

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760062
 研究課題名（和文）電磁超音波・非線形渦電流マルチセンサによる高クロム鋼のクリープ損傷劣化診断
 研究課題名（英文）Nondestructive Evaluation of Creep Damage of High Cr Ferritic Steels by EMAT-Nonlinear ECT multi-sensor

研究代表者 内一 哲哉（UCHIMOTO TETSUYA）
 東北大学・流体科学研究所・准教授
 研究者番号：70313038

研究成果の概要（和文）：

本研究では高クロム鋼のクリープ損傷について、微視的損傷過程を新しい概念のセンサである電磁超音波・非線形渦電流マルチセンサを用いて定量的に評価することを目的とし、下記の内容について検討した。クリープ損傷過程における組織変化と音響特性、電磁特性との関係を明らかにした。さらに、クリープ損傷による劣化評価に適した電磁超音波・非線形渦電流マルチセンサの構造について検討を行った。クリープ損傷に伴う組織変化と電磁特性、音響特性との関係に着目し、組織変化に敏感なパラメータを評価できる構造について検討した。

研究成果の概要（英文）：

This study aims at quantitative evaluation of micro-structural change by creep damage of high Cr ferritic steels by electromagnetic acoustic transducer (EMAT)-nonlinear eddy current testing (ECT) multi-sensor, and the followings were investigated. Examined were the relationship between structural change by creep damage and acoustic / electromagnetic properties. Finally, structure of EMAT-Nonlinear ECT multi-sensor was discussed to evaluate the micro-structural change by creep damage of high Cr ferritic steels.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：電磁非破壊評価学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：改良9Cr1Mo鋼，クリープ損傷評価，マルチセンサ，非線形渦電流試験，電磁超音波試験，転位，析出物

1. 研究開始当初の背景

高クロムフェライト鋼は、オーステナイト系耐熱鋼と共に古くから実用化されるとともに研究が進められている鋼種である。電力需要に応じて稼働と停止を繰り返す火力発電ボイラには、オーステナイトステンレス鋼に比べ熱膨張係数が小さく温度変化に強い高

クロムフェライト鋼が適している。また、熱伝導率が大きいため、配管周りの簡素化や機器のコンパクト化を行うことができ、安価であるため、経済性の向上に寄与する。しかし、近年の火力発電設備の高効率化に伴い、より高温・高圧で使用することで生じるクリープ破断による事故が多数報告されている。従っ

て、クリーブ損傷の非破壊評価技術の確立が望まれている。クリーブ損傷に伴うき裂評価に関する研究は数多く報告されているものの、析出物及び転位構造の評価を試みた例は無い。クリーブ損傷をより早い段階で評価する必要があることから、ポイド等のキャビティが生じる前の段階での評価手法が望まれる。

非破壊検査手法のうち、電磁超音波探触子(EMAT)と渦電流探傷(ECT)は、通常の超音波探傷(UT)に不可欠な中間媒質を必要としない非接触式のセンサであることやプローブ構造及び装置システムが類似している。さらに、超音波探傷と渦電流探傷は探傷に関して互いに他を補完する関係にあることが経験的に知られている。本研究代表者は、これらの点に着目し、電磁超音波・渦電流マルチセンサを提案しており、電磁超音波・渦電流マルチセンサの構造に関する検討を行うとともに、電磁超音波・渦電流マルチセンサの有効性をき裂の定量的評価の観点から示している。本プローブはき裂の評価のみならず、損傷に伴う材料組織の非破壊評価についても有効であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では高クロム鋼のクリーブ損傷について、微視的損傷過程を新しい概念のセンサである電磁超音波・渦電流マルチセンサを用いて定量的に評価することを目的とする。このために、下記の内容について明らかにする。

(1) クリーブ損傷に伴う組織変化(析出物、サブグレイン、転位、ポイド)と音響特性、電磁特性との関係を明らかにする。析出物、転位密度、ポイドサイズ・密度等を定量的に評価し、これらのパラメータと電磁特性との間の関係を調査する。また、音響特性との関係については、超音波伝播速度、減衰率、非線形超音波について、これまでに提案されているモデルを参考に考察を行う。

(2) クリーブ損傷による劣化評価に適した電磁超音波・渦電流マルチセンサの構造について検討を行う。研究項目(1)で得られた組織変化と電磁特性、音響特性との関係に着目し、組織変化に敏感なパラメータを評価できる構造を決定する。

