

## 研究

## 光散乱法による表面2重粗さの特性解析

宮崎 英一\*・吉村 武晃\*\*・峯本 工\*\*

\* 神戸大学大学院自然科学研究科, \*\* 同工学部計測工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1

(1991年2月1日受付, 1991年3月22日受理)

Analysis of Surfaces with Two Scales of Roughness  
Using a Light Scattering Method

Eiichi MIYAZAKI,\* Takeaki YOSHIMURA\*\* and Takumi MINEMOTO\*\*

\* The Graduate School of Science and Technology, \*\* Department of Instrumentation  
Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University,  
1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657

(Received February 1, 1991; Accepted March 22, 1991)

The spatial distribution of laser light scattered by the rough surface, whose profile is composed of two Gaussian-random variables, has been theoretically deduced in an explicit form with a Fresnel diffraction approximation. The form of the distribution function depends strongly on two roughness components of the profile and changes from the sum of four Gaussian profiles to single one. From measurements of the cold rolled steels produced really in ironworks, it has been found that the spatial distribution are represented by the sum of two Gaussian profiles and the surfaces of the steels are composed of two scales of roughness. From the analysis of the measured distribution, two rms-slopes of the profile have been determined distinctly.

## 1. はじめに

粗さは、物体の表面特性を決める重要な要因の一つである。鋼板の表面特性は加工性、塗装性等の品質に直接関係する。製品品質の高度化する中で、鋼板の粗さ計測が強く要求されており、特にその製造工程中に測定される必要がある。そのため非接触、オンライン測定が可能なのが条件となっている。また粗さは統計量であるため、表面プロフィールが測定されても、それをさらに統計処理する必要がある。これはオンライン測定の大きな障害となる。これらの観点から粗さ測定法として、局所領域の平均情報が得られる光散乱法が広く研究されている。光散乱法の中でも、粗さの測定レンジが広い回折光強度分布測定法が特に重要である。回折光強度分布の測定値から粗さを一意的に決定するには物体の表面モデルと測定光学系における光波の伝播特性とを十分に把握する必要がある。本研究では表面モデルによる散乱過程と

その回折光強度分布特性とを取り扱う。光波の伝播特性の解析は従来よく用いられているキルヒホッフの回折近似を用いる。この近似が十分適用できる簡単な光学系を用いることにする。さらに解析はスカラー散乱理論を用い、偏光の状態変化は取り扱わない。

回折光の強度分布による表面の粗さ解析は、Beckmann<sup>1)</sup>らによって粗面の高さの確率密度関数がガウス形に従い、自己相関関数もガウス形に従うと仮定して理想的な表面モデルを用いて行われた。しかし実際の表面は、このような理想的表面ではない。このため表面プロフィールのモデルとして自己相関関数を指数関数で近似したり<sup>2)</sup>、周期成分とランダム成分の和からなるとしたり<sup>3)</sup>、二つの異なるプロフィールが重なり合う2重粗さを持つ<sup>4,5)</sup>ような、より実際的な表面モデルが報告されてきた。

本研究では製鉄所等で大量に生産されている普通の鋼板で、低温圧延加工された冷延鋼板を測定対象とする。

この表面は塗料の付着性向上のため、ダブル加工がなされている<sup>6)</sup>。これは圧延工程における調質圧延用ロールに微細な凹凸をつけて鋼板に転写させる加工法である。同一のローラーで圧延を続けるとローラー表面が摩耗し、それによって圧延された鋼板は複雑な表面粗さを持つ。本研究ではこの鋼板が2重粗さを持つとして取り上げる。今までの2重粗さに関する報告<sup>4,5)</sup>では理論式を導出したのみで、実験的に表面粗さを求めていない。そこで2重粗さの散乱過程を基本的に取り扱い、回折光強度分布を実測し、2重粗さを分離して測定できることを示す。

