

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420391

研究課題名(和文) 磁気センサを用いた周波数探査による非破壊材質評価システムの構築

研究課題名(英文) Development of nondestructive material evaluation system by frequency searching of magnetic properties with a magnetic sensor

研究代表者

槌田 雄二 (TSUCHIDA, Yuji)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：80284785

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁気的手法を用いて非破壊的な鉄鋼材の材質評価システムを開発し、その実用化に対する検討を行った。炭素鋼焼入れ材に対して、用いる周波数成分によって得られる磁気特性が異なることを示し、材質評価を非破壊的に可能とするために、周波数掃引励磁スペクトログラム法を開発した。同法が鋼材焼入れ条件を定性的に評価可能であることを明らかにし、実製品である車のシートフレーム部品の降伏応力を定量的に評価するため、降伏応力が既知である母材試料を用いて、測定結果から得られる磁気特性と降伏応力に相関関係を得た。母材試料から取得したデータより、車のシートフレーム部品の降伏応力を定量的に評価可能とした。

研究成果の概要(英文)： We have proposed the frequency sweeping excitation and spectrogram method by a magnetic sensor for low carbon steels. It was examined that the degrees of yield strength of low carbon steels were varied depending on hardened conditions. We evaluated the yield strength of them and the hardened practical car seat parts quantitatively and non-destructively by our proposed method. As a result, the followings can be summarized, (1)The proposed method is applicable to evaluate the degree of the yield strength hardened, the spectrograms of Hc and Wm, show the changes of the yield strength qualitatively. (2)By using the change ratio of Hc and the frequency gradient of Wm, which are derived from the spectrograms, it was shown that the good correlation depending on the degree of the yield strength had been confirmed. It can be said that our proposed method can evaluate the mechanical characteristics by measuring magnetic properties quantitatively.

研究分野：磁気工学

キーワード：磁気センサ 周波数探査 材質評価 非破壊評価 計測システム

1. 研究開始当初の背景

機械構造部材のほとんどは鉄系の鉄鋼材であり、強磁性体である。このような機械構造部材は、通常、機械的強度にのみ注意が払われ、磁気特性は考えられていない。また、鉄鋼材の組織的な材質評価のためには、試料を切出し、X線分析装置、電子顕微鏡等、高額な分析機器を用いる必要がある(破壊試験)。機械的強度と相関が強い磁気特性に着目し、その特性を詳細に吟味すれば、機械構造部材の材質評価が可能となるはずである。磁気センサを用いて材質評価が非破壊的に可能となれば、製造ラインにおいて「材質評価」がオンラインで可能となり、機械構造材を用いた最終生産品を高品質に保つことが可能となる。また、重要な機械構造部材には高強度・高硬度を得る目的で焼入れなどの熱処理が施されるが、熱処理によっても機械構造部材の磁気特性は変化するので、熱処理の効果についても磁気センサを用いて非破壊的に評価することが可能である。特殊な熱処理による機械的強度向上の評価が可能となれば、磁気センサを用いた非破壊評価システムを「機械強度制御」へ積極的に拡張することが可能となる。

研究代表者らは、以前より、磁気センサを用いることで、鉄鋼材の材質評価を定性的・定量的に評価する手法についての検討を行ってきた。本申請研究では、これまでの研究代表者らが行ってきた磁気センサを用いた非破壊評価手法に関する研究成果を発展させて、磁気センサを用いて機械構造部材機械強度に対する材質評価を非破壊的に可能とする計測システムの構築を行う。

具体的には、機械構造部材の材質評価に、研究代表者らが考案した周波数掃引励磁スペクトログラム法を中心として用いる。周波数掃引励磁スペクトログラム法とは、Fig. 1に示すように、複数の周波数成分を掃引励磁し、磁気センサにて測定される磁気特性から、最終的にスペクトログラムを用いて材質評価を行う手法である。Fig. 1に示すスペクトログラムは、横軸を測定位置、縦軸を周波数、磁気特性測定値を色の度合で表示することで、複数の周波数成分から得られた磁気特性を二次元的に表わすことができ、材質変化における磁気特性変化を定性的・定量的に評価することができる。磁気特性は励磁周波数によって異なり、複数の周波数下における磁気特性変化は材質変化検出に対して有益な情報であること、つまり、複数周波数励磁下の磁気特性測定による周波数探索は材質評価に対して効果的であることをこれまで明らかにしてきた。

