

## On-line Measurement of Surface Roughness and Glossiness by Using Laser Beam



浅野 有一郎  
Yuichiro Asano

鉄鋼研究所 計測制御  
研究部 主任研究員(掛  
長)



塩住 基仁  
Motoji Shiozumi

阪神製造所 設備部設  
備技術室



虎尾 彰  
Akira Torao

鉄鋼研究所 計測制御  
研究部



柳本 隆之  
Takayuki Yanagimoto

鉄鋼研究所 計測制御  
研究部



栗田 邦夫  
Kunio Kurita

鉄鋼研究所 計測制御  
研究部 部長



八角 忠明  
Tadaaki Yasumi

千葉製鉄所 冷間圧延  
部冷延技術室

### 1 結 言

冷延鋼板の表面粗度は、鋼板のめっき性、塗装性、加工性のほか、表面光沢、美観などを決める大きな要因であり、そのオンライン計測技術の開発は表面品質管理上の重要な課題とされている。とりわけ、光沢、美観はステンレスなど外観が重視される製品で重要であり、感覚量の定量化という課題も含め、オンライン管理技術の開発が強く望まれている。

他方、表面粗度および光沢の測定法としては、鋼板表面における光の散乱特性を検出する方法が有力である。前者については反射光の拡散の大きさまたはスペクトルパターンのコントラストから平均粗さ  $R_a$  を推定する方法が、後者については白色光の正反射光強度または拡散反射強度から光沢を判定する方法が提案されている<sup>1-5)</sup>。しかしこれらの方法には、前述の対象に適用する場合、次の問題点があった。

- (1) 粗度測定に関し、粗度表示パラメータが  $R_a$  のみでは不十分であると共に測定条件と精度の関係が不明である。

### 要旨

冷延鋼板の表面粗度と光散乱特性の関係について Beckmann の理論に従い数値計算による検討を行った。これにより正反射強度から粗度パラメータ  $R_a$  (平均粗さ)、 $T$  (自己相関距離) を求める場合の最適条件を明らかにした。この結果に基づき He-Ne レーザを用いたオンライン粗度計を開発し、 $R_a$  および  $T$  の測定精度として各々  $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$  を得た。またステンレス鋼板表面の視感光沢と粗度パラメータおよび光散乱特性の関係を明らかにし、判別関数を用いる手法によって視感光沢とほぼ一致する光沢判定技術を考案した。これらの知見とオンライン粗度計の原理を基に Ar レーザを用いたオンライン光沢計を開発し、これまでの目視による検査を自動化した。

### Synopsis:

The relation between surface roughness and scattered light intensity was analysed with cold-rolled steel sheets, and the appropriate condition for surface roughness measurement was selected in terms of the incident angle and wavelength of a projected light beam. These results led to the development of an on-line roughness measurement system using He-Ne laser light. The averaged roughness and the correlation distance of a surface profile were obtained with accuracy of  $\pm 10\%$  and  $\pm 20\%$ , respectively.

The relation between the sensory glossiness of stainless steel sheets and roughness parameters was also analysed and the significant correlation was found between them. According to the above results, the sensory glossiness can be measured by detecting scattered light intensities in the similar way as in the measurement of roughness parameters. On-line glossiness measurement system using Ar laser light was also developed for automatic inspection in the stainless steel rolling line.

- (2) 光沢測定に関し市販のオフライン装置と目視による判定結果が一致しない。

- (3) 高速で走行する鋼板に適用可能であり、かつ、堅牢で安価な実用装置に関する検討がなされていない。

当社ではこれらの問題に長年取組み、1983年にレーザを用いたブライト材用オンライン粗度計を開発し、千葉製鉄所調質圧延ラインに設置した<sup>6,7)</sup>。そしてさらにこの技術を発展させ、1985年にステンレス用オンライン光沢計を開発し、阪神製造所ステンレス調質圧延ラインに設置した<sup>8)</sup>。

本報では、表面粗度パラメータと光反射強度分布の関係についての理論的および実験的考察、新しい光沢判定方法、オンライン粗度計および光沢計についてその概略を述べる。

\* 昭和61年1月30日原稿受付

## 2 粗面における光散乱

### 2.1 粗度表示方法

ランダムな粗面の統計的性質は、表面形状を  $xy$  平面から  $z$  方向への凹凸で表わした場合、粗面各点の高さ分布  $P(z)$  の分散  $\sigma$  と  $xy$  平面内の一方向の断面プロファイルの自己相関関数  $C(\tau)$  が  $1/e$  に減少する距離  $T$  の2つのパラメータにより概括的に表現される<sup>9)</sup>。以下  $T$  を自己相関距離と呼ぶ。冷延鋼板表面においては、これらのパラメータについて次の結果が得られている<sup>3)</sup>。

- (1) 粗面の高さ分布  $P(z)$  は正規分布とみなせ、この場合  $P(z)$  の分散  $\sigma$  と平均粗さ  $R_a$  の間には次の関係が成り立つ。

$$\sigma = 1.25 R_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

- (2) 断面プロファイルの自己相関関数  $C(\tau)$  は、

$$C(\tau) = \exp[-(\tau/T)^n] \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表わされ、 $n$  の値は 1.8~2.2 程度の値である。

### 2.2 光散乱の理論的考察

不規則面の光反射特性に関する理論的解析については現在までにかなりの数の報告があるが、これらの中で最も一般的な取扱いをしていると考えられる Beckmann<sup>9)</sup> の理論に従い冷延鋼板の光散乱特性を考察する。ここでは粗面は完全導体であり、プロファイルの高さ分布  $P(z)$  は正規分布また (2) 式中の  $n$  の値は 2.0 (ガウス過程) と仮定する。