## 2. 2重粗さ表面による回折光の性質

本研究で用いた光学系を Fig. 1 に示す。x-面にある粗面物体にレーザー光を垂直に照射する。照射光と同一偏光方向の検光子を通して、回折光強度の観測面(X-面)で測定する。物体面内の位置ベクトル  $x$  での物体による位相変調量を  $\phi(x)$  とする。照射レーザー光を半径  $W$  のガウス形としたとき、物体で反射した直後の光の電場  $E_s(x)$  は

$$E_s(x) = \exp(-|x^2|/W^2) \exp[i\phi(x)] \quad (1)$$

と表される。粗面による位相変調量は確率的に変化するから、 $E_s(x)$  は確率変数として与えられる。その相互強度は

$$\begin{aligned} \langle E_s(x_1) E_s^*(x_2) \rangle &= \exp\{-(|x_1|^2 + |x_2|^2)/W^2\} \\ &\times \langle \exp[i\{\phi(x_1) - \phi(x_2)\}] \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで  $\langle \dots \rangle$  はアンサンブル平均を表す。物体面から観測面までの点像応答関数を  $K(x, X)$  とすると、観測面での電場  $E(X)$  の相互強度は

$$\begin{aligned} \langle E(X_1) E^*(X_2) \rangle &= \iint \langle E_s(x_1) E_s^*(x_2) \rangle K(x_1, X_1) \\ &\times K^*(x_2, X_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (3)$$

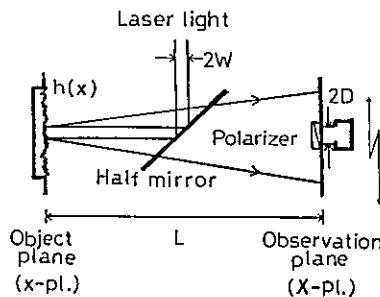


Fig. 1 The optical arrangement used for analysis.

と表される。

いま物体表面が2種類の表面プロファイルの重ね合わせであると仮定する。つまり表面プロファイルは

$$h(x) = h_1(x) + h_2(x) \quad (4)$$

とする。この形で表される物体粗面を2重粗さを持つ表面としよう。定数  $k$  を照射光の波数とする時、Fig. 1での測定光学系では、 $\phi(x) = 2kh(x)$  であるから

$$\phi(x) = \phi_1(x) + \phi_2(x) \quad (5)$$

となる。さらに  $h_1(x)$ ,  $h_2(x)$  は互いに統計的に独立であり、かつ確率密度関数がそれぞれ平均値ゼロのガウス分布に従うと仮定する。この時、 $\phi_1(x)$ ,  $\phi_2(x)$  および  $\phi(x)$  もまたゼロ平均のガウス変数となるから<sup>7)</sup>

$$\begin{aligned} \langle \exp[i\{\phi(x_1) - \phi(x_2)\}] \rangle &= \exp[-\langle \phi^2 \rangle \{1 - \langle \phi(x_1)\phi(x_2) \rangle / \langle \phi^2 \rangle\}] \\ &= \exp[-\langle \phi_1^2 \rangle \{1 - \langle \phi_1(x_1)\phi_1(x_2) \rangle / \langle \phi_1^2 \rangle\}] \\ &\times \exp[-\langle \phi_2^2 \rangle \{1 - \langle \phi_2(x_1)\phi_2(x_2) \rangle / \langle \phi_2^2 \rangle\}] \end{aligned} \quad (6)$$

と表すことができる。ここで表面が空間的に定常であり、 $\langle \phi_j^2 \rangle = \langle \phi_j^2(x) \rangle$  とした。また

$$\begin{aligned} \langle \phi_j^2 \rangle &= 4k^2 \langle h_j^2 \rangle \\ &= 4k^2 R_{s,j}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

の関係があり、 $R_{s,j}$  は表面プロファイルの  $j$  成分の rms 値 (縦粗さ) を表す。式(6)より、2重粗さを持つ表面は  $\phi_1(x)$  と  $\phi_2(x)$  とのそれぞれの関数の積で表される。表面が複数のプロファイルの和の形で与えられているとすると、その位相変調関数は、それらの成分による関数の積で与えられることがわかる。いま、 $j$  番目の成分の表面プロファイルの自己相関関数が、相関長  $R_{c,j}$  を持つガウス分布に従うとすると<sup>8)</sup>

$$\begin{aligned} \exp[-\langle \phi_j^2 \rangle \{1 - \langle \phi_j(x_1)\phi_j(x_2) \rangle / \langle \phi_j^2 \rangle\}] &= \exp(-\langle \phi_j^2 \rangle) \{1 - \exp(-\langle \phi_j^2 \rangle)\} \\ &\times \exp(-g_j |x_1 - x_2|^2 / R_{c,j}^2) \end{aligned} \quad (8)$$

