

In-Line Measurement Technologies of Surface Properties for Stainless Steel



虎尾 彰
Akira Torao

技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員 (課長)・工博



守屋 進
Susumu Moriya

川鉄テクノロジーサーチ (株) 技術支援センター 主任研究員 (部長)



館野 純一
Jun-ichi Tateno

技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員 (掛長)

要旨

ステンレス鋼板の表面品質特性を製造工程において測定することは品質保証上で重要であり、オンラインまたはインライン光学的測定装置が必要である。冷延ステンレス鋼板の光沢度および白色度を水銀ランプの正反射、拡散反射強度から測定し、さらに、これら2つの測定量とアルゴンレーザの正反射強度との3つの光学量からニューラルネットワークを構成して目視光沢感の等級判別を行う手法を考案した。一方、建材用ダル仕上げステンレス鋼板の色調むらの原因となる反射特性を白色光の拡散反射輝度から測定する手法を考案した。以上の手法をもとにそれぞれオンラインとインライン測定用装置を開発して実プロセスに適用し、製品の連続品質保証、目視検査の代替などのために有効活用している。

Synopsis:

An on-line glossiness meter for both quantitative and sensory factors has been developed to evaluate the surface glossiness of cold rolled stainless steel. The specular glossiness and Hunter's whiteness were measured from the specular and diffused intensities of reflections by a mercury lamp, respectively. Sensory glossiness was determined by a neural network with three optical informations, two of them being mentioned above and one being the specular reflected intensity of an Ar laser beam. The results of on-line measurements showed that two parameters could be measured with the accuracy of ± 50 in Gs (20°) and ± 2.0 for Hunter's whiteness. As for sensory glossiness, good agreements with results by visual inspections were obtained. Another in-line optical measuring apparatus of surface reflection properties of dull-finished stainless steel has been newly developed. The apparatus measures diffused luminant intensities from stainless steel strips and converts them into examination marks. Both systems are so applicable to the practical use at production lines as to substitute for the visual inspection and to help quality control of products.

1 緒 言

ステンレス鋼板は、耐食性、表面外観特性に優れた鋼板として、厨房機器、食器、建築用内外装材などその用途が拡大している。近年、ステンレス鋼板の製造工程は生産性向上のために連続化が進められ、全長品質保証のための連続的な操業状態管理が強く求められており、オンラインまたはインラインでの表面品質特性の測定技術開発が重要な課題となってきた。光沢性のあるステンレス鋼板表面の評価方法としては、工業的には日本工業規格にて規定される卓上型の測定器を用いた光沢度¹⁾や白色度²⁾などの定量的評価方法と目視等級と呼ばれる目視検査による光沢感の等級判定が用いられている。また、主として屋根材や外装材に用いられる光沢性の低い建材用ダルステンレス鋼板³⁾では耐食性や防眩性と同時にむらのない表面色調特性が要求されている。これは、鋼板パネルとして施工

された場合にむらが生じないようにするためである。従来はこの色調特性を検査するためには屋外での人間の目視検査による評価が行われていた。

以上に述べた検査方法では鋼板全長にわたる検査ができず、サンプル採取の必要があること、ラインの高速化に伴い目視検査が追従できず検査負荷も大きいこと、検査作業員間の個人差がある上に定量評価ができないこと、また、採取サンプルでの目視作業工程が介在することで生産効率を妨げることなどの問題がある。

そこで、これらの問題点を解決するために光学的手法による計測装置を開発し、実際の生産工程に適用した。本報告ではオンライン光沢度・白色度測定装置およびインライン輝度測定装置の概要とそれらの適用結果を述べる。

* 平成10年2月13日原稿受付

2 オンライン光沢度・白色度測定装置

2.1 測定原理

オンラインにおけるステンレス鋼板の光学的表面計測技術の研究は、これまでに、反射パターンによって性状を評価する方法⁴⁾、画像処理によって求められた反射光の広がりや表面性状を関係づける方法⁵⁾などが提案されているが、光沢度・白色度のオンライン測定技術についてはこれまでに報告されていない。また、光沢感の目視等級の判定方法においては、光学的な測定量と検査員の目視による等級判定結果との間では非線形的な相関があるため、従来の統計的な判別方法⁶⁾では十分な精度確保が難しい。

