
望遠測色計による鋼板のオンライン測色

On-line Color Measurement of Steel Sheets with Telescopic Spectrophotometer

虎尾 彰(Akira Torao) 栗田 邦夫(Kunio Kurita) 北川 源(Hajime Kitagawa)
善本 毅(Takeshi Yoshimoto) 中村 賢市郎(Kenichiro Nakamura) 藤田 正和
(Masakazu Fujita)

要旨：

カラー鋼板、酸洗鋼板、亜鉛めっき鋼板などの表面色調を走行状態で連続測定可能なオンライン望遠測色計を開発した。本装置は高照度白色光を対象物に照射し、その反射光を回折格子と並列光検出素子列により分光検出した後に測色演算を行うものである。カラー鋼板を対象にしたオンラインテストにより、オフライン測色による色差値との対応は ± 0.2 以内であるとの結果を得た。また、酸洗鋼板の変色度、亜鉛めっき鋼板の白色度の測定への対応などの他、鋼板以外の多くの対象物への適用が可能であり、今後製品の品質管理に有効に利用され得る。

Synopsis：

The surface colorimetry of steel sheets is important for quality control. To satisfy the strong needs of automatic inspection, a new on-line telescopic spectrophotometer has been developed. In this system, high illuminant light-sources illuminate a traveling sheet. Reflected light from the object is dispersed by a grating and its spectrum is detected by a photodiode array which consists of 31 diodes of the same size. The spectral reflective property is processed by a microcomputer. One-line performance tests have proved high reliability of the instrument, namely, the values of the color difference in colored galvanized sheets measured by this instrument coincided within ± 0.2 of those measured by an off-line colorimeter. When this instrument was applied to another sheets, the contamination of pickled sheets and the whiteness of galvanized sheets could be measured. It is resultantly expected that the control of surface property in the production line will be realized with this instrument.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

On-line Color Measurement of Steel Sheets with Telescopic Spectrophotometer



虎尾 彰
Akira Torao
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



北川 孟
Hajime Kitagawa
川鉄テクノリサーチ
(株) 研究開発センタ
ー 主任研究員(部長)・
工博



善本 毅
Takeshi Yoshimoto
川鉄商事(株) 課長



中村 賢市郎
Kenichiro Nakamura
東海大学 工学部光学
工学科 教授・工博



藤田 正和
Masakazu Fujita
東英電子工業(株) 専
務取締役

要旨

カラー鋼板、酸洗鋼板、亜鉛めっき鋼板などの表面色調を走行状態で連続測定可能なオンライン望遠測色計を開発した。本装置は高照度白色光を対象物に照射し、その反射光を回折格子と並列光検出素子列により分光検出した後に測色演算を行うものである。

カラー鋼板を対象にしたオンラインテストにより、オフライン測色による色差値との対応は ± 0.2 以内であるとの結果を得た。また、酸洗鋼板の変色度、亜鉛めっき鋼板の白色度の測定への応用などの他、鋼板以外の多くの対象物への適用が可能であり、今後製品の品質管理に有効に利用され得る。

Synopsis:

The surface colorimetry of steel sheets is important for quality control. To satisfy the strong needs of automatic inspection, a new on-line telescopic spectrophotometer has been developed. In this system, high illuminant light-sources illuminate a travelling sheet. Reflected light from the object is dispersed by a grating and its spectrum is detected by a photodiode array which consists of 31 diodes of the same size. The spectral reflective property is processed by a micro-computer. On-line performance tests have proved high reliability of the instrument, namely, the values of the color difference in colored galvanized sheets measured by this instrument coincided within ± 0.2 of those measured by an off-line colorimeter. When this instrument was applied to another sheets, the contamination of pickled sheets and the whiteness of galvanized sheets could be measured. It is resultant expected that the control of surface property in the production line will be realized with this instrument.

1 緒 言

鋼板表面の色彩情報は、製品品質を直接決定する要素となるだけでなく、間接的に表面状態を推定する手段となり得る。

例えば、着色亜鉛鉄板（以下カラー鋼板と称する）では色調そのもので商品価値が決まり、その標準色に対する色差管理は重要な品質管理項目である¹⁾。亜鉛めっき鋼板の一部で必要とされる白色度管理も同様な例である²⁾。また、酸洗の良否や鋼板上塗布膜の焼付け状態の良否を色彩情報から推定し鋼板品質を管理するのは色調測定の間接的利用法の一例である。

しかしながら、これらの鋼板の色調管理は従来主として熟練した検査員の視感による定性的評価に頼っていた。ところが最近では製品から試験片を採取し、オフライン色差計により定量評価する方法やオンラインで色調管理が可能な測色装置³⁾を利用した品質管理も行われつつあり、品質管理基準が厳しくなるにつれて、オンライン測定の要求が増してきている。

本研究はこのような要請にこたえるために、走行中の鋼板を対象に高精度で測色が可能な装置を開発し、その利用技術を確認することを目的となされた。本装置の性能評価実験をカラー鋼板製造ライン他で実施したところ期待された成果が得られたので、装置開発の経緯を含めてここでその詳細を述べる。

2 色差測定の原理およびオンライン測色計

2.1 色差の計算方法

国際照明委員会 (CIE) において 1931 年に色彩 (色) の標準化を目的とした 3 つの仮想的な基本色を制定した⁴⁾。これを 3 刺激値と呼び、可視の全波長領域で積分した値が相互に等しい 3 刺激値は等色関数 $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ で表わされる。これらのスペクトル分布曲線を Fig. 1 に示す。

