

光学機能シートの低コントラスト欠陥検出  
に関する研究

Detection of Low-Contrast Defects on Optical Sheets

平成 15 年度

廣瀬 修

Osamu HIROSE

## Abstract

The purpose of my research is to develop the automatic inspection technique for the low-contrast defects on optical sheets. Optical sheets are indispensable materials for liquid crystal display (LCD). Automatic inspection of low-contrast defects is very difficult for applying as the current technology. Within the display market, insistence for high-resolution and large-sized display increases rapidly. Therefore, it requires that the two categories of defects must be detected. First is the point defect, which is similar in size to the display pixel (about 20  $\mu\text{m}$  minimum). In many cases, the point defect has high enough contrast, making it practical to apply the current commercial inspection equipments. Second is the low-contrast defect that can be recognized under a broader view. In contrast to the first, the automatic inspection of the low-contrast defect is very difficult for the following reasons. i) It is difficult to design the optimum observation system, because the mechanism of defect generation cannot be clarified. ii) Inspection standard is not quantitative. This paper describes development of the automatic inspection technique for the slight convexo-concave defects and the color shading defects. These are the two most serious types of defects among the low-contrast ones.

The paper is composed of the following chapters.

Chapter 1 is the introduction of background of the research and review of the previous studies.

In chapter 2, a detection method for slight convexo-concave defects by using patterned illumination is proposed. The characteristic of the defects and problems on typical inspection equipments are explained in detail. The principle of the defect detection and the corresponding image processing algorithm is described. The successful detection results are shown.

In chapter 3, the validation of the proposed method by using ray-tracing simulation is estimated, in order to disclose the detection limit. Detection sensitivities for various defect shapes are estimated based on computer graphics images generated by the simulation. Then a selection method of illumination pattern size is introduced.

Chapter 4 gives an estimation method of effective area in the patterned illumination that contributes to the defect observation, which evolve the technique in Chapter 3. Chapter 4 also shows a design method of the optical system, covering illumination pattern and optical alignment.

In chapter 5, a quantitative evaluation of the color shading defects on the anti-reflection coating is described. The mechanism that the defects are caused by local disturbance of coating thickness is disclosed. Therefore, the correlation between coating thickness and the defects are described. Then limit of thickness change for non-defective area is indicated.

In chapter 6, an inspection method of color shading defect based on the quantitative evaluation described in chapter 5 is proposed. Variation of defect appearance with coating thickness and observation angle is given. Then, an inspection standard to judge the quality of anti-reflection coating, which is based on MacAdam's ellipsoid, is proposed.

In Chapter 7, a new method of the sensory inspection for shading defect is proposed. This method is based on the frequency distribution of fluctuation of defect features. The method is applied on two different types of shading defect, one is the color shading on the anti-reflection films, another is the shading defect on the grid structure films. The results are much in accord with visual inspection by human operators.

Chapter 8 summarizes the conclusion of this study and gives a look into the future trends on the inspection technique of the optical sheets.

# 目 次

第1章 緒論	1
1.1 光学機能シートの表面欠陥検出の背景	1
1.1.1 本研究の目的	1
1.1.2 光学機能シートとは	1
1.1.3 光学機能シートに要求される機能と品質管理	2
1.1.4 表面欠陥の種類と欠陥検査技術の整備状況	2
1.2 シート状製品の外観検査の自動化技術	3
1.2.1 一般的な外観検査装置	3
1.2.2 外観検査の応用分野と課題	4
1.2.3 欠陥の特徴	5
1.2.4 低コントラスト欠陥検査の従来技術と課題	6
1.3 本研究の新規性と成果	7
1.3.1 微小起伏欠陥	7
1.3.2 色むら欠陥	8
1.3.3 むら欠陥の官能検査の自動化に関する提案	8
1.4 本論文の構成	8
第2章 パターン照明を用いた微小起伏欠陥の検出	21
2.1 緒言	21
2.2 対象欠陥の特徴と検査の課題	22
2.2.1 対象欠陥の特徴	22
2.2.2 欠陥検査の課題と開発目標	22
2.3 検出原理	23
2.3.1 欠陥撮影方法	23
2.3.2 輝度プロファイルモデル	23
2.3.3 欠陥検出アルゴリズム	24
2.4 実験	26
2.4.1 実験方法	26
2.4.2 検出結果	26
2.5 ラインセンサを用いたインライン検査装置の開発	27
2.5.1 インライン検査のための課題	27
2.5.2 非同期画像入力による並列処理方法	28
2.5.3 画像解析時間の短縮	28
2.6 結言	29

第3章 微小起伏欠陥検出の光学シミュレーションによる評価	39
3.1 緒言	39
3.2 欠陥検出のシミュレーション	40
3.2.1 光学系の配置	40
3.2.2 受光面で観測される光強度分布の計算	41
3.2.3 欠陥形状モデルの作成	41
3.2.4 解析に使用したパラメータ	42
3.3 シミュレーションおよび実験結果	42
3.3.1 シミュレーションと実験との比較	42
3.3.2 欠陥の深さによる欠陥観測画像の違い	43
3.3.3 パターン周期による欠陥観測画像の違い	43
3.3.4 パターン周期と欠陥検出感度との関係	44
3.3.5 考察	44
3.4 光学配置と検出感度との関係	45
3.4.1 シミュレーション	45
3.4.2 実験	46
3.4.3 考察 - 欠陥の識別 -	46
3.5 結言	47
第4章 光線の影響領域に基づく光学系の最適設計	59
4.1 緒言	59
4.2 光線の影響領域に基づく光学系の最適設計	60
4.2.1 光線追跡シミュレーション	60
4.2.2 影響領域の定義	61
4.2.3 影響領域の計算例	62
4.2.4 影響領域を用いた検出感度の評価	62
4.2.5 欠陥とパターンの位相との関係	63
4.2.6 影響量曲線と欠陥の見え方との関係	63
4.3 考察	64
4.3.1 光学系設計の簡易化	64
4.3.2 欠陥抽出方法の選定	64
4.3.3 既存設備の仕様変更の簡易化	65
4.4 結言	65
第5章 反射防止膜に生じる色むらの定量評価	73
5.1 緒言	73
5.2 検査対象と色むら欠陥	74
5.3 色むら発生の原理	74
5.3.1 反射防止膜	74

5.3.2	反射防止膜から知覚される色	76
5.3.3	色むら発生の原理	77
5.4	実験	77
5.4.1	観測方法	77
5.4.2	色度によるむら欠陥の評価	77
5.4.3	「等価膜厚」に基づくむら欠陥の評価	78
5.4.4	観測角によるむらの見え方の変化	78
5.5	考察	79
5.6	結言	79
第6章 色むらの感覚評価の定量化および色むら低減に関する検討		91
6.1	緒言	91
6.2	検査対象と色むら欠陥	92
6.3	シミュレーションによる色むらの生成と評価	92
6.3.1	反射防止膜から知覚される色度	92
6.3.2	膜厚の違いによる色度変化	93
6.3.3	明度変化の取扱い	93
6.3.4	色むらの可判別性の評価	94
6.4	色むらの低減	94
6.4.1	色むらの見え方の違い	94
6.4.2	色むらを低減するための膜厚選定	95
6.5	結言	96
第7章 むら欠陥の官能検査の自動化に関する検討		105
7.1	緒言	105
7.2	特徴量の度数分布に基づく官能検査方法	105
7.2.1	むら欠陥の官能検査に関する仮説	106
7.2.2	仮説に基づく官能検査方法（特徴頻度法）	106
7.2.3	官能検査実験	107
7.2.4	しきい値曲線の設定方法	107
7.3	格子構造フィルムの濃淡むら欠陥検査	108
7.3.1	格子構造フィルムとむら欠陥検査の背景	108
7.3.2	欠陥検査における課題	109
7.4	回折パターンを用いた濃淡むら検査の基礎理論	109
7.4.1	フーリエ光学 <sup>12),13)</sup>	109
7.4.2	格子構造フィルムによる回折パターン	111
7.4.3	欠陥検査原理	111
7.5	シミュレーション	112
7.5.1	光学配置とモデル	112

7.5.2 シミュレーション結果	112
7.6 実験	113
7.6.1 実験装置	113
7.6.2 実験結果	113
7.7 むら欠陥の官能検査への応用	114
7.7.1 線幅不良を表す特徴量の定義	114
7.7.2 むら欠陥の評価方法	114
7.7.3 特徴頻度法による合否判定	115
7.8 結言	115
第8章 結論	129
8.1 本研究の成果	129
8.1.1 各章の結論	129
8.1.2 研究成果の活用	130
8.2 今後の展望	131
各章構成論文リスト	133
謝 辞	135

# 第 1 章 緒論

## 1.1 光学機能シートの表面欠陥検出の背景

### 1.1.1 本研究の目的

本研究の目的は、各種ディスプレイの部材として使用される光学機能シートを対象として、シート表面欠陥の検出技術を確立することにより品質の高いシートの生産を可能にし、ディスプレイの品質向上に寄与することである。なかでも、近年重要性が高まっており検出が困難な「低コントラスト欠陥」を対象として欠陥検出技術を確立する。

### 1.1.2 光学機能シートとは

本論文で取扱う光学機能シートとは、液晶ディスプレイ<sup>1)-6)</sup>やプラズマディスプレイ<sup>7)-9)</sup>等の表示装置に使用される各種のシート状部材を総称するものである。ディスプレイに使用される部材には、アクリルシート<sup>10),11)</sup>、偏光フィルム<sup>12),13)</sup>、位相差フィルム<sup>14)</sup>、カラーフィルタ<sup>15)</sup>などがある。

一般に、いずれの表示装置も多くの部材から構成されている。その一例として、液晶ディスプレイの基本的な構成を図 1.1 に示す。この図からも分かるように、液晶セル以外に多くの光学機能シートが使用されている。同図 (a) は STN 方式、同図 (b) は TFT 方式の液晶ディスプレイの基本構成を示している。これらの図は光源をディスプレイの後方に配置するバックライト型の構成を示している（光源を前面に配置するフロントライト型もあるが、パソコンやテレビ等ではほとんどがバックライトを採用している）<sup>16)</sup>。バックライト用光源には冷陰極管がよく用いられる。バックライトが発した光は導光板<sup>17)-19)</sup>と呼ばれる板材により表示面全体に均一に分配される。導光板には均質で透明度の高いアクリルシートがよく用いられる。液晶ディスプレイの心臓部である液晶セルは 2 枚の偏光フィルム<sup>12),13)</sup>に挟まれる構成となっている。第 1 の偏光フィルムを通過した光の振動方向を、液晶セルにかける電界によって回転させることにより、第 2 の偏光フィルムを通過する光量（各画素の明るさ）を制御するしくみになっている。図 1.1 (a) の STN 方式では、液晶セルがもつ波長分散によって画面に偏った色が生じるのを防ぐため、位相差フィルム<sup>14)</sup>が使用される。また、(b) の TFT 方式では Red, Green, Blue の各画素が規則的に配置されたカラーフィルタ<sup>15)</sup>が使用される。さらに、実際の液晶ディスプレイでは、画面保護や画質改善、背景光の反射防止等の機能を付加した基材シート<sup>20)-22)</sup>が前面に貼付されている場合が多い。このように、1 つのディスプレイ装置は様々な機能をもったフィルムやシートから構成されているが、これらの部材のいずれか 1 つにでも外観不良が存在するとディスプレイの品質を損なう

結果となる。そのため、これらのフィルムやシートには液晶セル本体と同様に厳しい外観品質が要求される。

### 1.1.3 光学機能シートに要求される機能と品質管理

光学機能シートには、本来の光学特性のほかに、ディスプレイの見やすさ・使いやすさを向上させるための様々な付加機能が要求される。例えば、照明光や背景の画面への映り込みを防止するために、ディスプレイ表面のシートには防眩処理（Anti-glare；AG）<sup>14),20)-22)</sup>と呼ばれる微細加工が施され、反射防止膜（Anti-reflection；AR）<sup>14),20)-24)</sup>と呼ばれる光学薄膜が施される。また、携帯端末の普及に伴い、傷付きや汚れ防止のためのハードコートや防汚コート等<sup>14),20)</sup>のコーティング技術の重要性が増している。自動車等に搭載される車載端末においては、盛夏の高温および厳冬期の低温に耐え得る耐熱・耐寒性<sup>14),20)</sup>が必要である。オフィスや家庭では視野角（画面がよく見える角度範囲）が広い方が好まれる。そのため、見る角度によらず光学特性が一定になるよう設計された光学フィルムが使用される<sup>25),27)</sup>。逆に、列車等の公共の乗物では隣席から画面が見えにくい方が好ましい。このようなニーズに対しては、見る角度によって光の直進性が異なる視角制御フィルム<sup>27)</sup>を選択することもできる。さらに、長時間の使用による目の疲労を低減するためにディスプレイの鮮明度を改善したり、バックライトの効率（光源の強度に対して実際に目に届く光の割合）を改善して画面を明るくするなどの機能<sup>14)</sup>も有している。

これらの機能を付加するため、一見して1枚のフィルムあるいは薄板に見える光学機能シートは、実は様々な光学特性を有する多層のシートから構成されている。一例として、高機能偏光フィルムの層構成を図1.2に示す。この例では、1枚の偏光フィルムは最表面の保護フィルムを含めると8層構造となっている。このように多層構造を形成することは、製造者の立場からみると製造工程の増加を意味している。一般に、工程が増えるほど異物混入や搬送時の擦過傷等の欠陥が発生する機会が多くなる。そのため、光学機能シートの製造は、通常クリーンルーム内で行われるが、それでも欠陥の発生を完全に防ぐことは困難である。したがって、品質管理においては各工程で発生した欠陥を後工程へ流出させないという自工程保証の確立が重要である。そのため、外観検査の形態としては、品質情報の工程への迅速なフィードバックが可能なインライン検査（製造ラインの中で行われる検査）が望ましい。

### 1.1.4 表面欠陥の種類と欠陥検査技術の整備状況

近年、ディスプレイの高精細化（画素サイズの微小化）および大画面化が進んでいる。このため、光学機能シートにおいて検出・排除しなければならない欠陥には、大別して以下に示すような2種類のものがある。

#### (1) 微細欠陥

微細欠陥と画素サイズと同程度の欠陥であり、点状欠陥と線状欠陥がある。

点状欠陥には、異物、気泡などがあり、線状欠陥にはすじ状の擦過傷や亀裂等がある。これらの欠陥の多くは正常部と欠陥部とのコントラストが高い。そのため、光学機能シートに微細欠陥があると、ディスプレイ上でその部分が黒くつぶれたり、明るい輝点となったり、あるいはR,G,Bいずれかの色が発色しないなどの表示機能障害となる。そのため、微細欠陥の許容サイズは目視で確認できる程度以下であることが多く、数 10  $\mu\text{m}$  から厳しいものでは 20  $\mu\text{m}$  ともいわれている。

## (2) 低コントラスト欠陥

近年のディスプレイの大型化にともない、広い面積を眺めたときに目につくコントラストの低い欠陥が大きな問題となっている。この種の欠陥は正常部との境界が不鮮明であるため欠陥部の抽出が困難である。また、欠陥サイズは上述の微細欠陥と比較して大きく、面状に分布するのが特徴である。低コントラスト欠陥には、シート表面の緩やかな起伏欠陥（以後、微小起伏欠陥）や、色むら、濃淡むら等の不均一性の欠陥がある。

表 1.1 は、欠陥の種類と特徴を示したものである。微細欠陥は比較的既存の検査装置が適用しやすい。しかし、欠陥の許容サイズの微小化および検査範囲（ディスプレイ面積）の拡大に伴い、高解像度かつ高速な検査が必要となってきた。そのためコスト面から自動検査が困難な場合も多い。ただし、現時点では解像度や処理速度の限界から直ちに適用が困難な場合でも、将来の機器の高性能化によって適用可能となることは期待できる。一方、低コントラスト欠陥については、様々な欠陥に汎用的に適用できる技術は整備されていない。それは、欠陥の発生メカニズムがそれぞれ異なり、それによって観測方法や評価基準が異なるためである。また、欠陥の合否判定基準が感覚的であり、定量的な判定が困難なことも検査の自動化が困難な要因となっている。

本研究ではこれらの欠陥のうち、既存技術の適用が困難な低コントラスト欠陥を検出対象とする。

## 1.2 シート状製品の外観検査の自動化技術

### 1.2.1 一般的な外観検査装置

画像処理技術の検査・産業への応用についてのサーベイが、中川<sup>28),29)</sup>、原<sup>30)</sup>、秦<sup>31)</sup>、江尻ら<sup>32)</sup>によってまとめられている。また、外観検査の動向から今後の展開についてワークショップ等で議論されている<sup>33)-40)</sup>。一般に、工程内での外観検査においては、欠陥の検出に適した観測系は工程毎に異なっている。そのため、観測系の構築と画像処理システムとを組合わせた開発事例が多く報告されている<sup>41)-51)</sup>。ここでは、シート状製品の自動検査に限定して従来技術を概説する。

図 1.3 は、一般的なシート状製品の外観検査装置の構成を示す。撮像手段としては、製品を搬送しながら撮影するという観点からラインセンサ<sup>52)</sup>がよく

用いられる。そのため、固定光学系を用いた検査が可能であることが前提となる。後述するように、このことが低コントラスト欠陥の自動検査において大きな障害となっている。

ラインセンサからの画像データは画像処理装置に入力され、画像前処理・二値化・特徴量計測等<sup>53)-55)</sup>が行われ、欠陥が抽出される。抽出された欠陥情報は、欠陥マップの作成、オペレータへのアラーム出力、製造記録帳票の作成等の処理に活用される。帳票による欠陥情報管理では不十分な場合は、マーキング装置と組合せて、実際の製品の欠陥部位またはそれに準じる位置に直接マーキングを行う場合もある。

画像処理エンジンとしては、画像データを一度メモリへ格納しソフトウェアによって解析を行う方式と、画像処理のほとんどをハードウェアで行う方式とがある。実際のインライン検査の現場では製品は連続して搬送されているため、撮像から欠陥情報出力までをリアルタイムに行う必要がある。そのため、従来実用化されているインライン欠陥検査装置は後者のハードウェア方式によるものが多い。しかし、ハードウェア方式では搭載されている画像処理アルゴリズムに限定されるため多様なニーズに対する柔軟性には欠ける。実際、ハードウェア方式では現在でも二値化処理が基本であり、画像前処理等のパラメータ設定ができる程度のシンプルなものが多い。一方、ソフトウェア方式は自由なアルゴリズムのコーディングが可能であるが、処理が複雑になるほど処理時間が長くなり、製造ライン速度に追いつかなくなる。近年のマイクロプロセッサの高速化・メモリの大容量化に伴いソフトウェア方式の実用事例は増えているが、一方で検査に要求される能力（解像度や欠陥判別能力）も年々高くなっており、画像処理コストの問題等から適用が困難な場合も多い。

### 1.2.2 外観検査の応用分野と課題

実際の外観検査の現場では、検査対象物の特性に応じたシステム開発が重要であると言われている。原氏による欠陥の特徴および検査の要求能力・コストの分類<sup>30)</sup>は、外観検査装置の開発にあたり非常に有用である。図 1.4 は、原氏による分類を引用し、これに対する昨今のシート検査への要求範囲を加筆したものである。この分類によると、LSI パターン、回路パターン等の分野（A 分野）では、検出対象は検査内容が明確であるが高速・高精度のため機械の能力が人間を超えており、設備費は数億円、画像処理はハードウェアで実行されるとしている。また、CRT 画面の色むら等の感覚的な検査の分野（C 分野）では、検査内容が不明確で機械の能力が人に追いつかず、画像処理はソフトウェアで実行され、設備費は数 100 万円とされている。FA 用視覚の分野（B 分野）はこれらの中間にあたりと分類されている。

このなかで、本研究が対象とするディスプレイ向け光学機能シートは、従来、B 分野に相当する外観検査が要求されてきた。検出すべき欠陥は目視が可能な程度の微細欠陥であった。すなわち、欠陥の大きさは従来の画素サイズ（100

μm 程度以上) であり, 欠陥のコントラストは明瞭であった。検査内容は比較的明確であり, 機械と人間との検出能力は拮抗していた。設備費は 1~数千万円であり, 設備投資に対してある程度の合理化メリットが期待できた。

しかし, 昨今のディスプレイ向け外観検査はこれとは様子が異なってきている。1.1.4 節で述べたように, 欠陥の種類は微細欠陥と低コントラスト欠陥に大別される。微細欠陥の許容サイズは目視の限界を超えつつあり, A 分野に近い解像度と処理速度が要求されるようになった。また, 低コントラスト欠陥の検査には, むらの程度や画面のひずみ具合といった感覚的な検査, いわゆる官能検査が必要になり, 従来 C 分野の領域であった検査も同時に要求されるようになった。これら性質の異なる 2 種類の検査を共通の設備あるいは画像処理アルゴリズムを用いて行うことは容易ではない。一方, 市場動向をみると, パソコンや液晶テレビ等の情報機器の価格は年々低下傾向にある。そのため, 検査装置には一層のコストダウンが要求されている。

### 1.2.3 欠陥の特徴

ここでは, 実際の製品検査の現場からみた欠陥の特徴を述べる。

#### (1) 微細欠陥

微細欠陥の検査には固定光学系が用いられる。微細欠陥の大きさは, 近年, 目視の限界に近くなってきている。そのため, 検査員の熟練度によって欠陥の発見に要する時間が異なり, 単位時間あたりの検査量には個人差がある。しかし, 微細欠陥は高いコントラストをもち, 欠陥サイズの特定は容易であるため, 合否判定基準を明確に定めることが可能である。そのため, 検査員の熟練度によらず一定の判定基準の下で検査を行うことができる。

微細欠陥の自動検査を考えるうえで問題となるのは, 設備コストと期待される経済効果との関係である。設備コストは欠陥の検出に必要な解像度, 検査面積, および必要な検査速度から決まるが, 欠陥サイズに対して検査面積が広大であるため年々設備コストが高くなる傾向にある。

#### (2) 低コントラスト欠陥

低コントラスト欠陥の検査には, 微細欠陥とは異なる次の 2 つの特徴がある。1 つめは, 固定光学系による検査が困難なことである。そのため製品検査の現場では, 検査員は図 1.5 に示すように被検査体を手で動かして最も欠陥が目立つ観測条件を探しながら検査を行っている。このような検査の自動化を考える場合, 固定光学系を前提とした従来の検査装置をそのまま適用することは不可能である。2 つめの特徴は, コントラストが低いために欠陥部と正常部とを明確に区別することや, 欠陥の程度を定量的に表すことが困難なことである。そのため, 合否判定を検査員の感覚に頼ることが多く, 検査基準にばらつき(個人差や検査員の疲労, 性格などによるばらつき)が生じる。

これらのことから, 低コントラスト欠陥の自動検査を考える場合には, まず欠陥が知覚される原理を明らかにし, 次にそれにより生じる物理量を計測し,

最後に計測された物理量に基づいて欠陥の程度を定量評価するという手順が必要である。

### (3) 低コントラスト欠陥の種類と検査方法

本研究の最初のステップとして目視検査の分析を行った結果、低コントラスト欠陥には大別して微小起伏欠陥と色むら欠陥の2種があり、同じような作業に見える検査であっても検査対象によって異なる現象を観測していることが分かった。

微小起伏欠陥は、平面サイズに対する高さ方向の変位（アスペクト比）が非常に小さい欠陥である。平面サイズは1mm程度～数cm、高さ方向の変位は数 $\mu\text{m}$ ～100 $\mu\text{m}$ 程度であり、点状の欠陥から数cmの範囲に分布する欠陥まで、様々な大きさのものがある。微小起伏欠陥を検査する場合には被検査面に映り込んだ光源像の位置を変化させて被検査面を走査するように検査している。

一方、色むら欠陥は、被検査面の広い範囲を眺めたときにわずかな色合いの違いが見えるものである。色むら欠陥を検査する場合には観測姿勢を変化させながら被検査面全体を眺めるように検査する。

これらのことから、微小起伏欠陥と色むら欠陥とは、それぞれ別の現象が生じていると考えられる。

## 1.2.4 低コントラスト欠陥検査の従来技術と課題

### (1) 微小起伏欠陥

微小起伏欠陥は、それを直接視認することは困難である。しかし、正常部と比較して欠陥部では照明光の反射方向あるいは透過方向が変化する。これを利用して、被検査面に映った光源の映り込み像あるいは被検査面を透過した光源像のひずみを検出する方法が多く研究されている<sup>56)-67)</sup>。実際の生産現場へも応用されており、自動車のボディやガラス、金属表面等の検査においてその効果が報告されている。

被検査体を介して光源像を観測するこれらの手法では、製造ライン中で観測位置を一定に保持することが重要である。しかし、本研究が対象とする光学機能シートは自動車のボディやガラスとは異なり、剛性をほとんどもたない。そのため、搬送中にわずかな反り等の変形が生じることが避けられず、光学系を固定した従来の検査装置をそのまま適用することが困難である<sup>68)-71)</sup>。この問題を解決するために従来報告されている手法では、独自の照明装置や画像処理アルゴリズムと組合せた開発例が多い。このことは、フィルムのような比較的安価な製品への適用を考えるうえでは設備投資効率の面で制約が大きい。そのため、シンプルな光学系と少ない画像処理コストによる欠陥検出技術が必要である。

### (2) 色むら欠陥

色むら欠陥の検出技術も数多く報告されており、市販装置も存在する。市販装置の多くは、CCDカメラや分光光度計等を用いて色差を定量的に計測して

むらを検出するものである<sup>72)-81)</sup>。しかし、これらの手法の多くは濃淡差あるいは色差という物理量の計測にとどまっており、人間の感覚に左右される合否判定基準の定量化には到っていない。むらの程度を表す指数を独自に定義して欠陥を判定する装置<sup>76)</sup>も存在するが、感覚量との相関については明らかにされていない。

むら欠陥検査が必要な製品の中には、むらの検出自体が非常に困難な場合が多い。このため、高度な画像処理アルゴリズムを用いて、通常の画像処理では困難な淡いむらを検出するための研究事例が報告されている<sup>82)-91)</sup>。また、むら欠陥は通常、検出ができて評価が困難である。そのため、検出されたむらを定量評価する手法も多く研究されている<sup>92)-103)</sup>。さらに、生産現場の実態に合致したむら検査を行うためには、人間がむら欠陥を見たときの感覚的な評価<sup>104)-106)</sup>を自動化する必要がある。このためには、画像の輝度差や色差といった物理量から、人間の心理に与える影響(心理量)を評価しなければならない。そのため、画像計測と人間による官能検査とを結びつける研究<sup>107)-118)</sup>が盛んになってきている。

このように、むら欠陥検査に関する研究は数多くなされている。しかし、むら欠陥の発生メカニズムや欠陥によって生じる光学現象は対象によってそれぞれ異なっている。そのため現在は、図 1.6 (a) に示すように、それぞれの検査対象毎に個別に研究が行われているのが実情である。将来、これらの個別技術が統合され、汎用的なむら欠陥検査技術が確立されるためには、次の3つの課題がある。1つは観測される特徴量を基に人間の感覚と合致する検査基準を確立すること、2つめはその検査基準を様々な特徴量に対して適用可能するための汎用アルゴリズムを構築すること、3つめは検査対象毎に光学現象を個別検討する必要のないよう、観測系の選定指針が整備されることである。これらの研究を進展させ、図 1.6 (b) に示すような理想的な開発手順を確立していくことが必要である。

## 1.3 本研究の新規性と成果

### 1.3.1 微小起伏欠陥

本研究では、まず、1つめの低コントラスト欠陥である微小起伏欠陥を検出するため、パターン照明を利用した検査方法を提案した。本手法によると、これまで困難であった起伏欠陥を固定光学系で検出できる。被検査面に映りこんだ照明パターンの像が欠陥によってぼけるという現象を利用し、従来法と比較して非常にシンプルな装置構成および画像処理にて信頼性の高い検査を実現した。また、光線追跡シミュレーションの手法を用いて、欠陥の観察像をコンピュータグラフィックスによって評価する手法を確立した。さらに、欠陥像の形成に寄与するパターン照明の範囲を示す「影響領域」という概念を新たに提案し、これに基づいて最適な照明パターン配置、および画像処理アルゴリズム

の選定方法を確立した。一般に、実際の現場では様々な形状の欠陥サンプルを入手することが困難なため、実験検証のみでは光学系の最適設計が困難であった。これらの手法を用いることにより、実験検証できなかった形状の欠陥についても検出感度の評価が可能になり、装置開発期間の短縮が期待できる。また、従来、目視による欠陥検査では欠陥の有無は検出できても、欠陥形状と欠陥の見え方との関係は明らかではなかった。本研究の成果により、どの程度の欠陥が目立って見えるのかを評価できるようになった。

### 1.3.2 色むら欠陥

次に、2つめの低コントラスト欠陥である色むら欠陥について、欠陥発生のメカニズムを明らかにした。色むら欠陥が問題となる反射防止膜を対象に、膜構成と色むらとの関係を基に、「等価膜厚」という概念を用いて色むら进行评估する方法を提案した。そして、観測条件と色むらの見え方の関係を明らかにし、色むらを低減する製膜条件を求めた。さらに、人間の視覚感度に基づいた色むら判定方法を提案した。これにより、従来目視による感覚的な評価に頼らざるを得なかった色むら検査に定量的な判定基準を設定することが可能になった。

### 1.3.3 むら欠陥の官能検査の自動化に関する提案

本研究ではさらに、官能検査の自動化法を提案した。従来法の多くはそれぞれ孤立した個々のむら欠陥の程度を評価しているのに対して目視検査では被検査面全体をながめて合否を判定している点に注目した。検査面内での特徴量の度数分布を求め、この度数分布と目視による評価結果とを比較し、両者の間に相関があることを見出した。

本手法を性質の異なる2種類のむら欠陥に適用し、それぞれ目視検査と一致する判定結果を得た。これにより、官能検査の汎用化の可能性を示した。

## 1.4 本論文の構成

本論文は8章より構成されている。

第1章は緒論であり、光学機能シートの表面欠陥検出の背景、従来技術の概要と課題、本研究の目的と新規性および本論文の構成について述べる。

第2章では、パターン照明を利用して光学機能シート表面の微小起伏欠陥を検出する手法について述べる。まず、欠陥の特徴について紹介し、通常の検査装置を適用する際の課題を述べる。次に提案手法の欠陥検出原理および画像処理アルゴリズムを解説する。また、実験検証を中心に、本手法の効果を述べる。

第3章では、パターン照明を用いた欠陥検出法について、シミュレーションに基づいた評価を行う。光線追跡法を用いて、任意のサイズの欠陥モデルに対して観測画像のCGを生成し、検出感度を評価する方法を述べる。また、欠陥サイズに合わせた最適照明パターンの選定方法を述べる。

第4章では、パターン照明を用いた欠陥検出法について、光学系の最適配置や欠陥の抽出に適した画像処理アルゴリズムの選定を含めた検査システムの最適設計の指針を述べる。各種欠陥形状に対して、欠陥像の形成に寄与するパターン照明の領域をシミュレーションにより求め、これを欠陥固有の「影響領域」として定義する。この影響領域と照明パターンとの位置関係に基づいて、欠陥の検出感度を評価する。

第5章では、光学機能シート表面に形成された反射防止膜を対象に、色むら欠陥を定量的に評価する手法について述べる。まず、色むら欠陥の発生のメカニズムを光学シミュレーションにより明らかにし、色むらの原因が反射防止膜の膜厚変動によるものであることを述べる。色むらと反射防止膜の膜厚との関係について述べ、外観品質上問題となる膜厚変動量を明らかにする。実際に色むらを観測した画像を用いて実験検証を行う。

第6章では、色むらを判定する手法について述べる。反射防止膜の構成および観測方法による色むら欠陥の見え方の違いを明らかにする。また、色むら欠陥と人間の色判別特性との関係に基づいて色むらの合否判定を行う手法について述べる。

第7章では、色むら欠陥の官能検査の自動化法を提案する。個々のむらの程度を評価するのではなく検査面全体を評価するため、特徴量の度数分布に基づいて合否判定を行う手法について述べる。また、本手法の汎用性を確認するため、格子構造フィルムの濃淡むらという異なる種類のむら欠陥検査について紹介する。提案する官能検査法がこれら2種類のむら欠陥に対して有効であることを述べる。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果および今後の展望について述べる。

## 参 考 文 献

- [1] 工業調査会：電子ディスプレイ技術 2003,電子材料 2003 年 6 月号別冊,(2003).
- [2] 工業調査会：液晶ディスプレイ技術 2002,電子材料 2002 年 6 月号別冊,(2002).
- [3] 岡野光治,小林駿介共編：液晶 基礎編 , 応用編,培風館,(1985).
- [4] 液晶若手研究会編：液晶ディスプレイの最先端,シグマ出版,(1996).
- [5] 吉野勝美,尾崎雅則：液晶とディスプレイ応用の基礎,コロナ社,(1994).
- [6] 日本学術振興会編：液晶デバイスハンドブック,日刊工業,(1990).
- [7] 川村正行：よくわかるプラズマテレビ,電波新聞社,(2002).
- [8] 別井圭一：PDP の製造技術の現状,精密工学会誌,69,7,(2003) 919-923.
- [9] 康乗幸雄,本多 聡：PDP 前面板,電子材料,37,12,(1998) 63-66.
- [10] 康乗幸雄,落合伸介,中川佳美,山本 努：帯電防止ハードコートアクリル板の開発,住友化学,1998-I,(1998) 16-22.
- [11] 真鍋健二,山崎和広,西垣善樹,前川知博：液晶バックライト用アクリル材料と成形技術の開発,住友化学, 2002-II,(2002) 15-22.
- [12] 林 成年：偏光板,FPD Intelligence,3,10,(1998)77-80.
- [13] 東 浩二：LCD 用光学フィルムの開発動向,第 8 回ファインプロセステクノロジー ジャパン'98,(1998).
- [14] Optical Films for Liquid Crystal Display LCD 用光学フィルムデータ集,住友化学光学製品事業部発行.
- [15] 山田 泰：最新の液晶用カラーフィルタ製造技術,精密工学会誌,69,7,(2003) 900-904.
- [16] 田中 章：携帯電話・携帯情報端末用フロントライト・バックライトの技術動向,MATERIAL STAGE,3,4,(2003) 25-28.
- [17] 濱田雅郎：LCD バックライト向けプリズムシートの技術と特徴,MATERIAL STAGE,3,4,(2003) 29-33.
- [18] 和氣 進,沖村裕伸,永田賢一：LCD バックライトユニット用反射材料,MATERIAL STAGE,3,4,(2003) 39-42.
- [19] 浅井郁夫：大型高精細導光板の製造技術,精密工学会誌,69,7,(2003) 905-910.
- [20] 染谷保行,蔵田信行,東 浩二,本多 卓,清水朗子,林 成年,波岡 誠,松元浩二,水口圭一,栢根 豊：LCD 用偏光フィルムの高機能化と新しい展開,住友化学,2000-I,(2000) 29-36.
- [21] 銅金 巖,南井正好：液晶材料の高機能化,平成 10 年度未来開拓学術推進事業報告会,(1998).
- [22] 北川 篤,松永卓也：高精細 LCD 用表面処理技術の開発,日東技報,40,1,(2002) 29-31.
- [23] A.Thelen：Design of Optical Interference Coatings, McGRAW-HILL Book Co., (1989).

- [24] たとえば, 光設計とシミュレーションソフトの上手な使い方, オプトロニクス社, (2000) 82.
- [25] 本多 卓: 光制御機能を有する高分子膜の開発と応用, 高分子学会 高分子可能性講座, (1998).
- [26] Akiko Shimizu: Viewing Angle Improving Film for LCD, International Display Research Conference, Asia Display, (1998).
- [27] 本多 卓: 光制御フィルム「ルミスティー」の開発, 第 3 回新産業創出セミナー, (1998).
- [28] 中川泰夫: 電子産業における目視検査の自動化, 電気学会論文誌 D, **109**, 7, (1989) 458-462.
- [29] 中川泰夫: 世紀末の外観検査, 第 11 回外観検査の自動化ワークショップ, (1999) 89-94.
- [30] 原 靖彦: 画像処理応用技術の課題, 第 4 回外観検査の自動化ワークショップ, (1992) 115-116.
- [31] 秦 清治: 外観検査の自動化の現状と展望, 精密工学会誌, **56**, 8, (1990) 1366-1380.
- [32] 江尻正員ほか: 画像処理技術の産業分野への応用, 電気学会雑誌, **111**, 2, (1991).
- [33] 谷内田正彦, 佐藤宏介, 鷲見和彦, 岡崎信一郎, 浅野敏郎: パネルディスカッション 10 年間の発展とこれからの課題, 第 10 回外観検査の自動化ワークショップ, (1998).
- [34] パネルディスカッション: 10 年間の発展とこれからの課題 精密工学会主催「外観検査の自動化」ワークショップから, 映像情報 Industrial, **31**, 2, (1999) 18-42.
- [35] 岡 昌世, 輿水大和, 谷口倫一郎, 山本和彦, 岩田耕一, 角田興俊: パネルディスカッション「外観検査は何処へ」, 第 11 回外観検査の自動化ワークショップ, (1999) 142-155.
- [36] パネルディスカッション: 「外観検査は何処へ」 - 精密工学会「外観検査の自動化」ワークショップから - , 映像情報 Industrial, **32**, 1, (2000) 14-44.
- [37] 輿水大和, 上田博唯, 池内克史, 村瀬 洋, 田村秀行: 「Machine vision と Multi-Media の出会い」, 第 12 回外観検査の自動化ワークショップ, (2000).
- [38] パネルディスカッション: 「Machine vision と Multi-Media の出会い」 精密工学会主催「外観検査の自動化」ワークショップから, 映像情報 Industrial, **33**, 2, (2001) 20-51.
- [39] A.D.H.Thomas, M.G.Rodd, J.D.Holt and C.J.Neill: Real-time Industrial Visual Inspection: A Review, Real Time Imaging, (1995) 1:139-158.
- [40] P.Aracti: Automated Visual Inspection in Europe, Present and Future, European Vision Association, (1995).
- [41] J.Caron, L.Duvieubourg and J.G.Postaire: An Hyperbolic Filter for Defect Detection in the Packaging Industry, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (1997) 207-211.
- [42] A.Duflot and J.G.Postaire: A Mutli Processor Line Scan Vision System for

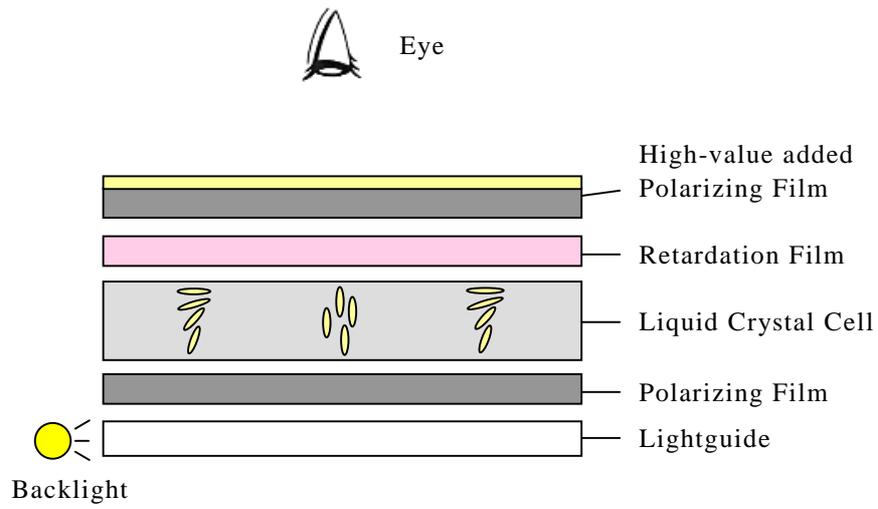
- Dimensional Control in Flat Glass Industry, 14th Int. Symp. on Manufacturing and Robotics, (1992).
- [43] F.Franchini and G.Longorbardi: Automatic Inspection with Optical Position Sensors, Opt. & Laser in Engineering 16, (1992).
- [44] C.Fernandez, J.Suardiaz, A.Iborra and J.M.Fernandez-Merono: On-line Automated Visual Inspection for Quality Control within the Automobile Industry, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (1999) 49-54.
- [45] J.Caron, L.Duvieubourg and J.G.Postaire: Design Considerations for an Industrial Inspection System for Quality Control on Flat Product: Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (1999) 37-42.
- [46] J.Caron, L.Duvieubourg, J.J.Orteu and P.Rovelte: Automatic Inspection System for Strip of Preweathered Zinc, Int. Conf. on Applications of Photonic Technology, (1997) 571-576.
- [47] K.Goebbels and G.Ferrano: Automation of Surface Defect Detection and Evaluation, Conf. on Automated Inspection and High Speed Vision Architectures, SPIE **1223**, (1993).
- [48] L.Duvieubourg, A.Taleb-Ahmed, J.Caron and J.G.Postaire: Analyze of Recursive Filters for the Detection of Defects on Flat Product, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (1999) 69-74.
- [49] R.Stojanovic, P.Mitropulos, C.Koubias and G.Papadopoulos: Vision Inspection of Web Textile Fabric, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (1999) 75-80.
- [50] L.Northon, M.Bradshaw and A.J.Jewell: Machine Vision Inspection of Web Textile Fabric, Proc. British Machine Vision Conference, (1992) 217-226.
- [51] L.J.Olsson and S.Gruber: Web Process Inspection Using Neural Classification of Scattering Light, IEEE Transaction on Industrial Electronics, **40**, 2, (1993) 228-234.
- [52] 産業用カメラの選び方・使い方,日本工業出版,画像ラボ 4月別冊号,(2000).
- [53] 長尾 真ほか: デジタル画像処理,近代科学社,(1978).
- [54] FEST Project 編集委員会編: 新実践画像処理,(株)リンクス出版事業部,(2001).
- [55] (社)精密工学会画像応用技術専門委員会編: 画像処理応用システム,東京電機大学出版局,(2000) 108-118.
- [56] 石井 明, 秦 清治, 千葉直樹, 小野勝一: 移動光源による自動車ボディの塗装欠陥の自動検出, 材料試験技術, **44**, 4, (1999) 254.
- [57] 久保田整, 山華義博, 小野勝一: 塗装外観検査の自動化技術の研究, SUZUKI TECHNICAL REVIEW,25,(1999) 77-83.
- [58] 明渡甲志,三高良介,佐久間祐治: 円筒物体の外観検査装置,第 11 回外観検査の自動化ワークショップ, (1999) 101-105.
- [59] 田中一基, 新原良美, 池田浩志, 山田直樹, 木葉 博, 笹西和人: 塗装表面検査の自動化技術, 日本機械学会論文集 (C 編), **60**, 577, (1994) 3201-3208.
- [60] 吉田 清, 今西正則, 鈴木 裕, 渡辺正実: 動画像追跡処理法を用いた塗装外観検

- 査装置の開発, 精密工学会第 9 回外観検査の自動化ワークショップ, (1997) 45-48.
- [61] 棚澤 信, 尊田貴嘉之, 嶋崎 剛, 下園裕明: 透視ひずみの定量評価技術の開発, 精密工学会誌, **63**, 12, (1997) 1754-1758.
- [62] T.Someji, T.Yoshimura and N.Akiyama: Development of Automatic Surface Inspection System of Castings, Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng., **32**, 4, (1998) 278-283.
- [63] M.Sakakibara: Development of Automatic Coating Defect Sensor by Image Processing, 22nd ISATA, (1990) 727-736.
- [64] R.Seulin, F.Merienne and P.Gorria: Machine Vision System for Specular Surface Inspection: Use of Simulation Process as Tool for Design and Optimization, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (2001) 147-152.
- [65] C.Sanderson, L.E.Weiss and S.K.Nayer: Structured Highlight Inspection of Specular Surfaces, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **10**, 1, (1988) 44-45.
- [66] B.G.Batchelor, D.A.Hill and D.C.Hodgson: Automated Visual Inspection - Chapter 7: Lighting and Viewing Techniques, IFS Publications Ltd. and North Holland, (1985).
- [67] S.K.Nayer, K.Ikeuchi and T.Kanade: Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **13**, 7, (1991) 611-634.
- [68] D.Aluze, C.Coulot, F.Meriaudeau, P.Gorria and C.Dumont: Machine Vision for the Control of Reflecting Non Plane Surface, J. of the Machine Vision Association, Society of Manufacturing Engineers, **14**, 3, 1D-2D, (1998) 1-4.
- [69] A.P.Pentland: A New Sense for Depth of Field, IEEE Trans. **PAMI-9**, 4, (1987) 523-531.
- [70] M.Ishihara and H.Sasaki: High Speed 3-D Shape Measuring Apparatus Using Shape from Focus Method, J. Japan Soc. Prec. Eng., **63**, 1, (1997) 124-128.
- [71] I.Gurov and J.Vozniuk: Rough Surface Shape Retrieval in a Fringe Projection Technique by the Image Enhancement and Fringe Tracing Method, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision, (2001) 79-83.
- [72] 前出隆一: ディスプレイの色再現と色測定 輝度むら・色むら測定技術, 月刊ディスプレイ, **8**, 2, (2002) 62-63.
- [73] ファースト: フラットパネル検査装置, <http://www.fast-corp.co.jp/>
- [74] 大塚電子: FPD モジュール検査装置, <http://www.photal.co.jp/>
- [75] 千田直道, 柳原治之, 村上健二, 北島昭彦: 遮光筒式色彩計 520 01/02, 横河技報, **41**, 3, (1997).
- [76] 斉藤英貴: 色再現性と測定技術 ELDIM の視野角・ムラ検査装置, 月刊ディスプレイ, **9**, 6, (2003) 95-96.
- [77] 坂井隆夫: 生産における光技術 ディスプレイの表示むら検査, O plus E, No.222, (1998) 524-531.

