝度ヒストグラム	統計処理 2 値化 輪郭抽出 膨張・収縮 塗りつぶし、反転
周波数分析	FFT 多項式近似
断面輝度分析	FFT 多項式近似
輪郭強度分析	Sobel フィルタ 統計処理 多項式近似

図 101 欠陥抽出手法と画像処理アルゴリズム一覧

1024 階調読込と統計処理

高解像度光学系で取得した 1 ピクセル 10 ビット(1024 階調)を読み込む (図 102)。

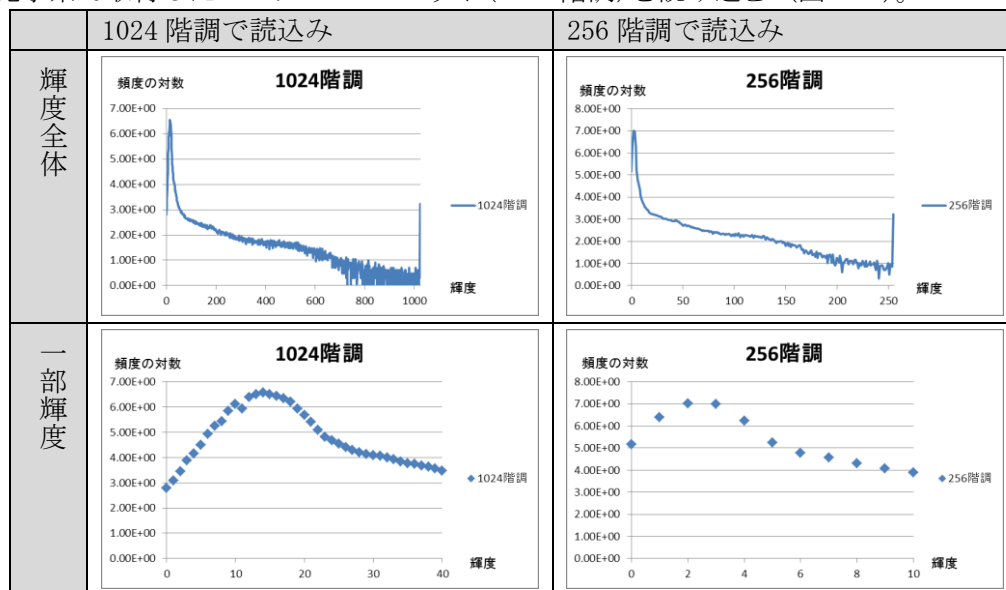


図 102 1024 階調と 256 階調のヒストグラム

高解像度光学系で取得した 1 ピクセル 10 ビット(1024 階調)の画像をそのまま読み込んで処理できるよう実装することにより、高精度な画像処理が可能となる。

実装した「統計処理」と、excel による計算結果を比較した (図 103)。

	Excel	実装
最頻値	20	20
平均	24.298477	24.298478
標準偏差	44.207256	44.207256

図 103 実装と excel の統計処理結果

実装した統計処理は excel による計算とほぼ同じ値を取り、同等であることが確認できた。

2 値化

2 値化は輝度ヒストグラム分析と輪郭検出で使用する。

2 値化とは連続階調で表現された画像を、特定の階調の値をしきい値として扱い、白と黒の 2 階調の画像にする処理のことである。

実装結果の検証は、元画像（図 104）に対して実装した 2 値化と OpenCV の 2 値化の処理のしきい値を変えて行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 105）。



図 104 元画像

	実装した 2 値化	OpenCV の 2 値化
しきい値=100		
しきい値=180		

図 105 実装と OpenCV の 2 値化結果画像

実装した 2 値化と OpenCV の 2 値化の結果が同じ見た目の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

輪郭抽出

輪郭検出は、輝度ヒストグラムと楕円フィッティングで使用する。

輪郭検出とは同一階調で塗りつぶされている範囲の輪郭を検出する処理のことである。

実装結果の検証は、元画像（図 106）に対して実装した輪郭検出と OpenCV の輪郭検出の処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 107）。



図 106 元画像
(lenna をしきい値 180 で 2 値化)

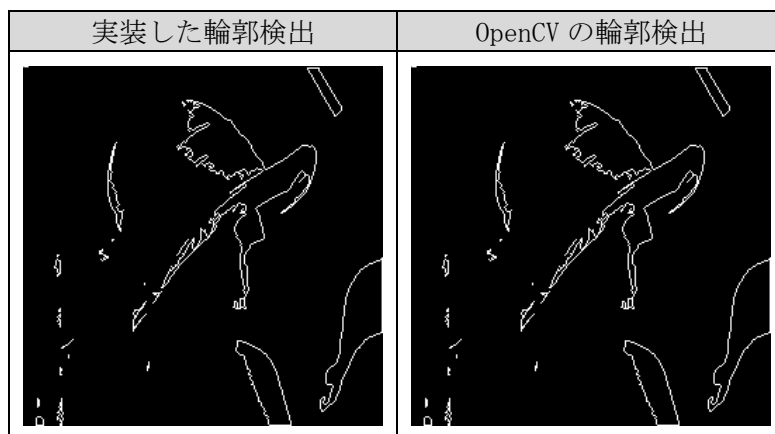


図 107 実装と OpenCV の輪郭検出結果画像

実装した輪郭検出と OpenCV の輪郭検出の結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

膨張・縮小

膨張・縮小は、欠陥のマスク画像作成で使用する。

膨張とは指定された方向に 1 ピクセル単位で画像を拡張する処理のことである。また縮小は指定された方向に 1 ピクセル単位で画像を縮小する処理のことである。

下記に、テストパターンと期待する結果を示す（図 108）。

テストパターン
背景：白、画像：黒

4方向膨張1回

4方向膨張2回

8方向膨張1回

8方向膨張2回

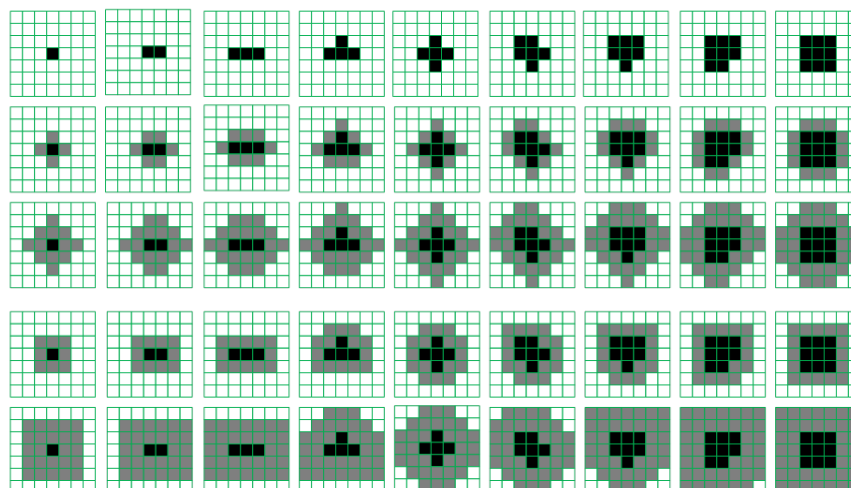


図 108 膨張・縮小のテストパターンと期待する結果

膨張の実装結果の検証は、テストパターン（図 109）に対して実装した膨張処理を 4 方向または 8 方向へ行い、テスト結果が想定したパターン（図 110）になることで行った。

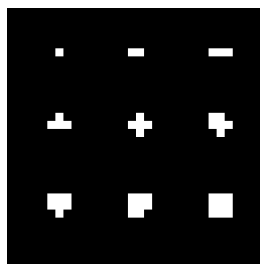


図 109 テストパターン

	膨張 1 回	膨張 2 回
4 方向		
8 方向		

図 110 膨張処理結果

実装した膨張処理の結果が期待する結果（図 108）と同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

縮小の実装結果の検証は、テストパターン（図 111）に対して実装した縮小処理を 4 方向または 8 方向へ行い、テスト結果が想定したパターン（

図 112）になることで行った。

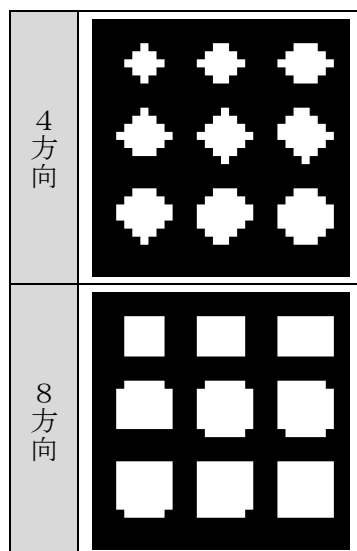


図 111 テストパターン（期待する結果の 2 回膨張を使用）

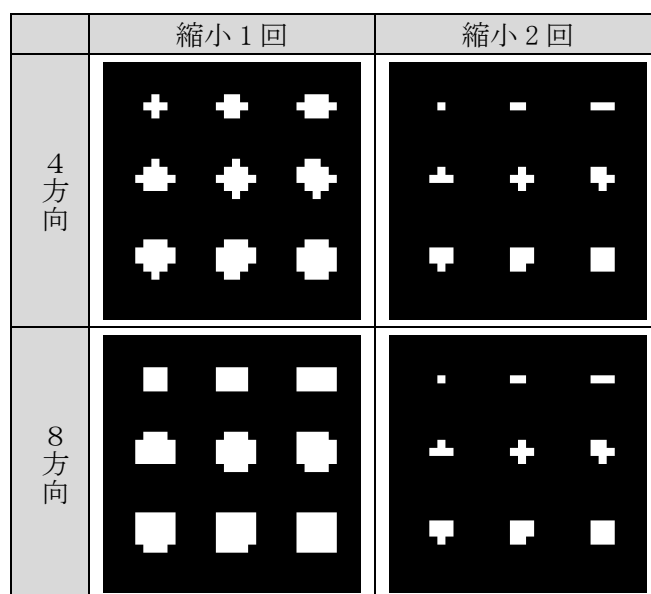


図 112 縮小処理結果

実装した縮小処理の結果が期待する結果（図 108）と同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

塗りつぶし、反転

塗りつぶしと反転は、輝度ヒストグラムで使用する。

塗りつぶしとは特定の色で囲まれている閉領域の内側または外側を同一色にする処理のことである。また、反転は各ピクセルの値を階調のスケール上で反対の値に変換することである。

