

交流漏洩磁束探傷試験法を支援する近似的交流非線形数値解析法の実験による適用範囲評価

岡山職業能力開発短期大学校 後藤 雄治
職業能力開発総合大学校 橋本 光男

Evaluation of Compare Experiment with Approximate Non-linear Alternating Magnetic Field Numerical Analysis Method for Alternating Magnetic Flux Leakage Testing

Yuji GOTOH, Mitsuo HASHIMOTO

要約 近年鉄鋼業界では鉄鋼製品の高品質化が叫ばれており、その需要は拡大しつつある。圧延工程等の製品製造過程に発生する鋼材表面の微小き裂は、その後のプレス工程等で大きな障害となるため早期発見が必要であり、またその検査手法の確立は重要課題である。この強磁性材料の表面微小き裂検出に対する電磁現象を利用した非破壊検査手法の一つに交流漏洩磁束探傷試験法がある。これは材料に非接触で、しかも高速に探傷が行え、かつき裂形状等の評価が瞬時に行えるといった利点を有している。しかし、検査には交流磁場を使用するため、鋼材の交流非線形磁気現象や渦電流等がき裂信号に影響するため、その評価方法等はまだ解明されていない。そこで我々は2重鋼管システムを作成し、まず強磁性体鋼管を外部より交流で磁化させた時の鋼管内部に侵入する磁束密度を測定し、これと等価正弦波交流非線形解析法により、未飽和交流磁化領域における実効的な強磁性体の交流磁気特性を求めた。さらにこの磁化曲線を解析に使用し、鋼管表面き裂より生じる交流漏洩磁束を求め、解析と同条件下における実験値との比較検討を行なった。これにより未飽和交流磁化領域における、鋼材表面き裂より発生する交流漏洩磁束の現象評価が行なえることが明かになったので報告する。

I 緒言

近年鉄鋼業界では鉄鋼製品の高品質化が求められており、特に材料表面の微小き裂検出は重要視されてきている。この鉄鋼材の表面微小き裂検出に対する非破壊検査手法には、高い周波数を使用した交流漏洩磁束探傷試験法の適用が実用化されつつある。この検査は鉄鋼材に交流磁場を印加し、材料表面に磁束を集中させ、き裂より漏れる漏洩磁束を検出し、き裂の検出を行う手法であるが、励磁磁界が高いため磁性体の非線形性が強く現れ、材料内部の磁束密度や渦電流密度

分布、また材料表面に生じる漏れ磁束等の現象の理解を困難にしている。この現象解明には交流非線形解析が有用である。そこで我々は簡易的な交流非線形解析として等価正弦波交流非線形解析法の適用を試みた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

本研究では、交流漏洩磁束探傷試験法の材料内部および、き裂から発生する漏れ磁束等の現象解明を行うことを目的として、等価正弦波交流非線形解析手法に使用する交流磁化曲線を実験的に求め、さらにこの解析手法の適用範囲を検証実験により明確にした。

II 交流磁気特性評価

2.1 実験方法

鉄鋼材を交流で磁化させた時、材料内部に侵入する磁束の評価を行うため、本研究では鋼管を肉厚の薄い径の異なる2重構造にし、その表面、中部、内部に3つの磁束検出コイルを配置した鋼管の作成を行った。その外観図をFig.1に示す。

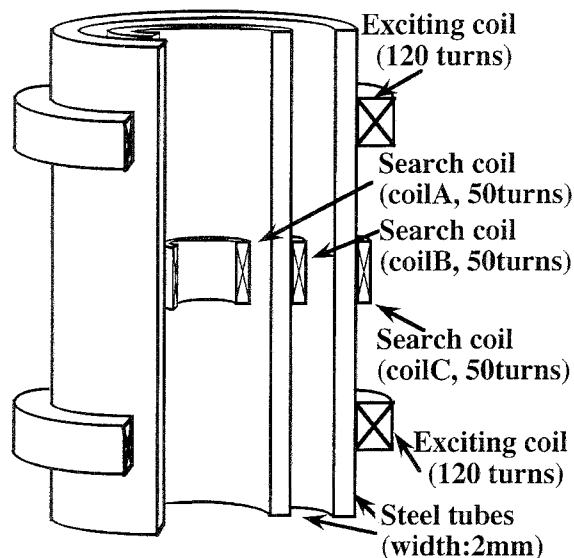
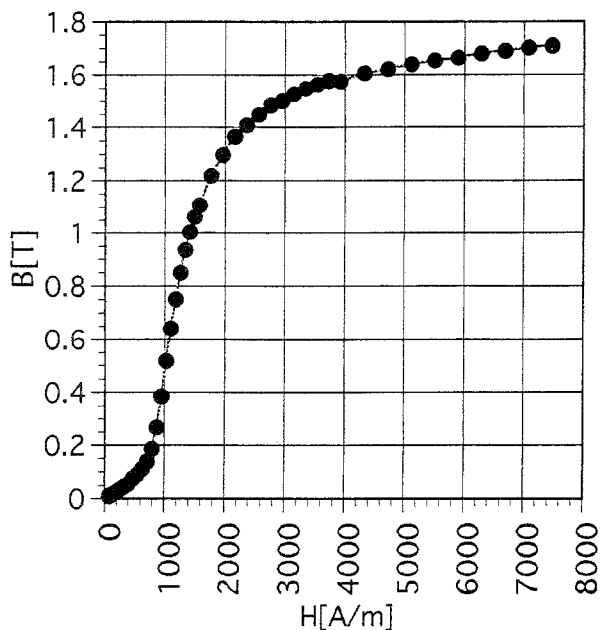


