

磁気 AE を用いた SUS304 鋼の疲労評価に関する検討

Fatigue Estimation of SUS304 Stainless Steel by Magneto-Acoustic Emission

京都大学大学院エネルギー科学研究科 安部 正高 Masataka ABE Member
京都大学大学院エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

Magneto-Acoustic Emission (MAE) is stress pulses observed during dynamic magnetization process of ferromagnetic material, which is caused by abrupt and discontinuous motion of magnetic domain wall pinned by inclusions, voids, dislocations, grain boundaries etc. The characteristics of MAE change with the applied stress, plastic deformation and fatigue since the stress, dislocation and residual stress influence the structure of the magnetic domains and the pinning effects. Therefore, MAE is potential technique for Non-Destructive Testing (NDT) of ferromagnetic materials. On the other hand, it is known that unstable austenitic stainless steel SUS304 undergoes a martensitic transformation due to plastic deformation or fatigue at room temperature. In this paper, we attempt to apply MAE technique to fatigue detection and estimation of SUS304 steel.

Keywords: MAE, NDT, Fatigue, SUS304

1. 諸言

鉄などの強磁性材料に変動磁場を印加すると、材料内部の磁区構造の変化によって弾性波が発生する。この現象を磁気 AE (Magneto-Acoustic Emission) と呼ぶ[1]。磁気 AE の特性は、材料の形状、印加磁場の強さや周波数、応力などの外的要因や[2-5]、結晶粒度、不純物、熱処理といった内的要因に依存し[6-8]、低炭素鋼やニッケル合金などの強磁性材料における応力、塑性変形、サイクル疲労などの非破壊評価手法への適用が検討されている[9,10]。

一方、代表的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 鋼は一般的に非磁性とされているが、室温で準安定であり、応力負荷や塑性変形、疲労によって磁性を持つマルテンサイト相が生成することが知られている。このことを利用して、磁気的手法によって SUS304 鋼の塑性変形や疲労の非破壊評価法の研究が進められている[11,12]。しかし、これまで磁気 AE の SUS304 鋼への適用はほとんど行われてこなかった。マルテンサイト相は強磁性を示すため、SUS304 鋼においても磁気 AE が発生する可能性がある。

そこで本研究では、SUS304 鋼の疲労評価への磁気 AE の適用を目的として、サイクル疲労試験を施した SUS304 鋼について磁気 AE を測定し、疲労評価における有効性を検討した。

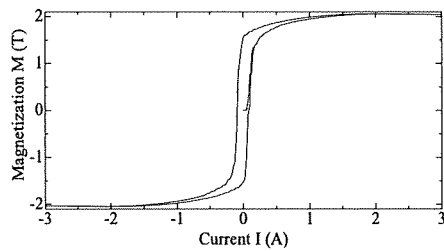
2. 磁気 AE の発生要因と性質

一般に多結晶強磁性体は磁壁で区切られた多数の磁区で構成されており、その磁化過程では、結晶中の格子欠陥、不純物、結晶粒界等の影響で磁壁移動が不連続になり、磁化も不連続に進行する (バルクハウゼン効果)。この不連続磁壁移動のうち、主に 90° 磁壁の移動や回転磁化によって、磁区の自発ひずみのエネルギー変化がパルス状の弾性波として放出される現象が磁気 AE であるとされている。動的磁化過程において同様に測定されるバルクハウゼンノイズは主に 180° 磁壁の移動に起因する誘導起電圧パルスであり、磁気 AE とは異なる。応力負荷にともなう磁気弾性結合による磁区構造の変化、ならびに、塑性変形や疲労における転位やすべり線の増殖、残留応力などによる磁壁移動の抵抗増大や磁区構造の変化は磁気 AE に大きな影響を与えるため、磁気 AE を用いた応力・塑性変形・疲労の評価技術に関する研究が進められている[9,10]。

