

## オンライン遠隔測色計の開発

論文

虎尾 彰\*・北川 孟\*<sup>2</sup>・善本 毅\*<sup>3</sup>  
 中村賢市郎\*<sup>4</sup>・杉田七三郎\*<sup>5</sup>

## Apparatus for the On-line Telescopic Color-Spectrophotometry

Akira TORAO, Hajime KITAGAWA, Takeshi YOSHIMOTO,  
 Ken-ichiro NAKAMURA and Shichisaburo SUGITA

## Synopsis :

The surface color difference of steel sheets, especially of colored galvanized sheets, is one of the most important factors to be measured. The measurement is usually carried out by 'on-line' or 'off-line' visual inspection, or by 'off-line' instrumental one, but it has not been done by 'on-line' instrumental one.

Through a strong request to establish automatic inspection technique for on-line use, a new inspection system has been developed. In this system, two light-sources illuminate a travelling sheet with the intensity of more than  $10^5$  lux. A high speed data processor provides the spectral reflective property of the illuminated sheet surface. Remote inspection of the instrument has an advantage that it can be installed in almost any production line. On-line performance tests have proved high reliability of the instrument; the values of the color difference measured by this instrument coincide within  $\pm 0.2$  with those measured by an 'off-line' sampling test with a spectrophotometer. Applying this instrument to the production line, the color difference of the sheet to its standard color is successfully measured over the whole length of a coil. It is resultantly expected that the control of the color difference in the production line will be realized with this instrument.

## 1. 緒 言

鋼板表面の色や光沢などの光学的性質は、製品の品質を決定する一つの要素である。とりわけ着色亜鉛鉄板(カラー鋼板)では色調そのもので商品価値がきまりその色調管理は主要な品質管理項目である。カラー鋼板の中でも最近家電機器に使用されているPCMと呼ばれる製品はさらに厳しい基準が色調検査がなされている<sup>1)</sup>。

また電気めつき鋼板などの表面処理鋼板やステンレス鋼板のみならずSPCC, SPCEのような一般冷延鋼板, などにおいても色調は重要な管理項目である。熱延鋼板の酸洗条件の良否を判定する手段としても色調検査は有効に利用され得る。

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。最近では製品から試験片を採取し光学的に定量評価する方法も普及してきてはいるが、オンラインで製品全量の色調管理を行い操業中に異常事態に対応する体制はとられていない。このような操業体制を実現するために

はまずオンラインで色調管理が可能な測定装置(オンライン測色計)の開発, 実用化が前提となる<sup>2)</sup>。

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できる装置を開発することを目的としてなされた。本試作装置の性能評価実験をカラー鋼板製造ラインで実施したところ期待どおりの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のべる。

## 2. 色差測定の原因およびオンライン測色計

## 2.1 色差の計算法

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三つの仮想的な基本色を制定した<sup>3)</sup>。これを三刺激値と呼ぶ。可視の全波長領域で積分した値が相互に等しい三刺激値は等色関数 $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ で表される。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のものではなくて物体から反射され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

昭和58年11月9日受付 (Received Nov. 9, 1983)

- \* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)
- \*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)
- \*<sup>3</sup> 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)
- \*<sup>4</sup> 東海大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tokai University)
- \*<sup>5</sup> 東英電子工業(株) (Toei Electronics Co., Ltd.)

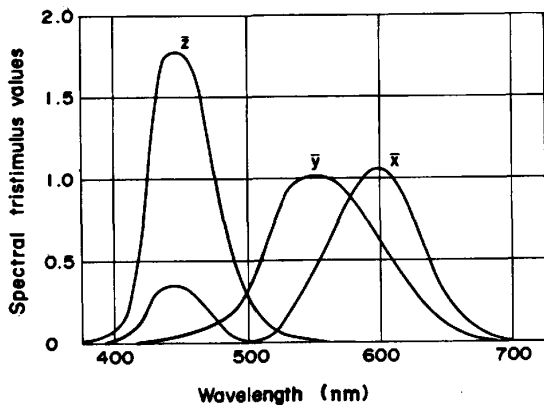


Fig. 1. Spectral tristimulus values.

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三刺激値は次式で与えられる (ここで  $\lambda$  は波長である)。

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

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

相異なる物体のそれぞれの  $X, Y, Z$  から両者の色差が所定の変換式により計算される。

変換式は CIE からいくつか提案されているが<sup>4)</sup>、ここでは JIS にも制定されている<sup>5)</sup> HUNTER の色差式<sup>6)</sup>を用いた。

この計算法では、まず  $L, a, b$  なる三特性値を(2)式から求める。

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

測定物体の三特性値  $L, a, b$  と標準物体の値  $L_s, a_s, b_s$  とを  $L$  軸,  $a$  軸,  $b$  軸を直交座標とする三次元空間に表示し二点間距離 (すなわち色差) を(3)式から求める。