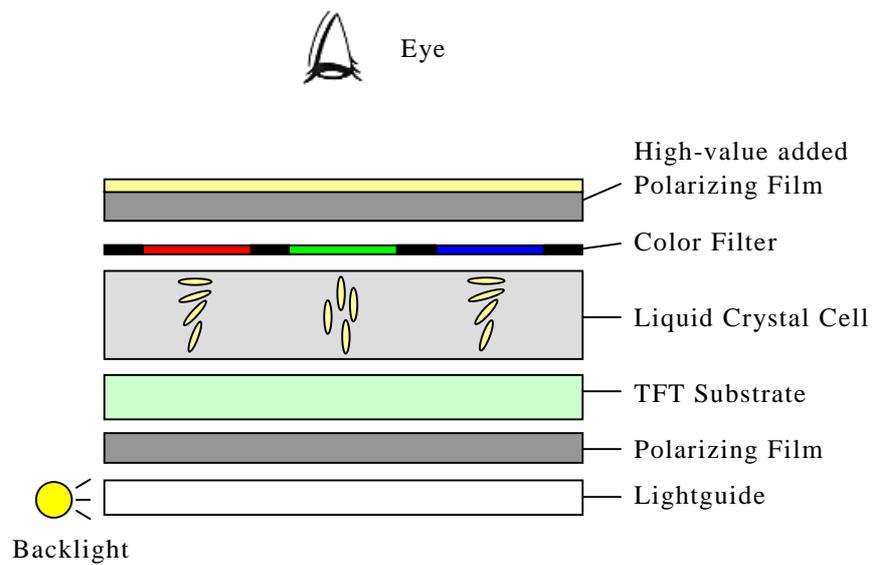
- [78] 小川俊昭：カラーフィルタ検査装置,電子材料 1996年6月別冊,(1996) 126-129.
- [79] 村上和博：カラーフィルタ検査装置,東芝技術公開集,13,72,(1995) 63-65.
- [80] 棚橋高成：LCD ムラ検査器の開発,映像情報 Industrial,35,2,(2003) 64-67.
- [81] 高橋 映,田中雅樹：むら欠陥検出技術,OMRON TECHNICS,36,4 (1996) 247-249.
- [82] 斎藤文彦：多重解像度画像を用いた液晶ディスプレイ輝度むら欠陥検出,精密工学会誌,63,5,(1997) 647-651.
- [83] 斎藤文彦：遺伝的アルゴリズムによる液晶ディスプレイ領域輝度むら検出,画像電子学会論文誌,125,5,(1996) 178-183.
- [84] 柏木利幸,大江俊一郎：色の均一性評価手法,第14回外観検査の自動化ワークショップ,(2002) 73-78.
- [85] 森本 圭,大江俊一郎,寺田賢治,柏木利幸,川人美洋子：藍染めの色むら検出手法,第9回画像センシングシンポジウム講演論文集,(2003) 239-244.
- [86] 中野宏毅,吉田靖夫,藤田和弘：ガボール関数を用いたカラー液晶ディスプレイのマクロ欠陥検査,電子情報通信学会論文誌,(1997) 734-744.
- [87] 大野隼人,梶岡英之,藤田尊圭,浅野敏郎,玉野和保：マルチバンド画像を用いた分光特性推定とその応用,第14回外観検査の自動化ワークショップ (2002) 67.
- [88] 安川涼子,川人美洋子,浦川宏,梶原莞爾：天然藍染めの感性工学的評価 IV-色むらのパターン解析-,繊維学会予稿集,58,1,(2003) 214.
- [89] 岡崎好孝,橋本 基：画像処理によるプラスチック成形時の色むら計測,第10回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集,(2001) 76-77.
- [90] 綿貫啓一,遠藤新：色むら欠陥検出におけるウェーブレット係数操作の最適化,日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集,(2001) 101-102.
- [91] 山下博,永井秀明：印刷物微少濃淡むらの高精度検出法に関する研究,三菱重工技報,35,3,(1998) 202-205.
- [92] 森由美：液晶ディスプレイのムラに取り組む 液晶ディスプレイのムラ規格の定量化・標準化への試み,映像情報 Industrial,35,3,(2003) 69-73.
- [93] 森由美,棚橋高成,辻智,田村徹,吉武良治,森口喜代：ヒューマンインフォメーション 認識限界コントラストに基づいた輝度ムラの定量化手法,映像情報メディア学会誌,56,11,(2002) 1837-1840.
- [94] 秦清治,石丸伊知郎,広刈正義：パターン検査装置のための色彩検査機能の開発,電子情報通信学会技術研究報告 PRMU,101,124,(2001) 17-24.
- [95] 中元 淳,山下 博,金子 博：MTFフラクタル次元による印刷濃度むらの定量的評価法,電子情報通信学会論文誌,(2000) 1082-1089.
- [96] 浅野敏郎,石丸伊知郎：ラディアル基底関数ネットを用いた色むらの評価,電気学会産業システム情報化研究会資料 IIS-00,No.13-21,(2000) 5-9.
- [97] 新野秀憲,大滝亮一,伊藤 誼：色むらの多次元定量化についての一提案,日本機械学会論文集 C,60,570,(1994) 357-362.
- [98] 浅野敏郎,川目啓介,望月 淳,福原信雄：CRTディスプレイの白色均一性定量評価,

- 電子情報通信学会論文誌,**J73-D2**,6,(1990) 830-839.
- [99] 上田邦夫：ムラ検査の自動化,映像情報 Industrial,**35**,2,(2003) 35-41.
- [100] 秦 清治,川上幸治,琢磨幹雄,花房秀行：ファジーニューラルネットワークを用いた印刷欠陥評価システムの構成,第 6 回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 98-103.
- [101] 高地正夫：液晶ディスプレイのムラに取り組む 輝度分析と輝度ムラ,映像情報 Industrial,**35**,3,(2003) 83-85.
- [102] 浅野敏郎,池田達紀：GAを用いた電子ディスプレイの色むら感性評価,知能メカトロニクスワークショップ講演論文集,(2001) 168-171.
- [103] 北山綱次,吉田浩之,渡辺恵一,小川雅司：ニューラルネットを利用した色検査(シートベルトへの適用),第 6 回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 83-86.
- [104] 浅野敏郎：画質官能検査の自動化技術,ファクトリー・オートメーション,**12**,11,(1994) 30-34.
- [105] 長田典子：官能検査の自動化 - 概論・手法 -,映像情報 Industrial,**35**,2,(2003) 13-16.
- [106] Toshio ASANO: Progress on 'Kansei' Measurement Technology and Its Application to Visual Inspection, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.,**32**,2 (1998) 85-89.
- [107] Mauridhi Hery Purnomo, Toshio Asano, Eiji Shimizu: "Identification of color uniformity defect on the electronic displays by learning the human perception records", T.IEE Japan, **118-C**,7/8, (1998) 1164-1169.
- [108] 吉武良治,土屋和夫：STN 液晶ディスプレイの見やすさに影響を与える要因の検討,人間工学,**29**,4 (1993) 209-214.
- [109] 横澤美紀,菅原正幸,栗田泰市郎：映像入出力系の評価,映像情報メディア学会誌,**54**,8 (2000) 1150-1155.
- [110] 浅野敏郎,石丸伊知郎：電子ディスプレイにおける色むら感覚強度の学習,電気学会論文誌,**121-C**,9,(2001) 1395-1400.
- [111] Y.Yokoyama, N.Tsumura, H.Haneishi, Y.Miyake, J.Hayashi and M. Saito:"A New Color Management System Based on Human Perception and its Application to Recording and Reproduction of Art Paintings", Proc. of Fifth Color Imaging Conference, (1997) 169-172.
- [112] 佐藤洋一,清水治和,加藤清一：カラーフィルムインライン官能検査システム,第 6 回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 87-92.
- [113] 千葉直樹,奥田泰生,安富文夫,松浦英文,河田 宏,富田 洋：限度見本に依存した官能検査の良否判定のモデル化,第 6 回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 93-97.
- [114] 奥田泰生,貴志宗紀,安富文夫,松浦英文,人見正明,大隈正人：色むら定量化のための色彩感覚特性評価,第 3 回画像センシングシンポジウム講演論文集,(1997) 85-88.

- [115] 広瀬 修：回折パターンを利用した格子構造フィルムのむら欠陥検査,精密工学会誌,**69**,4, (2003) 586-590.
- [116] 斎藤文彦：人間の視覚・聴覚情報 輝度むらの特徴量と視覚による検出時間の関係の分析,映像情報メディア学会誌,**52**,4,(1998) 554-560.
- [117] 糊澤 信, 鈴木俊彦, 下園裕明：液晶表示装置の表示むら評価技術の開発, 精密工学会誌,**66**, 1 (2000) 152-156.
- [118] 加藤晴夫：色相相対視感度特性の測定,電子情報通信学会 1990 年春季全国大会講演論文集,(1990) 70.



(a) Super Twisted Nematic (STN) type



(b) Thin Film Transistor (TFT) type

**Fig.1.1** Construction of typical Liquid Crystal Display (LCD)

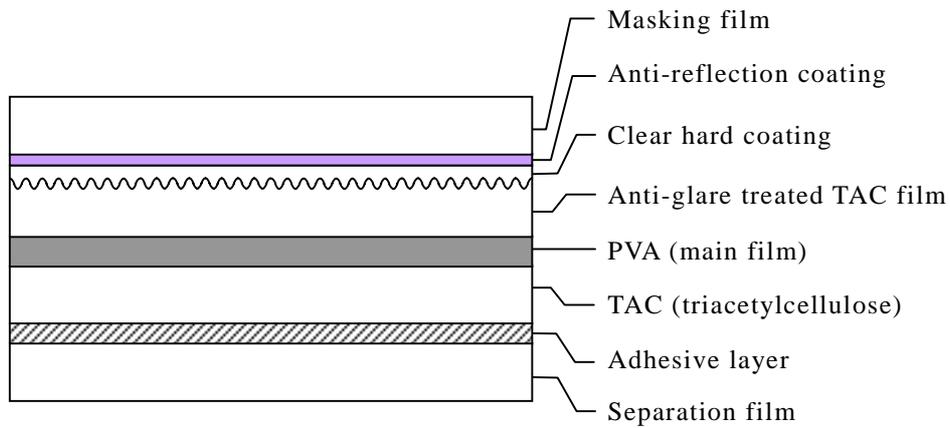


Fig 1.2 Construction of typical Polarizing film

Table 1.1 Categories of optical film defects

	大分類	欠陥形態	欠陥種類	検査の特徴	
				検査方法	問題点
光学機能シートの欠陥	微細欠陥	点状欠陥	・異物 ・気泡 など	固定光学系による検査が可能	・高解像度・高速処理が必要 高コスト
		線状欠陥	・擦過傷 ・亀裂 など	市販技術の適用が比較的容易	限定されたアルゴリズム
	低コントラスト欠陥	面状欠陥	・緩やかな起伏 ・色むら ・濃淡むら など	固定光学系では検査困難  検査員が手に持って動かしながら検査	・発生メカニズムが多様 ・適する観測系が多様 汎用技術が少ない ・合否判定の定量化が困難 官能検査

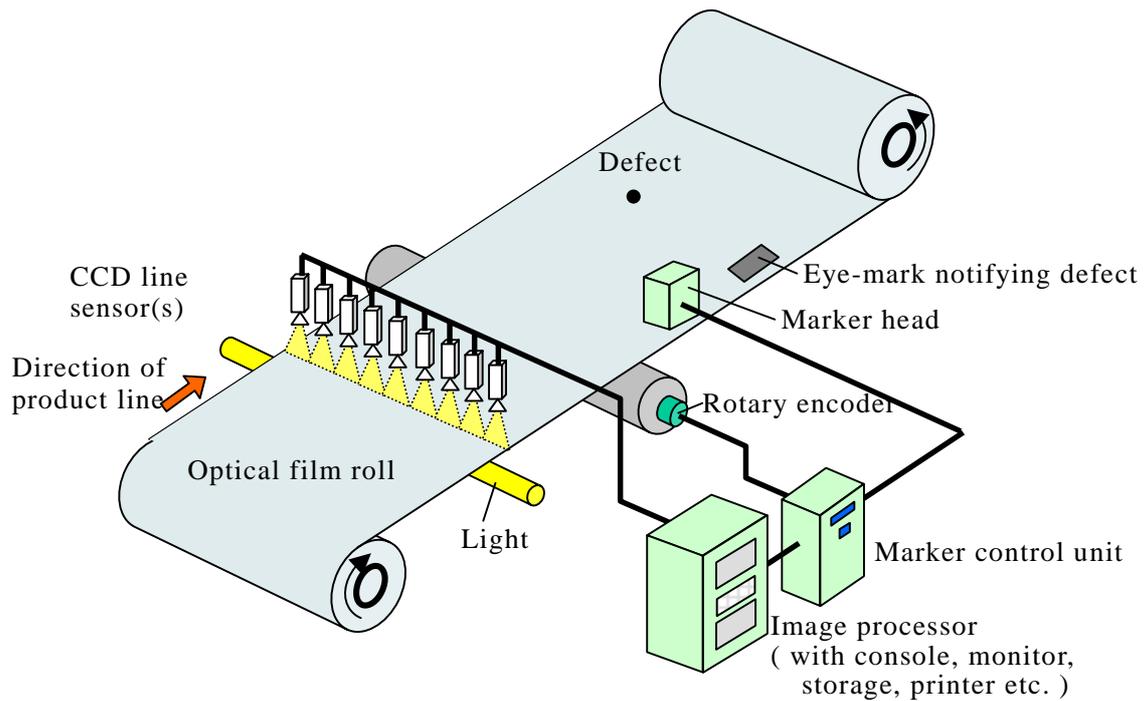


Fig.1.3 Construction of typical defect detection system

	A分野	B分野	C分野
用途	半導体、大型コンピュータ	FA用視覚	感覚的な検査
検査対象	LSIパターン、回路パターン	品名読み取り、はんだ付け形状	CRT画面の色むら、真珠等級判定
画像処理	ハード(専用回路)	汎用プロセッサ	ソフト
省人効果	数10人	数人	1+ $\alpha$ 人
装置価格	1~数億円	1~数千万円	1~数百万円
特長	<ul style="list-style-type: none"> <li>●検査内容が明確</li> <li>●高速/高精度</li> <li>●機械の能力が人間を越える</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●位置決め</li> <li>●汎用画像処理装置が有効</li> <li>●機械と人間の能力が拮抗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●官能検査の自動化</li> <li>●検査内容が不明確</li> <li>●機械の能力が人に追いつかない</li> </ul>

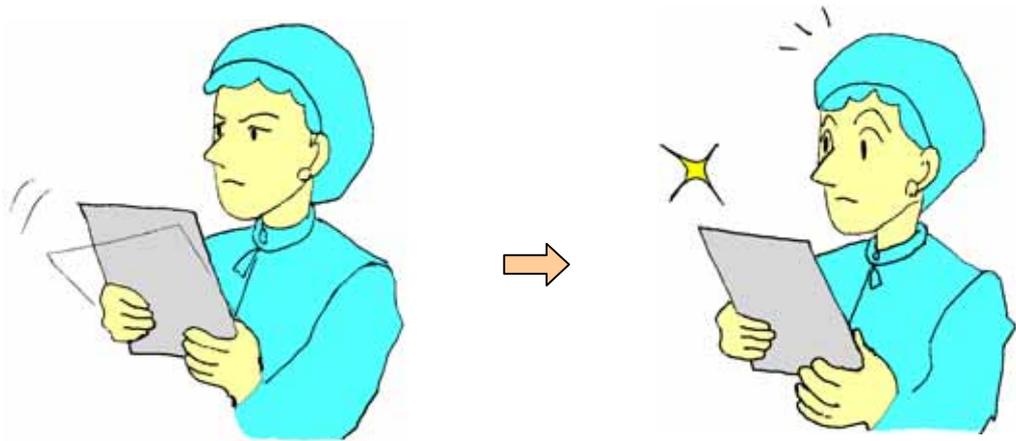
(a) Categories of image processing applications

(Ref. 原 靖彦：画像処理応用技術の課題，第4回  
 外観検査の自動化ワークショップ，(1992) 115-116)

	A 分野	B 分野	C 分野
光学機能シート検査の特徴	微細欠陥(点状，線状欠陥)		
		低コントラスト欠陥(面状欠陥)	
			許容コスト
	要求速度/精度		

(b) Characteristics of optical sheet inspection

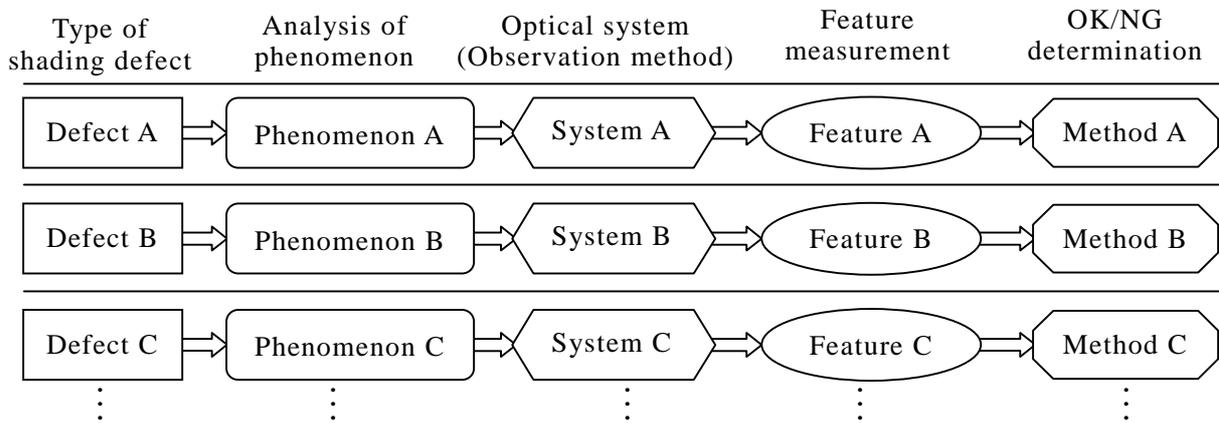
Fig.1.4 Categories of image processing applications and characteristics of the optical sheet inspection



Operators pick an optical film up by hands and move it to search the defects.

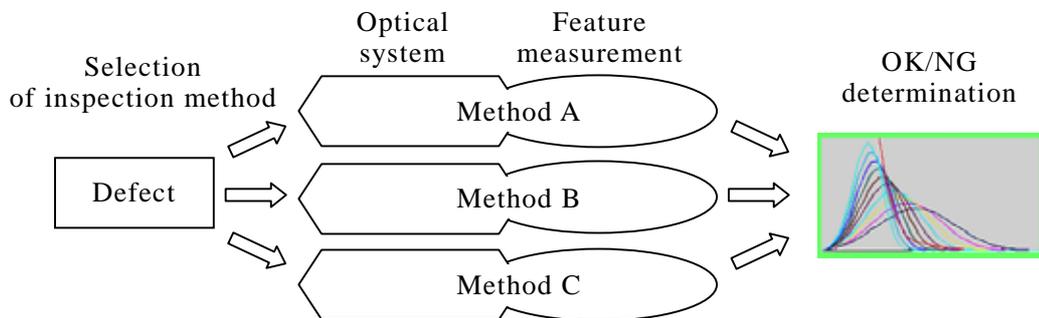
The defects will be visible faintly under the best observation condition.

**Fig.1.5** Procedure of visual inspection



(a) Typical development procedure

An optical phenomenon caused by defect is analyzed for each subject. Optimum observation method, feature measurement and OK/NG determination are developed for each defect.



(b) Ideal development procedure

Optimum optical system and feature measurement method can be selected easily and the multi-purpose determination method is applicable for any kind of defect feature.

**Fig.1.6** Development of the inspection system for shading defect

## 第2章 パターン照明を用いた微小起伏欠陥の検出

### 2.1 緒言

光学機能シートの表面に発生する微小起伏欠陥は自動検査が困難な欠陥の一つである。通常、これらの欠陥はパターン照明を使用して検出される。たとえば、被検査面に映り込んだ照明像のパターンが欠陥の存在によってゆがんだり、輝度分布が局所的に変化するなどの現象が利用される。しかし、欠陥を観測できる位置が限られるため、固定光学系を用いた通常の検査装置を適用することは困難である。

起伏欠陥を検出する方法として従来から様々な手法が報告されている<sup>1)-7)</sup>。これらの多くは、輝度勾配を持つ光源を使用した特殊な光学系と高度な画像処理アルゴリズムとを組合わせたものである。以下にその代表例を紹介する。石井ら<sup>1)</sup>は移動光源と長さの異なる複数の導光板から構成される特殊な照明装置を開発し、塗装面上の欠陥の自動検出を実現している。田中ら<sup>2)</sup>は、放射輝度を連続的に変化させた面光源を使用し、欠陥検出と凹凸の判別を実現した。吉井ら<sup>3)</sup>はストライプパターン照明を使用し、欠陥による明暗パターンの反転箇所を抽出し、その時間変化を追跡することにより誤検知の少ない検査方法を確立している。明渡ら<sup>4)</sup>は、光源にスリット光を使用し、反射光をスクリーンに投影した像を観測することにより、被検査面上の欠陥を検出する手法を開発している。糊沢ら<sup>5)</sup>は、ガラスを対象に、光源の透過像のゆがみを検出することにより欠陥を検出する手法を確立した。染次ら<sup>6)</sup>は、リング状の多段照明を使用し、画像処理においては欠陥周囲の輝度分散値等を用いた特徴量法と統計的な手法とを併用することにより鋳物表面の欠陥検査を実現した。Sakakibaraら<sup>7)</sup>は、被検査面にパターンを投影することにより表面の各種欠陥を検出するシステムを開発した。

これらの手法は、検査対象の特徴に合わせた光学系と観測される画像に適した処理アルゴリズムとの組合わせからなり、いずれも効果的である。しかし、フィルム等の比較的安価な製品の生産ラインへの適用を考えると設備が大がかり過ぎたり、画像処理コストが高くなり過ぎたりし、実際に適用することがコスト面から困難であった。さらに別の問題として、被検査体がフィルム等の剛性が極めて低い素材では、被検査体のハンドリングが困難であるという問題がある。フィルム等では、搬送中に生じる動的な反りなどの変形があり、これによってフィルムに映り込んだ照明パターンは大きくゆがむ。このため、欠陥によって生じる照明パターンの変化との識別が必要となる。しかし、その識別を安価なシステムでかつ生産ラインに追従可能な処理速度で実現することは容易でない。

本章では、まず、微小起伏欠陥の特徴を説明し、通常の検査装置適用上の課

題を述べる。次に、この課題を解決する手法として、パターン照明を用いた欠陥検出方法を提案する。照明の明暗パターンがフィルム表面の起伏欠陥の存在によってぼけることに着目した欠陥検出原理について述べる。そして、実験検証を中心に、本手法の検出能力・実用性等について検討した結果を述べる。

## 2.2 対象欠陥の特徴と検査の課題

### 2.2.1 対象欠陥の特徴

欠陥の断面形状を図 2.1 (a) にモデルで示す。この種の欠陥は平面サイズに対して高さ方向の変化が非常に小さいことが特徴である。同図 (b) は凹凸複合型の欠陥の形状測定例である。欠陥の大きさは、大小様々であり、直径 1mm 以下で高さまたは深さが数  $\mu\text{m}$  ~ 数十  $\mu\text{m}$  の点状欠陥から、直径数 mm 以上で高さまたは深さが数十  $\mu\text{m}$  以上の大きなうねりのような欠陥までがある。一般に平面寸法が大きく高さが低いほど欠陥のコントラストが低く検出が難しい。

### 2.2.2 欠陥検査の課題と開発目標

微小起伏欠陥を観察するためには、通常、図 2.2 のように反射照明が用いられる。この図は、フィルムに映り込んだ蛍光灯光源の像を利用して欠陥を検出する手法を示したものである。欠陥は照明強度が大きく変化するところで明瞭に観察されることが知られている<sup>1)</sup>。照明強度が大きく変化する蛍光灯のエッジ近傍において、欠陥によって輝度が大きく変化したりエッジ形状のゆがみが観測されたりしているのが分かる。図 2.2 (b), (c) の下部のプロファイルは画像中に破線で示した位置の輝度プロファイルを示している。これを見ると、欠陥位置で周囲よりも高い輝度が観測されている。オペレータが目視検査を行う場合は、フィルムを手に持ち、観測角を少しずつ変化させてフィルムに映る光源像の位置を移動させながら視線を検査面全体にわたって走査するように検査する。

しかし、この原理をそのまま利用して通常の検査装置による自動検査を行うことは事実上不可能である。それは、観測すべき位置が非常に狭い範囲に限られており、その位置が動的に変動するからである。被検査面が平面である場合には、図 2.2 (b) の破線の位置をラインセンサを用いて撮像することにより自動検査が可能である。しかし、実際には被検査体が剛性をもたないフィルムであるため、動的に反りやうねりといったわずかな変形を生じる。このような場合、図 2.2 (c) のように光源像がゆがみ（この場合には右回転）、観測すべき位置が移動する。この例では、光源像がラインセンサの撮像位置をまたぐ形となり、欠陥のみの画像を得ることは不可能である。このため、通常の固定照明下でラインセンサを用いた自動検査を行うことはできない。これを避けるためには、例えば、光源像のゆがみに沿った曲線上の輝度プロファイルを動的に求め

るといった専用のアルゴリズムが必要となる。しかし、その場合ラインセンサは使用できず、市販の検査装置をベースとした安価な検査装置の構築は困難となる。

本研究では、これらの課題を解決し比較的 low コストにて自動検査を実現するため、次の 2 つの条件を満たす検査方法の開発を目標とした。

- (1) 照明および観測位置を固定した光学系による観測
- (2) ラインセンサ、エリアセンサともに適用可能な画像処理アルゴリズム

## 2.3. 検出原理

### 2.3.1 欠陥撮影方法

照明としては、図 2.3 に示す 2 種類のパターンを光源前面の拡散板に配置した照明装置を使用した。図 2.3 (a) は、ラインセンサを用いてストライプパターン照明下で欠陥を撮影した画像であり、同図 (b) は、エリアセンサを用いてチェッカパターン照明下で欠陥を撮影した画像である。なお、ストライプの間隔並びにチェッカの大きさは、検出すべき欠陥の最小サイズに合わせ、数 mm 以下とし、ピントはいずれもパターン面に合わせている。

これらの画像の中で、欠陥は中央に位置しており、欠陥の存在により欠陥近傍の各パターンは局所的にぼけたように見える。しかし、欠陥から大きく離れたパターンにおいても、パターンの間隔もしくは大きさが微妙に変化している。これは、フィルム表面のわずかな反りに起因するものであり、欠陥の存在によるものではない。

通常、欠陥によるパターンの変化を抽出する方法として、欠陥がない場合のパターンの画像との差分をとる方法や、パターンの特徴（例えば明暗のピッチ）の変化を抽出する方法等が考えられる。しかし、被検査体がフィルムのように容易に変形し得る素材である場合、正常部であっても図 2.3 の画像に見られるようなパターンのゆがみが動的に発生する。したがって、欠陥のみを検出するためにはこれらを明確に識別する画像処理アルゴリズムが必要となる。

### 2.3.2 輝度プロファイルモデル

図 2.4 は、ストライプパターン照明またはチェッカパターン照明を用いた時の欠陥近傍の輝度プロファイルモデル化したものである。領域 a は被検査体が完全に平面の場合であり、明暗は等間隔で輝度変化は急峻である。領域 b は反り等による曲面領域であり、パターンのゆがみが明暗間隔の不ぞろいとして現れている。領域 c は欠陥部であり、パターンのぼけが緩やかな輝度変化として現れている。これより、欠陥のみを検出するためには欠陥の存在によって生じる中間的な輝度（中間調）と緩やかな輝度勾配を生じている領域の検出を考えればよいことがわかる。

### 2.3.3 欠陥検出アルゴリズム

ここではチェッカパターン照明を使用しエリアセンサで撮影した画像をもとに欠陥抽出アルゴリズムを解説する。

#### (1) 輝度中間調領域の抽出

原画像は図 2.5 (a) のようにパターンの明部と暗部がほぼ同面積を占める画像であるので、そのヒストグラムは同図 (b) のように 2 つのピークをもつ。図中破線で示した 2 つの輝度レベルはそれぞれ明部と暗部を除去するためのしきい値を示しており、これらのしきい値に挟まれる谷の部分が欠陥の存在によって生じる中間調の領域に対応する。図 2.5 (c) は、2 つのしきい値によって明部と暗部を除去し、中間調の領域を抽出した結果である（この画像を第 1 欠陥候補抽出画像と呼ぶことにする）。

被検査体の表面が比較的平面に近く動的な反り等も少ない場合、画像中の明部および暗部が占める面積比率はほとんど変化しないと考えられる。このような場合にはしきい値の決定方法として図 2.6 (a) に示すような p-タイル法<sup>7)</sup>が有効である。p-タイル法は二値化後の画像の面積比があらかじめ設定した比率になるようにしきい値を定める手法であり、しきい値を動的に定めるうえで最も基本的な手法である。一方、被検査体が曲面を多く含む場合や反りを生じる場合などは明部および暗部が占める面積比率が動的に変化する。この場合は固定の面積比に分割する p-タイル法では不向きである。このような場合には、同図 (b) に示すように、ヒストグラムから中間調領域の度数の平均的なレベルを抽出し、これとの比較により動的にしきい値を決定する方法が効果的である。被検査体の素材に合わせていずれかの方法を選択すると良い。実験ではフィルムを比較的平面に保持できたため、どちらの方法でも同様の結果が得られた。図 2.5 (c) は、p-タイル法を採用し、暗部：境界領域：明部の面積比率をほぼ 4：2：4 とし、度数が全体の 40% および 60% となる輝度値をしきい値とした場合の抽出結果である。

ところで、欠陥のない正常な領域であってもチェッカパターンの輝度は連続的に変化するので、中間調領域には正常部の画素が含まれる。第 1 欠陥候補抽出画像をみると、欠陥部は抽出されているが、同時に各チェッカパターンの明部と暗部の境界も抽出されていることがわかる。

#### (2) 輝度勾配の中間調領域の抽出

次に、緩やかな輝度勾配の領域の抽出を考える。チェッカパターンの明部と暗部の境界は水平方向と垂直方向のみであるので、水平 (x)、垂直 (y) の 2 方向 Sobel フィルタ<sup>8)</sup> によって図 2.5 (d) の 1 次微分画像を得る。変換には式 (2.1) に示すオペレータおよび式 (2.2) に示す演算式を使用した。

$$\begin{array}{l} \text{水平：} \\ \text{垂直：} \end{array} \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{array} \quad (2.1)$$

$$f_{xy} = |f_x| + |f_y| \quad (2.2)$$

ここで、 $f_x, f_y, f_{xy}$  はそれぞれ水平、垂直、および両方向の演算結果を表すものとする。

図 2.5 (e) は演算後のヒストグラムである。チェッカパターンの明部と暗部では輝度変化が小さいことから微分値の低いところに、大きな山が生じる。一方、明部と暗部の境界近傍では、微分値は非常に大きくなる。

したがって、輝度中間調領域の抽出と同様に、図中破線で示した 2 つのしきい値によって輝度勾配の中間調領域を抽出することを考える。このとき、反り等によって原画像のコントラストはほとんど変化しないことが実験的に分かっているので、1 次微分画像のヒストグラムは一定であると考えられる。したがって、ここでのしきい値決定方法にも p-タイル法を採用した。実験では、累積度数が、原画像の明部と暗部の面積比率の和である約 80% となる輝度値を第 1 のしきい値とし、残る境界領域を輝度勾配の大きさによって 2 分するため累積度数が約 90% となる輝度値を第 2 のしきい値とした。このようにして図 2.5 (f) のような画像が得られる。

原画像からの輝度中間調領域の抽出画像 (図 2.5 (c)) と、1 次微分画像からの輝度勾配中間調領域の抽出画像 (同図 (f)) とを AND 処理することにより、同図 (g) に示すように、これらの特徴をあわせもつ領域が抽出される (この画像を第 2 欠陥候補抽出画像と呼ぶ)。

### (3) 膨張・収縮によるノイズ除去

図 2.5 (g) の第 2 欠陥候補抽出画像では、欠陥領域は明瞭に抽出されているが、同図 (d) の各格子が交差する領域を中心とする微小領域が多数抽出されている。そこで、これらの微小領域を除外するために、膨張・収縮処理を行った。膨張処理は 1 個の欠陥が複数個として誤認識されるのを回避するために行う処理であり、ごく近傍に集中している微小な抽出画素を結合すればよいため 1, 2 回程度の処理が妥当と考えられる。また、収縮処理は微小なノイズ成分を除去するために行う処理であり、ノイズの大きさは高々、原画像の明部と暗部の境界領域の幅程度であると考えられるため、膨張回数に境界領域の幅を加算した回数が妥当であると考えられる。図 2.5 (h) は膨張処理を 2 回、収縮処理を 5 回行った結果である。これらの処理により欠陥のみが明瞭に抽出されていることがわかる。

ところで、膨張・収縮回数は検査システムの検出率・虚報率 (正常部を誤って欠陥と判定する率) に直結する重要なファクタである。したがって、現実には実際に生産ラインにおいて稼動しながら、検出率・虚報率の評価結果に基づくフィードバックを繰り返し実験的に最適値を決定することが望ましい。上述の膨張・収縮回数は、実験に使用したサンプルにおいて虚報を発生しないよう調整した値である。

#### (4) 欠陥情報解析および出力

欠陥検出画像を基に欠陥のラベリングを行い、必要な欠陥情報を解析して出力する。本実験では、欠陥面積、重心位置を取得した。

## 2.4. 実験

### 2.4.1 実験方法

撮影方法を図 2.7 に示す。被検査体は厚さ 200  $\mu\text{m}$  程度の半透明フィルムである。被検査体を水平に保持し、エリアセンサとチェッカパターン照明とを被検査体に対してそれぞれ 45 degree の角度で対向させて配置した。カメラ視野はフィルム面で 120mm  $\times$  80mm、カメラの有効画素数は 512  $\times$  480、チェッカサイズは 2.5mm の正方格子とした。チェッカパターンの画像上での大きさは 10 画素程度とした。画像解析には市販の汎用画像処理装置 (CPU: Pentium II<sup>TM</sup>, 400MHz) を使用した。

### 2.4.2 検出結果

#### (1) 各種サンプル検出能力

10 種類の欠陥サンプルについて検出テストを行った結果を表 2.1 に示す。欠陥の強度として "strong", "medium", "weak" の 3 段階を用意した。"strong", "medium" レベルは品質上の不良レベル, "weak" は視認がやや困難であり品質上の限度レベルである。表中、画像の中に欠陥の存在による中間調領域が現れていることを視認するものを "A", パターンのゆがみのみで中間調領域が視認できないものを "B" と記載した。これらの代表例 (Sobel オペレータを施した画像) を図 2.8 (a), (b) にそれぞれ示す。中間調が現れているものについてはすべて検出可能であったが、中間調の発生しない "weak" レベルでは、許容される反りなどと同様であり、欠陥としては検出しなかった。表 2.2 に、欠陥サンプル全 10 種について、原画像、1 次微分画像、欠陥抽出画像を掲載する。この表では "weak" レベルのサンプル A8, A9 についても欠陥が抽出されているように見える。しかし、サンプル A8, A9 では他のサンプルと比較して欠陥抽出が可能なしきい値範囲が狭く、後述の照明変動に対しても頑健性を持たなかったため、表 2.1 では検出不可という評価とした。

#### (2) 照明変動

生産現場においては、必ずしも照明条件を一定に維持できない場合が多い。そのため検査装置の実用化のためには照明変動に対する安定性は重要な性能のひとつである。実験では照明の時間的・空間的な変動について評価を行った。

時間変動と等価な操作としてレンズの絞りを 1 絞り分 (6dB) 変化させた場合、"weak" レベルの欠陥 (A8, A9) は検出できなくなるが、"medium" レベル以上の欠陥の検出には影響がなかった。また、2 絞り分 (12dB) 変化させた場合

には, "medium" レベルの検出能力は低下するが, 虚報は発生せず正常に画像処理を実行できた. このことは照明の安定化対策を実施することが困難な既存の製造現場へ適用する上で大きな利点である.

一方, 本手法は画像のヒストグラムからしきい値を決定しているため光源の空間的不均一については許容性をもたない. 図 2.9 は光源の明度が空間的に均一な場合とシェーディングを含む場合の原画像のヒストグラムを比較したものである. 光源の明度が空間的に不均一な場合, 同図 (b) に示すように, パターン照明の明部を表すピークが低くなだらかになり, しきい値決定の妨げとなる. 今回の検出対象欠陥の場合, 2%程度 (平均輝度からの標準偏差: CCD 出力では 3 階調程度) の均一性が必要であった.

### (3) 処理時間

1 画面の検査に必要な処理時間は, プロセッサに Pentium II<sup>TM</sup> (クロック周波数 400MHz) を使用した場合, 画像入力を除いて約 44ms であった. 処理時間の内訳を表 2.3 に示す. エリアセンサとして市販のプログレッシブカメラを使用し, 2 フィールド同時取込みを行えば画像入力を含めても 70ms 程度となり, 極めて実用的な検査が可能であると思われる.

### (4) 本手法のその他の適用条件

実験を通じて, 本手法の実用化にあたっては以下のような適用条件を満たす必要があることが分かった.

- ・ 被検査体の表面が光沢をもち, パターン照明の反射像が明瞭に得られること. パターンがコントラストよく撮影されなければ本解析手法は適用できない.
- ・ エリアセンサの場合, フィールド蓄積時間以下のフィルム振動・ばたつき等がないこと. 振動により画像のぼけが生じ, これらが中間調として撮像されるため虚報の原因となる.
- ・ 照明パターンの間隔を大幅に圧縮または伸張するような曲面がないこと. 大きな曲面を有する場合は検出能力の低下につながる.
- ・ 照明の設置時に空間的な均一性を確保する配慮が必要である.
- ・ 照明パターン形状は, 明部と暗部の面積比が 1:1 でありその境界が視野全体に均等に配置されていればチェッカまたはストライプに限るものではない.

## 2.5 ラインセンサを用いたインライン検査装置の開発

### 2.5.1 インライン検査のための課題

前節までで述べたアルゴリズム開発および実験はチェッカパターン照明およびエリアセンサを用いて行った. しかし, 製造ラインへの導入を考えるうえではラインセンサの使用が望ましい. そこで, 連続的に搬送されるフィルムを対象として, ストライプ照明およびラインセンサからなる図 2.10 のようなイ

ンライン検査装置を試作する。

インライン検査装置を構築するためには次のような課題がある。

- ・ 画像入力連続的に行われるため，画像入力と画像解析を並行して行わなければならない。
- ・ 画像入力時間よりも短い時間内に画像解析を完了しなければならない。

次節以降にて，上記課題を解決するための検討を行う。

### 2.5.2 非同期画像入力による並列処理方法

画像入力・画像解析の並列処理は次のような手順で行う。画像メモリを2面確保し，片方の画像メモリへ画像入力している間に他方のメモリに格納された画像に対して処理を行う。いま，2つの画像メモリを便宜上メモリA，メモリBと呼ぶ。処理手順は以下の通りである。図2.11はこの処理の流れを示す。

- (1) メモリAへの画像入力を開始
- (2) メモリBの画像データの解析を実行
- (3) 解析結果出力
- (4) メモリAへの画像入力完了待ち
- (5) メモリA,Bを示すポインタを入れ替えて(1)へ戻る

### 2.5.3 画像解析時間の短縮

エリアセンサを用いた画像処理プログラムによる画像解析時間は，表2.3に示した通り，画像サイズ512×480pixelに対して44msであった。これをそのままラインセンサによる検査に換算すると，例えば4960画素×960スキャン(=4.7Mpixel)の画像に対して約850msを要する計算になる。ラインセンサの駆動速度をごく一般的な10MHz(毎秒約2000スキャン)とすると，画像入力時間は480msとなり，画像入力時間に対して約1.8倍の解析時間を要する。解析時間は最新の高速プロセッサを使用することにより短縮できると考えられるが，ここでは参照画素の間引きにより解析時間の短縮を図る。

表2.3をみると，第1および第2欠陥候補抽出プロセスに多くの時間を要していることが分かる。これらのプロセスの主要な処理はヒストグラム作成処理である。ところで，ラインセンサによるインライン検査を考える場合には，ラインセンサのスキャン方向は図2.9に示したようにストライプパターンに直交する方向である。このため，ヒストグラム作成にあたって全スキャンのデータを積算する必要はなく，数本毎に積算すれば十分であると考えられる。実験では，10スキャン毎に間引きしたデータを基に作成したヒストグラムを用いても，欠陥検出感度を損なわない処理結果が得られた。このときの画像解析時間の内訳を表2.4に示す。この結果から，第1，第2欠陥候補抽出プロセスの処理時間が短縮されていることがわかる。この方法により，本実験で使用したような比較的低速のプロセッサでも画像入力時間以下で画像解析を終了することができる。

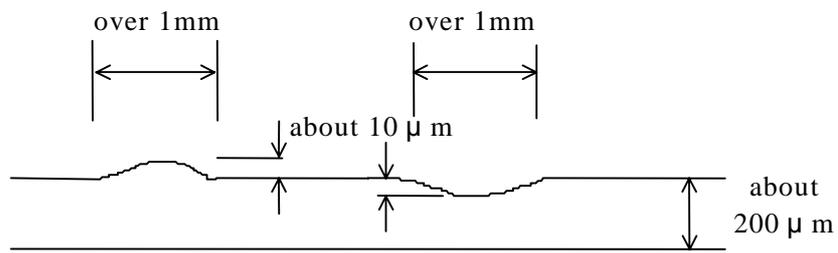
## 2.6 結言

フィルム等の表面に発生する微小起伏欠陥を自動検出する方法について検討し、以下の結論を得た。

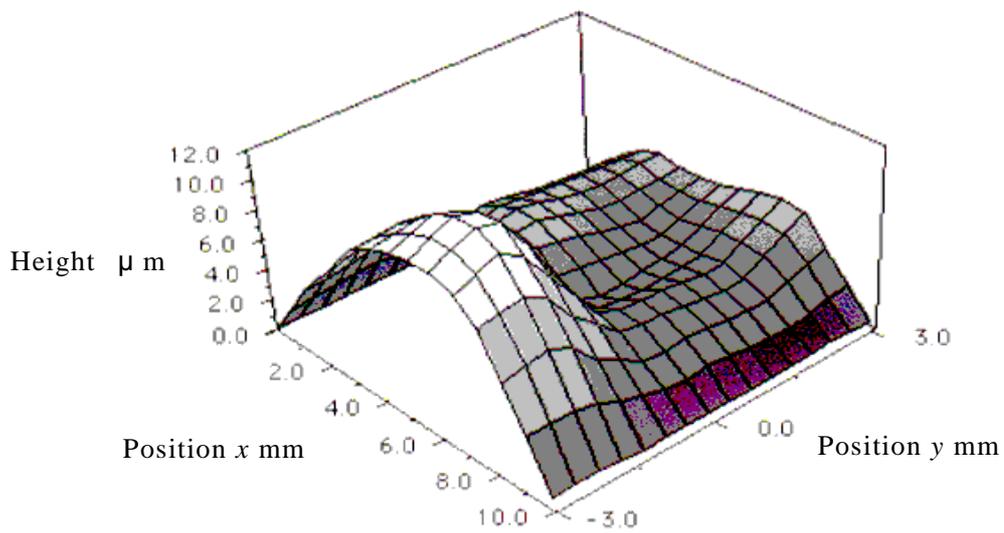
- (1) ストライプとチェッカの簡単なパターン照明を用いて、欠陥によって生じるそれらのパターンのぼけ領域を欠陥領域として抽出する実用的な欠陥検出アルゴリズムを提案した。本手法によると、従来困難であった固定光学系での自動検査が可能であることを述べた。
- (2) 本手法を実際に欠陥サンプルに対して適用した結果、中間調領域を視認できる欠陥について確実に検出できること、ならびにサンプルの反りによる誤検出が生じないことが明らかになり、信頼性の高い検査が可能であることを示した。
- (3) 本アルゴリズムは通常の屋内の照明変動に対して十分な安定性があり、既存の製造ラインへの導入が容易であることを述べた。
- (4) ラインセンサを用いて連続フィルムをインラインで検査するためのプログラムを試作した。4960 画素、10MHz の駆動条件下で画像入力時間以下での画像解析を実現し、インライン検査に目処を得た。

## 参 考 文 献

- [1] 石井 明, 秦 清治, 千葉直樹, 小野勝一: 移動光源による自動車ボディの塗装欠陥の自動検出, 材料試験技術, 44, 4, (1999) 254.
- [2] 田中一基, 新原良美, 池田浩志, 山田直樹, 木葉 博, 笹西和人: 塗装表面検査の自動化技術, 日本機械学会論文集 (C 編), 60, 577, (1994) 3201-3208.
- [3] 吉田 清, 今西正則, 鈴木 裕, 渡辺正実: 動画像追跡処理法を用いた塗装外観検査装置の開発, 精密工学会第9回外観検査の自動化ワークショップ, (1997) 45-48.
- [4] 明渡甲志, 三高良介, 佐久間祐治: 円筒物体の外観検査装置, 第 11 回外観検査の自動化ワークショップ, (1999) 101-105.
- [5] 糊澤 信, 尊田貴嘉之, 嶋崎 剛, 下園裕明: 透視ひずみの定量評価技術の開発, 精密工学会誌, 63, 12, (1997) 1754-1758.
- [6] 染次孝博, 吉村剛治, 秋山伸幸: 鋳物部品表面の凹状欠陥自動検出システムの開発, 精密工学会誌, 63, 10, (1997) 1412-1416.
- [7] M.Sakakibara: Development of Automatic Coating Defect Sensor by Image Processing, 22nd ISATA, (1990) 727-736.
- [8] W.Doyle: Operations Useful for Similarity-invariant Pattern Recognition, Proc. JACM, 9 (1962) 259.
- [9] R.O.Duda and P.E.Hart: Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, (1971) 267.

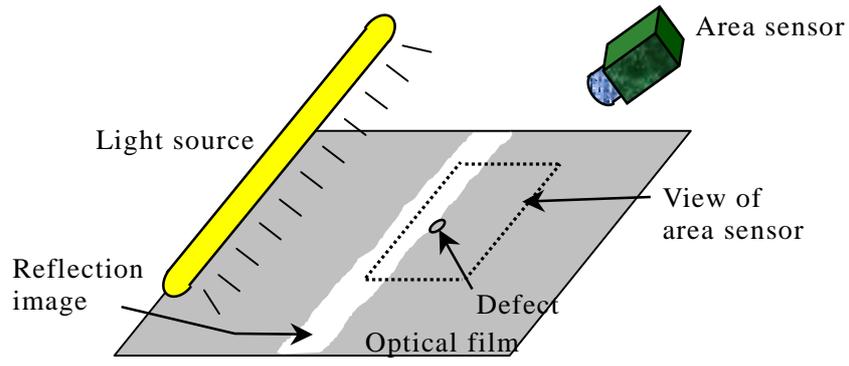


(a) Typical cross sections  
 left : convex defect , right : concave defect

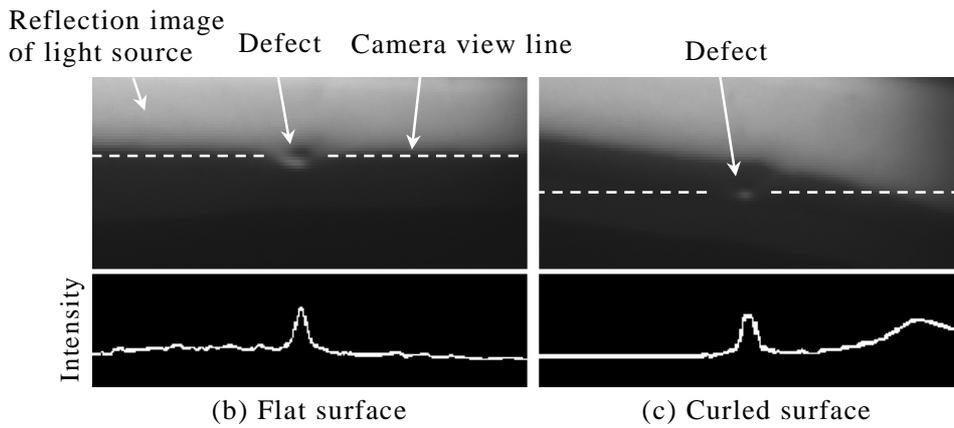


(b) An example of 3-D measurement of a compound defect

**Fig.2.1** Shapes of defects

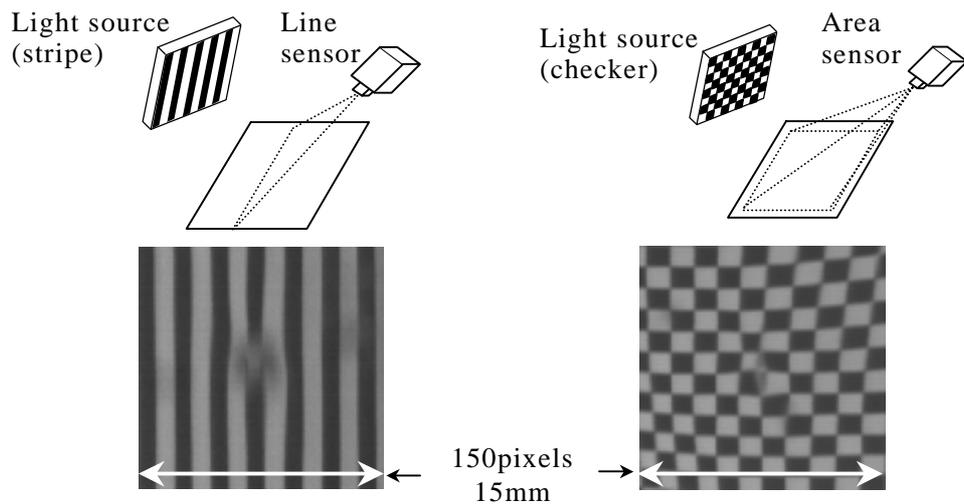


(a) Observation method



**Fig.2.2** Observation of a defect in a sheet of film

Each lower figure shows intensity profile on a dashed line in the upper image.