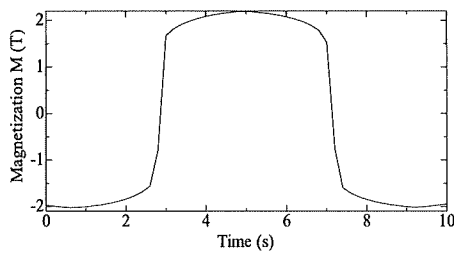
Fig.1 には強磁性体である SS400 鋼に三角波形状の周期磁場を印加した際の磁化曲線、1 周期における磁化の時間変化と測定される磁気 AE イベントの分布を例示した。図より、磁化の変化が急激な時間帯において磁気 AE も多く測定されていることがわかる。つまり、磁気 AE イベントの発生数 N は磁化 M の時間変化率に対して比例関係にあると考えられる。

$$N_{(t)} \propto \left| \frac{dM}{dt} \right| = \left| \frac{dM}{dH} \frac{dH}{dt} \right| \quad (1)$$

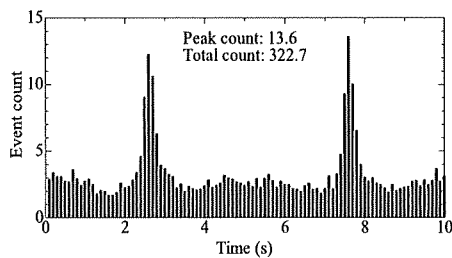
連絡先: 安部正高、〒606-8501 京都市左京区吉田本町、
京都大学大学院エネルギー科学研究科、
E-mail: abe@energy.kyoto-u.ac.jp



(a) Hysteresis loop



(b) M-t curve



(c) Distribution of MAE count

Fig.1 MAE distribution and hysteresis loop of SS400

これより、印加磁場が三角波形状の周期磁場の場合には磁気 AE イベントの発生数 N は微分磁化率 dM/dH の絶対値に比例する。このように、磁気 AE は材料の磁化特性と密接な関係にあることがわかる。

2. 実験

2.1 試験片

実験に使用した試験片はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。この材料の機械的特性の一部を Table1 に示す。試験片形状は Fig.2 に示すように厚さ 10mm で、最も断面面積が小さくなる中央部で幅 20mm である。試験片中央部には直径 2.5mm、深さ 2.5mm の非貫通ホールノッチを設け、疲労き裂がノッチ部から発生するようにした。Table2 には本研究で行った両振りの高サイクル疲労試験の条件を示した。事前に同一形状の試験片について疲労試験をおこない、その破断回数 N_0 が 156,178 回であ

Table 1 Mechanical properties of SUS304

0.2% yield stress	210MPa
Tensile strength	530MPa
Young's modules	200GPa

Table 2 Cycle fatigue conditions and number of cycles

Fatigue degree N/N_f	Stress amplitude	Number of cycles N
0%(untested)	185MPa	0
4.1%		15,650
8.2%		31,250
12.3%		46,850
16.4%		62,450
20.5%		78,050
24.6%		93,650
28.7%		109,250
32.8%		124,850
41.0%		156,050
61.4%		234,000
81.9%		312,000
100%(failure)		$N_f=380,921$

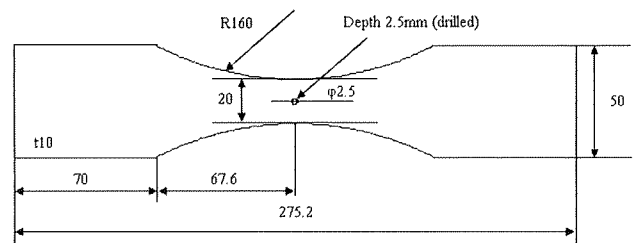


Fig.2 Specimen

ることを確認した上で、実際に磁気 AE と磁化曲線を測定する試験片について、測定を行う繰り返し数 N を適当に設定した。測定は繰り返し数 N 毎に疲労試験をストップし、その度に試験片を疲労試験機から取り外して行った。測定と疲労試験を繰り返した結果、 $N_f=380,921$ 回で破断した。