Fig. 1 Analysis and experiment model of the search for AC magnetization curve

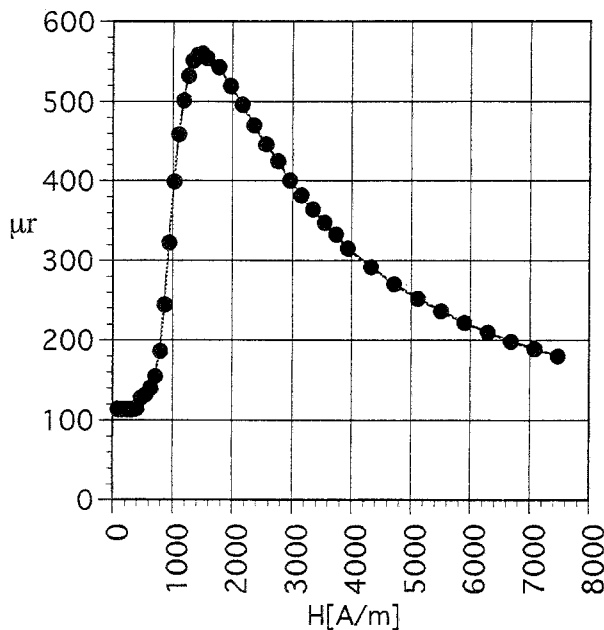
鋼管外面に2つの励磁コイル(各120ターン)を直列で巻き、交流で磁化させ、鋼管内部に侵入する磁束を、それぞれの鋼管および鋼管中心部に配置した3つの検出コイルで出力電圧として検出し、鉄鋼材の交流磁気特性の評価を行った。なお本論文では2つの鋼管の中心部に配置した検出コイルをコイルA、内側鋼管に巻いた検出コイルをコイルB、外側鋼管に巻いた検出コイルをコイルCと名付けた。鋼管の材質はマンガンクロム鋼で、導電率は 4.42×10^6 S/mであり、最大比透磁率は572である。この材質の静磁界により求めた磁化曲線をFig.2(a)、(b)に示す。Fig.2(a)はB-H曲線を示し、Fig.2(b)はFig.2(a)を横軸H [A/m]、縦軸を比透磁率 μ_r に書き換えたH- μ_r 曲線である。鋼管の径は外側鋼管が60mm、内側鋼管が30mmで、それぞれ長さは200mm、管厚は2mmである。

2.2 解析方法

本解析では磁気ベクトルポテンシャルによる軸対称有限要素法を用いた。強磁性体を交流で磁化させると



(a) B-H curve



(b) H- μ_r curve

Fig. 2 DC magnetization curve

磁気飽和領域に近づくにつれ、透磁率の非線形性やヒステリシスの影響から磁束密度波形は歪みをおびてくる。この現象をFig.3のモデルで検証実験を行った。これは強磁性体鋼管の外周に励磁コイルを2つ巻き、2つの励磁コイルの間に検出コイルを配置したモデルである。周波数を2kHz一定とし、励磁電流を0.2、1.5 Aと変化させたときの鋼管内部の磁束密度を検出コイルにより出力電圧として測定した。その実験結果をFig.4にそれぞれ示す。

