

永久磁石と渦流法を併用した高周波焼入れ 鋼材表面硬さ測定の数値解析評価

中国職業能力開発大学校 専門課程 電子技術科¹⁾
中国職業能力開発大学校 専門課程 生産技術科²⁾
岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 技術開発部長)³⁾
岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 代表取締役)⁴⁾

後 藤 雄 治
野 村 龍 司
田 中 穰
矢 野 博 明

Numerical analysis to evaluate surface hardness measurement of hardened steel using a permanent magnet and eddy current method

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

要約 本稿は、平成12年度に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た技術支援内容をまとめたものである。

近年、鉄鋼関連企業では製品の高品質追求は高く、焼入れ鋼材の表面硬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、高速非接触で検査が可能である渦流試験法を応用し、製造ライン上で簡易に焼入れ鋼材の表面硬さを検査する手法の検討を試みた。

焼入れ鋼材は、硬さに比例して初期磁化曲線と導電率は共に値が低下する。そこで、これら電磁気特性の差を渦流試験法で検出することにより、表面硬さ評価が可能だと考えられる。しかし焼入れ鋼材は硬さに比例して初透磁率の不均一性が増すため、通常の渦流試験法では測定結果がばらつく原因となり適用は難しい。

そこで本能力開発セミナーでは永久磁石により焼入れ鋼材表面を未飽和領域で磁化させ、透磁率の不均一性を抑えた上で渦流試験法を適用する手法を検討した。その結果、検出される信号は小さいものの、測定値のばらつきは抑えられ、焼入れ鋼材表面硬さ測定が非破壊で可能となることを数値解析および実験により明らかにしたので報告する。

I はじめに

高周波焼入れ処理は鉄鋼材の表面硬化法として浸炭法や窒化法等と共に広く適用されている。高周波焼入れ法は短時間で表面硬化処理が行なえることから、自動車部品等の大量製造ラインを中心に広く使用されている。これらの焼入れ鋼材は強度保障のため硬化層の深さや表面硬さを検査する必要がある。そのため量産ラインにおいては、抜き打ち的に製品の数個を取りだし、部分的に切断と研磨処理を施した後、各種硬度

計を使用した破壊検査が義務付けられている。しかし大量製造ライン上では、不良品や未処理の鋼材が混ざる事があるため、未然にこれらを防ぐ簡易な非破壊検査手段の需要が年々高まってきている。そこで本能力開発セミナーでは渦流試験法を応用し、製造ライン上で簡易に表面硬度を検査する手法の検討を試みた。

焼入れ鋼材(マルテンサイト)は焼鈍材等の元組織と比べると、単位結晶格子内に含まれる炭素原子数が多い⁽¹⁾、磁場を加えた際、磁壁の移動に障害が生じ、硬さに比例して透磁率は低下する⁽²⁻⁵⁾。また同様に導

電率も減少することが確かめられている⁽³⁻⁵⁾。そこで、これら磁気特性および導電率の差を渦流試験法で検出することにより、表面硬さ評価が可能だと考えられる⁽⁶⁾。しかし焼入れ鋼材は、硬さに比例して初透磁率の不均一性が増すため⁽⁵⁾、通常の渦流試験法では測定結果がばらつく原因となり適用は難しい⁽⁷⁻¹⁴⁾。

そこで本能力開発セミナーでは永久磁石により焼入れ鋼材表面を未飽和領域で磁化させ、透磁率の不均一性を抑えた上で渦流試験法を適用し、表面硬さを測定する手法について数値解析を用いて検討した。

II 高周波焼入れ鋼材の材料評価

本能力開発セミナーでは、焼入れによる硬さ変化に伴った導電率と初期磁化特性の評価、並びに初透磁率のバラツキ測定を行った。試験に供した鋼はS45Cで、430HV、550HV、700HVの硬さで鋼材全てに無心焼入れを施した棒材3本と、元組織領域を模擬した焼鈍材(245HV)1本の計4種類の鋼材を評価した。

まず、各硬さ別の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.1に示す。硬さが増すに伴い、導電率は減少傾向を示す様子が理解できる。

次に4本の初期磁化曲線および初期磁化領域における透磁率のバラツキを評価した。4本の試験鋼材の形状は $\phi 9 \times 50\text{mm}$ に統一した。評価に用いた測定装置⁽¹⁵⁾をFig.2に示す。試験鋼材をヨーク材で隙間無く挟み、x軸方向に一樣に0.1Hzの低周波磁場で磁化