2.2 測定方法

測定装置の概略図を Fig.3 に示す。電磁石のコイル(2000 巻)に周期が 10s で、最大電流値が 3A である三角波形状の電流を流すことで周期的な磁場を印加する。磁場の印加方向は長手方向とし、電磁石の磁極間隔は 115mm とした。その際、AE 測定装置によって、試験片の磁化過程で

発生する弾性波の発生時刻、発生件数と振幅をイベント計数法により検出する。イベント計数法では、微小な時間帯にしきい値を超えた一連の信号を1イベントとし、この一連の信号のうちで最も大きな振幅をイベントの振幅とする (Fig.4)。なお、三角波電流は3周期繰り返し、第2周期目の最小電流値から1周期間の磁気 AE を計測した。計測はそれぞれ10回行い、その平均値を実験値として採用した。

また、試験片の磁気的変化を測定するために、試験片中央部に探りコイル (20 巻) を巻き、電流値に対応する磁束密度を測定した。さらに、試験片表面に設置した電子磁気工業社製ホールセンサ T-550 (空間分解能 50 μm、測定レンジ ±4T、測定感度 10⁻⁷T により印加磁場方向 (試験片長手方向) の磁界強さを測定し、以下の式から試験片の磁化を算出した。

$$M = B_{coil} - \mu_0 H_{hole} \quad (2)$$

ここで、 M は試験片の磁化、 B_{coil} は探りコイルにより測定された磁束密度、 H_{hole} はホールセンサで測定された磁界強さ、 μ_0 は真空の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]) である。

AE 測定装置一式には NF 回路設計ブロック社製のものをを用いた。AE 探触子 AE-901S (中心周波数 150kHz) からの信号はプリアンプ AE-912 (利得 40dB) によって増幅され、AE 計測器 U-PLOT9502 によってイベント数がカウントされる。プリアンプと AE 計測器はそれぞれ、50kHz のハイパスフィルターと 100kHz~500kHz のバンドパスフィルターを持つ。AE 計測器による発生時刻の計測は 0.1s 間隔でおこなわれる。分解時間は 0.8ms、デッドタイムは 1ms である。しきい値は 50dB に設定した。

3. 測定結果と考察

Fig.5 に、各疲労度 (本研究では、測定時の疲労試験サイクル数 N の最終破断サイクル数 N_f に対する百分率と定義する) で測定された磁化曲線の一例を示した。一般には非磁性とされる SUS304 鋼であるが、外部磁場を印加することで僅かながら磁化されていることがわかる。しかし、磁化曲線はほとんどヒステリシスを示さず、疲労度との明確な相関も見られなかった。これは、本試験片では中央部にホールノッチを設けたため局所的に疲労損傷が起こったこと、測定の度に探りコイルを巻き直したこと、探りコイルの巻き数が少なかったことなどが原因として考えられる。今回のように局所的な疲労を生じる

