

# 漏洩磁束を利用した SUS304 鋼の疲労・損傷の評価

## Evaluation of Fatigue and Damage in SUS304 using Magnetic Flux Leakage

京都大学大学院エネルギー科学研究科	佐々木 海	Kai Sasaki	
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	木下 勝之	Katsuyuki Kinoshita	
京都大学大学院エネルギー科学研究科	松本 英治	Eiji Matsumoto	Member

Austenitic stainless steel SUS304 is typically classified as a paramagnetic material, but it forms ferromagnetic martensite phase due to plastic deformation, stress or fatigue. This martensitic transformation can be applied to magnetic Non-Destructive Evaluation (NDE) technics. In this paper, we attempt to detect and estimate the artificially introduced notch, fatigue crack and fatigued part in SUS304 steel by measuring the Magnetic Flux Leakage (MFL) near the specimen surface. It is found that the notch and fatigue crack can be detected by measuring the MFL, and the possibility was shown to detect the potential part of fatigue crack propagation.

**Keywords:** MFL, SUS304, Fatigue Crack, High Sensitive Magnetic Sensor, NDE

### 1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼は、優れた加工性と耐食性を有し、様々な機械構造物の構造材料として用いられている。また、その機械的、化学的な特性から、エネルギープラントや LNG タンクなど、破損や損傷によって大きな被害をもたらす可能性の高い構造物に用いられることも多い。また、オーステナイト系ステンレス鋼は、一般には常磁性体とされているが、近年では、損傷や応力負荷によって強磁性体であるマルテンサイト相を生成するという性質を利用した磁気的な非破壊検査法の研究も行われてきている[1]。

鉄などの強磁性体は空気と比べて透磁率が桁違いのため、磁束線（等ポテンシャル線）は磁性体内部を通りやすい。ところが、磁性体に傷や加工時に生じた変質部などの磁気的非均質部が存在すると、外部に磁束線が漏れることがある。これを漏洩磁束と呼ぶ。また、透磁率が低い母材中に何らかの理由で透磁率の高い強磁性部が生成された場合には、これとは逆に磁束線がその箇所へと集中、もしくは磁化により局所的な磁束ループを生じる。このような場合にも、磁束線の変化が材料外部にまで及ぶことがあり、本研究では、これも広い意味での漏洩磁束と呼ぶこととする。

漏洩磁束探傷法は、漏洩磁束密度の分布を適当な磁気センサを用いて計測することにより欠陥を検出する非破

壊検査法である。近年、上述の性質を利用してオーステナイト系ステンレス鋼の疲労・損傷の評価に漏洩磁束探傷法を応用する研究[2]が進められているが、非破壊評価法として確立されたとはいえない。また、背面欠陥や背面から進展する疲労き裂の検出、内部の劣化評価などに関してはデータも少なく十分な研究がされていないのが現状である。そこで、本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 鋼について、人工的に設けた表面・背面欠陥、表面および背面から進展する疲労き裂ならびに疲労に伴う材質劣化の検出・評価を試みた。

### 2. マルテンサイト変態

オーステナイト相は熱力学的安定性が低く、加工や疲労、損傷などによる残留応力、塑性変形により、加工誘起マルテンサイト変態を起こし、より安定で強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[3]、[4]、[5]。マルテンサイト相は、熱処理によって強度や硬度が増加し、耐摩擦性も高いが、一方でやや脆く、また常温で磁性を有しており、変態前のオーステナイト相とは明らかに異なる性質を持っている。

### 3. 漏洩磁束の測定

#### 3. 1 試験片

実験に用いた SUS304 鋼試験片の形状を Fig.1~3 に示す。まず、表面欠陥および背面欠陥の検出実験のために、

連絡先:佐々木海、〒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: sasaki.kai.75c@st.kyoto-u.ac.jp

幅5mm、深さ1、3、5、7、9mmの5つの溝を設けたFig.1に示すような試験片1を用意した。次に、表面の疲労および疲労き裂の検出を行うために、中央部に予スリットを設けたFig.2に示すような試験片2および3を用意した。試験片2は中心にスリット加工のみが施されている。試験片3は試験片2と同材質、同形状であり、疲労試験を行って、予スリット先端から約20mmの疲労き裂を進展させた。さらに、背面から進展する疲労き裂の検出のために、Fig.3のような形状の試験片4~8を用意した。試験片5~8には振幅200MPaで完全両振りの疲労試験を行い、それぞれスリット先端から2mm、5mm、7mm、8mmの疲労き裂を発生させた。