と展開される。ここで、 $g_j$  は(7)式で表された縦粗さ  $R_{s,j}$  に依存する  $\langle \phi_j^2 \rangle$  の関数である。例えば

$$g_j = \langle \phi_j^2 \rangle / \{1 - \exp(-\langle \phi_j^2 \rangle)\} \quad (9)$$

の関数形がよく用いられる<sup>9)</sup>。この  $g_j$  は表面粗さが滑らかなら1に近づき、逆に表面粗さが粗くなれば  $\langle \phi_j^2 \rangle$  に近づく。式(8)の右辺第1項は物体表面の位置に無関係で、スペッキューラ成分を発生させる。第2項は表面の位置の関数であり、散乱成分を発生させる<sup>9)</sup>。

先に仮定した2重粗さを持つ物体面上の電場  $E_s(x)$  の相互強度は(6)、(8)式から求めることができる。表現を簡単にするために

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \exp\{-\langle\phi_1^2\rangle + \langle\phi_2^2\rangle\} \\
 I_2 &= \exp(-\langle\phi_2^2\rangle)\{1 - \exp(-\langle\phi_1^2\rangle)\} \\
 I_3 &= \exp(-\langle\phi_1^2\rangle)\{1 - \exp(-\langle\phi_2^2\rangle)\} \\
 I_4 &= \{1 - \exp(-\langle\phi_1^2\rangle)\}\{1 - \exp(-\langle\phi_2^2\rangle)\} \quad (10)
 \end{aligned}$$

とすると、相互強度は

$$\begin{aligned}
 \langle E_s(x_1)E_s^*(x_2) \rangle \\
 = \exp\{-(|x_1|^2 + |x_2|^2)/W^2\} \\
 \times \{I_1P(\infty) + I_2P(R_1) + I_3P(R_2) \\
 + I_4P(R_1)P(R_2)\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

のように4項の和として表される。ここで

$$P(R_j) = \exp(-|x_1 - x_2|^2/R_j^2) \quad (12)$$

$$R_j^2 = R_{c,j}^2/(2q_j) \quad (13)$$

である。

簡単のため  $W$  が無限大の一様照明とし、物体面で反射した直後の光波の性質を調べる。ここでの光強度は  $x_1 = x_2$  とすればつまり  $P(R_j) = 1$  となる。このとき各項の光強度は(10)式で与えられる。 $I_1 \sim I_4$  はそれぞれ2種類の関数の積で表されている。これは、2重粗さ表面による散乱は2種類の散乱過程に分解され、しかもそれぞれの過程でスペキュラ成分と散乱成分とを発生させることを示している。したがって(11)式の第1項は、2重粗さ表面の第1成分と第2成分とで、ともにスペキュラ成分が発生する光強度の割合を示す。特に物体表面が完全に滑らかならその値は1となり  $I_2 = I_3 = I_4 = 0$  となる。第2項は粗面の第1成分で散乱成分、第2成分でスペキュラ成分が発生する光強度を示す。第3項はその逆の場合を示す。第4項は粗面の第1成分と第2成分の双方で散乱成分が発生する光強度を示す。

物体面 ( $x$ -面) では(11)式によって与えられる光が発生している。観測面は Fig. 1 に示すように、その光が距離  $L$  だけ自由空間を伝播した位置にある。この光学系の伝播特性を表す点像応答関数として、フレネル回折近似を用いる。 $K(x, X)$  の関数形が決まると観測面での回折光強度分布を求めることができる。全強度で規格化した回折光の強度分布は

$$\begin{aligned}
 \langle I(X) \rangle &= I_1 G(WL^2; X) + I_2 G\{2L/(kR_1)\}^2 \\
 &+ WL^2; X + I_3 G\{2L/(kR_2)\}^2 \\
 &+ WL^2; X + I_4 G\{2L/(kR_1)\}^2 \\
 &+ \{2L/(kR_2)\}^2 + WL^2; X \quad (14)
 \end{aligned}$$

