

高感度磁気センサを用いたオーステナイト系ステンレス鋼のき裂の検出

Detection of Crack in Austenitic Stainless Steel with High Sensitive Magnetic Sensor

京都大学エネルギー科学研究科 安部 正高 Masataka ABE Student Member
京都大学エネルギー科学研究科 琵琶 志朗 Shiro BIWA Member
京都大学エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

This study attempt to detect cracks in austenitic stainless steel by Magnetic Flux Leakage Technique with a high sensitive magnetic sensor. If a specimen is subjected to the stress, the magnetic properties change or the martensite phase is formed due to the plastic deformation or the stress induced phase transformation.. When the generated phase is martensite, this local change of magnetic property can be detected by measuring the Magnetic Flux Leakage with a sensitive magnetic sensor. In order to verify the MFL due to the above effect, we first calculate the MFL in the vicinity of a crack in austenitic stainless steel by the use of FEM analysis. Subsequently, we measure the MFL with respect to a SUS304 specimen with fatigue crack and a welded SUS316 specimen with SCCs. It is found that the location and the shape of the welded part, the fatigue crack and the SCC can be visualized by the MFLT with a high sensitive magnetic sensor.

Keywords: NDI, MFLT, Crack Detection, SCC, Fatigue Crack, Biaxial Sensing, High Sensitive Sensor

1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼は一般的に非磁性とされているが、正確には真空と比較して数パーセント大きな透磁率を有している。また、応力負荷や塑性変形によって磁性を持つマルテンサイト変態相が生成することが報告されている[1]。代表的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 鋼は良好な加工性と高い耐食性を持ち、食器具といった日用品から原子炉の炉内構造材料まで幅広い分野で用いられている。この SUS304 鋼については、マルテンサイト変態部位における変態量と強制着磁によって生じる磁束密度分布強度との間に定量的な関係があることが中曽根らによって報告されている[2]。さらに、このマルテンサイト変態量分布と塑性ひずみ分布との関係を実験的に求め、疲労評価法に応用する研究も同時に行われている[3]。一方で、近年原子炉関連の構造材料として SUS316 鋼が用いられる事例が増えている。この SUS316 鋼も SUS304 鋼と同じオーステナイト系ステンレス鋼であり、マルテンサイト変態相の磁性を利用した磁気的破壊評価法の研究が始まっている[4]。

本研究では、まず、オーステナイト系ステンレス鋼中に生じたき裂およびその近傍の磁気特性変化を模擬

した有限要素法モデルを用いて、漏洩磁束が発生することを確かめた。続いて、疲労き裂を有する SUS304 鋼試験片および溶接部に SCC を有する SUS316 鋼試験片について試験片表面近傍における磁場分布を高感度磁気センサを用いて測定し、疲労き裂や溶接部および SCC の検出を試みたのでその結果を報告する。

2. FEM による漏洩磁束解析

2.1 解析モデル

Fig. 1 に解析モデルを示す。試験片は冷間加工されたオーステナイト系ステンレス鋼を想定し、比透磁率は 1.5 とした。長さ 20mm、厚さ 5mm の試験片中央には幅 5mm、深さ 2mm の溝があり、溝の角部分には疲労き裂を模擬した幅 0.5mm、深さ 2mm の微細な溝を設けた。さらに、き裂周囲には 0.5mm 幅のマルテンサイト変態相の生成による変質部を設け、比透磁率を 2.0 とした。試験片は地磁気と同程度の微小外部磁場 ($3 \times 10^{-5} \text{T}$) に平行に配置されている。今回は地磁気と同じ方向に着磁された場合を想定して、試験片の保磁力を 10、欠陥近傍の変質部では保磁力を 100 とした線形解析をおこなった。

2.2 解析結果

解析結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a)は試験片近傍の磁

連絡先:安部正高、〒606-8501 京都市左京区吉田本町、
京都大学エネルギー科学研究科、電話: 075-753-3565、
e-mail:abe@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