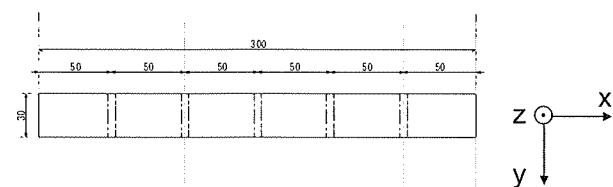


Fig.1 Specimen 1

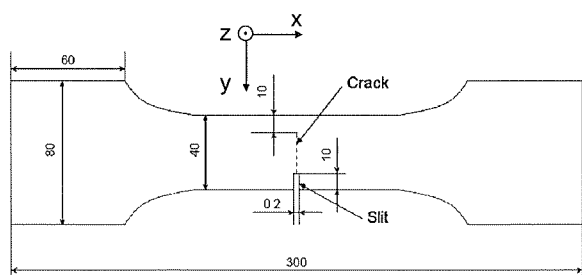


Fig.2 Specimen 2 and 3

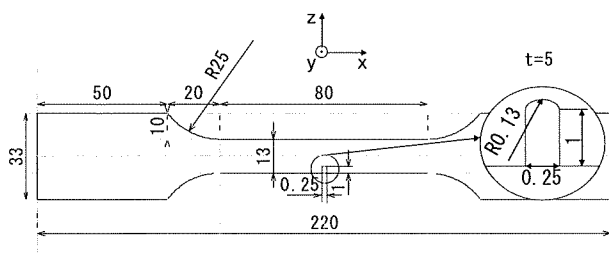


Fig.3 Specimen 4~8

### 3. 2 測定方法

測定システムの概略図をFig.4に示す。測定に用いたホールセンサの空間分解能は $50\mu\text{m}$ と高く、 $\pm 4(\text{T})$ の広い測定レンジを持ち、測定感度も $10^{-7}(\text{T})$ と高感度のセンサである。試験片はすべて電磁石(2000巻)を用いて、交流法(電流振幅最大値3A)で消磁した後、試験片1~3については電流値3Aで厚さ方向に、試験片4~8について

は幅方向(Fig.3のz軸正方向)に着磁した。測定に際しては、測定点は $0.5\text{mm}$ 間隔の格子点とし、材料表面からセンサまでの距離(リフトオフ)は $0.5\text{mm}$ とした。すべての試験片について、試験片表面に対して法線方向( $B_z$ )と接線長手方向( $B_x$ )の漏洩磁束密度を測定した。 $B_z$ は測定面法線方向を正、 $B_x$ は試験片1および試験片4~8についてはFig.1, Fig.3中のx軸正方向を正、試験片2および3についてはFig.2中のx軸負方向を正として測定した。試験片1については、測定範囲を溝の中央部を中心とした幅方向5mm、長手方向30mmの範囲とし、測定レンジ4mTで、5箇所の溝について、溝の表面側と背面側から漏洩磁束を測定した。試験片2、3については、測定範囲を試験片中央部を中心とした $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の範囲とし、測定レンジ40mTで、疲労き裂進展部の側面から測定した。試験片4~8については、測定範囲を試験片中央を中心として、長手方向に1次的に30mmとし、き裂の背面から測定した。

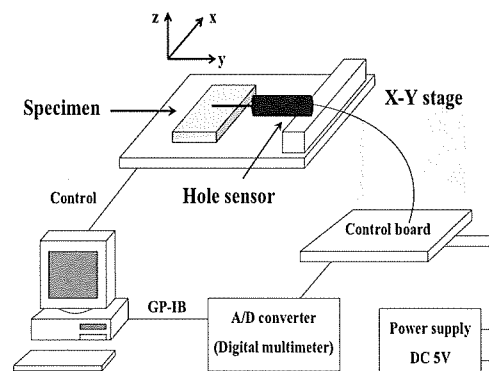


Fig.4 Experimental system

## 4. 測定結果と考察

### 4. 1 表面欠陥および背面欠陥の検出

試験片1の測定結果の一例として、深さ9mmの溝の表面側、背面側からの測定結果をFig.5に示す。また、Fig.6に溝の中心からの距離が同じとなる測定点(同一x座標の点)の磁束密度を平均化してプロットしたグラフをのせる。溝はFig.5、Fig.6の $x=-2.5 \sim 2.5\text{mm}$ の辺りに位置する。測定結果において、接線方向成分は、多くの測定結果においてx軸負方向(画像下方向)にいくほど、磁束密度が増加している。これは、今回の測定は磁気シールドなどを用いていないため、環境磁場による影響が出たと考えられる。

