研究論文

1135. 小型 C リング試験片による応力緩和評価法

島貫 静¹, 仲田 清智^{1,*}, 笠原 茂樹¹, 国谷 治郎¹*Development of Stress Relaxation Measurement by a Small Size C-ring Specimen Method*

Shizuka SHIMANUKI, Kiyotomo NAKATA, Shigeki KASAHARA and Jiro KUNIYA

A stress relaxation measurement method has been developed by using C-ring specimens, and a specimen size effect has been evaluated taking radiation-induced stress relaxation into consideration. C-ring specimens were stressed by forcing a wedge in the gap. Giving an appropriate eccentric configuration in the half of the ring opposite the gap, the stress gradient along the circumference was eliminated in the section and the stress level could be varied by changing the gap spacing. The validity of the C-ring test method was confirmed by thermally stress relaxation experiments at annealing temperatures from 300 to 600°C for 1 min to 200 h in carbon steel: considerable stress relaxation could be measured for all levels of applied stress even at relatively low annealing temperatures. The relaxation results obtained from the C-ring test were in good agreement with those from a uniaxial tensile stress relaxation test. The smaller C-ring specimen with about 40 mm diameter, which is required for radiation-induced stress relaxation test, also showed adequate accuracy on stress relaxation at 600 to 830°C in stainless steel, compared with the large size C-ring specimen test.

KEYWORDS: stress relaxation, radiation-induced stress relaxation, C-ring specimen, eccentric ring, initial stress, annealing, uniaxial stress relaxation test, carbon steels, stainless steels, temperature range 300–830°C, temperature dependence

I. 緒 言

多くの構造物は、材料の溶接やボルトの締結等によって構成されており、その溶接部やボルト締結部には残留応力が発生している。この残留応力は、材料が定歪みの状態で使用される場合、応力緩和現象が発生すると低下する。特に、原子炉炉内構造材料では、中性子照射を受けることによって応力緩和現象が発生することが知られている。この応力低下は、材料中のき裂の発生や成長を遅くし有効に働くことが考えられるが、一方、ボルト等では、締付け力の低下などのマイナス効果も考えられる。

中性子照射による応力緩和挙動を知るためには、試験片に一定の歪みを加えたまま照射を実施する必要がある。その試験方法として、曲げ法がよく用いられてきた^{1~8)}。曲げ法は、ビーム型試験片に拘束治具を用いて曲げを加え、そのまま照射を行い、照射後試験片を治具から取り外し、照射前後での曲率の変化から応力の減少を測定するものである。ステンレス鋼、Ni 基合金やジルコニウム合金等で塑性変形状態での応力緩和測定法として最も実績があるが、治具を含めると試験体の体積が大きくなり、曲率の測定においてバラツキが生じ易いことが欠点である。高強度部材である析出強化型 Ni 基合金では、コイル状にしてバネ長さの変化として応力緩和が調べられた例もある⁹⁾。種

種の金属に適用できて、中性子照射下応力緩和挙動を容易に、かつ高精度に検出できる方法を開発する必要がある。

そこで本研究では、照射下での試験には適用された例はないが、高強度鋼の熱時効中の応力緩和試験として適用例のある C リング法^{10,11)}に着目した。これは、C 型に加工した試験片の開口部にクサビを挿入して押し広げることで応力を負荷し、時効前後のクサビのないときの開口部の開口量の変化から応力緩和を測定する方法で、曲げ法のように、大型の拘束治具を必要とせず、また、開口量の測定は、曲率等よりも容易に精度よい測定が期待できる。C リングの大きさは大きいほど精度の向上が期待できるが、中性子照射を想定して試験片の直径を小さくしても応力緩和を検出できる可能性がある。このように、C リング法は照射下での応力緩和の測定方法として多くの点で有利と考えられる。この方法では、曲げ法と同様に、引張応力と圧縮応力が同時に発生する点で注意を要する。しかし、従来の研究によれば、照射下応力緩和は、初期応力値にほとんど依存しないことが知られており^{2,6)}、また、SIPA モデルによる理論解析でもそれが支持されている^{12~14)}。

本研究では、C リング法における試験片形状や応力評価の妥当性および焼鈍温度や時間を変化させたときの応力緩和挙動を定量的に評価、検討し、照射下応力緩和試験としての小型 C リング試験法の確立を目的とする。

II. 実験方法

本研究では、まず炭素鋼を供試材として、熱時効応力緩和試験に適用された比較的大きな直径の C リング試験片(直径約 65 mm)を用いて^{10,11)}、応力緩和試験として JIS

¹ 日立製作所日立研究所(Hitachi Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

(2002年 5月30日 受理; 2002年 7月16日 査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 029-267-9003, Fax. 029-266-2589,

E-mail: k_nakata@nfd.co.jp

現在、日本核燃料開発㈱(Nippon Nucl. Fuel Develop. Co., Ltd.)

