

新しい視点から見た電磁現象非破壊評価技術

—多重周波励磁スペクトログラム法—

New Electromagnetic Nondestructive Evaluation Technology

— Multi-Frequencies Exciting Spectrogram Method —

榎園正人

大分大学 工学部
電気電子工学科 教授

Masato Enokizono

1 非破壊評価技術

近年の技術の急速な進歩に伴う構造物の大型化・複雑化によって、安全性あるいは保全性への要求はきわめて重要な問題となっている。また、経済的な条件からより正確な使用寿命を知ること強く要求されている事柄である。そのために、細心の注意を払って設計・製作されたものであっても、使用中に生じた破損や欠陥を速やかに見つけ出すための検査は、欠かすことが出来ない。

原子力プラントや航空機などの大型構造物や機器に使用されている金属材料（鋼材、ステンレス材、インコネル材、アルミ材等）は、放射線にさらされたり、大きな繰り返し荷重や衝撃荷重、熱応力などが加わる厳しい環境で使用されている例である。原子力プラントにおいては、定期的にプラントを停止して検査が行われているが、放射線放出を避けるためにも破壊検査は不可能であり、また伝熱管の全数調査が必要ということから、非破壊検査の重要性は極めて高いものといえる。

「非破壊検査」とは、(1) 欠陥の有無の判定、(2) 欠陥の位置の判定、(3) 欠陥の種類の分類、(4) 欠陥の大きさの判定、(5) 欠陥の形状を明確にする、ことを言う。非破壊検査には様々な手法を用いたものがあり、現在よく用いられている手法にはそれぞれ一長一短がある。放射線を使う方法は、安全性を確保するために非破壊検査を行う技術者に特殊な資格が必要であり、その装置も大型で取り扱いが不便である。さらに、欠陥の評価を自動で行おうとするとコンピュータとの接続に多くの電子機器を必要とする等の欠点がある。超音波を使う方法は、最近よく改良され、金属材料だけではなく、セラミックスなどの材料に対しても有効な微小欠陥検出方法として活用されている。しかし、接触子（プローブ）との間に音響インピーダンスの整合を取るための接触媒質を必要とするため、広範囲を高速に検査することは難しい。また、渦

電流探傷法は、非接触で検査速度が速く、試験の結果が電気信号として得られ自動化しやすいなどの利点を持っているが、表皮効果による制限から、肉厚金属板の中や裏側に存在する欠陥に対して困難を有している。しかし、この点を改良すればプローブ自体に大掛かりな装置を必要としない手軽で安価なシステムを構築できる。また、試験結果が電気信号として得られることから近年、安価で高速大容量となったパーソナルコンピュータと組み合わせれば、ソフトウェア技術の向上とあいまって手軽で安価な「非破壊検査システム」を構築できる。このように、「渦電流探傷法」、あるいは「電磁現象を用いた探傷法」は、非常に大きな可能性を秘めている。それゆえ、次世紀に向けた高度な非破壊検査技術の開発が望まれるところである。

ここでは、当研究グループによって開発された新しい周波数探査法として多重周波励磁スペクトログラム法を紹介し、その一助としたい。

2 多重周波励磁スペクトログラム法の原理

2.1 渦電流

一般に変化する磁場の中にある導体は、電磁誘導によって生じる渦状の遮蔽電流である渦電流が生じる。したがって時間的に変化している交番磁界の中に導体を置くと、この渦電流が生じ、これにより磁場が内部へ浸透しようとするのを妨げようとする反抗磁界が発生して、その結果渦電流や磁場が導体の表面付近に局限され、内部に入らなくなる表皮効果の現象が起こる。

このように磁束密度のみならず電流も表面付近に集中されるため、その実効抵抗は周波数の増加とともに大きくなる。他方、交流磁場によって発生する渦電流の大きさは周波数の増大に伴って増加する。言い換えれば交流磁場の周波数を増

加させると、渦電流は増大するが、他方それが浸透する深さは減少する。このことは、導体内の任意の点にまで磁束密度並びに渦電流を到達させるには、それに合致する励磁周波数が存在することを意味し、周波数探査法を可能にする。