3. 研究の方法

(1) 試験体

改良 9Cr-1Mo 鋼母材のクリーブ損傷による析出物変化と転位構造の変化が磁気特性に与える影響を調査するため、熱時効試験片、引張試験片、クリーブ試験片を作製した。本研究で使用した供試材は改良 9Cr-1Mo 鋼である。本研究においては熱処理条件として 1060℃で 60 分、空冷の後 760℃で 60 分、さらに空冷の後 740℃で 504 分後炉冷し、745℃

で 1 時間さらに炉冷を行った。また、熱時効試験、引張試験、クリーブ試験の後に、磁気特性評価用に円柱状試験片、SEM 観察、X 線回折法、非線形渦電流法用に平板の試験片を、それぞれ放電加工により切り出した。クリーブ損傷に伴う析出物変化が改良 9Cr-1Mo 鋼の磁気特性に及ぼす影響を検討するために、熱時効試験を実施した。試験温度が 500, 550, 600, 650℃であり、さらに各試験温度に対して試験時間を 600, 1400, 4000, 7520 時間とした計 16 種類である。さらに、クリーブ損傷に伴う転位構造変化が改良 9Cr-1Mo 鋼の磁気特性に及ぼす影響を検討するために、引張試験を実施した。引張試験は試験温度 500, 550, 600, 650℃の 4 条件で行った。引張試験においては試験片に対して転位の導入がなされるため、引張試験片の磁気特性を評価することで、転位構造変化が及ぼす高クロム鋼の磁気特性へ影響を議論する。さらに、クリーブ損傷に伴う組織変化が改良 9Cr-1Mo 鋼の磁気特性に及ぼす影響を検討するために、クリーブ試験を施したクリーブ試験片を作製した。本研究において作製したクリーブ試験片は試験温度 550, 600, 650℃で様々な応力を負荷し作製した。

(2) 電磁音響特性評価

本研究において、試験片の磁気特性評価に B-H ループアナライザを用いて行った。外径 3mm、長さ 30mm の円柱状試験片を対象とし、交流磁気特性を評価した。組織変化の周波数依存性を調査するため、試験周波数は 1, 3, 5, 10, 30, 50, 100, 200 kHz で行った。

また、音響特性については、5MHz の圧電探触子を用いて音速を評価した。

(3) 非線形渦電流法による測定

交流磁気特性に関する知見に基づいて、電磁非破壊手法の一つである非線形渦電流法を適用した。測定システムの概略図を図 1 に示す。励磁コイルと検出コイルを同軸に配置した上置プローブを試験片上に配置し、交流電流を流す。コイルにより発生する磁場により試験片が磁化される。その際の磁化過程は相互誘導作用により検出コイルの電圧として検出される。本研究ではコイルの芯にフェライトコアを用いることでより強い磁場範囲で測定する。測定により、励磁電圧及び検出電圧からなるリサージュ波形(ヒステリシス相当曲線)を得る。このヒステリシス相当曲線から比較的容易にヒステリシスの変化を調べることができる。ここで、ヒステリシス相当曲線において、磁気ヒステリシス曲線の残留磁磁化に相当する点の電圧値を残留磁束磁化相当と定義する。

使用したプローブは励磁コイルが外径 2mm、内径 1mm、長さ 2mm、巻き数 200

のパンケーキ型、検出コイルは外径 2mm、内径 1mm、長さ 2mm、巻き数 400 のパンケーキ型、フェライトコアは径が 1mm、長さ 7mm の円柱状である。