実装結果の検証は、元画像（図 113）に対して実装した塗りつぶし、反転と Windows アクセサリ「ペイント」の「塗りつぶし」「反転」の処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 114）。



図 113 元画像(前ページの輪郭画像)

	実装の結果	ペイントの結果
背景を「塗りつぶし」		
反転		

図 114 実装とペイントの輪郭検出結果画像

実装した「塗りつぶし」、「反転」と Windows アクセサリ「ペイント」の「塗りつぶし」、「反転」の結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

Sobel フィルタ

Sobel フィルタは、輪郭強度分析とハフ変換で使用する。

Sobel フィルタとは輪郭を検出する手法のひとつ。

実装結果の検証は、元画像（図 115）に対して実装した Sobel フィルタと OpenCV の Sobel フィルタの処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 116）。



図 115 元画像

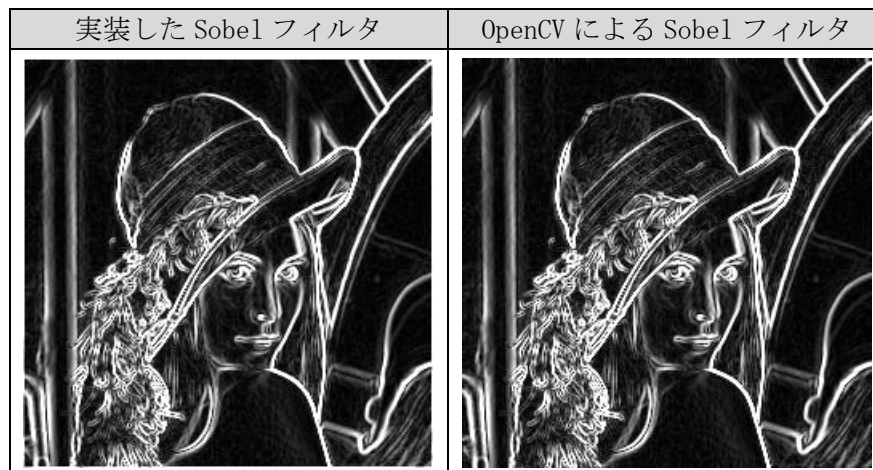


図 116 実装と OpenCV の Sobel フィルタ結果画像

テスト結果は下記の条件で作成した。

- ・縦、横に Sobel フィルタをかける
- ・それぞれの結果の二乗平均を描画する

実装した Sobel フィルタと OpenCV の Sobel フィルタの結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

多項式近似

多項式近似は、輝度ヒストグラム、輪郭強度分析、断面輝度分析、周波数分析で使用する。

多項式近似とは関数や離散的に与えられたデータを多項式を用いて近似することである。

実装結果の検証は、検証用データ（図 117）に対して、実装した多項式近似と excel による多項式近似処理の結果が同等の結果が出力されることを確認することで行った（図 118）。

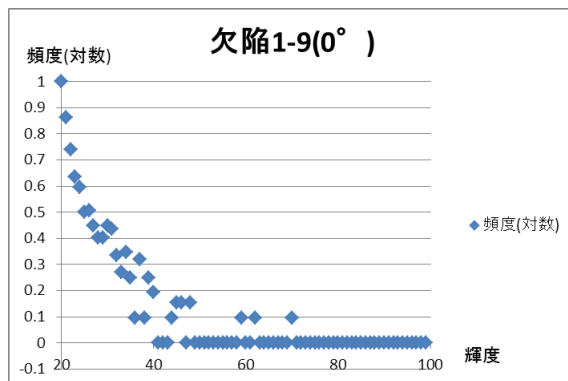


図 117 検証用データ

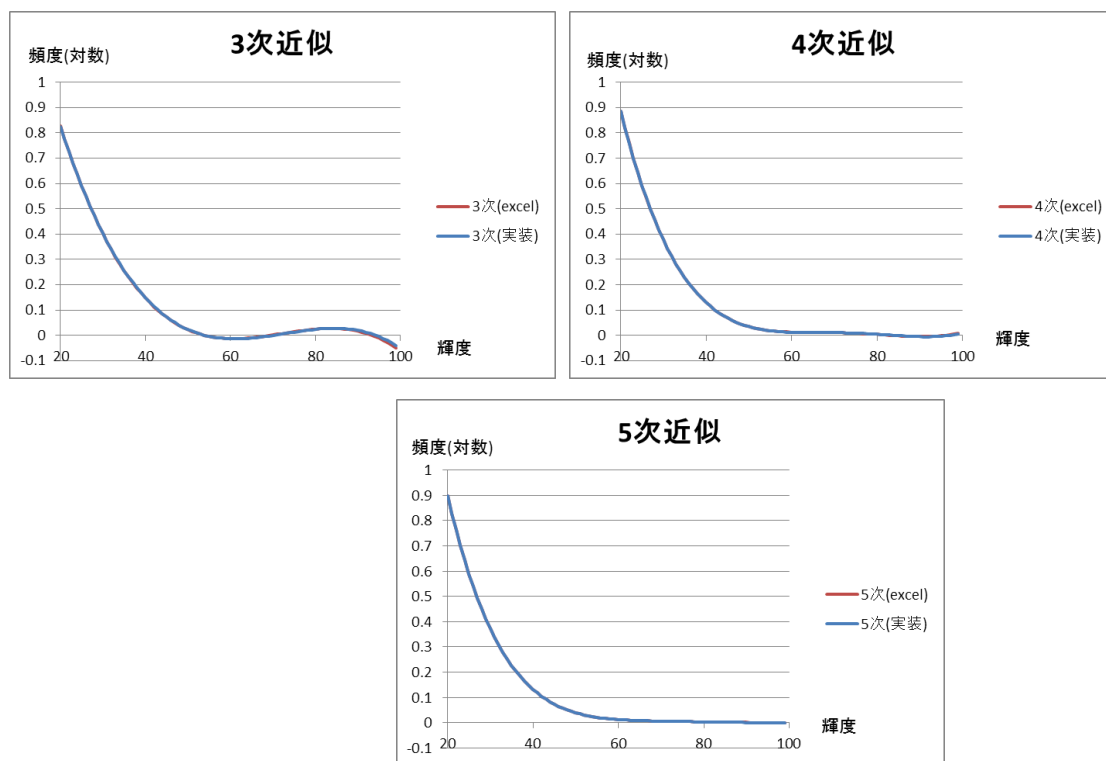


図 118 実装と excel の処理結果

実装した多項式近似と excel の多項式近似の結果が同様の値を取り、機能として同等であることが確認できた。

2次元 FFT

FFT は周波数分析で使用する。

FFT とは高速フーリエ変換といい、離散フーリエ変換（Discrete Fourier Transform、DFT）を計算機上で高速に計算するアルゴリズム。

実装結果の検証は、元画像（図 119）に対して実装した FFT と FFTW の処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 120）。



図 119 元画像

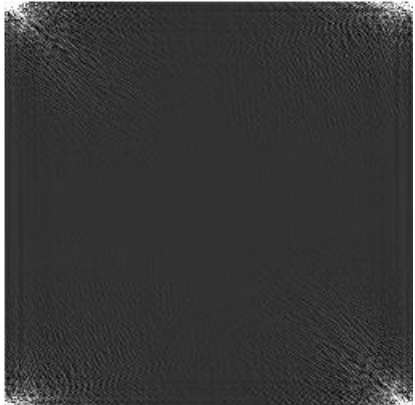
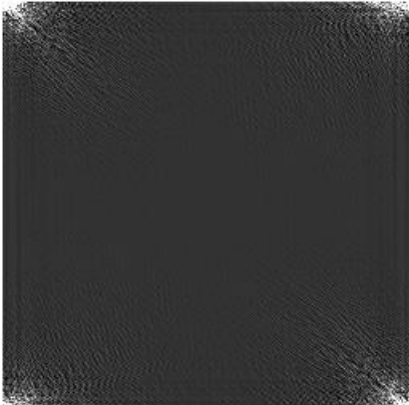
実装した 2 次元 FFT	FFTW
	

