

高周波焼入れ深さの電磁氣的検査法における磁化特性のばらつきを考慮した数値解析評価

岡山職業能力開発短期大学校 電子技術科¹⁾ 後藤雄治
 岡山職業能力開発短期大学校 生産技術科²⁾ 野村龍司
 岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 技術開発部)³⁾ 田中 穰
 岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 代表取締役)⁴⁾ 矢野博明
 岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 技術開発部)⁵⁾ 榊井憲嗣

Numerical analysis evaluation with consideration to the variation in the magnetization characteristic of the surface hardened depth electromagnetism inspecting method

Yuji GOTOH¹⁾, Ryuji NOMURA²⁾,
 Minoru TANAKA³⁾, Hiroaki YANO⁴⁾, Noritugu MASUI⁵⁾

要約 本稿は、平成11年度より鉄鋼及び機械加工業等を中心とした岡山県内異業種企業で構成された玉島工業会に対し、能力開発セミナーとして実施し、平成12年度のF方式に展開した技術支援内容をまとめたものである。なお、本事業成果内容は、平成12年5月に(株)日本非破壊検査協会より「新進賞」を受賞、ならびに平成13年1月に全国総合技能展より「雇用能力開発機構理事長賞」を受賞したものである。

近年、鉄鋼関連企業では製品の品質追求は高く、特に鋼材の焼入れ深さ測定は重要視されつつある。現在、この評価は鋼材の断面強度を測定する破壊検査が主流であるが、生産性の高効率化追求に伴い、非破壊的に検査する技術の要望が高まりつつある。そこで我々は、これらの要望に答えるべく、高速非接触で深さ検査が可能である、交流磁場を使用した、電磁氣的測定法の検討を試みた。

鋼材焼入れ後のマルテンサイトと、元組織の初期磁化曲線と導電率は共に差が生じる。これらの差は高周波焼入れ材の場合、低周波交流磁場下において、焼入れ深さ変化に伴い、鋼材表面に配置した検出コイルの出力電圧振幅値の変化を生む。しかし、焼入れ鋼材等の強磁性体は、未飽和磁化領域では材料中における透磁率のばらつきの影響からノイズが発生し、測定誤差の原因となる等の問題がある。それゆえ、一般的に電磁氣的検査法は信頼性に乏しいとの評価を得てきた。そこで本セミナーでは各硬度別におけるマルテンサイトの未飽和磁化領域での透磁率のばらつきを実験により評価した。さらに、本電磁氣的検査法において、材料内部の透磁率の不均一性が検査精度に与える影響を数値解析により評価を行った。その結果、高周波焼入れ鋼材を低周波で磁化させた場合、焼入れ領域の透磁率は元組織領域に比べてばらつきは大きいものの、全体的な値が低いと、磁束は元組織領域に集中する事が分かった。それゆえ、検出コイルの出力電圧は、焼入れ領域の透磁率の不均一性による影響は少なく、本検査手法により信頼性ある焼入れ深さ測定が可能であることが分かった。

I. はじめに

自動車部品の多くは高周波焼入れ処理が施されている。高周波焼入れ材は、強度保障のため硬化層の深さ評価が必要不可欠である。この深さを非破壊的に測定する手法は数多く報告されているが、検査装置の大型化や装置コスト、測定時間等の問題から、まだ普及には至っておらず、現状では焼入れ材を部分的に切断し、断面強度を各種硬度計で測定する破壊検査が主流となっている。しかし近年では短時間でかつ非破壊での簡便な測定需要が高まっている。そこで我々は未飽和磁化領域における交流磁場を利用し、高速非接触で検査が行える測定手法の検討を試みた。

鋼材焼入れ後のマルテンサイトと、元組織の初期磁化曲線と導電率は共に差が生じる。高周波焼入れ材の場合、これらの差は低周波交流磁場下で、焼入れ深さ変化に伴い、鋼材表面に配置した検出コイルの出力電圧振幅値に変化を生む^[1-4]。一方、強磁性体は磁気特性に不均一性を持ち、未飽和磁化領域では出力電圧等のノイズの原因を生む^[5,6]。

そこで本稿では各硬度別におけるマルテンサイトの未飽和磁化領域における磁気特性のばらつきを実験により評価し、磁気特性の不均一性を考慮した数値解析により、低周波交流磁場を使用した高周波焼入れ深さ非破壊検査手法の検討を行った。

2. 材料評価

本稿では試験鋼材を S45C と限定し、焼入れによる硬度変化に伴った導電率と初期磁化特性変化の評価、並びに焼入れ鋼材の磁気特性のばらつき測定を行った。

2. 1 S45C 鋼材のマルテンサイト硬度評価

Fig.1に高周波焼入れにより深さ1, 2, 3 mmまで焼入れを施した円柱形鋼材(φ30×150)のマルテンサイト硬度分布を示す。これは高周波焼入れ鋼材を輪切りにし、表面より0.25mmピッチでピッカース硬度計により測定した硬度結果を示している。一般的に焼入れ深さは Hv450を境界としている。この結果から S45C の高周波焼入れ鋼材の場合、マルテンサイト部の硬度は表面から約 Hv700を維持し、それ以降急激に硬度が減衰し、元組織の硬度 Hv245に到達することが理解できる。例えば焼入れ深さ3 mm時では、表面より深さ約2 mmまで Hv700を維持し、それ以降約1.5mm間で急激に硬度が減衰し、表面より深さ約3.5mm付近から Hv245を維持していることが分かる。

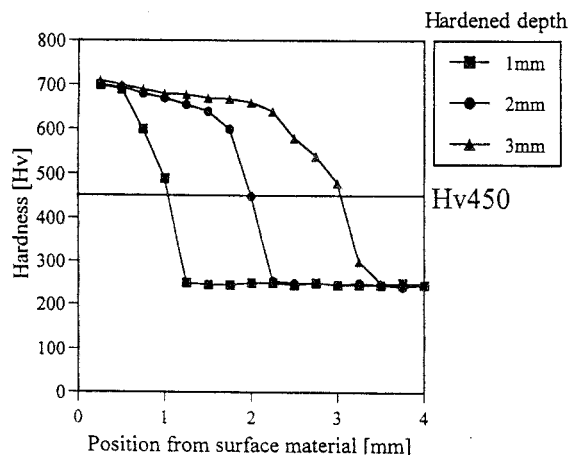


Fig.1 Hardness of surface hardened material (S45C steel)