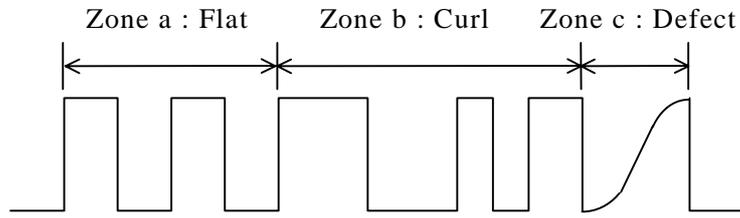


(a) Stripe observed by line sensor

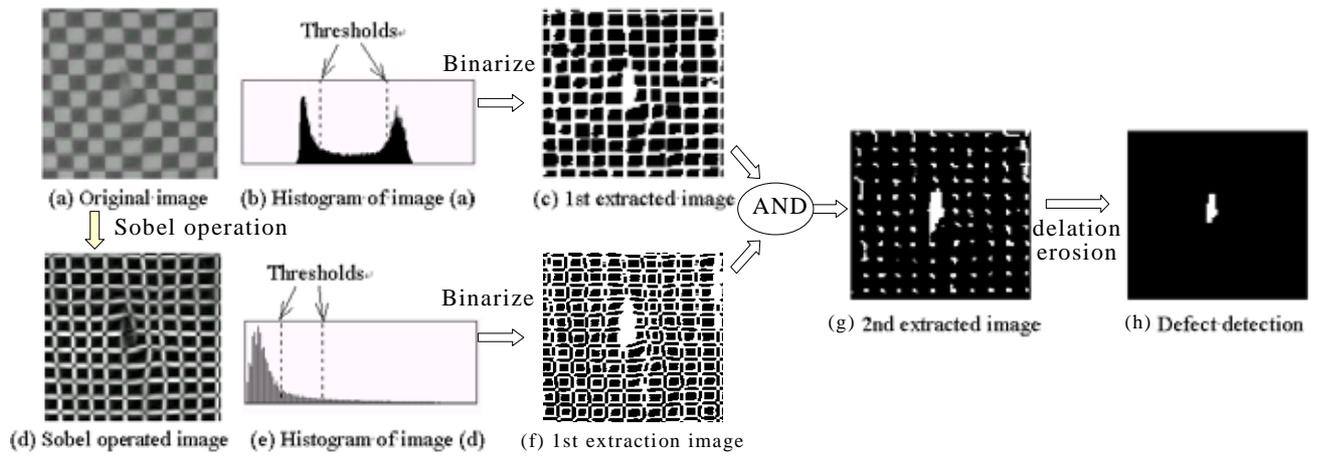
(b) Checker observed by area sensor

**Fig.2.3** Observation of stripe and checker patterns

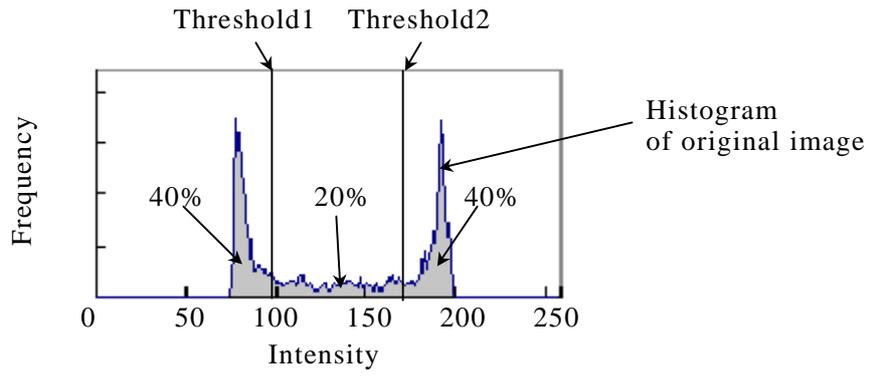
A defect is observed blurrily.



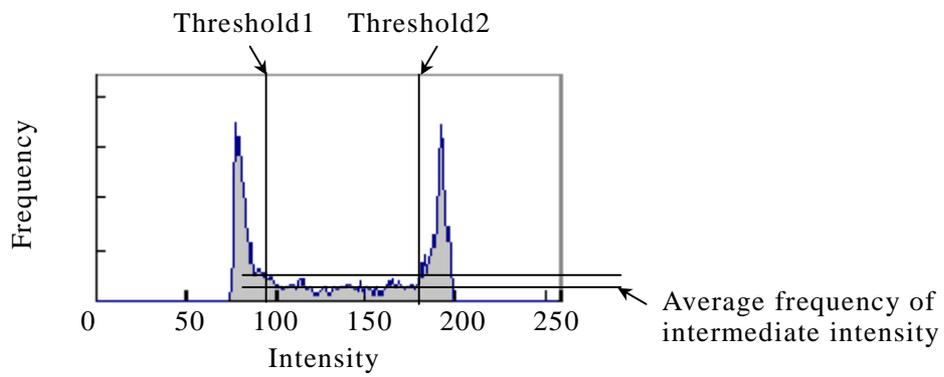
**Fig.2.4** Characteristic intensity profiles in a stripe image



**Fig.2.5** Image processing steps

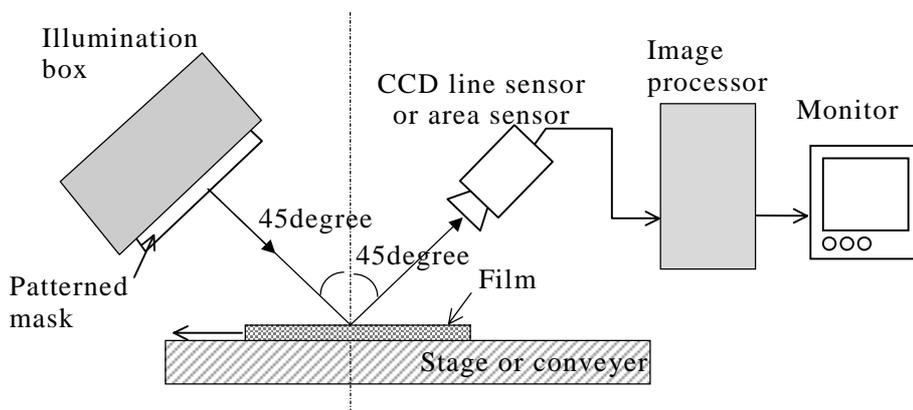


(a) p-tile method



(b) Threshold determination based on histogram of image

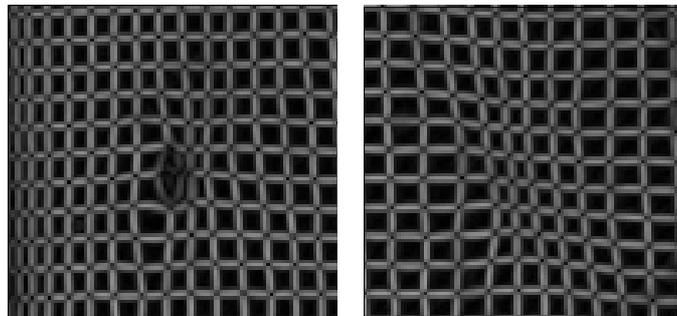
**Fig.2.6** Threshold determination



**Fig.2.7** Configuration of experimental system

**Table 2.1** Results of defect inspection

Defect sample No.	Level of defect	Appearance	Result
A1	strong	A	
A2	medium	A	
A3	strong	A	
A4	medium	A	
A5	strong	A	
A6	medium	A	
A7	weak	B	×
A8	weak	B	×
A9	weak	B	×
A10	medium	A	

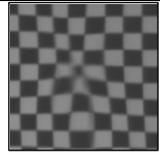
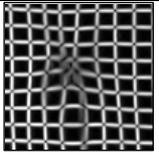
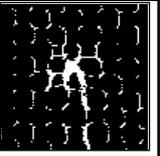
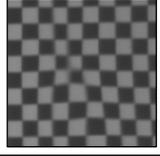
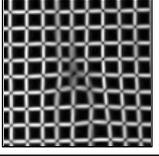
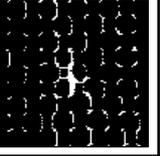
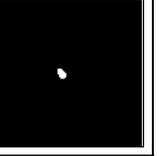
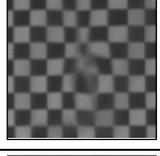
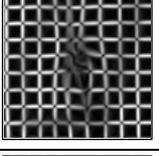
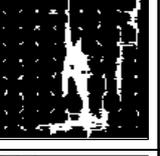
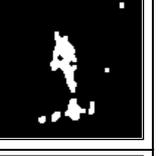
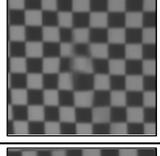
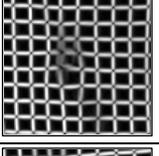
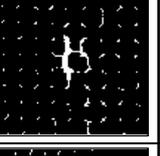
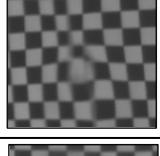
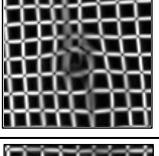
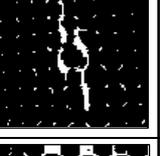
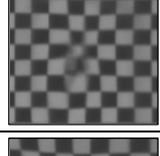
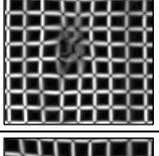
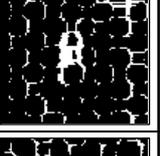
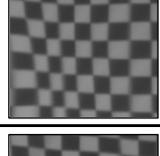
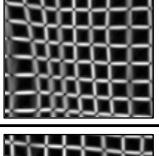
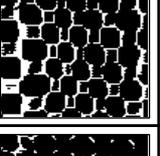
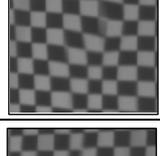
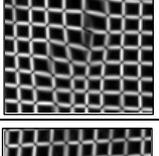
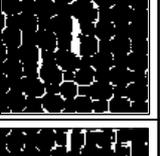
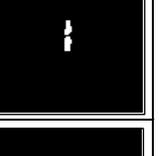
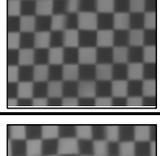
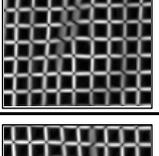
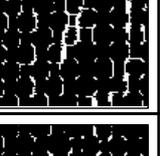
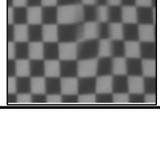
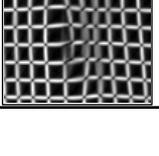


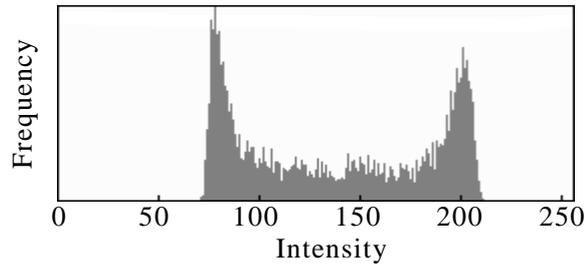
(a) Sample A1  
(appearance "A")

(b) Sample A7  
(appearance "B")

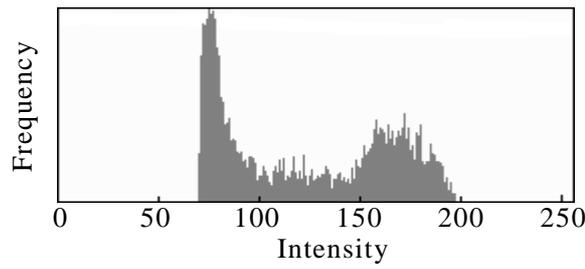
**Fig.2.8** Examples of sobel operated images

**Table 2.2** Results of defect inspection

Sample #	Original image	operated image	1st extracted image	detection image
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				
A7				
A8				
A9				
A10				



(a) Under uniform intensity illumination



(b) Under illumination with shading

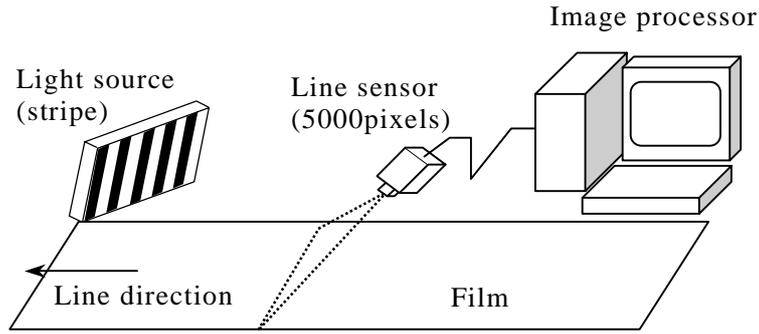
**Fig.2.9** Histograms of original image

**Table2.3** Executing time of image processing for each frame image

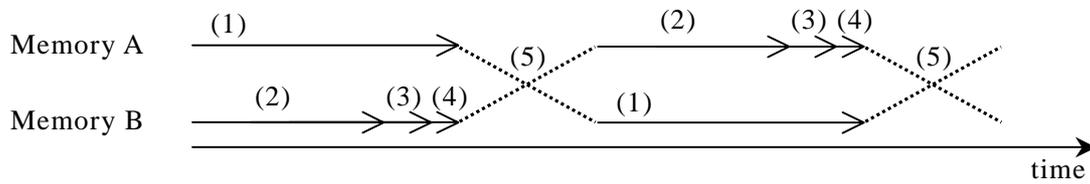
Process	Executing time [ms]
Sobel operation	4
1st extraction	13
2nd extraction	18
dilation/erosion	5
feature extraction	4
total	44

Image size :  $512 \times 480$ pixels

Frame rate : 33ms



**Fig.2.10** Prototype in-line inspection system



- (1) Start image capture to memory A
- (2) Start image processing to memory B
- (3) Output inspection result
- (4) Wait status for image capture completion
- (5) Counterchange pointers for memory A and B  
return to (1)

**Fig.2.11** Parallel operation flow

**Table2.4** Executing time of image processing with prototype in-line system

Process	Executing time [ms]
Sobel operation	55
1st extraction	83
2nd extraction	83
dilation/erosion	98
feature extraction	40
total	359

Image size : 4960 × 960pixels  
 Line scan : 2000 scan per second  
 Capture time : 480ms



# 第3章 微小起伏欠陥検出の光学シミュレーションによる 評価

## 3.1 緒言

フィルムやシート等、光沢面を有する薄物製品の表面に発生する微小起伏欠陥の自動検出<sup>1)-4)</sup>は、次の2つの理由により容易ではない。(1)被検査体の面積が欠陥の寸法に比して非常に広いために高空間分解能のラインセンサを使用した高速な検査が要求される。(2)被検査体が易変形素材であるため、被検査体は搬送中に緩やかなゆがみが生じるが、これによる誤検出は避けなければならない。特に、本研究で検出対象としている欠陥は、幅方向には数mmの広がりをもち高さ変化は数 $\mu\text{m}$ という非常に緩やかな表面起伏欠陥であるため、通常の正反射を利用した検出方法では高速な検出は困難であった<sup>5)</sup>。

前章では、このような微小起伏欠陥の検出に対して、明暗の繰返しパターンからなるパターン照明を使用し、被検査体表面を介して観察される照明のパターンが欠陥の存在によって局所的にぼける現象を見出した。そして、このぼけが生じている領域を欠陥領域として自動抽出する画像処理アルゴリズムを提案し、実際の欠陥サンプルを用いて検出能力の評価を行った(欠陥サンプルには重大欠陥から良品と見なせる限度のものまでを用意した。それらの幅方向の大きさはいずれも数mmであり、高さ変化は数十 $\mu\text{m}$ から2,3 $\mu\text{m}$ である)。その結果、本手法が照明変動に対するロバスト性に優れ、被検査体が動的な反りやうねりを有する素材であってもこれらと欠陥との識別が可能であること、ならびに本手法では通常使用される照明を用いて非常に少ない計算量にて実現できるため、コストおよび処理時間の面で実用性が高いことを述べた。しかし、実際に本手法を製造ラインに導入する際には、以下の項目について検討しなければならない。(1)本手法で検出される領域と、実際の欠陥の大きさと凹凸の程度との関係。(2)検出可能な欠陥寸法。(3)最適なパターン形状。(4)撮影装置、被検査体、パターン照明の最適な空間配置。しかしながら、これらの項目を実験的に明らかにすることは、欠陥サンプルに限られること並びにパラメータの多さにより容易ではない。

一方、欠陥の存在によって照明パターンがぼける現象については、糊澤ら<sup>6)</sup>は自動車用ガラスに対して報告している。すなわち、ガラス表面に局所的な凹凸がある場合にガラス越しにその箇所のチェッカパターンを観察するとチェッカパターンがぼけることを見出し、その原因を光線経路の光学的なゆがみによるものと説明している。しかし、本研究においては、パターン照明からの光線は被検査面上で鏡面反射することから、パターンのぼけは別の原因によるものと思われる。

そこで、本章では、照明パターンが局所的にぼける原因を明確にするために、照明パターンから撮影面までの光線追跡を行う。そして、様々な寸法の微小起伏欠陥が存在するときの撮影画像をシミュレーションにより生成し、本手法を製造ラインに導入する際に検討すべき項目の評価を行う。

## 3.2 欠陥検出のシミュレーション

### 3.2.1 光学系の配置

シミュレーションには図 3.1 に示すような座標系を用いる。ラインセンサの受光面を光軸 ( $z$  軸) の原点にとり、被検査面 (フィルム) は、 $z = L_1$  を切片とし  $x$ - $z$  平面に対して 45 degree の傾きをもつ平面とする。パターン照明の出射面は、 $x$ - $z$  平面に平行に、 $y = L_2$  の平面とする。これにより、ラインセンサとパターン照明とが被検査面に対してそれぞれ 45 degree の角度で対向する配置となる。パターン照明から出射された光は被検査面で正反射し、ラインセンサの手前に配置した開口  $d$ 、主点位置  $H, H'$  のレンズを介してラインセンサの受光面に結像される。

実験では一眼レフカメラ用の組合わせレンズを使用した。シミュレーションにおいてはこれと等価な厚肉単レンズを用いた。被検査面が平面であれば、受光面からレンズの像空間主点  $H'$  までの距離  $s_2$ 、物空間主点  $H$  から被検査面を介してパターン照明までの距離  $s_1$ 、レンズの焦点距離  $f$  の間には、次の結像の関係が成り立つ<sup>7)</sup>。

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

$$M = s_1 / s_2 \quad (3.2)$$

ここで、焦点距離  $f$  は既知であり、レンズの横倍率  $M$  は画像取得時の拡大率 { (パターン照明上での実寸法) / (対応するラインセンサの受光面上での寸法) } から実測可能であるので、式 (3.1), (3.2) より  $s_1, s_2$  を求めることができる。レンズの開口  $d$  と絞り  $F$  値との間には図 3.2 に示すように、

$$F\text{-number} = f / d \quad (3.3)$$

の関係があり、例えば焦点距離  $f = 55\text{mm}$  のレンズを用いて絞りを  $F4$  とした場合、開口の大きさ(直径)は  $d = 13.75\text{mm}$  となる。

結像光学系の全長  $L_0$  は  $s_1, s_2$  と主点間距離  $H$  から次式で与えられる。

$$L_0 = s_1 + s_2 + \Delta H (= L_1 + L_2) \quad (3.4)$$

式 (3.4) より、特定のカメラおよびレンズを用いてある一定の拡大率にてパターン照明の正反射像を撮影する場合、結像光学系の全長は一意に定まることが分

かる。

### 3.2.2 受光面で観測される光強度分布の計算

ラインセンサの各画素が受光する光強度の計算にあたり，ある一画素  $P(x_p, y_p, z_p)$  に注目する．レンズの有効開口範囲を多数の微小領域に分割し，その一つの微小領域を  $Q(x_q, y_q, z_q)$  とする．微小領域  $Q$  の中心を通り画素  $P$  に入射する光線の強度は，光線の経路を遡り，パターン照明の出射点を求めることによって得られる．

さて，図 3.1 に破線で示すように，受光面から光学距離が  $L_0$  となる位置に，パターン照明の鏡面反射像を考える．被検査面が平面であれば，各微小領域を通して画素  $P$  に入射する光線の出射点は，レンズの収差を無視すると微小領域  $Q$  の位置に関係せずに，パターン照明上の一点  $S(x_s, y_s, z_s)$  であり，鏡面反射像上では， $S'(x_s, y_s, z_s)$  である．点  $S'$  は  $z_s = L_0, y_s = 0$  で表される  $x$  軸に平行な直線上にあることから， $x_s$  は点  $P$  と主点  $H, H'$  から容易に求めることができる．

次に，微小領域  $Q$  を通り画素  $P$  に入射する光線の被検査面での反射を考える．欠陥近傍の被検査面の形状を  $z' = g(x, y')$  とすれば，反射点  $R(x_r, y_r, z_r)$  は，直線  $QS'$  と被検査面との交点であり，二分法<sup>8)</sup>を使って求めることができる．なお，被検査面形状の計算においては図 3.1 に示す局所座標系  $xy'z'$  を用いた．一方，点  $R$  の外向きの法線ベクトルを  $\mathbf{n}$ ，反射ベクトルを  $\mathbf{v}$  とすれば，入射ベクトル  $\mathbf{u}$  は，次式で与えられる．

$$\mathbf{u} = \mathbf{v} - 2(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (3.5)$$

したがって，入射ベクトル  $\mathbf{u}$  より，パターン照明の出射点  $S(x_s, y_s, z_s)$  が計算され，その点の照明強度（本論文中では，明部を 1，暗部を 0 とした）を得ることができる．

以上の計算をレンズの有効開口範囲の全微小領域について行い，その総和を画素  $P$  での照明強度として評価した．同様の計算を各画素に行うことによって，ラインセンサで撮像される 1 ラインの画像を得ることができる．さらに，欠陥モデル関数を  $y'$  方向（生産ラインの流れ方向に相当）に順次平行移動しながら上記の計算を繰り返し行うことにより，2 次元画像を生成することができる．このときの移動量は実際の生産ライン速度とラインセンサの駆動条件とによって決まるラインの流れ方向の空間分解能に一致させる．

### 3.2.3 欠陥形状モデルの作成

図 3.3 は実際の欠陥サンプルの表面形状を測定した例である．同図 (b) には欠陥の頂点付近を通る 2 方向の断面形状を実線で示している．欠陥は緩やかな凹，凸あるいは凹凸複合の形状をしている．そこで，欠陥形状のモデルとして，欠陥の断面形状に類似しているガウス型関数およびその 1 次導関数を使用する．まず，凹欠陥および凸欠陥のモデルとして次式を使用する．

$$g(x, y') = A \cdot \exp\left(-\frac{2(x^2 + y'^2)}{\sigma^2}\right) \quad (3.6)$$

ここで,  $A$  は欠陥の高さ方向の変位を表し,  $A$  の符号によって欠陥形状 (凹または凸) を表す.  $\sigma$  は欠陥の平面寸法を表し, 高さ方向の変位がピークの  $1/e^2$  となる半径を与える. 次に, 凹凸複合欠陥の表現には次式を用いる.

$$g(x, y') = A\beta \cdot x \cdot \exp\left(-\frac{2(x^2 + y'^2)}{\sigma^2}\right) \quad (3.7)$$

ここで,  $\beta$  は式 (3.7) の最大値と最小値の差 (p-p 値) が  $A$  に一致するように調整した係数である. なお, 図 3.3 (b) には欠陥形状の計測結果に類似した欠陥モデルを破線で示しており, 実際の欠陥形状をほぼ表現できていることが分かる. 図 3.4 はシミュレーションに使用した欠陥モデルを鳥瞰図表現したものであり, 高さが  $A = 5.0 \mu\text{m}$ , 半径が  $\sigma = 1.5 \text{mm}$  の例である.

### 3.2.4 解析に使用したパラメータ

解析にあたっては以下のような数値を使用した.

- ・ CCD : 5000 画素ラインセンサ, 素子寸法  $7 \mu\text{m}$
- ・ レンズ :  $f = 55 \text{mm}$ ,  $H = 1 \text{mm}$ , 絞り F4
- ・ 光学配置 :  $L_0 = 900.6 \text{mm}$ ,  $L_2 = 100.0 \text{mm}$
- ・ パターン : パターン周期 (明暗 1 対の幅) は  $0.5, 2.0 \text{mm}$  の 2 種類  
明部と暗部とも同一寸法で, 輝度は明部: 1, 暗部: 0.
- ・ 撮像視野 :  $500 \text{mm}$  (空間分解能:  $0.1 \text{mm/pixel}$ )
- ・ 欠陥モデル : 凹欠陥, 凸欠陥, 凹凸複合欠陥の各モデル  
 $\sigma = 0.5, 1.0, 2.0 \text{mm}$ ,  $A = 0, 1, 2, \dots, 10, 20, \dots, 50 \mu\text{m}$   
(ただし, 凹欠陥では  $A$  は負値)

これらは実際の実験装置に合わせた値としている. ここで, 被検査体の搬送速度は画像の空間分解能が幅方向と流れ方向とで一致するように調整している. たとえば, ラインセンサの駆動速度を毎秒 1000 スキャンとしたとき搬送速度は  $6 \text{m/m}$  となる.

## 3.3 シミュレーションおよび実験結果

### 3.3.1 シミュレーションと実験との比較

シミュレーション結果と実験結果の比較例を図 3.5 に示す. シミュレーションには, 実験に使用した欠陥サンプルの形状に合わせて,  $\sigma = 1.0 \text{mm}$ ,  $A = -5.0 \mu\text{m}$  の凹欠陥モデルを使用した. パターン照明の周期は  $2.0 \text{mm}$  (明部, 暗部とも  $1.0 \text{mm}$ ) とし, それ以外の光学系は前節の通りとした. 図に示すプロファイ

ルは、それぞれ欠陥中央を通る 1 ラインの画像の輝度プロファイルを表している。これらを比較すると、欠陥による画像のぼけ具合およびプロファイル形状とも非常によく一致していることが分かる。

### 3.3.2 欠陥の深さによる欠陥観測画像の違い

目視検査において、欠陥の平面寸法がほぼ同じであっても照明パターンがぼけて見える程度は欠陥毎に異なることが経験的に知られている。この現象は平面寸法の大きい欠陥ほど顕著である。これは、平面寸法がほぼ同じであっても欠陥の高さの違いにより欠陥形状が異なるためと考えられているが、欠陥形状と見え方との関係は解明されていない。そこで、平面寸法が同じで高さの異なる欠陥モデルに関してそれぞれの欠陥観測画像をシミュレートし、見え方の違いを調べた。欠陥モデルとして、 $d = 1.0 \text{ mm}$  および  $3.0 \text{ mm}$  の凹欠陥モデルを使用し、欠陥の高さを  $A = -3.0 \mu\text{m}$ ,  $-5.0 \mu\text{m}$ ,  $-7.0 \mu\text{m}$  と変化させた。パターン照明の周期は  $2.0 \text{ mm}$  とした。結果を図 3.6 に示す。同図 (a) は  $d = 1.0 \text{ mm}$  の凹欠陥についての結果である。これをみると欠陥高さによらず見え方はあまり変化していない。一方、同図 (b) は  $d = 1.0 \text{ mm}$  の凹欠陥についての結果であるが、このとき、 $A = -3.0 \mu\text{m}$  ではわずかにパターンのゆがみが見られるのみでぼけは観測されておらず、欠陥高さが大きくなるにつれてぼけが見られるようになる。

図 3.7 は、 $d = 3.0 \text{ mm}$  の凹欠陥モデルを使用し、欠陥の高さ  $A$  を変化させたときの輝度プロファイルのぼけ領域の大きさを示したものである。ここでは、ぼけ領域の大きさとして、図中のプロファイルに斜線で示した領域の面積  $S$  を用いた。この結果から、欠陥の平面寸法が同じであるとき、欠陥の高さによってぼけ領域の面積が単調に増加することが分かる。

### 3.3.3 パターン周期による欠陥観測画像の違い

次に、同一欠陥に対して周期の異なるパターン照明を用いた場合の欠陥画像を実験により取得し、欠陥による画像のぼけ具合を比較した。結果の一例を図 3.8 に示す。ここでは、前節の欠陥サンプルよりも平面寸法の小さい  $d = 0.5 \text{ mm}$  のものを使用した。同図 (a) は前節と同様のパターン周期  $2.0 \text{ mm}$  の照明下での観測画像および欠陥中央を通る断面の輝度プロファイルである。この場合、欠陥は画像中の楕円で示した領域の中央付近に存在するが、ほとんどぼけは見られず、また、輝度プロファイルからも欠陥の存在による振幅の減衰は見られない。一方、同図 (b) はパターン周期  $0.5 \text{ mm}$  の照明下での観測結果である。これをみると、画像の中央付近に欠陥によるぼけが観測されており、輝度プロファイルにも明暗の振幅の減衰が現れている。これら両者の違いは、欠陥の平面寸法に対するパターン周期の大小関係の違いである。このことから、検出すべき欠陥の平面寸法によって適切な照明パターンが存在すると考えられる。

### 3.3.4 パターン周期と欠陥検出感度との関係

欠陥寸法に応じた適切なパターン周期を明らかにするため、いくつかの欠陥モデルに対してパターン周期を変化させてシミュレーションを行った。欠陥の存在による画像のぼけを定量化するために次式で示す欠陥検出感度 $D$ を定義する。

$$D = w_{blurring} / w_{stripe} \quad (3.8)$$

ここで、 $w_{stripe}$  はパターン周期である。また、 $w_{blurring}$  は、図3.9の図中に示す欠陥の中央を通る輝度プロファイルにおいて、明暗の振幅が欠陥の存在によって正常部における振幅の80%以下に減衰（ぼける）した領域の幅である。

欠陥モデルとして、 $r = 0.5\text{mm}$ 、 $A = -5.0\ \mu\text{m}$  および  $r = 2.0\text{mm}$ 、 $A = -20.0\ \mu\text{m}$  の2種類の凹欠陥モデルを使用し、パターン周期 $w_{stripe}$ を6.0mmから0.2mmまで0.2mmごとに変えてシミュレーションを行った。図3.9の結果をみると、いずれの欠陥モデルにおいても欠陥寸法に対してパターン周期が大きいときには、欠陥検出感度 $D$ は小さく、ほとんどぼけは見られない。しかし、欠陥寸法に対してパターン周期が同程度になると欠陥検出感度は急激に増大し、ぼけが広範囲に生じることがわかる。

### 3.3.5 考察

シミュレーションおよび実験結果から、本技術を実用化するうえで次のような重要な特徴を見出すことができる。

- (1) 欠陥による画像のぼけ具合の推定：一般に、欠陥検査技術の検討において様々な寸法の欠陥サンプルを入手することは困難である。しかし、本研究で行ったシミュレーション結果と実験結果が良く一致したことから、入手困難な任意の欠陥形状に対して観測画像を評価することができる。これにより光学系の実用化検討を効率的に行うことが可能であると期待できる。
- (2) 欠陥の高さの推定：従来、微小起伏欠陥の目視検査においては、欠陥の有無の評価のみが可能であった。欠陥の高さを計測するためには高度な表面形状測定装置が必要であり、計測には多大な時間が必要である。このため、欠陥情報を生産工程管理に活用することは困難であった。また、フィルムのような剛性をもたない素材においては、計測中に生じるフィルムの反り等の変形により正確な計測ができないという課題があった。本シミュレーションを用いてあらかじめ様々な欠陥の見え方を評価しておくことにより、欠陥の高さをおおむね推測することが可能になる。図3.6の結果から、欠陥高さが数 $\mu\text{m}$ 程度か、数十 $\mu\text{m}$ 程度かといったオーダーの推定が可能であると考えられる。これにより、生産工程で発生する欠陥形状の傾向をインラインで監視することが可能になり、生産工程の改善につながる。

が期待できる。

- (3) 最適照明パターン：本手法を用いて欠陥が検出できるかどうかは、画像のぼけの領域がノイズに対して十分な面積で抽出されるかどうかによって決まると考えられる。一方、本手法の欠陥抽出アルゴリズム（欠陥の存在によって生じる中間的な輝度の領域と輝度変化が緩やかな領域の2つの特徴を合わせ持つ領域を検出する）から、欠陥のない正常領域において抽出されるノイズの大きさは高々ストライプ周期程度であると予想される。したがって、図 3.9 において検出感度が 1 となるストライプ周期が検出可能な限界であり、それよりも小さいストライプをもつパターン照明とすればよい。あるいは、実用化の可能性を判断する際に経験的によく用いられる S/N 比 3 以上という目安をここにも適用するとすれば、いずれの欠陥寸法に対しても欠陥の半径 以下のパターン周期とするのが望ましいと考える。

### 3.4 光学配置と検出感度との関係

3.2.1 節で述べた通り、本手法では、使用するレンズと画像の解像度が決まれば光学系の全長は一意に定まる。しかし、ラインセンサと被検査体との距離  $L_1$  と被検査体からパターン照明までの距離  $L_2$  との組み合わせは決まらない。そこで、同一の欠陥に対して、一定の全長  $L_0$  を維持しながらラインセンサ・被検査体・パターン照明の配置 ( $L_1, L_2$ ) を変化させて、これらの配置の違いが検出感度に与える影響を、シミュレーションと実験により検証した。

#### 3.4.1 シミュレーション

欠陥モデルとして、前節と同じ、 $w = 0.5 \text{ mm}$  および  $w = 2.0 \text{ mm}$  の2種類の凹欠陥モデルを使用した。シミュレーションでは欠陥高さ  $A$  を可変とした。パターン周期として、それぞれの欠陥モデルに対して  $w_{\text{stripe}} = w$ 、すなわち、 $w_{\text{stripe}} = 0.5 \text{ mm}$  および  $w_{\text{stripe}} = 2.0 \text{ mm}$  を用いた。

それぞれのモデルに対するシミュレーションの結果を図 3.10 に示す。（欠陥サイズとパターン周期の組み合わせのうち、 $w = 0.5 \text{ mm}$  と  $w_{\text{stripe}} = 2.0 \text{ mm}$  では欠陥がパターンサイズよりも小さく検出困難である。図 3.10 ではこれを除く3通りの組み合わせについてシミュレーション結果を示した。）これらの図をみると、照明距離によって欠陥検出感度が異なっており、ある適切な照明距離が存在することが分かる。さらに、その適切な照明距離は欠陥の平面サイズによって異なっている。また、欠陥の平面サイズが同じであれば、欠陥の高さ  $A$  が大きいほど高い検出感度が得られる照明距離の範囲が広がっている。これらの結果から、検出対象欠陥の平面寸法が決まれば、それに適するパターン周期と照明距離が求められる。この例では、 $w = 0.5 \text{ mm}$  の欠陥を検出するためには照明距離  $L_2 = 70 \text{ mm}$  程度、 $w = 2.0 \text{ mm}$  の欠陥には  $L_2 = 280 \text{ mm}$  程度の照明距離

が適している。

### 3.4.2 実験

照明距離による検出感度の変化を確認するため、実際の欠陥サンプルに対して検出実験を行った。欠陥サンプルには、0.5 mm および 2.0 mm 程度のものを使用した。照明パターンはいずれも周期 0.5 mm のストライプとした。結果を図 3.11、図 3.12 に示す。フィルムと照明との距離  $L_2$  は 50 mm から 190 mm の間で 20 mm ずつ変化させた。このとき、カメラとフィルムとの距離  $L_1$  を同じ距離だけ変化させてフォーカス位置をパターン面に維持した。図中、画像の中央付近に欠陥が存在する。画像中に見られる黒い線はマーカーで描いた目印であり、画面の左右から欠陥に向かって伸びている 2 本の棒状のものは欠陥位置を示すための指示棒である。

図 3.11 は  $\phi = 0.5$  mm の欠陥の観測画像と欠陥中央部の輝度プロファイルである。これらを見ると、 $L_2 = 50$  mm ではあまりパターンのぼけは見られないが、遠ざけるにつれてぼけが大きくなり、やがて  $L_2 = 150$  mm を超えると再びぼけが見られなくなっていく様子が分かる。 $L_2 = 90$  mm 程度で最も検出しやすいと考えられる。

図 3.12 は  $\phi = 2.0$  mm の欠陥の観測画像と欠陥中央部の輝度プロファイルである。これらを見ると、照明距離が短い場合にぼけが見られないことは同じであるが、ぼけが見えはじめる距離  $L_2$  が大きくなっている。 $L_2 = 110$  mm 以上でぼけが見え始め、最も遠い  $L_2 = 190$  mm までぼけ具合は低下しなかった。

これらの結果はシミュレーションの結果とよく一致している。このことから、欠陥サイズに応じた選択的な検出が可能であるという本手法の利点を確認された。また、必ずしも各種サイズの欠陥サンプルを用意して実験を行わなくても、シミュレーションによって最適照明条件が得られるということが確認できた。

### 3.4.3 考察 - 欠陥の識別 -

従来、微小起伏欠陥は欠陥の有無は目視により検査できても、そのサイズを基準に合否判定をすることが困難であった。上記の結果は、欠陥サイズを識別して検出できる可能性を示している。たとえば平面サイズの大きい欠陥のみを検出したい場合にはパターン周期、照明距離ともに大きくとるとよい。また、平面サイズの大小によらず検出したい場合はパターン周期、照明距離ともに小さくとるとよい。さらに、図 3.10 の (a) と (b) とを比較すると、欠陥サイズによって検出感度の値が大きく異なっている。これを利用して、検出感度に上限値を設定することにより、設定値よりも大きいものを欠陥と見なさないようにすることにより、平面サイズの小さい欠陥のみを検出することも可能であると考えられる。

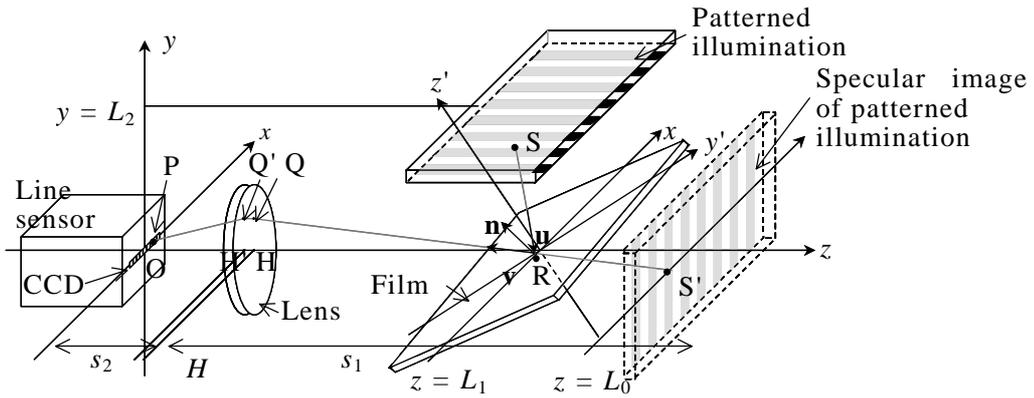
### 3.5 結言

パターン照明を用いた微小起伏欠陥の検出手法について，幾何光学に基づくシミュレーションと実験検証を行い，以下の結果を得た．

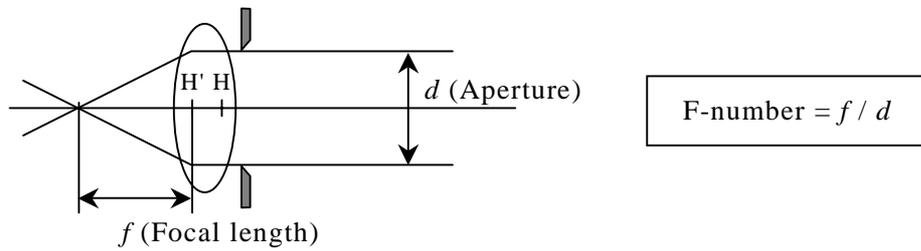
- (1) シミュレーションにより生成した画像の欠陥部でのぼけ具合および輝度プロファイルが実験結果と良く一致することを確認し，本手法の妥当性を確認するとともに，任意の欠陥の観測画像が推定できることを示した．
- (2) ストライプパターン照明の周期の違いによる欠陥検出感度の変化を明らかにした．
- (3) 画像のぼけ領域の幅とストライプ幅との比に着目することにより，最適なパターン周期を選定する指針を示した．
- (4) 被検査体と照明との距離による検出感度の変化を明らかにし，対象欠陥に応じて適切な照明距離の選択が可能であることを示した．また，これを利用し，従来困難であった欠陥サイズの識別が可能であることを述べた．

### 参 考 文 献

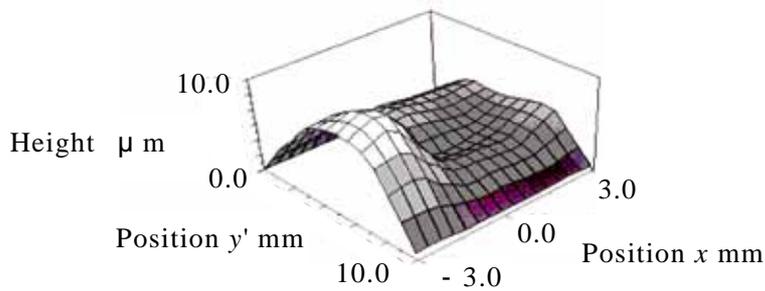
- [1] 石井 明，秦 清治，千葉直樹，小野勝一：移動光源による自動車ボディの塗装欠陥の自動検出，材料試験技術，44，4 (1999) 254.
- [2] 田中一基，新原良美，池田浩志，山田直樹，木葉 博，笹西和人：塗装表面検査の自動化技術，日本機械学会論文集 (C 編)，60，577，(1994) 3201-3208.
- [3] 吉田 清，今西正則，鈴木 裕，渡辺正実：動画像追跡処理法を用いた塗装外観検査装置の開発，精密工学会第9回外観検査の自動化ワークショップ，(1997) 45-48.
- [4] T. Someji, T. Yoshimura and N. Akiyama: Development of Automatic Surface Inspection System of Castings, Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 32, 4, (1998) 278-283.
- [5] 広瀬 修，石井 明，秦 清治，鷲崎 一郎：パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出，精密工学会誌，66，7 (2000) 1098-1102.
- [6] 糊澤 信，尊田貴嘉之，嶋崎 剛，下園裕明：透視ひずみの定量評価技術の開発，精密工学会誌，63，12 (1997) 1754-1758.
- [7] たとえば，飯塚 啓吾：現代光工学の基礎，オーム社，(1980) 79-100.
- [8] たとえば，大野 豊，磯田 和男監修：数値計算ハンドブック，オーム社，(1990) 78.



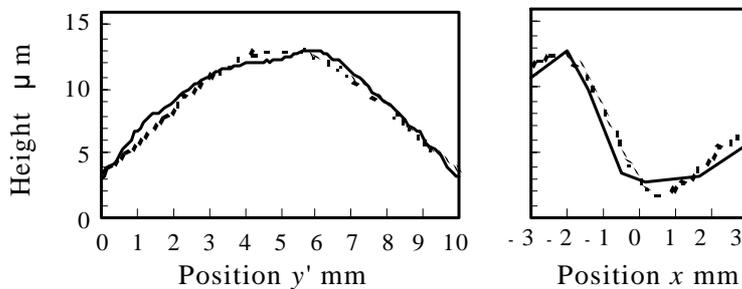
**Fig.3.1** Illustrating the definition of the optical system for the defect detection with patterned illumination



**Fig.3.2** F-number and aperture



(a) 3-D shape of a compound defect

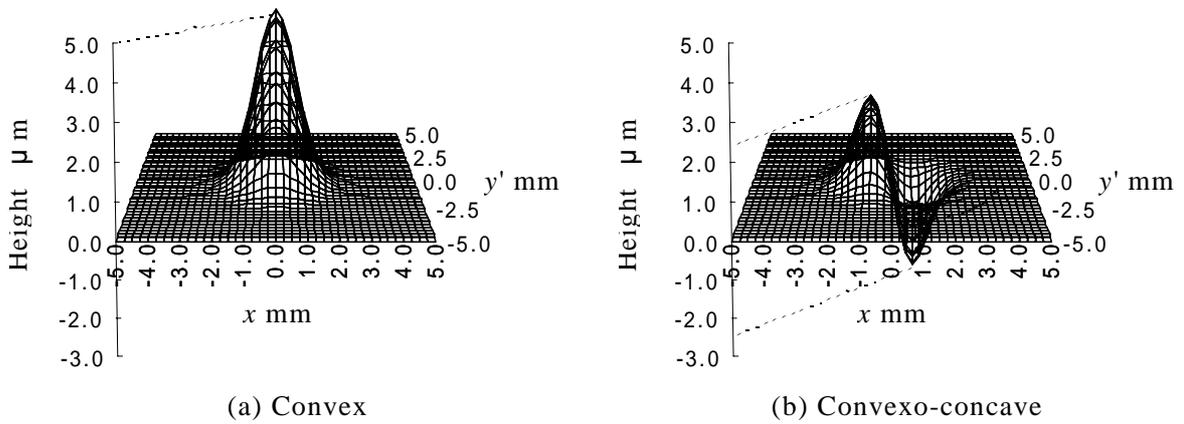


(b) Cross section diagrams

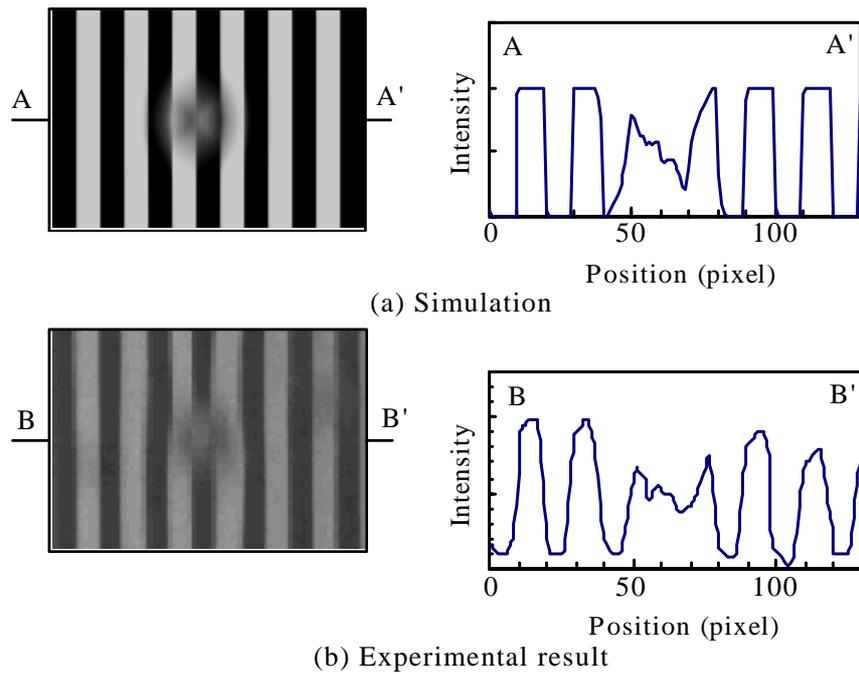
Solid lines show the measured values.

Dashed lines show the approximated Gaussian curves.

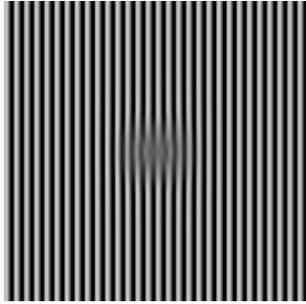
**Fig.3.3** An example of 3-D measurement of a convexo-concave defect



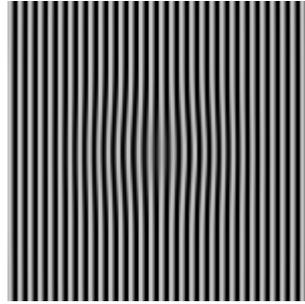
**Fig.3.4** Examples of defect model  
 $\lambda = 1.5 \text{ mm}$  ,  $A = 5.0 \text{ } \mu\text{m}$



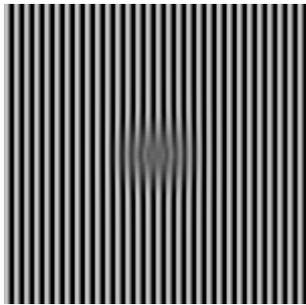
**Fig.3.5** Comparison between simulation and experimental results  
 Defect model : Concave defect ,  $\lambda = 1.0 \text{ mm}$  ,  $A = - 10.0 \text{ } \mu\text{m}$   
 Period of pattern (Stripe pair width) :  $2.0 \text{ mm}$   
 Each left figure shows observation of defect.  
 Each right plot is intensity profile on a horizontal cross section A-A' or B-B'.



