

磁化渦電流探傷試験の数値解析評価法の検討

橋本 光男*・浅井 晃一*

Study on Numerical Analysis Method for Magnetized Eddy Current Testing

Mitsuo HASHIMOTO and Koichi ASAI

Synopsis : High quality products are demanded in steel production. Therefore quality measurement technology corresponding to it becomes more and more important. Eddy current testing is generally used for surface inspection. Because this technique enables high speed inspection without contacting objects. However, eddy current testing using magnetization is used because magnetic noises are large in steel samples. On the other hand, the technique is governed by an electromagnetic phenomenon, but it is difficult to understand this phenomenon intuitively. In recent years the phenomenon elucidation of the eddy current testing by numerical analysis was became possible by combining with development of numerical analysis technology and exploiting of markedly improved computers. Therefore establishment of the numerical analysis for this testing is expected to provide a useful method of separating signals of defects from magnetic noises.

Key words: eddy current testing; numerical analysis.

1. はじめに

国内における鉄鋼製品には高品質が求められ、これに対応した品質計測技術がますます重要となっている。鉄鋼製品の表面検査の一つとして渦電流探傷法が用いられている。この手法は高速かつ非接触で検査ができる特徴を持つが、鉄鋼の持つ磁気ノイズの弁別に課題があるのが現状である。そのため検査の高精度化には、きず信号と磁気ノイズの検出特性を評価することが重要となる。

一方、渦電流探傷法は電磁現象に支配され、この現象が直感的に理解しにくいところも検査を難しくしている。近年、数値解析技術の進展と計算機の性能が格段に向上したことが相まって、数値解析による渦電流探傷試験の現象説明が実用的になってきた^{1,2)}。そこで、数値解析を用いて、きずの検出信号の解析手法を確立することによって、渦電流探傷法の高精度化が期待できる。これまでに管の内挿検査プローブを用いた磁化渦電流探傷をモデルにした軸対称二次元解析が報告されている³⁾。この場合、きずは軸対称解析の性質上、全周のきずである。鉄鋼生産ラインで問題になるきずは微小であり、しかも3次元的なモデルとなる。このような微小なきずを扱う3次元有限要素法解析では、要素分割数が多くなり、実用的な計算には解析の工夫が求められる。本報では、鉄鋼ラインで問題になる微小なきずを、3次元的に解析する方法を検討し、それによって、実験による磁化渦電流探傷の検出特性を数値解析によって明らかにした。

2. 実験方法

Fig. 1 に本論文で解析対象とする磁化渦電流探傷の評価実験システムを示す。実験システムは、ノイズを消去するために直流の磁気回路、表面を2次元スキャンするXYテーブル、渦電流探傷装置およびそれらの制御とデータ収集するコンピュータから構成される。試験片は2mm厚の熱延鋼板にFig. 2に示す三種類のきずを放電加工により設けた。プローブはきずに対して十分大きな範囲に渦電流を発生させる励磁コイルと検出コイルによって構成されている。励磁コイルは20mm×20mmの正方形型コイルで、巻き回数は200ターン、検出コイルは外径2.2mm、巻き数は140ターンである。励磁周波数は100kHzとし、リフトオ

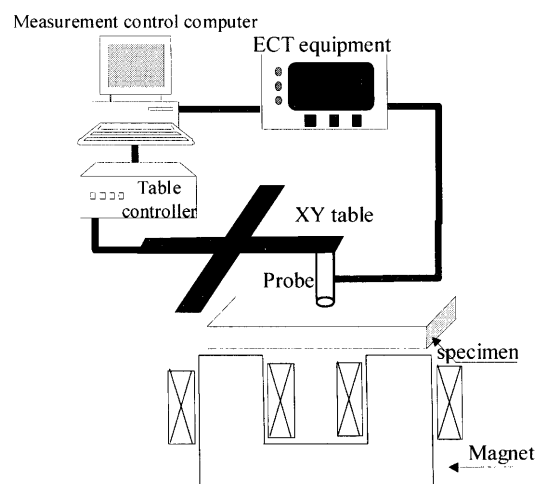
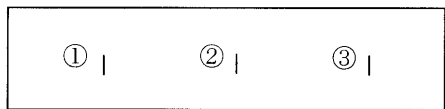


Fig. 1. Experiment system.



