

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420406

研究課題名(和文)高精度な余寿命評価を目指した複合型磁気センサによる非破壊疲労モニタリング法の構築

研究課題名(英文) Development of the nondestructive fatigue monitoring system using the combined-type magnetic sensor to achieve highly accurate residual life assessment

研究代表者

岡 茂八郎 (OKA, Mohachiro)

大分工業高等専門学校・情報工学科・教授

研究者番号：80107838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：この研究は、鉄系構造材の疲労蓄積状態を試料の磁性の有無や疲労形態の違いに関わらず評価できる可能性のある磁気センサの製作と、それを用いた高精度な余寿命が推定できる非破壊疲労モニタリング法を構築することであった。この研究では、第1に交番磁界型磁気センサはオーステナイトステンレス鋼の疲労検出が可能な磁気センサであることを示した。第2に積層コイル型磁気センサが軟鋼やステンレスの平面曲げ疲労や片振り引張疲労に適用できることを示した。よって、各種磁気センサを用いて鉄系構造材に対する高精度な余寿命評価の可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was mainly the following two points. The first purpose was to have developed the magnetic sensor comprising the possibility of appreciable of the fatigue accumulation of an iron base structural material regardless of magnetic presence of the specimen or the difference in the fatigue mode. The second purpose was to have constructed the nondestructive fatigue monitoring method to which a highly accurate residual life was able to be presumed with a developed magnetic sensor. In one of the results of this research, the alternating excitation magnetic sensor evaluated fatigue of the austenitic stainless steel. Secondly, the stacked-coil type magnetic sensor was able to evaluate the plane bending fatigue and the pulsating tension fatigue. The possibility of a highly accurate residual life assessment to an iron base structural material was able to be shown by using the fatigue evaluation method that used various magnetic sensors.

研究分野：磁気センサ工学

キーワード：非破壊検査 疲労 鉄系構造材 磁気センサ 渦電流法 交番磁界

## 1. 研究開始当初の背景

各種化学プラントや製鉄プラントなどの産業用施設は、40-60年経過したものが多い。これらの構造物を支えている鉄系構造材は、高経年化に伴う繰り返し応力などにより疲労損傷を生じ重大な事故を少なからず起こしている。

そこで、広範に使用されて社会を支えている鉄系構造材の高経年化に伴う材質劣化を原因とする事故を防ぐため、鉄系構造材に発生する微小なき裂などの損傷を検出するための研究や疲労蓄積状況を知り十分な時間的余裕や計画性を持って部材や部品を交換する非破壊疲労モニタリング法の開発が近年の重要なテーマとして研究されている。

鉄系構造材の非破壊疲労モニタリング法の世界的な研究状況の中で、我々は、従来から鉄系構造材の平面曲げによる疲労蓄積を、オリジナルな磁気的手法である残留磁化法や既存の渦電流法や漏れ磁束法の改良によってモニタリングする研究を行ってきた。

しかし、残留磁化法では疲労評価の対象となる被検査材がオーステナイトステンレス鋼に限定されることや、平面曲げ疲労や片振り引張疲労といった疲労形態による疲労検出感度の違いが生じる問題が残っていた。また、磁性を持つ被検査材に対して十分な感度を持っていないことや出力が小さいと言った問題も残している。

## 2. 研究の目的

このように、従来から行われてきた鉄系構造物用金属材の疲労評価法は、試料の磁性の有無、平面曲げ疲労や片振り引張疲労といった疲労形態によって検出感度が大きく変わる難点が残っている。そこで、この研究テーマ「高精度な余寿命評価を目指した複合型磁気センサによる非破壊疲労モニタリング法の構築」では、疲労形態の違いによるセンサ出力の違いを検証することや新しい疲労検出法として渦電流法や漏れ磁束法(磁束変化法)を兼ね備えた複合型磁気センサを提案・開発し評価を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

今回、この目的を達成するために、以下の手順で研究を行った。

### (1) 疲労形態とセンサ出力の違い

平面曲げ疲労や片振り引張疲労といった疲労形態によって疲労検出状態がどのように変化するかを従来手法であるFG型磁気センサを用いてオーステナイトステンレス鋼であるSUS316やSUS316L、SUS304を対象に検証した。