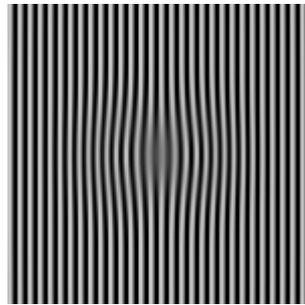
i) Concave defect with  $A = - 3.0 \mu m$



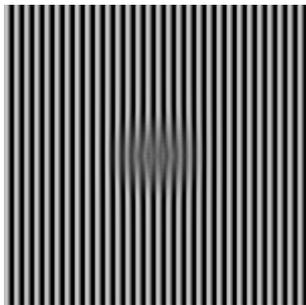
i) Concave defect with  $A = - 3.0 \mu m$



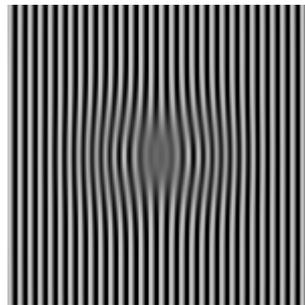
ii) Concave defect with  $A = - 5.0 \mu m$



ii) Concave defect with  $A = - 5.0 \mu m$



iii) Concave defect with  $A = - 7.0 \mu m$

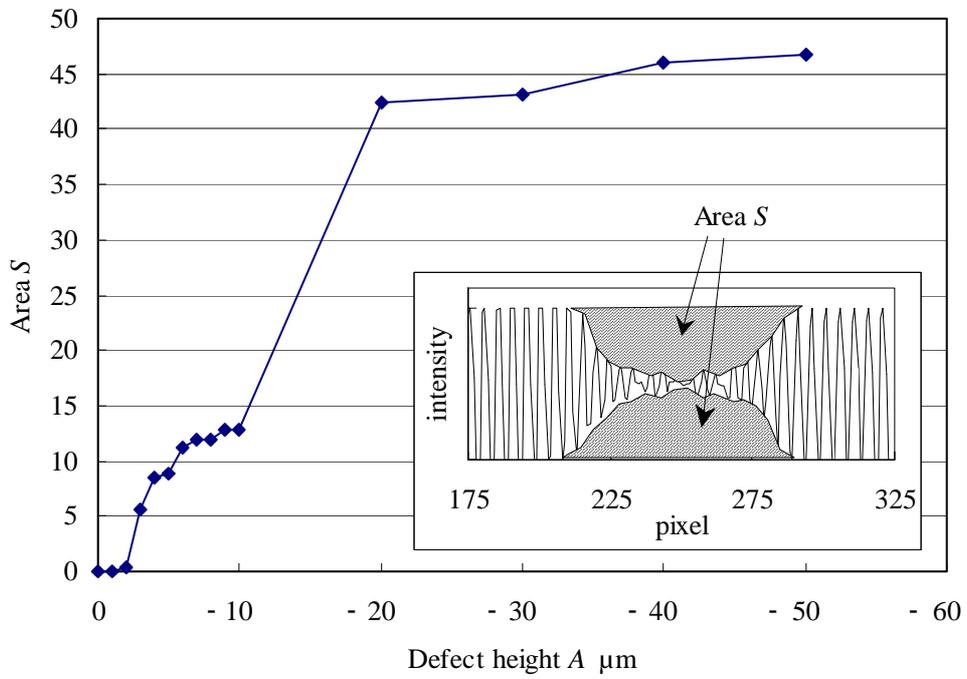


iii) Concave defect with  $A = - 7.0 \mu m$

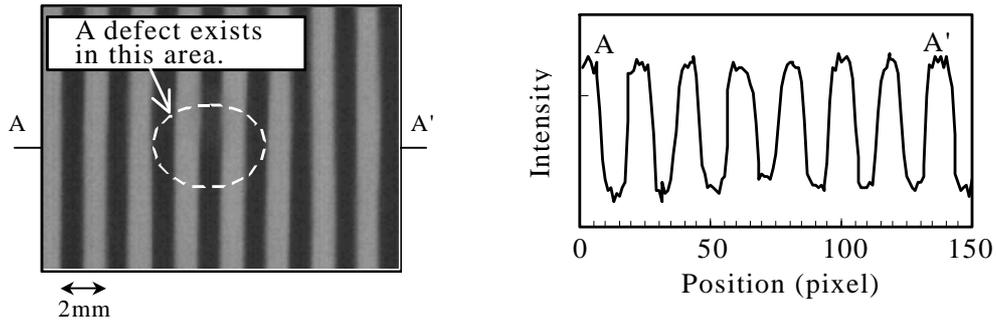
(a) Concave defect with  $\lambda = 1.0 mm$

(b) Concave defect with  $\lambda = 3.0 mm$

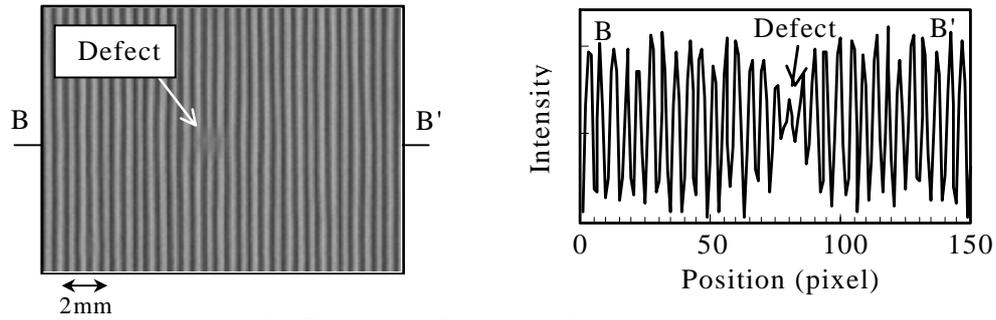
**Fig.3.6** Variations of the defect image with the defect height (simulation results)  
Stripe pair width : 0.5mm



**Fig.3.7** Variations of the blurring area with defect height (simulation results)  
 Stripe pair width : 0.5mm  
 Defect model : Concave defect with  $\sigma = 3.0$  mm

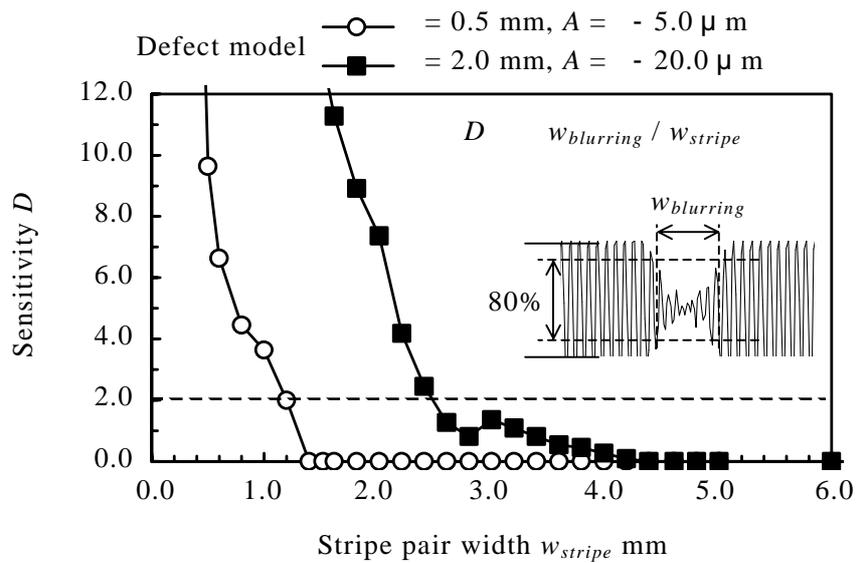


(a) Under the 2.0 mm width stripe pair  
In this case the defect is not observed.

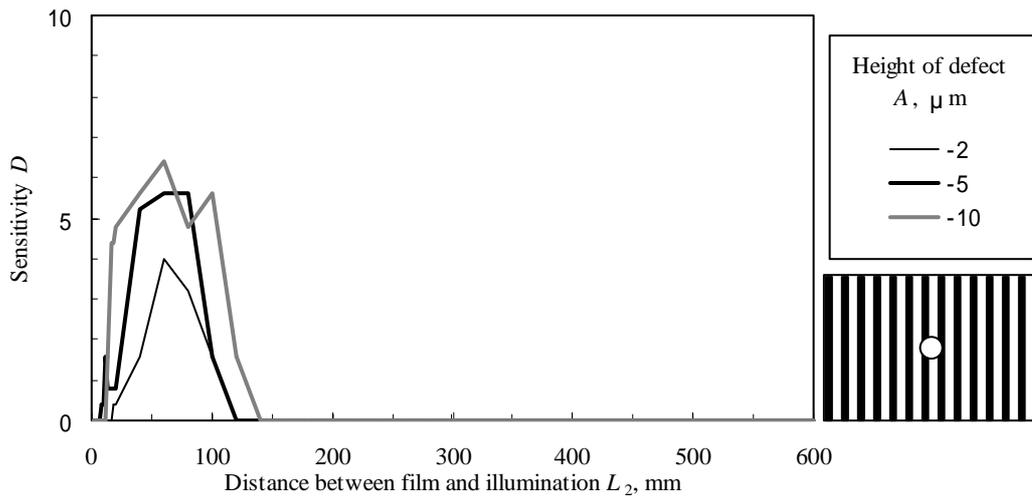


(b) Under the 0.5mm width stripe pair  
A defect is observed blurrily.

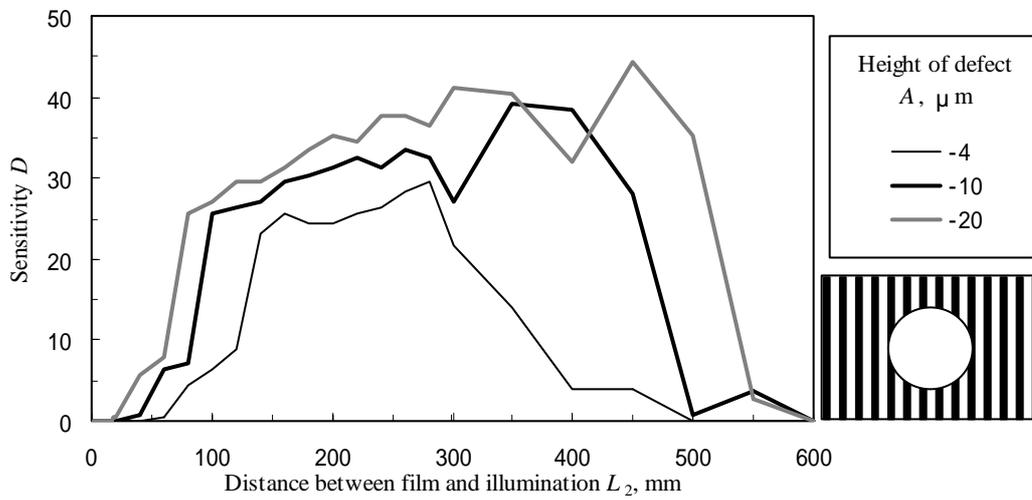
**Fig.3.8** Variations of the defect image and intensity profile with the stripe pair width of patterned illumination (experimental results)  
Concave defect, 0.5 mm



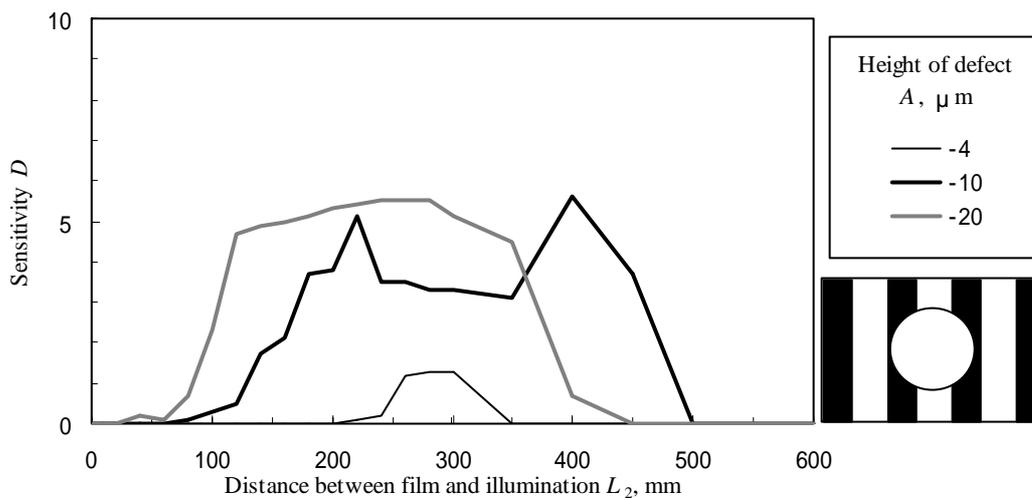
**Fig.3.9** Plots of the sensitivities in function of stripe pair width



(a) Defect model :  $\phi = 0.5 \text{ mm}$ , Stripe pair width :  $w_{stripe} = 0.5 \text{ mm}$

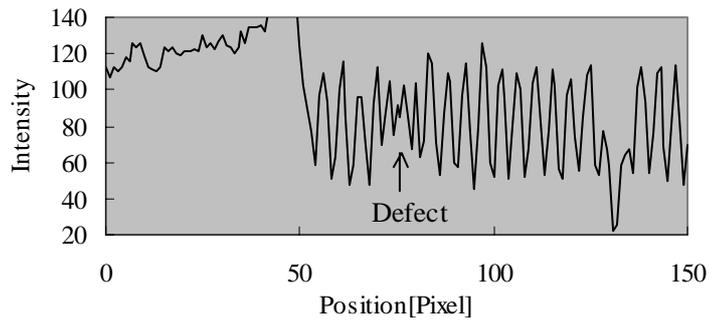
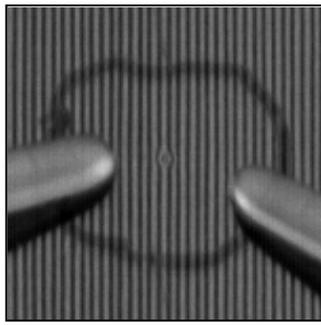


(b) Defect model :  $\phi = 2.0 \text{ mm}$ , Stripe pair width :  $w_{stripe} = 0.5 \text{ mm}$

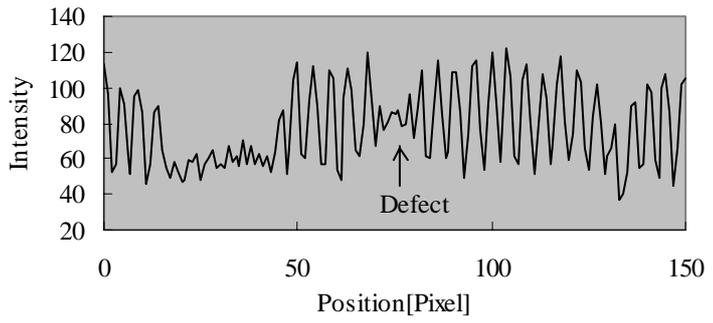
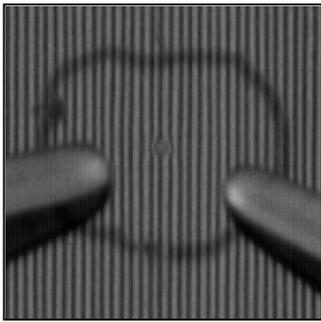


(c) Defect model :  $\phi = 2.0 \text{ mm}$ , Stripe pair width :  $w_{stripe} = 2.0 \text{ mm}$

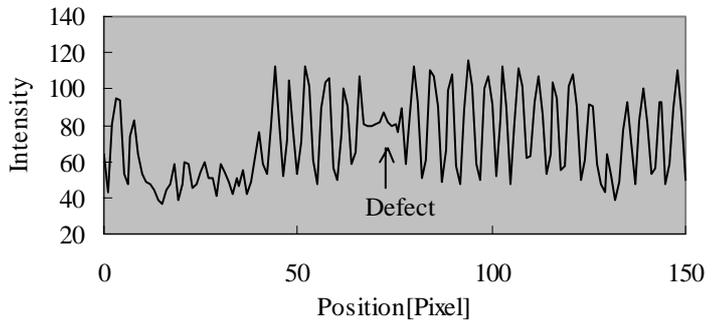
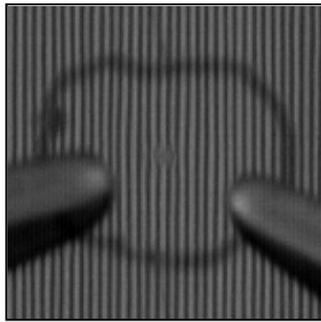
**Fig.3.10** Variations of the sensitivities with illumination distance (simulation results)



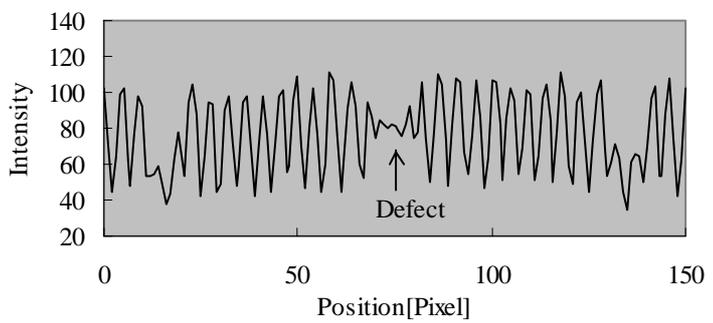
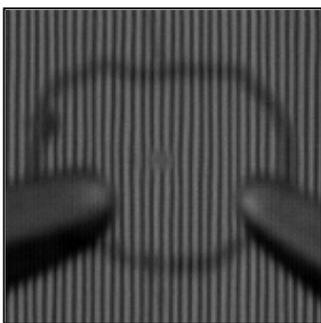
(a)  $L_2 = 50\text{mm}$



(b)  $L_2 = 70\text{mm}$



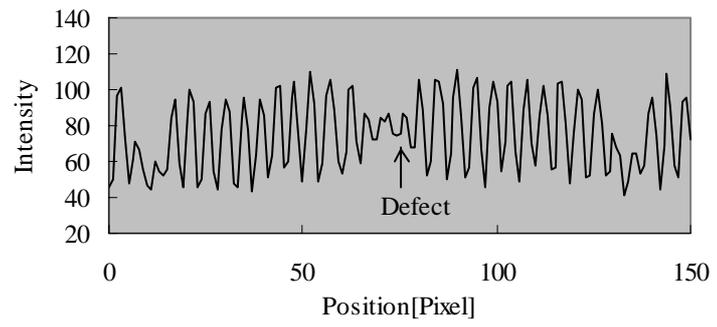
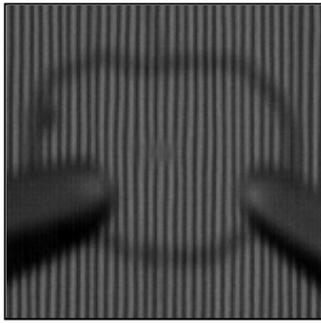
(c)  $L_2 = 90\text{mm}$



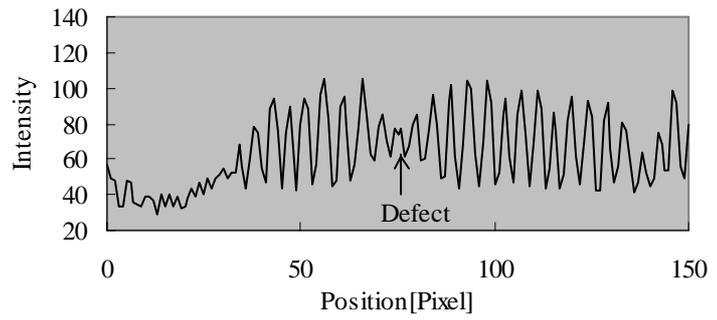
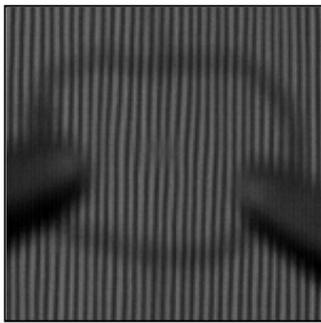
(d)  $L_2 = 110\text{mm}$

**Fig.3.11** Experimental results involving variations of defect observation image and intensity profile with illumination distance

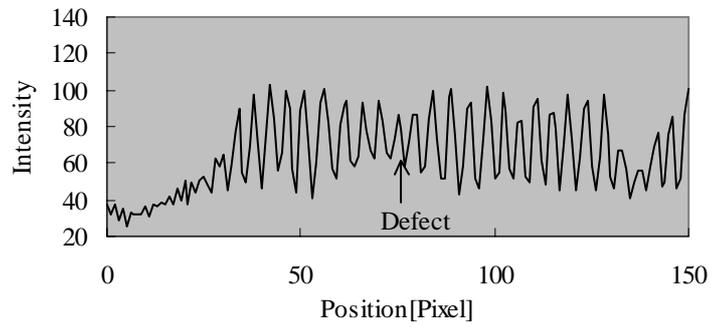
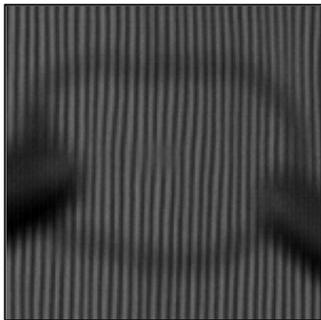
defect : 0.5 mm



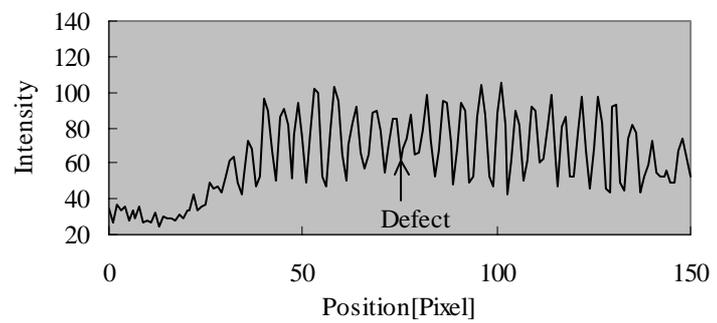
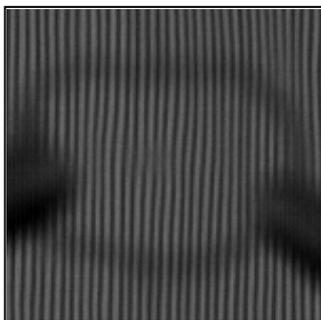
(e)  $L_2 = 130\text{mm}$



(f)  $L_2 = 150\text{mm}$



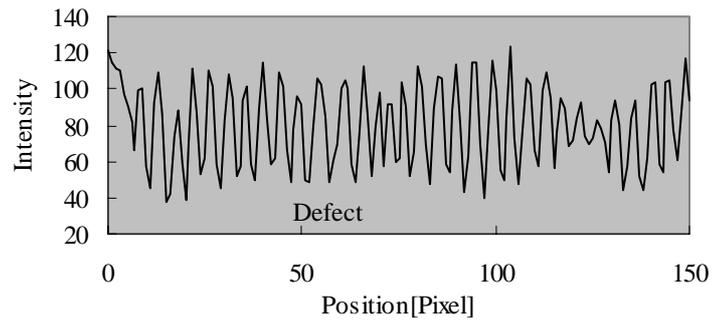
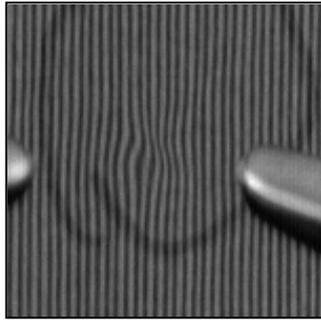
(g)  $L_2 = 170\text{mm}$



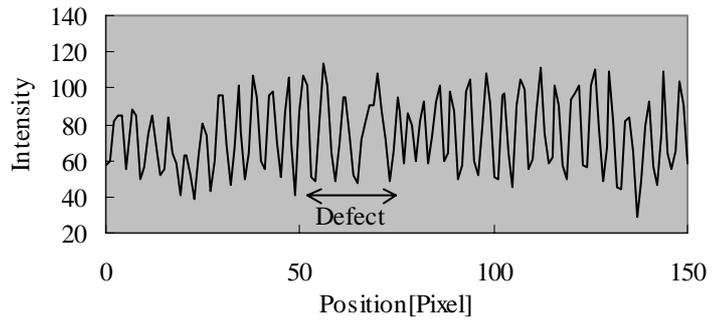
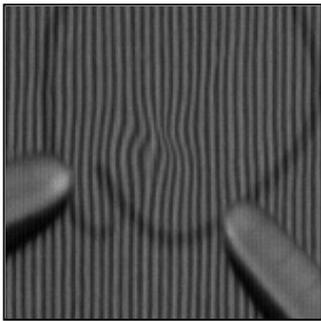
(h)  $L_2 = 190\text{mm}$

**Fig.3.11** Experimental results involving variations of defect observation image and intensity profile with illumination distance (continued)

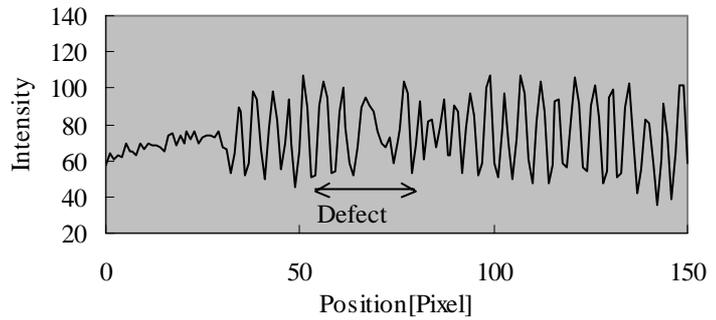
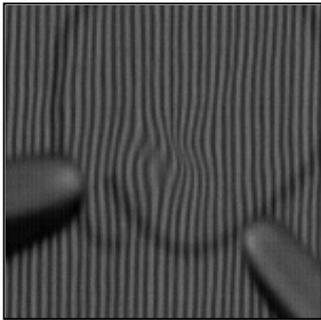
defect : 0.5 mm



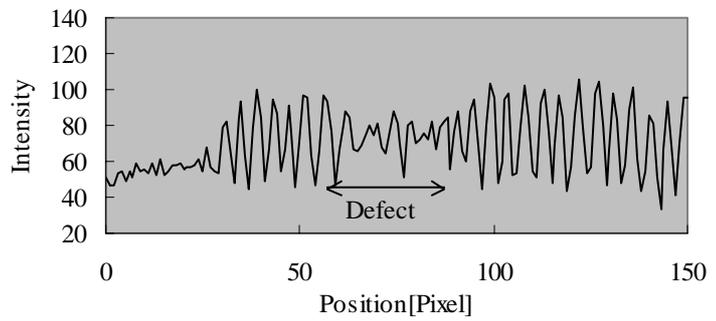
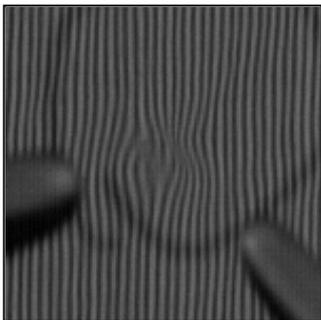
(a)  $L2 = 50\text{mm}$



(b)  $L2 = 70\text{mm}$



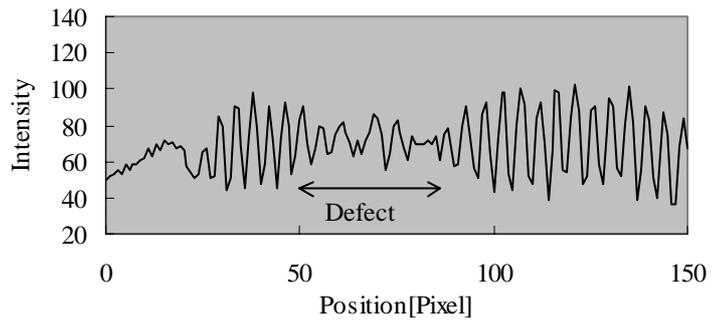
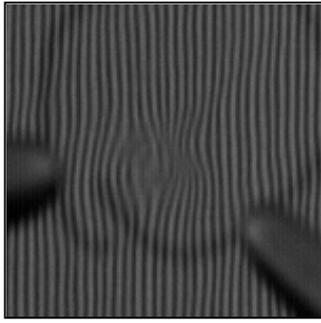
(c)  $L2 = 90\text{mm}$



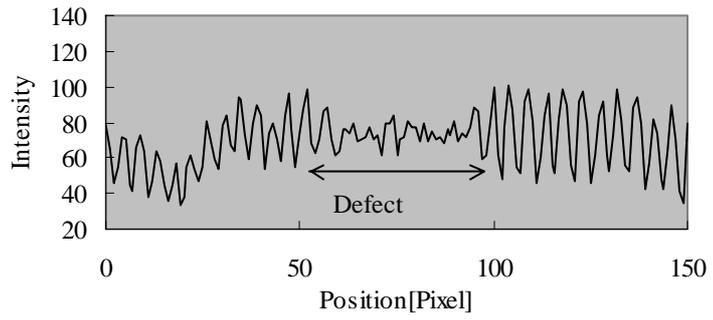
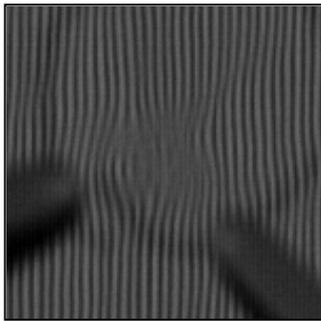
(d)  $L2 = 110\text{mm}$

**Fig.3.12** Experimental results involving variations of defect observation image and intensity profile with illumination distance

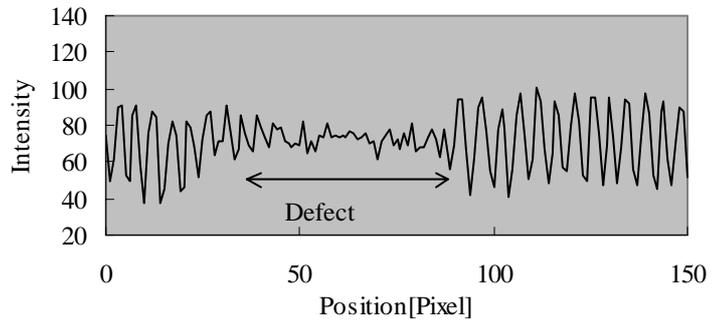
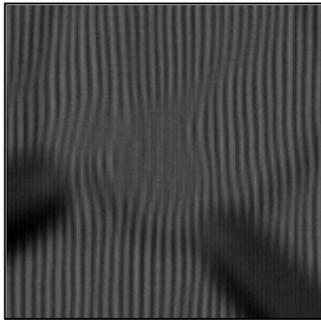
defect : 2.0 mm



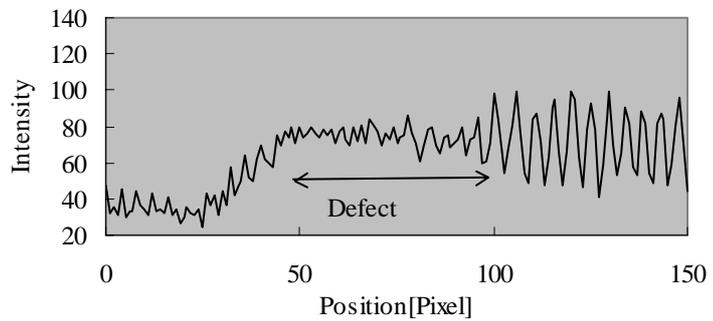
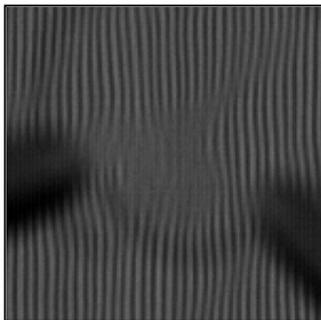
(e)  $L_2 = 130\text{mm}$



(f)  $L_2 = 150\text{mm}$



(g)  $L_2 = 170\text{mm}$



(h)  $L_2 = 190\text{mm}$

**Fig.3.12** Experimental results involving variations of defect observation image and intensity profile with illumination distance (continued)

defect : 2.0 mm



## 第4章 光線の影響領域に基づく光学系の最適設計

### 4.1 緒言

光学機能シート表面の微小起伏欠陥を検査するため、周期的に明暗を繰り返すパターン照明を用いた欠陥検出方法を提案してきた。本章では、この検査方法において最適な観測系を設計する方法について述べる。

微小起伏欠陥を検出する方法として提案されている手法<sup>1)-7)</sup>の多くは、被検査面を透過あるいは被検査面で反射する光線の経路が欠陥の存在する領域と正常部とで異なるという現象を利用している。しかし、欠陥形状と光線経路の変化との関係についての研究は報告されていない。そのため、パターン照明を用いた観測系の設計について明瞭な指針はなく、経験的にパターンサイズや光学配置を決めている場合が多い。欠陥の形状に応じて最適な光学系を与える指針を示すことができれば、産業応用のうえで有効である。

前章では光線追跡シミュレーションを用いて、パターン照明からの光線が欠陥を含んだ被検査面で反射した後 CCD カメラで撮影されるまでの光線経路を解析し、欠陥観測画像の CG を生成した。また、欠陥領域とパターンサイズとの比に基づいて検出感度を定義することにより、欠陥検出に適したパターンサイズを選定するための指針を示した。しかし、さまざまな欠陥および照明パターンに対して欠陥画像の CG を作成しプロファイルを解析する必要があり煩雑であった。また、前章では、検出に適したパターンサイズであっても光学系の配置によって検出感度が異なること、高い検出感度が得られる光学配置は欠陥によって異なることが明らかとなった。そのため実際に観測系を設計するにあたっては、最適なパターンサイズと光学配置の組み合わせを選定しなければならず、前章で求めた指針だけでは不十分である。一方、製造業における外観検査のニーズに目を向けると検査基準や検査対象が年々変化することが多い。このような背景からも光学系全体の最適配置を少ない手順で設計することが重要である。

本章では、欠陥によって生じる光線経路の変化を「影響領域」という考え方をを用いて表し、この影響領域と照明との重なりに基づいて定義される「影響量」を評価することにより、光学配置を含めた観測系の最適設計法を確立することを試みる。そして、照明パターンの位相と欠陥との位置関係による影響量の変化に着目することにより、欠陥の見え方（パターンのぼけが観測できる / 輝度の反転が生じる / パターンのゆがみのみが観測される）をおおよそ識別する手法を提案する。これを利用することにより、パターン照明を用いた各種の検査方法のうち、対象とする欠陥検査に適した手法を容易に選定できることを述べる。

## 4.2 光線の影響領域に基づく光学系の最適設計

### 4.2.1 光線追跡シミュレーション

シミュレーションに用いた観測系の配置を図 4.1(a) に示す。x 軸上に CCD ラインセンサを配置し、光軸を z 軸にとる。ラインセンサから距離  $L_1$  の位置に観測角  $\theta$  となるよう被検査面を配置した（被検査面を  $x-y'$  平面、法線方向を  $z'$  とした）。また、被検査面で正反射の関係になるよう、 $xy''z''$  座標系を設定し、 $x-y''$  平面と平行に被検査面からの距離  $z''=L_2$  の位置にパターン照明を配置した。ここで、CCD から被検査面までの距離  $L_1$  と被検査面からパターン照明までの距離  $L_2$  との組み合わせは、使用するレンズと横倍率およびフォーカス位置などから求められる。同図 (b) は CCD から被検査面を経てパターン照明へ達する経路を視覚的に分かりやすくするため、便宜上  $z$  軸、 $z'$  軸、 $z''$  軸を同一直線上に表示したものである。

被検査面 ( $x-y'$  平面) 上で欠陥形状を表すモデルとして次式で定義されるガウス型関数を使用した。

$$g(x, y') = A \cdot \exp\left(-\frac{2(x^2 + y'^2)}{\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

ここで、 $A$  は欠陥の高さ方向の変位を表し、 $A$  の符号によって欠陥形状（凹または凸）を表す。 $\sigma$  は欠陥の平面寸法を表し、上式の定義では高さ方向の変位がピークの  $1/e^2$  となる半径を与える。また、式 (4.1) の 1 次導関数は凹凸複合欠陥のモデルとして使用できる。ガウス型関数およびその導関数は、実際に欠陥の断面形状を計測した結果によく類似している<sup>2)</sup>。

解析にあたっては以下のような数値を使用した。これらは実際の実験装置に合わせた値としている。

- ・ CCD : 5000 画素ラインセンサ、素子寸法  $7\mu\text{m}$
- ・ レンズ : 焦点距離  $f=55\text{mm}$ 、主点間距離  $H=1\text{mm}$ 、絞り F4
- ・ 光学配置 :  $L_1=800.6\text{mm}$ 、 $L_2=100.0\text{mm}$
- ・ パターン : 明部と暗部とも同一寸法のストライプ
- ・ 撮像視野 :  $500\text{mm}$  (空間分解能:  $0.1\text{mm}/\text{pixel}$ )
- ・ 結像位置 : パターン面
- ・ 欠陥モデル: 起伏欠陥 (凹, 凸)

シミュレーションの手順は次の通りである。まず、レンズの開口面を微小領域  $Q_j$  ( $j=1,2,\dots,80$ ) に分割し、各微小領域の中心を通過して画素  $P_i$  に入射する光線をパターン照明面まで遡る場合を考える。光線は微小領域  $Q_j$  を透過し、被検査面上の点  $R_j$  で正反射し、パターン面上の点  $S_j$  に到達する。ここでは、 $Q_j$  を通

って画素  $P_i$  に入射する光の強度を  $S_j$  上の光源強度で近似することとした。全微小領域  $Q_j$  について到達点  $S_j$  での光源強度を求めて積算することにより、画素  $P_i$  に入射する光強度を求めることができる。全画素について同様の計算を行うことにより、ラインセンサが観測する画像を生成することができる。さらに、被検査面を表す関数を、想定される生産ライン方向（図 4.1 の配置では  $y'$  方向）に平行移動しながら上記の計算を繰り返すことにより、2 次元の観測画像を生成することができる。

#### 4.2.2 影響領域の定義

欠陥の存在により照明パターンの像がぼける原理を図 4.2 に示す。被検査面が平面であれば反射光線の方向はほぼ均一となるが、起伏欠陥がある箇所では反射方向に拡がりが生じる。図の例では、観測位置に欠陥がない (a) の場合には反射光線は全て照明の暗部に達するため暗い像が観測されるが、欠陥がある (b) の場合は反射光線の到達位置が複数のパターンにまたがるため観察位置には欠陥が明るい像として現われる。カメラの物側の結像点がパターン照明面であるとき、正常部ではパターンがそのまま観測され、欠陥領域はぼけたように観察される。そこで、欠陥の存在によって生じる反射方向の変化を、各光線の正常部での反射方向に対する角度差で表すことを考え、いろいろな欠陥モデルに関してこの偏差の分布を計算した。図 4.3 は欠陥による反射方向の変化の定義を示す。角度  $\phi, \psi$  は、欠陥が存在する場合の反射光線（直線 RS）と欠陥が存在しない平面での反射光線とのなす角を  $x-z'$  平面および  $y'-z'$  平面にそれぞれ射影したときの角度差として定義した。図 4.4 (a) は、代表的な欠陥モデルについて  $\phi, \psi$  を計算した結果である。ここでは、欠陥モデルとして半径  $r = 2000 \mu\text{m}$ 、高さ  $A = 20 \mu\text{m}$  のガウス型の凸欠陥を用いた。このとき、 $\phi$  はストライプパターンに直交する方向の拡がりを、 $\psi$  はパターンに平行な方向の拡がりを表す。この図は照明の入射角および観測角をととも  $0 \text{ degree}$ （同軸落射照明）のときの光線の拡がりを求めた例である。ここで、レンズの開口を考慮しているため、欠陥のない正常部でも光線方向にはある拡がりが生じる。しかし、これらの光線は全て結像点へ向かうため画像のぼけには寄与しない。そのため、影響領域の計算の際には、欠陥が存在しない場合に同位置に入射した光線の反射方向とのなす角を計算することとし、欠陥による光線経路の変化のみを評価した。

パターン照明が 2 次元の分布をもつ場合には光線の拡がりについても図 4.4 (a) に示したように 2 次元で考える必要がある。しかし、照明パターンをストライプとしラインセンサによる観測を考える場合には、 $\psi$  方向の拡がりは画像中のパターンの変化に寄与しないので考慮しなくてよい。そこで本論文では図 4.4 (a) の分布を同図 (b) のように  $\phi$  軸に射影したものをを用いることとし、以後この分布によって表される光線の拡がりを「影響領域」(Reaching Range of the Ray; RRR) と呼ぶこととする。なお、ここでは被検査面 ( $x-y'$  平面) の原点付近に欠陥モデル

を配置し，被検査面の一定領域内（原点を中心とする半径 5 mm の円内）に入射する光線について反射方向の分布を計算した．欠陥形状以外のパラメータが同じであれば一定領域内に入射する光線の本数は同じである．そのため，影響領域の評価に寄与する光線の本数（投票の大きさ）は欠陥形状によらず一定である．

#### 4.2.3 影響領域の計算例

サイズの異なる欠陥モデルに対して影響領域を計算した結果を図 4.5 に示す．欠陥モデルの高さは全て  $A=20\ \mu\text{m}$  とし，欠陥半径は  $r=500\ \mu\text{m}$  の凸欠陥から  $r=3000\ \mu\text{m}$  の緩やかな凸欠陥まで変化させた．同図 (b) は各分布の違いを見やすくするため縦軸を対数表示したものである．欠陥半径が小さい欠陥の場合は，解析領域内に達する全光線のうち光線経路に変化を生じる光線の割合が小さい．しかし，欠陥表面の勾配が大きいため光線の方法は大きく変化する．このため，欠陥半径が小さいものほど影響領域曲線は  $\phi=0$  におけるピークが高く，かつ裾野が広がっている．逆に，欠陥半径が大きくなるほど欠陥表面の勾配が緩やかになるので，光線経路の変化は小さくなる．

#### 4.2.4 影響領域を用いた検出感度の評価

ある欠陥が特定のパターン照明下で検出可能かどうかは，その欠陥により生じる影響領域と比較して照明パターンの周期がどの程度小さいかによって決まると考えられる．そこで，影響領域とパターン照明の強度分布との重なりを求めて，この値に基づいて欠陥検出の可否を評価することを考える．図 4.6 は影響領域とパターン照明の強度分布の一例を示す．（ここで，図 4.4 と同じ半径  $r=2000\ \mu\text{m}$ ，高さ  $A=20\ \mu\text{m}$  の凸状起伏欠陥モデルを使用しているが，図 4.6 では縦軸を拡大表示している．）影響領域を示す分布を  $R(\phi)$  とし， $\phi$  軸上で表した照明パターンを  $P(\phi)$  とすると，両者の重なり  $S$ （図 4.6 の斜線部の面積）は次式を用いて求められる．

$$S = \int R(\phi) \cdot P(\phi) \cdot d\phi \quad (4.2)$$

本論文では，以後，式 (4.2) で与えられる  $S$  を「影響量」(Integration) と呼ぶこととする．図 4.6 の例では，照明パターンは明暗の寸法比が 1:1 で周期が 2 degree のストライプパターンである．欠陥は照明パターンの暗部の中央に位置している．影響領域は近傍の明部をまたぐように分布しているため，観察位置の暗部にも明るい像が現われ，欠陥の検出が可能であると考えられる．

次に，サイズの異なる欠陥モデルに対して，パターンの周期を変化させて影響量  $S$  の変化を求めた．結果を図 4.7 に示す．図中，(a) は  $r=500\ \mu\text{m}$ ， $A=20\ \mu\text{m}$  の凸欠陥，(b) は  $r=2000\ \mu\text{m}$ ， $A=20\ \mu\text{m}$  の凸欠陥モデルに関する計算結果を表

す。また、影響領域と照明パターンとの代表的な位置関係を略図で示している。この略図が示すとおり、ここでは欠陥の中心が照明パターンの暗部の中央にくるような配置としている。結果をみると、各欠陥ともパターン周期が小さくなるにつれて急激に影響量が増加している。これより、欠陥サイズに対して周期が十分小さいパターン照明が効果的であることが分かる。ただし、サイズの小さい欠陥に対してパターンを小さくする場合、カメラの解像度によって限界があることに注意が必要である。反対に、パターン周期が大きくなるにつれて (b) の  $\lambda = 2000 \mu\text{m}$  では急激に影響量が減少してゼロとなっているが、(a) の  $\lambda = 500 \mu\text{m}$  ではあまり減少していない。一般に、欠陥半径が小さくアスペクト比の大きい欠陥は照明パターンに依らず知覚されやすいのに対して、欠陥半径が大きくアスペクト比の小さい起伏欠陥はパターン周期を小さくしないと見えにくいことが経験的に知られているが、照明パターンと影響量との関係はこの現象をよく表している。

#### 4.2.5 欠陥とパターンの位相との関係

前節で求めた影響量は欠陥が照明パターンの暗部の中央にくるような配置において照明パターンと影響領域との重なりを求めたものである。本節では、欠陥位置による影響量の変化について述べる。図 4.8 は、 $\lambda = 2000 \mu\text{m}$ 、 $A=20 \mu\text{m}$  の凸欠陥モデルに対して、様々な周期のストライプパターンに関する影響量を、欠陥位置を移動させながら計算した結果である。パターン周期は 1 degree から 4 degree まで変化させた。図の横軸はパターンと欠陥との相対位置を表しており、スケールは暗部の左端を 0 とし 1 周期で 2 となるように便宜上設定したものである。このとき、欠陥半径  $r$  に対してパターン周期が大きいほど、欠陥位置によってパターンと影響領域とが重なったり重ならなかったりするので、影響量の変化が大きくなる。影響量変化が方形波に近いほど欠陥が検出しにくい。逆に、影響量が暗部の中央で大きいほど、あるいは明部の中央で小さいほど検出しやすいことを表す。図 4.8 の結果をみると、パターン周期が小さい場合は欠陥位置による影響量の変化は小さいが、パターン周期が大きくなるにつれて欠陥位置による変化が大きくなり、やがて方形波に近づくことが分かる。

#### 4.2.6 影響量曲線と欠陥の見え方との関係

パターン照明下での表面欠陥の見え方は、欠陥形状とパターンとの組み合わせによって異なる。代表的な見え方となる欠陥と照明パターンとの組み合わせを図 4.9 (a) ~ (d) に示す。各図の左上のプロットは影響領域と照明パターンとの関係を、左下のプロットは欠陥位置に対する影響量曲線を、また右側の画像はシミュレーションにより生成した観測画像をそれぞれ示している。

同図(a)は、 $\lambda = 500 \mu\text{m}$ 、 $A = 20 \mu\text{m}$  の凸欠陥を周期 0.5 degree のストライプ照明下で観測したときの解析結果である。このとき影響領域に対してパターン周期

の方が小さい。観測画像には欠陥部で複数のストライプにまたがるぼけが見られており、欠陥部の抽出が可能である。同図 (b) は、(a) と同じ  $\lambda = 500 \mu\text{m}$ ,  $A = 20 \mu\text{m}$  の凸欠陥を周期 10 degree のストライプ照明下で観測したときの解析結果である。このとき欠陥サイズに対してパターンが大きくなるため、図 4.7 の結果から影響量は小さくなるが、ゼロにはならない。このため、観測画像には欠陥部で明暗の輝度反転が見られており、欠陥検出が可能である。影響量曲線は欠陥位置（明暗の境界）の近傍で変化が大きく、それ以外の個所ではほぼ一定の値となっている。次に、同図 (c) は、 $\lambda = 2000 \mu\text{m}$ ,  $A = 20 \mu\text{m}$  の凸欠陥を周期 1 degree のストライプ照明下で観測した場合である。この場合も影響領域に対してパターン周期が十分小さいため、画像のぼけが生じている。このとき影響量曲線は勾配および変化幅とも小さくなっている。また、同図 (d) は、 $\lambda = 5000 \mu\text{m}$ ,  $A = 20 \mu\text{m}$  の非常に緩やかな凸欠陥を周期 2 degree のストライプ照明下で観測した場合の解析結果である。このとき、影響領域とストライプ幅とが同程度であるため、欠陥位置によって影響量が大きく変化する。影響量曲線を同図 (c) のそれと比較すると、勾配および変化幅とも大きくなっていることが分かる。観測画像にはパターンのぼけは生じておらず、ゆがみのみが見られる。

### 4.3 考察

#### 4.3.1 光学系設計の簡易化

本論文で定義した影響領域は欠陥から照明を見たときの角度で表現している。これを用いて、対象欠陥に適した照明パターンを同様に角度で表すことにより、照明距離に依存しない規格化された照明パターンの指針を与えることができる。実際のアプリケーションにおいては、工場スペース等の空間的な制約のもとで光学系を構築しなければならない場合が多い。このような場合でも、照明配置に応じて最適なパターンサイズを容易に選定することができる。

#### 4.3.2 欠陥抽出方法の選定

従来、パターン照明下で撮像された画像からの表面欠陥の抽出方法には大別して次の 3 つの方法があった。すなわち、(1) 明暗の輝度の反転を利用する方法、(2) パターンのゆがみを利用する方法、(3) パターンのぼけを利用する方法、である。しかし、対象欠陥に適した抽出方法選定の根拠は必ずしも明確ではなかった。本論文で述べた影響量曲線に基づく評価法を用いることにより、欠陥が上記 (1) ~ (3) のどのような見え方で観測されるかを推測することが可能になり、方式選定が容易になる。また、複数の検出方法の組み合わせによる検査対象の拡張や欠陥識別等も可能であると考えられる。

### 4.3.3 既存設備の仕様変更の簡易化

一般に、品質管理の規格は月日とともに変化することが多い。本研究で確立した評価法を用いることにより、既存の設備において検査対象や検査規格が変わった場合でも、それに応じた光学系の設計変更を容易に行うことができる。

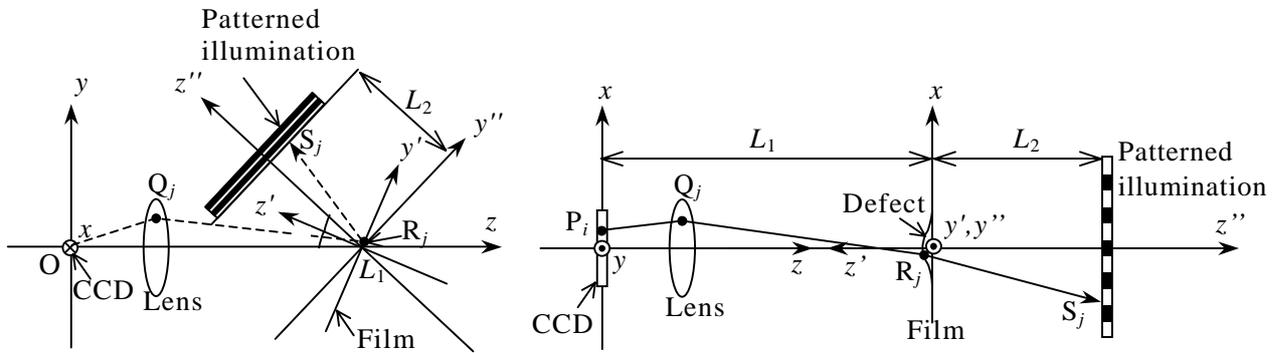
## 4.4 結言

パターン照明を用いた微小起伏欠陥の検出手法について、最適な光学系を設計するため、以下の検討を行った。

- (1) 欠陥の存在による光線経路の変化に基づき、欠陥の観測に寄与する照明範囲を表す尺度として、「影響領域」という量を定義した。
- (2) 影響領域を用いることにより、現場スペースに応じた照明距離およびパターンサイズの選定が可能であり実用性が高いことを述べた。
- (3) 影響領域と照明パターンとの関係から検出感度に相当する「影響量」を定義し、影響量の変化に着目してパターン照明下での欠陥の見え方を推測する手法を示した。これによって検査方法の選定が容易であることを述べた。

## 参 考 文 献

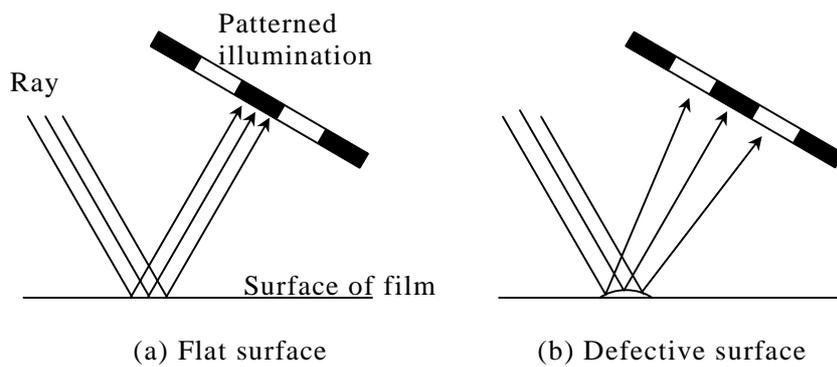
- [1] 広瀬 修, 石井 明, 秦 清治, 鷲崎 一郎: パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1098-1102.
- [2] 広瀬 修, 石井 明, 秦 清治, 鷲崎 一郎: パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出(第2報) - 光学シミュレーションによる欠陥検出評価 -, 精密工学会誌, **67**, 7 (2001) 1135-1139.
- [3] 吉田 清, 今西正則, 鈴木 裕, 渡辺正実: 動画像追跡処理法を用いた塗装外観検査装置の開発, 精密工学会第9回外観検査の自動化ワークショップ (1997) 45-48.
- [4] 石井 明, 秦 清治, 千葉直樹, 小野勝一: 移動光源による自動車ボディの塗装欠陥の自動検出, 材料試験技術, **44**, 4 (1999) 254.
- [5] 田中一基, 新原良美, 池田浩志, 山田直樹, 木葉 博, 笹西和人: 塗装表面検査の自動化技術, 日本機械学会論文集 (C編), **60**, 577 (1994) 3201-3208.
- [6] T. Someji, T. Yoshimura and N. Akiyama: Development of Automatic Surface Inspection System of Castings, Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng., **32**, 4 (1998) 278-283.
- [7] 糊澤 信, 尊田貴嘉之, 嶋崎 剛, 下藺裕明: 透視ひずみの定量評価技術の開発, 精密工学会誌, **63**, 12 (1997) 1754-1758.



