



直流磁化併用パルス渦電流試験による 二重構造鋼材の裏面減肉検出

Detecting Thinning on Back Surface of Double Structure of Steel
by Pulsed Eddy Current Testing with DC magnetization

職業能力開発総合大学校 (現 アイオワ州立大学)	小坂 大吾	Daigo KOSAKA	Member
職業能力開発総合大学校 (現 株式会社 日立パワーソリューションズ)	坂根 尚武	Shobu SAKANE	Non Member
職業能力開発総合大学校	橋本 光男	Mitsuo HASHIMOTO	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	長沼潤一郎	Junichiro NAGANUMA	Member

This paper aims at detecting thinning of the back surface of a steel double sided structure. Our proposed technique is characterized by using pulsed eddy current testing with DC magnetization. When a double structural steel is magnetized by DC current, flux leakage is generated as a result of thinning on the back surface. We have shown by the use of simulations that the permeability of the top plate has changed with flux leakage from the back plate. The steel plate without thinning and the steel plate with a thinning on the back surface were used. The thinning region on the second plate was a smooth surface in the shape of an ellipse. Experimental results have shown that we were able to detect a thinning on a back surface of double stacked plates by pulsed eddy current testing. Results have also shown that the changes in the permeability of the top plate were a result of magnetization, which was detectable with pulsed eddy current testing. From the simulations and experimental work we conclude that our proposed technique is effective for detecting a thinning of Double Structure of Steel.

Keywords: Thinning detection, Steel, DC magnetization, Eddy current testing, Pulse induction

1. 緒言

鋼材構造物の健全性を担保するためその厚さ管理が行われており、一般的に超音波厚さ計を用いた手法が使われている。一方で、隙間に気体層がある二重構造の場合においては、気体層を超音波が透過しないため、超音波厚さ計で直接測定することができない。二重構造の上下鋼材の寸法が異なり、上板が小さい場合には上板の外側から下板に超音波を入射し、多重反射させることで、下板の厚さを測定する手法が試みられている[1]。しかし、上下鋼材の寸法が同じく下板に超音波センサを設置できない場合には、適用できない。

非破壊検査手法の一つとして渦電流試験がある。非接触で導電体の材質やきず形状を透磁率や導電率の変化として測定することができる手法である。その一つに高リフトオフや深部の探傷に用いられるパルス渦電流試験がある[2]。この手法は励磁コイルに一時的に大電流を流すことでセンサのジュール熱による破損を防ぎつつ信号強度を増加させることができ、さらに励磁波形に広い周波

数帯が含まれていること[3][4]により試験体表面から深部の情報を一度の測定で得ることができる[5]。アルミ合金の積層板[6]や鋼材のきず検出、厚さ測定[7][8]、保温材下の配管腐食の検出[9]などの適用例が報告されている。また、渦電流試験と磁化を組み合わせた減肉検出手法として Saturated Low Frequency Eddy Current 法[10]が実用化されている。

本研究では、直流磁化を併用したパルス渦電流試験によって二重構造鋼材の下板裏面の減肉の検出手法を提案する。まず、十分な磁化力を持った磁化器で鋼材全体を直流磁化する。これにより、二重構造鋼材の下板から減肉によって漏洩する磁束が上板に浸透し、下板の減肉の直上に位置する上板部分の透磁率が変化する。次に、この上板表層の透磁率の変化を渦電流試験で測定することで、下板裏面の減肉を検出する。この手法は、上板を集磁鋼として用いることで、下板裏面の情報を間接的に取得する手法である。

本研究では最初に、有限要素法による非線形静磁界解析を用いて本手法の検出原理の確認とターゲットとする試験体形状に必要な磁化力を推定した。次に、推定した磁化力による直流磁化とパルス渦電流試験によって二重構造鋼材の下板の減肉の検出を試みた。これにより、提案する手法の有用性を示す。

連絡先: 橋本光男
職業能力開発総合大学校
〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
E-mail: hasimoto@uitech.ac.jp