Fig. 2に磁気センサの構造を示す。磁束密度測定用Bコイルと磁界強度測定用としてロゴスキー・チャトックコイルが設置されており、言わば聴診器と同様に、外部から非破壊的に磁束密度波形と磁界強度波形の測定が可能である。各測定時には、励磁周波数や

試料の磁気特性が異なる場合でも、Bコイルより測定する磁束密度の最大値を一定となるようにフィードバック制御を行うことによって、試料の材料特性が異なる場合でも同一磁束条件下で磁気特性の比較が可能である。この磁気特性測定により材質評価を実施する。

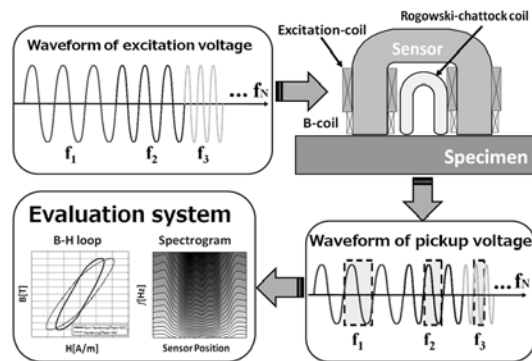


Fig. 1 Our proposed frequency sweeping excitation and spectrogram method (FSES method)

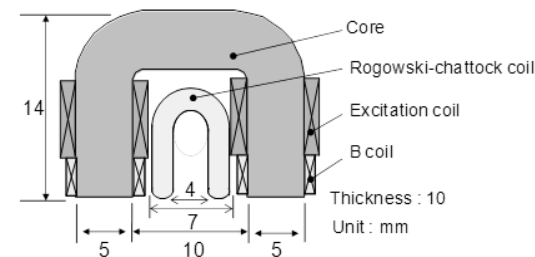


Fig. 2 Proposed magnetic sensor

2. 研究の目的

本申請研究では、以上のような各周波数成分の磁気特性の情報を含む周波数掃引励磁スペクトログラムと機械構造部材の材質変化との相関関係を定性的かつ定量的に明らかにする。更に、研究代表者らが開発してきた磁気センサを用いて、機械構造部材の機械強度特性と磁気特性の相関関係を定量的に明らかにする。以上を統合することによって、機械構造部材の非破壊手法を複合的に材質評価へ適用する。周波数探索を特徴とする周波数掃引励磁スペクトログラム法(FSES法)を中心として、磁気センサを高感度化、複合的に用いることによって、非破壊材質評価システムの構築を行う。

3. 研究の方法

Fig. 1にFSES法の原理を示す。FSES法は、複数の周波数成分を掃引励磁し、磁気センサにて測定される磁気特性から、最終的にスペクトログラム法を用いて焼入れを評価するといった手法である。Fig. 1に示すスペクトログラム法は、横軸を測定位置、縦軸を周波数、磁気特性測定値を色の度合で表示することで、複数の周波数成分から得られた磁気特性を二次元的に表わすことができ、焼入れ領域における磁気特性変化を定量的に評価す

ることができる。Fig. 2 に磁気センサの構造を示す。磁束密度測定用 B コイルと磁界強度測定用としてロゴスキー・チャトックコイルが設置されており、外部から非破壊的に磁束密度波形と磁界強度波形の測定が可能である。各測定時には、励磁周波数や試料の磁気特性が異なる場合でも、B コイルより得られる磁束密度の最大値を一定となるようにフィードバック制御した。そのため、試料の材料特性が異なる場合でも同一磁束条件下で磁気特性の比較が可能である。また、磁束密度を同条件とした場合、保磁力と磁気損失を用いることでリフトオフの影響をほとんど受けず焼入れの評価が可能であることを報告した。本測定で用いた車のシートフレーム部品は複雑な形状であり、不均一なリフトオフが生じる可能性があるため、本測定では保磁力 H_c [A/m] と磁気損失 W_m [W/kg] を用いて焼入れ評価を行った。