一方、物体の色はそれに固有なものではなくて物体から反射され

* 昭和61年1月30日原稿受付

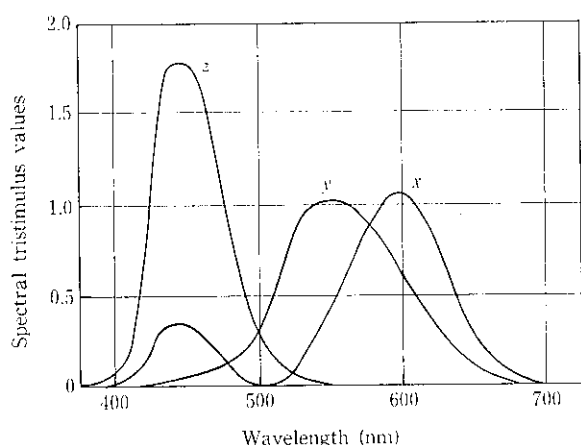


Fig. 1 Spectral tristimulus values

る光に依存するので、物体を照らす光のスペクトル分布と関係づけられる。標準照明光源のスペクトル分布を $P(\lambda)(W/nm)$ とし、標準照明光源に対するスペクトル比反射率を $\rho(\lambda)$ とすると測定物体の色の3刺激値は次式で与えられる (λ : 波長)。

$$\left. \begin{aligned} X &= \int P(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda / \bar{Y} \\ Y &= \int P(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda / \bar{Y} \\ Z &= \int P(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda / \bar{Y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

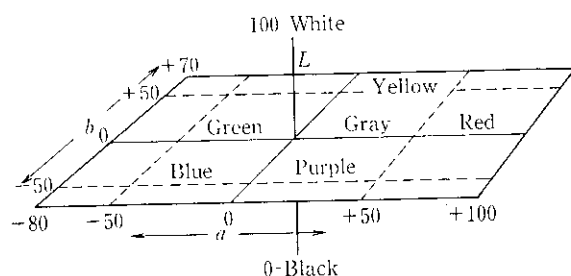
ここで、 $\bar{Y} = \int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$ であり、 λ の積分区間は 380 nm から 780 nm の波長範囲とする。

相異なる物体の色の違いを定量的に表現する際に用いられる色差 ΔE は、それぞれの物体の X, Y, Z から所定の変換式により計算される。変換式は CIE から複数提案されているが¹³⁾、ここでは JIS にも制定されている⁹⁾ Hunter の色差式⁷⁾を用いた。

この計算法では、まず L, a, b なる3特性値を(2)式から求める。これらは $L a b$ 系による明度指数 (L)、クロマチネス指数 (a, b) と呼ばれる。

$$\left. \begin{aligned} L &= 10 \times \sqrt{\bar{Y}} \\ a &= 17.5 \times (1.02 \times X - Y) / \sqrt{\bar{Y}} \\ b &= 7.0 \times (Y - 0.847 \times Z) / \sqrt{\bar{Y}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 2 に $L a b$ 三軸が直交する直交座標を用いた色空間を示す。この空間において L が大きい程明るく、 a の大小は赤から緑の度合を、 b の大小は黄から青の度合を表わすことになる。また、測定物体の L, a, b 値と標準物体のそれらの値 L_s, a_s, b_s とをこの三次元色空間に示し、その二点間距離を(3)式から求めて、得られた値を色差 ΔE とする。

Fig. 2 The rectangular surface-color solid with dimensions L, a , and b

$$\Delta E = \{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta L)^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\Delta a = a_s - a$, $\Delta b = b_s - b$, $\Delta L = L_s - L$ である。

以上より、色差を求めることはスペクトル比反射率 $\rho(\lambda)$ を求めることに帰結される。すなわち、走行する対象物の反射光を分光し、可視波長領域で同時に光強度を検知できれば高速演算処理により色彩情報を得ることが可能となる。

通常このためには、3刺激値のスペクトル分布に適合した別個のフィルタを用いる方法⁸⁾や素子自体の分光感度特性を3刺激値のスペクトルに合わせたカラーセンサ素子を用いる方法^{9,10)}、さらにはプリズムや回折格子などの分散素子とフォトダイオードアレイ(PDA)などの並列検知器群を用いる方法¹¹⁾などが考案されている。これらの中では分解能の面で分散素子を用いた方式が優れているとされている。

2.2 オンライン測色計の構成

筆者らが開発したオンライン測色計は走行中の鋼板を対象に、その色差や白度等を連続的に監視することを目的としたものであり、並列検出素子列を使用している点で原理的に Issacs らのもの¹¹⁾と類似したところもある。以下に今回開発した装置の構成を述べる。装置は異なる2種類開発し、遠隔用の大型装置Ⅰと比較的近接用の小型装置Ⅱがあるが、光学系の配置や基本的な機器構成はほぼ同一であるので内容の詳細は装置Ⅰを中心にして述べ、両者の比較については後述することにする。

本装置は連続スペクトルをもつ光を測定物体表面へ投光する照明光源、測定物体表面上の測定視野を決め、かつ反射光を集光するための受光レンズ系、集光された光を分光する反射型平面回折格子、分光された光を単色スペクトルごとに同時受光する検出素子列(PDA)、検出素子列からの出力を単色スペクトルごとに増幅する増幅回路、増幅後の信号を処理して X, Y, Z および ΔE 、白度などの色彩パラメータを演算出力する計算機および出力機器などから構成されている。光学系の基本構成と各構成要素を Fig. 3 と 4 に図示する。

照明光源としてはタングステンランプを2個用いている。これらは、JIS に規定された「照明および受光の幾何学的条件」¹²⁾に適合させるために測定物体の面法線と45度をなす方向から照射される。JIS に適合させた理由は、本来感覚量である測色値を相互に比較する場合に共通の測定条件を採用する必要があるためである。光源を2個用いた理由は S/N の大きい信号電流を得るためと、光源の照度変動やレンズ系の結像面に生じるフィラメント像の照度むらなどを軽減するためである。

