

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560434
 研究課題名（和文） 予防保全を目指した磁気センサによる鉄系構造材の疲労状態監視法の構築
 研究課題名（英文） Development of the monitoring method of fatigue accumulation using the magnetic sensor to achieve preventive maintenance for ferrous structural materials
 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

研究成果の概要：SUS304, SUS316 を対象にしてパンケーキ型コイルを用いて疲労蓄積量とコイルのインダクタンスの関係を調査した。両被検査材において両者間には良い相関を示した。また、抵抗率と疲労蓄積量との間にも良好な関係が見られた。さらに、インダクタンス法に用いるパンケーキ型コイルの形状は厚さが薄いほど疲労検出に効果的であり、SUS430 においても疲労蓄積量とパンケーキ型コイルのインダクタンスの間に相関が見られた。また、オーステナイト系ステンレス以外のフェライト系ステンレスにも対応可能なセンサシステムを提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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： 予防保全, 非破壊検査, 渦電流, ステンレス鋼, インダクタンス, 抵抗率

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所の高経年化は、国民の安全・安心の観点から重大な関心事である。同様に、化学プラントや火力発電所でも高経年化は進んでいるが、設備の新設は経済的理由、省資源の観点からままならないのが現状である。周知のようにこれらに使用されている構造用金属材料は、非常に厳しい環境で使用されており、十分に安全を見込んで設計されているとはいえ、時間の経過とともに繰り返し外

部応力、製造時の溶接などによる残留応力、さらに、腐食環境などによって機械的特性の悪化はゆっくりながら確実に進行し、最後には破壊に至る。疲労の蓄積によって発生する構造用金属材料のき裂や減肉などは、定期的な検査（時間基準監視）で発見すべきものであり、そのための非破壊評価技術が現在まで積極的に研究され多くの成果が上がっている。さらに、より確実な安全の保障や経済性確保の観点から、疲労によってき裂や減肉が発生

する前に疲労の蓄積や特性悪化の分布状況を知り、き裂や減肉の発生前に部材や部品を交換する方法（予防保全、あるいは、状態監視保全）が近年の緊急テーマとして多くの研究機関で研究されている。この研究テーマ「予防保全を目指した磁気センサによる鉄系構造材の疲労状態監視法の構築」では、鉄系の構造用金属材の疲労による事故発生を未然に防ぐ方法の一つとして磁気的手法を研究し、その解決法を提案するものである。

2. 研究の目的

従来から行われてきた鉄系構造用金属材の疲労蓄積量を検出する方法の確実な発展を図るため以下の2点を大きな目的とした。

まず、疲労の蓄積する構造的な場所は機械設計の段階であらかじめ想定できる可能性が高いことを考慮して、観測点に配置し、疲労状態を監視する磁気センサを開発することを目的とする。この磁気センサは、状態監視により材料の物理特性の変化の絶対値を捉える新たな偏差型磁気センサである。さらに、新しい予防保全に適用でき疲労検出可能な磁気センサとその測定システムを開発して構造用金属材の疲労推定法の確度を向上させることと対応材料の範囲を拡大させることである。

3. 研究の方法

1) インダクタンス法

今回、この目的を達成するために、以下の2通りの方法を用いた。一つ目は、疲労蓄積による被検査材の電磁気的特性（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単一小型のパンケーキ型コイルのインダクタンスの変化として捉えるインダクタンス法である。この方法は、疲労を捉える磁気センサがパンケーキ型コイルで済むという特徴があり疲労検出実験にすぐに取り掛かれるメリットがある。しかし、どのような形状のパンケーキ型コイルが対象被検査材において適しているのか、どのような周波数を用いれば高感度に疲労を捉えることができるかなどは未知であるのでそれらを特定する予備実験が必要である。Fig. 1に今回、主に実験に用いたパンケーキ型コイルを示す。また、Fig. 2にこのパンケーキ型コイル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連積層コイル磁気センサ法

2つ目は、3連の空芯小型パンケーキ型コイルを用いる方法である。この方法は、Fig. 3のようにパンケーキ型コイルを配置し、中央のコイルを励磁コイルとし、上下2個のパンケーキ型コイルを差動に接続し、電子回路を

用いてバランスを取っておく。下部に設置されたパンケーキ型コイルの下部に被検査材を置くと疲労による電磁気特性の変化により上下2個のパンケーキ型コイルを鎖交する磁束が変化し疲労を捉えることができる構造である。Fig. 4にこのパンケーキ型コイル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) 被検査材

実験に用いた SUS304, SU316 はオーステナイト系ステンレス鋼であり、SUS430 はフェライト系ステンレス鋼である。Table 1 に実験に用いた試料の化学成分比(wt%)を示す。Fig. 5 に試料の形状や寸法、単一のコイルのインダクタンスや3連積層コイルの出力電圧の測定を行った範囲を示す。なお、実験に用いた全ての試料の板厚は1 mm である。試料は、圧延後の状態であり熱処理は行わずワイヤ放電加工機で切り出したものをそのまま使用した。

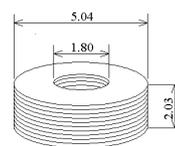


Fig. 1 A pancake type coil sensor.