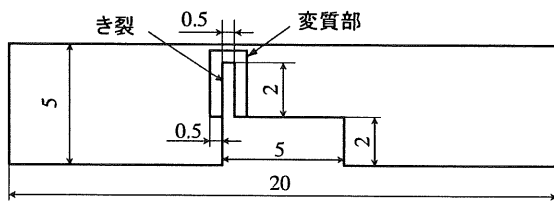
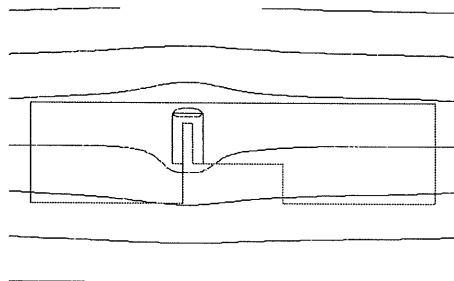
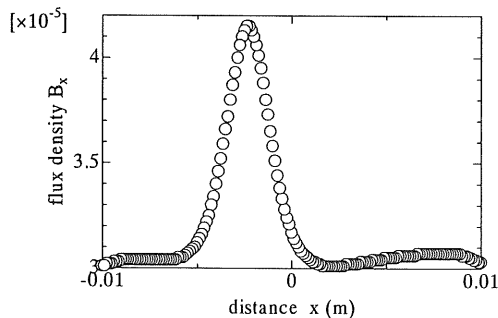


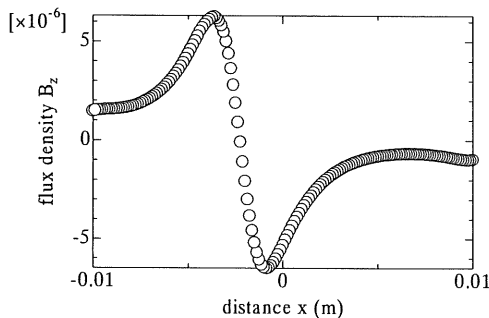
Fig. 1 Analysis model.



(a) Magnetic flux lines near specimen.



(b) Distribution of tangential component of MFL.



(c) Distribution of normal component of MFL.

Fig. 2 Results of FEM analysis.

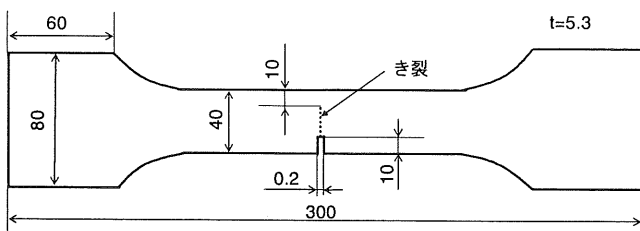


Fig. 3 SUS304 specimen with a fatigue crack.

束線図である。き裂近傍では微小な磁気ループが形成されており、漏洩磁束が生じていることがわかる。(b) および(c)は試験片表面からの距離 (リフトオフ) が 1mm の空間における磁束密度分布を示している。(b) は磁束密度の接線成分 (x 軸方向成分) の分布であり、(c)は法線成分 (z 軸方向成分) の分布である。模擬き裂近傍で生じた漏洩磁束の影響がはっきりとあらわれている。また、ノッチに由来する漏洩磁束分布も若干生じていることがわかる。ただし、これらの漏洩磁束は地磁気と同程度のオーダーであり、センサの寸法効果の影響も考慮すると、検出するためには小型でかつ高感度な磁気センサが必要となることが予想される。

3. SUS304 鋼疲労き裂の検出

前章における解析結果より、き裂近傍では微小な漏洩磁束が生じることが確認された。この章では、実際に SUS304 鋼中に設けた人工の疲労き裂近傍の漏洩磁束を測定することで、疲労き裂の検出を試みた。

3.1 試験片および測定システム

試験片は Fig. 3 に示すような SUS304 鋼疲労き裂試験片を用いた。漏洩磁束の測定は、試験片を長さ方向 (スリットおよびき裂に垂直な方向) におよそ 40kA/m の外部磁場を印加して着磁したもの、および、供用中の条件に近くなるように同様の試験片を着磁後に地磁気中に長時間保持したものについておこなった。