測定物体上の照明視野中心から法線方向の所定位置で集光された反射光はレンズ系で平行光とされた後、回折格子にて分光される。この場合、平面回折格子を使用しているため分光光は等波長間隔に分散されて PDA を用いた検出素子列へ導かれる。これらの配置は PDA の各素子上に可視波長域内の定波長間隔おきの単色スペクトルが照射されるよう幾何光学条件を計算した上で決められている。

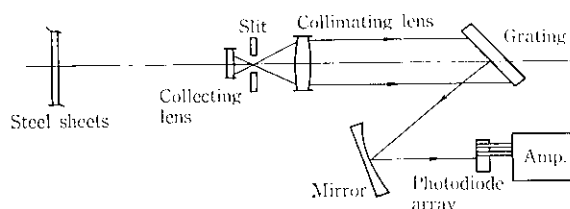


Fig. 3 Schematic arrangement of the optical system

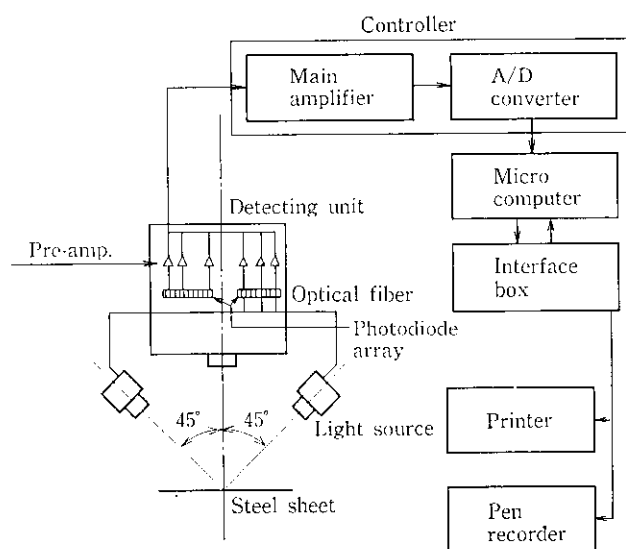


Fig. 4 Block diagram of the telescopic spectrophotometer

また、PDAの各素子の暗電流や電気系の雑音に対して十分大きな信号電流が得られるように照明や受光系は設計されており、光学系の減衰特性や鋼板の最小反射率などから計算して得た必要照度 10^5 ルクスを満足する構成となっている。

分光対象波長範囲は実用上400 nmから700 nmで十分であるとされており¹³⁾、本装置の場合には装置Iで10 nmおき、装置IIでは20 nm間隔としている。

各素子で受光されたスペクトル光は光電変換後、積分、増幅などのアナログ処理が施され、その後計算機に転送される。これらの照明光源、受光部およびアナログ処理部の一部は一体構造となっている。その外観をPhoto 1および2に示す。

AD変換後の各スペクトル成分の信号はインターフェイスを経由して16ビット演算可能なマイクロコンピュータに送られ、3刺激値、色差などの演算が行われる。出力機能としては反射率曲線、 $L a b$ 値、 ΔE などのプリントアウト、 ΔE 、白色度などのアナログアウトの他に ΔL 、 Δa 、 Δb などのデジタル表示などもある。

本装置の特徴をまとめると次のようになる。

- (1) 高照度の光源を結像照射しているので実用上外部光の影響が現れない。
- (2) 回折格子と検出素子列を組み合わせた分光測色を行っているので高分解能な測定が可能である。
- (3) 光ファイバを用いた光源強度補正機構を設けているので長時間測定時の安定性に優れている(2.3参照)。
- (4) 測定物体と装置間距離が十分に大きく、現場設置時の作業性が良い。
- (5) 測定時間が0.1秒と短く、応答性に優れている。
- (6) 仕様の異なる2種類の装置があり、測定モードや測定結果の出力方法も多様であるので測定対象に応じた使用が可能である。

装置IおよびIIの比較をTable 1に示す。また色差演算式は多くの提案があるが、必要に応じて選択可能な機能を付加することも可能である。

2.3 光源強度変動自動校正機構

光源である白色光は安定化電源は用いているが強度変動や寿命による光量変動があるため、当初は光源部に設けた光検出素子による

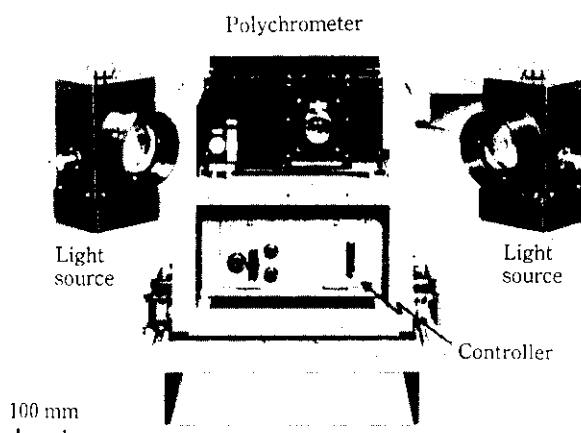


Photo 1 Apparatus I for the on-line color spectrophotometer

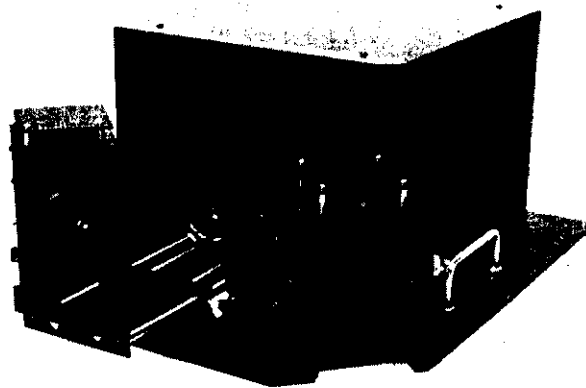


Photo 2 Apparatus II for the on-line color spectrophotometer

Table 1 Comparison of the apparatus I with the apparatus II

Item	Specifications	
	Apparatus I	Apparatus II
Lamp power	100 V, 650 W	12 V, 150 W
Wavelength interval	10 nm	20 nm
Distance	500 mm	160 mm
Measuring area	25 mm × 80 mm	10 mm × 15 mm
Dimension	720 ^h × 1 100 ^w × 550 ^d (mm)	450 ^h × 420 ^w × 200 ^d (mm)
Calculation of X, Y, Z	2° field colorimetry	10° field colorimetry
Color difference formula	Hunter L, a, b	
White standard plate	Kodak white standard paint	

