

プラズマディスラプション模擬損傷材の 残存疲労寿命に及ぼす繰返し熱負荷の影響*

荒居 善雄^{*1}, 小林 英男^{*2}, 土田 栄一郎^{*1}
黒田 勉^{*3}, 班目 春樹^{*4}

Influence of Cyclic Thermal Loading on Residual Fatigue Life of Materials Damaged by Simulated Plasma Disruption

Yoshio ARAI, Hideo KOBAYASHI, Eiichiro TSUCHIDA,
Tsutomu KURODA and Haruki MADARAME

Surface damage of type 304 stainless steel, which is one of the candidates for the first-wall structural material in a fusion reactor, at cyclic plasma disruption loadings is simulated by a high heat flux Neutron Beam Injection. Influences of the cyclic thermal loads on the residual fatigue life are studied. The results obtained are summarized as follows. (1) The maximum tensile residual stresses near the damaged surface increased with increasing thermal loading cycles from 1 to 5. (2) The fatigue strength and the fatigue limit of the specimen subjected to 5 cycles of thermal loading and those for 1 cycle are the same. (3) A critical crack length, $2b_e$ to vanish from sight caused by thermal loading is important for the evaluation of the residual fatigue life. If the defect length, $2b < 2b_e$, residual life after the second thermal loading and that before thermal loading are the same. If $2b > 2b_e$, fatigue crack growth occurs due to the cyclic thermal load.

Key Words: Fatigue, Crack Growth, Plasma Disruption, Residual Life, Stainless Steel

1. 緒 言

トカマク形核融合炉では、プラズマが瞬時に消滅(プラズマディスラプション)するとき、プラズマの有する熱および磁気エネルギーの放出により、プラズマを取り囲む構造体である第一壁は、局所的かつ過渡的熱負荷を受ける⁽¹⁾⁽²⁾。著者らは前報において、第一壁候補構造材料の304ステンレス鋼の表面に、中性粒子入射装置(NBI)による高熱負荷(80 MW/m², 70 ms)を与えることにより、プラズマディスラプションによる表面損傷を模擬し、破壊強度と疲労寿命に及ぼす表面損傷の影響を調べた⁽³⁾。一方、現在用いられているトカマク形核融合試験研究装置は、停止時に必ずプラズマディスラプションを起こしており、トカマク形核融合炉第一壁の強度設計、残存疲労寿命の評価に際して、同一位置がプラズマディスラプション時の表面損傷を繰返し受けることを考慮する必要がある。本研究

では、トカマク形核融合炉第一壁候補構造材料の304ステンレス鋼の表面に高熱負荷を繰返し与えることにより、複数のプラズマディスラプションによる表面損傷を模擬し、損傷状態(初期微小き裂分布、硬さ、残留応力)と残存疲労寿命の関係を調べ、複数回のプラズマディスラプションを受ける第一壁の残存疲労寿命の評価方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材と試験片 供試材は前報と同一であり、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304である⁽³⁾。化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。疲労試験に用いた試験片の形状を図1に示す。試験片は幅270 mm、長さ365 mm、厚さ20 mmの平板から、試験片長手方向を圧延方向と一致させて切り出した。複数の試験片の表面の加工履歴をそろえるために、圧延板の片面を照射面に設定し、この面を1.0 mmだけ研削した後に、反対側の面を切削し、所定の試験片厚さとした。

2.2 プラズマディスラプションの模擬方法 照射条件は前報と同一であり、入熱量80 MW/m²、照射時間約70 msである⁽³⁾。照射時に試験片の照射面を鉛直に設置した。試験手順を図2に示す。図2(a)に示

* 平成5年10月2日 第71期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成6年4月1日。

^{*1} 正員、埼玉大学工学部(☎338 浦和市中大久保255)。

^{*2} 正員、東京工業大学工学部(☎152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*3} 核融合科学研究所(☎464 名古屋市千種区不老町)。

^{*4} 正員、東京大学工学部附属原子力工学研究施設(☎319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22)。

