

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560518

研究課題名(和文) 直流磁界と低周波励磁型磁気センサを用いた新しい非破壊材質劣化評価法の構築

研究課題名(英文) Development of the New Nondestructive Material Degradation Evaluation Method Using the Low Frequency Excitation Magnetic Sensor Under the DC Magnetic Field

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) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：ステンレス鋼を始めとする鉄系構造材の疲労評価において、パンケーキ型コイルを用いるインダクタンス法が効果的である。そこで、鋼などの磁性を持ち、疲労が方面に集中しない片振り引張疲労を与えた試料を対象にしてインダクタンス法の改良を行い、励磁周波数が10kHzのインダクタンス法で疲労評価が可能なることを示した。さらに、ネオジ磁石を使った平行直流磁界バイアス下で見かけの透磁率を小さくし浸透深さを大きくする直流磁界を併用した励磁周波数10kHzのインダクタンス法を考案し評価を行った。その結果、この方法は、試料の表面状態の影響が少なく、片振り引張疲労を評価できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In the fatigue evaluation of an iron-based structural material, the inductance method that uses a pancake-type coil is reported to be effective. This method cannot evaluate the inside fatigue of a specimen because the eddy current does not penetrate into the inside of a specimen through the skin effect. In this method, the accuracy of the fatigue evaluation depends on the surface condition of a specimen. In this study we applied pulsating tension fatigue. We achieved the following results. The detection of pulsating tension fatigue of specimens made of low carbon steel was originally possible by the inductance method which used 10kHz as an excitation frequency. We attempted the improvement of the sensibility using the inductance method excited in the low frequency together with the dc magnetization method that used Nd magnets. This method could evaluate pulsating tension fatigue of a specimen irrespective of the surface condition.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：疲労破壊 疲労 磁気センサ 渦電流法 直流磁界 鉄系構造材

1. 研究開始当初の背景

現在稼働中の火力発電所や化学プラントなどは、1960-70年代の高度成長期に製造され40-50年経過したものが多く知られている。これらの産業用施設・設備に多く使用されている鉄系構造材の高経年化は、疲労の蓄積や腐食などにより材質が劣化し、事故となることがあるため、重要な問題と考えられている。そこで、鉄系構造材の高経年化に伴った材質劣化を原因とする事故を未然に防ぐため、事故につながる構造材に発生する微小なき裂の検出のための研究が盛んに行われてきた。しかし、き裂が発生する前に、疲労による材質劣化の状況を知り事故が発生する前に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状態監視保全法が多く、研究機関で研究されている。しかし、従来の方法は、材質劣化の推定結果が検査対象の材質によって異なることや、測定条件によってその推定結果がばらつくことがあるため使用に耐えるものは多くはない。そこで、我々は、従来から鉄系構造材の平面曲げによる材質劣化を評価するために、渦電流法の一つであるパンケーキ型コイルを用いたインダクタンス法を開発している。しかし、このインダクタンス法は、励磁に100kHz程度の交流を用いるため、試料が磁性体の場合、表皮効果により加工履歴や腐食等の影響を受けやすい表面のみしか材質劣化の評価ができず、試料内部の材質劣化を正確に評価できないという課題を残している。よって、これらの欠点を克服した正確な疲労評価がぜひ必要である。

2. 研究の目的

従来から行われてきた鉄系構造用金属材料の疲労評価法は、表皮効果のため試料内部の疲労評価ができないなど、いくつかの欠点を残している。そこで、Nd (ネオジ) 磁石などによる強力な直流磁界によって試料を飽和し試料の透磁率を等価的に小さくし、そのうえで比較的低い交流磁界を印加し表皮効果の影響を小さくしたインダクタンス法に改良することを考えた。この研究テーマ「直流磁界と低周波励磁型磁気センサを用いた新しい非破壊材質劣化評価法の構築」では、表皮効果の低減に重点的に取り組み、磁性を持つ試料や片振り引張疲労を対象とした新しい疲労検出法を提案し、その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、我々が開発・改良した以下の2通りの疲労評価法を用いた。

(1) インダクタンス法

第1の方法は、疲労蓄積による被検査材の電磁的特性(透磁率, 抵抗率など)の変化を試料内に発生する渦電流を介してパンケーキ型コイルのインダクタンス(L [H])や位相