### (2) 複合型磁気センサの開発と改良

交番磁界型磁気センサと積層コイル型磁気センサの2つのタイプの複合型磁気センサの開発を行った。両センサとも疲労評価の対象を磁性を持つ被検査材とし低い周波数で励磁する場合は渦電流が疲労検出にあま

り関与しない磁束変化型として動作する。一方、被検査材を非磁性とし高い周波数で励磁する場合は、渦電流が強く関与する渦電流型として動作すると考えられる。最後に、この二つの磁気センサの疲労検出特性の検証をSUS304やSPCCを用いて行った。

## 3. 1 各種疲労検出用磁気センサ

### (1) FG型磁気センサ法

Fig.1にFG型磁気センサのヘッドの写真を示す。FG型磁気センサは、試料に垂直な方向の磁束密度を検出する。ここで用いた薄膜FG型磁気センサ(島津製作所製)は、薄膜製造プロセスを用いて製作されたセンサヘッド部と駆動用電子回路で構成されている。駆動用電子回路と組み合わせたときのこのFG型磁気センサの感度は、約30mV/ $\mu$ Tである。なお、センサと試料表面の距離(リフトオフ)は約1mmである。

### (2) 交番磁界型磁気センサ法

Fig.3に、この実験に用いた交番磁界励磁型磁気センサの配置図を、Fig.4に交番磁界励磁型磁気センサの各部の寸法やコイルの諸元を示す。励磁用コイルは、直径6mm、高さ10mmのMz-Zn製のフェライトコアを備えている。励磁用コイルは高さ10mm、内径6mm、外径10mmの円筒形で直径0.1mmのホルマル線を1658回巻いている。2つの励磁コイルは、直列に接続されている。検出コイルは高さ0.5mm、内径1.8mm、外径5mmの円筒形で直径0.04mmのホルマル線を315回巻いている。検出コイルは2つの励磁コイルから0.5mm離して中央部に置かれている。試料とセンサの間隔であるリフトオフは0.1mmである。また、片方の励磁コイルには、励磁磁束密度を測定するBコイルとして直径0.04mmのホルマル線を3回巻いている。

励磁周波数が低い場合で、試料が疲労していない状態では試料は材質的に均一であるため、検出コイルに鎖交する励磁磁束はお互いに打ち消しあい検出コイルに誘導起電力は発生しない。しかし、試料が疲労すると試料の透磁率や導電率が不均一になる。そのため、検出コイルに鎖交する磁束が不均一となり誘導起電力が発生する。これが、磁束変化型の疲労検出原理である交番磁界型磁気センサの疲労検出の原理である。なお、励磁周波数が高くなれば、渦電流の影響も大きくなると考えられる。

### (3) 積層コイル差動型磁気センサ法

Fig.5(a)に積層コイル差動型磁気センサの疲労検出の写真とFig.5(b)に積層コイル差動型磁気センサの寸法図を示す。3つの円筒型コイルの寸法は、内径1.8mm、外径3.0mm、高さ2.5mmである。また、ホルマル線の線径は、直径0.04mmで巻き数は610回である。3つの円筒型コイルは外径1.8mm、長さ10mmのMn-Znのフェライトコアを中心にし

て、お互いのコイルが接するように配置されている。

疲労によって試料内の透磁率( $\mu$ )や抵抗率( $\rho$ )が変化し上下の検出コイルと鎖交する磁束が変化し出力電圧  $v_{out}$  が変化する。なお、 $v_{out}$  はロックインアンプで大きさ( $V_{out}$  [V])と位相( $\theta$ [degrees])として計測した。

Fig.6 に交番磁界型磁気センサと積層コイル型磁気センサの駆動機器のブロック図を示す。

### 3. 2 試料

実験に用いた試料は、冷間圧延鋼(SPCC), オーステナイトステンレス鋼 SUS304, SUS316, Sus316L であり、厚みは全て約 1mm である。各材料の化学組成を Table 1, Table 2, Table 3 に示す。また、Fig.7 にこの研究で用いた試料の形状や寸法を示す。

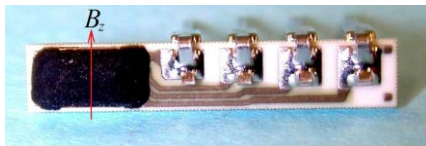


Fig. 1 The FG magnetic sensor head.

