

研究種目：若手研究(A)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18686034  
 研究課題名(和文) 磁気センサを用いた金属損傷評価および損傷緩和・回復システムの実用化に関する研究  
 研究課題名(英文) The system of metal failure evaluation, failure relaxation and recovering measuring by magnetic sensors  
 研究代表者  
 槌田 雄二 (TSUCHIDA YUJI)  
 大分大学・工学部・助教  
 研究者番号：80284785

研究成果の概要：磁気センサを用いて金属疲労評価の検討を行い、電磁誘導加熱技術によるスポット熱処理による金属損傷緩和・回復技術に関する検討を行った。金属疲労評価の成果に関しては、以下の2つに大別できる。1. オーステナイト系ステンレス鋼：家庭用品から原子力分野まで用いられているオーステナイト系ステンレス鋼は非磁性であると考えられていた。本鋼は損傷を受けることによって加工誘起マルテンサイト変態を起こし、変態部分は磁性相となる。この特性に注目し、ひずみ及び疲労を受けたオーステナイト系ステンレス鋼を着磁し、高感度磁気センサを非破壊的に走査することによって、ひずみ分布及び疲労分布を測定できることを明らかにした。2. 一般構造用鉄鋼材：軟鋼に代表される一般構造用鉄鋼材の場合、バージン材から強磁性を呈する。磁気センサを用いて非破壊的に損傷度合いを評価することは困難であった。本研究では磁壁移動に起因して発生する磁気的信号であるバルクハウゼン信号に着目し、複雑なバルクハウゼン信号からひずみ量、疲労量を評価出来ることを明らかにした。また、電磁誘導加熱技術を用いて、炭素鋼に局部的に熱処理を施した場合の機械特性・磁気特性評価を行った。その結果、電磁誘導加熱処理技術を用いて、熱処理条件によっては、炭素鋼の機械的特性を改善することが出来ることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	18,700,000	5,610,000	24,310,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	23,600,000	7,080,000	30,680,000

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：計測システム

## 1. 研究開始当初の背景

近年、原子力分野では、「維持基準」の適用が始まった。「維持基準」とは、機器に損

傷があっても性能が保たれていれば継続使用するための基準である。それまで原子力発電所では、亀裂を一切認めず、どんなに微小

な亀裂があっても、その部材は交換対象となっていた。これに対して、構造物あるいはその部材の安全性に問題のない亀裂は容認し、モニタリングしていくことによって、その部材の使用限まで活用して行こうという考え方に基づくのが「維持基準」である。超音波、X線、ECT、磁気等を用いることによって、構造物内における亀裂の探傷は、国内外で古くから行われてきたが、「維持基準」の運用により、亀裂有無の探査から、亀裂寸法・深さを正確にモニタリングするために、これらの手法を用いたより高度な探傷装置の開発が盛んに行われるようになってきた。一方、一般の産業界においては、このようなモニタリングを行うことは、手間と費用が掛かるため、不具合が出た場合のみ、対象部材を修理することなく廃棄、安易に交換しているのが現状である。しかしながら、「維持基準」のような基準は、限りある地球資源を有効に活用するために、原子力分野に限らず、今後、国内外の一般の産業界においても積極的に取り入れて行かなければならない考え方である。産業が成熟した技術立国である日本でこそ、このような基準を積極的に採用し、地球資源の有効活用を行うべきである。亀裂発生以前の損傷状態を定量的に評価することが出来れば、これまでに確立された探傷技術をはるかに凌いで構造物の安全性を大幅に高めることが可能となる。更に、疲労した損傷部に対して、電磁誘導加熱技術により熱処理を施すことによって、損傷の緩和あるいは回復を可能とするシステムが可能となれば、様々な産業界への有用度は高い。

## 2. 研究の目的

X線、超音波、磁気などを用いて構造物内の小さな亀裂・傷を探傷することは、非破壊検査手法としてある程度確立された技術である。本研究は、探傷から更に一歩進んで、鉄鋼材に対して、磁気センサを用い、亀裂発生前における金属損傷の度合いを定量的に評価することを第1の目的とする。更に、電磁誘導加熱技術を用い、損傷部分に熱処理を施し、損傷の緩和あるいは回復を可能とするシステムを構築するための検討を行うことが第2の目的である。

