

強度から波面がわかる？

「波面を測る」となると、普通は干渉計の出番です。でもそれしか方法はないのでしょうか？

あるときミラーの検査のために干渉計を使っていて、妙なことに気づきました。干渉縞画像のフォーカスが合っていなかったり、ミラーを傾けたりすると、かえって傷や欠陥が目立つのです。

例をお見せしましょう。図1～図3に示すのは、いずれも同じ圧延鋼板です。図1は普通の干渉縞画像です。点状の欠陥があるところを○で囲んであります。欠陥が凹なのか凸なのかは、これだけではわかりません。図2はデフォーカスした画像です。点状欠陥のところが目立っています。明るいものと暗いものがあります。これは欠陥が、片方が凹、他方が凸であることに対応しています。デフォーカスの向きを逆にするると、明暗が逆転します。図3は被検物を傾けたものです。点状欠陥は明暗になってだけでなく、あたかも凹凸形状を斜めから見ているような画像になっています。また、全体に縦すじが見えますが、これは圧延痕と思われる。

この例では、干渉縞からも欠陥が判断できますが、干渉縞ではわかりにくい欠陥でも、デフォーカスや傾きを与えると、よくわかる場合があります。デフォーカスや傾きの量を増やすと、検出感度が上

がります。誌面では実際にお見せできないのが残念ですが、デフォーカスや傾きをダイナミックに変えながら観察すると、あたかも3次元立体形状のムービーを見ているようです。

さて、世の中を見回してみると、似たような原理の技術がありました。それは、魔鏡トポグラフィ¹⁾と呼ばれるものです。被検面全体に光を照射し、反射光をスクリーンで受けると、表面の凹凸が光の明暗となって観察できます。Siウェハラの検査に応用され、なんとナノメートルオーダーの検出感度があるそうです。

しかし、魔鏡トポグラフィは、高感度とはいえ定性的な検査技術にとどまっているようです。せっかくですから、この原理を発展させて、なんとか定量的な波面計測技術を生み出せないのでしょうか？じつは、それに近い発想の技術が活躍しているので紹介します。

最近建設されている大型光学望遠鏡では、大気揺らぎによる波面の乱れをリアルタイムに検出してそれを打ち消すように反射鏡を変形させる、補償光学²⁾と呼ばれる技術が使われています。最近話題の、ハワイに建設されているすばる望遠鏡³⁾にも使われています。補償光学における波面センシング技術である Roddier 法⁴⁾がそれです。

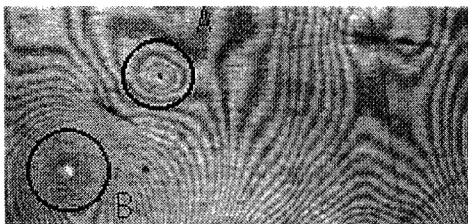


図1 圧延鋼板の干渉縞画像。点状欠陥の位置を○で囲んだ。

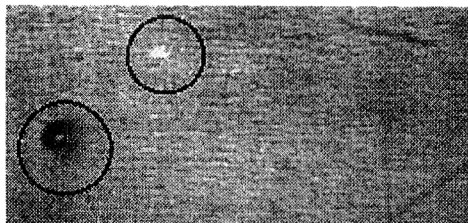


図2 圧延鋼板のデフォーカス強度画像。凹凸の点状欠陥が明暗となって強調されている。

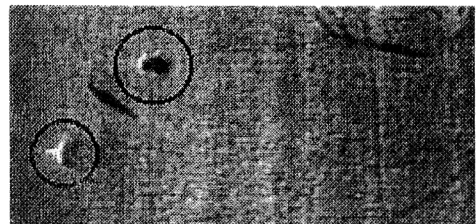


図3 圧延鋼板を傾けた強度画像。凹凸の点状欠陥と波状の形状エラーが強調されている。

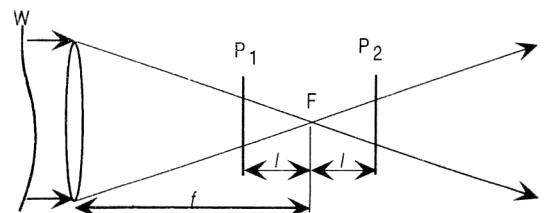


図4 Roddier 法の説明。

Roddier 法を図 4 に示します。フォーカス F 前後の位置 P_1 と P_2 で画像の強度分布 I_1 と I_2 を測定し、式(1)の関係を利用して波面を求めます。ここで、 W は波面、 δ_c は光束のエッジ上のデルタ関数、 \mathbf{n} は光束のエッジから外へ向かう単位ベクトルです。右辺第 1 項は、強度の差が波面の 2 次微分すなわち波面曲率半径に比例することを示しています。右辺第 2 項は、強度画像のエッジ上では強度の差が波面の傾きに比例することに対応します。

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{f(f-l)}{l} \cdot \left[\nabla^2 W - \frac{\partial W}{\partial \mathbf{n}} \cdot \delta_c \right] \quad (1)$$

これって、図 2 や図 3 の状況に似ていませんか？ 図 2 で、波面の凹凸が明暗に対応していたこと、デフォーカスの向きを逆にすると凹凸と明暗の対応が逆になったことは、式(1)の右辺第 1 項と同様です。図 3 で傾きを増やすほど感度が上がったことは、右辺第 2 項に似ています。

では、Roddier 法が求めている解答でしょうか？ Roddier 法は、滑らかで、光線が交差しない範囲の低次の波面形状の測定では成功していますが、複雑な波面形状の検出にはどうでしょうか。また点状の

欠陥や鋭角な折れの検出感度は、図 2 や図 3 に示した方法は非常に高いのですが、Roddier 法はそういう計測に使われたことはあまりないようです。もっとも、最近 Roddier 法に似た新しい技術⁵⁾が出てきて、複雑な波面形状への対応も進んでいるようです。

いずれにしろ、デフォーカスや傾きを変化させたときに味わえる、ダイナミックな 3 次元形状の迫力を思うと、もっともっとフレキシブルな計測技術の可能性が残されているように思えてなりません。

文 献

- 1) 釘宮敏洋：“魔鏡によるウェハー鏡面の評価”，応用物理，**60** (1991) 825-826.
- 2) 家 正則：“能動光学と補償光学”，光技術コンタクト，**29** (1991) 10-18.
- 3) 高見英樹：“すばる望遠鏡補償光学系”，光技術コンタクト，**36** (1998) 27-33.
- 4) F. Roddier, C. Roddier and N. Roddier: “Curvature sensing: A new wavefront sensing method,” Proc. SPIE, **976** (1988) 203-209.
- 5) A. Barty, K.A. Nugent, D. Paganin and A. Roberts: “Quantitative optical phase microscopy,” Opt. Lett., **23** (1998) 817-819.