規格の引張試験法¹⁵⁾と比較しながら, Cリング法の応力緩和試験としての妥当性を検証し, その後, オーステナイトステンレス鋼を供試材として, 例えば, 材料試験炉で温度制御しながら中性子照射を実施するのに十分な小型Cリング試験片(直径約40 mm)を用いた試験法の確立を行う。

1. 供試材

供試材は炭素鋼とSUS304 ステンレス鋼である。Table 1にその化学組成を示す。炭素鋼素材はφ75 mm×長さ250 mmとし, これを930℃で1 hおよび600℃で1 hの熱処理後空冷した。熱処理後の室温での0.2%耐力は225 MPaであった。また, SUS304は, 板材を用いて1,050℃で0.5 hの溶体化処理を施した。

2. Cリング試験

(1) 試験片形状

Fig. 1に大型および小型Cリング試験片の形状を示す。また, Fig. 2は, 作製された小型Cリング試験片の写真(開口部にクサビ挿入)である。本試験片は, 開口のあ

Table 1 Chemical compositions of materials used in this study (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S		
Carbon steel	0.14	0.29	0.74	0.004	0.0025	0.21	
Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Stainless steel (SUS304)	0.06	0.42	0.83	0.028	0.005	8.41	18.32

Fig. 1 Drawing of a C-ring specimen

Fig. 2 A small size C-ring specimen
A wedge was forced in the gap.

る側(幅の広い側)とない側(幅の狭い側)を有し, 開口部にクサビを挿入して開口のない側に応力を負荷する。この場合, 応力は開口のない側の円周に沿って一様に発生するように形状を定める必要がある。この原理を以下に述べる。

いま, 開口部にクサビを挿入したとき, 開口のない側の半円 BAB 部の中立面上任意の点の半径方向断面には,

$$M = Qr(1 + \cos \phi) \quad (1)$$

の曲げモーメントが働く。ここで, Q は開口部を押し広げる力, r は中立面半径, ϕ は中立面上任意の点とO点を結ぶ線がOAとなす角度である。この曲げモーメントによって

$$\sigma = M/Z \quad (2)$$

の応力が発生する。ここで, Z は断面係数である。この応力は, 中立面を境にして内側で引張, 外側で圧縮となり, 内外表面において最大となる。半円 BAB 部のどの断面にも同じ応力を発生するためには, 下式を満足することが必要である。

$$Z = Z_0(1 + \cos \phi)/2 \quad (3)$$

ここで, Z_0 は点Aでの断面係数である。

試験片の厚さを b , 半円 BAB 部の任意の点での幅を h , 点Aでの幅を h_0 とすると, (3)式は

$$\frac{bh^2}{6} = \left(\frac{bh_0^2}{6} \right) \left(\frac{1 + \cos \phi}{2} \right) \quad (4)$$

$$h = h_0 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi}{2}} \quad (5)$$

となる。すなわち, リングの幅 h を中心からの角度によって(5)式に従って変化させればよいことになる。このような形状は, 2つの円弧(半径 r_1, r_2)を偏心させることによって近似的に構成することができる。すなわち, 2つの円弧の偏心量を k とすると, それに挟まれる部分の幅 h は,

$$h^2 = h_0^2 - 2k(r_1 - r_2)(1 - \cos \phi) \quad (6)$$

であり, この式を(5)式と等価にするためには,

$$k = \frac{h_0^2}{4(r_1 - r_2)} \quad (7)$$

とすればよい。本研究では上記の考え方に従って試験片の形状を定めた。

製作にあたっては, 昇温時に試験片とクサビの間で熱応力の発生を避けるために, 両者には同一材質を使用し, 試験片とクサビの接触面での密着性を良くするために, それぞれの接触面をエメリー #800以上の仕上げとした。

