

# マルテンサイト系ステンレス鋼のクリープ損傷に伴う磁気ヒステリシス特性の変化

## Changes of Magnetic Hysteresis Properties due to Creep Damage in Martensitic Stainless Steel

岩手大学	木村敬	Takashi KIMURA	Non Member
岩手大学	小林悟	Satoru KOBAYASHI	Non Member
岩手大学	鎌田康寛	Yasuhiro KAMADA	Member
岩手大学	菊池弘昭	Hiroaki KIKUCHI	Member
湘南工科大学	大谷俊博	Toshihiro OHTANI	Member

Measurements of magnetic minor hysteresis loops have been performed in martensitic stainless steel subjected to tensile creep test at 120 MPa and 873 K. The minor-loop coefficients as well as coercivity, which are indicators of internal stress, sharply increase at the primary creep and show a very slow increase at the secondary creep, followed by the steady increase at the tertiary creep. A good correlation of the coefficients with creep strain clearly shows that magnetic method using minor hysteresis loops can be a possible technique for nondestructive evaluation of creep damage in the steels.

**Keywords:** Creep damage, SUS403 steel, Magnetic hysteresis, Vickers hardness

### 1. 緒言

高温高圧下で使用される発電プラントの高温機器の多くは、1960~1970年代に建設され、経年劣化(主として腐食、疲労、クリープ)が進行しているにもかかわらず、当初計画寿命を延長し運転されている。クリープは高温機器の健全性を左右する最も重要な経年劣化因子の一つである。クリープ損傷とは、高温、一定荷重(応力)下において、熱活性により材料がゆっくりと連続的に変形し、最終的には亀裂発生、破壊に至るといった現象である。この変形は微細組織の変化と歪みの累積の相互作用により関連付けられ、歪みの累積は転位運動や微細組織に支配される。

従来、クリープ損傷評価はレプリカ法によって評価されている。[1]しかし、レプリカ法は現場の熟練者の経験的な判断で行われる場合が多く、膨大な時間と労力を要する。また、限られた範囲の検査にしか適応できないという問題点がある。クリープ損傷は構成材料全体に広がり、必ずしも表面から損傷していくとは限らないため、材料内部の損傷を評価できる技術が必要である。本研究では材料内部の組織変化に敏感である磁気ヒステリシスループ(特にマイナーループ)を用いて、タービン翼や蒸気配管材などの高温高圧プラント材料として広く用いられているSUS403鋼のクリープ損傷とヒステリシス特性の相関を調べたので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 測定試料と測定条件

SUS403鋼の化学組成を表1に示す。クリープ試験は、大気中120MPaの引張応力下、873Kの高温下で行い、クリープ時間(クリープ歪み)が異なる多数の試験片を用意した(中断試験法)。クリープ歪みは必ずしもクリープ時間と良い相関を持たないため、クリープ時間は余寿命評価には不適切である。そのため、クリープ歪みと時間の関係に基づき、修正 $\theta$ 法と破断パラメータ $P_\alpha$ から破断寿命を推定し、試験終了時の余寿命消費率 $t/tr$ を求めた。[2-4]余寿命消費率はクリープ進行度を示す良いパラメータである。図1に余寿命消費率とクリープ歪みの関係を示す。ここでステージI, II, IIIはそれぞれ遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープ領域に対応する。本研究では、磁気ヒステリシス特性と余寿命消費率の関係を調べた。また、磁気特性と機械特性の相関を調べるため、試験片の表裏5点ずつ、荷重300g、10秒の条件で硬度試験を行った。

Table 1 Chemical compositions of SUS403. (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.120	0.300	0.400	0.033	0.018	0.200	11.67	Bal

連絡先: 小林 悟, 〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5,  
岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター  
e-mail: koba@iwate-u.ac.jp

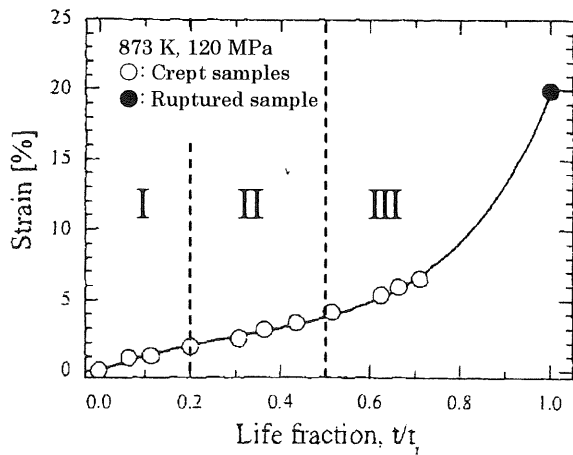


Fig. 1 Creep strain as a function of estimated life fraction in the interrupted test, taken at 120 MPa and 873K. [2]