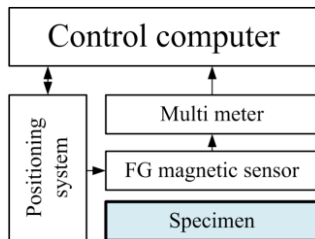


Fig. 2 Block diagram of the measurement system for the FG magnetic sensor.

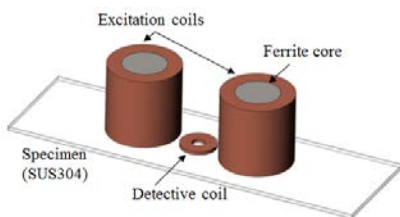


Fig.3 Setup of the alternating excitation magnetic sensor.

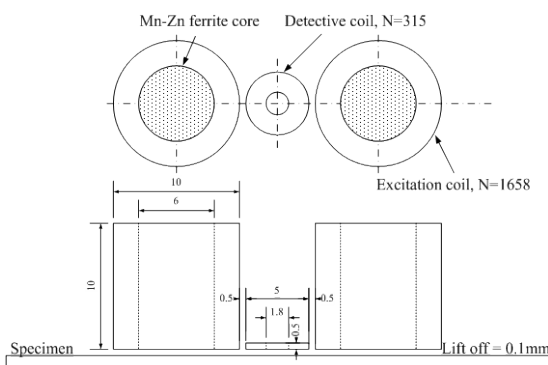
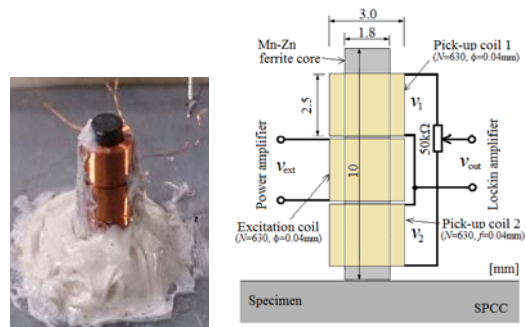


Fig.4 Dimensions of the alternating excitation magnetic sensor.



(a) Photograph. (b) Schematic diagram.

Fig.5 The stacked-coil type magnetic sensor composed of three cylindrical-type coils and a Mn-Zn ferrite core.

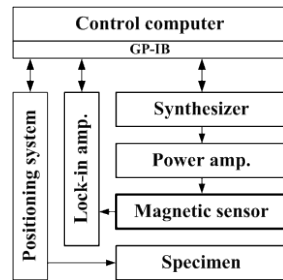


Fig. 6 Block diagram of the measurement system for the alternating excitation magnetic sensor and the stacked-coil type magnetic sensor.

Table 1 Chemical compositions of SPCC in wt%.

C	Si	Mn	P	S
0.01	-	0.0025	0.0013	0.01

Table 2 Chemical compositions of SUS304 in wt%.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.05	0.61	1.00	0.024	0.007	8.11	18.31

Table 3 Chemical composition of SUS316 and SUS316L in wt%.

wt [%]	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316	0.04	0.68	0.99	0.03	0.009	10.1	16.69	2.03
SUS316L	0.021	0.7	1.03	0.024	0.003	12.17	17.44	2.15

### 3. 3 実験方法

実験は、Fig. 8 の手順で実験を行った。FG型磁気センサの場合は、励磁と消磁を行ったが、他の2種の磁気センサの実験では行っていない。FG型磁気センサを用いた残留磁化法では、センサの出力電圧  $v_{out}$  [V]を、交番磁界型磁気センサと積層コイル差動型磁気センサにおいては、検出コイルの出力電圧  $v_{out}$  [V]の大きさ [V]および励磁電圧との位相差  $\theta$  [deg.]を測定した。試料ごとに印加応力の値を決め試料中央の 40mm x 40mm の範囲を 1mm ステップで、自動位置決め装置を用いて疲労回数ごとに疲労印加を中断し測定した。

