

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560423

研究課題名（和文）回転バルクハウゼン信号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 rotational Barkhausen signals

研究代表者

榎田 雄二 (TSUCHIDA YUJI)

大分大学工学部・助教

研究者番号：80284785

研究成果の概要（和文）：本研究では、バルクハウゼン信号、回転バルクハウゼン信号を測定するためのセンサ及び測定システムを開発した。バルクハウゼン信号の分布とX線装置による残留応力分布を比較し、両者に良い相関があることを明らかにした。したがって、バルクハウゼン信号により、非破壊的に残留応力などの材質評価が可能である。

研究成果の概要（英文）：In this paper, we developed a new sensor and measurement system to measure Barkhausen and rotational Barkhausen signals. The measured distributions of Barkhausen signals were compared with those of residual stress by an X-rays devise. The comparisons showed that the nondestructive material evaluation such as residual stress by using the Barkhausen signals was possible.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
22年度	1,900,000	570,000	2,470,000
23年度	800,000	240,000	1,040,000
24年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、計測工学

キーワード：計測工学、バルクハウゼン信号、材質評価、非破壊システム

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、電気・磁気特性は考えられていない。機械的強度と相関が強い電気・磁気特性に着目することによって、機械構造部材の材質評価が可能となる。電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「品質管理」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。更に、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電気・磁気特性も変化するので、熱処理の効果についても電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。熱処理による機械的強度向上の評価が可能となれば、電磁気センサを用いた非破壊評価システムを「材質制御」にも拡張することが可能となる。

2. 研究の目的

研究代表者らは、以前より、磁気センサを用いることで、鉄鋼材の疲労状態を定性的・定量的に評価する手法についての検討を行ってきた。本研究では、これまでの研究代表者らが行ってきた電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、電磁気センサを複合的に用いた機械構造部材の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バルクハウゼン信号を中心として用いる。バルクハウゼン信号とは、図1に示すように、磁性体の磁化過程時に発生する信号であり、磁気モーメントが結晶内の欠陥・転位などによりピンニング効果を受けることによって発生する。バルクハウゼン信号の発生は、結晶内の欠陥・転位に起因するので、バルクハウゼン信号評価法を確立すれば、機械構造材の材質評価を可能とする非破壊計測システムの構築が可能である。

通常、バルクハウゼン信号は、交番磁束下において、図1に示すように180度磁壁移動（磁化モーメントが反転する）場合に発生するとされてきた。これに対して研究代表者らは、回転磁束下のバルクハウゼン信号に注目した。図2と図3に無方向性電磁鋼板を測定試料とした場合の、交番磁束下と回転磁束下における実際に測定したバルクハウゼン信号を示す。図2に示す信号が従来のバルクハウゼン信号であり、磁束変化が大きい時にバルクハウゼン信号が発生していることが分かる。