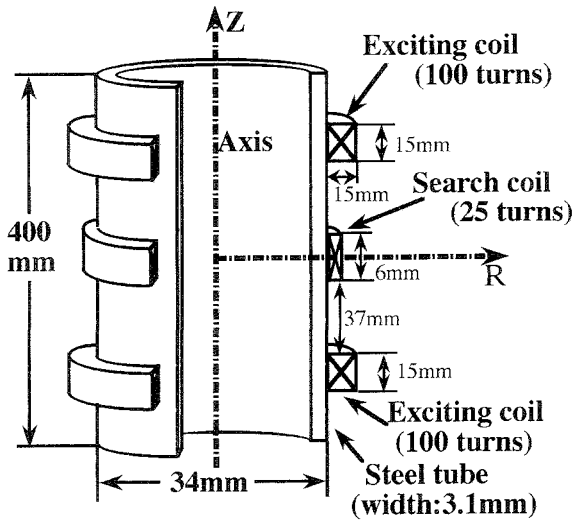
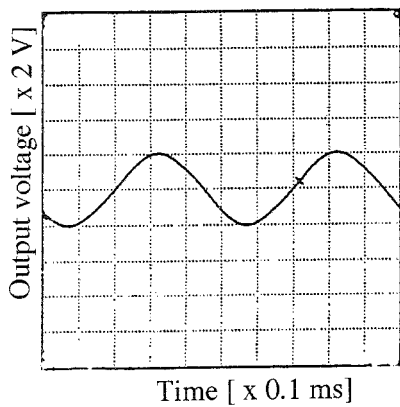
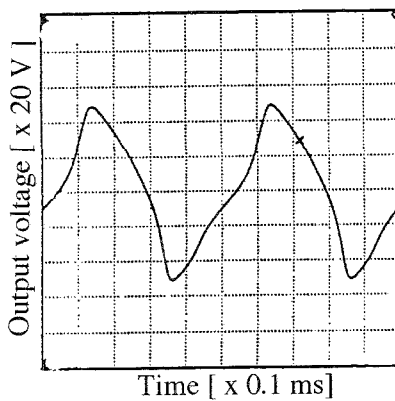


Fig. 3 Experiment model of the search for output voltage wave form



(a) Frequency:2kHz, Exciting current: 0.2A



(b) Frequency:2kHz, Exciting current: 1.5A

Fig. 4 Output voltage

この結果は検出コイルの磁束の総量の微分波形を示している。励磁電流が小さい値 (0.2A) では正弦波形を示しているが、励磁電流が大きくなるに伴い、出力電圧は歪み波形として現れ、同時に位相も変化している。このことから、後者では非線形特性から材料表面が磁気飽和領域となり、波形が大きく崩れていくことが理解できる。これらの現象を解析で評価するには磁気特性の非線形性を考慮したステップ・バイ・ステップ法^{(5),(6)}で解く必要がある。しかし、この解析手法は多くの計算時間が必要となるため、本研究では計算時間の短縮や解析の容易性を考慮して、未飽和磁化領域での交流非線形解析手法として、磁束密度を正弦波形として取り扱う等価正弦波非線形数値解析法^{(7),(8)}の開発を行い、本実験への適用を行った。その支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{J}_e = 0 \quad (2)$$

なお \mathbf{A} 、 \mathbf{J}_0 、 \mathbf{J}_e 、 ν ($\nu = \mu_0 \times \mu_r$) はそれぞれベクトルポテンシャル、強制電流密度、渦電流密度、磁気抵抗率である。ここでの渦電流密度 \mathbf{J}_e は、 $\mathbf{J}_e = -j\omega\sigma\mathbf{A}$ である。ここで、 ω 、 σ は角周波数及び、導電率である。(1)式の ν を非線形とした解析手法である。この解析手法を用い、実験と同じ条件下で、3つの検出コイル (コイルA、B、C) に得られる出力電圧を解析で求め、実験値と照合し、磁化曲線の修正を繰り返しながら、交流磁場内で実験値と解析値が合う最適な交流磁化特性を求めた⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾。解析モデル図をFig.5に示す。これは実験モデル (Fig.1) と同じモデルであるが、軸対称問題として取り扱っているので、解析上実際の1/4の領域を表している。また、鋼管は等方性磁性材料として取り扱っている。