色差を  $\Delta E$  とすると、

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

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

2.2 測色計の分類

測色計は、検査員が視感に基づいて判定していた標準物体の色と測定物体の色との差異を上記の  $\Delta E$  なる値によつて定量化するために用いられる。

測色計の原理は、三刺激値を直読する方法と分光測光により測定物体からの標準照明光反射スペクトル分布を求め(1)式を用いて三刺激値を演算する方法とに大別される。前者は、三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て測定物体の  $X, Y, Z$  を光学的に直接得るものである<sup>7)</sup>。測定精度の点では分光測光を利用する方法の方が優れている。分光測光法では、分光器としてプリズムを用いる方法<sup>8)</sup>と回折格子を用いる方法とがある。プリズム分光では短波長側の波長間隔が小さくなるが回折格子を用いると波長間隔の等しい分光が可能となる。高精度の測色には回折格子分光法を利用することが多い。

回折格子分光法は、平面型回折格子による透過型のもとと平面型あるいは、凹面型回折格子による反射型のもとに分類される<sup>9)</sup>。分光測光法においてはプリズム、回折格子のいずれを分光器として用いた場合も、分光スペクトルを読みとる方法は機械的走査法と電気的走査法に分類される。前者は分光器を所定の軸のまわりに回転(振動)させて測定波長領域の走査を行い、単色スペクトルごとに時系列的サンプリングするものである<sup>10)</sup>。後者は分光器を固定したまま、分光された多数の単色スペクトルを多数の検知器群で各スペクトルごとに同時サンプリングするものである。検知器群に入力された信号の読みとりは電気的走査により行われる。

機械的走査法は測定時間が長くかかるので、瞬時に変化現象を分光するためには電気的走査法が利用される<sup>11)</sup>。回折格子で分光されたスペクトルをホトダイオードアレイ (PDA) などの検知器群で、たとえば 20 nm ごとのように、等波長間隔スペクトルとして同時サンプリングする方式の測色計も考案されている<sup>12)</sup>。

2.3 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、走行中の測定物体を対象に連続的にその色差を監視することを目的としたものであり、原理的に ISAACS らのもの<sup>12)</sup>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のべる。

本装置は筆者らのうちの一人が考察した実験室規模の装置<sup>13)</sup>を参考に製作したものである。

これは、連続スペクトルをもつ光を測定物体表面へ投影する照明光源、測定物体の表面上 25 mm × 80 mm の視野の反射光を集光する受光レンズ系、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知器、検知器からの出力を単色スペクトルごとに増幅する多数の前置増幅器と主増幅器、増幅後の信号を処理し  $X, Y, Z$  および  $\Delta E$  を演算、出力する計算機、などで構成されている。

光学系の基本構成と各構成要素を図示したのが Fig. 2, Fig. 3 である。

照明光源としては 650 W のタングステンランプを二

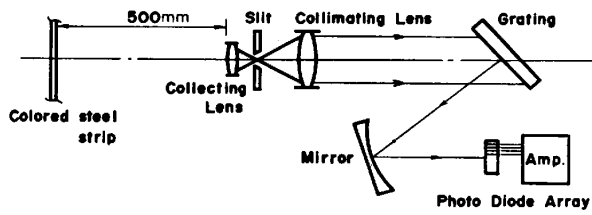


Fig. 2. Schematic arrangement of the optical system.

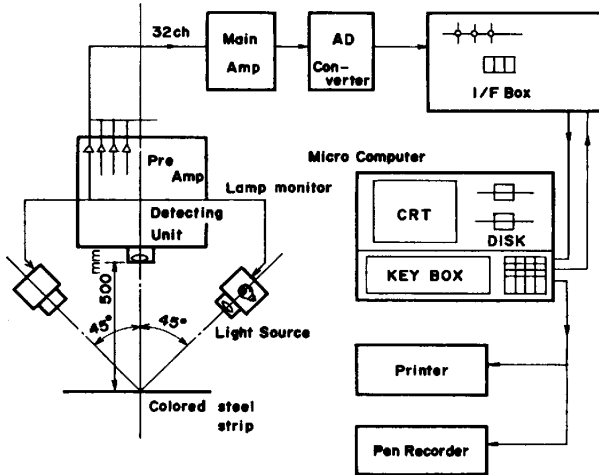


Fig. 3. Block diagram of the telescopic color measurement system.

個用いる。これらは、JIS に制定された「照明および受光の幾何学的条件」<sup>14)</sup> 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明される。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からである。光源を二個用いた理由は後にのべるように S-N 比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て分光される。この分光器では等波長間隔に分光される。本装置では、検出器として PDA のような等間隔に配列された素子からなるリアイメージセンサが有効に利用できる。PDA の各素子の暗電流や電気系の雑音に対して十分大きい信号電流が得られるように照明、受光系は設計されている。光学系の減衰特性、鋼板の反射率などから計算した必要照度は  $10^5$  ルクス以上である。

上記の仕様の照明光源を用いてさらに光源像を受光レンズの焦点面 (Fig. 2 のスリット位置) に結像させて受光エネルギーの集中化をはかつたところこの要件を十分満足することが明らかになった。分光対象波長範囲は実

