

静磁界及び微小交流磁界を併用した 鋼板肉厚測定法の三次元非線形磁界解析評価

Examination of 3-D nonlinear FEM for thickness on steel plate
using static magnetic field and minute alternating electromagnetic field

大分大学大学院 徳本貴則 Takanori TOKUMOTO
大分大学工学部 小野田二千翔 Nichika ONODA
大分大学工学部 後藤雄治 Yuji GOTOH

The inspection of the defect in the steel wall of the oil tank in the petrochemical plant etc. is important for the safe maintenance. In this paper, the electromagnetic inspection method using a dc magnetic field and a minute ac magnetic field is proposed. Generally, in the steel, the relative permeability is not unity. Therefore, the technique for reducing the effect of the nonuniformity of the permeability in the steel, and measuring the opposite side defect on the steel wall is examined using 3D nonlinear FEM.

Keywords: 3-D nonlinear FEM, opposite side defect in steel plate, minor loop

1. 緒言

鉄鋼材料は初透磁率の不均一性が存在するため、微小交流磁界を使用する渦電流探傷試験法(ECT)では、検出の際の測定信号に μ ノイズが発生し、欠陥による信号を明確に得られない場合がある。また ECT は交流磁界を使用するため、表皮効果の影響により表面探傷に限定される。

鋼材内の初透磁率の不均一性を除去した上で、欠陥や肉厚を検出する方法には様々な手法が提案されているが、代表的な手法の一つに大きな直流磁界と ECT を併用した検査法(以下、直流磁化 ECT と定義する)がある。この直流磁化 ECT は、検査鋼板表面から大きな直流磁界を加えて、初透磁率の不均一性を低減させた上で ECT を適用し、裏面欠陥や肉厚測定を行う検査法である。

本研究では、検査鋼板のヒステリシス曲線を使用して、線形補間からマイナーループを求める三次元交流非線形渦電流解析法の開発を行い、実現場で使用されている検査装置(SLOFEC)の現象解明解析を行ったので報告する。

連絡先:後藤雄治、〒870-1192 大分市且野原 700、
大分大学工学部機械・エネルギーシステム工学科、
電話:097-554-7795
e-mail: goto-yuuji@cc.oita-u.ac.jp

2. 解析モデルと条件

2.1 検討モデル

ここでは実現場で使用されている検査装置と同様のモデルを使用して解析を行った。検査装置の解析モデル概要図を Fig.1、各寸法を Fig.2 にそれぞれ示す。これは検査鋼材(SS400)表面から直流磁化器によって直流磁界を印加し、さらに差動型 ECT コイルで微小交流磁界を印加して裏面欠陥を検出するモデルである。またリフトオフ(検査鋼材との距離)は直流磁化器では 5mm、差動型 ECT コイルは 6mm に設定している。鋼板の裏面欠陥の寸法は幅(X方向)=9mm、奥行き(Y方向)=9mm、深さ(Z方向)=1.8mm である。これら解析条件をまとめて Table.1 に示す。

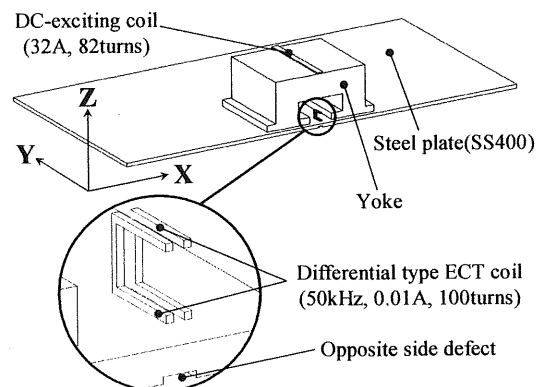


Fig.1 Inspection model (1/2 domain)