測定結果より、欠陥表面からの測定においては、法線方向成分、接線方向成分ともに、溝付近で磁束密度分布

の変化がみられ、欠陥の検出および欠陥開口部形状の同定ができていけると言える。一方、背面からの測定結果では、法線方向成分は Fig.6 のように、溝深さが 9mm、すなわち溝が平滑表面から 1mm まで迫ったものについては溝付近で磁束密度分布が変化していることが確認された。一方、溝深さが 7mm 以下の測定結果においては、溝の影響とみられる磁束密度分布の変化は見られず、欠陥の検出はできなかった。

今回の測定結果から、試験片の溝部分では Fig.7 のような磁束ループを形成していると考えられるが、その具体的な機構やプロセスを解明することは、今後の検討課題である。

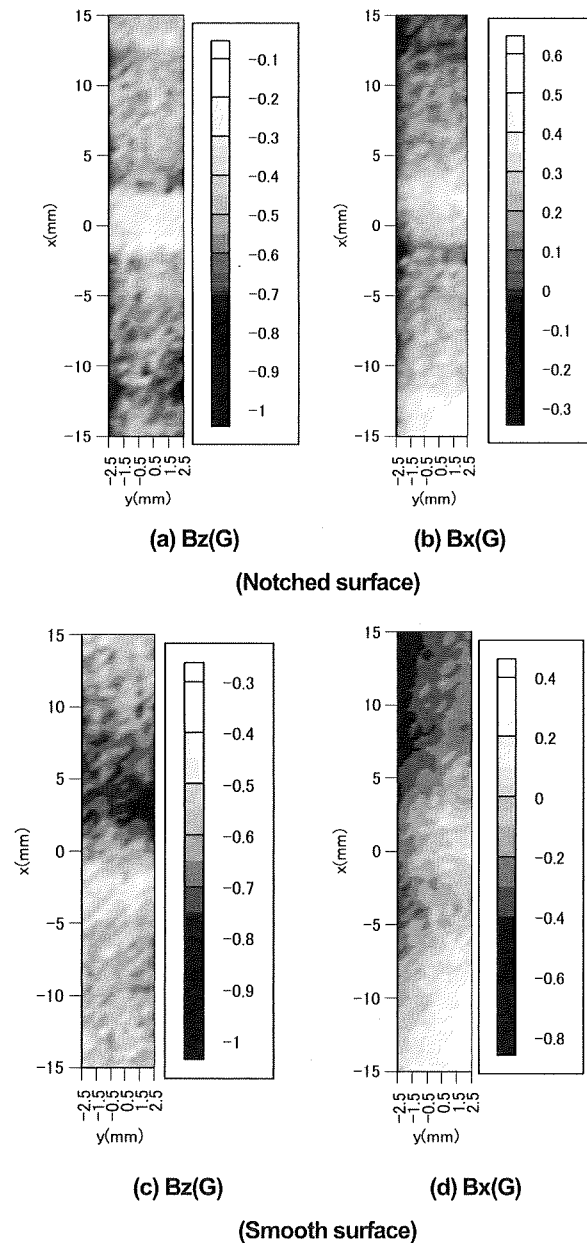
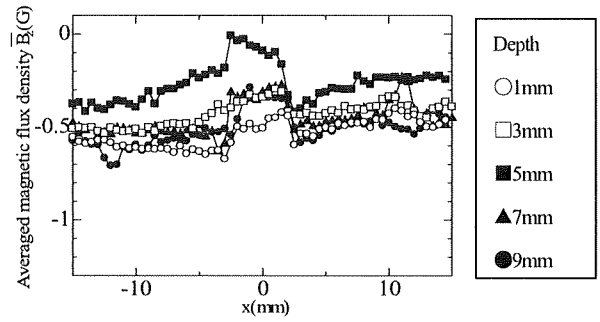
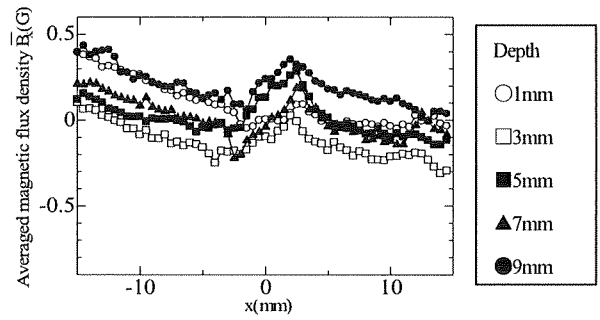