2.2 多重周波励磁法の概要^{1,2)}

これまでの渦電流探傷法において磁場を印加する励磁コイルの印加電圧には、一般に単一交流励磁周波数が用いられてきた。被試験体の表側欠陥に対しては、高励磁周波数を使用し欠陥による渦電流の流路変化を顕著に捉えることによって、容易に探査ができる。しかしながら、被試験体裏側欠陥では表皮効果のため低励磁周波数に設定せねばならず、この場合検出用のピックアップコイルの誘起電圧は減少し傷や欠陥による微小な検出信号を捉えることが困難となる。このことが問題となり傷や欠陥の定量的な評価を困難にならしている。それゆえこの最適な励磁周波数の設定は裏側欠陥推定に対して重要な要素であると言える。このことは言い換えれば、この最適周波数を求めることができれば、逆に欠陥検出を固有の周波数として探査できることを意味する。そこでこの最適周波数を検出力とする新しい方法が考えられる。

今、各周波数成分を一度に評価できる手法、つまり磁気センサーの印加電圧に周波数帯の範囲を任意に決め、数十種類の周波数の交流磁界を多重化した励磁波形を使用した周波数探査法が多重周波励磁法である。図1 (a) のような時間領域において連続的に滑らかな一つの励磁入力正弦波が与えられているとき、これを周波数領域に変換（フーリエ変換）すると図1 (b) のように周波数軸上の一つのパラメータとした振幅スペクトルが得られる。次いで、図2 (a) に示す本手法で用いる多重入力励磁周波数の波形を、フーリエ変換した時の振幅スペクトルを図2 (b) に示す。図2 (b) に示すように、一様な大きさの様々な周波数成分スペクトルから構成されて

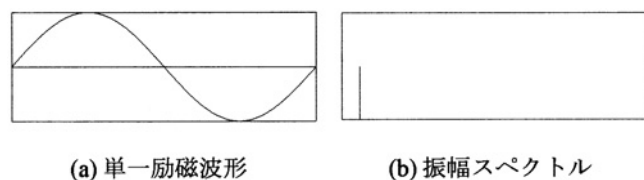


図1 単一励磁周波数の入力波形およびそのスペクトル

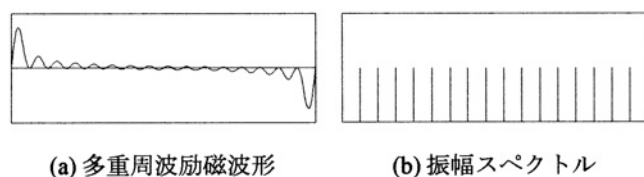


図2 多重励磁周波数の入力波形およびそのスペクトル

いる。このような多重周波励磁波形を磁気センサーに印加した場合に傷や欠陥の有無、傷や欠陥の種類や形状の違いによりある周波数帯のスペクトルに変化が見られる。

2.3 解析的検討

検討のための数値解析モデルを図3に示す。ここでは複素近似法による境界要素解析が用いられた³⁾。図3に示すように磁気センサーは、スキャンした場合における欠陥検出信号が最大となる位置に固定し、裏側欠陥の出力スペクトルを求める。被試験体には、250mm×20mm×5mmの一般機器構造用材SUS304を用いた。数値解析条件は、励磁コイルの巻線抵抗1.5Ω、被試験体の導電率 $1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、比透磁率1.0とした。被試験体は、傷幅5mm一定で傷の深さを4、3、2、1mmと変えて欠陥検出スペクトルを求める。基本周波数を1kHzとし、第80高調波成分まで考慮、つまり1kHzから80kHz成分までを含んだ多重励磁周波数波形を印加する。それぞれの周波数成分を同一レベルの条件下で評価するため各周波数成分一定、入力スペクトル一定としてある。それぞれの被試験体における欠陥検出スペクトルをそのままプロットしただけではその微小変化を認識するのは困難なので、無欠陥の被試験体での出力スペクトルを基準値として、

