

【論文】

金属材料の回転曲げ超長疲労挙動

吉房 篤*1
寺田 裕紀*2杉尾 秀昭*2
田中 哲志*3

Very Long Fatigue Life Behavior of Metallic Materials in Rotating Bending

Atsushi YOSHIFUSA Hideaki SUGIO Hiroki TERADA Satoshi TANAKA

Abstract- In order to investigate the very long fatigue life characteristics, the rotating bending fatigue tests were carried out on the high strength steel SUJ2, SNCM439 and SCM435 material.

Keyword: very long fatigue life, rotating bending, high strength steel, SUJ2, SNCM439, SCM435

1. 緒言

各種機械・構造物の余寿命評価や信頼性確保に対する社会的要請が一段と高まり、実製品に対する寿命延伸技術の確立が強く望まれている。これは設計時の耐用年数を超えて機械・構造物を長期間使用することにつながるもので、部材の長寿命域における疲労特性が重要な課題となる。一方、多くの鉄鋼材料の疲労特性に関しては $N=10^6\sim 7$ 付近の応力繰返し数で明瞭な疲労限度が現れる傾向がある。しかし、高強度鋼や表面処理材等に関し $N=10^5\sim 6$ の付近で見掛けの疲労限度が現れた後、 $N=10^7$ 前後から再び低下する二段折れ曲がり現象がしばしば報告されており⁽¹⁾、⁽¹⁸⁾、ビッカース硬さが $Hv=400\sim 500$ 程度を超えるとその現象が起こるといわれている⁽¹⁹⁾。

本研究では、硬さの異なる高強度鋼 SUJ2, SNCM439 と中強度鋼 SCM435 の各々について、強度に及ぼす硬さの影響を検討するために回転曲げ疲労を行い、超長寿命の S-N 曲線を求めるとともに、破面観察を行った。また、内部を起点とした破壊については破面の定量的評価も検討した。

さらに、表面仕上げの影響も調べるために全ての材料の試験片について研削材(以後 G 材)及び電解研

*1 大学院工学研究科機械工学専攻

*2 機械工学科 4 年

*3 機械工学科

磨材(以後 EP 材)を用いて研究実験も行った。なお、実験の打ち切り最高繰返し数は $N=1\times 10^9$ とした。

2. 供試材および実験方法

本研究で用いた供試材は SUJ2, SNCM439 及び SCM435 でありのそれぞれの化学成分と機械的性質を Table 1 及び 2 に示す。

SUJ2 の熱処理は、 $835^\circ\text{C}\cdot 40\text{min}$ 加熱・油冷 $\rightarrow 180^\circ\text{C}\cdot 120\text{min}$ 加熱・空冷である。最小直径 $d=3\text{mm}$ (応力集中係数 $K_t=1.06$)に仕上げられている。ビッカース硬さ $Hv=740$ である。

SNCM439 の熱処理は、 $850^\circ\text{C}\cdot 60\text{min}$ 加熱・油冷 $\rightarrow 180^\circ\text{C}\cdot 120\text{min}$ 加熱・空冷である。最小直径 $d=3\text{mm}$ (応力集中係数 $K_t=1.06$)に仕上げられている。ビッカース硬さ $Hv=610$ である。

SCM435 の熱処理は、 $855^\circ\text{C}\cdot 30\text{min}$ 加熱・油冷 $\rightarrow 600^\circ\text{C}\cdot 60\text{min}$ 加熱・水冷である。最小直径 $d=4\text{mm}$ (応力集中係数 $K_t=1.08$)に仕上げられている。ビッカース硬さ $Hv=320$ である。

疲労試験は、学会より提供されたままの研削材(G材)とそれに試験片表面の加工層と残留応力を除去するために表面を $30\mu\text{m}$ 以上電解研磨⁽²⁰⁾したものの(EP材)について行った。Fig. 1 に試験片の形状寸法を示す。

