

低サイクル疲労に関する VAMAS ラウンドロビン試験

北川 正樹*・山口 弘二*2

VAMAS Low Cycle Fatigue Round Robin Tests

Masaki KITAGAWA and Koji YAMAGUCHI

1. 緒 言

本報告は、VAMAS 低サイクル疲労の国際共同研究を推進しながら、高温低サイクル疲労試験で問題となった、例えば破断繰返し数に及ぼす熱電対スポット溶接の影響、破損繰返し数の種々の定義などの問題点を明らかにして解決をはかるため、本研究部会で追加実験を加えて共同で議論し、結論が得られた温度測定法、破損繰返し数の材料力学的意味等を、国際ラウンドロビン試験結果とともに述べたものである。

1.1 国際ラウンドロビン試験について

本研究部会は、1982年フランスで開催されたベルサイユサミットで合意された国際協力プロジェクトの1つである VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards)¹⁾²⁾ のなかで、低サイクル疲労に対して日本国内で対応 (コンタクトパーソン: 西島 敏, NRIM) するための実行組織として、日本鉄鋼協会高温強度研究委員会熱疲労試験分科会 (主査: 雑賀喜規, 現: 石川島汎用機械(株)) を引継いで平成2年3月に設立された。

VAMAS 低サイクル疲労の国際ラウンドロビン試験の目的¹⁾ は、国際的な標準試験法を作成するための基礎資料を得ることである。低サイクル疲労試験結果に影響を与えるであろう実験条件、たとえば試験片形状、試験片表面仕上げ、伸び計、試験機、加熱方法、破損の定義等は、各研究機関で独自の手法が用いられている現状を考慮して、試験片表面の最終仕上げ条件、用語の定義、共通供試材、試験条件、及び報告事項などが記載されたガイドライン³⁾ に従って、試験が実施された。その試験結果は、国際会議等⁴⁾ でのデータの確認、議論を経て、英国物理学研究所 (NPL) によって最終報告書⁵⁾ にま

とめられている。

日本では、本研究部会において国内の参加機関の募集、供試材の配付、試験結果の解析とともに、熱電対の取り付け方の影響、種々の温度測定技術の精度、さらに種々の定義による破損繰返し数の比較、破損繰返し数の定義に関連してき裂長さとの関係等を検討するために国内追加実験なども進めてきた。

1.2 国際ラウンドロビン試験の国内参加機関、及び供試材と実験条件

国際ラウンドロビン試験には、ヨーロッパ6ヶ国の16研究機関が参加した。日本では表1に示す部会メンバーで試験結果の解析等を行ったが、ラウンドロビン試験には、そのうち10研究機関が参加し、国内追加試験は12研究機関が分担した。

表1 VAMAS 低サイクル疲労研究部会メンバーと試験分担

メンバー (所属機関)		国際ラウンドロビン試験	国内追加試験
主 査 幹 事 委 員	北川正樹 (石播技研)		
	山口弘二 (金材技研)		
	岡崎正和 (長岡技科大)	○	○
	坂根正男 (立命大)		
	北村隆行 (京大)		
	小峰龍司 (動燃大洗)	○	○
	衛藤基邦 (原研東海研)	○	○
	小林一夫 (金材技研)	○	○
	菊池正夫 (新日鉄第二技研)	○	
	山田武海 (NKK 本社)		
	中野善文 (川鉄技研)		
	時政勝行 (住金鉄鋼技研)		○
	横幕泰典 (神鋼機械研)		○
	飯久保知人 (大同特殊研)	○	○
園家啓嗣 (石播技研)	○	○	
左近淑郎 (三菱重工高砂研)	○	○	
岡部永年 (東芝電機技研)	○	○	
山下満男 (富士電機生産技研)	○	○	
福田嘉男 (日立機械研)	○	○	
新田明人 (電力中研泊江研)			
事務局 寺口彰俊 (日本鉄鋼協会)			

平成4年3月17日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Mar. 17, 1992; Accepted on Apr. 10, 1992)

* 本会基礎研究会 VAMAS 低サイクル疲労研究部会主査 石川島播磨重工業(株)技術研究所構造材料研究部部長 工博 (Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co., Ltd.)

*2 本会基礎研究会 VAMAS 低サイクル疲労研究部会幹事 金属材料技術研究所損傷機構研究部第1研究室長 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku Tokyo 153)

Key words: low-cycle fatigue; high temperature; testing method; standarization.

表2 供試材の熱処理条件と化学組成

供試材	熱処理	化学組成 (mass%)															
		C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe	N	Cu	Co	Ti	Nb	Al	
316L 9Cr-1Mo	1140°C/40 min	0.019	0.45	0.001	0.029	1.69	12.1	17.3	2.35	BAL	0.069	0.295	0.13	0.005	0.005	0.032	
	950°C/30 min	0.08	0.254	0.0015	0.022	0.366	0.15	8.26	0.99	BAL	—	0.11	—	—	—	0.019	
IN 718	760°C/1 h	0.023	0.03	0.0017	0.002	0.03	52.3	18.0	3.18	19.5	—	0.005	0.02	0.98	5.35	0.49	
	960°C/1 h	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
N 101	720°C/8 h	0.053	0.08	0.002	—	0.07	BAL	24.2	1.45	0.18	—	0.01	19.2	3.02	0.91	1.41	
	620°C/8 h	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1120°C/1 h	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	850°C/16 h	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

表3 低サイクル疲労試験条件

供試材	温度(°C)	全ひずみ範囲 (%)		
316L	550	2.0	1.2	0.6
9Cr-1Mo	550	2.0	1.2	0.6
IN 718	550	2.0	1.2	1.0
N 101	850	1.2	0.7	0.5

供試材としては、繰返し加工硬化材として 316 L 鋼、加工軟化材として 9Cr-1Mo 鋼とインコネル 718 (以下 IN 718 合金)、安定材としてナイモニック 101 (以下 N 101 合金) が選定された。それぞれの化学組成、熱処理条件を表 2 に示す。N 101 合金は INCO Alloy 社、その他は UNIREC 社が製造したものである。

疲労試験は、ガイドライン³⁾に従い、全ひずみ制御、三角波、ひずみ速度 $10^{-3}/s$ の条件で、表 3 に示す各試験条件毎に各機関 3 本ずつ、計 9 本の試験を行った。試験片表面の最終仕上げ状態は平均あらさで $0.4 \mu m$ 以下にすること以外は、各機関が通常試験を行っている方法で実施した。各機関の試験片形状、表面あらさ、伸び計や試験機のタイプ、荷重軸のアラインメント、加熱方法、熱電対の種類、熱電対の取り付け法等は、試験結果とともに、最終報告書⁵⁾にまとめられている。

