

# 微小試験片による引張強度とひずみの評価

Evaluation of tensile strength and strain using small specimens

鈴木 茂和・木下 博嗣

福島工業高等専門学校機械工学科

Shigekazu SUZUKI and Hiroshi Kinoshita

National Institute of Technology, Fukushima College, Department of Mechanical Engineering

(2015年10月11日受理)

Small specimen test technology (SSTT) is a key technique in evaluating the irradiation performance of reduced-activation ferritic/martensitic (RAF/M) steels used in fusion demonstration plants. Because SSTT results are rather sensitive to surface finishing conditions (mechanical damage, roughness and dimensional accuracy), the effect of surface finishing on tensile data was examined. Sheet tensile specimens were 5-mm-long, 1.5-mm-wide, and 0.76-mm-thick gage sections (SS-J3 type) prepared from 15-mm-thick plates of RAF/M steel F82H (F82H-B07 heat). SS-J3 specimens were obtained from the plates by wire electro-discharge machining (WEDM). Tensile tests were conducted at a nominal strain rate of  $3.33 \times 10^{-4}$  /s. The ultimate tensile strength values were 645 MPa (standard deviation of 16 MPa) for the 15-mm-thick plates. The area reduction of the 15-mm-thick plates was 0.76 in natural strain.

**Key words:** Small specimen, Tensile strength, True fracture strain

## 1. はじめに

現代社会はエネルギー大量消費社会であり、年々消費量が増加している。家庭や企業に供給されているエネルギーの多くは火力発電、水力発電、原子力発電などによって賄われている。しかし、火力発電は原料である化石燃料の枯渇問題など長期的な供給の面で不安があり、水力発電は施設費用や発電効率の問題がある。原子力発電の場合、高レベルの放射性廃棄物の処分や放射能漏れ対策などが問題である。

そこで、新エネルギーとして資源が無尽蔵であり、暴走事故が本質的に起こりえない核融合による発電が注目されており、日本と欧州の共同研究が進められている。核融合炉ではブランケットと呼ばれるプラズマを包む容器があり、冷却や燃料生産、遮へいの機能を担う重要な構造物である。核融合炉ブランケット材として有力視されている低放射化フェライト鋼(F82H-BA07)の強度特性を明らかにし、データを蓄積する事が求められている。

しかしながら、引張強度に関する評価は主に強度に注目しており、伸び・ひずみに関する評価は少ない<sup>1)</sup>。また、原子力炉や核融合炉材料開発にはJISの標準試験片ではなく微小試験片が用いられている。これは材料開発

において、試験炉や加速器を用いて照射試験を行い、イオンや中性子が材料に与える影響を調べる必要<sup>2)</sup>があり、その際には有効スペースが小さいため、小さな試験片に照射が行われる。さらに照射後も強度試験等が必要であることから微小試験技術<sup>3),4),5)</sup>が必要であり、放射性廃棄物の低減にも役立つ。また、高経年化発電機器における余寿命評価においては、供用中部材からの切出し片や廃材から製作された微小試験片が用いられているが、微小試験片の作製条件について明確な規定がない。

そこで、本研究では、微小試験片作製条件の検討と引張強度および真破断ひずみの評価を行う。

## 2. 実験条件

### 2.1 供試材

供試材のF82H鋼は、原子力研究開発機構が開発を進めてきた核融合炉用構造材料である。ボイラー用耐熱鋼である改良9Cr-1Mo鋼をベースとした合金であり、低誘導放射化のためにMoをW、NbをTaに置換したものである。そのため、基本的な特性としては、改良9Cr-1Mo鋼に近い特性<sup>1)</sup>となっている。主な組成は、0.1% C, 0.1% Si, 0.45% Mn, 8% Cr, 1.85% W, 0.2% V, 0.04% Ta, 0.01% B, 0.02% Nである。

材料は、溶解後に二次精錬，拡散処理を行い，topφ250/botφ200×L600の形状で铸造後，φ175×L1200の形状に鍛造し，切断，切削を行い，厚さ90mmまで鍛造後，厚さ15mmまで熱間圧延と熱処理を行ったF82H鋼を原子力機構から供給を受けた。

## 2.2 試験片作製条件

本研究において使用する試験片の形状を Fig. 1 に示す。この試験片の形状は，核融合炉材料開発において日本国内で共通で使用されている SS-J3 (Small Specimen - Japanese 3 type) 形状である。

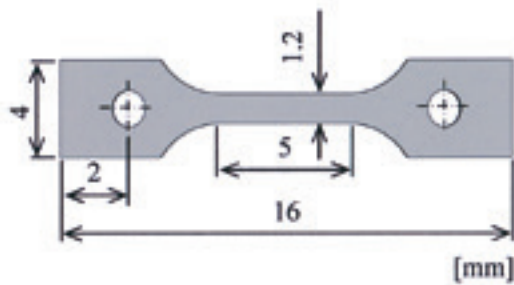


Fig. 1 Shape and dimensions of small specimen (SS-J3 type)