疲労試験には4連式片持ち回転曲げ疲労試験機(繰返し速度は3150rpm)を使用した(日本材料学会・疲労部門委員会・組織構造分科会にて開発されたもの)。実験は室温(20±2°C)、大気中で行い、応力はいずれも最小断面における公称曲げ応力とした。

破面観察にはSEM(走査型電子顕微鏡)を用いた。

Table 1 Chemical composition

Material	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SUJ2	1.01	0.23	0.36	0.01	0.01	0.06	0.04	1.45	0.02
SNCM439	0.41	0.24	0.66	0.018	0.016	0.13	1.71	0.75	0.21
SCM435	0.36	0.19	0.66	0.012	0.007	0.01	0.02	1.01	0.2

Table 2 Mechanical properties

Material	Hv	σ_B (MPa)	ϕ (%)
SUJ2	740	2300	0.4
SNCM439	610	2115	40.0
SCM435	320	991	67.3

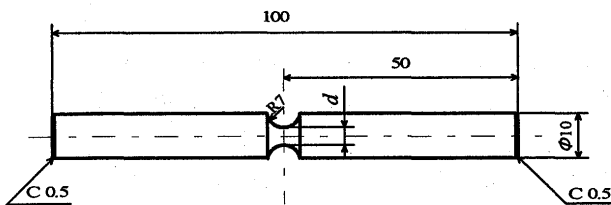


Fig. 1 Shape and dimensions of test piece

3. 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線

Fig. 2 にSUJ2のS-N曲線を示す。図中の○, ●はG材で、□, ■はEP材である。○, □は各々高応力で表面を起点として破断したもの、●, ■は低応力で内部の介在物を起点として破断したもの(フィッシュアイ型)である。

この結果によると、 $N=10^7$ 回付近までは加工層を持つG材が若干上方に位置する。 $N=10^7$ 回における見掛けの疲労限度(以後 σ_{wI} と呼ぶ)以下の応力においては内部の介在物を起点とする破断が現れる(後述Fig. 5(b)参照)。この内部起点型の現れる 10^7 回以上

の超長寿命域ではデータが混在し、今の段階では明確なことはいえない。しかし、超長寿命の疲労限度(以後 σ_{wII} と呼ぶ)は 2×10^8 回の時間強度で判断するとG材、EP材ともに900MPa程度となるようだ。S-N曲線全体の形態としては、表面起点型のS-N曲線と内部起点型のS-N曲線とが交わった状態と考えることができる^{(17), (18)}(σ_{wI} はG材で1300MPa、EP材で1200MPa前後となる)。

Fig. 3にSNCM439のS-N曲線を示す。図中の○, ●はG材で、□, ■はEP材である。○, □は各々高応力で表面を起点として破断したもの、●, ■は低応力で内部の介在物を起点として破断したものである。

この結果によると、低繰返し域では、SUJ2で現れたG材、EP材の寿命の差はほとんど認められないようだ。超長寿命域において、現段階ではまだまだデータが少ないが、高強度鋼特有の二段折れ曲がりS-N曲線の形態となっている^{(8), (18), (22)~(24)}。現在のデータから σ_{wI} はG材で約850MPa、EP材で約900MPa程度となるようである。 σ_{wII} はG材、EP材共に現段階では両材とも600~700MPaの応力範囲にあると思われる。

Fig. 4に上述の両材よりも硬さのかなり低いSCM435のS-N曲線を示す。図中の○はG材で、□はEP材である。○, □は各々表面を起点として破断したものである。

この結果によると、G材、EP材ともに $N=10^6$ 回付近で水平に折れ曲がり、超長寿命域においてはSUJ2やSNCM439のような二段折れ曲がりを示さなかった^{(9), (19), (21)}。 10^8 付近での σ_{wII} はG材で425MPa、EP材では390MPaとなった。この差は、前述の両材に比