(2) 応力評価

本試験片では, 上記のように, 開口部にクサビを挿入して応力が負荷される。ここで, 開口部の開口幅の変化率 Δ を(8)式で定義すると, Δ と開口のない側の内外周に発生する歪 ε との間に弾性変形範囲で(9)式が成立する。

$$\Delta = \frac{D - D_0}{D_0} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \alpha \Delta \quad (9)$$

ここで、 D_0 はクサビ挿入前の開口幅、 D はクサビ挿入後の開口幅、 α は形状係数である。形状係数は、開口幅を試験部の歪みに換算するための係数であるが、試験部の形状が複雑なので、本試験では、試験部内外周面に歪ゲージを付けて ε と Δ の実測から実験的に決定した(Fig. 3, 4参照)。(8),(9)式から、試験部内外周に発生する応力 σ は、

$$\sigma = E\alpha\Delta = E\alpha \frac{D - D_0}{D_0} \quad (10)$$

となる。ここで、 E はヤング率である。(10)式において、はじめにクサビを挿入したときの開口幅を D_i とすると、初期応力 σ_0 は、

$$\sigma_0 = E\alpha \frac{D_i - D_0}{D_0} \quad (11)$$

で、応力緩和後クサビを取り外したときの開口幅を D' とすると、残留応力 σ_r は、

$$\sigma_r = E\alpha \frac{D_i - D'}{D_0} \quad (12)$$

で表される。応力緩和焼鈍前後においてはほぼ同じ温度(室温)で開口幅を測定する場合、ヤング率は変化しないと考えられるので、(11),(12)式から、

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_0} = \frac{D_i - D'}{D_i - D_0} \quad (13)$$

となる。(13)式からわかるように、応力緩和における応力比 σ/σ_0 は、Cリングの形状係数によらず緩和前後の開口幅の変化から測定されるので、試験においては開口幅を精度よく測定することが必要である。本研究では、Fig. 1に示すように、開口部近傍に4個のビッカースダイヤモンド圧痕を設け、上側と下側の圧痕間隔の平均値を開口幅の代用とした。

(3) 応力緩和試験

応力緩和試験は、室温でCリング試験片の開口部にクサビを挿入して応力(歪み)を負荷する。その後、クサビを取り外して開口部の幅を測定し、これを(12)式の D_0 とした。再度クサビを挿入して開口幅 D_i を測定した後、所定の焼鈍温度に保持した。焼鈍後、室温に戻し、クサビを取り外して開口幅 D' を測定した。なお、初期応力は、室温の降伏応力を越えない範囲で設定した。

炭素鋼の応力緩和を発生させる焼鈍は、温度300, 400, 500および600℃において、時間を1, 2, 6, 18, 36および60 minと変化させて行った。さらに、500℃では4, 10, 25, 75および200 hの長時間試験も行った。1~60 minの短時間試験はソルトバスを用い、各温度に加熱したソルトバス中に所定時間試験片を浸漬させた後、直ちに取出して水洗する方法によって行った。また500℃の長時間試験は真空加熱炉を用い、所定時間加熱後空冷した。SUS304では、600, 700および830℃大気中で1~3 h焼鈍した。一つの焼鈍温度の試験には1個の試験片を用い、所定の時間において、クサビを取り外して開口量を測定し、再度クサ

ビを挿入してさらに加熱することを繰り返した。圧痕間隔の測定は、室温において、マイクロメータ付き顕微鏡を用いて実施した。測定精度は $\pm 1 \mu\text{m}$ であった。

III. 実験結果および考察

1. 試験片形状および応力評価の妥当性検証

まず、開口幅と試験部での応力(歪み)の関係を調べるために、弾性範囲内で種々の幅のくさびを挿入したときに発生する歪みを歪ゲージを用いて測定した。Fig. 3は、大型Cリング試験片で測定した結果を示す。 ε は、図中に示すように、開口のない側の内外面において6枚の歪ゲージにより測定された歪みの絶対値の平均で表した。両者には、よい直線関係があり、(9)式を満たすことがわかった。この直線の傾きから形状係数 α は 2.05×10^{-3} と求められた。

Fig. 4は、小型Cリング試験片の結果である。この場合も両者にはよい直線関係が見られ、サイズの小型化の影響はほとんどないと考えられる。これから、小型Cリング試験片の形状係数は 3.17×10^{-3} であった。

