

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

岡山職業能力開発短期大学校
岡山県玉島工業会（センサ・システム部）

後 藤 雄 治
田 中 穰
矢 野 博 明

Non-destructive Inspection for Surface Hardened Depth Using Alternating Flux and Low Exciting Frequency

Yuji GOTOH, Minoru TANAKA, Hiroaki YANOHI

要約 岡山職業能力開発短期大学校は、鉄鋼産業の集中した水島工業地帯に隣接しており、能力開発セミナーやF方式、事業内援助業務等を通し、地元鉄鋼業界及び機械産業界等とのつながりの歴史は古い。本短大では地域産業界の方々に対し、業務内容のご理解やセミナー等のアピールの場として年に一度、校内研究発表会を開催している。

本稿は、平成10年9月1日に開催された第13回岡山短大校内研究発表会の際、異業種企業で構成された岡山県玉島工業会より開発依頼のあった内容に対し、事業内援助および能力開発セミナーとして展開を計り、商品化に結び付けることの出来た成果内容を示す。

自動車のシャフト部やエンジン部等、高強度を必要とする鋼材には、高周波焼入れが施されている。これらの焼入れ鋼材は、強度保障の確認のため、硬化層深さ評価は必要不可欠である。この深さの評価には、古くからX線や超音波等を使用する等様々な非破壊的測定手法が考案されてきたが、検査装置の大型化やコスト等の問題から、普及にはいたっていない。そのため、現状では焼入れ鋼材を部分的に輪切りにし、断面強度をマイクロビッカース硬度計等を用いて測定する方法が主流となっている。しかし、この手法は正確な硬度保障は得られるものの、サンプル鋼材の作成や、多くの測定時間を要する等の問題がある。そこで本能力開発セミナーでは非破壊検査装置の関係を目的とし、まず、鋼材焼入れ後の鋼材（マルテンサイト）と、焼入れ前の鋼材（元組織）の初磁化曲線と導電率を求め、差が生じることに着目した。これらの差は低周波における交流磁場下では、鋼材表面に配置した検出コイルの出力電圧の位相差や振幅値に変化を生む。そこで、我々はこの現象を利用し、小型で操作性に優れ、短時間で測定可能な高周波焼入れ深さ非破壊検査装置の開発を行ない、商品化に結び付けたので報告する。

I はじめに

高強度を追及する鉄鋼材や自動車部品の多くには、材料表層に高周波焼入れが施されている。近年では自動車部品を中心に、焼入れ鋼材の高品質追及が高まっており、硬化層の正確な深さ評価が要求されてきている。

この深さの評価には、古くからX線や超音波等を使用したものが多い。しかし、これらは検査装置の大型化や測定時間がかかるなどの問題がある。一方、焼入れした硬い鋼は保磁力が大きいので、この保磁力の差と硬化深さとを対応させて焼入れ深さを評価する静磁場磁化や低周波による交流磁化を使用した測定手法¹⁻⁵⁾

や、多重周波数による渦電流を用いた測定手法⁶⁾等、様々な非破壊検査手法が検討されているが、まだ確立されていないため、現状では焼入れ鋼材を部分的に輪切りにし、断面強度をマイクロビッカース硬度計等を用いて測定する方法が主流となっている。そこで本能力開発セミナーでは鋼材焼入れ後のマルテンサイトと元組織の初磁化曲線と導電率を求め、未飽和領域での交流磁化における位相差および磁束量と、硬化深さの関係の導き出し、小型で操作性に優れ、短時間で測定可能な焼入れ深さ測定手法の検討を、数値解析および検証実験により行った。

II 材料評価

本セミナーでは材料をS45C鋼材と限定し、元組織と焼入れしたマルテンサイトにおける導電率と磁化特性の評価を行った。

1 S45C鋼材のマルテンサイト硬度評価

高周波による焼入れ焼戻しにより作成したS45C鋼材($\phi 30 \times 150$) 表層のマルテンサイト硬度分布をFig.1に示す。

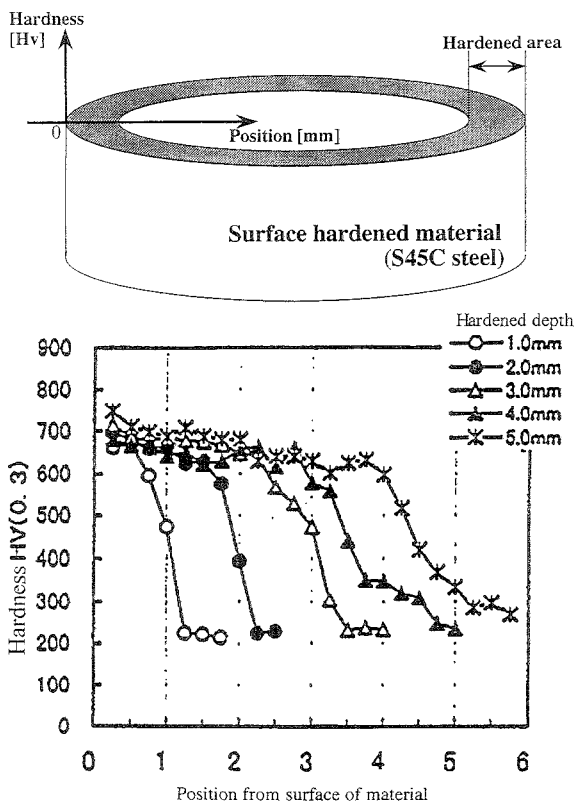


Fig.1 Hardness of surface hardened material (S45C steel)

これは、材料表面より1.0、2.0、3.0、4.0、5.0mmの深さで高周波焼入れを施したときの材料断面における硬度をビッカース硬度計で測定した硬度分布を示している。この結果から、S45C鋼材の高周波焼入れの場合、マルテンサイト部の硬度は約Hv700前後を維持することが理解できる。

2 導電率評価

S45C鋼材の元組織 (Hv245) と、鋼材全てに無心焼入れを施した棒材 ($\phi 9 \times 210$ mm、Hv400、Hv500、Hv700) を計4本作成し、ダブルブリッジ回路により、それぞれの導電率の測定を行った。その結果をFig.2に示す。硬度が増すに伴い、導電率は減少傾向を示しており、例えば硬度Hv700鋼材では、元組織鋼材に比べ約24%導電率が減少していることが分かる。

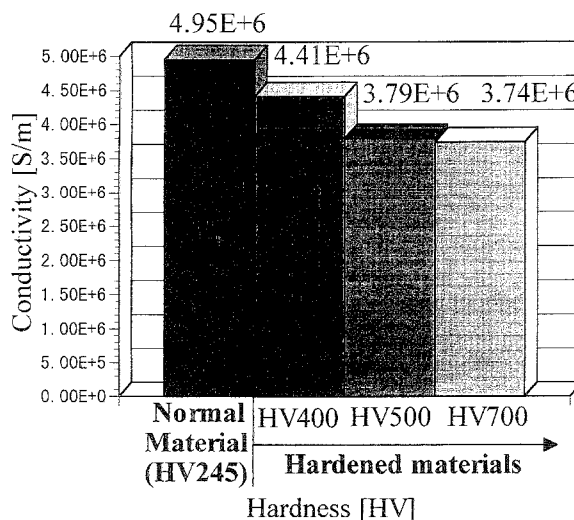


Fig.2 Conductivity of hardened and normal materials (S45C steel)

