

レーザー回折投影法によるタッチパネル透明電極のパターン解析

著者	増田 健二
雑誌名	技術報告
巻	20
ページ	49-54
発行年	2015-03-10
出版者	静岡大学技術部
URL	http://doi.org/10.14945/00009247

レーザ回折投影法によるタッチパネル透明電極のパターン解析

増田 健二

技術部プロジェクト・安全支援部門

1. はじめに

欠陥検査と言っても、対象物の大きさ、材質、形状などによって測定法が大きく変化する。欠陥検査には、検出感度の向上と処理の高速化が要求される。ここでは、回折、散乱などの光現象を用いた欠陥検出法について述べる。回路などのマイクロ検査においては、狭い部分を検査するのに対して、マクロ検査では、回路パターン全体の線幅や形状異常となる欠陥（称して「回路パターン欠陥」と呼ぶ）を検出する。欠陥は、異物、キズ、薄膜の異常（膜ムラ）などである。

ここで検査対象とするのは、タッチパネルで用いられる透明な電極基板である。タッチパネルはLCDやCRTの表面に重ねて使用されるので、後ろ側にある画面表示が見えるように、タッチパネル部分は目に見えない透過性のある（透明な）ものになっている。導電体である金属を用い、透過性をよくするためには、目には見えない非常に細い電線を配線する方法と非常に薄い金属被膜を用いる方法がある。近年の透過被膜の性能は高くなっており、携帯電話の透過型静電容量タッチパネルの透明電極パターンを肉眼で見ることはできない。タッチパネルの透明電極の欠陥検出はこれまで、成形後の導通検査やレーザ顕微鏡を用いたマイクロ検査が行われ、長時間の検査が必要とされる。さらに、回路パターンの微細化と透明度の向上が進み、検出感度の向上と処理の高速化のニーズが高まっている。

本研究では、レーザ回折投影法を用いてタッチパネルの透明電極の回路パターンをスクリーン上に拡大投影することにより、CCDカメラを用いて撮影し、回路パターンを可視化するとともに、異物、キズなどによる散乱光を検知することで欠陥検出をする手法である。これまでのレーザ顕微鏡などは、形状測定に反射光を利用する手法のため、透明度が向上するのに伴って、欠陥の見極めが難しくなっており、長時間の検査時間が必要であり、検査効率が大きな課題と考えられている。そこで、透明物体を透過する光が表面微細構造により回折する現象を利用して形状計測を行う。回折パターンの大きさは、物体の大きさに反比例する。微細な構造そのものを計測するよりも、その回折パターンを計測するほうが有利なことがある。ここでは、透明物体の表面微細構造のパターン解析を可能にするための表面形状計測法として提案する¹⁾。

2. レーザ光による回折

2.1 回折投影法の原理

波は障害物がないところでは直進するが、障害物があると、その裏側に回り込んで進んでいくという性質をもっている。この波動現象特有の性質を回折と呼ぶ。光の場合でも回折現象が起きる。多スリットに平行光（1次波）が入射し、スリットで回折した光

（2次波）が、スリットから遠方の距離にあるスクリーン上につくる回折縞（回折像）について解説をする（フランホーファーの回折^{2,3)} という）。N個のスリットを等しい間隔 d で配列した多スリットに平行光（1次波）スリット面に垂直に入射する。スリットで回折し、入射光の方向と θ だけ傾いた方向に2次波が平行に進む（Fig.1）。各スリットによって回折した光が、スクリーン上に明暗の分布をもつ回折縞をつくる。回折格子の場合、スリットが多数であるから、干渉の効果が強調されて、明線が鮮明に現れる。