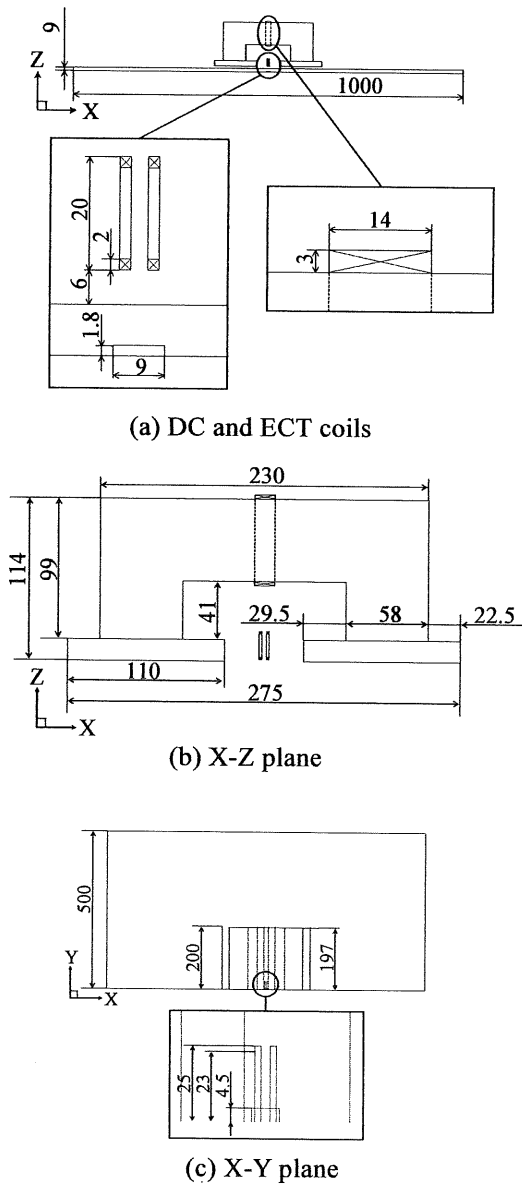


Fig.2 Size of inspection model (unit:mm)

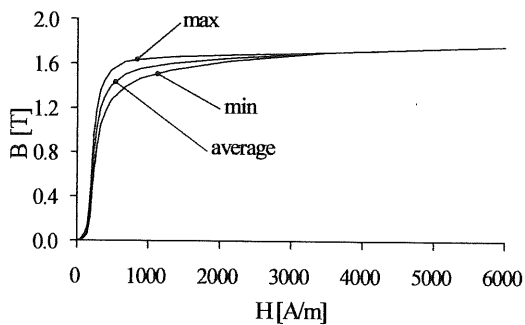


Fig.3 Magnetization curves (SS400)

Table.1 Conditions of numerical calculation

Magnetization condition	DC-exciting coil	1~32A(82Turns)
	ECT-coils	0.01A, 100Turns, 50kHz
Lift off	Static magnet yoke	5mm
	ECT-coils	6mm
Size of opposite side defect	Length (X direction) = 9mm Width (Y direction) = 9mm Depth (Z direction) = 1.8mm	
Steel plate (SS400)	Length (X direction) = 1000mm Width (Y direction) = 1000mm Depth (Z direction) = 9mm $\sigma=7.51 \times 10^6 \text{S/m}$	

2. 2 透磁率の不均一性の考慮法

検査に使用した鋼板(SS400)の B-H 曲線を Fig.3 に示す。図は $\phi 9$ で長さが 100mm の棒状の鋼材(SS400)を電磁石にはさみ、測定位置を様々に変えて各位置における B-H 曲線を測定した結果を示している。解析では鋼板メッシュ分割内に、Fig.3 の範囲でばらつく B-H 曲線を 47 本作成し、正規乱数を発生させ、ランダムに各要素内に B-H 曲線を配置して非線形計算を行った。

3. 三次元非線形磁界解析

3. 1 直流磁界解析

直流励磁電流を様々に変化させた場合の直流磁束密度の解析結果を Fig.4 にそれぞれ示す。これは裏面欠陥が存在しない時を示している。Fig.4 から、直流磁化電流が増すにつれて、鋼材内部の磁束密度の不均一性は低減されることが分かる。このモデルでは直流励磁電流を 32A 程度まで上げると磁束密度の不均一性は無くなることが分かった。これらの図から 32A 程度であれば探傷を行う際の μ ノイズを減らすことが可能だと考えられる。

Fig.5 に裏面欠陥が有る場合と無い場合の欠陥近傍における直流磁束密度のベクトル分布を示す。図から裏面欠陥が存在する場合は直流磁束密度が欠陥を迂回するため、鋼板内部表層に直流磁束密

度が集中していることが分かる。これに対し裏面欠陥が存在しない場合、直流磁束密度は鋼板内部を一様に分布して通過する。つまり、裏面欠陥が存在する時と存在しない時では鋼板内部表層の直流磁束密度の値に差が発生することが理解できる。