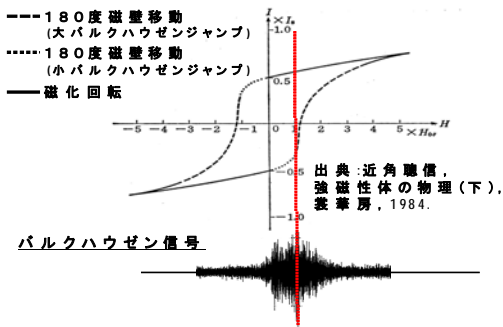


図1 磁化過程とバルクハウゼン信号

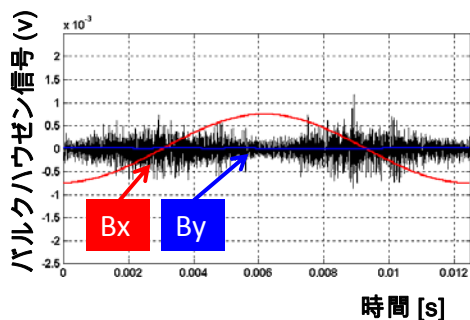


図2 従来のバルクハウゼン信号

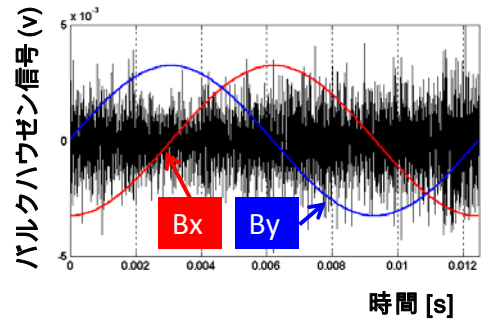


図3 回転バルクハウゼン信号

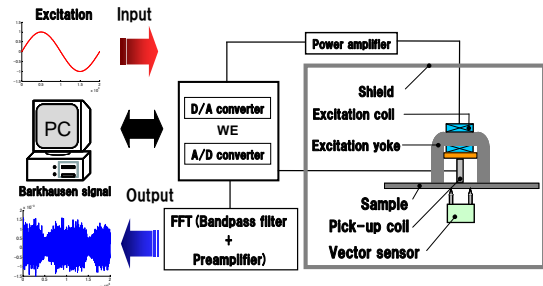


図4 バルクハウゼン信号測定システム

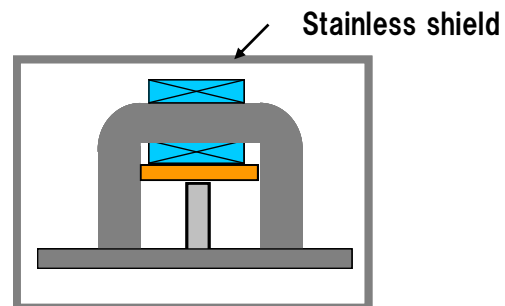
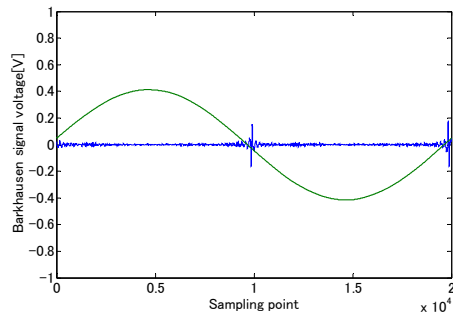


図5 バルクハウゼン信号測定システム用電磁気シールド

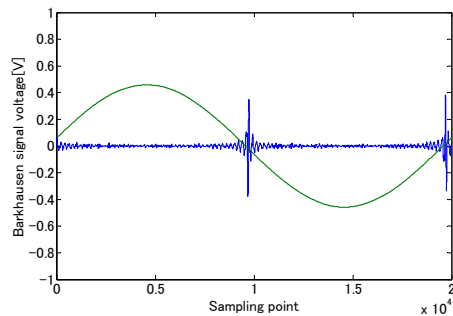
3. 研究の方法

(1) 測定装置及び測定方法

測定システムを図4に示す。測定システムは、励磁、ピックアップコイル及び磁束密度制御システムからなる。磁束密度制御後、バルクハウゼン信号をA/Dコンバータに直接取り込み、FFT（バンドパスフィルタ+プリアンプ）を行い、デジタル波形処理後、PCに集録した。バンドパスフィルタの電源ノイズ、及びプリアンプを接続した際のノイズを軽減する為である。バルクハウゼン信号はノイズと同じ高周波数帯域に存在するため、バルクハウゼン信号のみを抽出し、ノイズを軽減することが重要となってくる。また、今回は外乱からのノイズを取り除いた状態でバルクハウゼン信号の測定を行う為に、測定対象物とセンサを覆うステンレス製の電磁シールドを図5に示すように用いた。電磁シールドの有無による、バルクハウゼン信号



(a) 電磁シールド無



(b) 電磁シールド有

図6 電磁シールドによるバルクハウゼン信号測定時のノイズ低減化

の波形の変化を示した結果を図6に示す。図6(a)と(b)を比較すると分かるように、電磁シールドを用いた方がバルクハウゼン信号の波形を測定する際、ノイズが軽減されていることがわかる。従って、以下の測定は、電磁シールド内で行うものとする。各測定点でのバルクハウゼン信号を測定し、材質評価のため、残留応力付加材との相関を検討した。

(2) 測定試料及び測定条件

測定試料は磁石を回転子の表面に埋め込む、S P M (Surface Permanent Magnet) モータの鉄心材料に用いられるものを使用した。測定試験片を図7に示す。また、測定試験片とセンサ走査の概念図を図8に示す。本図に示すように、バルクハウゼン信号測定センサを試験片長手方向及び幅方向に走査し、各点でのバルクハウゼン信号を測定した。図9に示すように長手方及幅方向に、2.5mm 間隔で測定を行った。また、測定試験片は無方向性電磁鋼板である。その他の測定条件を表1に示す。励磁周波数を 50Hz 一定とし、制御磁束密度は $B = 0.4, 0.6 \cdot \cdot 1.0$ (T)とした。図7に示した試験片の各測定領域A, B, Cにおいて中心を原点として、x 方向に磁気センサを±2.5mm, y 方向に±27.5mm 移動させ、移動間隔を 2.5mm として各箇所 69 点、合計 207 点の測定を行った。