Crack①: 1 mm l × 0.1 mm w × 0.05 mm d
 Crack②: 1 mm l × 0.1 mm w × 0.1 mm d
 Crack③: 3 mm l × 0.2 mm w × 0.2 mm d

Fig. 2. Specimen and shape of cracks.

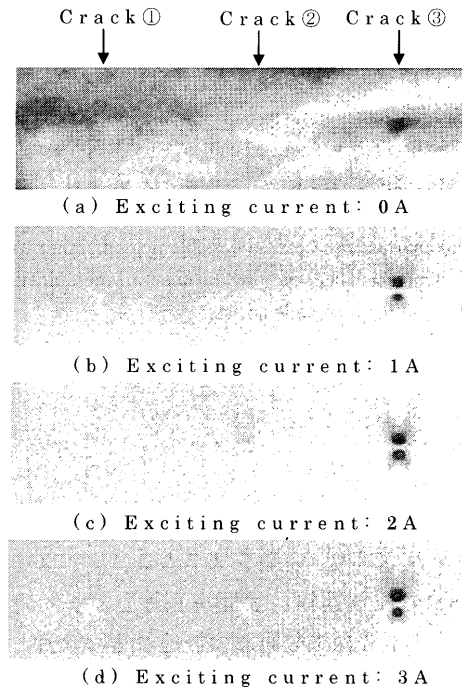


Fig. 3. ECT 2-D measurement results.

フを0.5 mmとして試験を行った。

3. 実験結果

作成した試験片について、きずの検出特性を測定した実験結果を Fig. 3 に示す。測定範囲は三つのきずをカバーする 20 mm × 80 mm の領域で、測定のピッチは 0.5 mm である。この結果からわかるように直流励磁を加えないときは磁気ノイズが大きく、最も大きい長さ 3 mm のきず以外の信号は検出されない。励磁なしでは、圧延の影響と思われる全体的に変化のあるノイズも見られた。しかし、直流励磁を上げていくと磁気ノイズが減り、きず信号も大きくなり十分な S/N 比ですべてのきずが検出できることがわかる。

Fig. 4 は各励磁条件における、信号のピーク点を結ぶライン上での信号強度を示す。図 (a) に示す励磁を加えないときは、全体に大きな変化のあるノイズと局所的なノイズが大きく、最大の 3 mm のきずにおいても十分な S/N 比を得られないことが分かる。実用的にはフィルター等を用いることにより 3 mm のきずは検出できるが、それより小さなきずは全く検出されない。1 A の励磁を加えるだけで大きな変化のノイズは急激に減衰し、きず②および③の二つ

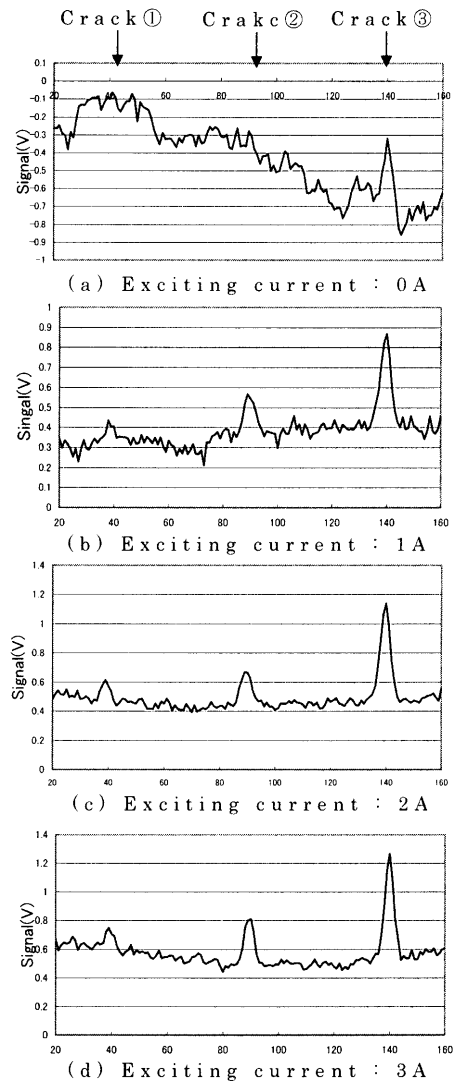


Fig. 4. Signal on cracks search line.