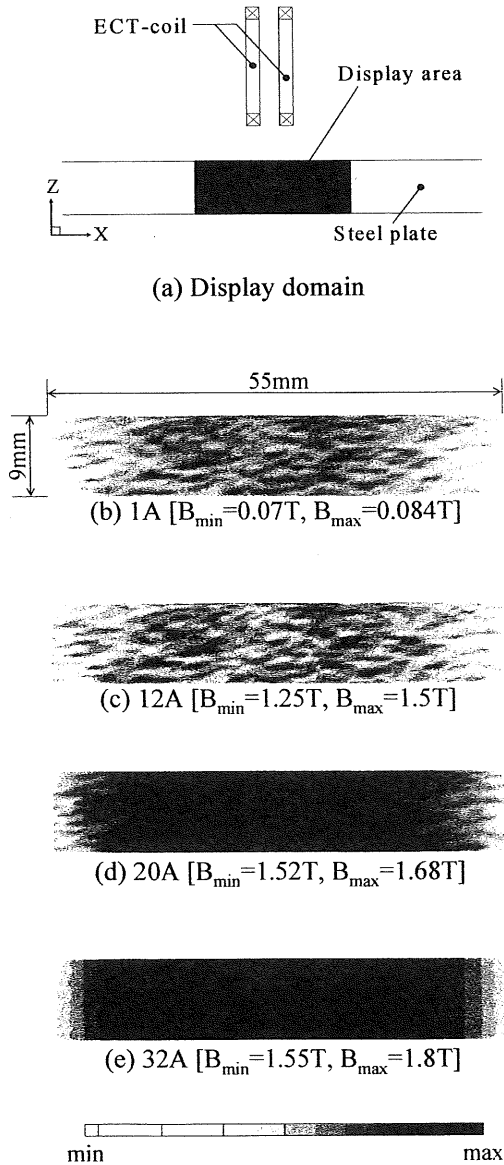
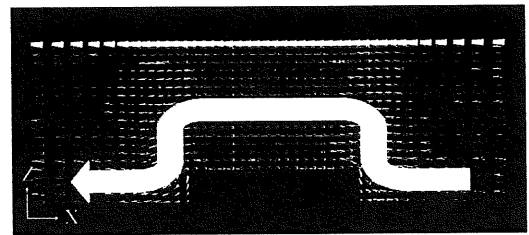
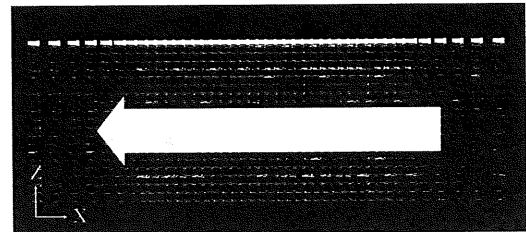


Fig.4 Distribution of direct current magnetic flux density

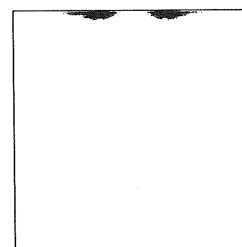
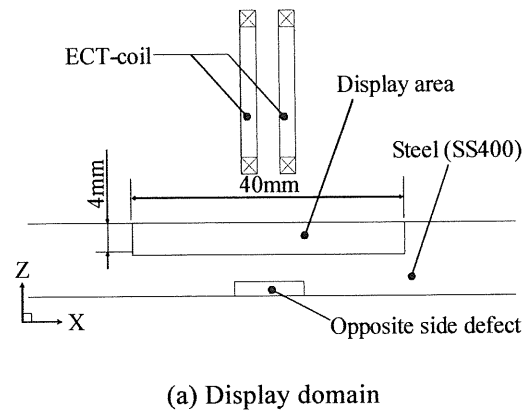


(a) With opposite side defect
($B_{\max}=1.88\text{T}$)

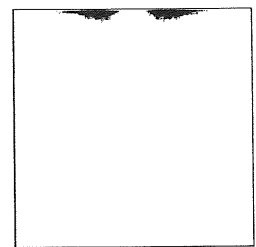


(b) Without opposite side defect
($B_{\max}=1.80\text{T}$)

Fig.5 Distribution of static magnetic flux density in steel plate (DC:32A)



(b) Without defect
($B_{\max}=8.0 \times 10^{-4}\text{T}$)



(c) With defect
($B_{\max}=7.0 \times 10^{-4}\text{T}$)