したように、繰返し照射の影響を調べるために、同一位置における照射回数を1回(試験片1~6, Nt1材と称する)、5回(試験片7~11, 以下, Nt5材と称する)と変えて疲労試験に供した。また、図2(b)に示したように、1回照射後、機械的負荷の繰返しにより損傷面の微小き裂を進展させた試験片(以下、これを予き裂材と称する)について、再び1回照射を行った後、疲労試験に供した。予き裂導入時の機械的荷重条件と再照射後の機械的荷重条件は同じである。予き裂導入条件と予き裂寸法を表3に示す。表3のT.P.は試験片番号、 σ_{max} , R , N_{pre} は予き裂導入時の機械的荷重条件の内、最大曲げ応力、応力比、繰返し数であり、 $2b$ は予き裂長さである。予き裂長さ $2b$ を四とおりに変えてき裂長さと繰返し熱負荷の関係を調べた。試験片14では巨視的な予き裂が2箇所を観察された。試験片15の予き裂は表面において幅方向に貫通していた。

2.3 初期損傷測定方法 図3に試験片座標(x, y, z)を示す。損傷面を二等分するように、 x 軸を設定し、試験片中央部の長手方向10mm、幅方向全体を観察範囲として表面微小き裂両端の座標(x_1, z_1), (x_2, z_2)を測定した。正味の表面き裂長さ $2b^*$ を次式で用いて算出した。

$$2b^* = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \dots\dots\dots (1)$$

表1 化学成分(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.05	0.59	0.95	0.030	0.005	8.93	18.21

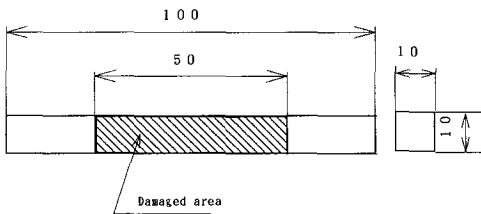
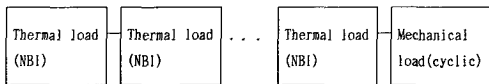
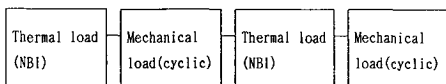


図1 試験片形状 [単位: mm]



(a) 繰返し熱負荷後の疲労試験



(b) 予き裂材の再照射試験

図2 試験手順

試験片を長手方向に垂直に切断した断面をエメリー紙で#1200まで研磨し、王水でエッチングした後ピッカース硬さ試験を行った。圧子押し込み荷重を4.9Nとして、幅中央($x=5$ mm, $z=0$)における厚さ方向(y 方向)の硬さ分布を測定した。

試験片側面で長手方向残留応力の厚さ方向分布を測定した。測定にはX線残留応力測定装置(理学電機製, 管電圧, 電流; 30 kV, 2~10 mA)を用いた。試験片側面はエメリー紙とダイヤモンドペーストで#3000程度まで研磨した後、0.4 mm程度の電解研磨を施した。X線照射領域は、側面($x=0$)の $z=0$ および裏面($y=10$ mm)の $x=5$ mmを中心に、それぞれ長手方向に14 mm幅、厚さ方向に3 mm幅とした。残留応力測定は、熱負荷繰返し数1, 2, 5回の試験片に対して行った。

2.4 疲労試験方法 疲労試験には電気油圧式サーボ試験機(島津製作所製, 荷重容量98 kN)を用いた。負荷形式は、三点曲げで損傷面を引張側とした。繰返し速度は20 Hz, 応力比 $R=0.05$ とした。試験中に所定の繰返し数ごとに除荷し、金属顕微鏡で表面観察を行った。疲労破壊の起点となると思われる複数初期微小き裂に着目し、金属顕微鏡による表面観察を行い、初期微小き裂からのき裂進展、き裂の合体、交差を観察した。観察範囲は中央から長手方向 ± 1 mm, 幅方向

表2 機械的性質

σ_y	σ_b	δ
MPa	MPa	%
269	619	63.2

表3 予き裂導入条件と寸法

T. P.	σ_{max}	R	N_{pre}	$2b$
	MPa		cycle	mm
12	400	0.05	1200000	0.2
13	400	0.05	1030000	2.0
14	500	0.05	207000	1.11
				2.61
15	500	0.05	258000	10.0

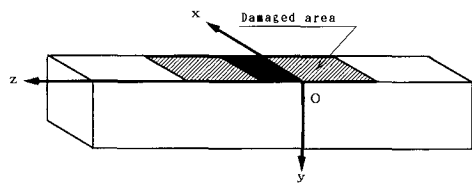


図3 試験片座標

全体とした。x 軸(負荷方向に垂直)への投影き裂長さ $2b$ を用いて結果を整理した。応力拡大係数の算出には、き裂長さとして $2b$ を用い、形状を半円と仮定し、モード I のみを考慮して Newman らの式を用いた⁽⁴⁾。

