

環状切欠き付 SUS403 材の高温回転曲げ疲労特性*

森本精洋*¹, 小池雅彦*²High Temperature Rotating Bending Fatigue Characteristic
for SUS403 Notched Round BarAkihiro MORIMOTO*³ and Masahiko KOIKE*³ Department of Mechanical Engineering, Kinki University,
3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka-shi, Osaka, 577-8502 Japan

In order to study the notch effect on rotating bending fatigue properties for SUS403 stainless steel, the rotating bending fatigue tests were carried out at room temperature, 300°C and 600°C with a frequency of 1200 cycles/min. The temperature dependence of fatigue limit and the estimation method of fatigue notch factor were investigated. The relationships between the fatigue limit σ_w of smooth specimen and the tensile strength σ_B and also σ_w and the Vickers hardness HV were obtained as $\sigma_w = 0.58\sigma_B = 1.63HV$ at every temperature. Furthermore the relationship between the parameter $(\beta-1)\sqrt{\sigma_0/\sigma_B}$ and $Kt-1$ was proposed to estimate the fatigue notch factor, where σ_0 is the tensile strength at room temperature, β is the fatigue notch factor at a certain temperature and Kt is the stress concentration factor. Then fatigue notch sensitivity factor η was obtained as $\eta = 0.056\sqrt{\sigma_B/Kt}$. Using these results, the estimated fatigue limit was satisfactory and the predicted accuracy was $\pm 10\%$.

Key Words: Rotating Bending Fatigue, Fatigue Limit, Notch, Fatigue Notch Factor

1. 結 言

ステンレス鋼は耐熱性、耐食性にすぐれているため、各種化学工業や原子炉関係に関わる高温での構造部材に使用されることが多い。550°Cまではマルテンサイト系又はフェライト系ステンレス鋼が、それ以上の温度ではオーステナイト系ステンレス鋼が使用されることが多い。高温では疲労特性は室温とは異なり、10⁷回の繰返し数においても疲労限度が認められない場合や⁽¹⁾、切欠き材についても、切欠き係数が温度に依存するなどが報告されている⁽²⁾。

また、切欠き材の疲労寿命の評価には、時間強度の部分では疲労強度減少係数と弾性応力集中係数、弾塑性応力集中係数ならびに弾塑性ひずみ集中係数との関係について報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。疲労限度の評価には、切欠き感度係数⁽⁶⁾や切欠き底の最大応力と応力勾配による方法など⁽⁷⁾⁽⁸⁾が検討されている。しかしこれらの研究のなかで、切欠き係数の温度依存性について検討した研究はほとんど認められない。

本論文はマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 の平滑材および切欠き材を用い、高温回転曲げ疲労試験

を行い、疲労限度および切欠き係数の温度依存性などについて検討した。

2 実験方法

2-1 供試材料 材料はマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 材で 980°Cより焼入れ後 730°Cで焼もどし処理をした。供試材料の組織写真を図1に、化学成分、機械的性質を表1、2に示す。

2-2 試験片形状 前述した引張試験や疲労試験に用いた試験片形状を図2に示す。切欠き付試験片の応力集中係数は $Kt=2.6, 4.5$ であり、ポアソン比を 0.3 とし、深い環状切欠きを持つ軸が曲げモーメントを受ける場合⁽⁹⁾について求めた。なお、いずれの試験片も圧延方向が試験片軸方向となるように採取した。

2-3 高温引張試験 引張試験は標点距離 30mm で 0.2%耐力までは 0.3%/分、それ以降は約 7.5%/分のひずみ速度で試験した。

2-4 高温回転曲げ疲労試験 疲労試験は電気炉を有する小野式回転曲げ疲労試験機で行った。試験温度は室温、300°C、600°Cの三温度条件で、1200回/分の繰返し速度で試験した。疲労試験では

