

新しい粗度評価法と鋼板面での光の散乱特性解析への応用*

高藤 英生**・石田 次雄**・草鹿履一郎***

A New Quantitative Representation of Surface Roughness and Its Application to the Analysis of Light Scattering from Steel Sheet Surfaces

Hideo TAKAFUJI, Tsugio ISHIDA, and Riichiro KUSAKA

Synopsis:

An automatic analysis system for surface roughness has been developed by incorporating a roughness measuring instrument of the probe type to a laboratory automation system. This system facilitates the measurement and statistical analysis of random profiles of rough surfaces which require a great deal of work and time.

1) First a new quantitative representation of surface roughness was established in this system and the statistical characteristics of surface profiles of cold rolled steel sheet were analysed.

2) Next the spatial intensity distribution of laser beam scattering from the same surfaces was examined by a photogoniometer.

From these experiments the relation between surface roughness and light scattering characteristics of dull finished sheet was obtained.

This result suggests the possibility of non-contacting, on-line inspection technique of surface roughness.

This system will be useful for the investigation of surface characteristics of steel products, such as the surface appearance, paint adhesion, plating, and drawing qualities.

1. 緒 論

表面粗度は、工業製品や機械部品の表面機能に関する重要な量であるが、鉄鋼業においても、圧延製品の塗装性やめつき性、薄鋼板のプレス成型時の加工性、あるいは表面光沢や美観、圧延時の摩擦潤滑やロールの寿命、鋼管内面の流体熱伝達など、多くの問題に関連しており、今後製品の高級化、用途の多様化に伴って、益々重要になってくると考えられる¹⁾。

しかるに現状では、表面粗度と表面機能の関連は、十分調べられているとはいえない。これは、表面機能に係る要素が粗度以外にも多いので、問題の整理が難しいこともあるが、粗度の測定法、評価法にも、問題なしとはいえない。すなわち、JISなどの規格では、機械加工面のような比較的規則性のある面を対象に、触針式を

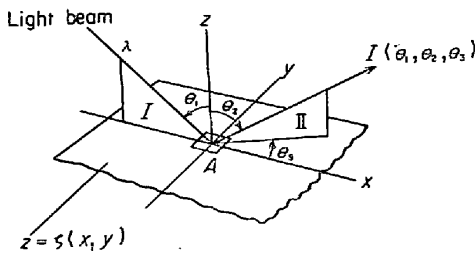
測定法の基準として、最大高さ R_{max} や中心線平均あらさ R_a のような簡単な表示法を定めているが、これをそのまま、圧延鋼板面のような不規則な面に適用するには、不十分である。しかし大量のデータ処理を行なつて適当な評価をする手段が容易に得られないため、止むを得ず簡単な測定と限られた表示法でもつて粗度を論じているのが、一般の現状である。

一方、粗面での光の反射散乱特性から、その面の粗度を評価することは、従来から試みられており、文献も多い。しかしそれらは往々にして、散乱特性を単純に R_{max} や R_a と関連づけたり、また粗面の統計的情報を十分考慮に入れたものでも、理論解析に終始して、実験的裏付けのされているものがすくなく、この問題の研究は完了していない。しかしこの方法は、非破壊・非接触的手法であり、面のある大きさの部分の平均的な情報が得

* 昭和49年11月本会講演大会にて発表 昭和50年4月30日受付 (Received April 30, 1975)

** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 理博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)



$z = \zeta(x, y)$: rough surface
 $z = 0$: mean level of surface
 I : plane of incidence
 \mathbf{I} : scattering surface
 θ_1 : angle of incidence
 $A = L_x \cdot L_y$: beam spot area on rough surface
 $I = I(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$: intensity distribution of beam scattering in the direction of θ_2, θ_3

Fig. 1. Light scattering from a rough surface.

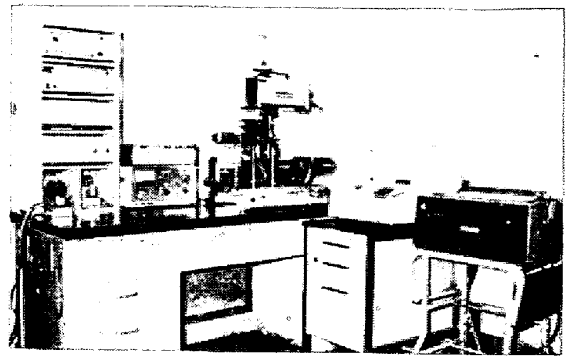


Photo. 1. A computer aided analysis system for surface roughness.

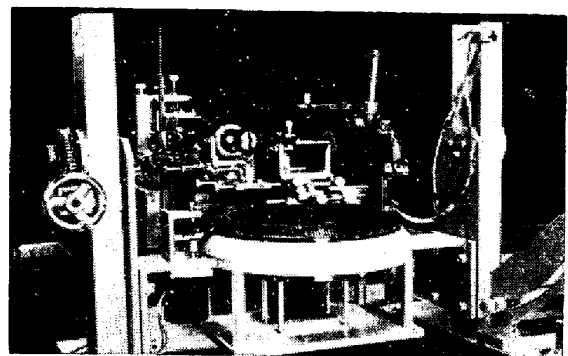


Photo. 2. A photogoniometer.