図 120 実装と FFTW の処理結果

テスト結果は下記の条件で作成した。

- ・ 四隅が周波数=0
- ・ FFT 結果は、実部と虚部の二乗平均で描いた

実装した FFT と FFTW の結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

FFT は実装の仕方によって処理速度が大きく変わる。

処理速度は FFTW を目標とし、差を 10%以内に近づける（図 121）。

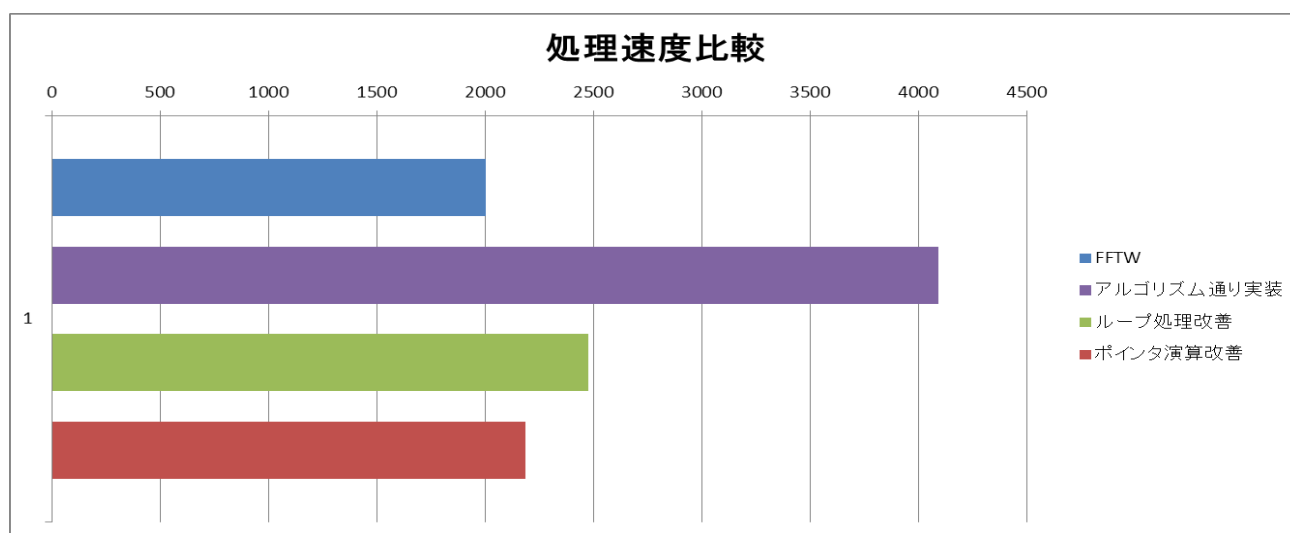


図 121 FFT 処理速度比較

8192x8192[ピクセル]の画像を2次元FFTしたときの処理時間。単位は[ms]。
当初、アルゴリズム通り実装したときは、FFTWの倍以上の時間がかかったが、最適化によりFFTWより9%遅い程度まで改善した。

実装の処理速度が目標値以内であることが確認できた。

ガウシアンフィルタ

ガウシアンフィルタは、楕円フィッティングで使用する。

ガウシアンフィルタとはノイズ除去を行うアルゴリズムのひとつである。

実装結果の検証は、元画像（図 122）に対して実装したガウシアンフィルタと OpenCV のガウシアンフィルタの処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 123）。



図 122 元画像

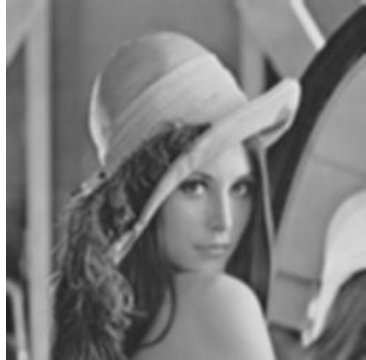
実装した ガウシアンフィルタ	OpenCV による ガウシアンフィルタ
	

図 123 実装と OpenCV のガウシアンフィルタ結果画像

テスト結果は下記の条件で作成した。

- ・カーネルサイズ=5、 $\sigma=1.5$
- ・画像端の輪郭の有無は、画像の外挿処理の違い

実装したガウシアンフィルタと OpenCV のガウシアンフィルタの結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

楕円フィッティング

楕円フィッティングは、楕円検出と断面輝度分析で使用する。

楕円フィッティングとは、輪郭の数点から近似楕円を求めるアルゴリズムである。

実装結果の検証は、テストデータ（図 124）に対して実装した楕円フィッティングの処理を行い、excelで求めた計算結果と同等の結果が出力されることを確認することで行った（図 125）。

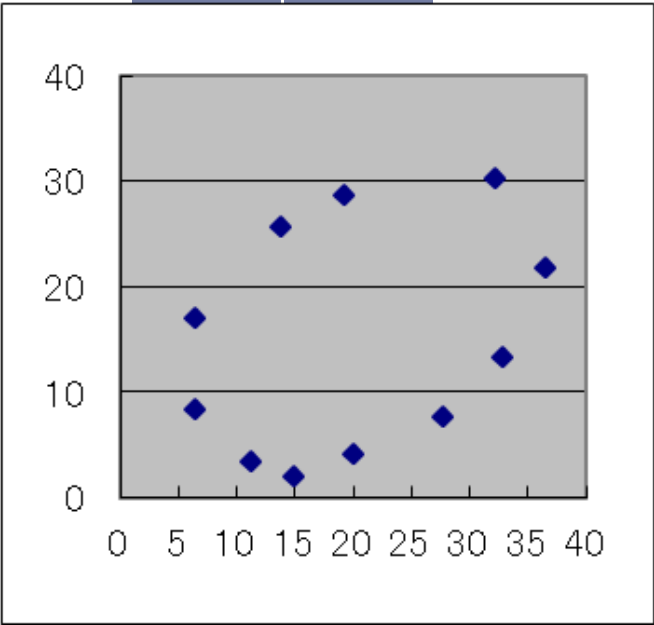
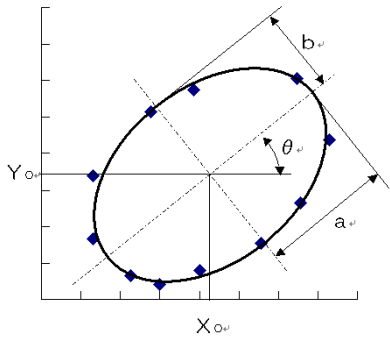


図 124 テストデータ

	実装による計算結果	期待値
X0	21.008923	21.00892
Y0	16.886101	16.8861
θ	39.312852[deg]	39.31285[deg]
A	17.741964	17.74196
b	11.297043	11.29704

図 125 実装結果と期待値



実装した楕円フィッティングと excel の計算の結果が同様の値になり、機能として同等であることが確認できた。

Canny フィルタ

Canny フィルタは、ハフ変換で使用する。

Canny フィルタとは、輪郭を検出する手法のひとつ。ガウシアンフィルタで平滑化、Sobel フィルタ、輪郭の細線化、ヒステリシス閾値処理のステップを踏むことで高い性能のエッジ検出を可能にしている。

実装結果の検証は、元画像（図 126）に対して実装した Canny フィルタと OpenCV の Canny フィルタの処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 127）。



図 126 元画像

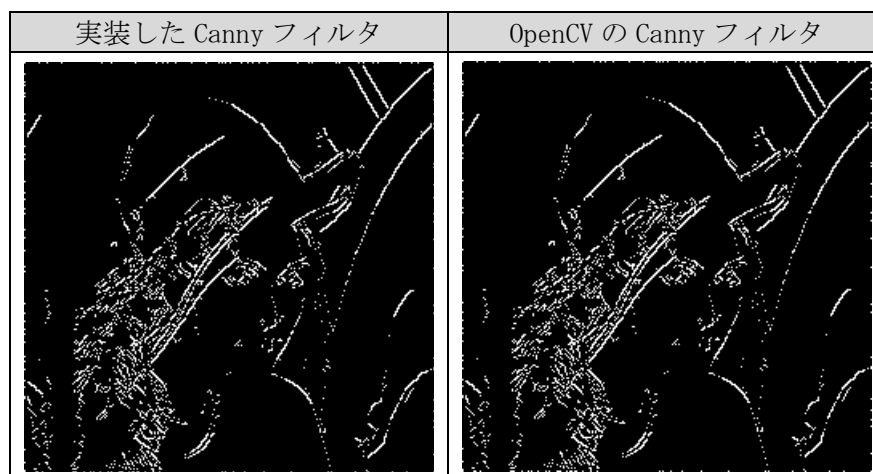


図 127 実装と OpenCV の Canny フィルタ結果画像

実装した Canny フィルタと OpenCV の Canny フィルタの結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

ハフ変換

ハフ変換は、直線検出で使用する。

ハフ変換とは、画像から直線や円を検出するアルゴリズムである。

実装結果の検証は、元画像（図 128）に対して実装したハフ変換と OpenCV のハフ変換の処理を行い、同等の画像が出力されることを確認することで行った（図 129）。