2. 二重構造鋼材の直流磁化分布

2.1 解析条件

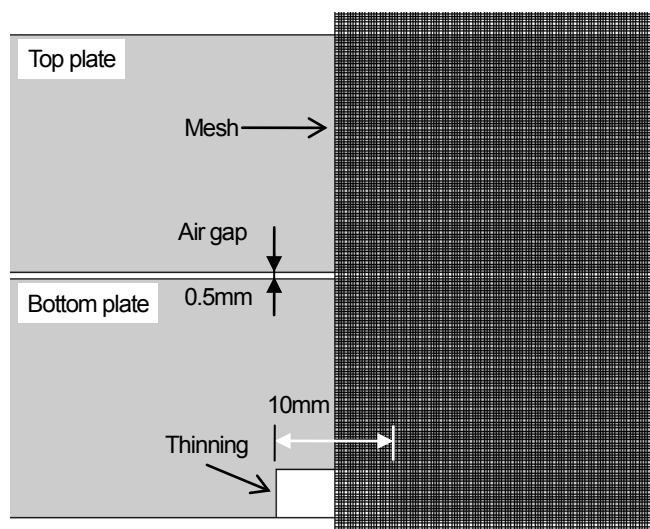
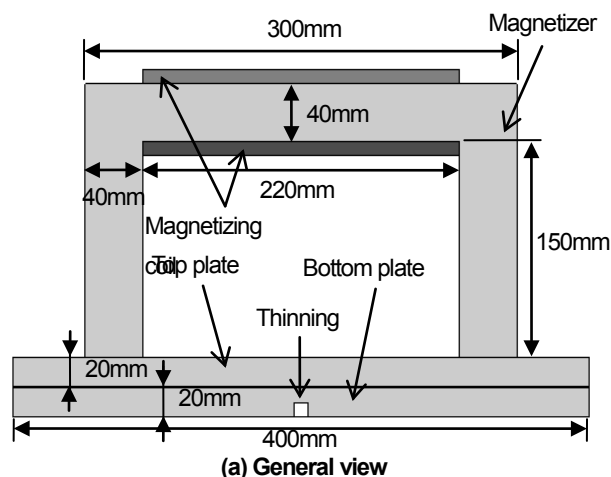
本研究の対象は三次元で表現される部分減肉である。しかし減肉を二次元で近似することにより計算コストが減少し、減肉の奥行き以外のパラメータをより詳細に評価することができる。本稿では多くのパラメータで解析を行うことで検出原理を明らかにすることを優先し二次元での解析を試みた。但し、奥行き方向の磁束の変化は考慮されないため、三次元の部分減肉に対して減肉の影響が過大評価されることは留意する必要がある。

二次元静磁界解析において磁気ベクトルポテンシャル A を変数とする A 法は一般的な手法である。本研究の対象は圧延鋼材であるため透磁率は磁界、磁束密度に対して非線形である。よって A の変数である透磁率を非線形で解く。透磁率は磁界に対してヒステリシスを有するが、本測定法において試験体は比較的強く磁化されるため、初期磁化曲線のみを考慮した解析でも参考になる結果が得られると考えた。したがって、試験体内の磁化状態を可視化するに当たり、初期磁化曲線を用いた A 法による二次元非線形静磁界有限要素法によるシミュレータ[11]を用いた。

解析に用いた二次元モデル及びメッシュ分割を Fig. 1 に示す。シミュレーションモデルは磁化器とその励磁コイル及び二枚の鋼材で構成されている。磁化器と二枚の鋼材は圧延鋼材を想定し同一の初期磁化曲線を用いた。その初期磁化曲線を Fig. 2 に示す。Fig. 1(a)に示すように試験体である二枚の鋼材は幅 400mm、厚さ 20mm の同一形状の平板である。下板の裏面に矩形形状の模擬減肉を有しており、減肉深さは 1mm から 20mm まで可変した。減肉幅は 10mm とした。直流磁化器の外径は、幅 300mm、高さ 190mm、厚さ 40mm である。幅は下板まで磁束が十分に浸透するよう磁極間の距離が試験体の厚さ以上になるよう設定した。高さは上板の透磁率変化をとらえるセンサを走査するための空間を確保するよう設定した。検出原理を明確にするために上板と下板の隙間は Fig. 1(b)に示すように 0.5mm 一定とした。メッシュはすべての要素を $0.25\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ の正方形とした。減肉を中央に配置することでモデルを左右対称とすることができる。これを利用し実際の解析は右半分のみで行った。

2.2 磁束密度分布

磁化器の起磁力を 4000A、減肉なしとした時の試験体内部の磁束密度と比透磁率を可視化した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)より、試験体中央の上板、下板共に 1.6T か