角(θ [degrees])の変化として捉えるインダクタンス法である。Fig.1にこの研究で用いたパンケーキ型コイルの外形図を示す。このコイルに用いられているホルマル線の線径は0.04mmである。Fig.2に試料の寸法やパンケーキ型コイルの配置, Nd磁石の配置などを示す。なお、試料の寸法は加工の都合で、材料によって異なり130mm長の試料と140mm長の試料を用いた。Fig.3にパンケーキ型コイルを用いたインダクタンス法を用いて疲労検出実験を行う際の駆動システムのブロック図を示す。

(2) 3連コイル差動型磁気センサ法

Fig.4に3連コイル差動型磁気センサの疲労検出の原理図とFig.5にこの3連コイル差動型磁気センサを用いて疲労検出実験を行う際の駆動システムのブロック図を示す。3個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。

試料に疲労が蓄積すると、試料内の透磁率(μ)や抵抗率(ρ)が試料内の転移の増加などによって変化する。よって、試料内部に流れる渦電流が変化し上下の検出コイルと鎖交する磁束(ϕ_1, ϕ_2 [Wb])が変化し従出力電圧 v_{out} が変化する。なお、 v_{out} はロックインアンプで大きさ(R [V])と位相(θ [degrees])として計測する。この報告では、主に v_{out} の大きさを用いて疲労の評価を行った。

(3) 試料

実験に用いた試料は、低炭素鋼($t=1$ mm), 構造用鋼(SS400)($t=1.2$ mm), SUS430($t=1$ mm), SU316L($t=1$ mm)である。この中で、SUS430はフェライト系ステンレス鋼で磁性を持ち、SU316Lはオーステナイト系ステンレス鋼で、磁性をほとんど持たない。低炭素鋼の組成をTable 1に、SUS316LおよびSUS430の組成をTable 2, Table 3に示す。

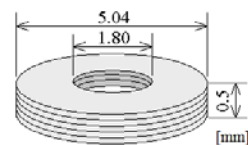


Fig.1. Pancake-type coil sensor.

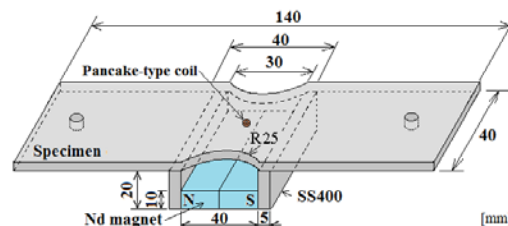


Fig.2. Dimensions of a specimen and arrangement of the pancake-type coil with Nd magnets.

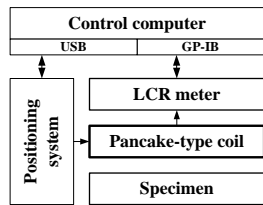


Fig. 3. Block diagram of a measurement system for the inductance method.

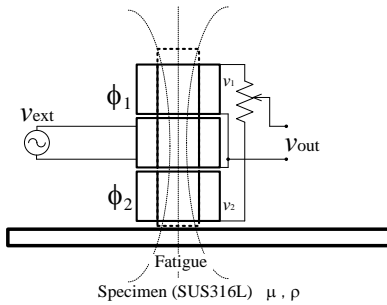


Fig. 4. Principle of fatigue evaluation using the three stacked-coil sensor.

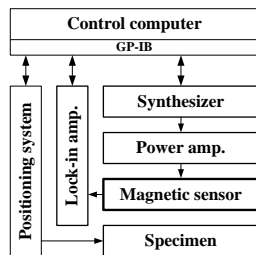


Fig. 5. Block diagram of a measurement system using the three stacked-coil sensor.

Table 1. The chemical compositions of low carbon steel ($w_t\%$) (Low carbon steel).

C	Si	Mn	P	S	S-Al
0.05	0.01	0.21	0.015	0.009	0.047

Table 2. The chemical compositions in $w_t\%$ (SUS316L).

Ni	Cr	C	Si	P	Mn	S	Mo
12.17	17.44	0.021	0.70	0.024	1.03	0.003	2.15

Table 3. The chemical compositions in $w_t\%$ (SUS430).

