論説

Paper

非磁性角鋼片誘導加熱探傷における短い傷の検出 （有限要素法による解析）

遠藤敏夫^{*1}，蛇石大輔^{*2}，中原勘寿^{*3}

Inspection of Short-Defects on the Surface of Non-Magnetic Square Billets Using an Induction Heating Inspection Method (Analysis by the Finite Element Method)

Toshio Endo, Daisuke Hebiishi, and Kanju Nakahara

Abstract

The induction heating inspection method is a technique to detect surface defects on billets. When a billet passes through a high-frequency coil, an induced current flows on the billet surface. The current flow will be obstructed by any defects that are present, and the temperature of the areas surrounding the defects will differ from areas that are free from defects due to differences in the current paths. The billet temperature profile can be inspected using an infrared scanner, and consequently surface defects can be detected.

In this study, we report the analytical results of temperature distribution using the finite element method with regard to short defects on the surface of non-magnetic square billets.

The results we obtained are as follows:

- (1) In the area of a defect, the shorter the defect, the larger the temperature difference between the defective area and non-defective areas
- (2) Joule heating is larger at the edge of a defect than it is in other areas, partly due to concentration of the induced current.
- (3) For short defects, the temperature difference between non-defective and defective areas becomes larger with longer heating times.

1. はじめに

角鋼片（以後、簡単のため鋼片と呼ぶ）の自動探傷法の一つに誘導加熱探傷法がある。誘導加熱探傷法とは、鋼片表層部を高周波で急速加熱させたとき、疵部と健全部の温度上昇に差が生ずることから、その温度差を赤外線サーモグラフィで検出する手法の探傷法である^{1),2),3)}。

誘導加熱探傷において、疵信号として検出される温度差は僅か数度の信号であり、検出精度を高めるためには非破壊検査の一般的な課題である S/N アップが重要となる。誘導加熱探傷では、疵信号を赤外線サーモグラフィにて検出

しているため、放射率の均一化という放射測温における固有の課題がある。この課題については、粉体を鋼片表面に疎らに塗布することによって放射率を均一化して、なおかつ、放射率=1にまで高めることで解決している¹⁾。一方、疵信号を高めるという基本的な課題については、最適探傷条件の追求が行われており、文献2)で報告されている。

本研究の目的は非磁性鋼片を対象とするもので、誘導加熱探傷において検出が難しいとされている短い疵の検出性能向上策を追求することにある。検出性能向上の追求には、誘導加熱によって疵部周囲がどのような昇温状況呈するかを、3次元的に解析する必要がある。また、鋼片内

2003年5月6日受付

* 1 大同工業大学情報学部，工博（Dr., Eng., School of Informatics, Daido Institute of Technology）

* 2 日立システムアンドサービス（Hitachi Systems & Services, Ltd.）

* 3 大同特殊鋼（株）星崎工場（Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd）

部の詳細な昇温状況も必要とする。鋼片内部の温度を、しかも0.1s単位で測定することは不可能である。さらに、赤外線サーモグラフィの空間分解能の制約から、短い疵周囲の表面温度を詳細に測定することにも限界がある。このため、本研究では有限要素法を用いたシミュレーションによって、短い疵周囲の昇温状況を3次元的に解析することにより検出性能の向上策を追求している。

本報告は、長さが5から10mm程度の、短い線状疵を対象とした疵部周囲温度の有限要素法による解析結果、ならびに短い疵の検出性能向上策を提案するものである。

2. 誘導加熱探傷とは

以下、Fig.1とFig.2をもとに、誘導加熱探傷の原理を簡単に述べる。Fig.1は、誘導加熱探傷の状況を例示するもので、鋼片を挿入した状態で加熱コイルに高周波電流を流すと、鋼片の表層部には鋼片長手方向と垂直な周囲方向（幅方向）に誘導電流が流れ、この誘導電流によるジュール発熱にて鋼片表層が加熱される。よく知られているように、誘導電流の浸透深さ δ [m] は、 $\delta = \sqrt{\rho / \pi f \mu}$ で計算される。ここで、 f は高周波電流の周波数 [Hz]、 ρ と μ はそれぞれ鋼片の抵抗率 [$\Omega \cdot m$] と透磁率 [H/m] である。たとえば、 $f=100\text{kHz}$ のとき、磁性鋼で δ はおよそ0.06mm、非磁性鋼（オーステナイト系ステンレス）で1.4mmとな

Fig.1. Principles of the induction-heating surface defect inspection method.