* 原稿受付 2007年11月1日。

*¹ 正員、近畿大学理工学部(☎577-8502 東大阪市小若江3-4-1)。*² (株)アピスト(☎532-0011 大阪市淀川区西中島5-2-5)。

E-mail: morimoto@mech.kindai.ac.jp

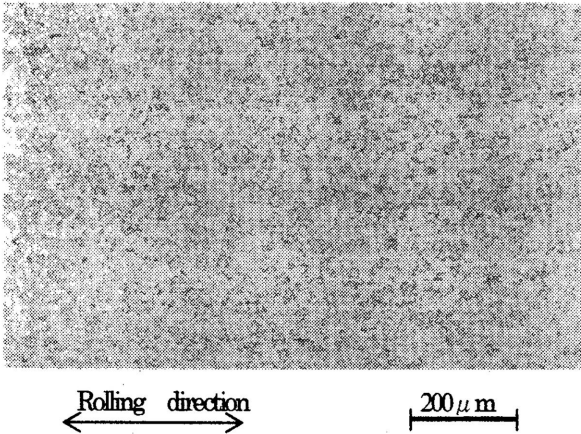


Fig.1 Photograph of microstructure

Table1 Chemical compositions of material (Wt,%)

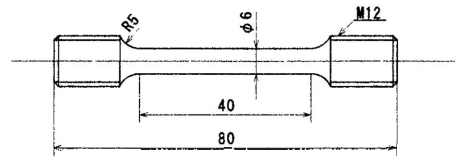
Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS403	0.13	0.34	0.54	0.031	0.012	0.37	11.89

Table2 Mechanical properties of material

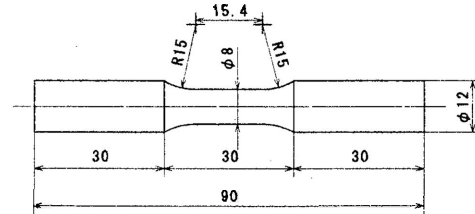
Item	Temperature(°C)	SUS403
Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	R.T.	268
	300	232
	600	112
Tensile strength σ_B (MPa)	R.T.	538
	300	444
	600	200
True tensile strength σ_T (MPa)	R.T.	1160
	300	951
	600	430
Elongation δ (%)	R.T.	35
	300	31
	600	61
Reduction of area ψ (%)	R.T.	73
	300	73
	600	89
Vickers hardness HV	R.T.	174
	300	142
	600	53

時間強度部分の応力は上下の応力比が 1.03~1.1 となるように応力を低下させ疲労試験を行った。疲労限度は疲労試験を行った応力で破壊しなかった時の最大応力としたが、 10^8 回で破壊しなかった場合は S-N 曲線より 10^8 回での応力振幅値を疲労限度とした。したがって本実験では疲労限度は疲労き裂伝ば限界応力となっている。

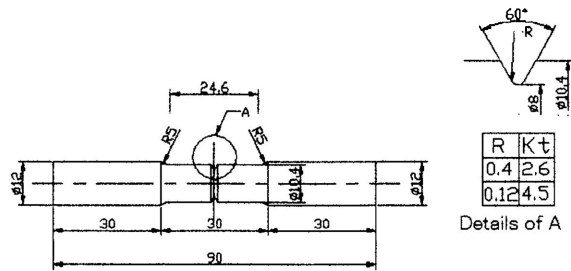
3. 試験結果および考察



(a) Specimen of tensile test



(b) Specimen of rotating bending fatigue test (Smooth specimen)



(c) Specimen of rotating bending fatigue test (Notched specimen)