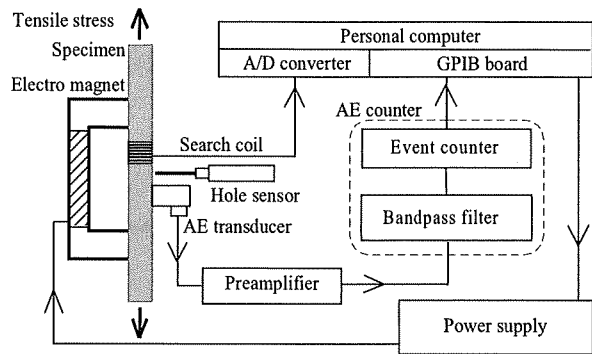


Fig.3 Experimental system

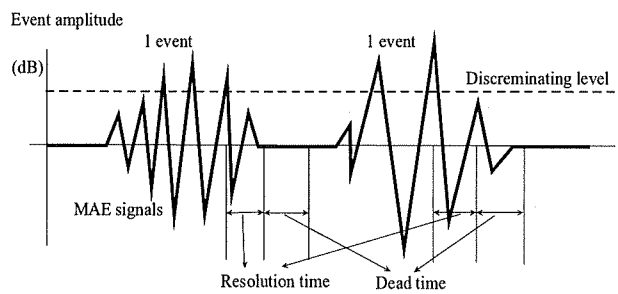


Fig.4 MAE measurement method

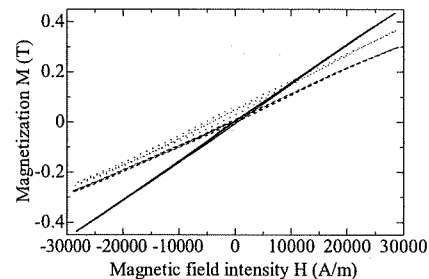


Fig.5 Magnetization curve of SUS304

試験片では、探りコイルで平均化された磁束密度および試験片表面の磁界強度から磁化曲線を求める手法は適当ではなかったと言える。

Fig.6 から Fig.8 には疲労度 0%、41.0%、81.9% の試験片における印加磁場 1 周期 10 秒間に発生した磁気 AE の 0.1 秒間隔毎におけるイベント分布を示した。図より、発生する頻度は少ないものの、磁気 AE が発生していることがわかる。しかし、イベント分布には明確なピークは存在しない。これは、Fig.1 で例示したような一般的な強磁性体と異なり、今回の試験片においては Fig.5 に示すように磁化曲線が平均的にほぼ直線状となっているからである。疲労試験を施していない試験片についても磁気 AE が測定されたのは、試験片加工時に生じた変質層や材料

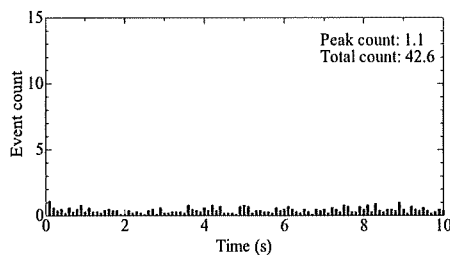


Fig.6 Distribution of MAE event (0% fatigue)

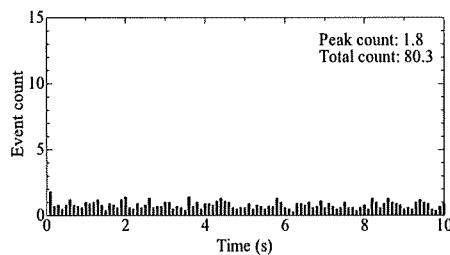


Fig.7 Distribution of MAE event (41.0% fatigue)

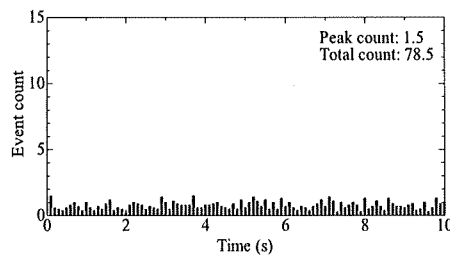


Fig.8 Distribution of MAE event (81.9% fatigue)

中に当初から存在する磁性相によるものと考えられる。

Fig.9 および Fig.10 にはイベント数の総和（以降、トータルカウントと呼ぶ）とイベント分布における最大イベント数（以降、ピークカウントと呼ぶ）を疲労度に対してプロットしたものを示した。Fig.9 からわかるように、磁気 AE のピークカウントは全体的に少なく、疲労度によらずほぼ一定であった。一方、トータルカウントは疲労度が 20%を超えたあたりから急激に増加している。このような磁気 AE の変化は、疲労や疲労き裂の発生および進展に伴うマルテンサイト相の生成に対応すると考えられるが、生成したマルテンサイト相との定量的な関係については今後検討する必要がある。また、生成したマルテンサイト相の形状・組織と磁気 AE との相関についても組織観察などを通して検討していきたい。