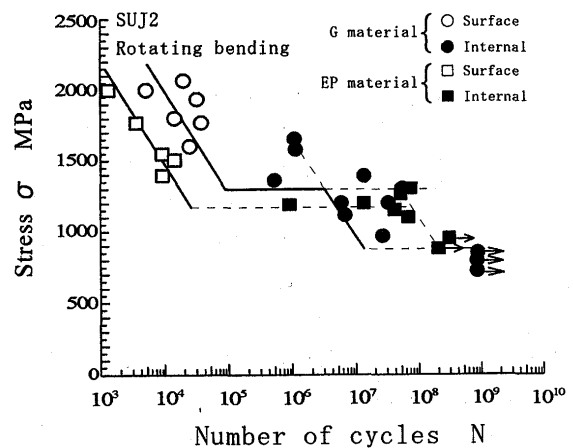


Fig. 2 S-N curve of SUJ2

べ若干小さいように思えるが、その理由は全て試験片が表面起点型の破壊形態であるためと考えられる。

以上3種の材料のS-N曲線において全体的にいえることは、まず緒言で述べたように、 $Hv \approx 500$ 以上の材料では、G材、EP材ともに二段折れ曲がりを示すが、 Hv がそれよりも低い値のSCM435ではG材、EP材ともに2段折れ曲がりは示さなかった。一方、 Hv の高い値のSUJ2とSNCM439のG材、EP材のS-N曲線の差異はSUJ2の表面起点破壊で両材に明らかな差が認められた。このことは、切欠き感度の影響と考えられる。

また、G材、EP材の σ_{w1} は若干の差はあるものの、現在のところバラツキの範囲と考えられる。

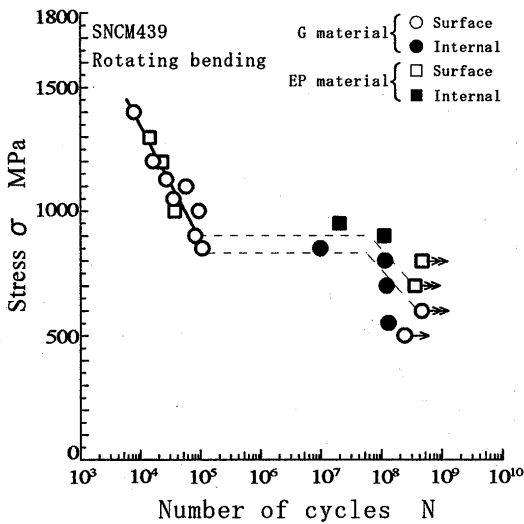


Fig. 3 S-N curve of SNCM439

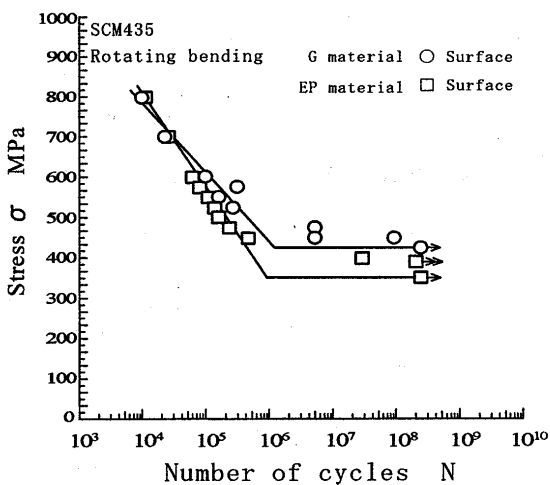


Fig. 4 S-N curve of SCM435

3.2 SUJ2 材の破面観察

二段折れ曲がりを示す材料の例として SUJ2 の破面写真を Fig. 5(a), (b) に示す。

Fig. 5(a)に低繰返し数域で破断した破面の一例を示す。これによると G 材では試験片表面におけるすべりまた研削傷を起点とし、EP 材では表面近傍の介在物を起点として破壊している事がわかる。

