ビレットの誘導加熱探傷における放射率差ノイズの 粉体塗布による改善効果について

遠 藤 敏 夫*・中 原 勘 寿**

Noise Reduction by Spray Coating with Resin Powder on Billets
prior to the Induction Heating Inspection

Toshio ENDO* and Kanju NAKAHARA**

The induction heating inspection is a rather simple and robust system to detect automatically surface flaws of square billets in steels including non-magnetic ones. In this system the induced current goes around crevice cracks in the surface on the rapid RF induction heating and the immediate thermographical mapping reveals flaws as the lower-temperature streaks around the cracks.

The metallic bright scratches marked on conveyers are so low in emissivity (ϵ) that they resemble the flaws as the lower-temperature streaks on the map. In order to make the emissivity uniform all over the surface, authors had applied the spray coating with the resin powder on the billets prior to the induction heating and therewith succeeded in reducing such fake images.

In this paper authors optimized the spray coating with the acrylic resin powder on the square billets in an austenitic stainless steel. The coverage (the coated area/the bare area) increases linearly the emissivity of the metallic bright surface and 90% is the minimum to equalize it with $\epsilon \simeq 1$. On the other hand, the coating retards the thermal diffusion through the layer proportionally to its thickness and 20 μm is nearly the maximum to avoid the substantial delay in measuring the metal surface temperatures by a radiation thermometer. The highest S/N ratio on the flaw detection is obtained through the coating about 90% in coverage and about 20 μm in thickness.

Key Words : induction heating inspection, surface defect, emissivity, square steel billet

1. はじめに

鉄鋼製品は、渦流探傷装置や漏洩磁束探傷装置によって表面疵が厳しく検査され、ユーザに出荷されている。一方、鉄鋼製造過程における中間製品である角ビレット(以後、単にビレットと呼ぶ)についても冷間で表面疵検査と疵手直し作業が行なわれている。ビレットは曲がりが大きいため、表面疵の自動検査に被検査材とセンサとがほとんど接触に近い状態であることが要求される渦流探傷法や漏洩磁束探傷法を適用することは困難であった。曲がり大きなビレットに対する表面疵自動検査方法の一つとして誘導加熱探傷法がある^{1)~4)}。ビレット表層部を高周波で急速加熱させたとき、疵部と健全部では温度上昇に差が生ずる。誘導加熱探傷法は、

この温度差が生じている部分を赤外線サーモグラフィでとらえ、疵部位を検出する自動探傷法で、とくに非磁性ビレットを対象とした探傷に有用である。

誘導加熱探傷法では、疵検出に赤外線サーモグラフィを用いているため、実用化するにはビレット表面の放射率均一化という、放射測温に関わる固有の問題を解決する必要がある。実際、ビレットは搬送途上の衝突やコスレによって表面に放射率の低い光沢部が頻発するため、ビレットの表面温度が一樣であっても、赤外線サーモグラフィで検出される温度は一樣でなく温度ムラが生じ、それがノイズとなる。さらに、誘導加熱探傷法において、疵部と健全部の温度差は微小で、たとえば、深さが0.5 mmの疵に対して温度差はわずか数°Cでしかなく、疵検出性能向上にはビレット表面の放射率を高めることが必須となる。

筆者らは、ビレット表面の放射率 ϵ を $\epsilon \simeq 1$ にまで高めると同時に均一化する放射率改善手段として、表面を粉体で疎らに覆う手法を提案し、今まで不可能であった非磁性ビレットの自動探傷を疵深さの検出限界が0.5 mmという高い検出性能で実現できることを紹介してきた¹⁾。そこでは、テスト装置による探傷結果にもとづいて、放射率改善の効果を示す

* 大同工業大学情報学部情報学科 名古屋市南区滝春町 10-3

** 大同特殊鋼(株)星崎工場 名古屋市南区大同町 2-30

* School of Informatics Daido Institute of Technology, 10-3 Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya

** Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho, Minami-ku, Nagoya

(Received July 24, 2003)

(Revised March 24, 2004)