(b) Enlarged view
Fig. 1 Simulation model

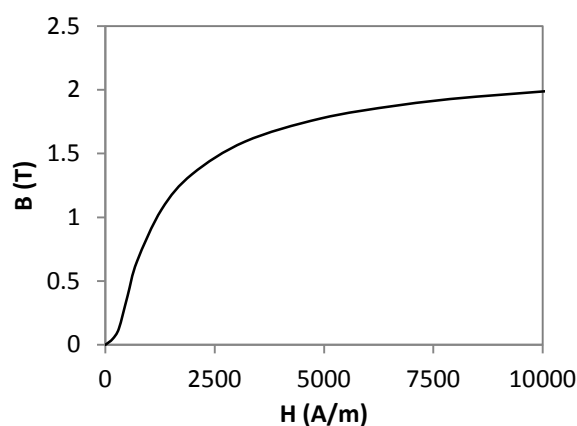


Fig. 2 Initial magnetization curves of rolled steel

ら 1.7T に磁化されていることが確認できる。初期磁化曲線から求めたこの時の比透磁率分布を Fig. 3(b)に示す。試験体中央の広い範囲で磁化されている。これは、磁化器の磁極間の距離が試験体の厚さに対して十分に広いことによる。上板と下板で磁束密度、比透磁率の変化が連続していないのは、上板と下板の間に隙間が存在することによる。隙間が大きくなるとその磁気抵抗が大きくなり、

下板は磁化しにくくなることは容易に想像できる。次に、減肉深さを 10mm とした時の結果を Fig. 4 に示す。減肉直上の上板に磁束密度と比透磁率の変化が生じていることが確認できる。比透磁率の変化は上板表面にまで達している。また、減肉幅より広い範囲で生じている。これは、直流磁化であるから磁束が厚さ方向に広がることと、下板の磁束が減肉の手前から減肉を避けることによる。減肉が存在しない時と 10mm の減肉が存在するときの上板表面の比透磁率分布を Fig. 5 に示す。減肉が存在することで、減肉直上に周囲より比透磁率が小さい部分ができていることが確認できる。Fig. 5 の減肉深さ 10mm の解析結果において、減肉周辺の比透磁率の最大値 (Fig. 5 中の $\mu_r \text{ max}$) は 304、減肉中央 (Fig. 5 中の $\mu_r \text{ min}$) は 126 である。つまり、磁化と減肉の存在によって健全部に対する減肉部直上の透磁率が約 41% 変化している。直流磁化器の起磁力を 2000、4000、8000A とした時の上板表面の透磁率の比(減肉直上 (Fig. 5 中の $\mu_r \text{ min}$) / 周辺の最大値 (Fig. 5 中の $\mu_r \text{ max}$)) をプロットした図を Fig. 6 に示す。2000A では

減肉深さ約 10mm で、4000A では減肉深さ約 2mm で、8000A では減肉深さが 2mm で約 10% の比透磁率の変化が確認でき、起磁力によって検出可能な減肉形状が決定する。健全部に対して 10% の透磁率変化は、渦電流試験で検出可能な透磁率変化として期待できる。つまり、十分な直流磁化は鋼材裏面の減肉による磁束の変化によって鋼材表面の透磁率の変化を誘起すると言える。

一方で、実際の減肉形状は三次元であるから、より大きい起磁力が必要となると推測される。また、透磁率はテンソルであるので、この変化を効率的にとらえるには磁化の方向性を考慮する必要がある。

Fig. 7 に起磁力 4000A 時の上板直上の空気要素の垂直方向の磁束密度をプロットした結果を示す。減肉深さ 10mm の直上において、約 10mT の磁束密度変化が存在した。パルス ECT で試験体内部の透磁率変化を検出する以外にも漏洩磁束の測定による減肉検出の可能性を確認できた。