Fig. 5(b)に高繰返し数域で破断した破面の一例を示す。これを見ると表面より約 0.25mm 以内に存在する 5~25 μ m 程度の介在物が起点となり、フィッシュアイを形成した後、破壊が生じたことがわかる。このことより、内部起点型の破壊の場合はフィッシュアイ型の破面形態となることがわかる。

破壊の起点が表面の場合は、G 材では研削傷、EP 材では表面近傍の介在物である。超長寿命域では、EP 材のフィッシュアイは表面まで達しているが、G 材のフィッシュアイは明確に表面まで達した様子が見えがえない。このことは表面の粗さと加工層が影響しているものと思われる (Fig. 5(b))。すなわち、表面からもき裂が進展したと考えられるのが妥当であろう。

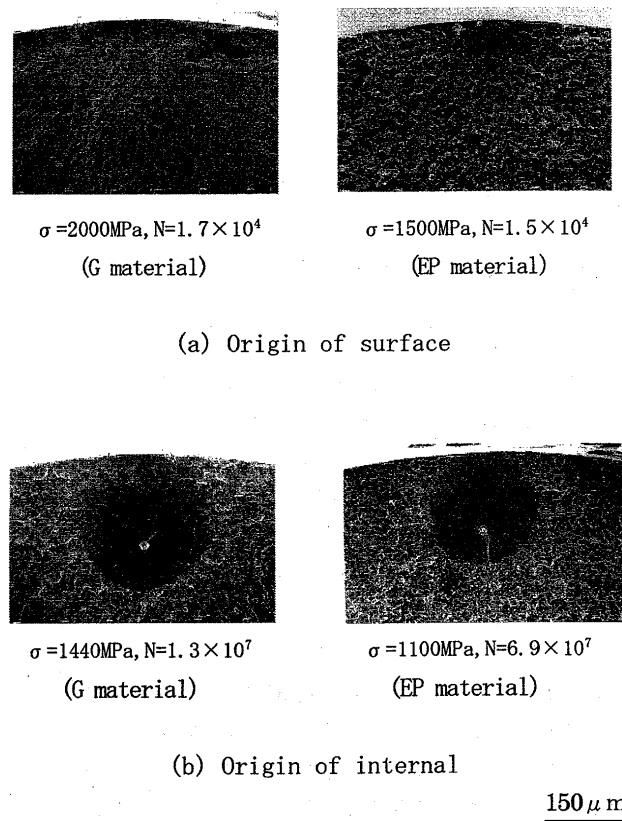


Fig. 5 Photographs of fracture surface

3.3 SUJ2 材におけるフィッシュアイの定量的検討

Fig. 6 は、内部破壊におけるフィッシュアイの特徴を示す寸法を定義したもので、上がG材で、下がEP材を示している。それぞれフィッシュアイの縦の直径を $2b$ 、横の直径を $2a$ 、介在物までの深さを d_{inc} とする。そして、G材においては加工層の厚さを d_1 、フィッシュアイの半径を d_2 とする。