にとどめられている。

本報告は、文献1)で示されていない放射率改善効果の仕組みを、粉体塗布面の放射率測定結果をもとに、詳しく述べるものである。具体的には、誘導加熱探傷が対象とする常温領域において、ビレット表面を覆う粉体の面積割合と見掛けの放射率との関係、ならびに、ビレットから粉体への熱伝達遅れについての測定結果から、面積割合が90~100%の粉体塗布によってS/Nが大幅に改善されることを示すものである。

以下、第2章では誘導加熱探傷について、第3章ではビレット表面の放射率が探傷性能に及ぼす影響について、第4章では粉体塗布面の粉体面積割合と放射率の関係を、第5章では粉体被覆厚みと熱伝達遅れについての測定結果を、さらに、第6章では測定結果をもとに粉体塗布効果を考察する。

2. 誘導加熱探傷とは

Fig. 1は、ビレットの1面を探傷するテスト装置の概念図である^{1),4)}。誘導加熱コイルと赤外線サーモグラフィは固定で、一辺が90~153 mmのビレットを搬送させながら探傷を行なうものである。テスト装置は、①ビレット搬送装置、②静電粉体塗布装置、③周波数が100 kHzの誘導加熱用高周波電源、④ビレット表面の温度を非接触で測定する赤外線サーモグラフィ(検出素子: HgCdTe, 受光帯域: 8~12 μm , 素子冷却: スターリングクーラ方式, NEC 三栄(株)製)、および、⑤パソコンで構成されている。赤外線サーモグラフィは加熱コイル出口に設置され、ビレット幅方向にライン走査を行ない、加熱直後の温度分布を測定している。テスト装置ではビレットを20 m/minの速度で搬送しており、結果的にはビレット長さ方向に3.3 mm、幅方向に1 mmの空間分解能で表面温度分布を測定している。Fig. 2は、非磁性ビレットの長さ方向に延びる線状疵の周囲を流れる誘導電流の分布を有限要素法で解析した結果の一例である。(a)は、疵部の縦断面における電流密度を、(b)は横断面のそれを示す。計算ではビレット表面に垂直な、深さ $d=1.0$ mm、開口幅 $W=0.1$ mmの疵を想定している。誘導電流の流れ方は、疵深さ d と浸透深さ $\delta(=\sqrt{\rho/\pi f \mu})$ に依存する。この例では、ビレットを非磁性鋼としているので $\delta=1.4$ mmである⁵⁾。Fig. 2のシミュレーション例が示すように、誘導電流は疵の両端を除いた部分では、疵部の縁を迂回して流れるため底部で密になるが疵部表層は粗になる。よって、疵のない健全部表層と疵部表層ではジュール発熱に差が生じ、表面温度は疵部のほうが健全部よりも低くなる。したがって、ビレット表面温度分布を検出し、周囲より温度が低い部分を抽出することにより疵部位を特定することができる。

以下の議論では、非磁性ビレットを対象とし、疵信号 ΔT を“ $\Delta T = \text{健全部温度} - \text{疵部温度}$ ”で定義する。

3. 放射率が探傷性能に及ぼす影響

ビレットは、探傷前にショットブラスト処理が施され、表

Fig. 1 Schematic diagram of the test equipment

Fig. 2 Eddy-current density surrounding a surface defect on a non-magnetic billet by the finite element method

面に発生したスケールなどが取り除かれている。ショット肌の放射率は、0.75程度であることが実験で確認されている。Fig. 3は、同じビレット(同じ疵)を対象にした探傷テストで得られた疵信号 ΔT で、ビレット表面の放射率による影響を示すものである⁴⁾。●印は黒ラッカが塗布されたビレットの ΔT 、○印はショット肌の ΔT である。黒ラッカが塗布された表面の放射率は $\epsilon \approx 1$ とみなすことができる^{6)~8)}。Fig. 3から、 $\epsilon \approx 1$ の黒ラッカ肌と $\epsilon \approx 0.75$ 程度のショット肌とでは、 ΔT に大きな差が生じていることが確認できる。この探傷テスト結果が示すように、疵信号 ΔT の検出にはビレット表面から放射される赤外線エネルギーを検出し、温度に変換するサーモグラフィが用いられているので、疵信号 ΔT を高めるには、放射率 ϵ を限りなく1にまで高めることが重要となる。