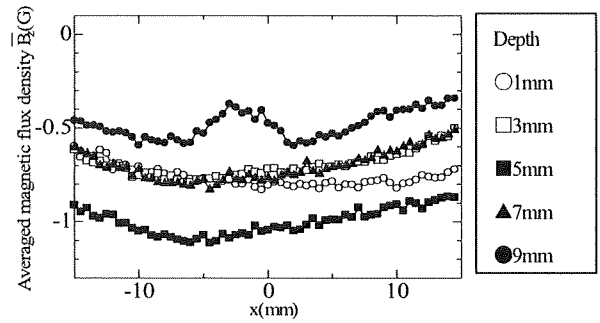
Fig.5 Distribution of magnetic flux density near slit (depth 9mm, width 5mm)



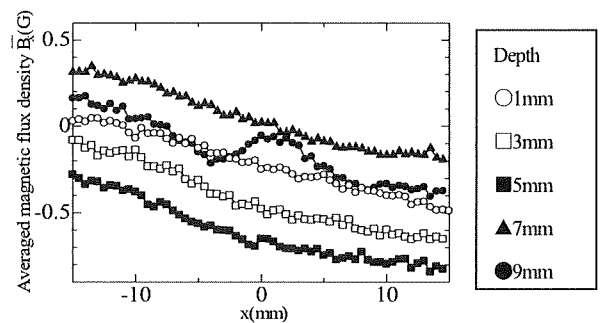
(a)  $\bar{B}_z$  (Notched surface)



(b)  $\bar{B}_x$  (Notched surface)



(c)  $\bar{B}_z$  (Smooth surface)



(d)  $\bar{B}_x$  (Smooth surface)

Fig.6 Averaged magnetic flux density

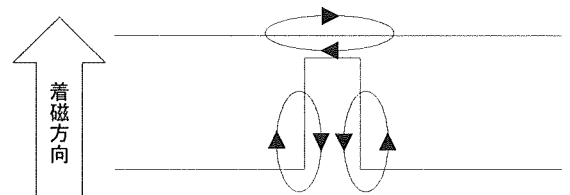


Fig.7 Sketch of magnetic flux near slit

## 4. 2 疲労部および疲労き裂の検出

### 4. 2. 1 表面の疲労および疲労き裂の検出

Fig.10 に試験片 2、Fig.11 に試験片 3 の磁束密度分布の測定結果を示す。 $B_z$  と  $B_x$  の 2 成分の測定結果から、疲労き裂近傍で磁束密度分布が特徴的に変化していることが確認でき、側面からの漏洩磁束測定では、疲労き裂の検出ができた。これは、疲労き裂近傍に強磁性であるマルテンサイト相が生成したためと考えられる。磁束密度の変化の仕方をみてみると、疲労き裂近傍では、 $B_z$  は増加し、 $B_x$  はき裂( $x=0$ )を境に変化している。この磁束の流れから、測定面において、疲労き裂部分では磁束が湧き出していると考えられる。これは、磁場を印加したことによってマルテンサイト相が磁化された結果、Fig.8 のような磁束ループが形成されていると考えられる。一方、スリット近傍の磁束密度は、 $B_z$  は減少し、 $B_x$  はスリットの中心 ( $x=0$ ) を境にき裂近傍とは逆向きに変化している。つまり、測定面において、スリット部分では磁束が吸い込まれており、磁束の流れは Fig.9 のようになっていると考えられる。また、Fig.9 の法線方向成分の測定結果を見ると、疲労き裂の先端近傍で磁束密度が特徴的な変化をしていることがわかる。これは、き裂先端近傍における応力集中により優先的に生成したマルテンサイト相由来すると考えられる。すなわち、漏洩磁束分布の測定によって、疲労き裂だけでなく、これからき裂が進展していくと思われる箇所を検出できることが示された。

