

© 1984 ISIJ

冷延鋼板の光反射特性解析とそのオンライン 表面粗度測定への応用

論 文

浅野有一郎*・塩住 基仁*・栗田 邦夫*
矢部 直*²・守屋 進*³

Analysis of Light Reflection from Cold-rolled Steel Sheets and Its Application to On-line Measurement of Surface Roughness

Yuichiro ASANO, Motoji SHIOZUMI, Kunio KURITA,
Tadashi YABE and Susumu MORIYA

Synopsis:

The relation between reflected light intensity and surface roughness parameters was analysed by numerical calculations based on BECKMANN's theory. In addition, detailed analysis was made in case that the statistical characteristic of surface topography deviated from the one assumed in the theory.

From these considerations, the conditions appropriate for surface roughness measurement were selected in terms of the incident angle and wavelength of a light beam. The experiments under these conditions gave good results for different kinds of steel sheets.

These results lead to the development and installment of an on-line roughness measurement system in a TPL (temper and processing line) of Chiba Works.

1. 緒 言

表面粗度は、物体表面の光学的性質、機械的性質及び物理化学的性質に深く関わっていることが知られ、表面性状の把握には不可欠な要素である。鉄鋼業においても鋼板の光沢、塗装性、めつき性、加工性の他、圧延ロールの耐摩耗性等を決める要因として重要な管理対象とされている。とりわけ近年、製品品質の高度化や歩留り改善の要求が極めて厳しくなりつつある中で、鋼板及び圧延ロールのオンライン粗度管理が強く求められている。

これらの要求から、表面粗度のオンライン測定を目指した非接触粗度測定技術の開発は重要な課題であり、既に幾つかの光学的測定方法が提案されている^{1)~3)}。特に被測定面の光反射強度分布(光反射の拡散の程度)から表面粗度を推定する方法は、生産現場でのオンライン測定手段という観点から、また粗度情報として被測定表面プロファイルの振幅情報と周波数情報の両者の検出が可能であるという観点から、この要求に応える有力な手段と考えられる。しかしこの方法も、測定精度や装置化技術などの点でいまだ十分な検討がなされておらず、鉄鋼製造プロセスで実用可能なオンライン測定装置はこれまで

未開発であつた。

本論文では、表面粗度と光反射強度分布の関係について、BECKMANN⁴⁾の理論的考察に従い数値計算による詳細な検討を行うと共に、両者の相関におけるばらつきの原因について考察し、最適な測定条件を明らかにした。また、これらの結果を種々の冷延鋼板サンプルを用いた測定実験により確認した。さらに、この最適条件が実用装置の開発という観点からも有利である点を活かし、当社千葉製鉄所調質圧延ライン用に開発したオンライン粗度測定装置の概要と測定結果についても述べる。

2. 従来の研究成果と問題点

2.1 粗度表示方法

不規則表面の幾何学的形状を特徴づける量として従来から種々の表示が用いられている⁵⁾。また機械加工面、冷延鋼板面等についてその統計的性質がかなり詳細に調べられている⁶⁾⁷⁾。これらの成果は次のようにまとめられる。

(1) 粗面の幾何学的特性は、平均粗さ R_a 、2乗平均粗さ RMS 等の振幅情報と PPI (Peaks Per Inch)、平均山間隔⁵⁾等の周波数情報により概括的に表現できる。

昭和 58 年 11 月 15 日受付 (Received Nov. 15, 1983)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1-1 Kawasaki-cho Kawasaki 260)

*² 川崎製鉄(株)起業化推進室 (New Enterprise Promotion Department, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)計量器技術センター (Measurement & Instrumentation Center, Kawasaki Steel Corp.)

(2) 冷延鋼板表面の統計的特性は表面形状を $x y$ 平面から z 方向への凹凸で表した場合、次のとおりである。

高さ分布 $p(z)$ は、分散を σ として、正規分布

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。又 $x y$ 平面内の任意の方向 t を選び、 t を含む断面プロファイルの自己相関関数を $C(\tau)$ とすれば

$$C(\tau) = e^{-(\tau/T)^n} \begin{cases} C \approx 1 \text{ において } n = 2 \\ C \approx 0 \text{ において } n = 1 \end{cases} \dots\dots (2)$$

で表される。また(2)式中の T を以下、自己相関距離と呼ぶ。

(3) σ および T は各々振幅情報と周波数情報であり、 R_a , RMS, PPI と次の関数がある。

$$\sigma = \text{RMS} = 1.25R_a \dots\dots\dots (3)$$

$$1/T \propto \text{PPI} \dots\dots\dots (4)$$

(4) 冷延鋼板ダル材に関し、 $C(\tau)$ における n のばらつきは、 $C \approx 1$ の付近で $\pm 10\%$ を越える。

(1)~(4)の結果から以下の論述では、振幅情報として慣用的でありかつ統計量 σ と良い相関のある R_a を、周波数情報として統計的考察に有利な T を用いる。

2.2 表面粗度と光反射強度分布

不規則面の光反射特性に関する理論的考察については現在までかなりの数の報告があるが⁴⁾⁸⁾⁹⁾、これらの中で統計論的観点から最も一般的取り扱いをしていると考えられる BECKMANN⁴⁾ の理論の帰結を要約しておく。