また、ビレットは搬送時にお互いの衝突、あるいは、搬送装置とのコスレなどによって表面に光沢部が生ずる。この光

沢部は放射率が小さいので、光沢部からの放射エネルギーは低く、結果的に疵部と同様な温度分布となり疵として誤検出される。このため、疵信号評価のために実施した探傷テストでは、ビレットに黒ラッカを均一に塗布し、放射率 ε が均一で、しかも、 $\varepsilon=1$ の状態ではビレット表面の温度分布を測定している。

実用機を想定したとき、ビレット全表面を黒ラッカで塗布することは、ラッカ乾燥時間による能率低下やコスト面など

Fig. 3 Comparison of defect signals, ΔT , between a black paint coated sample and a bare sample

Fig. 4 Relationship between the average thickness of the powder layer and the signal-to-noise ratio

から、非現実的である。そこで、筆者らは、この放射率問題の対策として静電粉体塗装で用いられている平均粒径が $40\ \mu\text{m}$ の、Ti または C 粉末を樹脂で被覆した、微細な粉体をビレット表面に塗布する方法を考案した。粉体塗布は、自動車部品や電気部品などの塗装で用いられている静電粉体塗装技術を利用している。Fig. 4 は、粉体塗布による探傷性能の改善効果を示すもので、深さ $d=1.0\ \text{mm}$ の線状疵に対する疵信号 ΔT 、および放射率差によるノイズ(肌ノイズ)と、粉体塗布量の関係を示すものである¹⁾。Fig. 4 における粉体塗布量は、ビレットを被覆する粉体の平均厚みであり、探傷テスト後に回収した粉体の体積から換算した値である。以後、粉体の平均塗布厚みを粉体被覆厚み m と呼ぶ。

Fig. 4 から、粉体を塗布することによって探傷性能が改善されることは確認できるが、ビレット表面の放射率との関係は明らかでない。粉体塗布面の放射率 ε は、粉体で被覆されている面積割合(以後、粉体被覆率 η と呼ぶ)で定められるものと推察される。粉体被覆率 η が100%であれば、ビレット表面の放射率は均一化されるが、時間的に遅れることなくビレット表面温度が粉体に伝達されているかは保証されない。また、ランニングコストの観点からも、できるだけ η を抑えることが望ましい。

次章以降では、①粉体被覆率 η と放射率 ε の関係、②粉体被覆厚み m と粉体への熱伝達遅れの関係、について実験結果を示し、 η が肌ノイズをどの程度低減させ、また、疵信号をどの程度高めるかについて言及する。

4. 粉体塗布面の放射率測定 (被覆率 η と放射率 ε の関係)

4.1 放射率測定モデル

常温近辺の温度測定を目的とした放射測温に関しては詳細な報告例もみられるが⁹⁾、ここでは市販の赤外線サーモグラフィを導入することを前提としているので、探傷テストで使用した赤外線サーモグラフィを用いて、粉体被覆率 η と放射率 ε の関係を室内実験で追求した。

測定サンプルとしては、ビレット表面の光沢部と同じような性状を呈する、長さ $200\ \text{mm}$ 、幅 $100\ \text{mm}$ 、厚さ $0.5\ \text{mm}$ のステンレス荒磨板を選んだ。

(1) 粉体なしの場合

Fig. 5 は、粉体が塗布されていない場合の、放射率 ε の測定状況を例示するものである。表面温度が T_s で、放射率が ε_s のサンプルを、内面温度が T_a の管体内部に設置し、サンプルから放射される放射エネルギーを、探傷テストで用いた赤外線サーモグラフィで検出する状況を示している。ただし、管体内面の放射率は1とする。このとき、赤外線サーモグラフィが検出する輝度温度を T_i とすると

$$f(T_i) = \varepsilon_s f(T_s) + (1 - \varepsilon_s) f(T_a) \quad (1)$$

が成り立つので、 ε_s は次式で計算される^{10)~14)}。

$$\varepsilon_s = \{f(T_i) - f(T_a)\} / \{f(T_s) - f(T_a)\} \quad (2)$$

ここで、 $f(T)$ は、絶対温度 T の黒体から放射される赤

外線エネルギーであり

$$f(T) = A\sigma T^n \quad (3)$$

で表わされる。(3)式において、 σ はステファン・ボルツマン定数である。また、 A は係数、 n は測定波長領域と測定温度範囲によって決まる定数で、これらの値は、赤外線サーモグラフィの検出部に依存する。