試験片は以下に示す手順で作製した。

- 1) 材料の素材表面に酸化膜があるため，汎用フライス盤により表面を約2mm切削する。
- 2) 治具ピン及びワイヤ放電加工用の下穴を汎用フライス盤で加工する。
- 3) ワイヤ放電加工により Fig. 2 に示す素材厚さの試料原型を2回の走査で作製する。
- 4) 試験片ブロック側面を，耐水研磨紙を使用して研磨する。
- 4) ワイヤ放電加工により厚さ1.35mmに加工する。
- 5) 加工層の除去及び厚さ調整のため耐水研磨紙による研磨と粒径0.3μmのアルミナを使用してバフ研磨を行う。
- 6) 光学顕微鏡で表面に研磨傷が無いことを確認する。

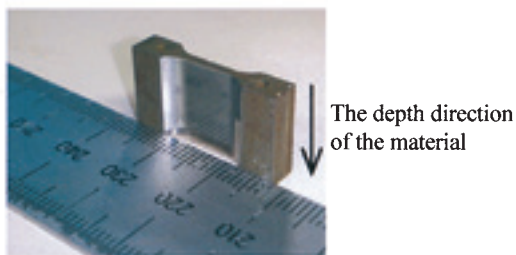


Fig. 2 Specimen block (polished the side surface)

ここで，微小試験片の表面粗さが引張強度に与える影響を確認するため，側面研磨の条件を変えて試験片を作製した後に引張試験を行い，最適条件の検討を行った。側面研磨の条件とその時の表面粗さは以下の通りである。試験片作製に当たり，試験片の表面は耐水紙研磨後に粒径0.3μmのアルミナを使用したバフ研磨による仕上げで統一した。

- ①放電加工面状態 (Ra 2.46 μm)
- ②化学研磨 (Ra 0.56 μm)
- ③耐水紙研磨 #240~#4000 (Ra 0.08 μm)
- ④耐水紙研磨 (#240~#4000) 後に化学研磨 (Ra 0.15 μm)

## 2.3 引張試験条件

引張試験はインストロン社製 44R3382 試験機を用いた。ひずみ速度  $3.33 \times 10^{-4}$  で行い，CCDカメラ形式のインストロン社製非接触伸び計 AVE を用いてひずみの計測を行った。一般的な引張試験においてはひずみゲージやクリップ式の伸び計が使用されるが，試験片の幅が1.2mmととても小さくこれらを使用する事ができないため，非接触により伸びを計測する。非接触伸び計は試験片表面にあるマークの変位を計測するため，標点間距離5mmでマークをつけた。

試験片の取り付けに際して，余ひずみを与えると正確な引張強さや伸びを計測する事ができないため，余ひずみを与えないよう，Fig. 3 に示すように治具を使用して試験機に取り付けた。Fig. 3(a) に示すような真鍮製のガイドに治具を固定した状態で試験片を取り付け，Fig. 3(b) に示すようにガイドを固定したまま試験機に取り付ける。治具を試験機に固定したあとにガイドを取り外して引張試験を行う。

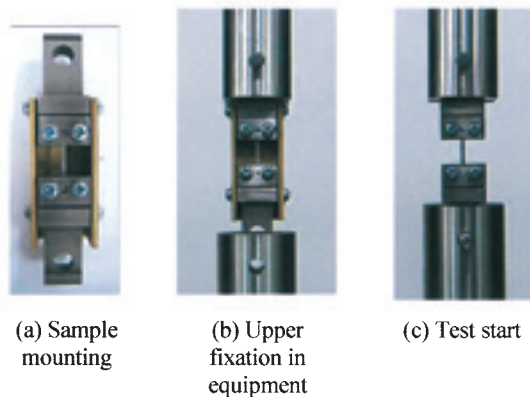


Fig. 3 Jig for tensile tes. 4 試験片採取位置

F82H 鋼は鍛造および圧延加工を行っていることから異方性を有していることが考えられる。そこで、引張試験を行うに当たり、Fig. 4 に示すように素材を4等分し中央部 (c) と端部 (e) に分け、さらにそこから圧延方向と平行 (L 方向) と直行 (T 方向) 方向の試験片を切り出して評価を行った。