3. 損傷状態に及ぼす繰返し熱負荷の影響

3.1 表面損傷形態 模擬損傷材の巨視的損傷形態を図4に示す。熱負荷繰返し数が2回、5回と増加するに伴って溶融量が増加し、試験片下部に垂れ流れて堆積する傾向にある。しかし、表面の巨視的凹凸(うねり)の周期および深さに大きな変化は見られない。金属顕微鏡により観察した微視的損傷形態を図5に示す。損傷面に初期微小き裂が局所的に密集して存在し(以下、これをき裂群と称する)、き裂群の中での微小き裂の位置と方向がランダムであることは、熱負荷繰返し数1回と5回で同様であった。微小き裂の数および寸法を表4に示す。熱負荷繰返し数1回と5回の損傷面の初期微小き裂長さはほぼ等しいことから、本研究の熱負荷条件においては、初期微小き裂は繰返し熱負荷により再溶融して消滅し、繰返し熱負荷によるき裂進展は生じていないと考えられる。初期微小き裂数

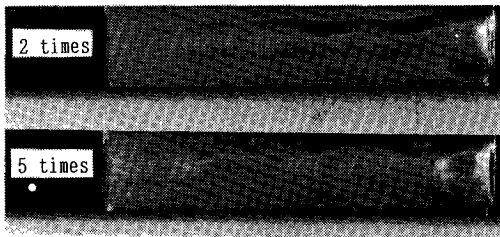


図4 巨視的損傷形態

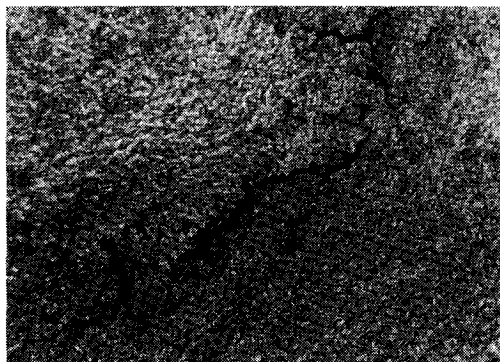


図5 微視的損傷形態(Nt 5 材)

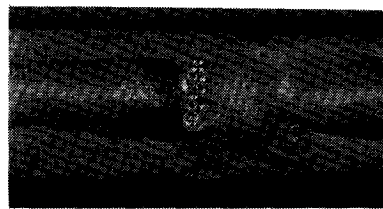
とき裂群の数は熱負荷繰返し数の増加に伴い増加した。

予き裂材の繰返し熱負荷による損傷形態の変化を図6に示す。図6と表3に示したように、試験片14の2箇所の予き裂のうち、小さい予き裂($2b=1.11\text{ mm}$)は繰返し熱負荷により消滅し、試験片14の大きい予き裂($2b=2.61\text{ mm}$)と試験片15の予き裂はき裂縁が溶融・凝固しているが、き裂は消滅せず開口していた。ここでは結果は省略するが、試験片12(予き裂長さ $2b=0.2\text{ mm}$)および試験片13(予き裂長さ $2b=2.0\text{ mm}$)の場合、繰返し熱負荷により予き裂は溶融・凝固して消滅した。以上の結果をまとめれば、予き裂長さ $2b \leq 2.0\text{ mm}$ の予き裂は繰返し熱負荷により再溶融・消滅し、予き裂長さ $2b \geq 2.61\text{ mm}$ の予き裂は消滅せず、熱応力により開口した。

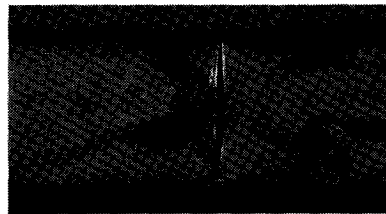
3.2 硬さ試験結果 図7に断面の金属顕微鏡写真を示す。溶融層の厚さは、Nt1材で0.02~0.60

表4 初期微小き裂の数および寸法

T. P.	Thermal cycle	Average crack length mm	Number of crack	Number of crack group
1	1	0.22	34	4
2	1	0.20	33	6
3	1	0.20	11	1
7	5	0.19	70	6
8	5	0.21	108	7
9	5	0.19	30	3