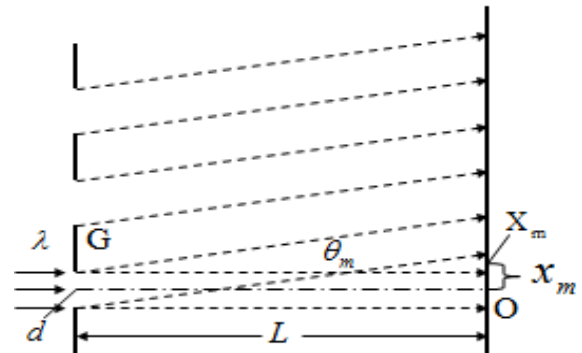


Fig.1 回折格子による回折

回折格子Gから十分にはなれた距離Lのスクリーン上に映し出された回折縞のm次の主極大の明線の位置をx_m。ゼロ次からの明線の距離をOX_m=x_mとすると、m次の明線の回折角θ_mは、

$$\sin \theta_m = \frac{OX_m}{GX_m} = \frac{x_m}{\sqrt{L^2 + x_m^2}} \approx \frac{x_m}{L} \quad (1)$$

細線直径d（スリット幅d）式（1）より、

$$d = \frac{m\lambda L}{x_m} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2)$$

と表される。

2.2 単スリットによる回折

単スリット幅を回折縞の暗線の間隔から求める。単スリットにHe-Neレーザーを射てると、スクリーン上にFig.2のような回折縞が現れる。この回折縞をCCDカメラ（BITRAN BU-51LN）で撮影する。Fig.2に画像データFig.3に光強度を数値化（テキストデータ）した中心軸の断面データを示す。0次の明線をはさんで左右に現れる暗線（光の強さが極小）部分X_mをテキストデータから読み取る。0次に近い位置から順番に8次まで（左はマイナス、右はプラス）次数の番号を付ける。次数間の暗線の位置X_mを測り、暗線の間隔x_mを(3)式より求める。

$$x_m = \frac{1}{2}(X_m - X_{-m}) \quad (3)$$

図3の回折強度分布のグラフから次数間（m=±1~8）の暗線の位置を0.053mm/pixelの精度で読み取る。(3)式より暗線間隔x_mの平均値および平均2乗誤差は、x_m = 4.256 ± 0.089(mm)となり、距離L=500mm、He-Neレーザーの波長λ=632.8nmを(2)式に代入して単スリットの幅（d = 75μm）を求めると、

$$d = 74.3 \pm 1.5 \mu m$$

となり、誤差の範囲内でほぼ妥当な値となった。

2.3 細線（キズ）による回折縞

金属細線で回折する光により、スクリーン上に明・暗の回折縞ができる。この縞の間隔xを計ることによって、細線の直径dを求めることができる。この場合、バネルの原理（Babinet Principle）によると、板に空けられた単スリットと空間に置かれた細線に照射した光波は同じ回折パターンを作ることから、単スリットの(2)式と(3)式の強度分布が細線にも適用できる。

Fig.4に、金属細線およびキズにHe-Neレーザーを当てた回折縞の画像を示す。単スリット（Fig.2）と同じ回折パターンを作ることが分かる。細線の直径は小さい方が回折縞の間隔は広くなる。