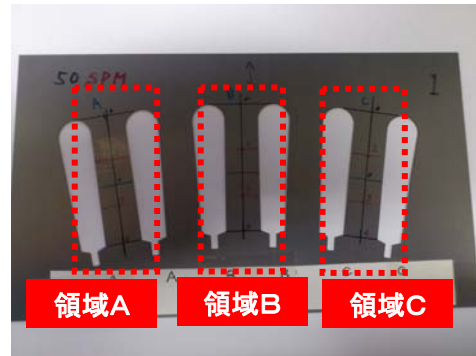


図7 バルクハウゼン信号測定試験片

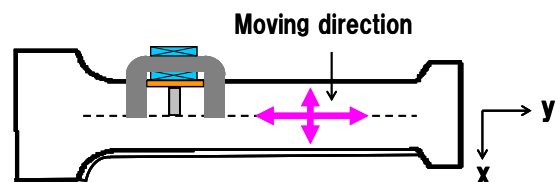


図8 測定試験片とセンサ走査の位置関係

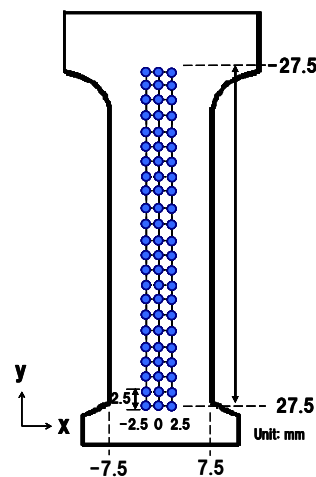


図9 測定試験片の測定点

表1 測定試料及び測定条件

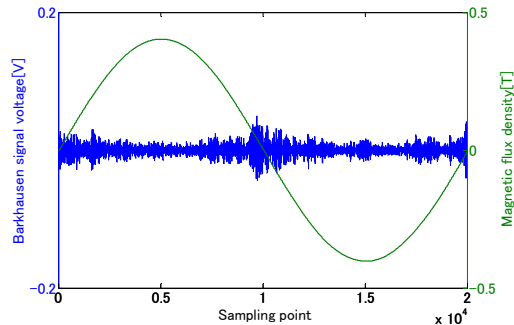
Measurement sample	Non-oriented electrical steel sheet
Measurement zone	A,B,C
Measurement point	207
Magnetic flux density control	0.4, 0.6 · · 1.0 (T)
Excitation frequency	50 (Hz)
Bandpass filter	7~13 (kHz)

4. 研究成果

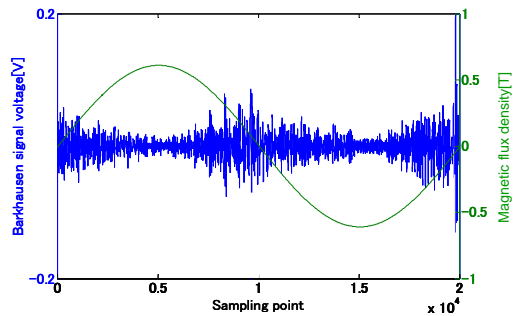
(1) 残留応力付加材のバルクハウゼン信号測定結果

残留応力付加材の試料中央での箇所の制御磁束密度ごとのバルクハウゼン信号の波

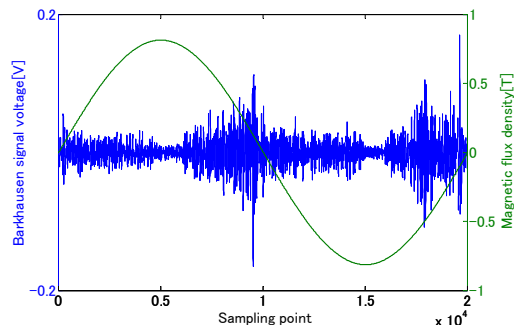
形の測定結果を図10(a)~(d)に示す。図10(a)~(d)を比較するとバルクハウゼン信号の波形の振幅は磁束密度が大きくなるにつれて大きくなっている。しかしながら、図10(c)と(d)では波形の振幅の増加がランダムである。原因として、 $B = 1.0$ (T)時は