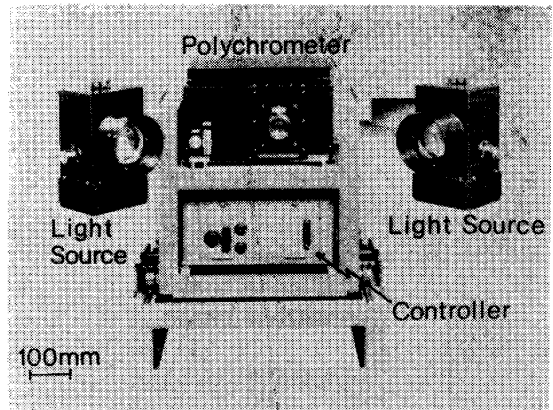


Photo. 1. Apparatus for the on-line color-spectrophotometry.

用上 400 nm から 700 nm で十分であるとされている<sup>15)</sup>。また波長の分割幅は小さくするほど測定精度は向上する。そこで本装置では 400 nm から 700 nm の波長範囲を 10 nm 間隔で分割し、31 個のスペクトルをそれぞれ PDA の別個の素子で受光している。各スペクトルの光の強度は光電変換後増幅されアナログ処理の積分演算を行い計算機に転送される。

これら照明光源、受光部およびその附属回路部などは一体構造となつている (Photo. 1)。

AD 変換後の 31 個のスペクトル成分はインタフェールを経由して計算機に読み込まれる。計算機は 16 ビット演算可能なマイクロコンピュータを用いている。計算機の主な出力機能は、反射率、(L, a, b) の値、 $\Delta E$  の連続測定値、などである。100 ms ごとの演算値が出力されるので、たとえば測定物体が 120 m/min で走行している場合は幅 80 mm で走行方向に 200 mm の面積の色情報の平均値が連続して測定される。

本装置では、測定を行う際の装置の保全と作業者の安全を確保するために、測定物体-装置間距離を 500 mm としたが、設置条件に応じて任意の値に設計し得る。

本装置の特徴は、(1)高照度の光源を用いているので実用上外部光の影響が表れない、(2)投受光光学系に新しいくふうを加えたので照度むら、光源強度変動による誤差が減少した、(3)測定物体-装置間距離が十分大きい、(4)測定時間が短く瞬時に変化する色差の測定が可能、(5)オンラインで  $\Delta E$  を連続測定する On Line Mode、オンラインで任意の時点の反射率、Lab 値などを計算、出力する On Line Test Process Mode、オフラインで反射率、Lab 値などを計算、出力する Off Line Mode の 3 つの測定機能を持つ、などであり、高精度のオンライン測定ができる。

### 3. 本装置を用いた実験結果と考察

#### 3.1 本装置の基本的性能の評価

##### 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強度から測定試料の分光反射率  $\rho(\lambda)$  が算出されるので、白色板の種類によって測色値が変わってくる。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白色板を採用している<sup>16)</sup>。

従来から二種類の測色計 (A ; 分光方式, B ; 三刺激値直読方式) 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. 4 に示す。

本装置で採用した白色板の反射率は可視波長領域で十分に平坦でかつ高いことから、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<sup>17)</sup>の一つを満足している。一方、「拡散反射特性」は十分に満たしているものの、ひつきなどの機械的耐久性やごみ付着などの光学的安定性については不十分な点もあり、今後改善の余地もある。

##### 3.1.2 波長分離特性

回折格子、凹面鏡、PDA など分光系の三次元的な配置は幾何光学的な理論計算をもとに決められている。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、水銀光源の基線スペクトルの測定と、中心波長既

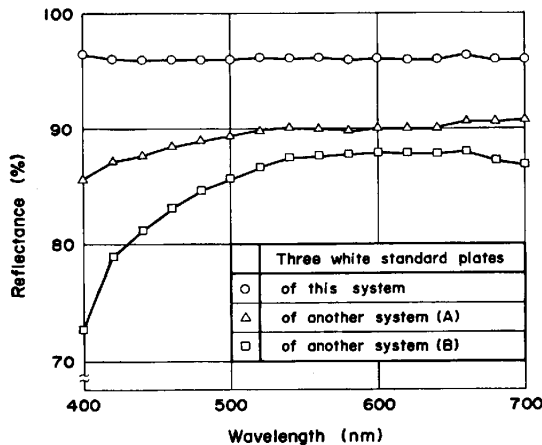


Fig. 4. Spectral reflectance of three white standards.

Table 1. Wavelength accuracy of the photodiode array used in this system.