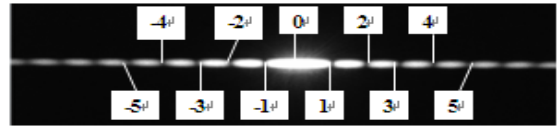


Fig.2 単スリットによる回折縞の暗線の次数

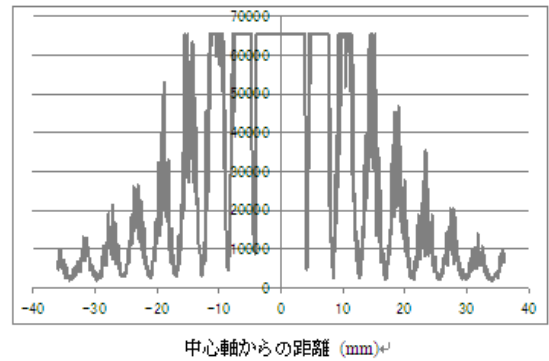


Fig.3 単スリット（幅 75μm）による回折強度分布

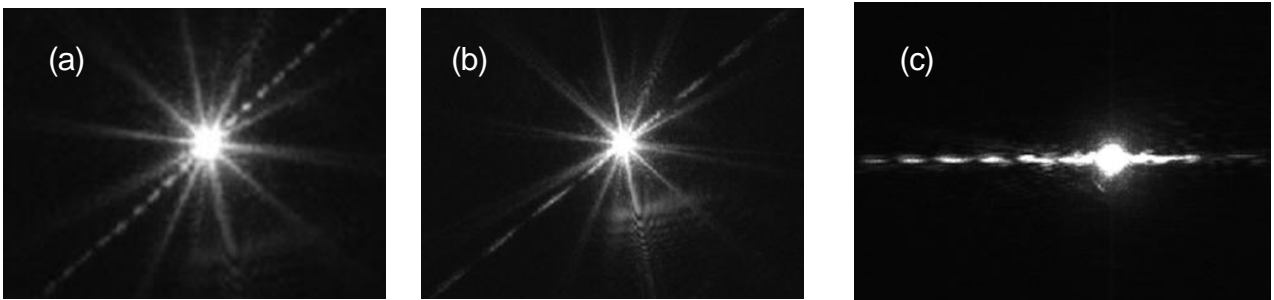


Fig.4 細線（キズ）による回折縞 (a) φ0.15mm 細線 (b) φ0.025mm 細線 (c) キズ

3. 顕微鏡によるタッチパネル回路パターン計測

Fig.5 に、タッチパネルの回路パターンの顕微鏡筒を用いた測定系の概略図を示す。タッチパネル表面には、非常に細い電線または微細な金属薄膜で透明電極が加工されている。パネルの背面から Na ランプを用いて、単色（橙色：589nm）平行光線をタッチパネルに垂直に入射させると、透明なパネル表面が橙色に着色され、構造物の微細な凸凹により生じる明暗から画像のコントラスト変化として検出される。このパネルの表面微細形状を顕微鏡筒（×50：島津理化）と CCD カメラを組み合わせた測定系を用いて撮影する。

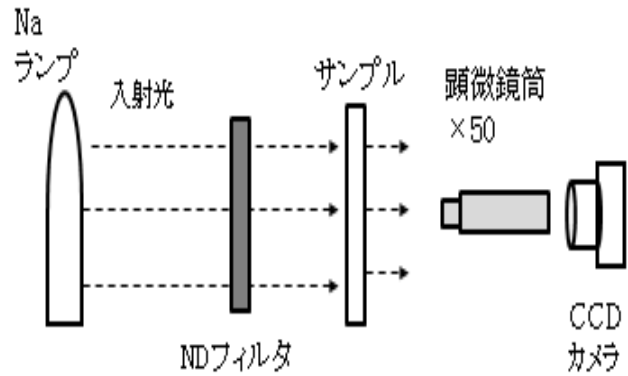
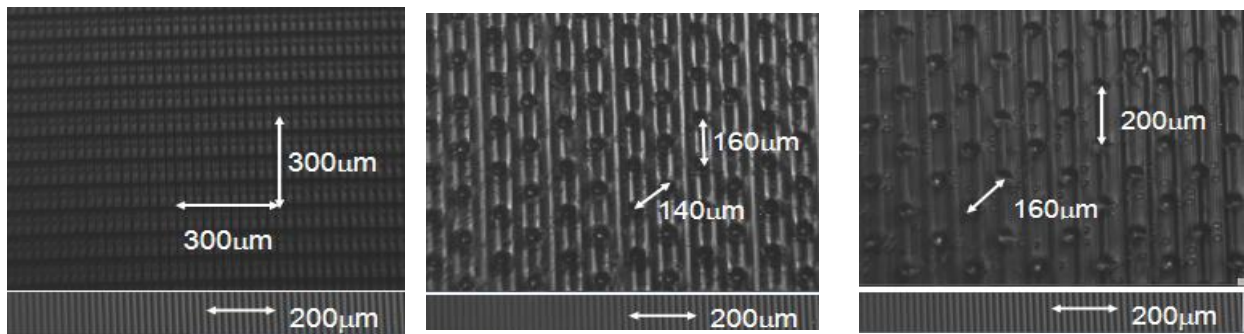