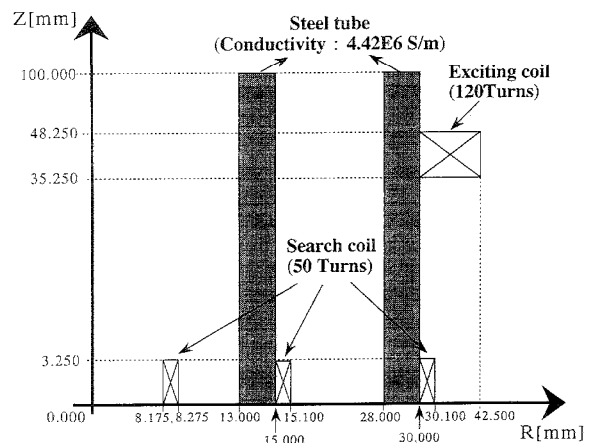


Fig. 5 Analysis model of the search for AC magnetization curve

2.3 実験および解析結果

周波数を2kHz一定とし、励磁電流を変化させた時の各種検出コイルに得られる出力電圧（ピーク値）の実験および解析を行った。

2.3.1 直流磁化曲線による解析と実験の比較

Fig.2に示す静磁界で測定した磁化曲線を使用して周波数が2kHz時での検出コイルに得られる出力電圧（ピーク値）の実験と解析を行った。その実験結果と解析結果をFig.6に示す。ここでは、内側の鋼管（コイルB）や、中心部（コイルA）に、実験値と解析値の大きな相異が見られた。実験結果は解析に比べ、高い周波数において、より表皮効果が高まり、外側の鋼管に磁束が集中し、内部まで磁束が侵入しないように振る舞い、コイルA、B部は、解析値より実測値の方が低い値を示していることが理解できる。これらより交流磁化では、静磁界による磁化曲線より、初期磁化段階での透磁率は高く評価する必要があることが分かる。そこで本研究では、静磁界により得られた磁化曲線を変化させ、実験値と解析値が合う様な交流磁化曲線を求めた。

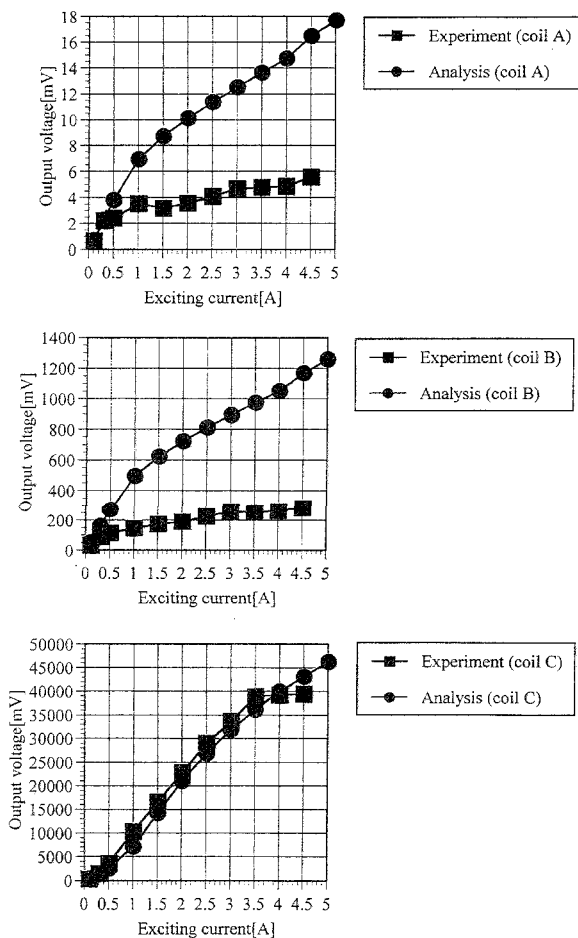


Fig. 6 Output voltage using DC magnetization curve

2.3.2 交流磁化曲線による解析結果

励磁電流が0.1Aの様な、外部磁場が小さい磁化領域では実験値、解析値は共によく合うことから、交流磁化曲線の初期透磁率の値は静磁界での磁化曲線と同じ値（比透磁率：110）であることが理解できる。しかし、励磁電流を増やすに伴い、外側鋼管の検出コイル（コイルC）は、解析値の方が実験値より低く、内側の2つのコイル（コイルA及びB）は解析値の方が実験値より高い傾向をみせることから、静磁界に比べ交流磁場では表皮効果により、鋼管内部に侵入する磁束は少ないことが分かる。これらのことから、交流磁化曲線での初期段階での透磁率は、静磁界磁化曲線に比べ高くなることが理解できる。よって、初期透磁率は静磁界磁化曲線と同一（比透磁率：110）にし、それ以降の初期段階での透磁率は静磁界時よりも高い値とした磁化曲線を得た。その交流磁化曲線をFig.7(a)、(b)に示す。