Fig.2 Configuration of specimens

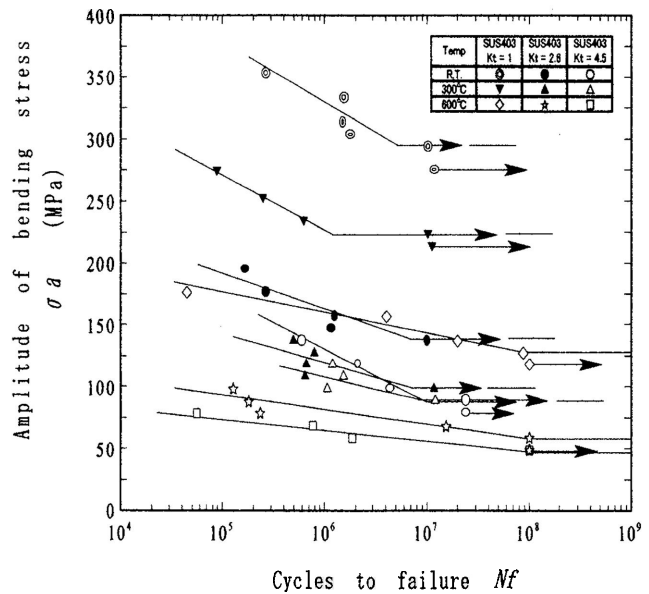


Fig.3 Result of rotating bending fatigue

3.1 疲労試験結果 平滑材および切欠き材の応力振幅 σ_a と破壊までの繰返し数 N_f の関係を図 3 に示す。これより 300°C までは切欠の有無に関わら

ず疲労限度の現れる回数は $10^6 \sim 10^7$ 回であるが、 600°C では 10^6 回でも明瞭な疲労限度は認められなかった。

3・2 疲労限度の温度依存性 表 3 に疲労試験により求めた各温度での疲労限度のまとめを示す。図 4 にはこれらの疲労限度の温度依存性を示す。これより応力集中係数が増すほど、疲労限度の温度依存性は減少することおよび低い温度ほど疲労限度の応力集中係数依存性は大きくなっている。

3・3 平滑材の疲労限度と引張強さおよび硬度との関係 平滑材の疲労限度と引張強さおよび硬度との関係を図 5, 図 6 に示す。SUS403 材の平滑材の室温から 600°C の温度において、疲労限度 σ_w と引張強さ σ_B ならびにビッカース硬度 HV の関係式は式 (1), (2) のように評価される。

$$\sigma_w = 0.58 \sigma_B \quad (1)$$

$$\sigma_w = 1.63 HV \quad (2)$$

3・4 切欠き係数の温度依存性 表 4 および図 7 に応力集中係数 Kt と切欠き係数 β の関係を示す。これより同じ応力集中係数で比較すると温度が上昇するに従い、切欠き係数は低下する傾向があり、応力集中係数が高くなるとその傾向は大きくなっている。以下では切欠き係数 β の温度依存性について検討する。

Table3 Summary of test result

Item	Materials	Kt	R.T.	300°C	600°C
Fatigue limit σ_w (MPa)	SUS403	1	294	224	126
		2.6	137	97	59
		4.5	87	88	49

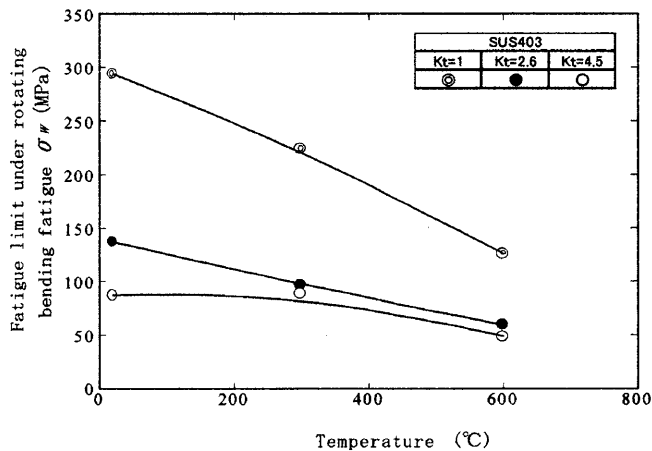


Fig.4 Temperature dependence of fatigue limit

日本機械学会で切欠き係数計算図表¹⁰⁾での切欠き係数の実験式は式 (3) で示されている。

$$\beta = 1 + \xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \quad (3)$$

ξ_1 は引張強さに関する係数であり $\xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5$ は試験片の形状に依存する係数である。ここで σ_B を引張強さとし、 ξ_1 を $\xi_1 = C \sqrt{\sigma_B}$ と仮定すると (一般に切欠き係数計算図表では、 $\xi_1 = 0.57 + 0.00057 \sigma_B$ で表されるが、 $150 \text{MPa} \leq \sigma_B \leq 750 \text{MPa}$ では $\pm 20\%$ の精度で $\xi_1 = 0.043 \sqrt{\sigma_B}$ となる。),

$$\beta = 1 + C \sqrt{\sigma_B} \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \quad (4)$$