2. 2 各硬度における導電率評価

以上の結果より本稿では、焼入れ領域の硬度を Hv700とし、焼入れ領域から元組織領域への減衰領域を Hv570および Hv430と仮定して、鋼材全てに無心焼入れを施した棒材(φ9×210mm)3本と、元組織領域を模擬するため、同形状の棒材に焼なまし処理を施した鋼材(Hv245)の計4本を作成した。なお各硬度別における無心焼入れ材の作成は、電気炉で900度まで材料全体を加熱し、急冷温度を変化させる事により各硬度の値を得た。次に、これら4本の鋼材を、ダブルブリッジ低抵抗測定回路により、それぞれの導電率の測定を行った。測定結果を Fig.2にそれぞれ示す。硬度が増すに伴い、導電率は減少傾向を示している。例えば硬度 Hv700鋼材では、元組織鋼材に比べ約25%導電率が減少していることが理解できる。

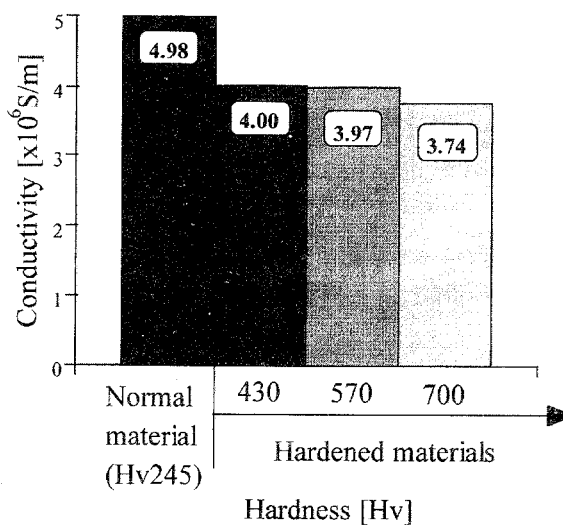


Fig.2 Conductivity of hardened and normal materials (S45C steel)

2. 3 各硬度における磁化特性およびばらつき評価

2. 3. 1 磁化特性測定装置

本稿では、各硬度における S45C 鋼材の初磁化特性および磁化特性のばらつきを評価するため、磁極間隔可変型電磁石を励磁装置として用いる磁化特性測定装置^[7]の開発を行った。その装置の外観図を Fig.3(a)、(b)に示す。これは試験鋼材をヨーク材で隙間無く挟み、軸方向に一樣に磁化させる構造である。試験鋼材に直接巻いたコイル (B コイル 200 ターン) をフラックスメータ (電子磁気工業(株)製、FM-3001P) に接続し、磁束密度 B を測定した。また軸方向の空間磁場 H は Gauss メータのホールプローブ (電子磁気工業(株)製、T-401、トランスバース型) を測定面が軸方向を向くように、B コイルに密着させるかたちで配置させ、得られた値から次式を用いて H を測定した。

$$H = \frac{B_G \times 10^{-4}}{\mu_0 \times \mu_r} \quad (1)$$

H: 空間磁場 [A/m]、BG: Gauss メータで得られた値 [Gauss]

μ_0 : 真空の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$)、 μ_r : 比透磁率 (=1)

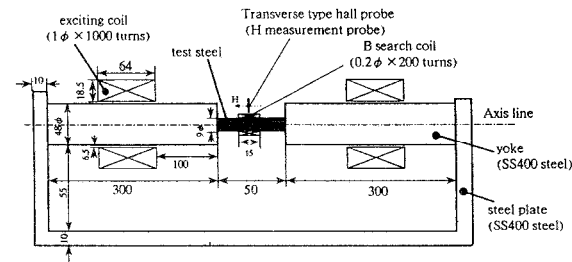
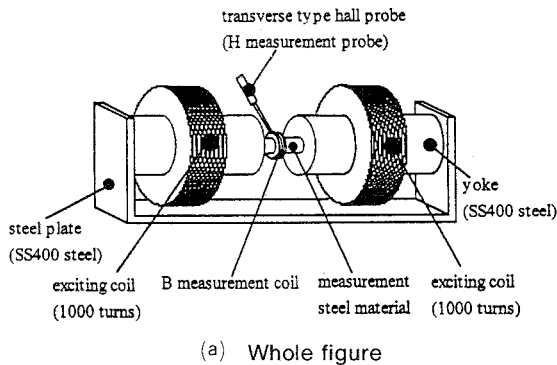


Fig.3 Magnetization measurement model

また、この測定装置の検証を行うため、本稿では同ロットで作成した円柱形状 ($\phi 9 \times 50\text{mm}$) とリング状 (外径 120mm、内径 100mm、断面積 $6.0 \times 10^{-5}\text{m}^2$) の S45C 冷間圧延鋼を用意し、それぞれの初磁化曲線を求め、比較を行った。円柱形鋼材は本測定装置で測定を行い、リング鋼は 0.65 ϕ 銅線の 2 次コイル (B 測定コイル)

を一層で全周に 435 ターン巻き、フラックスメータに接続して、磁束密度 B を測定し、また B 測定コイルの上に 0.65 ϕ 銅線の 1 次コイル (H 測定コイル) を一層で同じく全周に 435 ターン巻き、低周波電源に接続し初期磁化曲線を求めた。なお、H の値は次式を用いて求めた。

$$H = \frac{nI}{l} \quad (2)$$

H: 空間磁場 [A/m]、n: 巻き数 (435 ターン)

I: 励磁電流 [A]、l: 磁路 [m]