磁場測定システムの概略図を Fig. 4 に示す。磁束密度センサには(株)AMI 製アモルファス MI センサを用いた。センサ部形状は約 0.45mm 角と空間分解能が高く、±30G の広い測定レンジと 1mG の高感度を併せ持つセンサである。測定に際して、リフトオフは 1mm で固定した。測定範囲は、疲労試験のために設けられたスリットを中心に幅方向 30mm、長さ方向 30mm の範囲について測定をおこなった。試験片の片側表面には試験片番号が記してあり、測定はこの試験片番号が記してある側およびその反対側の面について、それぞれ着磁された状態と着磁後、地磁気中に長時間保持した状態について測定した。測定間隔は 0.5mm とした。

3.2 測定結果

Fig. 5 には、着磁した試験片について測定した磁束密

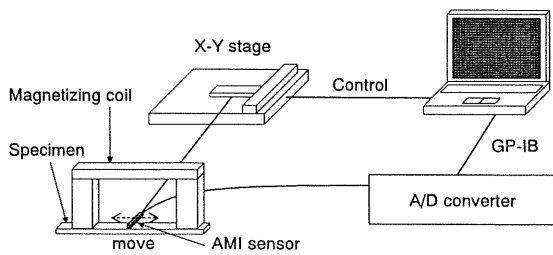
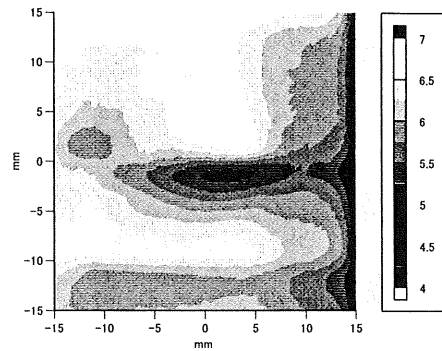


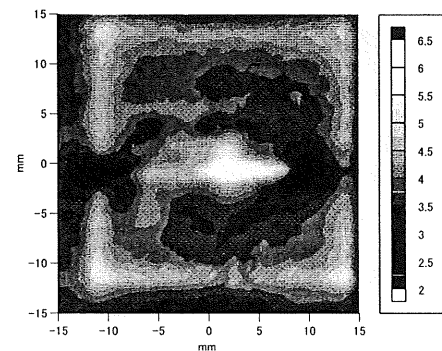
Fig. 4 Experimental system.

度分布を示した。着磁は試験片番号が記してある面に電磁石を接して行ったため、試験片番号記入側の磁束密度分布のほうがはっきりとした磁束密度分布を示していることがわかる。しかし、基本的には番号記入側および無記入側とは同様の分布パターンをしめしている。これらの分布パターンから、スリット部およびその先端から伸びているき裂伸展部においては材料の欠損、そして、疲労負荷によるマルテンサイト変態相の析出に伴う漏洩磁束が生じていることがわかる。すなわち、基本的には非磁性である SUS304 鋼について、高感度な磁気センサを用いれば漏洩磁束探傷法を適用できることがわかった。各成分の分布を見ると、漏洩磁束はスリット部およびき裂伸展部からループを描くように分布していることがわかる。実際に目視でも確認できるき裂伸展部では明瞭な漏洩磁束が生じていることが見て取れるが、目視ではき裂が確認できない部分（座標(-10, 0)付近)についても強い漏洩磁束が局所的に生じていることがわかる。これにより、スリットのような欠損部だけでなく、微細なき裂もしくは今後き裂が伸展すると考えられる疲労蓄積部位においても磁性相が析出しており、漏洩磁束が生じているのではないかと考えられる。