モニタ機構を試みた¹⁴⁾。しかし、光量変動は各波長で様ではなくスペクトルの分布そのものが変化するため、光量を用いた補正では十分な効果を得られないという欠点があった。

そこで、代表的な複数波長での光量変動検出から、光源強度変動の自動校正を行う機構を設けて測定の安定化を図った。光源光の検出には拡散板、光ファイバおよび干渉フィルタを用い、2つの光源から3波長ずつの光を光学系内に設けた光検出器に導いた。この光検出器は測色のための分光光を検出するPDAと共用することが温度変動や電気ドリフトなどの点から好ましいが、検出素子面への導

光部が複雑になるため、同型の検出素子列を近傍に設けることで代用している。素子面へは2つの光源からの光ファイバを同一波長分だけまとめることにより、3波長分の3本が導かれている。

測定開始時には標準白色板の測定が行われる。この時の各波長反射光強度を $I_0(\lambda)$ 、モニタ光の検出強度を $I_{m0}(\lambda_m)$ とする。ここで、 $\lambda=400\sim 700\text{ nm}$ 、 $\lambda_m=\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ である。また、測色時に得られるそれぞれの値を $I(\lambda)$ 、 $I_m(\lambda_m)$ とすれば、測定対象物の分光反射率 $\rho(\lambda)$ は次式で表わされる。

$$\rho(\lambda) = \left\{ \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right\} \left\{ \frac{R_w(\lambda)}{C(\lambda)} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$R_w(\lambda)$: 標準白色板分光反射率補正值

ここで $C(\lambda)$ の値が光源強度補正值であり

$$m(\lambda_m) = I_m(\lambda_m) / I_{m0}(\lambda_m)$$

と表わすとすれば、 $C(\lambda)$ は λ の範囲ごとに以下の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} 400 \leq \lambda \leq \lambda_1: & C(\lambda) = m(\lambda_1) \\ \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2: & C(\lambda) = m(\lambda_1) \frac{\lambda_3 - \lambda}{\lambda_3 - \lambda_1} + m(\lambda_2) \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ \lambda_2 \leq \lambda \leq \lambda_3: & C(\lambda) = m(\lambda_2) \frac{\lambda_3 - \lambda}{\lambda_3 - \lambda_2} + m(\lambda_3) \frac{\lambda - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} \\ \lambda_3 \leq \lambda \leq 700: & C(\lambda) = m(\lambda_3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

λ_m としては光源スペクトル変動や検出素子の感度等を考慮して最終的には $\lambda_1=450\text{ nm}$ 、 $\lambda_2=540\text{ nm}$ 、 $\lambda_3=620\text{ nm}$ を選択している。

3 本装置を用いた実験結果と考察

3.1 基本的性能評価試験

3.1.1 標準白色板の選定

分光測色においては使用する標準白色板の分光反射光強度を基準として測定対象物の分光反射率 $\rho(\lambda)$ が算出されるので白色板の特性をいかに良くするかは重要であり、白色板の違いにより同一サンプルを測定しても測色値は異なる。本装置では Kodak 社の標準白色ペイントを、標準塗布条件で鋼板に塗布した後焼付けて製作した白色板を使用している¹⁵⁾。

従来から2種類の測色計（分光方式と3刺激値直読方式）に使用されている白色板と、本装置で選定した白色板の分光反射率を

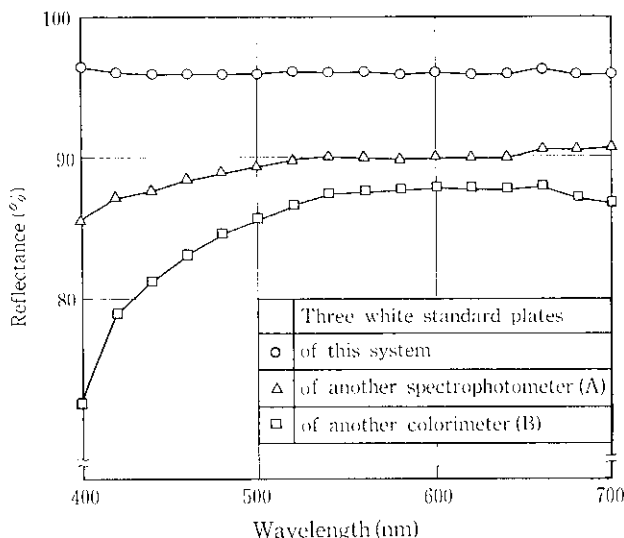


Fig. 5 Spectral reflectance of three white standards

Fig. 5 に示す。これより、本装置用に製作した白色板の反射率は可視波長領域で十分に平坦かつ高いことから、最も優れていることがわかる。これは、JIS に規定された「常用標準白色面」が具備すべき条件の一つを満足している¹²⁾。

3.1.2 波長分離特性

分光測色においては波長分離特性が測色精度に直接影響するため、水銀光源の輝線スペクトルの測定、中心波長既知の干渉フィルタを用いた測定およびレーザ光を用いた測定によって、その特性を調べた。その結果、分光誤差は $\pm 2\text{ nm}$ 以内であり、10 および 20 nm の等波長間隔分光法であるうえに色差などの相対値を測定する本装置の場合実用上満足できる特性であると言える。