(a) Alignment of the optical system and definition of the coordinate system

(b) Two-dimensional display

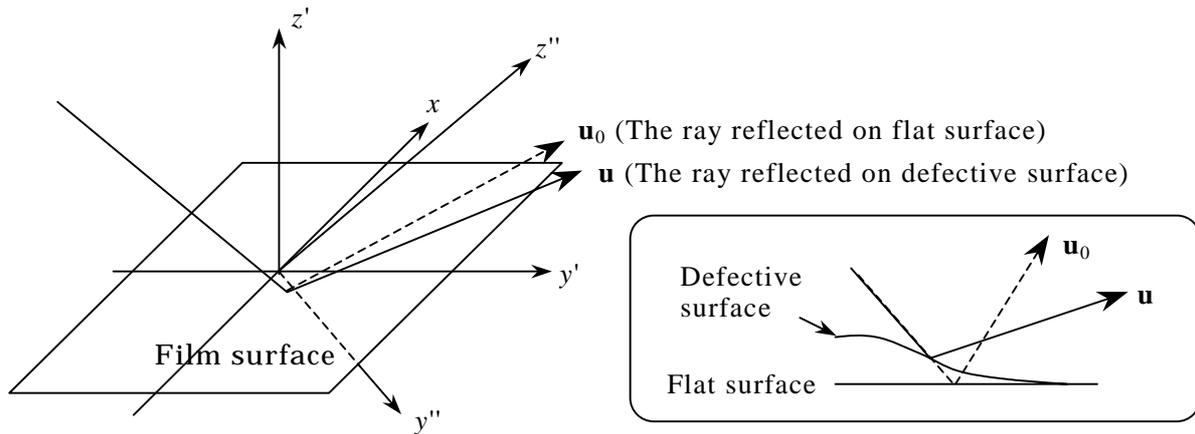
**Fig.4.1** Illustrating the definition of the optical system for the defect detection with patterned illumination



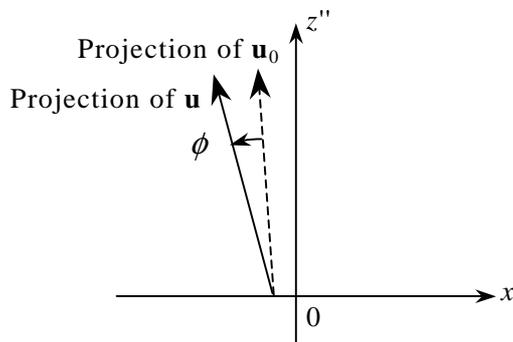
(a) Flat surface

(b) Defective surface

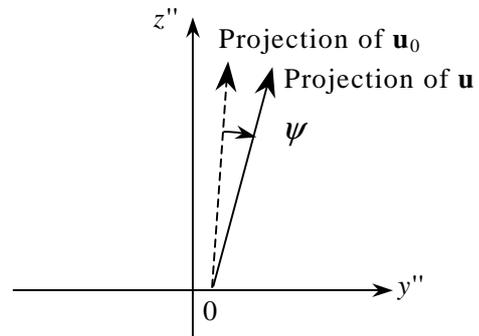
**Fig.4.2** Increase of the range of reflection angle



(a) Shift of reflection angle with defective surface

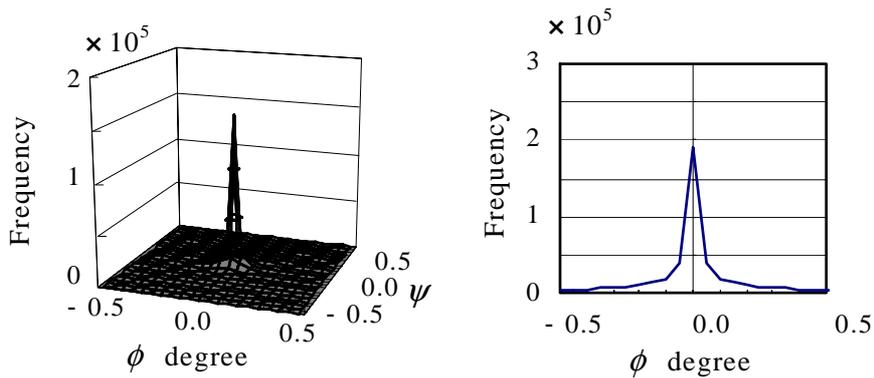


(b) Projection to  $x$ - $z''$  plane



(c) Projection to  $y''$ - $z''$  plane

**Fig.4.3** Definition of the reflection angle  $\phi$  and  $\psi$



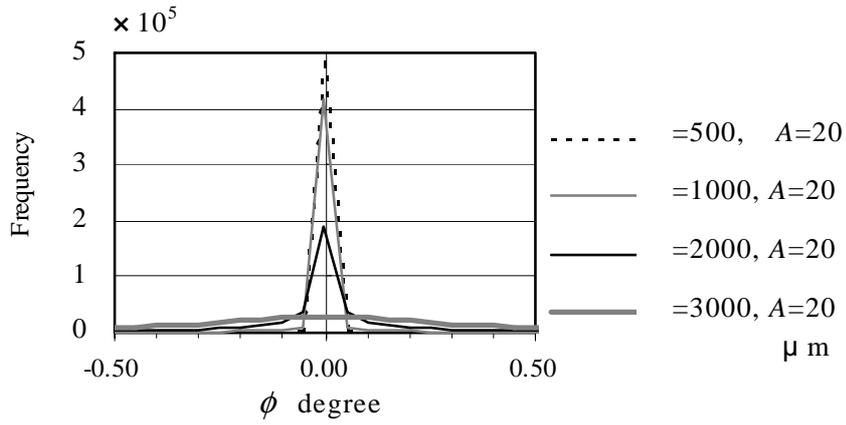
(a) Two-dimensional distribution

(b) Projection to  $\phi$  axis

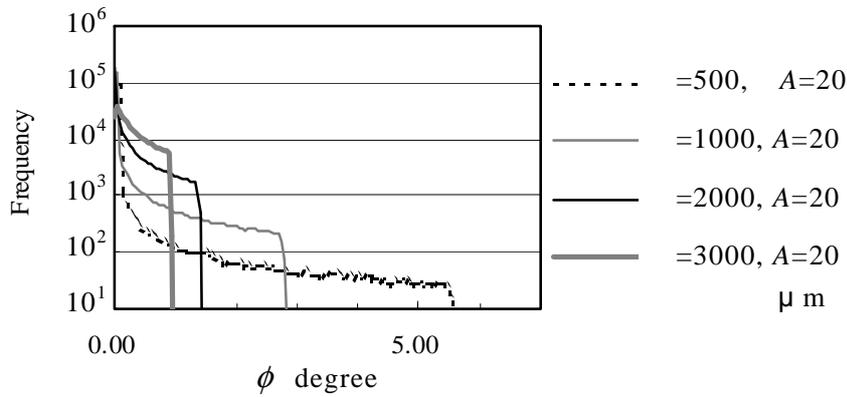
**Fig.4.4** Example of “Reaching Range of the Ray”

Defect model : Convex defect ,  $r = 2000 \mu m$  ,  $A = 20 \mu m$

Observation angle : 0 degree

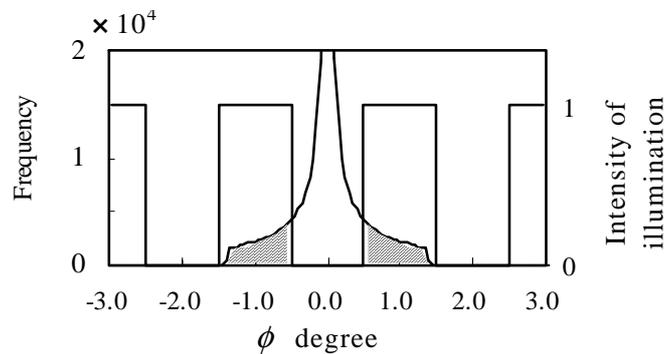


(a) Linear scale description



(b) Logarithmic scale description

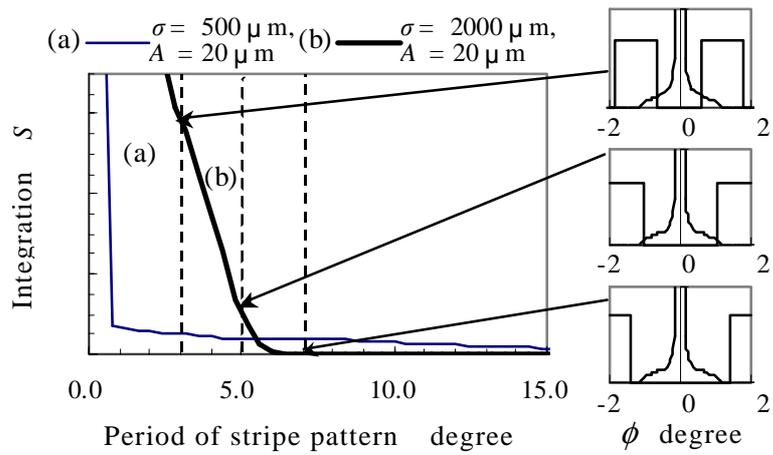
**Fig.4.5** Examples of “Reaching Range of the Ray” for several defect models



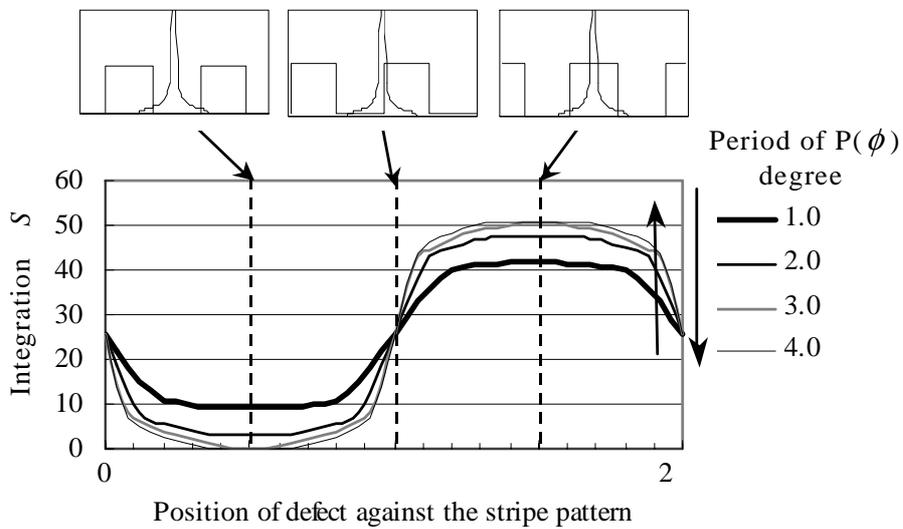
**Fig.4.6** Overlapping with Reaching Range and illumination pattern

Overlapping zones are indicated by hatching.

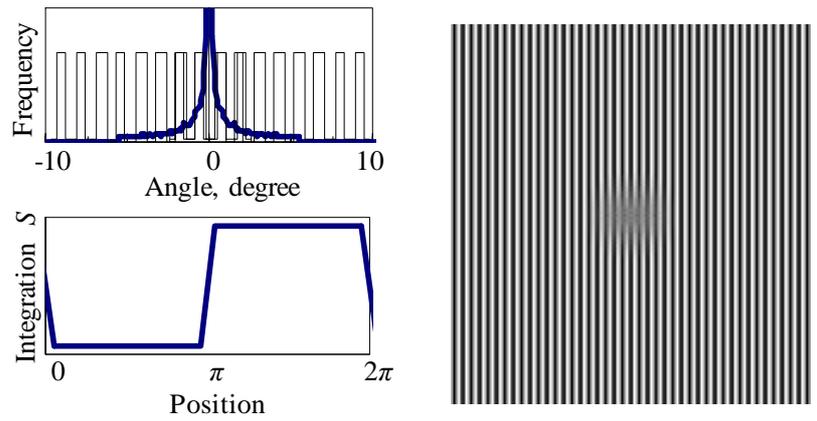
Defect model : Convex defect ,  $r = 2000 \mu\text{m}$  ,  $A = 20 \mu\text{m}$



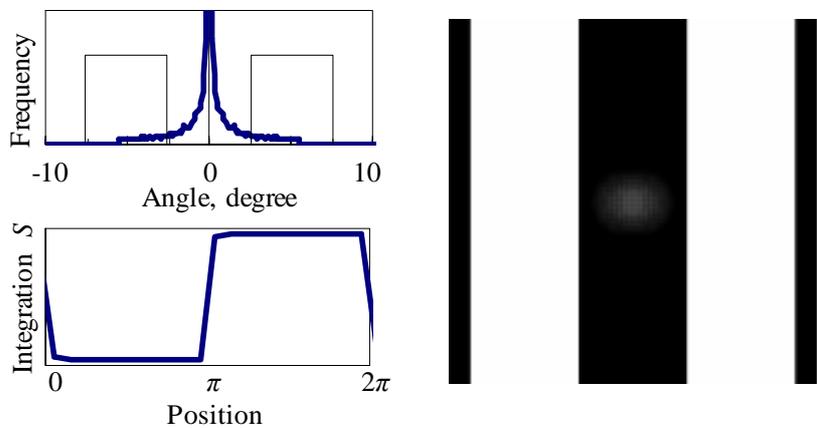
**Fig.4.7** Variations of the overlapping area with period of stripe pattern  
Each plot shows different defect model.



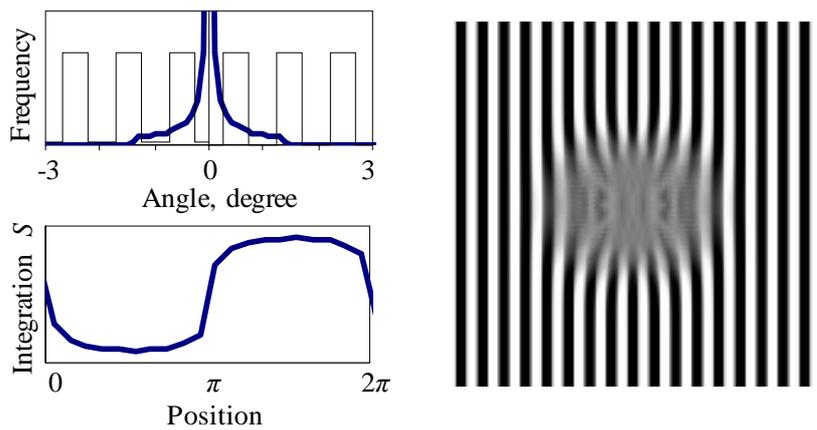
**Fig.4.8** Variations of the overlapping area with relative position of defect  
against the stripe pattern  
Defect model : Convex defect ,  $\sigma = 2000 \mu\text{m}$  ,  $A = 20 \mu\text{m}$   
Scale of horizontal axis is defined expediently.



(a) Convex defect ;  $r = 500\mu\text{m}$ ,  $A = 20\mu\text{m}$ , Pattern period ; 0.5degree

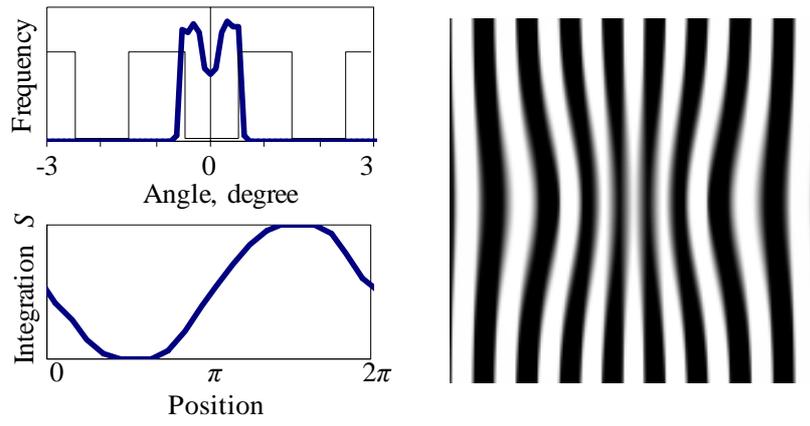


(b) Convex defect ;  $r = 500\mu\text{m}$ ,  $A = 20\mu\text{m}$ , Pattern period ; 10.0degree



(c) Convex defect ;  $r = 2000\mu\text{m}$ ,  $A = 20\mu\text{m}$ , Pattern period ; 1.0degree

**Fig.4.9** Variations of the observation of defects involving various types of RRR Each upper left plot shows RRR and illumination pattern. Lower left plot shows integration curve. Each image (CG) shows observation of defect.



(d) Convex defect ;  $r = 5000\mu\text{m}$ ,  $A = 20\mu\text{m}$ , Pattern period ; 2.0degree

**Fig.4.9** Variations of the observation of defects involving various types of RRR  
(continued)



## 第5章 反射防止膜に生じる色むらの定量評価

### 5.1 緒言

本章では、微小起伏欠陥と同様にコントラストが低く認識し難い欠陥である反射防止膜の色むら欠陥について、その検出方法および定量評価法を検討する。ここで取扱う反射防止膜は主にディスプレイの表面に使用されるものであり、画面内に背景が映り込むのを防止する機能をもつ<sup>1)-4)</sup>。反射防止膜はその分光反射率によって固有の色を生じる。このとき、反射防止膜の膜厚が変化すると分光反射率が変化するため、周囲と異なった色あいとなり、これがある限度を超えると色むら欠陥となる。

一般に、むら欠陥の自動検査は容易ではない。それは、むらを欠陥であると感じる程度には個人差が大きく、定量的な合否判定基準を定めにくいためである。CCDカメラやカラーセンサを用いて濃淡差や色度差等を定量的に計測することは可能であるので、これらの計測値に基づいてむらの有無を自動検出する研究や事例はいくつか紹介されている<sup>5)-12)</sup>。しかし、実際の品質管理要求に合致する合否判定基準を与える汎用的な手法は確立されていない。そのため、厳格な合否判定が要求される出荷検査等の現場では目視による官能検査<sup>13),14)</sup>に頼ることが多いのが実情である。

むら欠陥は、通常、欠陥部と正常部とのコントラストが非常に低いため、検出自体が困難な場合が多い。そのため、高度な画像処理アルゴリズムを用いて低コントラスト画像からむら欠陥を抽出する研究<sup>15)-23)</sup>が行われている。斎藤により多重解像度画像を用いたむら欠陥検出法<sup>15)</sup>や遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた方法<sup>16)</sup>の効果が報告されている。柏木ら<sup>17)</sup>は、各画素の色度をRGB空間に投票し各色度が登場する頻度に基づいて色むら領域を抽出する手法を提案し注目されている。浅野ら<sup>19)</sup>は、複数のバンドパスフィルタと白黒CCDカメラとを用いて、分光放射計と同等の精度での色度計測を実現している。

むら欠陥検査をより困難にしている要因として、むらの検出ができて、そのむらを定量的に合否判定するための基準が定めにくいという課題がある。そのため、計測されるむら欠陥の特徴量を基に、目視検査と合致する判定基準を定義しようとする研究<sup>24)-33)</sup>が多く行われている。それらの手法は様々であり、GA<sup>24)</sup>やニューラルネットワークを活用するもの<sup>25)-27)</sup>や、多次元特徴量を基に評価基準を策定するもの<sup>28),29)</sup>、人間が識別可能なコントラスト値に基づく方法<sup>30),31)</sup>、などがある。

一般に、むら欠陥の発生メカニズムは被検査対象によって多種多様であり、それによって観測方法・評価方法も異なる。そのため、従来より多くの手法が提案されてきたが、汎用的に適用できる評価技術は少ない。当面は各々の二

ズに合わせた個別の検討が必要であると考えられる。本研究が取扱う反射防止膜に生じる色むら欠陥についても同様であり、欠陥発生のメカニズムの解明、欠陥の観測に最も適した光学系の構築が重要である。

本章では、光学シミュレーションによる欠陥発生のメカニズム解析を行い実験検証する。色むらという感覚的な量を、品質管理項目に相当する等価膜厚という特徴量に変換することにより色むらの程度を定量化する手法を提案する。また、観測条件と色むらの見え方の関係を明らかにし、実際に製品が使用される状況下で最もむらが見えやすいという現象について述べる。

## 5.2 検査対象と色むら欠陥

検査対象は液晶などのディスプレイの表面に用いられるアクリルシート等の部材である。これらの部材の表面には、通常、ディスプレイに背景光が映り込むことを防止するための反射防止膜とよばれる薄膜が形成されている。

反射防止膜は通常、図 5.1 (a) に示すように何層かの薄膜（膜厚は数 10 nm ~ 100 nm 程度）からなり、膜の表面および裏面での反射光が互いに干渉して弱めあうことによって低反射率を得る。一般に、形成する薄膜が多層になるほど広い波長域にわたって反射率を低くすることができる。層の数が少ない場合は可視光全域で均一な低反射率を得ることが困難なため、目の可視感度の高い緑色領域（波長 550 nm 付近）で反射率が最小になるような膜厚が選択される。同図 (b) は 2 層からなる反射防止膜の分光反射率の例である。層の数は用途によって異なるが、ディスプレイ用途には品質とコストとの関係から 1 層ないし 2 層のものがよく用いられる。本章ではこのうち、比較的色彩むらが目立ちやすいとされる 2 層品を取扱う。

色むら欠陥は分光反射率の不均一によって発生する。人の目に知覚される色は物体のもつ分光反射率と照明の分光分布とによって決まるが、反射防止膜の場合、膜厚が局所的に変化しているとその部分の分光反射率が異なるため、周囲と異なった色に見える。なお、膜の屈折率が変動した場合も同様の現象が生じるが、実際の製造ラインにおいて屈折率が局所的に変動することはまれであるため、本章では膜厚の変動による色むらに限定する。

## 5.3 色むら発生の原理

### 5.3.1 反射防止膜

反射防止膜の表面から入射した照明光は図 5.1 (a) に示したように各層の境界面で反射および透過を繰り返し、様々な経路を辿って一部は再び表面から出射する。反射防止膜の分光反射率の計算方法として一般にマトリクス法<sup>34),35)</sup>が知られている。マトリクス法については多くの教科書で解説されているので、こ

ここでは各光線の振幅と位相の計算についてのみ説明する。

いま，空気層を第 0 層として，表面から順に第 1 層，第 2 層，基材を第 3 層と呼ぶことにし，各層の屈折率を  $n_i$ ，膜厚を  $d_i (i=0,1,2)$  とする．このとき，第  $i$  層と第  $i+1$  層の境界における振幅反射率  $R$  および振幅透過率  $T$  はそれぞれ以下の式で与えられる．

$$R_{is} = \frac{n_i \cdot \cos \theta_i - n_{i+1} \cdot \cos \theta_{i+1}}{n_i \cdot \cos \theta_i + n_{i+1} \cdot \cos \theta_{i+1}} \quad (5.1)$$

$$R_{ip} = \frac{n_{i+1} \cdot \cos \theta_i - n_i \cdot \cos \theta_{i+1}}{n_i \cdot \cos \theta_{i+1} + n_{i+1} \cdot \cos \theta_i} \quad (5.2)$$

$$T_{is} = \frac{2n_i \cdot \cos \theta_i}{n_i \cdot \cos \theta_i + n_{i+1} \cdot \cos \theta_{i+1}} \quad (5.3)$$

$$T_{ip} = \frac{2n_i \cdot \cos \theta_i}{n_i \cdot \cos \theta_{i+1} + n_{i+1} \cdot \cos \theta_i} \quad (5.4)$$

ここで，添え字の  $p, s$  はそれぞれ  $p$  偏光および  $s$  偏光を表す．角度  $\theta_i$  と  $\theta_{i+1}$  との間にはスネルの法則

$$n_i \cdot \sin \theta_i = n_{i+1} \cdot \sin \theta_{i+1} \quad (5.5)$$

が成り立っている．また，境界における光パワーの反射率および透過率は，たとえば  $s$  偏光についてはそれぞれ次式で与えられる．これらの和は常に 1 となりエネルギー保存を満たしている．

$$R_{power-s} = \frac{2n_i \cdot \cos \theta_i}{n_i \cdot \cos \theta_i + n_{i+1} \cdot \cos \theta_{i+1}} \quad (5.6)$$

$$T_{power-p} = \frac{2n_i \cdot \cos \theta_i}{n_i \cdot \cos \theta_{i+1} + n_{i+1} \cdot \cos \theta_i} \quad (5.7)$$

空気層から反射防止膜の第 1 層 ( $n_1 = 1.44$ ) へ入射する光について，振幅反射率，振幅透過率，およびパワー反射率を計算した結果を図 5.2 に示す．この図からも分かるように，振幅反射率は負値をとりうる．これは各層の屈折率値の大小関係によって固定端反射となるとき位相変化を表している．特に， $p$  偏光においては入射角の増加に伴い振幅反射率の符号が反転する角度があり，この角度を境に反射時の位相変化がゼロから  $\pi$  にシフトする．この入射角においてパワー反射率はゼロとなる．この入射角はブルースター角としてよく知られている．

式 (5.1) ~ (5.5) を用いて，任意の経路を通して空気層へ出射する光の振幅は，各層の境界における反射および屈折の回数だけ振幅反射率・振幅透過率を掛けることにより容易に求めることができる（ただし，ここでは各層における減衰は考慮していない）．

次に，複雑な経路を通して表面へ出射した光の光路長から位相を求める．まず，図 5.3(a) のように第 1 層を 1 度だけ通過したときの光路差はスネルの法則を用い

て次のように求められる．

$$\delta_1 = AB + BE - HE = 2n_1d_1 \cos\theta_1 \quad (5.8)$$

次に，同図 (b) のように第 2 層まで通過したときの光路差は，

$$\begin{aligned} \delta_2 &= AB + BC + CD + DF - GF \\ &= 2n_1d_1 \cos\theta_1 + 2n_2d_2 \cos\theta_2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

となり，各層での光路差の和で求めることができる．以下同様に，いくつかの層において 2 回以上反射を繰り返し複雑な経路を通る場合でも，各層を通過する際に生じる光路差を積算することにより光路全体で生じる光路差を求めることができる．

このように，表面に出射する全ての光に対して振幅と光路長（位相）を計算し，それらを重ね合わせるにより反射光全体の電界強度を求めることができ，入射光強度との比により反射率を求めることができる．この計算は p 偏光，s 偏光それぞれについて行う．さらに，入射光の波長を変化させて上記の計算を繰り返すことによって反射防止膜の分光反射率が得られる．

### 5.3.2 反射防止膜から知覚される色

ある物体を見たときに知覚される色はその物体に照射される照明の分光分布と物体がもつ分光反射率とによって一意に決まることが知られている．ここでは古典的な表色系の一つである XYZ 表色系および  $xy$  色度を用いて反射防止膜がどのような色に見えるかを評価した．XYZ 三刺激値および  $xy$  色度はそれぞれ次式で与えられる<sup>35)</sup>．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} \cdot d\lambda \quad (5.10)$$

$$K = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \end{aligned} \quad (5.12)$$

ここで， $S(\lambda)$  は照明の分光分布， $\rho(\lambda)$  は物体（ここでは反射防止膜）の分光反射率， $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  は XYZ 表色系における等色関数を表している． $K$  は基準化定数と呼ばれる．物体色を表す場合は通常，式 (5.10)，(5.11) のように  $Y$  が視感反射率に合致するように  $K$  を定義する．

前節で図 5.1 (b) に示した分光反射率をもつ反射防止膜を標準の光 D65 照明の下で観測した場合，色度は  $x=0.398, y=0.260$ ，色度図上では図 5.4 に示す位置となり赤紫色に見える．このことは，反射防止膜の分光反射率（図 5.1 (b)）が可視

領域の中央付近で低く，赤色領域および紫色領域で高いということからも直感的に分かりやすい。

### 5.3.3 色むら発生の原理

反射防止膜の膜厚が変化するとそれに伴い分光反射率のプロファイルが変化する。図 5.5 は，図 5.1 (b) の構成の反射防止膜に対して第 1 層の膜厚を 5 nm ずつ変化させた場合の分光反射率および色度を求めた結果を示す。これを見ると，膜厚が小さくなるとプロファイルは短波長側へ，逆に膜厚が大きくなると長波長側へシフトすることが分かる。この効果により膜厚が小さい領域では赤みがかかった色に，膜厚が大きい領域では紫がかかった色に知覚され，それらの領域が隣接すると色むらとなって知覚される。

## 5.4 実験

### 5.4.1 観測方法

反射防止膜の観測は，面光源の正反射像を撮影する方法で行った。図 5.6 は実験装置の構成を示す。ステージ上に反射防止膜を形成したサンプルを固定し，光源とカメラを様々な角度で正反射の位置に対向させて画像を取得した。光源には冷陰極管（室内環境を想定して昼光色を使用）と導光板および拡散板からなる面光源を使用し，カメラは単板カラー CCD エリアセンサ（RGB 各 8 bit）を用いた。画像信号をパーソナルコンピュータにてキャプチャし，観測領域での  $xy$  色度の解析を行った。

### 5.4.2 色度によるむら欠陥の評価

良品サンプルと色むら欠陥のあるサンプルの画像を取得し，それぞれの画像の色度分布を求めた。その結果を図 5.7 に示す。同図 (a) はそれぞれの画像を比較したものである。ただし，原画像では色の違いが視認しにくいいため，ここでは色度差を誇張して表示した。同図 (b) は各画像を  $10 \times 10$  画素の微小領域に分割し各領域の平均色度を求めて色度図にプロットしたものである。これを見ると，良品サンプルでは比較的狭い領域に色度が集中しているのに対して，欠陥サンプルでは広い領域にわたって色度が分布している。また，色度値は赤色領域と紫色領域の間を往復するように変化していることが分かる。

通常の画像処理を用いたむら検査装置では，この色度差を基準として合否判定を行うことが多い。この方法はむらの有無を検知するには有効である。しかし，どの程度の色差をむらと感じるかは個人差があるため，色度差に基づいて品質管理上の客観的な判定基準を与えることは困難である。

#### 5.4.3 「等価膜厚」に基づくむら欠陥の評価

色むらの発生原因が膜厚の局所的な変動であることを 5.3.3 節で述べた。そこで、膜厚変動と色度の変化との関係を明らかにするため、膜厚を 0.1 nm ずつ変化させて分光反射率を計算し、そのとき知覚される色度を求めた。図 5.8 (a) は第 1 層の膜厚変化に対する色度の変化をプロットしたものである。この結果と図 5.7 に示した実験結果とを比較すると色度変化の様子はよく一致していることが分かる。実験では色度変化は 1 本の曲線上にはないが、これは照明の強度分布が完全に均一でないことや画素毎のばらつきなどの影響である。ここで、観測された画像の各微小領域の色度 (図 5.7 (b) の各プロット) に最も近い理論曲線上の色度を求め、その色度に相当する第 1 層の膜厚値を求める。こうして求めた膜厚相当量を「等価膜厚」と呼ぶことにし、等価膜厚と基準膜厚との差に基づいてむら欠陥の評価を行うことを考える。ここで、実際の製品では、第 1 層の膜厚だけでなく第 2 層の膜厚も変化する。図 5.8 (b) は、第 1 層が 80 nm、第 2 層が 90 nm のときの色度  $(x_0, y_0)$  を基準として、第 1 層のみ、および第 2 層のみの膜厚が変化したときの色度差  $\Delta xy = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  を計算した結果を示している。結果をみると、第 1 層の膜厚変化による色度変化が第 2 層のそれに対して約 2 倍となり、第 1 層の膜厚変化が色むらに大きく影響することが分かる。したがって、第 1 層の膜厚変化に換算した等価膜厚による色むら評価は工程管理上も有効であると考えられる。

実験に用いた図 5.7 (a) の各画像に対して等価膜厚の分布を求めた結果を図 5.9 に示す。等価膜厚は  $y_i$  方向に中央 10 画素の平均色度から求めた。これを見ると欠陥サンプルの等価膜厚は良品のそれに比べて大きく変動していることが分かる。

#### 5.4.4 観測角によるむらの見え方の変化

同一のむら欠陥に対して、観測角を変えて撮影し、画像中の色度変化を調べた。図 5.6 に示した実験装置において正反射の関係を維持しながら照明角度およびカメラ角度 (ともに  $\theta_0$ ) を変化させて画像を取得し、それぞれの画像中の色度分布を求めた結果を図 5.10 に示す。観測角が大きくなるにつれて画像全体の平均色度が右上方に移動していることが分かる。これは、式 (5.8) において観測角度  $\theta_i$  が大であるほど光路差は小さくなるため、観測角が大きくなることは膜厚  $d_i$  が小さくなることに対応することから説明できる。また、観測角がさらに大きくなると干渉の影響がほとんどなくなるため、照明光の分光分布 (白色) が支配的となり、白色領域に近づく (同図 (b) の点線領域)。

ここで注目すべき点は、同一欠陥であっても観測角が大きくなると色度分布の範囲が狭くなっていることである。図 5.11 は各々の観測角における色度分布中の最大色度差をプロットしたものである。同図には同一条件下でシミュレーションにより求めた色度差を実線で表示している。この結果をみると、観測角

20 degree 以下の範囲で色度差が大きく観測されており，それ以上の観測角では観測される色度差がしだいに小さくなる．このことは，色むらを観測する際，観測角を大きくすると色むらは目立たなくなることを意味している．

## 5.5 考察

むら欠陥の評価にあたって，第 1 層の膜厚に相当する等価膜厚を定義し，これに基づいて欠陥の程度を判定した．このような概念を導入することにより，従来は色度差の判定という主観に頼らざるをえなかった問題を，品質上意味のある物理量に置き換えることが可能になり，客観的な判定基準を与えることができる．

また，むら欠陥は観測角が小さい領域でより大きく観測されることが分かった．このことから，より垂直に近い角度で観測系を構築することにより高い欠陥検出感度を得られる．しかし，このことは一方で，実際にディスプレイが使用される（人に見られる）状況下において，最も色むらが目立つということの意味する．そのため，精度の良い膜厚制御が必要である．

## 5.6 結言

反射防止膜に見られる色むら欠陥検査に関する検討を行い，以下の結果を得た．

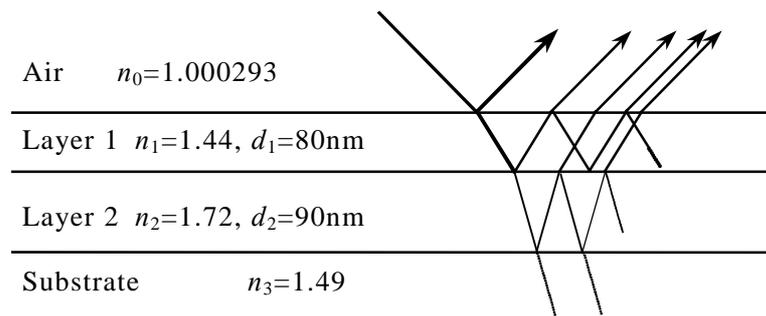
- (1) 欠陥の発生原理をシミュレーションにより明らかにし，実験検証した．
- (2) 膜厚の変化および観測角による色むらの見え方を定量的に評価した．
- (3) 色度差を膜厚変化相当量に換算することにより，むらを客観的に判定する指針を示した．

## 参 考 文 献

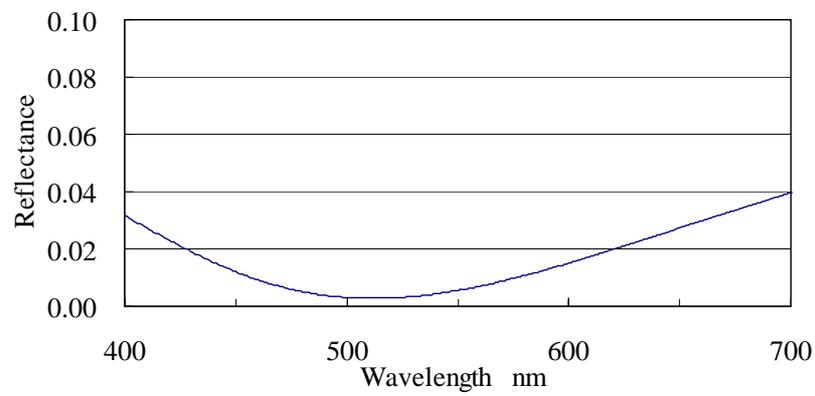
- [1] 染谷保行,蔵田信行,東 浩二,本多 卓,清水朗子,林 成年,波岡 誠,松元浩二,水口圭一,栢根 豊:LCD用偏光フィルムの高機能化と新しい展開,住友化学,2000-1,(2000) 29-36.
- [2] 銅金 巖,南井正好:液晶材料の高機能化,平成 10 年度未来開拓学術推進事業報告会,(1998).
- [3] 北川 篤,松永卓也:高精細 LCD用表面処理技術の開発,日東技報,40,1,(2002) 29-31.
- [4] A.Thelen: Design of Optical Interference Coatings, McGRAW-HILL Book Co., (1989).
- [5] 前出隆一:ディスプレイの色再現と色測定 輝度むら・色むら測定技術,月刊ディスプレイ,8,2,(2002)62-63.
- [6] ファースト:フラットパネル検査装置,<http://www.fast-corp.co.jp/>
- [7] 大塚電子:FPD モジュール検査装置,<http://www.photal.co.jp/>

- [8] 千田直道,柳原治之,村上健二,北島昭彦: 遮光筒式色彩計 520 01/02,横河技報,41,3,(1997).
- [9] 斉藤英貴: 色再現性と測定技術 ELDIM の視野角・ムラ検査装置,月刊ディスプレイ,9,6,(2003) 95-96.
- [10] 坂井隆夫: 生産における光技術 ディスプレイの表示むら検査,O plus E,No.222,(1998) 524-531.
- [11] 小川俊昭: カラーフィルタ検査装置,電子材料 1996年6月別冊,(1996) 126-129.
- [12] 村上和博: カラーフィルタ検査装置,東芝技術公開集,13,72,(1995) 63-65.
- [13] 浅野敏郎: 画質官能検査の自動化技術,ファクトリー・オートメーション,12,11,(1994) 30-34.
- [14] 長田典子: 官能検査の自動化 - 概論・手法 -,映像情報インダストリアル,(2003.2) 13-16.
- [15] 斎藤文彦: 多重解像度画像を用いた液晶ディスプレイ輝度むら欠陥検出,精密工学会誌,63,5,(1997) 647-651.
- [16] 斎藤文彦: 遺伝的アルゴリズムによる液晶ディスプレイ領域輝度むら検出,画像電子学会論文誌,125,5,(1996) 178-183.
- [17] 柏木利幸,大江俊一郎: 色の均一性評価手法,第 14 回外観検査の自動化ワークショップ,(2002) 73-78.
- [18] 中野宏毅,吉田靖夫,藤田和弘: ガボール関数を用いたカラー液晶ディスプレイのマクロ欠陥検査,電子情報通信学会論文誌,(1997) 734-744.
- [19] 大野隼人,梶岡英之,藤田尊圭,浅野敏郎,玉野和保: マルチバンド画像を用いた分光特性推定とその応用,第 14 回外観検査の自動化ワークショップ (2002) 67.
- [20] 安川涼子,川人美洋子,浦川宏,梶原莞爾: 天然藍染めの感性工学的評価 IV-色むらのパターン解析-,繊維学会予稿集,58,1,(2003) 214.
- [21] 岡崎好孝,橋本 基: 画像処理によるプラスチック成形時の色むら計測,第 10 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集,(2001) 76-77.
- [22] 綿貫啓一,遠藤新: 色むら欠陥検出におけるウェーブレット係数操作の最適化,日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集,(2001) 101-102.
- [23] 山下博,永井秀明: 印刷物微少濃淡むらの高精度検出法に関する研究,三菱重工技報,35,3,(1998) 202-205.
- [24] 浅野敏郎,池田達紀: GAを用いた電子ディスプレイの色むら感性評価,知能メカトロニクスワークショップ講演論文集,(2001) 168-171.
- [25] 浅野敏郎,石丸伊知郎: ラディアル基底関数ネットを用いた色むらの評価,電気学会産業システム情報化研究会資料 IIS-00,No.13-21,(2000) 5-9.
- [26] 北山綱次,吉田浩之,渡辺恵一,小川雅司: ニューラルネットを利用した色検査(シートベルトへの適用),第 6 回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 83-86.
- [27] 秦 清治,川上幸治,琢磨幹雄,花房秀行: ファジーニューラルネットワークを用い

- た印刷欠陥評価システムの構成,第6回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 98-103.
- [28] 新野秀憲,大滝亮一,伊藤 誼:色むらの多次元定量化についての一提案,日本機械学会論文集 C,60,570,(1994) 357-362.
- [29] 浅野敏郎,川目啓介,望月 淳,福原信雄:CRT ディスプレイの白色均一性定量評価,電子情報通信学会論文誌,J73-D2,6,(1990) 830-839.
- [30] 森由美,棚橋高成,辻智,田村徹,吉武良治,森口喜代:ヒューマンインフォメーション 認識限界コントラストに基づいた輝度ムラの定量化手法,映像情報メディア学会誌,56,11,(2002) 1837-1840.
- [31] 高地正夫:液晶ディスプレイのムラに取り組む 輝度分析と輝度ムラ,映像情報 Industrial, 35,3,(2003) 83-85.
- [32] 中元 淳,山下 博,金子 博:MTFフラクタル次元による印刷濃度むらの定量的評価法,電子情報通信学会論文誌,(2000) 1082-1089.
- [33] 上田邦夫:ムラ検査の自動化,映像情報 Industrial,35,2,(2003) 35-41.
- [34] たとえば,光設計とシミュレーションソフトの上手な使い方,オプトロニクス社,(2000) 82.
- [35] たとえば,照明学会編:ライティングハンドブック,オーム社,(1987) 55.