2. 高温低サイクル疲労試験法の現状

金属材料の高温低サイクル疲労試験は、各研究機関で広く行われている。しかし、その試験法に関しては、表 4 に示すように米国の材料試験協会⁶⁾、日本材料学会⁷⁾、日本溶接協会⁸⁾の推奨試験法、あるいは Halford⁹⁾、Thomas¹⁰⁾の提案など種々あり、国際的な標準試験法は未だ制定されていない。各試験法の内容も、表 4 のように一般的記述であるため、試験片形状を始めとした試験条件に関しては、各研究機関が独自の方法を採用しているのが現状である。熱電対の取り付け方についても、スポット溶接は試験片肩部にしなければいけないと明記しているのは、Thomas¹⁰⁾のものだけで、他は溶接部から破壊が起きなければむしろスポット溶接を推奨している⁷⁾⁸⁾か、詳しく言及していない。

さらに、高温低サイクル疲労寿命として、破断繰返し数 N_f と破損繰返し数 N_x が定義されているが、特に後者の N_x の定義が明確になっていない。そのため、応力の低下率の値すら、日本では材料学会の熱疲労試験法⁷⁾などにならない 25% を採用している研究機関が多いが、ヨーロッパの研究機関では、1.5 から 95% まで種々な値が採用されている⁵⁾。

表4 高温低サイクル疲労試験法の比較

		ASTM E606 ⁶⁾	材料学会 ⁷⁾	溶接協会 ⁸⁾	Halford ⁹⁾	Thomas ¹⁰⁾
試験片	直径 平行部長さ 標点間距離 肩部曲率半径	$\geq 6.35 \text{ mm}$ $2D \sim 3D$ $\geq D$ $4D \sim 8D$	10 mm 40 mm $D \sim 2D$ —	$\geq 6 \text{ mm}$ $\geq GL + D$ $GL/D \geq 1$ $R/D \geq 2$	— — $2D \sim 4D$ —	6~12 mm $2D \sim 4D$ $2D \sim 4D$ $R/D > 2$
	表面仕上げ	$\geq 0.2 \mu m$	エメリー紙 400 番以上	エメリー紙 400 番以上	$\geq 0.2 \mu m$	表面粗さに敏感な材料 $< 0.2 \mu m$
試験機	試験片取付	曲げひずみは最小ひずみレンジの 5% 以下	試験片装着時にねじりモーメントを負荷しない	曲げ応力は軸応力の 5% 以下	曲げ応力は軸応力の 5% 以下	曲げひずみは軸ひずみの 5% 以下
	温度調整	$\geq \pm 2^\circ C$	昇温、降温時の温度差 $\pm 10^\circ C$ 以下	—	—	RT ~600°C $\pm 3^\circ C$ ~800°C $\pm 4^\circ C$ ~1000°C $\pm 6^\circ C$
熱電対取付		—	点溶接	高周波加熱の場合は点溶接、炉加熱の場合は縛り付け	高周波加熱の場合は点溶接、炉加熱の場合は縛り付け	高周波加熱の場合は肩部に点溶接、炉加熱の場合は縛り付け
破損繰返し数の定義		完全破断又は引張ピーク応力値の降下が圧縮ピーク応力値の降下の一定比率以下になった時点	ピーク応力値が定常値の 3/4 に低下した時点	ピーク応力値が定常値の 3/4 又は 0.9 に低下した時点	荷重範囲が 5% 低下した時点	数種類の方法を提案