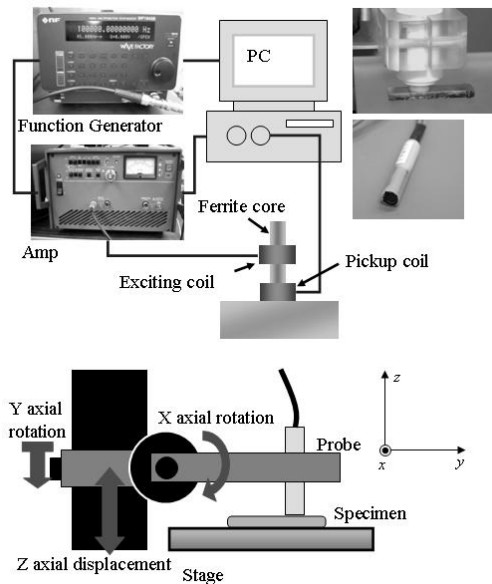


図 1. 非線形渦電流法の測定システム。

(4) 電磁超音波-渦電流マルチセンサ

図 2 に電磁超音波 (EMAT) の構造と原理を示す。図 2 に示されるコイルに高周波パルス電流を流すと、試験体の表面近傍には渦電流が誘導される。ここに、永久磁石により試験体表面に垂直な静磁場を印加すると試験体表面に平行なローレンツ力が発生し、試験体中を横波が伝播する。超音波の受信は上記の逆過程によりコイルに発生する電圧を検出することにより行う。この送受信の過程により、EMAT は接触媒体を使用せずに非接触での測定が可能である。

一方、ECT は励磁コイルに交流電流を流すと交流磁束が発生し、電磁誘導によって試験体の内部に渦電流が誘導される。試験体の電磁特性に依存して渦電流の流れ方が変わり、検出コイルのインピーダンスが変わることとなる。ここで、図 2 の EMAT 用コイルを ECT の励磁コイルとして用いることで、ECT プロブとしても機能する。また、相互誘導形の ECT プロブは励磁コイルと検出コイルから構成される。図 2 に電磁超音波-渦電流複合プロブの構造の一例を示す。この図においてコイル 1 を EMAT の送受信コイルと ECT の検出コイルに使用し、その上部に ECT の励磁コイルのコイル 2 を、最上部に永久磁石を配置することにより、極めて単純な構造を持った複合プロブが構成できる。

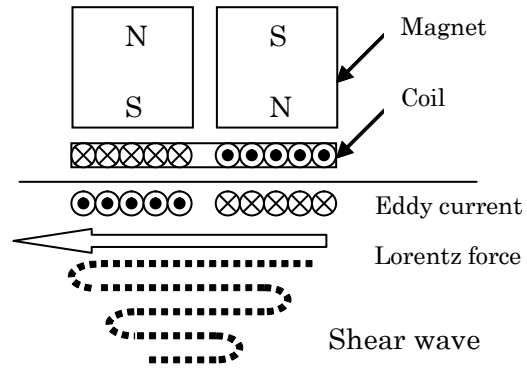


図 2. EMAT の原理

4. 研究成果

(1) 交流磁気特性

熱時効試験片、引張り試験片、クリープ試験片の交流磁気特性を様々な試験周波数で測定し、相互に比較することにより、析出物と転位構造が磁気特性に与える影響を評価した。その結果、1) 転位、析出物などの磁区ピン止め点の特徴長さに対応して敏感な周波数帯が存在すること、2) 適切に選んだ周波数における磁気パラメータは、転位密度、析出物と相関すること、の 2 点を見いだした。図 3 は、比較的高い周波数帯域である 50kHz における熱時効試験片とクリープ試験片の残留磁化相当と Larson-Miller パラメータ (LMP) について整理したものである。熱時効試験片は、LMP の増大に伴い、残留磁化が増加する。これは M23C6 型炭化物の粗大化によることが、SEM 観察により確認された。一方、クリープ試験片については同様の傾向は確認できなかった。これは、MX 窒炭化物の減少によるものと推定される。図 4 は、クリープ試験片について 5kHz における残留磁化相当と転位密度と関連する X 線回折ピークの積分幅との関係を示したものであり、転位の回復に伴い残留磁化相当が上昇することがわかる。