本試験片では、前述したように、開口部にクサビを挿入して応力を負荷し、この応力は開口のない側の円周に沿って一様に発生するように形状を定めた。試験部での発生応力の均一性を確かめるために、有限要素法(FEM)による解析を行った。Fig. 5は、大型Cリング試験片(炭素鋼)について、(a)試験部の内外面の歪みと、(b)A点での幅方向の歪みの分布を示す。Cリング試験部の中央AからB(Fig. 1参照)まで、内面では引張歪み、外面では圧縮歪みがほぼ均一に発生している。また、試験片の幅方向では、中立面を境に引張から圧縮歪みに直線的に変化している。さらに、ジアリルフタレート樹脂(DAP樹脂、弾性係数: 2.35 GPa)で試験片の模型を製作し光弾性法による観

Fig. 3 Relationship between Δ and strain ε measured by strain gauges for a large size C-ring specimen (cf. Eq. (9)): where

$$\Delta = \frac{(\text{Gap spacing with wedge inserted}) - (\text{Original gap spacing})}{(\text{Original gap spacing})}$$

Fig. 4 Relationship between Δ and strain ε measured by strain gauges for a small size C-ring specimen

Fig. 5 FEM analysis of strain (a) along the inner and outer circumferences and (b) in the thickness at A point of a large size C-ring specimen

Fig. 6 Photoelastic stress pattern in (a) eccentric and (b) uniform thickness rings

察を行った。光源は波長 546.1 nm の水銀灯を用いた。比較のため、同心円試験片についても観察を行った。Fig. 6 (a), (b)には、それらの観察結果を示す。等応力線に沿って光弾性縞模様が現れるが、(b)では、縞模様は円周に沿って一様に生じておらず、また試験片の中央より上方にまで及んでいる。一方、(a)では、縞模様は開口のない側に円周に沿って一様に生じており、開口のある側にはほとんど観察されない。これは、Cリング試験片では、クサビを挿入したとき開口のない側の円周に沿って均一に応力が発

生し、開口のある側にはほとんど発生していないことを示唆している。また、試験片の幅方向には、等応力線が等間隔に見られ、応力が内周から外周へ、ほぼ直線的に変化していることがわかる。以上の計算と観察から、本形状のCリング試験片では、開口のない側の円周に沿って均一に応力が発生することが確認された。

開口部の開口量から応力を評価することの妥当性についても、有限要素法による解析で検討した。Fig. 7は、大型Cリング試験片(炭素鋼)の場合について、前出の開口幅の変化率(Δ)と内外面の歪みの絶対値の平均値(ε)の関係を解析した結果である。開口幅として中立面上での幅を用いて解析した。図には前出のFig. 3の実験値も併せて示すが、実験では、開口幅は開口部上下の標点間距離の平均である。実験値は、中立面上での開口幅で計算された直線とよく一致しており、標点間距離の平均値を開口量として歪み(応力)を評価できることがわかる。図は示さないが、小型Cリング試験片でも同様の結果が得られた。

2. 大型Cリング試験片(炭素鋼)による応力緩和試験

(1) 応力緩和の焼鈍温度および時間依存

Fig. 8, 9は、開口幅を変化させて試験片の内外周に室温で初期応力 σ_0 を91~107 MPaおよび170~182 MPaの範囲で負荷したとき、焼鈍温度300, 400, 500および600℃における応力緩和試験結果を示す。所定時間焼鈍後室温まで冷却したときの残留応力 σ_r は、いずれの焼鈍温度においても、時間とともに減少し、その低下の割合は焼鈍温度が高いほど大きい。室温で負荷した初期応力値と最も短時間側の残留応力値を比較すると、応力緩和が1 min (= 0.017 h)以下のごく短時間で生じる段階がある。Fig. 10は、同一ロットで同じ熱処理をした炭素鋼の引張試験により求められた0.2%耐力の試験温度依存性を示す。91~

Fig. 7 Calculated relationship of Δ and ε , together with experimental results

Fig. 8 Time dependence of residual stress at various annealing temperatures for carbon steel
Initial stress σ_0 : 91~107 MPa

Fig. 9 Time dependence of residual stress at various annealing temperatures for carbon steel
Initial stress σ_0 : 149~182 MPa

107 MPa の低初期応力の場合には、600℃以下では耐力に達していないが、高初期応力(170~182 MPa)では、300℃以上では耐力を越えるので試験片の応力の高い周辺部では塑性変形が生じると考えられる。このことから、短時間で生じる応力緩和は、低初期応力のものでは遷移クリープの影響と、高初期応力ではそれに加えて、部分的な塑性変形の影響があると考えられる。