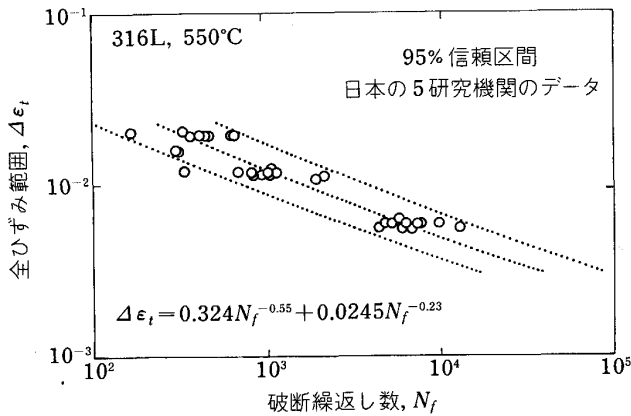


図 1 316L 鋼における全ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

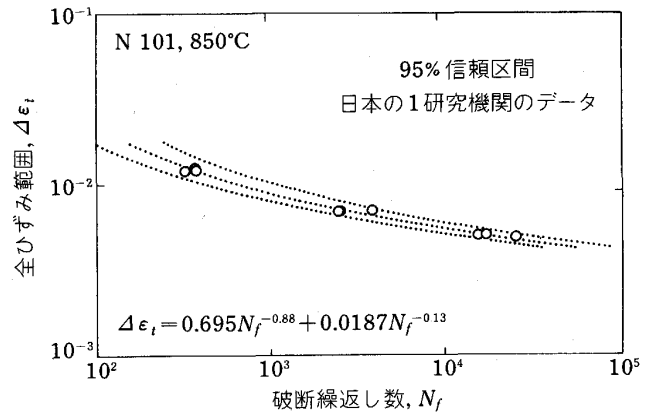


図 4 N101 合金における全ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

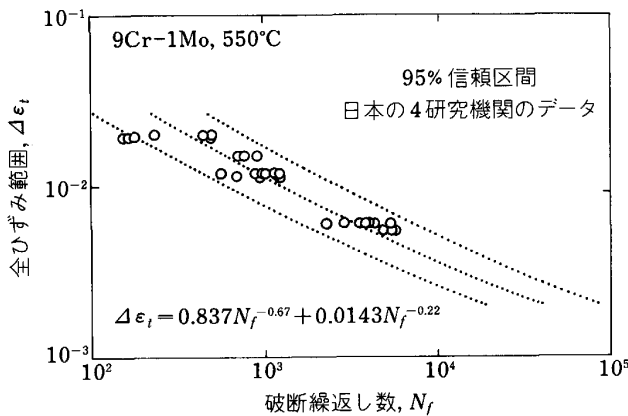


図 2 9Cr-1Mo 鋼における全ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

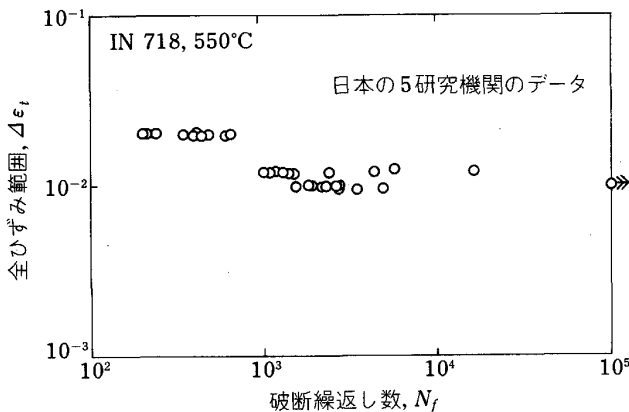


図 3 IN718 合金における全ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

3. ラウンドロビン試験の結果

3.1 全ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

日本のデータ¹¹⁾について、各材料毎に全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ と破断繰返し数 N_f (完全破断) の関係をプロットしたのが図 1, 2, 3, 及び 4 である。316L 鋼は 5 機

関, 9Cr-1Mo 鋼は 4 機関, IN718 合金は 5 機関, N101 合金は 1 機関の結果である。破断繰返し数のばらつきがひずみレベルによらず、正規分布すると仮定したときの 95% 信頼区間も同時に示している。しかし、IN718 合金では、破断繰返し数のばらつきはひずみレベルが小さいところで著しく大きくなる傾向が観察された。例えば $\Delta\epsilon_t = 1\%$ における寿命のばらつきは対数で 2 桁にも達している。これは後述するように熱電対の取り付け方法の差によるばらつきを含んでいることがわかったので、統計解析は行っていない。図 1, 2 の 316L 鋼, 9Cr-1Mo 鋼では、共通試験の結果としては比較的まとまっていると考えられる。図 4 の N101 合金は、1 機関だけのデータであるため破断繰返し数のばらつきは非常に小さい。

ヨーロッパと日本の全データに対する最終報告書⁵⁾の結論は、以下のようにまとめられている。

- (1) 破断繰返し数のばらつきは機関内では比較的少なく、機関間で相対的に大きい。
- (2) ばらつきの原因は単一の要因だけに起因するとは考えられず、この程度のばらつきは現在使われている試験法の多様性を反映したものと見なせる。
- (3) 破断繰返し数のばらつきは、316L 鋼, 9Cr-1Mo 鋼では比較的少なく、IN718 合金, N101 合金では著しく大きい。
- (4) 素材の採取位置、試験機や熱電対のタイプ、試験片表面仕上げのあらさなどと破断繰返し数には明らかな相関は認められない。

(5) 平滑丸棒試験片に押しあて式伸び計を用いた軸ひずみ制御の試験 (最終報告書で Category Z と定義) 以外の試験, 例えば径制御や肩部制御, あるいはリッジ付試験片の試験では応力幅や破断繰返し数に平均値から顕著にはずれるケースが多い。