## 2.2 磁気マイナー・ヒステリシスループ測定

磁気測定用に 2.1mm×2.1mm×14mm の角棒型に試験片を切り出し後、検出コイル 40 回を巻きつけ、磁気ヨーク(励磁コイル 80 回巻)を用いて磁気測定を行った。磁場振幅  $H_a$  が異なるマイナー・ヒステリシスループ群を 0.05Hz の励磁周波数、約 13kA/m までの磁場範囲で測定した。比較のため  $H_a=20\text{kA/m}$  の磁場振幅でメジャーループを測定した。

最近、我々は Fe 単結晶・多結晶、Ni 単結晶、低炭素鋼におけるマイナー・ヒステリシスループ解析[5-7]から、マイナーループ変数間に以下の関係があることを明らかにした。

$$W_F^* = W_F^0 \left( \frac{M_a^*}{M_s} \right)^{n_F} \quad (1)$$

ここで、 $W_F^*$  はマイナーループヒステリシス損失、 $M_a^*$  はマイナーループ飽和磁化、 $M_s$  は飽和磁化である。マイナーループ係数  $W_F^0$  は格子欠陥(転位、結晶粒界、析出物など)に敏感な物理量である。べき指数  $n_F$  は約 1.5 であり、塑性変形の度合い、温度、格子欠陥の種類に依存しない。マイナーループ係数は格子欠陥に対しメジャーループの保磁力  $H_c$  と同様の振る舞いを示すが、 $H_c$  に比べ格子欠陥に敏感であると共に、測定磁場が  $H_c$  のそれに比べ約 1/5 程度で済むというメリットある。

## 3. 実験結果

### 3.1 ビッカース硬さ試験

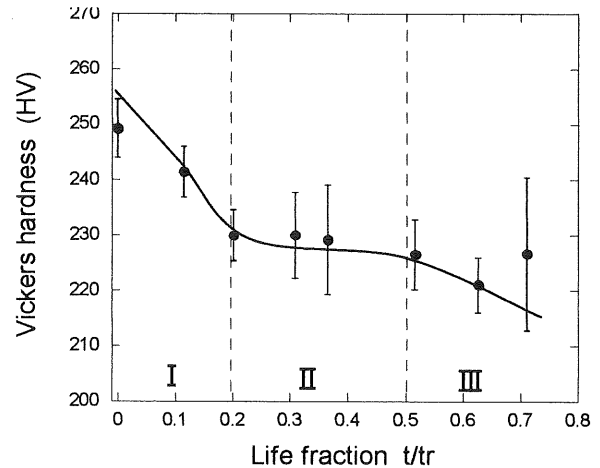


Fig. 2 Vickers hardness as a function of life fraction

図 2 にビッカース硬さの余寿命消費率依存性を示す。遷移クリープではクリープ損傷と共に硬度は急激に減少し、定常クリープで一時減少が止まった後、加速クリープで再び緩やかな減少に転ずる振る舞いが見つかった。

### 3.2 磁気ヒステリシスループ測定

図 3 に  $t/t_r=0, 0.7$  におけるメジャーループを示す。クリープ損傷に伴いループ幅(保磁力)が増加する傾向が見つかった。同様なループ幅の増加はマイナーループでも観測された。

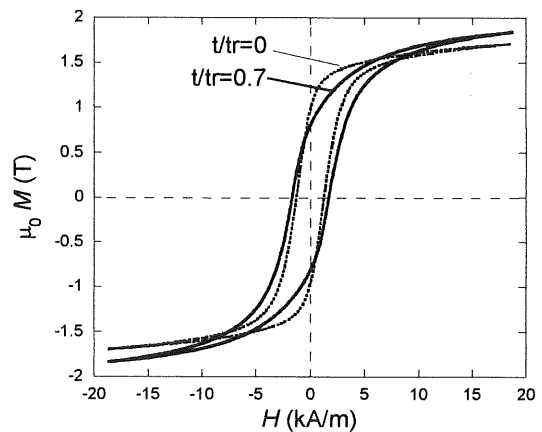


Fig.3 Major loop, taken at  $t/t_r = 0$  and 0.7.

