

# 磁気的手法による SUS304 鋼の高温疲労初期損傷評価

## Evaluation of Initial Fatigue Damage of SUS304 Stainless Steel at Elevated Temperature by a Magnetic Method

日本原子力研究開発機構 高屋 茂 Shigeru TAKAYA Member  
日本原子力研究開発機構 永江 勇二 Yuji NAGAE Member

We investigated the relationship between magnetic properties and the accumulation of fatigue damage at elevated temperature for SUS304 stainless steel. The strain-controlled push-pull fatigue tests at 923 K under total strain range conditions of 0.4%, 0.5% and 0.7% were implemented. The leakage magnetic flux density was also measured before and after each fatigue test. As result, it was shown that the maximum differences in leakage magnetic flux density before and after the fatigue test subsequently increased proportionally with the loading cycles under all total strain range conditions, although its rate depended on the total strain range. Furthermore, we proposed that this difference was proportional to the estimated accumulation energy independent of the total strain range. This shows the possibility of a non-destructive evaluation of fatigue damage before crack formation.

**Keywords:** Non-destructive Evaluation, Fatigue Damage, Elevated Temperature, Magnetic Method, SUS304 Stainless Steel

### 1. 緒言

損傷がき裂として顕在化する前に、その損傷程度を非破壊で評価できれば、保全活動の選択肢が広がることによりプラントの安全性・経済性が向上すると期待される。

高速増殖炉構造材料の候補材料のひとつであるオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304 鋼) に関しては、機械的負荷を加えることにより、常磁性を示す FCC 相から強磁性を示す BCC 相に無拡散相変態 (マルテンサイト変態) することによって、磁気特性が変化することが知られており、この現象を利用したき裂発生前劣化評価手法の開発が行われている[1]。ただし、マルテンサイト変態が起こる上限温度が 623 K 程度であるため[2]、評価対象の多くは常温以下の環境における劣化であった。

しかしながら、最近の我々の研究により、上とは機構が異なると考えられるものの、900 K 程度の高温環境におけるクリープ損傷や疲労損傷によっても、SUS304 鋼の磁気特性が変化することが明らかにされ[3,4]、高速増殖炉のような高温環境の劣化に対しても、

磁気特性変化を利用した劣化評価手法を適用できる可能性が示された。

そこで、本研究では、全ひずみ範囲の異なる疲労試験を 923 K の高温環境下で実施し、さらに磁束密度測定を行なうことにより、磁気特性を用いた SUS304 鋼の高温疲労初期損傷の定量的評価の可能性について検討する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験片

供試材には、熱間圧延した後、1050℃で 0.2 時間保持し、その後水冷することによって溶体化処理を施した SUS304 鋼 (C:0.05, Si:0.57, Mn:0.86, P:0.027, S:0.002, Ni:8.92, Cr:18.43, Fe:bal.(wt%)) を用いた。試験片形状を Fig.1 に示す。試験片は軸方向が素材の圧延方向と一致するように採取した。また漏洩磁束密度の測定が容易なように、平行部を平板形状とした。

#### 2.2 高温環境下疲労試験

高温環境下疲労試験の試験条件を Table 1 に示す。本研究では、高温環境下疲労損傷による磁気特性変化の全ひずみ範囲依存性を調べるために、全ひずみ範囲 ( $\epsilon_f$ ) を 0.4, 0.5, 0.7% の三条件とした。さらに負荷サイクル

連絡先：高屋茂、〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002、日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門材料技術開発グループ、  
電話：029-267-4141、e-mail: takaya.shigeru@jaea.go.jp

数による変化を調べるために、各全ひずみ範囲に関して、遷移硬化領域まで、破損推定サイクル ( $N_f$ ) の 1/4 サイクルまで、および同 1/2 サイクルまでの試験を実施した。ここで、破損サイクルとは、引張側最大応力が定常値から 25%低下するサイクル数として定義した。今回試験に供した素材の破損サイクルは、既実施試験データより、全歪み範囲 0.4, 0.5, 0.7%の各条件に関して、約 68,000 サイクル、約 16,800 サイクル、約 4,800 サイクルと推定される。

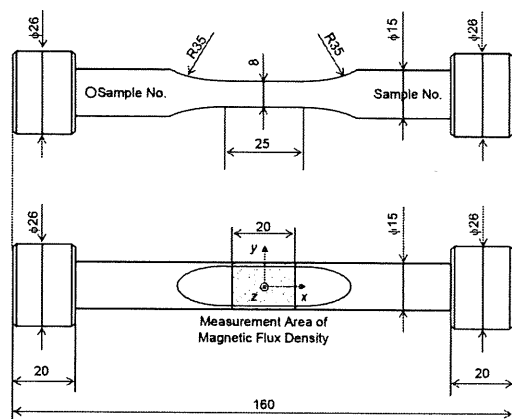


Fig. 1 Fatigue test specimen dimensions and the magnetic flux density measurement area