(a) 試験片14



(b) 試験片15

図6 予き裂試験片の損傷形態

mm, Nt 5 材で 0.02~0.72 mm である。断面の硬さの厚さ方向分布を図 8 に示す。熱負荷繰返し数 1 回と 5 回の溶融層の硬さはほぼ等しく、母材の硬さを 140~170 程度とし、それ以上の硬さを示す深さを硬化深さと定義すれば、硬化深さは熱負荷繰返し数 1 回よりも 5 回のほうが深い。

3.3 残留応力 模擬損傷材の残留応力分布の繰返し熱負荷による変化を図 9 に示す。図の横軸の厚さ方向座標 y は試験片厚さ t で無次元化し、前報の結果 (1 回損傷, 厚さ 18 mm) と比較している⁽⁹⁾。熱負荷繰返し数によらず損傷側には引張残留応力が、内部には圧縮残留応力が、また損傷面と逆の背面側には引張残留応力が存在している。損傷面 ($y/t=0$) 近傍の最大引張残留応力は熱負荷繰返し数の増加に伴い増加した。



図 7 断面観察結果(Nt 5 材)

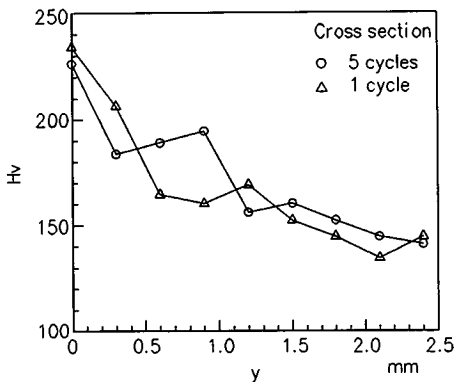


図 8 硬さの厚さ方向分布(断面)

4. 残存疲労寿命に及ぼす繰返し熱負荷の影響

4.1 疲労強度特性 熱負荷繰返し数 1 回 (Nt 1 材) と 5 回 (Nt 5 材) について、最大応力 σ_{max} と破断繰返し数 N_f の関係を図 10 に示す。本報告の Nt 1 材の結果 (○印) と前報⁽³⁾ の熱負荷繰返し数 1 回の結果 (実線) を比較すれば、両者はよく一致しており、本報の NBI 照射は前報のそれとほぼ同様の照射となっていることが確認された。比較のために母材の結果を ●印と破線で示す。熱負荷繰返し数によらず損傷材の結果は母材よりも疲労強度、疲労限度ともに低下している。Nt 1 材の結果 (○印) と Nt 5 材の結果 (△印) を比較すれば、両者の疲労強度と疲労限度はほぼ等しい。

$\sigma_{max}=500$ MPa における複数微小き裂のき裂長さ b と繰返し数 N の関係を Nt 5 材について図 11 に示す。き裂 A (△印) は、き裂 D (▲印) と合体して (半黒塗り△印) 急速に進展し、貫通き裂となった。き裂 C (○