粗面における光散乱の幾何学的配置を Fig. 1 に示す。波長  $\lambda$  のコヒーレントな光束が入射角  $\theta_1$  で反射面上の面積  $A$  の領域に入射した場合の反射角  $\theta_2$  方向の散乱光強度を  $I(\theta_1, \theta_2)$  で表わせば、波動光学的理論と統計的考察から次の結果が導かれる。

$$I(\theta_1, \theta_2) = e^{-g} \rho_0^2 + \frac{2\pi A^2}{F^2} \int_0^\infty J_0(V_{xy}\tau) [e^{-g(1-\cos\theta)} - e^{-g}] \tau d\tau \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$F = \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\rho_0 = 2 \sin(V_x A/2) / (V_x A) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V_x = (2\pi/\lambda)(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$V_{xy} = (2\pi/\lambda)(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$g = (2\pi\sigma/\lambda)^2 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、 $C(\tau) = \exp(-\tau^2/T^2)$ 、 $J_0$  は 0 次の Bessel 関数である。

光反射強度分布の特徴を表わすパラメータとして、最も測定が容易な正反射強度  $I_s$  を選べば、(3) 式より次の結果が得られる。

$$I_s = I(0, 0) = e^{-g} + \frac{\pi F^2}{A} e^{-g} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \quad \dots\dots\dots (9)$$

さらに (9) 式は、 $g$  の値の大小により次のように近似できる。

$$g \ll 1 \text{ の場合 } I_s = e^{-g} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$g \gg 1 \text{ の場合 } I_s = f(g/T) \quad \dots\dots\dots (11)$$

(10) および (11) 式から、原理的には  $g \ll 1$  および  $g \gg 1$  の2条件下で  $I_s$  を測定することにより、 $\sigma$  (または  $R_a$ ) および  $T$  の値を求めることが可能であることがわかる。

これらの条件をさらに詳しく検討するため、(9) 式について数値計算を行った。計算にあたっては、 $g$  については 0.1~100、 $T$  については冷延鋼板の通常の値として 20~100  $\mu\text{m}$  の各範囲で変化させた。また入射光束径を約 1 mm と仮定し  $A = 10^6 \mu\text{m}^2$  とした。

Fig. 2 に計算結果を示す。 $g \leq 1$  の領域では  $I_s$  の  $T$  に対する依

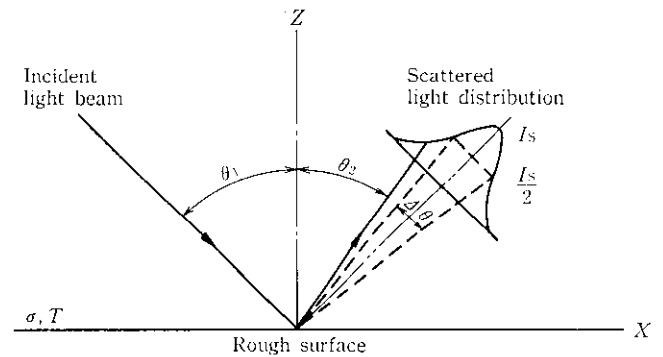


Fig. 1 Light scattering from a rough surface

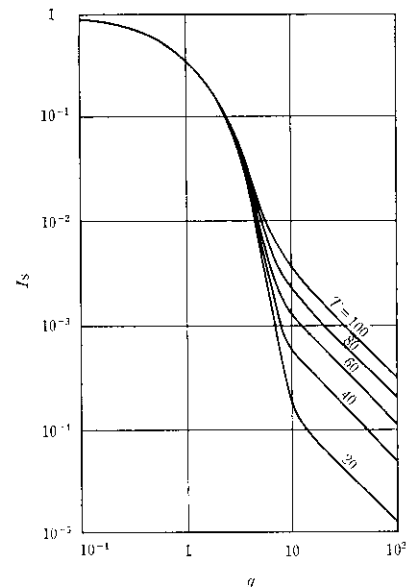


Fig. 2 Relation between  $g$  and  $I_s$  in the case of  $T=20\sim100 \mu\text{m}$

存性はほとんど無視可能であり、 $I_s$  は  $g$  すなわち  $\sigma$  のみに依存することが示されている。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  $\sigma$  と  $I_s$  の値を与えれば  $T$  の値を求め得ることが示されている。 $\sigma$  と  $T$  を  $\pm 3\%$  以内の精度で求めるための  $g$  に対するより正確な条件を Fig. 2 の計算結果に基づいて検討した。また (2) 式における  $n$  の値のばらつきが測定精度に及ぼす影響を考察し合わせて次の結果を得た。これらの内容の詳細は参考文献 7) で述べた。

- (1)  $g \leq 4$  における  $I_s$  の測定値から精度  $\pm 3\%$  以内で  $\sigma$  あるいは  $R_a$  を求めることが可能である。
- (2) 自己相関関数が  $C(\tau) = \exp[-(\tau/T)^2]$  で表わせる場合、 $g \geq 12$  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)  $C(\tau) = \exp[-(\tau/T)^n]$  であり  $n$  の値にばらつきがある場合、このばらつきに起因する誤差は  $g$  の増大とともに大きくなる。
- (4)  $4 \leq g \leq 12$  の領域においても、 $I_s$  と  $\sigma$  あるいは  $R_a$  が与えられれば  $T$  を求めることが可能である。

### 2.3 実験結果と考察

前節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。

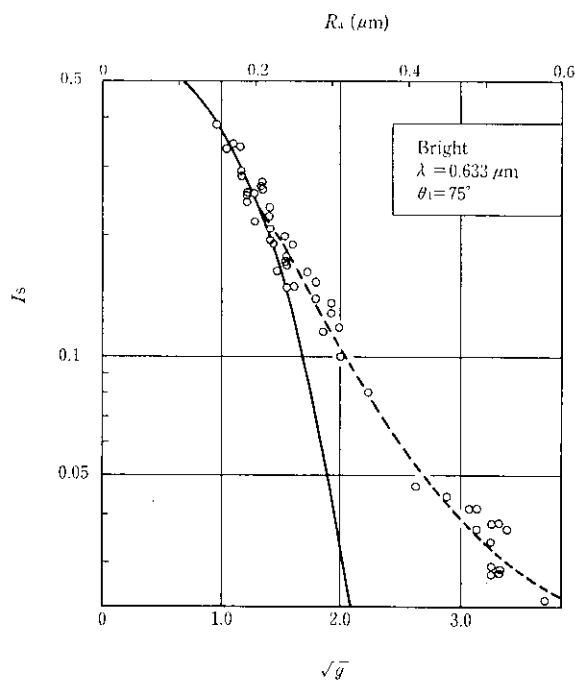


Fig. 3 Relation between  $\sqrt{g}$  and  $I_s$  (Solid line shows theoretical curve and dotted line shows an experimental curve)