Table 1 Conditions of fatigue test at elevated temperature

Temperature (K)	923
Atmosphere	Air
Total strain range (%)	0.4, 0.5, 0.7
Strain rate (%/s)	0.1
Strain waveform	Triangular

### 2.3 磁束密度変化測定

サイクル数の増加に伴う疲労損傷の蓄積による磁気特性変化を調べるために、疲労試験実施前後に磁束密度分布の測定を行った。測定領域を Fig.1 に示す。変動交流磁場を用いて試験片を消磁した後、約 0.1T の外部磁場により軸方向に着磁を行い、その後、残留磁化状態で磁束密度の軸方向成分を測定した。磁束密度の測定には、島津製作所製薄膜フラックスゲートセンサ[5]を用いた。センサの検出感度は約 50 nT、センササイズは 2.5 mm×2.5 mm である。試験片表面-センサ間の距離は約 0.5mm とした。なお、測定は試験片を疲労試験機から取り外し、室温環境下にて実施した。

### 3. 実験結果と考察

9本の試験片を疲労試験に供し、Table 2 に示したサイクル数にて試験を終了した。

本研究に用いた SUS304 鋼中には溶体化処理後も強磁性体である  $\delta$  フェライトが 1%前後存在しており、場所によって磁束密度が若干異なっている。そのため、疲労試験の実施前にも磁束密度測定を行い、疲労試験実施後の測定結果から実施前の測定結果を差し引くことで、高温環境下疲労損傷による正味の磁束密度変化量を求めた。また、本研究のように、試験片の軸方向に試験片を着磁し、磁束密度の軸方向成分を測定する場合、疲労損傷集中部と関係するような局所的な磁化の直上で、着磁方向と逆方向の磁束密度が測定される (Fig.2)。そこで、疲労試験前後の測定結果から求めた正味の磁束密度変化が負になる領域のみに着目することとした。ただし、着磁方向に向く磁束密度を正とする。

Fig.3 に、負荷サイクル数と測定領域内における磁束密度の負への最大変化量 (絶対値) との関係を示す。ここで、図中の Side A, B は、試験片の二つの平滑面を示し、疲労試験機に取り付けた際の空間的關係から便宜的に定義した。まず、遷移硬化領域までで試験を終了した試験片では、いずれも磁束密度はほとんど変化しなかった。試験開始から遷移硬化領域までにおいて

Table 2 The cycles to finish fatigue tests

	$\epsilon_t=0.4\%$	$\epsilon_t=0.5\%$	$\epsilon_t=0.7\%$
Transition hardening stage	103	105	53
~1/4Nf	14910	3005	1204
~1/2Nf	33005	8005	2405

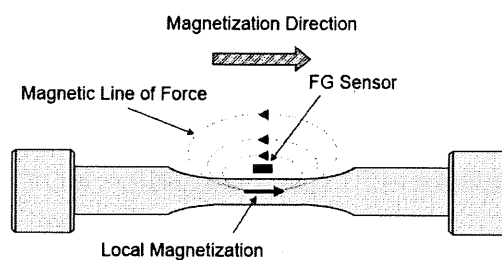


Fig.2 Direction of the magnetic line of force due to local magnetization

は、材料内の転位密度が増加し加工硬化が起こるが、このような遷移硬化領域までの転位密度の増加が、磁気特性の急激な変化を導くわけではないことがわかる。一方、試験開始から  $1/2N_f$  サイクルまでに関しては、磁束密度の最大変化量が、いずれの全ひずみ範囲に関しても、サイクル数の増加に伴い、線形に増加することが示された。ただしその傾きは、全ひずみ範囲に依存しており、磁束密度の最大変化量を  $\Delta B_{\max}$ 、サイクル数を  $N$  とすると、両者には次の関係が成り立っていることがわかる。

$$\Delta B_{\max} = a(\varepsilon_f)N \quad (1)$$

係数  $a$  の全ひずみ範囲依存性を明らかにできれば、(1)式の関係を用いることにより、磁束密度の最大変化量から、負荷サイクル数および破損するまでのサイクル数を推定することが可能になる。しかしながら、実環境においては、全ひずみ範囲が変化することも考えられ、(1)式に基づく損傷評価は現実的ではないと思われる。