3 磁化曲線評価

S45C鋼材の元組織 (Hv245) と、鋼材全てに焼入れを施したリング試料 (外径120mm、内径100mm、断面積 $6.0 \times 10^{-5} \text{m}^2$ 、Hv500、Hv700) を計3個作成し、それぞれの初磁化曲線を求めた。磁束密度Bは試料の断面積が関係するため、リングにはまず0.65 ϕ 銅線の2次コイルを一層で全周に435ターン巻き、その上に0.65 ϕ 銅線の1次コイルを一層で同じく全周に435ターン巻いて磁化曲線を求めた。得られた結果をFig.3 (a)、(b)にそれぞれ示す。Fig.3 (a)はB-H曲線を、Fig.3 (b)はH- μ r曲線を示している。元組織に比べ硬度が大きくなるにつれて磁化特性が低くなり、最大比透磁率の値は減少していくことが理解できる。硬度Hv700

では、元組織に比べ約53%最大比透磁率が低くなっていることが分かる。

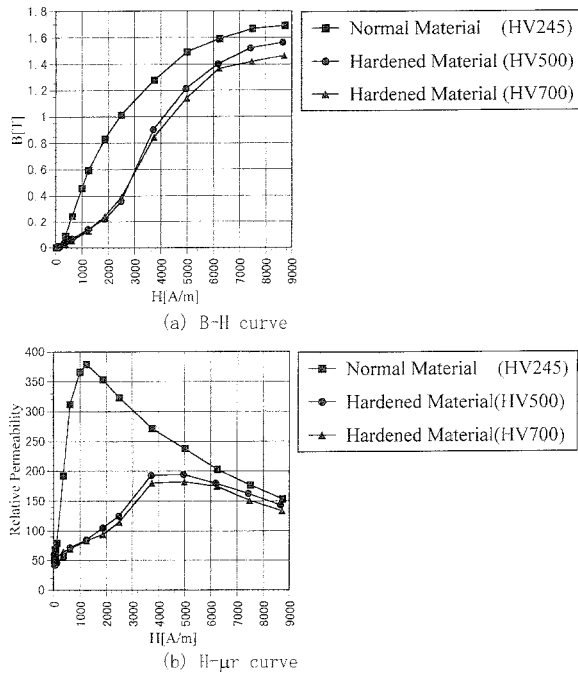


Fig.3 Magnetization curves of hardened and normal materials (S45C steel)

Ⅲ 交流非線形解析

本セミナーでは円柱形の高周波焼入れ鋼材 (S45C) 表面に、励磁コイルおよび検出コイルを配置し、渦電流の浸透深さを考慮に入れて、5~15Hzの低周波数を使用し、未飽和領域の交流磁場印加時における出力電圧の評価を、等価正弦波交流非線形数値解析法を用いて行なった。非線形解析にはFig.2、Fig.3で得られたS45C鋼材の元組織とマルテンサイトの導電率と磁化曲線を使用し、焼入れ深さが出力電圧の位相角や振幅に及ぼす影響の検討を行った。

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磁気特性の非線形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^{7,9)}。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密度は歪まず、正弦波として

扱えることが確かめられている⁹⁾。そこで本研究では、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^{10,11)}の適用を行った。この解析手法は、複素数近似解析法 ($j\omega$ 法) を使用し、非線形交流磁界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。

$$\text{rot}(\text{vrot}A) = J_o - J_e \quad (1)$$

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

なお A 、 J_o 、 J_e 、 v 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。これは(1)式の磁気抵抗率 v を非線形とした解析手法である。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。

2 解析結果及び考察

焼入れ深さと位相および振幅の関係を数値解析により検討を行った。解析モデルをFig.4に示す。鋼材の周回方向に2つの励磁コイルと、その間に検出コイルを巻き、交流で励磁したときの検出コイルに得られる出力電圧の評価を行った。焼入れ深さ変化に対する、励磁電流波形のピーク値と検出コイルの出力電圧の積分波形 (磁束波形) のピーク値の間の位相角と、出力波形ピーク値の振幅の大きさを評価した (Fig.5参照)。

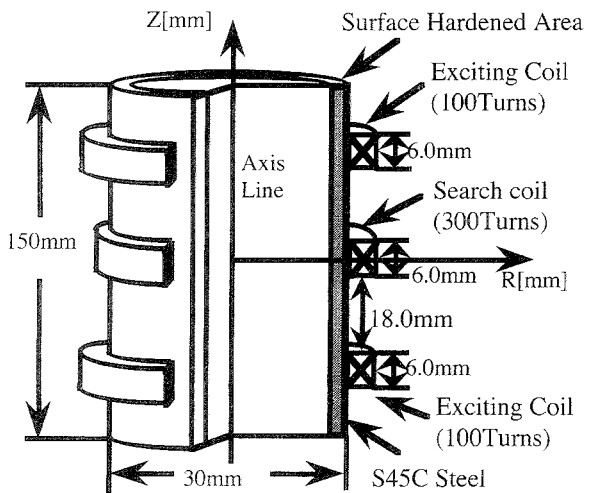


Fig.4 Model of experiment and analysis

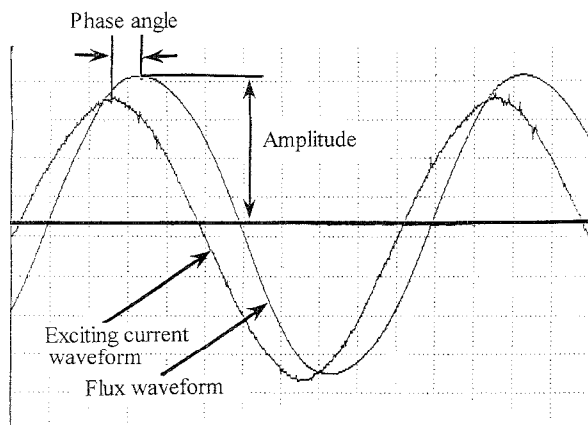
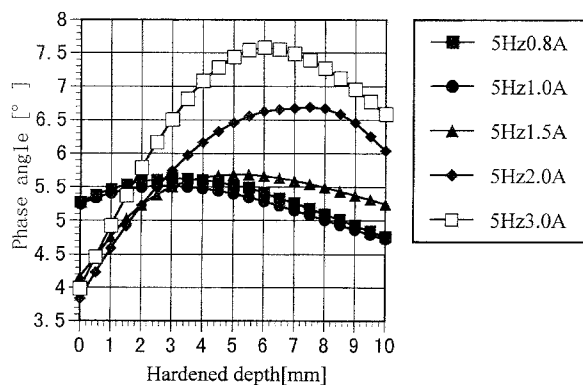


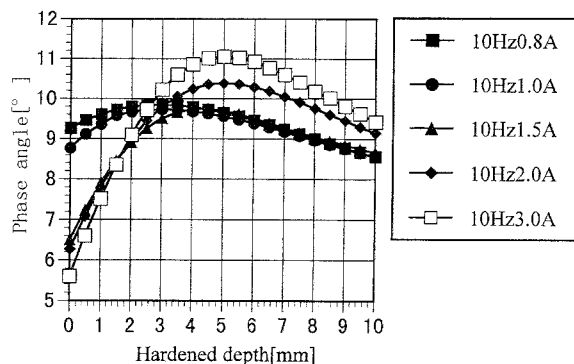
Fig.5 Definition of phase angle and amplitude of flux waveform