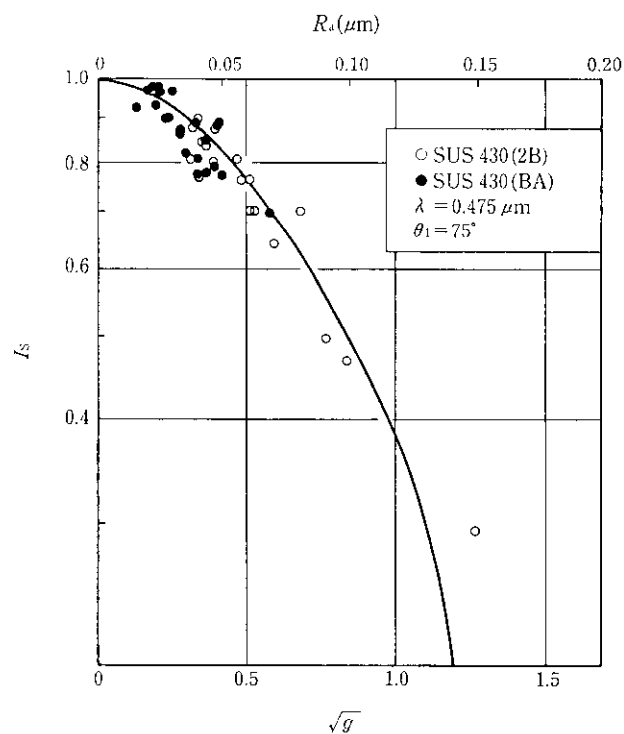


Fig. 5 Relation between  $\sqrt{g}$  and  $I_s$  in the case of stainless steel samples (2B and BA mean samples pickled after annealed and bright annealed samples respectively)

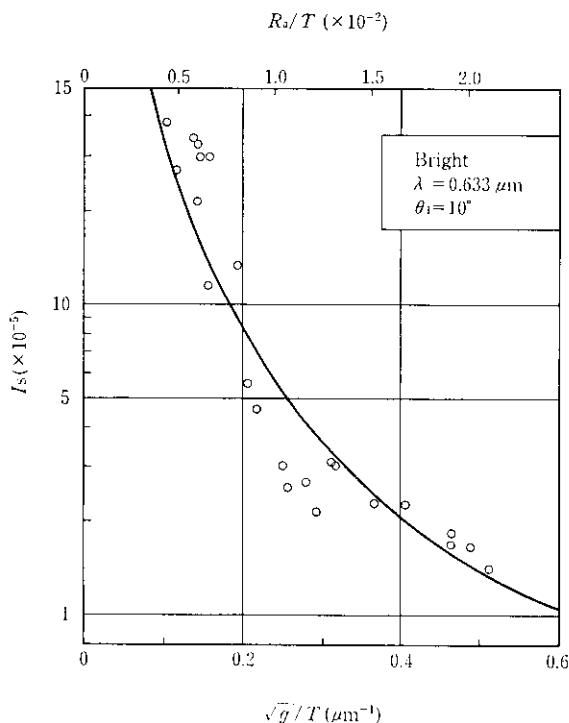


Fig. 4 Relation between  $\sqrt{g}/T$  and  $I_s$  with  $g$  ranging from 15 to 150

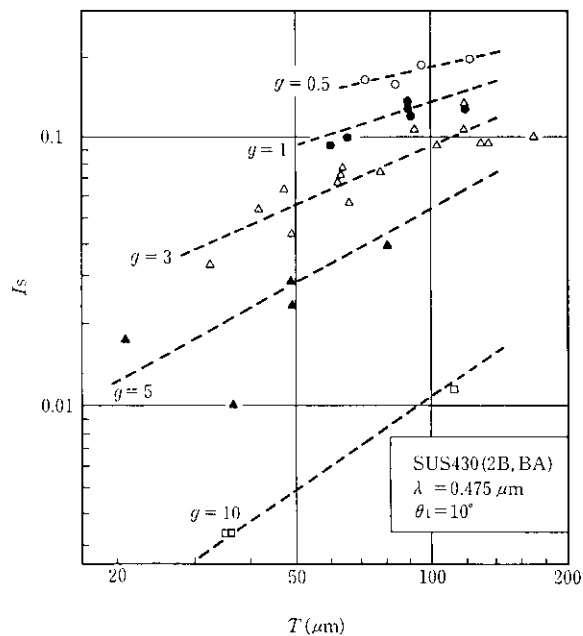


Fig. 6 Relation between  $T$  and  $I_s$  with  $g$  ranging from 0.5 to 10

サンプルは冷延ダル材 ( $R_a=1\sim 3\ \mu\text{m}$ ), ブライト材 ( $R_a=0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ), 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  $2.5\times 2.5\ \text{mm}$  の領域から10本の2次元プロファイルを採取し、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 (立体角  $5\times 10^{-8}\ \text{sr}$ ) を用いた。また以下の記述においては実用上の便宜のため  $\sigma$  の代りに  $R_a$  を用いる。