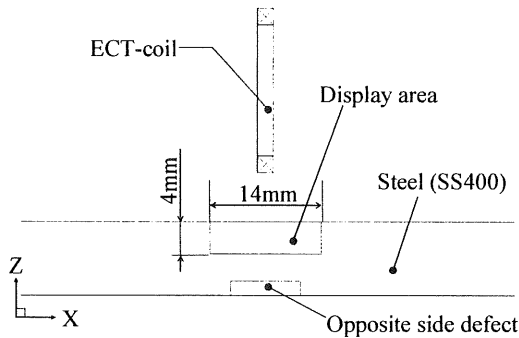
0 0.8 B[mT]

Fig.6 Distribution of minute alternating magnetic field in steel (differential coil, 50kHz, 0.01A)

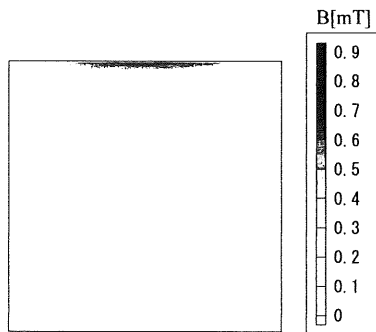
3. 2 微小交流磁界解析

ここでは、直流励磁電流を 32A 一定とし、透磁率の不均一性をおさえた上で、差動型 ECT コイルで微小交流磁界を加えた際の解析を行った。微小交流磁界は差動型 ECT コイルで発生し、磁化条件は 50kHz (0.01A) とした。この時に得られる各 ECT コイル真下の鋼板内部に生じるマイナーループの最大値と最小値の差をとった磁束密度分布(交流磁束密度分布)を裏面欠陥の有無別に Fig.6 に示す。

Fig.6 から裏面欠陥が存在する場合と存在しない場合では、最大磁束密度の値に差がみられる。これは欠陥が有る時と無い時の鋼板内部表層の直流磁束密度差によって生じることが考えられる。また、図から微小交流磁界は鋼板表層のみに分布し、鋼板の裏面までは到達していないことが理解できる。つまり、直流磁化 ECT では鋼板内部表層に分布する、直流磁束密度の差を ECT コイルで検出していると考えられる。



(a) Display domain



(b) With opposite side defect

Fig.7 Distribution of minute alternating magnetic field (single coil, 50kHz, 0.01A)

3. 3 裏面欠陥の探傷

ここでは現象理解を容易にするため、ECT コイルは 1 個とし、裏面欠陥の有無によるインピーダンスの変化を検討した。なお、ECT コイルの励磁条件は 50kHz, 0.01A としている。Fig.7 に裏面欠陥が存在する場合の鋼材内部の交流磁束密度分布を示し、Fig.8 に ECT コイルの場所を移動させた時のコイル内部のインピーダンスの値をそれぞれ示している。Fig.7 から ECT コイルが一個の場合でも交流磁束密度が鋼板表層に集中していることが確認できる。また Fig.8 より、裏面欠陥の有無によってコイル内部のインピーダンスの値が変化することがわかる。この結果からも、直流磁化 ECT における微小交流磁界は直流磁束密度差によって欠陥探傷を行っていることが分かる。

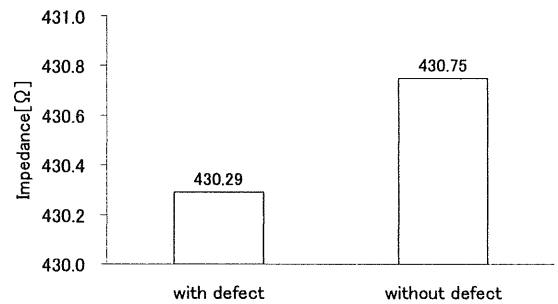


Fig.8 Impedance in ECT coil

4. 結言

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 直流磁化電流を約 32A まで増加することにより鋼材内部の μ ノイズを除去できる。
- (2) 微小交流磁界は鋼材表層のみに分布する。直流磁化 ECT における交流磁界は、鋼板表層の直流磁束密度差により欠陥を検出している。

参考文献

- [1] 徳本貴則、後藤雄治：直流および微小交流磁場を併用した鋼板肉厚検査手法の数値解析評価、(社)日本非破壊検査協会、表面探傷分科会、資料 No.30264、pp.5-8、2007