不規則面の高さ分布 $p(z)$ が正規分布であり、自己相関関数 $C(\tau)$ が Gauss 過程 ((2)式において $n=2$) であると仮定する。Fig. 1 に示すように、波長 λ の光束が入射角 θ_1 で、高さ分布の分散 σ 、自己相関距離 T で特徴づけられる粗面に入射した場合、 $\theta_2 = \theta_1$ における反射光強度 I_s (以下正反射強度と呼ぶ) と σ および T の間に次の関係が成り立つ。

$$g = (2\pi\sigma/\lambda)^2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2 \dots\dots\dots (5)$$

とすれば $g \ll 1$ の場合 $I_s = e^{-g} \dots\dots\dots (6)$

$g \gg 1$ の場合 $I_s = f(\sigma/T) \dots\dots\dots (7)$

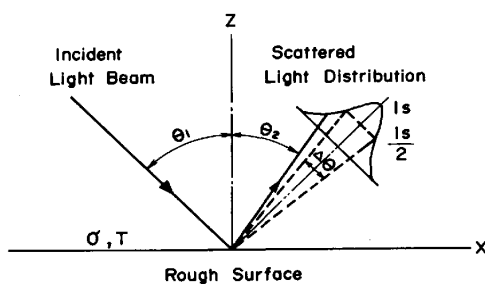


Fig. 1. Light scattering from a rough surface.

ここで(3)式の関係を用いれば、(7)式の右辺は R_a/T の関数となる。(6)式、(7)式の関係は従来より種々の報告で用いられており、原理的には $g \ll 1$ および $g \gg 1$ の2条件下で I_s を求めることにより、 R_a および T の測定が可能であることを示している。なお I_s は入射光強度で規格化した値に対応し以下では無次元量として表記する。

2.3 従来の問題点

(6)式、(7)式の関係から R_a および R_a/T を求める提案、あるいはこれらの関係についての実験結果が報告されているが³⁾⁷⁾、表面粗度測定方法としては次のような問題点がある。

(1) 光反射強度の R_a および T に対する依存性が、 $g \ll 1$ および $g \gg 1$ の領域以外では定量的に明らかにされておらず、 g の値の選定について定量的検討がなされていない。

(2) 光反射強度分布を特徴づける量として Fig. 1 に示した正反射強度 I_s や拡散の半値幅 $\Delta\theta$ を用いることができるが、 $g \gg 1$ の条件下でこれらと R_a/T との相関を冷延鋼板について求めた場合、ばらつきが非常に大きく、(7)式の関係から R_a/T を測定する場合の精度は極めて低い。

ダル材を用いた $g = 100 \sim 3000$ における実験結果を Fig. 2 に示す。同様の結果が文献⁷⁾においても得られている。

(3) 前述の方法にはこれを装置化する場合、次のよ

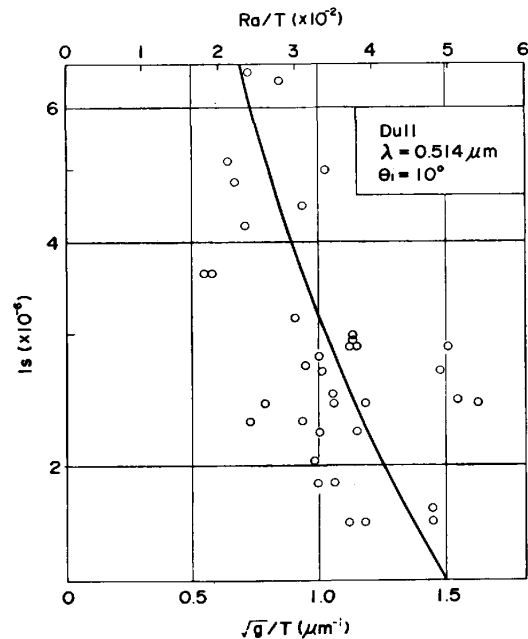


Fig. 2. Relation between \sqrt{g}/T (or R_a/T) and I_s in the range of $g = 100 \sim 3000$ with dull finish samples. Solid line shows a theoretical curve.

うな問題点があり、実用的で安価な工業用計器を開発するという観点から好ましくない。

(7)式の関係から R_a/T を求める場合、ブライツ材の一部 ($R_a=0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$) やステンレス鋼板 ($R_a=0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$) に対して $g \gg 1$ を満たすには $\theta_1=\theta_2=0$ とした場合でも、使用すべき光源波長は紫外域から真空紫外域、さらには軟X線領域となり、実用装置として考えた場合、とりわけレーザー光源の利用を考えた場合現実的でない。

また $g \ll 1$ および $g \gg 1$ の2条件を実現するには波長の大きく異なる2種の光源を必要とし、レーザー光源を使用する場合、測定する粗度の領域に制約が生じると共に装置としても高価、複雑になる。

本論文では、 g の全域にわたって正反射強度 I_s と表面粗度の関係を明らかにした。また自己相関関数 $C(\tau)$ のばらつき等に起因する測定誤差について検討し、光反射強度から表面粗度を推定する場合の最適条件を求めた。さらにこの結果に従えば上述(3)の問題に対しても有利である点を活かし、実用的オンライン測定装置を開発した。