られるという特長もあつて、生産現場における操業管理、品質管理などへの実用も期待される。

以上のような事情を考慮に入れ、

- 1) 触針式粗度計を電算機に直結し、鋼板粗面の解析を行なう粗度解析システム
- 2) レーザービームを鋼板粗面に入射し、散乱光の強度分布を測定するフォトゴニオメーター

を用いて、冷延鋼板面の表面粗度と、レーザービームの散乱特性の解析を行なつたので報告する。

2. 理 論

— 不規則面における光の散乱 —

粗面における光の散乱理論に関しては、すでに多くの研究があるので、解析にあつては、それらの結果を借用する。従つて詳細は文献²⁾にゆずり、ここでは簡単に概略を述べる。

(問題) 解くべき問題は、Fig. 1 に示すように、粗面 $z = \zeta(x, y)$ 上のスポット $A (L_x \cdot L_y)$ に入射角 θ_1 で、波長 λ の平行光束が入射した場合、 (θ_2, θ_3) 方向の光の散乱強度分布 $I = I(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を求めることである。

(一般解) 入射光束は入射面に平行に偏光した平面波とし、粗面が完全導体とすると、反射率 $R = 1$ である。さらに粗面凹凸の曲率が波長 λ に比べて大きく、したがつて粗面上の点の電場の強さは、その点に想定した接平面上の場の強さに等しいと仮定して、ヘルムホルツの式を解くと、散乱光の場の強さ ρ は、粗面形状 $z = \zeta(x, y)$ の関数として求まる。

$$\rho(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \rho\{\zeta(x, y), \lambda\} \dots\dots\dots (1)$$

(統計解) 上式を厳密に解いて、不規則面 $z = \zeta(x, y)$ について数値解を求めることは面倒でもあり、また今の場合意味もないので、ここでは統計的な扱いをして、散

乱強度の平均値を、粗面形状の統計的特性値で表現することを試みる。

最終的に求めるものは、場の強度であるから、

$$\begin{aligned}
 I &= \langle \rho \cdot \rho^* \rangle = \langle \rho \rangle \cdot \langle \rho^* \rangle + D\{\rho\} \\
 &= I\{\chi_1(v_z), \chi_2(v_z, -v_z)\} \\
 &= I\{p(z), p_2(z_1, z_2)\} \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

ただし $\chi_1(v) = \int_{-\infty}^{\infty} p(z) e^{iv_z} dz$

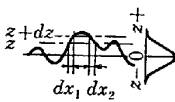
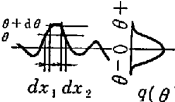
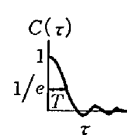
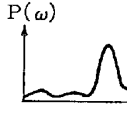
$$\chi_2(v_1, v_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_2(z_1, z_2) e^{iv_1 z_1 + iv_2 z_2}$$

すなわち、 I は粗面 ζ の一次元および二次元の characteristic function $\chi_1(v), \chi_2(v_1, v_2)$ したがつて粗面 ζ の一次元および二次元の波高分布 (probability density) $p(z), p_2(z_1, z_2)$ によつてあらわされる。さらに統計学の教えるところにより、これらはまた波高分布 $p(z)$ および自己相関々数 (auto-correlation function) $c(\tau)$ によつてきまる。 $p(z), c(\tau)$ は周知のように Table 1 に示すようなもので、各々 $z = \zeta(x, y)$ の波高値および周波数に関する統計的特性をあらわす量である。

以上をまとめると、結局、散乱強度分布は、次式で表現されることになる。

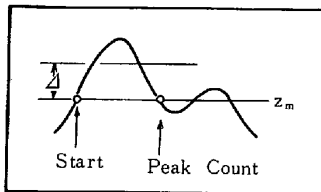
$$I(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = I\{p(z), c(\tau)\} \dots\dots\dots (3)$$

Table 1 本研究で用いた粗度解析表示法

粗面性状の種類	表示名	記号	定義	備考
振幅	平均あらさ	Ra	$\frac{1}{L} \int_0^L z - z_m dx$	z_m : 中心線
	二乗平均あらさ	RMS	$\sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (z - z_m)^2 dx}$	$z_m = \frac{1}{L} \int_0^L z dx$
	高さ分布	$p(z)$	$\lim_{dz \rightarrow 0} \frac{1}{L} (dx_1 + dx_2 + \dots)$	 <p>$p(z)$が正規分布になる場合 $\sigma_a = \text{RMS}$</p>
σ_a		$\frac{1}{\sqrt{2\pi} p(0)}$		
傾斜角	平均傾斜角	θ_a	$\frac{1}{L} \int_0^L \theta - \theta_m dx$	$\theta = dz/dx$ θ_m : 中心線
	二乗平均傾斜角	θ_{rms}	$\sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (\theta - \theta_m)^2 dx}$	$\theta_m = \frac{1}{L} \int_0^L \theta dx$
	傾斜角分布	$q(\theta)$	$\lim_{d\theta \rightarrow 0} \frac{1}{L} (dx_1 + dx_2 + \dots)$	 <p>$q(\theta)$が正規分布になる場合 $\sigma_\theta = \theta_{rms}$</p>
σ_θ		$\frac{1}{\sqrt{2\pi} q(0)}$		
周波数	Peaks per inch*	PPI (Δ)	$\frac{\text{レベル}\Delta\text{をこえる山の数}}{1 \text{ インチ}}$	Δ を粗度計のFull Scaleによって決める。 $\Delta = \alpha \cdot \text{F.S.}$
		* PPI (Δ^*)	$\frac{\text{レベル}\Delta^*\text{をこえる山の数}}{1 \text{ インチ}}$	Δ^* をその面のRMS値によって決める。 $\Delta^* = \alpha \cdot \text{RMS}$
	自己相関	$C(\tau)$	$\Psi(\tau) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} z(x) \cdot z(x+\tau) dx$ $C(\tau) = \Psi(\tau) / \Psi(0)$	
T	$C(\tau)$ が $1/e$ になる時の τ の値 $C(T) = C(0)/e$			
パワースペクトル	$P(\omega)$	$P(\omega_n) = a_n^2 + b_n^2$ $Z(x) = a_0 + b_0 + \sum_{n=1}^{N-1} (a_n \sin \omega_n x + b_n \cos \omega_n x)$		