実製品の降伏応力を定量的に評価するためには、基準となる測定データが必要である。そこで、焼入れ条件が異なる複数の母材試料を用意し、硬度の測定を行った。硬度は、降伏応力の 3 倍程度であると想定した。複数の母材試料の引張試験から得られたデータより、本測定で用いた母材試料の降伏応力 [kgf/mm²] は、ビッカース硬度 [HV] の約 1/3 倍であることが明らかになっている。本測定では焼入れ度合いを表す指標値として、硬度から換算された降伏応力を用いた。Fig. 3 に示す試料は、車のシートフレーム部品の母材試料（自動車部品用薄板 SPC）であり、縦 131 mm、横 200 mm、厚さ 0.6 mm の薄板試料である。x = ±20.0 mm の位置で、10.0 mm おきに各 3 点ずつ合計 15 点の硬度を測定し、その平均値より降伏応力を算出した。Table 1 に母材試料の焼入れ条件（加熱コイルの励磁電流値）と、硬度及び降伏応力を示す。HA-80 は 2 個、その他の条件では各 3 個ずつ合計 23 個の母材試料を用意した。Table 1 より、降伏応力は加熱コイル電流値が高くなるほど、増加する傾向であることが分かる。

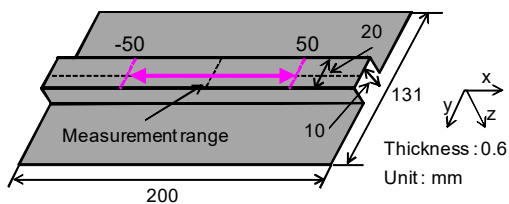


Fig. 3 Hardened carbon steel plate.

Table 1 Hardness and yield strength of base samples

Name of Samples	Non-hardened	HA75	HA80	HA85	HA95	HA110	HA125	HA140
Exciting current [A]		75	80	83	95	110	125	140
Hardness [HV]	138.3 ~ 140.1	194.1 ~ 197.0	204.1 ~ 208.2	202.2 ~ 209.4	268.4 ~ 281.9	378.5 ~ 384.9	392.5 ~ 403.4	381.2 ~ 385.8
Yield strength [kgf/mm ²]	46.1 ~ 46.7	64.7 ~ 65.7	88.0 ~ 93.7	100.7 ~ 103.1	122.8 ~ 127.3	126.2 ~ 127.3	130.6 ~ 134.5	127.1 ~ 128.6

4. 研究成果

FSES 法を用いて母材試料の焼入れ評価を行う。Fig. 3 に示すように、直線状に 100 mm、1 mm 間隔でセンサを走査して測定した。最大磁束密度を 0.1 T とし、励磁周波数は 10 Hz から 30 Hz まで、2 Hz ごとに 11 個の周波数成分を用いた。Fig. 4 に保磁力のスペクトログラムを焼入れ条件ごとに示す。加熱コイル電流値が増加するにつれて保磁力の値も増加することが分かる。また、保磁力では周波数に依存する値の変化がほとんど無く、スペクトログラムがほぼ一色である。Fig. 5 に磁気損失のスペクトログラムを焼入れ条件ごとに示す。保磁力と同様、加熱コイル電流値の違いによるスペクトログラムの変化が得られた。磁気損失は保磁力とは異なり、周波数に依存する値の変化が見られ、スペクトログラムの色度合いに変化が表れている。以上の結果より、本手法によって、加熱コイル電流値に依存する降伏応力変化を定量的に評価することが可能である。

