

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760593

研究課題名(和文) 瞬時360°のバルクハウゼンノイズ測定を用いた定量的応力評価システムの開発

研究課題名(英文) Development of Barkhausen noise measurement system with rotating magnetization probe for stress evaluation

研究代表者

笠井 尚哉 (KASAI, NAOYA)

横浜国立大学・環境情報研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20361868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で作製した3極磁化器を用い回転磁界が形成可能な3極磁化器を用いたBHN検出システムを構築し、3極磁化器を用いてBHNが検出できることを確認した。さらに、小型コイルと応力負荷装置を設計、試作し、磁化及び応力を負荷しながら磁壁挙動のその場観察を行った。さらに、SPCCとSS400のAs received、熱処理を施した試験片のその場観察結果、磁歪及び組織観察結果から、BHNの応力に関する挙動について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We successfully developed Barkhausen noise (BHN) measurement system with three magnetic pole. It generated the uniform rotating magnetic field. To discuss about magnetic domain wall movement in stress, in-situ observation system for magnetic domain wall movement was also developed. Moreover, parameters, such as magnetostriction and texture of the test piece were also measured. From obtained results, stress behavior of BHN for quantitative evaluation was discussed.

研究分野：材料安全工学

キーワード：非破壊応力評価 バルクハウゼンノイズ

1. 研究開始当初の背景

多くの大型の鉄鋼構造物は高度経済成長期に建設され現在までに老朽化が進行し、それらの効率的な維持管理技術が重要となっている。このためには、構造物の部位ごとに余寿命評価を行い、寿命が近い部位又は劣化が進行している部位を交換・補修する必要がある。精度良く余寿命評価するためには該当部位の応力を精度良く求めることが重要となる。

鉄鋼材料中の応力の非破壊評価法としては、X線を用いる方法があるが、測定範囲は鉄鋼材料の最表面(約10 μ m程度)に限られるとともに、測定部位に対して事前に表面処理を行う必要がある。また、一般にその装置は大型かつ高価であり、放射線を使用することから測定中の装置の取り扱いに関して労働安全衛生上の特別な配慮が伴う。

バルクハウゼンノイズ(以下、BHN)は、鉄鋼のような強磁性体の磁気モーメントの向きがそろった磁区において、磁場を印加すると、磁場と同じ方向の磁気モーメントを持つ磁区が大きくなるように磁壁(磁区と磁区を隔てるもの)が移動することに起因するものである。材料中の結晶粒界、組織、析出物、転位などが磁壁の移動に対して障害物(ピンニングサイト)となるため磁壁は滑らかに移動せずに、不連続に移動するためBHNが発生する。引っ張り応力を強磁性体の鉄鋼材料に作用させると、磁歪の逆効果により応力と同じ方向を向いた磁区の面積が広がるように磁区構造が変化し、このような状態で磁界を印加しBHNを測定すると、BHNは増加する。これによりBHNを用いた応力評価が可能となる。

鉄鋼材料の部位の余寿命評価を行うには、主応力の方向と大きさを知ることが重要で、一般的な研究では専用の治具を作製し、10度ごとに磁化器を回転し360°にわたってBHNを測定する方法が検討されている。しかし、この方法では、360°にわたってBHNを測定するのに36回実験を繰り返すことになり、時間と手間がかかる。また、プローブと試験体との接触状態が常に一定にならず、大きな誤差要因となる。そこで、120°づつ異なる3つの磁化電流を3つの磁極に流し、それぞれの磁極が作り出す3つの磁界の合成により、360°回転する磁界を作り出し、瞬時に360°にわたってBHNが測定できるプローブを作製する。これにより、2つの磁極のプローブと異なり、提案するプローブでは、それぞれの3つの磁極が試験体に一定の接触状態となることも期待できる。

2. 研究の目的

鉄鋼構造物に働いている応力の大きさと方向を定量的に評価することを最終目標に、120°づつ異なる3つの磁化電流を用いて回転する磁界を作り出し、瞬時に360°にわたってBHNを測定できるプローブを作製するとと

もに、応力評価の高精度化の基礎的検討のために応力を印可した際の磁壁の挙動のその場観察装置を開発する。さらに、応力印可と磁壁移動の関係についてリアルタイムで観察し、BHNを用いた応力評価精度の向上を図る。

3. 研究の方法

3.1 試験片

SS400、SPCC及び電磁鋼板の試験片を作製する。As received試験片、転位密度の減少を狙った熱処理、結晶粒の成長や組織の変化を狙った熱処理、の数種類の熱処理を施した試験片をBHNと磁壁挙動、応力評価の考察のために準備する。