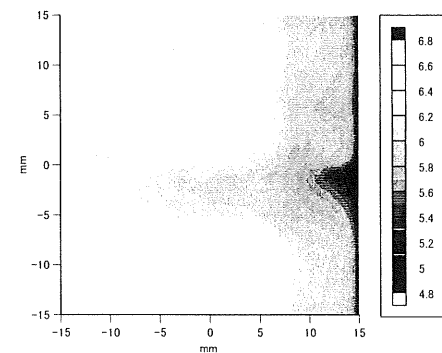
続いて、Fig. 6 には着磁後地磁気中に長時間保持した試験片について測定した磁束密度分布を示した。Fig. 5 の着磁直後の場合と比較すると、試験片番号の記入側面と無記入側面とで漏洩磁束分布がやや異なるように見える。これは、加工による材質変化が厚さ方向に生じていることも影響していると考えられるが、長時間地磁気中に保持されたことで、局所的な磁気特性変化に対応して磁気モーメント分布に自発的な偏りが生じたのが大きな要因だと考えられる。き裂先端近傍の磁束密度の値を着磁直後の測定結果と比較してみると、地磁気中に長時間保持した試験片のほうが磁束密度分布の変化が大きくなっているが、これも磁気モーメン



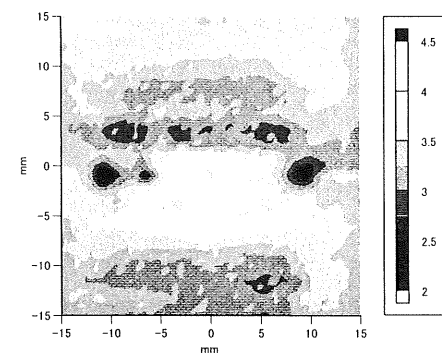
(a) tangential (engraved surface)



(b) normal (engraved surface)

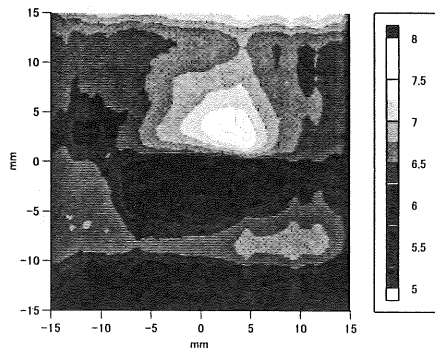


(c) tangential (non-engraved surface)

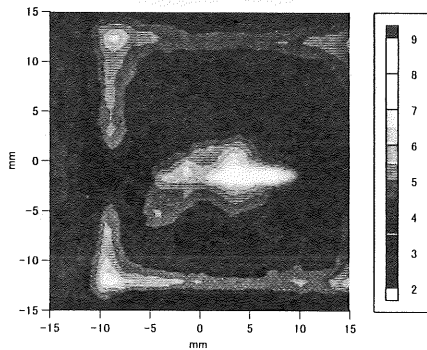


(d) normal (non-engraved surface)

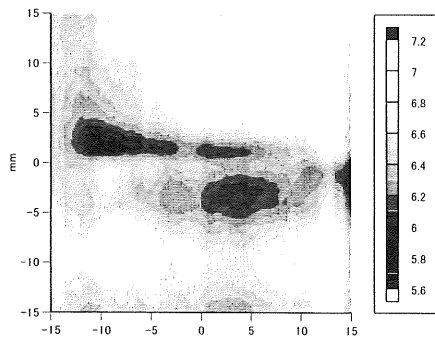
Fig. 5 Distribution of MFL from magnetized specimen (G).



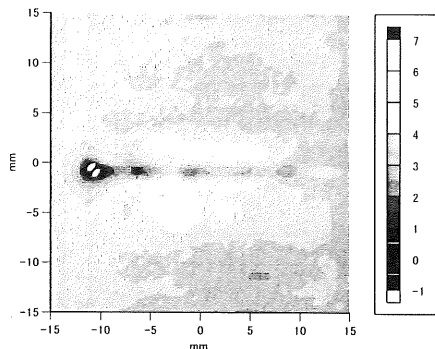
(a) tangential (engraved surface)



(b) normal (engraved surface)



(c) tangential (non-engraved surface)



(d) normal (non-engraved surface)

Fig. 6 Distribution of MFL from specimen held in geomagnetic field for a long time (G).