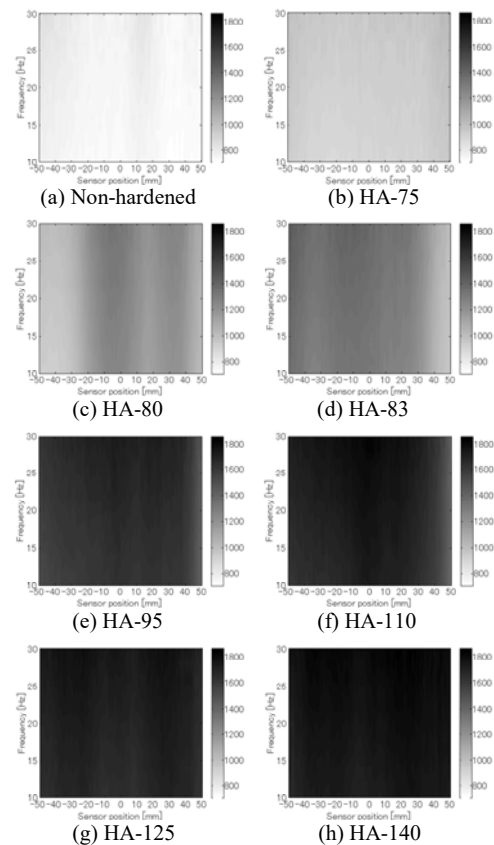


Fig. 4 Spectrogram of coercive force, H_c .

保磁力と磁気損失を用いて降伏応力の定量的評価を行うため、それぞれの物性値の周波数特性及び変化率（絶対値）を検証し、降伏応力と相関が得られる代表値の検討を行った。Fig. 6 と Fig. 7 に、Fig. 3 に示す試料の中心 (x = 0 mm) における保磁力及び磁気損失の周波数特性を示す。Fig. 4 から分かるように、保磁力では、降伏応力による変化は見られるが、周波数に依存する変化はほと

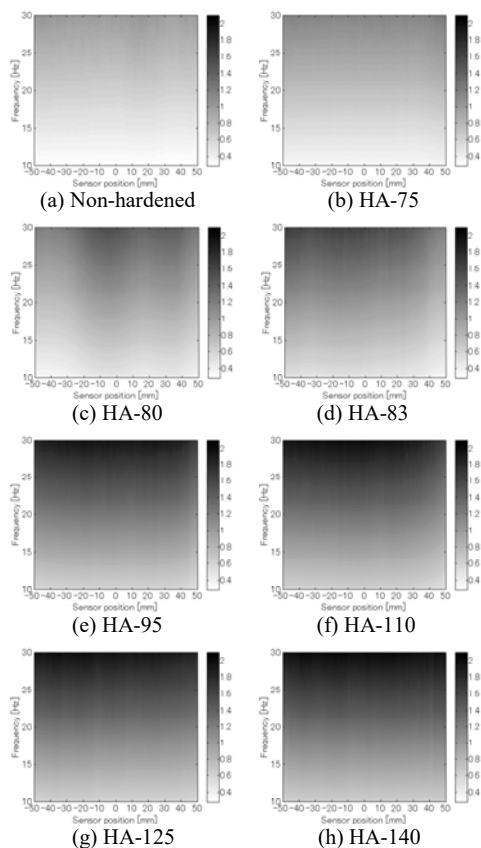


Fig. 5 Spectrogram of magnetic power loss, W_m

んど無く、各試料ごとにフラットな直線グラフとなる。それに対して磁気損失では、降伏応力による変化があり、かつ周波数に対して値が増加し、各試料ごとに右上がりのグラフとなる。また、Fig. 7より $f = 10$ Hz 時と $f = 30$ Hz 時を比較すると、信号値の最大・最小値の幅が増加している。つまり、磁気損失の周波数勾配は降伏応力により異なることが分かる。以上の結果より、磁気損失の周波数勾配を用いることで、より定量的に評価することが可能であると考えられる。

次に変化率の検証を行った。Fig. 8とFig. 9に試料の中心 ($x = 0$ mm) における保磁力及び磁気損失の変化率を示す。両者ともに高い変化率を示し、 $f = 10 \sim 30$ Hz 間では周波数に依存する変化率の変化はほとんど無い。また、保磁力の変化率は磁気損失に比べ、10 ~ 20 %程度高い。以上の結果より、保磁力は周波数に依存する値の変化は無いが、変化率は大きく変化する。したがって、保磁力の変化率を用いることでより有効に降伏応力の定量評価が可能であると考えられる。

Fig. 10とFig. 11に、23個の母材試料からそれぞれ求めた代表評価値と降伏応力との相関関係を示す。保磁力の変化率における相関係数 r は 0.98、磁気損失の周波数勾配における相関係数 r は 0.98 を示し両者ともに強い相関が得られた。また、Non-hardened, HA75HA80~83, HA95~140 に大きく分けることができ、焼入れ条件による降伏応力の推定