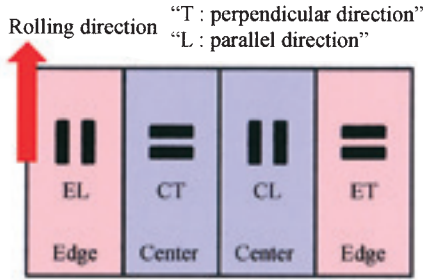


Fig. 4 Specimen sampling positions and orientations

## 2.5 真破断ひずみの評価

延性材料の単軸引張試験において、材料の変形は荷重の増加と共に弾性変形から塑性変形に変化する。さらに荷重を増加させることによって均一変形のまま極大値に達するが、その直後には材料の一部だけが急激に変形するくびれが発生し、局部変形が生じる。くびれが生じると極めて狭い領域にひずみが集中し最終的に破断に至る。このような挙動は塑性不安定と呼ばれている<sup>2)</sup>。

局部変形発生以降のひずみは伸び計で評価する事が困難であることから、破断後の断面積を用いて真破断ひずみの評価を行う。

金属材料の塑性変形は結晶面のすべりによって生じるため体積一定則が成立する。そのため、変形前の体積とある瞬間の体積の関係は次式で表される。

$$A_0 \times L_0 = A \times L \quad (1)$$

ここで、 $A_0$ :変形前の断面積、 $L_0$ :変形前の長さ、 $A$ :変形後の断面積、 $L$ :変形後の長さである。

また、真ひずみ $\varepsilon_t$ と公称ひずみ $\varepsilon_n$ は次式で表される。

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (2)$$

(2)式を $L$ と $L_0$ を用いて表すと次式の通りとなる。

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (3)$$

従って、(1)式と(3)式から断面積と真ひずみの関係は

以下の通りとなり、引張試験後に試験片の破断面積を計測する事で真破断ひずみの評価を行う。

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (4)$$

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 側面研磨の影響

研磨条件を変えた試験片の引張強さと伸びの関係を Fig. 5 に示す。表面粗さが小さくなると、引張強さと均一伸びは大きくなる傾向を示しているが、④の耐水紙研磨後に化学研磨した条件が最も大きな値を示した。これは、化学研磨によって耐水研磨による若干の加工ひずみが除去されたのと、角部が除去されたためだと推測される。

サイズ効果を調べるために試験片形状が大きくなった場合や、照射実験等での実務レベルでは化学研磨処理まで実施することは困難であるので作業性を考慮すると、耐水研磨が最適であると考え、本研究において試験片側面仕上げ条件は③の耐水研磨とする。

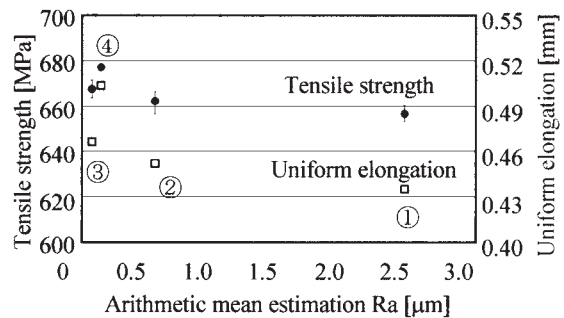


Fig. 5 Surface roughness and tensile properties

### 3.2 ひずみと引張強度の評価

代表的な引張試験の結果を Fig. 6 に示す。最大応力を示した後にくびれを生じ、一般的な延性金属と同様の傾向を示した。ここで、ひずみの評価に当たり、最大応

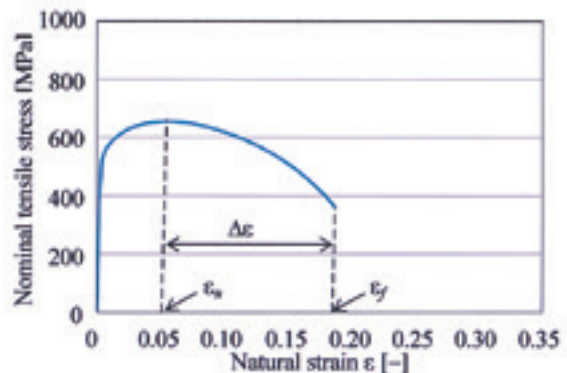


Fig. 6 Stress-strain curve

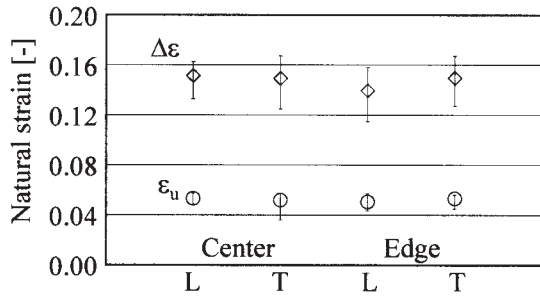


Fig. 7 Dispersion of natural strain

力値 $\sigma_{max}$ におけるひずみを $\epsilon_u$ , 破断時におけるひずみを $\epsilon_f$ , 局部変形が生じている間のひずみを $\Delta\epsilon$ と定義する。