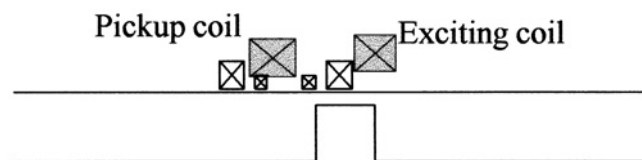


図3 欠陥出力信号が最大となるセンサーの位置

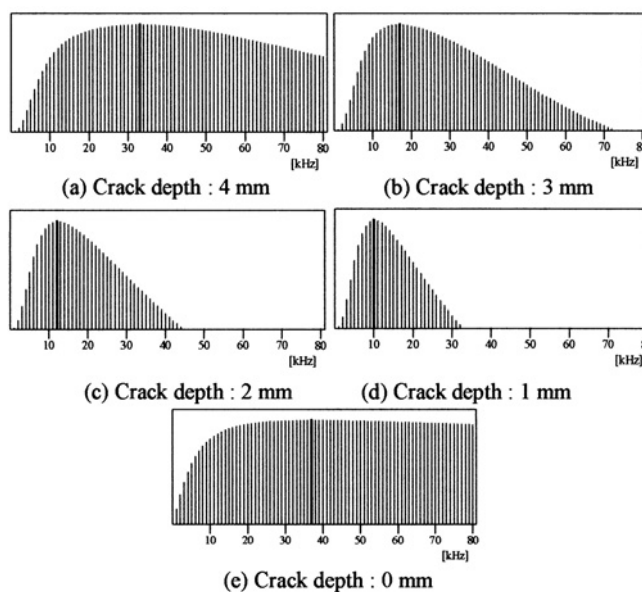


図4 傷が存在する場合の欠陥出力スペクトル
(数値解析結果、励磁周波数：1kHzから80kHzの範囲)

その値でそれぞれの深さに対する欠陥検出スペクトルを正規化してプロットした。そのときのそれぞれの被試験体の欠陥検出スペクトルの結果を図4に示す。これより傷深さの違いによりそれぞれ最も顕著に変化した周波数帯が異なっており、無欠陥の場合では、図4 (e) の様にある特定のスペクトルに変化は見られない。このことから、傷の深さと励磁周波数の間には密接な関係があると言え、多重励磁周波数による周波数探査によって、最も顕著に捕らえられる周波数成分を測定することにより、傷や欠陥の状態を検出することが可能となる。このことは、傷や欠陥の種類の違いによりある特定の周波数帯の変化を把握すれば、非破壊検査の診断する際の有効な手掛かりになることを示唆する。

3 多重周波励磁スペクトログラム法探査システム

本磁気探査システムは、数百ミリ秒以内に少なくとも80個までの周波数成分を多重化した印加磁界による多重周波数応答測定を行うものである。この手法は欠陥を周波数成分で探査し、従来に比べ遙かに高感度で詳細な情報を得ることができる。また、この周波数探査で得られた最適周波数で磁束の微分分布を適当な画像処理を行うことにより、疲労分布をも推定せしめる可能性を有する。

3.1 測定システム及びセンサーの構造

本測定システムのスキームを図5に示す。多重周波励磁スペクトログラム法を用いたこのシステムは5Hzから8MHzまでの任意の範囲において任意の数の周波数成分の多重化が設定でき、様々なセンサーを用いた探査が可能である。

まず多重周波励磁波形を得るためのシステムとして、12bit以上のA/Dコンバータ内蔵型のファンクションシンセサイザーでセンサーからの発生印加磁界の各周波数成分の

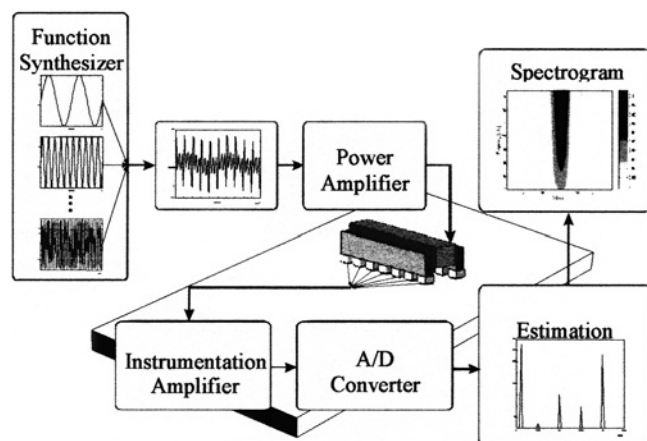


図5 システムのブロックスキーム

振幅が同じになるようにフィードバック制御して一つの多重化した信号波形を得る。その後、広帯域増幅器を通して多重周波数成分帯を持つ励磁電流をセンサーに印加する。このとき励磁磁界の各周波数成分の大きさがバラバラであると正確な測定ができない。言い換えれば、等レベルの各励磁周波数成分によって、周波数による探査を行うことを意味する。欠陥が存在すればその影響によって、欠陥に起因する実効抵抗が増大し欠陥の深さに呼応した周波数成分の応答が強く反応する。