オンライン測定装置の開発にあたり、装置の実現性を考慮して光沢度および白色度を同一光学系にて測定することを検討した。光沢度は照射する光源を白色光とした場合、干渉、回折などの影響が少なく、光強度の測定方向が正反射方向であることなどを考え合わせると、表面微細形状のうちの幾何光学的な情報を反映しているものと考えられる⁷⁾。ここで幾何光学的反射とは表面の凹凸が光の波長に対して十分に大きい条件での反射を意味する。したがって、表面からの光反射強度分布から正反射方向の光強度を直接的に測定する方法により光沢度の評価が可能であると考えられる。

一方、種々の白色度を有する鋼板サンプルでの反射スペクトルおよび反射光の空間的分布を測定、解析した結果、白色度は正反射方向の所定の角度内での反射強度と良好な相関を持ち、スペクトル情報を考慮する必要がないことが明らかにされた。

すなわち、光沢度と白色度は共に同一の光学系にて反射強度分布を測定することで得られることになる。具体的には Fig. 1 に示すように干渉性の弱い光源による測定対象表面からの光反射分布を測定し、正反射方向の所定の領域 (θ_G の領域) の光強度 (正反射光強度) を光沢度として評価し、その所定領域外 ($\theta_T - \theta_G$ の領域) の拡散した光強度 (拡散反射光強度) を白色度として評価することができる⁸⁾。それらの測定量と卓上型測定装置により測定される 20° 鏡面光沢度 $G_s(20^\circ)$ と Hunter の白色度 $W^9)$ との相関をそれぞれ求め、検量線を用いて光沢度、白色度に換算して各測定値を得る。

2.2 測定装置の概略

Fig. 2 にはこの原理による測定装置の構造の概略を示す。照射光源として水銀ランプの基線のうちの波長 405 nm の光を入射角度

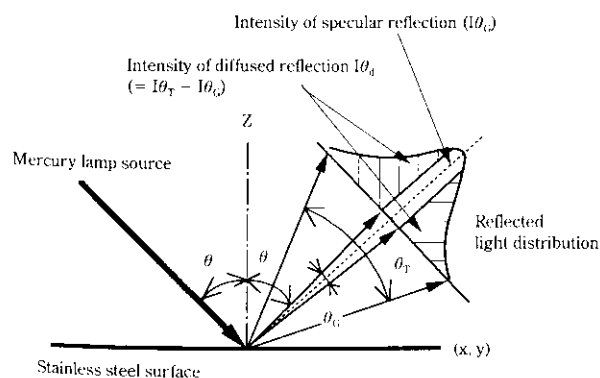


Fig. 1 Principle for measuring the specular glossiness and whiteness from the reflected light distribution

30° で連続的に走行するステンレス鋼板に照射し、その反射光を 32 ch. のフォトダイオードアレイにて測定する。このアレイ検出素子とフーリエ変換レンズにより、鋼板表面の傾斜、パスライン変動により生じる測定誤差を軽減している。また、光源強度および外乱光をモニタし長期的な光源強度の低下および外乱光の変化に対する補償回路を設けている。

一方、目視による光沢感の等級判定については上記の2つのパラメータのみの測定では比較的高光沢の鋼板に対しては分解能が悪くなる。これは、水銀光源での測定結果には表面微細凹凸形状による反射特性のうち幾何光学的な性質が反映されているのに対して目視検査では表面のより微細な形状により決定される物理光学的な特性を反映した光反射分布を加味した情報を感知していることによるものと考えられる。ここで物理光学的な反射とは表面の凹凸が光の波長と同程度である条件を意味する。そこで、この条件を満足する測定を実現するためにコヒーレントな光源であるレーザ光の反射強度を測定することとした。具体的には Fig. 2 に示すように波長 488 nm の Ar レーザの光を入射角度 10° で同一測定面に照射してその反射強度を専用のフォトダイオードアレイにより測定している。これらの条件の設定には Beckmann らの理論¹⁰⁾に基づいて解析を行っている。

光沢感の等級判定には以上説明した3つの測定量にニューラルネットワークを適用して目視判定に近い判別を実施している¹¹⁾。ここで光沢感の等級としては A から D ランクに分類し、A ランクが最も等級が高いものとしている。これらのランクは普遍性を持つものではなく、官能検査に基づく製造者固有の分類である。この等級判別結果および光沢度、白色度は上位計算機に伝送され、製品の管理データとして操業解析、品質管理に用いられる。

