

高サイクル繰返し負荷を受ける炭素鋼の応力磁化効果に関する実験的検討

安部 正高^{*1}, 澄川 貴志^{*1}, 三戸 慎也^{*2}, 宮澤 和紀^{*2}

Experimental investigation on magnetomechanical effect of carbon steel under high-cycle loading

Masataka ABE^{*1}, Takashi SUMIGAWA^{*1}, Shinya MITO^{*2} and Kazunori MIYAZAWA^{*2}^{*1} Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

^{*2} Yokogawa Electric Corporation

2-9-32 Naka-cho, Musashino-shi, Tokyo 180-8750, Japan

Received: 29 November 2022; Revised: 27 February, 2023; Accepted: 3 July 2023

Abstract

A magnetic non-destructive inspection method based on measurement of the magnetic flux leakage near the material surface has been studied for carbon steel pipes used in various plants. However, in actual plants, stress fluctuations caused by changes in the temperature and internal pressure of the fluid passing through the pipes may affect the residual magnetization state due to magnetomechanical effect and prevent accurate inspection. In this paper, we applied cyclic stress to pre-magnetized STPG370 carbon steel up to 10^7 cycles and measured the change of the magnetization state as the change of the magnetic field near the specimen surface. As a result, under the environmental magnetic field, the magnetization (or corresponding magnetic field near the specimen surface) of the specimen decreases significantly after the first few cycles of stress loading, which suggests the magnetization state approaches the anhysteretic (stable) magnetization state. Furthermore, the magnetization gradually decreases further with higher cycles of stress loading.

Keywords : Residual magnetization, Magnetomechanical effect, Cyclic stress, Pinning effect, Carbon steel, NDT

1. 緒 言

各種プラントの健全性を保証するためには、その主要な構成要素である配管の劣化状況を常に把握しておく必要がある。特に、配管内を通る流体との化学反応による腐食（コロージョン）や、流体との摩擦によるすり減り（エロージョン）による減肉状況の管理が重要である。現在、多くのプラントでは超音波や内視鏡を用いた配管検査が行われているが、検査精度や効率に問題があり、より効率的で高精度かつ自動的な検査手法の確立が求められている（四辻, 2009）（Raj et al., 2002）。そこで、これら既存の検査手法に代わる配管の検査方法として、近年、磁場計測による検査手法の開発が進められている。この手法では、炭素鋼などの強磁性体配管を長軸方向に磁化することにより、材料中に大きな残留磁化を生じさせ、内部腐食等に起因して材料表面近傍に漏れ出た磁束を測定することで、内部の腐食や減肉を検知する（Babbar and Clapham, 2003）（Dubov and Kolokolnikov, 2012）。この手法により、原理的には内部腐食（減肉）の位置や深さを非接触かつ高精度に検知することが可能である。

一方で、強磁性体の磁化状態は静的もしくは動的な応力負荷によって可逆的もしくは非可逆的に変化することが知られており、応力磁化効果または Villari 効果と呼ばれる（Jiles, 1995）（Suzuki and Matsumoto, 2005）。実際のプラントでは、配管内を通る流体の温度や内圧の変化等に起因する周期的な応力変動（繰返し負荷）が生じることから、応力磁化効果により配管の残留磁化状態が非可逆的に変化し、特に運転中検査（On Stream Inspection）を行う場合には検査中も常に応力変動にさらされるため、磁場計測を用いた手法において正確な検査ができなくなる懸念される。すなわち、繰返し負荷を受ける配管の磁化状態の安定性は磁場計測による腐食減肉検知の精度に大きく関わってくる。これまで、繰返し負荷を受ける強磁性体の磁化変化を測定し、有効磁場や Preisach

No.22-00319 [DOI:10.1299/transjsme.22-00319], J-STAGE Advance Publication date : 11 July, 2023

^{*1} 正員, 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)^{*2} 横河電機 (株) (〒180-8750 東京都武蔵野市中町 2-9-32)

E-mail of corresponding author: abe@energy.kyoto-u.ac.jp

モデルに基づき応力磁化効果をモデル化した研究はあるが (Li and Jiles, 2003) (鈴木, 松本, 2003), 数回程度の低繰返し数に対する検討にとどまっており, 実際のプラント配管がさらされているようなより高サイクルの繰返し負荷における応力磁化効果について測定, 検討した例はない. これは, 数サイクル程度の繰返し負荷で, 応力磁化効果により生じる磁化変化の非可逆成分が非常に小さくなるために, 試験片に巻かれた B コイルの検出限界を下回り, 正確な磁化変化を直接測定することが困難となるためである. しかし, 高サイクル繰返し負荷によって磁化状態が非可逆的に変化するのであれば, その変化による影響を補正したうえで検査を行う必要が生じる.

そこで本研究では, 高サイクル繰返し負荷を受ける炭素鋼配管材の磁化状態の変化を明らかにすることを目的とする. そのために, あらかじめ磁化された STPG370 炭素鋼試験片に環境磁場下で弾性領域の繰返し応力を負荷し, 高サイクル繰返し負荷時に磁化変化の計測が困難となる従来の B コイルを用いた磁化測定法に代えて, 一定繰返し数毎に試験片を取り出し, 試験片表面近傍の磁束密度を磁気センサにより測定することで, 試験片の磁化状態の変化を間接的に計測する手法を提案する. また, 地磁気レベルのバイアス磁場を残した環境磁場中で繰返し負荷試験を行うことで, 高サイクル繰返し負荷時の磁化状態変化 (応力磁化効果) のメカニズム解明を試みる.

2. 実験方法

2・1 試験片

供試材には JIS 規格で規定される圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG370 を用いた. STPG370 は, 350 度以下の高圧流体を輸送するための配管として, 各種プラントで多く利用されている. また, 近年では水素ガスパイプラインの候補材としても注目を集めている (西口他, 2008).