なお、日本の機関の試験条件は、すべて Category Z の範疇に入る。また、本部会においても、破断繰返し数

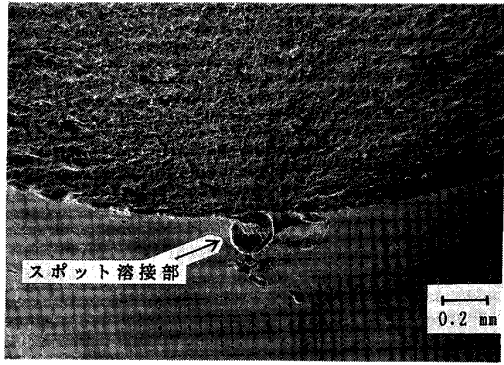


写真1 熱電対スポット溶接部からき裂が発生、成長した IN718 合金の疲労破面

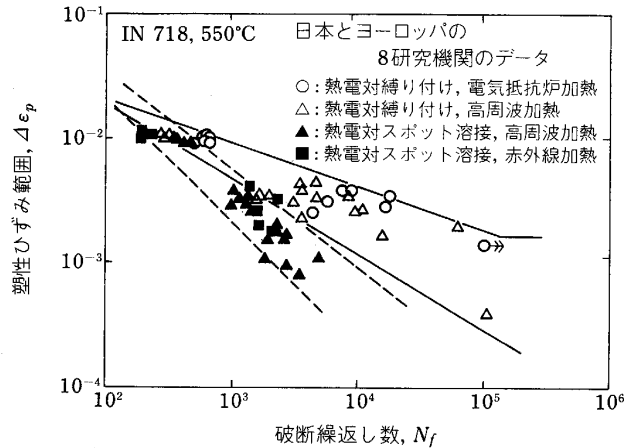


図7 IN718 合金における塑性ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

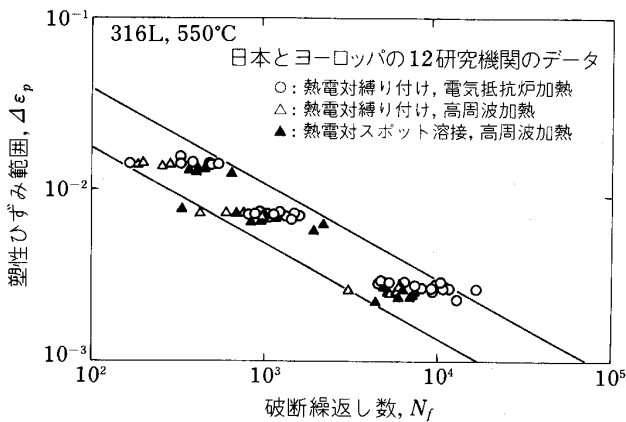


図5 316L 鋼における塑性ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

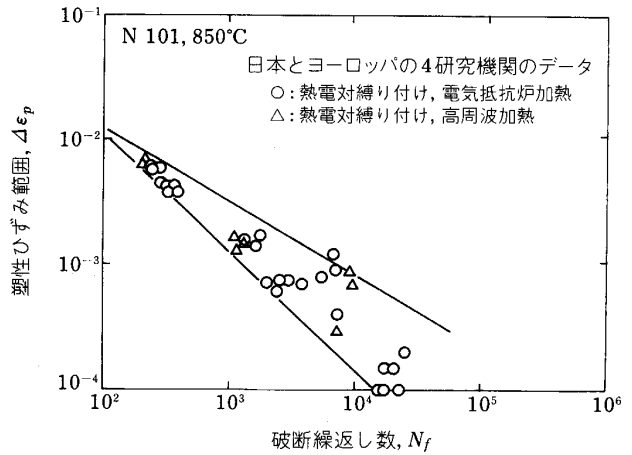


図8 N101 合金における塑性ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

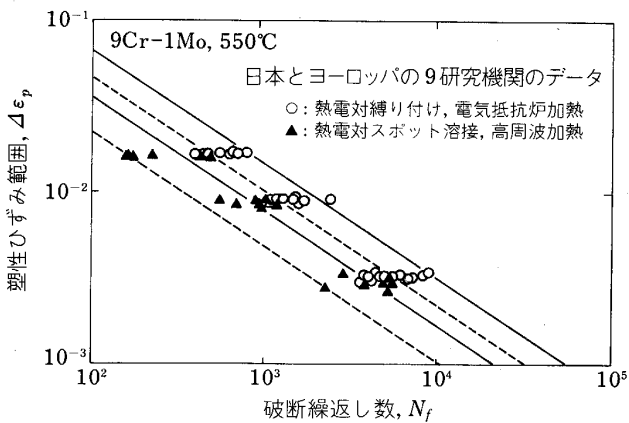


図6 9Cr-1Mo 鋼における塑性ひずみ範囲と破断繰返し数の関係

のばらつき要因として、試験片形状や表面あらさについて検討したが、これらは破断繰返し数のばらつきの主要因とは考えられなかった¹²⁾。

3.2 破断繰返し数に及ぼす熱電対取り付け方法の影響

本部会で日本の全試験片の破面調査を行ったところ、IN718 合金では熱電対を試験片平行部にスポット溶接した試験では、写真1のように全ての試験片はスポット

溶接部のきずから疲労き裂が発生していた。316 L 鋼、9Cr-1Mo 鋼では、各ひずみ範囲の一部の試験片で同様なところが疲労き裂の発生箇所であることが確認された¹²⁾。

そのため、最終報告書⁵⁾に熱電対の取り付け法と加熱方法が明記されている全データについて、塑性ひずみ範囲と破断繰返し数の関係でプロットしたのが図5、6、7、8である。ただし、前項(5)のような傾向があるため、ここでは Category Z の条件に限っている。

図5の316 L 鋼では、加熱方法、熱電対取り付け法の違いによる破断繰返し数の差はほとんど認められないが、図6の9Cr-1Mo 鋼ではわずかに、図7のIN718 合金では明確に熱電対をスポット溶接した試験条件のものが低破断繰返し数を示すことがわかる。図8のN101 合金の場合は、全てのデータが加熱方法によらず熱電対取り付けの条件であるため、破断繰返し数のばらつきは少なくなっている。しかし、熱電対取り付け法が明記されていない高周波加熱の試験条件の多くは、図8よりも著しく低破断繰返し数を示しているため、N101 合金の

場合も IN 718 合金と同様な影響が存在するであろうと思われる。

4. 種々の温度測定法, 及びその精度

4.1 種々の温度測定法の測定結果

低サイクル疲労試験における試験片加熱方法として高周波, または赤外線加熱を用いる場合, 温度の制御と測定は多くの場合試験片平行部に直接熱電対をスポット溶接することにより行われていた。これは, 316 鋼等での従来の共同研究を通じて熱電対のスポット溶接の影響は無いと考えられていたためであろう。しかし, 3.2 項で明らかのように, 今回の国際共同研究でその影響が鋼種によって大きく現れることがわかった。このため, 熱電対を直接スポット溶接することなく試験片平行部の温度を測定する方法として, 種々な測定法について検討した。以下, それぞれの結果について述べる。

(1) 輻射温度計による測定

表 5 は, 輻射温度計による実測値をスポット溶接した熱電対による測定結果と比較して示したものである。試験片には 316 L 鋼の低サイクル疲労試験片を用いた。試験片中央部の温度が 492~611°C の各温度時に, 中央部と R 部 (中央から 28~30 mm 離れた位置) の温度を測定した。輻射温度計は, 測定範囲が 300~600°C のもの (MINORUTA, IR-308) であり, 輻射率は昇温後 2 時間経過時に中央部熱電対温度により補正している。表に示すように, 昇温後 2 時間経過時点での測定値は, いずれの温度においても熱電対との測定結果との差異は ±2°C 程度であり, 良好な測定結果を示している。しかし, 24 時間経過後は試験片表面の酸化により, 輻射率が変化するため中央部の輻射温度計の測定結果には誤差が生じる。

(2) 押し付け型温度計による測定

表 6 は, 押し付け型温度計 (ANRITU, HL-30) による測定結果を示す。試験片には 316 L 鋼の低サイクル

表 5 輻射温度計による測定結果 (°C)

経過時間	R 部		中央部	
	熱電対	輻射温度計	熱電対	輻射温度計
2 h	409	409	546*	546*
	429	428	570	569
	458	458	611	609
	368	368	492	490
24 h	413	415	550	560

* 輻射率は 2 h 経過後の中央部熱電対で補正
熱電対はスポット溶接した。

表 6 押し付け型温度計による測定結果 (°C)

熱電対	400	450	500	550	600
押し付け型温度計	400	449	498	544	575

ただし, 試験片中央部の温度を示す。熱電対はスポット溶接した。

試験片を用いた。試験片中央部の 500°C 以下の各温度では, 熱電対温度と良好な一致を示したが, 500°C 以上では接触部からの熱放射が大きくなるため熱電対温度より低い値を示し, 温度が高い程誤差が大きくなるようである。

(3) 熱電対押し付け法による測定

表 7 は, 熱電対押し付け法による測定結果を示す。この方法は先端を溶接した熱電対を高周波加熱コイルの間から差し込み, 試験片表面に押し付けて測定したものである。試験片には 9Cr-1Mo 鋼の低サイクル疲労試験片を用いた。この方法による測定では, スポット溶接した熱電対と比較して 100°C 近くの誤差を生じる場合がある。また, それぞれの温度で 3 回測定した結果, 押し付ける力により測定値がかなり変動することがわかった。

(4) 熱電対縛り付けによる測定

熱電対をグラスウール等の耐熱性の紐で試験片に縛り付ける方法により温度測定を行った。次の 4 つの方法で熱電対の先端処理を行い, それぞれ測定値をスポット溶接した熱電対の測定値と比較した。

- 熱電対先端を溶接する。
- 熱電対先端を切り離す。
- 熱電対先端を溶接した後, 偏平に打ち延す。
- 熱電対先端を切り離した後, それぞれの先端を偏平に打ち延す。