その後、疲労を規程回数印加した後、上記の測定を試料に肉眼で確認できる亀裂が発生するまで繰り返した。疲労は、片振り引張疲労試験の場合は、繰返し周期 20Hz、最大引張り力±49kN、最大振幅 30mm の能力を持った鷺宮製作所製の片振り引張疲労試験機(V-0674)を用いて印加した。また、平面曲げ疲労試験の場合は、曲げモーメント 2.2Nm の容量を持った平面曲げ疲労試験機(UF15、島津製作所)を用いて実験を行った。応力繰返し周波数は 30Hz である。すべての実験は、室温で行った。

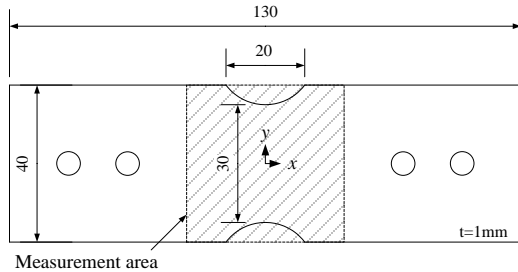


Fig. 7 Dimensions of a specimen.

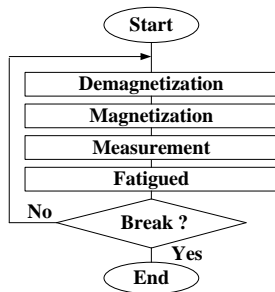


Fig. 8 Measurement procedure.

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 残留磁化法による疲労形態とセンサ出力の違い評価

この実験では、FG 型磁気センサとオーステナイトステンレスの SUS304 を用いて、平面曲げ疲労と片振り引張疲労の蓄積状態の変化の差を調べた。今回使用した試料では、平面曲げ疲労時の疲労限は、270MPa であり、片振り引張疲労時の疲労限は、160MPa であった。Fig.9 から Fig.10 に疲労が印加された場合の試料表面に垂直な残留磁束密度  $B_z$  [T] の分布を示す。

Fig.9 は、240MPa の片振り引張応力を 55100 回かけた場合である。 $B_z$  がピークを示すところでは、長さ数 mm の亀裂が生じている。また、Fig.10 は、240MPa の片振り引張応力を 55100 回かけた場合である。 $B_z$  がピークを示すところでは、Fig.9 の場合と同様に長さ数 mm の亀裂が生じている。

Fig. 11(a)と Fig.11(b)に  $dB_z$  (Fig.9 中の  $B_0$  と  $B_{zmax}$  の差)と疲労回数  $N$ 、および、印加応力  $\sigma_a$  の間の関係を示す。両者とも FG 型磁気センサは疲労の進展をよくとらえている。ここで、片振り引張疲労では、 $N=1000$  までの間

に大きく疲労が蓄積しているが平面曲げ疲労では、そのような傾向は示していない。この傾向の差が疲労形態の違いによる疲労蓄積傾向の差だと考えられる。

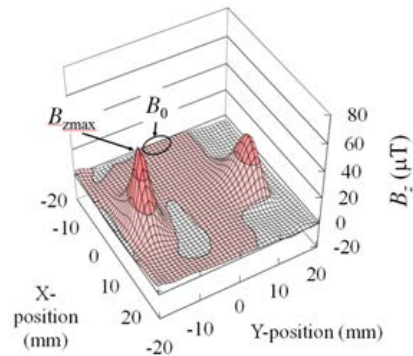


Fig.9 The distribution of  $B_z$  (SUS304, Pulsating tension stress,  $N=55100$ ,  $\sigma_a=240$ MPa).