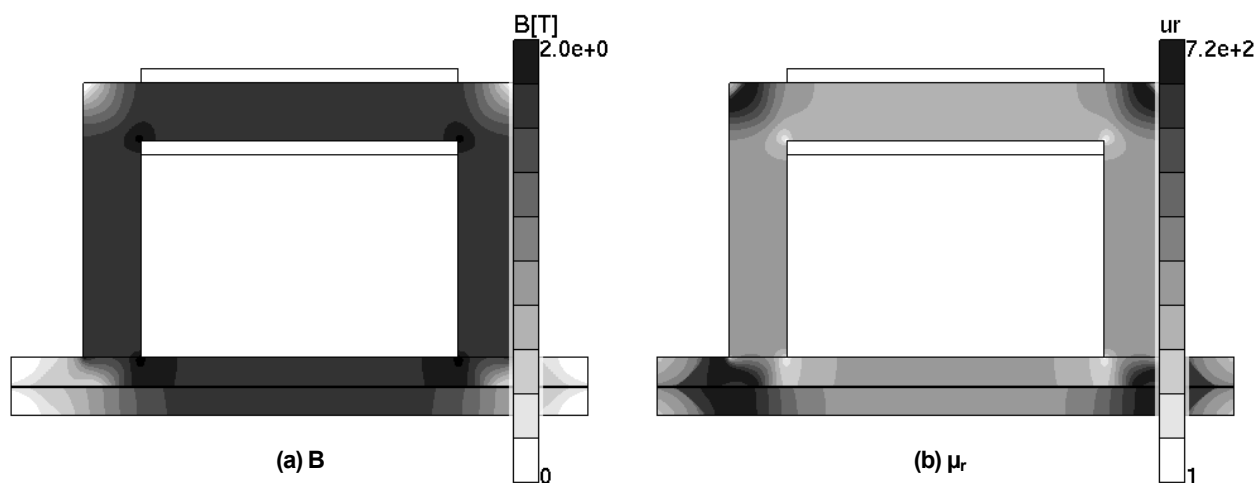


Fig. 3 Simulation results of DC magnetization without thinning (4000A)

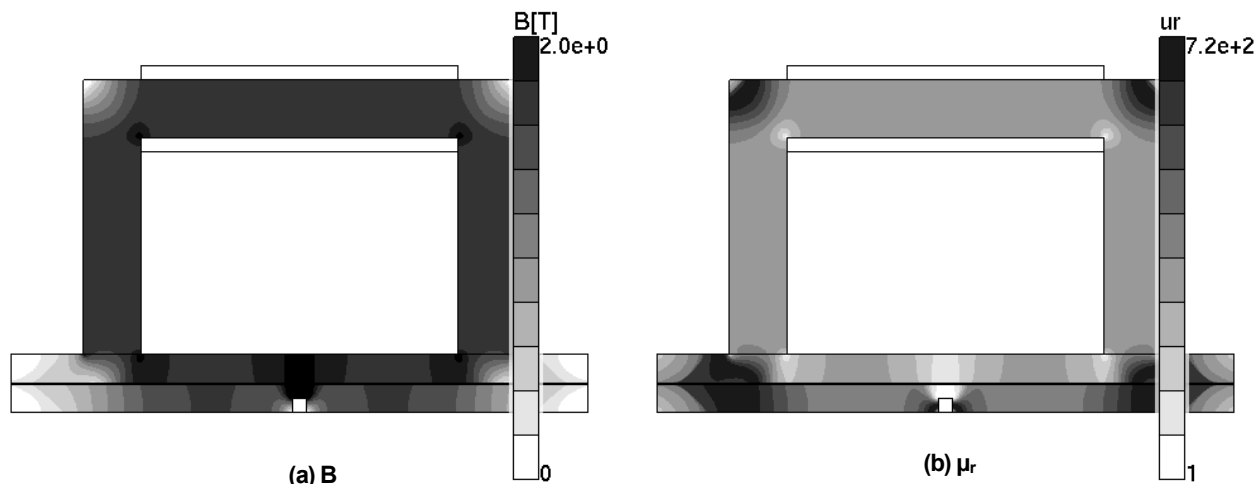


Fig. 4 Simulation results of DC magnetization with 10mm depth thinning (4000A)

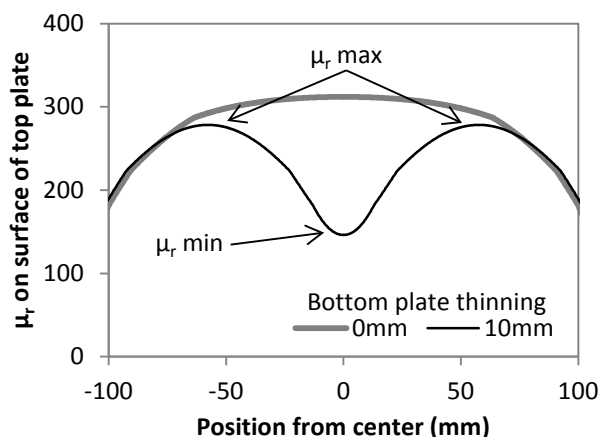


Fig. 5 Calculated μ_r on surface of top plate using simulation (4000A)