$\epsilon_u$  および $\epsilon_f$  の評価に当たり, 採取位置の影響を調べるため, 採取位置と $\epsilon_u$ ,  $\Delta\epsilon$  の関係を Fig. 7 に示す.  $\epsilon_u$  は採取位置の影響を受けず  $\epsilon_u = 0.05$  の一定値を示した. そのときの標準偏差は 0.008 であり, ばらつきが非常に小さいことがわかった. また,  $\Delta\epsilon$  は平均で約 0.147, 標準偏差が 0.016 と  $\epsilon_u$  の 2 倍のばらつきであることがわかった. これは, 局部変形領域では, 幾何学的な形状変化による部分的な剛性の低下や, 材料内部のき裂進展に伴う瞬時的剛性の低下が影響していると考えられる. また, 試験片断面が矩形であることから, 完全な長方形断面の試験片作製は不可能であり, ミクロンオーダーで断面形状のばらつきがあり, それが, 局部変形時のばらつきに影響しているものと考えられる.

それぞれの試験片採取位置における素材深さ方向の引張強さの分布を Fig. 8 に示す. 試験片採取位置の影響をほとんど受けず引張強さは平均で 645MPa が得られた.  $\pm 20\text{MPa}$  程度のばらつきが観察されるが, 標準偏差を求めると 16MPa であり, 非常に均質な材料であることがわかった. 圧延方向に対して並行(L)および直行方向(T)から, また, 端部と中央部から切り出した試

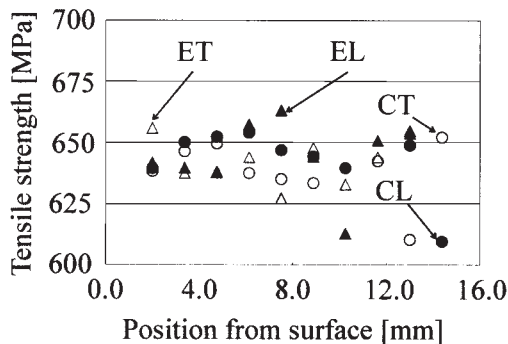


Fig. 8 Dispersion of tensile strength

験片の結果において明確な違いや何らかの傾向が観察されないことから異方性もほとんど無い事がわかった.

マイクروسコープを用いて引張試験後の破断面を観察し断面積を計測した一例を Fig. 9 に示す. 短辺部に比べると長辺部が大きく湾曲しているのが観察された. 断面積計測結果から絞りと真破断応力, 真破断ひずみを求めた所, 中央部(C)の平行方向(L方向)以下の平均値を得る事が出来た.

- ①絞り  $\phi = 0.77$
- ②真破断応力  $\sigma_{tf} = 1633 \text{ [MPa]}$
- ③真破断ひずみ  $\epsilon_t = 1.47$

今後, 他の場所と方向のデータを蓄積する事で原型炉設計に役立つと期待している.

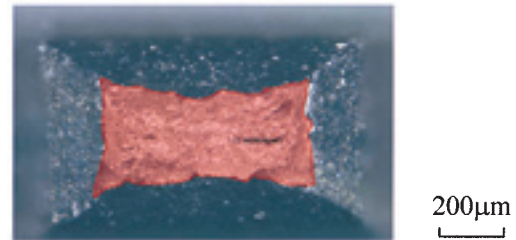


Fig. 9 Cross section observation

#### 4. まとめ

- (1) 微小試験片による強度特性を調べるための試料作製法を確立し十分な強度特性を得ることができた.
- (2) 試験片採取位置及び材料表面からの深さ方向が及ぼす引張強さとひずみへの影響は確認できず, 強度分布が均一な材料であることが分かった.
- (3) 真破断応力は中央部の平行方向で1633[MPa]が得られた.

#### 謝 辞

本研究は, 原子力機構の支援を受けて核融合研究開発の幅広いアプローチ (Broader Approach : BA) 活動の一環で行われたものである.

#### 参 考 文 献

- 1) 谷川博康, 酒瀬川英雄, 芝清之, 廣瀬貴規; 低放射化フェライト鋼製造技術の現状と課題, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 87, No. 3, pp167-171, (2011)
- 2) 谷川博康; 原子炉・核融合炉の照射効果に及ぼす応力に関する機構論的研究, pp.1-2, (1997.12)
- 3) 須藤一; 材料試験法, 内田老鶴園新社, (2002)
- 4) 井形直弘, 核融合炉材料, 培風館, (1986)

- 5) 微小試験片材料評価技術の進歩、社団法人日本原子力学会、「微小試験片材料評価技術」研究専門委員会, (1992)