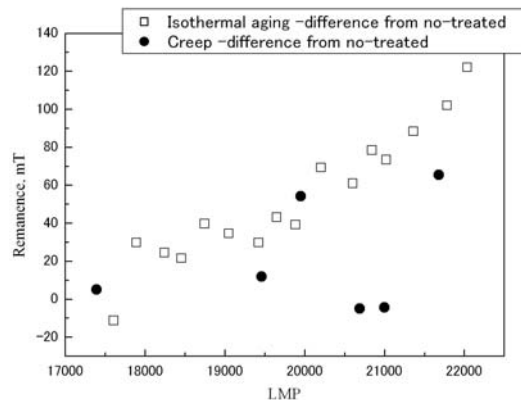


図 3 LMP と残留磁化(50kHz) との関係。

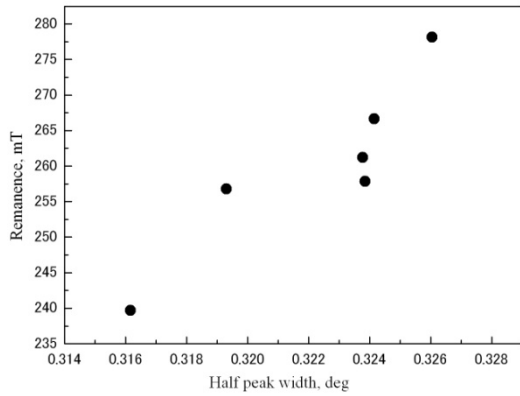


図4. X線回折ピーク積分幅と残留磁化との関係(5kHz)

(2) 音響特性

熱時効試験片について音速値を測定したところ、LMP との間に明確な相関は確認されなかった。熱時効図5にクリープ試験片の横波音速とX線回折ピーク積分幅との関係を示す。時効試験により改良9Cr-1Mo鋼のM23C6型炭化物の総量は増加せず、粗大化する。従って、音速値に大きな影響を及ぼさないものと考えられる。熱時効図5にX線回折ピーク積分幅と横波音速との関係を示す。転位構造と音速には相関があると考えられ、今後そのメカニズムを議論する必要がある。

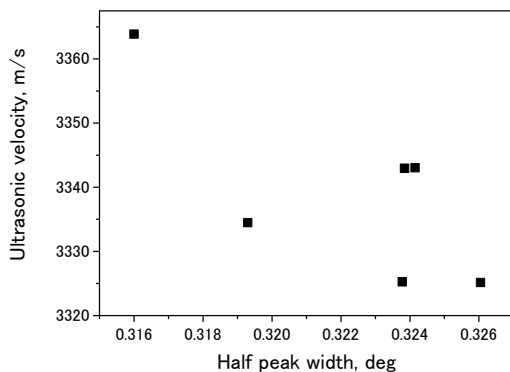


図5. X線回折ピーク積分幅と横波音速との関係

(3) 非線形渦電流法による測定

非線形渦電流法を用いた析出物変化の評価可能性を検討するため、50kHzにおける測定を行った。磁気特性評価の場合と同様に、LMP と残留磁化相当との関係を調査した。結果を図6に示す。図6から、B-Hループアナライザを用いた磁気特性評価の場合と同様に、LMPの増加に伴い残留磁化相当が増加していることが分かる。同様に

非線形渦電流法を用いた転位密度評価可能性を検討するため、5kHzにおける測定も行った。B-Hループアナライザを用いた磁気特性評価の場合と同様に、転位密度及び粒径の回復に伴い残留磁化相当が減少していることが確認できた。

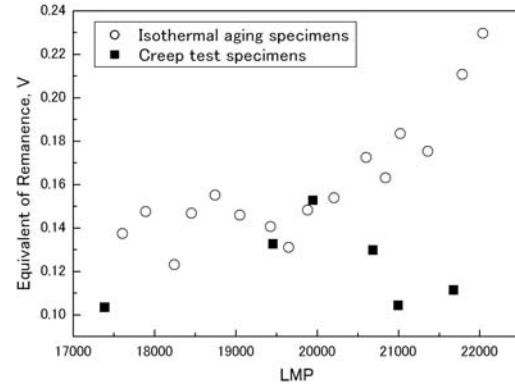


図6. LMPと残留磁化相当(50kHz)との関係

(4) 電磁超音波-渦電流マルチセンサの試作と評価

電磁超音波-渦電流マルチセンサを設計し、図7に示す構造と寸法のセンサを試作した。

本センサを用いて、クリープ試験片の非線形渦電流法による測定と音速測定を行った。音速測定については、共鳴法を適用することにより圧電探触子による結果と同等の測定結果が得られた。一方、非線形渦電流法については、センサのサイズが大きく、十分な精度が得られないことが確認された。今後、プローブの構造をさらに検討する必要がある。