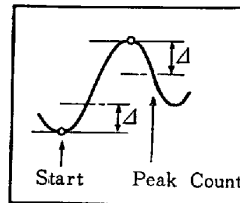
* PPIは、ピークの認識の仕方によって、次の二つに大別される。

(1) PPI1



- ① 中心線 z_m をよぎる。
 - ② あるレベル Δ をこえる。
 - ③ 中心線 をよぎる。
- ↓
レベル Δ のピークをカウントする。

(2) PPI2



- ① 上昇開始
 - ② あるレベル Δ 以上上昇
 - ③ あるレベル Δ 以上下降
- ↓
レベル Δ のピークをカウントする。

PPI1は、中心線を軸にレベル Δ を(+)側にとったPPI1 Pと、(-)側にとったPPI1 Mの二つに区別することができる。

3. 装置

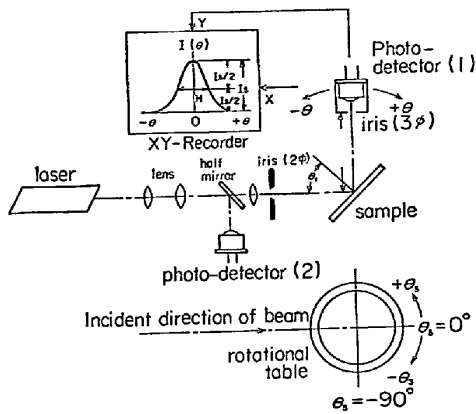
3.1 粗度解析システム (Photo. 1)

新日鉄基礎研究所では、分析・計測などの各種実験装置を中型計算機 IBM 1800 に直結し、併列自動運転により、装置群の運転操作、データの採取、処理、解析および結果の表示を行なわせるラボラトリーオートメーションシステム (LA) が稼動している³⁾。

そこで、触針式粗度計 (東京精密 SURFCOM-3 B) を LA に組み込み、粗度解析システムを構成した。これにより、粗面形状の大量データの測定、解析は完全に自動的に行われる。

3.2 フォトゴニオメーター (Photo. 2)

粗面での光の散乱強度分布を測定するため、レーザーとゴニオ機構を組合せたフォトゴニオメーターを試作した。本装置は、Fig. 1 に示すように、入射角 θ_1 でレー



Laser : He-Ne $\lambda=0.632\mu$ TEM₀₀
 Incident beam : 2mm ϕ
 Photo-detector : silicon cell (SBC-2020, Sharp) with an iris (3 ϕ) aperture angle=1.7 deg

Fig. 2. Schematic diagram of photogoniometer for measuring the spatial intensity distribution of scattering laser beam.

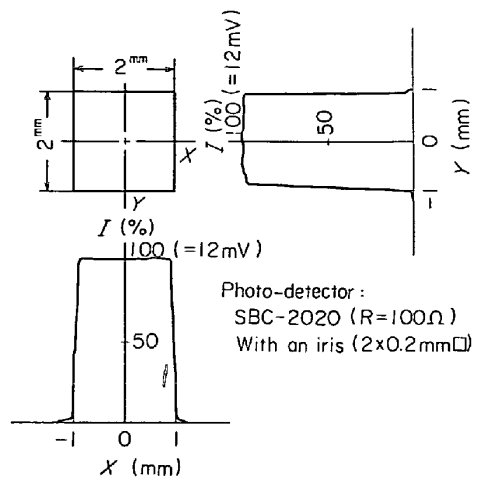
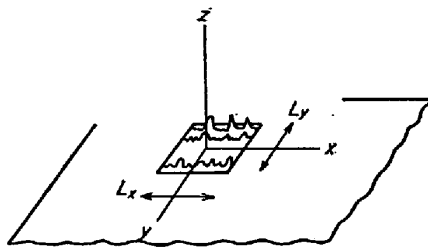


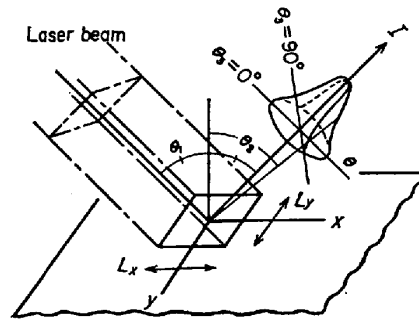
Fig. 3. Intensity distribution of incident laser beam, measured by scanning a photo-detector perpendicular to the incidence direction.

(a) Surface roughness analysis



Measurement spot area : $L_x(2500\mu) \cdot L_y(2500\mu)$
 Sampling distance : $\Delta x=1\mu, \Delta y=100\mu$
 Measurement : $z=\zeta(x, y)$
 Analysis : Table 1

(b) Light scattering measurement



Sectional area of incidence beam : $2000\mu \times 2000\mu$
 Beam spot area on sample surface : $L_x(2800\mu) \cdot L_y(2000\mu)$
 Plane of incidence : $(x; z)$
 Angle of incidence : $\theta_1=45^\circ$
 Angle of scattering : $\theta_3=0^\circ, 90^\circ \theta=\theta_2-\theta_1$
 Measurement : $I=I(\theta; \theta_1, \theta_3)$
 Analysis : I_s (peak value of I)
 H (half width value of I)

Fig. 4. Measurement of surface roughness and laser beam scattering distribution on the same spot of a rolled steel sheet surface (y : rolling direction).