センサーは種々のタイプのものが使用できるが、ここでは一例として図6に示すようなセンサーについて、欠陥探査の評価を行った。センサーはMn-Zn系のフェライトをコアとし、一つの励磁コイルと複数個の検出コイルから成っている。これはパイプの欠陥探査用に設計されたもので、構造上の特徴として4本の脚部の中央部に励磁コイルを配し、放射状に周囲に磁界が印加でき、四方向からの出力が得られる。検出コイルから得られたアナログ信号は、データ収集システムにより、デジタル信号に変換されてコンピュータ内に取り込まれる。このサブシステムは、マルチプレクサー、増幅器、反エイリアスフィルター、高性能A/Dコンバーターから成っている。また、このA/Dコンバーターは、高速(1秒当たり20mega sample)かつ、32ビット分解能を有する。

本システムでは信号へのノイズによる干渉を取り除き、測定から主要な成分の値を抽出するためにパワースペクトラム評価³⁾を用いている。その後更に、得られたパワースペクトラム信号を用いて図8に示すような縦軸を周波数成分に、横軸を位置としたスペクトル図(スペクトログラム)として表示させる。すなわち、スペクトログラムは、センサーポジション上の単一の検出コイルから得た信号の周波数成分における相対振幅値を表している。相対振幅値は、欠陥がない場合に測定された値と欠陥が存在する場合を測定している現在の値との間の差異である。このスペクトログラムにより、測定範囲における多重周波数応答スペクトラムの最大値とその時の周波数成分の最大値が確認でき、正確な欠陥評価を行う上での重要な情報が示されている。

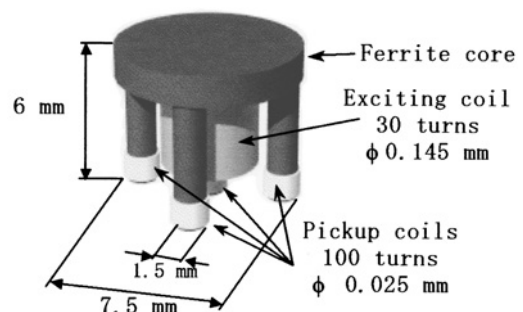


図6 センサーの構造

3.2 探査方法

本測定装置による探査手順は、最初適当な周波数帯を選び、対象物をセンサーで走査すると、図7に示すように画面上部にスペクトログラム画像と各周波数成分の変化ならびに、センサー位置における周波数スペクトル図の順次変化していく。これらは各位置における相対振幅値が示されており、スペクトル信号の強さが欠陥の深さに対応する。こうして得られた一走査後に得られるスペクトログラムが図8の結果である。この結果から得られる評価値として最大周波数 F_{MAX} 及び最大振幅値 S_{MAX} から欠陥の位置並びに深さを推定することができる。そしてこの分布の広がりから欠陥形状の情報も得られる。図9はx-y軸を面にして平面上のアルミニウム材の内部に設置された複数個の欠陥の探査結果を示す。このように、三次元スペクトログラム図を構成することにより、複数個の各欠陥の個別の位置や深さの推定も容易に行え、また各周波数成分について輪切りにして任意の周波数における断