熱電対は, いずれも直径 0.3 mm の R 熱電対を使用した。c の方法では溶接により先端部分を約 1 mm の球状にした後厚さ 0.3 mm 程度の円盤形状にした。また, d の方法ではそれぞれの先端を厚さ 0.08~0.09 mm, 長さ 3~4 mm 程度の平板形状にした。a~d の測定結果を表 8 に示す。表に示すように c および d の方法によれば, スポット溶接した熱電対と同程度の精度で温度が計測できる。ただし, これらの方法でも, 縛り付けに用いる紐の耐久性 (張力) や試験片等の表面酸化などにより, 条件によっては長時間安定して温度を測定できない場合が考えられる。本方法の温度測定を用いた国内追加疲労実験では, 温度は 550°C で試験時間が約 8 時間のものであるが, 試験中 5~10°C 程度変動が観察される場合

表 7 熱電対押し付け法による測定結果 (°C)

熱電対点溶接	500	550	600
熱電対押し付け法	429~432	463~478	497~510

ただし, 試験片中央部の温度を示す。熱電対押し付け法は, それぞれ 3 回測定した。

表 8 熱電対縛り付けによる温度測定結果 (°C)

熱電対点溶接		500	550	600
熱電対縛り付け	a. 先端溶接まま	469	520	567
	b. 先端切り離しまま	489	541	592
	c. 先端溶接後偏平	—	547~551	—
	d. 先端切り離し後偏平	503	548	601

もあった¹²⁾。ただし、この追加実験から、高周波加熱の場合において破断繰返し数に及ぼす熱電対縛り付けの影響が、9Cr-1Mo 鋼ではわずかに、IN718 合金では明瞭に存在することが再確認できた¹²⁾。

なお、熱電対の出力に対する熱電対先端の塑性変形の影響は無いと考えてよい。ただし、塑性変形された先端部内に温度差が無いことが条件であり、そのためにも先端部分をあまり大きくしてはならない。

4.2 高温低サイクル疲労試験の推奨温度測定法

熱電対をスポット溶接することなく、試験片平行部の温度を測定する方法について検討した結果、輻射温度計あるいは熱電対縛り付けによる方法を用いれば、少なくとも試験開始時は正確に温度が測定できることがわかった。

以上のことから、次のような手順で試験片の温度の制御と測定を行えば、高周波加熱によっても熱電対を平行部にスポット溶接することなく低サイクル疲労試験が可能と考えられる。

(1) 予め準備した温度校正用試験片の肩部あるいは R 部と平行部に熱電対をスポット溶接し、両部の温度を予備試験として校正しておく。

(2) 本試験においては、試験片の肩部あるいは R 部のみに熱電対をスポット溶接し、高周波加熱の制御を行う。この際平行部の温度は熱電対縛り付け法または輻射温度計で試験開始時に確認する。

なお、ヨーロッパの研究機関では、ラミネート法と呼ばれる温度計測法も採用されている。この方法は、熱電対の 2 種類の金属をそれぞれ層状に重ね合わせて試験片表面に接触させるものであり、良好な温度測定が可能との報告があった⁴⁾。

5. 定義の違いによる破損繰返し数 N_x のばらつき

第 2 章でも述べたように、高温低サイクル疲労の破損繰返し数 N_x の標準的な決め方が規格化されていない。そこで、種々の N_x の定義による N_x のばらつきを今回のデータを用いて解析した結果について述べる。

5.1 解析方法

破損繰返し数の定義としては、図 9 に模式的に示す 4 つの方法を採用した。

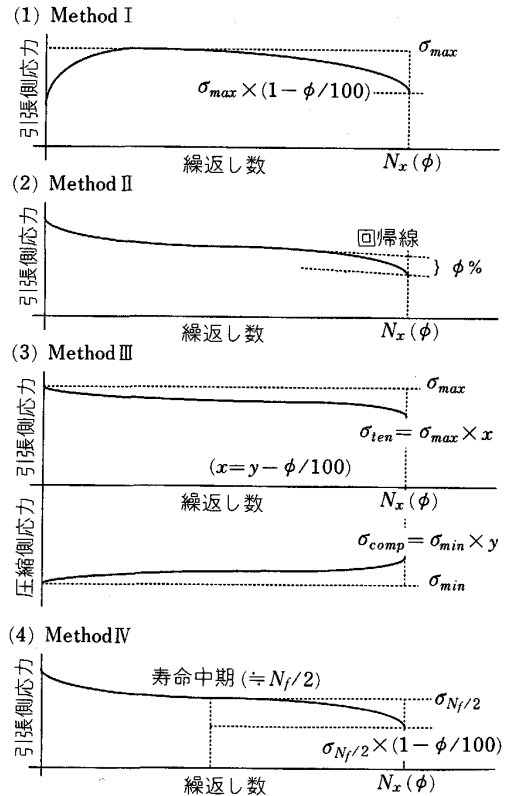


図 9 破損繰返し数 N_x の各種算出法

Method I ; 引張側応力振幅の最大値から一定比率 ϕ だけ低下した時点

Method II ; 引張側応力振幅が、定常状態の外挿で予想される値から一定比率 ϕ だけ低下した時点

Method III ; 引張側応力振幅の降下が、圧縮側応力振幅の降下より一定比率 ϕ 以上大きくなった時点

Method IV ; 寿命中期の引張側応力振幅から一定比率 ϕ だけ低下した時点

応力振幅の低下比率 ϕ は、10, 25, 50% の 3 ケースで解析した。各方法における破損繰返し数 N_x を繰返し応力挙動データから計算し、全ての試験片に対して算出された N_x の破断繰返し数 N_f に対する比率 (N_x/N_f) を対数正規確率紙に整理することによって、この比率のばらつき度合いから各定義の良否を検討した。

5.2 解析結果

各破損繰返し数の定義の解析評価結果は、表 9 に各鋼

表 9 破損繰返し数の定義に関するまとめ

材料 ϕ	316L			9Cr-1Mo			IN718			N101		
	10%	25%	50%	10%	25%	50%	10%	25%	50%	10%	25%	50%
Method I	○	○	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○
Method II	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Method III	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	○	○
Method IV	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○:ばらつき小 ○:ばらつき中 ×:ばらつき大