## 3. 研究の方法

まず、磁気センサを用いた漏洩磁束量測定による金属疲労評価を行っていく。具体的に以下に示すセンサ・測定システムで鉄鋼材の疲労評価を行った。

- (1) 高感度薄膜 FG センサ (センサメーカー試作品)、あるいは市販ホールセンサを用い、漏洩磁束量測定によるひずみ・疲労評価
- (2) 当研究室が特許を有する多重周波励磁スペクトラム ECT センサによるひずみ・疲労

評価

(3) 磁束密度 B と磁界強度 H を同時測定可能な独自開発磁気センサを用いたヒステリシスループ測定によるひずみ・疲労評価

(4) 当研究室が開発した磁気センサを用いたバルクハウゼンノイズ測定によるひずみ・疲労評価

## 4. 研究成果

磁気センサを用いた金属疲労評価の検討については、研究の方法に記述した(1)から(4)の内、(1)について述べる。

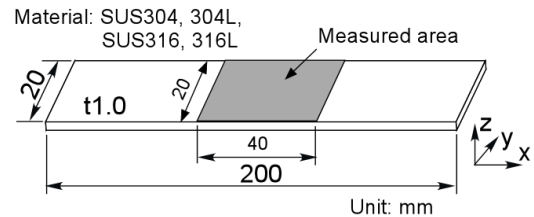


図1 引張試験歪み評価用試験片形状

表1 供試オーステナイト系ステンレス鋼の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS304	0.040	0.44	0.79	0.032	0.006	8.21	18.20	-
SUS304L	0.020	0.57	0.98	0.028	0.001	9.11	18.04	-
SUS316	0.049	0.69	0.92	0.031	0.002	10.62	16.58	2.13
SUS316L	0.020	0.67	0.98	0.030	0.005	12.13	17.55	2.23

Unit: [wt%]

図1に引張試験で用いた試料の形状・寸法を示す。対象試料として、4種類のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS304L, SUS316, SUS316L を用いた。すべての鋼材について、本図に示すように寸法 200 x 20 mm, 厚さ 1.0 mm の板材を用いた。漏洩磁束の測定は、本図中央に示すグレー部分、試料中心より、長手方向 (x 方向) に ±20 mm, 幅方向 (y 方向) に ±10 mm の領域において、各方向に 1 mm ごとに行った。4種類の鋼材の化学成分を表1に示す。塑性変形後の測定可能な漏洩磁束値の相違から、SUS304, SUS304L については、市販のホール素子センサを用い、SUS316 および SUS316L については、TFG センサを用いた。TFG センサの方がホールセンサよりも感度が 15 倍高いが、測定範囲が 50 分の 1 であるため、2つのセンサを使い分けた。まず、引張試験機を用いて、試料に引張応力を印荷する。試料を引張試験機から取り外した後、交流磁界下にて消磁を行う。消磁を行った試料を直流磁界下にて着磁を行う。着磁を行った試料に対して、いずれかのセンサを用いて漏洩磁束の測定を行った。その後、同一試料を再度引張試験機にセットし、以上の手順を繰り返した。両センサにおける測定に関しては、特別な磁

気シールドルーム等を用いず、測定前後で試料がない状態での背景磁場（バックグラウンドノイズ）の測定を行い、それぞれの条件における測定結果から、このバックグラウンドノイズを差し引いた。

まず、SUS316、SUS316L についての結果を示す。図2に各ひずみ状態での TFG センサによる漏洩磁束の測定値を示す。以前に行った SUS304 との比較のため図1に示した測定領域内において、x 方向には-5~5mm、y 方向には-2~2における領域で測定した分布の平均を各ひずみ状態における漏洩磁束量  $B_{ZAVE}$  とした。図2では、0、10、20、30、40、50、55、60、62.5、65、67.5、70、72.5% のひずみ状態における漏洩磁束量  $B_{ZAVE}$  を示している。SUS304、SUS304L と比較すると20から30分の1とかなり小さい量であるが、SUS316、SUS316L においても、ひずみが増加するにしたがって  $B_{ZAVE}$  が相関的に増加していくことが分かった。SUS316L については、ホールセンサを用いて測定しても、ひずみに対して漏洩磁束量が増加しているのか判断するのが難しいほどの変化しか認めることが出来なかったため、今回 TFG センサを用いることによって、SUS316、SUS316L、特に SUS316L に関して、ひずみ量と漏洩磁束量の相関を初めて明らかにすることが出来た。