Fig.5 顕微鏡によるパネル表面形状測定系

今回撮影に使用する CCD カメラ（BITRAN BU-51LN）は、モノクロで分光感度特性（回折効率）は 500～650nm が高く、画素数は 140 万画素（1360×1024pixel）と高解像度である。測定精度は、撮影する面積によって規定される。顕微鏡筒の倍率 50 倍、焦点距離 30mm であり、XYZ ステージに取り付け手動で焦点を合わせる。顕微鏡を使用した場合、画角（撮影面積）は 2.62×1.98mm となり、1.93μm/pixel（横：2.62mm/1360pixel、縦：1.98mm/1024pixel）となる。サンプルとしては、iphone 4S、3G と ipod nano を用いた。透明電極（回路パターン）の顕微鏡写真を Fig.6 に示す。サイズの指標として、回折格子（格子定数 20μm）を写真の下に添付した。iphone 4S（Fig.6-a）の電極の幅は、縦 75μm（300μm/4）、横 25μm（300μm/12）程度であり、等間隔に並んだ長方形（20×40μm）程度の大きさの（薄膜）電極が確認できた。iphone 3G（Fig.6-b）は、電線の線幅は 10μm 程度であり、半分ずれて交互に直径 60μm 程度のボタンスイッチが等間隔に並んでおり、電極の幅は、縦 160μm、斜め 140μm 程度である。ipod nano（Fig.6-c）は、形体は iphone 3G（Fig.6-b）に似ており、電極の幅は、縦 160μm、斜め 140μm 程度である。



(a) iphone-4S

(b) iphone-3G

(c) ipod nano

Fig.6 タッチパネルの回路パターン（透明電極基板）の顕微鏡写真

4. レーザ回折投影法による回路パターン計測

Fig.7 にレーザ回折投影法による回路パターンの測定系の概略図を示す。半導体レーザー（532nm, 40mW）を用い、ビームシェーパーで均一な強度のビームにしたのちに、ビームエキスパンダー（×10）で直径 25mm の平行光として拡幅し、タッチパネルの透明電極に垂直に照射する。パネルの表面からの回折光を前方のスクリーンに投影して、スクリーンに写し出される（0 次）回折縞を広角レンズを取り付けた CCD カメラで撮影する。今回は、CCD カメラの総画素数を 35 万画素（1,360×1,024pixel）に設定して、広角レンズを用い、CCD カメラとスクリーンの距離を固定して撮影する。画角（撮影面積）サイズは、サンプルとスクリーンの距離 L によって規定される。 $L=1.128m$ の場合、画角サイズは 412×292mm となり、解像度は、0.303mm/pixel（横：412mm/1,360pixel、縦：292mm/1,024pixel）となる。サンプルを iphone 3G、4S と ipad nano のタッチパネルの透明電極基板に取り換えて同様の計測を行う。