我々は、最近、高温環境下疲労試験片の透過型電子顕微鏡および磁気力顕微鏡観察を行うことにより、高温環境下疲労損傷による磁気特性変化の原因が、損傷集中部における FCC 相から BCC 相への相変態であることを明らかにした[3]。相変態が起こるためには、新しい界面生成エネルギー等の駆動力が材料内部に蓄えられる必要がある。このことから、相変態による磁気特性変化と疲労による蓄積エネルギーの間には、強い

相関があると考えられる。

疲労により材料内部に蓄積されるエネルギーを考える前に、簡単のため、Fig.4 に示す単軸引張により蓄積されるエネルギーを考える[6]。O→A→B の過程に材料内部に散逸されるエネルギーを  $\Phi$  とすると、 $\Phi$  は次式で求められる。

$$\Phi = \int_0^{\varepsilon^e + \varepsilon^p} \sigma d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma^* \varepsilon^e \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon^e$  は弾性ひずみであり、 $\varepsilon^p$  は塑性ひずみである。(2)式右辺第一項は材料に投入された全エネルギーを表し、同じく第二項は A→B の過程で開放される弾性エネルギーを表している。降伏点以降の応力を初期降伏応力  $\sigma_Y$  と等方硬化係数  $R(\varepsilon)$  を用いて、

$$\sigma = \sigma_Y + R \quad (3)$$

のように表せるとすると、(2)式は次のように変形することが出来る。

$$\Phi = \int_0^{\varepsilon^p} \sigma_Y d\varepsilon + \int_0^{\varepsilon^p} R d\varepsilon \quad (4)$$

ここで、右辺第一項は主に熱として散逸するエネルギーであり、第二項が材料内部に蓄積されるエネルギーである。

本研究では、疲労の場合も引張の場合と同様に蓄積エネルギーを評価できるとし、1 サイクルあたりに材料内部に蓄積するエネルギーを次式により推定した。

$$\Phi_{\text{accum.}} = 2 \times \int_0^{\varepsilon^p} (\sigma - \sigma_Y) d\varepsilon \quad (5)$$

全ひずみ範囲 0.4, 0.5, 0.7% に関して、測定によって

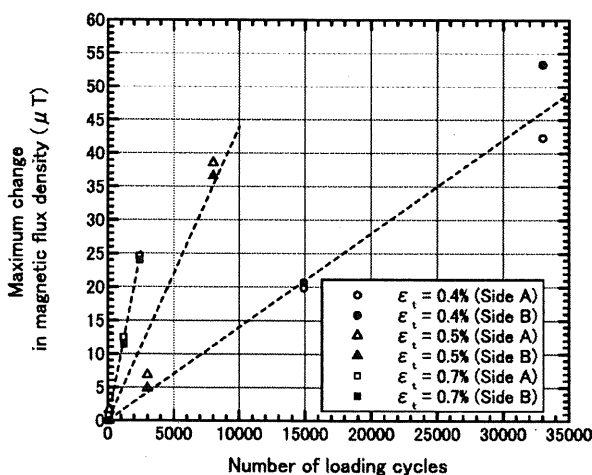


Fig.3 Number of loading cycles versus maximum change in magnetic flux density during the fatigue tests conducted at 923 K.

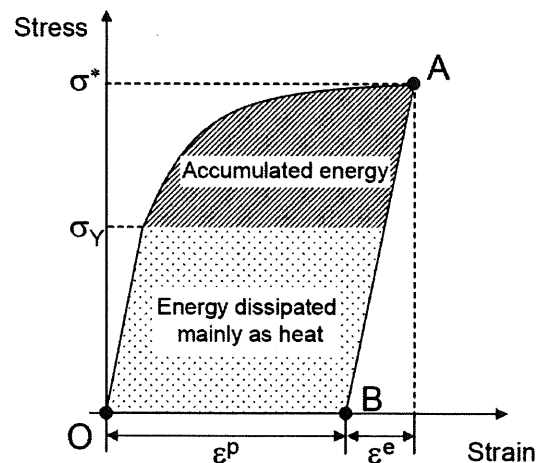


Fig.4 Schematic diagram of energy accumulated due to simple uniaxial tensile loading.