図 128 元画像

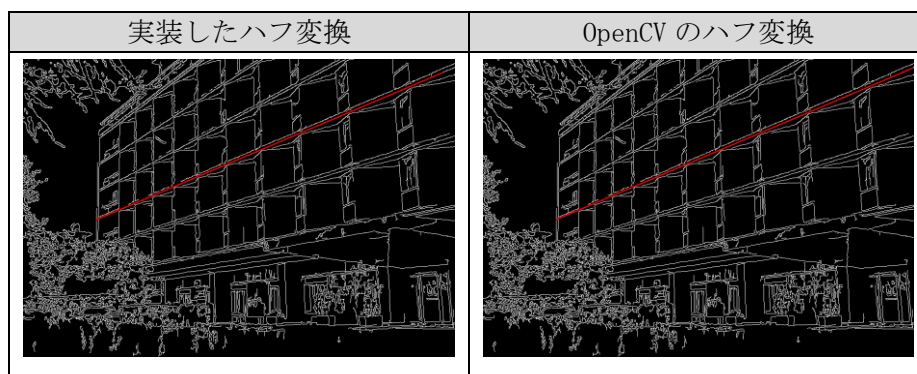


図 129 実装と OpenCV のハフ変換結果画像

実装した Canny フィルタと OpenCV の Canny フィルタの結果が同様の画像になり、機能として同等であることが確認できた。

背景輝度補正

マイクロスコープの画像では「トップハット」アルゴリズムを用いた輝度補正が効果的であったが、高解像度光学系の画像では「統計処理」(最頻値、分散、平均)を組み合わせた輝度補正が効果的であった。輝度補正前と輝度補正後の画像を下記に示す(図 130)。

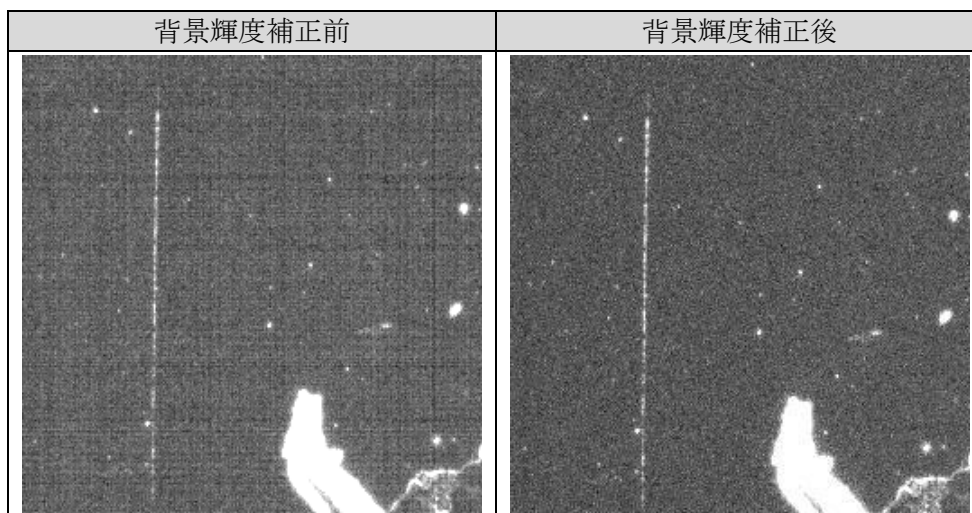


図 130 背景輝度補正前と後の比較

輝度ヒストグラム

欠陥の観察と特徴抽出手法の確立では輝度値の比較を行うことは出来なかったが、高解像度光学系の画像は撮影条件が一定なので、輝度値の比較を行うことが可能である(図 131)。そのため、輝度ヒストグラムで数値化する特徴情報の種類が増えることにより、分類精度の向上が図れる。

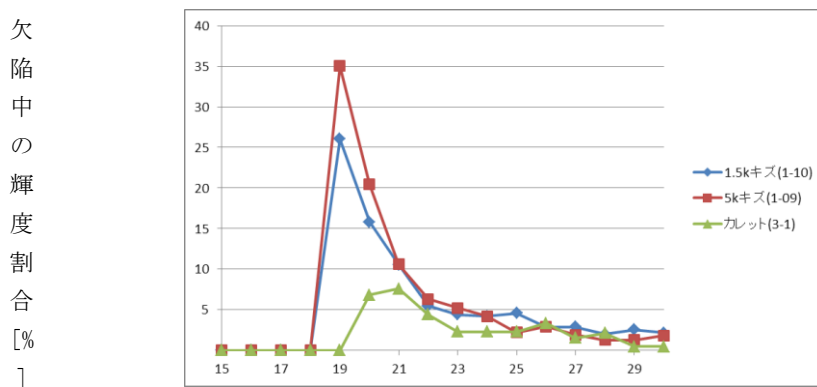


図 131 欠陥毎の輝度ヒストグラム

HALCON での特徴抽出手法の再評価

マイクロスコープ画像で検証した 4 種類の分析手法について、同一の欠陥を実際のカメラで撮影した画像を用いて再評価した。実写画像とマイクロスコープ画像の例を下記に示す(図 132)。

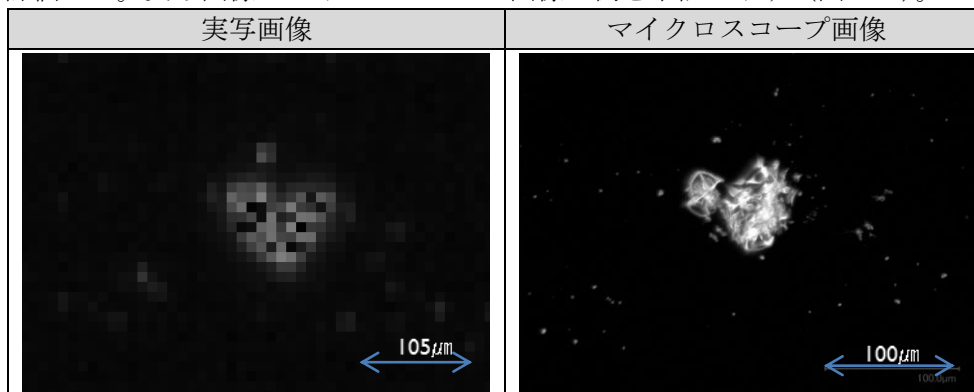


図 132 実写画像とマイクロスコープ画像

評価に使用した HALCON は検査システムで一般的な画像処理ソフトウェアである。
下記が対象の分析手法である。

- ① 輝度ヒストグラム分析
- ② 輪郭強度分析
- ③ 周波数分析
- ④ 断面輝度分析

検証データ

検証に使用した欠陥画像の数を下記に示す（図 133）。

欠陥の種類	欠陥データ数（欠陥数）
線キズ	32 (11)
点キズ	6 (2)
面キズ	3 (1)
カレット	12 (4)
気泡	3 (1)