トの局在化の影響と考えられる。特に、Fig. 6(d)では、前述した目視ではき裂が確認できない部分（座標(-10, 0)付近)において特徴的な磁束密度分布が強くあらわれており、注目に値する。今後、このような局所的な磁気特性変化を考慮して、このような分布パターンと欠陥との対応関係を明らかにすることは非破壊検査上重要であると考えられる。さらに、Fig. 6においては縦方向の縞状の磁束密度分布パターンがみられるが、これは材料の圧延や切削などの加工による組織変化の影響であると考えられる。このような微小な磁気特性変化は強磁性体においては透磁率の変化率が小さいため、漏洩磁束分布から検出することは難しい。一方で、SUS304 鋼は透磁率が真空に近いため、このような微小な磁気特性の変化によって生じる漏洩磁束の変化を比較的明瞭に検出できていると考えられる。

4. SUS316 鋼溶接部中の疲労き裂の検出

4.1 試験片および測定システム

試験片は Fig. 7 に示すような住友金属テクノロジー株式会社製ノッチ入り平板試験片を用いた。この試験片は常温常圧近傍での SCC 試験を述べ 3550 時間実施後、表面観察によりノッチ部の一部にき裂が生じていることを確認している。漏洩磁束の測定は、試験片を交流磁場法により消磁したもの、および、前章同様に 40kA/m の外部磁場を印加して着磁したものについておこなった。磁場測定システムは前章と同様のものを用いた。測定に際しては、リフトオフは 1mm とし、溶接部位を中心として幅方向 50mm、長さ方向 40mm の範囲について磁場測定を行った。測定間隔は 0.5mm とした。

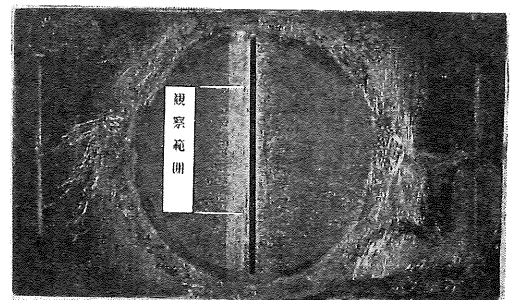
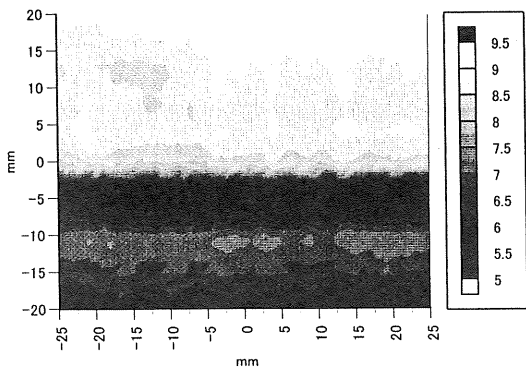
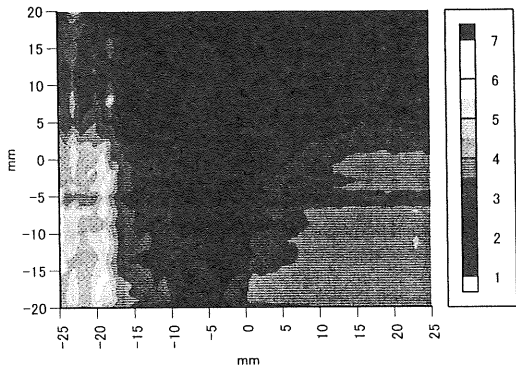