3.2 瞬時に360°測定可能なBHNプローブとそのシステムの作製

フェライトコア供給メーカを調査し、BHNプローブとして使用可能な磁極と本体のサイズを調査し、BHNプローブを設計・試作する。この際、磁極の先端形状を半球状にすることで試験片との一定の接触状態を確保する。周波数10Hz程度の120°位相が異なる3つの正弦波を発生させるシステムを構築し、プローブのそれぞれの磁極のコイルに電流を流し、回転磁界を作り出す。さらに、この回転磁界によるBHNを測定可能なシステムも構築する。

3.3 応力に伴う磁壁挙動のその場観察装置の設計及び試作

磁気モーメントの向きが異なる磁区の表面で、入射した光の偏光挙動が異なる磁気光学効果を使用して、応力を負荷した際の磁壁移動の挙動をリアルタイムで観察できる、その場観察装置を開発する。磁区による偏光状態の観察では、画像のコントラストが弱く、磁区の認知が困難になる可能性があるため、エッジ抽出処理などの画像処理も検討する。

3.4 BHN応力評価システムの高度化

磁壁の移動や回転挙動に依存する、B-Hカーブと磁気ひずみを測定し、その場観察結果及びBHNの測定結果を用いて考察し、応力評価システムの高度化を図る。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

4.1 瞬時に360°測定可能なBHNプローブとそのシステムの作製

コイルの磁極コアには磁気特性の良いフェライトコアを用い、試験片との接触状態を一定に保つようにするために、先端を研磨機で半球状に切削した。3個のコアに、 ϕ 0.2mmポリウレタン銅線を3層にして278回巻き、それぞれCh.1、Ch.2、Ch.3とし空間角が互

いに 120° になるように配置した。エポキシ樹脂系の接着剤で磁極を本体に接着し、3 極磁化器を作製した。作製した磁化器のコイルに、マルチファンクションシンセサイザから交流電流を発生させ、その電流をパワーアンプにて増幅させてそれぞれの磁極に流し、回転磁界を形成させた。形成させた磁界の測定はガウスメータを用いて行い、測定結果はデジタル信号として PC に取り込み、プログラムを作成し、xy グラフ上で表示した。励磁電流の位相や振幅を調節することで縦や横の直線磁界、回転磁界が 3 極磁化器によって形成できることを確認した。さらに、得られた磁界を用いて、BHN を測定する検出コイルを作製し、測定した誘導起電圧を PC の取り込み、ソフトウェアでフィルタ処理を施し、BHN を抽出した。その結果、回転磁界による BHN は連続的な波形となった。

以上より、本研究で構築したシステムとプローブで、回転磁界を作り出すとともに、回転磁界による BHN の測定に成功した。

4.2 応力に伴う磁壁挙動のその場観察装置の設計及び試作

磁壁挙動のその場観察装置の設計及び試作に関する検討については、まず、試験片の機械研磨及び電解研磨に関する検討を行った。各試験片の機械研磨と電解研磨の高度化について研究例や文献を調査するとともに、実験で機械研磨プロセスと電解研磨の条件(溶液組成、溶液温度、電流の大きさ、電流印加時間)の最適化を行うことにより、各試験片表面を磁区観察可能な表面状態にすることに成功した。

次に、磁性コロイド溶液を滴下し、各試験片の磁区観察をピッター法で行った。SS400 の As received の試験片ではスパイク状の細かい磁区が確認できた。一方、SS400 の焼きなまし処理を行った試験片では、結晶粒の粗大化に伴い磁区も大きくなった。さらに、小型コイルと応力負荷装置を設計、試作し、磁化及び応力を負荷しながら磁壁挙動のその場観察を行った。応力を負荷すると 180° 磁壁の増加が確認できた。その後、応力を増加させても 180° 磁壁についての変化は起こらなかった。

ピッター法による結果は、概ね BHN の測定結果と一致するものであり、応力評価の高精度化のための貴重な知見を得ることが出来た。

Kerr 効果を用いた磁壁挙動のその場観察装置の検討では、偏光を試験片表面に斜めに入射させる必要がある。そこで、光源の位置調整を行い、さらに絞りの中心を自由に移動することができる開口絞りを設計・試作し、現有の光学顕微鏡に組み込んだ。試験片の準備については、機械研磨及び電解研磨を施し、鏡面状態となった表面に、反射防止膜としてカーボン膜を表面に蒸着した。これを用いて、上記の構築した観察装置で観察を行った。し

かしながら、観察感度は向上したが、Kerr 効果による明確な磁壁画像を得ることが出来なかった。このため、偏光状態が異なる 2 枚の画像を用いて差分処理を施すことにより磁壁の情報のみを精度良く抽出することも試みたが、試験片表面の磁壁の情報のみを精度良く取り出すことが出来なかった。