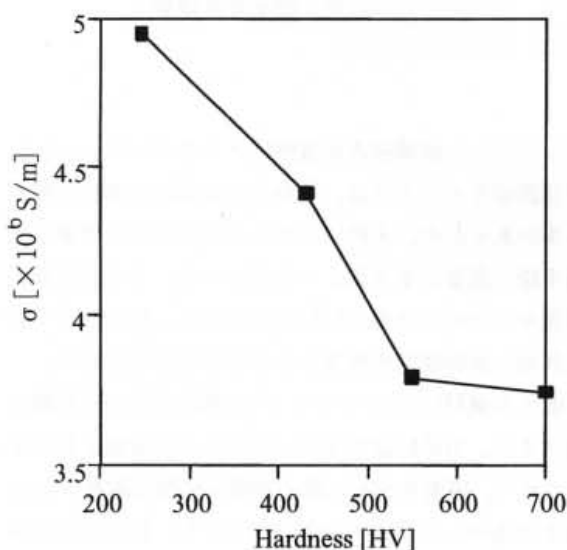


Fig. 1. Conductivity change by hardness of material (S45C steel).

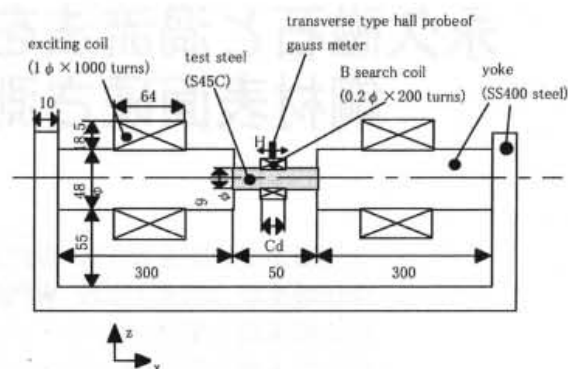


Fig. 2. Magnetization measurement model.

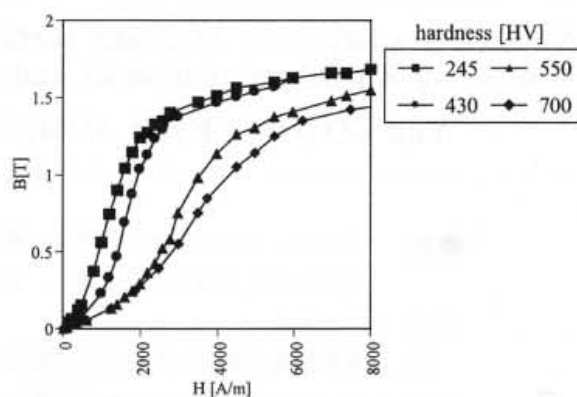


Fig. 3. Magnetization curves of steel materials of various hardness (S45C steel).

させ、試験鋼材に直接巻いたコイル(Bコイル:幅Cd=15mm、200ターン)により磁束密度Bを測定した。またx軸方向の空間磁場Hは磁極間に垂直に、Bコイルに密着させるかたちで配置させたガウスメータのホールプローブにより測定した。各硬さ別の初期磁化曲線測定結果をFig.3にそれぞれ示す。硬さが増すにつれ、初期磁化特性が減少する様子が理解できる。硬さが700HVでは、焼鈍鋼材に比べ最大比透磁率が約65%低くなる結果を得た。

次に、この測定装置を使用し、各硬さ別における透磁率の不均一性を評価した。試験鋼材の形状は $\phi 9 \times 180\text{mm}$ とした。測定はBコイル(幅Cd=4mm、50ターン)とガウスメータのホールプローブの位置を同じにし、また外部磁場Hの値は一定としたまま、x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から透磁率のバラツキを評価した。測定範囲は、試験鋼材のx軸方向の中心点より $\pm 20\text{mm}$ (2mmピッチ計21点)とした。700HVについての測定結果をFig.4に示す。この結果は、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(以降、バラツキ率と称す。)を縦軸に示している。外部磁場Hが500A/mでは最大で

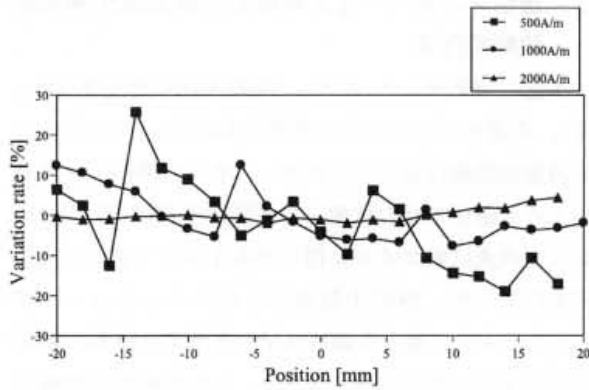


Fig. 4. Variation rate of relative permeability (700HV, hardened S45C steel).