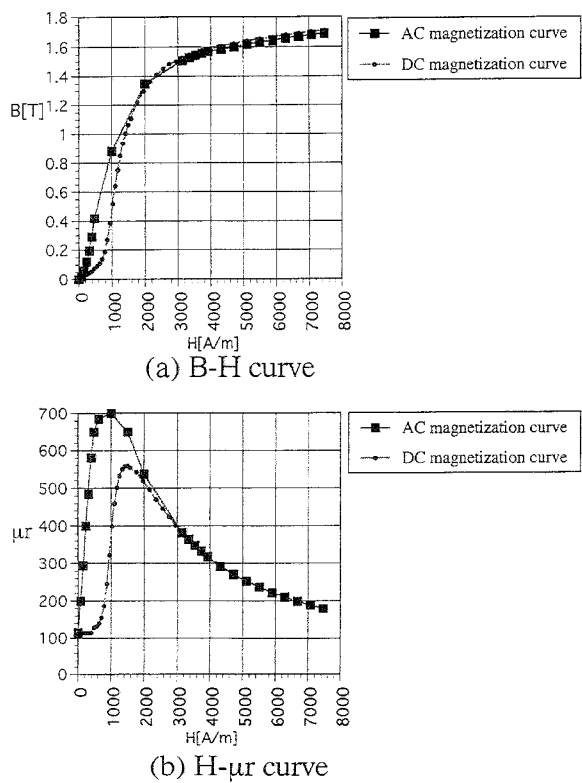


Fig. 7 AC magnetization curve

Fig.7(a)は静磁界および交流磁化における磁化曲線（B-H曲線）を示し、Fig.7(b)には横軸H [A/m]、縦軸を比透磁率に書き換えたH- μ_r 曲線を示す。Fig.2の静磁界の曲線に比べ、原点からの立ち上がりが急であり、初透磁率および最大透磁率が高くなっていることが分かる。この曲線を解析に使用して3つの検出コ

イルに得られる出力電圧の解析を同条件下で行った結果をFig.8に示す。Fig.2の静磁界磁化曲線時における解析結果に比べ、どの検出コイルとも実験値とよく合い、Fig.7の磁化曲線は実効的な交流磁化曲線として扱えることが理解できる。

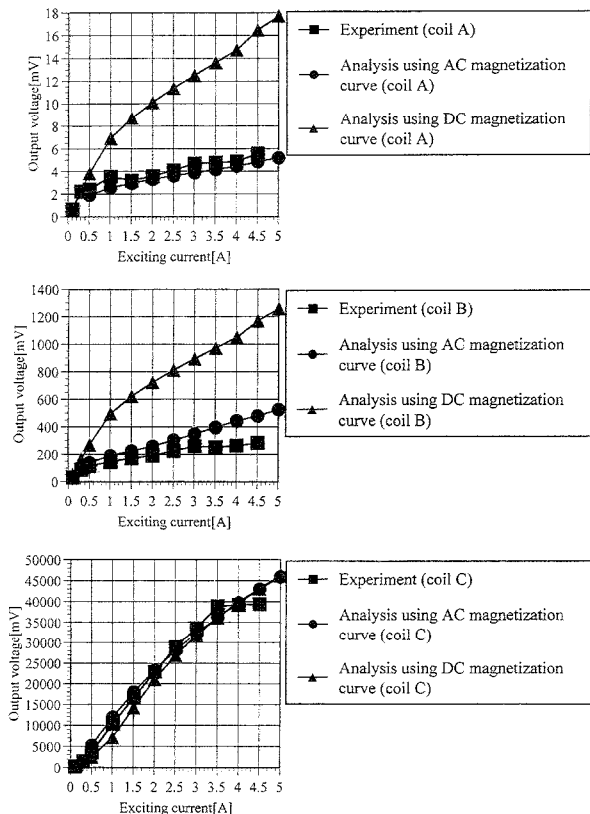


Fig. 8 Output voltage of using AC magnetization curve

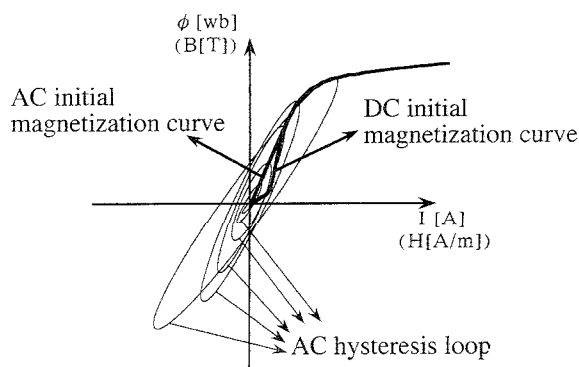


Fig. 9 AC hysteresis loop, AC and DC initial magnetization curves

強磁性体を交流で磁化させたときのヒステリシス曲線はFig.9の様に考えられる。強磁性体は交流磁化の場合、表皮効果や渦電流の影響から、材料内の各部分で異なる磁化を持つ。その結果計測されたヒステリシスループは長円形に近い形を描く。このループの最大