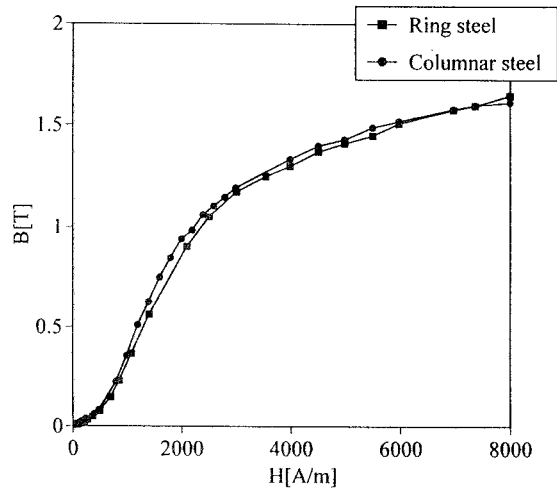
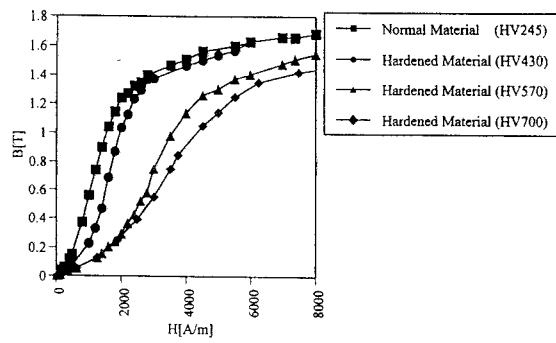


Fig.4 Effect of ring and columnar steel on B—H curve

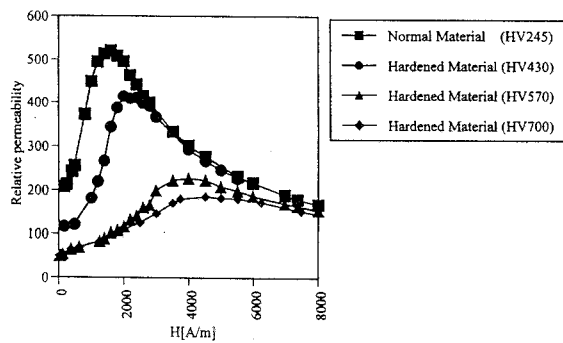
また両者とも励磁周波数は 0.1Hz の正弦波を用いた。得られた結果を Fig.4 に示す。最大で 10% 程度の誤差が見られたが、これは測定領域および試験材形状の相違によるばらつきの範囲内と考えられ、全体としてはほぼ一致する結果を得た。

2. 3. 2 各硬度における初期磁化特性

Fig.3 の初期磁化特性測定装置を使用し、S45C 鋼材の各硬度における初期磁化特性の測定を行った。2.2 節同様、測定した鋼材は、円柱形状 ($\phi 9 \times 50\text{mm}$) の S45C 鋼材全てに、硬度 Hv700、Hv570、Hv430 の無心焼入れを施した棒材と、焼なまし処理を行った Hv245 の鋼材 4 本を使用した。測定結果を Fig.5(a)、(b) にそれぞれ示す。Fig.5(a) は B-H 曲線を、Fig.5(b) は H- μ_r 曲線を示している。硬度が増すにつれ、透磁率が減少する事が理解できる。例えば、硬度 Hv700 では、焼なまし材に比べ約 65% 最大比透磁率が低くなっていることが分かる。



(a) B-H curve



(b) H- μ_r curve

Fig.5 Magnetization curves of hardened and normal materials(S45C steel)

2. 3. 3 各硬度における磁化特性のばらつき

本稿では Fig.3の初期磁化特性測定装置を使用し、各硬度における磁気特性の不均一性を評価した。測定試料はそれぞれ硬度 Hv245、Hv430、Hv570、Hv700の ϕ 9円柱形鋼材で、長さを180mmとした。測定はBコイル(ϕ 0.2、幅4mm、50ターン)とホールプローブの位置を同じとし、また外部磁場Hの値は一定としたまま、試験鋼材軸方向にBコイルおよびホールプローブを2mmピッチで平行移動させ、各点における磁束密度を測定した。外観図を Fig.6に示す。測定範囲は、試験鋼材の長さ方向の中心点より ± 20 mm(2mmピッチ計21点)の測定を行った。各硬度における測定結果を Fig.7~10にそれぞれ示す。なお、これらの結果の縦軸は、各点における測定値から平均値を引き、さらにその値を平均値で割った割合を示している。Fig.7の焼なまし材では、外部磁場Hが300A/mでは、最大約7%のばらつきがあるが、500A/mまで磁場を増やすと2%程度まで低減されることが分かった。次に Fig.8の硬度Hv430の焼入れ材では、外部磁場Hが500A/mでは、最大約15%のばらつきがあるが、1000A/mまで磁場を増やすと、約3%まで低減されることが理解できた。Fig.9の硬度Hv570の焼入れ材

では、外部磁場Hが500A/mでは、最大約28%のばらつきが計測されたが、2000A/mまで磁場を増やすと、ほぼ均一になることが分かった。最後にFig.10の硬度Hv700の焼入れ材では、外部磁場Hが500A/mでは、最大28%のばらつきがあるが、2000A/mまで磁場を増やすと、ほぼ均一になることが計測された。以上の結果から、焼なまし材は外部磁場Hが500A/m程度で、Hv430の焼入れ材では1000A/m程度で磁化特性のばらつきが低減されるが、硬度Hv570以上の焼入れ材では2000A/m程度まで磁化させなければ磁化特性のばらつきは低減されず、またそのばらつきは最大で約28%生じることも合わせて理解できた。これらのばらつきは、磁気測定では出力信号のノイズの原因となりうることが予想される。

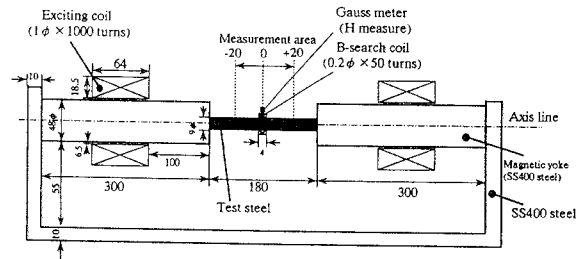


Fig.6 Measure model of magnetic noise

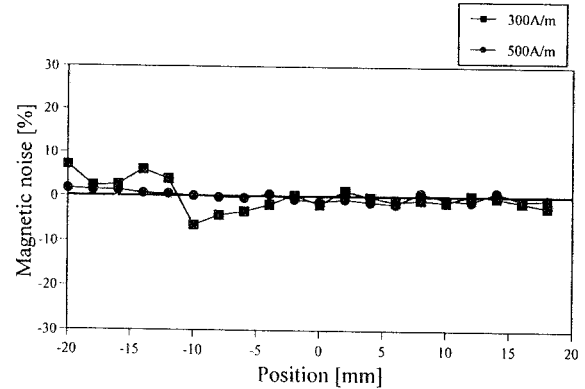


Fig.7 Magnetic noise (Hv245, normal S45C steel)