Fig. 11は、応力緩和に及ぼす初期応力の影響を示す。焼鈍温度は500℃である。初期応力は、試験部の内外周に加わる最大の応力であり、Fig. 10からわかるように、107 MPa は耐力以下、149 MPa は耐力相当、182 MPa は耐力よりやや高い応力である。縦軸は、残留応力 σ_r を初期応

Fig. 10 Temperature dependence of 0.2% proof stress obtained by tensile tests in the carbon steel

Fig. 11 Effect of initial stress on thermally stress relaxation in carbon steel at 500℃

力 σ_0 で除した応力比((13)式参照)で示した。ごく短時間での応力比の低下は初期応力レベルが高いほど大きい、その後の時間に対する応力比の低下は初期応力レベルにほとんど依存しないことがわかった。

(2) C リング法と引張試験法の比較

ここでは、一般的に用いられる引張試験法による応力緩和試験によって得られる値とCリング法によるそれとを比較した。引張試験法は、JIS Z 2276に準じて実施した¹⁵⁾。炭素鋼試験片は、直径 10 mm、ゲージ長さ 100 mm の丸棒引張試験片である。はじめに負荷する歪み量は、引張試験法もCリング法も同じ0.08%とし、焼鈍温度は500℃とした。

Fig. 12は両試験における残留応力の焼鈍時間に対する変化を示す。いずれの試験でも残留応力は時間の経過とともに低下するが、その値は両者で異なる。ここで注意しなければならないことは、Cリング法では室温における値を評価しているのに対し、引張試験法では500℃における値を評価していることである。そこで、(14)式を用いてCリング法における値のヤング率補正を行った。

$$\sigma_{r500} = (E_{500}/E_{RT})\sigma_{rRT} \quad (14)$$

Fig. 12 Comparison of the C-ring with the uniaxial tensile methods in stress relaxation test at 500°C in carbon steel. An initial strain is 0.08%.

Fig. 13 Young's modulus corrected stress relaxation curves in the C-ring and the uniaxial tensile methods tested at 500°C in carbon steel

ここで、 E_{500} および E_{RT} は、それぞれ500°Cおよび室温におけるヤング率であり、文献16)から、 $E_{RT}=199$ GPaおよび $E_{500}=163$ GPaを用いた。Fig. 13はヤング率補正後の結果を示す。図に示されるように、ヤング率補正後の残留応力値はよい一致を示した。

本結果から、JIS規格にある引張試験法で求められた応力緩和挙動は、Cリング法で求めた挙動とよく一致することがわかった。

3. 小型Cリング試験片(ステンレス鋼)による応力緩和試験

小型Cリング試験片においては、大型Cリング試験片と比較して円周が小さいため、同じ応力緩和量に対して、開口幅の変化が小さいので、高精度な測定が必要である。Fig. 14は、SUS304で、700°C焼鈍による応力緩和の初期応力依存性を検討した結果である。応力緩和量は応力比(σ_r/σ_0)で表示し、初期応力は試験片内外周に負荷される最大応力で、85 MPaは700°Cでの材料の耐力以下、154

Fig. 14 Time dependence of residual stress at initial stresses of 85 to 184 MPa obtained by small size C-ring specimens of stainless steel annealed at 700°C

Fig. 15 Annealing temperature dependence of residual stress obtained by small size C-ring specimens of stainless steel

Initial stress: 154 MPa and annealing for 1 h at each temperature

MPaは耐力相当、184 MPaは耐力をやや越える応力である。初期応力が低いほど、短時間での応力低下は小さく、1 h以上の焼鈍時間では、応力比の低下は初期応力によらずほぼ同じ挙動を示す。これらは、大型Cリング試験片で得られた結果(Fig. 11)と同様である。Fig. 15は、初期応力を約154 MPaとして、600~830°Cで1 h焼鈍したときの残留応力の焼鈍温度依存性を示す。焼鈍温度が低いほど残留応力が大きく緩和量が小さくなる。

これらの結果から、小型Cリング試験片でも、大型試験片と同等の精度で応力緩和を検出できると考えられる。

IV. 結 論

Cリング試験法による応力緩和評価技術を確立するために、大型(直径約65 mm)と小型(直径約40 mm)のCリング試験片を用いて、試験片形状および応力評価の妥当性、焼鈍温度、時間を変化させたときの応力緩和挙動を調べ