Fig.2. Schematic illustration of induced current density at defect edges.

る。表面疵が存在すると鋼片表層を流れる誘導電流は疵部を迂回する。たとえば、Fig.1に示すような疵部の横断面に着目すると、誘導電流は疵の底部に集中するが縁部では粗となる。また、Fig.2に示すように疵長手方向の両端部でも誘導電流は集中する。このように、疵が存在することによって電流密度が異なるため、ジュール発熱に差が生じ、その結果として疵部と健全部とでは温度上昇に差が生ずる。誘導加熱探傷とは、赤外線サーモグラフィで鋼片表面の温度分布を検出し、温度分布が変化している部分を抽出することによって疵部位を検出する探傷法である。

3. シミュレーションモデル

筆者らは、Fig.3に示す実験装置にて、最適探傷条件の追求、ならびに、放射率のバラツキを起因とする肌ノイズ対策のため、詳細なテストを繰り返してきた。本報告では、実験装置を対象としたモデルによるシミュレーションを中心に、あわせて、コイル幅とコイルギャップを広げた実用モデルのシミュレーション結果についても述べる。

Fig.3. Schematic diagram of the experimental equipment.

Fig.4に、実験装置の状況に合わせて設定したコイルと鋼片の形状を示す。本稿のシミュレーションでは、疵の開口幅 W を0.1mm、傾斜角度 θ を 0° （ビレット表面に垂直）としている。

渦電流場は、よく知られているようにマクスウェルの電磁方程式から導かれた次の基礎方程式を時間的に離散化したのち、有限要素法にて空間を離散化して得られる節点方程式によって解析される^{4),5)}。

Fig.4. Drawing showing the billets and coils in the experimental equipment.

$$\text{rot} (1/\mu) \text{rot} A + \partial A / \partial t = J \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A は磁気ベクトルポテンシャル、 J は強制電流（密度）、 μ は透磁率、 σ は導電率である。

同様に、熱伝導場もよく知られた次の偏微分方程式を離散時間化し、さらに有限要素法にて空間を離散化して得られる節点方程式によって解析される。

$$c \partial T / \partial t - \text{div} \text{grad} T = Q \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 T は温度、 ρ は密度、 c は比熱、 k は熱伝導率、 Q は単位体積あたりの発熱量である。シミュレーションでは、物性値を Table 1 の値とした。

Table 1. Physical properties for the non-magnetic billets used for the simulation test.

Electric conductivity [S/m]	1.3×10^6
Relative permeability μ_r [-]	1
Thermal conductivity [W/m・K]	15.9
Heat capacity c [J/kg・K]	494
Density [kg/m ³]	7930

有限要素法による渦電流場と熱伝導場のシミュレーション・ソフトウェアは多くのメーカーより製品が提供されており、本研究においても渦電流解析と熱伝導解析の連成問題を得意とする株式会社フォトンの PHOTO-EDDY j および PHOTO-THERMO を利用した。

4．シミュレーション結果

本来なら、鋼片を移動させて疵部がコイルに挿入される直前から、コイル出口の検出位置に到達するまでに亘って、鋼片の温度分布をシミュレーションする必要があるが、その実行には膨大な計算量を要するので、ここでは鋼片をコイル内で静止させたものと想定してシミュレーションを行った。なお、コイル幅が広く、必要な加熱時間を確保できるならこの想定で十分である。

シミュレーションでは、周波数を 100kHz、さらに、0.1s 間の誘導加熱で、鋼片表面の温度上昇が 10℃となる加熱条件（電流値）とした。

以後、鋼片長手方向の座標を y 、幅方向の座標を x 、疵信号を $T = (\text{健全部温度}) - (\text{疵部温度})$ で定義する。

(1) 実験装置を想定したシミュレーション

コイル幅が 20mm で、コイルギャップが 15mm の実験装置を想定したシミュレーション結果について述べる。Fig.5 はコイル幅に対して鋼片がどの程度の長さ亘って加熱され得るかを推定するために実施したシミュレーション結果である。縦軸は鋼片表層部に流れる誘導電流を電力密度で表したもので、コイル幅中心部の電力密度（最大値）で正規化している。横軸は鋼片長手方向の位置で、コイル幅の中心を原点としている。図から、コイル端における電力密度は中心部の約 70% であり、コイル内に位置する鋼片部分においては極端な加熱差はないと推察される。

Fig.5. Calculated distribution of the power density induced by the heating coil in the experimental equipment.