2. 1 位相角

周波数および励磁電流をパラメータとし、焼入れ深さを材料表面より0.5mmピッチで10mmまで変化させたときの、それぞれの深さに対する位相角の解析結果をFig.6 (a) ~ (c) にそれぞれ示す。どの周波数も励磁電流が大きくなるほど位相角変化が大きく現れることが理解できる。また位相角はどの周波数でも、ある深さでピークが現れることが分かった。また周波数が高くなると、その位相角のピークが現れる焼入れ深さは、浅くなることが分かる。



(a) Frequency: 5Hz



(b) Frequency: 10Hz

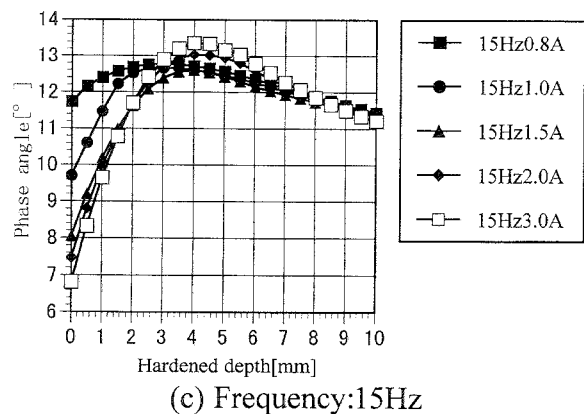


Fig.6 Relation between phase angle and hardened depth

次に、焼入れ深さに対する位相角変化は、元組織とマルテンサイトの磁化曲線と導電率のどちらに大きく影響されるかを明確にする必要がある。そこでFig.4のモデルに対し、元組織とマルテンサイトの導電率を一定とし、磁化曲線に差を与えた場合と、磁化曲線を一定とし、導電率に差を与えたときの焼入れ深さに対する位相角変化の影響を数値解析により求めた。解析で使用した導電率及び磁化曲線は実験で求めたS45C鋼材元組織と硬度Hv700の値を用いた。その結果をFig.7に示す。

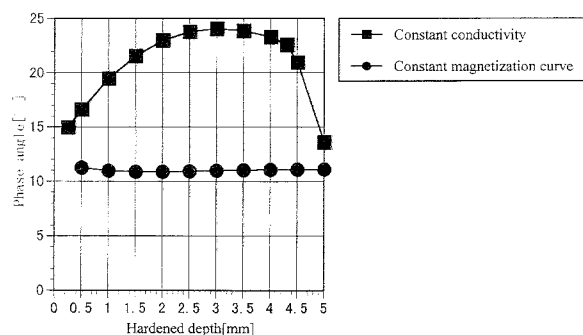


Fig.7 Effect of conductivity and magnetization curve on phase angle

■のラインは、有限要素法の焼入れ領域要素内にHv700の磁化曲線を与え、元組織要素内には元組織(Hv245)の磁化曲線を与え、導電率は全要素、元組織の値で統一し、焼入れ領域を材料表面から深さ5mmまで変化させた時の解析結果を示している。一方、●のラインは、焼入れ領域要素内にHv700の導電率を与え、元組織要素内には元組織(Hv245)の導電率を与え、磁化曲線は全要素、元組織の値で統一し、焼入れ領域を材料表面から深さ5mmまで変化させた時の解析結果を示している。この結果から、導電率に差を与えた場合、位相角変化は焼入れ深さの変化に対して大きな差は見られないことが分かった。しかし、導電率を一定とし、磁化曲線に差を与えると、大きな位相

角変化が生じることが理解できた。また同時に、ある深さで位相角のピーク値が現われることも分かった。この解析結果から、高周波焼入れ深さに対する位相角の変化は、元組織とマルテンサイト部との磁化曲線の差に大きく影響されることが理解できた。

2.2 磁束、透磁率、渦電流分布

周波数を15Hz、励磁電流を3.0A一定とした時の材料内部の比透磁率、磁束密度、渦電流密度分布の解析結果をFig.8 (a) ~ (c) にそれぞれ示す。

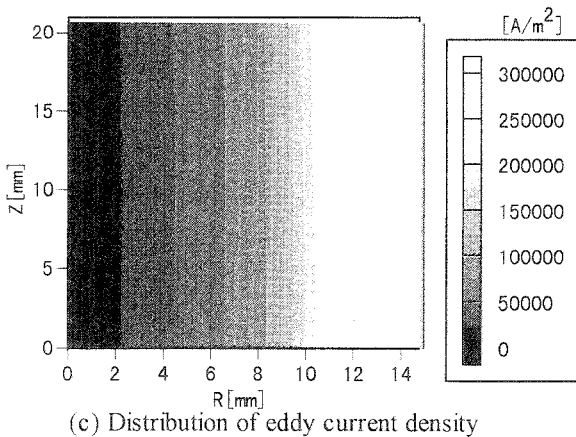
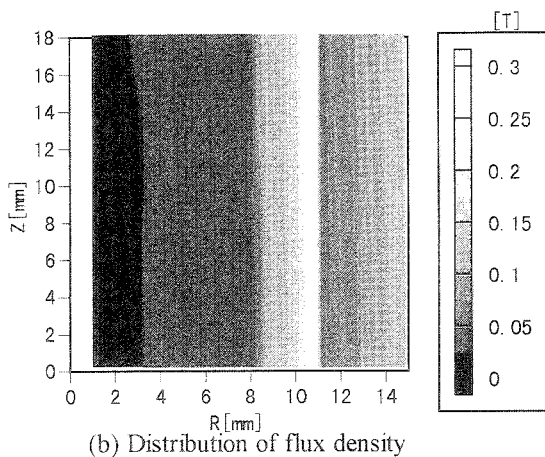
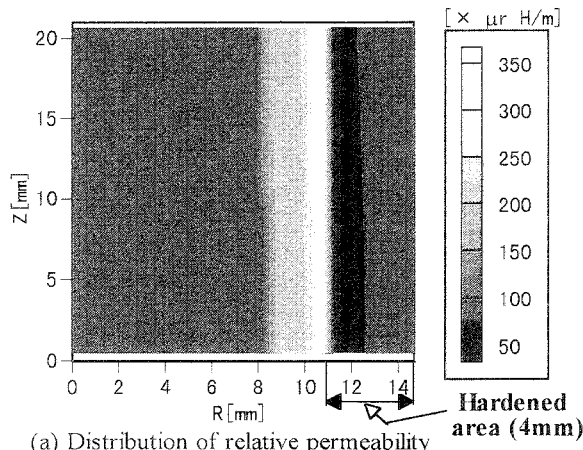
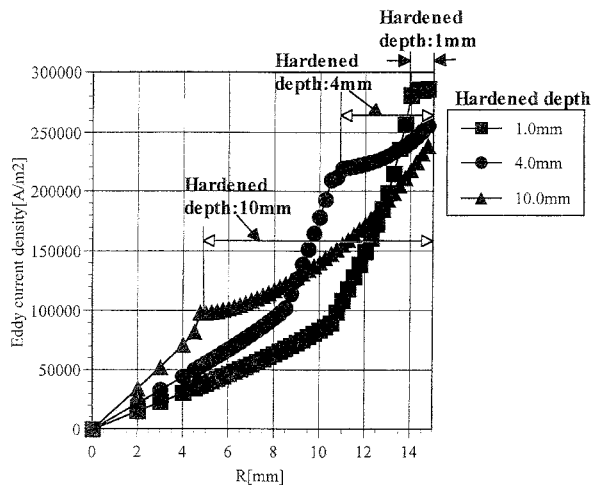