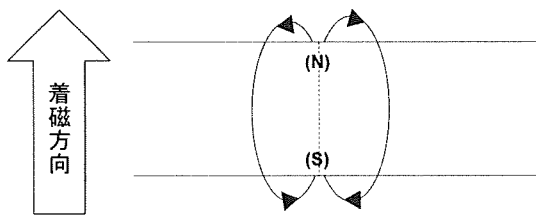


Fig.8 Sketch of magnetized region and magnetic flux near fatigue crack

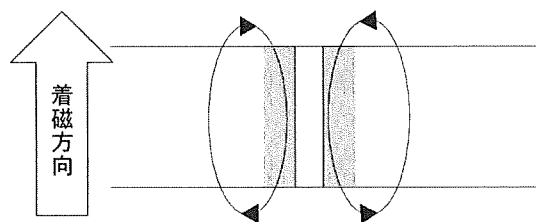
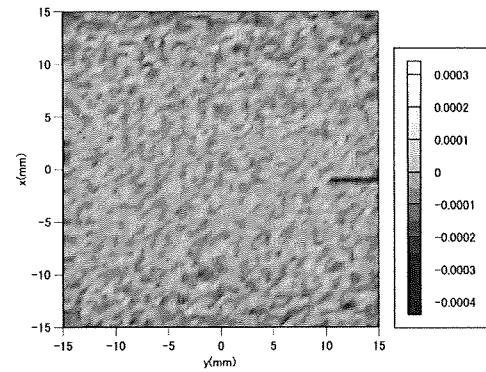
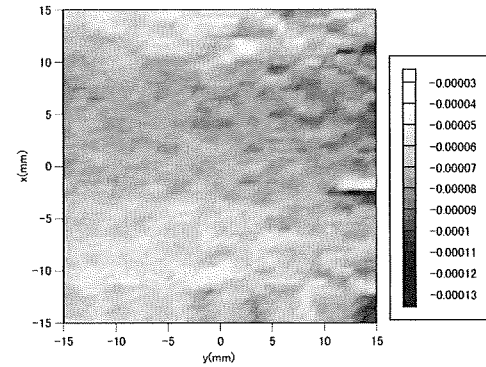


Fig.9 Sketch of magnetized region and magnetic flux near slit

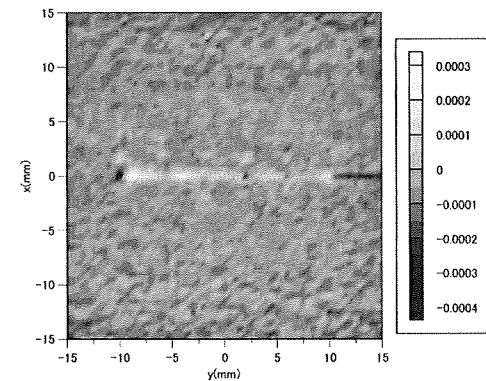


(a)  $B_z$ (T)

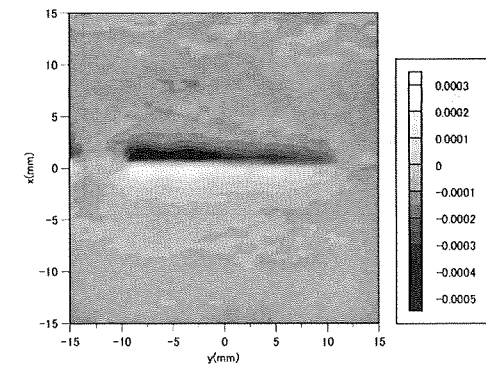


(b)  $B_x$ (T)

Fig.10 Distribution of magnetic flux density (Specimen 2)



(a)  $B_z$ (T)

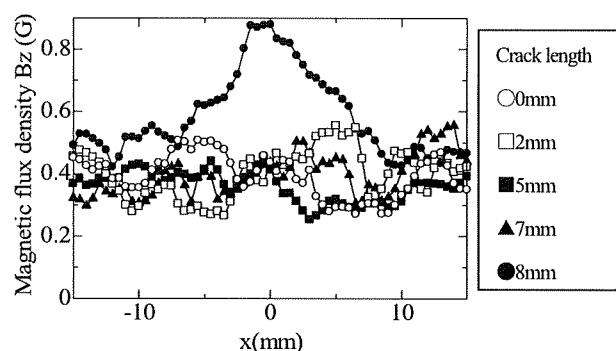


(b)  $B_x$ (T)

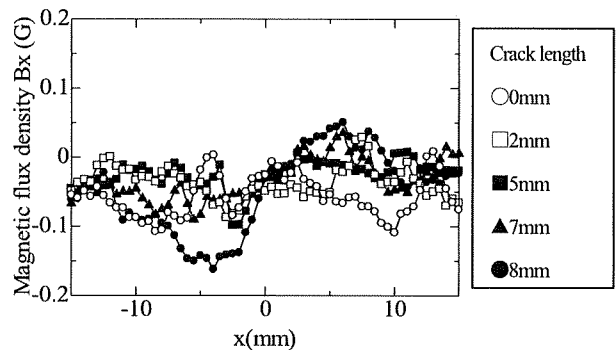
Fig.11 Distribution of magnetic flux density (Specimen 3)