( $\lambda_{\max}$  (nm) : Line spectrum or wavelength for maximum transmittance)

Spectra $\lambda_{\max}$ (nm)	Line spectra of a Mercury lamp		Spectra of a Halogen lamp through interference filters			
	434.8	546.1	448	553	602	648
Known	434.8	546.1	448	553	602	648
Measured	434	548	446	554	602	650

知の干渉フィルタを用いる方法との二通りの方法によって、その特性を調べた。Table 1 にその結果を示す。分光誤差は  $\pm 2$  nm であり、10 nm 等波長間隔分光法の本装置では実用上満足できるものであることがわかった。

また、PDA 面での反射に起因する測色誤差は、その配置をくふうすることにより除去されている。

##### 3.1.3 外的変動要因による誤差

測定対象物の角度変動、距離変動および外部環境変化による測定誤差を調べたところ以下の点が明らかにされた。

(1) オンライン測定時には測定対象物と装置間の距離変動、左右角度変動 (鋼板幅方向の板振れ) よりむしろ前後方向での角度変動 (鋼板走行方向の板振れ) が発生しやすいと思われる。そこで、鋼板走行方向の振れによる角度変動を 0.5 度以内におさめるために抑えロールを設置するなどの振れ防止対策を施す必要がある。

(2) 正常時の再現性は色差にして 0.2 以下に納まるが、外部温度が急激に上昇する場合には誤差が大きくなる。これは使用した PDA の温度ドリフトによるものである。本装置は検出部の温度制御はしていないが、空冷、水冷などにより温度ドリフトを最小限に抑える方策を講じると安定性はさらに向上する。ただし現状でも、測定前に標準白色板のテーブル値を測定値と入れ換えれば、誤差は色差にして 0.1~0.2 程度になる。自動校正機構を付加すると、さらに精度の向上が期待される。(3) 本装置には光源強度変動を検出し、測色値を補正するためのモニタ機能が内蔵されているため安定した測定が行える。この機構はランプ寿命のモニタにも有効である。

#### 3.2 各種測色計との測定値の比較 (オフライン実験 I)

実際のカラー鋼板を用いて各種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 4 台である。ここでは JIS に規定された「照明および受光の幾何学的条件」<sup>14)</sup> も考慮して検討を加えた。

- A. 本装置, 45° 照射・0° 受光
- B. 積分球使用分光測光方式, 拡散照射・0° 受光
- C. 積分球使用三刺激値直読方式, 0° 照射・拡散受光
- D. C と同一方式, メーカーの異なるもの

任意の 7 色のサンプルを用意し、上記 4 台の装置にて測色した結果を Fig. 5 に示す。

2.2 節にも述べたように、測色方法は数種類あり上記 A~D においても方式、フィルタの性能の差、標準白色板の違いなどから測定値そのものを直接比較することに若干問題はある。色差測定値の分解能を比較する方が妥

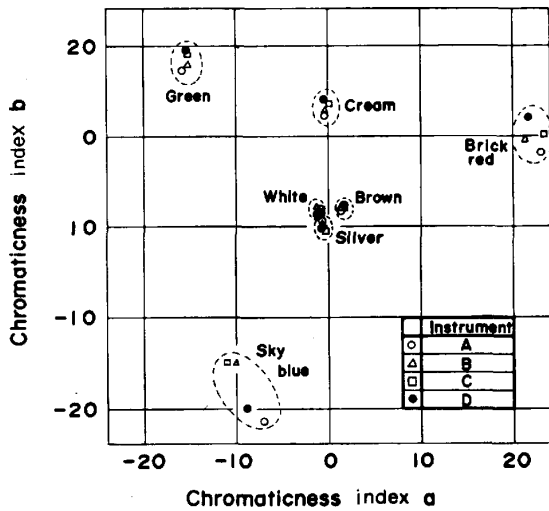


Fig. 5. Chromaticness indices of four instruments (○ denotes the on-line instrument).

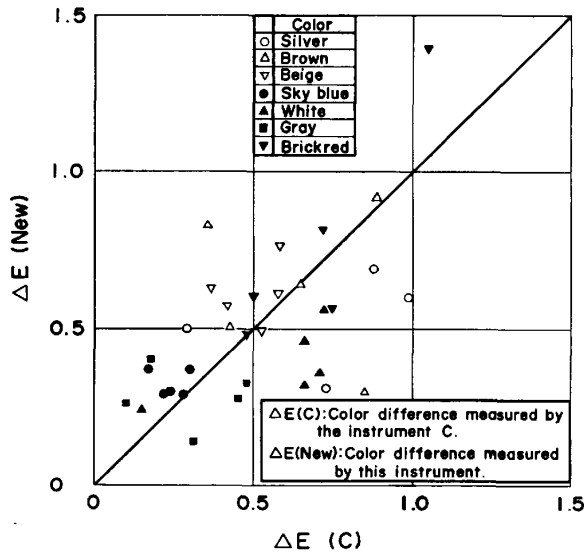


Fig. 6. Comparison of this instrument with the instrument C.