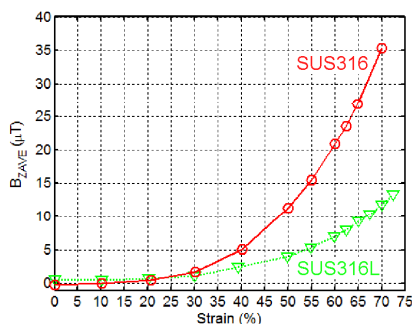
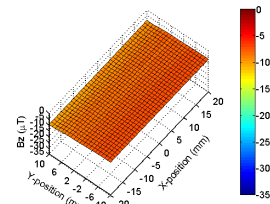


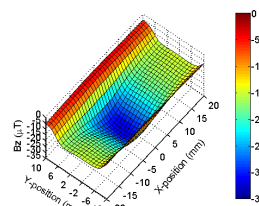
図2 引張試験歪みと漏洩磁束分布の関係 (SUS316 & SUS316L)

SUS316L について、引張試験前、および破断直前時に対して、図1に示した測定領域内で測定した漏洩磁束密度値を3次元的に表示したものを図3に示す。SUS316L では、ひずみ量が30%においても、漏洩磁束密度値の分布は、バックグラウンドノイズとほとんど変わらない程度であったが、破断直前に局部的に大きく漏洩磁束分布が変化する部分があり、その周辺で破断することが分かった。次に SUS304 系鋼材についての結果を示すが、これらの鋼材については、歪み量と磁気特性の関係がすでに多くの論文で明らかにされている。したがって、ここでは、SUS304L

について、引張試験前、および破断直前時の漏洩磁束密度値を3次元的に表示したものを図4に示す。破断直前時の分布は図3に示した SUS316L の場合と異なることが分かる。これは、SUS304 系鋼と SUS316 系鋼で加工誘起マルテンサイト変態量が大きく異なることに起因するものだと考えられる。

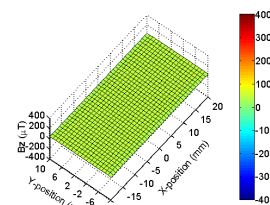


(a) Strain: 0%

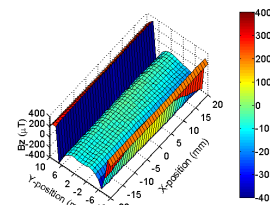


(b) Strain: 72.5%

図3 試験前と破断直前時の漏洩磁束分布 (SUS316L)



(a) Strain: 0%



(b) Strain: 70.0%

図4 試験前と破断直前時の漏洩磁束分布 (SUS304L)

疲労試験に用いた試料は、SUS304、SUS316、SUS316L である。それぞれの試料には表1に示したものをを用いた。試料は、圧延後の状態であり熱処理は行わず、図5に示す形状にワイヤ放電加工機で切り出したものを使用した。試料中央部に 10R の円弧状の切り込みを入れた平滑試験片である。なお、

TFG センサの中心と試料表面の距離は、約 2.2 mm である。漏洩磁束密度の測定領域は、SUS304 の場合は試料中央部の 10 x 20 mm の範囲を XY 両方向とも 0.2 mm ステップに、SUS316、SUS316L の場合は、20 x 20 mm の範囲を XY 両方向とも 0.5 mm ステップで測定した。実験の手順は引張試験時と同様である。この実験でも、あらかじめ背景磁気雑音を測定し、影響を除いた。また、すべての実験は、室温で行った。なお、以下に示す全てのデータは、この背景磁気雑音を除去したものである。

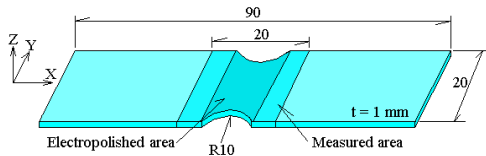


図5 面外曲げ疲労評価用試験片形状

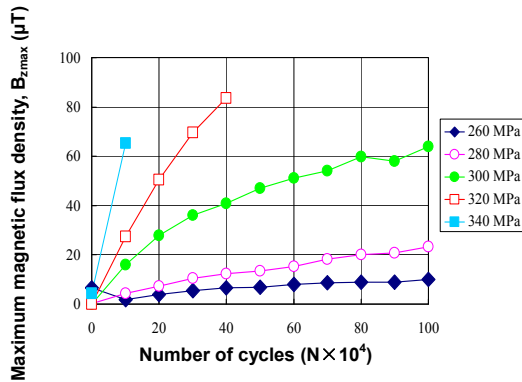


図6 漏洩磁束と繰返し疲労回数の関係 (SUS304)