と表される。ここで  $WL^2 = (2L/kW)^2 + W^2$  として、ガウス関数を規格化し

$$G(\sigma^2; X) = \{(2/\pi)/\sigma^2\} \exp(-2|X|^2/\sigma^2) \quad (15)$$

とした。2重粗さ表面による回折光強度分布は一般に四つのガウス関数の和として与えられる。式(14)の各項

は(11)式のそれと対応して表してある。例えば、第1項はスペキュラ成分のみによる回折光強度分布を表している。

### 3. 回折光の近似表示

2重粗さを持つ粗面による回折光強度分布は、ガウス関数の和で表される。この強度分布を四つのガウス関数に波形分離し、 $X=0$  での強度および半値半幅を決定すれば、2重粗さの各成分  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$  を決定することができる。この波形分離が可能であるためには(10)式の  $I_1 \sim I_4$  が正確に測定できる必要がある。しかしこれらの値は粗さと共に指数関数的に変化するため、測定系は数桁の直線性が必要となる。現実の測定系で、この精度を保つには高精度の測定装置が必要となる。そこで本研究では光強度の測定限界を最大測定値の1%と仮定し、簡便な測定系でも2重粗さ測定が可能な条件を考察する。つまり表面粗さの  $j$  成分によるスペキュラ成分の測定限界を  $\exp(-\langle\phi_j^2\rangle) > 0.01$ 、散乱成分の検出限界を  $\{1 - \exp(-\langle\phi_j^2\rangle)\} > 0.01$  とする。この条件で測定可能な範囲は  $4.6 > \langle\phi_j^2\rangle > 0.01$  となる。

2重粗さの特別な例として一方が極めて滑らかな表面をまず取り扱う。位相変調量が  $\langle\phi^2\rangle < 0.01$  とし、 $\exp(-\langle\phi^2\rangle) = 1$  と近似できるとする。 $I_3 = I_4 = 0$  となるから(14)式回折光強度分布は

$$\begin{aligned}
 \langle I(X) \rangle &= \exp(-\langle\phi^2\rangle) G(WL^2; X) \\
 &+ \{1 - \exp(-\langle\phi^2\rangle)\} G\{2L/(kR)\}^2 \\
 &+ WL^2; X \quad (16)
 \end{aligned}$$

となる。この表面は  $h_1(x)$  のみによる1重粗さを示す。点像応答関数としてフラウンホーファ回折近似が成立する領域では、 $L$  が  $W$  に比較して十分大きいので  $WL = 2L/(kW)$  となる。このように置くことにより(14)、(16)式はフラウンホーファ回折近似を満足する領域でも成立する。この結果は他の1重粗さに関するフラウンホーファ回折近似による解析結果<sup>1,10)</sup>と一致する。つまり、(14)式は2重粗さの回折式を一般的に表すものと考えられる。

回折光強度分布は(14)式に示すように四つのガウス関数で表される。しかし表面粗さの2成分が、それぞれどの程度かによって、その強度分布の形が大きく変化する。2重のプロファイルからなる表面粗さを測定するのに有効な回折光強度分布は次に示す a) ~ d) の四つに分類される。ただし2重粗さは、 $\langle\phi_1^2\rangle > \langle\phi_2^2\rangle$  の関係を満足するものとして取り扱う。

a)  $4.6 > \langle\phi_1^2\rangle + \langle\phi_2^2\rangle > \langle\phi_1^2\rangle > \langle\phi_2^2\rangle > 0.01$  の場合

式(10)に示す  $I_1 \sim I_4$  はすべて測定される。したがって回折光は(14)式で表され、4種類の項からなる。四つのガウス形に波形分離し、 $I_1 \sim I_4$  および半値幅を求める。 $I_1 \sim I_4$  より  $\langle \phi_1^2 \rangle, \langle \phi_2^2 \rangle$  を求め、 $R_{s1}, R_{s2}$  を決定する。半値幅から  $R_1, R_2$  を求め、 $R_{c1}, R_{c2}$  を決定する。2重粗さを分離できると同時に、それぞれ縦粗さと横粗関長とを分離して求めることができる。

b)  $\langle \phi_1^2 \rangle + \langle \phi_2^2 \rangle > 4.6 > \langle \phi_1^2 \rangle > \langle \phi_2^2 \rangle > 0.01$  の場合  $\langle \phi_1^2 \rangle + \langle \phi_2^2 \rangle > 4.6$  であるため、 $I_1 = 0$  となり回折光にスペキュラ成分が存在しない。他の  $I_2 \sim I_4$  は有効な値であるから回折光は