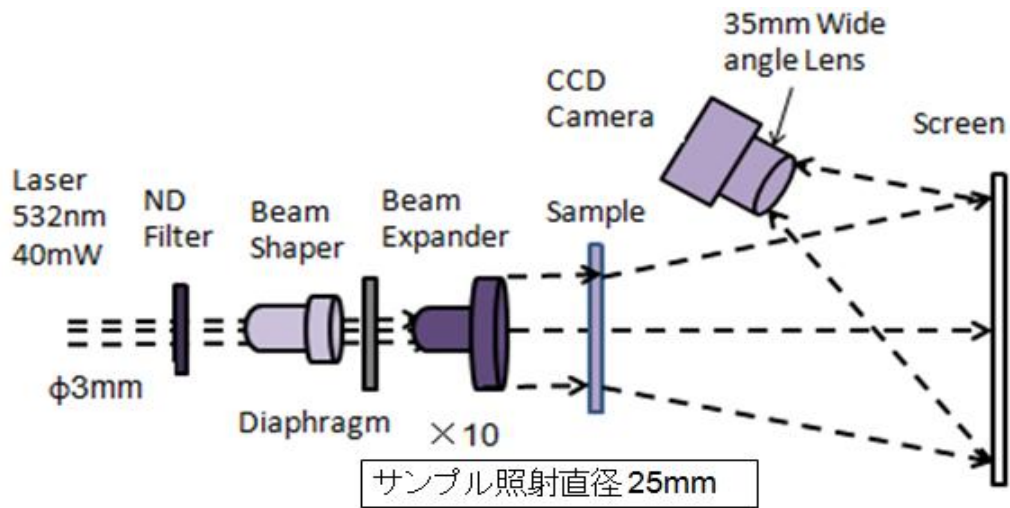


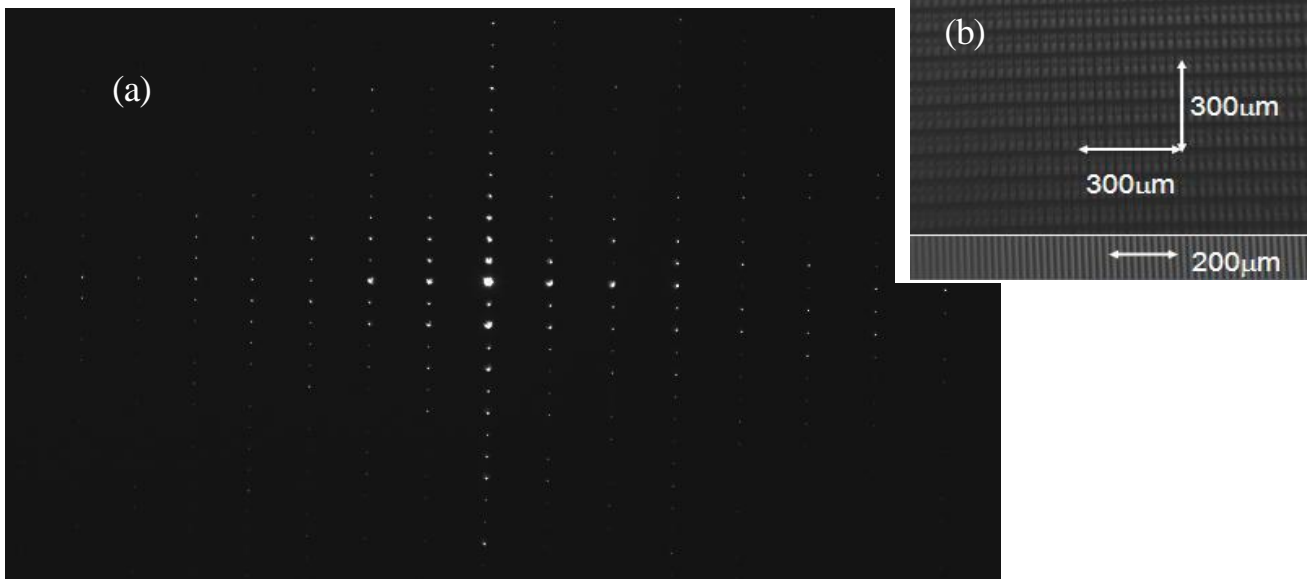
Fig.7 レーザ回折投影法の測定系

Fig.8 (a) に iPhone 4S の画像を示す。Fig.6 の顕微鏡と比較する場合、回折では、縦・横が逆になって回折縞を形成するため、顕微鏡画像を 90°回転させて比較する。電極部分が回折縞 (点) として構成され、光強度が大きいことが分かる。Fig.8(c) に縦と横の中心軸の強度分布グラフを示す。顕微鏡画像 (Fig.6-a) の回折縞の縦軸が実線 (赤)、横軸が点線 (青) である。回折縞の間隔を pixel 数から求め、(2)式をもとに電極間の距離を算出する。λ はレーザーの波長 (532nm)、L はサンプルとスクリーン間の距離 (1.128m)。x は解像度 (0.303mm/pixel) に pixel 数を掛けて求める。そして、電極間の距離 d を算出する。

$$\text{縦軸} : d = \frac{\lambda L}{x} = \frac{532 \times 10^{-9} \times 1.128}{0.303 \times 10^{-3} \times 26.9} = 73.6 \times 10^{-6} \text{ [m]}$$

$$\text{横軸} : d = \frac{\lambda L}{x} = \frac{532 \times 10^{-9} \times 1.128}{0.303 \times 10^{-3} \times 74.3} = 26.7 \times 10^{-6} \text{ [m]}$$