(2) 粉体ありの場合

粉体が塗布されている場合には、粉体からの赤外線放射エネルギーが加わり、また、サンプルが被覆率 η で粉体にて覆われるので、(1)式に代わり、次式の関係が成り立つ (Fig. 6 参照)。

$$f(T_i) = (1-\eta)\epsilon_s f(T_s) + \eta\epsilon_p f(T_p) + (1-\eta)(1-\epsilon_s)f(T_a) + \eta(1-\epsilon_p)f(T_a) \quad (4)$$

ここで、粉体の放射率 ϵ_p を $\epsilon_p \approx 1$ 、また、粉体温度 T_p がサンプル温度 T_s に等しいと仮定すると

$$f(T_i) = \{(1-\epsilon_s)\eta + \epsilon_s\}f(T_s) + (1-\eta)(1-\epsilon_s)f(T_a) \quad (5)$$

が得られ、さらに

$$\epsilon' = (1-\epsilon_s)\eta + \epsilon_s \quad (6)$$

とすると、(5)式は

$$f(T_i) = \epsilon' f(T_s) + (1-\epsilon')f(T_a) \quad (7)$$

で表わされる。(7)式は(1)式の ϵ_s を ϵ' に置き換えた形となり、 ϵ' は粉体塗布面の放射率とみなすことができる。

Fig. 5 Infrared radiation energy from a sample without powder coating

Fig. 6 Infrared radiation energy from a sample with powder coating

よって

$$\epsilon' = \{f(T_i) - f(T_a)\} / \{f(T_s) - f(T_a)\} \quad (8)$$

から粉体塗布面の放射率を求めることができる。

以上の、放射率測定モデルの妥当性を確認するため、実際の探傷を想定し、周囲環境温度を常温、また、ビレットを常温より10°C程度加熱したとして、 $T_a = 15 \sim 25^\circ\text{C}$ 近辺、 $T_s = T_a + (10 \sim 20)^\circ\text{C}$ を選んで測定した。

4.2 測定装置

(1) サンプル

サンプルは、ビレットの光沢部を想定し、厚みが0.5 mmのステンレス荒磨板を用いた。Fig. 7のように、サンプル表面を10区分に分け、エリア#10を粉体なしのサンプル地肌とした。残りのエリアに対しては粉体塗布時間を調整することによって、被覆率 $\eta = 0 \sim 100\%$ の範囲で、それぞれが異なった η となるように粉体を静電塗布した。また、Fig. 7に示すように、サンプルの上下部および中央部の3カ所に黒ラッカを塗布し、この部分を赤外線サーモグラフィで検出し、それをサンプル温度 T_s とした。なお、サンプル温度が一定であることを保証するため、黒ラッカ部の温度が均一になっていることを確認しながら測定を行なっている。

(2) 測定装置

前節の放射率測定モデルを実現するため、Fig. 8のような実験装置を試作した。装置は、測定筐体、温度制御機能を備えたホットプレート、温水タンク、ならびに、温水循環装置にて構成される。測定筐体は周囲が水槽の構造となっている。また、①と②の2つに分割されており、両者を密着させることによって一対で筐体をなし、内壁は $\epsilon \approx 1$ とみなすことができるベルベット布が貼り付けられている^{(11),(12)}。温水タンクには温度制御機能が備えられている。また、温水タンクから測定筐体への温水循環に加えて、温水タンクと筐体のそれぞれが自身の攪拌器にて温水を常に攪拌しており、筐体内部の温度は、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以下の精度で維持されている。サンプルは、温度制御機能を備えたホットプレート面に密着させることによって加熱されている。

筐体内部の温度は、熱電対によって監視されており、筐体

Fig. 7 Powder coated sample used for emissivity measurement

Fig. 8 Schematic of an emissivity measurement unit

Fig. 9 Relationship between the emissivity of powder coated samples vs. the coverage (coated area/bare area) η