3.1.3 位置変動による測定誤差

測定対象物の距離変動や角度変動による測定誤差を調べたところ、高明度試料に対して色差測定誤差を 0.2 以内に納めるための許容条件は次の通りであった。すなわち距離変動で $\pm 4\text{ mm}$ 以内（装置Ⅱの場合 $\pm 2\text{ mm}$ 以内、以下括弧内は装置Ⅱの場合を示す）、左右角度変動で $\pm 2/100$ 以内（ $4/100$ 以内）、前後方向角度変動にして $\pm 1/100$ （ $\pm 2/100$ 以内）であった。装置ⅠはⅡに比較して距離変動に対しては影響が小さいが、角度変動による測定誤差は大きくなり規制条件は厳しくなる。いずれの装置を使用するにせよ、オンライン測定時には鋼板走行方向の振れを少なくするために、抑えローを設置するなどの振れ防止対策を施す必要がある。

3.2 安定性評価試験

3.2.1 電源変動の影響

装置Ⅰの光源への印加電圧を変えた場合に、2.3 で述べた補正機構が有効に働くかどうかを調べた。Fig. 6 に $I(\lambda)/I_0(\lambda)$ と $C(\lambda)$ との対応を示す。これより各波長（この場合 $\lambda_1=450$ 、 $\lambda_2=550$ 、 $\lambda_3=650\text{ nm}$ とした）ともに強度比が 0.2~1.2 の広い範囲で変化した場合でもモニタ値 $C(\lambda)$ も良く追従して検出されていることがわかる。装置Ⅱについては電源を $100 \pm 10\text{ V}$ 変化させた場合の ΔE 変動値は 0.1 以内であった。

3.2.2 長時間安定性試験

ある時刻とその後一定時間経過後とで同一試料の各波長信号強度

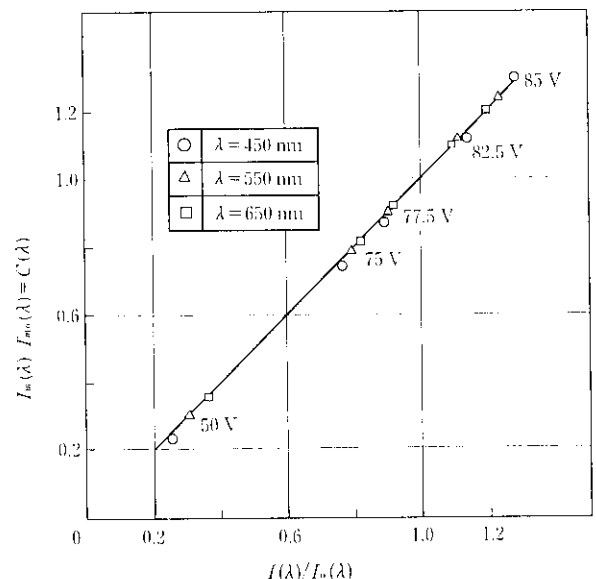


Fig. 6 Comparison of the intensity ratio of reflected light with that obtained by the monitoring system

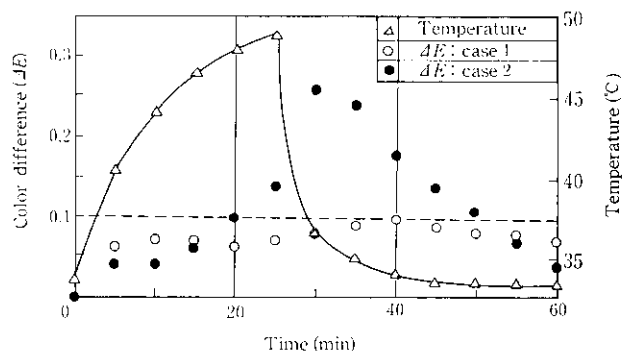


Fig. 7 Fluctuations of color difference when the atmospheric temperature is changed (Case 1, with the monitoring system; case 2, without the monitoring system)

をモニタリングし、(5)式に基づいて数値計算を行い、補正機構の有効性を調べた。装置Ⅰを使用し、試料としてはページ色カラー鋼板、モニタ波長としては450, 540, 620 nmの3波長を用いた。ある時刻での測定値をケース1、3波長モニタによる補正を行った場合の測定値をケース2、補正を行わなかった場合をケース3とし、参考として波長540 nmのみを用いた補正すなわち $C(\lambda) = m(540)$ のみによる補正を行った場合の測定値をケース4とする。これらのケースについて、ケース1を基準とする色差値の変動はケース2で0.08、ケース3で0.47、ケース4で0.32となった。実用上許容される色差変動は0.1以内と考えられるので、3波長を用いた補正法が最良であり、要求を満たすことがわかる。

次に周囲温度を変動させた場合の色差測定誤差を調べた。温度変動による光源のスペクトル変動が測定誤差をもたらすからであり¹⁶⁾、モニタ用干渉フィルタの透過特性変化やモニタ光取出口の熱膨張による位置変動、検出素子や回路の温度ドリフトなども安定性を損う原因として考えられる。そこで干渉フィルタは光学系内の検出素子列上に設置し、光学系を内蔵する筐体全体を25°Cに温度制御することによりドリフト等を軽減している。Fig. 7には光源部筐体付近の温度と、同一試料の色差値変動との対応を3波長によるモニタを行った場合と行わない場合について示した。これより、自動校正を行うことにより周囲温度が変動しても色差誤差は0.1以内で安定しており、実用上十分な性能であると言える。また、終日連続測定を行っても同様に色差変動は0.1以内であり、長時間安定性は良好であった。

3.3 オフライン測定実験

3.3.1 各種測色計を用いたカラー鋼板の測定

カラー鋼板を用いて5種類の測色計による比較測定実験を行った。使用した装置は以下の5台であり、JISに規定された「照明および受光の幾何学的条件」¹²⁾を考慮して検討を加えた。

