レーザー回折パターンによる細線表面欠陥の検出[†]

稲 荷 隆 彦*・亀 井 光 仁*

Surface Inspection of Wire Using Diffraction Pattern Produced by Laser

Takahiko INARI* and Mitsuhiro KAMEI*

When a laser beam illuminates a wire with an inclined angle from its running direction, a diffraction pattern like a ring appears around the wire. In scanning with the laser beam across the wire, the diffraction pattern like a ring rotates around the wire if the diameter of the wire is small enough. If the scanned laser beam illuminates the defect on the surface of the wire, the shape of the diffraction pattern is disturbed. The defect, therefore, is detected by photoelectric detection of the disturbance of the pattern using a spatial filter.

The phenomenon described above led the authors to develop an on-line automatic surface inspection system for the wire. Because this system has a new ability we have never had before, its application seems promising from the point of view of automatic inspection.

In this paper, the principle of the automatic inspection system, the outline of our equipment for test, and the discussion for the magnitude of the disturbance of the pattern by the surface defects are described.

1. ま え が き

生産中の金属などの素材の表面に発生する欠陥は、現在多くの場合、生産工程内で作業員の目視により検査が行われている。この検査作業を自動化するために、種々の光学的検査装置が開発されている。

光学的検査装置は通常光源を用いたものと、レーザーを用いたものがあるが、レーザーを用いる場合は、おおむね均一、清浄な表面上の微細な欠陥の検出が目的であり、直径が 0.1mm 程度の欠陥の検出は、通常光源では一般に困難である。

光学的検査装置の重要な問題点は、光線の投射方法とその反射光の集光方法にあり、特にレーザー光線を用

用いる場合には問題となる。またレーザー光線を用いる場合、その反射光強度のみを検知する場合と、金属表面により発生する回折効果を積極的に利用する方法とがある。回折効果を利用すると表面の微細構造の統計的特徴が認識できることは、以前より著者らの提案してきたところであり^{1)~3)}、現実装置として実現されている⁴⁾。

以上述べてきたのは板状の金属面が対象であったが、ここで問題とする ← 細線の場合は、表面欠陥が微細であること、一般的には光は多方向に散乱され、集光系が難しくなること、細線自身の位置変動は、実際の生産工程ではその線径に比較して、相当大幅に許容しなければならないことなどにより、きわめて困難であった。現在生産工程で用いられているのは、主として過電流探傷装置であり、その場合には磁性体や被覆線などの検査には用いることができない。

著者らの開発した方式は、上に述べた表面構造によるレーザー光線の回折効果により、反射光が細線の長手方向を中心軸とする円錐の母線に沿って進むことを利用し、集光系の大幅な簡略化と、上に述べた表面構造の統計的特徴の変化をとらえる方式による微細な欠陥の検出を可能とし、実用的な細線表面検査方式としたところに特長がある。

2. リング状回折パターンの形成

物体表面を表面粗さによる構造体と考える。いま座標系として表面粗さの平均値からなる平面を (x, y) 面とし、光線が照射されている面積の中心を原点 0 とする系を設定する (Fig. 1 参照)。

照射光線がコヒーレントである場合、観測点 $\vec{R}$ において観測される光波は次式で与えられる⁵⁾。

$$\Psi(\vec{R}) = \iint K(\vec{R}; x, y) U(\vec{r}) dx dy \quad (1)$$

ここで $U(\vec{r})$ は散乱点 $\vec{r}$ における反射光波の複素振幅、 $K(\vec{R}; x, y)$ は座標 (x, y) と観測点 $\vec{R}$ により決まる光波の伝播係数である。

[†] 第 13 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 49・8)

* 三菱電機(株)生産技術研究所 尼崎市南清水中野 80

* Manufacturing Development Laboratory, Mitsubishi Electric Co., Amagasaki

(Received April 12, 1976)

Fig. 1 Coordinates system

実際に観測される回折パターンは光波の強度分布であるから、

$$I(\vec{R}) = |\Psi(\vec{R})|^2 = \left| \iint K(\vec{R}; x, y) U(\vec{r}) dx dy \right|^2 \quad (2)$$

で与えられる。この式は、観測される回折パターンは照射面積内にある表面のすべての散乱点より発して観測点 $\vec{R}$ に達する光波を散乱点に関し x 方向、ならびに y 方向に重ね合せ、その2乗をとった結果として表わされることを示している。

いま物体表面と観測面との距離 R が表面粗さに対し十分大きい場合、すなわち各散乱点からの光が互いに干渉を起す範囲を (x, y) として、 $x^2 + y^2 \ll \lambda R$ (ただし λ は光の波長) が成り立つ場合、(1)式の $K(\vec{R}; x, y)$ にそれぞれの位置関係を代入すると、 $\Psi(\vec{R})$ は $U(\vec{r})$ のフーリエ変換で与えられ、(2)式より $I(\vec{R})$ は $U(\vec{R})$ のパワースペクトルに相当していることが示される⁶⁾。物体表面として、一定方向に圧延傷をもつ金属表面などを用いる場合、表面と観測面との関係を Fig. 2 のようにとれば、回折パターンは図のように圧延傷方向を直角となす方向に拡がった帯状のパターンとなる^{1), 2)}。これは上に述べたように、回折パターンが、表面構造からの反射波分布 $U(\vec{r})$ のパワースペクトルで与えられるためである。このことは対象が細線の場合も同様で、やはり帯状のパターンが観測される。