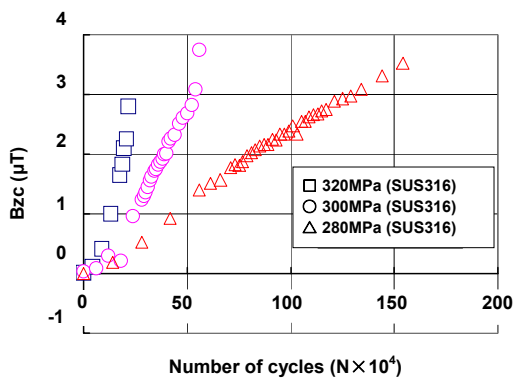


図7 漏洩磁束と繰返し疲労回数の関係 (SUS316)

図6に SUS304 の各繰返し応力における疲労回数と測定領域における最大磁束密度値  $B_{zmax}$  の関係を示す。図中でグラフの線が右端まで届いているものは、試料がその繰返し

疲労回数まで破断しなかったことを示す。本図には、繰返し応力を疲労限以上である 260, 280, 300, 320, 340 MPa とした場合、繰返し疲労回数 10 万回ごとの  $B_{zmax}$  を示す。これらの繰返し応力では、繰返し数が増すと  $B_{zmax}$  は増加している。さらに、繰返し応力が大きいほど  $B_{zmax}$  の増加の割合が大きくなる。図7に試料を SUS316 とし、繰返し応力を 280, 300, 320 MPa とした場合の同様の関係を示す。本図を図6と比較すると、SUS316 では、SUS304 に繰返し応力 280MPa で 100 万回疲労を印加した時の 10 分の 1 以下である。SUS316L では、更に小さく、破断時の漏洩磁束密度 ( $B_z$ ) が  $1 \mu T$  であった。このため、SUS316、SUS316L では、試料中央部の測定値  $B_{zCenter}$  と応力を受けていない部分の測定値  $B_{zero}$  との差を  $B_{zC} = B_{zCenter} - B_{zero}$  と定義し、この値を試料表面部における残留磁束密度の最大値とし、疲労評価のパラメータとして使用した。SUS304 よりも安定なオーステナイト相を持つために常温でマルテンサイト変態が起こりにくい SUS316 および SUS316L においても、疲労によって誘起されたとと思われるマルテンサイト相による残留磁化を利用して疲労の蓄積量の推定が行える可能性がある。SUS316L は常温では、加工誘起マルテンサイト変態しないと言われていたが、漏洩磁束密度 ( $B_z$ ) に増加が見られた。また、引張試験、疲労試験を行う環境温度によっても加工誘起マルテンサイト変態量が異なることを明らかにした。

次に、電磁誘導加熱技術を用いて、炭素鋼に対して、局部的に熱処理を施した場合の機械特性・磁気特性評価を行った結果について示す。図8に、電磁誘導加熱を用いて熱処理を施した試験片用に今回開発した磁気測定システムを示す。図8に示すように、励磁部分は励磁コイルと励磁ヨークによって構成される。電磁誘導加熱の影響で試料が変形してするため、上下の励磁ヨークで試料を挟んで励磁を行う。また、試料全体を均一に磁化するため中央部にも励磁コイルを巻いている。ピックアップ部分は、H コイル、B コイルと補償コイルから構成されている。図9に測定システム中央部の H コイル、B コイルと補償コイルを示す。図10には、電磁誘導加熱により熱処理を施した炭素鋼板のひずみ-応力特性と MH ループを示す。図10に示すように、MH ループの膨らみ方によって、ひずみ-応力特性が変化している。更に、MH ループの膨らみによって、引張強さが増加し、伸びが減少していることがわかる。この結果、炭素鋼板の MH ループとひずみ-応力特性には相関があることが分かり、電磁誘導加熱により熱処理を施した後、炭素鋼板の MH ループを測定することによって、熱処理後の炭