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{X}) \rangle = & \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) G \{ (2L/kR_1)^2 + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \\ & + \exp(-\langle \phi_1^2 \rangle) G \{ (2L/kR_2)^2 + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \\ & + \{ 1 - \exp(-\langle \phi_1^2 \rangle) - \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) \} \\ & \times G \{ (2L/kR_1)^2 + (2L/kR_2)^2 + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \end{aligned} \quad (17)$$

と三つのガウス関数で与えられる。右辺第1項の半値幅から  $R_1$  が、第2項の半値幅から  $R_2$  が決定できる。第1項、第2項の強度より  $\langle \phi_1^2 \rangle, \langle \phi_2^2 \rangle$  が求まる。そのため粗さのパラメータ  $R_{s1}, R_{s2}, R_{c1}, R_{c2}$  が決定される。

c)  $\langle \phi_1^2 \rangle > 4.6 > \langle \phi_2^2 \rangle > 0.01$  の場合

$I_1 = I_3 = 0$  であるから、回折光の強度分布は二つのガウス関数の和からなる。回折光は

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{X}) \rangle = & \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) G \{ (2L/kR_1)^2 + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \\ & + \{ 1 - \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) \} G \{ (2L/kR_1)^2 \\ & + (2L/kR_2)^2 + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \end{aligned} \quad (18)$$

と与えられる。回折光強度分布を波形分離することで  $R_{s1}, R_{c2}$  が決定される。しかし  $R_{s1}$  と  $R_{c1}$  とは分離して求めることができない。これは、 $\langle \phi_1^2 \rangle$  が測定限界外

にあり、縦粗さの情報  $R_{s1}$  が欠落するためである。しかし(18)式からわかるように、回折光の広がり  $R_j$  で決定される。 $R_j$  は(13)式で与えられ、表面プロファイルの傾きとして粗さ情報を持つことがわかる。ここで表面プロファイルの傾きの標準偏差  $S_j$  を導入する。表面プロファイルの自己相関関数が、ガウス分布に従うとすると

$$S_j^2 = 2R_{s1}^2 / R_{c1}^2 \quad (19)$$

の関係がある。この関係を(18)式に代入すると

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{X}) \rangle = & \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) G \{ (4LS_1)^2 + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \\ & + \{ 1 - \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) \} G \{ (4LS_1)^2 \\ & + (4LS_2)^2 / \{ 1 - \exp(-\langle \phi_2^2 \rangle) \} + W_L^2; \mathbf{X}^2 \} \end{aligned} \quad (20)$$

となる。ここで  $\rho_1 = \langle \phi_1^2 \rangle$  とおいた。表面プロファイルの傾きの標準偏差を用いて2重粗さを分離することができる。

d)  $\langle \phi_1^2 \rangle > \langle \phi_2^2 \rangle > 4.6$  の場合

$I_1 = I_2 = I_3 = 0$  となり、回折光強度分布は単一のガウス形となる。そのため2重粗さを分離することができない。しかし  $S_1, S_2$  を用いて、 $S = (S_1^2 + S_2^2)^{1/2}$  として平方平均された値が求まる。

#### 4. 冷延鋼板の粗さ測定

まず本研究で用いた19種類の冷延鋼板の表面粗さを、回折光強度分布法の結果と比較するために、従来から用いられている信頼性の高い機械的触針式粗さ計で調べた。測定結果の一例を Fig. 2 に示す。触針式粗さ計はスタイラス半径  $10 \mu\text{m}$  の、サーフコム 110 A (東京精密製) である。図(a)は表面プロファイルの確率密度関数  $P_r(h)$ 、図(b)はその自己相関関数  $C(|x_1 - x_2|)$  であ