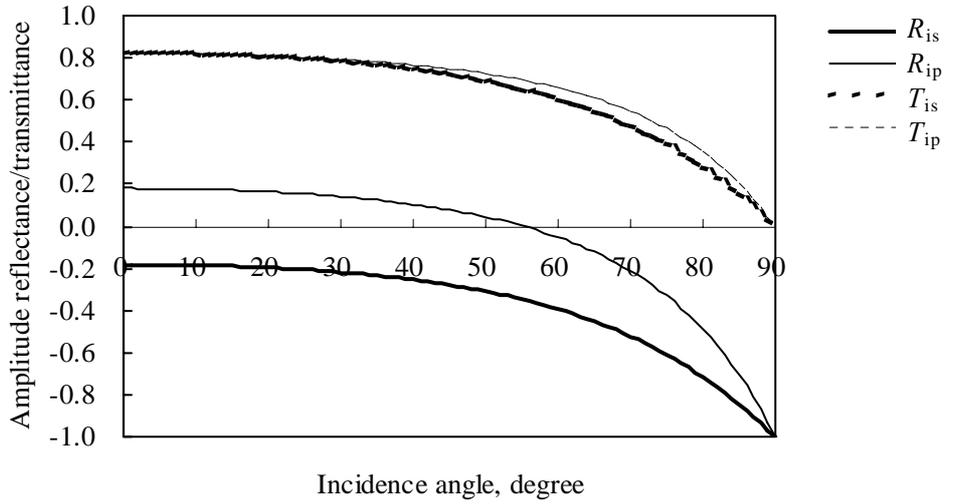


(a) An example of configuration of anti-reflection coating

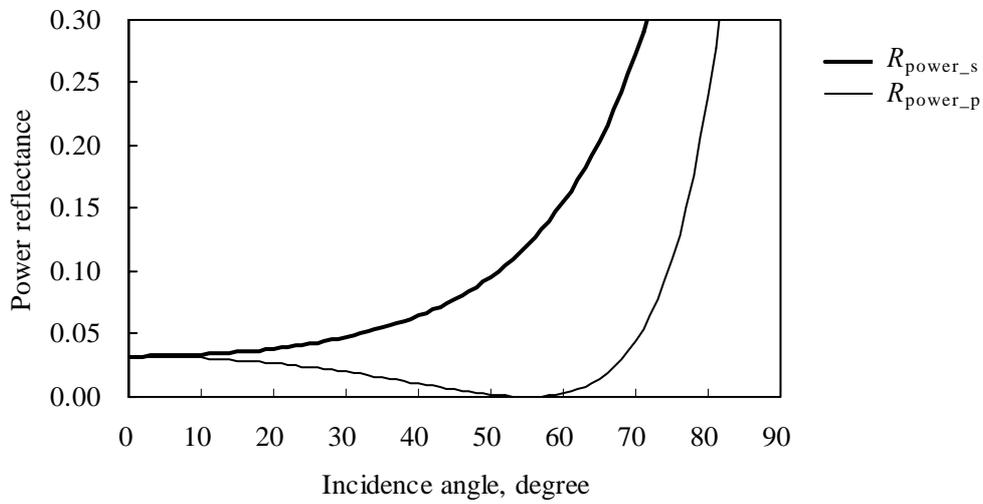


(b) An example of spectral reflectance characteristic

**Fig.5.1** Configuration of anti-reflection coating

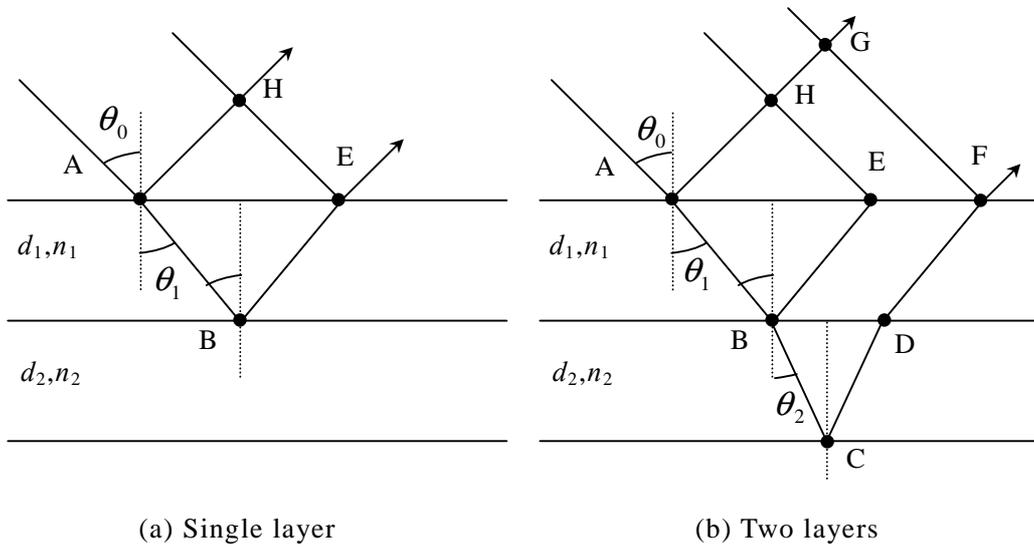


(a) Amplitude reflectance and transmittance

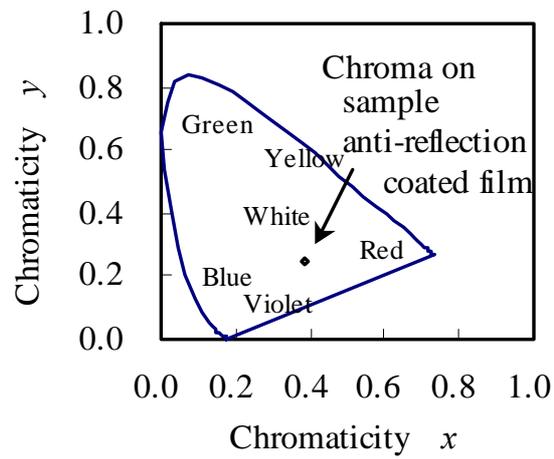


(b) Power reflectance

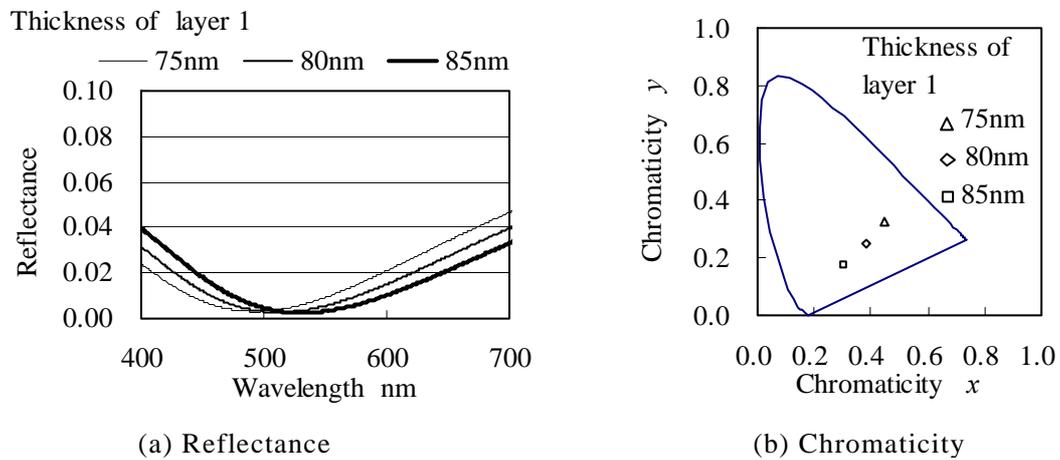
**Fig.5.2** Reflectance and transmittance between layers



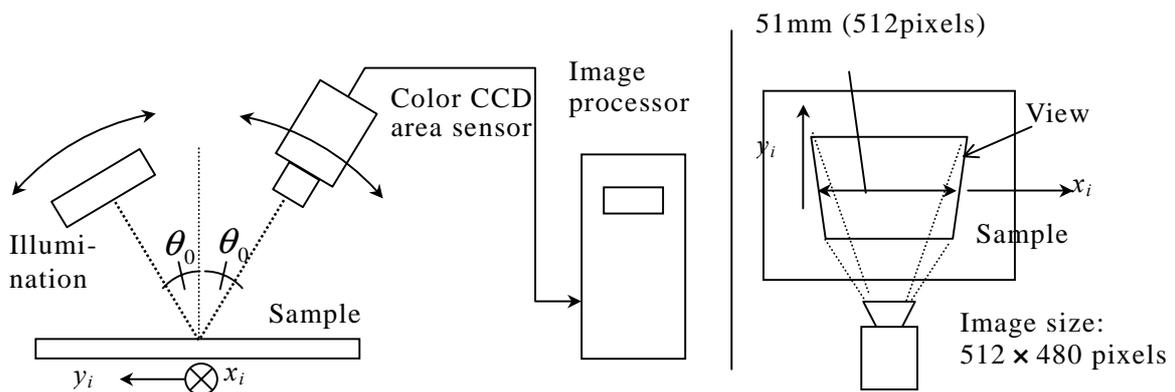
**Fig.5.3** Optical path differences with anti-reflection coating



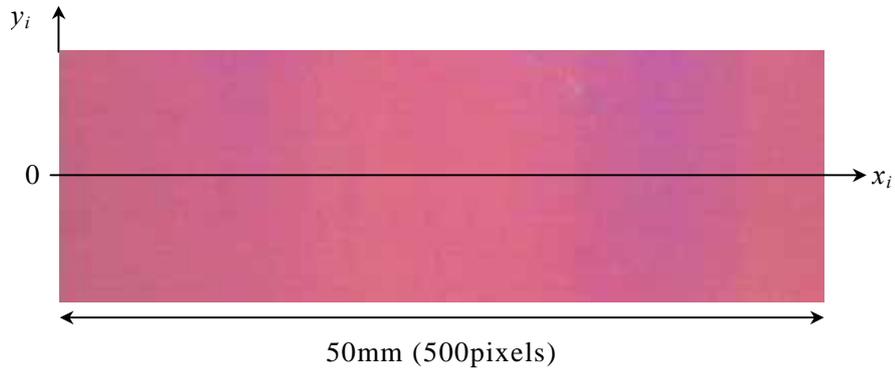
**Fig.5.4** Chromaticity involving two layer anti-reflection coating



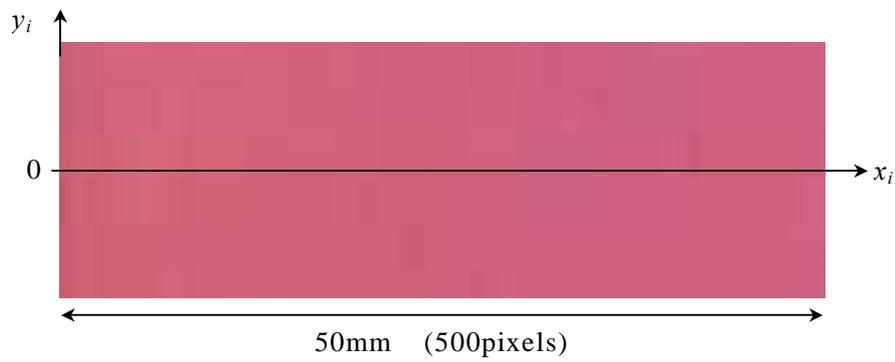
**Fig.5.5** Variations of reflectance and chromaticity with first layer thickness



**Fig.5.6** Configuration of experimental system

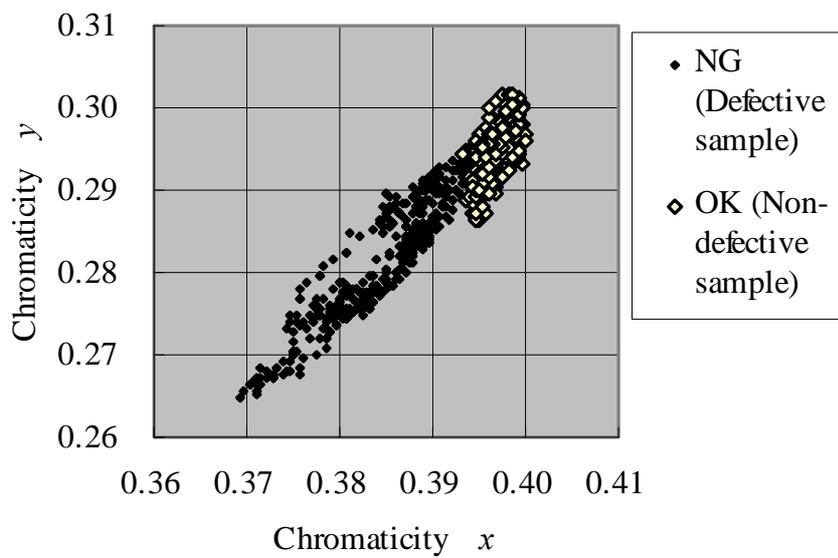


i) NG (Defective sample)



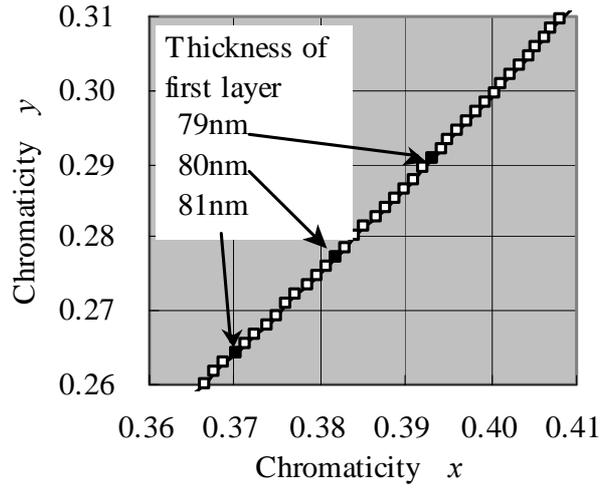
ii) OK (Non-defective sample)

(a) Observed images

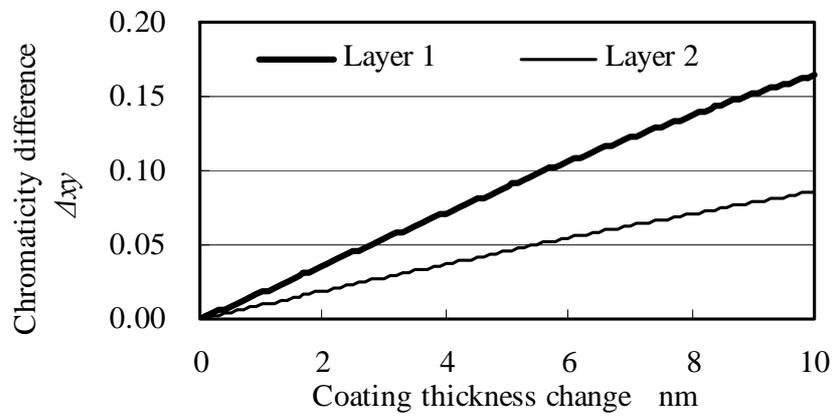


(b) Chromaticity distribution

**Fig.5.7** Variation of chromaticity distributions with defect

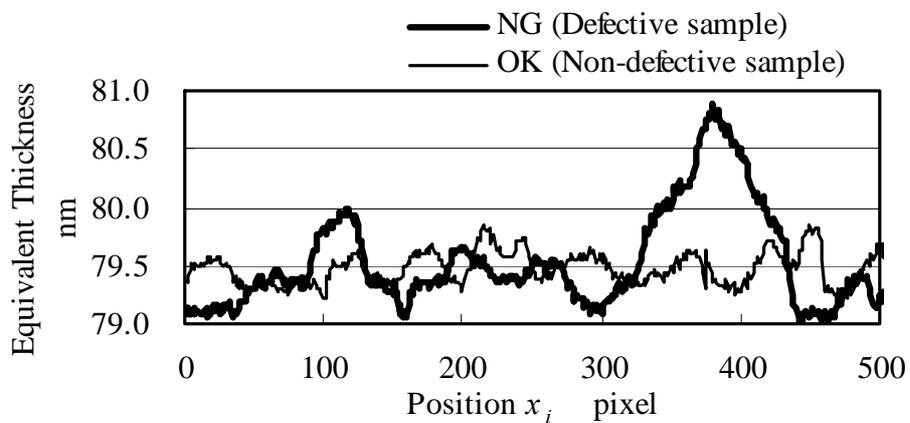


(a) Variation of chromaticity with first layer's thickness

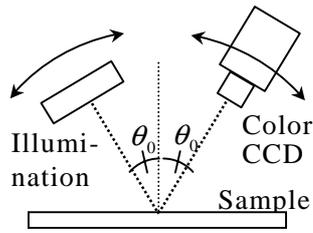


(b) Comparison of chromaticity differences between first and second layer's thickness changes

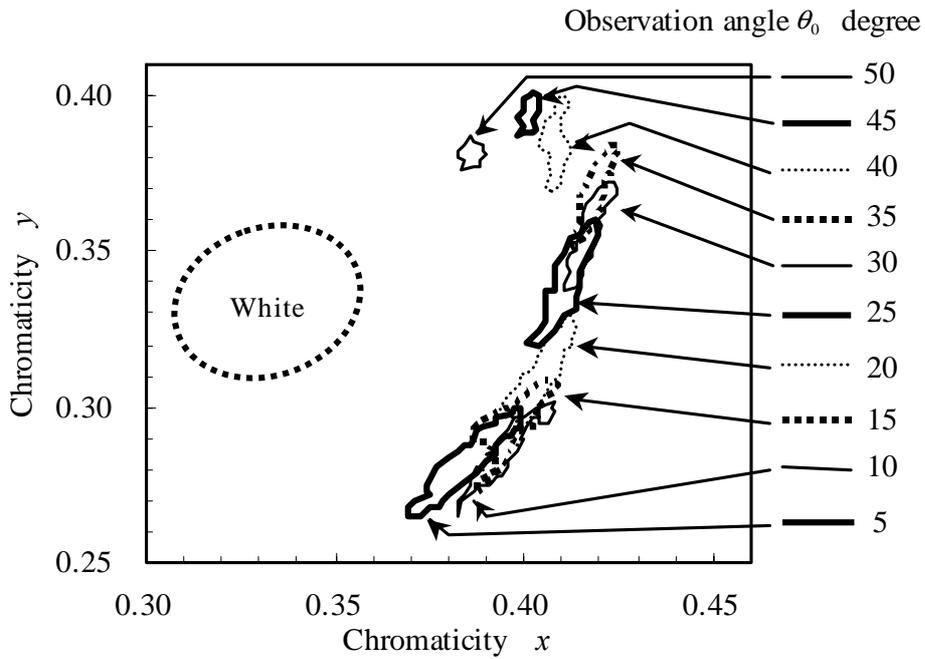
**Fig.5.8** Simulation result



**Fig.5.9** Comparison of Equivalent Thickness Variation between defective and non-defective sample

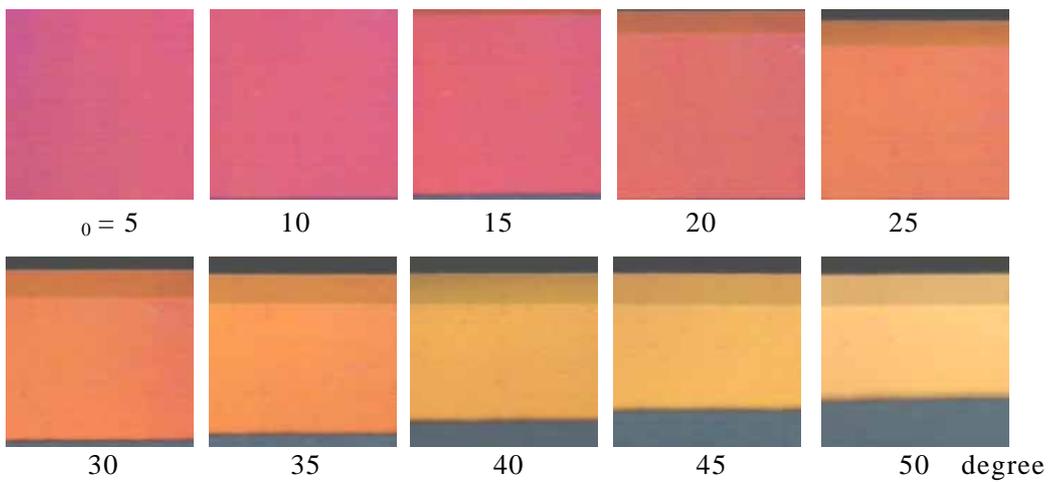


(a) Variation of observation angle ( $\theta_0 = 5, 10, 15, \dots, 50$  degree)



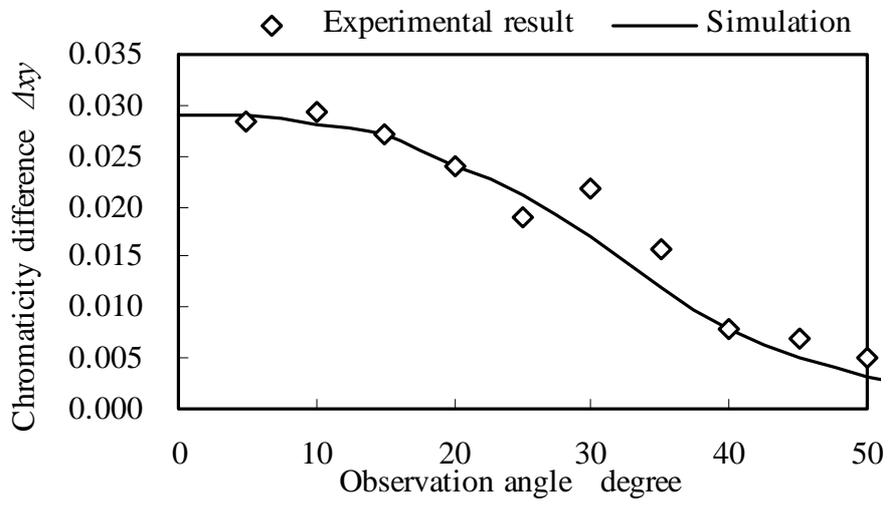
(b) Variation of chromaticity distributions with observation angle

Each plot shows chromaticity distribution involving the same defect sample with different observation angle.



(c) Variation of observed images

**Fig.5.10** Variation of chromaticity distributions with observation angle



**Fig.5.11** Variation of chromaticity difference with observation angle



## 第6章 色むらの感覚評価の定量化および色むら低減に関する検討

### 6.1 緒言

本章では、基材シートに1層の薄膜を形成した反射防止膜を対象に、色むらの可判別性を評価し、設計膜厚の違いによる色むらの見え方の違いを評価する。

一般に色むら欠陥は定量評価が困難であり、人の目視による官能検査が基準となっている場合が多い。近年、官能検査の定量化の重要性が認識され始め、研究事例が多くなってきている<sup>1)-11)</sup>。官能検査の定量化の研究には大別して2種類のアプローチが見られる。1つは、限度見本あるいは人間の判定結果に基づいてそれに合致する判定基準を確立<sup>3)-6)</sup>しようとするものであり、ニューラルネットワークなどの手法がよく用いられる。もう1つは、人間がむら欠陥を見たときに受ける印象や識別限界などを明確にし、官能検査に絶対的な尺度<sup>7)-12)</sup>を与えようとするものである。糊沢ら<sup>7)</sup>は、液晶ディスプレイの濃淡むらを対象に、人間が知覚するむらはその輝度差と変化幅との比(grad値)によって決まるという重要な特性を見出した。加藤<sup>8)</sup>や奥田ら<sup>9)</sup>により人間の色彩感覚特性に関する研究成果が報告されており、色相や明度によってむらの感じ方が異なるなどの興味深い結果が示されている。斎藤<sup>10)</sup>は、人間がむら欠陥を知覚するまでの所要時間を尺度として、輝度むらが持つ特徴量の知覚しやすさへの影響を明確にした。また、筆者<sup>11)</sup>は、画面内に出現する濃淡変化量(grad値に相当)の度数分布に基づいて、ディスプレイの濃淡むらの合否判定基準を与える手法を提案している。

前章では、2層の薄膜からなる反射防止膜を対象に、干渉シミュレーションによりむらの発生原理を解析し、膜厚の変化と色むらとの関係を明らかにした。また、色の差という感覚的な量を膜厚という品質管理上意味のある量に置き換えることにより、むらを客観的に判定する指針を示した。さらに、2層の薄膜からなる反射防止膜であっても1層品と同様に評価するため、等価膜厚という考え方を整理した。この結果、第1層(基材から最も遠い層)の膜厚が重要であることを示した。前章ではまた、観測方法によるむらの見え方の違いをある1つの品種について実験検証した。しかし、実際には設計膜厚の異なる様々な製品が存在し、品種毎の違いによるむらの見え方を検証する必要があった。

本章では、1層品を対象に、色むらの可判別性を評価し、設計膜厚の違いによる色むらの見え方の違いを評価する。1層品は2層品と比較して色むらが目立ちにくいといわれている。しかし、色むらに対する人間の目の感度は高く、1層品に生じるわずかな色むらであっても視認される。本章では、まず、シミュレーションによりむらの発生原因である膜厚変動とそれに伴う色差との関

係を定量的に求める。次に、膜厚の変化によって明るさの変化はほとんど生じないことを示し、色むらが見えるかどうかの判定基準として  $u'v'$  色度図上での MacAdam の色判別楕円<sup>12)</sup>が利用できることを述べる。これを利用して、どの程度の膜厚変動に対して色むらが視認されるかを調べる。さらに、設計膜厚および観測方法と色むらの見え方との関係を明らかにし、色むらを目立ちにくくするための膜厚選定方法について考察する。

## 6.2 検査対象と色むら欠陥

一般的な膜構成からなる 1 層および 2 層反射防止膜の分光反射率の例を図 6.1 に示す。この図からも分かるように、通常、層の数が多いほど反射率を低くすることができる。可視光全域にわたって均一な低反射率が得られない場合は、可視光領域の中央付近 (550 nm 付近) で反射率が最小となるように膜厚と屈折率が選定される。例えば、アクリルシート等の基板 (屈折率 1.49) に一般的な  $MgF_2$  材料を用いて屈折率 1.38 の薄膜を形成する場合、膜厚を 100 nm 程度とすることにより可視光領域で低い反射率を得ることができる。

膜厚が変化すると分光反射率曲線が波長軸方向にシフトするため、膜厚が不均一であると場所によって異なった色に見える。通常、層の数が多いほど色むらが目立ちやすい。これは、層数が多くなるほど可視光領域の長波長側および短波長側で分光反射率の勾配が急峻になるためである。このため、膜厚変化によって生じる分光反射率の違いが 1 層の時に比して大きくなり、その結果、知覚される色度の差が大きくなる。

## 6.3 シミュレーションによる色むらの生成と評価

### 6.3.1 反射防止膜から知覚される色度

ある物体を見たときに知覚される色はその物体に照射される照明の分光分布と物体の分光反射率によって決まる<sup>7)</sup>。ここでは最も伝統的な表色系である XYZ 表色系および CIE 1976 UCS 色度図 ( $u'v'$  色度図) を用いて反射防止膜がどのような色に見えるかを評価した。

XYZ 表色系および  $u'v'$  色度は次のように定義されている<sup>7)</sup>。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} \cdot d\lambda \quad (6.1)$$

$$K = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} u' &= 4X / (X + 15Y + 3Z) \\ v' &= 9Y / (X + 15Y + 3Z) \end{aligned} \quad (6.3)$$

ここで、 $S(\lambda)$  は照明の分光分布、 $\rho(\lambda)$  は物体の分光反射率、 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  は XYZ 表色系における等色関数を表している。積分範囲は可視光の範囲 ( $\lambda = 380 \sim 780 \text{ nm}$ ) である。一例として、照明に標準の光 D65 光源を使用した場合、図 6.1 に示した 1 層品の反射防止膜から知覚される色度は  $u'=0.199$ 、 $v'=0.457$  となり、色度図上では図 6.2 に示す位置となる。

### 6.3.2 膜厚の違いによる色度変化

図 6.1 に示した 1 層品に関して膜厚を変化させ、それぞれの膜厚に対して分光反射率を計算により求めた。反射防止膜の屈折率を 1.38 とし、膜厚は設計値 100 nm を中心に  $\pm 5 \text{ nm}$  の範囲で変化させた。結果を図 6.3 (a) に示す。膜厚が変化すると分光反射率曲線は波長軸方向にシフトする。膜厚が大きくなると短波長領域の反射率が高く、逆に膜厚が小さくなると長波長領域の反射率が高くなる。各々の分光反射率から知覚される色度をプロットすると同図 (b) のようになる。膜厚の変化に対して連続的に色度が変化していることが分かる。

### 6.3.3 明度変化の取扱い

本節では、膜厚変化に伴う反射光の明度変化を求める。

前節で用いた  $u'v'$  色度図では、色差は色度図上の距離として次のように定義される。

$$\Delta u'v' \equiv \sqrt{(u'_0 - u')^2 + (v'_0 - v')^2} = \sqrt{\Delta u'^2 + \Delta v'^2} \quad (6.4)$$

ここで、 $u'_0, v'_0$  は基準となる色度（膜厚が設計値通りである箇所での色度）を、 $u', v'$  は膜厚が設計値に対して異なる領域での色度をそれぞれ表す。

これに対し、一般には、色度図上での色合いだけでなく明るさを含めた色差を評価することが多い。この場合には、たとえば CIE 1976  $L^*u^*v^*$  表色系<sup>7)</sup> が用いられる。このとき色差は次のように定義される。

$$\Delta L^*u^*v^* \equiv \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (u_0^* - u^*)^2 + (v_0^* - v^*)^2} \quad (6.5)$$

本研究の場合、むら欠陥の評価にあたって明度差は考慮しなくてよいと考えられる。それは、膜厚変動に伴って分光反射率曲線が波長軸方向にシフトするが、反射率の大きさの方向へはシフトせず、膜厚変動による平均反射率の変化は小さいためである。例えば、図 6.3 (a) に示した各々の分光反射率曲線について可視光領域での平均反射率を求めると、膜厚 95 nm のとき 1.85%、膜厚 105 nm のとき 1.88% でありこれらの差は非常に小さい。この反射率の違いによる影響を調べるため、式 (6.5) で定義される  $L^*u^*v^*$  色差と、次式で定義される色の差のみを表す  $\Delta u^*v^*$  と

を比較した。

$$\Delta u^* v^* \equiv \sqrt{(u_0^* - u^*)^2 + (v_0^* - v^*)^2} \quad (6.6)$$

図 6.3 (a) に示した各々の分光反射率曲線について可視光領域での平均反射率および  $\Delta u^* v^* / \Delta L^* u^* v^*$  を計算した結果を表 6.1 に示す。これをみると、膜厚の変化に伴う平均反射率の変化量は非常に小さいことが分かる。最も膜厚変動差の大きい 105 nm のときでも  $\Delta u^* v^* / \Delta L^* u^* v^* = 0.9956$  であり、明度差を考慮する場合としない場合とでほぼ一致する色差が得られている（後述するように、5 nm という膜厚差は色むら欠陥を生じるのに十分な膜厚差である）。このことから、色むらの評価においては明度差を考慮する必要がなく、前節で用いた  $u^* v^*$  色度図に基づいて評価が可能であることが分かる。

#### 6.3.4 色むらの可判別性の評価

人間がどの程度の色差の識別できるかを表す指標として、MacAdam の色判別楕円がよく用いられる。これは、色領域毎に判別できる最小色差を楕円の大きさで表したものである。目の視感度は波長によって異なるため色判別楕円の大きさや形状（長軸対短軸比）は色領域毎に異なっている。一般に、人の目は青色領域で色の違いに対して高い感度があるとされている。

膜厚変動による色差が判別できるかどうかを評価するため、様々な膜厚値に関して知覚される色度をシミュレーションにより求め、色度図上に色判別楕円と重ねてプロットした。結果を図 6.4 に示す。D65 光源下でのこの反射防止膜の色は緑と青の領域に近い白色領域にあり、色判別楕円の大きさは非常に小さいことが分かる。これは、他の色領域に比してわずかな色の变化（色差が小）でも視認されやすい領域であることを意味している。（MacAdam の楕円は通常、大きさの違いが分かりやすいように楕円の径を 10 倍に拡大して描かれている。図 6.4 ではこれにあわせて色差も拡大表示している。）各膜厚値に対応する色度をみると、設計膜厚 100 nm に対して  $\pm 2$  nm の変動があれば色度図上の距離は色判別楕円の大きさと同程度となっている。そのため、局所的に 2 nm 以上の膜厚変動がある場合には色むらとして認識されることが分かる。

### 6.4 色むらの低減

#### 6.4.1 色むらの見え方の違い

色むらの検査に適した観測角を明らかにするため、および、色むらが目立ちにくい膜構造が実現可能かどうかを確認するため、設計膜厚および観測角（＝光源の入射角）を変化させて一定の膜厚変動に対する色差の変化を求めた。ここでは一定値 5 nm の膜厚変動に対する色差を、設計膜厚を 60 ~ 150 nm の範囲で

変化させ、また観測角を 0 ~ 60 degree の範囲で変化させて計算した。色差の定義は式 (6.4) の  $u'v'$  色差を用いた。結果を図 6.5 に示す。この結果をみると、同じ膜厚差であっても、それによって生じる色差は設計膜厚によって異なっていることが分かる。色差は設計膜厚 100 nm、観測角 0 degree のときに最も大きい。6.2 節で述べたように、通常は可視光領域の中央で反射率が低くなるように膜厚を選定するが、図 6.5 の結果から、これは同時に色むらが最も目立ちやすい膜厚であることが分かる。このことは次のように説明できる。図 6.6(a) は膜厚が 100 nm および 95 nm のときの分光反射率曲線を示す。これらの曲線は可視光領域の中央付近で交差するため、両者の差をとると赤色領域と紫色領域では符号が逆になる。膜厚が 95 nm のときの色は 100 nm のときのそれと比較すると赤色が強く紫色が弱い色に見える。一方、同図 (b) は、同様に膜厚が 80 nm および 75 nm のときの分光反射率を比較したものである。このとき、分光反射率曲線は 450 nm 付近に極小値があり、可視光の広い領域にわたって緩やかな単調増加となる。これらの差は (a) の場合と比較すると均一に近いいため、色の差を感じにくいと考えられる。

図 6.5 に戻って、今度は観測角の影響に注目する。設計膜厚が 100 nm の場合、観測角が大きくなるにしたがって色差が小さくなっている。設計膜厚が 80 nm 程度以下では、観測角が変化しても色差は依然小さいままである。ところが、設計膜厚が 110 nm 以上の領域では、観測角が大きくなると色差が一度増加し、その後減少している。このことは、膜厚および観測角と薄膜中を通過する光線の光路長との関係から説明できる。屈折率  $n$ 、膜厚  $d$  の薄膜に入射角  $\theta$  で光が入射した場合、薄膜の表面反射光と裏面反射光との光路差は次式で与えられる。

$$\delta = 2nd \cos \theta \quad (6.7)$$

この式から明らかのように、観測角を大きくすることと膜厚が小さくなることは同等の効果をもつ。このため、たとえば設計膜厚が 110 nm 以上のときに観測角を大きくした場合、膜厚が小さくなるのと同じ効果となり色差が増加している。

#### 6.4.2 色むらを低減するための膜厚選定

前節の現象を利用すると、分光反射率曲線が極小となる波長が可視光領域の中央から長波長側あるいは短波長側へシフトするように設計膜厚を選定することにより、ある程度色むらを目立ちにくくすることが可能である。このとき、設計膜厚を大きく（たとえば 120 nm 程度に）選定すると、観測角が小さいときのみ色差を小さくすることができる。通常、ディスプレイが使用される（人に見られる）角度は比較的小さいので、これによって実用上むらを低減できる。また、検査工程においては観測角を大きくとることにより設計膜厚 100 nm のときと同程度の感度で色差を計測することができる。一方、設計膜厚を小さく（たとえば 80 nm 程度に）選定すると、観測角による色差の変化は単調減少を保持

したまま一様に低くなる。また、色度は黄色方向にシフトするが、図 6.4 から、このとき MacAdam の楕円は設計膜厚 100 nm のときと比較して大きくなるのがわかる。これらの効果により色むらを目立ちにくくすることができる。

## 6.5 結言

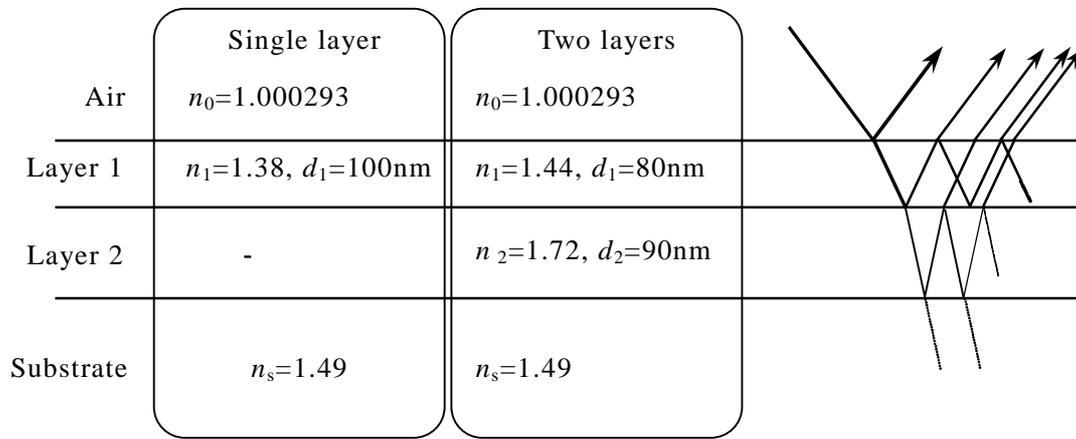
アクリルシート等の基板の上に形成された反射防止膜に生じる色むら欠陥を定量評価するため、薄膜干渉シミュレーションを中心に以下の検討を行った。

- (1) 薄膜の膜厚変動に起因する色むらを、シミュレーションを用いて生成することにより、膜厚変動量と色度変化との関係を明らかにした。
- (2) 膜厚変動に伴う明度変化のうち、明るさの変化は色の変化に対して非常に小さいため無視できることを明らかにした。そのため、最もシンプルな  $u'v'$  色差が適用可能であり MacAdam の色判別楕円による欠陥判定が可能であることを述べた。
- (3) 色判別楕円を用いて色むら欠陥の判定基準を求めた。その結果、設計膜厚に対して  $\pm 2$  nm 程度の膜厚変動でも人の目に視認されうる色むらとなることを述べた。
- (4) 設計膜厚および観測角と色むらとの関係を明らかにした。可視光領域の中央で最も低反射率となるように膜厚を選定した場合、色むらが最も目立ちやすいことを明らかにした。また、色むらを低減するための設計膜厚の選定方法について述べた。

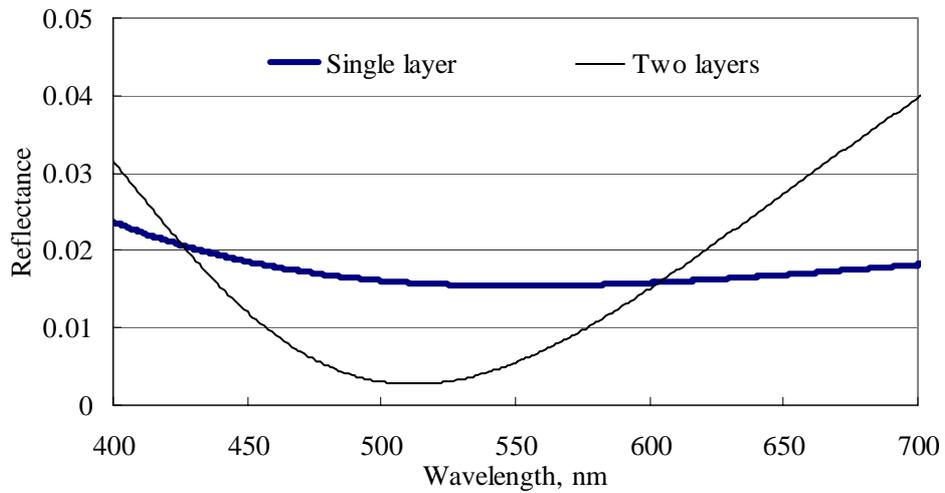
## 参 考 文 献

- [1] 浅野敏郎：画質官能検査の自動化技術, ファクトリー・オートメーション, 12, 11, (1994) 30-34.
- [2] 長田典子：官能検査の自動化 - 概論・手法 -, 映像情報インダストリアル, (2003.2) 13-16.
- [3] 浅野敏郎, 石丸伊知郎：電子ディスプレイにおける色むら感覚強度の学習, 電気学会論文誌, 121-C, 9, (2001) 1395-1400.
- [4] Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, Y. Miyake, J. Hayashi and M. Saito: "A New Color Management System Based on Human Perception and its Application to Recording and Reproduction of Art Paintings", Proc. of Fifth Color Imaging Conference, (1997) 169-172.
- [5] 佐藤洋一, 清水治和, 加藤清一：カラーフィルムインライン官能検査システム, 第 6 回外観検査の自動化ワークショップ, (1994) 87-92.
- [6] 千葉直樹, 奥田泰生, 安富文夫, 松浦英文, 河田 宏, 富田 洋：限度見本に依存した官

- 能検査の良否判定のモデル化,第 6 回外観検査の自動化ワークショップ,(1994) 93-97.
- [7] 糊澤 信, 鈴木 俊彦, 下園裕明: 液晶表示装置の表示むら評価技術の開発, 精密工学会誌, 66, 1 (2000) 152-156.
- [8] 加藤晴夫: 色相相対視感度特性の測定, 電子情報通信学会 1990 年春季全国大会講演論文集,(1990).
- [9] 奥田泰生, 貴志宗紀, 安富文夫, 松浦英文, 人見正明, 大隈正人: 色むら定量化のための色彩感覚特性評価, 第 3 回画像センシングシンポジウム講演論文集,(1997) 85-88.
- [10] 斎藤文彦: 人間の視覚・聴覚情報 輝度むらの特徴量と視覚による検出時間の関係の分析, 映像情報メディア学会誌, 52, 4, (1998) 554-560.
- [11] 広瀬 修: 回折パターンを利用した格子構造フィルムのむら欠陥検査, 精密工学会誌, 69, 4, (2003) 586-590.
- [12] たとえば, 照明学会編: ライティングハンドブック, オーム社, (1987) 55.