図 133 検証に使用した欠陥画像数

※同じ欠陥を 0 度、45 度、90 度と角度を変えた画像を分析した。

欠陥画像から欠陥部分を目視で確認できないものについては分析対象から除外した。

輝度ヒストグラム分析

欠陥画像の輝度ヒストグラムから標準偏差について着目した分析である。

輝度ヒストグラム分析のフローは下記の通りである（図 134）。

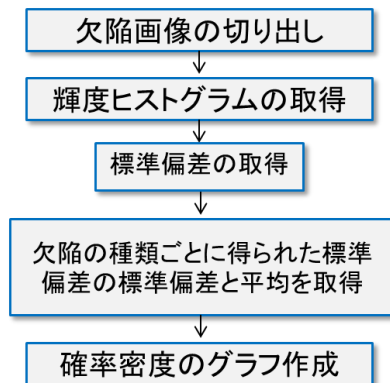


図 134 輝度ヒストグラム分析処理フロー

実画像とマイクロスコープでの輝度ヒストグラム分析の結果を下記に示す（図 135）。

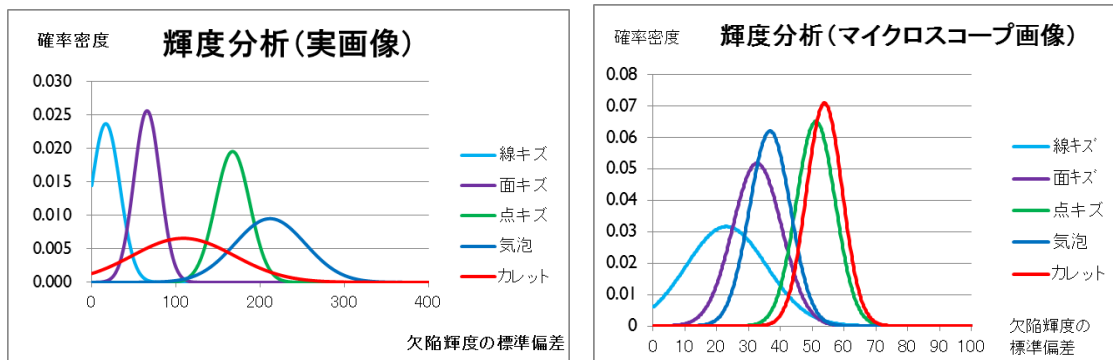


図 135 輝度ヒストグラム分析結果

マイクロスコープ画像とはグラフの概形が異なるが、より欠陥ごとに値の分布がわかれていたため、分類に使える特徴と確認できた。

断面輝度分析

欠陥を貫くある線分に沿った欠陥の輝度（断面輝度）に着目した分析である。

断面輝度分析のフローは下記の通りである（図 136）。

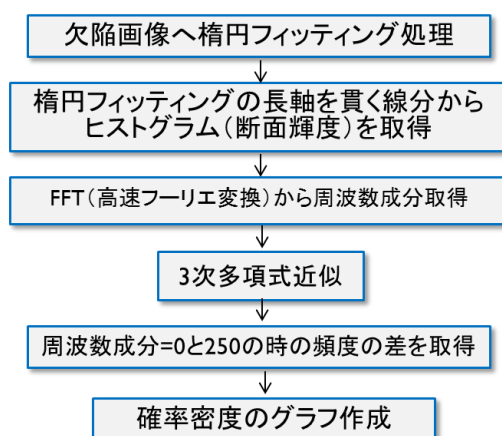


図 136 断面輝度分析処理フロー

実画像とマイクロスコープでの断面輝度分析の結果を下記に示す（図 137）。

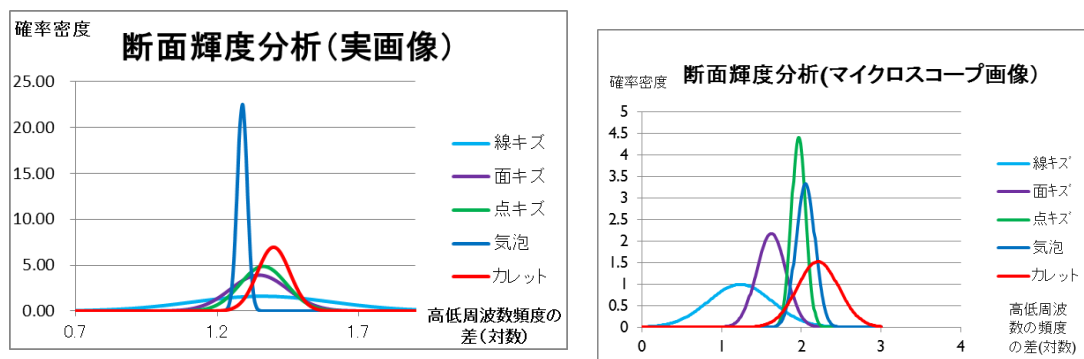


図 137 断面輝度分析結果

マイクロスコープ画像とはグラフの概形が異なるが、気泡の確率密度が高く気泡の判別ができる特徴であると確認できた。

さらに高低周波数頻度値パラメータを変化させた場合の、断面輝度分析の結果を下記に示す（図 138）。

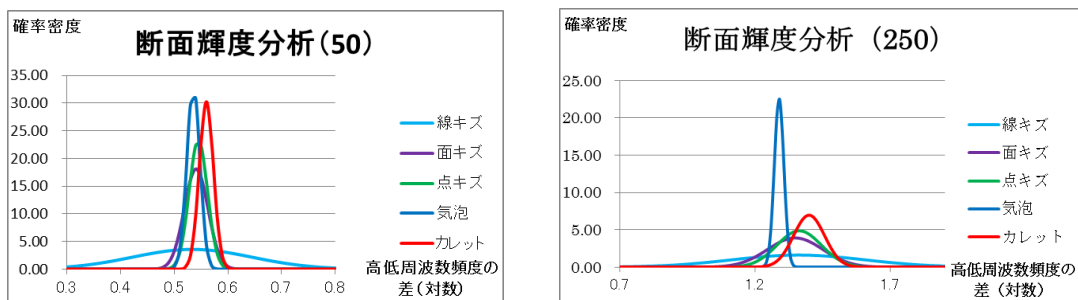


図 138 断面輝度分析のパラメータ変更による結果

高低周波数頻度値パラメータを変化させることで、線キズ以外の確率密度や気泡だけの確率密度を高められることが確認できた。

周波数分析

欠陥画像の FFT（高速フーリエ変換）による分析である。

周波数分析のフローは下記の通りである（図 139）。

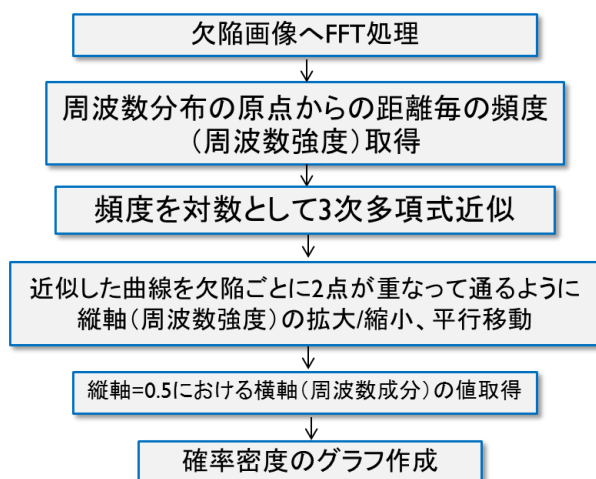


図 139 周波数分析処理フロー

実画像とマイクロスコープでの周波数分析の結果を下記に示す（図 140）。

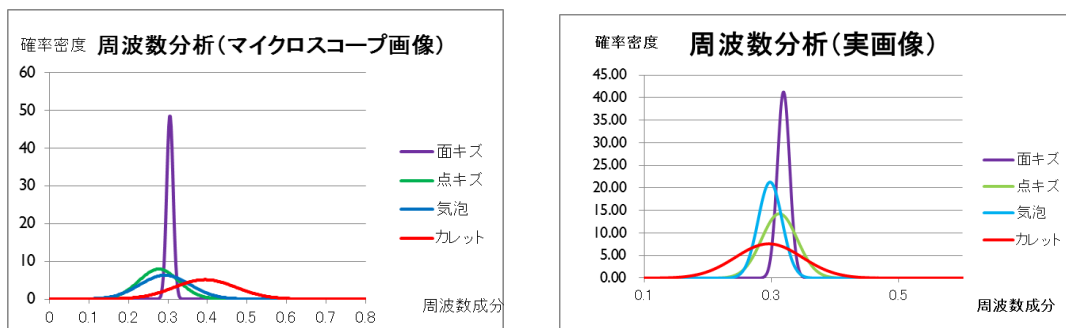


図 140 周波数分析結果

図 140 の結果から、マイクロスコープ画像と実画像では同様に面キズの確率密度が高く面キズの判別ができる特徴であると確認できた。

さらに特徴抽出頻度パラメータを変化させた場合の、周波数分析の結果を下記に示す（図 141）。

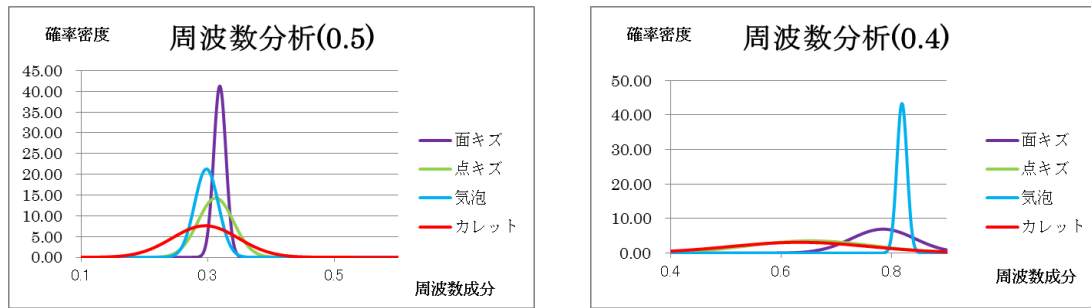


図 141 周波数分析のパラメータ変更による結果

特徴抽出頻度パラメータを変化させることで、面キズだけでなく気泡についての確率密度が高められることが確認できた。

輪郭強度分析

輪郭強度の標準偏差について着目した分析である。

周波数分析のフローは下記の通りである（図 142）。

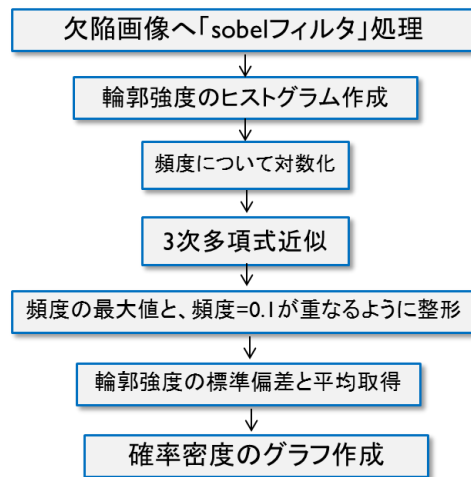


図 142 輪郭強度分析処理フロー

実画像とマイクロスコープでの周波数分析の結果を下記に示す（図 143）。

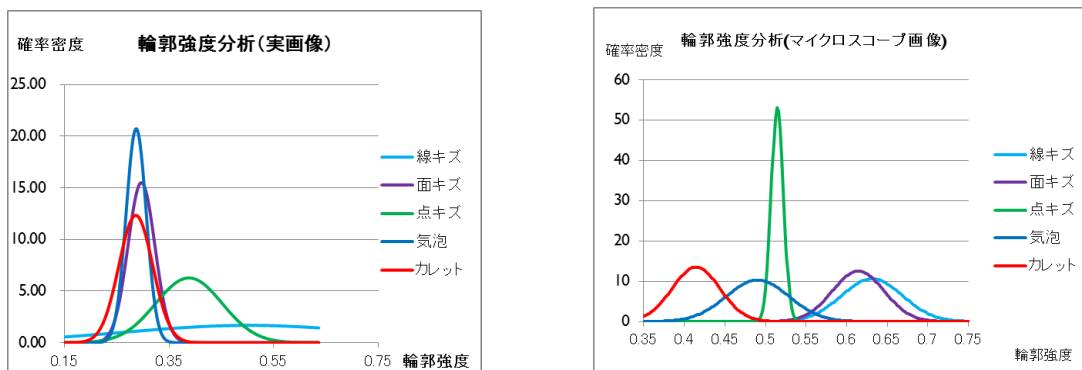


図 143 輪郭強度分析結果

マイクロスコープ画像とグラフの概形は異なるが、面キズとカレットと気泡の確率密度が高くかつ同じ値を取るため、面キズとカレットと気泡またはその他というグループでの判別が可能な特徴であると確認できた。