た。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) Cリング試験片の開口部にクサビを挿入して弾性範囲内の応力を負荷するが、開口部と反対側の半円部を偏心させた円弧で形成することによって、その部分に均一な応力(歪み)を発生させることができた。また、試験部の内外周面上に発生する応力値は、Cリングの開口量から評価できることを確認した。
- (2) 炭素鋼において、Cリング試験法を用いて、焼鈍温度300~600℃で、1 min~200 hの熱応力緩和試験を実施した結果、ごく短時間で発生する応力低下と、その後の焼鈍による応力緩和が観察された。長時間側での応力緩和は焼鈍温度が高いほど大きく、応力比(残留応力/初期応力)の変化は、初期応力レベルにはほとんど依存しない。短時間での急な応力低下は、遷移クリープに加えて、初期応力が試験温度で材料の耐力を越えた場合、部分的な塑性変形を起こすことによると考えられた。試験部応力は、応力中立面から内外周方向へ応力勾配があり、応力緩和試験中に部分的な降伏を発生させないためには、焼鈍温度での材料の耐力を越えないことが望ましいと考えられた。
- (3) Cリング法で得られた500℃焼鈍による熱応力緩和挙動は、引張試験法で得られた値とよく一致した。
- (4) 小型Cリング試験片でも、大型Cリング試験片の場合と同等の精度で熱応力緩和が検出できた。

以上から、Cリング試験法は、応力緩和評価に適用可能であり、本研究で開発した小型Cリング試験片(直径約40 mm)は、照射下での応力緩和評価試験に十分な精度で適用できることが示唆された。

— 参考文献 —

- 1) D. E. Fraser, P. A. Ross-Ross, A. R. Causey, "The relation between stress relaxation and creep for some zirconium alloys during neutron irradiation", *J. Nucl. Mater.*, **46**, 281(1973).
- 2) T. A. Kenfield, H. J. Busboom, W. K. Appleby, "In-reactor stress relaxation in bending of 20% cold-worked 316 stainless steel", *J. Nucl. Mater.*, **66**, 238(1977).
- 3) G. L. Wire, J. L. Straalsund, "Irradiation induced stress-relaxation of previously irradiated 304 stainless steel in a fast flux environment", *J. Nucl. Mater.*, **64**, 254(1977).
- 4) F. Povo, E. H. Toscano, "On stress-relaxation in bending: For example results applied to Zircaloy-4", *J. Nucl. Mater.*, **74**, 76(1978).
- 5) F. Povo, M. Higa, "Stress-relaxation in bending, at 673 K, of stress-relieved and cold-worked Zircaloy-4", *J. Nucl. Mater.*, **91**, 189(1980).
- 6) A. R. Causey, G. J. C. Carpenter, S. R. MacEwen, "In-reactor stress relaxation of selected metals and alloys at low temperatures", *J. Nucl. Mater.*, **90**, 216(1980).
- 7) A. R. Causey, F. J. Butcher, S. A. Donohue, "Measurement of irradiation creep zirconium alloys using stress relaxation", *J. Nucl. Mater.*, **159**, 101(1988).
- 8) J. P. Foster, E. R. Gilbert, K. Bunde, D. J. Porter, "Relationship between in-reactor stress relaxation and irradiation creep", *J. Nucl. Mater.*, **252**, 89(1998).
- 9) L. C. Walters, W. E. Ruther, "In-reactor stress relaxation of Inconel X750 springs", *J. Nucl. Mater.*, **68**, 324(1977).
- 10) I. A. Oding, *Creep and Stress Relaxation in Metals*, ed. A. J. Kennedy, Oliver & Boyd, London, p. 257(1965).
- 11) R. L. Brown, M. Cohen, "Stress relaxation of hardened steel", *Metal Prog.*, p. 66(Feb.), (1962).
- 12) M. L. Grossbeck, L. K. Mansur, "Low-temperature irradiation creep of fusion reactor structural materials", *J. Nucl. Mater.*, **179-181**, 130(1991).
- 13) J. Nagakawa, "Calculation of radiation-induced stress relaxation", *J. Nucl. Mater.*, **212-215**, 541(1994).
- 14) J. Nagakawa, "Calculation of radiation-induced creep and stress relaxation", *J. Nucl. Mater.*, **225**, 1(1995).
- 15) JIS Z2276, 金属材料の引張りラクセーション試験方法, (1975).
- 16) 佐藤千之助, "金属材料の弾性係数に及ぼす温度の影響", 機械誌, **72**[608], 1240(1969).