- A: 本装置Ⅰ, 45° 照射・0° 受光
- B: 本装置Ⅱ, Aと同一方式
- C: 積分球使用分光測光方式, 拡散照射・0° 受光
- D: 積分球使用3刺激値直読方式, 0° 照射・拡散受光
- E: Dと同一方式, メーカーの異なるもの

測定試料は5色のカラー鋼板で各色とも人工的に色差レベルを5段階に変えた鋼板を用意した。また、それぞれの光沢度も高光沢、低光沢の2条件にて作製してあるので合計50枚の試料にて測定した。測色の場合、測定方法、標準白色板の違いなどから L, a, b などの指数を直接比較することは不適切なので、ここでは $\Delta E, \Delta L$ な

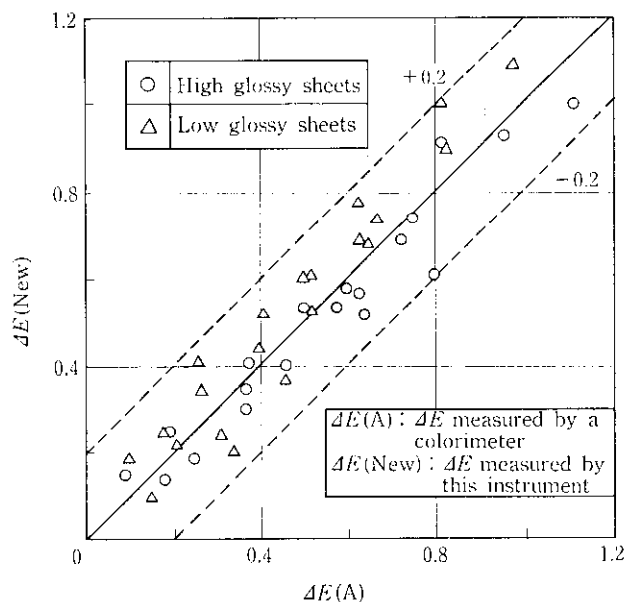


Fig. 8 Comparison of color difference obtained by this instrument with that obtained by the colorimeter in the measurement of colored galvanized steel sheets

どの差の値を比較することとした。

その結果の一例として装置AとDとで測定した ΔE の値の対応をFig. 8に示した。本来方式の異なる装置間での比較は適切ではないが、ここでは以下の理由により比較を行った。すなわち、カラー鋼板製造ラインでのオフラインチェック用として装置Dが使用されていたこと、およびオンライン実験時の精度チェックにも装置Dを使うことが予想されたからである。この比較結果より、光沢性の高低にかかわらず両者は ± 0.2 以内の色差誤差内で一致しており、本装置が遠隔測色であることを考慮すると色差の識別能力は良好であると言える。また、A~Eそれぞれの装置間にて色差値を比較したが、同一方式のAとBあるいはDとEでは色差にして ± 0.1 以内、他の方式同士でも ± 0.2 以内の一致が得られた。通常の測色計における再現性に関しても ± 0.2 程度が一般的である¹⁷⁾ことや、厳密な分光測色を行っている装置Cとの対応においても ± 0.2 以内の差で一致していることを考慮すると装置Ⅰ、Ⅱとも十分な性能を有すると言える。

3.3.2 他の対象への適用実験

カラー鋼板以外にも色調をオンラインで測定したいとの要求は強い¹⁸⁾ので本装置の広範囲にわたる適用が考えられる。そこで、鉄、非鉄分野などで考えられる対象物についてオフラインでの測定実験を試みた。測定対象としては酸洗鋼板、亜鉛めっき鋼板、銅箔、カラータイルなどである。試料は色調の異なるものを複数枚用意し、比較として前述の装置Dの測色計を用いた。測定結果をFig. 9に示すが、亜鉛めっき鋼板で高目の色差が測定される他は色差0~10以上の広い範囲にわたって ± 1 以内で一致しており、各製造プロセスへの適用が可能である。

この亜鉛めっき鋼板の場合、表面の白色度を管理する必要がある²⁾白色度として明度指数 L の使用が可能である。すなわち、通常用いられる Lab 系の白色度 $W(Lab)$ は

$$W(Lab) = 100 - \{(100 - L)^2 + a^2 + b^2\}^{1/2} \quad (6)$$

と定義されるが、 $a, b \ll L$ の場合は

$$W(Lab) \approx L \quad (7)$$

となり、白色度を L で代用可能だからである。そこで本装置Ⅰに

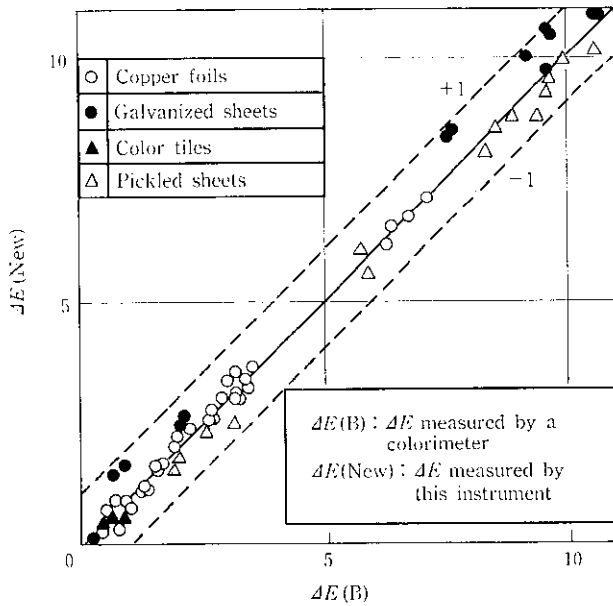


Fig. 9 Comparison of color difference obtained by this instrument with that obtained by the colorimeter in the measurement of pickled steel sheet, galvanized steel sheet, copper foil and tile