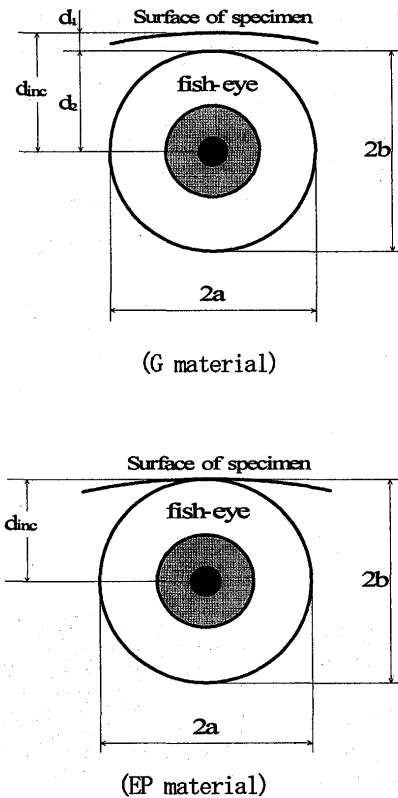


Fig. 6 Definition of notation of Fish-eye

Fig. 7 は、フィッシュアイ形状を示すものとして、 $2a/2b$ と応力との関係を示したものである。 $2a/2b$ の値は、G材、EP材とも応力の大きさにはほとんど関係なく、ほぼ 1.0 となっている。よってフィッシュアイは、ほぼ真円であることを意味する⁽⁴⁾

Fig. 8 は d_{inc} と $2b$ の関係を見たものである。ほぼ 1:1 の関係を示している。このことから、フィッシュアイの大きさは d_{inc} に依存していることがわかる。

Fig. 9 では、縦軸に d_{inc} と $2b$ の比、横軸に d_{inc} の関係を示したものである。このグラフを見ると、緩やかな右上がりの傾向を示している。これは、 d_{inc} が深くなると介在物の中心はフィッシュアイの円の中心よりも下にくるといえる。このグラフを見てわかるように、どのフィッシュアイの介在物も中心に来ているとはいえない。