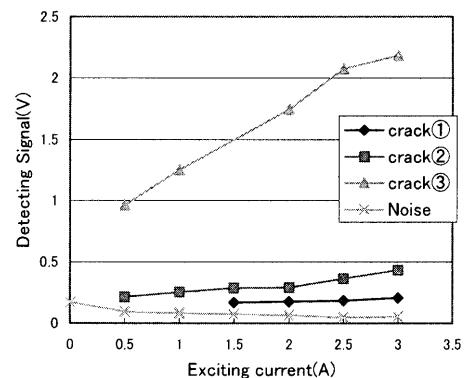


Fig. 5. Exciting current vs. detecting signal (testing frequency: 100 kHz).

のきず検出信号は S/N 比が 2 以上になる。さらに 2 A 以上の励磁を加えるともっとも小さなきずでも S/N 比が 2 以上となる。

Fig. 5 に励磁電流に対する信号およびノイズの検出信号の強度を示す。この図からわかるように、最も大きいきずの検出信号は励磁電流が増えるに従い大きくなり、磁化電

流が2.5Aを超えると飽和する傾向が見られた。また、①と②のきずについても磁化を大きくすることにより検出信号が大きくなることがわかる。図中で各きずの検出信号強度をプロットしていない点があるのは、十分なS/N比が得られず信号強度が判別できないためである。深いきずほど励磁の増加により信号がより大きくなる傾向が見られた。

一方、ノイズ信号は励磁電流を上げることによりより減少する。このため励磁電流を上げるとS/N比は明らかに向上することがわかる。励磁電流1.5Aでは、3種類のきず全てがS/N比2以上で検出できることが確認できた。

4. 磁化渦電流探傷試験の数値解析法の検討

磁化渦電流探傷法は、直流磁化下における微小な交流磁界による渦電流場の解析が必要となる。しかし、直流磁化と渦電流探傷における高周波数の交流磁場を重ね合わせた磁界を数値解析で直接解くことは現状では困難である。これは一つに、静磁界が加わっているときの交流磁界による磁気特性を定義することが困難であること、もう一つはマイナーループも含めた解析が必要となり解析精度が保障されないためである。そこで本報では、非線形静磁界解析によって板内の磁束密度を求め、その後磁束密度に対応した透磁率を考慮した線形交流渦電流解析を行う二段階の解析手法をとる。この数値解析手法を Fig. 6 に示す。用いた解析の一連の流れを以下に説明する。最初に直流励磁における非線形静磁界解析による鋼板内の磁束密度を求める。非線形静磁界解析により求められた直流励磁による鋼板内の磁束密度に相当する交流透磁率を鋼板内に割り当てる。次に、これを使って線形交流渦電流解析を行い、渦電流探傷法で測定されるきず直上の空間の磁束密度分布を求める。

ここで用いた交流透磁率は以下のようにして求めた。熱延試験片と同じ材料で1.6mmφに放電加工により切り出した長さ50mmの円柱試験片の全長に励磁コイルおよび、そのコイルの内側の中央に検出コイルを設けた。励磁コイルは1200ターン、検出コイルは100ターンである。各直流励磁電流における検出コイルのインピーダンスをLCRメータを用いて計測した。実験と同じモデルで透磁率をパラメータにした軸対称数値解析で求めたインピーダンスと実験結果を比較して、各直流励磁下における微小変動磁界に対する交流透磁率を求めた。

実験に用いたモデルは Fig. 1 に示すように、磁化ヨーク、励磁コイルおよび微小なきずを含む試験片から成り立っている。この実験体系のフルモデルについて有限要素法による要素分割を試みたが、実用的に計算処理できる要素分割数では微小なきずを含む渦電流の解析は困難であった。なぜなら、きずが極めて小さくこのために要素分割数が増すこと、さらに表皮効果を考慮するため板およびきずの表面の要素を小さな要素でかつ複数層の分割が必要となるため