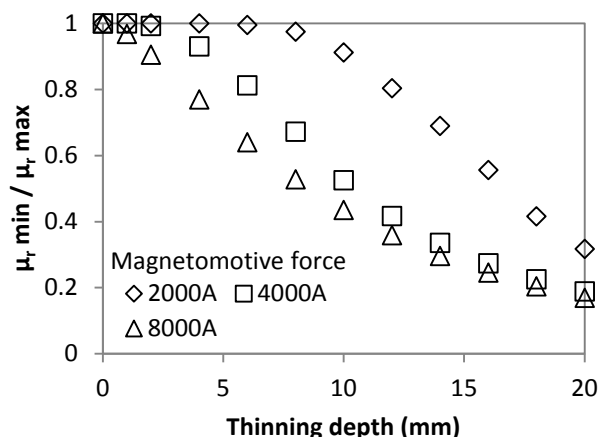


Fig. 6 Comparison between magnetomotive forces using simulation

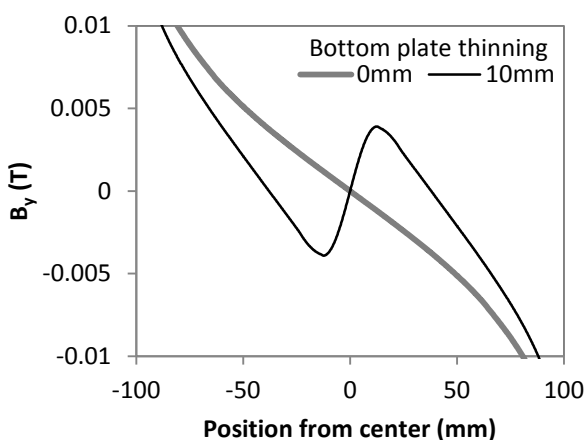


Fig. 7 Calculated leakage flux profiles on top plate using simulation (4000A)

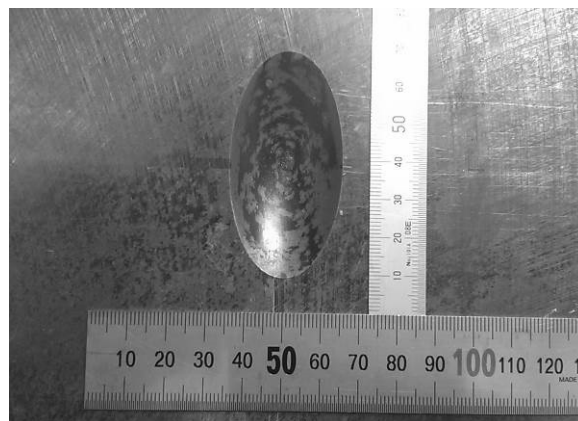


Fig. 8 Bottom view of specimen

3. 二重構造鋼材の裏面減肉診断

3.1 測定システム

数値解析は二次元で行っていることを考慮する必要があるが、重ねられた合計厚さ 40mm の鋼材の、深さ 4mm の裏面減肉を検出するには、数値解析で得られた結果(Fig. 6 参照)から 4000A 以上の起磁力が必要であると考えられる。そこで、Fig. 8 に示す減肉長さ 60mm 幅 30mm 最大深さ 5mm の楕円形の減肉を、4000A 前後の起磁力による直流磁化を併用したパルス ECT で検出することを試みた。

測定システムを Fig. 9 に示す。磁化器とパルス ECT センサで構成される。磁化器と試験体の形状は Fig. 1(a) に示す通りで奥行きは 400mm である。励磁コイルは 640 ターンである。励磁電流 6A で起磁力 3840A となる。他に、起磁力 2560A、5120A を用いた。検出には Fig. 10 に示すパルス ECT センサを用いた。パルス ECT センサはポットコア形のヨークの内部に、励磁コイルと検出コイルを入れたものである。このヨークが鋼材内に作る磁束の向きは磁化器の磁束とは一致しない。ゆえに磁化器の磁化の影響を効率的に捉えられない可能性があるが、磁束の範囲を限定することで減肉による部分的な透磁率変化を

捉えることを期待してポットコア形のヨークを採用した。ヨークの材質は 3%珪素鋼を用い、励磁コイルは 100 ターン、検出コイルは 480 ターンとした。パルス ECT の励磁には励磁時間設定用のワンショットマルチバイブレータと、励磁電流供給用の直流電源と FET を用いたスイッチ回路を用いた。励磁電流波形は 0.2A を 2 秒間通電する方形波のパルス波を用いた。検出には 40dB のプリアンプ、波形観測のためにオシロスコープを使用し、励磁電流 OFF 後の信号を 40dB 増幅した波形を観測した。Fig. 11 に示すように、パルス ECT センサを磁化器の内側に設置し、試験体表面の減肉部周辺で二次元走査(C scan)した。走査領域は 100mm×150mm である。