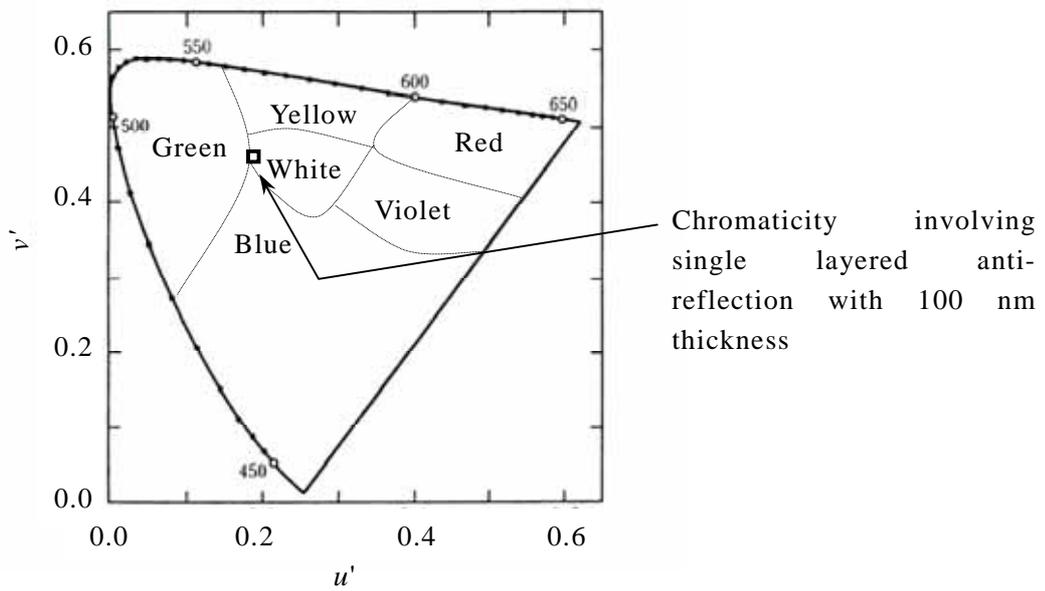


(a) Examples of configuration of anti-reflection coating

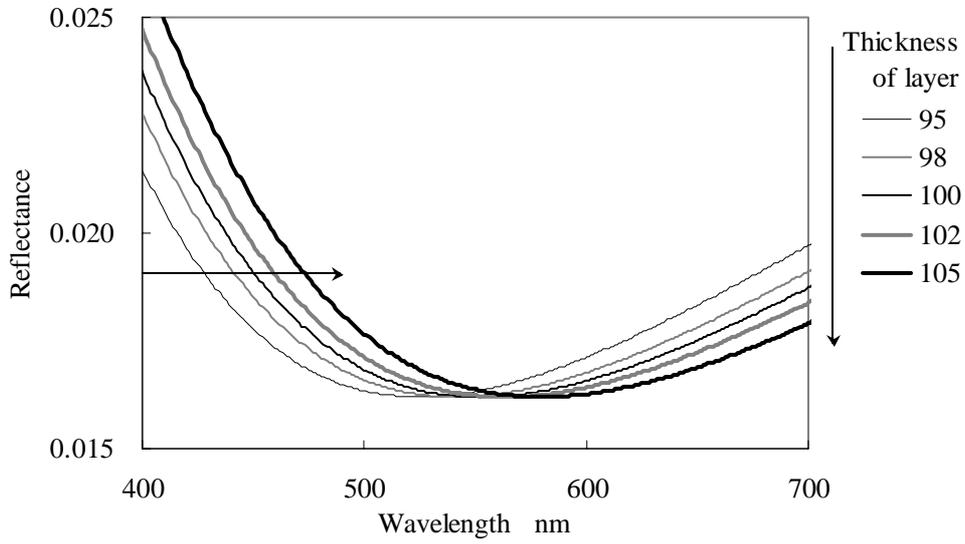


(b) Examples of spectral reflectance

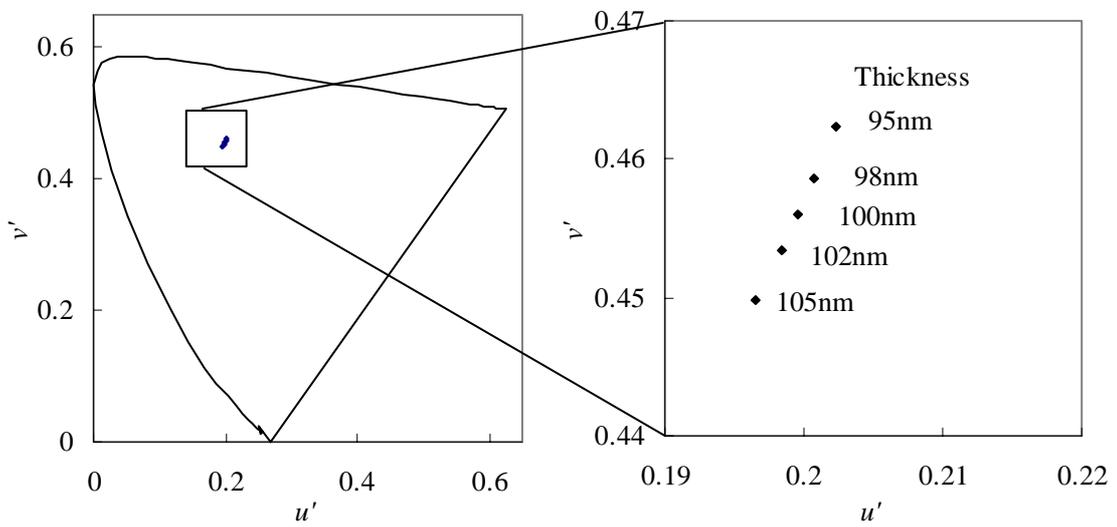
**Fig.6.1** Configuration of anti-reflection coating



**Fig.6.2** An example of chromaticity involving the single layered anti-reflection ( Configuration of coating is indicated by **Fig.6.1.** )



(a) Variations of spectral reflectance

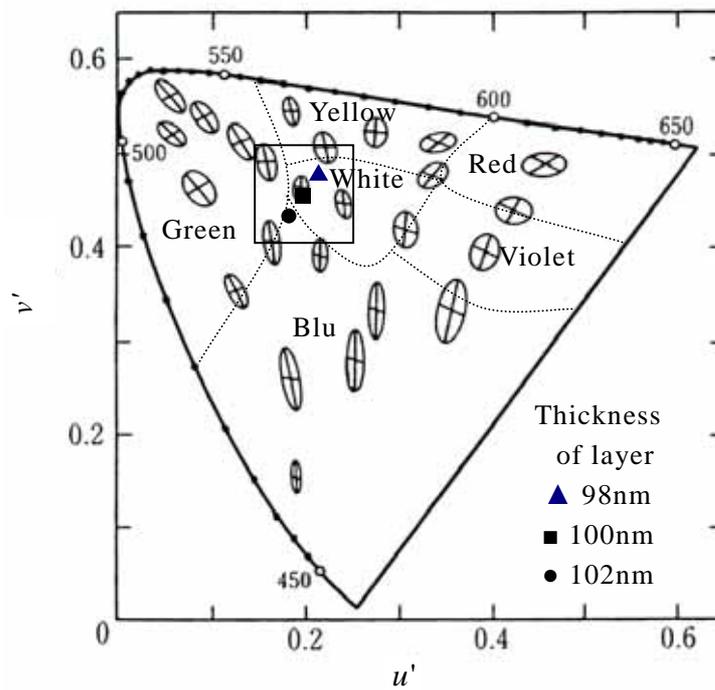


(b) Variations of chromaticity

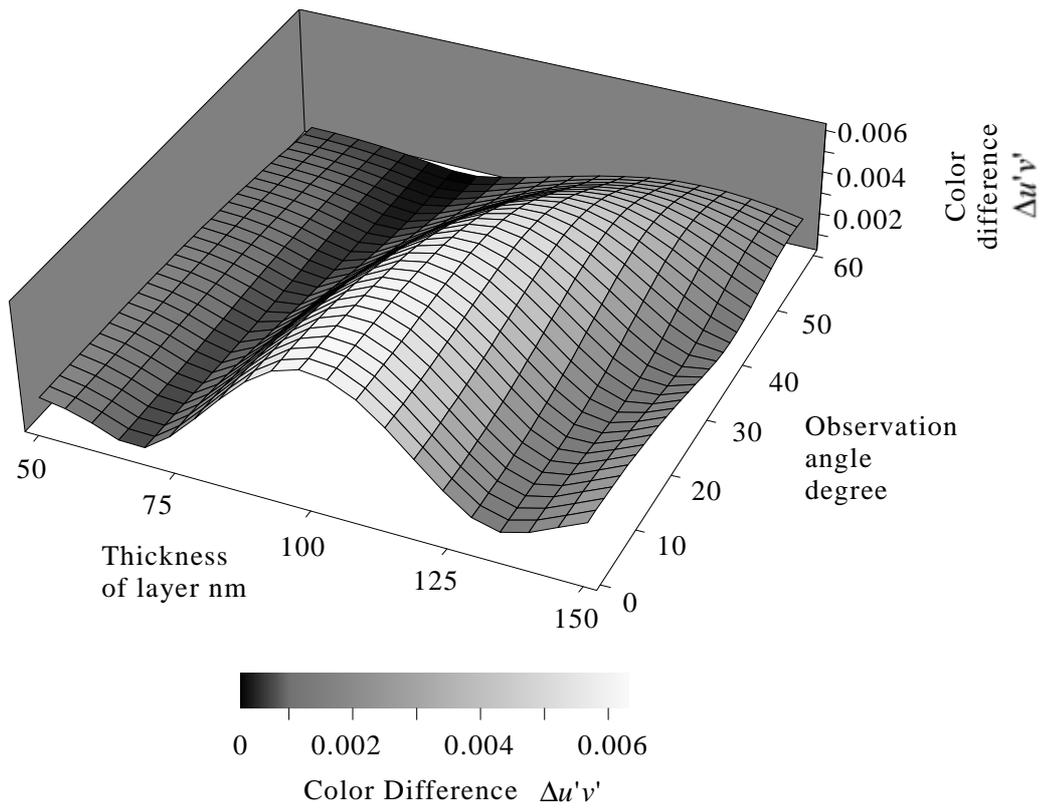
**Fig.6.3** Variations of spectral reflectance and chromaticity with thickness of layer involving the single layered anti-reflection

**Table 6.1** Variation of mean reflectance and color difference with thickness

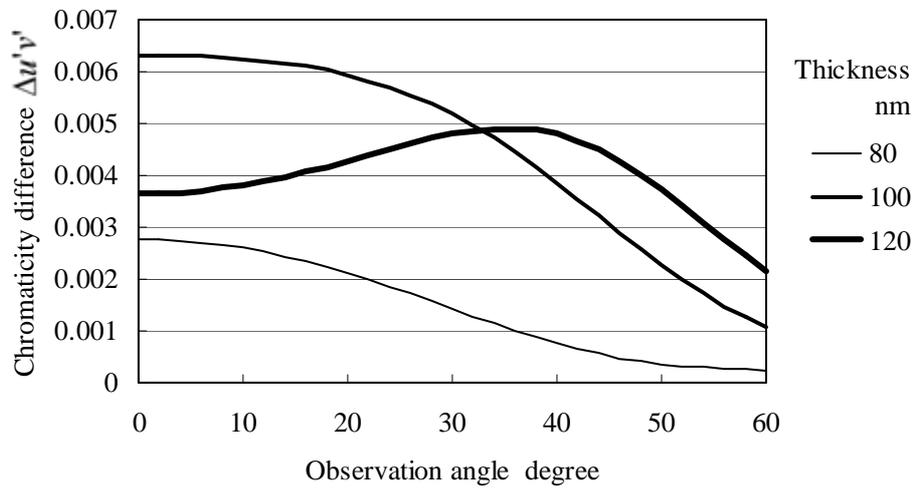
Thickness of layer nm	Mean reflectance %	$\Delta u^* v^* / \Delta L^* u^* v^*$
95	1.776	0.9991
98	1.772	0.9999
100	1.782	1.0
102	1.795	0.9986
105	1.823	0.9956



**Fig.6.4** Valuation of visibility of color difference by using MacAdam's ellipsoid

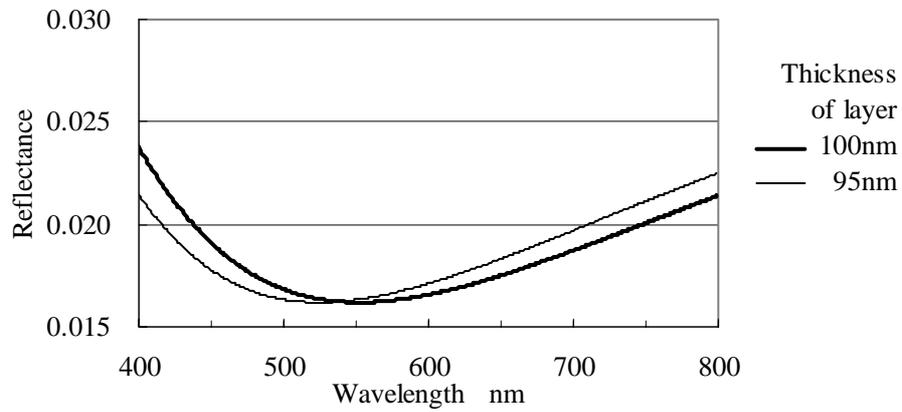


(a) 3-dimensional display

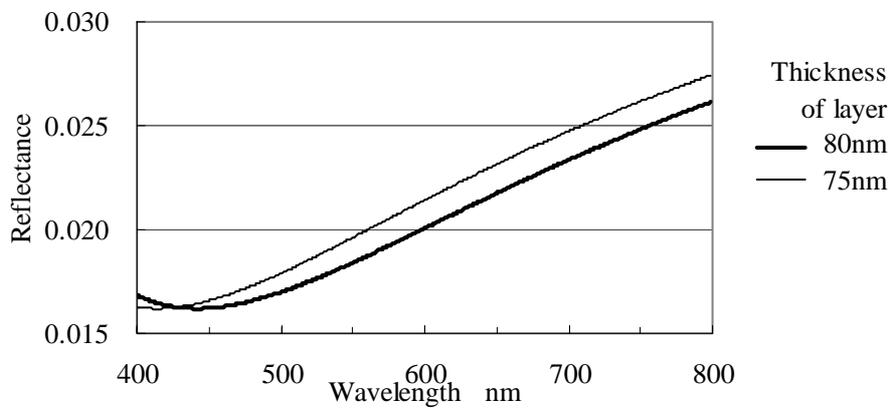


(b) Cross-sectional view involving several thickness

**Fig.6.5** Variation of color difference with thickness of layer and observation angle



(a) In case which the thickness of layer is 100nm



(b) In case which the thickness of layer is 80nm

**Fig.6.6** Variation of spectral reflectance with defect



## 第7章 むら欠陥の官能検査の自動化に関する検討

### 7.1 緒言

第5章および第6章では、反射防止膜に生じる色むら欠陥について、その発生のメカニズムを明らかにし、色むらという感覚的な量を膜厚という品質管理上意味のある物理量に置き換えることにより定量評価する手法を確立した。また、人間の目の知覚限界に着目した色むら検査方法について述べた。

しかし、実際のむら欠陥検査の現場においては、個々のむらが知覚されるかどうかではなく、被検査面全体を眺めたときにむらがどの程度気になるかによって合否判定がなされている。このような検査は一般に官能検査と呼ばれ、見る人の主観に大きく左右されることから検査の自動化は非常に困難である。前章までで述べた色むらの定量評価法により個々のむらが知覚されるかどうかを定量的に判定することが可能となったが、官能検査の自動化方法を与えるまでにはいたっていない。

そこで、本章では、前章までに述べたむらの定量化手法を用いて、むらを表す特徴量の度数分布に基づく新しい検査方法を提案する。むら欠陥には、視野内に強いむらが1箇所ある場合や、わずかなむらが多数存在する場合などがある。そのため、個々のむらの程度によって合否判定を行う従来法ではこれと合致する判定結果を得るためには限界がある。本手法では、むらの程度に応じて許容される出現度数を設定し、この許容度数を超えるかどうかによって合否判定を行うこととした。この手法によって目視による官能検査と良く一致する判定結果が得られることを実験により検証する。

本章ではまた、ここで提案する検査方法の汎用性を確認するため、異なる原因により生じるむら欠陥についても実験検証を行う。検査対象として、ディスプレイ向けの別の部材である「格子構造フィルム」を挙げ、これに生じる濃淡むら欠陥の検査について述べる。格子構造フィルムとは、例えばディスプレイの前面に用いられる導電性メッシュのように、非常に微細な格子を有する光透過性の部材である。ここではレーザの回折パターンを利用し、フィルム上へのレーザ照射位置を移動しながら回折パターンの変化を計測することにより濃淡むらの特徴計測が可能であることを述べ、得られた特徴量を基に官能検査の自動化が可能であることを検証する。

### 7.2 特徴量の度数分布に基づく官能検査方法

本節では、人がむら欠陥を見たときに受ける印象の強さについて仮説を立て、その仮説に基づいた合否判定法を立案し、その実効性について実験検証する。

### 7.2.1 むら欠陥の官能検査に関する仮説

目視検査では、むらの強さのみではなく、一度に見えるむらの数によっても合否判定結果が異なる。非常に弱いむらであれば1枚の製品に1,2箇所程度存在しても許容されることがあるが、より多く存在すると不合格とされる。また、強いむらは1箇所でも存在すると不合格となる。このことから、個々のむらの強度のみでは人がむらを見たときに受ける印象の強さを評価できないと考えられる。

人間の視覚は濃淡差に敏感であり、濃淡差のあるところに無意識に注目することが知られている<sup>1)</sup>。このため画面内に不自然なむらがあるとその位置を無意識に注視する。しかし、これはより本能に近い活動であり、我々が通常ディスプレイを見る目的(仕事をするなど)からは不要な動作である。また、注視点が視野内でジャンプ(サッケード)すると、その間は思考が抑制される<sup>2),3)</sup>ことも知られている。これらのことから、むら欠陥の判定においては次のような心理的な作用がはたらいているという仮説が考えられる。すなわち、むらという意図しない外的要因により思考が抑制されることは不快感につながる。弱いむらであればそこに強く注意を奪われることはないため大きな不快感とはならないが、画面内に弱いむらが多数存在する(何度も見せられる)ことによって不快感が蓄積され、ある許容値を超えたとき不良品扱いになるものと考えられる。

そこで、むらの特徴量に基づいてではなく、特徴量の出現頻度、すなわち度数分布に基づいて合否判定を行うことを考える。

### 7.2.2 仮説に基づく官能検査方法(特徴頻度法)

反射防止膜に生じる色むら欠陥を表す特徴量として、前章まで、観測される色度から求めた等価膜厚の変動量を用いてきた。そこで、前節の仮説に基づき、等価膜厚の変動量の度数分布を求めることとする。図7.1は、第5章で用いた2種類の反射防止膜サンプルについて特徴量の度数分布を求めた結果である。同図(a)は各サンプルの観測画像、(b)は特徴量(等価膜厚)であり、それぞれ図5.7(a)、図5.9に示したものを再度掲載した。同図(c)は特徴量の度数分布を表す。ここでは等価膜厚の絶対値ではなく変動量が重要であるので、各等価膜厚分布の最小値との差を用いて度数分布を作成した。この結果をみると、良品の度数分布と比較して不良品のそれは低くなだらかな分布形状となっている。図(c)に破線で示した曲線は、良品サンプルの度数分布を包含するように設定したしきい値曲線を表しており、度数分布の一部がこのしきい値曲線を超えた場合にNGと判定する。これにより、色むらの程度に応じて許容される度数が変化するため、目視に近い判定結果が得られると期待できる。以後、本論文ではこの手法を特徴頻度法(Feature and Frequency Method; FF-method)と呼ぶこととする。

### 7.2.3 官能検査実験

特徴頻度法の実効性を確認するため、様々な色むらの CG を用いて、目視官能評価と特徴頻度法による評価との比較実験を行った。CG 作成においては、色むらの強度（等価膜厚の変動量）、色むら領域の幅、画面内に存在する色むらの本数を様々に変化させて、合計 28 枚の画像を用意した。

目視評価方法として比較評価法を採用し、次のような手順で各 CG の目視評価点を作成した。まず、CG に関する情報をもたない評価者に図 7.2 に示すような 2 枚 1 組の CG を見せ、どちらをむらが強いと感じるか、または同程度と感じるかを回答させる。強いむらと判断された CG には 2 を、同程度と判断された場合には両方の CG に 1 を加算する。図 7.2 には印刷上のむらと区別するためむら欠陥のある箇所を矢示しているが、目視評価者にはこの情報は与えない。全ての CG の組み合わせについて比較評価を行い、累積点をその CG の目視評価点とする。図 7.3 は比較評価の実施例を示す。この方法によると色むらの目視官能評価を容易に数値化することができる。この実験では、目視評価点が 20 以上のものが品質上の NG と判定された。

一方、特徴頻度法に使用する特徴量には CG 作成の基となる等価膜厚変動量を用いた。等価膜厚変動量の度数分布を作成し、しきい値曲線を超えるものを NG 判定とした。ここではしきい値曲線を実験的に求めた。その方法を図 7.4 (a) に示す。目視評価の結果良品と判定された CG の度数分布を重ねて描画し、これらを包含するような曲線とした。このしきい値曲線に基づいて各 CG に対して合否判定を行い、目視官能評価によって NG と判定された CG が特徴頻度法によっても同様に NG 判定されるかどうかを検証した。結果の例を図 7.5 に示す。同図 (a) ~ (c) は良品の CG に対する判定結果である。目視による比較評価点はいずれも 10 程度であり 28 枚の CG の中で最も低い（むらが目立たない）評価点となっている。度数分布をみるといずれもしきい値曲線以下となっているが、特徴量 1.3 ~ 1.5 付近の度数はそれぞれ異なっている。このことから、良品と判断されるものであっても、非常に弱いむらを多く含むものとそうでないものがあることが分かる。次に同図 (d) ~ (g) は、特徴量 1.3 ~ 1.5 付近には度数がみられないが、特徴量 1.7 以上の領域に度数が存在するために特徴頻度法で NG 判定となった例である。これらの目視官能評価値はいずれも 20 以上であり、目視でも NG 判定されていることが分かる。また、同図 (h) は使用した CG の中で目視による比較評価点が最も高かった（むらが強い）CG の度数分布を示す。これをみると、特徴量 1.3 以上の領域全体にわたって大きな度数がみられており、特徴頻度法でも NG 判定される。

以上の結果から、特徴頻度法によって目視官能検査とよく一致する合否判定が可能であることが確認された。

### 7.2.4 しきい値曲線の設定方法

本実験では良品サンプルの観測画像から得られる度数分布からしきい値曲

線を実験的に求めた。しかし、特徴頻度法の汎用化のためには、むら欠陥の特徴量が従う分布関数を用いて簡便にしきい値曲線を設定することが望ましい。ここでは度数分布の作成についての考え方を説明し、分布関数を用いたしきい値曲線の設定について述べる。

等価膜厚の変動量を求める際に、平均膜厚からの偏差ではなく各検査領域内の最小値との差を用いた。これは、人間が感じるむらの強度には負値は存在しないと考えたためである。そこで、正值のみを扱う分布関数の1つであるWeibull分布を用いた例を示す。Weibull分布は2つの係数  $m$  (形状母数) および (尺度母数) を用いて次式で表される。

$$f(x) = \frac{mx^{m-1}}{\alpha} \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (7.1)$$

図 7.4 (b) は、 $m=3$  とし、 $\alpha$  を変化させた場合の分布形状の変化を示している。この図からも分かるように、尺度母数  $\alpha$  が大きくなるにしたがって分布形状が低くなだらかになる。そこで  $\alpha$  に上限値を定め、 $\alpha$  が上限値以下のときの分布形状を全て包含するようなしきい値曲線を定めることができる。Weibull 分布の形状は色むら欠陥の特徴量の分布形状とよく類似していることから、むら欠陥の記述に適用できる可能性は高いと考えられる。

実測データによらずしきい値曲線を定めるためには、実際の品質管理基準と Weibull 分布の尺度母数  $\alpha$  との関係性を明確に記述することが必要であるが、現段階ではこれにはいたっていない。このことは今後の課題である。

### 7.3 格子構造フィルムの濃淡むら欠陥検査

前節で提案した特徴頻度法の汎用性を確認するため、ここでは本手法を発生原因の異なるむら欠陥の評価に適用する。検査対象にはこれまでとは異なるディスプレイ用部材である「格子構造フィルム」を用いる。

#### 7.3.1 格子構造フィルムとむら欠陥検査の背景

格子構造フィルムおよびそれに発生するむら欠陥を図 7.6 (a) に示す。この部材は透明フィルムに等間隔の格子が配置されたものである。格子の寸法は、例えば線幅  $20 \mu\text{m}$ 、間隔  $195 \mu\text{m}$  程度である。このような部材では、見る人が微細格子を意識することはほとんどない。外観上の欠陥は、面全体を眺めたときある領域が周囲と異なる明るさに見える、といった性質のものである。図 7.6 (b) は格子形状の不良をモデルで表したものである。濃淡むらの要因は線幅の局所的な変動であり、図の例では中央の2本の縦線が太くなっている。このような箇所が集中すると、その領域が周囲よりも暗く見えるため濃淡むらとなる。しかし、むら検査のために格子の線幅を全て計測することは、事実上不可能である。それは、広大な製品面積に対して格子は微細であるため、すべての

線幅を計測することは非常に高速かつ高解像度での検査が必要となるためである。また、個々の格子を微視的に計測することと、面全体を眺めたときに知覚されるむら欠陥の評価とは必ずしも結びつかない。

本研究では、これらの課題を解決し得る手法として、フィルムを透過したレーザー光の回折パターンを利用した外観検査方法を確立した。本手法によると、レーザーが照射されている領域での傾向的な格子形状を画像解析により計測することができる。解析方法は極めてシンプルであり高速検査に適している。

ところで、レーザー光の回折を検査・計測に応用する研究はこれまでも多く報告されている<sup>4)-11)</sup>。例えば、回折パターンのスポットの強度比などを基にICマスク等の線幅<sup>4)</sup>や極微細格子の形状<sup>5)</sup>を計測する手法、正常な回折パターンを遮蔽する空間フィルタと組合せた欠陥検出方法<sup>6)-11)</sup>などが報告されている。これらの手法は極微細構造を計測することができる反面、非常に精密な光学系が必要である。そのため、専門技術をもたない一般ユーザーによる利用、あるいは振動の多い製造現場での実現は容易ではない。また、官能検査の定量化に回折パターンを利用しようとする試みはなされていない。

これに対し本手法は、回折パターンに現れるむら欠陥の特徴のみを必要十分な精度で計測することにより、官能検査を行おうとする試みである。ここではまず格子構造フィルムの形状不良に起因する回折パターンの特徴を明らかにする。次に、簡単な光学系と画像処理とを組合せた欠陥検出原理およびむら評価方法を述べる。また、実際のフィルムに適用した結果を紹介する。

### 7.3.2 欠陥検査における課題

本研究で対象とする欠陥の検査には次の3つの課題がある。第1に微細構造に対して検査面積が広大であるため、通常の画像処理法では高い解像度と検査速度が要求される。それは設備のコストに直結する問題である。第2に、欠陥の主要因である線幅不良はその1つひとつをみると正常部との差が非常に小さい。図7.6(b)は欠陥モデルを誇張描画しているが、実際の観測画像からは不良部を発見することは容易ではない。第3に、線幅不良はすべて欠陥になるわけではなく、ある領域に集中したときに欠陥と認識される。したがって、線幅不良の程度を表し、それが許容されるむらかどうかを人間の主観と同様に判定する尺度が必要である。

## 7.4 回折パターンを用いた濃淡むら検査の基礎理論

本手法の原理となる回折理論を簡単に説明し、格子形状不良による回折パターンを理論的に求め、検査原理を説明する。

### 7.4.1 フーリエ光学<sup>12),13)</sup>

ある既知の電界分布をもつレーザー光が開口面を通過した後、衝立面で観測される回折パターンは開口面における電界分布のフーリエ変換で与えられること

が知られている<sup>12),13)</sup>。図 7.7 は開口面と衝立面との配置を示す。光軸を  $z$  軸にとり、 $z=0$  の面に開口面を配置する。本研究の場合、開口面とは被検査フィルムを指す。開口面における電界分布を  $g(x_0, y_0)$  とする。一般に、 $g(x_0, y_0)$  は複素関数である。このとき、 $z=z_i$  の面に配置された衝立面における電界分布  $u(x_i, y_i)$  は次式で与えられる。

$$u(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0) \frac{e^{jkr}}{r} \cdot dx_0 dy_0 \quad (7.2)$$

ここで、

$$r = \sqrt{z_i^2 + (x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (7.3)$$

である。近軸近似 ( $\{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2\} / z_i^2 \ll 1$ ) のもとで式 (7.3) を変形すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} r &= z_i \sqrt{1 + \frac{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}{z_i^2}} \\ &= z_i + \frac{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}{2z_i} - \frac{\{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2\}^2}{8z_i^3} \dots \\ &= z_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} - \frac{x_i x_0 + y_i y_0}{z_i} + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_i} - \frac{\{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2\}^2}{8z_i^3} \dots \end{aligned} \quad (7.4)$$

式 (7.4) の第 4 項まで採用しなければならない  $z_i$  の領域を近方領域 (フレネル領域)、第 3 項までの近似でよい領域を遠方領域 (フラウンホーファ領域) と呼ぶ。通常、第 4 項の値が  $\lambda/4$  となる距離  $z_i$  より遠い領域をフラウンホーファ領域とする。例えば、1 辺の長さが  $D$  の正方形開口面の場合、

$$z_i = \frac{D^2}{\lambda} \quad (7.5)$$

となる  $z_i$  以遠がフラウンホーファ領域とされる。

近軸近似およびフラウンホーファ近似の下で式 (7.2) を変形することにより、次式を得る。

$$\begin{aligned} u(x_i, y_i) &= \frac{1}{j\lambda z_i} e^{jk \left[ z_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} \right]} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0) \cdot e^{-j2\pi \left( \frac{x_i x_0}{\lambda z_i} + \frac{y_i y_0}{\lambda z_i} \right)} \cdot dx_0 dy_0 \\ &= \frac{1}{j\lambda z_i} e^{jk \left[ z_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} \right]} \{ G(f_x, f_y) \}_{f_x = \frac{x_i}{\lambda z_i}, f_y = \frac{y_i}{\lambda z_i}} \end{aligned} \quad (7.6)$$

ここで、 $G(f_x, f_y)$  は  $g(x_0, y_0)$  のフーリエ変換を表す。 $u(x_i, y_i)$  も複素関数で与えられる。

CCD カメラで観測できるのはパワー分布であるので、衝立面におけるパワー分布を次式により求める。

$$P(x_i, y_i) = |G(x_i, y_i)|^2 \quad (7.7)$$

ここでは振幅の絶対値は重要ではないため係数を省略した。これらの式から、開口面形状と開口面におけるレーザの電界分布が既知であれば、衝立面で観測される回折パターンを計算することができる。

#### 7.4.2 格子構造フィルムによる回折パターン

式(7.6), (7.7)を用いて、格子構造フィルムによる回折パターンを求める。本節では、簡単のため1次元で計算する。格子構造フィルムは、図7.8(b)に示すように、1次元では一定周期で配置されたスリット列として表される。開口面における電界分布は次のように表すことができる。

$$g(x_0) = \left\{ 1.0 - \frac{1}{b} \left[ \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{b}\right) \right] \right\} \text{rect}\left(\frac{x}{c}\right) \quad (7.8)$$

ここで、 $a$  は格子の線幅、 $b$  は格子の繰り返し周期、 $c$  は開口幅をそれぞれ表す。記号 $*$ はたたみ込みを表す。また、 $\text{rect}$ 関数は矩形波を、 $\text{comb}$ 関数は周期的に存在するデルタ関数列をそれぞれ意味しており、次のように定義される<sup>9)</sup>。

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & |x| = \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7.9)$$

$$\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-n) \quad (7.10)$$

開口面における電界分布を、簡単のため等位相かつ一様振幅とすると、式(7.8)はそのまま電界分布を表す式となり、これのフーリエ変換によって回折パターンは次式で求められる。

$$G(f_x) = c \text{sinc}(cf_x) - ac [\text{sinc}(af_x) \text{comb}(bf_x)] * \text{sinc}(cf_x) \quad (7.11)$$

式(7.11)から得られるパワー分布は図7.9のようになる。回折パターンは一定周期のスポット列となり、各スポットの強度が  $\text{sinc}^2(af_x)$  を包絡線とするように変化して観測される。

#### 7.4.3 欠陥検査原理

式(7.11)をみると、スポット強度の包絡線は格子の線幅  $a$  のみによって決まり、スポット間隔は格子間隔  $b$  のみによって決まることが分かる。これを利用して、回折パターンの各スポットの強度に基づいて格子の線幅不良を、スポッ

ト間隔に基づいて格子間隔不良を、それぞれ独立に検査することが可能である。格子構造フィルムにおいては、その製法上、格子間隔が変動することは稀であるので、本論文では以後、線幅の変動に起因するむら欠陥のみを取扱う。

## 7.5 シミュレーション

フィルムの格子形状が回折パターンに与える影響を評価し、本手法による欠陥検査の可能性を確認するため、計算機によるシミュレーションを行った。

### 7.5.1 光学配置とモデル

シミュレーションに用いた光学系は図 7.7 と同じである。光源は後述の実験にあわせて波長  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  の He-Ne レーザを想定した。開口面における電界分布は、スポットサイズ  $w = 0.4 \text{ mm}$  のガウス分布とし、位相は等位相とした（実際にはビームウェストは共振器内にあるので開口面では球面波に近くなり等位相ではないが、このように近似しても実験値との大きな差は生じなかった）。このとき電界分布は次式で表される。

$$g(x_0, y_0) = \exp\left[-\frac{x_0^2 + y_0^2}{w^2}\right] \quad (7.12)$$

開口面には、線幅  $20 \mu\text{m}$ 、周期  $195 \mu\text{m}$  の縦横とも等間隔の格子モデルを使用した。開口面の計算範囲を、 $|x| < d/2$ 、 $|y| < d/2$ 、 $d = 5.12 \text{ mm}$  の矩形領域とし、計算機上で  $N \times N$ 、 $N = 2048$  の 2 次元データとした。図 7.10 はこのモデルによる電界分布を疑似画像表示したものである。また、開口面から衝立面までの距離は  $z_i = 500 \text{ mm}$  とした。 $z_i$  は、フラウンホーファ領域に達するのに十分な距離であればよく、ここでは実験装置の構造から定めた。開口面は格子構造をしているが、これは格子間隔と同じ大きさの開口面が多数並んでいることと等価である。そこで、式 (7.5) の  $D$  に格子間隔を代入することにより、フレネル領域とフラウンホーファ領域の境界は約  $100 \text{ mm}$  の距離であることが分かる。

開口面における電界分布を FFT によってフーリエ変換して得られる 2 次元の複素数データをパワーに変換することにより、回折パターンの CG を作成した。電界分布には、図 7.10 に示した均一な格子の他に、様々な線幅不良を含む格子モデルを用いた。

### 7.5.2 シミュレーション結果

#### (1) 均一な格子モデルによる回折パターン

均一な格子モデルによる回折パターンのシミュレーション結果を図 7.11 (a) に示す。これをみると、一定周期のスポットが現れており、その強度が別の周期で強弱を繰り返していることが分かる。同図 (b) は比較のため同一条件下で実験を

行った結果である。また、同図 (c) は (a),(b) の  $x_i$  軸上でのパワー分布を表している。これらを見ると、両者はスポットの観測される位置およびスポットの包絡線の形状において良く一致していることが分かる。実験値には、実際のレーザが開口面で等位相ではないことやスクリーンでの散乱などから、スポットとスポットの間に若干のパワーが観測されている。しかし、本手法では主にスポットの強度のみに注目するため、欠陥検査への影響は小さい。

### (2) 線幅不良を含む格子モデルによる回折パターン

次に、局所的な線幅不良を含む格子モデルを用いてシミュレーションを行い、回折パターンの変化を評価した。図 7.12 に結果の一例を示す。この図ではスポット強度の変化を見やすくするため包絡線のみを描画している。包絡線は各スポットのピーク値を基に最小自乗法により  $\text{sinc}^2$  関数近似により求めた。同図 (a) はレーザビームの中心を境界として左半分の線幅が  $25 \mu\text{m}$  で右半分が  $20 \mu\text{m}$  である格子、(b) は線幅が全て  $20 \mu\text{m}$  の均一な格子、(c) は左半分の線幅が  $15 \mu\text{m}$  で右半分が  $20 \mu\text{m}$  である格子についてのシミュレーション結果である。これらを見ると線幅が大きい場合には包絡線の周期が小さく、逆に線幅が小さい場合には周期が大きくなっていることが分かる。このことから、各スポットの強度を計測することによって、レーザビームが照射されている領域の線幅の傾向を評価することが可能である。

### (3) 線間隔不良を含む格子モデルによる回折パターン

次に、間隔不良を含むモデルについて回折パターンを求めた。格子モデルとして、開口面の中心付近に 1 箇所だけ間隔が異常値  $175 \mu\text{m}$  となるモデルを使用した。シミュレーションの結果を図 7.13 に示す。これを見ると等間隔のスポット列以外の部分にパワーが現れている。

## 7.6 実験

### 7.6.1 実験装置

実験装置の構成を図 7.14 に示す。光源は He-Ne レーザを使用した。ビーム径は  $w = 0.4 \text{ mm}$  となるよう、エキスパンダを使って調整した。これは、目視で認識されるむら欠陥の最小幅に合わせた値である。格子構造フィルムと投影スクリーンをシミュレーションと同じ位置に配置した。格子構造フィルムを 1 軸ステージ上に配置し、 $x_0$  方向に順次移動することによりレーザビームの照射位置を走査できるようにした。CCD エリアセンサを用いて投影パターンを観測し、画像をパーソナルコンピュータへ取り込み、解析した。

### 7.6.2 実験結果

実際に様々な形状不良をもつフィルムを用いて回折パターンを観測した結果

を図 7.15 に示す .各画像は回折パターンの第 1 サイドローブ ( 光軸位置でのスポットを第 0 次として , 第 9 ~ 18 次スポット ) 付近を撮影したものである . 同図 (a) は正常部で観測されたパターンである . 各スポットに付した番号は次数を表す . 同図 (b) は正常部に比して平均線幅が広い箇所での観測画像である . 正常部での画像と比較すると , 高い輝度を示すスポットの次数が光軸方向 ( 画像では左方向 ) ヘシフトしていることが分かる . このことは 7.4.2 項のシミュレーション結果と一致し , 線幅の違いが回折パターンのスポット強度に現れることが確認できる . 次に図 7.16 は格子構造フィルムを  $x_0$  方向に 1 mm ずつ移動させてレーザーの照射位置を変えながら回折パターンを観測した例である . 同一のフィルム内でもレーザーの照射位置によって回折パターンが異なっている . このことから , 各位置で線幅が異なることが分かる .

## 7.7 むら欠陥の官能検査への応用

回折パターンの各スポット強度に基づいてレーザー照射位置でのおおよその線幅を計測することができることが分かった . しかし , 実際には線幅不良が単体で欠陥になることは少なく , ある領域に偏在することによって濃淡むらとして知覚される . そのため , 単一の画像から線幅不良を抽出するのではなく , 回折パターンを連続的に観測し , その特徴量の変化に基づいて欠陥を認識することを考える必要がある .

### 7.7.1 線幅不良を表す特徴量の定義

線幅を表す特徴量をより少ない計算量にて表すため , ここでは , 第 1 サイドローブに属するスポット群の強度の重心を用いることとする . 例えば図 7.15 の例では , 正常部 (a) での強度重心は 13.5 次の位置にあり , (b) の線幅異常部では 13.1 次の位置にある . この重心位置の値は , それぞれの計測位置での線幅の傾向を表す量であると考えられる . ここで , 重心位置を画像上の座標ではなくスポットの次数で表すこととした . これにより , 例えば機械的な振動等により撮影位置がずれた場合でもその影響を受けずに重心の計測が可能である .

### 7.7.2 むら欠陥の評価方法

実際に様々な強さのむらが存在するフィルムを用いて , 回折パターンのスポット群の重心を求めた結果を図 7.17 に示す . 図の横軸はレーザーの照射位置を表し , ここでは幅 300 mm の領域にわたってフィルムを移動させてレーザー照射位置を変化させた . サンプルのむらの程度は , 目視検査により , (a) 劣悪 , (b) 悪い , (c) やや良い ( 許容限度 ) , (d) 良品と判定された 4 種類を用意した .

むら欠陥は線幅の異なる領域が隣接することにより濃淡差として知覚されるものであるため , 単位長あたりの重心位置の変化が大きい箇所ほど強いむらが存在すると考えられる . 図 7.17 の結果をみると , むらの強いサンプルほど重心

位置が大きくばらついていることが分かる。

この重心位置の変化量を，ここではレーザー照射位置が 10 mm 移動する間の最大値 - 最小値で表すこととした。この単位長は，実際に見られるむら欠陥の平均的な出現周期に合わせた値であり，単位長あたりの変化量はむら欠陥の程度を表す特徴量であると考えられる。上記 4 種のサンプルについて重心位置の変化量を求めた結果を図 7.18 に示す。これをみると，むらが強いサンプルほど，変化量の値が大きい箇所が目立つ。個々のむらを単独で評価して合否判定を行うのであれば，このグラフにしきい値を設定してこれを超える箇所を欠陥とするという検査方法が可能である。

### 7.7.3 特徴頻度法による合否判定

前節までで計測された特徴量を基に，特徴頻度法により各サンプルの合否判定を行う。図 7.19 は，図 7.18 で示した重心の変化量の度数分布を示す。これをみると，良品サンプルでは度数分布は比較的变化量の小さい領域に集中しているが，むらが強いサンプルほど大きな変化量に対する度数が増加している。これらの度数分布に対してしきい値曲線を設定し，判定を行った。しきい値曲線の例を図 7.19 に点線で示している。この図をみると，目視検査で不合格とされるフィルム (a), (b) はいずれもしきい値曲線を超過しており，正しい合否判定ができていたことが分かる。

## 7.8 結言

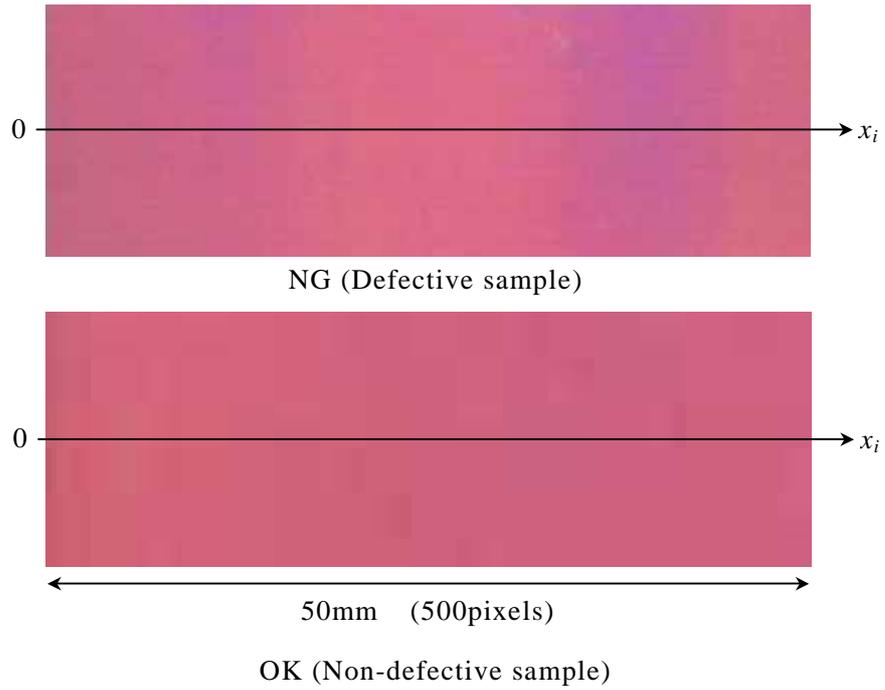
ディスプレイの部材として用いられる反射防止膜および格子構造フィルムに発生するむら欠陥について，以下の検討を行った。

- (1) 欠陥の特徴量の度数分布に基づいて目視官能検査と同等の合否判定を行う手法を確立した。反射防止膜および格子構造フィルムの各欠陥に適用し，効果を検証した。
- (2) 格子構造フィルムのむら欠陥発生要因が格子の線幅の不均一によることに着目し，レーザーの回折パターンを利用した欠陥検査方法を提案した。
- (3) 各種欠陥モデルを使用して回折パターンをシミュレーションにより求めた。その結果，欠陥の存在により発生するパターンの変化を明らかにした。
- (4) 実際の欠陥サンプルに本手法を適用し，正常品によるパターンとの識別が可能であることを確認した。

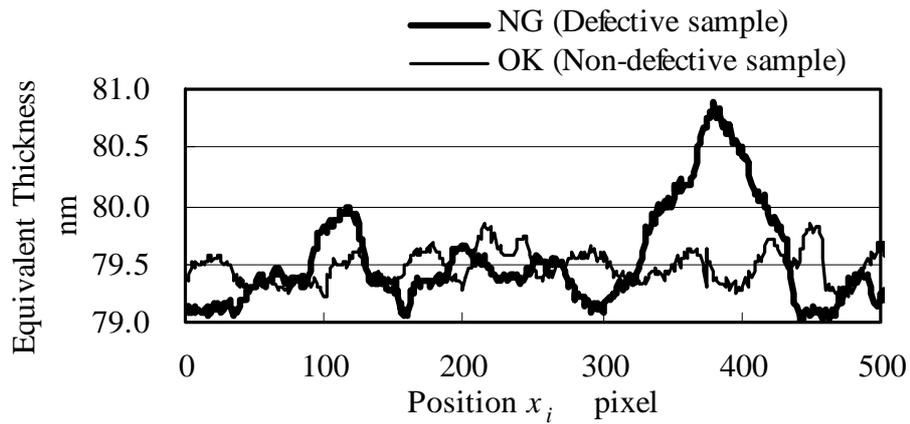
本手法では，むらを表す特徴量とその頻度というわずかな情報に集約したにも関わらず目視官能検査と良く一致する合否判定基準を確立することができた。また，本論文中では取扱う特徴量を回折パターンのスポットの重心あるいは等価膜厚としたが，これに限るものではなく一般的な濃淡差や色度差を特徴量としてもよい。そのため，本手法はむら検査全般に適用できる可能性が高いと考えられる。

## 参 考 文 献

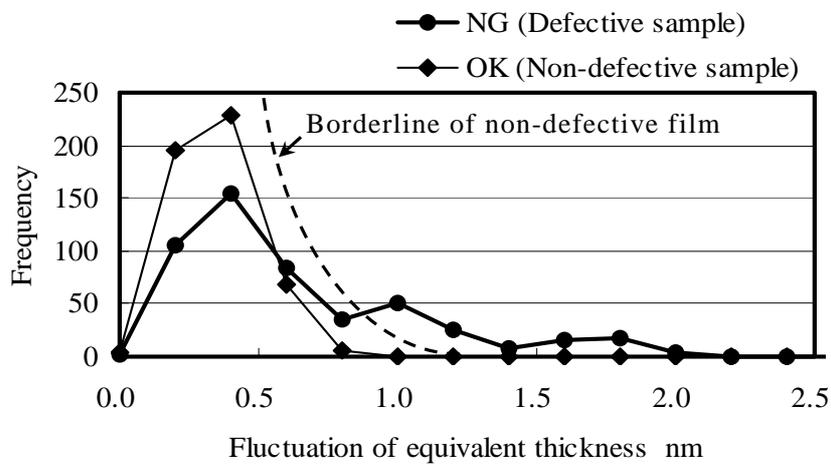
- [1] たとえば, 松田隆夫: 知覚心理学の基礎, 培風館, (2000) 23-101.
- [2] F.C.Volkman: Human visual suppression, *Vision Research*, **26**, 9, (1986) 1401-1416.
- [3] B.L.Zuber: Saccadic suppression, Quarterly progress report, I.T., **75**, (1964) 190-191.
- [4] H.P.Kleinknecht and H.Meier: Linewidth measurement on IC masks and wafers by grating test patterns, *Appl. Opt.* **19**, 4, (1980) 525-533.
- [5] 高谷裕浩, 三好隆志, 外山潔, 斎藤勝政: 回折パターンによる極微細溝形状の測定評価に関する研究, *精密工学会誌*, **57**, 11, (1991) 2041-2047.
- [6] L.S.Watkins: Inspection of Integrated Circuit Photomasks with Intensity Spatial Filters, *Proc. IEEE*, **57**, 9, (1969) 1634-1639.
- [7] P.M.Will and K.S.Pennington: Filtering of Defects in Integrated Circuits with Orientation Independence, *Appl. Opt.*, **10**, 9, (1971) 2097-2100.
- [8] A.Iwamoto and H.Sekizawa: Defect-type discrimination optical system, *Appl. Opt.*, **20**, 9, (1981) 1724-1726.
- [9] 深谷次助, 佐々木彰: スリット開口の Fraunhofer 回折による旋削面粗さ測定, *精密機械*, **51**, 4, (1985) 173-178.
- [10] C.Ciamberlini, F.Francini, G.Longobardi, P.Sansoni and B.Tiribilli: Defect detection in textured materials by optical filtering with structured detectors and self-adaptable masks, *Opt. Eng.*, **35**, 3, (1996) 838-844.
- [11] Seung-Woo Kim, Sang-Yoon Lee and Dong-Seon Yoon: Rapid pattern inspection of shadow masks by machine vision integrated with Fourier optics, *Opt. Eng.*, **36**, 12, (1997) 3309-3311.
- [12] J.W.Goodman: Introduction to Fourier Optics Second Edition, McGRAW-HILL, (1996).
- [13] 飯塚啓吾: 光工学, 共立出版, (1977) 29-62.



(a) Observed images of anti-reflection coating samples

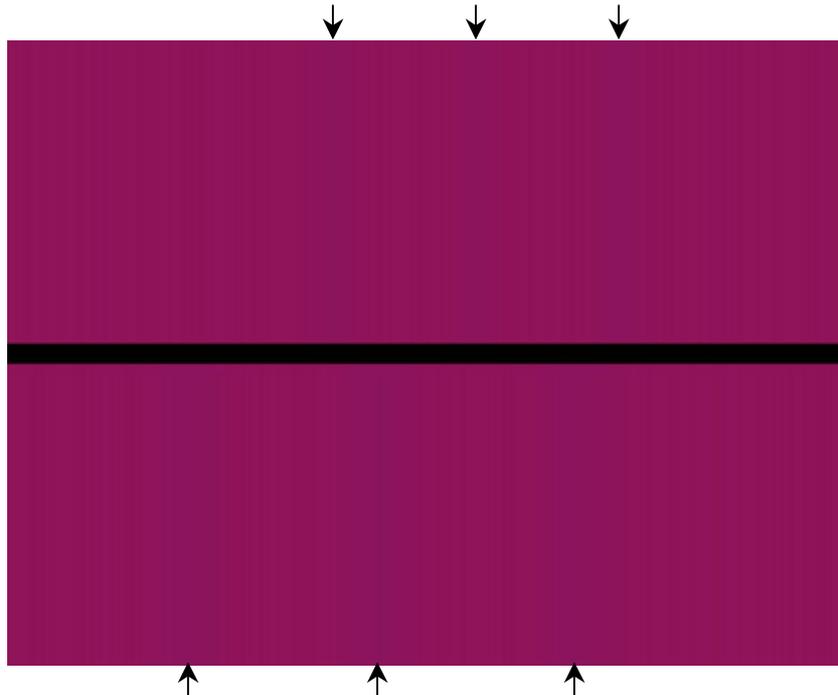


(b) Comparison of equivalent thickness between defective and non-defective sample



(b) Comparison of frequency distribution of equivalent thickness

**Fig.7.1** Feature and Frequency Method(FF-method)



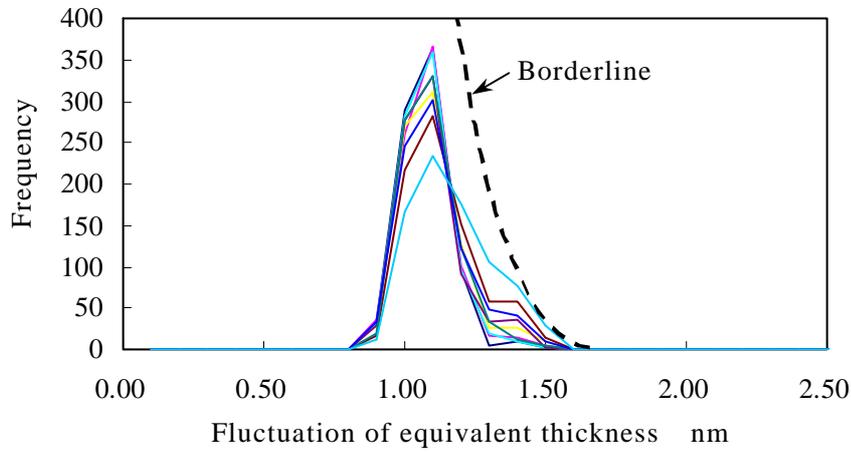
**Fig.7.2** An example of a pair of CG images

[Comparative evaluation sheet]

Date : 2002.4.24  
 Object : Color shading defect (CG)  
 Operator : Chama

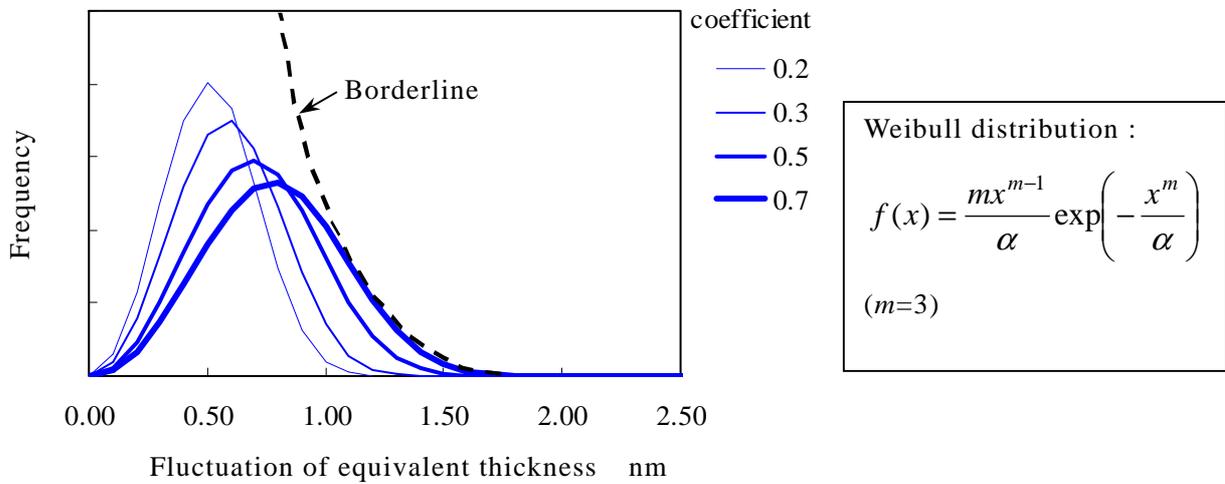
CG #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Total (Grade of defect)	
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	10	OK
2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	2	12	OK
3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	12	OK
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	10	OK	
5	1	2	2	2	0	1	1	1	1	0	1	2	2	1	0	1	0	0	0	1	1	2	0	1	0	0	0	23	NG	
6	2	2	2	2	1	0	1	1	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	25	NG	
7	2	2	2	2	1	1	0	1	1	0	0	2	1	1	1	1	0	1	0	1	2	1	1	1	0	0	0	25	NG	
8	2	2	2	2	1	1	1	0	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	29	NG	
9	2	2	2	2	1	2	1	1	0	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	2	1	2	0	0	34	NG	
10	2	2	2	2	2	2	1	1	0	2	2	0	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	0	0	38	NG	
11	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	12	OK	
12	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	11	OK	
13	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	11	OK	
14	2	2	1	2	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	23	NG	
15	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	0	1	1	0	0	2	1	2	1	1	0	1	1	0	32	NG	
16	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	1	0	0	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	32	NG	
17	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	0	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	0	45	NG	
18	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	0	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	44	NG	
19	0	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	0	2	2	2	2	1	1	1	1	1	43	NG	
20	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	12	OK	
21	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	13	OK	
22	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	10	OK	
23	2	2	1	2	2	1	1	1	0	0	2	1	2	1	1	1	0	0	0	2	1	2	0	1	0	1	0	27	NG	
24	2	2	2	2	1	2	1	2	1	0	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	0	1	0	0	0	36	NG	
25	2	2	2	1	2	2	2	2	0	1	2	2	2	2	2	1	0	1	1	2	2	2	2	1	0	0	1	39	NG	
26	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	0	1	46	NG	
27	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	0	2	2	2	1	1	0	45	NG	
28	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	49	NG	

**Fig.7.3** An example of comparative evaluation



(a) Experimental method

Plots show the histograms involving OK samples, which are scored less than 20 points.