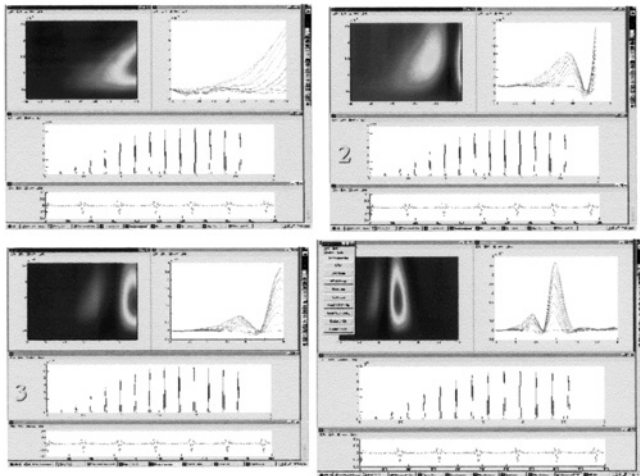


図7 探査過程の推移画面の変化

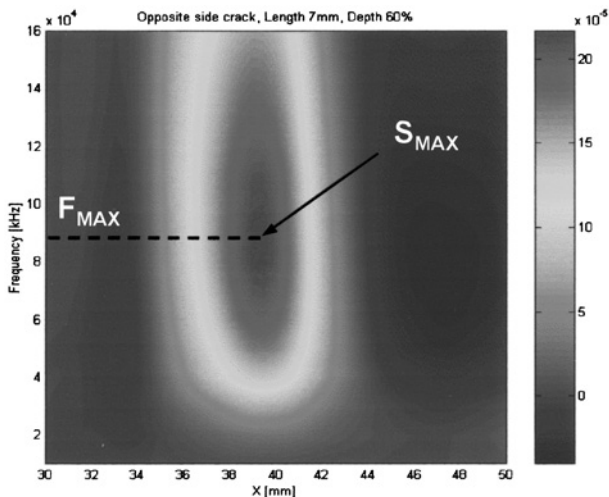


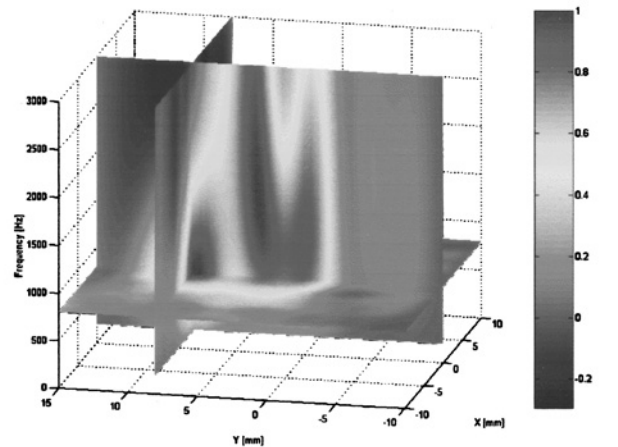
図8 スペクトログラム
(308頁にカラー写真掲載)

面分布を見ることができ、より詳細な欠陥状況を知る有効な手がかりを得る。これは後に述べる特定の周波数域での疲労等の分布状況を知ることにつながる。

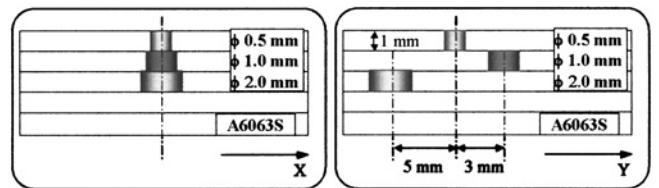
3.3 欠陥探査結果^{4,5)}

原子炉用蒸気伝熱管インコネル材の欠陥探査を行った結果を図10に示す。また、同図 (a) はセンサーを軸方向に移動させた時の検出結果を示し、図 (b) はセンサーを円周方向に角度を変えて検出した時の結果をそれぞれスペクトログラム図で示している。ここで示すスペクトログラム表示は最大周波数 F_{MAX} が56kHz及び65kHzの各周波数で切った面におけるその周波数成分での振幅値の分布図を示す。この周波数 F_{MAX} と S_{MAX} は欠陥の深さを推定し、その広がりから欠陥形状を推定できる。これらの両図を合成して図 (c) が得られ、これから明らかなように、全体の欠陥の存在する箇所とその大まかな形状を可視化することができる。

さらに図11は管の外側に設置される磁性を有する鉄系のサポート材がある場合で、サポート材の下に発生する欠陥をも明瞭に識別できる結果を示す。一般にこのような箇所での欠陥発生例は多い。通常このような状況にある欠陥はサポート材の磁気特性の影響を強く受けて検出信号を乱し、欠陥の位置、形状のみならず存在すら把握することは難しいとされている。このことはサポート材の有無によるスペクトログラム図の相違からもわかる。本手法ではこの無欠陥のスペ