ブライト材の  $0.1\leq g\leq 10$  における  $I_s$  と  $R_a$  (または  $\sqrt{g}$ ) の関係を Fig. 3 に、 $15\leq g\leq 150$  における  $I_s$  と  $R_a/T$  (または  $\sqrt{g}/T$ ) の関係を Fig. 4 に示す。またステンレス鋼板の  $0.01\leq g\leq 2$  にお

ける  $I_s$  と  $R_a$  の関係を Fig. 5 に、 $0.5 \leq g \leq 10$  における  $I_s$  と  $T$  の関係を Fig. 6 に示す。

ブライタ材については、 $I_s$  と  $R_a$  および  $I_s$  と  $R_a/T$  の間の相関は良好で実験曲線を用いれば  $I_s$  の測定値から  $R_a$  および  $R_a/T$  の値を各々 10%,  $\pm 20\%$  程度の精度で推定可能である。Fig. 3 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は受光部開口寸法が有限であること、サンプル表面プロファイルの統計的性質に差異があることなどが原因であろうと思われる。

ステンレス鋼板については、 $I_s$  と  $R_a$  の相関は良好で  $I_s$  の測定値から  $R_a$  の値を  $\pm 10 \sim 20\%$  程度の精度で推定可能である。他方 Fig. 6 における実験条件は  $0.5 \leq g \leq 10$  であり、前述の計算結果によれば  $I_s$  は  $R_a$  と  $T$  の関数ではあるが  $R_a/T$  の関数として表わすことができない。このため Fig. 6 では、 $g$  すなわち  $R_a$  をパラメータとして  $I_s$  と  $T$  の相関を示した。この結果から  $I_s$  と  $R_a$  すなわち  $g$  を与えられれば、 $T$  の値を求めることが可能である。

ダル材についてもブライタ材とほぼ同様の結果が得られるとともに、 $g \geq 100$  における  $I_s$  と  $R_a/T$  の相関はばらつきが大きく、2.2 節 (3) が確認された<sup>7)</sup>。

またこれらの実験において示したように、 $R_a$  の値の変化範囲が測定対象とする材種において 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  $10^\circ$  および  $75^\circ$ ) で投射することにより、 $g$  の値に関する 2 条件を満たすことが可能であり、これは実用装置を開発する上で好都合である。

### 3 オンライン粗度計への応用

前章までの成果を用いてブライタ材を対象としたオンライン粗度計を開発し、1983 年 8 月千葉製鉄所調質圧延ラインに設置した。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。

#### 3.1 装置の概要

装置構成を Fig. 7 に示す。光源は He-Ne レーザ (3mW, 0.633  $\mu\text{m}$ ) 2 本であり入射角は  $75^\circ$  および  $10^\circ$  に設定されている。光検出器はシリコンフォトダイオードであり、被測定鋼板面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検出する。各々の強度分布から最大強度を求め、前述の正反射強度  $I_s$  の値としている。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 2 秒である。

本装置はその開発にあたり鋼板面や検出部の振動対策などオンライン実用装置として次の配慮がなされている。

- (1) 光検出器を走査しかつその開口径を適切に設定することにより、鋼板の振動、パスラインの変動、検出部の設置角度誤差などによる測定誤差を最小に抑えている。鋼板面の傾斜  $\pm 15/1000$  に対し測定誤差は  $\pm 10\%$ 、パスライン変動許容量は約 5mm である。
- (2) 光源強度および全反射強度を常に検出し正反射強度を補正する機能を有し、光源強度の変動および必要に応じて鋼板表面の全反射率の変動にともなう測定誤差を軽減している。
- (3) 光源および光検出器として安定、堅牢、安価なものを選定し使用している。
- (4) 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完全に防止している。

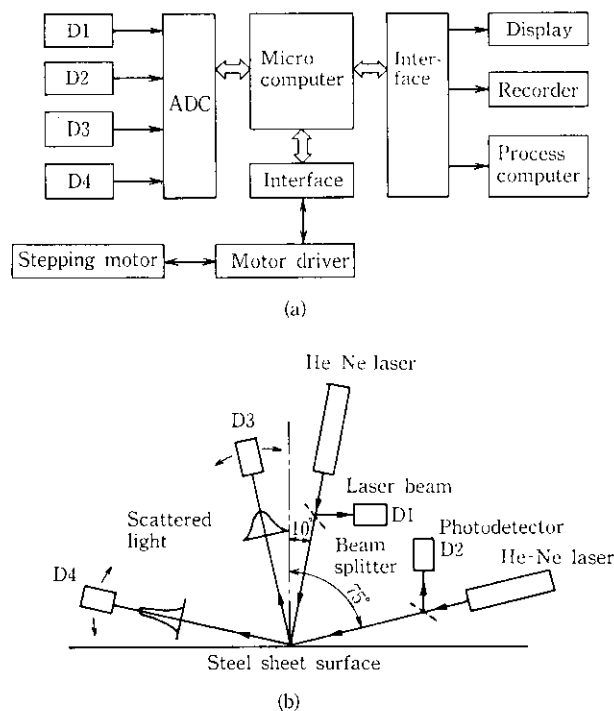


Fig. 7 Block diagram (a) of the newly developed equipment and construction of the measuring head (b)

#### 3.2 測定結果と操業への活用

$R_a$  および  $T$  のオンライン測定値の精度を確認するため、オンライン測定値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測定値を比較した。その結果、 $R_a$  の測定値については  $\pm 10\%$ 、 $T$  の測定値については  $\pm 20\%$  の精度が得られた<sup>7)</sup>。これらの精度と被圧延コイル全長にわたる測定は、冷延鋼板のオンライン粗度管理技術開発の要求に充分応え得るものである。