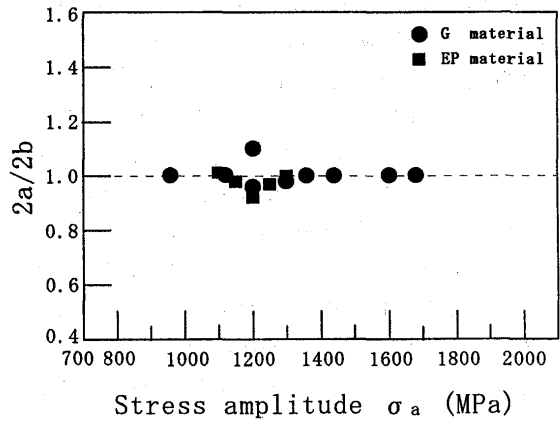


Fig. 7 SUJ2 $2a/2b-\sigma_a$

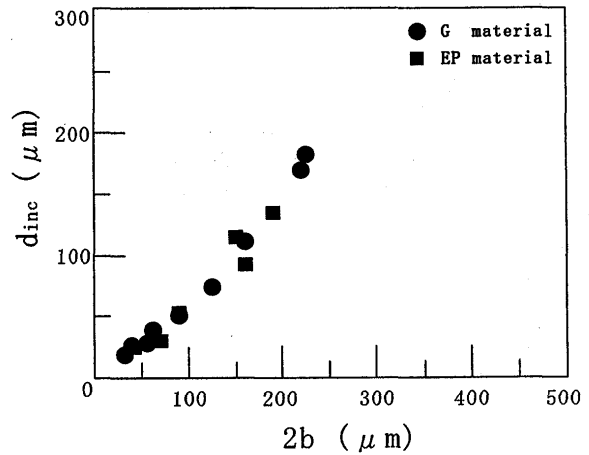


Fig. 8 SUJ2 $d_{inc}-2b$

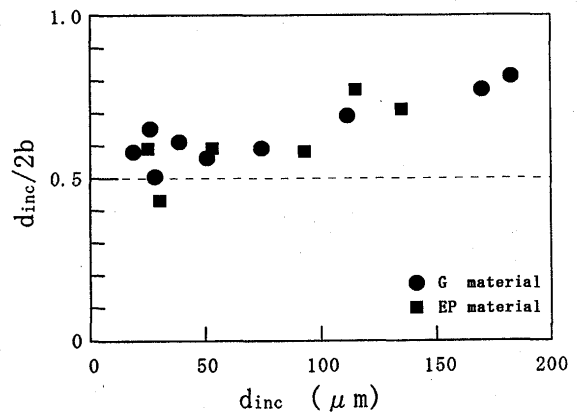


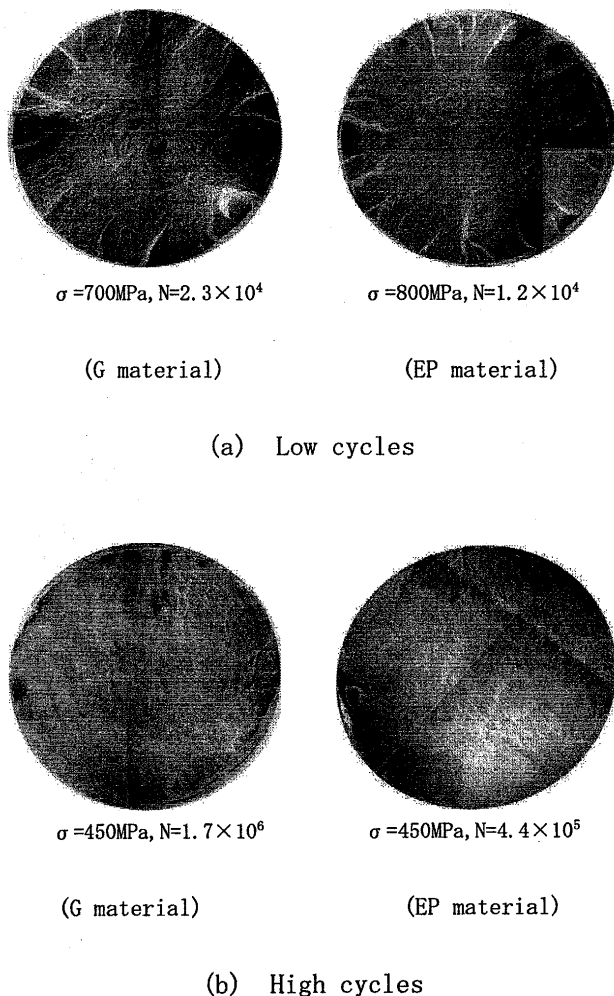
Fig. 9 SUJ2 $d_{inc}/2b-d_{inc}$

3.4 SCM435 材の巨視的破面

Fig. 10(a), (b)は二段折れ曲がりを示さなかった材料 SCM435 の巨視的な破面写真の一例である。

Fig. 10(a)は低繰り返し数域での破面の一例であり、これを見ると、G 材, EP 材とも試験片表面から複数のき裂が発生し、ラチェットマークと呼ばれる模様を呈して破断にいたっていることがわかる。したがって、最終破面は試験片の中央となる。また、破面は全体的に凹凸である。

Fig. 10(b)は高繰り返し数域で破断した両材の一例を示す。これを見ると、表面の最も弱い所を起点としてき裂が伝ばして破断にいたっていることがわかる。そのときの破面は低繰り返し数で破断した時の破面と比べると滑らかな面を示す。



$\sigma = 700\text{MPa}, N = 2.3 \times 10^4$

(G material)

$\sigma = 800\text{MPa}, N = 1.2 \times 10^4$

(EP material)

(a) Low cycles

$\sigma = 450\text{MPa}, N = 1.7 \times 10^6$

(G material)

$\sigma = 450\text{MPa}, N = 4.4 \times 10^5$

(EP material)

(b) High cycles

1mm

Fig. 10 Photographs of fracture surface

4. 結 言

- (1) 各種材料における超長寿命の S-N 曲線の特徴は、硬さの高い SUJ2 材と SNCM439 材の両材共に典型的な二段折れ曲がり現象が認められた。なお両材の主な違いは、見掛けの疲労限度より高い応力における寿命において、SUJ2 材の G 材と EP 材では差が現れるが、SNCM439 材の場合ほとんどこの差が認められず、バラツキの範囲であることである。