得られた応力ひずみ曲線から(5)式を用いて求めた1サイクルあたりの推定蓄積エネルギー密度は、それぞれ、0.115, 0.164 および 0.511  $\text{mJ}/\text{mm}^3$ であった。材料内部の総蓄積エネルギー  $U$  が、1サイクルあたりに蓄積されるエネルギー  $\Phi_{\text{accum}}$  にサイクル数  $N$  をかけて求められるとすると、

$$U = \Phi_{\text{accum}} \cdot N \quad (6)$$

となる。このようにして推定した蓄積エネルギーと、Fig.3 に示した磁束密度の最大変化量との関係を Fig.5 に示す。この図より、我々は、磁束密度の最大変化量と蓄積エネルギーの間に次の関係が成り立つことを提案した。

$$\Delta B_{\text{max}} = bU \quad (7)$$

ここで  $b$  は、(1)式中の係数  $a$  と異なり、全ひずみ範囲によらない係数であり、最小自乗法を用いて、 $b = 14.44 \mu\text{T}/(\text{J}/\text{mm}^3)$  と求められた。また近似線と実験値との相関係数は、0.90 であった。

どのような負荷様式の場合でも、微視的き裂発生までに蓄えられるエネルギーは同一である ( $U_c$ ) と考えると[6、7]、磁束密度の最大変化量を測定することにより、微視的き裂発生までに必要な残りのエネルギー  $\Delta U$  を、次式を用いて推定可能であると思われる。

$$\Delta U = U_c - \Delta B_{\text{max}} / b \quad (8)$$

(8)式は、全ひずみ範囲に依存しないことから、(1)式に基づく損傷評価に比べて、実環境への適用可能性が高いと考えられる。

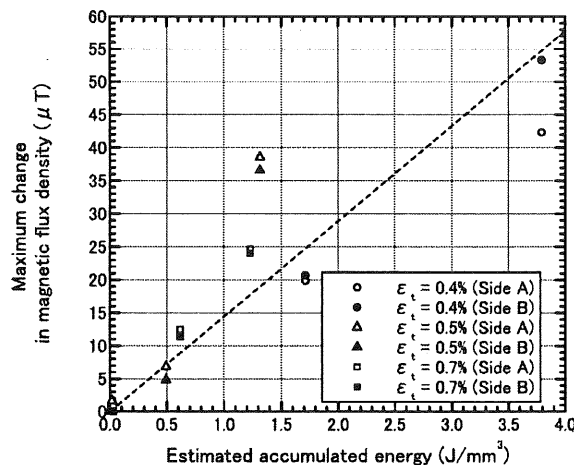


Fig.5 Estimated accumulated energy versus maximum change in magnetic flux density during the fatigue tests.

### 3. 結言

923 K の高温環境下において疲労試験を実施し、その前後で磁束密度測定を行うことによって以下の結論を得た。

- 1) 磁束密度の最大変化量が、サイクル数に線形に増加することを示した。ただし、その傾きは全ひずみ範囲に依存する。
- 2) 疲労による蓄積エネルギーを推定し、蓄積エネルギーと磁束密度最大変化量の間に関係があることを提案した。
- 3) 上記提案関係に基づき、磁束密度最大変化量から微視的き裂発生までに必要なエネルギーを定量評価できる可能性が示された。

### 謝辞

疲労試験を実施していただいた常陽産業の矢口様に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] Z. Chen, K. Aoto, S. Kato, Y. Nagae, and K. Miya, "An experimental study on the correlation of natural magnetization and mechanical damage in an austenitic stainless steel", *Int. J. Appl. Electrom*, Vol.16, 2002, pp.197-206.
- [2] K. Mumtaz, S. Takahashi, J. Echigoya, L. Zhang, Y. Kamada, M. Sato, Temperature dependence of martensitic transformation in austenitic stainless steel, *J. Mater. Sci. Lett.*, Vol.22, 2003, pp.423-427.
- [3] S. Takaya, Y. Nagae, Magnetic property change of type 304 stainless steel due to accumulation of fatigue damage at elevated temperature, *Int. J. Appl. Electrom*, submitted.
- [4] 永江勇二、青砥紀身、"SUS304 鋼の高温損傷による磁気特性および金属組織変化"、*材料*、Vol.54、2005、pp.116-121.
- [5] 吉見健一、藤山陽一、務中達也、山田康晴、中西博昭、吉田多見男、"小型薄膜フラックスゲート磁気センサとその応用"、*島津評論*、Vol.56、No.1・2、1999、pp.19-28.
- [6] 村上澄男、"連続体損傷力学 — 損傷・破壊解析の連続体力学的方法 —"、出版予定.
- [7] 伊原千秋、五十嵐健人、"低炭素鋼の高サイクル疲労におけるき裂発生モデル"、*材料*、Vol.29、No.320、1980、pp.434-438.