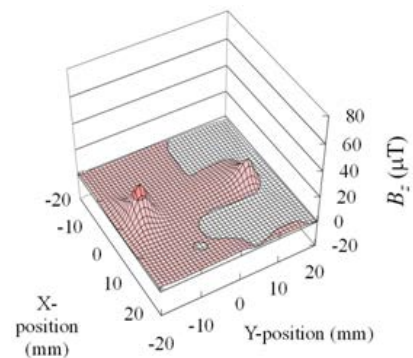
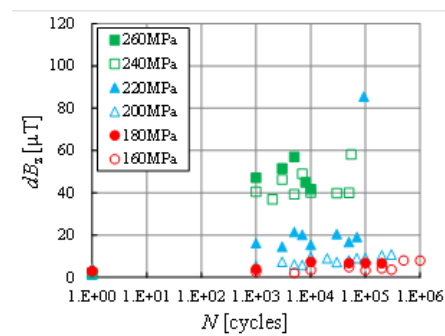
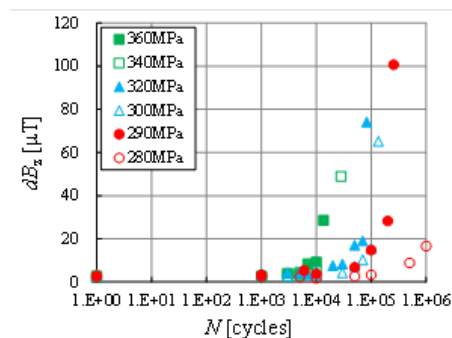


Fig.10 The distribution of  $B_z$  (SUS304, Plane bending stress,  $N=13600$ ,  $\sigma_a=360$ MPa).



(a) Pulsating tension stress.



(b) Plane bending stress.

Fig.11 Relationship between  $dB_z$ ,  $N$ , and  $\sigma_a$  (SUS304).

#### 4. 2 複合型磁気センサの開発と改良

##### (1) 交番磁界型磁気センサの疲労検出特性

試験片に 300MPa の応力をかけ平面曲げ疲労印加した場合の交番磁界型磁気センサによる測定結果を Fig.12(a), Fig.12(b)に示す。励磁周波数は 1kHz, 励磁磁束密度は励磁コイルの試料に一番い部分のフェライトコアに巻かれた励磁磁束密度を測定する B コイルによる測定で 0.1T であった。Fig.12(a)は Fig.12(b)は 53000 回の疲労を印加した場合の  $dV_{out}$  ( $dV_0$ ,  $x=-20\text{mm}$ ,  $y=0\text{mm}$  付近の  $2\times 7\text{mm}$  の範囲平均値を 0 とした値) の分布を示す。この磁気センサの疲労検出の原理から、試料の透磁率や抵抗率の変化に起因した検出コイルに鎖交する磁束の変化をとらえていることがわかる。よって  $x=0\text{mm}$ ,  $y=\pm 15\text{mm}$  の位置付近の切欠きに起因すると思われる信号が大きく検出されている。Fig.12(b)では,  $x=0\text{mm}$ ,  $y=0\text{mm}$  付近で, 疲労に起因したと思われる信号がとらえられている。

一方, Fig.13 は, Fig.12(b)の  $dV_{out}$  を x 方向に積分したものである。このように交番磁界型磁気センサの出力信号を加工すると試料中央部で信号が大きくなり, この交番磁界型磁気センサが SUS304 の平面曲げ疲労をよくとらえている。このように, この研究で開発した交番磁界型磁気センサは, 励磁周波数 1kHz という渦電流法ではあまり用いない比較的low周波の励磁でも疲労をよくとらえることができる。なお, このセンサの励磁コイルのインダクタンスが大きいので高周波での励磁には高い励磁電圧が必要となる。

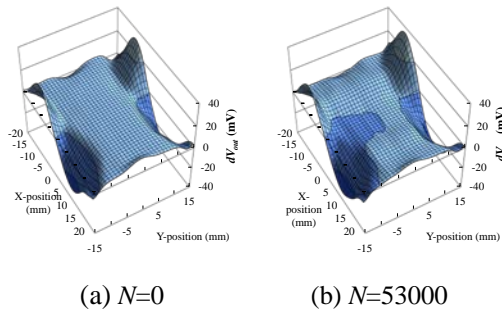


Fig.12 The distribution of  $dV_{out}$  (SUS304, Plane bending stress,  $f_{ex}=1\text{kHz}$ ,  $\sigma_a=300\text{MPa}$ ).