より L 値を測定し、装置Dによる値と比較したところ白色度 50 から 70 の広い範囲において ± 0.5 以内の誤差で一致しており、実ラインでの使用も可能である。従って、オンライン測定による製品品質の管理やめっき液の管理への利用も期待される。

以上のように、本装置は市販の各種測色計と同等またはそれ以上の分解能を有し、適用対象も広範囲にわたるので、それぞれの製造プロセスに応じた利用方法を選択することによってオンライン測定に適用可能である。

3.4 オンライン測定実験

3.4.1 カラー鋼板への適用

今回開発した遠隔測色計（装置I）をカラー鋼板製造ラインに設置して走行鋼板を対象に測定を実施した。設置場所は約 4m の垂直パスラインの中間で板幅方向のほぼ中央部である。鋼板は一定の張力を受けて走行しているが、パスが長く振れが生じるので測定部位の上下 300mm の位置に鋼板を挟む形で前後面から直径 100mm のゴムロールを設置して板振れ防止対策を講じた。

オンライン測定では、

- (1) 任意の瞬間における反射スペクトルの測定
- (2) 約 0.25 秒おきの色差測定値の推移の表示
- (3) 約 0.1 秒おきの測色値（色差、白色度他）のアナログ出力
- (4) 設定時間ごとの測定値、例えば $X, Y, Z, L, a, b, \Delta E$ のプリントアウト

などの機能があり、それぞれを選択可能である。通常のオンライン測定では (3) と (4) を組み合わせて使用している。各色カラー鋼板標準板の L, a, b 値は測定ごとに記憶させても良いが、通常はあらかじめ測定した値を記憶させておき（100 種類分ファイル可能）色替えごとに数値を引き出して使用する。

Fig. 10 に約 2m/s の速度で走行するカラー鋼板各種のオンライン測定値とライン出側にて切出したオンライン測定部近傍のオフライン測定値との対応を示す。両者は良く対応しており色差 0.2 以内の差で一致している。両者に差があるのは設置角度の不一致による

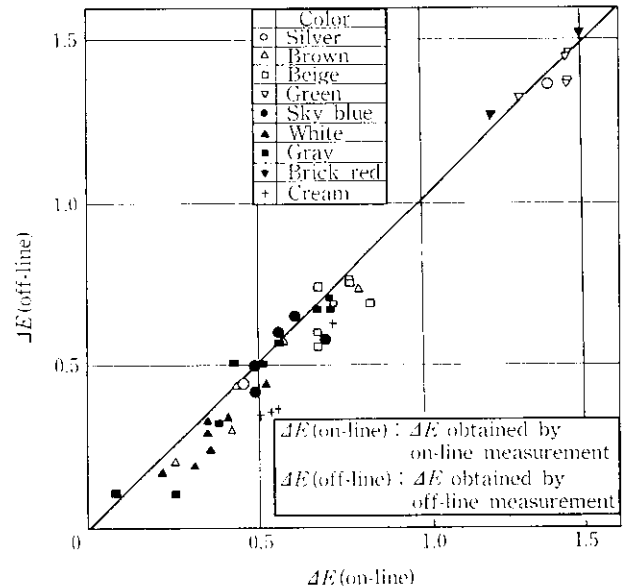


Fig. 10 Comparison of off-line measurement with on-line measurement

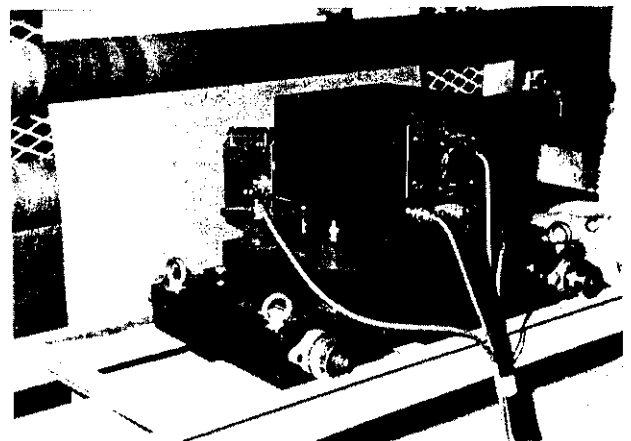


Photo 3 The telescopic spectrophotometer installed in the color coating line

ものであり、全体的にオフライン測定値の方が低目に測定されている。これは、板振れ防止用ロールで鋼板を表裏面から挟み込んでいるが、その締め付けが強かったために鋼板面が角度にして 1/200 程度傾いていたことによるものである。従って高精度を期するためには、事前の位置設定および調整には十分注意を払う必要があり、そのための調整機構を有することが望ましい。

また、装置IIを用いたオンライン測定（Photo 3 参照）では、通常現場にて使用されているオフライン色差計による測定値との比較で約 ± 0.1 以内で一致した値が得られた。色差計の種類の違いや同一機器における再現性を考慮すると ± 0.1 の違いはほぼ限界と考えられるので^{17,19)}、例えば色差 ± 0.5 以内でラインの作業管理を行うとすれば、オンライン測定器とオフライン測定器とは同一種類の機器を使用する必要があるだろう。

3.4.2 酸洗鋼板への適用

酸洗鋼板の白色度管理は品質管理上重要であり、オンライン測色計の適用が期待される。そこで実際の酸洗ラインに装置を設置して、従来、目視で検査している表面変色度との対応を調べた。変色の度合いは定量評価できないので、作業者の識別例えば変色の程度