このように、開発装置では複数情報を同一の光学系にて同時に測定し、それらの結果をもとにして品質の総合判定を行っており複合計測あるいは知能化計測の手法の一例であると言える¹²⁾。

2.3 オンライン測定結果

開発した装置は、ステンレス鋼板製造ラインの冷間圧延材用焼鈍酸洗ラインに設置した。フェライト系ステンレス鋼板 (SUS430) およびオーステナイト系ステンレス鋼板 (SUS304) を対象に、本装置による光沢度、白色度の測定結果と従来の卓上型測定装置による測定結果を比較した。Fig. 3 に測定結果の対応をそれぞれ示す。Fig. 3 に示されるように光沢度は SUS430 および SUS304 について同一の検量線で測定可能であり、白色度については、Fig. 4 に示されるように SUS430 と SUS304 では異なる検量線を必要とすることがわかる。光沢度、白色度への換算は、強度補正後の光強度の測定値を用いて Table 1 に示す換算式により求めた。Table 1 において

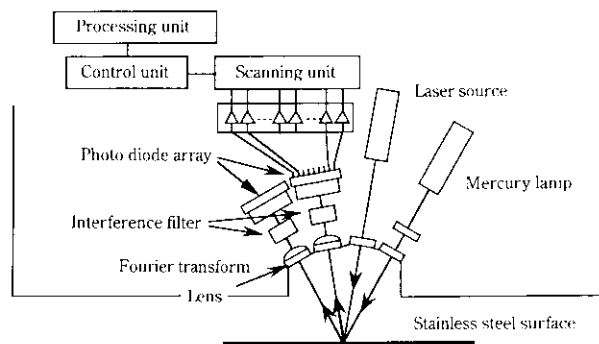


Fig. 2 Schematic drawing of the developed on-line apparatus

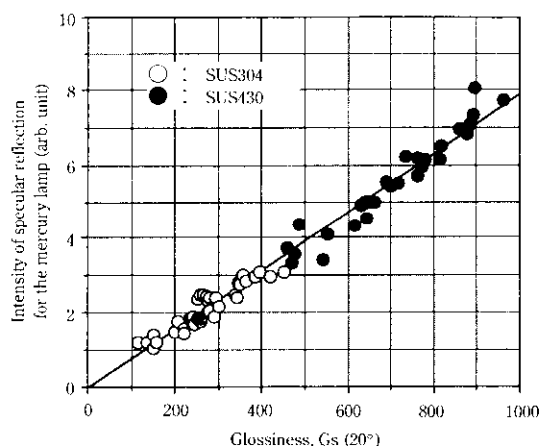


Fig. 3 Relationship between glossiness G_s (20°) and the intensity of specular reflection for the mercury lamp in the on-line equipment

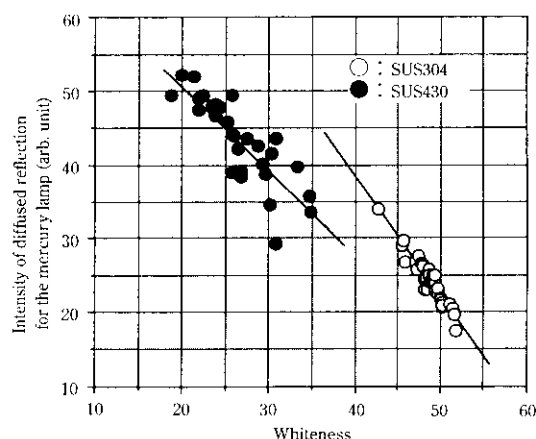


Fig. 4 Relationship between the whiteness and the intensity of diffused reflection for the mercury lamp in the on-line equipment

Table 1 The equation of calibration curve with glossiness and whiteness

Measured item		Equation of the calibration curve
Glossiness		$G = 123 \times I_p + 17$
Whiteness	SUS430	$W = -0.646 \times I_d + 64.95$
	SUS304	$W = -0.554 \times I_d + 62.14$

I_p は光源強度の変動補正後の正反射方向の光強度であり、 I_d はその拡散反射光強度である。その結果、光沢度は G_s (20°) との相関において ± 50 以内、白色度は Hunter の白色度との対応において ± 2 以内の精度で測定可能である。