STPG 材は鋼管材であり, 鋼管の厚さ方向にスライスして, 図 1(a)に示す寸法の試験片を切り出した. 試験片の厚さは 3 mm であり, 30 mm (幅) $\times$ 300 mm (長さ) の平行部 (試験部) およびその上下に位置する 60 mm (幅) $\times$ 70 mm (長さ) のつかみ部で構成されている. なお, 残留応力の影響を排除するため焼きなまし (Ar 雰囲気中において 600 $^{\circ}$ C で 1 時間加熱後 0.5 $^{\circ}$ C/min で炉冷) を行ったうえで実験に使用した. また, S20C の一本の角材 (40 mm (幅) $\times$ 40 mm (奥行き) $\times$ 440 mm (長さ)) の両端下面にそれぞれ一つの N35 ネオジウム磁石 (40 mm (幅) $\times$ 40 mm (奥行き) $\times$ 30 mm (長さ)) を取り付け, 二本の角材 (40 mm (幅) $\times$ 40 mm (奥行き) $\times$ 120 mm (長さ)) で挟み込んで作製したコの字型の専用磁化ヨークを用いて, 磁化ヨークの両極をつかみ部に密着させて試験片を磁化した (図 2 参照). 有限要素解析により, 本磁化手法を用いることで, 試験片内部には長手方向に 1.6 T 程度の十分に大きな磁束密度が発生することを確認している.

図 1(b)中の①, ②および③の領域 (以下, “エリア①”, “エリア②”, “エリア③” と呼称する) は, 磁場測定を行った領域 (後述) である. 磁化ヨークにより着磁された試験片はエリア②を N 極, エリア③を S 極とした磁束線ループを形成する. 試験片の磁化の強さはこの磁束線の強度と比例するため, 各エリアで測定される磁束密度成分のうち, エリア②および③では法線方向 (z 方向) 成分 B_z を, エリア①では長手方向 (x 方向) 成分 B_x を試験片の磁化状態を反映する磁束線ループの主要な磁束密度成分と考え測定した. 測定の座標軸については図 1 中に示す通りである.

2・2 試験システムおよび試験条件

試験片への繰返し応力の負荷には, 島津製作所製サーボパルサー (EHF-10-TQ1, 最大定格荷重 100 kN) および同社製 4830 型制御装置による試験システムを用いた. 試験片には, 試験片長手方向に対して最大応力 50 MPa, 最小応力 5 MPa (応力比 $R = 0.1$) の片振り繰返し負荷を周波数 30 Hz で 10^7 回まで与えた. この際, 10^6 回毎に試験片を取り外して磁場測定を行った. これらの応力サイクルの条件は, 実際のプラント配管において生じる応力変動を参考に決定した. ただし, 周波数に関しては実験時間の短縮を図るため, 実際の応力変動よりも高い周波数を設定した. 炭素鋼の応力磁化効果による磁壁移動速度は等価な磁場変化による磁壁移動速度と同等であることが報告されている (Matsumoto, 1998). 一般的な炭素鋼の数 kA/m 程度の低磁場における磁壁移動速度は 10 m/s 程度であり (近角, 1984), 磁壁移動距離を数百 nm 程度と仮定すれば, 磁場印加による磁壁移動時間は 10^{-8} s のオーダーで完了すると推算される. このため, 本試験に用いた周波数は, 試験結果に与える影響は無いと判断した.

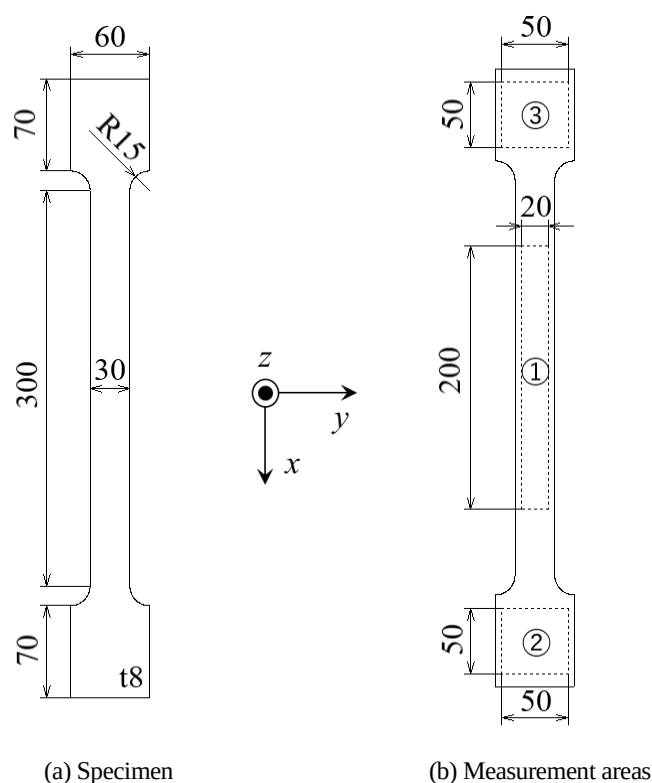


Fig. 1 STPG specimen shape for cyclic loading and measurement areas.

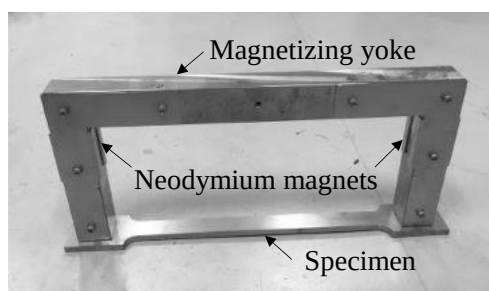


Fig. 2 U-shaped magnetizing yoke. Two N35 NdFeB magnets are attached to the underside of both ends of one long rectangular piece of S20C and sandwiched by two short rectangular pieces of S20C.