磁化時をプロットしていくと、Fig.7及びFig.9に示す様に、直流磁化曲線に比べ、初透磁率領域が高い値を示すことが明らかとなった。そこで交流問題の解析には、この交流磁化曲線の適用が有用であると考えられる。

III 交流漏洩磁束評価

3.1 実験及び解析条件

交流磁化曲線 (Fig.7) を解析に使用し、鋼管の外表面き裂による交流漏洩磁束の解析を行い、同じモデルでの検証実験により交流磁化曲線の適用性を検討した。そのモデル図をFig.10に示す。鋼管外側に80mmの間隔をおいた2つの励磁コイルを巻き、交流で励磁させ、き裂から漏洩する磁束を差動型検出コイルで出力電圧 (ピーク値) として検出し、交流漏洩磁束の評価を行った。なお、本研究での数値解析は軸対称有限要素法を用いているため、き裂は鋼管外側の周方向に一定の大きさのスリット状として設け、実験および解析とも同型モデルでの評価を行った。き裂の幅は1.5mm、深さは0.5mm一定とし、鋼管の管厚は3.1mmで、長さは400mm、鋼管外径は34mmとした。また、交流漏洩磁束の差動型コイルの巻数は各30ターンとし、2つの励磁コイル (各160ターン) と差動型検出コイルの距離をそれぞれ40mm一定に保ったまま、鋼管表面を0.5mmピッチで平行移動させ、漏洩磁束を出力電圧として検出した。また周波数は2kHz一定とし、励磁電流を0.1、0.2、0.4Aと変化させた。鋼管と検出コイルのリフトオフは0.4mmとして実験及び解析を行った。

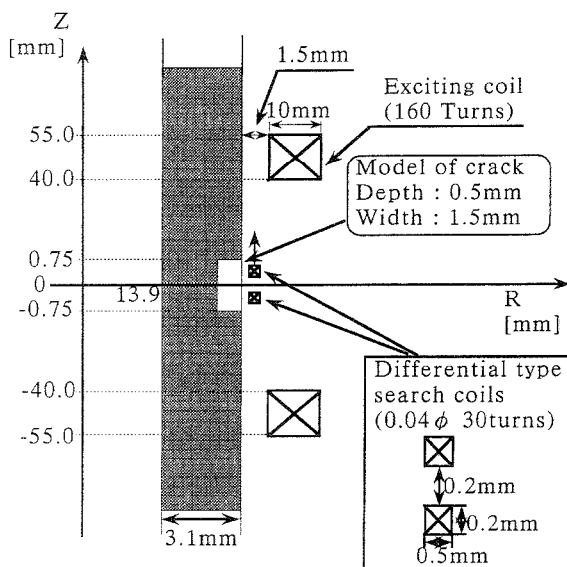


Fig.10 Model of verification experiment and numerical analysis

3.2 実験及び解析結果

励磁電流0.1、0.2A時における実験及び解析結果をFig.11、Fig.12に示す。比較のために、直流磁化曲線使用時の解析結果も合わせて表示した。両者とも、実効的な交流磁化曲線を使用した解析結果の方が直流磁化曲線使用時より、実験値とよく合っていることが理解できる。これは、未飽和磁化領域の実効的な交流磁気特性が正しく評価されているためだと考えられる。

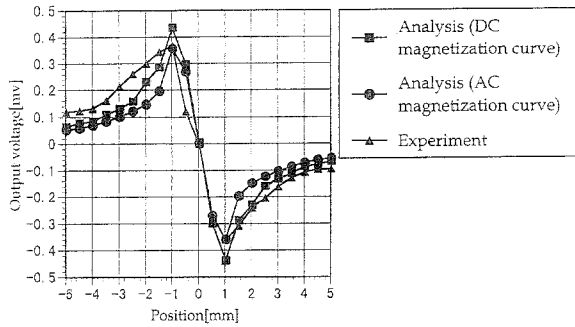


Fig.11 The locus of output voltage when search coils muve (2kHz, 0.1A)