さらに特徴抽出頻度パラメータを変化させた場合の、周波数分析の結果を下記に示す（図 144）。

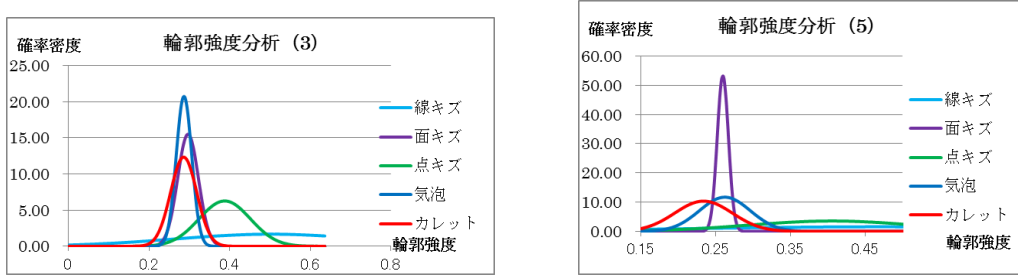


図 144 輪郭強度分析のパラメータ変更による結果

マスクサイズパラメータを変化させることで、面キズのみの確率密度を高められることが確認できた。

HALCON 検証結果

上記の分析結果から 4 種類の分析手法について有用性を認めることが出来た。ただし、適切な分析結果を得るためには、最適なパラメータを選択する必要がある。そのためパラメータは固定値ではなく、機械学習によって選択する。

分析手法と特徴情報

欠陥検出において、各分析手法で取得する特徴情報は以下の通りである（図 145）。また、下記の全ての特徴情報は欠陥の分類に使用する。

No.	分析手法	特徴情報	抽出手順
1	形状分析	面積	欠陥の輪郭内部のピクセル数をカウント
2	形状分析	周囲長	輪郭の縦横を 1.0, 斜めを $\sqrt{2}$ として合計を求める
3.	形状分析	円形度	$\frac{4\pi(\text{面積})}{(\text{周囲長})^2}$
4	形状分析	中心座標 (x)	欠陥の重心 (x) - 欠陥の近似楕円の重心 (x)
5	形状分析	中心座標 (y)	欠陥の重心 (y) - 欠陥の近似楕円の重心 (y)
6	形状分析	近似楕円縦横比	1. 欠陥の近似楕円を求める 2. 近似楕円の外接矩形から値を求める $\frac{\text{楕円外接矩形の長辺}}{\text{楕円外接矩形の短辺}}$
7	形状分析	楕円近似二乗誤差	1. 欠陥の近似楕円を求める 2. 近似誤差を求める
8	輝度ヒストグラム分析	輝度の最小値	輪郭内部の輝度の最小値
9	輝度ヒストグラム分析	輝度の最大値	輪郭内部の輝度の最大値

No.	分析手法	特徴情報	抽出手順
10	輝度ヒストグラム分析	輝度のモード	最頻値の輝度
11	輝度ヒストグラム分析	輝度四分位 25%	輝度をヒストグラムとして並べた場合の小さい方から 25%目の値
12	輝度ヒストグラム分析	輝度四分位 75%	輝度をヒストグラムとして並べた場合の小さい方から 75%目の値
13	輝度ヒストグラム分析	輝度の平均	欠陥の輝度の平均値
14	輝度ヒストグラム分析	輝度の偏差	欠陥の輝度の偏差値
15	輝度ヒストグラム分析	輝度近似値	1. 輝度のヒストグラム作成 2. ヒストグラムの多項式近似 3. 比較点での値抽出
16	輪郭強度分析	輪郭強度近似値	1. Sobel フィルタ 2. 多項式近似 3. 比較点での値抽出
17	周波数成分分析	周波数分析近似値	1. FFT 2. 多項式近似
18	断面輝度分析	断面輝度近似値	1. FFT 2. 多項式近似

図 145 特徴情報一覧

機械学習による特徴抽出パラメータ調整

HALCON によって検証した分析手法の結果から調整パラメータを選定した（図 146）。

分析手法	対象アルゴリズム	対象パラメータ
断面輝度分析	ヒストグラム分析	高低周波数頻度値
周波数分析	ヒストグラム分析	特徴抽出頻度値
輪郭強度分析	ヒストグラム作成	マスクサイズ

図 146 調整対象パラメータ一覧

機械学習によるパラメータの抽出

断面輝度分析、周波数分析、輪郭強度分析のパラメータを学習データから抽出する。

初回は、形状分析と輝度ヒストグラム分析から。2 回目以降は使用したパラメータと結果から再度探索して、適切な値をとるまで繰り返す（図 147）。

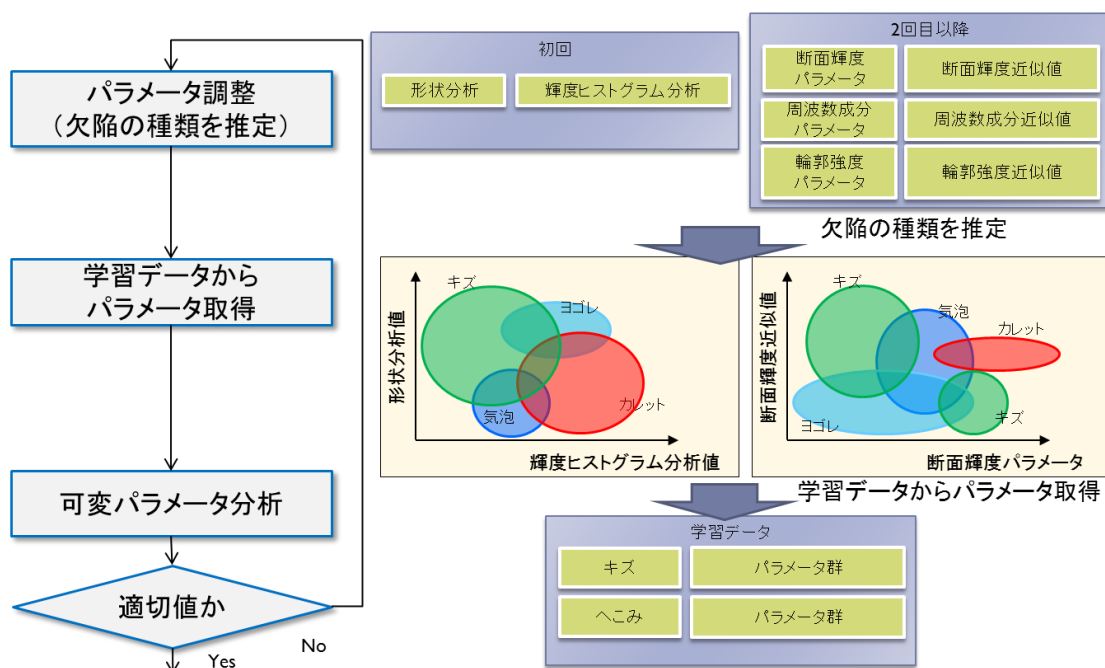


図 147 機械学習によるパラメータ調整処理フロー

欠陥分類手法の検討

分類に使用可能なアルゴリズムについて調査を行った。

- ① K-Means 法
- ② EM アルゴリズム
- ③ SVM(サポートベクタマシン)
- ④ アダブースト

詳細については以降の章に記述する。

K-Means 法

データを自動的に分類するクラスタリングのひとつの手法である。クラスタ（データのかたまり）の平均(means)を求めながら K 個のクラスタに分類する（図 148）。

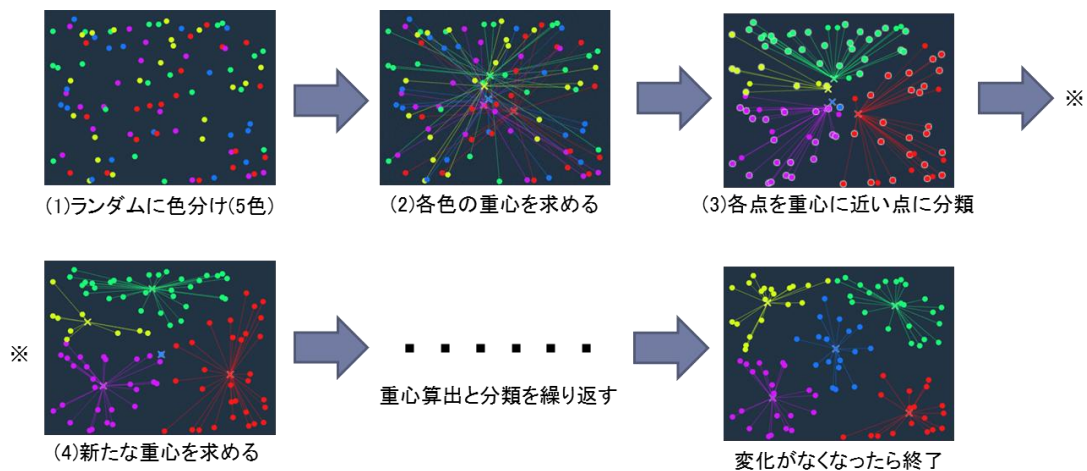


図 148 K-Means 手法の処理フロー

クラスタがガウス分布(正規分布)しているときの分類精度が高い。
欠陥分析結果は正規分布していると予想しているので高精度に分類可能である。

使用する際の注意点に、初期値は全ての点をランダムにクラスタリングするが、初期値によっては分類結果が適切でないことがある。こちらは「K-Means++」という改良アルゴリズムを使用することで解決が可能である。