磁場測定のための磁気センサは、旭化成製高精度 3 軸磁気センサ (AK09940) を用いた。磁気センサを株式会社コムス製 X-Y ステージ (PM80B-100XY) に取り付け、試験片表面近傍 (試験片表面から約 2 mm 離れた位置) の磁束密度分布を 5mm 間隔で二次元的に測定した。本研究で用いた 3 軸磁気センサのサイズは 1.6 mm (幅) × 1.6 mm (奥行き) × 0.58 mm (厚さ) と小型であり、十分な空間分解能を実現できる。測定は、前述のように試験片平行部内のエリア①、試験片つかみ部内において N 極側に相当するエリア②および S 極側に相当するエリア③に対して実施した。

試験片の磁化状態に影響を与える因子として、反磁場や熱揺らぎ磁気余効等に起因する経時変化、チャッキング時の初期応力 (試験片には平均して 20 MPa 程度の引張応力が生じることを確認している)、環境磁場の影響などが考えられる。そこで、これらの影響について事前実験を行い確認した。まず、磁化直後の試験片平行部中心の磁場を 5760 分 (4 日間) の間、30 分毎に測定した。図 3 に試験片長手方向の磁束密度成分 B_x の測定結果を示す。これより、測定開始から 200 分頃までに測定値はやや減少 (すなわち磁化は減少) したものの、それ以降は磁場の変化はほとんど見られず一定となった。次に、チャッキング時の初期応力の影響を確認するため、試験片

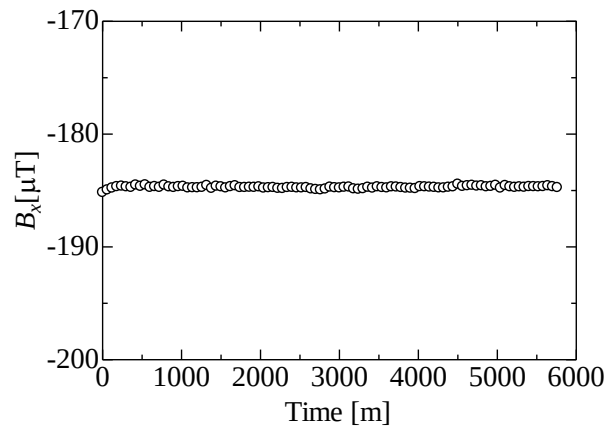


Fig. 3 Measured magnetic field B_x at a specimen center v.s. time.

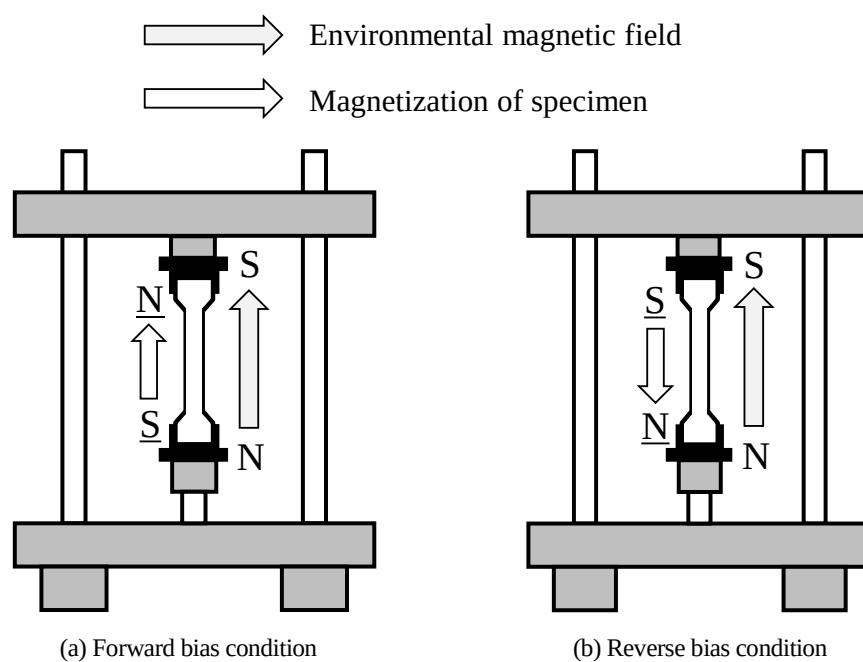


Fig. 4 Environmental magnetic field conditions (underlined : magnetic pole of specimen). Under the forward bias condition, the direction of the specimen magnetization and the environmental magnetic field coincide, while under the reverse bias condition, the direction of the specimen magnetization and the environmental magnetic field are in opposite directions.

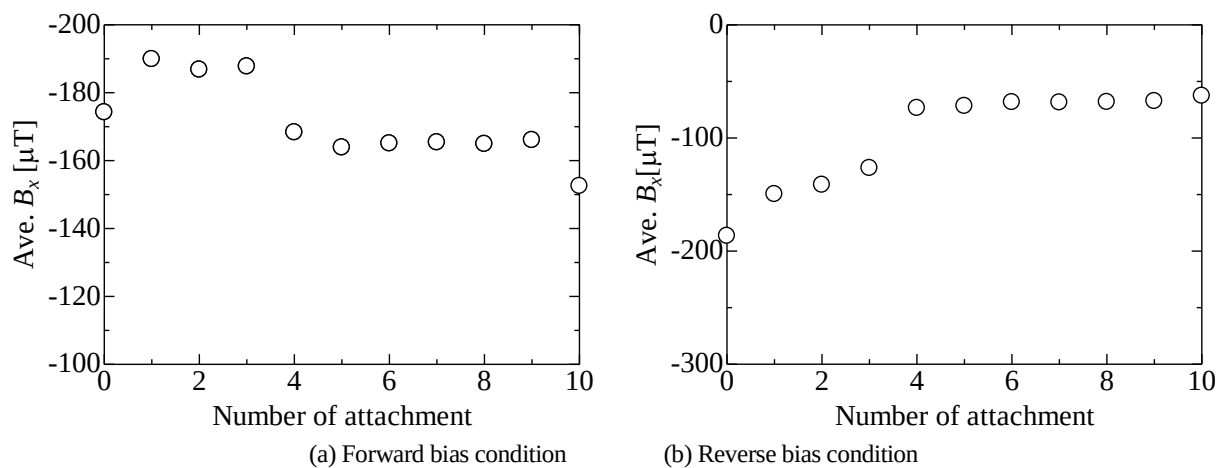


Fig. 5 Change of averaged B_x of Area 1 by attachment/detachment to chuck.