Fig.6 は、深さ $d=1.0\text{mm}$ に対する疵信号 T の推移を、疵長さ別で表したものである。 T は疵中央部における値とした。疵の長手方向の中心は、コイル幅の中心と一致させてある。Fig.6 は、疵がコイル幅以内の長さであれば、

T は時間の経過とともに指数関数的に上昇を続けるが、コイル幅に近づくと（或いはそれ以上になると）加熱が開始されてから 0.2 秒後に最大値となり、その後は低下する傾向にあることを示している。これは、誘導電流が疵底部と縁部を迂回して流れるため、疵が長いと誘導電流は縁部を迂回して流れ、底部に集中する。結果として疵底部のジュール発熱が大となり、温度上昇度も大きくなる。しかし、疵縁部は誘導電流の密度が粗となるため、温度上昇度は小さい。疵部周囲に温度差が生ずると熱拡散が始まる。熱拡散は時間とともに進行し、加熱されてから 0.2 秒経過すると、疵縁部と健全部の温度差は縮まる傾向を示す。一

Fig.6. Calculated defect signal ΔT , as a function of the elapsed time that was assumed for the experimental equipment. The lengths of the defects L , are 5, 10, and 20 mm, respectively.

方で、疵が短いと疵端部を迂回して流れる誘導電流の割合が大となるため、疵が長い場合と比べて、疵底部における電流の集中度は小さい。したがって、加熱時間が経過しても T は上昇を続ける。当然、長い時間経過すると T は熱拡散によって低下する。

Fig.7 は、加熱開始後 0.2s 後における、疵の長手方向 (y 方向) に対する温度分布を示したものである。横軸は疵中央からの位置である。また、対象疵の深さは 1.0mm である。鋼片の、長手方向に関する温度分布は疵中央部に対して対称となる。Fig.7 の (a)(b)(c) は、それぞれ疵長さ $L=5, 10, 20$ mm に対する、疵縁部と健全部の温度、および疵信号 ΔT を示す。疵中央部での ΔT は、疵長さの短い方が、長い場合と比べて大きくなっている。これは、疵縁部の表面温度が低いからであることがFig.7より確認される。また、疵端部では健全部領域を中心に、健全部よりも温度上昇度が大きくなっている。これは、中央部では大半の誘導電流が疵縁部を迂回して疵底部に集中して流れていたものが、疵縁部にも集中して流れるからである。参考のため、Fig.8 に疵部を含む、鋼片表面温度分布のコンタ図を示す。

実験機で測定された、長さが 7mm 程度の短い疵に対する温度分布を Fig.9 に示す。健全部と比べて、疵の両端部は温度が高く、疵部中央は低いことがFig.9より確認できる。

(2) 実用化を想定したシミュレーション

これまで、コイル幅が 20mm で、コイルギャップが 15mm の実験装置を想定したシミュレーション結果について述べてきた。実用化を考えるならコイルギャップを拡大する必要がある。そこで、コイルギャップ 50mm、コイル幅 50mm の実用機を想定した加熱条件で、短い疵に対する疵信号 ΔT のシミュレーションを行った。

Fig.7. Calculated temperature profiles in the longitudinal direction of the billets in both defective and non-defective areas and defect signal ΔT .

Fig.8. Calculated temperature distribution chromatograph for the induction heating conditions using the experimental equipment.

Fig.10 は、幅が 50mm のコイルに対して、鋼片がどの程度の長さによって加熱され得るかを推定するために実施したシミュレーション結果である。Fig.5 と同じく、縦軸は鋼片表層部に流れる誘導電流を電力密度で表したもので、コイル幅中心部の電力密度（最大値）で正規化している。横軸は鋼片長手方向の位置で、コイル幅の中心を原点としている。Fig.5 との比較から、コイルギャップを広げた場合には加熱幅が拡大していることが確認される。

ここでは、コーナ部に発生する長手方向に割れた深い傷（ $d=2.0\text{mm}$ ）を対象とした。Fig.11 はシミュレーション結

Fig.9. Example of neighboring temperature profiles for the short defect measured by the experimental equipment.