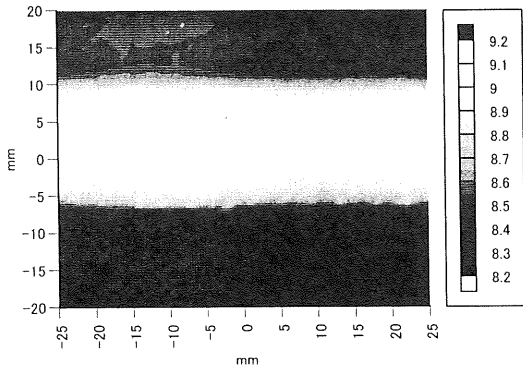
Fig. 7 SUS316 specimen with SCC



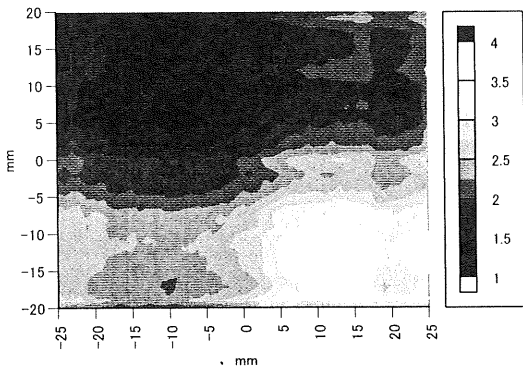
(a) tangential (notch present surface)



(b) normal (notch present surface)

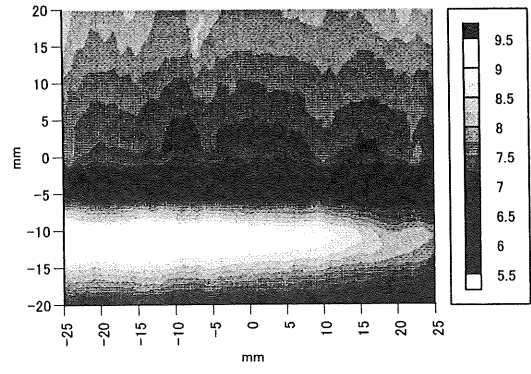


(c) tangential (smooth surface)

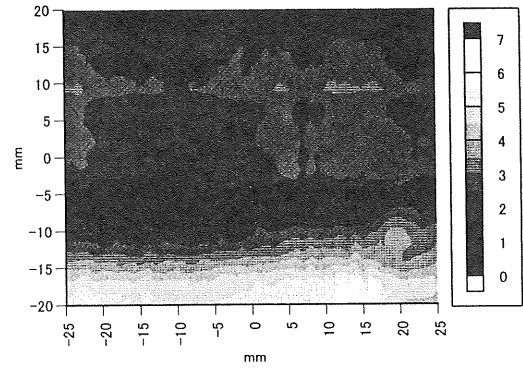


(d) normal (smooth surface)

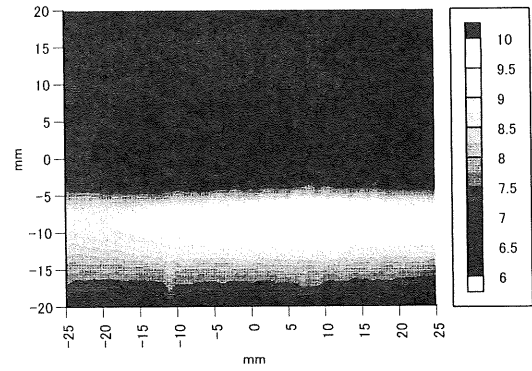
Fig. 8 Distribution of MFL from demagnetized specimen (G).



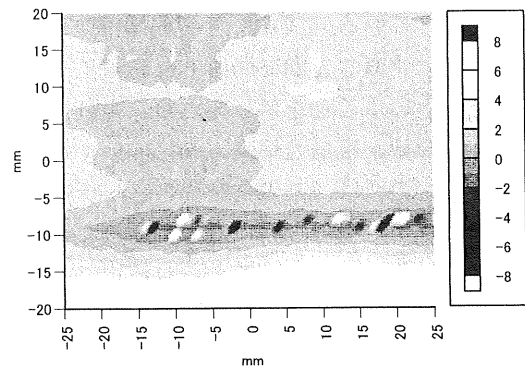
(a) tangential (notch present surface)



(b) normal (notch present surface)



(c) tangential (smooth surface)



(d) normal (smooth surface)

Fig. 9 Distribution of MFL from magnetized specimen (G).