Ni	Cr	C	Si	P	Mn	S	Mo
0.13	16.10	0.06	0.40	0.033	0.76	0.004	-

(4) 実験方法

実験は、Fig. 6 の手順で実験を行った。インダクタンス法では、パンケーキ型コイルのインダクタンス L と位相角 θ 、3 連コイル差動型磁気センサにおいては、上下に設置され差動に接続されたコイルの出力電圧 $v_{out}[V]$ の大きさ R および励磁電圧との位相差 θ を測定した。試料ごとに印加応力の値を決め試料中央

の $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ または、 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 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、繰返し周期 20Hz 、最大引っ張り力 $\pm 49\text{kN}$ 、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。すべての実験は、室温で行った。

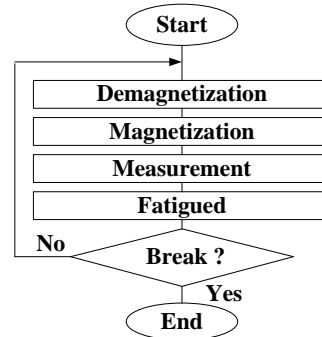


Fig. 6 Measurement procedure.

4. 研究成果

(1) インダクタンス法による磁性体試料の疲労評価

パンケーキ型コイルと LCR メータを用いたインダクタンス法をその励磁周波数を 10kHz として、磁性を持つ鉄系構造材である低炭素鋼に適用した結果を以下に示す。なお、ここで用いたコイルは 0.04mm のホルマル線を、 369 回巻いている。このコイルの空気中のインダクタンスは、 10kHz で $413.8\mu\text{H}$ である。

Fig.7に片振り引張疲労を印加する前の試料中央部 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の範囲のパンケーキ型コイルのインダクタンス(L)分布を示す。また、Fig.8に応力 130MPa とし、疲労繰返し回数(N)が $200,000$ 回の場合の試料の同じ範囲の L の分布を示す。両者を比べると $x=0\text{mm}$ において $y=\pm 15\text{mm}$ の所の L の減少が疲労のために大きくなっていることが分かる。

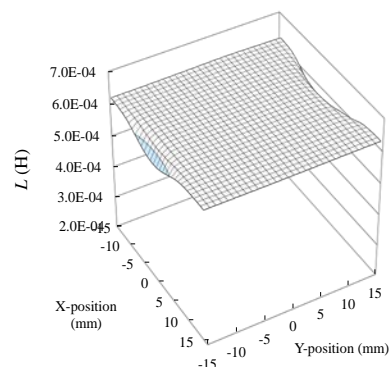


Fig. 7. Distribution of L of the pancake-type coil ($N=0, f_{ex}=10\text{kHz}$).

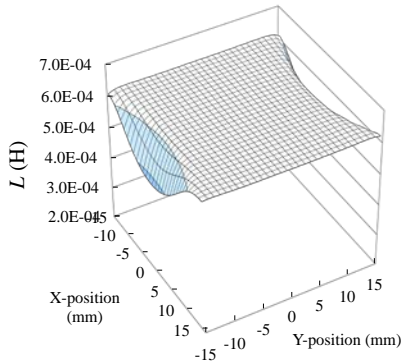


Fig. 8. Distribution of L of the pancake-type coil ($N=200000$, $\sigma_a=130$ MPa, $f_{ex}=10$ kHz).

次に、Fig.9 に $|dL|$ と N 、および、印加応力との間の関係を示す。なお、 $|dL|$ は、疲労による試料中央部の幅の減少による L の変化を除くために、疲労が加えられた試料の $y=\pm 12$ mm の場所の L の最小値と同じ場所の疲労の加えられていない試料の L の値の差の絶対値であり、ここでは、疲労の進行を示すパラメータとして用いた。Fig.9 より、疲労の進行と $|dL|$ の間にはよい相関があり、励磁周波数 10kHz のパンケーキコイルを用いたインダクタンス法は、10kHz 程度の励磁周波数を用いても磁性を持つ試料の疲労検出に有効であった。

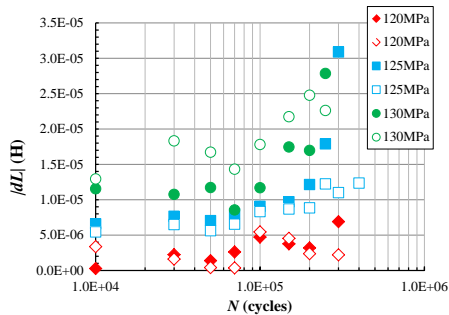


Fig. 9. Relationship among $|dL|$ of the pancake-type coil, σ_a , and N ($f_{ex}=10$ kHz).