Fig.8 Distribution of permeability, flux, and eddy current density (hardened depth:4mm, 15Hz3.0A)

これは焼入れ領域を材料表面より4mm一定とし、焼入れ要素内に実験により求めた硬度Hv700の磁化曲線と導電率を、元組織要素内には元組織 (Hv245) の磁化曲線と導電率をそれぞれ与え、等価正弦波交流非線形解析法で非線形解析した結果である。比透磁率の解析結果から、焼入れ領域では元組織部に比べ比透磁率が低く現われていることが分かる。そのため、材料内部の磁束密度分布は透磁率の高い元組織部に集中している様子が合わせて理解できる。一方、渦電流分布は材料表層が最も高い値を示している。焼入れ深さを材料表面より1.0、4.0、10.0mmと変化させた時のZ=0ライン上の渦電流密度分布を折れ線グラフで表した解析結果をFig.9に示す。この結果から、焼入れ領域内での渦電流分布の傾は、元組織領域に比べ小さいことが分かる。また材料表層における渦電流のピーク値は焼入れ深さが深くなるにつれて減少傾向を示すことが合わせて理解できる。



2.3 渦電流評価

励磁電流に対する出力電圧の位相角変化を発生させる要因には様々な物理現象が考えられる。しかし、最も大きな原因は材料内部に発生する渦電流であると考え、本セミナーでは、この位相角のピークが現れる現象を解明するため、材料内部に生じる総渦電流量を解析的に求め検討を行った。本解析は $j\omega$ 法による非線形解析のため、磁気ベクトルポテンシャル A は複素数で表される。そこで複素数表示の渦電流密度 Je ($Je = -j\omega\sigma A$) の実数成分を Je_x 、虚数成分を Je_y で表すとする。検出コイルの位相に与える渦電流の影響は断面積に関係するため、本解析では各要素における半径で重みを付けた材料内部に生じる総渦電流量の算出を行った。各要素における半径を r とし、鋼材内部の要素番号を c 、 n を鋼材内の全要素数とすると、材料内部に

生じる総渦電流量 (Je_{total}) を次式を用いて求めた。

$$Je_{total} = \sum_{e=1}^n \sqrt{\left(r^{(e)} Je_x^{(e)}\right)^2 + \left(r^{(e)} Je_y^{(e)}\right)^2} \quad (3)$$

上式を用い、周波数15Hz、励磁電流3.0A時の各焼入れ深さにおける総渦電流量の解析結果を、位相角結果と共にFig.10に示す。位相角は焼入れ深さが4.0mm時にピークが現れ、その後緩やかな減少傾向を示している。これに対し(3)式により求めた渦電流量も、焼入れ深さ4.0mm時にピークが現れ、位相角と同様の傾向を示していることが理解できる。この結果から焼入れ深さが変化するに伴い、材料内部に発生する渦電流量も変化し、渦電流量が位相角に反映していることが理解できる。

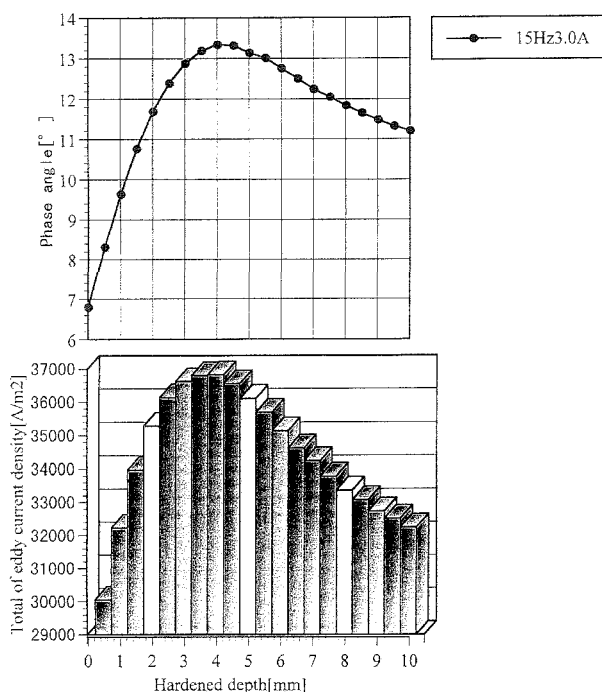


Fig.10 Total of eddy current density and phase angle as a function of hardened depth

2. 4 出力電圧

次に、焼入れ深さ変化に対する出力電圧の積分波形（磁束波形）のピーク値の評価を行った。周波数および励磁電流値をパラメータとし、焼入れ深さを变化させたときの解析結果をFig.11、12にそれぞれ示す。周波数が高くなるにつれ、表皮効果が高まるため、焼入れ深さが深い領域では傾きが小さくなるものの、深さに比例して振幅は減少傾向を示すことが理解できる。これは、焼入れが深くなると、透磁率の低い領域が材料表層に広がり（Fig.8、9参照）、材料表層に集中する渦電流のピーク値が減るためだと考えられる。

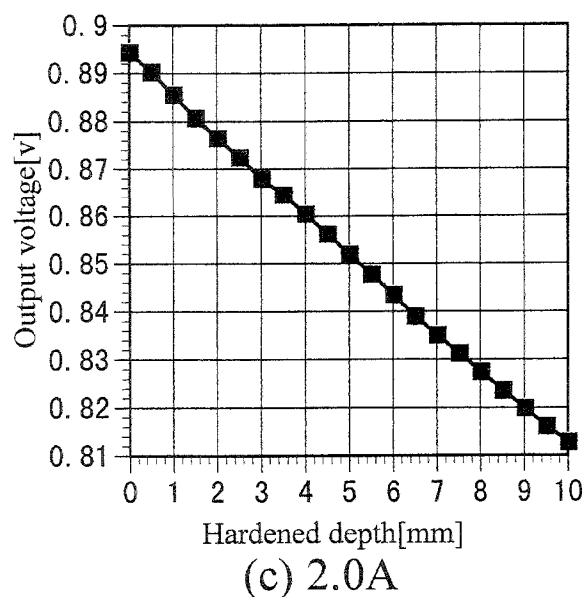
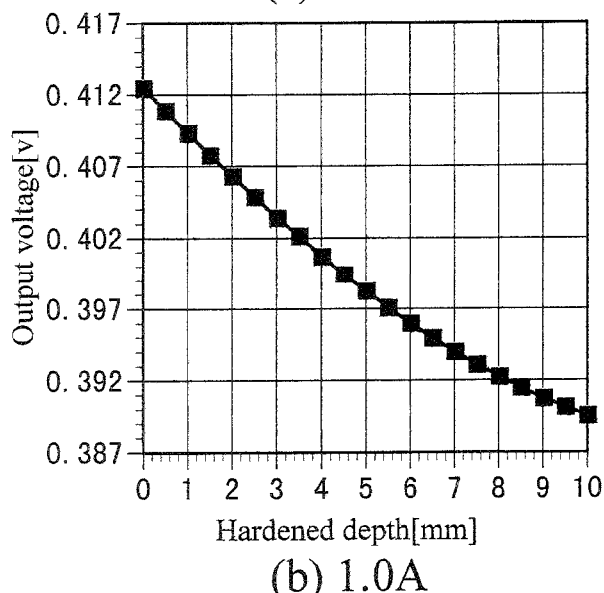
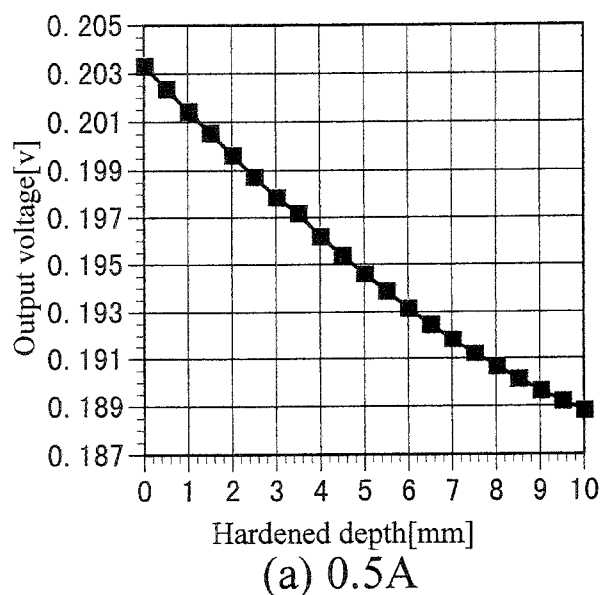