となる。ここで室温での β を β_0 、引張強さ σ_B を σ_0 とすれば、室温では、

$$\frac{\beta_0 - 1}{\sqrt{\sigma_0}} = C \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \quad (5)$$

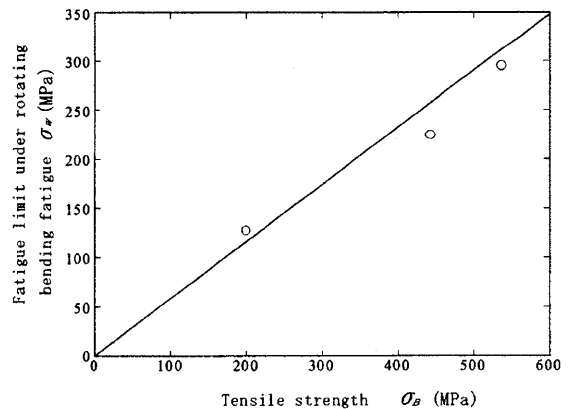


Fig.5 Relationship between fatigue limit under rotating bending fatigue and tensile strength

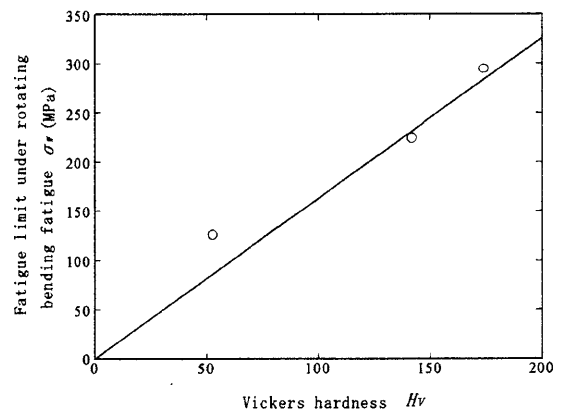


Fig.6 Relationship between fatigue limit under rotating bending fatigue and Vickers hardness

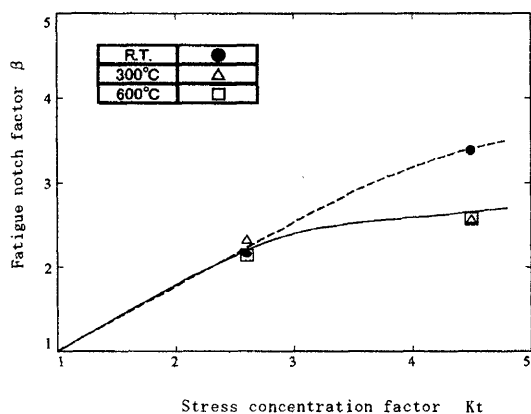


Fig.7 Relationship between fatigue notch factor and stress concentration factor

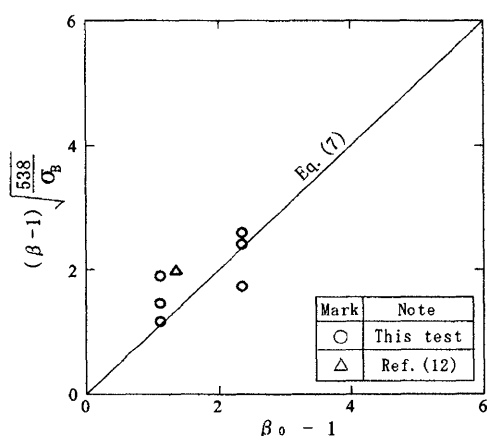


Fig.8 Relationship between $(\beta-1)\sqrt{538/\sigma_B}$ and (β_0-1)