4.2 測定結果

Fig. 8 および Fig. 9 には、測定により得られた磁束密度分布を示した。Fig. 8 は消磁した試験片について測定した結果である。Fig. 8(a)および(b)より、ノッチ部においては材料が欠損していることによりリフトオフが急激に変化し、磁束密度の減少パターンという形でその形状が画像化されていることがわかる。実際にはノッチ部でも微小な漏洩磁束が発生しているはずであるが、リフトオフ変化の影響が大きいため、このような分布パターンとなっている。一方、ノッチの底部にはき裂の開口部があるが、こちらはノッチ底部とセンサとのリフトオフが大きく、き裂による漏洩磁束をこの測定データからは分離することはできない。また、溶接部の磁気特性変化に由来する漏洩磁束についてもわかりにくくなっている。Fig. 8(c)および(d)では、溶接部の磁気特性変化に由来する漏洩磁束が明瞭に見られ、溶接部形状がきれいに画像化されているが、こちらの結果においてもき裂による漏洩磁束分布をはっきりと確認することはできない。

続いて、Fig. 9 には着磁した試験片についての測定結果を示した。Fig. 9(a)および(b)では、消磁した試験片の場合と同様にノッチによるリフトオフの変化に起因する磁場の減少パターンが見られるが、ノッチ部の磁気モーメント分布に由来する漏洩磁束もはっきりと確認できる。しかし、消磁の場合と同様にリフトオフ変化の影響が大きいため、これらの図では溶接部およびき裂による磁束密度変化はわかりづらくなっている。Fig. 9(c)および(d)では、溶接部とき裂近傍で生じる漏洩磁束が明瞭に見て取れる。特に法線成分については、印加した磁場方向と垂直な方向に局所的な正負のピークのペアが生じている。これは、き裂先端部においては、印加磁場とは垂直な方向に局所的な磁気モーメントが生じているということを示しており、微細ではあるが細長い磁性領域が磁場と垂直方向に向いていることを示している。これは、この試験片のノッチ底部において微細なノッチと平行な開口部を持つ割れが点在していることに対応していると考えられる。このような特徴的な漏洩磁束分布は前章の SUS304 鋼試験片の測定結果においてみられた、き裂伸展部近傍における磁束分布と類似している。先の SUS304 鋼の測定結果とあわせて、今後このような局所的磁気モーメント分布と欠陥との対応関係を明らかにしていきたい。

5. 結言

本研究では、高感度磁気センサを用いて材料表面近傍の磁場分布を測定することにより、オーステナイト系ステンレス鋼に対しても、漏洩磁束法が適用できることを確認した。

- 1) SUS304 鋼疲労き裂試験片に対する漏洩磁束探傷法の適用により、スリットのような欠損部だけでなく、疲労き裂に起因する微小な漏洩磁束分布から、疲労き裂およびその近傍の変質部の検出も可能であることがわかった。
- 2) SUS316 鋼 SCC 試験片に対する漏洩磁束探傷法の適用により、ノッチのような欠損部だけでなく、SCC に起因する微小な漏洩磁束分布から、SCC およびその近傍の変質部の検出が可能であることがわかった。
- 3) SUS304 鋼や SUS316 鋼は透磁率が真空の透磁率に近いいため、材料の圧延や切削といった加工による組織変化に由来する微小な磁気特性変化についても高感度な磁気センサを用いた漏洩磁束法によって検出できることがわかった。
- 4) SUS304 鋼疲労き裂試験片と SUS316 鋼 SCC 試験片のき裂近傍における局所的な磁気モーメント分布は類似しており、き裂との対応関係を明らかにすることができれば、非破壊評価法への応用が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] 日本 AEM 学会、“電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊評価技術に関する調査研究分科会報告書”、JSAEM-R-0006、2001。
- [2] 中曽根裕司、岩崎祥司、清水徹、霞総司、“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。
- [3] 中曽根裕司、“フェライトスコープ法によって求めた SUS304 鋼中貫通疲労き裂近傍のマルテンサイト相変態率分布とひずみ分布の関係”、第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、2008、pp.321-323。
- [4] 植田雄二、岡茂八郎、薬師寺輝敏、榎園正人、“磁気センサによるオーステナイト系ステンレス鋼の引張試験ひずみ評価および面外曲げ疲労評価”、日本 AEM 学会誌、Vol.13、No.2、2005、pp.99-106。