4.3 BHN 応力評価システムの高度化

強磁性体材料に磁場を与えると磁場と同じ方向の磁化を持つ磁区が広がる。このとき 90° 磁壁は減少し、 180° 磁壁が増加していき、全ての磁壁が 180° 磁壁になったとき磁歪は最大になる。そのため、磁歪量は磁化前の 90° 磁壁の量に比例する。引張応力を負荷すると磁歪の逆効果により 180° 磁壁が増大するので、応力を負荷すると最大磁歪は減少し、 90° 磁壁に変化可能な全ての磁壁が 180° 磁壁になると磁歪は飽和すると考えられる。BHN は 180° 磁壁の量に依存するので、磁歪の逆効果により全ての磁区が 180° 磁壁になると飽和し、そのときの応力は磁歪の飽和点と同じだと考えられる。

また、BHN は結晶粒径や転位、金属組織など様々な要因に影響を受けるのに対し、磁歪の変化は磁区構造のみに依存するので、磁歪を測定することは BHN 応力評価システムの高度化に対して有効である。

そこで、本研究では各熱処理を施した SPCC と SS400 の各試験片の磁歪を測定した。SPCC の試験片の磁歪においては、熱処理有り無しで初期の磁歪の値が異なるが、応力に関して一様減少したのち、100 MPa 程度以上では一定であった。また、As received の試験片の磁歪に比べ、0 MPa における熱処理後の試験片の磁歪が小さくなった。熱処理後の SPCC の試験片は、結晶粒が粗大化しているとともに、磁区のその場観察でも得られたように磁区も粗大化していた。従って、熱処理後の試験片は、As received の試験片より 90° 磁壁が減少している磁区構造を有していると考えられ、これにより熱処理後の試験片の磁歪が小さくなった。応力の影響に関しても、 90° 磁壁が少ないため 100 MPa 程度において 180° 磁壁への変化が完了し、BHN も 100MPa 程度で飽和挙動を示すことが明らかになった。

一方、SS400 においては、熱処理有り、無しの試験片の磁歪は応力に関して同様な値を示しながら一様減少を示した。SS400 の As received、熱処理後の試験片において結晶粒と磁区の大きさはほとんど同様であった。従って、磁歪の大きさや応力に関しての挙動が同じであると説明できる。

しかしながら、応力に関する BHN の挙動は異なるものであった。これは、焼きなまし後では層状パーライト内に含まれるセメントタイトが球状化したことによると考えられる。As received の試験片では層状パーライトが磁壁移動を妨げていたために、BHN の応力

に関する応答が小さいが、熱処理後では層状パーライト内に含まれるセメンタイトが球状化したため、BHN の応答が増大したと考える。

4.4 得られた成果のまとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- ・ 作製した3極磁化器を用い、励磁電流の位相と振幅を調節することで、直線、回転等の任意の磁界が形成可能なことを確認した。
- ・ 3極磁化器を用いたBHN検出システムを構築し、3極磁化器を用いてBHNが検出できることを確認した。
- ・ 小型コイルと応力負荷装置を設計、試作し、磁化及び応力を負荷しながらピット法により、磁壁挙動のその場観察を行った。
- ・ 自作の光学器具を設計・試作し、現有の光学顕微鏡に組み込み、偏光状態を作り出した。さらに、偏光状態が異なる2枚の画像を用いて差分処理を施すことにより磁壁の情報のみを精度良く抽出することも試みたが、試験片表面の磁壁の情報のみを精度良く取り出すことが出来なかった。
- ・ SPCCとSS400のAs received、熱処理を施した試験片の磁歪と組織観察結果から、BHNの応力に関する挙動について明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

飯田直、笠井尚哉、「3極磁化プローブによるBHN検出システムの構築」、(一社)日本機械学会年次大会 2014 産業・化学機械と安全部門、2014年9月9日

飯田直、笠井尚哉、「3極磁化プローブによるBHN検出システムの構築」、(一社)日本非破壊検査協会平成 26 年度保守検査ミニシンポジウム、2014年7月4日

笠井尚哉、「バルクハウゼンノイズを用いた鉄鋼材料の応力評価の基礎検討」、(一社)鉄鋼協会材料の組織と特性部会の自主フォーラム、2013年3月28日

飯田直、笠井尚哉、「3極磁化プローブによるBHN検出システムの構築」、(一社)日本非破壊検査協会第 17 回表面探傷シンポジウム、2014年3月14日

6. 研究組織

(1)研究代表者

笠井尚哉 (KASAI NAOYA)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授

研究者番号：20361868