をチャックに何度も着脱し、磁場測定を行った。この際、環境磁場の影響についても併せて考慮するため、チャック部には若干の磁化を残し、上部チャックおよび下部チャックがそれぞれ S 極および N 極に弱く磁化された状態で試験を行った（チャック部近傍では地磁気の 2~5 倍程度、試験片平行部付近では地磁気の 2 倍程度の環境磁場が存在することを確認している）。そこで、図 4 に示すように、試験片の N 極に磁化したつかみ部を S 極に磁化されている上部チャックに取り付ける条件を“順バイアス磁場条件”、試験片の N 極に磁化したつかみ部を N 極に磁化されている下部チャックに取り付ける条件を“逆バイアス磁場条件”と定義し、以降、それぞれの条件について実験を行った。順バイアス条件では、試験片の磁化と環境磁場の方向が一致しており、逆バイアス条件では、試験片の磁化と環境磁場の方向が逆向きとなる。エリア①における測定結果を図 5 に示す。図 5(a)および (b)は、それぞれ順バイアスおよび逆バイアス磁場条件下の結果を示しており、横軸にチャックへの試験片の着脱回数を、縦軸に磁束密度の試験片長手方向成分 B_x の平均値をプロットしてある。図より、5 回程度の着脱によって測定結果は安定することがわかる。同様の傾向はエリア②および③についても確認された。すなわち、初期応力の影響は環境磁場の方向によらず、5 回程度で飽和する。

以上より、実験に際しては、磁化の経時変化の安定のために試験片を着磁後 1 日置くとともに、着脱の影響を無くすために試験片を予めチャックへ 5 回着脱することとした。なお、高サイクル繰返し負荷時の磁化変化のメカニズム解明のために、本実験においてもチャックの磁化は残したまま実施し、順バイアス条件および逆バイアス条件で測定を行った。また、各条件について 2 本ずつ試験片を用意し、実験を行った。

3. 結果および考察

3・1 順バイアス磁場条件試験結果

図 6 は、サイクル数に対して (a) エリア①の磁束密度の試験片長手方向成分 B_x 、(c) エリア②の磁束密度法線方向成分 B_z 、および、(e) エリア③の磁束密度法線方向成分 B_z をプロットしたものである。また、(b)、(d) および (f) はそれぞれ (a)、(c) および (e) の 5 サイクル目までの測定結果を拡大したものである。図中白抜き丸印および三角印は、それぞれ 1 本目および 2 本目の試験片の測定結果を示している。また、黒塗りの四角印は 2 回の測定結果の平均値を示している。

図 6(b)、(d) および (f) より、いずれのエリアにおいても試験初期の数サイクルでは、磁場が大きく変化した。その変化割合は負荷前の磁場に対して各エリアともに 20% 程度であり、変化量はエリア①で $20.6 \mu\text{T}$ 、エリア②で $-71.4 \mu\text{T}$ 、エリア③で $68.9 \mu\text{T}$ であった。また、1 サイクルあたりの変化率はエリア①で $4.1 \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア②で $-14.3 \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア③で $13.8 \mu\text{T}/\text{cycle}$ であった。これは、応力磁化効果により、バイアス磁場（環境磁場）および応力下で最も安定な磁化状態（すなわち非ヒステリシス磁化状態）に近づく磁化変化が生じたためである。ここで非ヒステリシス磁化状態とは、その時点での応力と磁場によって一意的に決まる強磁性体の磁気力学的に安定な平衡状態のことである。通常、非ヒステリシス磁化はバイアス磁場に対して減衰する交流磁場を重ね合わせ、交流磁場成分がゼロとなったときの磁化として測定される。バイアス磁場下の磁化が、数サイクル程度の応力負荷サイクルによりこの安定な磁化状態へ非可逆的に変化し、以降は応力負荷サイクルに対して小さな定常ループを描くことは先行研究においても確認されている（Suzuki and Matsumoto, 2005）。一方、図 6(a)、(c) および (e) より、試験初期数サイクルでの大きな磁場変化の後も磁場は緩やかに減少（初期の磁場方向に対して逆方向に変化）する傾向にあることがわかる。その変化割合は負荷前の磁場に対して 20% 程度であり、変化量はエリア①で $31.9 \mu\text{T}$ 、エリア②で $-138.7 \mu\text{T}$ およびエリア③で $129.1 \mu\text{T}$ であった。また、1 サイクルあたりの変化率はエリア①で $3.2 \times 10^{-6} \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア②で $-1.4 \times 10^{-5} \mu\text{T}/\text{cycle}$ およびエリア③で $1.3 \times 10^{-5} \mu\text{T}/\text{cycle}$ であった。1 サイクルあたりの変化率は約 100 万分の 1 に減少しているものの、試験初期の数サイクルの磁化変化量の 2 倍程度の変化が確認された。このように、試験初期の低サイクル負荷で応力磁化効果による急激な非可逆磁化変化が起こった後も、繰返し応力負荷によって非常に小さな変化率で非可逆磁化変化は生じ、磁化状態はさらに非ヒステリシス磁化状態に近づくことが明らかになった。