当であるが、上記 B~D の装置が接触式である点を考慮すると、Fig. 5 に示す本装置の測色値は遠隔測定としては十分満足できるものであると言えよう。

次に、各色カラー鋼板において色差レベルの異なるサンプルを5枚ずつ用意して、4台の装置にて色差測定を試みた。装置AとCによる測定値の対応をFig. 6に、装置AとBによる測定値の対応をFig. 7に示す。

Fig. 6によれば両装置間での測定値の差が大きく、色差にして最大0.5程度異なるものもある。これは装置Cがフィルタ方式の三刺激値直読法であり、分光測光方式より分解能が劣るからである。分光測光方式の本測色計の性能を評価するためには、装置Cのような三刺激値直読方式測色計と比較することは不適当である。

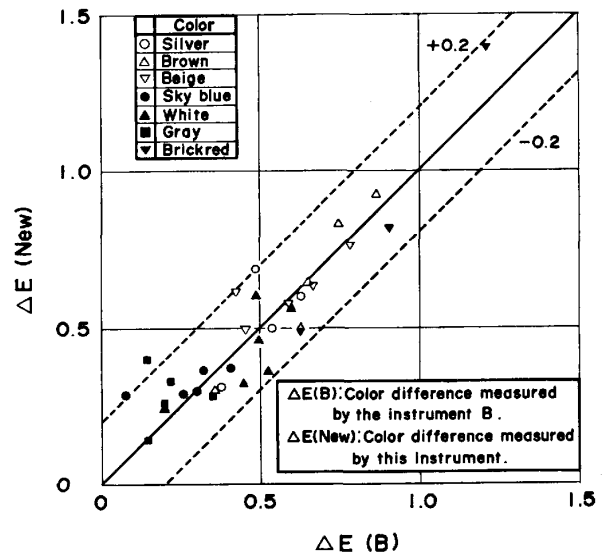


Fig. 7. Comparison of this instrument with the instrument B.

一方、A、B 両装置では照射・受光方法、標準白色板などの違いはあるが分光測光方式を測定原理としている点で基本的に一致している。従って本装置の色差分解能を評価するためには、装置Bによる測定値と比較の方が妥当である（各種測色計の性能の比較、解析結果の詳細を述べることは本論文の目的からはずれるので他の文献<sup>18)</sup>に譲りたい）。

Fig. 7によれば両装置間での色差測定値は約 ±0.2 の範囲内で良い相関を示していることがわかる。通常良く調整された分光光度計を用いる場合でも同一機器における再現性を考慮すると、明るい色で0.2 NBS単位、中明度以下の明るさの色では0.5~1 NBS単位程度の色差に相当する誤差が生じるとされている<sup>19)</sup>。Lab単位系もNBS単位系と同様の取り扱いができるので、遠隔測色である点を考えあわせると本装置の色差分解能は十分満足できるものである。

### 3.3 各種カラー鋼板の明度と色差測定誤差との関係 (オフライン実験 II)

分光測光方式の測色計においては、測定物体の明度が分光測光誤差へ影響を与え、最終的には色差値の測定誤差となることが考えられる。これらの定量的解析を試みた。分光測光誤差の色差値へ与える影響については二三の研究者によつて解析されており<sup>20)21)</sup>、色差誤差の数式表現方法も提案されている<sup>22)</sup>。

そこで本装置で使用している HUNTER の色差式<sup>6)</sup>を適用し色差誤差の数式表現を試みた。

物体色の三刺激値は(1)式から算出されるが、実際には積分計算の代わりに次式で示す近似計算が行われる。

$$\left. \begin{aligned} X &= K \sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \rho_{\lambda} \Delta \lambda \\ Y &= K \sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \rho_{\lambda} \Delta \lambda \\ Z &= K \sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \rho_{\lambda} \Delta \lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $K=100/\sum_{\lambda} P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta \lambda$  であり、 $\lambda$  の領域は 400 から 700 nm である。すなわち本装置の場合  $\Delta \lambda=10$  nm とした等波長間隔方法を採用しているので、31 点の加算計算を行うことになる。

いま、Lab 系における明度指数  $L$  およびクロマチイクネス指数  $a, b$  の分散を求めると

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L^2 &= \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial \bar{x}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{x}_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial \bar{y}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{y}_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial \bar{z}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{z}_{\lambda}}^2 \\ &\quad + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial P_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{P_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial \rho_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\rho_{\lambda}}^2 \\ \sigma_a^2 &= \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial a}{\partial \bar{x}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{x}_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial a}{\partial \bar{y}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{y}_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial a}{\partial \bar{z}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{z}_{\lambda}}^2 \\ &\quad + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial a}{\partial P_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{P_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial a}{\partial \rho_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\rho_{\lambda}}^2 \\ \sigma_b^2 &= \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial b}{\partial \bar{x}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{x}_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial b}{\partial \bar{y}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{y}_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial b}{\partial \bar{z}_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\bar{z}_{\lambda}}^2 \\ &\quad + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial b}{\partial P_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{P_{\lambda}}^2 + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial b}{\partial \rho_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\rho_{\lambda}}^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

と表されるが、 $P_{\lambda}, \bar{x}_{\lambda}, \bar{y}_{\lambda}, \bar{z}_{\lambda}$  は定数であるので(5)式中  $\sigma_{P_{\lambda}}^2, \sigma_{\bar{x}_{\lambda}}^2, \sigma_{\bar{y}_{\lambda}}^2, \sigma_{\bar{z}_{\lambda}}^2$  はすべて 0 とおいてよい。従つて