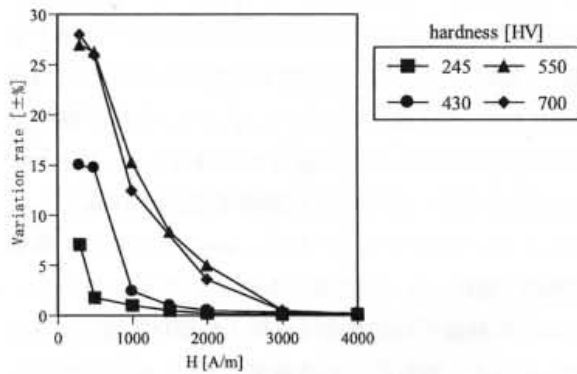


Fig. 5. Rate of magnetic characteristic variation reduction of each hardness steel material (S45C steel).

30%近くのバラツキが計測された。しかし外部磁場を増やすに連れて、透磁率の値が均一になる様子が理解できる。この測定をそれぞれの硬さに対して行った結果をFig. 5 にまとめて示す。横軸に外部磁場Hの値をとり、縦軸はバラツキ率の最大値を示した。これらの結果から、硬さが増すと初透磁率の不均一性が増大することが分かる。しかし、外部磁場Hを増やすことにより、原子磁気モーメントがそろい、バラツキは低減されていく様子が理解できる。

Ⅲ 直流磁化を用いた渦流試験解析および実験

渦流試験法は、交流を流した試験コイルを試験材に近づけ、材料中に渦電流を発生させ、コイルのインピーダンス変化から材料のき裂や、材料特性を測定する試験法である。本能力開発セミナーでは、この手法を、高周波焼入れ鋼材の表面硬さ計測に応用する検討を行った。しかし、この試験法で焼入れ鋼材を検査する

と、透磁率の不均一性により測定値が大きくばらつく。そこで、焼入れ鋼材表面を永久磁石で磁化させ、原子磁気モーメントの方向を一定にした状態で渦流試験法を適用する手法の検討を試みた。

この現象を解析するには、永久磁石による直流磁化による磁化特性と、渦流試験コイルによる交流磁化問題の2つを考慮する必要がある。しかし、渦流試験コイルに流す電流は数mAと小さいため、交流磁化特性はマイナーループ特性と考えられる。そこで本能力開発セミナーでは、各硬さ別の焼入れ鋼材の交流磁化特性を評価し、その値を使用した数値解析により最適磁化領域やインピーダンスの評価を行なった。

1. 交流磁化特性評価

数値解析を行なうにあたっては、まず焼入れ鋼材を永久磁石で直流磁化させた状態に交流磁場を加えた時の、鋼材内部の交流透磁率を求め、その値を用いて、渦流試験コイルに得られるインピーダンスを求める必要がある。そこで本能力開発セミナーでは各硬さ別焼入れ鋼材の交流比透磁率は、実験と交流線形渦電流解析により求めた。

各硬さ別の焼入れ鋼材(φ9×50mm)をFig. 2 に示した測定装置のヨーク材に挟み、x軸方向に一樣に直流磁化させ、試験鋼材に直接巻いたコイル(Bコイル: 幅Cd=15mm、200ターン)のインピーダンスを測定する。次に、軸対称三次元有限要素法の交流線形渦電流解析により、そのインピーダンスに見合った焼入れ鋼材内部の交流比透磁率を求めた。またx軸方向の空間磁場Hは磁極間に垂直に、Bコイルに密着させるかたちで配置させたガウスメータのホールプローブにより測定した。この測定より、外部磁場Hに対する鋼材の交流比透磁率を求めることができる。

ここで使用する軸対称三次元交流線形渦電流解析の支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_0 - J_e \quad (1)$$

$$\text{div} J_e = 0 \quad (2)$$

なおA、 J_0 、 J_e 、 $\nu (= 1/(\mu_0 \times \mu_r))$ 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、交流磁化における磁気抵抗率である。渦電流密度 J_e は次式で表される。

$$J_e = -j\omega \sigma A \quad (3)$$

ここで ω 、 σ は、角周波数及び導電率である。また、インピーダンスはコイル部のベクトルポテンシャルを用い、周回積分を行なうことにより算出することができる。

$$z = \frac{-j\omega N_i \oint_c A_c dl}{I} \quad (4)$$

ここで N_i 、 A_c 、 I はそれぞれコイルの巻き数、コイル部のベクトルポテンシャル、強制電流である。

本能力開発セミナーではインピーダンス測定に使用した周波数は40kHzとした。得られた結果をFig. 6に示す。交流比透磁率は硬さが増すにつれ、値が小さくなることからわかる。また外部磁場Hが増加するに伴い、全体的に値が減少し、硬さ別における透磁率差も小さくなる傾向を示すことが理解できる。

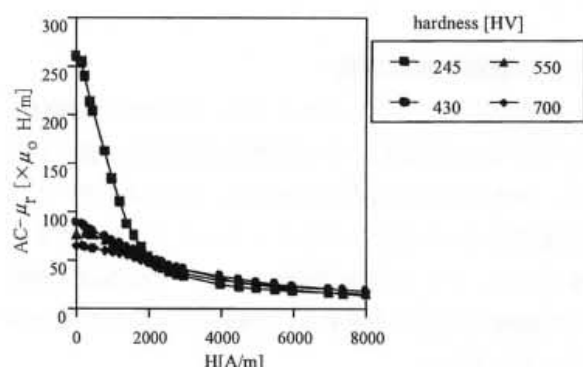


Fig. 6. Alternating H- μ_r curves (40kHz).