Fig. 8 に同一ロールによる一連の圧延におけるコイル数増加による  $R_a$  と  $T$  の変動経過の一例を示す。1 コイルの平均長さは約

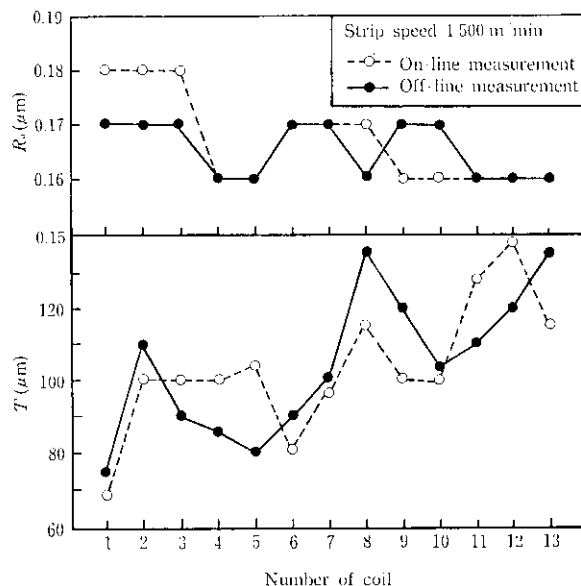


Fig. 8 Changes of  $R_a$  and  $T$  measured with each of coils that were rolled consecutively

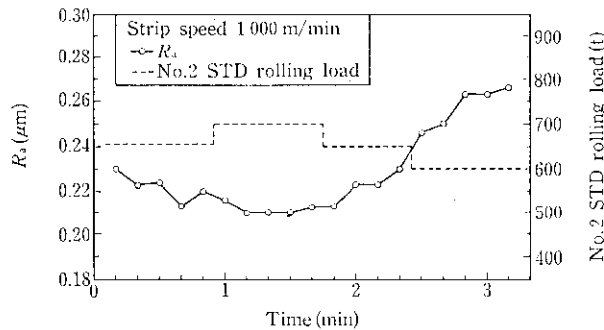


Fig. 9 An example of the roughness control by changing the rolling load

8 000 m である。図中に示した触針式粗度計によるオフライン測定値との比較から前記の測定精度が得られていることがわかるとともに、圧延コイル数の増大にともない  $R_a$  が減少し  $T$  が増大してゆく様子が明確にとらえられている。

Fig. 9 に圧延中にロールの圧延荷重を変化させた場合の  $R_a$  の変化を示す。圧延荷重ステップ状の変化に対し、 $R_a$  の変化は緩やかではあるが荷重変動に追従している様子が認められる。この結果は荷重操作による粗度パラメータの制御可能性を示している一方、圧延による粗面形成過程が必ずしも単純でないことを示唆している。

これらの応用例が示すように本装置の操業への適用は、長期にわたる粗度変動の傾向的管理から単一コイル内における粗度制御まで大きな可能性をもっており、今後ともその成果が期待できる。

## 4 オンライン光沢計への応用

### 4.1 開発の背景

ステンレス鋼板の品質管理において鋼板の光沢、つやは重要な管理項目の1つである。ここで扱われる光沢とは人間が心理的、感覚的に感ずる光沢をさしている。

現在多く用いられている光沢度測定法のうち、鮮明光沢度測定法は心理的光沢を表現するのに適しているが、この方法は人間の介入する割合が大きく、光沢を定量的に把握することは難しい。従ってオンライン測定装置への応用は困難である。このような状況からステンレス鋼板表面の心理的光沢を定量的にオンラインで測定する方法は未だ開発されておらず、作業者の目視判定に頼っているのが現状である。このために作業者ごとの判定に個人差が生じたり、低速点検作業による能率の低下、作業負荷の増大を招くなど問題が多い。

以上のような背景から、オンライン光沢計の開発が望まれている。そこで、光沢決定要因の検討、光沢と反射光強度との関係、反射光強度による光沢判別方法などを検討し、レーザを用いたオンライン光沢計を開発した。

### 4.2 光沢測定原理

#### 4.2.1 光沢の評価方法

ステンレス製造ラインでは光沢を通常4段階に判定しており、ここでは光沢度の高い方から4, 3, 2, 1と数値で表わすこととする。本論文では複数人が数回の目視判定を行った結果より等級付けられた信頼度の高いサンプルを使用している。また、鋼板の規格ごとに光沢度の等級が分けられている。

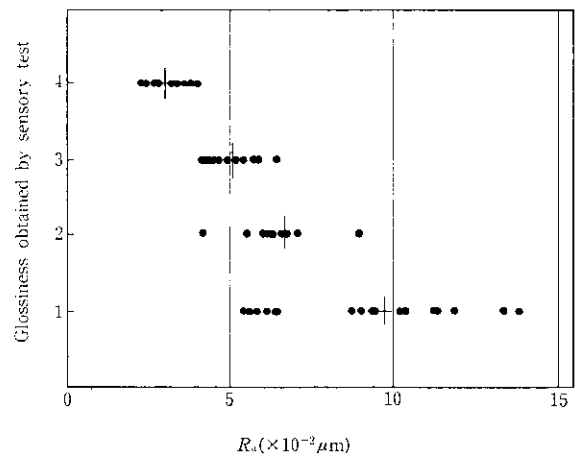


Fig. 10 Relation between  $R_a$  and glossiness

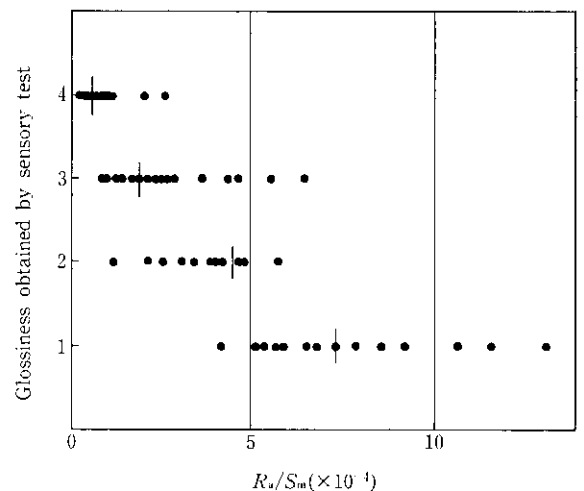


Fig. 11 Relation between  $R_a/S_m$  and glossiness

#### 4.2.2 光沢と粗度との関係

鋼板の光沢に差異を生じさせる要因としては、反射特性の違いと表面粗度の違いが考えられる。しかし、光沢度の異なるサンプルの反射スペクトル形状に大きな違いが認められないことから、表面の物性的な違いが光沢度に及ぼす影響は小さいとの結論を得た。そこで、他方の要因と考えられる粗度に関する検討を行った。