(2) 直流磁界を併用したインダクタンス法による磁性体試料の疲労評価 1

パンケーキ型コイルと LCR メータを用いたインダクタンス法は、励磁周波数を従来法の約1/10の 10kHz としても低炭素鋼の疲労評価に用いることができることを示した。そこで、さらに、直流磁界を併用することによって試料内部の疲労評価を可能とする事や試料の表面状態の疲労評価への影響を受けない疲労評価法の開発を行った結果を次に述べる。なお、ここで用いたコイルは 0.04mm のホルマル線を、324 回巻いている。このコイルの空気中のインダクタンスは、10kHz で $320.2\mu\text{H}$ である。また、ここで用いた試料は典型的な構造用鋼の SS400 であり、疲労形態は片振り引張疲労である。

① 試料表面状態の影響の低減

Fig.10 に励磁周波数 100kHz としたときの dL の分布を示す。なお、ここで dL は、 L の

場所による変化を理解しやすくするために試料中央部 3mm x 3mm の範囲の平均値を基準とした値である。Fig.11 に励磁周波数 10kHz で、平行直流磁界を併用した場合の dL の分布を示す。これらの図を比較すると、Fig.10 でははっきりと dL の分布に影響していた傷が Fig.11 ではほとんど影響が見られなくなっており、励磁周波数を下げ平行直流磁界を併用したインダクタンス法は、試料の表面状態に影響されにくい疲労評価法である。

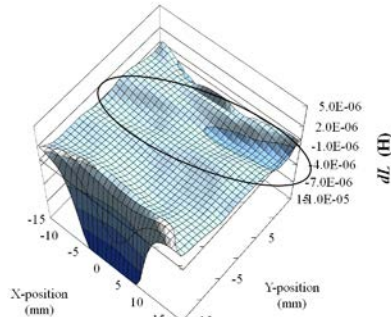


Fig. 10. Distribution of dL without Nd magnets ($N=0$, $f_{ex}=100$ kHz, with a scratch).

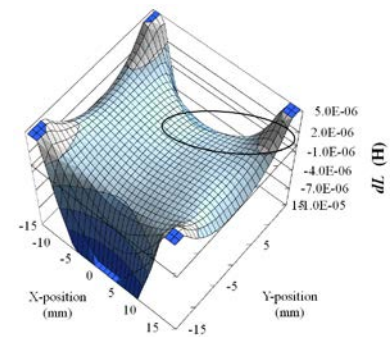


Fig. 11. Distribution of dL with Nd magnets ($N=0$, $f_{ex}=10$ kHz, with a scratch).

② 平行直流磁界を併用したインダクタンス法の疲労評価

Fig.12 に試料を構造用鋼の SS400 とした直流磁界を印加しない場合の、疲労回数 N と dL_{ave} (疲労評価のパラメータ。疲労がないときの試料中心部の L の 3mm x 3mm の範囲の平均値をゼロとしたときの各疲労を与えた場合の L_{ave} の値) と印加応力 σ_a の間の関係を示す。疲労が進むに従って dL_{ave} がどの応力においてもほぼ大きくなっている。

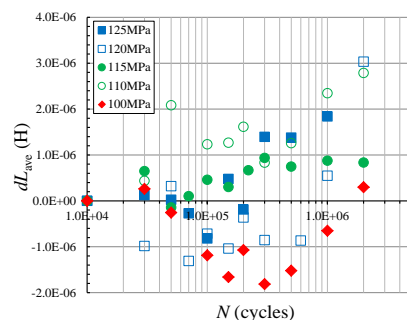


Fig. 12. Relationship among dL_{ave} , σ_a , and N without Nd magnets ($f_{ex}=10$ kHz).