以上に述べたように本装置では、光沢度、白色度、等級判別結果を 2 s ごとに出力し、オンラインでの連続的な表面特性の評価が可能である。Fig. 5 に連続して生産されるコイルのうち 3 コイル分の光沢度と白色度との値の測定結果の一例を示す。Fig. 5 中の光沢度が急激に低下している部分はコイル間の溶接点である。本結果に示されるように、コイル全長にわたる表面の光沢度及び白色度の変化の様子を測定することが可能となる。

実システムでの評価を行うために、作業時に検査員が走行する鋼板に対して行った目視判定結果と開発システムによるオンラインで

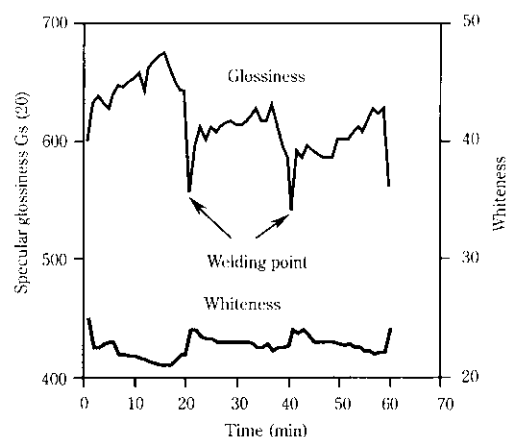


Fig. 5 Examples of on-line evaluation

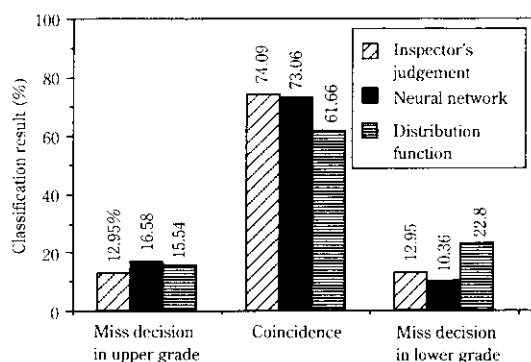


Fig. 6 Experimental results of the glossiness evaluation

の光沢感判定結果とを比較した。等級の正しいランクとしてはライン出側に鋼板サンプルを切り出し、検査員が目視にて再度等級判定した結果を採用し、オンラインでの本システムと検査員による各判定がオフラインで検査員が判定したランクとどの程度合致するかの一一致率にて比較した。また、ニューラルネットワーク法との比較のために従来の統計的手法である判別関数法による判定¹³⁾も合わせて行った。この際判別関数のパラメータはニューラルネットワークと同様の学習データを用いて定めた。これらの比較した結果を Fig. 6 に示す。この結果より、ニューラルネットワークによる正しい判定率は 73.1%、判別関数による正しい判定率は 61.7% となり、前者の方法が約 11% 高い判定精度が得られた。検査員による目視判定一致率が約 74.1% であり、ニューラルネットワークによる判定一致率とほぼ同じであることから本システムは検査員の代替として十分な性能を有しているものと言える。

3 インライン輝度測定装置

3.1 測定原理

ダル仕上げステンレス鋼板は主として屋外で使用されるので、太陽光の反射特性が鋼板の表面凹凸形状の違いにより異なる場合、遠方からの目視時に明暗輝度差として顕著な差となって現れる。Fig. 7 には屋外での観測時と光学的測定を行う場合との対応関係を示す。通常、目視判定時にはサンプリングした鋼板パネルの輝度差を評価付けしてチェックし、製品の表面色調を定量評価していた。この方法にてあらかじめ評価付けされたサンプルの反射特性を種々の

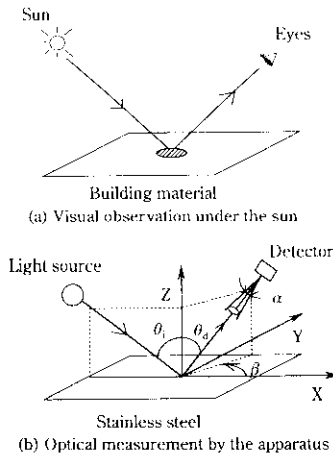


Fig. 7 Optical alignment and parameters

Table 2 Specification of the developed apparatus

System	Measuring head, Controller, Printer
Light source	Ring-light-guided fiber illuminator
Detector	Silicon photodiode ($\lambda = 550 \text{ nm}$)
Incident angle (θ_i)	0°
Detecting angle (θ_d)	Diffused reflection ($70 \sim 85^\circ$)
Measuring field (α)	Variable (equivalent to visual inspection)
Azimuth angle (β)	$0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$