Fig.10. Calculated distribution of the power density induced by the induction heating conditions used in the equipment for practical applications.

果の一例である。長い疵（ $L=100\text{mm}$ ）に対しても、短い疵（ $L=10\text{mm}$ ）に対しても、実験装置を想定したシミュレーションと同じ結果になっている。長い疵（ $L=100\text{mm}$ ）の疵信号 T は、加熱が開始されてから約 0.2 秒後に最大値に達した後は低下するが、短い疵の T は 0.2 秒後も増大を続けていることが確認できる。

以上の議論より、短い疵のほうが、長い場合と比べて疵中央部での疵信号 T は大となることが推察される。ただし、探傷周波数 f （浸透深さ）と疵深さ d によって、 T の様子は異なったものとなる。しかし、 f を固定する限り、疵の短い方が d が深くなるほど、疵中央部での T が大きくなることは容易に推察される。

Fig.11. Calculated defect signal ΔT , as a function of the elapsed time for our application equipment for both long and short defects.

5. 短い疵の検出性能向上に関する提案

シミュレーション結果にもとづき、長さが5～10mm程度の短い疵に対する、検出性能の向上策を以下に提案する。

(1) 加熱時間を長くする

シミュレーション結果によるなら、コイル幅以下の短い疵に関して、疵中央部の ΔT は加熱時間の経過とともに上昇を続ける。加熱時間の選び方は、疵深さ d と加熱周波数 f によっても異なるが、 $f=100\text{kHz}$ として、実験装置モデルの対象疵 $d=1.0$, $L=5\text{mm}$ を標準的な短い疵とするなら、少なくとも0.2s以上の加熱は必要と考える。加熱時間を長くするには、探傷速度の低速化、コイル幅の拡大、によって実現される。

(2) 健全部よりも疵両端部の温度が高いことを疵抽出処理に加える

この処理は、鋼片長手方向の温度分布を差分処理することで実現され、すでに実用化されているが、これに加えて疵両端部温度が高く、中央部が低い部分を抽出する、パターン処理を加えれば、さらに検出精度が向上すると考える。

(3) 赤外線サーモグラフィの鋼片長手方向分解能を向上させる

シミュレーションでは疵長さの長短を問わず、疵中央部では健全部温度よりも低く、また、短い疵の方がより低い温度となっている。つまり、短い疵の方が ΔT は大となっている。一方で、疵の両端部は健全部よりも温度は高い。実験装置モデルのように、 $L=5\text{mm}$ の疵を取り上げるなら、健全部よりも温度が低い部分は約3mmで、健全部を含む

疵両端3mmの部分は高くなっている。疵中央部の、温度上昇が健全部よりも低くなっている3mmの部分を、さらには、疵両端部(数mm)の温度が高い部分を検出するには、赤外線サーモグラフィの鋼片長手方向の空間分解能を可能な限り向上させることが重要である。

6. あとがき

本稿では、角鋼片の誘導加熱探傷において検出が難しいとされる、長さが5～10程度の短い疵を対象に、有限要素法を用いたシミュレーションによる疵信号 ΔT の解析結果について報告した。

ここでの議論は、シミュレーションをベースとしたもので、結果は推察でしかない。今後は、実験によってシミュレーション結果の確認を行っていく考えである。

なお、疵信号 ΔT は、疵長さ L のみならず、疵深さ d および周波数 f に影響される。ここでは紙面の都合で短い疵を対象としたシミュレーション結果のみの報告にとどめたが、 f と d が ΔT に及ぼす影響を疵長さ別にシミュレーションしている途中であり、別の機会に報告を予定している。

最後に、本研究を遂行するにあたってご協力を頂いた大同特殊鋼(株)技術開発研究所の関係者諸氏に厚く御礼申し上げます。

(文 献)

- 1) 遠藤敏夫, 渡辺裕之, 八木富一, 水野正志: 計測自動制御学会論文集, **36**(2000) 11, 1044.
- 2) 遠藤敏夫, 八木富一, 水野正志: 電気製鋼, **71**(2000) 3, 199.
- 3) Y. Strom: Iron and Steel Eng., **69**(1992) 5, 29.
- 4) 中田高義, 高橋則雄: 電気工学の有限要素法, 森北出版(1982)
- 5) 坪内始, 内藤 督: 実践数値電磁界解析法, 養賢堂(1995)