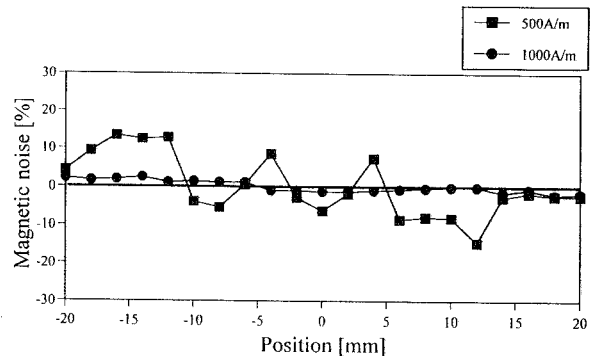


Fig.8 Magnetic noise (Hv430, hardened material S45C steel)

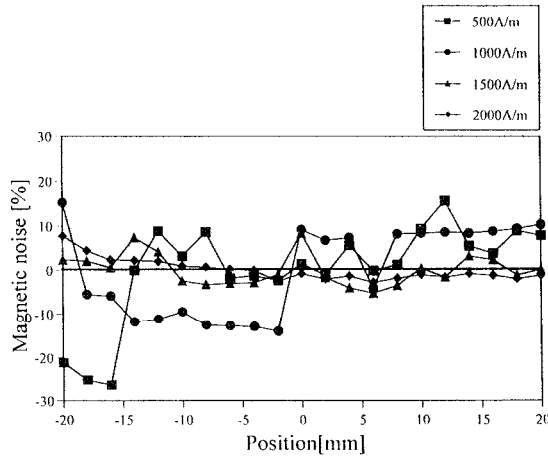


Fig.9 Magnetic noise
(Hv570, hardened material S45C steel)

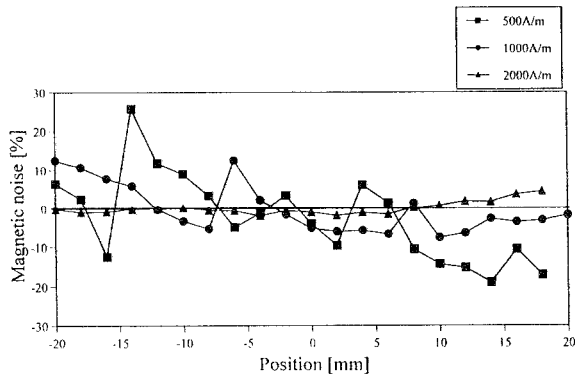


Fig.10 Magnetic noise
(Hv700, hardened material S45C steel)

3. 交流非線形解析

本稿では低周波交流磁場を使用し、非接触で高周波焼入れ深さを評価できる手法の検討を行った。測定プローブはヘルムホルツ型励磁コイルと、2つの励磁コイルの間に検出コイルを配置したモデルとした。このプローブ内に非接触で円柱形高周波焼入れ材を挿入した時の検出コイルに得られる出力電圧の評価を、等価正弦波交流非線形解析を用いて行なった。解析および実験モデル図を Fig.11 に示す。交流励磁周波数は、渦電流の浸透深さを考慮に入れて20Hzの低周波数を使用した。励磁電流の与え方は、解析および実験ともに、検出コイルと試験鋼材の間に配置したコイル（200ターン）により、空間磁場Hを測定し、この値を基準に調節を行った。また非線形解析には2章で測定した各硬度のS45C鋼材の導電率と初期磁化曲線を使用し、焼入れ深さが出力電圧の振幅に及ぼす影響の検討を行った。

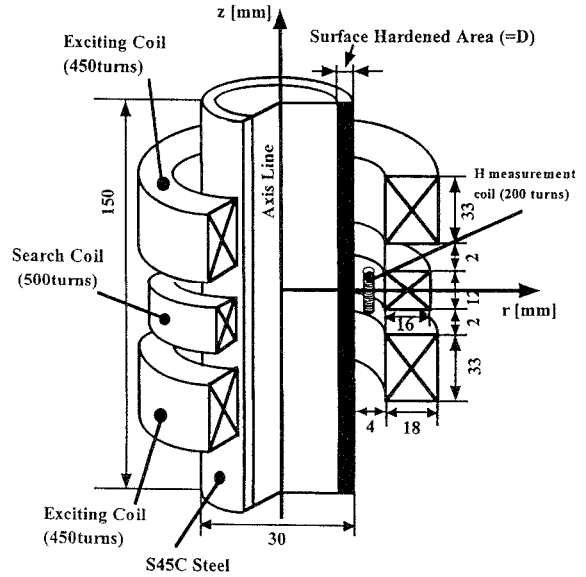


Fig.11 Model of experiment and analysis

3. 1 等価正弦波交流非線形解析法

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非線形性のため磁束波形は歪むため、これを解析で評価するには非線形磁気特性を考慮してステップ・バイ・ステップ法で解く必要がある^[8-11]。しかし、この解析手法は多くの計算時間が必要となる。一方、交流励磁において、材料内部の透磁率が最大透磁率までの未飽和磁化領域では磁束波形は歪まず、正弦波として扱えることが確かめられている。そこで本稿では、計算時間の短縮や解析の容易性を考慮し、未飽和磁化領域での交流非線形解析手法として、等価正弦波交流非線形数値解析法^[12-17]の適用を行った。この解析手法は、複素数近似解析法(j ω 法)を使用し、非線形交流磁場で歪波形として現れる材料内の磁束波形を振幅の等しい正弦波に近似する、等価正弦波を使用した近似的交流非線形解析法である。その支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{rot } A) = J_0 - J_e \quad (3)$$

$$\text{div } J_e = 0 \quad (4)$$

なお A 、 J_0 、 J_e 、 ν は、それぞれ磁気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。渦電流密度 J_e は、 $J_e = -j\omega \sigma A$ であり、ここでの ω 、 σ は、角周波数及び、導電率である。この解析手法は(3)式の磁気抵抗率 ν を非線形としている。また解析では、鋼材を等方性磁性材料として取り扱っている。