3. 粗面による光散乱の理論的考察

3.1 光散乱の理論

粗面の光散乱を最も一般的に論じている BECKMANN⁴⁾ の理論に従い、光散乱特性と粗度の関係について考察する。

Fig. 1 において x を t 方向とした配置を考える。反射面を完全導体と仮定し波長 λ のコヒーレントな光束が入射角 θ_1 で反射面上の面積 A の領域に入射した場合の反射角 θ_2 方向の散乱光強度を $I(\theta_1, \theta_2)$ で表す。また粗面は等方的であり、高さ分布 $p(z)$ を分散 σ の正規分布と仮定する。(5)式の g と自己相関関数 $C(\tau)$ を用いて、波動光学的理論と統計的考察から次の結果が導かれる。

$$I(\theta_1, \theta_2) = e^{-g} \rho_0^2 + \frac{2\pi F^2}{A^2} \int_0^\infty J_0(v_{xy}\tau) [e^{-g(1-C)} - e^{-g}] \tau d\tau \quad (8)$$

$$\text{ここで } F = \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (9)$$

$$\rho_0 = 2 \sin(v_x A/2) / v_x A \quad (10)$$

$$v_x = (2\pi/\lambda)(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \quad (11)$$

$$v_{xy} = (2\pi/\lambda)(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) \quad (12)$$

また J_0 は0次 Bessel 関数である。

冷延鋼板面の自己相関関数として次の式を仮定する。

$$C(\tau) = e^{-\tau^2/T^2} \quad (13)$$

この仮定は(8)式に対する $C(\tau)$ の寄与が $\tau \approx 0$ 付近

で大きいことと、(2)式の結果を合わせて考えた場合、0次近似として正しいといえる。

(13)式を(8)式に代入し、(8)式の被積分関数を g について級数展開した後、積分を実行すれば次の式が得られる。

$$I(\theta_1, \theta_2) = e^{-g} \left(\rho_0^2 + \frac{\pi F^2 T^2}{A} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m!m} e^{-v_x^2 T^2/4m} \right) \quad (14)$$

(14)式において、 $g \ll 1$ および $g \gg 1$ の場合次の式が得られる。 $g \ll 1$ $I(\theta_1, \theta_2) = e^{-g}$

$$[\rho_0^2 + (\pi F^2 T^2/A) e^{-v_{xy}^2 T^2/4}] \quad (15)$$

$$g \gg 1 \quad I(\theta_1, \theta_2) = \frac{\pi F^2 T^2}{Ag} \exp\left(-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4g}\right) \quad (16)$$

(15)式において正反射強度 $I_s = I(\theta_1, \theta_2)$ を考えた場合、通常 $T^2 \ll A$ であり右辺第2項は無視できて(6)式の関係が得られる。又(16)式は(7)式に対応している。

3.2 数値計算による検討

光反射強度分布の特徴を表すパラメータとして、最も測定が容易な正反射強度 I_s を選び、 I_s と g および T の関係を(14)式に基づく数値計算により求める。

(14)式において $\theta_1 = \theta_2$ として

$$I_s = e^{-g} + \frac{\pi T^2}{A} e^{-g} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m!m} \quad (17)$$

(17)式の数値計算において、 g については0.1~100、 T については冷延鋼板の通常値として20~100 μm の各範囲で変化させた。また、入射光束径を約1mmと仮定し $A = 10^6 \mu\text{m}^2$ とした。なお(17)式右辺の級数和の計算は倍精度計算により増分がゼロとなるまで行つた。

計算結果を Fig. 3 に示す。 $g \leq 1$ の領域では I_s の T 依存性はほとんど無視可能であり、 I_s は g すなわち R_a へのみに依存することを示している。他方 $g \geq 10$ の領域では I_s は T に強く依存し、 g すなわち R_a と I_s を与えれば T の値を求め得ることを示している。

$g \leq 1$ の領域について考察する。Fig. 3 の I_s , g , T の関係を $\sqrt{g} = \eta_T(I_s)$ (18)

で表せば、任意の I_s における \sqrt{g} の値の範囲は $\eta_{20}(I_s) \sim \eta_{100}(I_s)$ である。 I_s を測定し(18)式の関係から $\sqrt{g} (\propto R_a)$ を求める場合の、 T のばらつきに起因する $g = (\eta_{20} + \eta_{100})/2$ における誤差率を次の式で評価する。

$$\epsilon_1 = (\eta_{20} - \eta_{100}) / (\eta_{20} + \eta_{100}) \quad (19)$$

(19)式の関係および ϵ_1 と \sqrt{g} の関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 の結果から、 $g \leq 1$ の領域では誤差率 ϵ_1 は $\pm 1\%$ 以下となり、 I_s はほぼ $\sqrt{g} (\propto R_a)$ のみの関数とみなせる。また ϵ_1 が $\pm 3\%$ 以下であるためには $g \leq 4$ であればよい。

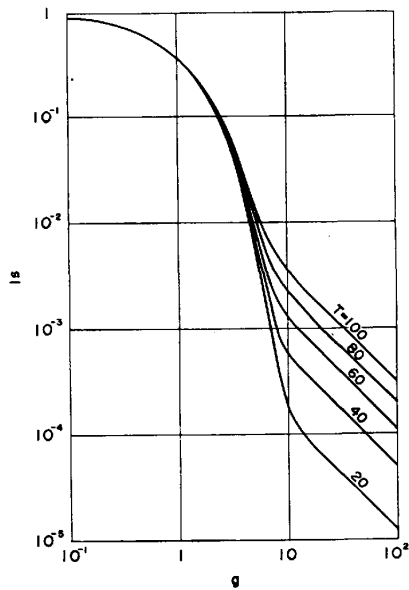


Fig. 3. Relation between g and I_s in the case of $T=20\sim 100 \mu\text{m}$.