レーザービームを入射させ、正反射方向 ($\theta_2=\theta_1$) を中心とする散乱光強度分布 $I=I(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を測定し、分布のピーク値 I_s 、半値幅 H を求めるものである。

3.3 測定試料

試料は超音波洗浄を行ない、表面の汚れや油を除去した。実験は比較的等方的な粗面を有するダル鋼板を中心に行なった。

- 冷延薄板 50×45×t
- ダル (18枚)
- ブライト (2枚) スクラッチダル (2枚)

4. 実 験

試料面のほぼ同一個所、同一面積の部分 (スポット) について、上述の装置を用いて、表面粗度解析と散乱強度測定を行なった。実験条件は、Fig. 4 に示す。

5. 結 果

5.1 冷延鋼板面粗度の統計的性質

- 1) 面内の粗度のばらつき
 解析に先立ち、スポット内をどの程度細かく測定すれ

ば必要十分かを調べる。そのため代表的な試料についてまず十分と思われる程度に細かく測定を行ない、この測定値の集まり ($\Delta y = 10\mu$, $N = 150$ 本) を母集団とみなして、これから等間隔 Δy ごとに順次数を増やしながら標本を抽出、平均していった結果を Fig. 5 に示す。これから、 $\Delta y = 10\mu$, $N = 150$ の測定を行ない平均したものは、スポット粗度の真の代表値とみなしてよく、また $\Delta y = 100\mu$, $N = 15$ の平均値は、真の代表値から $\pm 3\%$ 程度ばらついていることがわかる。以上の結果を参考に、測定精度と解析時間の兼ね合いから、以下の測定は、次の条件で行なつた平均値を、スポット粗度としている。

$$L_x = 2500\mu, \Delta x = 1\mu, M = 2500$$

$$L_y = 2500\mu, \Delta y = 100\mu, N = 25$$

2) 波高分布 $p(z)$

Fig. 6 は、粗面の波高分布 (distribution density) の

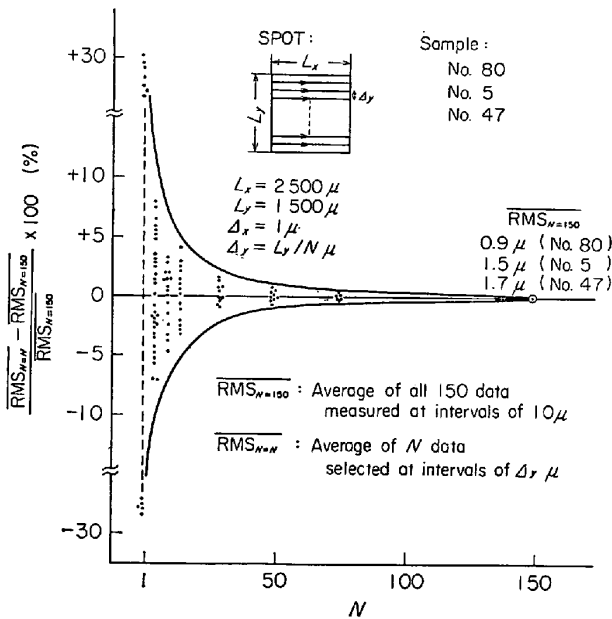


Fig. 5. Local dispersion of RMS values in a measuring spot.

測定結果例である。 $p(z)$ には、図に示すように三通りのパターンがあるが、(c)のパターンはスクラッチダル面のみで、ダル面の大部分は(a)または(b)で、(a)のように正規分布から偏っているものも、その程度はそれ程大きくない。

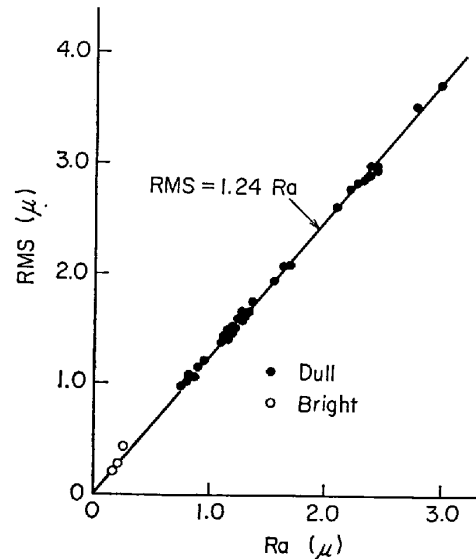


Fig. 7. Relation between root mean square, RMS, and center line average, Ra, of cold rolled steel sheet surfaces.

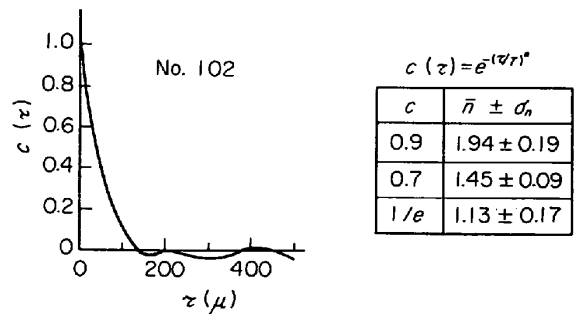


Fig. 8. Auto-correlation function of surface profile of cold rolled steel sheet.