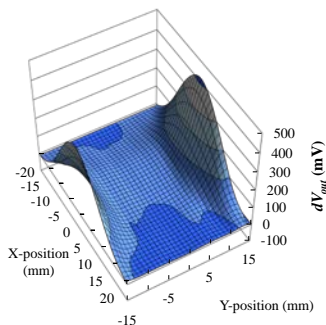


Fig.13 The distribution of  $dV_{out}$  (SUS304, Plane bending stress,  $f_{ex}=1\text{kHz}$ ,  $N=53000$ ,  $\sigma_a=300\text{MPa}$ ).

##### (3) 積層コイル型磁気センサの疲労検出特性

Fig.14 に積層コイル型磁気センサの SUS304 を試料とし, 平面曲げ疲労を印加した場合の出力電圧  $V_{out}$  の変化分  $dV_{out}$  ( $dV_0$ ,  $x=-20\text{mm}$ ,  $y=0\text{mm}$  付近の  $2\times 7\text{mm}$  の範囲平均値を 0 とした値) の分布を示す。ここで, 励磁周波数は, 1kHz である。Fig.14(b)の場合は, 長さ数 mm の亀裂が生じているため, 試料の切欠き部分で大きな出力となっている。また, 試料中央部では,  $dV_{out}$  が大きくなり, 平面曲げ疲労もよくとらえている。さらに, Fig.15 では,  $dV_p$  (試料中央部の  $dV_{out}$  と  $dV_0$  の差) を指標として, 印加応力, 疲労回数との関係を示す。 $dV_p$  は良く疲労の蓄積量を検出している。また, Fig.16 では, 試料を冷間圧延材 (SPCC) とした場合の積層コイル型磁気センサの欠陥検出指標である  $dV_p$  ( $N=1000$  の場合を基準とした  $dV_{out}$ ) 分布を示す。 $dV_p$  は良く疲労の蓄積量を検出している。

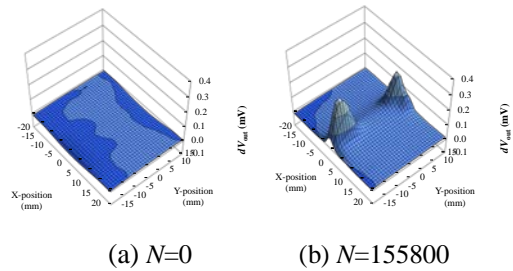


Fig.14 The distribution of  $dV_{out}$  (SUS304, Plane bending stress,  $f_{ex}=1\text{kHz}$ ,  $\sigma_a=300\text{MPa}$ ).

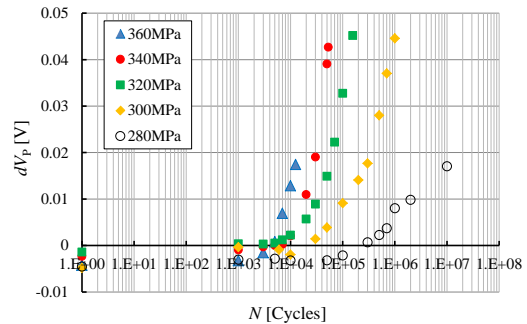


Fig.15 Relationship between  $\sigma_a$ ,  $N$ , and  $dV_p$ . (SUS304, Plane bending stress,  $f_{ex}=5\text{kHz}$ ).

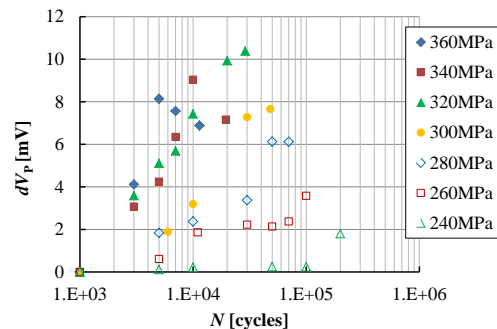


Fig.16 Relationship between  $\sigma_a$ ,  $N$ , and  $dV_p$ . (SPCC, Plane bending stress,  $f_{ex}=5\text{kHz}$ ).