Photo 1 Microscopic images of the distribution of the powder coating on the billet surface

の水温と一致し、なおかつ、定常状態にあることを確認したのち、水槽②を移動させて、代わりにホットプレートを設置し、筐体①に開けられた測定口より赤外線サーモグラフィでホットプレート上のサンプル表面温度を測定している。

4.3 放射率測定結果

T_a を16~26°C近辺、 T_s をそれよりも10~20°C高い温度で、温水タンクの水温とホットプレート温度を制御し、放射率を測定した。Photo 1は、粉体塗布面の顕微鏡写真の一例である。

Fig. 9は、(8)式で計算した粉体塗布面の放射率 ϵ' である。 ϵ' は $f(T_a)$ 、 $f(T_i)$ 、 $f(T_s)$ を(8)式に代入することによって得られる。ここで、 $f(T_a)$ 、 $f(T_i)$ 、 $f(T_s)$ は測定実験で使用する赤外線サーモグラフィに固有な関数を用いて、 T_a 、 T_i 、 T_s から求めることができる。 T_a は筐体内部に挿入した熱電対の温度、また、 T_i と T_s はそれぞれ赤外線サーモグラフィで測定した粉体塗布面と黒ラッカ部の輝度温度である。なお、 T_s は黒ラッカ部の放射率を $\epsilon_s=0.98$ としたときの輝度温度とした。黒ラッカ部の放射率 $\epsilon_s=0.98$ は、サンプルに溶接した熱電対との比較から求めた値である。黒ラッカ部の放射率がこの程度の値であることは多くの文献で示されている^{6)~8)}。

Fig. 9に示すように、粉体塗布面の放射率 ϵ' と粉体被覆率 η とは、(6)式の直線関係にあることが、この測定実験により確認された。したがって、前節で述べた測定モデルの妥当性、ならびに、粉体の放射率 ϵ_p を $\epsilon_p=1$ 、粉体温度 T_p をサンプル表面温度 T_s に等しいとした仮定は成り立つと言える。なお、サンプル地肌の放射率 ϵ_s は $\epsilon_s=0.14$ であった。

5. 粉体の昇温速度測定

粉体を塗布することによって、放射率を $\epsilon=1$ にまで高めることができることを、Fig. 9の実験結果で示した。実験では、十分に時間が経過した後には赤外線サーモグラフィでサンプル表面温度を測定しているが、実際の探傷ではピレットの加熱が開始されてから表面温度が測定されるまでの時間は0.1s程度である⁴⁾。したがって、粉体はピレット表面温度まで瞬時に加熱される必要がある。この章では、粉体塗布面の昇温速度についての測定結果を示す。

Fig. 10は、被覆率 $\eta=98\%$ の粉体塗布面と、黒ラッカ面の昇温速度を比較した結果である。図中に、サンプルの表面状態と温度測定ラインを示す。測定は以下の手順で実施した。熱伝導性が良好な、厚みが0.5mmのアルミ板を測定サンプルとして用意し、サンプルの片面に粉体と黒ラッカを塗布した。昇温速度の測定では、粉体およびラッカ塗布面とは反対側のサンプル面を約90°Cの熱水で瞬間的に加熱し、赤外線サーモグラフィにて10msの走査周期で、黒ラッカ部と粉体塗布部の温度を同じ走査タイミングで測定した。Fig. 10より、両者の昇温速度には、ほとんど差がないことが確認される。なお、黒ラッカ部の厚みは、18 μm であることが

測定により確認されている。

Fig. 11 は、アルミ板サンプルから粉体への熱伝達速度が、粉体塗布量にどの程度影響されるかを検討したもので、粉体塗布量は厚み m で議論されている。厚み m は、昇温速度の測定後に粉体を溶融させて生成される塗装膜厚を測定したものである。Fig. 11 に示されるように、サンプルの片面に被覆厚みを変えた粉体塗布面を作成し、Fig. 10 の測定と同じく 10 ms の走査周期で温度測定している。粉体被覆率 $\eta < 100\%$ の部分については η の値を測定しており、 $m=22\ \mu\text{m}$ では $\eta=99.7\%$ 、 $m=18\ \mu\text{m}$ では $\eta=93.0\%$ であることを確認している。