Fig.11 Output voltage as a function of hardened depth
(Frequency:5Hz, analysis)

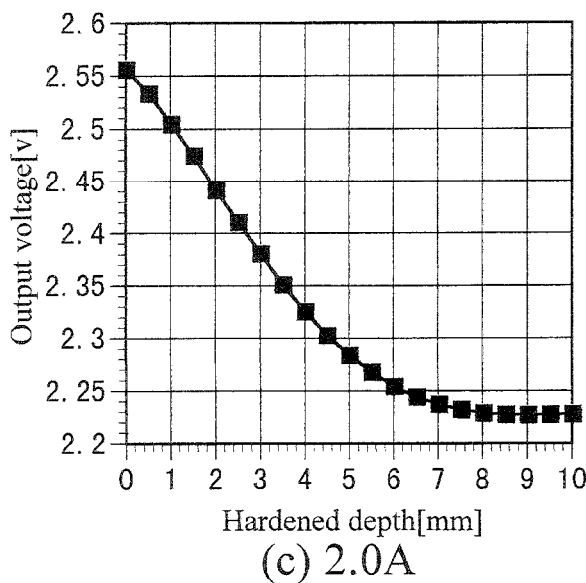
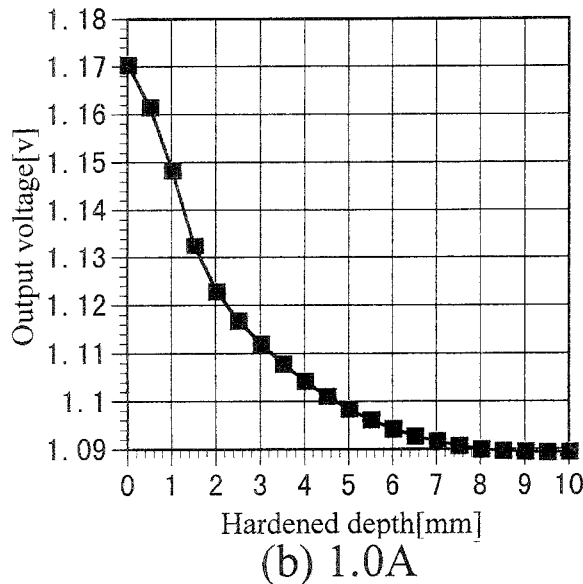
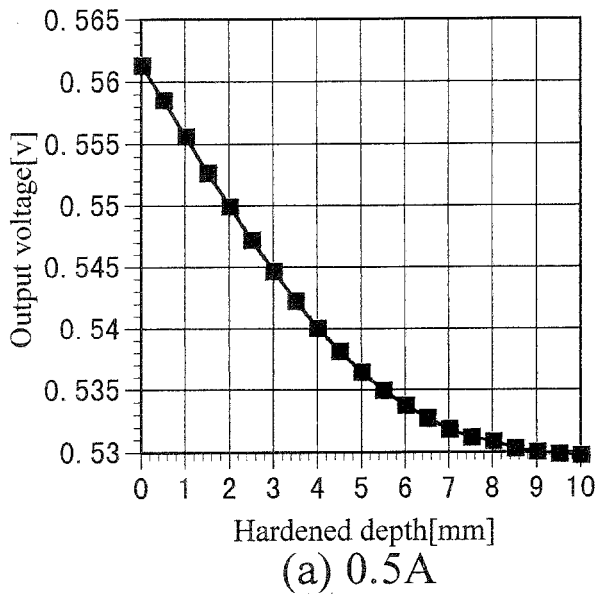
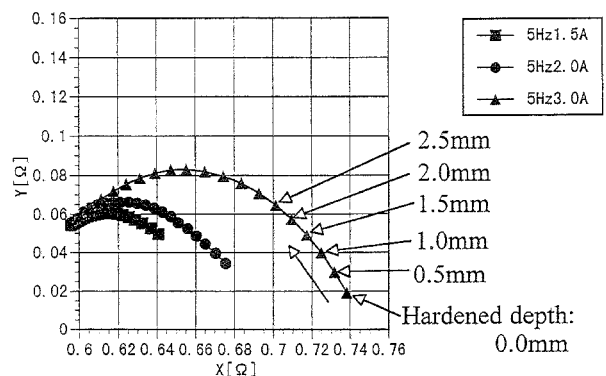
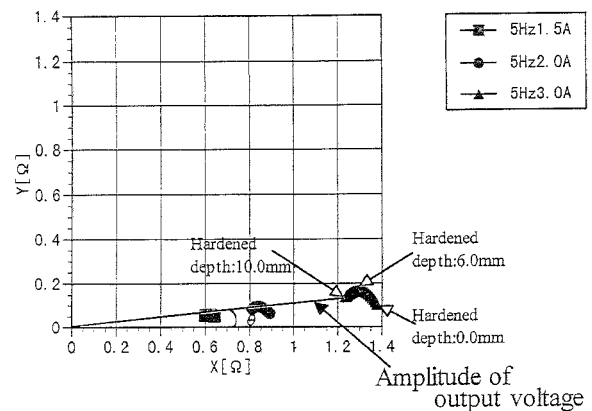
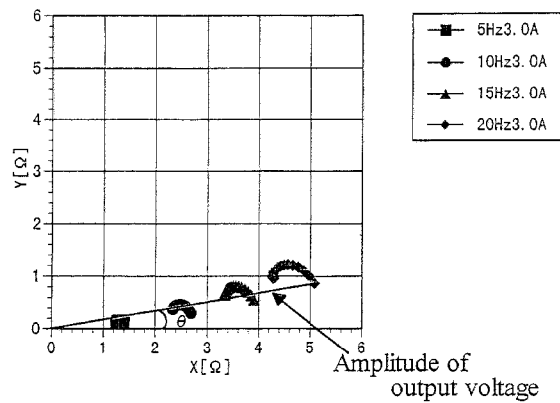