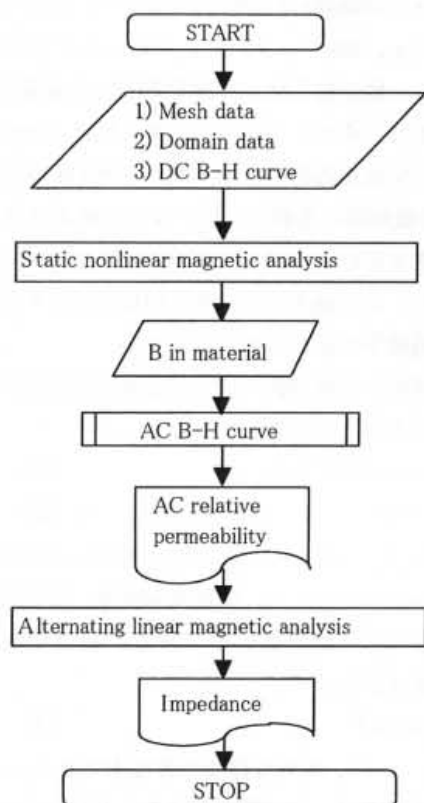


Fig. 7. Flow chart of impedance calculation.

2. 透磁率の不均一性を考慮した直流磁化渦流試験解析方法

本能力開発セミナーでは、各硬さ別の導電率 (Fig. 1)、直流磁化における初期磁化曲線 (Fig. 3)、および交流磁化曲線 (Fig. 6) を使用し、焼入れ鋼材を永久磁石で直流磁化させた状態での透磁率の不均一性の評価、および渦流試験コイルに得られるインピーダンスの解析を行なった。解析手順を示したフローチャートを Fig. 7 に示す。焼入れ鋼材は硬さが増すに連れ、初透磁率の不均一性が大きくなる⁹⁾。これを解析で模擬するため、本解析では Fig. 5 の実験結果を基に、各硬さにおける初透磁率のパラッキを考慮した解析を行った。例えば700HVの鋼材は Fig. 5 の結果から、外部磁場Hが200A/mでは最大で約±28%の透磁率のパラッキがあり、3000A/m以上まで磁場を増加させなければ透磁率のパラッキは無くならない。そこで、700HV領域での初透磁率のパラッキは最大で±28%とし、H=3000A/m以上で均一となるB-H曲線を20曲線作成した。Fig. 8 は、そのうちの+28%、0%、-28%の3曲線 (700HV鋼材、H- μ_r 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焼入れ鋼材領域内にランダムに与え、解析的に初透磁率の不均一性を模擬した。同様に、550HV領域では、3000A/mまで最大±28%、430HV領域では、2000A/mまで最大±15%、245HV領域では、2000A/mまで最大±8%の範囲内でばらつく各B-H曲線を作成し、焼入れ鋼材の分割領域内にランダムに与え、初透磁率の不均一性を模擬した。次に、永久磁石による直流磁化における鋼材内部の磁束密度分布を静磁界非線形解析により求め、その磁束密度分布から交流磁化曲線 (Fig. 6) を使用して、焼入れ鋼材内部の交流比透磁率分布を求めた。次に、この交流比透磁率分布を使用して交流線形渦電流解析を行ない、渦流試験コイルに得られるインピーダンスの値を求めた。

ここで使用する軸対称三次元静磁界非線形解析の支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_0 \quad (5)$$

なお A 、 J_0 、 ν ($=1/(\mu_0 \times \mu_r)$) は、それぞれ磁気ベクトルポテンシャル、強制電流密度、直流磁化における磁気抵抗率である。また本解析で用いる焼入れ鋼材は等方性磁気材料として取り扱った。各要素に与えられた初期磁化曲線に合うよう、磁気抵抗率 ν を修正し、収束条件を満たすまで反復計算を行なう。本解析の収束判定法は、ニュートンラフソン法を用い、収束判定値は、値をそれ以上小さくしても得られる値に変化が見られないことを確認した上で $1 \times 10^{-5} \text{T}$ とした。

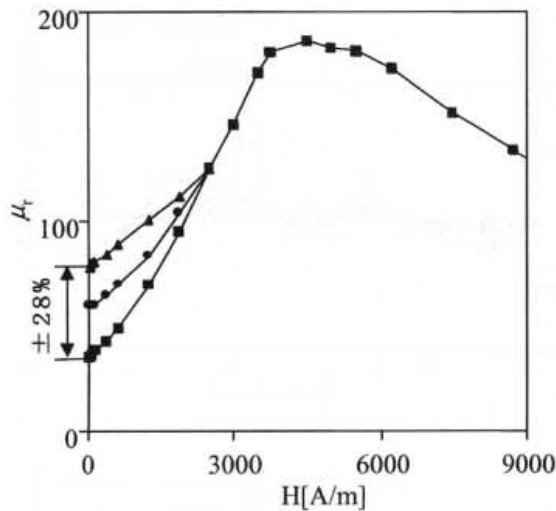


Fig. 8. Example of a variation distribution of initial relative permeability (700HV).