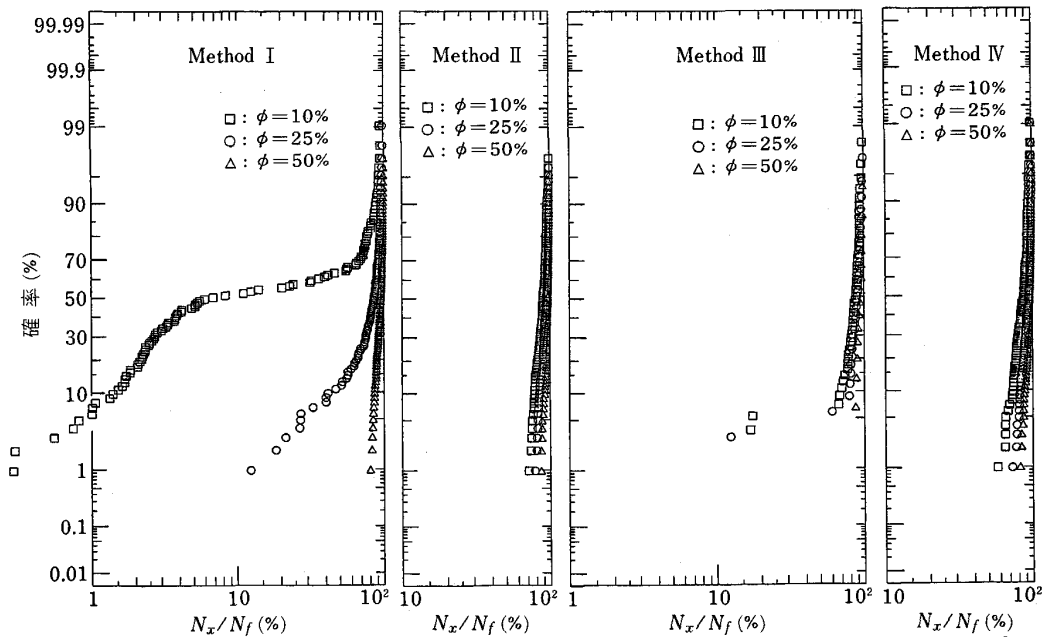


図 10 各種算出法による N_x/N_f のばらつき度合い

種毎にまとめた。また全鋼種に対して、比率 N_x/N_f を対数正規確率紙にプロットしたものが図 10 である。

表 9 から、各定義法の特徴は以下のようにまとめられる。

(1) Method I は、繰返し硬化材には適しているが、繰返し軟化材に適用するには、 ϕ をある程度大きくすることが必要である。しかし、 ϕ の値には次章で述べるように限度がある。

(2) Method II は、4 鋼種すべての材料に対し ϕ の大きさにかかわらず良好な適用性を示す。特に、繰返し硬化、軟化の激しい材料に対して物理的に有意な方法であろう。しかし、 N_x を算出する際引張側ピーク応力を結ぶ回帰式を作成する必要があり、手間がかかる。

(3) Method III は、IN 718 合金等でばらつきがある。また、引張側圧縮側ともデータがきちんとそろっていないければ、 N_x を算出できない場合もでてくる。

(4) Method IV は、4 鋼種すべての材料に対し ϕ の大きさにかかわらず良好な適用性を示す。

図 10 では 4 つの定義による方法をそれぞれ全鋼種に対してプロットしている。この図から、Method II はばらつきが最も小さく、Method IV はそれにほぼ匹敵すると言える。したがって、直線回帰の手間を考えれば、Method IV が N_x の定義法として実用的と考えられる。ただし、試験末期に複数の大きなき裂があったりして、引張応力の減少がだらだらとゆるやかになる場合は注意を要する。

ϕ の適切な値の選定については次章で述べる。

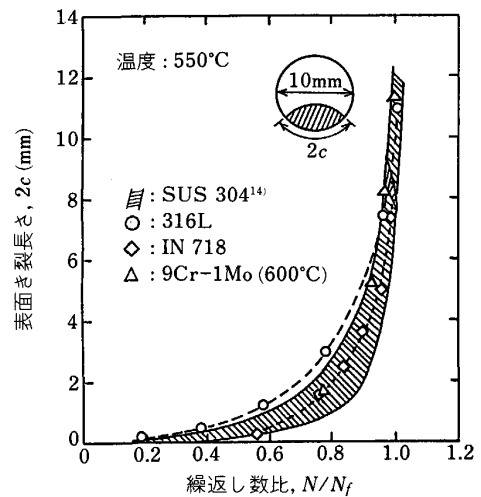


図 11 表面き裂長さと繰返し数比の関係

6. き裂長さと応力低下率 ϕ の値について

6.1 き裂長さと繰返し数比、及びき裂長さと応力比の関係

高温低サイクル疲労においては破断繰返し数 N_f に占めるき裂進展過程の割合はかなり大きいといわれている¹³⁾¹⁴⁾。直径 10 mm の中実丸棒試験片のひずみ制御疲労試験において発生したき裂の表面長さ $2c$ と繰返し数比 N/N_f の関係を図 11 に示した。この図には 304 鋼の文献データ¹⁴⁾ も示している。この図から、疲労き裂は繰返し数比の 0.1 から 0.4 の間で発生し、0.6 から 0.8 以降で急激に成長することがわかる。

破損繰返し数 N_x は、き裂の大きさで定義されるのが

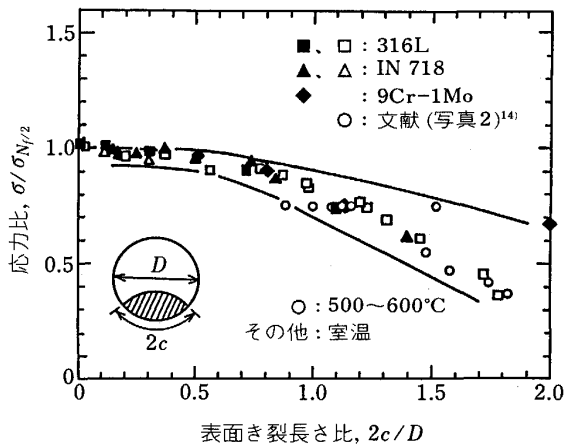


図 12 表面き裂長さ比と応力比の関係

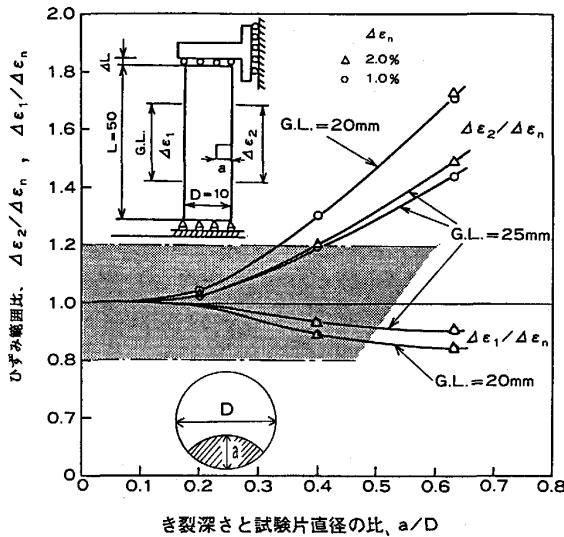


図 13 ひずみ範囲比とき裂長さ比の関係 (解析結果)