本センサを用いた材料評価の可能性を調べるため、鋳鉄の黒鉛と基地組織の評価を行った。

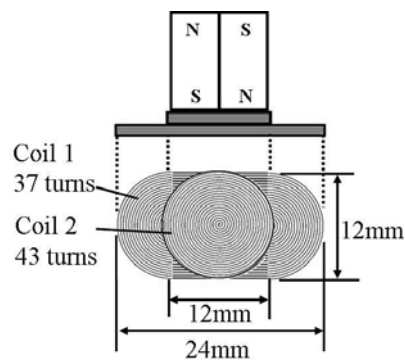


図7. 試作した電磁超音波-渦電流マルチセンサの構造と寸法

片状黒鉛鑄鉄および球状黒鉛鑄鉄を含む試験片を準備し、さらに熱処理により系統的に基地組織を変化させた。

鑄鉄の弾性率は黒鉛の球状化率と相関することが知られており、超音波伝播速度を評価することにより黒鉛球状化率を測定することが可能である。図8に、マルチセンサによって測定した横波音速と黒鉛球状化率との関係を示す。マルチセンサを用いて黒鉛球状化率が評価可能であることが確認できた。

図9にパーライト率とプローブ電圧との関係を示す。図9より、パーライト率と渦電流信号との間に相関性が見られ、パーライト率を評価することが可能であることが示された。このことからマルチセンサを用いた渦電流試験による基地組織の測定の有効性が確かめられた。

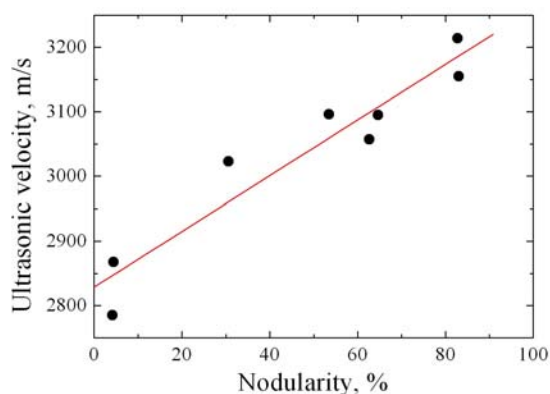


図8. マルチセンサによって測定した横波音速と黒鉛球状化率との関係

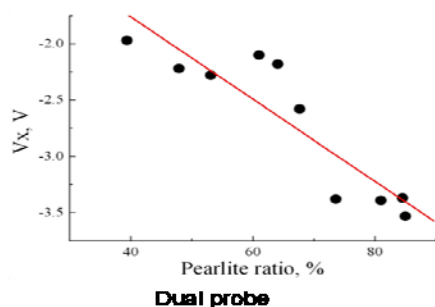


図9. マルチセンサによって測定した渦電流信号と基地組織のパーライト率との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 大瀧啓太郎, 内一哲哉, 高木敏行, 電磁超音波 - 渦電流複合プローブを用いた鑄鉄の非破壊材質評価日本機械学会論文集A編, 第76巻, 968-975頁(2010)(査読有り)

〔学会発表〕(計6件)

1. Keitaro Ohtaki, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Application of an EMAT/EC Dual Probe for Material Characterization of Cast Irons, Sixth International Conference on Flow Dynamics, 2009.11.5, Sendai.
2. Keitaro Ohtaki, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Material characterization of Cast Irons with an EMAT/EC Dual Probe, The 14th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2009.9.20-24, Xi'an, China.
3. 上野聡一, 内一哲哉, 高木敏行, 高橋由紀夫, 非線形電磁応答に基づく高クロム鋼のクリープ損傷評価, 日本機械学会東北支部第44期講演会, 2009.3.13, 仙台.
4. 大瀧啓太郎, 内一哲哉, 高木敏行, 電磁超音波 - 渦電流複合プローブを用いた鑄鉄の非破壊材質評価, 日本機械学会東北学生会第39回卒業研究発表講演会, 2009.3.6, 秋田.
5. S. Ueno, T. Uchimoto, T. Takagi, Y. Takahashi, Evaluation of Microstructure Change by Creep Damage in High Chromium Ferritic Steels Using Electromagnetic Non-destructive Method, Proceedings of Eighth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, 2008.12.19, Sendai.
6. 上野聡一, 内一哲哉, 高木敏行, 高橋由紀夫, 電磁非破壊評価を用いた高クロム鋼のクリープ損傷に伴う組織変化の評価, 日本非破壊検査協会平成20年度秋季大会, 2008.11.5-7, pp.251-252, 多賀城.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内一 哲哉 (UCHIMOTO TETSUYA)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号: 70313038

(2) 研究分担者

なし