Fig.12 Output voltage as a function of hardened depth
(Frequency:15Hz, analysis)

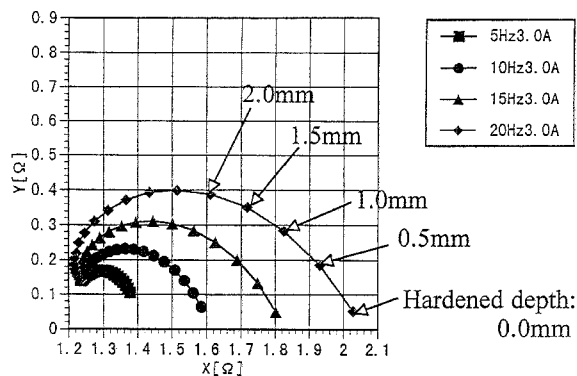
2. 5 複素数表示

以上の結果から、焼入れ深さ変化には励磁電流に対する位相角と振幅の2要素の変化を確認することができた。そこで、検出コイルに得られる出力電圧（磁束波形）から実数成分、虚数成分のリサージュ表示を求めた。解析結果をFig.13 (a) ~ (d) にそれぞれ示す。なおFig.13 (b)、(d) の結果は、各条件変化の比較が行なえる様、焼入れ深さ10mm時の値を全て同じ座標に表し直した図である。これらの結果から励磁電流が大きくなるにつれ全体の振幅が大きくなる様子が理解できる。また、焼入れ深さが深くなるにつれ、原点からの距離（振幅）が減少すると同時に、 $Y=0$ ライン上からの位相角 θ は、ある焼入れ深さでピークを表し、その後減少傾向を示すといった曲線を示すことが理解できる。またFig.13 (a)、(b) は励磁電流を、(c)、(d) は周波数をパラメータとした結果である。同周波数では、励磁電流が高くなると全体的な曲線の振幅および位相が増加するので、判別がしやすくなることが理解できる。これに対し周波数変化では、渦電流の浸透深さが関係するため、周波数が高くなるにつれ焼入れ深さが浅い領域の判別は容易になるが、深い領域の判別は困難になることが理解できる。





(c) Lissajous waveform of output voltage
(Change of frequency)



(d) Enlarged lissajous waveform
(Change of frequency)

Fig.13 Effect of current and frequency on Lissajous waveform

2. 6 励磁-検出コイル間距離の影響

Fig.4のモデルに対し、励磁コイルと検出コイルの距離が、位相角や振幅に及ぼす影響を数値解析により評価した。解析では、励磁コイルと検出コイルの距離を0~39mmの間で変化させた。また周波数は5Hzとし、励磁電流は1.5A一定とした。得られた結果をFig.14 (a)、(b) にそれぞれ示す。Fig.14 (a) は焼入れ深さに対する位相角を、Fig.14 (b) は振幅値を示している。励磁-検出コイル間が27mmまでは増加するに従い、焼入れ深さ0mm時の位相角とピーク値の位相角との差は増加傾向にあるが、27mm以上距離を離すと、その位相角の差は減少傾向を示す事が理解できる。また振幅の大きさは励磁-検出コイル間が増加するに伴い、焼入れ深さ0~10mm間の振幅差は減少することが理解できる。これらの結果から、このモデルに対し、位相角と振幅値の両者を利用して焼入れ深さの評価を行なう場合、励磁コイルと検出コイルの距離は27mm程度が適当だと考えられる。

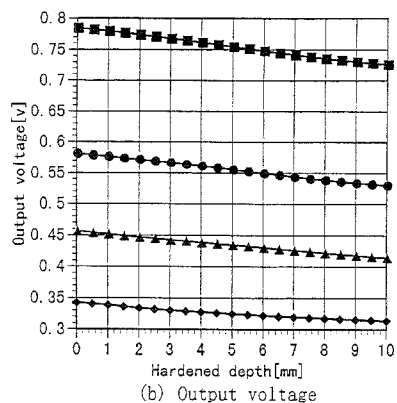
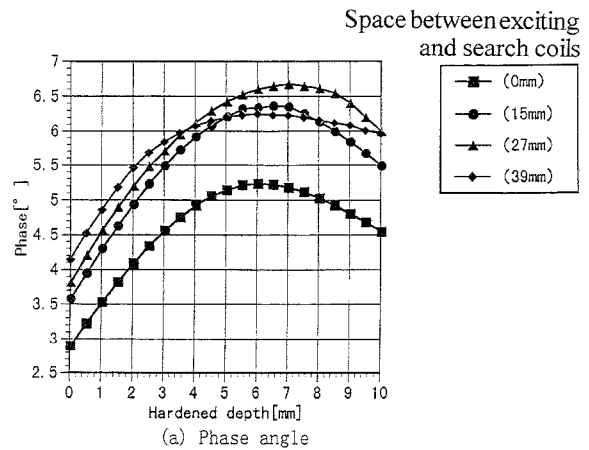
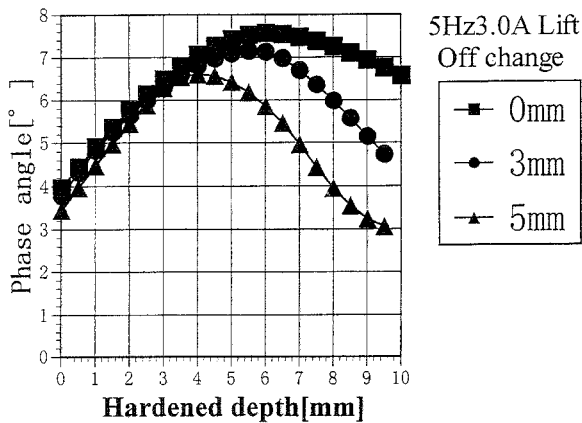


Fig.14 Effect of space between exciting and search coils on phase angle and output voltage

2. 7 リフトオフの影響

焼入れ鋼材と、励磁-検出コイルとの距離変化（リフトオフ変化）が位相角および振幅に与える影響を数値解析により評価した。解析では、励磁-検出コイルの内、外径及び巻数、距離（27mm）を一定とし、中に挿入する鋼材の直径を変化させた時の評価を行なった。なお周波数は5Hz、励磁電流は3.0A一定とした。解析結果をFig.15 (a)、(b) にそれぞれ示す。Fig.15 (a) から、リフトオフが大きくなるにつれ、位相角のピーク位置が現れる焼入れ深さが浅くなる事が理解できる。同時に、ピーク位置以降の焼入れ深さに対する位相角の減衰が大きくなることも合わせて理解できる。これは、リフトオフが大きくなるにつれ、鋼材内部に発生する渦電流の絶対量が減少するためだと考えられる。次にFig.15 (b) から、リフトオフが大きくなるにつれ、全体的な振幅値は減少することが理解できる。しかし、リフトオフが大きくなるにつれ、焼入れ深さ0mm~10mm間の振幅差は増加することが分かる。