も可能であると考えられる。以上の結果より、Fig. 10とFig. 11の結果を実製品に適用すれば、実製品における降伏応力の定量的評価が可能であると考えられる。

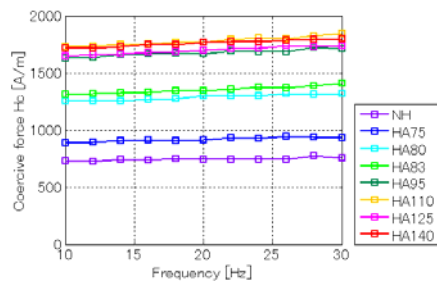


Fig. 6 Coercive force depending on frequency ($x = 0$ mm, $f = 10 - 30$ Hz).

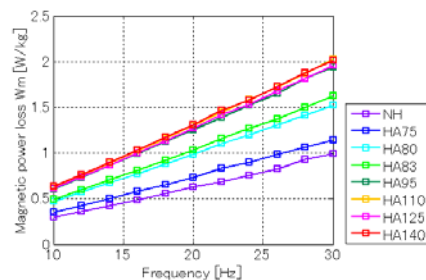


Fig. 7 Magnetic power loss depending on frequency ($x = 0$ mm, $f = 10 - 30$ Hz).

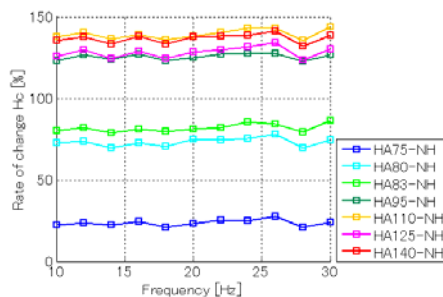


Fig. 8 Rate of changes from 10 Hz to 30 Hz (H_c).

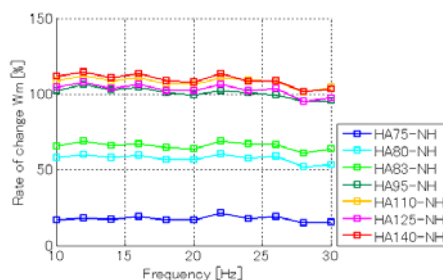


Fig. 9 Rate of changes from 10 Hz to 30 Hz (W_m).

スペクトログラム法による降伏応力の定量的評価及び、上述した降伏応力の定量的評価を実製品で試みた。Fig. 12に実製品である車のシートフレーム部品を示す。この試料は、Fig. 3で示した母材試料（自動車用薄板SPC材）を二枚重ねプレス加工により作製されている。全領域で焼入れが施されていない試料(Fig. 12(a))と、部品を高強度化するために、特定の領域に焼入れが施されている試料(Fig. 12(b))の二つがある。最大長さ 440.0

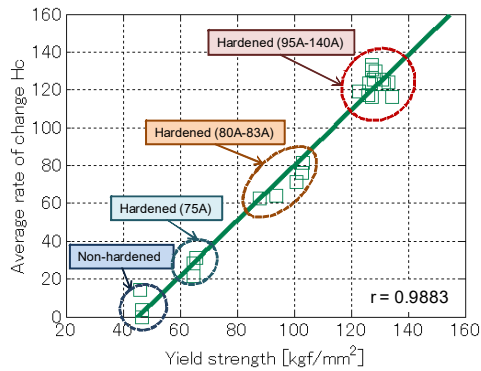


Fig. 10 Quantitative evaluation of degree of yield strength by average rate of change of H_c .

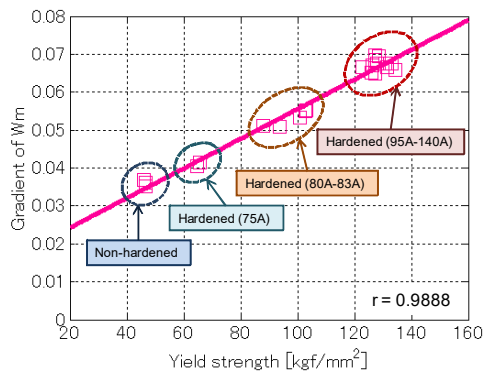


Fig. 11 Quantitative evaluation of degree of yield strength by gradient of W_m .