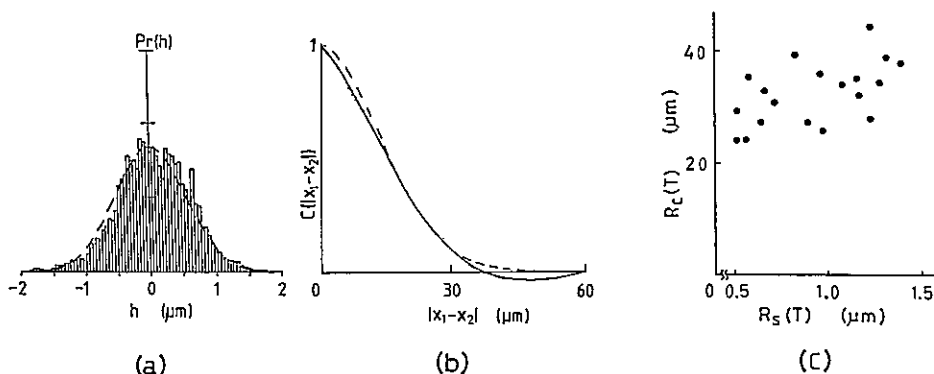


Fig. 2 (a) Height distribution function for the surface profile. The dashed curve represents Gaussian distribution function with  $R_c(T) = 0.54 \mu\text{m}$ . (b) Correlation function of the surface height. The solid curve is the experimental values, and the dashed curve is a Gaussian function with  $R_c(T) = 19.4 \mu\text{m}$ , fitted to the experimental curve. (c) The surface roughness analyzed by a mechanical profilometer.

る。実線は測定値、点線はそれにフィットさせたガウス関数を表す。いずれも単一のガウス形によく近似される。触針式粗さ計による表面粗さは一般に表面プロファイルの rms 値で表され、それを  $R_s(T)$  とする。この値は図(a)の確率密度関数の標準偏差から求めることができる。また表面プロファイルの自己相関関数から横相関長  $R_c(T)$  が決定できる。

粗さ特性をまとめたものが図(c)である。 $R_s(T)$  と  $R_c(T)$  には相関があり、 $R_s(T)$  が増加すると  $R_c(T)$  もわずかながら増加する。表面粗さ  $R_s(T)$  は  $0.53 \mu\text{m}$  から  $1.45 \mu\text{m}$  の範囲にある。これを波長  $633 \text{ nm}$  での位相変調量に換算すると  $10.6 < \langle \phi^2 \rangle^{1/2} < 28.9$  となる。光散乱法で測定するには極めて粗い表面であるといえる。確率密度関数が単一のガウス関数で表されるので表面が1重粗さか、多重粗さかは判別できない。これは2重粗さとしても互いに独立な変数の和で表される確率密度関数は畳み込み積分で与えられるので、単一のガウス関数となるからである。しかし多重粗さを持つとしても、それらの成分がガウス分布に従うことがわかる。さらに2重粗さを持つとした時、その自己相関関数は第1成分と第2成分による自己相関関数の和で与えられる。ここで各成分の相関関数のピーク値はそれぞれ、 $R_{s1}^2/(R_{s1}^2 + R_{s2}^2)$  と  $R_{s2}^2/(R_{s1}^2 + R_{s2}^2)$  とである。自己相関関数の測定精度を最大値の1%と仮定しよう。このとき  $R_{s1} \geq 10 R_{s2}$  の条件を満足すれば、表面が2重粗さとしても自己相関関数は単一のガウス形に近似される。つまり触針式粗さ計の測定結果からは、冷延鋼板の表面が1重粗さか、あるいは  $R_{s1} \geq 10 R_{s2}$  の条件の2重粗さか、容易に判別できない。

これらの冷延鋼板による回折光強度分布を、Fig. 1の光学系を用いて測定した。半径  $W=2.1 \text{ mm}$  の He-Ne レーザ光を物体に照射し、物体面から  $L=120 \text{ mm}$  離れた観測面での光強度を開口半径  $100 \mu\text{m}$  の光電子増倍管で測定した。この光学系条件では  $W$  が大きい場合  $WL=W$  を満足する。測定の一例を Fig. 3(a) に示す。図(b)は最小2乗法を用いて2種類のガウス関数に波形分離した結果を示す。回折光強度分布は2種類のガウス関数の和で近似される。このことは1重粗さなら(16)式、2重粗さなら(18)式で回折式が与えられることを示す。さらにこのガウス関数の半値幅は両者とも(16)式第1項の半値幅  $W_L=2.1 \text{ mm}$  と異なっている。このことは回折光強度にスペキュラ成分が存在しないことを表す。このことを詳しく調べたのが図(c)である。図(a)の強度分布から図(b)の波形の合成値を差し引いた