鋼板表面などの不規則な幾何学的形状の特徴は、振幅、周波数、および傾斜角などの情報により表わされることが一般に知られている。そこで、パラメータとして上記3つの情報に相当する  $R_a$ 、 $S_m$  (断面曲線の凹凸の平均間隔) および  $R_a/S_m$  を触針式粗度計により測定した。ここで前出の  $T$  値と  $S_m$  値は比例関係にあるので同等に扱うことが可能である。

表面粗度の振幅情報を示す  $R_a$  と光沢度との関係を Fig. 10 に示す。各光沢度群内で  $R_a$  測定値のばらつきはあるが、それらの重心値との関係では光沢度との間に相関が認められる。また、表面の傾斜角情報を示す  $R_a/S_m$  と光沢度との対応を Fig. 11 に示すが、この場合も同様に両者の間に良い相関が得られた。以上より光沢を決める要因として次のことが言える。

鋼板表面粗度と光沢度とは相関関係があり、粗度パラメータで表現すれば  $R_a$  および  $R_a/S_m$  が大きい程光沢度は低い。

#### 4.2.3 光沢と光反射特性との関係

2.2 にて述べたように、 $g$  値の2つの条件下で反射光強度を求め

ることにより、粗面の振幅および周波数情報を求めることが可能である。(10) および (11) 式によれば正反射強度  $I_s$  はそれぞれ振幅情報  $R_a$  と傾斜角情報  $R_a/T$  の関数になっている。一方、光沢度と粗度との間には前項で述べたように振幅情報、傾斜角情報ともに光沢度と相関があるとの結果が得られている。以上の2つの相互関係から、(10) および (11) 式の条件下で得られる正反射強度と光沢度との間にも相関関係があり、光沢度測定に光学的粗度測定法の応用が可能であると予想された。これらの検討事項を確認するために、 $g$  値の2つの条件下で正反射強度を測定して光沢度との関係を調べた。

ステンレス鋼板の  $R_a$  は  $0.01 \mu\text{m}$  から  $0.1 \mu\text{m}$  の範囲にあり、この場合に  $g \gg 1$  の条件を満たすためには入射光波長  $\lambda$  をできるだけ小さくする方がよい。しかし、 $\lambda$  によりこの条件を満たそうとすると紫外域になり、人間の目により得ることのできない情報まで正反射強度  $I_s$  の中に含まれる可能性がある。光沢測定では、できるだけ人間が目で得ている情報に近いものを得るために、入射光波長を可視域として、入射角を変えることで2つの  $g$  値を得るようにした。実際の測定条件としては、

$$\left. \begin{array}{l} g \leq 4 \text{ の場合 } I_{s70} = f(R_a) \\ \theta = 70^\circ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{array}{l} g \geq 10 \text{ の場合 } I_{s10} = f(R_a/S_m) \\ \theta = 10^\circ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、

$$\lambda = 0.475 \mu\text{m}$$

$I_{s70}$ :  $\theta = 70^\circ$  での正反射強度

$I_{s10}$ :  $\theta = 10^\circ$  での正反射強度

以上の関係より、(12) および (13) 式の条件下で正反射強度  $I_s$  を測定することにより  $R_a$  および  $S_m$  を得ることができる。従って Fig. 10 と Fig. 11 の関係を有効に用いることで光沢度の測定が可能である。一例として光沢度と  $I_{s10}$  との関係を Fig. 12 に示す。 $I_{s10}$  の重心値と光沢度との間には良い相関が得られている。

#### 4.2.4 光沢判定法

光沢度と  $I_{s10}$  および  $I_{s70}$  との間には相関があるが、 $I_{s10}$ 、 $I_{s70}$  とともに単独で光沢度の判定を行うことは各光沢度群の分布の重なりから不適当である。そこで  $I_{s10}$  と  $I_{s70}$  から構成される二次元平面上において複数に分布する光沢度群のうち、どの群に属するかにより光沢度を決定する方法を検討した。これらの群を分ける境界線を求めるには二次元平面上に存在する各光沢度群に対して、隣り合う群間の重なりが最小となるように判別関数法<sup>10)</sup>を用いる方法が適当である。光沢度既知のサンプルについて各群間の境界線を導出した結果を Fig. 13 に示す。この結果、約 90% の一致率で光沢度の判別が可能な境界線を得た。光沢度未知の任意のステンレス鋼板に対して光沢度を判定する場合には、 $I_{s10}$  および  $I_{s70}$  を測定して Fig. 13 に示した二次元平面内のいずれの領域に属するかを調べればよい。

### 4.3 装置の概要

オンライン光沢計の検出部の概略を Fig. 14 に示す。光源としてアルゴンレーザ ( $\lambda = 0.457 \mu\text{m}$ , 出力 2W) を用いている。発振器から2本の光ファイバで導かれた光は約 30m 離れた位置に設置された検出部まで伝送され、2つの異なる入射角  $10^\circ$  および  $70^\circ$  にて鋼板表面に照射される。光ファイバ射出端でのレーザ光強度は約 20 mW である。反射強度および参照光強度の測定用光検出素子としてはシリコンフォトダイオードを使用しており、反射光測定用の2つの光検出素子は被測定鋼板面のレーザ光反射点を中心とする