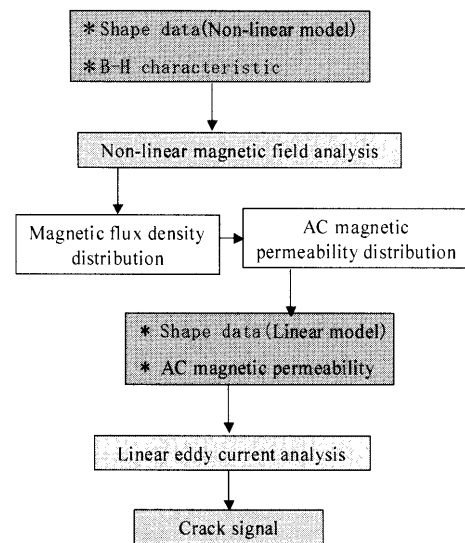


Fig. 6. Flow chart of numerical analysis method magnetized ECT.

である。このため直接フルモデルの要素分割を行い、精度よく解析することは計算機の能力を考慮すれば現実的ではない。

そこで本解析では、二段階の解析手法に対応して二つの有限要素解析モデルを検討した。一つは、磁化したときの板内の磁束密度を評価するために、板の上下にコイルを設けた非線形静磁界解析のための有限要素解析モデルである。対称条件を用いて1/4分割し、磁束に垂直方向には一様に磁束が加わるとして、きず長さより十分大きな領域で自然境界条件を設定した。板厚方向には、き裂近傍の磁束の変化が精度良く解析できるように細かく分割した。この要素分割を Fig. 7 に示す。

二つ目は、線形交流渦電流解析を行うための有限要素解析モデルで、実験に用いている周波数における表皮効果を考慮して表面近傍は十分に細かく分割した。この要素分割を Fig. 8 に示す。

解析結果を以下に示す。Fig. 9 は励磁電流1.5A時のきず①およびきず③のきず中心位置における垂直断面の磁束密度分布を示す。きずから離れた板内の領域ではほぼ磁気飽和領域であり、約1.7Tの磁束密度となっている。きずが存在すると、きずにより磁束の流れが制限されるため、磁束がきずを避けるように流れる。そのとき、きずの両側では磁束密度の低い領域が生じていることがわかる。これは大きなきずになるほど顕著になる。

次に Fig. 6 に示すように、解析結果の板内の磁束密度に対応する交流の透磁率を求める。きずより離れた位置では磁気飽和領域であるため交流透磁率が低いのにに対し、きずの両サイドでは磁束密度が低いため大きな交流透磁率の領域が存在することになる。このように交流透磁率を与え直した有限要素解析モデルを用いて線形渦電流解析を行った。この解析結果を Fig. 10 に示す。この図は、きずを上

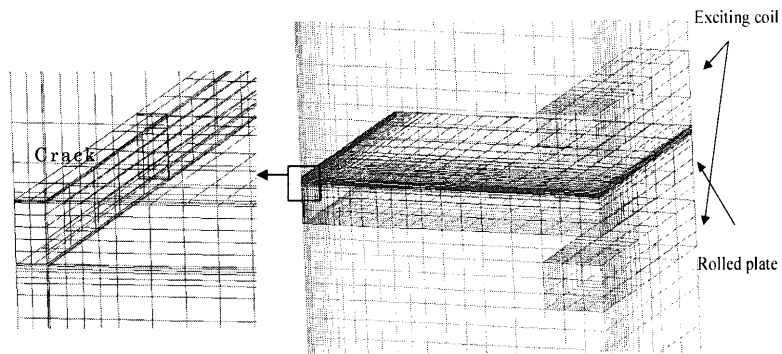


Fig. 7. Non-linear magnetic field analysis model.

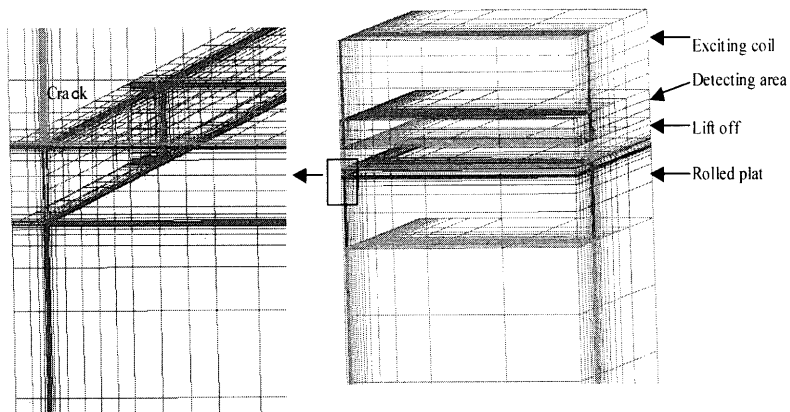


Fig. 8. Linear eddy current analysis model.