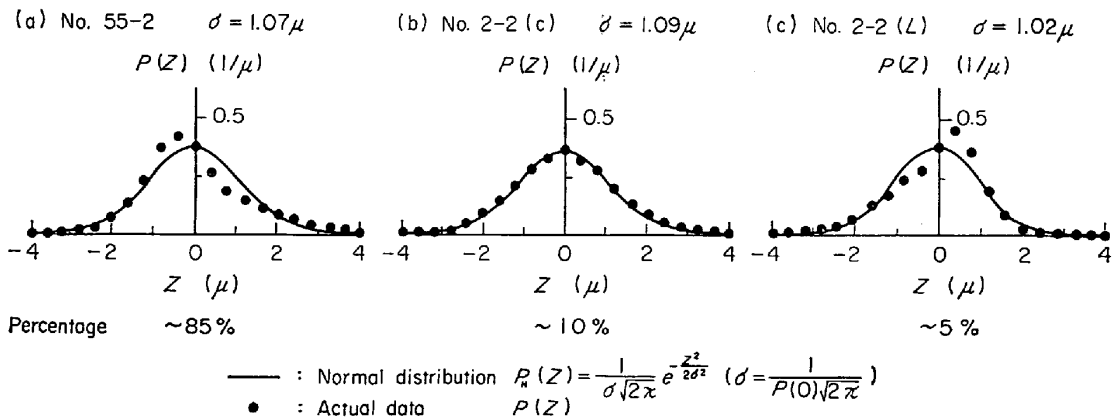


Fig. 6. Probability density $p(z)$ of surface profiles $z = \zeta(x)$ of cold rolled steel sheet.

また Fig. 7 は、中心線平均粗さ R_a と二乗平均粗さ RMS の関係を示す。面の $p(z)$ が正規分布の場合には、理論計算から $RMS=1.25 R_a$ であるが、鋼板面では $RMS=1.24 R_a$ となっている。

以上の結果から、鋼板面の $p(z)$ は、ほぼ正規分布と近似してよいことがわかる。

$$p(z) \approx \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad \sigma = \text{標準偏差} \dots (4)$$

3) 自己相関 $c(\tau)$

Fig. 8 は粗面 $z=\zeta(x)$ の自己相関 (auto-correlation function) の測定結果例である。一般に不規則過程の相関々数は、 $c(\tau)=e^{-(\tau/T)^2}$ (ガウス過程) や $c(\tau)=e^{-(\tau/T)}$ (単純マルコフ過程) で表わされるものが多い。そこでここでは、 $c(\tau)=e^{-(\tau/T)^n}$ で近似できるとして、測定値を対数グラフ上にプロットし、全サンプルについて n の平均値を求めると表のようになる。これから鋼板面の自己相関 $c(\tau)$ は、次のように近似できる。

$$c(\tau) \approx e^{-(\tau/T)^n} \quad n = \begin{cases} 2 & (c \approx 1) \\ 1 & (c \approx 0) \end{cases} \dots (5)$$

4) 新しいピークカウントの提案 *PPI

Fig. 9 (a) にモデル的に示すように、粗面 ① と ② は、RMS 値は同じであるが、粗面形状は全く違う。それで波高に関する情報の他に、周波数に関する情報を表わすために、単位長あたりの凹凸の数 PPI (peaks per inch) が実用されている。

しかしこの表示法は、Table 1 にも示すように、ピークの定義の仕方やピークカウントのレベル Δ の設定に問題があり、通常は Δ を粗度計の測定レンジによつてえらんでいるため、(b) に示すように、PPI 値は、その面の RMS 値により左右される。

そこで本研究では、Fig. 9 (c) に示すように、カウントレベルをその面の RMS 値によつてきめる新しいピークカウント方式、*PPI を定義して用いた。これによると、計器の測定レンジや面の RMS 値に左右されずに、凹凸の数の評価が可能になる。またピークの認識の仕方にも、幾通りもの定義が考えられるが、本研究では主として Table 1 に示す第二の定義に従つて、*PPI 2 を用いた。

この表示法は、本研究のために新たに定義したものであるが、ひとつの PPI の表示法として、一般に有用であると考えられる。

5) 統計表示と慣用表示の関係

次に鋼板面粗度の統計表示と慣用表示の関係について測定結果を述べる。

5.1) 波高に関する情報 (σ -RMS)

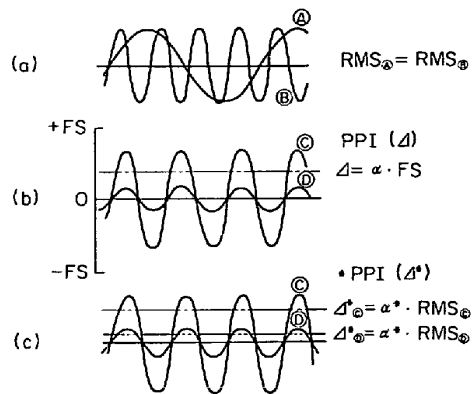


Fig. 9. A new definition of peak counting, *PPI, in which counting level, Δ^* , is given in proportion to RMS value.

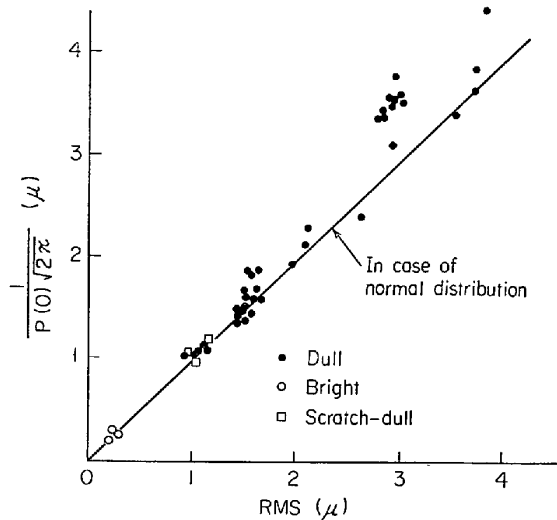


Fig. 10. Relation between RMS and $1/p(0)\sqrt{2\pi}$. ($RMS = 1/p(0)\sqrt{2\pi}$ when $p(z)$ is normal distribution.)