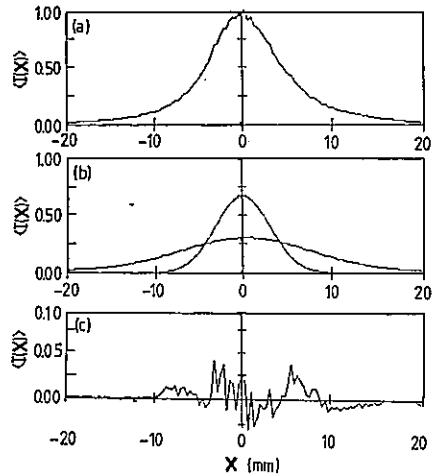
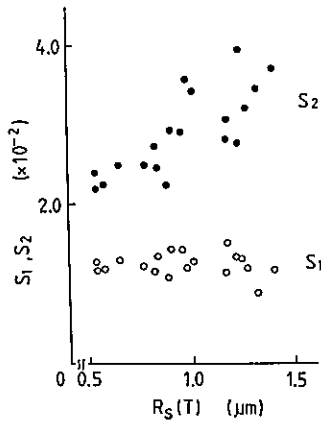
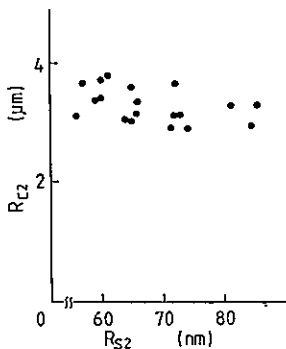


Fig. 3 (a) Intensity distribution scattered by a cold rolled steel. (b) Two Gaussian functions analyzed from the experimental curve. (c) The error distribution between the experimental curve and the analyzed function.

残差を拡大して表示してある。この結果より、検出限界内ではスペキュラ成分が存在しない。したがって Fig. 3 で用いた鋼板の表面は2重粗さを持つ。本研究で用いた19種類のすべての鋼板から観測された回折光強度分布は、スペキュラ成分を持たない2種類のガウス関数の和で表された。したがって冷延鋼板は  $R_{s1} \geq 10 R_{s2}$  を満足する2重粗さを持ち、それぞれの粗さの大きさは3章の(c)の条件に属するので粗さの解析には(20)式を用いれば良いことがわかる。

式(20)の右辺第1項と第2項のガウス関数の標準偏差をそれぞれ  $\Gamma_1, \Gamma_2$  とする。これらの値は(15)式で定義した  $\sigma$  と  $2\Gamma_i = \sigma_i$  の関係がある。もし  $\Gamma_1 \approx \Gamma_2$  であるとする、回折光強度分布を測定しても2種類のガウス関数に波形分離することが不可能となる。これは回折光の広がりか、表面の縦粗さだけでなく横相関長にも強く依存しているからである。2重粗さの縦粗さ  $R_{s1}, R_{s2}$  が大きく異なっても  $R_{c1}, R_{c2}$  の条件によっては同じ回折広がりを示す場合がある。式(20)からわかるように、 $\exp(-\langle \phi^2 \rangle) \ll 1$  の条件で  $S_2$  の値が  $S_1$  に比べて極端に小さくなければ、波形分離が可能となる。本研究で用いた冷延鋼板を測定した結果は  $2.4 \text{ mm} < \Gamma_1 < 3.8 \text{ mm}$ ,  $6.8 \text{ mm} < \Gamma_2 < 10.4 \text{ mm}$  であった。 $\Gamma_2$  は  $\Gamma_1$  の約2倍から3倍であり、波形分離が容易に行えることがわかった。式(20)を用いて  $S_1$  と  $S_2$  を分離して得られた結果を Fig. 4 に示す。横軸は触針式粗さ計によって得られた縦粗さ  $R_s(T)$  である。 $S_1$  を測定してもほぼ

Fig. 4 Dependence of  $S_1$  and  $S_2$  on  $R_s(T)$ .Fig. 5 Dependence of  $R_{c2}$  on  $R_{s2}$ .