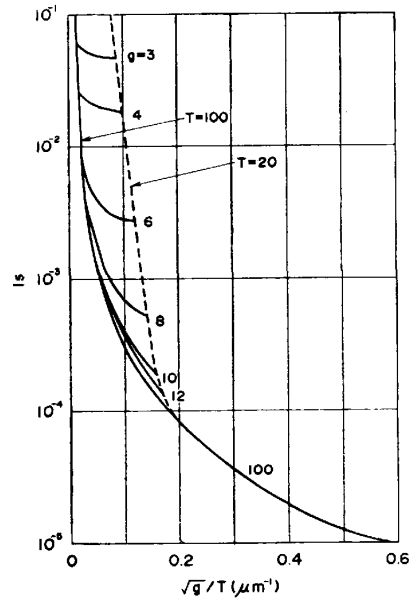


Fig. 5. Relation between \sqrt{g}/T and I_s in the case of $T=20\sim 100 \mu\text{m}$.

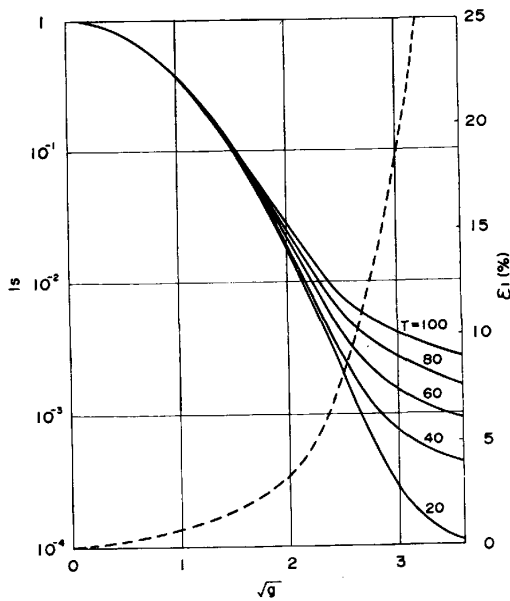


Fig. 4. Relation between \sqrt{g} and I_s in the range of $g \leq 10$ (solid lines) and dependency of ϵ_1 on \sqrt{g} (dotted line).

次に $g \geq 1$ の領域について考察する。この領域における I_s と $\sqrt{g}/T (\propto R_a/T)$ の関係を Fig. 5 に示す。Fig. 5 において I_s から \sqrt{g}/T を求める場合の誤差率 ϵ_2 を、 ϵ_1 と同様の方法で定めれば、 $g \geq 12$ において ϵ_2 は $\pm 3\%$ 以下となり I_s は \sqrt{g}/T のみの関数とみなせる。他方 $4 \leq g \leq 12$ においても g の値を与えれば I_s から T を求めることが可能である。

ところで、2.3(2) で述べたように $g \gg 1$ の条件下では I_s と R_a/T の相関のばらつきが極めて大きいという

問題点があつた。このばらつきについては次の原因が考えられる。

(1) $I_s \leq 10^{-4}$ となり一般に受光光量が小さくなり外乱光や光検出器の検出誤差等の影響を受けやすい。

(2) $g \gg 1$ では $R_a \gg \lambda$ であり、触針式粗度計では検出不可能な、あるいは R_a と T への寄与の小さい波長程度の表面凹凸が光反射強度に影響を与える。

(3) 表面プロファイルの自己相関関数 $C(\tau)$ に関数形のばらつきがある。

(3)の要因については、2.1(4) で述べたように、冷延ダ材材では $C(\tau) = e^{-(\tau/T)^n}$ とした場合、 $C \approx 1 (\tau \approx 0)$ で $n=2$ から $\pm 10\%$ 程度ばらつくことが報告されている。そこで n のばらつきを $n=2 \pm 0.2$ と仮定し、このばらつきの I_s に及ぼす影響について考察する。

(8)式で $\theta_1 = \theta_2$ (すなわち $\rho_0 = 1, F = 1, v_{xy} = 0$) として

$$I(\theta_1, \theta_1) = I_s = e^{-g} + \frac{2\pi}{A} \int_0^\infty [e^{-g(1-C)} - e^{-g}] \tau d\tau \dots \dots \dots (20)$$

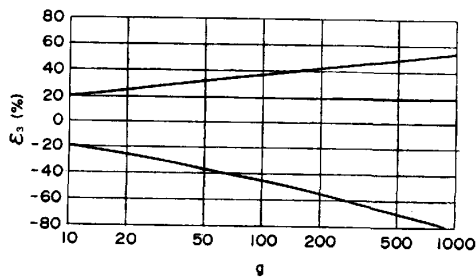
$g \gg 1$ においては(20)式の第1項および第2項被積分関数中の e^{-g} は無視可能であり次の式を得る。

$$I_s = \frac{2\pi}{A} \int_0^\infty e^{-g(1-C)} \tau \cdot d\tau \dots \dots \dots (21)$$

(21)式においては $g \gg 1$ の場合、被積分関数の I_s への寄与は $C \approx 1 (\tau \approx 0)$ 付近で大きく、自己相関関数 $C(\tau)$ は

$$C(\tau) = e^{-(\tau/T)^n} = 1 - (\tau/T)^n \dots \dots \dots (22)$$

と近似できる。(22)式を(21)式に代入し、 $s = \tau/T$ とお

Fig. 6. Dependency of ϵ_2 on g .

$$\text{けば, } I_s = \frac{2\pi T^2}{A} \int_0^\infty e^{-gs^n} ds \dots\dots\dots (23)$$