一方, Fig.13 では, 直流磁界の印加によって透磁率が見かけ上小さくなりその変化の L の変化への寄与が小さくなるために, ほぼ, N の増加に従って dL_{ave} が大きくなっている。よって, インダクタンス法への平行直流磁界の併用はその浸透深さが大きくなることと共に dL_{ave} と疲労の関係が単純化され磁性体の疲労評価に有効である。

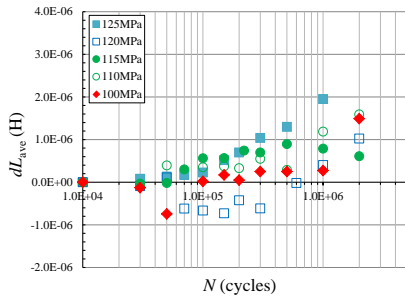


Fig. 13. Relationship among dL_{ave} , σ_a , and N with Nd magnets ($f_{ex}=10$ kHz).

(3) 直流磁界を併用したインダクタンス法による磁性体試料の疲労評価 2

ここでは, フェライト系ステンレス鋼である SUS430 として直流磁界を併用したインダクタンス法について述べる。なお, ここで用いたコイルは 0.04mm のホルマル線を, 369 回巻いている。このコイルの空気中のインダクタンスは, 100kHz で 320 μ H である。

Fig.14 に SUS430 に対して平行直流磁界を併用したインダクタンス法で片振り引張疲労の評価を行った。この結果から, 応力と L_{ave} のはっきりした相関は見られなかったが, N の増加に従って一端増加し, その後, 多少減少する傾向を示した。

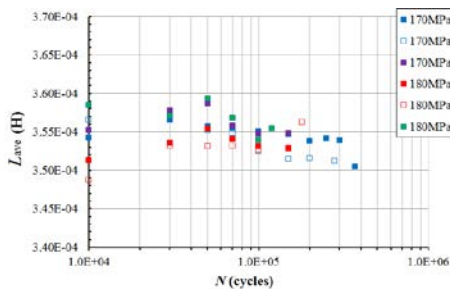


Fig. 14. Relationship among L_{ave} , σ_a , and N with Nd magnets ($f_{ex}=100$ kHz).

(4) 3連コイル差動型磁気センサによる非磁性体試料の疲労評価

パンケーキ型コイルのインダクタンスの変化で磁性体等の疲労の検出を行う研究を行ってきた。しかし, 励磁周波数を小さくするとインダクタンスの変化が小さくなり疲労の検出に注意が必要となるという問題点も明らかになった。そこで, パンケーキ型コイルを用いるインダクタンス法以外の試料深部の疲労評価法として3連コイル差動型磁気センサの適用を試みた。以下, この3連コイル差動型磁気センサを非磁性体である

SUS316L の内部の疲労評価に適用した結果を示す。ここでは励磁周波数を 10kHz を用いた。

Fig.15 に試料中央部の 3mm x 3mm の範囲の v_{out} の大きさ R の平均値 V_{ave} [V]と印加応力 σ_a , および, N の間の関係を示す。この図は, 横軸が対数であるため, $N=0$ を表現できない。よって, 図上では $N=1$ で疲労を印加していない状態を示している。図から, V_{ave} が右下がりの傾向を示しており, 印加応力や疲労蓄積量と相関があるのではないかと考えられる。しかし, この傾向は, 疲労印加による試料の板厚の変化とよく似ており, 試料の肉厚の変化の影響を受けている可能性がある。そこで, 今後, 板厚の変化を除去したインダクタンスの変化を抽出し, 疲労とインダクタンスの間の関係を再調査する必要があると考えている。

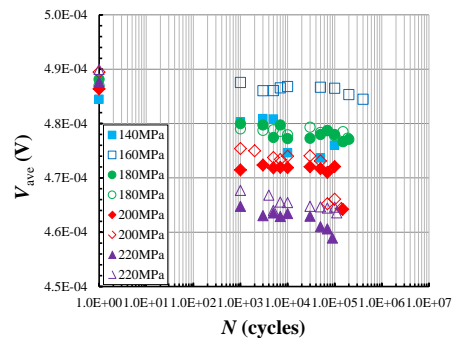


Fig.15. Relationship among V_{ave} of three stacked-coil sensor, σ_a , and N ($f_{ex}=10$ kHz).