(a) Phase angle when lift off changes

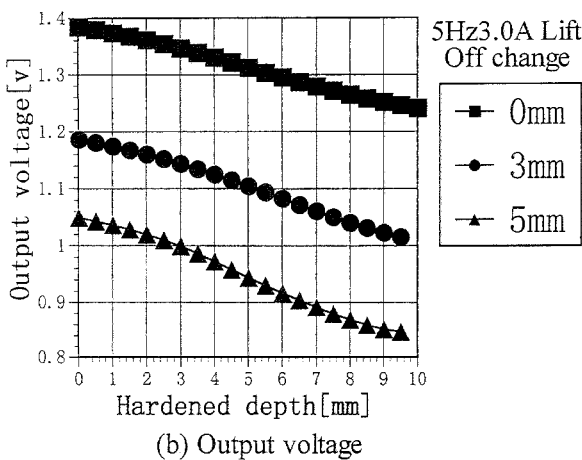
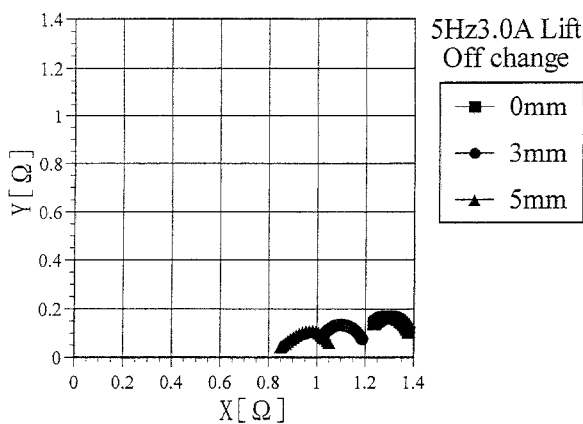
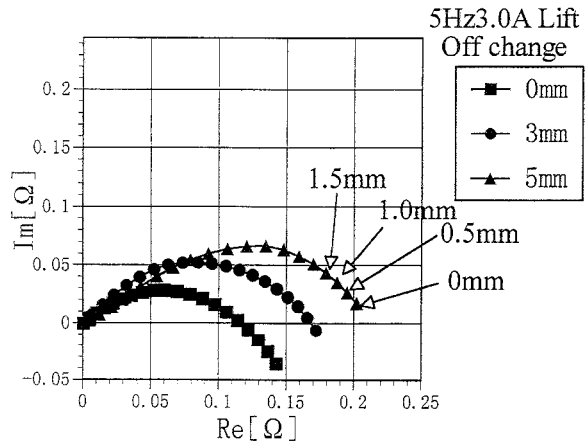


fig.15 Effect of lift off on phase angle and output voltage

次に各リフトオフにおける焼入れ深さ変化に対する出力電圧のリサージュ表示を求めた。結果をFig.16 (a)、(b) にそれぞれ示す。



(a) Lissajous waveform of output voltage (Lift off change)



(b) Enlarged lissajous waveform (Lift off change)

fig.16 Effect of lift on Lissajous waveform

これは比較を容易にするため、第一象限内に表し直した結果である。またFig.16 (b) は、各リフトオフ波形の焼入れ深さ10mm時の値を原点に置き直した結果である。リフトオフが増加するに伴い、焼入れ深さに対する位相角変化は減少するが、焼入れ深さ0mm～10mm間の振幅値の差が増すため、リサージュ表示ではリフトオフに関係無く、焼入れ深さの評価が可能であることが理解できる。

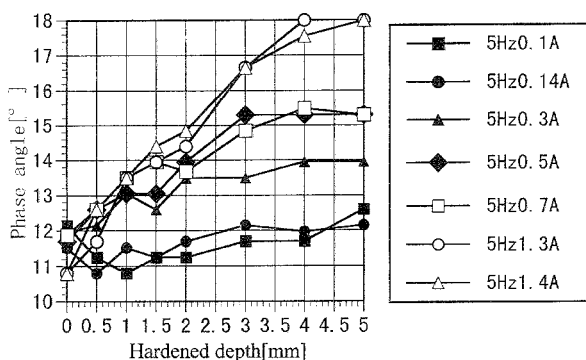
IV 検証実験

本セミナーでは、予め励磁電流を2.0A (200AT) 程度まで増加させても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、出力電圧波形のピーク値の大きさと、励磁電流波形のピーク値と出力電圧の積分波形(磁束波形)のピーク値との位相差を実験により評価した。実験にはFig.4と同形状(φ30×150mmの円柱形)のS45C鋼材で、鋼材表面より、深さ0.0、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0mmで高周波焼入れをし、さらに焼き戻し処理を施した試験片8本を作成し評価を行った。

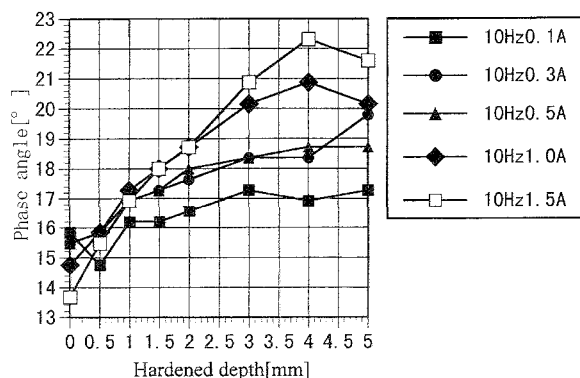
1 位相角評価

焼入れ深さ変化に対する位相角変化の実験結果をFig.17 (a) ~ (c) にそれぞれ示す。励磁電流値が0.1～0.5Aと小さい領域では、ばらつきが大きく明確な位相角変化は得られないが、どの周波数でも1.0A以上であれば位相角による焼入れ深さ判別が行えることが分かる。また解析同様、焼入れ深さが深くなるにつ

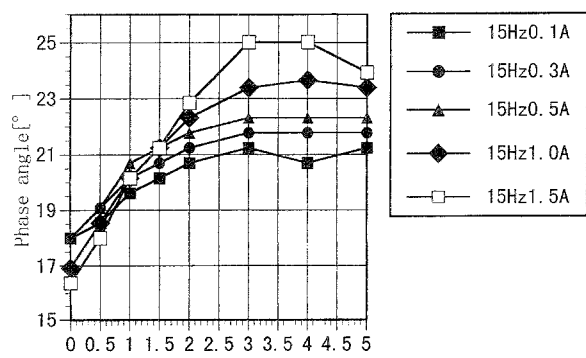
れ位相角は増加傾向にあることが分かった。周波数10 Hzでは励磁電流1.5A時で深さ4mmの点、15Hz、1.5A時では3~3.5mmの点で位相角のピーク点が現われることが理解できる。これは解析結果 (Fig.6 (a) ~ (c)) と同様の傾向を示している。



(a) Frequency:5Hz



(b) Frequency:10Hz

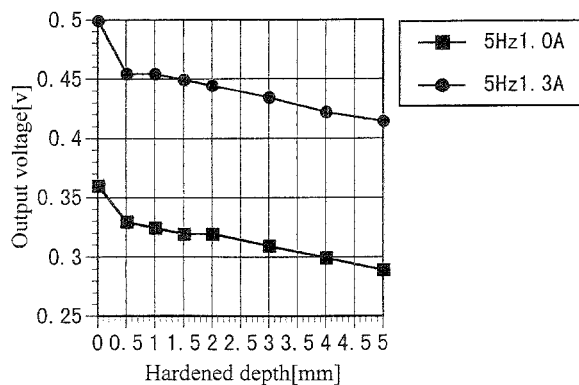


(c) Frequency:15Hz

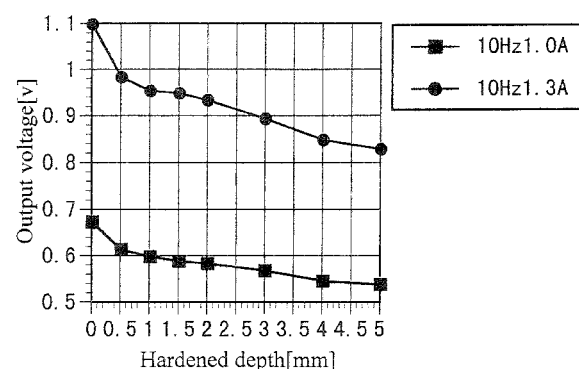
fig.17 Phase angle a function of hardened depth (experiment)