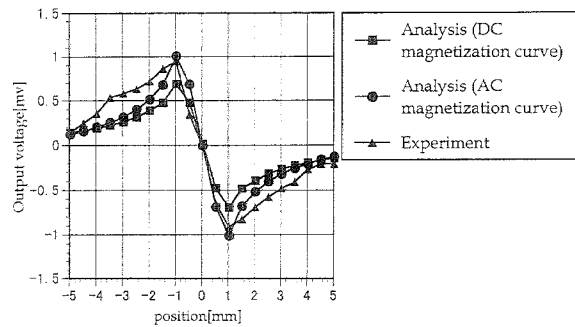


Fig.12 The locus of output voltage when search coils muve (2kHz, 0.2A)

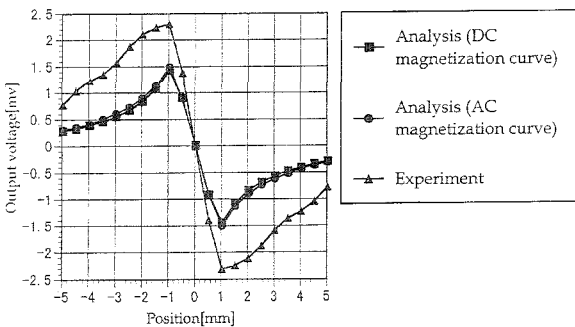


Fig.13 The locus of output voltage when search coils muve (2kHz, 0.4A)

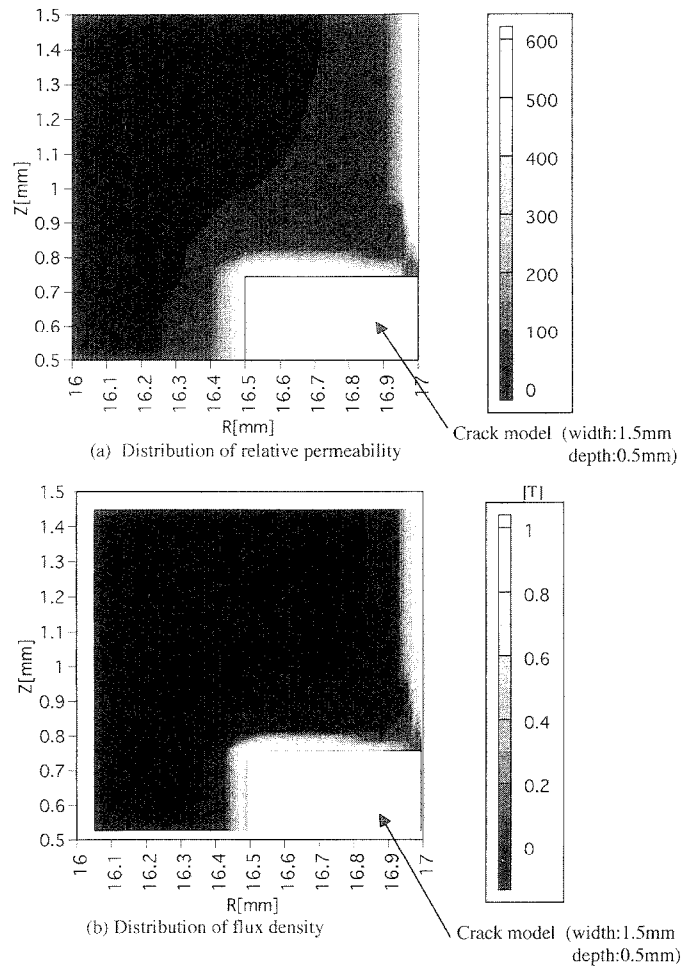


Fig.14 Distribution of B and μ_r in material (2kHz 0.2A)

しかしFig.13に示す様に、励磁電流をさらに上げ0.4Aにすると、交流磁化曲線使用時、直流磁化曲線使用時共に、実験値より小さい値となる。鋼材の磁化領域が磁気飽和に近づくにつれ、磁束密度波形に歪みが生じ、出力電圧波形もそれに伴う歪み波形が現れる。特に、材料表層にき裂が存在すると、磁化分布や透磁率は局所的に変化するため、透磁率の非線形性が大きく影響を及ぼし、歪みの影響が大きく現れるため、解析値と合わなくなると考えられる。次にFig.14に、Fig.12の実験値及び解析値が共に合っている磁化領域(2kHz,0.2A時)の、き裂近傍における材料内部の比透磁率と磁束密度分布を示す。周波数が高いため、磁束は表皮効果により材料表層に集中しており、その最も高い領域の透磁率は最大透磁率を示している (Fig.7参照)。この磁化領域での解析値は、実験値と合うことから、交流磁化曲線を適用した等価正弦波交流非線形解析法を使用した場合、最大透磁率付近の磁化領域までの評価が可能であることが理解できる。