(c) 三次元スペクトログラム図



(a) X-view

(b) Y-view

図9 アルミニウム板試料の内部欠陥の探査結果

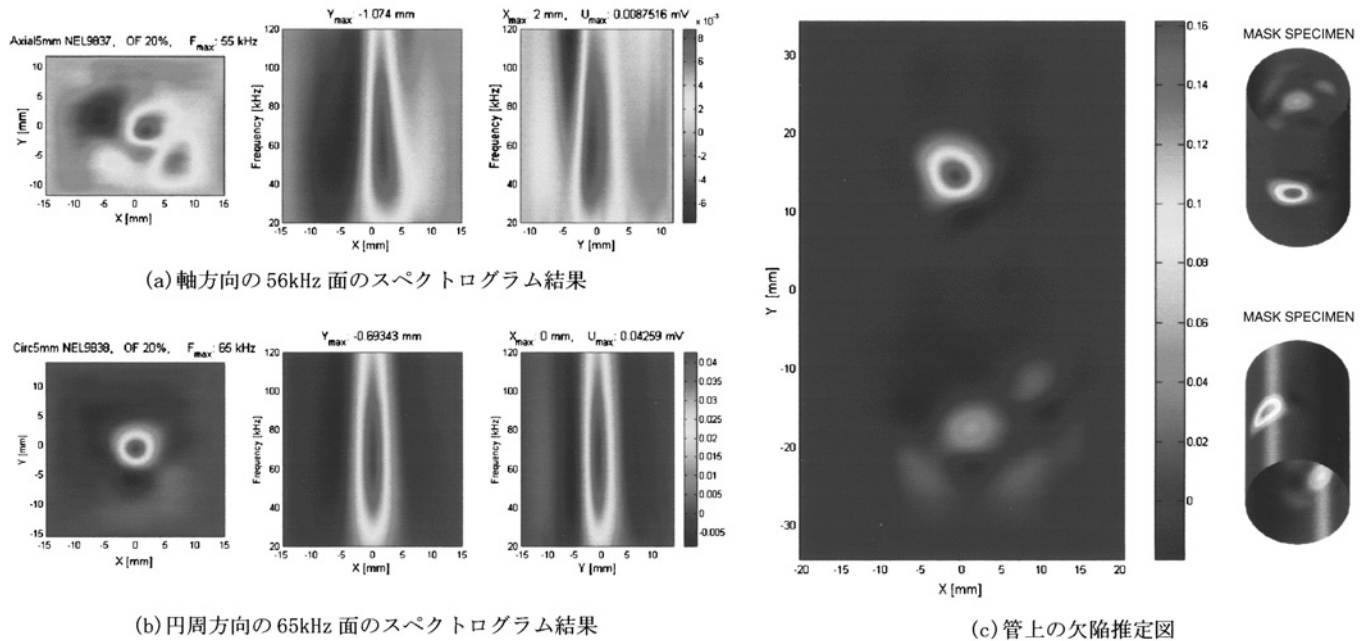


図10 蒸気伝熱管の欠陥探査結果

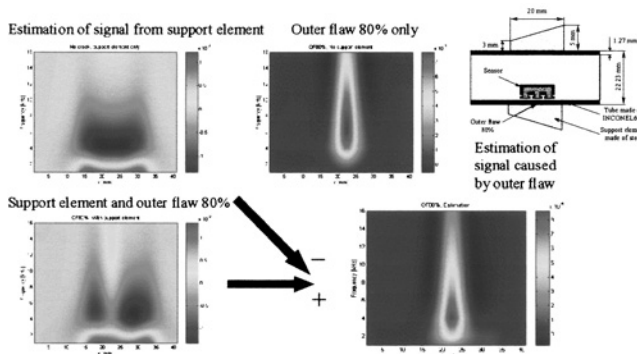


図11 磁性を有するサポート材付きの欠陥探査

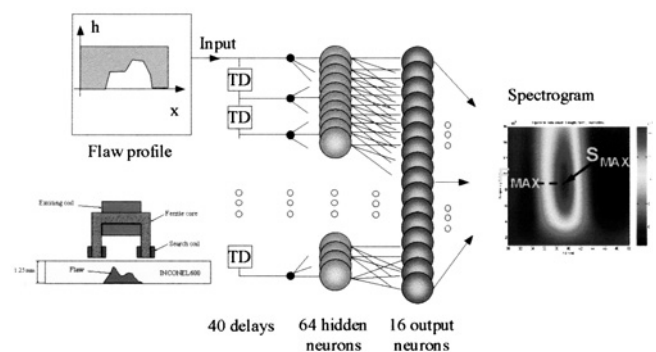


図12 ニューラルネットワークによる欠陥形状推定システム

クトログラムを事前に把握しておけば、得られた結果からの差画像を処理、評価することによって欠陥のみを浮かび上がらせることができる。これはいずれも欠陥とサポート材の探査が別々の周波数で関知されることによるもので、多重周波励磁法の特徴でもある。

3.4 ニューラルネットワークによる欠陥形状推定⁶⁾

得られたスペクトログラム結果から、より詳細な欠陥形状の推定を行おうとすると、逆解析手法としてニューラルネットワーク法が有用である。図12は欠陥形状の推定のためのニューラルネットワークの構成を示す。ここでは教師信号としてあらかじめ解析によって得られたスペクトログラムデータを参照し最急勾配法に基づく階層型ニューラルネットワークによるバックプロパゲーション法を適用する。図13は得られたライン輪郭が推定された形状を示す。若干の誤推定部が外側に見られるが、全体的には80%以上の精度で欠