3.2 測定結果

磁化器の起磁力を 5120A とし、パルス ECT センサで健全部と減肉部直上で検出した波形を Fig. 12 に示す。横軸の時間 0s はパルス ECT センサの励磁電流を OFF した時間である。0.03s の前後で波形の性状が異なる。これは励磁電流を OFF した直後にプリアンプの入力に数百 V の電圧が入力されることで保護回路が働いたことによる。したがって 0.03s 以前は測定に用いることができない。0.04s

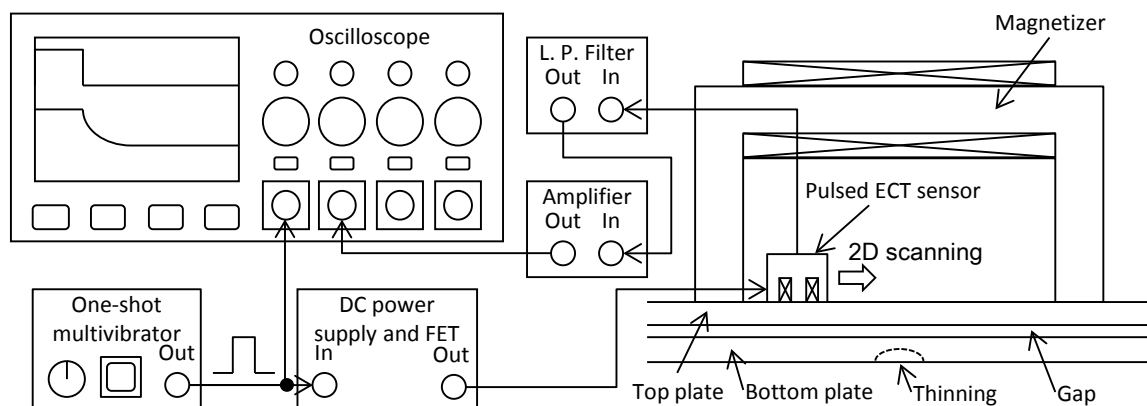


Fig. 9 Experimental setup

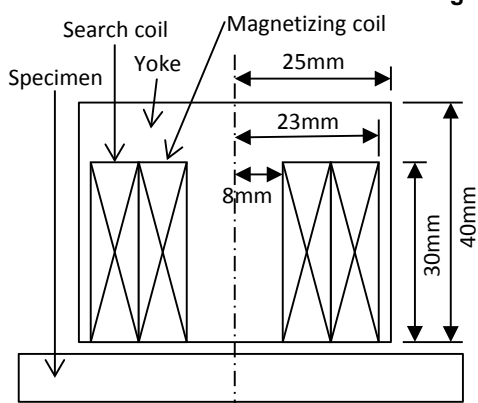


Fig. 10 Pulsed ECT sensor using pot core yoke

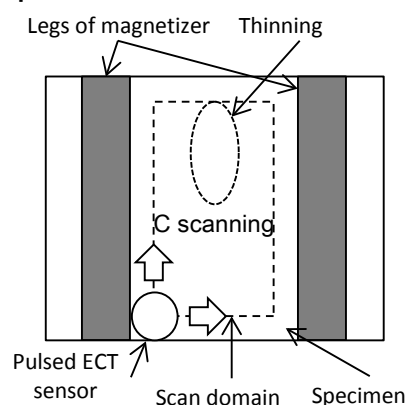
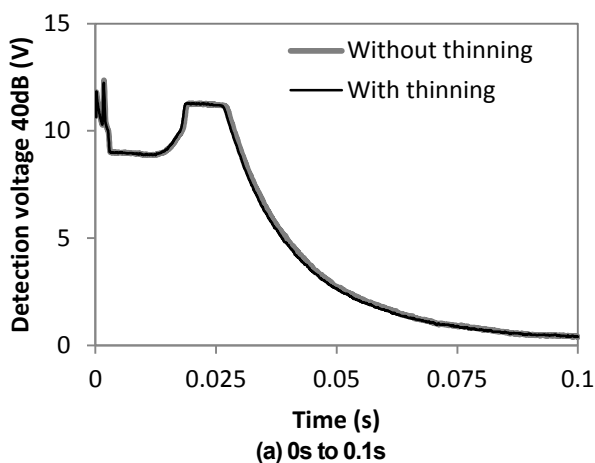
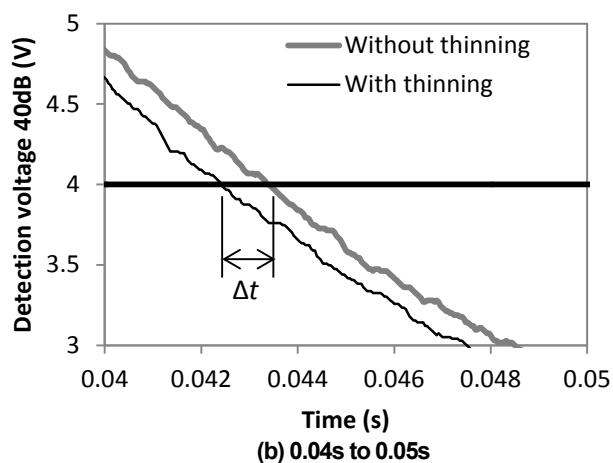