Fig. 10, 11 より、 $\eta < 100\%$ であれば黒ラッカと同等の昇温速度が得られるが、それ以上の厚みになるとサンプルは粉体によって完全に被覆され、さらに被覆厚みが増大すると、粉体はサンプル表面に積層して空気層を生成し、この空気層により熱伝達遅れが生ずるので、探傷のための加熱時間(約 0.1 s)では、表層の粉体に熱が伝わらず、結果的に十分な疵信号 ΔT を得ることは困難となることが理解される。

Fig. 10 Comparison of rate of temperature rises between powder-coated and paint-coated samples

Fig. 11 Influence of the powder layer thickness on the rate of temperature rise

6. 考 察

(1) 探傷テスト結果との比較

前章までの結果から、①粉体被覆率 η が 100% に達したとき粉体被覆厚み m は $22\ \mu\text{m}$ となっていること、②この状態ではサンプルから粉体への熱伝達遅れは無視でき、さらに、③粉体塗布面の放射率は $\epsilon' \approx 1$ とみなすことができることが確認された。このことは、粉体被覆厚みが $20\ \mu\text{m}$ 近辺で S/N が最大となっている Fig. 4 の探傷テスト結果と一致している。

探傷テストならびに今回の測定結果から、粉体が重ならないように $\eta=100\%$ でビレット表面を粉体塗布した状態で探傷したとき、最良の結果となることが確認される。実際の探傷では $\eta=100\%$ 前後、たとえば、 $\eta=90\sim 100\%$ の範囲で十分である。静電粉体塗布技術は確立された技術であり、この程度の粉体塗布制御は難しいことではない。

以下の項では、粉体被覆率 $\eta=90\%$ として、前章までに示した測定結果にもとづき、S/N 改善効果について考察する。

(2) 粉体塗布による疵信号アップ

今回、ステンレスサンプル地肌と同時に、工程材ビレットから切断されたサンプルの放射率を測定しており、その結果としてショット肌のままでは $\epsilon_s \approx 0.75$ であることを確認している。誘導加熱探傷においてビレットが加熱される温度は、常温よりたかだか 10°C 程度であり、この狭い温度範囲において (2) 式は十分な精度で直線近似することができる。このとき、赤外線サーモグラフィが検出する疵信号 ΔT は ϵ に比例すると考えることができるので、黒ラッカ塗布された $\epsilon_s \approx 1$ の理想的なビレットに対する疵信号 ΔT に対し、ショット肌 ($\epsilon_s \approx 0.75$) では ΔT が 25% 低下する。これに対し、粉体を $\eta=90\%$ 塗布したビレットでは放射率が $\epsilon' = 0.975$ にまで改善されるので ΔT は 2.5% の低下にすぎない。

(3) 粉体塗布によるノイズ抑制効果

前項で述べたように、ビレットの上昇温度がたかだか 10°C 程度とすると、赤外線サーモグラフィが検出する上昇温度はビレット表面の放射率に比例するとみなすことができる。ビレット表面の放射率が ϵ_s で、コスレによる光沢部の放射率を ϵ_n としたとき、肌ノイズの大きさはビレット上昇温度の $(\epsilon_s - \epsilon_n) \times 100\%$ となる。これはたいへん大きな値で、たとえば $\epsilon_n = 0.15$ とみなし、ショット肌のままのビレット ($\epsilon_s \approx 0.75$) を常温より 10°C 加熱したとすると、肌ノイズは 6.0°C となり、深さが $1.0\ \text{mm}$ 程度の疵に対する ΔT よりも大きな値となる。一方、ビレットを $\eta=90\%$ にまで粉体塗布すると、ショット肌は $\epsilon_s = 0.975$ に、光沢部は $\epsilon_p = 0.915$ にまで放射率が高められ、肌ノイズは 0.6°C にまで抑制される。これは、粉体が塗布されていない場合と比較すると 1/10 の値である。