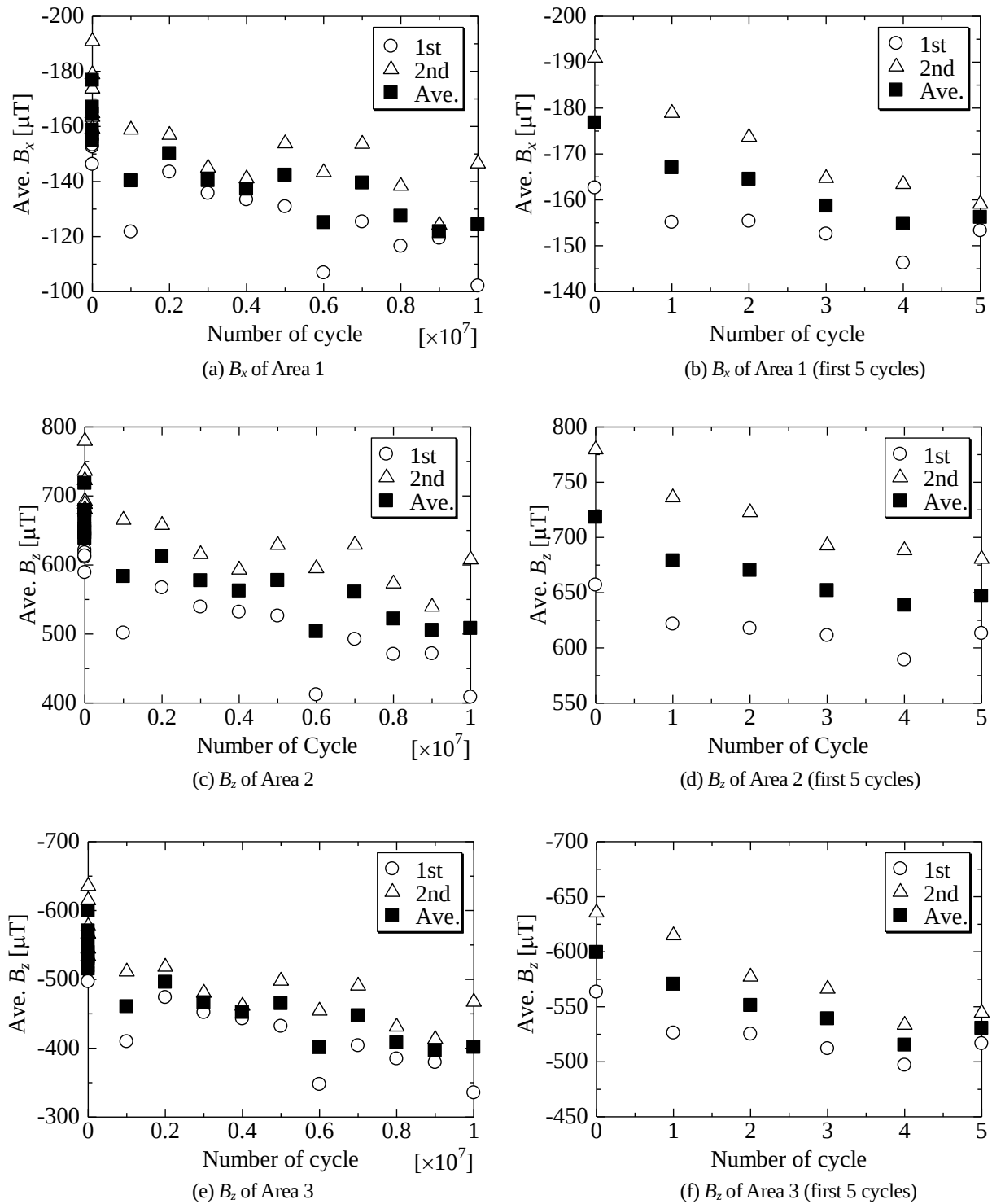


Fig. 6 Averaged magnetic flux density under forward bias condition.

3・2 逆バイアス磁場条件試験結果

図7は、サイクル数に対する(a) エリア①の磁束密度の試験片長手方向成分 B_x , (c) エリア②の磁束密度法線方向成分 B_z , および, (e) エリア③の磁束密度法線方向成分 B_z をプロットしたものである。また, (b), (d) および (f) はそれぞれ(a), (c), (e) の5サイクル目までの測定結果を拡大したものである。図中白抜き丸印および三角印は、それぞれ1本目および2本目の試験片の測定結果を示している。また、黒塗りの四角印は2回の測定結果の平均値を示している。