Fig. 11 Top view of scan domain



(a) 0s to 0.1s



(b) 0.04s to 0.05s

Fig. 12 Measured waveforms by pulsed ECT with DC magnetization (5120A)

付近に無欠陥部と減肉部の波形に約 1ms の違いがあることが確認できる。参考文献[12]で示したように、被試験体内部の磁束、渦電流の変化は被試験体の形状と相関がある。そこで、検出波形が 4V を下回る時間を評価値とし、二次元走査した結果を Fig. 13 に示す。凡例で表している Δt は、健全部相当の検出波形が基準電圧（今回は 4V）に達する時間を基準として、各位置での検出波形が基準電圧に達する時間との差を表している。したがって、色の濃い部分は検出波形が早く減衰している。Fig. 13(a) に示す直流磁化を併用していない時の結果では、走査領域において顕著な検出波形の変化は見られなかった。一方で

Fig. 13(b), (c), (d)に示すように、減肉部の検出信号は健全部より早く減衰し、起磁力が大きくなるにつれ減肉部の検出波形が明確になるのが確認できる。これらの結果から 5mm の減肉を検出するには、3840A から 5120A の起磁力が求められることが明らかになった。また、励磁電流を上げていくと SN 比が向上していくとともに、減肉による比透磁率変化の範囲が広がっていくことが分かる。これは直流磁化器の磁束が減肉によって直上の上板を通るだけでなく、走査面方向にも減肉をよけていることによる。つまり十分な起磁力であれば減肉は拡大されて検出される。