マイナーループ係数の余寿命消費率依存性を調べるため、マイナーループ群からマイナーループ変数(図4挿入図)を決定し、 $W_F^*$  と  $M_a^*$  の関係を調べた。図4に、 $W_F^*$  と  $M_a^*$  の関係の両対数プロットを示す。第2ステージ(マイナーループ磁化  $M_a^*$  が磁場振幅  $H_a$  に対し急激に増加する磁場領域であり、非可逆的磁壁移動が磁化に寄与する領域)

域)において、 $W_F^*$ と $M_a^*$ の関係は直線になり、その傾きはクリープ損傷度に依存せず  $n_F=1.53 \pm 0.02$  であった。この値は過去の実験結果[5-7]と一致する。

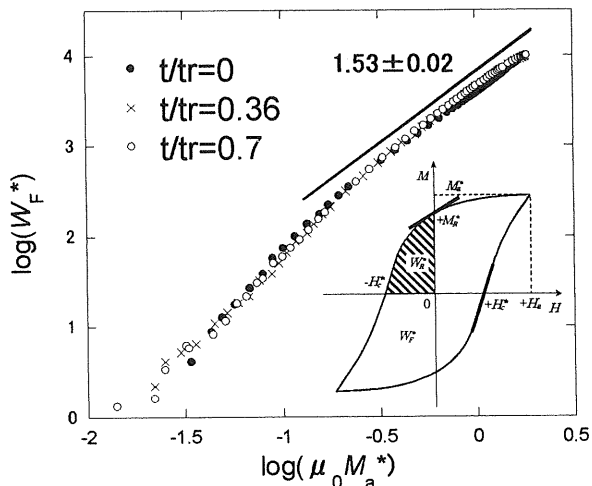


Fig. 4 Relation between  $W_F^*$  and  $M_a^*$ . The data for  $t/t_r = 0, 0.36$  and  $0.7$  are shown for typical examples.

図5に図4の直線部分を式(1)で最小二乗フィットして得られたマイナーループ係数  $W_F^0$  及び保磁力  $H_c$  の余寿命消費率依存性を示す。遷移クリープ(I)において、両者が急激に増加する振る舞いが観測された。更にクリープが進行すると、定常クリープ領域(II)で  $W_F^0$  と  $H_c$  はほぼ一定となった後、 $t/t_r=0.5$  以降の加速クリープ領域(III)で再び増加に転ずる。両磁気特性の振る舞いは、ピッカース硬さと逆の振る舞いを示した。

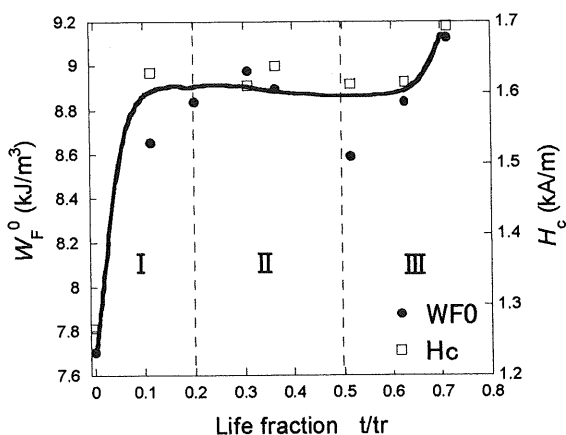


Fig.5 Minor-loop coefficient  $W_F^0$  and coercive force  $H_c$  as a function of life fraction.

#### 4. 結言

今回の実験結果から、マイナーループ係数・保磁力がクリープ損傷に伴い敏感に反応し、増加する事がわかった。これは磁気ヒステリシス法がクリープ材の損傷評価、余寿命予測に有効であることを示す。また、本研究で用いた磁気マイナーループ法は  $4\text{kA/m}$  程度の低磁場で測定でき、高磁場を必要としないためクリープ損傷評価の装置開発の点で有利である。

#### 参考文献

- [1] B. Raj, V. Moorthy, T. Jayakumar, R.K. Bhanu Sankara, Int. Mater. Rev. 48 (2003) 273.
- [2] T. Ohtani, J. Soc. Mater. Sci. Jpn. 56 (2007) 114.
- [3] K. Maruyama, C. Harada, H. Oikawa, J. Soc. Mater. Sci. Jpn. 34 (1985) 1289.
- [4] K. Maruyama, H. Oikawa, Trans. ASME J. Pressure Vessel Tech. 109 (1987) 142.
- [5] S. Takahashi and L. Zhang, J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 1567.
- [6] S. Kobayashi, T. Fujiwara, M. Tsunoda, S. Takahashi, H. Kikuchi, Y. Kamada, K. Ara, and T. Shishido, J. Mag. Mag. Mater. 310 (2007) 2638.
- [7] S. Takahashi, S. Kobayashi, H. Kikuchi, Y. Kamada, J. Appl. Phys. 100 (2006) 113908.