波高分布が正規分布 $p_n(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2}$ の場合には、理論的に $\sigma=RMS$ である。 ($RMS = \langle \zeta^2 \rangle = \int z^2 p(z) dz = \sigma$) 一方鋼板面は、上述の結果によつて、ほぼ正規分布であることが示されている。そこで $p(z)$ の実測値を用いて、 $\sigma = 1/p(0)\sqrt{2\pi}$ と RMS の関係をプロットしたのが Fig. 10 で、これから RMS 値は、波高分布を正規分布で近似したときの標準偏差 σ に対応しているといえる。

$$RMS \approx \sigma \dots [6]$$

5.2) 周波数に関する情報 (T-*PPI)

各種信号の周波数情報を調べるのに、通常スペクトル解析を行なうが、圧延面のような不規則面では、情報が各周波数に分散してしまい、有効な情報が得られにくい。

そこで、本研究ではもうひとつ別の周波数情報として自己相関長 (correlation distance) T をとりあげる。 T は Table 1 に示すように、自己相関が $1/e$ になる点の τ で定義される。自己相関は、情報が $\tau = 0$ の附近に集中しており、変動のゆるやかな面では T が大きく、変動のはい面では小さい。すなわち T は粗面の山や谷間の平均的なピッチに関する情報を含んでいると考えられる。

一方、PPI は、単位長あたりのピーク数、従つてその逆数は、平均的なピークのピッチ間隔を表わすもので、両者の間には、ある関係があると考えられる。

Fig. 11 は、*PPI 2 と $1/T$ との関係で、これから両者の間には、比例的な関係があることがわかる。

なお、以下の解析では、*PPI 2 については $\Delta^* = 0.4$ RMS, T については $c = e^{-(\tau/T)^2}$ として $c = 0.7$ 附近の値を用いている。しかしこれらは、 Δ^* や τ のとり方によつて変わるし、また相互に関連があると考えられ、理論的・実験的に検討を加える余地を残している。そうすれば、(7) 式の関係や、*PPI, T のもつ意味もより明瞭になるであろう。

$$\begin{aligned} *PPI\ 2\ (\Delta^*) &\approx K \cdot 1/T \quad \dots\dots\dots (7) \\ K &= K(\Delta^*) \end{aligned}$$

5.3) 傾斜角に関する情報 ($\sigma/T - \theta_a$)

以上の解析から、 σ や RMS は波高の平均値、 $1/T$ や *PPI は、山谷間ピッチの平均値を表わす量であることがわかる。従つて、この両者の積、 σ/T や RMS *PPI は、粗面の平均的な傾斜をあらわすものと考えられる。そこで、粗面の局所的な傾斜角の平均値 $\theta_a = \langle |g'| \rangle$ を測定し、以上の諸値の関係を示したのが、Fig. 12 である。この結果から、 σ/T , RMS *PPI などは粗面の傾斜角の平均値を表わすものといえる。

$$\theta_a \propto \left\{ \frac{\sigma/T}{RMS \cdot *PPI\ 2} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

5.2 冷延鋼板面における光の散乱特性

1) 散乱強度分布の測定例

Fig. 13 に鋼板粗面におけるレーザービームの散乱強度分布の測定例を示す。縦軸は、標準用ミラー面の正反射方向強度で正規化したもので、この測定値から、分布のピーク値 I_0 , 半値幅 H を読みとる。ただし、ダウル面といえども方向性があるので、 H の値は $\theta_s = 0^\circ, 90^\circ$ の二方向の測定を行ない、平均している。

2) 理論計算による推論

測定結果の整理の見通しをつけるため、理論計算を行なう。その際、粗面の統計的性質としては、5.1 の粗面解析の結果から、次のふたつの分布を用いる。ただし $c(\tau)$ に関しては、理論上、光の散乱に関係するのは、

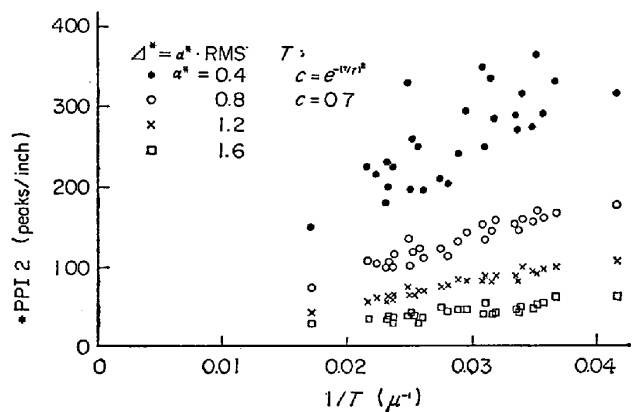


Fig. 11. Peaks per inch, *PPI 2, and correlation distance, T , respectively represent the average pitch and the average wave length of surface profiles.

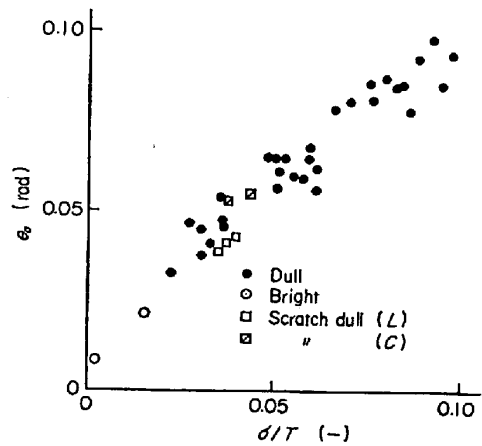


Fig. 12. Relation between the value σ/T and average slope θ_a .