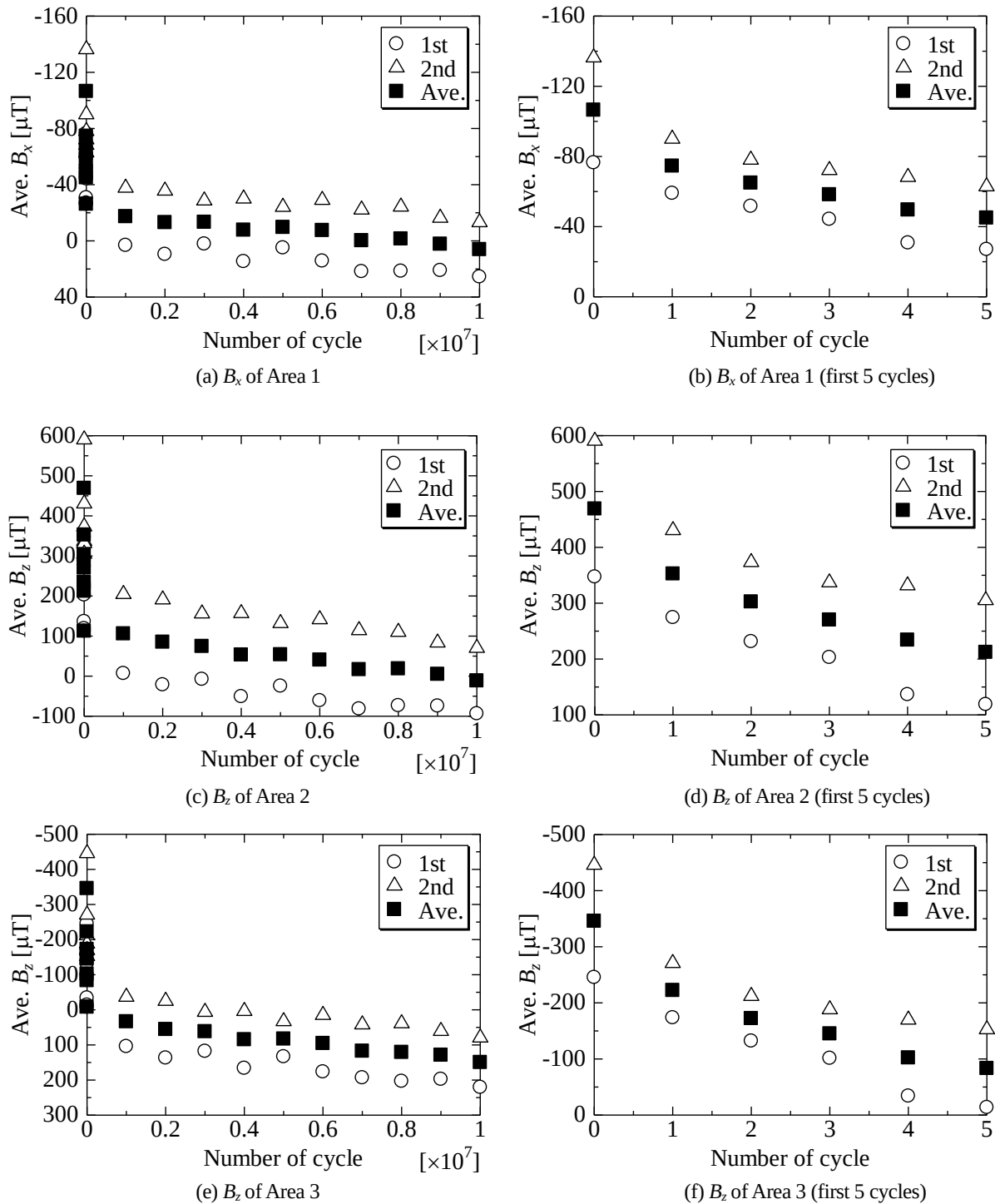


Fig. 7 Averaged magnetic flux density under reverse bias condition.

順バイアス磁場条件での結果と同様、試験初期の数サイクルでは、磁場は大きく変化した。その変化割合は負荷前の磁場に対してエリア①および②では55%程度、エリア③では75%程度であり、変化量はエリア①で $61.5 \mu\text{T}$ 、エリア②で $-256.9 \mu\text{T}$ 、エリア③で $262.5 \mu\text{T}$ であった。また、1サイクルあたりの変化率はエリア①で $12.3 \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア②で $-51.4 \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア③で $52.5 \mu\text{T}/\text{cycle}$ であった。また、その後の高サイクル繰返し負荷においても、磁場は減少する傾向を示した。その変化割合は負荷前の磁場に対して、エリア①および②では50%程度、エリア③では70%程度であり、変化量はエリア①で $51.1 \mu\text{T}$ 、エリア②で $-223.7 \mu\text{T}$ 、エリア③で $233.1 \mu\text{T}$ であった。ま

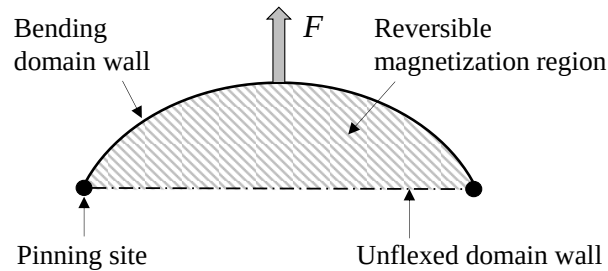
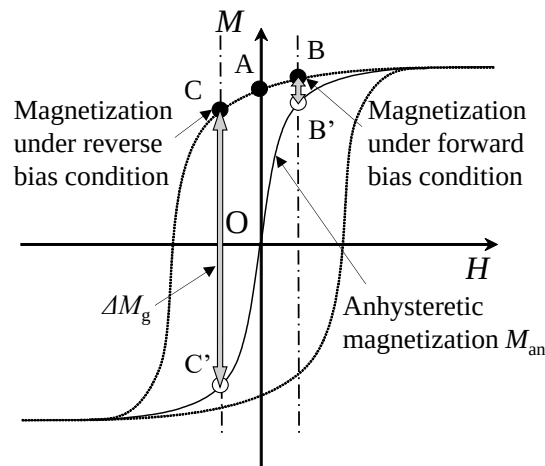


Fig. 8 Bending of magnetic domain wall and reversible magnetization.

Fig. 9 Anhyseretic magnetization and magnetization under each bias condition. The driving force of the magnetization change (magnetic domain wall shift) due to the magnetomechanical effect is positively correlated with the difference from the anhyseretic magnetization ΔM_g .

た、1 サイクルあたりの変化率はエリア①で $5.1 \times 10^{-6} \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア②で $-2.2 \times 10^{-5} \mu\text{T}/\text{cycle}$ 、エリア③で $2.2 \times 10^{-5} \mu\text{T}/\text{cycle}$ であった。1 サイクルあたりの変化率は約 200 万分の 1 に減少しているものの、試験初期の数サイクルの磁化変化量と同程度の変化が確認された。このように、逆バイアス磁場条件では、順バイアス磁場条件における磁場変化よりも全体的な変化量が大きく、最終的には磁場の符号が逆転した。

一方、順バイアス磁場条件と逆バイアス磁場条件の両者の測定結果をみると、どちらも 1 本目の測定値のほうが大きき変化を示している。今回、実験はそれぞれの磁場条件の 1 本目について行ってから半月ほど期間が空いた後にそれぞれの磁場条件の 2 本目について行った。1 本目の実験時に比較して、2 本目の実験時にはチャック部周辺の磁場強度がやや減少していることを確認しており、試験片に印加される環境磁場強度の減少がこのような傾向を生じた原因と考えられる。さらに、順バイアス磁場条件の測定結果と比較すると、逆バイアス磁場条件の測定結果のほうが全体的な測定値のばらつきが小さくなっている。環境磁場方向が測定結果のばらつきに影響を及ぼすメカニズムについては現段階では不明であるが、後述するように、チャック時の有効磁場や磁化変化を測定可能なシステムを構築し、測定することはメカニズム解明の一助となると考えられる。