顕微鏡画像 (Fig.6-a) の回折格子の格子定数から電極間の距離を目測すると縦が 75μm、横が 25μm 程度となっている。Fig.8-c の Excel グラフより回折縞の距離 x の平均値と平均二乗誤差を求めると、縦軸が $x = (26.9 \pm 0.6) [\text{pixel}]$ 、横軸が $x = (74.3 \pm 1.3) [\text{pixel}]$ となる。(2)式をもとに算出した結果は、縦が $73.6 \pm 1.6 [\mu\text{m}]$ 、横が $26.7 \pm 0.5 [\mu\text{m}]$ とほぼ一致した。



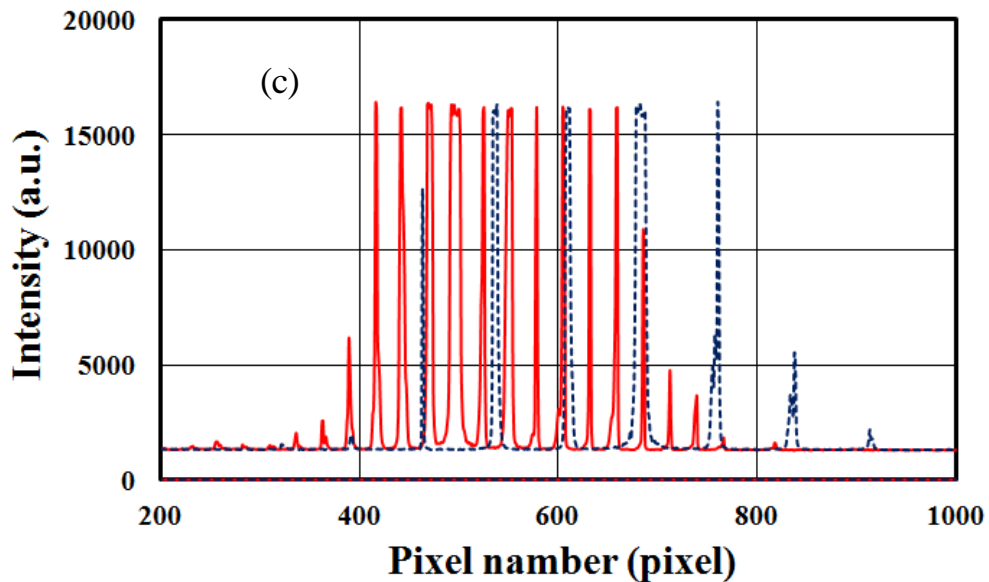


Fig.8 iphone-4S による回折縞

(a) 回折縞画像 (b) 顕微鏡画像 (c) 回折縞強度分布グラフ

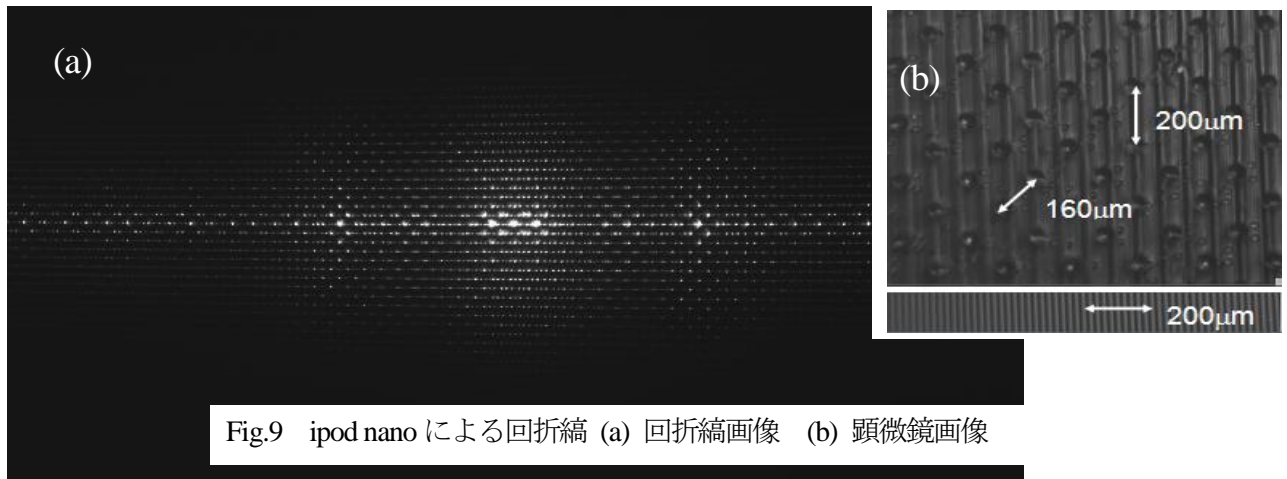


Fig.9 ipod nano による回折縞 (a) 回折縞画像 (b) 顕微鏡画像

Fig.9 に ipod nano の画像を示す。(a) 回折では縦・横が逆になって回折縞を形成するため、(b) 顕微鏡画像を 90°回転させて比較する。等間隔で並んだボタンスイッチによる回折縞が広範囲 (直径 25mm) で検出されており、回路パターンが全体の回折縞の形状異常となる欠陥 (回路パターン欠陥) の推定できる。

5. 回折散乱光を用いた欠陥検出