#### 4. 2. 2 背面から進展する疲労き裂の検出

試験片 4~8 の漏洩磁束の測定結果を Fig.12 に示す。試験片の形状から、この試験片に対しては一直線状の漏洩磁束分布しか測定できなかった。Fig.12 のき裂長さ 8mm の測定結果をみると、疲労き裂先端部から磁束が湧き出すように分布していることがわかる。このことから、き裂近傍のマルテンサイト相が磁化され、磁束の流れが Fig.13 のようになっていると考えられる。しかし、き裂長さ 7mm 以下の測定結果においては、磁束密度分布に特徴的な変化はみられず、き裂の検出ができなかった。この結果から、き裂長さが 8mm、つまり測定面から 4mm 程度の深さまでき裂が進展している場合であれば、欠陥背面からの漏洩磁束測定による疲労および疲労き裂の検出、評価が可能であるが、それ以下の浅いき裂の場合、このような直線状の漏洩磁束分布から疲労き裂の検出、評価は難しいと言える。しかしながら、実機では面積がある壁面の背後から進展するき裂に対しては二次元的な漏洩磁束分布を測定することが可能であるので、その分布のパターンから、疲労き裂が検出できる可能性もある。



(a)  $B_z$



(b)  $B_x$

Fig.12 Distribution of magnetic flux density

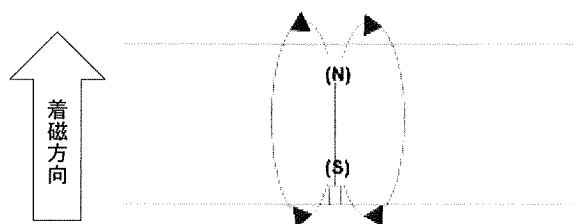


Fig.13 Sketch of magnetized region and magnetic flux near fatigue crack

#### 5. 結言

本研究では、漏洩磁束探傷法によるオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304 鋼) の表面および背面の疲労・損傷の検出、評価を行った。以下に本研究で得られた結論と今後の課題を記す。

- (1) 幾何形状が顕著な人工欠陥(スリット)については、欠陥表面からの漏洩磁束測定では、磁束密度分布の特徴的な変化がみられ、欠陥の検出ができた。
- (2) 一方、欠陥背面からの漏洩磁束測定では、溝深さが 9mm、すなわち溝が平滑表面から 1mm まで迫ったものについては、欠陥の検出ができたが、溝深さが 7mm 以下のものについては、磁束密度分布に変化がみられず、欠陥の検出はできなかった。
- (3) 疲労および疲労き裂については、き裂側面からの漏洩磁束測定では、き裂近傍で磁束密度分布の特徴的な変化がみられ、表面に発生したき裂の検出を行うことができた。また、き裂先端の応力集中部に特徴的な磁束密度が検出でき、これからき裂が進展していくと思われる箇所が推定できた。
- (4) 一方、背面から進展する疲労き裂についての漏洩磁束測定では、試験片の形状から、直線状の分布しか測定できなかった。浅いき裂の検出はできなかったが、測定面から 2mm 程度までき裂が進展している場合は、特徴的な磁束密度分布の変化が観測できた。
- (5) より高感度な磁気センサを用いたり、操作方法や磁化方法を改良することによって、より微小な欠陥を検出することや、疲労や応力の程度と漏洩磁束との相関を求め、疲労度や応力集中などの定量的な評価

を行うことは今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 高橋正氣、“磁性と塑性 - 非破壊検査への応用”、日本 AEM 学会誌 vol.9、no.2、2001、pp.9-17.
- [2] 永江勇二、青砥紀身、陳振茂、“オーステナイト系ステンレス鋼を対象とした損傷非破壊検出技術の開発”、サイクル機構技報、no.14、2002、pp.125-135.
- [3] 日本 AEM 学会、“電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊検査評価技術に関する調査研究分科会報告書”、1999、JSAEM-R-9803.
- [4] 日本 AEM 学会、“電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊検査評価技術に関する調査研究分科会報告書”、2000、JSAEM-R-9903.
- [5] 日本 AEM 学会、“電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊検査評価技術に関する調査研究分科会報告書”、2006、JSAEM-R-0006.