3・3 高サイクル応力負荷環境での磁化状態変化

Jiles らの磁壁運動理論によると、磁壁は不純物や格子欠陥などにピン止めされつつも弾性的に湾曲することができる (図 8)。強磁性体の磁化 M はこの磁壁の湾曲で生じる可逆磁化 M_{rev} と、十分に湾曲され不連続かつ非可逆的にピン止めサイトから磁壁が離れることで生じる非可逆磁化 M_{ir} の和となる。また、磁壁のピン止めが無い理想的な熱力学的可逆過程における非ヒステリシス磁化を M_{an} とすると、磁壁に働く力 F (磁壁移動の駆動力) は M_{an} と M_{ir} の差に比例する (Jiles and Atherton, 1986)。このことから、磁壁に働く力 F は磁気ヒステリシス曲線上の磁化 M と非ヒステリシス磁化 M_{an} の差 $\Delta M_g = M_{\text{an}} - M$ に比例することが導ける。また、Jiles らは有効磁場や Rayleigh の法則を用いて、磁化 M の応力負荷による変化率 (応力磁化効果の大きさ) は ΔM_g について常に正と

なることを導いた (Jiles and Li, 2003). すなわち, 磁化された強磁性体に応力を負荷すると, 磁化は常に熱力学的に安定な非ヒステリシス磁化 M_{an} に近づき, その駆動力は ΔM_g と正の相関がある.

以上の議論にもとづき, 繰返し負荷時の磁化変化 (応力磁化効果) のメカニズムについて考察する. 図 9 は, 強磁性体の磁気ヒステリシスと非ヒステリシス磁化の概略図であり, 着磁後の残留磁化状態は図中 A 点に対応する. また, 順バイアス磁場条件下での磁化は B 点, 逆バイアス磁場条件下での磁化は C 点に対応する. 応力を負荷すると, 応力磁化効果により磁化はより安定な磁化状態 (図 9 中の B 点→B' 点や C 点→C' 点上的変化に対応) へと可逆的および非可逆的に変化する. この磁化変化は前述の議論から非ヒステリシス磁化との差 ΔM_g が大きいほど顕著となるため, 順バイアス磁場条件下よりも逆バイアス磁場条件下の磁化変化のほうが大きくなったと考えられる. 先行研究では, この後数サイクル程度の繰返し応力負荷を行うと磁化は小さな定常ループを描く (すなわち, 1 サイクル毎の非可逆な磁化変化は生じなくなる) ことが確認されている (Suzuki and Matsumoto, 2005). これは非可逆的な磁化変化が起きたために ΔM_g が小さくなり, 応力磁化効果による非可逆な磁化変化が従来の B コイルによる測定によってはほぼ検出不可能な磁化変化量の範囲に収束したためと考えられる. しかし, 本研究で提案した試験片表面近傍の磁束密度を磁気センサにより測定する手法を用いることにより, 高サイクル繰返し応力負荷領域においても, 1 サイクルあたりの変化量は極めて小さくなるものの, 磁化状態は緩やかに安定な非ヒステリシス磁化状態へと非可逆的に変化するが確認された. 逆バイアス磁場条件の測定において, 高サイクル負荷時の測定磁場の符号が負荷前の磁場の符号から逆転していることから, 本測定結果および, 考察したメカニズムは妥当であると考えられる. ただし本研究では, 試験片の磁化曲線や非ヒステリシス曲線, ならびに, チェック時に実際に試験片に印加される有効磁場とそれにより生じる磁化変化については測定できていない. 今後は磁化特性測定用の試験片を別途作製し磁化曲線等を測定するとともに, チェック時の有効磁場や磁化変化を測定可能なシステムを構築し測定することで, 本考察メカニズムについて詳細に検証できるものと考えられる. また, 実際の配管の検査時には磁化方向長さなど試験片形状の影響も考えられる. この点については異なる長さの試験片について実験を行うなどして応力磁化効果の形状効果についてもさらに検討する必要がある.

このように, 高サイクル負荷領域では駆動力 ΔM_g が小さくなるにもかかわらず, 極微小な非可逆磁化変化が生じ得るのは, 繰返し応力負荷によって, 粒界や析出物周辺のマクロな応力集中が緩和され, これらに起因する磁壁のピン止め効果が弱まる (不可逆な磁壁移動に必要なエネルギーが減少する) ことにより, 局所的かつ不可逆な磁壁移動が起こったためではないかと推測される. また, 磁場変化から推察すると, その変化量は試験初期の数サイクルに比べてバイアス磁場方向の影響は小さくなる. これは, 駆動力と正の相関がある ΔM_g が小さくなったためと考えられる.

4. 結 言

本研究では, 圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG370 の高サイクル繰返し負荷における応力磁化効果とそのメカニズムを明らかにすることを目的とし, 磁化方向と同じ方向の環境磁場 (順バイアス磁場) 条件下および逆方向の環境磁場 (逆バイアス磁場) 条件下で繰返し応力負荷試験を実施した. 得られた結果は以下の通りである.

1. 順バイアス磁場条件, 逆バイアス磁場条件のどちらにおいても, 試験片の磁化に対応する周辺磁場は, 試験開始後数サイクルの応力負荷によって大きく変化した. その後の 10^7 サイクルまでの繰返し負荷では, 磁場は緩やかに変化 (初期磁場方向と逆方向に変化) を続け, 非ヒステリシス磁化状態に近づいた. 1 サイクルあたりの磁場変化率は逆バイアス磁場条件のほうが順バイアス磁場条件に比べて 2~4 倍大きく, 逆バイアス磁場条件においては, 最終的に負荷前に比べて磁場の符号が逆転した. 高サイクルにおける磁場変化率は, どちらの磁場条件においても試験開始後数サイクルに比べて 100 万分の 1 程度と非常に小さかった.
2. Jiles らの磁壁運動理論に基づくと, 応力磁化効果による磁化変化は非ヒステリシス磁化との差 ΔM_g と正の相関がある. 順バイアス磁場条件下よりも逆バイアス磁場条件下のほうが繰返し応力負荷による磁場変化が大きくなったこと, 逆バイアス磁場条件において最終的に測定磁場の符号が逆転したこと, また, 高サイクルにおいて磁場変化率が小さくなることはこのメカニズムと一致する.