妥当と思われるが、試験中にき裂の大きさを連続的に計測することは困難であるため、通常は引張応力の変化から求めている。

そのため、き裂の大きさと引張側の応力比 $\sigma/\sigma_{N/2}$ の関係を求めた結果が図 12 である。ここで、き裂の大きさは試験片直径 D で基準化した $2c/D$ を用いた。図中の○印は、304 鋼の高温試験破断面から求めた個々の試験片のデータ (写真 2)¹⁴⁾で、その他は室温試験における試験片表面からのレプリカで測定したものである。この図から、き裂の大きさと応力比の関係は、種々の試験結果をまとめると、一般的には右下がりの傾向はあるものの、かなり大きなばらつきを含んでいる。次節では、その原因について考える。

6.2 き裂の大きさと応力比の関係のばらつき要因

応力比に基づいた破損繰返し数の定義を採用するに当たり、き裂の成長に伴うひずみ範囲や応力振幅の変化に及ぼす制御ひずみ検出位置の影響について解析的検討を

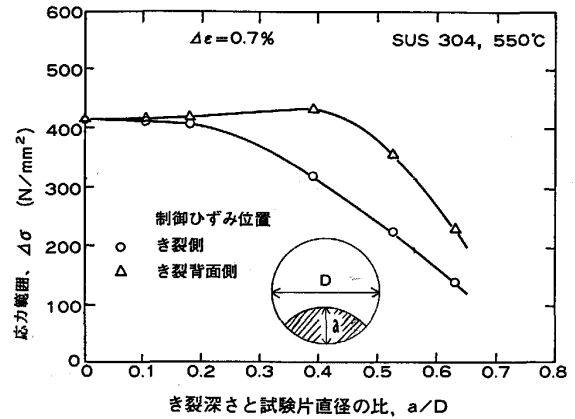


図 14 応力範囲の繰返し特性に及ぼす制御ひずみ検出位置の影響 (解析結果)

行った。丸棒の表面に深さ a の半円き裂がある場合に解析した結果の 1 つが図 13 で、境界条件等は図中左上に示した。この図は、直径 D の丸棒の端部における繰返し変位 ΔL を全長 $L=50\text{mm}$ で除した値を公称ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_n$ とし、き裂側のひずみ範囲 $\Delta\epsilon_2$ 及びその背面側ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_1$ の $\Delta\epsilon_n$ に対する比がき裂の大きさ a/D によってどのように変化するかを、 $\Delta\epsilon_n$ と GL をパラメータにして示したものである。

また、図 13 とは逆に、ひずみ範囲を一定に制御している伸び計がき裂側にある場合と背面側にある場合に、繰返し応力範囲がどのように変化するかを示したのが、図 14 である。

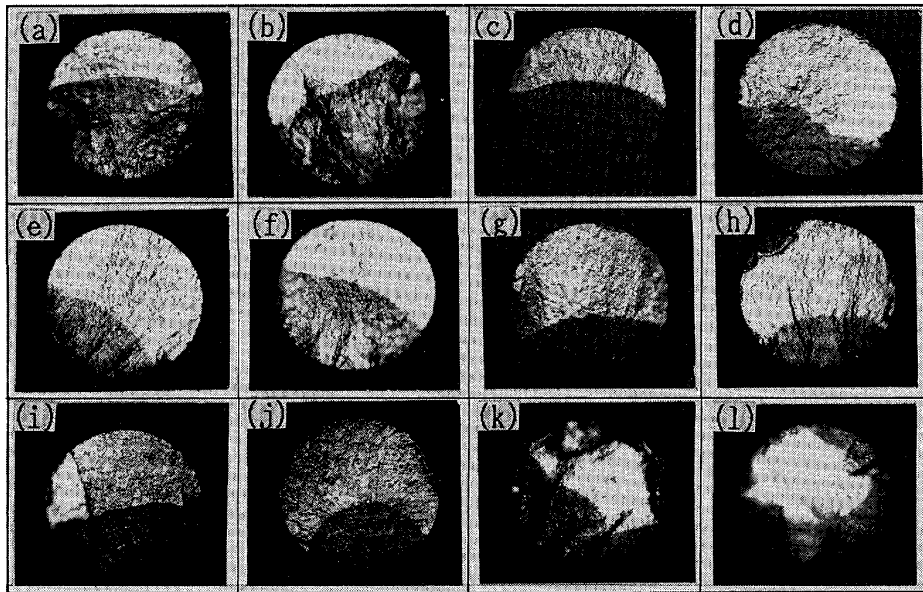
以上の解析結果は、材料が繰返し加工硬化、あるいは軟化挙動は示さないなど単純化しているが、少なくとも図 13 からは、き裂が大きくなるとき裂側と背面側でひずみ範囲が異なること、図 14 からは、伸び計とき裂の位置によって応力変化挙動が異なることが明らかである。このような挙動が、図 12 のばらつきの大きな要因と考えられる。

なお、図 13 などの関係は実験的にも検証された¹²⁾。

6.3 破損繰返し数 N_x の定義の条件

破損繰返し数 N_x の定義の条件の 1 つとして、き裂が発生成長することでき裂側と背面側でひずみ範囲が大きく異なってくることは、ひずみ範囲一定制御試験としての意味が曖昧になるという判断が考えられる。図 13 で検討したように、例えば $\Delta\epsilon_2/\Delta\epsilon_n$ の限界として明確な値は存在しないが、おおよそ 1.2 以下をひずみ範囲一定制御試験としての臨界値と考えると、き裂の大きさ a/D がおおよそ 0.35 から 0.4 に達する以前に N_x を定義しなければならないことになる。

また、破損繰返し数の決定は、応力の変化から求めるのであるから、図 14 からき裂の背面側に伸び計があった場合、少なくとも応力が明確に低下し始める時点、すなわち、き裂の大きさ a/D で考えると 0.4 から 0.5 以