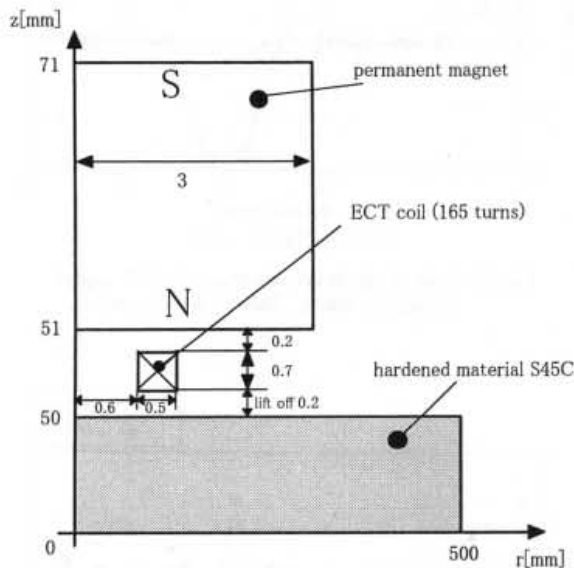


Fig. 9. Model of analysis and experiment (1/2 area).

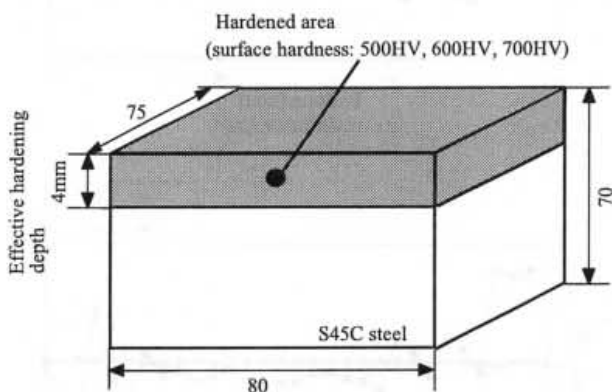


Fig.10. Surface hardness of steel materials in each standard experiment (S45C steel).

3. 解析および検証実験モデル

本能力開発セミナーでの解析および実験モデルを Fig. 9 に示す。このモデルに対し、軸対称三次元解析

および検証実験を行なった。これは渦流試験コイルの真上に円柱形の永久磁石を置き、焼入れ鋼材の真上にリフトオフ0.2mmで渦流試験コイルを配置したモデルである。焼入れ鋼材を直流磁化させる永久磁石は希土類磁石を使用し、実験では磁極中心軸表面の磁化力が0.45Tの磁石を使用した。また解析では、永久磁石を磁化電流で模擬した。実験で使用した高周波焼入れ鋼材は、表面硬さが500HV、600HV、700HVの3種類とし、全て表面からの有効焼入れ深さは4mm一定の試験鋼材を作成し評価を行なった (Fig.10参照)。

測定したい焼入れ表面硬さは、鋼材表面そのものであるため、渦流試験コイルの励磁周波数は高いほど良いが、渦電流の表皮深さが浅すぎると材料特性よりはむしろ、表面凹凸粗さ測定となる恐れがある。そこで本能力開発セミナーでは硬さの測定領域を、鋼材表面より0.1~0.2mmの深さ領域内に定め、励磁周波数は40kHzを採用した。

4. 透磁率の不均一性評価

焼入れ鋼材の硬さが700HVの場合、永久磁石の磁極表面磁化力を0.001、0.1、0.3、0.45Tと変化させ、焼入れ鋼材表層の交流比透磁率分布の解析を行なった。その結果をFig.11に示す。本解析では有限要素法の分割要素を r 方向に50 μ m、 z 方向に10 μ mピッチで分割を行ない、各分割要素内にランダムに初透磁率を与えて焼入れ鋼材内部の初透磁率の不均一性及び磁区の大きさを模擬した。

Fig.11の結果から、永久磁石の磁化力が小さい場合、交流比透磁率の大きさは一様では無いが、磁化を増やすに連れ、バラツキが低減される様子が理解できる。また、磁化が増えるに伴い、交流比透磁率は減少傾向を示すことが合わせて理解できる。