を得る。(23)式から、 n の値が $n=2$ からばらついた場合の I_s への影響は次の ϵ_3 で評価できる。

$$\epsilon_3 = \frac{\int_0^\infty e^{-gs^n} ds - \int_0^\infty e^{-gs^2} ds}{\int_0^\infty e^{-gs^2} ds} \dots\dots\dots (24)$$

$n=2.2$ および $n=1.8$ の場合の (ϵ_3 と g の関係を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より $|\epsilon_3|$ の値は g の増大と共に大きくなるのがわかる。例えば $g \geq 100$ では $|\epsilon_3|$ は 40% 以上となり、 I_s の測定値から $\sqrt{g}/T (\propto R_a/T)$ を求める場合のばらつきは 15% 以上となる。

3.3 理論的考察のまとめ

前節までの考察から次の各項の結論が得られる。

- (1) $g \leq 4$ における I_s の測定値から精度 $\pm 3\%$ 以内で R_a を求めることが可能である。
- (2) 自己相関関数が $C(\tau) = e^{-(\tau/T)^2}$ と表せる場合、 $g \geq 12$ における I_s の測定値から精度 $\pm 3\%$ 以内で R_a/T を求めることが可能である。
- (3) $C(\tau) = e^{-(\tau/T)^n}$ であり n の値にばらつきがある場合、(7)式から R_a/T を求める際のこのばらつきに起因する誤差は g の増大と共に大きくなる。
- (4) $4 \leq g \leq 12$ の領域で I_s と g すなわち R_a が与えられれば T を求めることが可能である。

4. 光反射強度および粗度測定実験

前章までの考察結果を実験的に確認するため、冷延鋼板サンプルによる光反射強度測定実験を行い触針式粗度計による粗度測定結果と比較した。

4.1 実験方法

サンプルは冷延ダル材 ($R_a = 1 \sim 3 \mu\text{m}$)、ブライツ材 ($R_a = 0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$)、ステンレス鋼板 ($R_a = 0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$) の3種類を用いた。

サンプルの R_a および T の値として、触針式粗度計により $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ の領域から 10 本の 2 次元プロフィールを採取し、各々から得られた値の平均値を用い

た。なおこの値の、同一領域の真の代表値からのばらつきは、実験的検証により $\pm 5\%$ 程度と推定される。

光反射強度 I_s の測定については、光源として He-Ne レーザ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ および $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$)、Ar レーザ ($\lambda = 0.475 \mu\text{m}$) を、光検出器として焦電型素子 (受光部開口寸法 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 、立体角 $5 \times 10^{-6} \text{ sr}$) を用いた。

4.2 実験結果

ダル材、ブライツ材、ステンレス鋼板について $0.1 \leq g \leq 10$ における I_s と R_a (または \sqrt{g}) の関係を Fig. 7, 8, 9 に示す。図中の実線は Fig. 4 の $T=60$ における理論曲線である。他方 I_s の値については理論曲線に適合するように定数倍して用いた (Fig. 2, 10, 11, 12 についても同様)。いずれの結果もばらつきは小さく良い相関が見られる。Fig. 8 の $g \geq 2$ の領域で実験結果と理論曲線に大きな差異が見られるがこれについては次の原因が考えられる。受光部開口寸法が入射レーザー光束径に比べ大きい鏡面反射に近い $g \approx 0.1$ における I_s と拡散の大きい $g \geq 2$ における I_s の比が理論計算の場合と一致しない。図中の破線で示した実験曲線を用いれば $\pm 10 \sim 20\%$ の精度で R_a の値を測定できる。

ダル材について $7 \leq g \leq 130$ における I_s と R_a/T または \sqrt{g}/T の関係を Fig. 10 に示す。Fig. 2 に示した $100 \leq g \leq 3000$ における測定結果に比べばらつきは小さく、この結果は 3.2 節で述べた $g \gg 1$ におけるばらつきの原因に対する考察が妥当であることを示している。Fig. 10 の関係から $\pm 20\%$ 程度の精度で R_a/T の

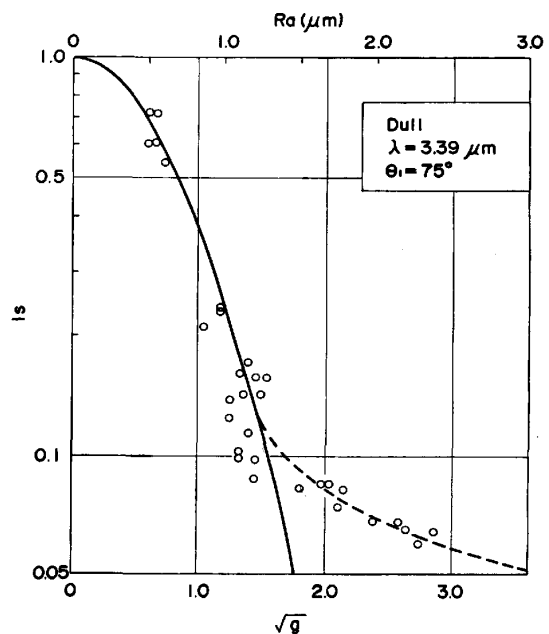


Fig. 7. Experimental results with dull finish samples. Solid line shows theoretical curve in the case of $T=60 \mu\text{m}$ and dotted line shows an experimental curve.