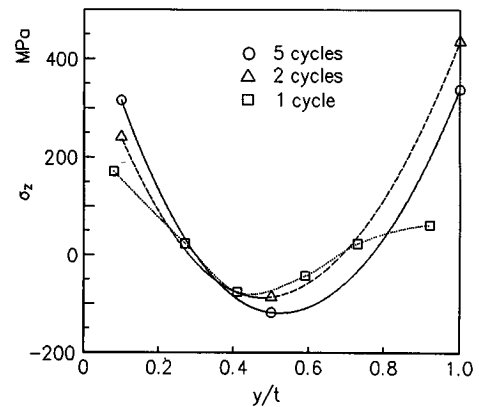


図 9 残留応力に及ぼす繰返し熱負荷の影響

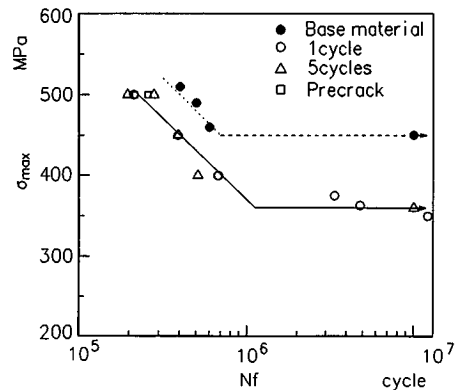


図 10 疲労強度・疲労限度に及ぼす繰返し熱負荷の影響

印)も他のき裂と合体して進展を続けた。き裂E(▽印)は進展を開始したが、他のき裂と交差して停留した。著者らは前報において、密集している初期微小き裂を疲労破壊の起点とする場合、き裂進展の過程において、合体による加速効果と交差分岐による減速効果が相殺し、必ずしも著しい加速効果をもたらすとは限らないことを指摘した⁹⁾。図11の結果から、この機構は繰返し熱負荷を受ける場合にも機能していることがわかる。表4に示したように、熱負荷繰返し数の増加に伴い初期微小き裂数とき裂群の数が増加しているにもかかわらず、図10に示したように、疲労強度、疲労限度に及ぼす熱負荷繰返し数の影響が小さいことは、以上の交差と合体の機構によると考えられる。

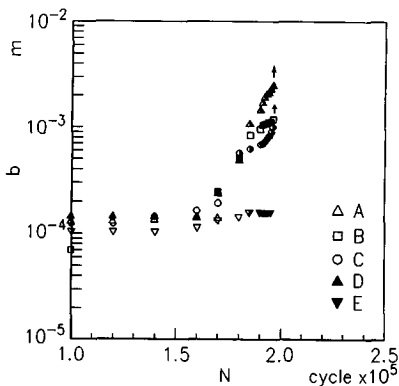


図11 表面き裂長さと繰返し数の関係(Nt 5材)

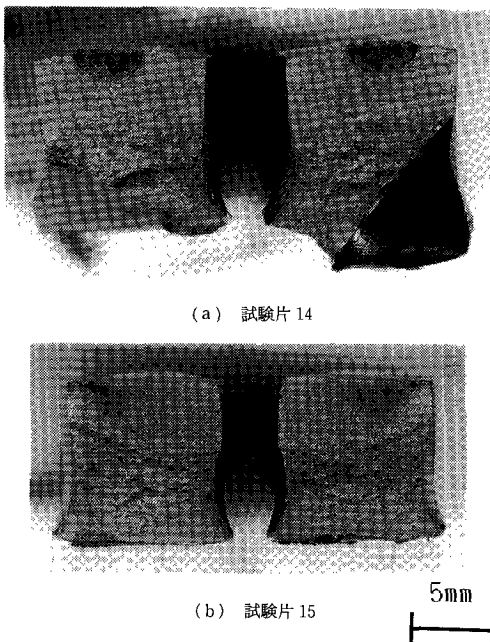


図12 予き裂試験片の巨視的破面形態

予き裂材について、予き裂導入時の機械的荷重繰返し数を N_1 、再照射後の機械的荷重繰返し数を N_2 とする。 $N_1 + N_2$ を予き裂材の破断繰返し数 N_f と定義した。 $Nt 5$ 材の結果と予き裂材の結果(図10の□印)を比較すれば、両者はほぼ一致している。

予き裂材の巨視的破面形態を図12に示す。写真の上面が損傷面であり、かつ引張面である。図12(a)に示したように、試験片14の2箇所の予き裂のうち、長さの長い場合($2b=2.61$ mm)、き裂面が変色し、破面上で明確に確認できる。しかし、長さの短い場合($2b=1.11$ mm)、予き裂面は破面上に確認できず、再照射により消滅したことがわかる。

4.2 疲労き裂進展特性 Nt 1材およびNt 5材の表面方向のき裂進展速度 db/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を図13に示す。実線は母材の結果($R=0.05$)である。初期微小き裂の方位の差異によりデータにはかなりばらつきが認められるが、母材の結果と比較して db/dN のばらつきの中心は低 ΔK 領域で加速側に位置し、き裂の進展に伴い母材の結果に近づいている。表面疲労き裂は溶融層内に発生した初期微小き裂を起点として進展を開始し、まず溶融層を進展する。その後、表面疲労き裂の前縁の大部分は、母材を進展する。組織と残留応力が母材と異なる溶融層におけるき裂進展特性は母材のき裂進展特性よりも加速側に位置し、き裂最深部が母材を進展することにより、溶融層の影響が小さくなり母材の結果に近づくと考えられる。溶融層と母材のき裂進展特性の関係を同一 ΔK における速度比 r として次式で定義する。

$$r = \frac{\left(\frac{db}{dN}\right)_a}{\left(\frac{db}{dN}\right)_m} \dots\dots\dots (2)$$