深さが $0.5\ \text{mm}$ の疵検出は必須で、この深さレベルの疵検出を目標としたとき、ビレットがショット肌のままでは、コ

スレ部分をすべて疵として誤検出することになる。工程材の搬送時には、コスレが頻発するため、誤検出個数は疵個数をはるかに超え、ショット肌のままでは自動探傷は困難となる。このように、粉体塗布による効果はたいへん大きく、誘導加熱探傷の実用化を可能にしている。

7. おわりに

本報告では、誘導加熱探傷においてビレット地肌の、放射率差に起因する肌ノイズを抑制するために考案した粉体塗布法の効果を、①粉体の被覆率 η と放射率の関係、ならびに、②粉体の被覆厚み m と熱伝達遅れの関係、を測定することによって明らかにした。さらに、粉体塗布によってS/Nがどの程度改善されるかについても述べてきた。

表面がショット肌のビレットを誘導加熱探傷したとき、放射率の低い部分を疵と誤認識するため、誤検出個数は疵個数をはるかに超え、多くの場合においてビレット表面がすべて疵とみなされる。このような状況では自動探傷装置の導入は非現実的なものとなる。ここで示した粉体塗布法は、肌ノイズを抑制し、誘導加熱探傷の実用化に大きく貢献するもので、すでに、本手法を導入した装置が生産ラインで順調に稼働を続けている。

ここでは、被検査材として非磁性ビレットを取り上げたが、磁性ビレットあるいは機械部品など、多くの分野に適用が可能と考える。

最後に、本研究を遂行するにあたりご協力頂いた大同特殊鋼(株)の関係者諸氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 遠藤, 渡邊, 八木, 水野: ビレットの誘導加熱探傷における放射率差ノイズの一改善方策, 計測自動制御学会論文集, 36-11, 1044/1046(2000)
- 2) Y. Strom: Automatic surface inspection of continuous cast billets, Iron and Steel Eng., 69-5, 29/33(1992)
- 3) 河田忠則: 鋼片の表面きず探傷機, 特殊鋼, 41-2, 30/33(1992)
- 4) 遠藤, 八木, 水野: 非磁性角鋼片の誘導加熱探傷における探傷条件の実験的考察, 電気製鋼, 71-3, 199/204(2000)

- 5) 電気学会: 電気工学ハンドブック, 1738/1739, 電気学会(1988)
- 6) 計測自動制御学会: 温度計測, 244/244, 計測自動制御学会(1992)
- 7) 石井, 岡本, 大岡, 衛藤, 星屋: 赤外線サーモグラフィによる材料表面きずの非破壊検出に関する研究, 非破壊検査, 48-10, 682/687(1999)
- 8) 久野治義: 赤外線工学, 22/22, コロナ社(1994)
- 9) 井内, 石井: 偏光輝度を利用した常温付近における光沢金属の放射測温法, 計測自動制御学会論文集, 36-5, 395/401(2000)
- 10) 藤村, 松村: 熱放射の拡張指数に基づく温度推定法, 計測自動制御学会論文集, 24-4, 15/21(1988)
- 11) 岡本, 神永, 刑部, 前川, 石井, 大岡, 衛藤: 赤外放射計による射度係数の測定とその応用, 日本機械学会論文集(B編), 57-534, 699/703(1991)
- 12) 岡本, 石井, 神永, 佐藤, 黒川: 赤外放射計による材料表面の射度特性について, 日本機械学会論文集(B編), 57-544, 4260/4265(1991)
- 13) 日本工業標準調査会: 放射温度計の性能試験方法通則, JIS C 1612: 2000, 日本規格協会(2000)
- 14) 岡本芳三: 遠赤外線リモートセンシング熱計測法, 30/55, コロナ社(1994)

[著者紹介]

遠藤 敏夫 (正会員)

1973年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年大同特殊鋼(株)入社, 99年大同工業大学教授, 現在に至る。鉄鋼製品表面疵の自動探傷などの研究開発に従事。日本非破壊検査協会, 情報処理学会などの会員。工学博士。

中原 勘寿

2003年 大同工業大学大学院工学研究科修士課程電気・電子工学専攻修了。同年大同特殊鋼(株)入社, 現在に至る。電気設備技術開発などの業務に従事。電気学会会員。