一定であり、鋼板の粗さ変化をとらえることができない。しかし  $S_2$  は  $R_s(T)$  に比例しており、 $S_2$  から鋼板の粗さ変化をとらえることができる。回折光強度分布測定法を用いて、冷延鋼板の表面粗さをモニターするとすれば、2重粗さの第2成分を主に観測していることがわかった。表面粗さの第2成分を(20)式を用いて解析した結果を Fig. 5 に示す。第2成分に関しては縦粗さ  $R_{s2}$  と横相関長  $R_{c2}$  を決定できる。

Fig. 4 の  $S_1$  と  $S_2$  の関係を利用すれば、冷延鋼板の表面特性を考察することができる。同図より  $S_2 > S_1$  となっているので冷延鋼板の粗さ特性が  $R_{s1}/R_{s2} < R_{c1}/R_{c2}$  の条件を満足している。この条件と定義  $R_{s1} > R_{s2}$  より、 $R_{c1} > R_{c2}$  の関係が導出される。表面の第1成分は第2成分より縦粗さが大きく、横相関長が第2成分より長い。さらに各成分について粗さ特性を調べる。第1成分の粗さに関して Fig. 4 より、 $S_1$  は全部の冷延鋼板に対して一定である。式(19)より  $R_{s1}$  と  $R_{c1}$  とは比例関係にある。表面粗さの第1成分は縦粗さが粗くなると横相関長が増加する特性を持つ。第2成分の粗さは Fig. 5 より、

$R_{s2}$  が増加するに連れて  $R_{c2}$  が減少する粗さ特性を持つ。以上より、2重粗さを持つ冷延鋼板の表面は、縦粗さと横相関長の相関関係が第1成分と第2成分とで異なることがわかった。このため各々の成分の粗さの生成過程が異なると考えられる。つまり第1成分の粗さはダブル加工によって発生し、第2成分の粗さは圧延ロールの表面疲労のため発生すると思われる。

## 5. おわりに

表面が2重粗さを持ち、それぞれの表面プロファイルが互いに独立な和の形で与えられるとして回折光強度分布の解析を行った。その結果、2重粗さの散乱過程ではそれぞれの粗さ成分で散乱され、スペキュラ成分と散乱成分とを発生させる。このため散乱光は4種類の異なった性質のものから構成される。また2重粗さのそれぞれの成分の粗さに応じて、回折光強度分布の形状が大きく変化する。ここで用いた冷延鋼板による回折光強度分布は2種類のガウス形関数の和で与えられ、しかもスペキュラ成分が存在しない。これより、鋼板は2重粗さをもつことがわかった。しかも、2重粗さを傾きの標準偏差として分離して決定することができた。回折光強度分布測定法では2重粗さのうち一方の傾きの標準偏差が粗さ依存性を示し、冷延鋼板の圧延による表面の微細な変化をとらえることができた。さらにこの2重粗さの各成分の粗さ特性が異なるので、その発生原因が異なることがわかった。

本研究で用いた冷延鋼板と触針法によるそれらの性質は住友金属工業(株)より提供されたものである。ここに感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) P. Beckmann and A. Spizzichino: *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* (Pergamon Press, New York, 1963).
- 2) J. A. Ogilvy and J. R. Foster: "Rough surfaces: gaussian or exponential statistics," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **22** (1986) 1243-1251.
- 3) J. Ohtsubo: "Measurement of roughness properties of diamond-turned metal surfaces using light scattering method," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 982-987.
- 4) P. Beckmann: "Scattering by composite rough surfaces," *Proc. IEE.*, **17** (1965) 1012-1015.
- 5) J. C. Leader: "An analysis of the spatial coherence of laser light scattered from a surface with two scales of roughness," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 536-546.
- 6) 岩村忠明: "鉄鋼業における計測技術", 計測と制御, **29** (1990) 10-19.

- 7) T. Yoshimura: "Statistical properties of dynamic speckles," J. Opt. Soc. Am. A, 3 (1986) 1022-1054.
- 8) T. Yoshimura, K. Kato and K. Nakagawa: "Surface roughness dependence of the intensity correlation function under speckle-pattern illumination," J. Opt. Soc. Am. A, 7 (1990) 2254-2259.
- 9) B. Ruffing and J. Fleischer: "Spectra of partially or fully developed speckle patterns generated by rough surfaces," J. Opt. Soc. Am. A, 2 (1985) 1637-1643.
- 10) 安達正明, 林 昭博, 沖田耕三: "反射されたレーザー光の広がりを用いる曲面状の粗面のモニタリング", 精密工学会誌, 6 (1986) 1042-1049.