条件にて測定した。具体的には分光反射スペクトル、変角光沢度、反射光分布（ゴニオメトリック測定）などを対象とした。その結果色調差は分光反射スペクトル差から生じているのではなく視野角の条件も含めた拡散反射特性に大きく依存することが明らかにされた。これらの条件は、目視判定時や施工時のパネルの幾何学的配置を考慮することで決められる。色調差を感度良く認識可能となる測定条件としては 0° で鋼板に白色光を照射し、目視感における高感度波長域 ($\lambda = 550 \text{ nm}$ 付近) での拡散反射強度を浅い屈折角 ($\theta_d = 70 \sim 85^\circ$) で測定する方式とした。その際に、視野角は鋼板に対する方向に応じて変えており、圧延方向からの測定の場合には 2° 視野を、板幅方向からの測定の場合には 0.2° 視野を採用した。

3.2 測定装置の概略

開発装置の仕様を Table 2 に示す。ハロゲン光源からの光を光ファイバで導光し、リング照明にて鋼板に垂直に照射する。その拡散反射光を浅い受光角 θ_d からミラー、レンズなどの光学系を介してシリコンフォトダイオードにて強度検出する。その際に目の視感のピークとなる波長 550 nm 近傍が中心波長となる干渉フィルタを通し、かつ視野角度を一定に規定して測定している。Fig. 8 には屋外で値付けされた目視評点と拡散反射輝度値との対応を示す。この関係を検量線として使用する。また、鋼板の圧延方向に対して観る方向（方位角： β ）が異なると評点も変わるので 3 個の検出器を内蔵させて同時に 3 方向から測定可能にしている。測定結果は目視評点に換算されてプリントアウトされる。

3.3 測定結果

実際の仕上げ工程にて鋼板を停止させて本装置により各コイルを測定したところ、Fig. 9 に示すように目視評点と ± 1 以内で一致する結果を得た。ラインでの使用時には測定の安定性、再現性確保のために標準校正用のサンプルを用いて開始前にチェックをして測定

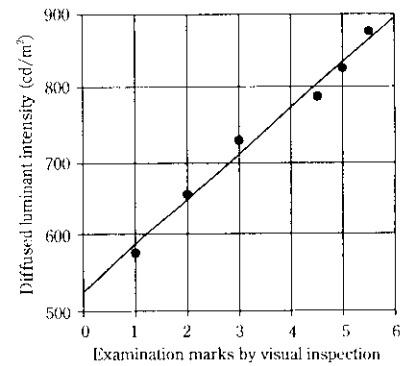


Fig. 8 Relationship between examination marks

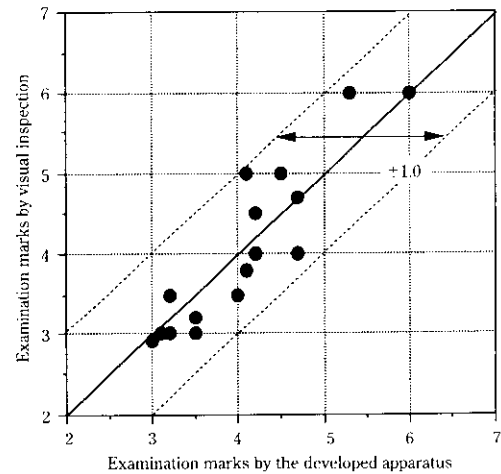


Fig. 9 Relationship between examination marks measured by the developed apparatus and these by visual inspection

の信頼性を高めている。また、本装置は可搬式であるので鋼板の任意の位置での測定が可能であり、操業監視や目視検査の代替、製品出荷時の表面品質管理などに有効である。さらに、方位角 β を変えて測定すると圧延方向によって、異なる反射異方性も評価可能である。したがって、操業条件や表面のテクスチャーを変化させた場合の反射特性を調べるためにも本装置を有効に活用できる¹⁴⁾。