3. 2 解析条件

3. 2. 1 焼入れ領域条件

Fig.1の硬度分布から、S45C 鋼材の高周波焼入れでは、材料表面から硬度 Hv700を維持し、その後ある深さで急激に硬度が低下し、元組織領域の Hv245となることわかる。しかし焼入れ硬度は Hv700から Hv245まで急激に減衰するものの、その中間硬度領域が数mm程度存在することも理解できる。一般的に高周波焼入れ深さは Hv450の値を境として判断しているため、Hv700を維持する領域の深さが焼入れ深さとはならない。そこで、本解析では Hv700を維持する領域から急激に硬度が減衰する中間領域を、Hv450を境にそれより硬度が高く、Hv700未満の領域は Hv570とし、また Hv450より硬度が低く Hv245以上の硬度をもつ中間領域は Hv430と仮定し、硬度が Hv700から Hv245まで減衰する中間領域を2層に分け、評価を試みた。具体的にはFig.12に示す様に、焼入れ深さ3mmの場合、解析条件として表面より2mmまでがHv700、2mmから3mmまでの層は Hv570、3mmから3.5mmまでの層は Hv430、そしてそれ以上深い層は全て Hv245の層と仮定し、それぞれの硬度の初期磁化曲線と導電率を初期条件として与え非線形解析を行うこととした。解析モデル(1/4領域)を Fig.13に示す。

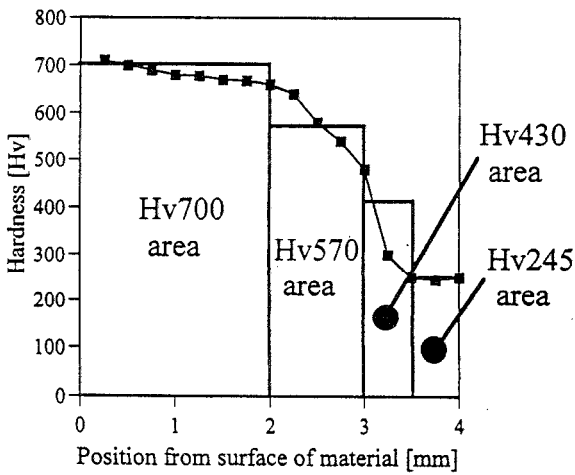


Fig.12 Analysis area (hardened depth: 3mm)

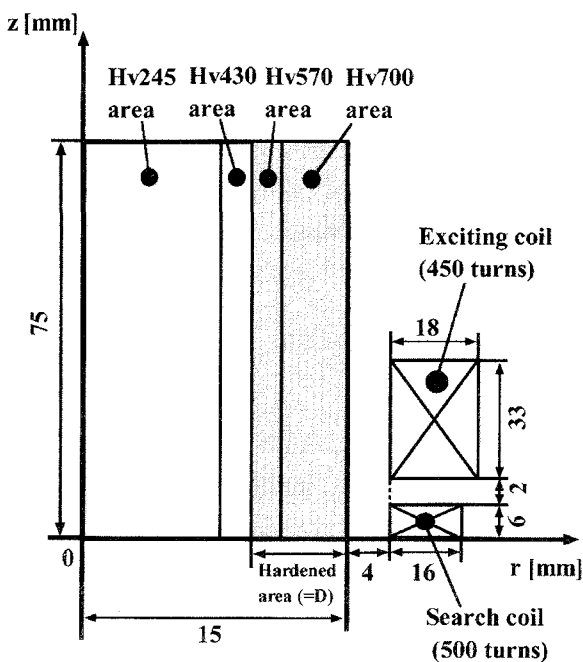


Fig.13 Model of analysis (1/4 area)

域は Hv430と仮定し、硬度が Hv700から Hv245まで減衰する中間領域を2層に分け、評価を試みた。具体的にはFig.12に示す様に、焼入れ深さ3mmの場合、解析条件として表面より2mmまでがHv700、2mmから3mmまでの層は Hv570、3mmから3.5mmまでの層は Hv430、そしてそれ以上深い層は全て Hv245の層と仮定し、それぞれの硬度の初期磁化曲線と導電率を初期条件として与え非線形解析を行うこととした。解析モデル(1/4領域)を Fig.13に示す。

3. 2. 2 各硬度における初期磁化曲線

鋼材等の強磁性体は材料内の透磁率の不均一性を持ち、各種磁気計測においてはノイズや測定誤差の原因となる。本稿ではこのノイズの原因となる磁化特性のばらつきを2.3.3の Fig.7~10において、各硬度ごとに評価した。この結果を元に、本解析では各硬度における磁化特性のばらつきを与え解析を行った。Hv700の鋼材は Fig.10の結果から、外部磁場 H が500A/m では ±28%の透磁率のばらつきがあり、2000A/m 以上まで磁場を増加させなければ透磁率のばらつきは無くならない。そこで、Hv700領域での透磁率のばらつきは最大で ±28%とし、H=2000A/m 以上で均一となる B-H 曲線を20曲線作成した。Fig.14は、そのうちの +28%、0%、-28%の3曲線を例として示している。これらの曲線を有限要素法の Hv700分割領域内にランダムに与え、解析的に透磁率のばらつきを模擬した。同様に、Hv570領域では、2000A/m まで最大 ±28%、Hv430領域では、1000A/m まで最大 ±15%、Hv245領域では、500A/m まで最大 ±8%の範囲内でばらつく各 B-H 曲線を作成し、各硬度別の分割領域内にラン

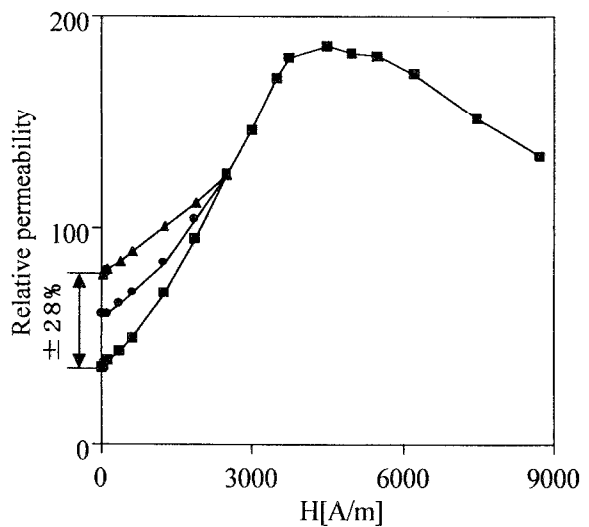


Fig.14 Distribution of relative permeability for analysis (Hv 700, S45C steel)