3. 粒界や析出物, 転位等の磁壁のピン止めサイトに変化がなければ, 繰返し負荷により ΔM_g は徐々に減少し, ΔM_g を駆動力とする磁化変化は磁壁の湾曲による可逆的な磁化変化 (微小定常ループ) に収束するはずであり, 従来の研究でも, 数サイクル程度の繰返し負荷において, このような傾向が確認されていた. しかし, 本研究では, 試験初期数サイクルでの大きな磁場変化の後も磁場が緩やかに減少した (非可逆磁化変化が生じた). これは, 繰返し応力負荷によって, 粒界や析出物, 転位等のミクロな応力集中が緩和され, 磁壁のピン止め効果が弱まるといった, ミクロな状態変化が生じたためと推測される.
4. 本研究により, 高サイクル繰返し負荷領域においても応力磁化効果による非可逆な磁化変化が生じることが明らかになった. 残留磁化を利用した機械構造物の非破壊検査を行う際には, このような高サイクル繰返し負荷による磁化変化を考慮した補正が必要となると考えられる.

謝 辞

本研究の一部は, 横河電機株式会社の受託研究費, JST, CREST, JPMJCR2092 および JSPS 科研費 JP21H04534 の支援を受けたものです.

文 献

- Babbar, V. and Clapham, L., Residual magnetic flux leakage: A possible tool for studying pipeline defects, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.22 (2003), pp.117-125.
- 近角聰信, 強磁性体の物理 (下) (1984), p.346, 裳華房.
- Dubov, A and Kolokolnikov, S., Assessment of the material state of oil and gas pipelines based on the metal magnetic memory method, *Welding in the World*, Vol.56 (2012), pp.11-19.
- Jiles, D.C., Theory of magnetomechanical effect, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.28, No.8 (1995), pp.1537-1546.
- Jiles, D.C. and Atherton, D.L., Theory of ferromagnetic hysteresis, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 61 (1986), pp.48-60.
- Jiles, D.C. and Devine, M.K., The law of approach as a means of modelling the magnetomechanical effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 140-144, Part 3 (1995), pp.1881-1882.
- Li, L. and Jiles, D.C., Modeling of the magnetomechanical effect: Application of the Rayleigh law to the stress domain, Vol.93, No.10 (2003), pp.8480-8482.
- Matsumoto, E., Stress-magnetization effects based on rate-type constitutive equations of deformable ferromagnetic materials, *Romanian Journal of Technical Science-Series E&E*, Romanian Academy Publishing House, Vol.43, No.3 (1998), pp.391-396.
- 西口廣志, 福島良博, 松岡三郎, 村上敬宜, 1MPa 水素ガスパイプライン用炭素鋼 STPG 370 (0.19 C-0.21 Si-0.56 Mn, mass%) の引張特性に及ぼす水素と予ひずみの影響, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.74, No.743 (2008), pp.1016-1025.
- Raj, B., Jayakumar, T. and Thavasimuthu, M., *Practical Non-destructive Testing*, Woodhead Publishing (2002), p.110.
- 鈴木孝明, 松本英治, 拡張 Preisach モデルを用いた磁気力学的構成式の定式化: 強磁性体の応力磁化効果, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.69, No.687 (2003), pp.1649-1656.
- Suzuki, T. and Matsumoto, E., Accurate model of ferromagnetic materials for optimal design of giant magnetostrictive actuator, *JSAEM Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics*, Vol.15 (2005), pp.151-158.
- 四辻美年, 非破壊検査技術の保守検査への適用, *精密工学会誌*, Vol.75, No.3 (2009), pp.355-358.

References

- Babbar, V. and Clapham, L., Residual magnetic flux leakage: A possible tool for studying pipeline defects, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.22 (2003), pp.117-125.
- Chikazumi, S., *Physics of ferromagnetism*, Vol. II (1984), p.346, Syokabo (in Japanese).
- Dubov, A and Kolokolnikov, S., Assessment of the material state of oil and gas pipelines based on the metal magnetic memory method, *Welding in the World*, Vol.56 (2012), pp.11-19.
- Jiles, D.C., Theory of magnetomechanical effect, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.28, No.8 (1995), pp.1537-1546.

- Jiles, D.C. and Atherton, D.L., Theory of ferromagnetic hysteresis, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 61 (1986), pp.48-60.
- Jiles, D.C. and Devine, M.K., The law of approach as a means of modelling the magnetomechanical effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 140-144, Part 3 (1995), pp.1881-1882.
- Li, L. and Jiles, D.C., Modeling of the magnetomechanical effect: Application of the Rayleigh law to the stress domain, Vol.93, No.10 (2003), pp.8480-8482.
- Matsumoto, E., Stress-magnetization effects based on rate-type constitutive equations of deformable ferromagnetic materials, *Romanian Journal of Technical Science-Series E&E*, Romanian Academy Publishing House, Vol.43, No.3 (1998), pp.391-396.
- Nishiguchi, H., Fukushima, Y., Matsuoka, S. and Murakami, Y., Effect of hydrogen and pre-strain on tensile properties of carbon steel STPG 370 (0.19 C-0.21 Si-0.56 Mn, mass%) for 1 MPa hydrogen pipelines, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A(in Japanese)*, Vol.74, No.743 (2008), pp.1016-1025.
- Raj, B., Jayakumar, T. and Thavasimuthu, M., *Practical Non-destructive Testing*, Woodhead Publishing (2002), p.110.
- Suzuki, T. and Matsumoto, E., Formulation of magnetomechanical constitutive equations using extended Preisach model (stress-magnetization effect of ferromagnetic materials), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A(in Japanese)*, Vol.69, No.687 (2003), pp.1649-1656.
- Suzuki, T. and Matsumoto, E., Accurate model of ferromagnetic materials for optimal design of giant magnetostrictive actuator, *JSAEM Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics*, Vol.15 (2005), pp.151-158.
- Yotsutsuji, M., Application of nondestructive inspection techniques for maintenance inspection (in Japanese), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.75, No.3 (2009), pp.355-358.