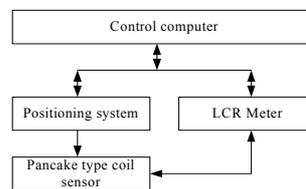


Fig. 2 The block diagram of a measurement system a pancake type coil.

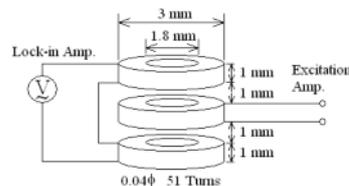


Fig. 3 A magnetic sensor using three coils.

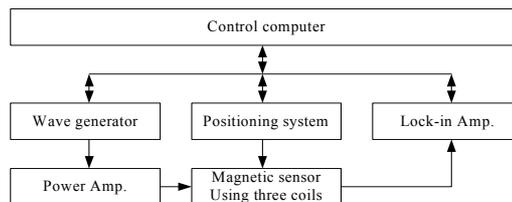


Fig. 4 The block diagram of a measurement system for a magnetic sensor using three coils.

Table 1 The chemical compositions in wt%(SU304, SUS316, SUS430).

Ni	Cr	C	Si	P	Mn	S	Mo
SU304							
8.21	18.20	0.04	0.44	0.03	0.79	0.01	
SUS316							
10.1	16.69	0.04	0.68	0.03	0.99	0.009	2.03
SUS430							
0.27	16.5	0.06	0.39	0.023	0.51	0.004	

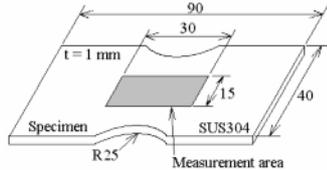


Fig. 5 The shape of a specimen including the measurement area.

4) 実験方法

実験は、試料ごとに印加応力の値を決め、Fig. 6 の手順で実験を行った。最初に試料を消磁し、次に磁化器を用いて直流磁界約 0.3 T で試料に対して垂直に磁化し、その後、疲労の蓄積状態を確認するために FG 型磁気センサを用いて漏洩残留磁束密度を測定した。その後、パンケーキ型コイルのインダクタンスを同じ範囲で測定した。パンケーキ型コイルのインダクタンスの測定に使用した試料は SUS304, SUS316, SUS430 であり、3 連積層コイル磁気センサで使用した試料は SUS316 である。さらに、この手順を試料が破断するまであらかじめ決めた曲げ回数ごとに測定し、試料が破断するまで繰り返した。疲労印加は、曲げモーメント 2.2 Nm の容量を持った平面曲げ疲労試験機 (UF15, 島津製作所) を用いて疲労の印加を行った。応力繰返し周波数は 30 Hz である。各測定は、2 度行いその平均値を測定値とし、測定値にメディアンフィルタ処理を行った。

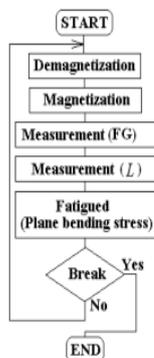


Fig. 6 Measurement procedure.

4. 研究成果

1) パンケーキ型コイルと SUS304

疲労検出素子に、厚さ 2 mm のパンケーキ型コイルを用いて、被検査材を SUS304 とした場合のインダクタンスの変化分と印加応力、繰返し回数の関係を Fig. 7 に示す。

SUS304 の場合、疲労の蓄積量とパンケーキ型コイルのインダクタンスの増加がよく一致していることが分かる。なお、インダクタンスの変化は非常に小さいため精密な実験が必要である。しかし、インダクタンスの変化と疲労蓄積量の間には非常によい直線の関係があることが分かった。

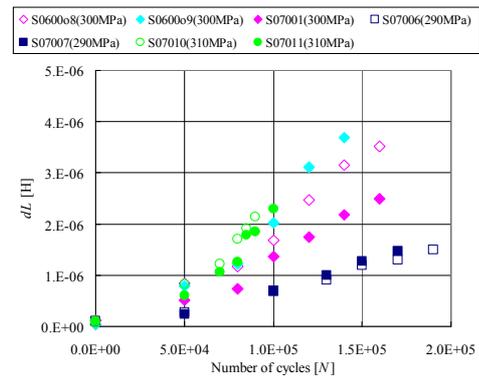


Fig. 7 The relationship among dL and N and σ_a (SUS304, 100 kHz).