素鋼板の機械的特性を知ることが出来る。また、電磁誘導加熱による熱処理条件によって、磁気特性やひずみ-応力特性が異なることが分かった。これは、電磁誘導加熱による熱処理条件によって、破断伸びや引張強さをコントロールすることができ、炭素鋼板の機械的特性を改善することが出来ることが分かる。以上により、電磁誘導加熱技術を金属損傷緩和・回復技術へ応用することが可能である。

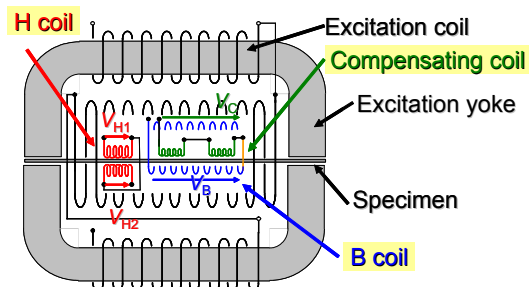


図8 熱処理試験片磁気測定システム

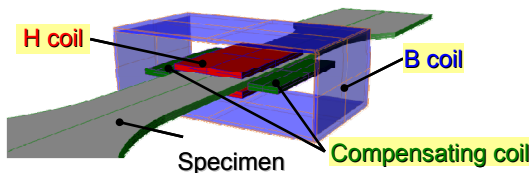
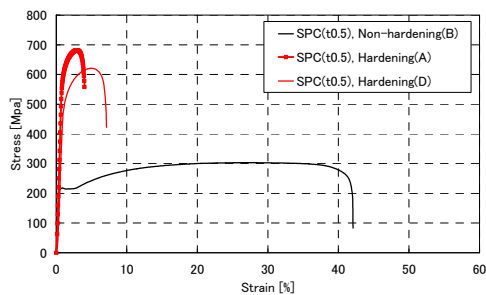
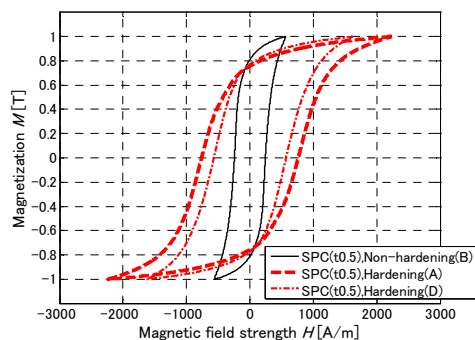


図9 磁界強度の測定方法



(a) Strain – stress curves



(b) MH loops

図10 焼入れされた低炭素鋼板のひずみ-応力特性とMHループの比較

## 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14件)

- ① Yuji Tsuchida, and Masato Enokizono, Mohachiro Oka, Rotational Barkhausen Signals Under Rotating Magnetic Flux, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, , Vol. 25, pp. 459 - 466, 2009. 査読無 (校閲有)
- ② Mohachiro Oka, Yuji Tsuchida, Terutoshi Yakushiji, and Masato Enokizono, Nondestructive Evaluation of Fatigue Damage for SUS316 by Using Electromagnetic Methods, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, , Vol. 25, pp. 1442 - 1449, 2009. 査読無 (校閲有)
- ③ Y. KAI, Y. TSUCHIDA, M. ENOKIZONO, Magnetic evaluation of hardening effect for carbon steel, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 10, pp. 1078-1084, 2008. 査読有
- ④ Mohachiro Oka, Shinya Nagato, Terutoshi Yakushiji, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Estimation of Fatigue Damage for an Austenitic Stainless Steel (SUS304) Using a Pancake Type Coil, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, , Vol. 27, pp. 1244 - 1251, 2008. 査読無 (校閲有)
- ⑤ 榎田雄二, 榎園正人, 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, 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, 非破壊検査協会誌, Vol. 57, pp. 433-436, 2008. 査読有
- ⑥ Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Mohachiro Oka and Terutoshi Yakushiji, " Measurement of Local Strain Distribution of Austenitic Stainless Steels by Using Magnetic Sensors, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, Vol. 26, pp. 1298 - 1305, 2007. 査読無 (校閲有)
- ⑦ Y. Kai, Y. Tsuchida, M. Enokizono, Numerical Analysis for Non-destructive Evaluation Taking account into Measured Magnetic Properties depending on Hardening Depth, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 28, IOS Press, pp. 225-232, 2007. 査読有
- ⑧ T. Yasutake, T. Chady, Y. Tsuchida, M. Enokizono, Development of Metal Detection System for Reuse of Dismantled