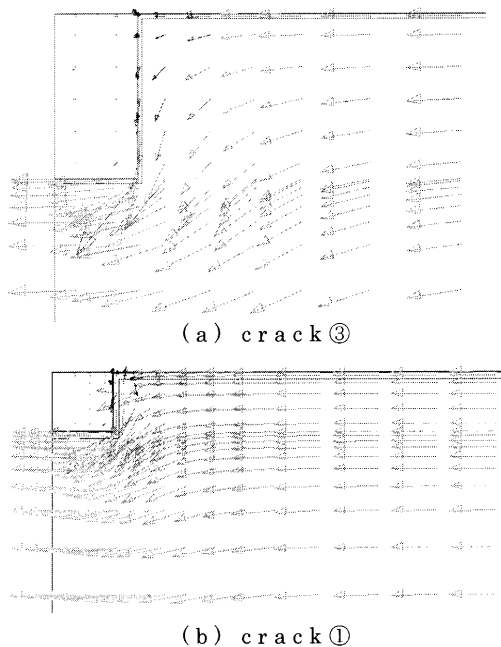


Fig. 9. Magnetic flux density in a steel plate (display of perpendicular section crack).

から見たときの鋼板上面の渦電流分布を示している。右上にきずが存在し、そのきずを避けるように渦電流が流れている様子が見られる。この渦電流の回転により板に垂直方向に磁束が発生する。この磁束をプローブの検出コイルが計測する。検出コイルが移動する板上面の磁束密度（垂直

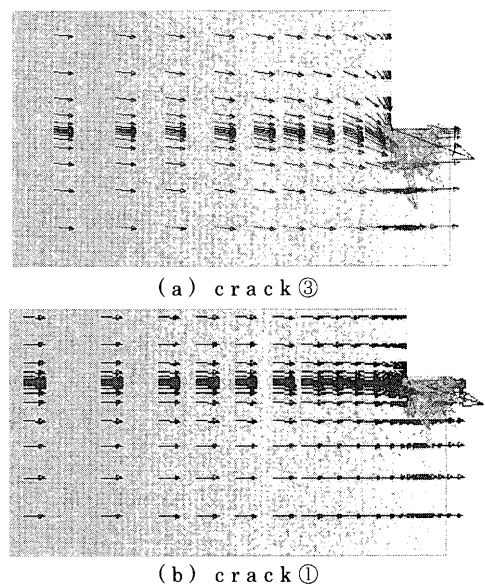


Fig. 10. Eddy current distribution (display of surface in steel plate of crack outskirts).

成分) を Fig.11 に示す。この結果、きずの端の位置でピークの磁束密度を検出することがわかる。これは実験結果をよく説明している。

このピーク値を各きずについてまとめた結果を Fig.12 に示す。この結果、きずの断面積が大きいほど検出信号が大きく、かつ励磁電流を大きくするに従いその検出信号が増

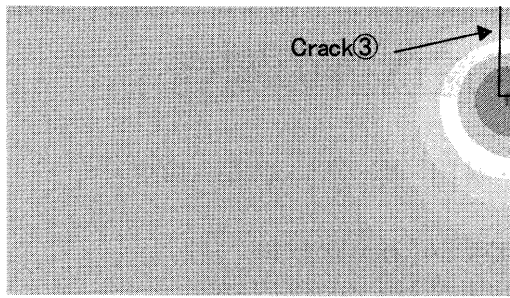


Fig. 11. ECT detecting signal (magnetic density distribution over surface of crack).

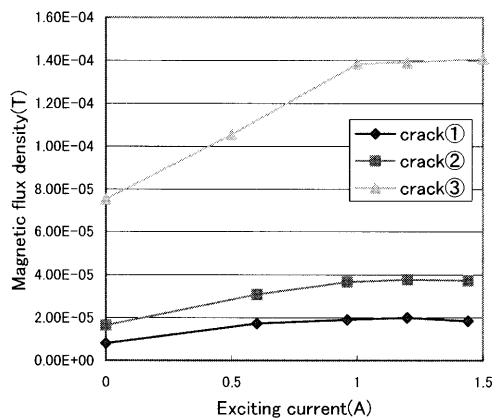


Fig. 12. Characteristic of exciting current and detecting signal by numerical analysis.