4 結 言

冷延ステンレス鋼板の光沢度、白色度を水銀ランプの光反射強度分布から同時に測定するオンライン表面光沢度・白色度測定装置とダル仕上げステンレス鋼板の反射輝度を測定するインライン輝度計測装置を開発した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 光沢性のある冷延ステンレス鋼板の光沢度、白色度は同一材質表面においては、干渉性の弱い光源（水銀ランプ）の反射強度分布の最大強度、拡散強度から推定可能である。
- (2) 430 系、304 系ステンレス鋼板において、光沢度は同一の検量線により評価可能であり、白色度は個々の検量線により評価可能である。
- (3) 開発したオンライン測定装置では、表面からの水銀ランプの光反射強度分布の 0.25° の受光角の測定値により、 20° 鏡面光沢度 $G_s(20^\circ)$ を ± 50 以内の精度で測定可能である。また、同一光学系により、 $\pm 4^\circ$ 受光角の積算量から 0.25° の受光角の測定値を差分することにより、Hunter の白色度 W を ± 2 以内

の精度で測定することが可能である。

- (4) アルゴンレーザの正反射強度を測定し、この値および水銀ランプから測定される正反射強度、拡散反射強度との3つの光学情報を入力因子とするニューラルネットワークを構成することにより、目視光沢感の等級を検査員による判定と同程度の一致率で判定可能である。
- (5) 光沢性の低いダル仕上げステンレス鋼板の反射輝度を受光角

度、視野角度などを規定した受光系にて測定し、目視評価に一致する評点をインラインにて測定するための装置を開発した。また、この装置では測定方位角を変えて測定することにより、鋼板の反射異方性についても評価可能である。

以上の各装置は、オンラインでの連続測定による製品の目標品質外れの低減、操業状況の把握、インラインでの間欠的測定による目視検査作業工程の省略などに寄与している。

参 考 文 献

- 1) 日本工業規格, JIS Z 8741, (1983)
- 2) 日本工業規格, JIS L 1015, (1969), L1074 (1965)
- 3) 矢沢好弘, 佐藤 進, 宮澤房夫, 岡 裕, 佐藤信二, 曾根雄二: 「高純度フェライト系ステンレス鋼 SUS447J1 の耐候性」, 第40回腐食防食討論会, B-302(1993), 301
- 4) 鈴木 孝, 小豆島明: 「画像処理を用いたレーザ散乱光による加工品表面の計測」, 平成3年度塑性加工学会春季講演会, (1991), 385
- 5) 金子徳次郎, 小豆島明, 工藤英明: 「画像処理によるレーザ反射散乱光の二次元分布と表面性状の関係に対する一考察」, 昭和63年度塑性加工春季講演会, (1988), 585
- 6) 浅野有一郎, 塩住基仁, 虎尾 彰, 柳本隆之, 栗田邦夫, 八角忠明: 「レーザを用いた鋼板の表面粗度および光沢度の測定」, 川崎製鉄技報, 18(1986)2, 114
- 7) 守屋 進, 園部 治, 内田洋之, 虎尾 彰, 市川文彦, 柳 和久: 「微小面素の法線ベクトル分布による表面解析と表面光沢への適用」, 第44回塑性加工連合講演会, 306(1993), 143
- 8) 川崎製鉄(株): 特許登録 第2705842号 (1997. 10. 9)
- 9) R. S. Hunter: "Photoelectric Color Difference Meter," *J. Opt. Soc. Amer.*, **48**(1958)12, 985
- 10) P. Beckmann and A. Spizzichino: "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", (1963), 75, [Pergamon Press]
- 11) 館野純一, 浅野一哉, 守屋 進, 市川文彦, 塩川 隆: 「鋼板の光沢感評価へのニューラルネットワークの適用」, 計測自動制御学会論文集, **33**(1997)8, 759
- 12) 虎尾 彰, 柳本隆之, 内田洋之, 守屋 進, 市川文彦, 鎌田征雄: 「産業用センシングシステムにおける知能化技術」, 平成7年電気学会電子・情報・システム部門大会, A-2-5(1995), 51
- 13) 虎尾 彰, 浅野有一郎, 栗田邦夫, 塩住基仁, 松本公一: 「ステンレス鋼板光沢測定装置の開発」, 計測自動制御学会第3回センシングフォーラム, (1986), 25
- 14) 虎尾 彰, 市川文彦, 栗山則行, 守屋 進: 「ステンレス鋼板表面性状の光学的測定装置の開発」, 第35回計測自動制御学会学術講演会, 112C-1 (1996), 359