(a)304 鋼, 550°C, $\alpha = 42$
 (d)304 鋼, 550°C, $\alpha = 75$
 (g)304 鋼, 600°C, $\alpha = 75$
 (i)9Cr-1Mo 鋼, 500°C, $\alpha = 75$

(b)304 鋼, 500°C, $\alpha = 37$
 (e)316 鋼, 550°C, $\alpha = 75$
 (h)304 鋼, 550°C, $\alpha = 75$
 (k)321 鋼, 600°C, $\alpha = 75$

(c)304 鋼, 600°C, $\alpha = 47$
 (f)316 鋼, 550°C, $\alpha = 55$
 (j)9Cr-1Mo 鋼, 550°C, $\alpha = 70$
 (l)316 鋼, 550°C, $\alpha = 75$

ただし $\alpha = \sigma_{final} / \sigma_{N/2} \times 100 (\%)$

写真 2 疲労及びクリープ疲労試験終了時の破面の様相

上に達した以降で N_x を定義しなければならないことになる。

き裂と伸び計の位置関係は試験毎に変化するものであるから、上述の2つの条件を満足させるには、 a/D が 0.4 に達した時点をも N_x と定義するのが妥当である。

a/D の値が 0.4 という条件は、き裂が完全な半円状で成長すると考えれば、丸棒試験片断面に対するき裂の面積率は約 25% に当たるため、 N_x の定義として応力の低下率が 25% の時点とする従来の定義⁷⁾ に材料力学的意味を与えたことになる。ただし、実際の破面上に残された高温疲労き裂の進展形跡は、写真2のようにさまざまな形があるため、応力減少率 25% に対応するき裂の面積率は平均的には 30% に達する¹²⁾。また、 $a/D = 0.4$ はき裂が半円状の場合、表面き裂長さで考えると $2c/D = 1$ にほぼ対応する。

き裂成長に伴う応力・ひずみヒステリシスループの形の変化を詳細に検討した結果、圧縮側のへこみ、すなわちカusp (cusp) は、き裂の大きさが $2c/D = 1$ 付近から出現し始めることが一部の試験で確認できた¹²⁾。カuspの出現を破損繰返し数とする定義⁶⁾ もまた、合理的な手法と思われるが、き裂の大きさの点からは上述の定義と材料力学的意味は同じとなる。しかし、カuspの出現は連続的にヒステリシスループを記録した上で判定しなければならず、実用的とはいえないだろう。

7. ま と め

VAMAS 低サイクル疲労の国際共同研究のなかで、高温低サイクル疲労試験での諸問題、例えば破断繰返し数に及ぼす熱電対スポット溶接の影響と熱電対スポット溶接の代替温度測定法、及び破損繰返し数の材料力学的意味などを明らかにした。結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 低サイクル疲労寿命に及ぼす熱電対スポット溶接の影響は、これまであまりないと考えられてきたが、今回の結果から超合金ばかりでなく、9Cr-1Mo 鋼のような中強度高延性材料においても存在することが明らかとなった。

(2) 高周波加熱の場合には、スポット溶接に替わる熱電対取り付け法として、偏平に打ち延した熱電対先端を耐熱性の紐で縛りつける方法を推奨した。ただし、温度制御用熱電対は、試験片肩部にスポット溶接しなければならない。また、輻射温度計を用いて、非接触で温度測定する方法も酸化が激しくならないうちは正確であることが分かった。

(3) 破損繰返し数に関する種々の定義について比較した結果、引張側応力振幅が、外挿で予想される値から一定比率だけ低下した時点、あるいは寿命中期の引張側応力振幅から一定比率だけ低下した時点で定義する方法が、鋼種や応力の低下比率に依存せずばらつきが少ない

ことがわかった。

(4) き裂と伸び計の位置関係によって、ひずみ範囲や応力変化挙動が異なることを解析的に明らかにした結果、破損繰返し数の定義として、き裂の大きさとして $a/D = 0.4$ 、あるいは $2c/D = 1$ の時点とする条件を提案できた。ここで、 D は試験片直径、 a はき裂を半円としたときのき裂深さ、 $2c$ は表面き裂長さである。 $a/D = 0.4$ 、あるいは $2c/D = 1$ は、試験片断面に対するき裂の占有面積率が約 25% であることを意味している。従って、破損繰返し数を決める際の引張側応力振幅の低下率として 25% の値を採用するのが妥当と考えられた。

最後に、本部会のこれらの成果は、ニューマテリアルセンターで審議中の高温低サイクル疲労試験 JIS 方案に反映されたことを記し、関係各位に深く感謝する。

文 献

- 1) VAMAS Bulletin No. 8, NPL, England (1988)
- 2) 金尾正雄, 新居和嘉, 新谷紀雄: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 207
- 3) G. B. Thomas and C. Amzallag: Constant Amplitude Low Cycle Fatigue Testing (Private communication)(1985)
- 4) Report of Conf. on Harmonisation of Testing Practice for High Temperature Materials, Ispra, Italy (1990)
- 5) Final Report on Evaluation of Low Cycle Fatigue Test Data in the BCR/VAMAS Intercomparison Programme, NPL, England (1990)
- 6) ASTM E606-77T, Tentative Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing, ASTM (1978)
- 7) 日本材料学会高温強度部門委員会: 熱疲労共通試験結果報告, 材料, **24** (1975), p. 254
- 8) 日本溶接協会 P. FCI 委員会: 高速炉構造材の高温低サイクル疲労試験方法に関する研究成果報告 (日本溶接協会編) (1981)
- 9) G. R. Halford: Fatigue in Creep Range-Material Testing, Recommended for ASME Boiler and Pressure Vessel Code Committee (1975)
- 10) G. B. Thomas, R. Hales, J. Ramsdale, R. W. Suhr and G. Sumner: Fatigue Frac. Engng. Mater. Struct., **12** (1989), p. 135
- 11) 日本鉄鋼協会高温強度研究委員会熱疲労試験分科会資料: 低サイクル疲労試験法に関する VAMAS 共通試験 (日本鉄鋼協会編) (1989)
- 12) 日本鉄鋼協会 VAMAS 低サイクル疲労研究部会資料: 低サイクルの VAMAS 国際ラウンドロビン試験に関する資料 (日本鉄鋼協会編) (1992)
- 13) S. Usami, Y. Fukuda and S. Shida: Trans. ASME, J. Pressure Vessel Tech., **108** (1986), p. 214
- 14) 福田嘉男, 佐藤善美, 中村和博, 高橋由紀夫, 桑原和夫: 材料, **39** (1990), p. 982