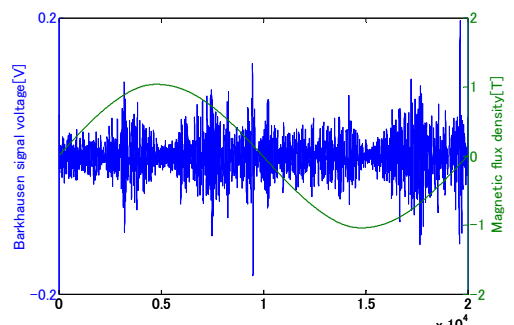
(a) $B = 0.4$ (T)



(b) $B = 0.6$ (T)



(c) $B = 0.8$ (T)



(d) $B = 1.0$ (T)

図10 各磁束条件下におけるバルクハウゼン信号

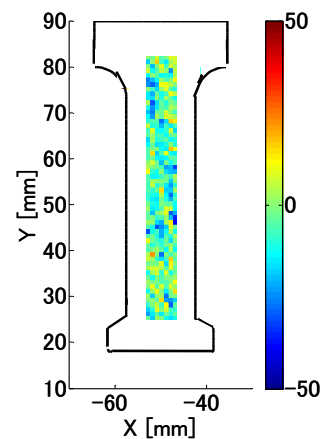
歪み率が増加し、今回残留応力を評価する際に $B = 1.0$ (T)磁束密度下は不适当であることが分かった。

(2) X線残留応力試験機による残留応力測定結果とバルクハウゼン測定結果との比較検討

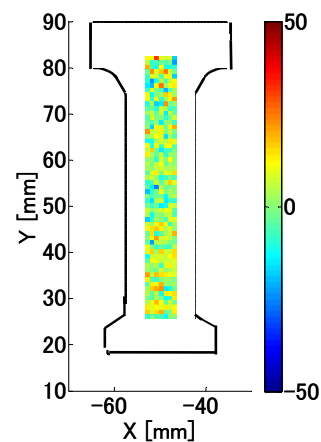
図11に測定領域CにおけるX線残留応力



(a) 残留応力、バルクハウゼン信号測定領域 (測定領域C)



(b) 試験片幅方向の残留応力, σ_x [MPa]



(c) 試験片幅方向の残留応力, σ_y [MPa]

図11 X線残留応力試験機による残留応力測定結果

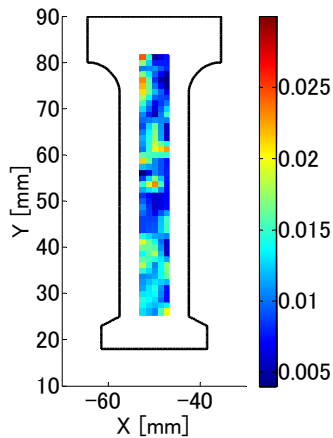


図 1 2 各磁束条件下におけるバルクハウゼン信号

試験機での残留応力分布を示す。また、図 1 2 に同じ測定領域で測定したバルクハウゼン信号の実効値 V_{rms} 分布を示す。X 線での残留応力測定結果では、赤色は引張り応力の大きさを示し、青色は圧縮応力の大きさを示している。また、 σ_x は x 方向に印加されている応力を σ_y は y 方向に印加されている応力を示している。仮にある点において x 方向に引張り応力が印加された場合、y 方向には圧縮応力が発生する。図 1 1 (a) と図 1 2 を比較すると、X 線での x 方向で圧縮応力が分布している領域で、バルクハウゼン信号 V_{rms} の分布も増加していることが分かる。これは圧縮応力により発生した転位等によって、磁化モーメントが動きにくくなるため、バルクハウゼン信号が増加したと考えられる。

(3) まとめ

X 残留応力試験機で測定した残留応力分布とバルクハウゼン信号 V_{rms} (実効値) 分布を比較し、引張・圧縮応力が大きい箇所に対しバルクハウゼン信号分布増減の相関がみられた。したがって、バルクハウゼン信号を用いて、引張・圧縮応力による材質評価を行うことが可能である。今回検討した条件下では磁束密度を $B = 0.6$ (T) 一定とした場合に、顕著に応力の変化が見られた。以上よりバルクハウゼン信号から残留応力などの材質評価が可能であると考えられる。

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 5 件)

- ① Yuji Tsuchida, Yuichiro Kai and Masato Enokizono, Non-destructive evaluation of pipe wall thinning utilizing

long-pulsed magnetic field, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, vol. 39, 2012, 381-388

- ② Taisuke Matsuda, Yuji Tsuchida and Masato Enokizono, Frequency sweeping excitation and spectrogram method to evaluate hardened carbon steel, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, vol. 39, 2012, 319-327