次に、この永久磁石による直流磁化で測定インピーダンスのバラツキが低減する現象を解析及び実験により評価した。解析結果をFig.12に、実験結果をFig.13にそれぞれ示す。Fig.12では、鋼材要素内にランダムに配置した磁気特性分布を r 方向に2mmピッチで平行移動させ、リフトオフ0.2mmを一定に保ったコイルの平行移動を解析的に模擬した。各点におけるインピーダンス(レジスタンス成分、リアクタンス成分)を、永久磁石の磁極表面磁化力を0.001、0.1、0.45Tと変化させて評価した。図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。図から、永久磁石の磁化力が増すに連れて、レジスタンス成分及びリアクタンス成分共にバラ

ツキが低減し、0.45T時では両者とも均一の値が得られることが分かった。

Fig.13の実験では、同形状で磁力の異なる永久磁石を数種類作成することは容易で無いため、本論文では永久磁石を配置しないコイルのみの通常渦流試験と、磁極表面磁化力0.45Tの円柱形希土類永久磁石を使用した渦流試験のインピーダンスのバラツキ比較を行った。その結果、図から実験でも解析と同様に永久磁石が無い状態ではバラツキが大きいが、0.45Tの永久磁石を使用することにより値が均一になることが分かった。

なお、永久磁石を配置しない通常渦流試験法での実験結果は解析結果以上にバラツキ率が大きく評価されている。本解析では解析領域を軸対称で評価しているため、周方向の透磁率は一定となる。しかし実際の磁壁の移動や磁化方向のばらつきは三次元的に変化するため、軸対称解析よりも実験値の方がバラツキ率は大きく評価されると考えられる。

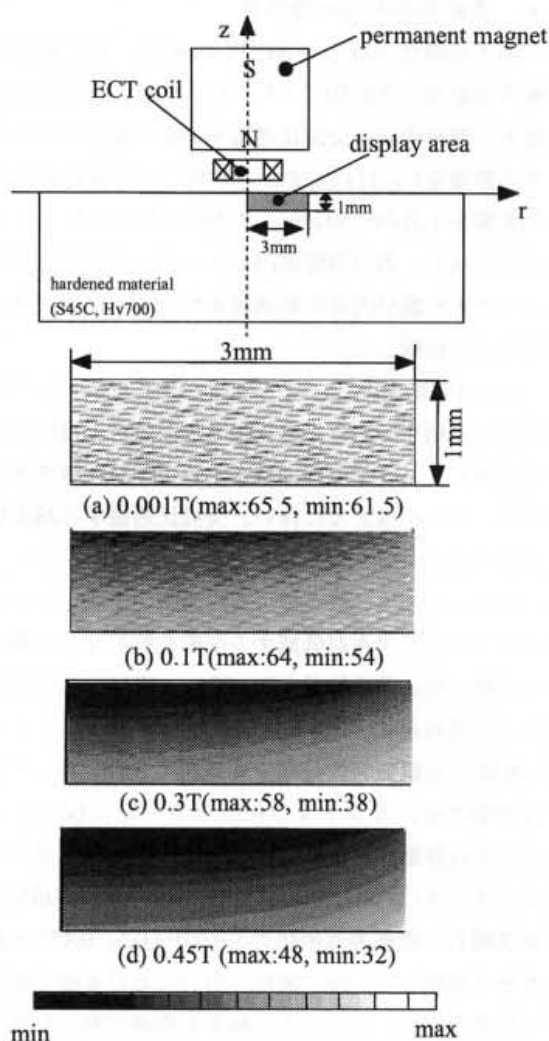


Fig.11. Distribution change of alternating relative permeability in material (S45C, 700HV, 40kHz).

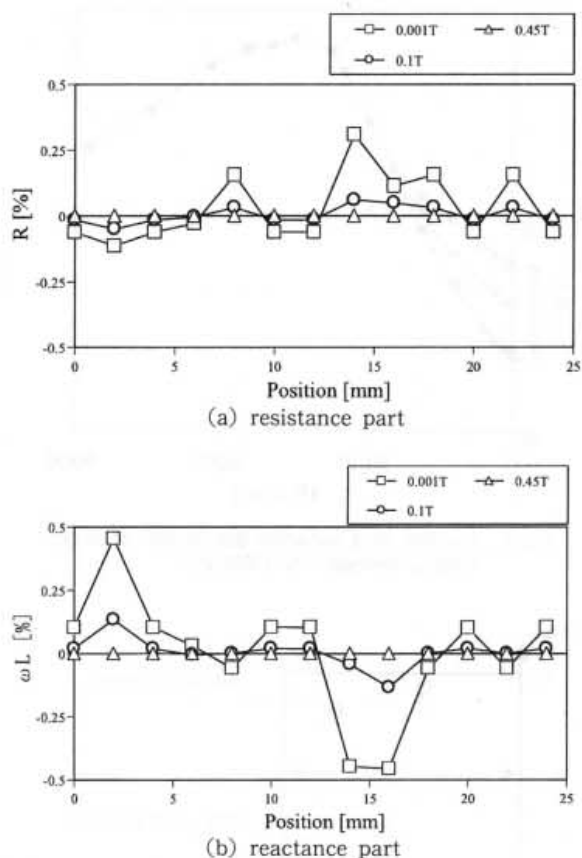


Fig.12. Rate of variation reduction of ECT signal (analysis, 40kHz, 700HV, S45C steel).