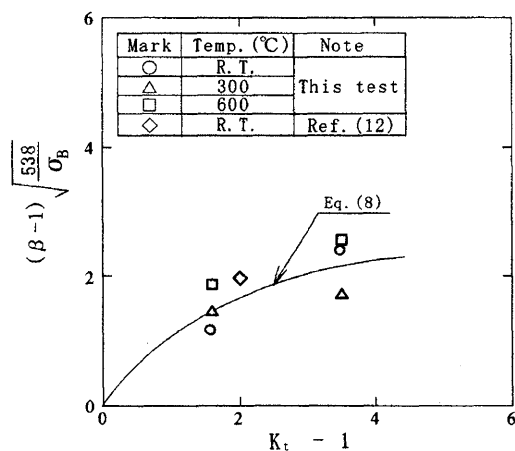


Fig.9 Relationship between $(\beta-1)\sqrt{538/\sigma_B}$ and (K_t-1)

Table 4 Relationship between stress concentration factor and fatigue notch factor

Item	temp. (°C)	Kt = 2.6	Kt = 4.5
		β	R.T.
	300°C	2.31	2.55
	600°C	2.14	2.57

ある温度では,

$$\frac{\beta-1}{\sqrt{\sigma_B}} = C \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \quad (6)$$

式(5), (6)より

$$\frac{\beta-1}{\sqrt{\sigma_B}} \sqrt{\sigma_0} = \beta_0 - 1 \quad (7)$$

となる.

図 8 に式 (7) を検証するため, 左辺を縦軸に, 右辺を横軸に整理した. これより若干ばらつきがあるが式 (7) が成立するものと考えられる.

式 (7) の左辺はある温度での切欠き係数を引張強さで補正したものであり, 右辺は室温での切欠き係数である. したがって右辺は応力集中係数 K_t と関係があるものと推察される. このためパラメータ $(\beta-1)\sqrt{\sigma_0/\sigma_B} = (\beta-1)\sqrt{538/\sigma_B}$ と (K_t-1) の関係を図 9 に示す. これより本パラメータで切欠き係数を整理すると, 環状切欠きではあるが温度によらず統一的に切欠き係数を式 (8) のように評価できることが分る.

$$(\beta-1)\sqrt{\frac{538}{\sigma_B}} = 1.3 \frac{K_t - 1}{\sqrt{K_t}} \quad (8)$$

式 (8) より R.E. Peterson⁽⁹⁾による切欠き感度係数 $\eta = (\beta-1)/(K_t-1)$ は式 (9) のように導かれるので, この式は切欠き感度係数の材料強度と応力集中係数依存性を表現するものと分る.

$$\eta = \frac{\beta-1}{K_t-1} = 0.056 \sqrt{\frac{\sigma_B}{K_t}} \quad (9)$$

図 10 に式 (9) を用いて求めた切欠き感度係数 η と切欠き底半径 ρ の関係を示す. 600°C で切欠き底半径が大きいところで実験値との差が大きい部分があるが, 切欠き感度係数の温度依存性 (材料強度依存性) を良好に評価していることが分る. なお式 (8) (9) は前

述したように $150\text{MPa} \leq \sigma_B \leq 750\text{MPa}$ であり、また従来の知見⁽¹¹⁾より $\beta \leq Kt$ が適用範囲と考える。

3・5 切欠き材の疲労限度の温度依存性と評価方法
材料の引張強さ σ_B と応力集中係数 Kt が分っていれば、式 (1) より平滑材の疲労限度 σ_w が求められる。また式 (8) を用いると切欠き係数 β が求まるので、切欠き材の疲労限度 $\sigma_{wk} = \sigma_w / \beta$ が求められる。図 11 に実測値と推定値を示すが、疲労限度の推定精度は $\pm 10\%$ 程度であることが分る。