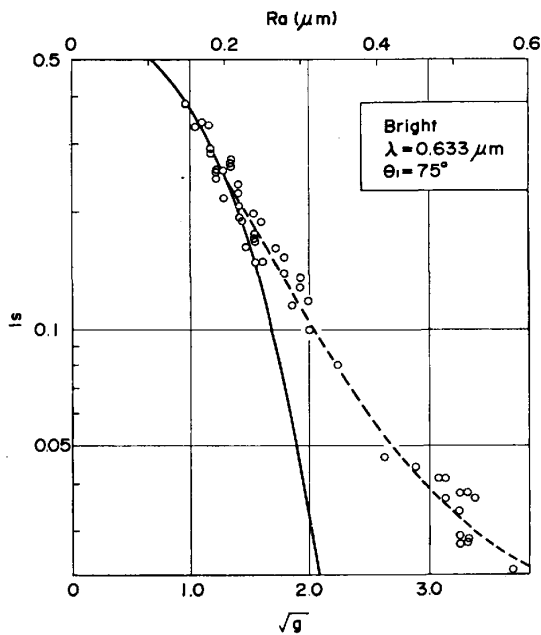


Fig. 8. Experimental results with bright finish samples.

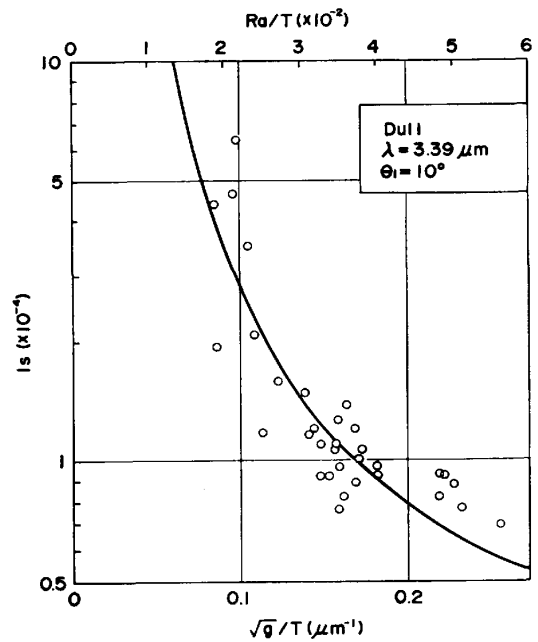


Fig. 10. Experimental results with dull finish samples in the range of $g=7\sim130$.

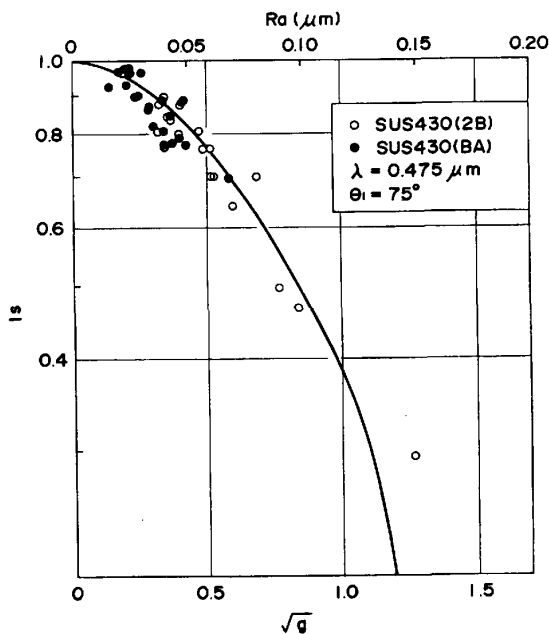


Fig. 9. Experimental results with stainless steel samples. 2B and BA mean samples pickled after annealed and bright annealed samples respectively.

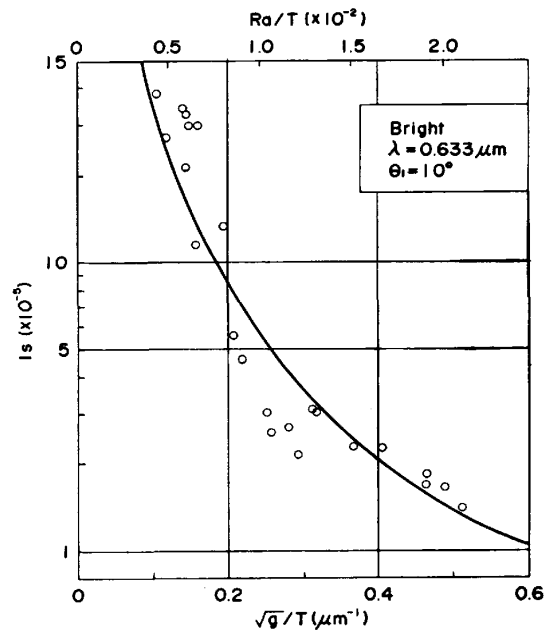


Fig. 11. Experimental results with bright finish samples in the range of $g=15\sim150$.