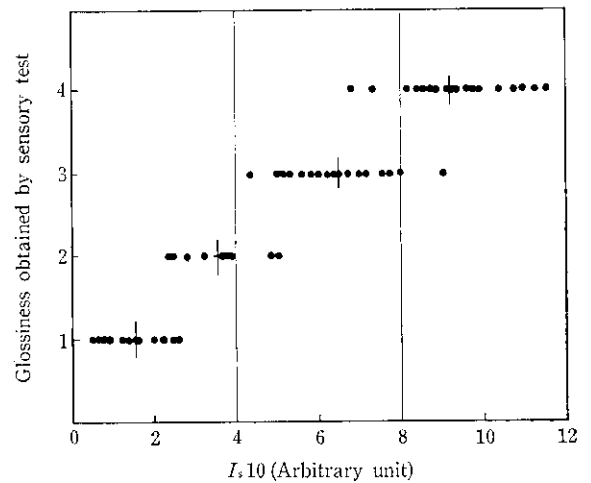


Fig. 12 Relation between  $I_{s10}$  and glossiness

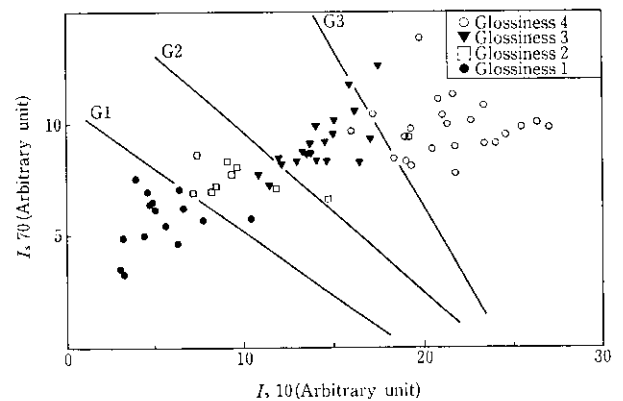


Fig. 13 Classification of glossiness based on discriminant function (off-line data)

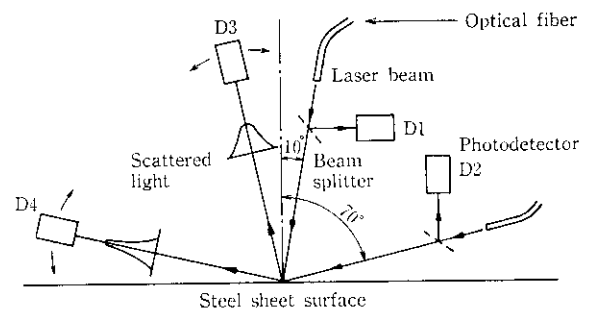


Fig. 14 Construction of the measuring head

円弧上を走査して反射光を測定する。これらの測定値は計算機に記憶された判別関数に照らし合わされて光沢度が判定される。鋼種により判別関数を変更する必要があるため、その場合には計算機の端末を用いることにより行うことができる。本装置は阪神製造所西宮工場の No. 2 スキンパスラインに設置されている。装置外観を Photo 1 に示す。

#### 4.4 オンライン実験結果と考察

スキンパス圧延時における光沢測定結果と作業員による目視判定結果の対応から、各光沢度群の分布状態と境界線の有効性を調べた。Fig. 15 に3段階に光沢度が変化した SUS 430 ステンレス鋼板 (2B 仕上) のオンライン測定結果を示す。これによると3つの

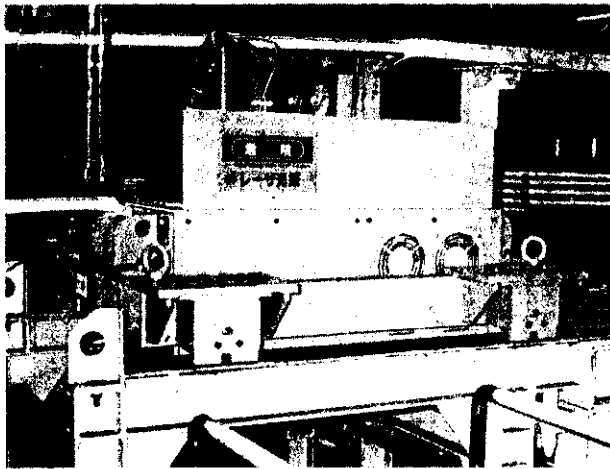


Photo 1 The on-line glossinessmeter installed in the skinpass line

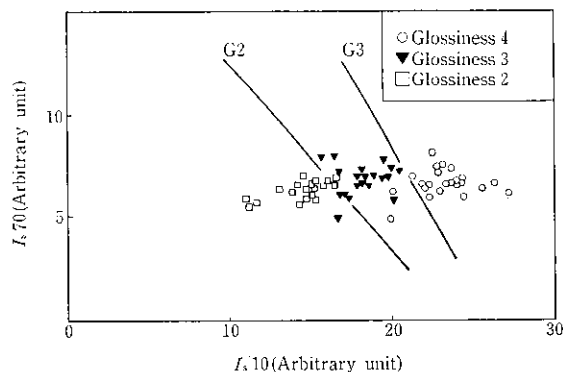


Fig. 15 Classification of glossiness based on discriminant function (on-line data)

光沢度群に分類可能であるが、サンプル測定時に導出した境界線がそのままではまらないとの結果を得た。サンプル測定時とオンライン測定時とで同一光沢度と判定したのもでもオンライン測定材の方が  $I_{s10}$  が高く逆に  $I_{s70}$  は小さい。(12) および (13) 式で示した2つの条件はそれぞれ鏡面的粗度測定条件および拡散的粗度測定条件を満たすものであることから、オンライン測定材の方がサンプル測定時より拡散反射の割合が強いことがわかる。この違いは光沢度判定時の条件の違い、例えば照明光や判定視野の違い、静止と走行中の測定の違いなどによるものと思われる。最終的にはオンライン測定時に複数の作業者の目視判定された結果に基づいて境界線を導出することになるが、判定の適中率が最良になるようにデータ数を増やして最適な境界線を得る必要がある。