- ③ Taisuke Matsuda, Yuji Tsuchida and Masato Enokizono, Non-Destructive Testing of Hardened Carbon Steel Using Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 721, 2012, 231-236

- ④ 槌田雄二, 松田泰輔, 榎園正人, 周波数掃引励磁スペクトログラム法による焼き入れ低炭素鋼の非破壊材質評価, 日本 AEM 学会誌, 査読有, Vol. 20, 2012, 665-670

- ⑤ Taisuke Matsuda, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono and Yuichiro Kai, Hardening Evaluation of Carbon Steel by using Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method, Journal of Electrical Engineering, 査読有, Vol. 61, 2010, 81-84

[学会発表] (計 16 件)

- ① 槌田雄二, 榎園正人, 磁気センサによるクリープ損傷非破壊評価, 日本原子力学会 2013 年春の年会, 2013 年 03 月 27 日, 近畿大学、東大阪市

- ② 岡本孝志, 槌田雄二, 榎園正人, 磁束密度制御下でのバルクハウゼン信号を用いた引張り応力の評価, 第 65 回電気関係学会九州支部連合大会, 2012 年 09 月 25 日, 長崎大学、長崎市

- ③ 百合野洋行, 槌田雄二, 榎園正人, 焼き入れ材の電磁気的非破壊評価, 第 65 回電気関係学会九州支部連合大会, 2012 年 09 月 25 日, 長崎大学、長崎市

- ④ 槌田雄二, 榎園正人, 磁気センサによる強磁性体鋼の非破壊材質評価, 日本保全学会第 9 回学術講演会, 2012 年 07 月 26 日, 一橋大学一橋講堂、東京都

- ⑤ Takashi Okamoto, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Measurement of Barkhausen signal depending on tensile stress of silicon steel sheet under controlling magnetic flux density, The 14th Korea-Japan Joint Symposium on the Applied Electromagnetics, 2012/2/10, Chosun University, Gwangju, Korea

- ⑥ Takashi Okamoto, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Measurement Barkhausen

- Signal Depending on Tensile Stress of Silicon Steel Sheet, The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia, 2011/11/14, Garden Villa, Kaohsiung, Taiwan
- ⑦松田泰輔, 槌田雄二, 榎園正人, 磁気特性を利用した焼入れ度合いの非破壊材質評価, 第64回電気関係学会九州支部連合大会, 2011/9/27, 佐賀大学
- ⑧岡本孝志, 槌田雄二, 榎園正人, バルクハウゼン信号を用いた引張応力の評価, 第64回電気関係学会九州支部連合大会, 2011/9/27, 佐賀大学
- ⑨Yuji Tsuchida, Yuichiro Kai, Masato Enokizono, Nondestructive evaluation of pipe wall thinning utilizing long-pulsed magnetic field, 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011/9/10, Garden Villa, the Royal Continental Hotel in Naples, Italy
- ⑩Taisuke Matsuda, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method to Evaluate Hardened Carbon Steel, 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011/9/9, Garden Villa, the Royal Continental Hotel in Naples, Italy
- ⑪Taisuke Matsuda, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Non-destructive Testing of Hardened Carbon Steel using Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method, The Seventh Japanese-Mediterranean and Central European Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, 2011/7/7, Hotel Gellért in Budapest, Hungary
- ⑫松田泰輔, 槌田雄二, 榎園正人, 磁気センサによる焼入れ鉄鋼材の非破壊材質評価, 電気学会マグネティックス研究会, 2011/6/1, 大阪市
- ⑬槌田雄二, 周波数掃引励磁スペクトログラム法による鉄鋼材焼入れ評価, 第19回MAGDAコンファレンス in 札幌, 2010年11月23日, 北海道大学
- ⑭Y. Tsuchida, Magnetic Domain Observation under Two-Dimensional Magnetic Flux Conditions by 30-kV Scanning Electron Microscope, 11th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, November 4, 2010, COMPAL Hall, Oita, Japan
- ⑮Y. Tsuchida, The Fatigue Evaluation Method for Structural Stainless Steels Using the Magnetic Sensor Composed of Three Pancake Type Coils, The Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2010), July 22, 2010, Marriott San Diego Mission Valley, San Diego, USA
- ⑯Y. Tsuchida, Evaluation of Surface Hardening by Measuring Magnetic Properties, The Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2010), July 22, 2010, Marriott San Diego Mission Valley, San Diego, USA

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・助教

研究者番号：80284785