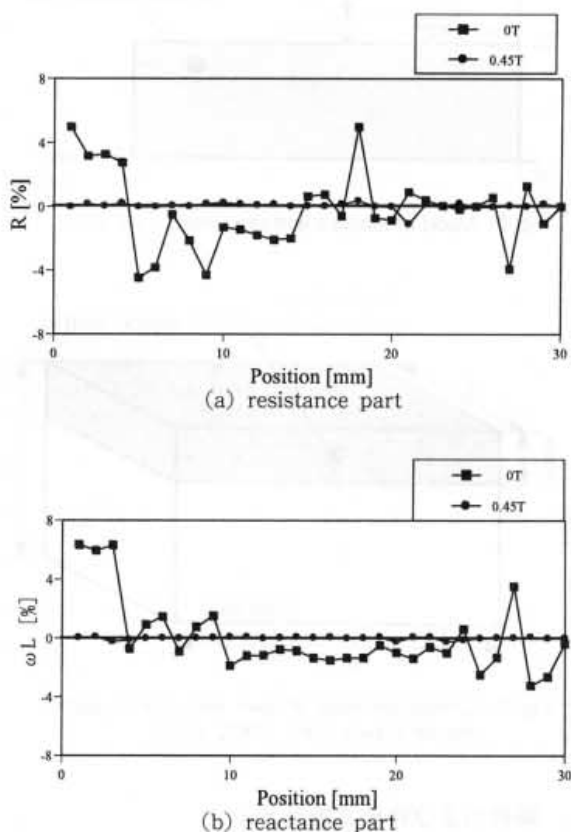


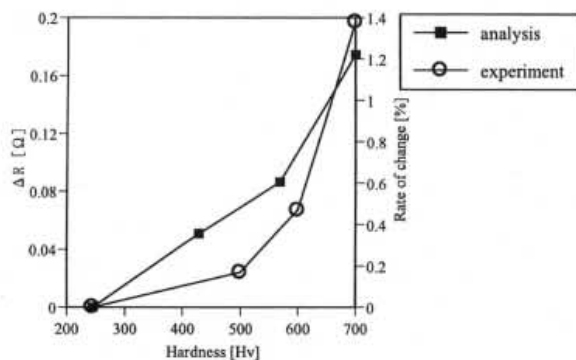
Fig.13. Rate of variation reduction of ECT signal (experiment, 40kHz, 700HV, S45C steel).

5. 硬さ別によるインピーダンス変化

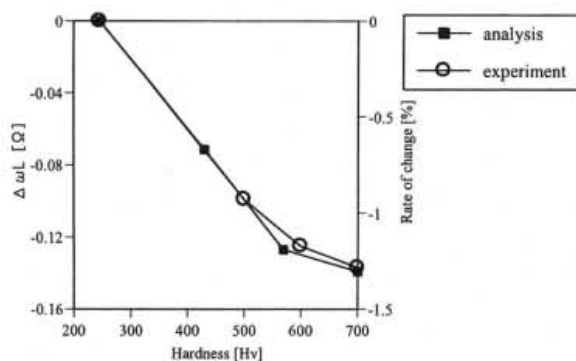
次に、実機検査に適応可能な永久磁石を考慮して、磁極表面0.45Tの永久磁石を使用し、表面焼入れ硬さの変化に伴う、渦流試験コイルのインピーダンス変化の実験と解析を行なった。得られたインピーダンスのレジスタンス成分とリアクタンス成分の結果をFig.14に示す。これは各硬さにおけるコイルの値から生材(245HV、焼鈍材)の値を引いた差を示している。なお変化の割合を同図の右縦軸に示した。

レジスタンス成分は、実験と解析に多少の差が見られるものの、硬さが増すに伴い、値が増加する傾向を示すことがわかる。またリアクタンス成分は、実験解析両者とも良く一致し、硬さに比例して値が減少する結果を得た。

またS45C鋼材の元組織の硬さ(245HV)を測定した際、コイルのインピーダンスのレジスタンス成分とリアクタンス成分から得られる位相角を基準とし、各表面硬さで得られるインピーダンスの位相角が、その基準位相角とどれくらい差があるかを示した位相差をFig.15に示す。なお、変化の割合を同図の右縦軸に示した。硬さが増すに連れ、基準との位相差が増加することが分かる。



(a) resistance part



(b) reactance part

Fig.14. Eddy current examining signal using magneto static field magnetization (40kHz, 0.45T).