EM アルゴリズム

教師なし学習アルゴリズムのひとつで、確率モデルのパラメータ(平均と分散)を最尤法で推定する(最尤とは、「一番もっともらしい」という意味)。

下記のように赤のデータ分布から、青のガウス分布のパラメータを推定が可能である(図 149)。

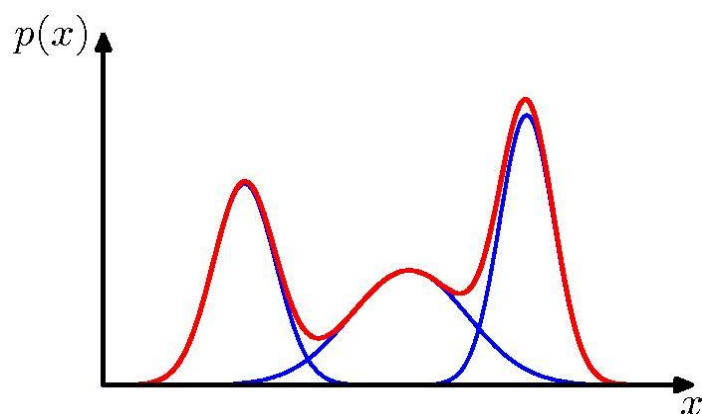


図 149 EM アルゴリズムによる推定イメージ

図 149 の 3 個のガウス分布の線形重ね合わせを数式で表すと下記の通り(数式 2)。

$$p(x) = \sum_{k=1}^3 \pi_k N(X|\mu_k, \Sigma_k)$$

数式 2 3 個の混合ガウス分布

混合ガウス分布の最尤推定により、欠陥分析結果のパラメータを推定する。

SVM(サポートベクタマシン)

教師あり学習を用いる識別方法のひとつ。マージン(ユークリッド距離)が最大になるように決定する(図 150)。

与えられた学習データを全て正しく識別できる「ノンパラメトリック」の手法である。

欠陥検出結果から、欠陥を判断するパラメータを蓄積する。

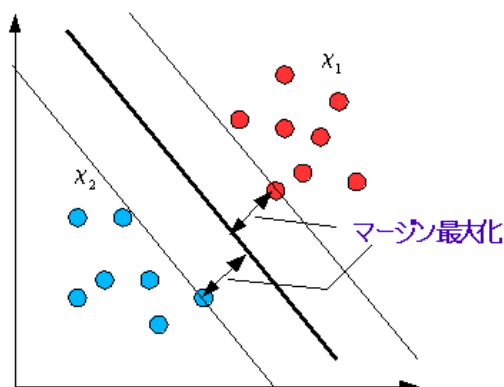


図 150 SVM の処理概要

考慮すべき点として、過学習(過剰適合)にならないようにする(学習データには忠実だが、新しいデータでの予測精度が低い)必要である(図 151)。こちらは正則化(許容誤差の設定)や、EM アルゴリズムの推定結果との比較によって解決は可能である。

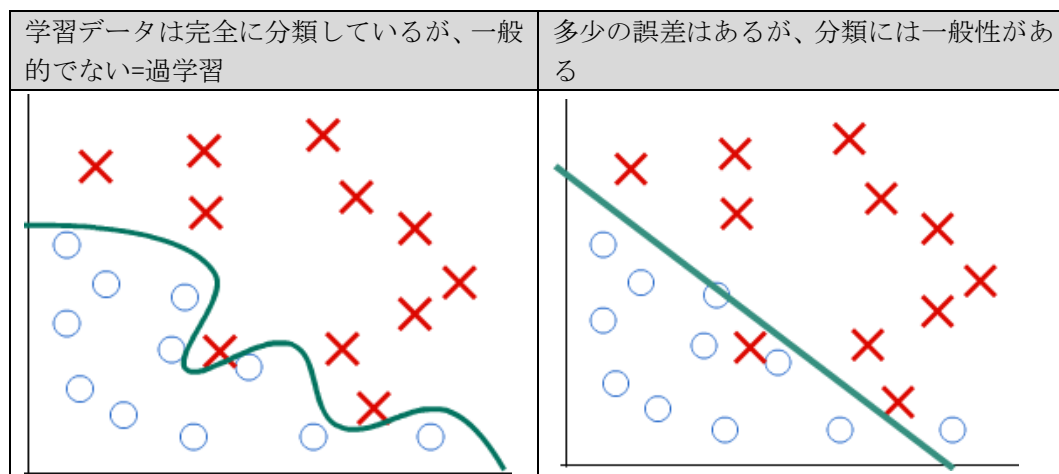


図 151 過学習状態と一般性がある状態

アダブースト

弱い識別器を、たくさん繋げて強い識別器をつくる手法である。識別器は重要度にあわせて重み付けをする(図 152)。

欠陥検出結果に応じて欠陥抽出の重要度を評価し、欠陥抽出に重みをつける



図 152 アダブースト手法のイメージ

欠陥分類手法の決定

欠陥分類は欠陥抽出処理の各分析により取得した特徴情報を使用して行う。

各特徴情報における欠陥ごとの確率密度の分布を解析したところ、SVM で明確に分離できるほど分布が分かれていなかったため、アダブーストの考えをもとに複数の条件を繋げることで精度の向上を行った。

特徴ごとに欠陥単位の確率を算出し、欠陥単位で全特徴の確率集計を行い、合計確率が一番高い欠陥が判定結果となる(図 153)。

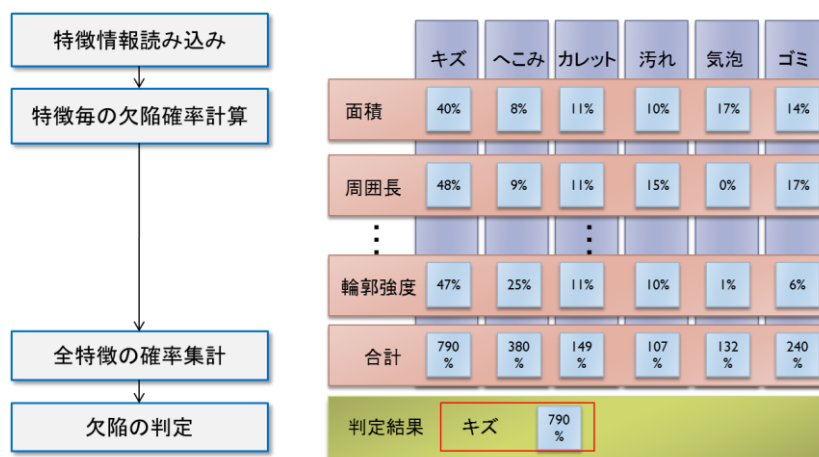


図 153 欠陥分類処理フロー

欠陥確率算出方法

確率は学習データを元に、ある特徴における欠陥ごとの平均と分散をもとめ、そのガウス曲線を確率密度のグラフとして描く。その上である値を取る時の確率を全ての欠陥の確率密度の合計を元に算出して求める（図 154）。