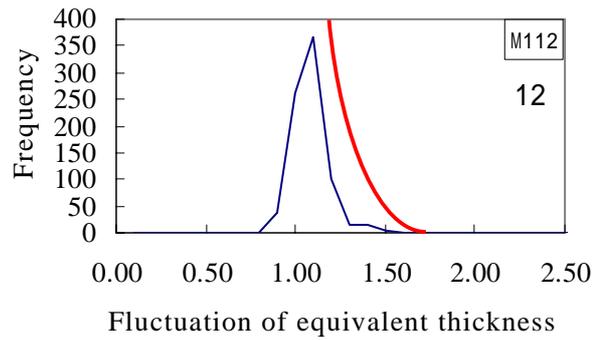
(b) Method by distribution functions

Plots by solid lines show the Weibull distribution curves with different coefficient . The borderline is configured to cover the distribution curve involving the limit sample.

**Fig.7.4** Configuration of the inspection borderline



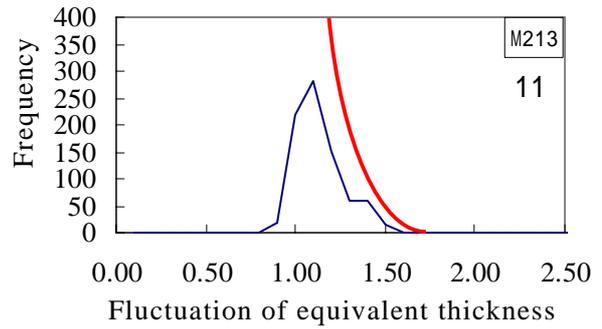
Visual inspection point : 12  
 FF method inspection : OK



(a) Sample CG #3



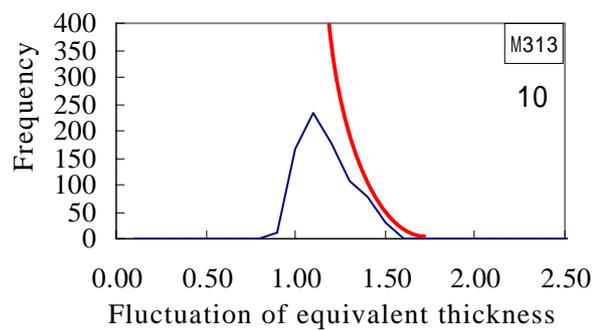
Visual inspection point : 11  
 FF method inspection : OK



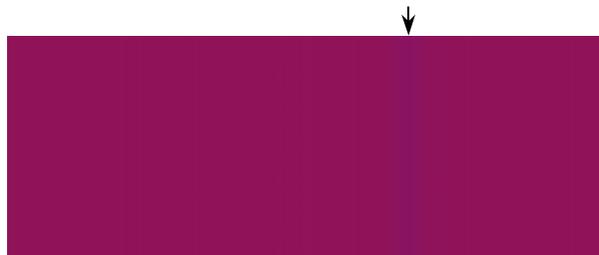
(b) Sample CG #13



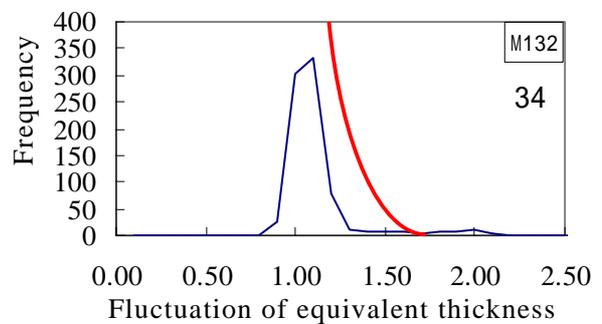
Visual inspection point : 10  
 FF method inspection : OK



(c) Sample CG #22

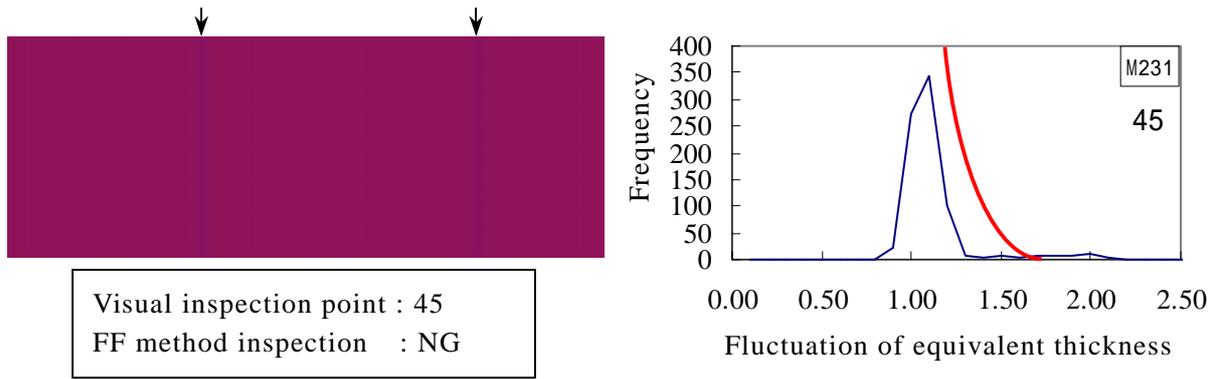


Visual inspection point : 34  
 FF method inspection : NG

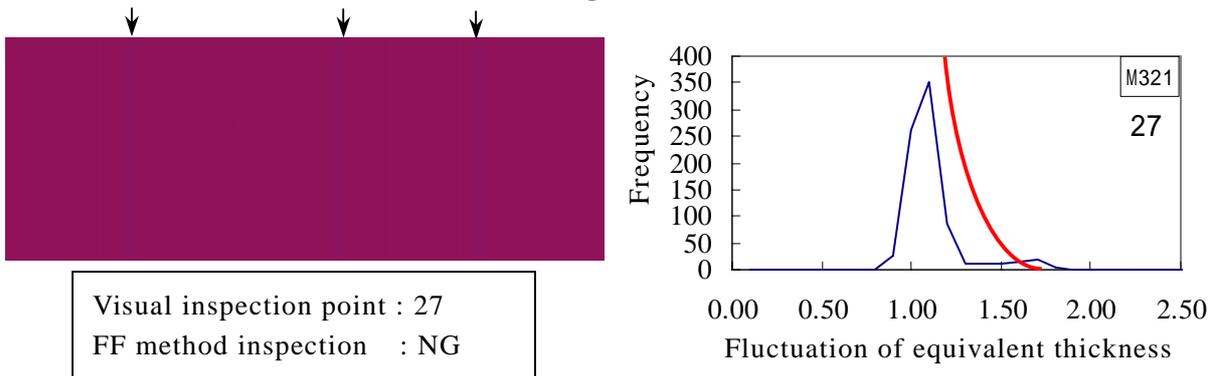


(d) Sample CG #9

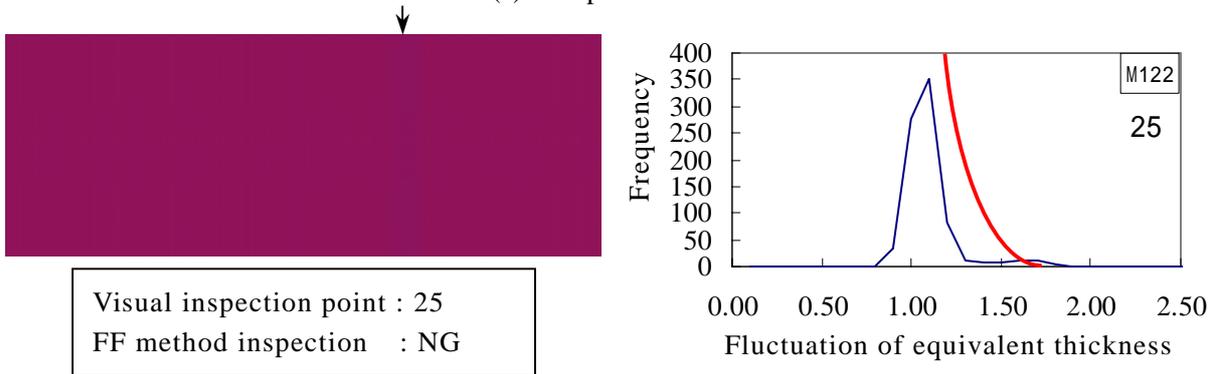
**Fig.7.5** Comparison between FF-method and visual inspection by human operator  
 Defects are be indicated by arrows.



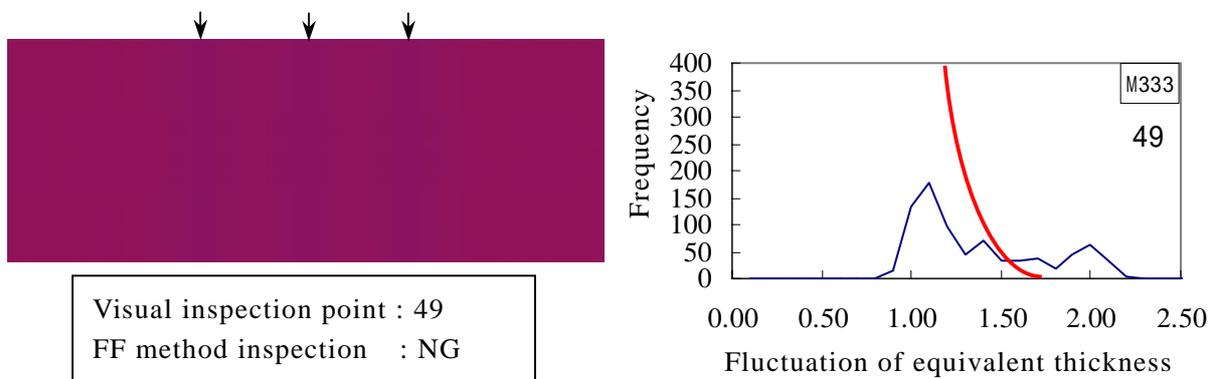
(e) Sample CG #17



(f) Sample CG #23

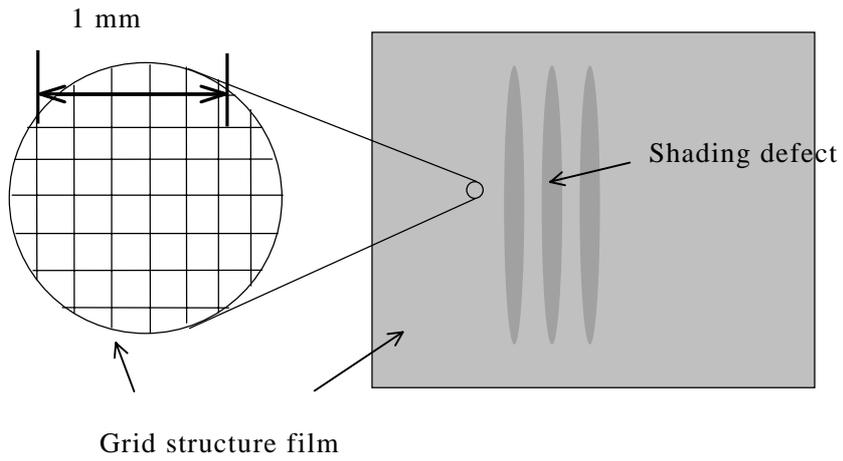


(g) Sample CG #6

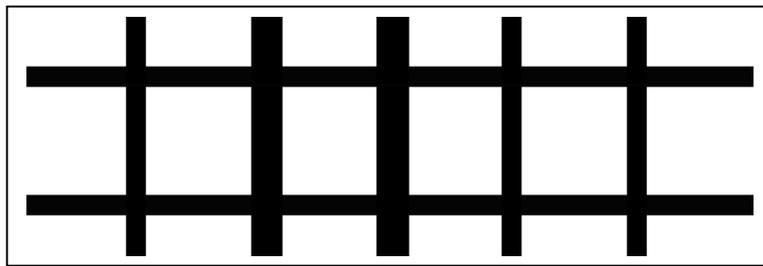


(h) Sample CG #28

**Fig.7.5** Comparison between FF-method and visual inspection by human operator (continued)

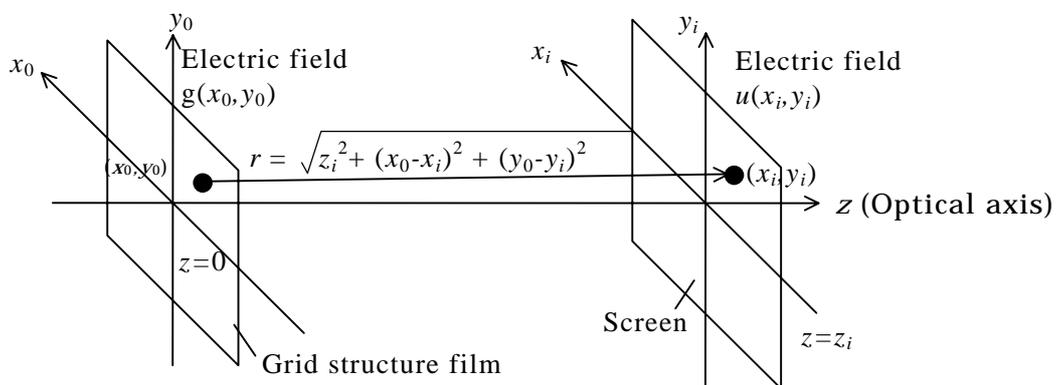


(a) Configuration of grid structure film and shading defect

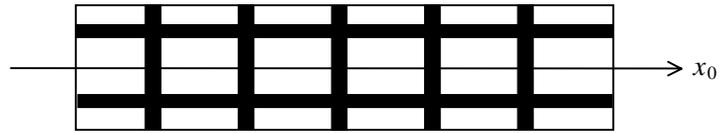


(b) Defect model

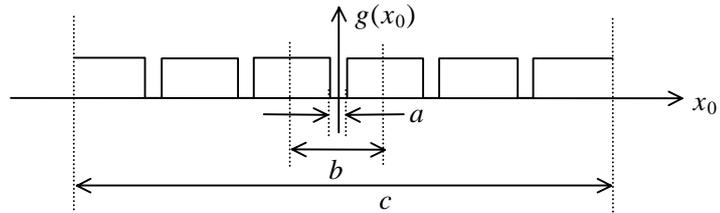
**Fig.7.6** Grid structure film and shading defect



**Fig.7.7** Framework of diffraction geometry

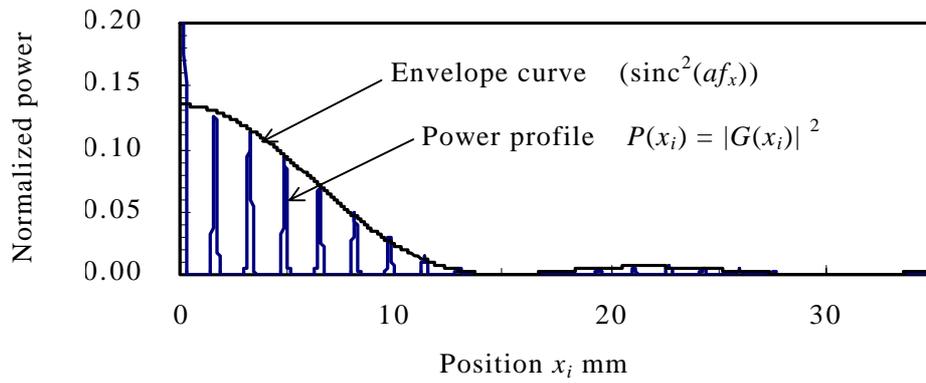


(a) Configuration of grid structure

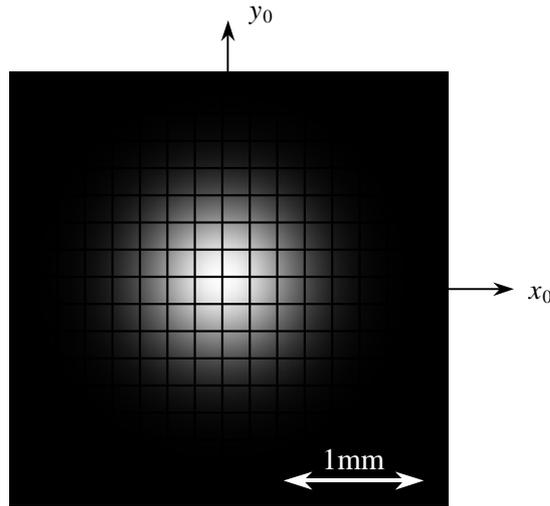


(b) Intensity profile

**Fig.7.8** Electric field on grid structure



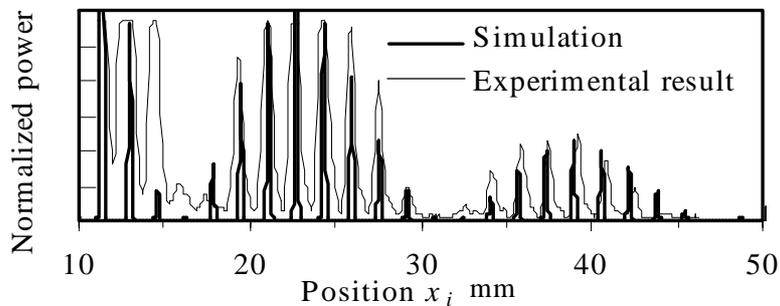
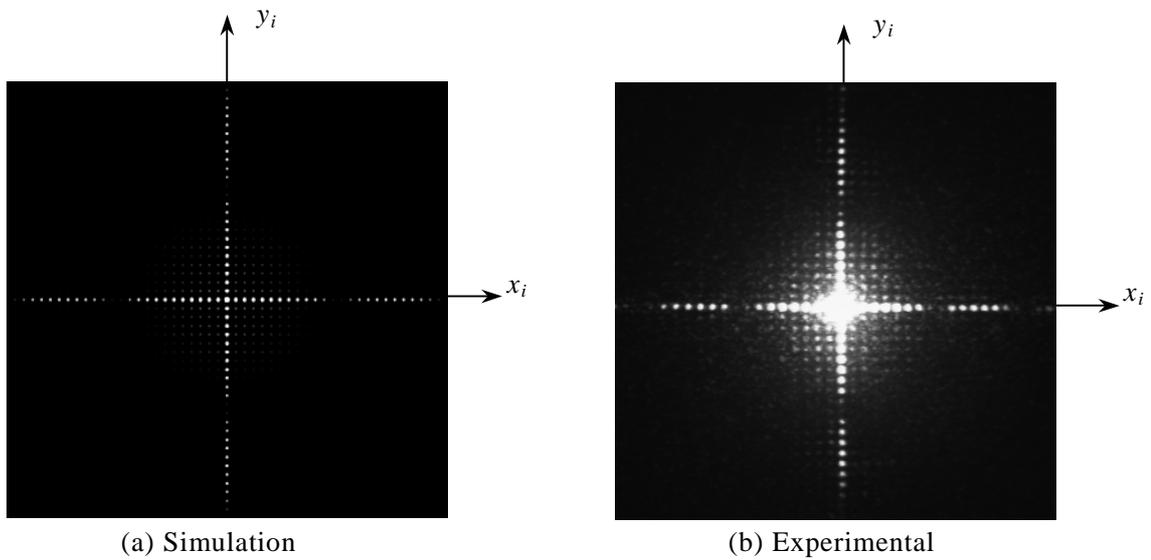
**Fig.7.9** Power profile of Fourier transform of electric field on grid structure



**Fig.7.10** An example model of electric field on grid structure film (computer-generated image)

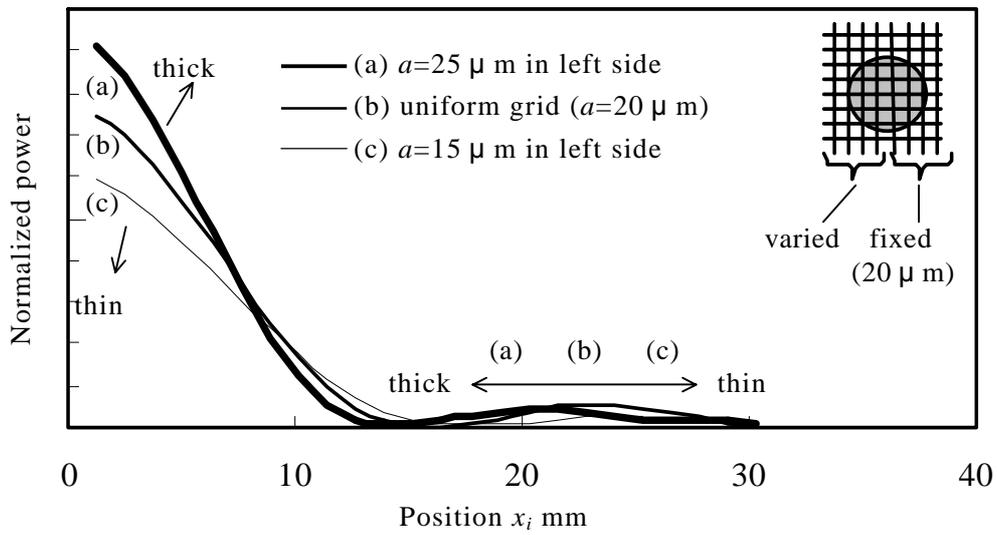
Beam characteristic : Gaussian beam (width  $w = 0.4$  mm, in phase)

Grid structure : line width  $a = 20 \mu\text{m}$  , grid interval  $b = 195 \mu\text{m}$

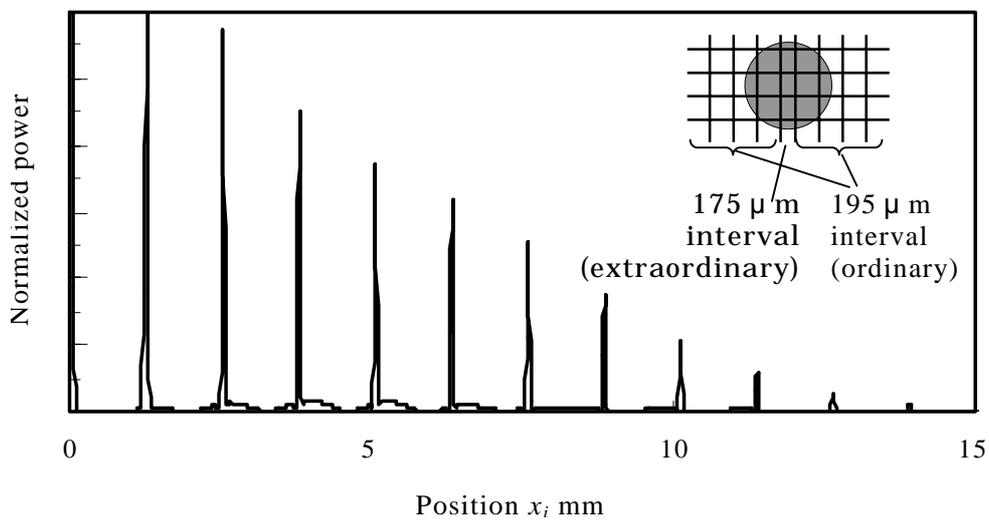


(c) Profiles of diffraction patterns

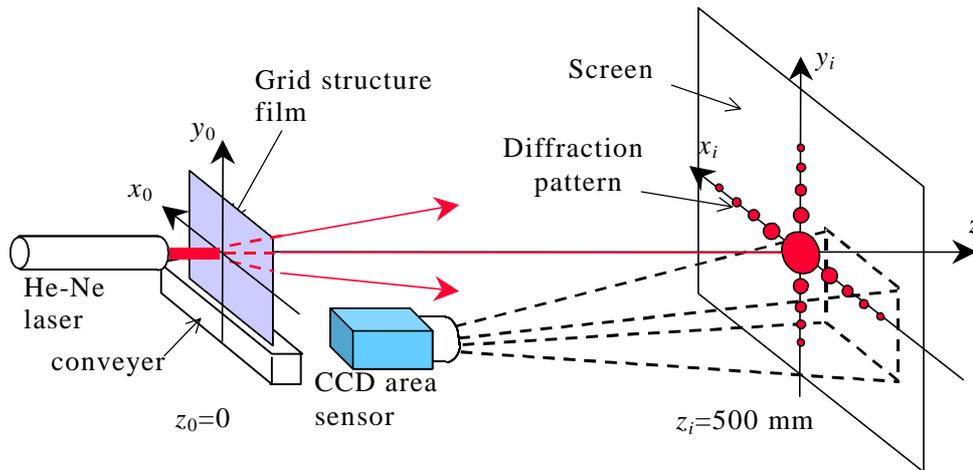
**Fig.7.11** Comparisons between simulation and experimental result ( Simulated image (a) is generated by Fourier transform of electric field model in Fig.7.6. )



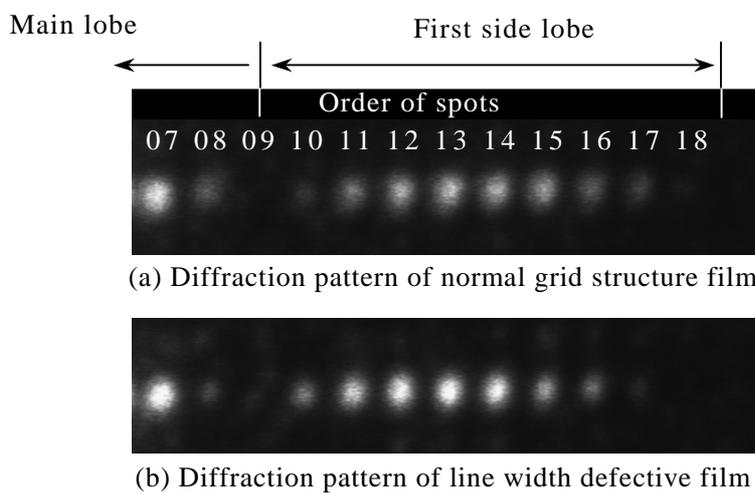
**Fig.7.12** Variations of envelop curve of diffraction pattern with the unevenness of grid line width



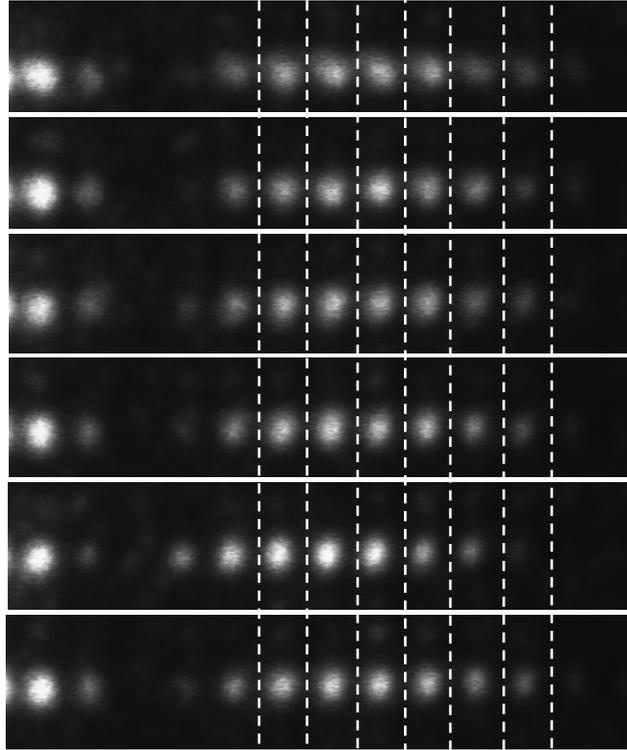
**Fig.7.13** Diffraction pattern with the grid interval unevenness  
Extraordinat spots are observed between ordinary.



**Fig.7.14** Configuration of experimental system

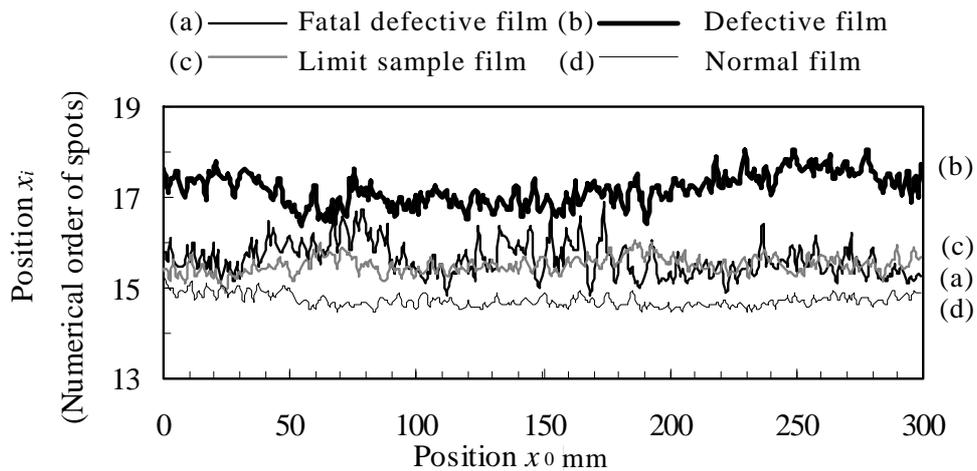


**Fig.7.15** Variations of diffraction pattern with the existence of grid structure defects



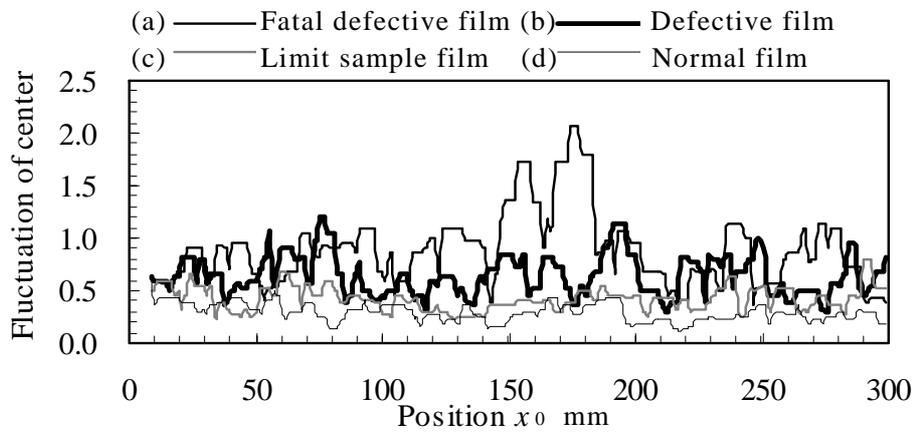
**Fig.7.16** Variations of diffraction pattern with laser incident position on the grid structure film

Each pattern is observed under the same film with different incident position of laser beam.

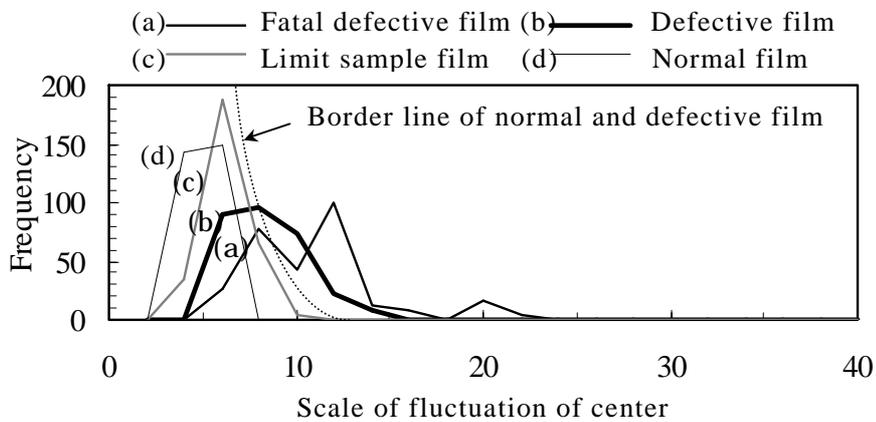


**Fig.7.17** Variations of the center of diffraction pattern involving a normal film and defective films

The longitudinal axis stands for the center position of the spots which are comprised of the first side lobe of the diffraction pattern.



**Fig.7.18** Fluctuation of center positions of diffraction pattern  
 The longitudinal axis stands for the maximum minus the minimum values of Fig.7.11 within 10 mm width.



**Fig.7.19** Frequency distribution of fluctuation

## 第 8 章 結論

### 8.1 本研究の成果

本研究では、各種ディスプレイに用いられる光学機能シートを対象に、外観検査の自動化が困難な低コントラスト欠陥の検出技術について検討した。得られた結果については各種の結言に示したが、ここではそれらを総括して述べるとともに、研究成果の実用について述べる。

#### 8.1.1 各章の結論

1 .液晶ディスプレイを中心に、表示装置が多層の光学機能シートから構成されることを解説し、光学機能シートの品質管理の重要性を述べた。光学機能シートに発生する外観欠陥をその特徴から微細欠陥と低コントラスト欠陥とに分類し、それぞれに対する検査技術動向を概観した。低コントラスト欠陥は欠陥自体を知覚することが困難であること、欠陥の合否判定基準が感覚的であり定量評価が困難であることなどから、従来技術の適用だけでは検査の自動化には限界があることを示した。

2 .低コントラスト欠陥のうち、微小起伏欠陥を固定光学系にて検出するため、パターン照明を用いた検出方法を提案した。本手法によると非常にシンプルな装置構成によって微小起伏欠陥を検出できることを示した。被検査面に映り込んだパターン照明像が欠陥の存在によってぼける現象を利用することにより、従来法と比較して非常に少ない計算コストでの欠陥抽出を可能にした。実際にラインセンサを用いて連続する光学機能シートの検査を行うシステムを試作し、一般的なラインセンサの駆動条件下でインライン検査が可能な処理速度を実現した。

3 .パターン照明を用いた微小起伏欠陥の検出方法に関して、光学シミュレーションによって検出能力を評価する手法を確立した。一般に、欠陥検査装置を構築する場合、想定される欠陥種類を全て用意してサンプルテストを行うことは不可能である。本シミュレーション技術を用いることにより、実験のみでは評価しきれない様々な形状の欠陥に対して検出能力および最適照明パターンの評価が可能となり、アプリケーションの開発において効果が期待できる。

4 .微小起伏欠陥に対して、その欠陥の観察像の形成に寄与する照明範囲を「影響領域」という考え方を用いて定義し、この影響領域と照明パターンとの関係に基づいて欠陥の検出感度を評価した。この手法によると、限られた現場スペースの中で対象とする欠陥の検出に適した照明パターンと照明配置の組合わ

せを容易に選定することが可能であることを示した。また、表面の起伏欠陥を検出する手法はいくつか提案されているが、欠陥の形状に適した方式の選定に関する指針は明確でなかった。本手法を用いることにより、欠陥の見え方を簡便に評価することが可能になり、検出手法の選定が容易となることを述べた。

5. 低コントラスト欠陥のもう一つの形態である反射防止膜に生じる色むら欠陥を対象に、欠陥発生メカニズムおよび欠陥検査方法を検討した。色むら欠陥が反射防止膜の膜厚変動によって生じることを明らかにし、どの程度の膜厚変動量が欠陥として知覚されるかを示した。反射防止膜の代表的な膜厚を示す「等価膜厚」という指標を定義し、膜表面を撮影したカラー画像を基に等価膜厚を計測することにより反射防止膜の品質を評価する手法を提案した。

6. 色むら欠陥を定量的に判定するため、人間の色判別特性と欠陥によって生じる色差とを比較した。反射防止膜の設計膜厚および観測条件の違いにより同一の膜厚変動であっても色むらの見え方が様々に変化することをシミュレーションおよび実験より明らかにした。これらの結果から、色むらを目立ちにくくする膜厚設定方法を提案した。また、人間の色判別特性に基づいた欠陥判定法を提案した。これらにより従来、感覚に頼らざるを得なかった色むら検査の定量化が可能となった。

7. むら欠陥の官能検査の自動化手法について述べた。個々のむらの強度を定量評価するだけでなく、被検査領域全体にわたってむらの特徴量を計測し、その度数分布に基づいて良否判定を行う特徴頻度法を提案した。本手法によると、従来検査員の主観に頼らざるを得なかったむら欠陥の合否判定を自動化できることを示した。本手法を、反射防止膜の色むら欠陥と格子構造フィルムの濃淡むら欠陥という発生原理の異なるむら欠陥に適用し、それぞれ目視検査と良く一致する判定結果を得た。

以上、各章の結論をまとめた。本研究で対象とした低コントラスト欠陥は検査の自動化あるいは省力化が非常に困難な欠陥であり、本研究の成果によりこれらの自動検出および定量評価に目処を得ることができた。

#### 8.1.2 研究成果の活用

光学機能シートの外観検査においては画素サイズと同程度の微細欠陥と本研究で対象とした低コントラスト欠陥の両方の検出が要求される。この中で、微細欠陥については、高速・高解像度への厳しい要求はあるものの、比較的既存技術の適用が進んでいる。一方、低コントラスト欠陥については固定光学系下で効果的に自動検査を行う手法がなかった。本研究の成果と従来技術とを組み合わせることにより、これら全ての欠陥について自動検査の目処を得た。

本論文の冒頭において、本研究の目的は「ディスプレイの品質向上」であることを述べた。一般に、製品の外観検査そのものは付加価値を生じない。外観検査技術の真の目的は検査結果に基づいて生産技術を高度化し製品の品質を向上することにある。本研究では欠陥情報を次のように活用し、製造の改善を実現した。

#### (1) 欠陥の分析と製造条件の改善

本研究によって、微小起伏欠陥の高さ、および色むら欠陥の原因となる膜厚変動のおおよその大きさを推定できるようになった。これらの欠陥情報と製造条件とを合わせて解析することにより、欠陥を低減するための製造条件を確立することが可能となった。

#### (2) 製造ラインの改善

欠陥発生状況を製造ラインにリアルタイムにフィードバックすることにより、ラインの異常に対し迅速に対応することが可能となった。これにより製造条件の一時的な変動による製品収率低下を最小限に抑えることができる。

## 8.2 今後の展望

パターン照明を利用した微小起伏欠陥の検出手法は、光学機能シートだけでなく自動車や各種製品のボディ等の検査に適用されている技術である。しかし、欠陥に適した光学系あるいは画像処理アルゴリズムの選定についての指針がなく、また光学系が大掛かりになることが多いため、柔軟性のあるシステムを構築することが困難であった。このことは検査対象が時々刻々変化する外観検査の現場では大きな弊害であり、そのため本技術が適用できる製造現場は限られたものであった。本研究の成果により、ニーズの変化への対応が容易な検査システムの構築が可能になり、従来コスト面から困難であったラインへも自動技術の適用拡大が期待できる。

むら欠陥の検査については、従来検査員の判断に頼らざるを得なかった合否判定の自動化技術を確立したことにより、実際の製造において大きな効果が期待できる。しかし、本手法はあくまでも目視官能検査とよく一致する合否判定法の提案であって、感性評価を行う手法ではない。一方、官能検査の自動化に関する研究分野では、感性情報（美しい、見苦しい、派手である、地味である、安定感がある、不安定などといった感覚的な情報）の定量評価が重要な課題となっており、近年、盛んに研究が行われている。これらをみると、現状はまだ個々の検査ニーズに対する個別検討の段階であると考えている。今後この分野においては、これら個々の研究成果を融合し、汎用的な感性情報の定量化技術が整備される段階へと移行していくものと考えられる。本研究は合否判定のみ

を目的としたが、今後は外観検査においても感性情報を取り入れた品質評価が必要となる可能性が高い。本研究の成果を発展させ、今後そのような研究の一端を担うことができれば幸甚である。

# 各章構成論文リスト

## 第 1 章 緒論

## 第 2 章 パターン照明を用いた微小起伏欠陥の検出

### 主論文

- [1] 広瀬 修, 石井 明, 秦 清治, 鷲崎 一郎: パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1098.

### 参照論文

- [1] O.Hirose, A. Ishii, S. Hata, I. Washizaki: Detection of Small Convex and Concave Defects on Optical Films by Patterned Illumination, Conference on Quality Control by Artificial Vision, (2001) 158-162.  
[2] 広瀬 修, 石井 明, 秦 清治, 鷲崎 一郎: 中間調解析によるフィルムシート欠陥検出手法, 第 11 回 外観検査の自動化ワークショップ, (1999) 106-109.

## 第 3 章 微小起伏欠陥検出の光学シミュレーションによる評価

### 主論文

- [1] 広瀬 修, 石井 明, 秦 清治, 鷲崎 一郎: パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出(第 2 報) - 光学シミュレーションによる欠陥検出評価 - , 精密工学会誌, **67**, 7 (2001) 1135.

### 参照論文

- [1] 広瀬 修, 石井 明: 画像処理によるフィルム表面の凹凸欠陥検査, 非破壊検査, **50**, 10 (2001) 642-646.  
[2] O.Hirose, A. Ishii, S. Hata, I. Washizaki: Detection of Small Convex and Concave Defects on Optical Films by Patterned Illumination, Workshop Frontiers of Computer Vision, (2002) 117-123.  
[3] 石井 明, 秦 清治, 広瀬 修, 鷲崎 一郎: パターン照明によるフィルム表面の凹凸欠陥の最適検出, 非破壊検査協会 平成 12 年秋季大会講演概要集, (2000) 201-204.

## 第 4 章 光線の影響領域に基づく光学系の最適設計

### 主論文

- [1] 広瀬 修, 石井 明:パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出(第3報) - 光線の影響領域に基づく光学系の最適設計 -, 精密工学会誌,70,2 掲載決定.

## 第5章 反射防止膜に生じる色むらの定量評価

### 主論文

- [1] 広瀬 修, 石井 明:反射防止膜に生じる色むらの定量評価, 精密工学会誌, 69,9, (2003) 1277-1280.

## 第6章 色むらの感覚評価の定量化および色むら低減に関する検討

### 主論文

- [1] 広瀬 修, 田中 幹人, 石井 明:反射防止膜に生じる色むらの定量評価(第2報) - むらの目立ちやすさと知覚限界の評価 -, 精密工学会誌, 掲載決定.

## 第7章 むら欠陥の官能検査の自動化に関する検討

### 主論文

- [1] 広瀬 修:回折パターンを利用した格子構造フィルムのむら欠陥検査, 精密工学会誌, 69,4, (2003) 586-590.

## 第8章 結論

## 謝 辞

本論文の執筆にあたり、懇切なるご指導を賜りました、慶應義塾大学理工学部 機械工学科 菅 泰雄 教授に深甚の謝意を表します。菅 教授には本論文以外にも様々な面でご指導・ご鞭撻をいただいております。心より御礼申し上げますとともに、教授のご研究の一層のご発展を御祈り申し上げます。

本研究を行うにあたり、多年にわたり適切なご指導を賜りました、香川大学工学部 知能機械システム工学科 石井 明 教授に深く感謝申し上げます。この間、石井教授には研究内容のみならず研究のあり方等につき多くのご指導をいただきました。このことは筆者にとりまして研究成果にもまして貴重な財産であり、今後の研究に活かしていきたいと思えます。

本論文を査読いただき、研究内容に関し細部にわたる適切なご指導、ならびに工学としての研究のまとめ方に関する貴重なご助言をいただきました、慶應義塾大学理工学部 機械工学科 三井 公之 教授、情報工学科 斎藤 英雄 助教授、システムデザイン工学科 村上 俊之 助教授、機械工学科 久能 孝彦 教授、対馬 一憲 助教授に謹んで感謝申し上げます。

本研究は筆者の勤務先である住友化学工業株式会社と香川大学との共同研究にて行ったものである。その間、長期にわたりご指導を賜りました、香川大学工学部 知能機械システム工学科 秦 清治 教授、ならびに本研究に関し深いご理解とご支援を賜りました、住友化学工業株式会社 生産技術センター所長 石丸 裕 理事に深く感謝申し上げます。

住友化学工業株式会社 生産技術センター 生産加工技術グループ 中井 敏雅 グループ マネージャーには本研究に関し多大なるご支援をいただきました。また、製造業での研究のあり方について多くのご指導を賜りました。厚く御礼申し上げますとともに、この間のご指導を実学として今後の研究に活かしていきたいと思えます。

住友化学工業株式会社 生産技術センター 生産加工技術グループ 主席研究員 鷲崎 一郎 氏、主任研究員 篠塚 淳彦 氏、研究員 鈴木 孝志 氏には、本研究の遂行にあたり終始絶大なるご指導、ご支援をいただきました。心より感謝申し上げますとともに、今後のご研究の発展ならびに生産技術開発でのご活躍を御祈り申し上げます。

住友化学工業株式会社 生産技術センター元所長 大久保 勝夫 理事(当時)には筆者の入社以来、技術者のあり方について貴重なご指導を賜りました。この間のご指導がなければ現在の筆者はなかったと思えます。謹んで深甚の謝意を表します。

筆者の友人 Fa Hone William 氏には多くのご支援、激励をいただいたことを感謝致します。

最後に、筆者の妻 明美 からは長期にわたり本研究の遂行に関し様々な支援と激励を受けた。特記して深く感謝したい。

平成 16 年 3 月