- Woods from Houses, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 28, IOS Press, pp. 233-240, 2007. 査読有
- ⑨Tomasz CHADY, Ryszard SIKORA, Grzerorz PSUJ, Masato Enokizono and Yuji Tsuchida, Evaluation of Fatigue Loaded Conducting Structures Using Selected Electromagnetic NDT Methods, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 28, IOS Press, pp. 109-116, 2007. 査読有
- ⑩甲斐祐一郎, 榎田雄二, 榎園正人, プレス加工による焼入れ圧延鋼板の磁気特性, 日本 AEM 学会誌, Vol. 15, pp.101-106, 2007. 査読有
- ⑪ Y. Kai, Y. Tsuchida, M. Enokizono, Non-destructive Evaluation of Hardening Carbon Steel by Measuring Hysteresis loops, Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 15, pp.S112-S115, 2007. 査読有
- ⑫M. Oka, K. Ono, S. Nagato, T. Yakushiji, Y. Tsuchida and M. Enokizono, Evaluation of Fatigue Damage in an Austenitic Stainless Steel Using Magnetic Sensors, Proceedings of The 9th Japan - Korea Joint Symposium on the Applied Electromagnetics, pp. 37 - 36, 2007. 査読無
- ⑬薬師寺輝敏, 岡茂八郎, 吉田敬志, 榎園正人, 榎田雄二, 残留磁気測定法による S U S 3 0 4 鋼の疲労被害検出, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 72, No. 724, pp. 1970-1977, 2006. 査読有
- ⑭Yuji Tsuchida, Mohachiro Oka, Terutoshi Yakushiji, and Masato Enokizono, Measurement of Local Strain Distribution of Austenitic Stainless Steels by Using Magnetic Sensors, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, Vol. 25, pp. 1261 - 1268, 2006. 査読無 (校閲有)

[学会発表] (計 9 件)

- ① Yuji Tsuchida, Rotational Barkhausen Signals Under Rotating Magnetic Flux, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2008), 2008. 7. 21, University of Illinois-Chicago (UIC), Chicago, Illinois, USA.
- ② Yuji Tsuchida, Metal Detection System to Reuse Woods from Wooden Houses, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2007), 2007. 7. 26, Colorado School of Mines,

Golden, Colorado, USA.

- ③ Yuji Tsuchida, Evaluation of Hardening for Carbon Steel by Measuring Magnetic Properties, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2007), 2007. 7. 26, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- ④ Yuji Tsuchida, Estimation of Fatigue Damage for an Austenitic Stainless Steel (SUS304) Using a Pancake Type Coil, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2007), 2007. 7. 26, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- ⑤ Yuji TSUCHIDA, Metal Detection System for Used Woods by Using Double Helmholtz Coils, The 12th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2007), 2007. 7. 21, Cardiff University, UK.
- ⑥ 榎田雄二, 磁気センサによる S U S 3 0 4 系鋼・S U S 3 1 6 系鋼の引張試験ひずみおよび面外曲げ疲労評価, 第 1 0 回表面探傷シンポジウム, 2007. 1. 26, 東京都城南地域中小企業振興センター
- ⑦ Yuji Tsuchida, Evaluation of Hardening for Carbon Steel by Measuring Magnetic Properties, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2006), 2006. 8. 3, Hilton Portland & Executive Tower, Portland, Oregon, USA.
- ⑧ Yuji Tsuchida, Nondestructive Evaluation of Strain Distribution and Fatigue Distribution from Austenitic Stainless Steel by Using Magnetic Sensors, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE2006), 2006. 8. 3, Hilton Portland & Executive Tower, Portland, Oregon, USA.
- ⑨ Yuji Tsuchida, Evaluation of Fatigue Loaded Conducting Structures Using Selected Electromagnetic NDT Methods, The 11th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2006), 2006. 6. 15, Iwate, Japan.

[その他]

<http://www.mag.eee.oita-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榎田 雄二 (TSUCHIDA YUJI)  
大分大学・工学部・助教  
研究者番号 : 80284785