測定が可能である。

ブライツ材について $15 \leq g \leq 150$ における同様の関係を Fig. 11 に示す。実験結果はほぼ理論曲線と一致しておりダルク材の場合と同様 $\pm 20\%$ 程度の精度で R_a/T の測定が可能である。

なお正反射強度 I_s と拡散角の半値幅 $\Delta\theta$ の間には $g \gg 1$ において $I_s \propto \Delta\theta^2$ の関係にあり⁷⁾、前述の結果は $\Delta\theta$ と R_a/T の関係についても定性的に成り立つと考

えられる。

ステンレス鋼板について $0.5 \leq g \leq 10$ における I_s と T の関係を Fig. 12 に示す。 g の値の変化に伴う I_s と T の関係の対応は定性的に理論計算結果と良く一致しており $3 \leq g \leq 10$ の領域においては R_a が与えられた場合 Fig. 12 の各関係から T の推定が可能である。

4.3 結果のまとめ

前節の実験結果は3章における理論的考察の結果と良く一致しており次のようにまとめられる。

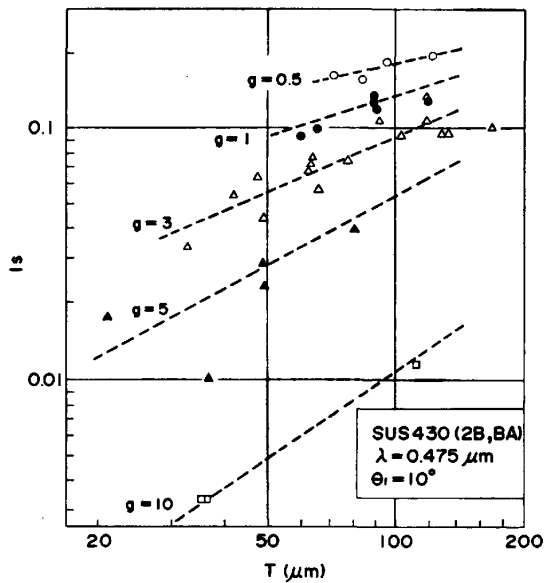


Fig. 12. Experimental results with stainless steel samples in the range of $g=0.5\sim 10$.

(1) $g \leq 4$ においては I_s は R_a のみの関数と見なせ、 I_s の測定により $\pm 10\%$ 程度の精度で R_a を求めることができる。

(2) $g \geq 10$ においては I_s は R_a/T の関数と見なせるが g の増大と共にばらつきも増大し $g \geq 100$ では相関は極めて弱い。これに対し $10 \leq g \leq 100$ においては I_s の測定により $\pm 20\%$ 程度の精度で R_a/T を求めることができる。

(3) R_a の値が高精度で与えられれば、 $3 \leq g \leq 10$ においても Fig. 12 の関係から T の値の推定が可能である。

(4) ダル材、ブライト材、ステンレス鋼板の各々について示したように、 R_a の変化範囲が5倍程度であれば、同一波長の光束を異なる入射角 (例えば 10° および 75°) で投射することにより(1)と(2)あるいは(1)と(3)の条件を満たすことが可能であり、装置化する上で好都合である。

5. オンライン粗度測定への応用

前章までの成果を用いてブライト材を対象としたオンライン粗度測定装置を試作し、1983年8月千葉製鉄所調質圧延ラインに設置した。以下本章では装置の概要とオンライン測定結果について述べる。

5.1 装置の概要

検出部ならびに全体構成を Fig. 13 に示す。光源は He-Ne レーザ (5 mW, $0.633 \mu\text{m}$) で入射角は 75° および 10° に設定されており測定されており測定条件は Fig. 8 および Fig. 11 と同様である。光検出器はシリ

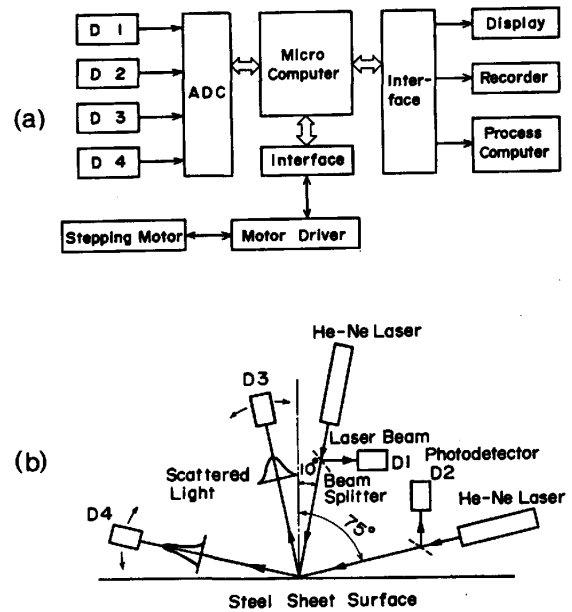


Fig. 13. (a) Block diagram of the newly developed equipment. (b) Construction of the measuring head.

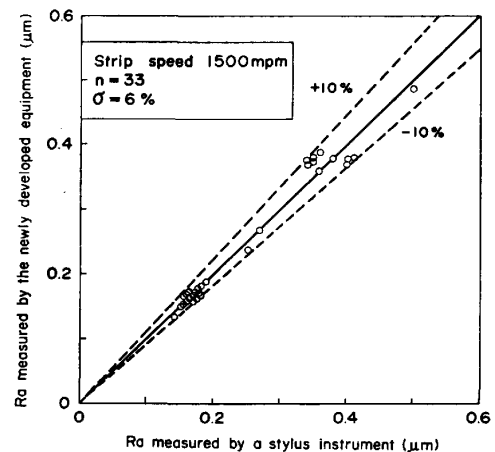


Fig. 14. Comparison of R_a values measured by a stylus instrument with those obtained by the newly developed equipment.