(5) 研究成果のまとめ

この研究テーマ「直流磁界と低周波励磁型磁気センサを用いた新しい非破壊材質劣化評価法の構築」の遂行を通して試料内部の疲労を正確に評価するために表皮効果の低減に重点的に取り組み, 磁性を持つ試料や片振り引張疲労を対象とした新しい疲労検出法を提案し, その評価を行った。以下, 今回の研究で得た成果をまとめる。

- ① 単純にパンケーキ型コイルのインダクタンスを計測する励磁周波数を下げたインダクタンス法においても, 片振り引張り疲労を加えた低炭素鋼の片振り引張り疲労と, パンケーキ型コイルのインダクタンスの間にはよい相関があり, 磁性を持つ試料(低炭素鋼)の疲労評価が可能であった。
- ② パンケーキ型コイルを用いたインダクタンス法の励磁周波数を下げるとインダクタンスの変化は小さくなるが, 磁性を持つ試料(構造用鋼, SS400)の片振り引張り疲労の評価は可能であり, かつ, 表面状態の影響を受けにくかった。
- ③ 励磁周波数を下げたインダクタンス法と Nd 磁石を用いた平行直流磁界を組み合わせると, 磁性を持つ試料(SS400)の片振り引張り疲労の評価の直線性が向上した。表面状態の影響の排除にも大きな効果があった。

④ 平行直流磁界を併用したインダクタンス法を磁性を持つフェライト系ステンレス鋼(SUS430)に適用した結果、これも、 L と疲労の間に関連が見られた。

⑤ 3連コイル差動型磁気センサを安定なオーステナイト相を持つステンレス鋼である SUS316L に適用した。これも、励磁周波数 10kHz で疲労とセンサ出力の間の関係が得られたが、板厚の変化の影響を受けている可能性があるため今後再検討の必要がある。

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 2 件)

① M. Oka, T. Yakushiji, Y. Tsuchida, and M. Enokizono, “Examination of the Inductance Method for Non-Destructive Testing in Structural Metallic Material by Means of the Pancake-type Coil”, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 21, No. 3. pp. 488-493, 2013(9)

② M. Oka, T. Yakushiji, Y. Tsuchida, and M. Enokizono, “Fatigue Evaluation of Low Carbon Steel by Means of the Inductance Method Using a Pancake-Type Coil”, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No. 2, pp.514-519, 2012(6)

[学会発表] (計 4 件)

① 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, 榎園正人, “磁気的手法によるオーステナイトステンレス (SUS316L) の片振引張疲労評価”, 第 22 回 MAGDA コンファレンス in 宮崎 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス, 2013 年 12 月 2 日, 宮崎観光ホテル (宮崎県宮崎市).

② T. Komiya, M. Oka, T. Yakushiji, and M. Enokizono, “Fatigue Evaluation of the Iron-based Structural Material (SUS430) by the Eddy Current Sensor under the DC Magnetic Field”, 15th Japan Korea Joint Symposium on the Applied Electromagnetics, 2013 年 2 月 1 日, Sungkyunkwan University (Suwon Korea).

③ M. Oka, T. Yakushiji, Y. Tsuchida, and M. Enokizono, “Examination of the Inductance Method for Non-Destructive Testing in Structural Metallic Material by Means of the Pancake-type Coil”, 7th Asia-Pacific symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012 年 7 月 26 日, Majestic Saigon Hotel (Ho Chi Minh City, Vietnam).

④ M. Oka, T. Yakushiji, Y. Tsuchida, and M. Enokizono, “Fatigue Evaluation of Low Carbon Steel by Means of the Inductance Method Using a Pancake-Type Coil”, 20th MAGDA Conference

in Pacific Asia, 2011 年 11 月 16 日, Garden Villa Kaohsiung (Kaohsiung 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

榎園 正人 (ENOKIZONO Masato)

大分大学・工学部・電気電子工学科・教授

研究者番号：40136784