また、同一コイル内で光沢度に変動がある場合に目視判定の代表性をどう扱うか、異なる光沢度群の中間的光沢が生じる場合の扱いをどうするかなどは今後も検討を続ける必要のある問題である。

ステンレス鋼板には成分の違いによる SUS 304 系や 430 系、仕上げ法の違いによる 2B 材や BA 材など複数種の鋼種がある。これらの鋼種ごとに光沢度群の等級が決められているので各光沢度群を判別する境界線も異なる。一方、粗度パラメータ  $R_a$  や  $R_a/S_m$  と光沢度との相関も鋼種ごとに異なり、SUS 430 2B 材のように両方のパラメータとの相関が強い場合や SUS 430 BA 材のように  $R_a$  との相関では比較的大きなばらつきを生じる場合がある。同様に反射光強度と光沢度との関係においても SUS 430 2B 材では  $I_{s70}$ ,  $I_{s10}$

ともに光沢度と良い相関があるのに対して SUS 430 BA 材では  $I_{s70}$  との相関が劣るなどの違いが生じる。以上のような違いを生じる原因は表面の拡散性あるいはその相補的な意味をもつ鏡面性の大小と深く関わる。

前述したように  $g \ll 1$ ,  $g \gg 1$  の条件はそれぞれ鏡面的粗度測定条件および拡散的粗度測定条件に対応するので、 $I_{s70}$  は鏡面性の大きさを、 $I_{s10}$  は拡散性の大きさを反映したパラメータとなる。一方、人間の目に感じられる光沢度の違いは以上に述べた表面の拡散性（鏡面性）の違いにより生じるものであり、光沢度を目視判定する場合には、作業者は鋼板の拡散性や鏡面性の大小を見ていることになる。そのため鏡面性の強いサンプルに対しては拡散反射成分のわずかな違いをもとにして光沢度の違いを判別しており、逆に拡散性の強いサンプルの光沢度を判別する際には鏡面性の違いを光沢度の判別基準としている。以上のことが SUS 430 の 2B 材と BA 材との間で反射特性の違いを生じさせる原因となっている。すなわち鏡面性の強い BA 材においては拡散反射情報を有する  $I_{s10}$  との相関が良く、逆に比較的拡散反射特性の強い 2B 材においては  $I_{s70}$  の違いから光沢度を良く判別可能となる。

市販の光沢計では原理上鏡面性の情報のみ抽出しているので拡散性のわずかな違いから光沢度を判定するのは困難と言える。そのために測定可能な対象が限られるという問題がある。これに対して本光沢計は鏡面性と拡散性という2つの性質を同時に測定することにより、目視による光沢判別機構に近い方法を採用しているという点で特徴がある。

## 5 結 論

冷延鋼板の表面粗度と光散乱特性に関する理論的、実験的検討結果を基にオンライン粗度計を開発した。さらに感覚量としての光沢と表面粗度、光散乱特性との関係を実験的に明らかにすることにより新しい光沢判定法を提案し、これを基にオンライン光沢計を開発した。

(1) 表面粗度と光散乱特性の関係については次の結論を得た。

- (a)  $g \leq 4$  においては  $I_s$  の測定により  $R_a$  の値を  $\pm 10\%$  以内で求めることができる。
- (b)  $10 \leq g \leq 100$  においては  $I_s$  の測定により  $R_a/T$  の値を  $\pm 20\%$  以内で求めることができる。
- (c)  $4 \leq g \leq 10$  においても  $R_a$  の値が高精度で与えられれば Fig. 6 の関係から  $T$  の値を推定できる。

またオンライン測定への応用の観点から、上述の (a) と (b) あるいは (a) と (c) の条件が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各種冷延鋼板について示し、この利点を生かしたブライト材用オンライン粗度計を開発した。

(2) 他方、光沢感と表面粗度、光散乱特性の関係について次の結論を得た。

- (a) ステンレス鋼板表面の光沢感を決める要因は主に表面粗度パラメータ  $R_a$  および  $T$  である。
- (b) したがって前述 (1) の (a) と (b) あるいは (a) と (c) の条件で得られる2つの正反射強度から光沢の判別が可能である。
- (c) 判別関数を用いた光沢判定手法により視感光沢とほぼ一致するステンレス鋼板の光沢判定が可能である。

これらの検討結果に基づき、これまでの目視検査に代るオンライン光沢計を開発した。

表面粗度は、表面品質を決める直接の要因であるばかりでなく、各種の表面計測に不可避的に関ってくるものである。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ものと思われ、これに対応して多様なオンライン表面計測技術の開発が求められると予

想される。本研究では冷延鋼板の粗度および光沢管理技術の向上に寄与するのみならず、各種の表面計測技術の開発にあたり表面粗度を論じる際の基礎を与えるものである。

#### 参 考 文 献

- 1) H. E. Bennet and J. O. Portes: *J. Opt. Soc. Am.*, **51** (1961), 123
- 2) R. A. Sprague: *Appl. Opt.*, **11** (1972), 2811
- 3) 高森英生, 石田次雄, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, **62** (1976) 6, 679
- 4) JIS Z 8741-1968
- 5) 日本色彩学会編: 色彩科学ハンドブック (1980), 625 [東京大学出版会]
- 6) 浅野有一郎, 栗田邦夫, 中川吉左衛門: 鉄と鋼, **68** (1982) 12, S1149
- 7) 浅野有一郎, 塩住基仁, 栗田邦夫, 矢部 直, 守屋 進: 鉄と鋼, **70** (1984) 9, 1095
- 8) 塩住基仁, 浅野有一郎, 相沢 均: 鉄と鋼, **71** (1985) 5, S392
- 9) P. Beckmann and A. Spizzichino: "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", (1963), [Pergamon Press]
- 10) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎: 多変量解析法, (1978), [日科技連]