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L^2 &= \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial L}{\partial \rho_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\rho_{\lambda}}^2 \\ \sigma_a^2 &= \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial a}{\partial \rho_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\rho_{\lambda}}^2 \\ \sigma_b^2 &= \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial b}{\partial \rho_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\rho_{\lambda}}^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる。すなわち、 $L, a, b$  の値は  $\rho_{\lambda}$  の誤差のみに依存することになる。

$\sigma_{\rho_{\lambda}}$  が大きな波長依存性を示さないものとしてこれを  $\sigma_{\rho}$  とすると、(2), (4), (6)から

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L^2 &= 5^2 k \left\{ \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda})^2 \right\} \sigma_{\rho}^2 / Y \\ \sigma_a^2 &= 17.5^2 k \left\{ A_1^2 \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{x}_{\lambda})^2 - 2A_1 A_2 \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{x}_{\lambda}) (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda}) \right. \\ &\quad \left. + A_2^2 \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda})^2 \right\} \sigma_{\rho}^2 / Y \\ \sigma_b^2 &= 7^2 k \left\{ B_2^2 \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda})^2 - 2B_1 B_2 \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda}) (P_{\lambda} \bar{z}_{\lambda}) \right. \\ &\quad \left. + B_1^2 \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{z}_{\lambda})^2 \right\} \sigma_{\rho}^2 / Y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 1.02, \quad A_2 = (1 + 1.02 \times x/y) / 2 \\ B_1 &= 0.847, \quad B_2 = \{1 + 0.847 \times (1 - x - y) / y\} / 2 \\ k &= 100 / \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

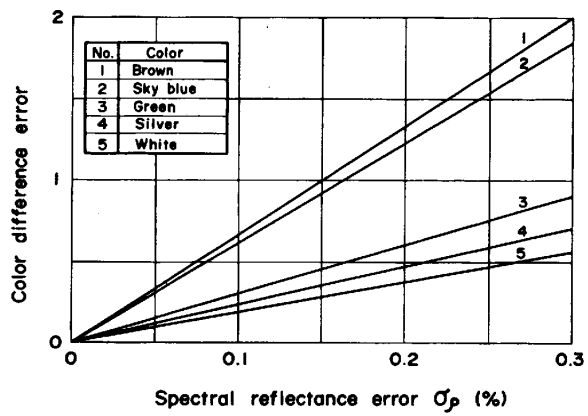


Fig. 8. Effect of spectral reflectance errors to color difference.

Table 2. Effect of spectral reflectance errors to color difference.

Color	x	y	Y	F (x, y, Y)	$\sigma_{\rho}$ (%)	$\Delta E_1$	$\Delta E_2$
Brown	0.336	0.327	4.61	6.66	0.034	0.226	0.127
Sky blue	0.186	0.226	6.53	6.11	0.047	0.287	0.141
Green	0.337	0.432	20.48	2.97	0.083	0.247	0.116
Silver	0.306	0.314	38.40	2.31	0.083	0.192	0.085
White	0.312	0.321	60.03	1.84	0.129	0.237	0.125

である。(8)式中  $x, y$  は色度座標と呼ばれるもので、  
 $x = X / (X + Y + Z)$   
 $y = Y / (X + Y + Z)$  ..... (9)

により得られるものである。

さらに  $\sigma_L \rightarrow \Delta L, \sigma_a \rightarrow \Delta a, \sigma_b \rightarrow \Delta b$  と置き換え、(7), (8), および(9)式を用いると、(3)式より色差  $\Delta E$  は  
 $\Delta E = F(x, y, Y) \times \sigma_{\rho}$  ..... (10)

となり、 $\sigma_{\rho}$  の一次式として表される。関数  $F$  は(7)式中の  $\sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{x}_{\lambda}), \sum_{\lambda} (P_{\lambda} \bar{y}_{\lambda})$  などにより計算される定数や(8)式から得られるもので、 $x, y, Y$  を決めれば定数となる。また、(10)式の  $\Delta E, \sigma_{\rho}$  はそれぞれ同一サンプルの複数回測定における色差および反射率の偏差である。関数  $F$  に代入する  $x, y, Y$  の値には基準測定時に得られる値を用いる。

Fig. 8 には (10) 式を用いて計算される分光反射率誤差の色差への影響を 5 色のサンプルについて示す。これより色差誤差の限界を同一の値にするためには白色、銀色鋼板のような高明度なものほど分光反射率誤差の許容範囲が大きくなることがわかる。また、 $x, y, Y$  の組み合わせを任意に変えた数値計算結果では、NBS 単位系における誤差の影響<sup>22)</sup>と Lab 系におけるものとは良く対応することも確認された。