コンフォトダイオードであり、被測定鋼板上のレーザ光反射点を中心とする円弧上を走査し各々の入射光に対する光反射強度分布を測定する。各々の強度分布から最大強度と全反射強度を求め、前述の I_s として前者を後者で除した値を用いている。各々の入射角に対応する I_s の値から実験曲線に基づく検量線により R_a および T の値を算出する。測定周期は約 2s である。

本装置の開発にあたり、鋼板面や検出部の振動対策等に関しオンライン実用装置として次の配慮がなされている。(1) 光源、光検出器として安定、堅牢、安価なものを使用している。(2) 光源強度ならびに全反射強度を検出し正反射強度を補正することにより光源強度およ

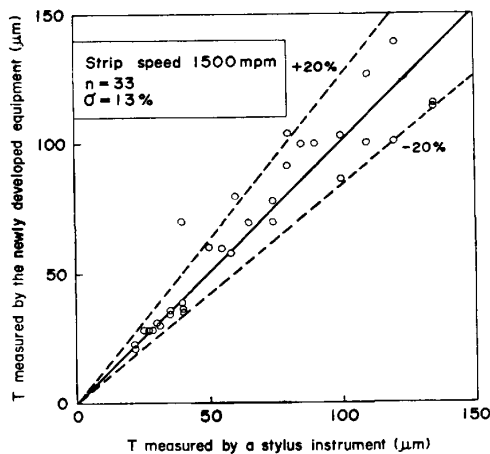


Fig. 15. Comparison of T values measured by a stylus instrument with those obtained by the newly developed equipment.

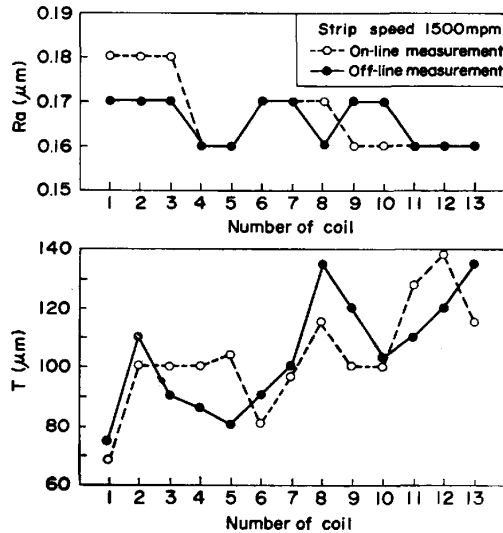


Fig. 16. Changes of R_a and T measured with each of coils that were rolled consecutively.

び鋼板表面の全反射率の変動に伴う誤差を軽減している。(3) 検出部の光学系はすべて共通のアルミダイキャスト上に配置され、振動による光軸ずれを防止している。

5.2 測定結果

Fig. 14, 15 に、 R_a と T のオンライン測定結果と被測定部位付近から採取したサンプルの触針式粗度計による解析結果の関係を示す。測定精度は R_a で $\pm 10\%$ 、 T で $\pm 20\%$ 程度でありオフライン測定時とはほぼ同等の精度が得られている。Fig. 16 に同一ロールによる一連の圧延におけるコイル数の増加に伴う R_a と T の変化を示す。1 コイル当たりの平均長さは約 8000 m である。Fig. 16 では圧延コイル数の増大に伴い R_a が減少

T が増大してゆく様子が明確にとらえられている。

6. 結 言

冷延鋼板の表面粗度 R_a 、 T と正反射強度 I_s の関係について理論、実験の両面から詳細に検討し次の結論を得た。

(1) $g \leq 4$ において I_s は R_a のみの関数とみなせ、 I_s の測定により R_a の値を精度 $\pm 10\%$ 以内で求めることができる。

(2) $g \geq 10$ において I_s は R_a/T の関数とみなせるが g の増大と共にばらつきが増大する。このばらつきの原因の一つとして $C(\tau)$ における n のばらつきがある。 $10 \leq g \leq 100$ においては I_s の測定により R_a/T の値を精度 $\pm 20\%$ 程度で求めることができる。

(3) $4 \leq g \leq 10$ においても R_a の値が高精度で与えられれば Fig. 12 の関係から T の値の推定が可能である。

また実用的測定装置開発の観点から上述(1)と(2)あるいは(1)と(3)の条件を同一波長の光束を異なる入射角で投射することにより実現可能であることを、冷延ダル材、ブライタ材、ステンレス鋼板について示した。さらにこの利点を活かしてブライタ材用オンライン粗度測定装置を開発し良好な測定結果を得た。

今後とも表面品質に対する要求はますます厳しく広汎になると予想され、各種粗度計測技術の研究がさらに急速に進むものと思われる。本論文では光反射強度から表面粗度 R_a および T を求める方法について一般的測定条件を明らかにすると共に実用的測定装置開発の要点を示した。

文 献

- 1) 中村常郎, 和田 尚: 精密機械, 22 (1956), p. 60
- 2) R. A. SPRAGUE: App. Opt., 11 (1972), p. 2811
- 3) H. E. BENNET and J. O. PORTES: J. Opt. Soc. Am., 51 (1961), p. 123
- 4) P. BECKMANN and A. SPIZZICHINO: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces (1963) [Pergamon Press]
- 5) 奈良治郎: 精密機械, 48 (1982), p. 262
- 6) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 精密機械, 40 (1974), p. 150
- 7) 高藤英生, 石田次雄, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 679
- 8) 蓮沼 宏: 精密機械, 22 (1956), p. 131
- 9) J. HOLZER and C. C. SUNG: J. App. Phys., 47 (1976), p. 3363