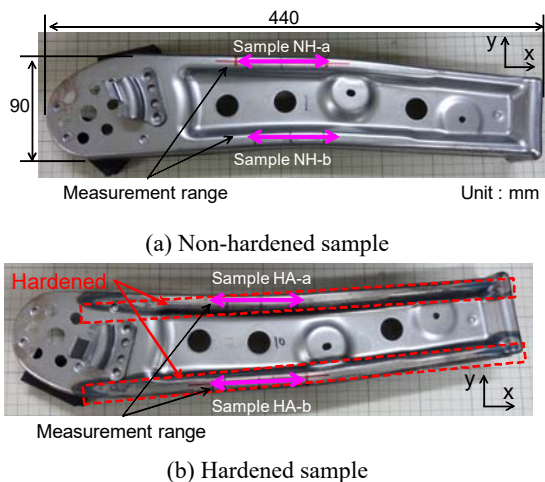


Fig. 12 Practical car seat parts.

mm, 最大幅 90.0 mm の複雑な形状をした部品である。Fig. 12 に示すように、測定対象領域を 2 箇所決め、その中央部を原点として長手方向に磁気センサを $x = \pm 35.0$ mm 移動させた。移動間隔は 1.0 mm で合計 71 点の測定を行った。また、 $x = \pm 30.0$ mm 領域で 3 点の硬度が測定され、一つの測定領域につき合計 9 点の硬度が測定されている。Fig. 13 と Fig. 14 に保磁力の変化率と磁気損失の周波数勾配を用いた、実製品の降伏応力の定量的評価を示す。何れも 10 % 程度の誤差範囲で一致した。以上の結果より、本手法を用いれば、実製品における降伏応力の定量的評価が

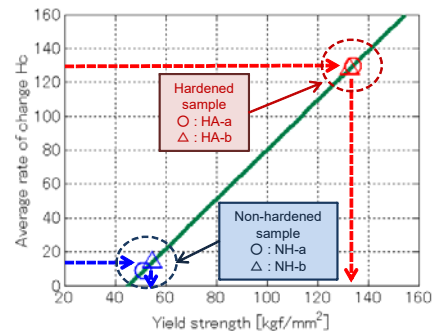


Fig. 13 Quantitative evaluation of yield strength by average rate of change of H_c (Practical car seat parts).

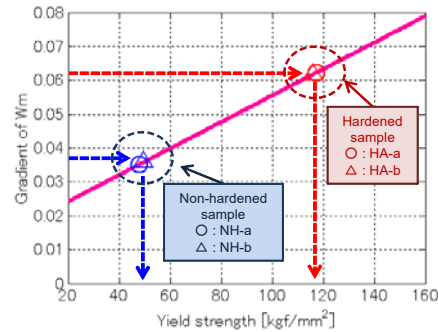


Fig. 14 Quantitative evaluation yield strength by gradient of W_m (Practical car seat parts).

可能であると考えられる。また、実際に評価を行う製品と同じ条件で母材試料のデータを取得すれば、保磁力の変化率と磁気損失の周波数勾配は同様の結果を得られると考えられる。

本研究では、電磁気的手法である周波数掃引励磁スペクトログラム法による非破壊材質評価を実用的に用いるため、焼入れ度合いによって異なる降伏応力の定量的評価手法の検討及び、実製品においてその手法が適用可能であるか検討した。以下にまとめる。

- (1) 保磁力と磁気損失を用いたスペクトログラムによって、焼入れ条件によって異なる降伏応力を定性的に評価可能であることを示した。
- (2) 保磁力では変化率（絶対値）、磁気損失では周波数に対する勾配を利用することで、降伏応力と強い相関を得ることができ、降伏応力の定量的評価が可能であることを示した。
- (3) スペクトログラム法によって、実製品（車のシートフレーム部品）の焼入れを定性的に評価可能であることを示した。
- (4) 複数の母材試料から取得した測定データを利用することで、実製品における降伏応力を定量的に評価できることを示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① Y. Tsuchida, Yuki Kudo, and M. Enokizono, Local Hardening Evaluation of Carbon

Steels by Using Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, 査読有, Vol. 36, pp. 110008-1-8, 2016.3
DOI: 10.1063/1.4974686