加している。実験と同様に直流励磁を増すと検出信号も飽和した。励磁により検出信号が増すのは、渦電流探傷試験がきずだけでなく透磁率の変化も検出するため、きずの検出を容易にすることが解析結果から理解できた。

次に生産ラインで生じるきずの評価を行った。ブリキ板に生じるきずの報告例⁴⁾から、生産ラインで生じるきずの一つの例として長さ：1mm、幅：0.05mm、深さ：0.01mmとした。このきずの形状は圧延されるため、板に平行に表面または、表面から0.01mm下に存在することも考えられる。これらのきずは板に平行に存在するため渦電流探傷試験では、渦電流を遮らない形状であり、原理上検出にくい形状と言える。この表面きずと表面から0.01mm下にあるきずについて解析した。この解析結果と、実験によるノイズを合わせてプロットした結果を Fig.13 に示す。この図では、ブリキ材を磁化しノイズを測定し、それを解析値に規格して表示した。この図から、表面きずは磁化することにより測定が可能であるが、表面から0.01mm下に存在すると測定が難しいことがわかる。この解析例のように数値解析を用いると、表面下のきずのように試験片を作成できないきずや、S/N比が1以下で実験では計測できないき

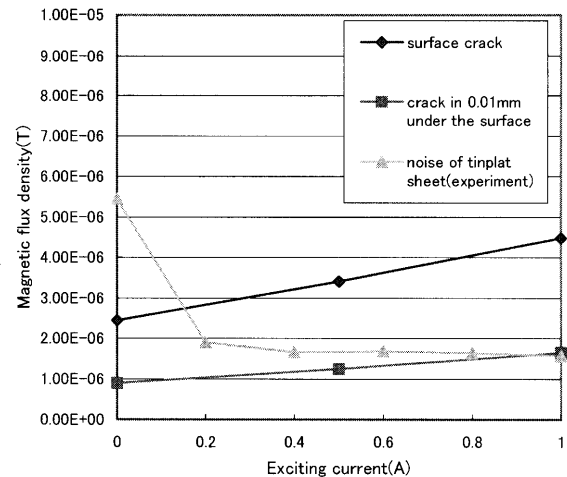


Fig. 13. Detecting characteristic of small crack.

ず信号も評価できることが確認できた。さらに実際の生産ラインで生じるきずの形状を明らかにし、その解析モデルを作成することにより、より微小なきずの検出特性の評価、検出法の改善等にこの数値解析法は有用と考えられる。

5. まとめ

鉄鋼製品の表面検査に用いる渦電流探傷法について、非線形静磁界解析と線形渦電流解析を組み合わせた微小きずの三次元数値解析法を検討した。その結果、磁化することによりS/Nが改善することは知られていたが、この数値解析法により、定量的に評価することができた。直流磁化を加えることにより、きず近傍に微分透磁率の高い領域が残存するため、きずの検出信号は大きくなることを確認した。この解析結果は実験結果をよく説明し解析法の検証ができた。今後、生産ラインで生じるきずの性状と各材料のノイズ特性を明らかにしていくことにより、きずの評価法の検討、本解析法はより精度の高い検査プローブの開発等のためのシミュレーションツールとしての利用が期待できる。

本研究は、日本鉄鋼協会「内部欠陥検出の高精度化研究会」で行い、試験片の提供等の協力を受けて行った。ここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) K.Oosima and M.Hashimoto: *J. Jpn. Soc. AEM*, **10** (2002), 384.
- 2) M.Hashimoto, D.Kosaka, K.Oosima and Y.Nagata: *Int. J. Appl. Electromagn.*, **15** (2001/2002), 27.
- 3) Y.Goto and M.Hashimoto: *Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn. A*, **117-A** (1997), 761.
- 4) K.Iwanaga, K.Maeda, A.Nagamune, M.Yasuhisa, H.Katou and J. Shitsuji: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1036.