ダムに与え、初期透磁率のばらつきを模擬した。以上の解析条件下で、周波数および印加磁場を一定としたとき、焼入れ深さ変化が出力電圧の振幅値に及ぼす影響の評価を行った。

3. 3 解析結果および考察

Fig.1の硬度分布を元に、鋼材内を4層に分け、焼入れ深さを3mmとし、交流非線形解析を行った。材料内部の比透磁率および磁束密度分布の解析結果をFig.15(a), (b)にそれぞれ示す。これは、焼入れ鋼材とプローブの間の空間磁場 H が2000A/m 時の結果を示している。Fig.15(a)の比透磁率解析結果から、Hv245層の値は他の Hv430、Hv570および Hv700の各3層に比べ高く、またこの層の表面は表皮効果の影響から最大比透磁率に近づいており、透磁率のばらつきも低減していることがわかる。それに対し、それ以外の3層では Hv245層に対し、比透磁率は低いことが分かる。そのため、Fig.15(b)の磁束密度分布では透磁率の高い Hv245層に磁束が集中している様子が合わせて理解で

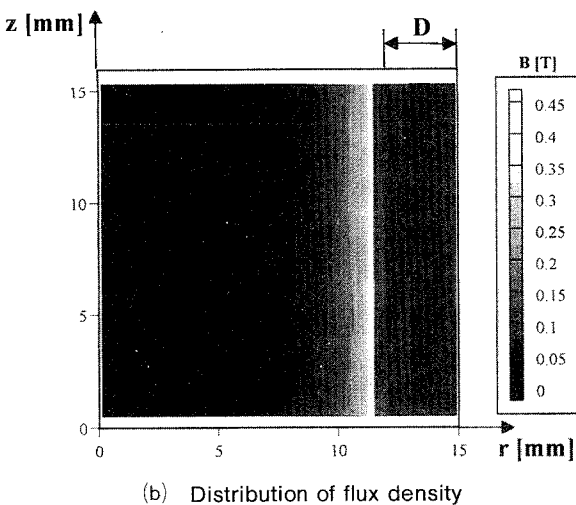
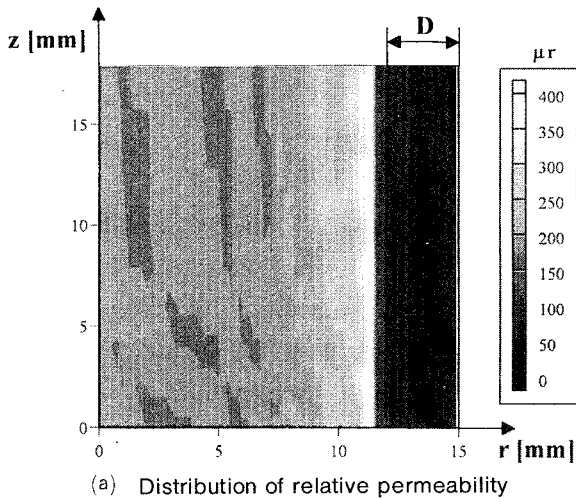


Fig.15 Distribution of flux and relative permeability (D=3mm, 20Hz, H=2000A/m)

きる。次に、この状態における $z=0$ ライン上の比透磁率および磁束密度の線分布を Fig.16(a), (b)にそれぞれ示す。Fig.16(a)の比透磁率線分布では、Hv245層内で最も大きな透磁率のばらつきが現れているが、Hv245層内の表層に近づくに伴い、ばらつきは低減されていることが理解できる。その他の3層では、透磁率のばらつきはあるものの、Hv245層に比べ絶対的な透磁率の値が小さいため、全体としては大きなばらつきにはならない。次に、Fig.16(b)の磁束密度結果では比透磁率分布同様、透磁率の高い領域で最も高い値が得られていることが理解できる。磁束密度は透磁率の値に比例して高くなるが、表皮効果の影響から、鋼材中心部までは磁束が侵入しない。そのため、鋼材表層

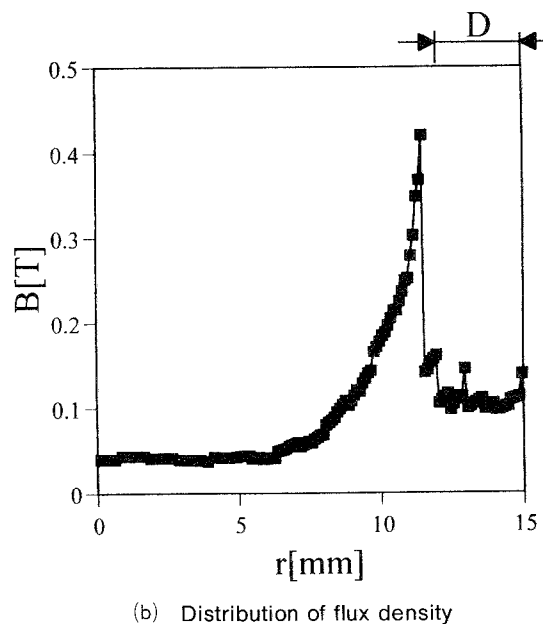
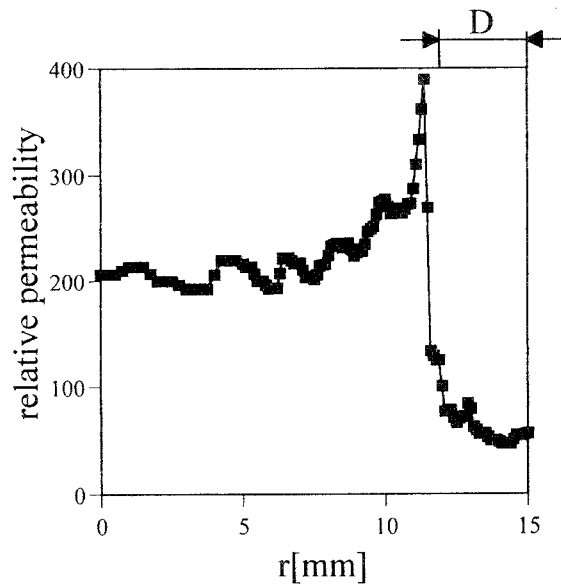