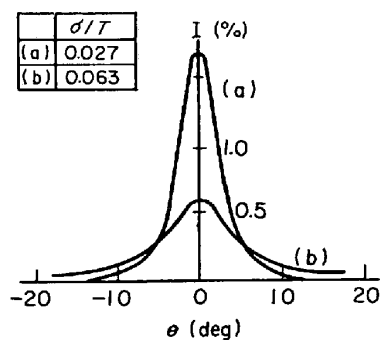


Fig. 13. Examples of spatial intensity distribution of laser beam scattering from cold rolled steel sheet surface. ($\theta_1 = 45^\circ, \theta_3 = 0^\circ$)

$\tau = 0$ の近傍であることから、 $n = 2$ を採用する。

$$\begin{aligned} p(z) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad \dots\dots\dots (9) \\ c(\tau) &= e^{-(\tau/T)^2} \end{aligned}$$

また、粗面での光の散乱特性は、粗度と波長の関係で $g \ll 1$ では鏡面的、 $g \gg 1$ では拡散的になるが、本実験

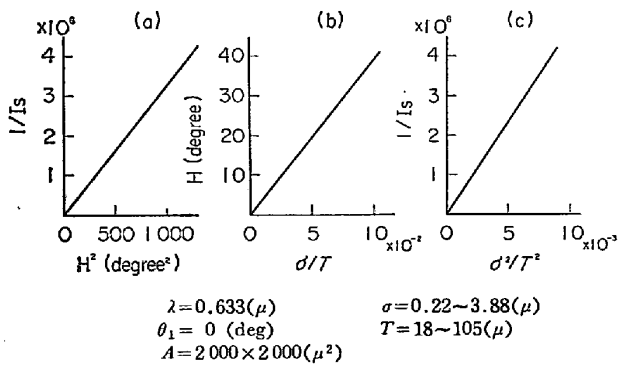


Fig. 14. A result of theoretical calculation for diffuse scattering.

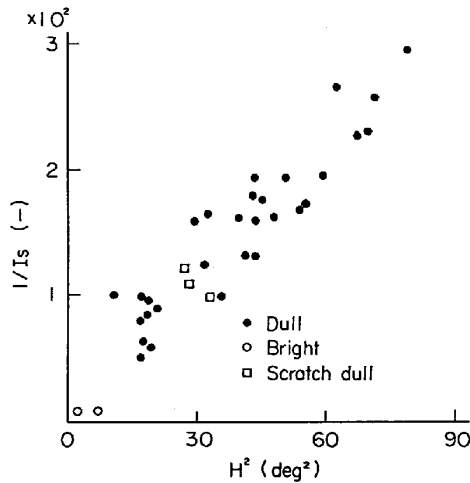


Fig. 15. Relation between peak value, I_s , and half value width, H_s , of intensity distribution of scattered laser beam.

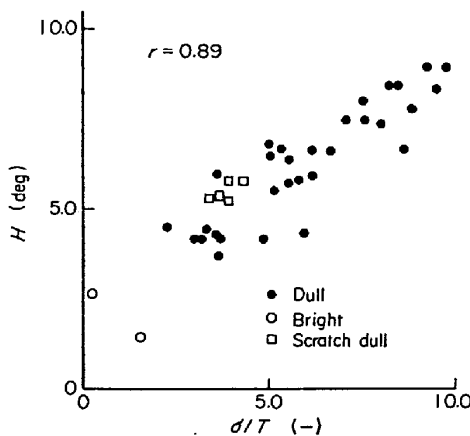


Fig. 16. Relation between H and σ/T .

での条件では、ブライト材で $g = 10$ 、ダル材では $g = 100 \sim 5000$ であり、拡散反射として扱う範囲にある。そこで BECKMANN に従って、等方不規則面での拡散散乱強度分布を解くと、次のようになる。

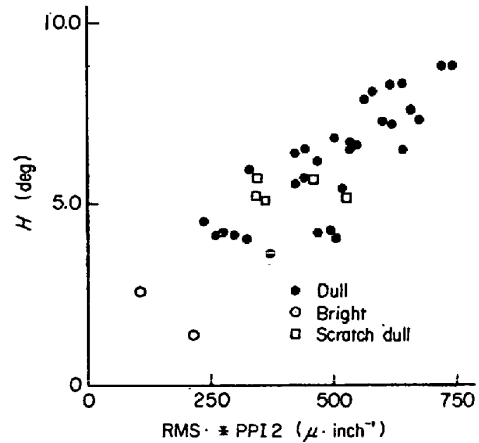


Fig. 17. Relation between H and $RMS \cdot *PPI 2$.

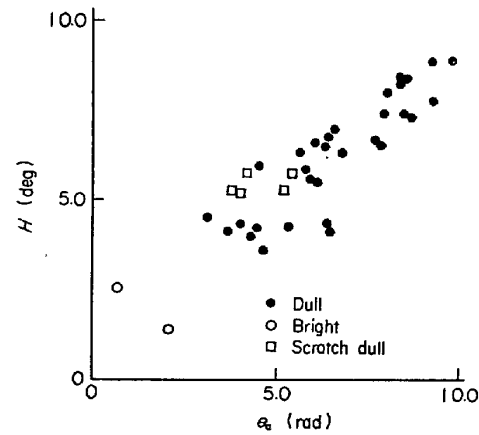


Fig. 18. Relation between H and θ_a .

$$I(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{\pi F^2 T^2}{L_x L_y v_z^2 \sigma^2} \exp\left(-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4v_z^2 \sigma^2}\right) \dots (10)$$

ただし

$$F = \frac{1 + \cos\theta_2 \cos\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3}{\cos\theta_1 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}$$

$$v_z = k (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

$$v_{xy} = k \sqrt{\sin^2\theta_1 - 2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 + \sin^2\theta_2}$$