CCD カメラの積分時間を調節することによって、異物 (細線・キズ) などの回折散乱光が検出できる。これは、回折格子のように干渉して背景光が少ない場合に限られる。光の波長に比べて大きい ($\phi > 1\mu\text{m}$) 物体による光散乱は、物体による光の反射・吸収・回折などの複雑な現象を含んでいる。ここで用いるのは回折散乱光であり、入射する光の波長 λ 、回折縞の間隔 x と物体の大きさ d の関係式、(2)式で示される。光の波長に比べて大きい物体による光散乱 (ミー散乱⁴⁾) では前方散乱が後方散乱よりも卓越するという特徴をもつ。前方散乱による回折縞を検出するためには、ある程度強い光量が必要となる。ここでは、Fig.7 のビームシェーパとビームエクスペンダーを取り外し、ND フィルターの減光量を調節した。透過光による前方散乱においては、ND8 フィルター (減光量 1/8, 12.5%) を用いた場合、レーザ光の照射照度は 8,200 [lx]となった。前方散乱光の回折格子(a)と iphone-4S の透明電極板の結果を Fig.10 に示す。20mm の格子間隔で交わる格子点において前方散乱して回折縞が見られた。光強度の強い中心部分が回折縞の次数が長いこと画分かる。Iphone-4S においては、中心部分だけ少し不鮮明な回折縞が見られた。

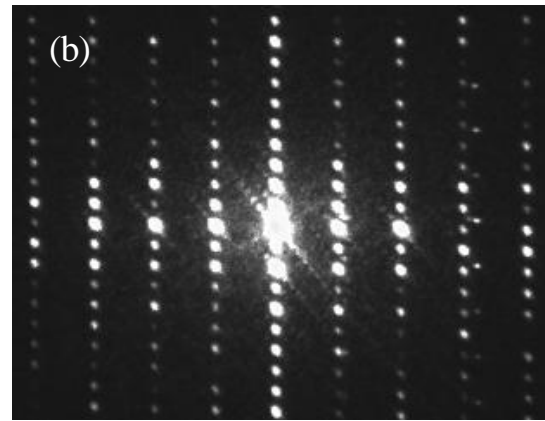
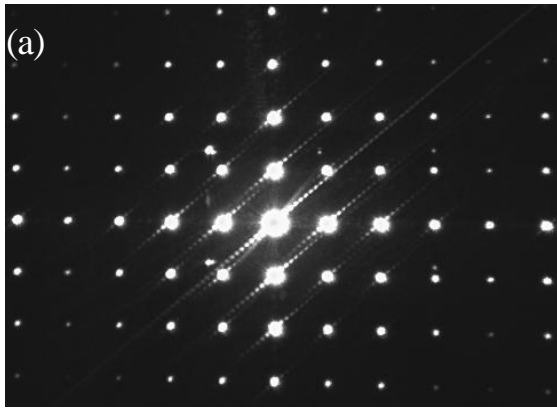