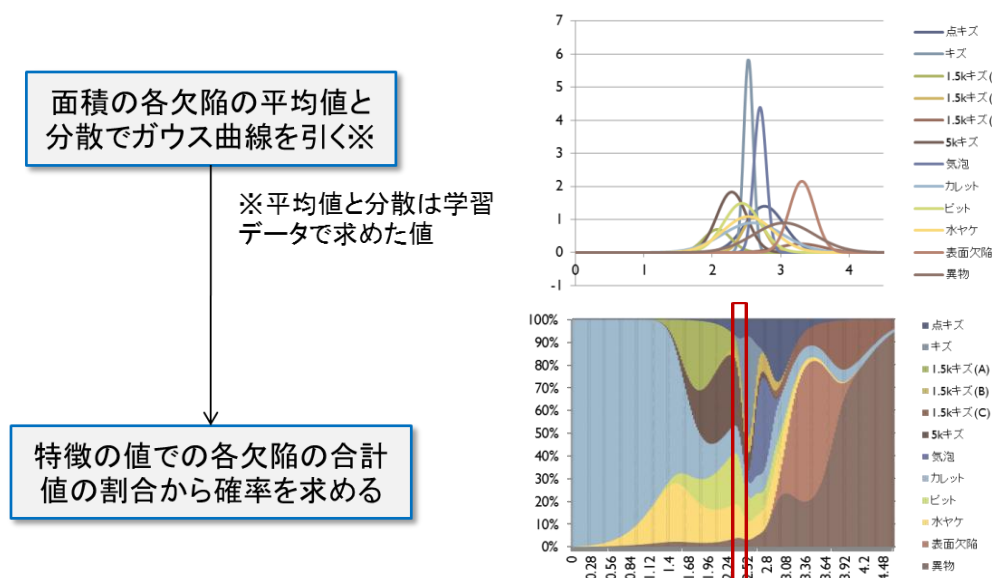


図 154 確率密度計算処理フロー

欠陥分類結果表示ソフトウェアのフローは下記の通りである（図 155）。



図 155 欠陥分類結果表示ソフトウェアのフロー

欠陥分類結果表示ソフトウェアのスクリーンショットは下記の通りである（図 156）。

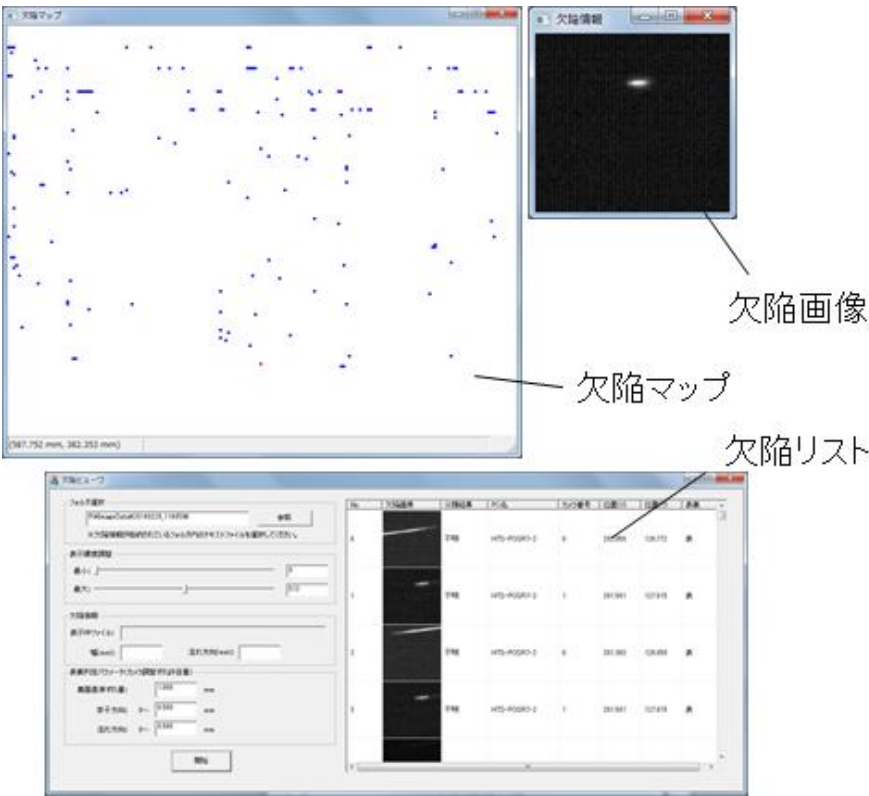
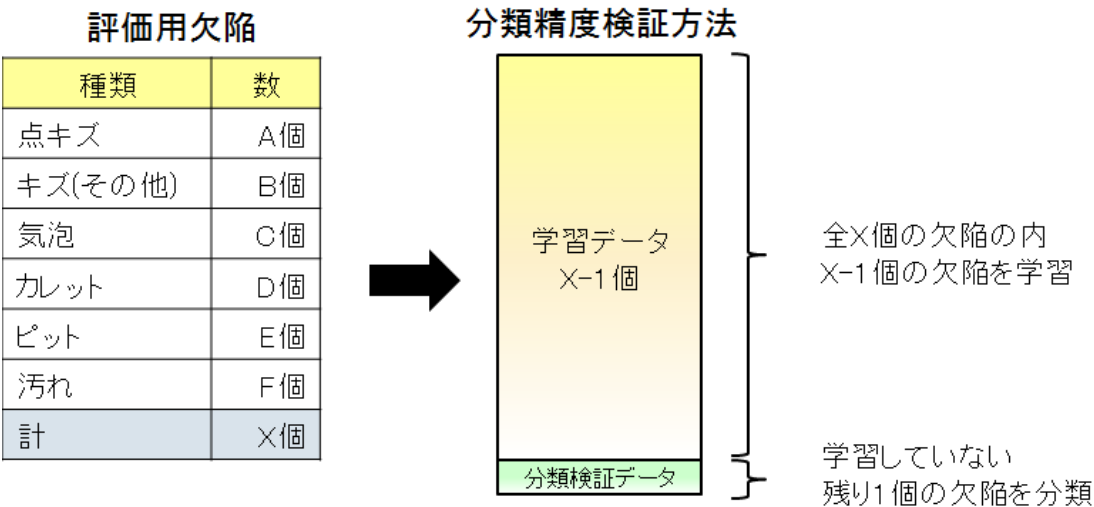


図 156 欠陥分類結果表示ソフトウェアのスクリーンショット

欠陥リストや欠陥マップを選択すると、選択した欠陥の画像が拡大表示される。欠陥分類結果表示ソフトウェアを使用し、欠陥画像蓄積用ソフトウェアで取得した欠陥データを出力できることを確認した。

欠陥分類の精度を評価するため、以下のように X 個の欠陥のデータから、X-1 個の欠陥を学習し、残り 1 個の欠陥を分類するソフトウェアを開発した（図 157）。下記ソフトウェアを使用することで、学習データと分類検証データを入れ替えながら、X 個の欠陥で X 回分類の評価・検証を行うことができる。



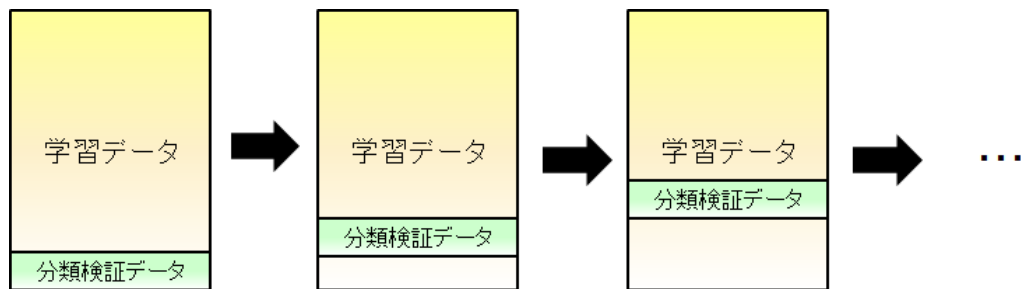


図 157 X 個の欠陥のデータから分類精度を評価する方法の説明図

上記のソフトウェアを使用し、点キズ 100 個、キズ(その他)100 個、気泡 100 個、カレット 100 個、ピット 100 個、汚れ 100 個の計 600 個の欠陥分類の精度を評価した結果を以下に示す (図 158)。

種類	分類合格数/全体数	分類正答率	分類誤判定率
点キズ	61/100	61%	39%
キズ(その他)	73/100	73%	27%
気泡	67/100	67%	33%
カレット	81/100	81%	19%
ピット	87/100	87%	13%
汚れ	63/100	63%	37%
合計	432/600	72%	28%

図 158 欠陥分類の精度評価

上記のように、欠陥分類の精度としては、分類正答率 72%、分類誤判定率 28%という結果となった。

以上の検証により、欠陥検出率は 100%となったが、目標としていた不良品誤検出率 (分類誤判定率) は目標値 0.1%に対して、28%という結果となった。不良品誤検出率が高いのは、学習データが不足していることが原因のため、今後、欠陥画像蓄積用ソフトウェアをラインに搭載して学習データを蓄積していくことで、不良品誤判定率は低下する見込みである。

最終章 全体総括

1) 高解像度光学系の開発

LED照明ユニットと高解像度光学ユニット改を液晶表示用ガラス検査搬送装置に搭載して、液晶表示用ガラス欠陥検査装置として組み上げる目標に対し、期間内に全ての光学系調整は完了できなかったが、1 ユニット分であるが光学系調整を完了させ、(キズ幅) 最小 10 μ m 以下の欠陥検出および欠陥の表裏判別可能な検査装置が確立できた。残り 4 ユニット分の光学調整を行うことで、1300×1100mm (G5 サイズ) 全面の検査が行える液晶表示用ガラス欠陥検査装置が完成する。今後、補完研究を行って完成を目指す。

2) 液晶表示用ガラス欠陥検査装置の開発

- ・欠陥の観察と特徴抽出手法の確立

レーザー顕微鏡、表面形状粗さ測定器、マイクロスコープを使って欠陥の観察を実施した。マイクロスコープで撮影した画像をもとに、欠陥の特徴抽出手法を確立した。

- ・カメラ画像のずれ量計測システム開発

装置化したガラス欠陥検査装置にカメラ画像のずれ量計測システムを搭載し、カメラ画像のずれ量計測の精度 7.015 μ m(8.5 μ m 以内)を達成した。

- ・欠陥の検出システム開発

欠陥検出率は 100%となったが、目標としていた不良品誤検出率（分類誤判定率）は目標値 0.1%に対して、28%という結果となった。不良品誤検出率が高いのは、学習データが不足していることが原因のため、今後、補完研究を行い学習データを蓄積していくことで、不良品誤判定率 0.1%を目指す。

以上