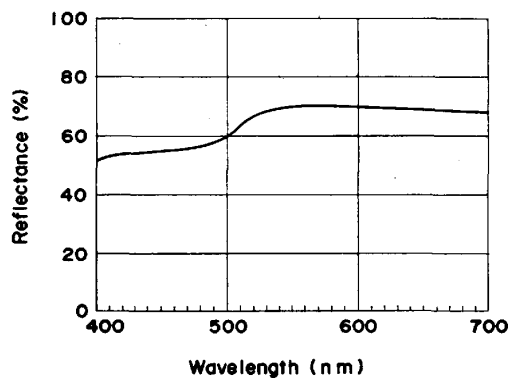
次に上記 5 色のカラー鋼板サンプルを各 10 回測定した場合の各波長反射率の分散を求め、(10)式を用いて誤差の影響を調べた。Table 2 にその結果を示す ( $\Delta E_1$  は周囲温度変化が 20°C から 40°C まで大きく異なる条

件での測定値、 $\Delta E_2$  は  $25^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  の条件での測定値、である)。温度変化の大きい場合は低明度でかつスペクトル分布にピークをもつ色サンプルなどでは色差誤差は 0.3 近く、その他のものは 0.25 以下である。温度変化が小さい場合は 0.2 以下である。この点からも光学系の温度制御は重要である。また測定物体の位置が異なると分光測色誤差が生じる。温度一定で距離を  $\pm 5$  mm、左右角度を約  $\pm 3^\circ$ 、前後方向の角度を約  $\pm 1^\circ$ 、それぞれ単独に変動させた時の高明度サンプルの色差誤差は 0.25 以内であった。

以上より測定サンプルの色によつて再現性が異なることから、各色に応じて色差管理範囲を決める必要があるといえよう。

3.4 オンライン測定実験

今回開発した遠隔測色計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 4 m の垂直バスラインの中間で板幅の中央部である。鋼板は一定の張力を受けて走行しているが、振れが生じるので測定部位の上下 300 mm の位置に鋼板を狭む形で前後面から直径 100 mm のゴムロールを設置して、板振れ



$X=64.96$     $L=82.21$     $L_s=82.13$   
 $Y=67.58$     $a=-2.82$     $a_s=-2.82$     $dE=0.20$   
 $Z=65.34$     $b=10.42$     $b_s=10.23$

Fig. 9. Spectral reflectance, and HUNTER  $L, a, b$  values of a cream colored steel strip measured while travelling.

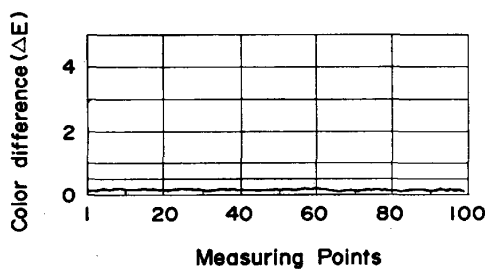


Fig. 10. Color difference of a travelling strip against a standard sample measured 100 times along the longitudinal direction.

防止対策を講じた。

Fig. 9 には約 120 m/min で走行するクリーム色鋼板の反射スペクトルおよび標準板との色差演算値を示す。ここでの標準板とは、オフラインでの色差チェック用に各色について用意された基準となる色のカラー鋼板である。Fig. 9 中の  $L_s, a_s, b_s$  の値が事前の測定により記憶されているクリーム色標準板の測色値である。

また、Fig. 10 には走行鋼板を連続的に 100 点測定した場合の色差推移を示す。この場合、On Line Test Process Mode を使用しているため計算時間が長く、鋼板の長手方向に沿つて約 50 m を 0.5 m おきに測定している。

Fig. 10 では色差 0.5 に色差許容値を設けた一例を示しているが、この値は任意に設定可能である。この設定許容値を連続して 100 点越えた場合に警報を発する連続監視機能も備えている。また、On Line Mode では計算処理時間が短縮されて 100 ms ごとの測色が可能になり、測定間隔は 0.2 m となる。

次に、ライン出側にて採取したオンライン測定部近傍サンプルを Off Line Mode にて測定した値と走行時に測定したオンライン測色値との対応を Fig. 11 に示す。この場合、色差にして 0.2 以内の差で一致している。両者に差が出る理由は、(1)距離、角度等の測定条件がオンライン、オフライン測定時で完全には一致していないこと、(2)オンライン測定では長手方向の平均値が測定されるのに対してオフライン測定では測定対象部分 (25 mm × 80 mm) のみが測定されること、(3)測定位置とサンプル採取位置が完全には一致していないことなど

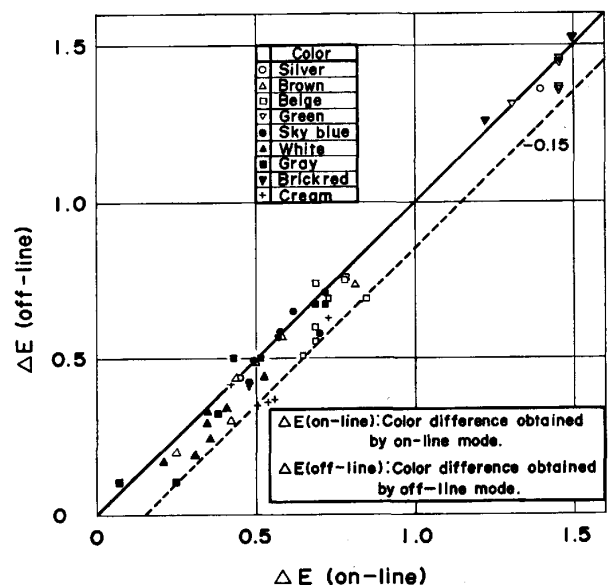


Fig. 11. Comparison of off-line measurement with on-line measurement.