Fig.10 透過光による前方散乱 (a) 回折格子による $\phi 0.15\text{mm}$ 細線の回折縞(積分時間 : 300ms),
(b) iPhone-4S による $\phi 0.15\text{mm}$ 細線の回折縞 (積分時間 : 100ms)

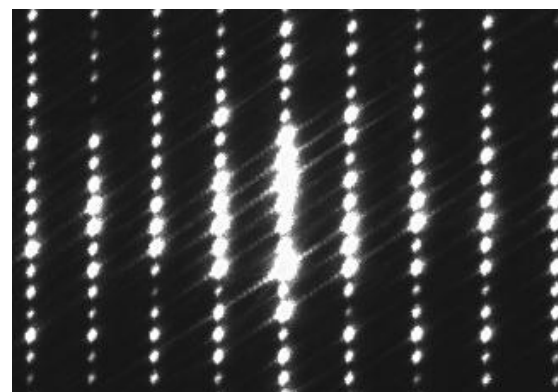
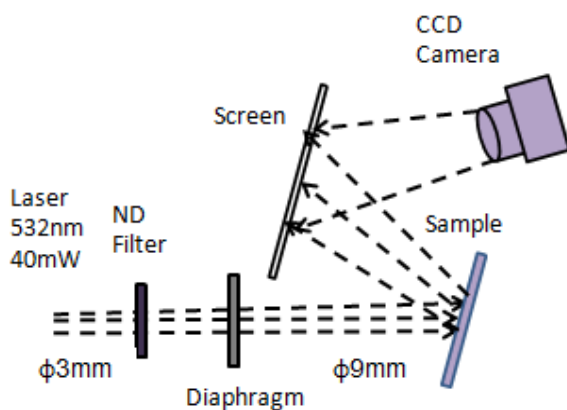


Fig.12 反射光による後方散乱

Fig.11 レーザ回折 (反射) 投影法の測定系

iPhone-4S によるキズの回折縞 (積分時間 : 200ms)

Fig.11 に反射光を用いたレーザ回折投影法の測定系を示す。レーザビームを回折できる限界 ($\phi 9\text{mm}$) まで広げてサンプルに照射する。Fig.12 のように、キズの後方散乱による回折縞が確認できた。

6. 結論

回折縞の大きさは物体の大きさに反比例する。微細な欠陥そのものを計測するよりも、その回折パターンを計測する方が有利なことがある。従来の顕微鏡を用いる方法では観察視野が狭い (2mm 角以下の) ため、パネル全面を解析するには長時間の計測が必要とされる。本提案では、広範囲 (直径 25mm) を検出するため、計測時間の短縮が期待される。タッチパネルの透明電極は、パターンが規則正しく並んでいる。散乱光の画像では、正常部分は暗く、異物やキズがある部分のみ明るくなるので、パネルの電極パターンの透過光や反射光を用いた前方散乱と後方散乱により生じる回折縞から、異物 (細線・キズなど) の位置と形状を推定する画像解析を試みた。

おわりに、この研究は、三浦・臼杵プロジェクト研究の一環¹⁾として行った。さらに、三浦・臼杵研の B4 の卒業研究テーマとしても行っている。

参考文献

- 1) 増田健二, 寺尾健, 臼杵深, 三浦憲二郎: 2014 砥粒加工学会学術講演会 (岩手大学) 講演論文集 48-51 DVD, 2014
- 2) 静岡大学工学部共通講座物理学教室編 : 物理学実験学術図書出版 38., 2014
- 3) 谷田貝豊彦 : 第二版応用光学-光計測入門, 丸善 123., 2005
- 4) Mie G., : Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Ann. Phys. 25: 377-445., 1908