Fig.16 The relative permeability and flux distribution on a line (20Hz, H=2000A/m, $z=0$ line)

より鋼材中心部の方が透磁率は高いが磁束密度は表層の方が中心部より高い値を示していることが分かる。よって、鋼材中心部の磁束密度分布は透磁率のばらつきにはほとんど影響されず、比透磁率分布ほどばらつかないことが合わせて理解できる。

これらの結果から、焼入れ領域は元組織領域に比べ磁化特性のばらつきは大きい(Fig.7~10参照)、透磁率が低い場合、材料内部に侵入する磁束は元組織領域に集中し、焼入れ領域の透磁率のばらつきにはほとんど影響されないことが考えられる。この現象を明らかにするため、励磁-検出コイル間隔を一定に保ったまま、プローブ全体を円柱形鋼材軸方向(z軸方向)に2mmピッチで平行移動した際の、各位置における出力電圧を求め、磁化特性の不均一性に伴う出力電圧のばらつきを求めた。解析および実験結果をFig.17(a)、(b)にそれぞれ示す。なお、これらの結果の縦軸は、各点における出力電圧値から平均値を引き、さらにその値を平均値で割った割合を示している。Fig.17(a)の解析結果から、空間磁場Hが100A/m時では、各位置における透磁率の不均一性を作る出力電圧のばらつきは約±3%ほどあるが、Hの値を上げるに伴いばらつき

は減少する様子が理解できる。またFig.17(b)の実験結果も同様の傾向を示し、外部磁場Hが5000A/m時ではばらつきはほとんど現れていない結果を得た。解析は、軸対称モデルで鋼材を等方性磁性材料として取り扱っている関係上、外部磁場Hの変化に伴う磁化の絶対的な大きさの強弱を模擬している。それゆえ、解析結果では外部磁場Hが大きくなるにつれて、そのばらつきの振幅値が小さくなるが、全体的な波形の形に変化は見られない。それに対して、実験結果では外部磁場の大きさにより、全体的な波形が変化する結果を得ている。これは、三次元的な磁区の移動や、磁化方向等が微妙に変化する影響だと考えられる。しかし、そのばらつきの割合や、外部磁場の増加に伴ってばらつきが減少していく過程は、解析と同じ傾向を示しており、透磁率のばらつきを考慮した本解析手法の有用性を示す結果を得たと考えられる。

これらの結果から、出力電圧のばらつきは、焼入れ領域に比べ、元組織領域の透磁率の不均一性が支配的となるため、外部磁場が100A/mと小さい場合でも出力電圧のばらつく割合は最大で±3%程度と小さく、さらにHを5000A/mまで上げれば、透磁率の不均一性を無視した検査が可能であることが分かった。

4. 検証実験および解析との比較

本稿では、Fig.11のモデルに対し検証実験および解析値との比較を行った。Fig.11のモデルに対し、予め励磁電流値を調節し、試験鋼材とプローブの検出コイルとの間に設置した外部磁場検出コイルにより、空間磁場Hの値が5000A/mまで増加させても、プローブ検出コイルに得られる出力電圧波形に歪みが発生しない、未飽和磁化領域であることを確認した上で、焼入れ深さ変化が出力電圧波形の振幅値に及ぼす影響を評価した。実験にはφ30×150mmの円柱形S45C鋼材で、鋼材表面より、深さ0、1、2、3、4、5mmで高周波焼入れを施した試験片6本を作成し評価を行った。H=500および2000A/m時の実験および解析結果をFig.18(a)、(b)にそれぞれ示す。どの条件下でも焼入れ深さが深くなるにつれて出力電圧は減少傾向を示していることが理解できる。材料内部に侵入する磁束密度は透磁率の高い元組織領域に集中する。そのため、焼入れ深さが深くなるにつれ、材料表面から透磁率の低い領域が増し、透磁率の高い元組織領域が減少するため、出力電圧は低下すると考察できる。次に解析値との比較であるが、H=2000A/m時で解析値の方が最大約8%低く評価されているものの、H=500A/mで

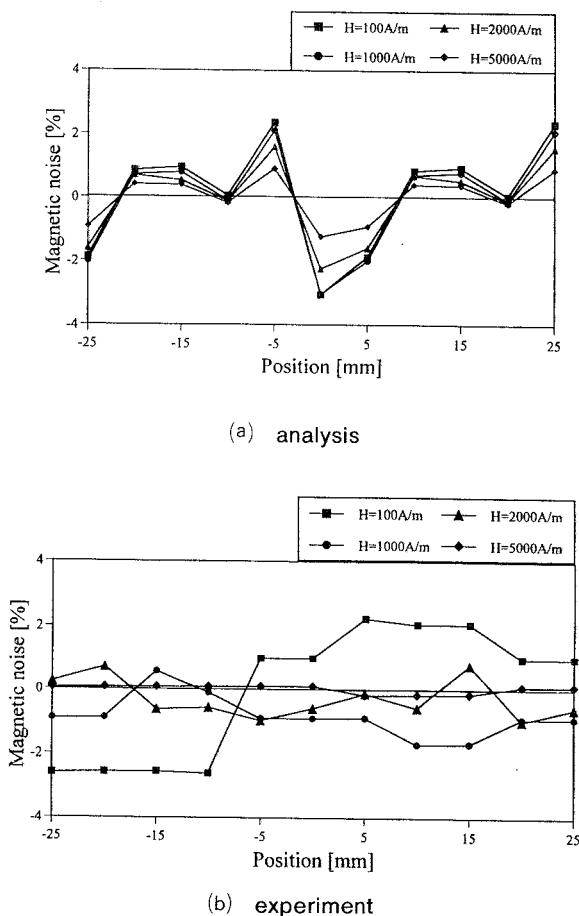
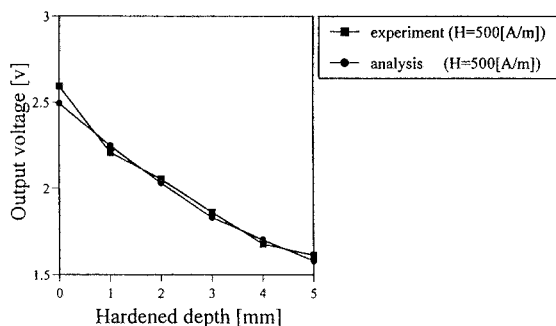
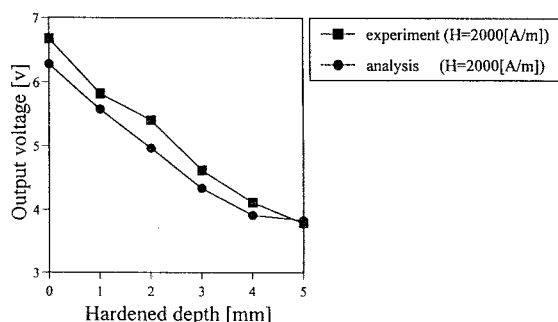