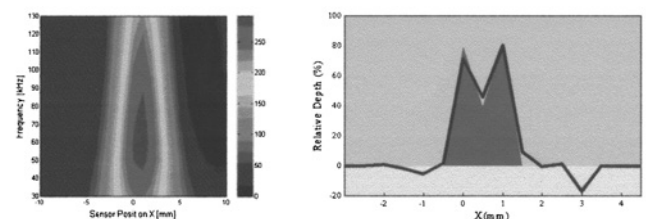


図13 ニューラルネットワークによる欠陥形状推定結果

陥形状が推定できている。これは従来と異なり、形状という2次元情報を推定するために S_{MAX} 及び F_{MAX} の2種類の値と、スペクトログラムの広がりに基づいていることによる教師信号情報の多様性がそれを容易にしている。

4 引っ張り応力下の損傷評価⁷⁾

欠陥探査のより高度な事前探査として、欠陥が発生する前の疲労段階における探査手段の確立が望まれるところであ

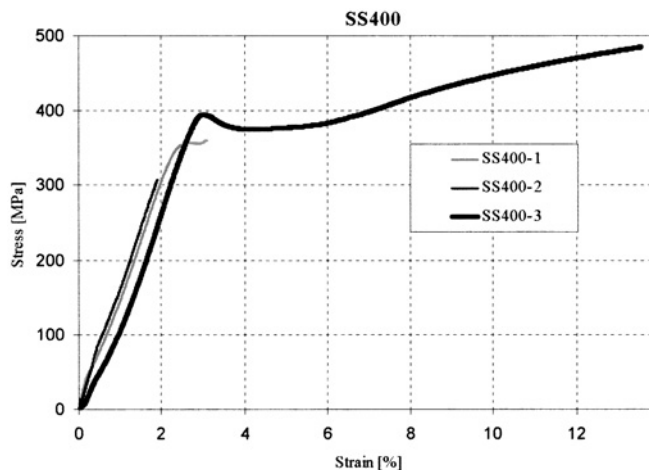


図14 引っ張り試験片と試験結果

る。これに関する電磁気学的手段は、スクウィッドなどの高感度磁気センサーを用いた表面残留磁化分布に起因した磁界分布の観察から内部ひずみに起因したパターンであるルーダース帯の可視化が試みられているが、外部磁界の影響を除去する必要があるなどの課題を持っている。また、センサー自体が高価であることも問題の一つである。そこで、本手法によるスペクトログラム法から得られた最大感度の周波数帯での磁界分布を解析処理することにより、これまでに比べて非常に容易に上記のパターンが得られることがわかった⁴⁾。疲労試験片の代わりに引っ張り応力下の損傷状態について、各段階の評価を、以下にその結果の概要を紹介する。図14はSS400の引っ張り試験による測定結果を示し、4種類の状態のサンプルが準備された。図15はその測定結果を示す。図からわかるようにストレスが増加するに伴いダメージが変化している様子が克明に分かるであろう。図16は先に得られた画像をイメージフィルタを使って画像処理することによって得られたもので、これより定量的にサンプルの損傷の程度を推し量ることが可能である。図15に示したパターン図からだけでは、損傷の程度を客観的に測ることは難しいが、図16からは明らかに信号の強度の変化を表示でき、その段階的差を見て取ることができる。

以上のように本手法は非常に適用範囲を広げ、各種分野に適用可能である。たとえばそれは鋼板の品質管理、分析用のみならず対象はコンクリートやバイオ関連にまで適用可能であろう。

引用文献

- 1) T. Chady, M. Enokizono: Reconstruction of the Defect Signals Embedded in Noises and other Non-defect Signals Using the ECT Spectrogram Method, Proceedings of the 8th Magnetodynamics Confer-