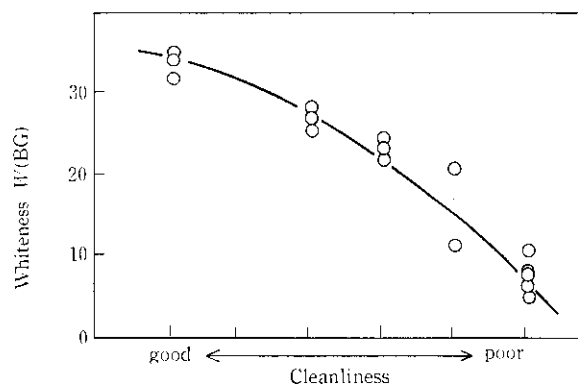


Fig. 11 Comparison of surface cleanliness of pickled sheets with whiteness obtained by this instrument

を大, 中, 小と区別することにより行った。また, 鋼板のパスライン変動誤差を減らすためにロール (直径約 900mm) の巻き付き部にて測定した。色彩パラメータとしては色差, 白色度などが考えられるが, ここでは白色度 $W(BG)$ すなわち次の式,

$$W(BG) = 3.388 \times Z - 3 \times Y$$

より得られる値を用いた。Fig. 11 に目視変色度と白色度との対応を示すが, 一定の相関があり変色の大小を白色度により定量化することが可能である。変色のある酸洗鋼板の反射スペクトルを調べたところでは, 短波長側において吸収性があるため, $W(BG)$ のように 3 刺激値の中でも短波長の Z 成分を用いたパラメータ $W(BG)$ を用いた場合には変色の度合を感度良く識別可能である。他のパラメータ, ΔE や $W(Lab)$ でも変色の大小を推定することができる。また, 実際には色彩パラメータ以外のものを適用することも可能であろう。また, 変色の発生場所も局部的であることも考えられるので, 鋼板長手方向測定値の統計的処理や板幅方向での測定も必要となろう。

以上よりオンライン測色計の酸洗鋼板変色度管理への適用が可能である。

4 結 言

走行鋼板の色差や白色度などを非接触, 高速に精度良く測定できる「オンライン測色計」を開発した。装置は遠隔用と近接用の 2 種あり, これらを用いてカラー鋼板, 酸洗鋼板を対象に実験を行った。その結果, 次の点が明らかになった。

- (1) 両装置とも等波長間隔の分光測光方式を採用している。分光には回折格子とフォトダイオードアレイを使用しており, 波長分離精度は約 $\pm 2 \text{ nm}$ である。
- (2) 使用する標準白色板の可視波長領域での分光反射光強度は約 95% でほぼ一定であり, JIS の条件を満足している。
- (3) 市販のオフライン測色計と両装置による色差測定値との対応は ± 0.2 以内の差で一致している。この差は測定方式や機種ごとに異なるもので, 非接触方式としては実用上満足できる性能である。
- (4) 光ファイバを用い, 3 波長での光源強度変動補正を行うことにより測定値の安定性を高めている。このため, 測定の再現性は色差値にして ± 0.1 以内を実現している。
- (5) カラー鋼板製造ラインへの適用実験によれば, 各色鋼板の標準板との色差をオフライン測定値と ± 0.2 以内の差で測定可能である。また, 白色度を用いることにより酸洗鋼板の変色度をオンラインで測定可能であるとの結果を得た。
- (6) 亜鉛めっき鋼板やカラータイル, 銅箔, 紙など多くの製造プロセスへの適用が期待される。装置は測定面との距離 500 mm の遠隔用と, 同じく 160 mm の近接用の二種類があるので測定対象に応じて選択可能である。
- (7) オフラインおよびオンライン実験を通じて, 測色パラメータを用いた表面性状の制御の可能性を得たので, 今後はより実用的な利用方法の研究を行う必要がある。

本装置は以上のような性能を有するので走行鋼板をはじめ種々の製造プロセスへの応用が可能であり, 品質管理体制の強化, 歩留り向上などに寄与することが期待される。

終わりに, オンライン実験の遂行に当たり種々協力いただいた川鉄鋼板株式会社千葉工場の関係各位に対してもお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 岡 真二: 塗装技術, **21** (1982), 67
- 2) 松田 明, 吉原敬久, 高田顕人: 鉄と鋼, **69** (1983) 13, S1110
- 3) S. J. Kishner: *Plast. Eng.*, June (1980), 30
- 4) 日本照明委員会: 測色, 国際照明委員会 (CIE) 公式勧告集 (日本語版, No. 15, E-1.3.1) (1971)
- 5) 山中俊夫: 照明学会雑誌, **62** (1978) 12, p. 638
- 6) JIS Z-8730-1970
- 7) R. S. Hunter: *J. Opt. Soc. Amer.*, **48** (1958), 985
- 8) R. S. Hunter: *J. Opt. Soc. Amer.*, **32** (1942), p. 509
- 9) 加藤久雄, 小島雅彦: 電子通信学会技術研究報告, **81** (1981), 177, 49-54 (SSD81-61)
- 10) 船引健介, 井上十九男, 志村幹彦: *Omron Technics*, **71** (1984), 6-14
- 11) Color Control, Inc: USP 3, 874, 799
- 12) JIS Z-8722-1971
- 13) 日本色彩学会編: 「色彩科学ハンドブック」, (1980), 206, [東京大学出版会]
- 14) 虎尾 彰, 北川 益, 善本 毅, 中村賢市郎, 杉田七三郎, 藤田正和: 「オンライン望遠測色計によるカラー鋼板の測色」, 色材研究発表会, **32**, (1983)
- 15) F. Grum and G. W. Luckey: *Appl. Opt.*, **7** (1968), 2289
- 16) 虎尾 彰, 北川 益, 善本 毅, 中村賢市郎, 杉田七三郎: 鉄と鋼, **70** (1984) 9, 1277-1284
- 17) 日本色彩学会編: 「色彩科学ハンドブック」, (1980), 277, [東京大学出版会]
- 18) R. P. Shead: 紙パルプ技術タイムズ, **28** (1985), 7, 22-24
- 19) 品田 登: 塗料の研究, **101** (1978), 70-75