があげられる。これらを補正すると両測定値の差は色差にして 0.1 以内に納まると推定される。すなわち、鋼板が走行している場合でも静止状態に近い色差測定が可能であると言える。また、オンライン測定では鋼板の走行速度、板振れなどの影響を受けないことも確認された。

設置環境を考慮すればよりいつそうの測定精度の向上が期待される。すなわち、標準白色板や測定鋼板用標準板の定期的測定による精度チェック機構や検出部の温度制御機能を付加することによって、より完成したシステムとなる。このような改良は早急に実施する予定である。

#### 4. 結 言

走行鋼板の色差を非接触、高速に精度良く測定可能な「オンライン遠隔測色計」を新規に開発してカラー鋼板を対象に実験を行った。その結果、次のような事実が明らかになった。

(1) 本装置は等波長間隔の分光測光方式の測色計であり、その波長分離精度は約  $\pm 2$  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強度はほぼ一定であり、JIS の条件<sup>1)</sup>を満足している。

(3) 市販のオフライン測定用分光測色計と本装置による色差値の対応は  $\pm 0.2$  以内で良く一致しており、非接触方式としては実用上十分に満足できる性能である。

(4) 三刺激値直読方式測色計は色差分解能が悪く、本装置による測定値との差異は約  $\pm 0.5$  に達する。

(5) 分光反射率誤差は色差誤差へ影響を与えるが、それは低明度サンプルほど大きく、たとえばそら色サンプルの実測値では 0.3 程度になる。比較的明度の高いサンプルでは 0.25 以下に納まるが、光学系の温度制御を行えばその値はさらに低減させることが可能である。

(6) 種々の誤差正対策を講じた場合、オンライン測定値と静止状態での測定値の差は 0.1 以下になるものと予想される。

本装置は以上のような性能を有するので、カラー鋼板製造ラインにおけるオンライン測色計として十分に実用可能であり、品質管理体制の強化のみでなく色替え時間の

短縮、などに有効に活用し得ることが明らかになった。また、各種鋼板の表面色調管理にも利用できる。内部校正や温度制御などの機能を付加すればさらに測定精度の向上が期待し得る。

終わりに本実験の遂行に当たり、種々御協力いただいた川鉄鋼板(株)千葉工場関係各位に対し謝意を表します。

#### 文 献

- 1) 岡 襄二: 塗装技術, 21 (1982), p. 67
- 2) S. J. KISHNER: Plast. Eng. (1980), p. 30
- 3) 日本照明委員会: 測色, 国際照明委員会 (CIE) 公式勸告集 (日本語版, No. 15, E-1.3.1) (1971)
- 4) 山中俊夫: 照明学会誌, 62 (1978), p. 638
- 5) JIS Z 8730-1970
- 6) R. S. HUNTER: J. Opt. Soc. Amer., 38 (1948), p. 661 (A), p. 1904 (A); 48(1958), p. 985
- 7) R. S. HUNTER: J. Opt. Soc. Amer., 32 (1942), p. 509
- 8) たとえば, C. L. SANDERS and W. GAW: Appl. Opt., 6 (1967), p. 1639
- 9) 吉永 弘編: 応用分光学ハンドブック (1973), p. 401 [朝倉書店]
- 10) たとえば, 日本色彩学会編: 色彩科学ハンドブック (1980), p. 210 [東京大学出版会]
- 11) 応用分光学ハンドブック (吉永 弘編) (1973), p. 760 [朝倉書店]
- 12) 米国特許 USP 3874799 (Patented. Apr. 1, 1975)
- 13) 中村賢市郎, 坂田俊文, 佐々木政子, 小林 栄: 日本写真学会講演予稿集 (1981), p. 76
- 14) JIS Z-8722-1971
- 15) 日本色彩学会編: 色彩科学ハンドブック (1980), p. 206 [東京大学出版会]
- 16) F. GRUM and G. W. LUCKEY: Appl. Opt., 7 (1968), p. 2289
- 17) JIS Z-8722-1971
- 18) 芝本 耿, 棟方明博: 色材, 49 (1976), p. 552
- 19) 色彩科学ハンドブック (日本色彩学会編) (1980), p. 277 [東京大学出版会]
- 20) D. L. MACADAM: J. Opt. Soc. Amer., 43 (1953), p. 533
- 21) I. NIMEROFF: J. Opt. Soc. Amer., 43 (1953), p. 531
- 22) 福田 保: 応用物理, 29 (1960), p. 331