2) パンケーキ型コイルと SUS316

疲労検出素子に、厚さ 2 mm のパンケーキ型コイルを用いて、被検査材を SUS316 とした場合のインダクタンスの変化分と印加応力、繰返し回数の関係を Fig. 8 に示す。この場合も、SUS304 と同様にインダクタンスの変化は小さいが、疲労の蓄積量とよい比例関係あることが分かった。これは、SUS316 の場合、マルテンサイト変態をほとんどしないため磁性の変化が小さくこのような結果になったと考えられる。

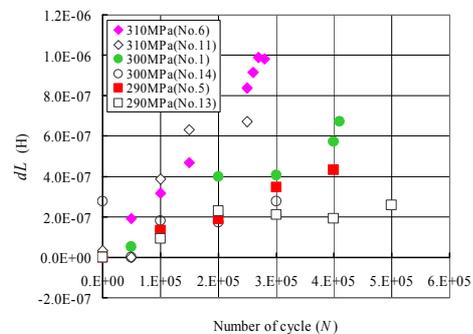


Fig. 8 The relationship among dL and N and σ_a (SUS316, 100 kHz).

3) 3連積層コイルと SUS304

疲労検出素子に、3連積層コイルを用いて、被検査材を SUS304 とした場合のコイル出力電圧と印加応力、繰り返し回数の関係調査した。ここでは、疲労の程度を表すパラメータとして、差動コイルの出力電圧の差分(dR)の分布の山と谷の間の傾き (dR/dI) をパラメータとした印加応力と繰り返し回数の関係を Fig. 9 に示す。この場合、差動形の検出方式を利用しているため、出力と疲労の蓄積量との関係が多少ばらついているが、パンケーキ型コイルと同様によく疲労を検出していることがわかる。

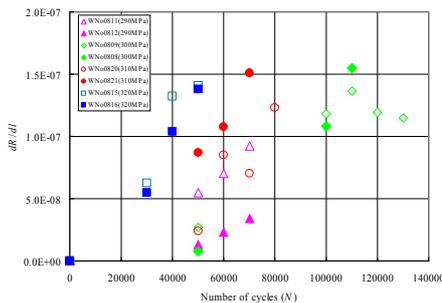


Fig. 9 The relationship among dR/dI and N and σ_a (100 kHz, SUS304).

4) 改良型パンケーキ型コイルと SUS430

疲労検出素子に、有限要素法によるシミュレーション結果を利用して改良した厚さを 0.5 mm のパンケーキ型コイルを用いて、サンプル数は少ないが、被検査材を SUS430 とした場合のインダクタンスの変化分と繰り返し回数の関係を Fig. 10 に示す。また、Fig. 11 に位相角の変化分と繰り返し回数の関係を示す。SUS430 は、あらかじめ磁性を持つため、従来は、磁気的手法による疲労検出法にはなじまなかった。しかし、このパンケーキコイルを用いたインダクタンス法では疲労を捉えることができた。これは新しい成果である。

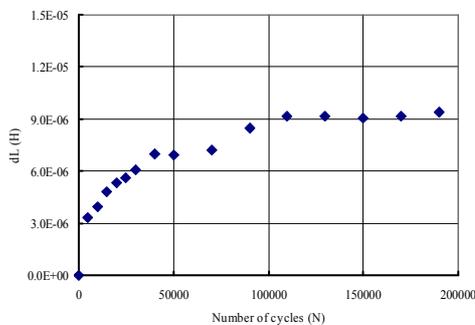


Fig. 10 The relationship among dL and N (SUS430, $\sigma_a=300\text{MPa}$, 200 kHz).

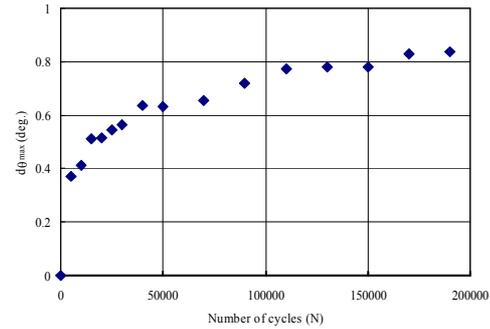


Fig. 11 The relationship among $d\theta$ and N (SUS430, $\sigma_a=300\text{MPa}$, 200 kHz).