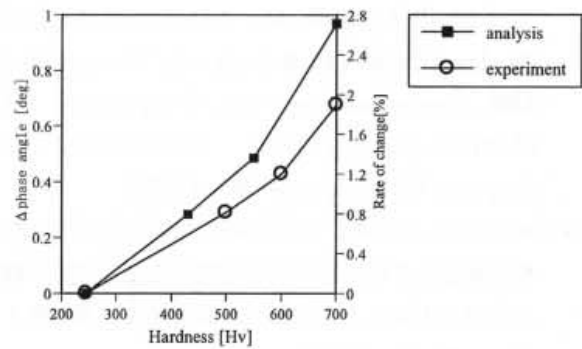


Fig.15. Effect of hardness on phase of ECT signal (40kHz, S45C steel).

IV まとめ

本稿で得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) 焼入れ鋼材は硬さが増すにつれて導電率及び初期磁化特性が共に減少し、初透磁率のパラッキも増加することが分かった。
- 2) 硬さ別における焼入れ鋼材内の交流磁場印加時における交流磁化特性を実験と交流線形渦電流解析を併用することにより求めた。交流磁化特性は外部磁場Hの増加に比例して、減少傾向を示すことが分かった。
- 3) 静磁界非線形解析および交流線形渦電流解析を併用することにより、初透磁率の不均一性を考慮した直流磁化渦流試験法のインピーダンスを求める事ができた。また、解析および検証実験から、この検査手法を使用し、焼入れ鋼材の初透磁率の不均一性による信号の変動を低減し、高周波焼入れ表面硬さが測定できることを示した。

謝 辞

本能力開発セミナーを進めるにあたり日頃貴重な助言を頂いている岡山大学工学部電気電子工学科高橋則雄教授、職業能力開発総合大学校電気工学科橋本光男教授、ならびに前岡山職業能力開発短期大学校長、濱本嘉輔先生（現、北九州市立大学国際環境工学部教授）に深く感謝致します。

[参考文献]

- (1) 不二越熱処理研究グループ：知りたい熱処理基礎編、(株)ジャパンマシニスト社
- (2) 小沼稔：磁性材料、工学図書株式会社
- (3) Yuji Gotoh, Minoru Tanaka and Hiroaki Yano:

- Numerical Analysis for Evaluating Surface Hardened Depth and Experiment, International 12th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG in Sapporo, PD1-7, pp.354-355, (1999)
- (4) 後藤雄治、田中稔、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、田中稔、矢野博明：透磁率の不均一性を考慮した高周波焼入れ深さ磁気測定法の数値解析評価、非破壊検査、第50巻4号、pp.241-248、(2001)
- (6) 橋本光男：渦電流探傷試験法、非破壊検査、第49巻11号、pp.740-745、(2000)
- (7) 後藤雄治、福富広幸、佐藤宏、橋本光男：弱磁化による磁性管ECTのノイズ低減、日本AEM学会、The Fourth MAGDA Conference in Tottori, pp.193-196 (1995)
- (8) 後藤雄治、福富広幸、橋本光男：弱磁化プローブによる厚肉鋼管の内面検査法の評価、(社)日本非破壊検査協会、平成7年度春季大会、pp.191-194、(1995)
- (9) 後藤雄治、橋本光男：未飽和領域磁化による磁性管ECTのノイズ低減シミュレーション、第4回職業能力開発研究発表講演会、pp.93-94、(1996)
- (10) 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、電気学会、平成8年マグネティックス研究会、pp.165-169、(1996)
- (11) 後藤雄治、橋本光男：未飽和磁化による厚肉鋼管ECTのノイズ低減数値解析、(社)日本非破壊検査協会、平成9年度秋季大会、pp.85-88、(1997)
- (12) 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)
- (13) Y. Goto and M. Hashimoto: "Magnetic Noise Reduction for ECT of Thick steel Tube by Unsaturated Magnetization", *The US-Japan Symposium on Advance in NDT*, pp.265-268 (1996)
- (14) 後藤雄治、橋本光男：強磁性体鋼管の内面非破壊検査法、職業能力開発報文誌、第11巻第1号(通巻21号)、pp.29-36、(1999)
- (15) 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)
- (16) 後藤雄治、田中稔、矢野博明：直流磁化渦流試験を用いた焼入れ鋼材表面硬さ測定、実践教育研究発表会講演予稿集、(社)実践教育訓練研究協会、pp.79-80、(2001)
- (17) 後藤雄治、田中稔、矢野博明：静磁場磁化ECTによる高周波焼入れ鋼材表面硬さ測定の数値解析評価、非破壊検査、第50巻11号、pp.729-735、(2001)