IV まとめ

交流漏洩磁束探傷試験法は強磁性体の非線形領域を使用しているため、現象解明は理解しにくいものとなっている。この現象解明には数値解析が有用であるが、交流磁気特性の評価および非線形解析手法の確立等の課題が多く存在する。本研究では、実効的な交流磁気特性を求め、また解析手法としては簡易的な等価正弦波法を使用して、その有用性を適用範囲も含めて検討した。その結果を以下まとめて示す。

- (1) 2重鋼管システムを作成して、強磁性体鋼管内部に侵入する磁束を測定し、これと等価正弦波非線形数値解析を比較して、未飽和磁化領域における交流の磁化特性を求めることができた。これにより、強磁性体内の磁束分布の非線形解析評価が正確に行えるようになった。
- (2) 数値解析と検証実験により、未飽和磁化領域（最大透磁率付近まで）であれば、交流漏洩磁束探傷試験法の現象解明に、交流磁化特性を使用した等価正弦波非線形数値解析が適用可能であることが判った。
- (3) 求めた交流磁化特性は、渦電流を考慮した j の法による非線形解析により導きだした曲線であり、渦電流による磁化曲線の傾変化は無視できる。そのため、基本的に周波数には依存しない実効的な交流磁化曲線であると考えられる。しかし、その厳密な適用周波数範囲等については未検討であるため、今後の検討課題としたい。

[参考文献]

- (1) 後藤雄治、橋本光男：交流漏洩磁束法の磁気特性評価、日本AEM学会、MAGDAコンファレンス講演論文集、pp.115-120、(1998)
- (2) 後藤雄治、橋本光男：軸対称モデルの交流漏洩磁束探傷特性、(社)日本非破壊検査協会、春季大会講演概要集、pp.337-340、(1998)
- (3) 後藤雄治、橋本光男：交流漏洩磁束探傷法の磁気特性評価とシミュレーション、電気学会、平成10年マグネティックス研究会、pp.53-58、(1998)
- (4) 橋本光男、後藤雄治：交流漏洩磁束探傷のシミュレーション、日本機械学会第76期全国大会講演論文集、pp.353-354、(1998)
- (5) 中田高義、高橋則雄：電気工学の有限要素法（第2版）、森北出版、(1982)
- (6) 中田高義、河瀬順洋：有限要素法による非線形過渡磁界解析、電気学会論文誌B、pp.56-62、

(1983)

- (7) 後藤雄治、橋本光男：交流漏洩磁束探傷試験の近似的数値解析法の検討、非破壊検査、第46巻11号、pp.815-820、(1997)
- (8) Y.Gotoh and M.Hashimoto：Approximate Numerical Analysis Method of Alternating Magnetic Flux Leakage Testing International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems、V.Kose and J.Sievert(Eds.) IOS Press. pp.193-196、(1998)
- (9) 後藤雄治、橋本光男：強磁性体の交流磁気特性評価と漏洩磁束探傷法への適用、職業能力開発研究発表講演会予稿集、pp.83-84、(1998)
- (10) 後藤雄治、橋本光男：交流漏洩磁束探傷試験法の数値解析シミュレーション、岡山職業能力開発短期大学校研究発表会、pp.9-10、(1998)
- (11) M.Hashimoto, Y.Gotoh, Y.Kusuhara and D.Kosaka: Evaluation of Approximate Non-Linear Numerical Analysis using Equivalent Sine Wave for Alternating Magnetic Flux Leakage Testing、International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems、ISEM PAVIA in ITALY、MPA2、pp.46、(1999)
- (12) 橋本光男、後藤雄治：交流漏洩磁束法のシミュレーション、第4回神奈川県非破壊試験技術交流会・技術研究会、pp.18-23、(1999)
- (13) 後藤雄治、橋本光男：鋼管表面検査に適用する交流漏洩磁束探傷試験法の等価正弦波交流非線形解析法の実験による評価、非破壊検査、第48巻11号、(1999)、掲載決定