Fig.17 Magnetic noise reduction (depth: 3mm)



(a) H=500A/m



(b) H=2000A/m

Fig.18 Comparison of experiment and analysis (20Hz)

は全体としてよく一致する結果を得ることができ、高周波焼入れ鋼材内部を硬度別に4層に分ける本解析手法の有用性を示すことができた。

5. まとめ

高周波焼入れ深さの電磁氣的検査法における磁化特性のばらつきを考慮した数値解析評価で得られた結果をまとめて以下に示す。

- 1) 焼入れ鋼材は硬度が増すにつれて、透磁率のばらつきも増加する。しかし外部磁場Hを2000A/m程度まで増加させると、どの硬度でも透磁率はほぼ均一となることを示した。
- 2) 高周波焼入れ鋼材の各層における磁化特性と透磁率の不均一性を考慮にいたした交流非線形解析を行った。高周波焼入れ鋼材を低周波で磁化させた場合、焼入れ領域は元組織領域に比べて透磁率のばらつきは大きい、全体的な値が低いため、磁束は元組織領域に集中する。それゆえ、検出コイルの出力電圧は、焼入れ領域の透磁率の不均一性による影響は少ないことが分かった。
- 3) 焼入れ深さが深くなるにつれて出力電圧の振幅値は減少傾向を示すことを実験および解析により示した。また実験、解析は共によく一致し、高周波焼入

れ鋼材内部を硬度別に4層に分ける本解析手法の有用性を示すことができた。

謝 辞

本能力開発セミナーを進めるにあたり日頃貴重なご助言を頂いております岡山大学工学部電気電子工学科高橋則雄教授と高橋研究室の皆様方、ならびに職業能力開発総合大学校電気工学科橋本光男教授、岡山職業能力開発短期大学校濱本嘉輔校長に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 後藤雄治、田中 穰、矢野博明：等価正弦波交流非線形解析を用いた高周波焼入れ深さ測定評価、日本 A E M 学会、8th MAGDA Conference in Hiroshima, pp.151-154, (1999)
- [2] 後藤雄治、田中 穰、矢野博明：高周波焼入れ深さ測定の数値解析評価、日本非破壊検査協会、平成11年度春季大会、pp.77-78, (1999)
- [3] Yuji Gotoh, Minoru Tanaka and Hiroaki Yano: Numerical Analysis for Evaluating Surface Hardened Depth and Experiment, Proceeding of International 12th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, PD1-7, pp.354-355, (1999)
- [4] 後藤雄治、田中穰、矢野博明：低周波および未飽和領域磁化を利用した高周波焼入れ深さ測定の数値解析と実験による評価、非破壊検査、第49巻1号、pp.55-65、(2000)
- [5] 後藤雄治、橋本光男：磁性管 ECT の未飽和領域磁化によるノイズ低減数値解析法、電気学会論文誌A、Vol.117-A、No.7、pp.761-766(1997)
- [6] Y. Gotoh and M. Hashimoto: "Magnetic Noise Reduction for ECT of Thick Steel Tube by Unsaturated Magnetization", Proceeding of The First US-Japan Symposium on Advances in NDT, pp.265-268, (1996)
- [7] 岩田恵治、中野正憲、藤原耕二、高橋則雄：けい素鋼板の厚さ方向の磁気特性測定法、平成12年度電気学会全国大会講演論文集、pp.741、(2000)
- [8] 後藤雄治、A. Radin、高橋則雄：三次元交流非線形渦電流解析による交流漏洩磁束の評価、平成11年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、No. 041608, pp.86-87, (1999)
- [9] Y. Gotoh, A. Radin and N. Takahashi: "Evaluation of alternating flux leakage testing using 3-D non-

- linear eddy current analysis”, Digests of International Magnetism Conference, DQ-10(2000)
- [10] 後藤雄治、高橋則雄：交流漏洩磁束探傷試験法の三次元モデルによる非線形解析及び実験的検討、平成12年度秋季大会講演概要集、(社)日本非破壊検査協会、pp.239-240、(2000)
- [11] Y. Gotoh and N. Takahashi: Study on Alternating Flux Leakage Testing using 3-D Non-linear FEM with Eddy Current, Digests of the Forth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, ICEF' 2000, p.122, (2000)
- [12] 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)
- [13] Yuji Gotoh, Mitsuo Hashimoto: “Approximate Numerical Analysis Method of Alternating Magnetic Flux Leakage Testing”, Proceeding of International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems, Vol.13, pp.193-196, (1998)
- [14] 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、pp.770-776、(1999)
- [15] 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回神奈川県非破壊検査試験技術交流会・技術研究会、pp.18-23、(1999)
- [16] 後藤雄治、橋本光男：交流磁気特性を使用した交流漏洩磁束探傷試験法の非線形数値解析評価、第11回電磁力関連ダイナミクスシンポジウム、pp.604-607、(1999)
- [17] Mitsuo Hashimoto, Y. Gotoh, Yoshito Kusuvara and Daigo Kosaka: “Evaluation of approximate non-linear numerical analysis using equivalent sine wave for alternating magnetic flux leakage testing”, Proceeding of International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems, IOS Press, pp.157-160(1999)