2 出力電圧評価

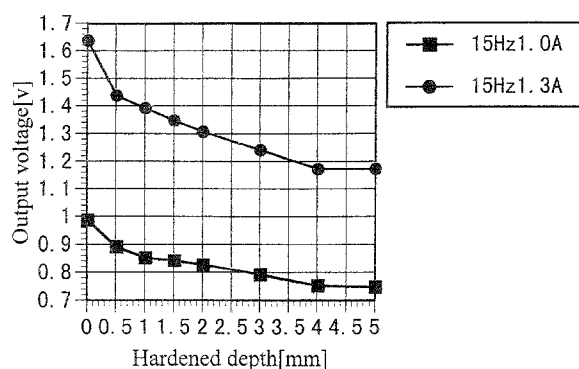
焼入れ深さ変化に対する出力電圧のピーク値変化の実験結果をFig.18 (a) ~ (c) にそれぞれ示す。どれも焼入れ深さが深くなるにつれて緩やかな減少傾向を示していることが理解できる。また、その傾向は周波数および励磁電流値が大きいほど顕著である。



(a) Frequency:5Hz



(b) Frequency:10Hz



(c) Frequency:15Hz

fig.18 Relation between output voltage and hardened depth (experiment)

V 商品化

本内容は商品化に結び付けることができた。その商品の概要をFig.19に示す。これは予め、焼入れ鋼材の基準データを入力することにより、焼入れ深さがデジタル表示で現れる仕組みとなっている。使用周波数は10Hz一定としてあるため、渦電流の浸透深さから、高周波焼入れ深さの測定範囲は約5mm程度までではあるが、位相差及び出力電圧の2要素で計測可能であるため、精度の高い検出が可能となっている。



高周波焼き入れ深さが 切断しないでわかる!!

(概要・特徴)	※測定対象
交流磁化遅れ方式を採用した高周波焼入れ深さ測定装置です。	高周波焼入れ鋼材 Ti6Al4V合金
同じ材料の基準片で校正を行い、測定ワークを切断することなく焼入れ深さを表示します。	※仕様
高周波焼入れ鋼材の他、Ti6Al4V合金深さ測定用もあります。	測定範囲：0.3～5mm デジタル表示 電源：AC100V 50/60Hz 消費電力：W342×D305×H177mm 質量：約8kg

Fig.19 本能力開発セミナーで商品化した装置の概要

VI まとめ

本稿で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) S45C鋼材について、マルテンサイトと元組織の導電率及び磁化曲線の測定により、マルテンサイトは元組織より導電率と最大透磁率が共に減少する事が理解できた。また硬度が増すにつれ、その傾向は大きいことが判った。
- (2) 焼入れ深さ変化における、励磁電流波形に対する出力電圧（磁束波形）の位相角変化は、マルテンサイトと元組織の導電率の差より磁化曲線の差に大きく影響されていることが理解できた。
- (3) 焼入れ層は元組織領域より透磁率は低い。そのため焼入れ深さが増加するに伴い、材料表層に透磁率の低い領域が増すため、出力電圧の振幅は深さに比例して減少傾向を示し、材料内部に生じる総渦電流量の変化に伴い、位相角は、ある深さでピークを持つことが理解できた。
- (4) 焼入れ深さ変化に伴い、励磁電流波形に対する位相角および出力電圧の振幅は変化するため、この2要素を利用したリサージュ表示を利用し、焼入

れ深さを非破壊的に評価できることを数値解析および検証実験により確かめることができた。

- (5) 実現場での装置コストや検査作業性を考慮に入れると、本手法は低周波数を用い、未飽和領域磁化のため、パワーアンプ等の出力も小さくてすみ、測定原理も容易なことから、安価で扱いやすい検査手法だと考えられる。
- (6) 本内容は、事業主団体方式に乗っ取り、能力開発セミナーとして行ってきた事業である。雇用・能力開発機構として、本能力開発セミナーはベンチャー企業等、地域基盤産業へ大きく貢献できた内容の一つだと考えている。

謝 辞

本能力開発セミナーを進めるにあたり、適切なアドバイスや御助言等を頂きました岡山大学、工学部の高橋則雄教授と高橋研究室の皆様方、並びに職業能力開発総合大学校、電気工学科の橋本光男教授、また焼入れ鋼材作成等で多大なるご支援を頂きました岡山職業能力開発短期大学校、生産技術科、野村龍司教授に深く感謝致します。

〔参考文献〕

- (1) 北川茂：磁化遅れを用いた鋼の非破壊評価、材料試験技術、Vol.30、No.1、pp.39-43（1985）
- (2) 北川茂：磁化を利用した材料評価、熱処理、26巻4号、pp.289-291（1985）
- (3) 齊藤惇：非破壊でできる焼き入れ深さの測定器、日本金属学会誌臨時増刊号、pp.124-126（1990）
- (4) 遠藤敏夫、八木富一、高田健一：非破壊式・焼入硬化層深さ測定装置の開発、電気製鋼62巻3号、pp.175-182（1991）
- (5) 石原安興、上野大成、末永允、中野英治：磁気特性によるオーステンパ球状黒鉛鋳鉄の組織判定、熱処理32巻1号、pp.16-21（1992）
- (6) 平邦昭、綱島正一：表面焼入材の内部硬度分布の非破壊測定装置の開発、熱処理28巻5号、pp.334-337（1987）
- (7) 中田高義、高橋則雄：電気工学の有限要素法、（1982）森北出版
- (8) 後藤雄治、Radin Ali、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、電気・情報関連学会中国支部第50回連合大会講演論文集、電気学会、pp.86-87（1999）
- (9) 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、(社)日本機械学会、第76期全国大会講演集、pp.353-354 (1998)
- (10)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)
- (11)Y.Gotoh and M.Hashimoto : Approximate Numerical Analysis Method of Alternating Magnetic Flux Leakage Testing, Proceeding of International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems, V.Kose and J.Sievert (Eds.) IOS Press., pp.193-196 (1998)
- (12)後藤雄治、田中穰、矢野博明：等価正弦波交流非線形数値解析を用いた高周波焼入れ深さ測定評価、第8回MAGDAコンファレンス講演論文集、日本AEM学会、pp.151-154 (1999)
- (13)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、平成11年度春季大会講演概要集、(社)日本非破壊検査協会、pp.77-78 (1999)
- (14)後藤雄治、田中穰、矢野博明：交流磁場を使用した高周波焼入れ深さ評価、第14回岡山職業能力開発短期大学校研究発表講演予稿集、pp.7-8 (1999)
- (15)後藤雄治、田中穰、矢野博明：低周波磁場による高周波焼入れ深さ評価、1999年度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.71-72 (1999)
- (16)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)
- (17)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)