- ② Yuji Tsuchida, and Masato Enokizono, Non-Destructive evaluation of materials by magnetic measurements, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 856, pp. 141-146, 2016.3
10.4028/www.scientific.net/MSF.856.141
- ③ Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Vector Magnetic Characteristic Analysis of a Permanent Magnet Motor by Controlling Local Stress, IEEE Trans. on Magnetics, 査読有, Vol.51, No.3, 8101904(4pages), 2015.3
DOI: 10.1109/TMAG.2014.2362515

[学会発表] (計16件)

- ① 槌田雄二, Hセンサを用いたバルクハウゼン信号による電磁鋼板の残留応力評価, 電気学会マグネティックス研究会, 2016年08月01日-08月01日, 高山市民文化会館(岐阜県高山市)
- ② Y. Tsuchida, Local Hardening Evaluation of Carbon Steels by Using Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, July 17-July 22, 2016, the Georgia Tech Hotel and Conference Center, Atlanta (USA)
- ③ 槌田雄二, 磁気センサを用いた非破壊材質評価, 平成28年電気学会全国大会, 2016年03月16日-03月18日, 東北大学(宮城県仙台市)
- ④ 槌田雄二, 金属材料改質技術と非破壊材質評価, 第24回MAGDAコンファレンス in Tohoku 電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス, 2015年11月12日-11月14日, 東北大学(宮城県仙台市)
- ⑤ 槌田雄二, 周波数掃引スペクトログラムを用いた焼入れ自動車鋼材の非破壊評価, 第24回MAGDAコンファレンス in Tohoku 電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス, 2015年11月12日-11月14日, 東北大学(宮城県仙台市)
- ⑥ 槌田雄二, 高周波誘導加熱による無方向性電磁鋼板の磁気特性の制御, 第24回MAGDAコンファレンス in Tohoku 電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス, 2015年11月12日-11月14日, 東北大学(宮城県仙台市)
- ⑦ 槌田雄二, 周波数掃引スペクトログラム法を用いた自動車用鋼板の非破壊評価, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 2015年09月02日-09月04日, 大分大学

(大分県大分市)

- ⑧ 槌田雄二, 高周波誘導加熱による無方向性電磁鋼板の磁気特性非破壊評価, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 2015年09月02日-09月04日, 大分大学(大分県大分市)
- ⑨ 槌田雄二, 周波数掃引スペクトログラム法を用いた焼入れ非破壊評価, 電気学会マグネティックス研究会, 2015年07月16日-07月17日, 茨城大学(茨城県日立市)
- ⑩ 槌田雄二, 熱処理を施した無方向性電磁鋼板の磁気特性, 電気学会マグネティックス研究会, 2015年07月16日-07月17日, 茨城大学(茨城県日立市)
- ⑪ Y. Tsuchida, Non-destructive Evaluation of Materials by Magnetic Measurements, The ninth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'9), July 05-July 08, 2015, Technical University of Sofia, Sofia (Bulgaria)
- ⑫ 槌田雄二, 周波数掃引スペクトログラム法を用いた焼入れ鋼材の非破壊評価, 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2015年05月14日-05月15日, ハウステンボス内タワーシティ(長崎県佐世保市)
- ⑬ 槌田雄二, 熱処理を施した無方向性電磁鋼板の磁気特性非破壊評価, 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2015年05月14日-05月15日, ハウステンボス内タワーシティ(長崎県佐世保市)
- ⑭ Y. Tsuchida, Measurement of iron loss in wound iron core by using visualizing iron loss distribution system, the 13th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, September 11, 2014, Starhotel Majestic, Torino (Italy)
- ⑮ 槌田雄二, 磁界センサを用いたバルクハウゼン信号による残留応力評価, 電気学会マグネティックス研究会, 2014年07月30日, ホテルパーク(岐阜県岐阜市)
- ⑯ Y. Tsuchida, Vector Magnetic Characteristic Analysis of a Permanent Magnet Motor by Controlling Local Stress, 16th IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2014), May 26, 2014, The Imperial Palace, Annecy (France)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

槌田 雄二 (TSUCHIDA YUJI)

大分大学・工学部電気電子工学科・准教授
研究者番号: 80284785