SS400-0

0 MPa

SS400-2

308 MPa

SS400-1

361 MPa

SS400-3

489 MPa

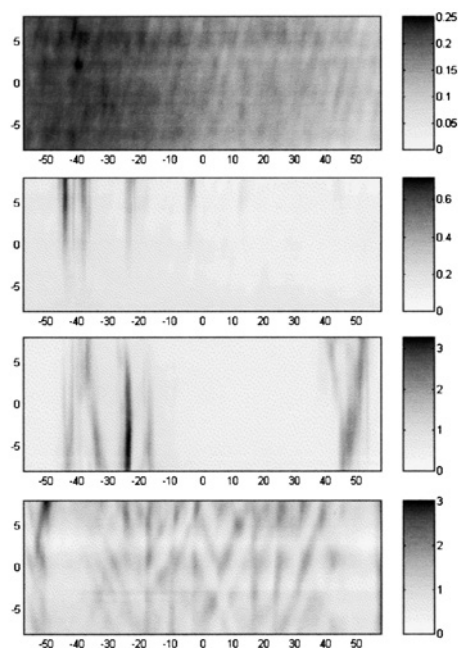


図15 引っ張り試験の応力

SS400-0

0 MPa

SS400-2

308 MPa

SS400-1

361 MPa

SS400-3

489 MPa

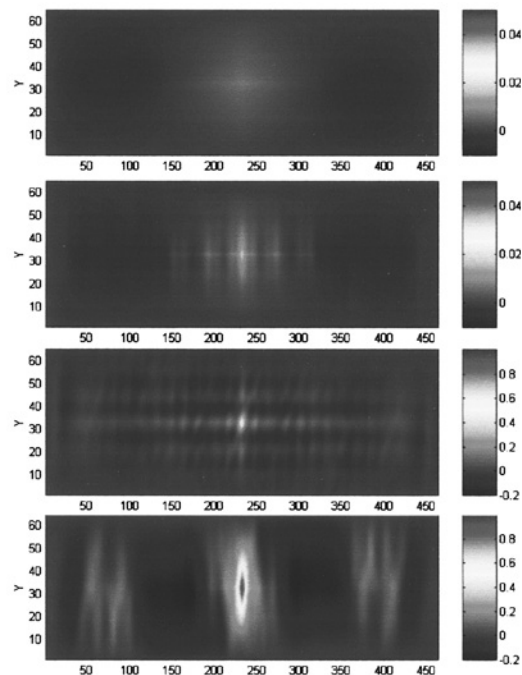


図16 引っ張り試験片と試験結果

ence, April 22-23, (1999) PS2-7, 147.

- 2) S. Kay: Modern Spectral Estimation, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, (1975)
- 3) 榎園正人, 戸高 孝, 槌田雄二, 高畑良一: 渦電流探傷法を用いたステンレス鋼板の裏側同定, 日本応用磁気学会誌, 24 (2000) 4-2, 847.
- 4) 榎園正人, Tomasz Chady, 池未知史: インコネル製パイプの多重周波渦電流探傷試験, 日本応用磁気学会誌,

- 24 (2000) 4-2, 843.
- 5) T. Chady, M. Enokizono : Eddy Current Testing Stain-less Plates by Using Matrix Sensor, Proceedings of the 7th Magnetodynamics Conference, April 24, (1998), 107.
- 6) T. Chady, M. Enokizono : System for Eddy Current Nodestructive Testingbased on Digital Signal Processing and Neural Networks, 日本応用磁気学会誌, 23, (1999) 4-2.
- 7) T. Chady, M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tsuchida and R. Sikora : Visualization of Fatigue Damage in Magnetic Materials Using a High Resolution Electric Sensor, IEEE Intermag Conference, 4, (2000)
(2000年10月24日受付)

ブックレビュー

移動層工学—実際と基礎—

篠原邦夫 高橋洋志 中村正明 編著

2000年12月 北海道大学図書刊行会発行 (Tel.011-747-2308)

●B5判 定価6,000円(消費税別)

移動層に関する専門書は、かなり出版されているが、この本は広範囲の角度から移動層を取りあつかっていることに特徴がある。執筆者が総勢35人と多く、それを3人の編者によって、編集されていることから見ても、やや詳細にわたる便覧的な性格をもつに至っている。それはこの本のサイズが普通より大きくB5判となっていること、および本の価格が6000円とやや高額になっていることなどとも相応しているようである。ここに参画している執筆者は、いずれも何らかの形で現実の移動層に携わった専門の研究者といえる。内容的には、高炉や都市ごみ処理装置などの実際例を豊富にとりあげているとともに、多くの図や写真が示されていることのために勉学者の理解を助けるものとなっている。基礎分野から新展開としての排煙処理システムや水素吸蔵合金などにも触れていることは、読者の新たな関心を引き起こすものと考えられる。最近の装置技術を取り上げながら、基礎にも配慮したこの専門書の存在価値は、移動層に係わる技術者にとって大きいものがある。

(金沢工業大学 経営工学科 柴田 充蔵)