5) 研究成果のまとめ

今回の研究で、得た成果をまとめる。

- 1) パンケーキ型コイルのインダクタンスを計測する方法での平面曲げ疲労蓄積量評価はオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304, SUS316 において、繰り返し回数 (疲労蓄積量) とパンケーキ型コイルのインダクタンスの間により相関があった。
- 2) 3連積層コイル型磁気センサにおいてもセンサ出力と繰り返し回数 (疲労蓄積量) との間により相関があった。
- 3) このことから、疲労の蓄積する構造的な場所をあらかじめ想定して、観測点に今回開発した磁気センサシステム (パンケーキ型コイルを使うインダクタンス法, 3連積層コイルを使う差動センサ法) を配置し疲労状態を監視することができることを示した。これによって、この研究の目的の一つを達成した。
- 4) また、改良パンケーキ型コイルや3連積層コイルをフェライト系ステンレスである SUS430 に適用し、センサ出力と繰り返し回数 (疲労蓄積量) との間により相関があることを確かめた。これによって、対応材料の範囲を拡大させることができた。
このように、この「予防保全を目指した磁気センサによる鉄系構造材の疲労状態監視法の構築」の研究の目的の多くの部分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 4 件)

- ① M. Oka, Y. Tsuchida, T. Yakushiji, and M. Enokizono, “NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF FATIGUE DAMAGE FOR SUS316 BY USING ELECTROMAGNETIC METHODS”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, American Institute of Physics, CP1096, Vol. 28B, pp. 1442-1449,

2009(3), 無

② 槌田雄二, 榎園正人, 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, “磁気センサによる SUS 304 系鋼・SUS 316 系鋼の歪みおよび曲げ疲労評価”, 非破壊検査, Vol. 57, No. 9, pp. 433-436, 2008(9), 無

③ M. Oka, T. Yakushiji, S. Nagato, Y. Tsuchida and M. Enokizono, “Estimation of Fatigue Damage for an Austenitic Stainless Steel (SUS304) Using a Pancake Type Coil”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, American Institute of Physics, CP975, Vol. 27, pp. 1244-1251, 2008(3), 無

④ M. Oka, K. Ono, T. Yakushiji, Y. Tsuchida and M. Enokizono, “Non-destructive Evaluation of Fatigue Damage in the Stainless Steel by Using Electromagnetic Method”, Short Papers Proceedings of 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, pp. 149-150, 2007(9), 有

[学会発表] (計 6 件)

① M. Oka, Y. Tsuchida, T. Yakushiji, and M. Enokizono, “NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF FATIGUE DAMAGE FOR SUS316 BY USING ELECTROMAGNETIC METHODS”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, American Institute of Physics, CP1096, Vol. 28B, pp. 1442-1449, 2009(3)

② 岡茂八郎, 宮崎翔太, 薬師寺輝敏, 槌田雄二, 榎園正人, “パンケーキ型コイルによるステンレス鋼の疲労評価”, 第 17 回 MAGDA コンファレンス in 日立 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp. 115-118, 2008(11)

③ 宮崎翔太, 岡茂八郎, “3 連コイル型磁気センサを用いたステンレス鋼の疲労評価”, 平成 20 年度 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 10-1P-13, CD-ROM, 2008(10)

④ 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, 槌田雄二, 榎園正人, “電磁氣的性質の変化を利用したステンレス鋼 (SUS304, SUS316) の疲労評価”, 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, pp. 29-32, 2008(5)

⑤ 岡茂八郎, 長門真也, 薬師寺輝敏, 槌田雄二, 榎園正人, “パンケーキ型コイルのインダクタンスの変化を利用したオーステナイトステンレス鋼の疲労評価”, 第 16 回 MAGDA コンファレンス in 京都 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp. 309-312, 2007(11)

⑥ 岡茂八郎, 長門真也, 薬師寺輝敏, 槌田雄二, 榎園正人, “パンケーキ型コイルを用いた SUS 304 の平面曲げ疲労評価”, 日本非破壊検査協会, 第 2 回表面探傷分科会講演資料, pp. 31-34, 2007(11)

[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]
特になし

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: 8 0 1 0 7 8 3 8

(2) 研究分担者

薬師寺 輝敏 (YAKUSHIJI TERUTOSHI)

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号: 9 0 2 1 0 2 2 8

(3) 連携研究者

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: 4 0 1 3 6 7 8 4