いま照射光線を細線の長手方向と角度 θ_0 をなす方

Fig. 2 Optical configuration for observing the diffraction pattern like a belt

Fig. 3 Forming of diffraction pattern like a ring from a wire

Photo. 1 A diffraction pattern like a ring from a wire

向にとり、観測面を Fig. 3 のように、細線の長手方向に対し直角をなす面にとると、図の中に示したように、帯状の回折パターンはリング状となって観測される。Photo. 1 にその実際の回折パターンの写真を示す。これは照射光線を傾けることにより、細線をその中心軸とし、中心軸と θ_0 の角度をなす直線を母線とした円錐の母線に沿って回折光が分布するためである。このことは照射された面の各散乱点 $\vec{r}$ から観測点 $\vec{R}$ に到達する光波の位相関係に着目すれば簡単に理解できる。Fig. 2 の配置で観測される帯状回折パターンは、円錐の母線が細線とほぼ直角をなし、かつ観測面を細線の長手方向に平行においた、特殊な場合であることがわかる。

3. 細線検査の原理

3.1 欠陥の検出

第2節で述べた回折パターンの光強度分布は、表面の統計的性質により決められる。リング状パターンの円周方向の強度分布は細線表面の圧延傷による回折により決められる。パターンの幅方向の強度分布は細線の長手方向の表面粗さにより決まり、表面が長手方向に完全に均一であれば、幅方向分布は δ 関数で表わされる。実際には表面粗さがあるため、幅方向にある程度の拡がりをもつパターンを与えている。反射光波 $U(\vec{r})$ の長手方向の分布 $[U(\vec{r})]_y$ が Gauss 分布に従うとすると、回折パターンの幅方向強度分布は $[U$

$(\vec{r})_V$ の相関長, ならびにその位相項の分散により決められる⁷⁾.

後述するように, われわれの検査方式では円周方向の分布の変化を検知するのではなく, 幅方向分布の変化を主として検知する. したがって直接的には表面構造の長手方向分布の異常が検知される. 実際には長手方向にのびた欠陥でも, 後述する実験例が示すように, 長手方向の構造の異常が同時に生じており, 実用上は長手方向の構造を検知していても差支えない. 以上のとおりこの検査方式では表面粗さ程度の欠陥まで検知できることになり, きわめて微細な欠陥の検出に有効であることがわかる.

3.2 光線走査と集光

照射光線のスポットの大きさは, 欠陥の検査能(検出できる欠陥の最小の大きさをここでは一応検査能と呼ぶことにする)を上げるために, 直径を 0.2mm 程度にまで集光する. この場合, たとえば細線径が 0.5 mm であれば, 表面を探索するため光線の走査を行わねばならない. また生産工程においては, 細線の位置のある程度の変動は避けられないため, どうしても光線走査は必要である.

いま Fig. 4 のように細線に対し直角方向に走査を行ったとする. 照射スポットの位置が細線表面に沿って回転するために, Fig. 1, Fig. 3 で述べてきた座標系が細線のまわりに回転すると考えてよい. 回転により決められる新しい回折パターンの中心は, 前のパタ

Fig. 4
Rotation of
the diffraction
pattern by
scanning laser
light

Photo. 2 Normal surface of a wire and the diffraction pattern from the surface under scanning laser illumination

Fig. 5 Fundamental configuration of automatic inspection system for wire

ーンの円周上の近傍に位置し, 細線の径が十分小さい場合には, 新しいリング状パターンは前のパターンとほぼ同一の円周上に分布する. したがって光線走査を行えば, 回折パターンは一定のリングの上を回転するように見える. 正常な細線(直径 0.55mm)の表面と場合の光線走査中の回折パターンを, Photo. 2(a), (b)にそれぞれ示す. すなわち細線表面からの反射光は, リング状回折パターンの円周上に常にあることとなり, 反射光の集光系はきわめて簡単な装置でつくることができる.

4. 細線検査装置の構成と動作

われわれの開発した細線検査装置の構成を Fig. 5 に示す. 小形 He-Ne レーザーの光線は集光レンズによりほぼ細線表面付近に集光される. その途中で音叉に取付けた鏡により反射させ, 音叉を振動させることにより, 光線の走査を行う.

回折光はいままで述べてきたとおり, 細線を中心軸とした円錐の母線に沿って進む. 受光側では中央に細線を通過させる孔をもうけた反射鏡により光路を変える. 光電子増倍管の前面に, リング状回折パターンのみを通すようにした空間フィルタが配置されている.