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$g = v_z^2 \sigma^2$$

一般に、粗面での散乱特性は粗面の統計的性質 $p(z)$, $c(\tau)$ の特性値 σ , T で表わされるが、拡散面で特徴的なのは、両者の比 σ/T できいてくることである。式 (10) を用いて、ピーク値 I_s , 半値幅 H と σ/T の関係を計算すると、Fig. 14 のようになる。ただこの式は、モデルの考え方、仮定などで、本実験の場合と必ずしも対応していない点があり、絶対値そのものは使えないので、理論解から得られる定性的な結果のみを参考にして、測定結果の整理に利用する。

3) 散乱特性と統計的粗度表示の関係

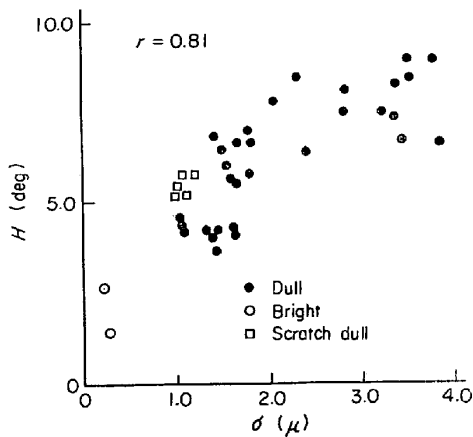


Fig. 19. Relation between H and σ .

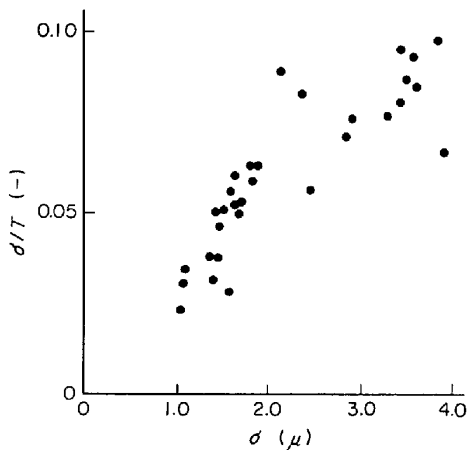


Fig. 20. Relation between σ and σ/T .

理論解析を参考に、実験結果について I_s , H , σ/T の関係を Fig. 15, 16 に示す。ここで H に関する測定結果が原点に交わらないのは、フォトデテクターの前につけてある絞りの開口角 (1.7 deg) によるものと考えられる。

この結果から、光の散乱特性と統計的粗度表示の間には、次の関係があることが分かる。

$$\begin{aligned} 1/I_s &\propto H^2 \\ 1/I_s &\propto (\sigma/T)^2 \dots \dots \dots (11) \\ H &\propto \sigma/T \end{aligned}$$

4) 散乱特性と慣用粗度表示の関係

次に実用的な観点から、散乱強度特性と慣用粗度の関係を調べておく。特に現実の鋼板では、 I_s の絶対値そのものは、表面の反射率や油膜などによつて影響をうけやすいと考えられるので、ここでは、比較的影響の少ないと考えられる半値幅 H との関係を Fig. 17, 18 に示す。

これから、光の散乱特性は、面の平均傾斜角に相当する粗度と相関があることが分かる。

$$H \propto \begin{cases} \text{RMS} \cdot \text{*PPI 2} \\ \theta_a \end{cases} \dots \dots \dots (12)$$

5) 散乱特性と RMS 粗度表示の関係

従来、光学的に RMS や R_{\max} 粗度を測定することが試みられているが、本実験でも、Fig. 19 に示すように、散乱特性と σ (=RMS) 粗度の間に可成の相関がある。しかし同時に、 σ と σ/T の間には、Fig. 20 のような関係がある。すなわち本実験で用いたサンプルでは、 σ と σ/T の間に特定の関係があり、そのため、 H が σ/T と σ の両者に相関があるという見掛上の結果を与えたものと考えられる。

しかし理論解析や実験結果からみて、一般的には (11) や (12) 式の関係が成立し、従つて RMS と *PPI 2 に特定の関係がない限り、RMS 粗度のみを独立に測定することは、できないと考えられる。

6. 結 論

Laboratory Automation System に触針式粗度計を組込んで構成した粗度解析システムと、レーザーとゴニオ機構を組合せたフォトゴニオメーターを用い、冷延ダル鋼板面の表面粗度と光の散乱特性について解析を行ない、次の結果を得た。

(1) 冷延ダル鋼板の統計的粗面特性は、次のとおりである。

$$\begin{aligned} p(z) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \\ c(\tau) &= e^{-(\tau/T)^n} \\ n &= \begin{cases} 2 & (c \approx 1) \\ 1 & (c \approx 0) \end{cases} \end{aligned}$$

(2) 粗度の統計的表示と慣用表示の間には、次の関係がある。

$$\begin{aligned} \sigma &\propto \text{RMS} \\ 1/T &\propto \text{*PPI 2} \\ \sigma/T &\propto \theta_a, \text{ RMS} \cdot \text{*PPI 2} \end{aligned}$$

(3) 冷延ダル鋼板面は、He-Ne レーザー光に対しては拡散的散乱特性を有し、散乱特性と粗度の間には、次の関係がある。

$$\begin{aligned} H &\propto \sigma/T, \text{ RMS} \cdot \text{*PPI 2}, \theta_a \\ 1/I_s &\propto H^2 \end{aligned}$$

(4) 以上の結果は光学的粗度測定や鋼板表面の美観定量化の基礎を与えるものである。

文 献

- 1) 奈良治郎：表面アラサ測定器，工場測定器講座 12, (1962) [日刊工業新聞社]
- 2) P. BECKMANN: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. (1963) [Pergamon Press]
- 3) 草鹿，釜：応用物理，42(1973) 5, p. 507~512