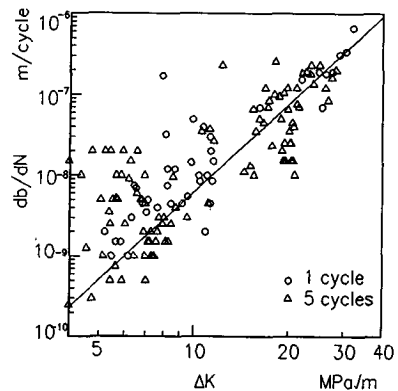


図13 き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

ここで、 $(db/dN)_d$ は溶融層におけるき裂進展速度、 $(db/dN)_m$ は母材におけるき裂進展速度 ($R=0.05$) である。 r とき裂長さの関係を図 14 に示す。Nt1 材では、 $b_1=1.5$ mm 程度、Nt5 材では $b_5=2.0$ mm 程度で r がほぼ 1 となっている。図 14 における同一の b に対する r の最大値をき裂長さに対して最小二乗法近似し、次式を求めた。

$0 \leq b \leq b_i$ において、

$$r_1 = 6.41 - 5.43b + 1.17b^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$r_5 = 8.34 - 7.24b + 1.72b^2 \dots\dots\dots (4)$$

$b_i \leq b$ において、

$$r_1 = 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$r_5 = 1.21 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 b_i, r_i の下添字 i は熱負荷繰返し数、 b の単位は mm である。図 14 において熱負荷繰返し数 5 回を実線、1 回を破線で示した。熱負荷繰返し数 1 回と 5 回の損傷材の速度比 r_i は、同一き裂長さで比較すれば、熱負荷繰返し数 1 回よりも 5 回のほうが大きい。

予き裂材のき裂進展速度 db/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を図 15 に示す。比較のために母材 (応力比 $R=0.36$ および 0) の結果を図中に実線および破線で示した。前報の結果から、Nt1 材の場合、残留応力を考慮した応力比はほぼ 0.36 と考えられる⁽³⁾。母材 $R=0.36$ のき裂進展特性を基準に考えると、予き裂からき裂進展開始直後は減速し、き裂進展に伴い母材の結果に近づいている。これは、再照射後の残留応力が単一過大荷重の役割を果たし、遅れ遅延現象が生じたものと考えられる。

4.3 残存疲労寿命に及ぼす影響評価

4.3.1 溶融を伴わない荷重 複数のプラズマディスラプション損傷を受けた第一壁について、溶融を

伴わない熱的、機械的または電磁氣的荷重の繰返しによる疲労寿命を考える。Paris 則と母材のき裂進展特性を表す材料定数 C と m を用いて積分を行うことにより残存疲労寿命を評価する場合、母材の C を 4.2 節で述べた速度比 r_i で補正する。

$$\frac{db}{dN} = r_i C \Delta K^m \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 r_i の下添字 i はプラズマディスラプション繰返し数、 b_0 は初期微小き裂長さ、 b_c は第一壁に許容される限界き裂長さ、 ΔK は溶融を伴わない熱的、機械的または電磁氣的荷重による応力拡大係数範囲である。3.1 節で述べた初期微小き裂長さが b_0 に、3.2、3.3、4.2 節で述べた溶融層と残留応力の影響が b_i, r_i に反映される。4.2 節で述べた、密集している初期微小き裂の合体と交差分岐の効果は、相殺するので、ここでは考慮しない。本研究では特定の照射条件と限られた熱負荷繰返し数について、 b_0, b_i, r_i の知見を得たが、残存疲労寿命の評価精度を向上させるためには異なる照射条件と熱負荷繰返し数について本研究で指摘したパラメータ b_0, b_i, r_i を明らかにする必要がある。

4.3.2 溶融を伴う荷重 複数のプラズマディスラプションを受ける第一壁の残存疲労寿命を評価する場合、再照射により消滅する限界欠陥寸法 $2b_e$ が重要である。 $2b_e$ は材料、照射条件により異なると考えられるが、本研究の場合 (SUS 304、入熱量 80 MW/m²、照射時間 70 ms)、2.0~2.6 mm の間にある。欠陥寸法 $2b < 2b_e$ ならば再照射により欠陥は再溶融し、凝固後は再照射前と同じ残存疲労寿命と見なせる。この場合、同一位置における繰返しプラズマディスラプションによる疲労き裂進展は生じないので、溶融による減肉のほうが問題となる。 $2b > 2b_e$ ならば同一位置における