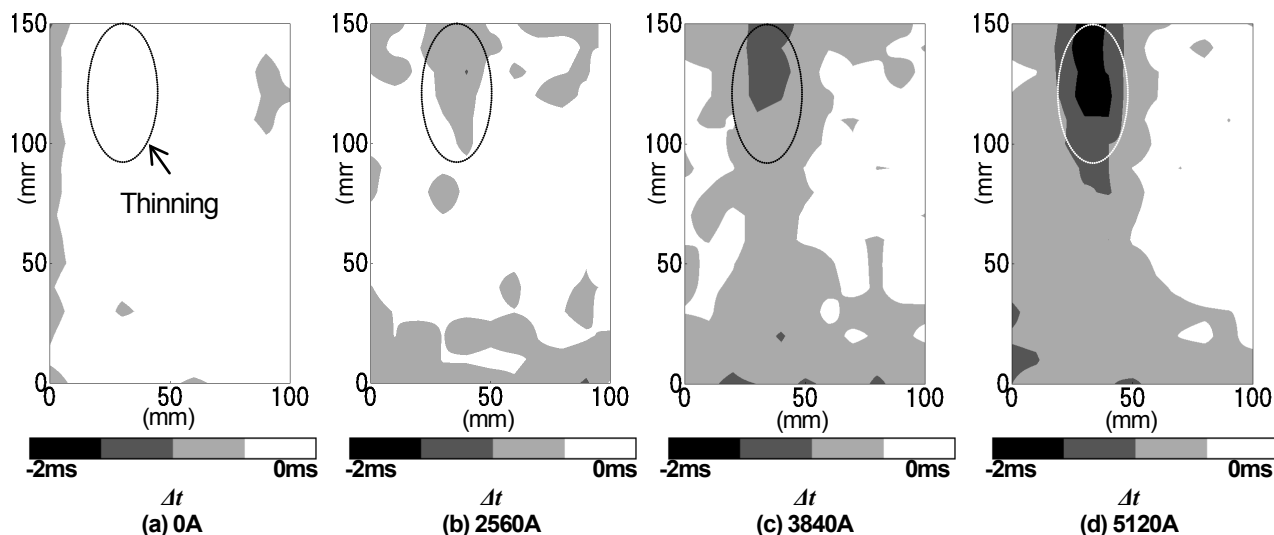


Fig. 13 Measured C scan results by pulsed ECT with DC magnetization

4. 結言

パルス ECT と直流磁化を併用した測定法による二重構造鋼材の裏面減肉の検出法を提案し、検出原理を明らかにした。これらは以下のように達成された。

最初に、数値解析を用いて試験体中の磁化状態を可視化することで、下板裏面の部分減肉により上板表面の比透磁率が変化することを確認できた。これにより、上板を集磁鋼として利用する本測定法の検出原理が明らかになった。次に、得られた磁化条件を参考に試験体への適用を試みたところ、裏面減肉を検出することができた。また、下板裏面の減肉による上板からの漏えい磁束を数値解析により定量的に評価した。漏えい磁束の評価による減肉検出の可能性を確認した。

一方で本測定法を実機に適用するには試験条件の決定指針が必要となる。例えば減肉の絶対値を評価するには試験体の磁気特性、隙間の大きさなどを考慮する必要がある。さらに磁化器やセンサの小形化も求められる。

他の手法との比較は行わなかったが、連続波による渦電流試験と比較した場合、原理的にパルス ECT は試験体に合わせて適切な周波数を選択もしくはスイープさせて測定する必要がないため、必要な情報をより短時間で得ることができる可能性がある[3][4]。今後は漏洩磁束や表面近傍の透磁率変化を検出する他の手法との比較を行う。

参考文献

[1] 城下悟, 永井辰之, 天野洋一, 平岡順之祐: “強め板下の肉厚測定手法の検討”, 日本保全学会第9回学術講演会予稿集 (2012)

[2] 小井戸純司: “パルス渦電流試験法における電磁解析技術の応用”, 非破壊検査, Vol. 47, No. 2, pp. 98-104 (1998)

[3] H. L. Libby: “Introduction to electromagnetic nondestructive test method”, Wiley-Interscience, New York, pp. 258-268 (1971)

[4] M. Morozov, G. Y. Tian and D. Edgar: “Comparison of PEC and SFEC NDE techniques”, Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 24, No. 1, pp. 153-164 (2009)

[5] B. Lebrun, Y. Jayet, and J. C. Baboux: “Pulsed eddy current signal analysis: application to the experimental detection and characterization of deep flaws in highly conductive materials”, NDT & E Int., Vol. 30, No. 3, pp. 163-170 (1997)

[6] J. C. Moulder, M. W. Kubovich, E. Uzal and J. H. Rose: “Pulsed eddy current Measurements Corrosion-Induced Metal Loss : Theory and Experiment”, Review of Progress in QNDE, Vol. 14, pp. 2065-2072 (1995)

[7] C. V. Dodd, W. E. Deeds and L. D. Chitwood: “Eddy Current Inspection of Ferromagnetic Materials Using Pulsed Magnetic Saturation”, Materials Evaluation, Vol. 46, pp. 1592-1597 (1998)

[8] 成瀬健, 島田道男, 吉井徳治: “ステップ励磁電流を用いた電磁誘導法による鋼板厚測定手法の検討”, 非破壊検査, Vol. 46, No. 5, pp. 359-366 (1997)

[9] 古海寛: “保温材上や防食材上からの肉厚測定”, 非破壊検査, Vol. 55, No. 3, pp. 109-113 (2006)

[10] 今吉和弘: “外面腐食の診断 SLOFEC&FCR”, 検査技術, Vol. 10, No. 9, pp. 13-18 (2005)

[11] 中田高義, 高橋則雄: “電気工学の有限要素法”, 森北出版株式会社, 東京, pp. 39-65 (1982)

[12] 小坂大吾, 橋本光男: “鋼板厚さ測定におけるパルス渦電流試験の解析と実験からの検討”, 非破壊検査, Vol. 63, No. 5, pp. 245-250 (20014)

(平成 26 年 6 月 5 日)