照射光線が正常表面を走査している間, リング状回折パターンは自身の描く円周上を回転するのみであるから, 空間フィルタを通して光電子増倍管に入る光の全強度は不変であり, 出力信号は変化しない. 第3節で述べたように, 表面に欠陥がある場合, 照射スポットがその欠陥部分を通

Photo. 3 Appearance of equipment for test

過する瞬間、リング状回折パターンの幅方向分布が変化し、空間フィルタを通して受光される全強度が変化する。この変化が信号処理装置により検知され、欠陥信号を発生する。Photo. 3 に検査装置の外観を示す。

5. 動作実験例と性能の検討

細線表面の典型的な欠陥例と、対応する回折パターンの変化の様子を Photo. 4 に示す。Photo. 2 に示した正常な表面に対する回折パターンと比較すると、パターンが部分的にくずれていることがわかる。これらのパターンは走査中であり、実際には欠陥部を通過する瞬間のみ、くずれたパターンが現われているのである。Photo. 5 は光電子増倍管から現われた欠陥に対応する信号の波形である。これらの実験は細線の線径が 0.55mm、照射スポット径はほぼ 0.2mm、走査周波数 2.5 kHz で行った。

検出できる欠陥の長さ（細線の長手方向の大きさ）の最小値は主として細線の走行速度と走査周波数に依存する。走査系は実用上音叉のような簡単な装置を用いることが望ましく、その場合 2.5 kHz 程度が普通である。このためたとえ 300 m/分の細線速度の場合、最小の欠陥の長さは 2 mm 程度となる。

第3節で述べた検出の原理から容易にわかるとおり、空間フィルタの環状のスリット幅が狭いほど検査

Photo. 5 Example of waveform of the signal from a defect

能は向上するが、実際にはリング状回折パターンは、完全に一つの環の上を回転しているのではなく、また現実には細線の位置の変動も回折パターンの位置に影響するため、スリットの幅はリング状回折パターン自身の幅よりいくぶん大きくとる必要がある。この幅の大きさはおのおのの対象に対し実験的に選定される。実際の装置の検査能は主としてこうした装置上の制約により決められる。もちろん細線表面自身の反射率の変化や、欠陥でないゴミの影響などは別問題である。また線径が大きくなった場合の検査能についても、以上の議論から推定は容易である。

こうした装置上の制約が除かれた場合、すなわち光線が全被検査表面を走査でき、かつ空間フィルタのスリット幅を回折パターンの幅の程度にすることができ理想的な条件にある場合、その検査能は表面粗さの変化の程度に達する。この場合の表面粗さの程度の一つには第3節で述べたとおり、細線表面からの反射光波 $U(\vec{r})$ 位相成分の分布の相関長と分散の変化率、ならびに照射面積に対する欠陥部分の面積の占める割合とで表わすことができる。この問題についての詳細な検討についてはまだ行っていない。

6. む す び

従来過電流深傷器を用いることができる範囲を除いて、目視に頼るほかに方法のなかった、細線の表面の

自動欠陥検査方式を開発した。細線の長手方向に傾斜した方向からレーザー光を照射した場合におこる、リング状回折パターンを利用することにより、光学的検査方式を困難にしていた反射光の集光方法を大幅に簡略化し、さらに 0.1mm 以下の幅をもつ微細な欠陥の検出を可能にすることができた。

Photo. 4 Example of detection of a defect

- (a) microscopic photograph of defect on the surface
- (b) disturbance of the diffraction pattern like a ring

この欠陥検査方式の検査能は、主として走査周波数と細線の走行速度、線径、ならびに細線の位置変動によって決められる。これらの装置上の制約のない、理想的な状態の場合には、検査能は主として正常表面の表面粗さの変化の程度により決められる。

表面粗さの変化の程度を定量的に表現し、検査能の限界を定義することは残された問題である。またわれわれの実験は主として金属線を用いたが、他の材料への応用の検討も、残された問題である。

参 考 文 献

- 1) 稲荷: レーザ・スペックルパターンによる表面の形状認識, 応用物理学会講演予稿集, p. 262 (1971 秋季)
- 2) 稲荷: レーザ・スペックルパターンによる形状認識, 学振第130委員会光と電波の境界領域研究会 (1972)
- 3) T. Inari: Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent Diffraction Patterns, Proc. 16th SPIE Annual Meeting, 47/53 (1972)
- 4) 長尾, 遠藤, 西邑: 表面欠陥検査装置「TOSPECTOR」700, 東芝レビュー, **30-2**, 139/143 (1975)
- 5) 山口: スペックリングの統計的性質, 光学, **3-2**, 76/92 (1974)
- 6) R.B. Crane: Use of a Laser-Produced Speckle Pattern to Determine Surface Roughness, J. Opt. Soc. Am., **60-12**, 1658/1663
- 7) H. Fujiwara and T. Asakura: Effects of Time-Varying Diffuse Illumination on Holography, Japan. J. Appl. Phys. **7**, 520/528 (1968)