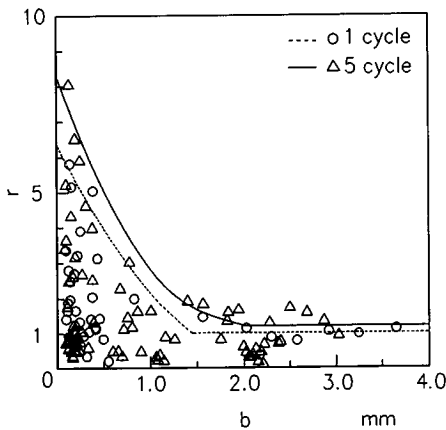


図 14 速度比とき裂長さの関係

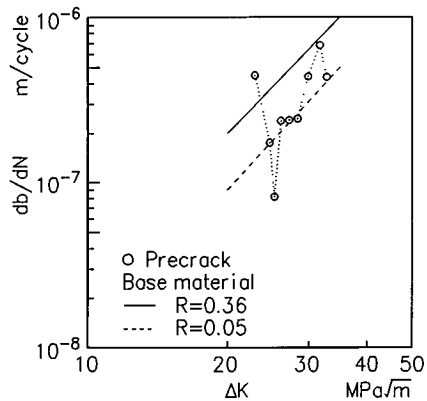


図 15 き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係 (予き裂試験片・再照射後)

繰返しプラズマディスラプションの熱応力により疲労き裂進展が生じる。この場合の残存疲労寿命は4・3・1項で述べた方法を用いて、安全側に評価することができる。ただし、式(7)の C, m には母材の熱衝撃疲労特性を、 ΔK には熱弾塑性解析に基づく力学パラメータを用いる必要がある [文献(3)の討論参照]。

5. 結 言

本研究では、トカマク形核融合炉第一壁候補構造材料の304ステンレス鋼の表面に高熱負荷を繰返し与えることにより、複数のプラズマディスラプションによる表面損傷を模擬し、損傷状態(初期微小き裂分布、硬さ、残留応力)と残存疲労寿命を調べ、複数のプラズマディスラプションを受ける第一壁の残存疲労寿命の評価方法について検討した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 熱負荷繰返し数1回と5回の損傷面の初期微小き裂の表面長さはほぼ等しく、本研究の熱負荷条件においては、初期微小き裂は繰返し熱負荷により再溶解して消滅し、繰返し熱負荷によるき裂進展は生じていない。初期微小き裂群の数は、熱負荷繰返し数の増加に伴い増加した。

(2) 熱負荷繰返し数1回と5回の溶融層の硬さはほぼ等しく、硬化深さは熱負荷繰返し数1回よりも5回のほうが深い。損傷面近傍の最大引張残留応力は熱負荷繰返し数の増加に伴い増加した。

(3) 熱負荷繰返し数1回と5回の損傷材の疲労強度と疲労限度はほぼ等しく、熱負荷繰返し数の増加に伴う初期微小き裂数とき裂群の数の増加は、疲労強度と疲労限度に影響しない。

(4) 熱負荷繰返し数1回と5回の損傷材の速度比は、同一き裂長さで比較すれば、熱負荷繰返し数1回よりも5回のほうが大きい。

(5) 複数のプラズマディスラプションを受ける第一壁の残存疲労寿命を評価する場合、再照射により消滅する限界欠陥寸法 $2b_e$ が重要である。欠陥寸法 $2b < 2b_e$ ならば再照射後は再照射前と同じ残存疲労寿命と見なせる。 $2b > 2b_e$ ならば同一位置における繰返しプラズマディスラプションの熱応力により疲労き裂進展が生じる。

本研究の遂行に当たり、実験に多大な協力をいただいた当時埼玉大学学生の和田傑君に謝意を表する。

文 献

- (1) 湊, ディスラプション時の電磁力・熱応力評価, 「プラズマディスラプション時の第1壁の健全性評価」研究会, (1985), 92.
- (2) 宮・関・荒木, 核融合における高熱流速実験の現状, 日本原子力学会誌, 29-10(1987), 855.
- (3) 小林・荒居・梶山・班目, プラズマディスラプション模擬損傷材の破壊強度と残存寿命の評価, 機論, 56-523, A (1990), 604.
- (4) Newman, J. C. Jr. and Raju, I. S., An Empirical Stress-intensity Factor Equation for the Surface Crack, *Eng. Fract. Mech.*, 15-1, 2(1981), 185.