#### 4. 3 研究成果のまとめ

この研究テーマ「高精度な余寿命評価を目指した複合型磁気センサによる非破壊疲労モニタリング法の構築」の遂行を通して、鉄系構造材に対して疲労形態の違いや磁性の有無にかかわらず高度な余寿命の評価のできる磁気センサの開発と評価を行った。

- ① FG 型磁気センサと試料として SUS304 を用い平面曲げ疲労と片振り引張疲労の疲労形態の違いを明らかにした。
- ② 複合型磁気センサの一つである交番磁界型磁気センサの欠陥検出特性を試料として SUS304 を用いて明らかにした。
- ③ 複合型磁気センサの他の形態である積層コイル型磁気センサと SUS304 および SPCC を用いて最適励磁周波数や欠陥検出特性を明らかにした。

以上のように、この科研費による研究の目的を達成することができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① M. Oka, T. Yakushiji, and M. Enokizono, The Evaluation of Fatigue Caused by Plane-Bending Stress on Stainless Steel Using the Stacked-Coil Type Magnetic Sensor, AIP Conference Proceedings 1806 (Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation), 110009, 2017(5).
- ② M. Oka, Yuki Sato, T. Yakushiji, and M. Enokizono, Evaluation of Fatigue Damage Induced by Pulsating Tension Stress and Plane Bending Stress Using the Remnant Magnetization Method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 52, IOS Press, pp. 1169-1176, 2016(6).
- ③ 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, 榎園正人, 磁気的手法による鉄系構造材の非破壊片振り引張疲労評価, 日本 AEM 学会誌, Vol.23, No.4, pp. 654-658, 2015(12).
- ④ M. Oka, T. Yakushiji, and M. Enokizono, Evaluation of the Material Degradation of Austenitic Stainless Steel under Pulsating Tension Stress Using Magnetic Methods, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.23, No.3, pp. 458-463, 2015(10).

[学会発表] (計 4 件)

- ① 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, 榎園正人, 積層コイル型磁気センサを用いた冷間圧延鋼板 (SPCC) の平面曲げ疲労評価, 第 25 回 MAGDA コンファレンス in Kiryu 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス, 2016 年 11 月 24 日, 桐生市民文化会館 (群馬県桐生市).
- ② M. Oka, T. Yakushiji, and M. Enokizono, The Evaluation of Fatigue Caused by Plane-Bending

Stress on Stainless Steel Using the Stacked-Coil Type Magnetic Sensor, Combined Abstracts 2016 PDF of QNDE-Georgia, 2016 年 7 月 19 日, Georgia Tech Hotel and Conference Center (Atlanta, GA, USA).

③ M. Oka, Yuki Sato, T. Yakushiji, and M. Enokizono, Evaluation of Fatigue Damage Induced by Pulsating Tension Stress and Plane Bending Stress Using the Remnant Magnetization Method, Short Papers Proceedings of 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics ISEM2015, 2015 年 9 月 18 日, 兵庫県立淡路夢舞台国際会議場 (兵庫県淡路市).

④ M. Oka, T. Yakushiji, and M. Enokizono, Evaluation of the Material Degradation of Austenitic Stainless Steel under Pulsating Tension Stress Using Magnetic Methods, Digests of 8th Asia-Pacific symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014 年 7 月 23 日, National Chung Hsing University (Taichung, Taiwan).

[図書] (計 0 件)  
なし

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)  
なし

○取得状況 (計 0 件)  
なし

[その他]  
なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岡茂八郎 (OKA Mohachiro)  
大分工業高等専門学校・制御情報工学科・教授  
研究者番号: 80107838

##### (2) 研究分担者

##### (3) 連携研究者

薬師寺輝敏 (YAKUSHIJI Terutosi)  
大分工業高等専門学校・機械工学科・教授  
研究者番号: 90210228

戸高孝 (TODAKA Takashi)

大分大学・工学部・電気電子工学科・教授  
研究者番号: 50163994

(4) 研究協力者 ( )