5. 結言

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼である

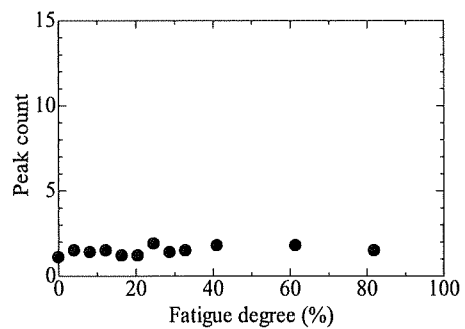


Fig.9 MAE peak count versus fatigue degree

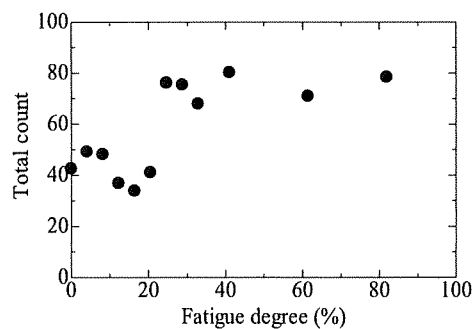


Fig.10 MAE total count versus fatigue degree

SUS304 鋼を実験対象に、完全両振り疲労試験を施した試験片について磁気 AE の測定および考察を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 疲労試験片について磁気 AE が発生することを確認した。しかし、イベント分布には明確なピークは存在しなかった。
- (2) 磁気 AE のピークカウントについては疲労との相関は認められなかったが、トータルカウントについては疲労が進行するにしたがって増加する傾向が確認された。

以上より、磁気 AE を用いたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の疲労評価の可能性が示された。今後はその発生機構や特性を把握するために、磁気 AE の具体的な波形の解析（周波数や振幅分布等）や、組織観察を通じたマルテンサイト相の分布等についてさらに検討する必要がある。また、今回使用した試験片ではホールノッチ近傍でのみ局所的に疲労損傷が生じたと考えられる。明瞭な磁気 AE 信号を得るためにはある程度の体積が必要となるため、疲労個所の体積をより大きくした試験片形状についても検討を行っていきたい。

参考文献

- [1] D.C. Jiles, "Review of magnetic methods for nondestructive evaluation", NDT International, Vol.21, No.5, 1998, pp.311-319.
- [2] 草薙, "強磁性材料の磁化過程における AE 特性とその応力依存性", 電力中央研究所報告, 278001, 1978, pp.1-21.
- [3] 新家ら, "SS41 の磁化過程における AE の応力依存性", 非破壊検査, Vol.34, No.8, 1985, pp.8-13.
- [4] D.H.L. Ng etc., "Effect of biaxial stress on magnetoacoustic emission from nickel", IEEE Trans. Magnetics, Vol.28, 1992, pp.2214-2216.
- [5] 羽根ら, "ニッケルにおける磁気AEの応力依存性", 日本機械学会論文集 A 編, Vol.65, No.534, 1999, pp.1629-1634.
- [6] 柴田ら, "磁気AE信号とバルクハウゼン信号の関連", 非破壊検査, Vol.36, No.10, 1987, pp.772-777.
- [7] R. Ranjan etc., "Magnetoacoustic emission, Magnetization and barkhausen effect in decarburized steel", IEEE Trans. Magnetics, Vol.22, No.5, 1986, pp.511-513.
- [8] A. Dhar etc., "Magnetizing frequency dependence of magneto-acoustic emission in pipeline steel", IEEE Trans. Magnetics, Vol.28, No.2, 1992, pp.1003-1007.
- [9] 新家ら, "磁化過程における AE の自動解析装置の試作と応用", 非破壊検査, Vol.34, No.8, 1985, pp.506-512.
- [10] 宅間ら, "磁気特性と磁気 AE による疲労損傷度と疲労条件の評価", 日本機械学会論文集 A 編, Vol.64, No.627, 1998, pp.2862-2868.
- [11] 中曽根ら, "マルテンサイト変態を利用した電磁的材料劣化評価", 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.2, 2001, pp.123-130.
- [12] 槌田ら, "磁気センサによる SUS304 系鋼・SUS316 系鋼の歪みおよび曲げ疲労評価", 非破壊検査, Vol.57, No.9, 2008, pp.433-436.