SCM435 の S-N 曲線の特徴は、G 材, EP 材とも二段折れ曲がりを示さず、一般の鋼と同様に折点は一回しか現れなかった。

- (2) SUJ2 材の低繰り返し数域での破面の特徴は、G 材では試験片表面における研削傷やすべりが破壊の起点となっている。EP 材では表面の介在物が主因である。高繰り返し数域では両材とも内部の介在物(フィッシュアイ型)であることが分かった。しかし、G 材においてはフィッシュアイが表面まで完全に達していないことも分かった。
- (3) SUJ2 材のフィッシュアイの形状に関して、 $2a/2b$ の値は応力に関係なくほぼ 1.0 になる。このことからフィッシュアイは真円に近い形状であるということがいえる。
- (4) 介在物起点の深さ d_{inc} と $2b$ の関係は、ほぼ 1:1 の関係を示していた。このことから、フィッシュアイの大きさは d_{inc} に依存していることがいえる。
- (5) $d_{inc}/2b$ と d_{inc} の関係は、緩やかな右上がりの傾向を示していた。これは、 d_{inc} が深くなると介在物の中心はフィッシュアイの円の中心よりも下にくることがといえる。
- (6) SCM435 の破面の特徴は低繰り返し数域では G 材, EP 材共にラチェットマークが現れる。高繰り返し数域で起こった破断の起点は、G 材, EP 材共に試験片表面におけるすべりが主である。破断面は滑らかな面を示す。

おわりに、試験片の表面粗さ測定にご協力いただいた井上研究室の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) T. Naito · H. Ueda · M. Kikuchi, Metal Trans, 15A, p. 1431 (1984)
- (2) 浅見, 熱処理, 25, p. 123 (1985)
- (3) 浅見, 杉山, 熱処理, 25, p. 147 (1985)
- (4) 増田·西島·田中, 日本機械学会論文集, 52A, p. 847 (1986)
- (5) 外山·菅田·宮原, 熱処理, 32, p. 315 (1992)
- (6) 浅見·弘永, 材料, 43, p. 12 (1994)
- (7) 金澤·西島, 材料, 46, p. 1396 (1997)
- (8) 松村·吉田·越智·政木, 第 26 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 137 (2002)
- (9) 菅田·城野·植松·大瀬戸·岡嶋, 第 26 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 169 (2002)
- (10) 酒井, (J. Soc. Mat. Sei. Japan), Vol. 53, No5 p. 586 (2004)
- (11) 村上敬宜·野本·植田·村上保夫·大堀, 材料, 48, p. 1112 (1999)
- (12) 塩澤·魯·石原, 材料, 48, p. 1095 (1999)
- (13) K. Tokaji·H. -N. Ko·M. Nakajima·H. Itoga, Mater. Sci. Eng., A, 345, p. 197 (2003)
- (14) 緒方·藤崎·田中, 九州産業大学工学部研究報告 第 40 号, p. 48 (2003)
- (15) 緒方·吉房·中橋·田中, 九州産業大学工学部研究報告 第 41 号, p. 37 (2004)
- (16) 中橋·吉房·石橋·田中·田中, 九州産業大学工学部研究報告 第 42 号, p. 27 (2005)
- (17) 塩澤·魯, 第 25 回疲労シンポジウム講演論文集 p. 207 (2000)
- (18) 三角·池本·大久保, 第 25 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 187 (2000)
- (19) 酒井達雄·村瀬拓朗·内山綾子, 第 54 期学術講演会講演論文集, p. 23 (2005)
- (20) 松村·吉田·越智·政木, 第 25 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 219 (2001)
- (21) 村山大志, 平成 14 年度徳島大学修士論文講演前刷集 (2002)
- (22) 長谷川·服部·渡邊, 第 25 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 211 (2000)
- (23) 猿木勝司·八田一成·北條浩, 日本材料強度学会誌 Vol. 39, No4, p. 77 (2005)
- (24) 三角·大久保·中山, 2006 年次大会講演論文集 Vol. 1, p. 469 (2006)