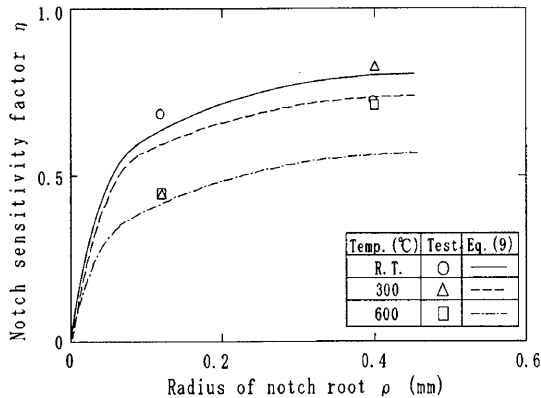


Fig.10 Relationship between notch sensitivity factor and radius of notch root

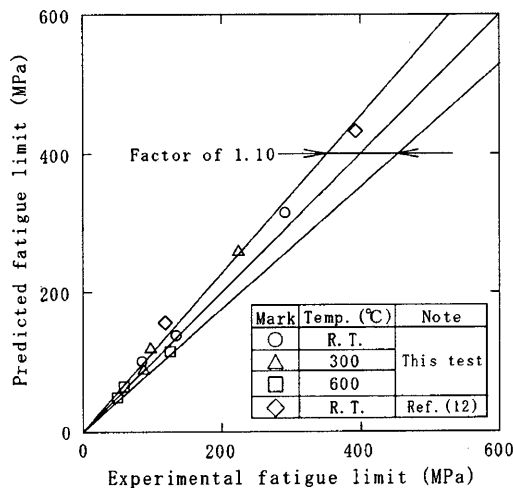


Fig.11 Relationship between experimental fatigue limit and predicted fatigue limit

4. 結 言

マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を用い室温、 300°C 、 600°C で応力集中係数 Kt を 1, 2.6, 4.5, と変化させた回転曲げ疲労試験を行なった。これらの結果を用い、疲労限度や切欠き係数の温度依存性の評価方法について検討した。得られた結果を以下に示す。
(1) 切欠きの有無にかかわらず 300°C までは明瞭な疲労限度は $10^6 \sim 10^7$ 回で認められるが、 600°C では 10^6 回においても明瞭な疲労限度は認められなかった。
(2) 平滑材の疲労限度 σ_w と引張強さ σ_B およびビッカース硬度 HV の関係は以下のように評価される。

$$\sigma_w = 0.58 \sigma_B = 1.63 HV$$

(3) 同じ応力集中係数 Kt で比較すると高温になるほど切欠き係数 β は低下する傾向にある。環状切欠きではあるがこれらを統一的に表現する評価式を以下に示す。

$$(\beta - 1) \sqrt{\frac{538}{\sigma_B}} = 1.3 \frac{K_t - 1}{\sqrt{K_t}}$$

(4) 上記評価式より切欠き感度係数 η は以下のように表現される。

$$\eta = 0.056 \sqrt{\frac{\sigma_B}{K_t}}$$

(5) 前項の (2) ~ (3) 項を用い疲労限度を推定した結果は良好で、その推定精度は $\pm 10\%$ であった。

参考文献

- (1) Kanazawa, K. et al, High-Temperature, Rotating Bending Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steels SUS304B and 316B, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.22, No.234(1973), pp.257-264.
- (2) Sunamoto, D. et al, Effect of Notches on the Creep-Rupture Strength and Fatigue Strength at High Temperature, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.12, No.114(1963), pp.123-129.
- (3) Topper, T.H. et al, Nuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens, *Journal of Materials*, Vol.4, No.1(1969), pp.200-209.
- (4) Koe, S. et al, Fatigue Life Estimation of Notched Plates Based on Elasto-Plastic Analysis, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.29, No.300(1978), pp.847-852.
- (5) Utsunomiya, T. et al, Fatigue Strength Reduction Factor of Crack Initiation Life Basis for Austenitic Stainless Steel, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.48, No.9(1999), pp.1035-1040.

- (6) Kawamoto, M., Researches on the Notch Effect of Materials, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.17, No.61(1951), pp.123-127.
 - (7) Nishitani, H. et al., Notch Sensitivity of Normalizing and Quenching S50C and Non-Propagating Microcrack of Smooth Specimen, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.40, No.329(1974), pp.41-52.
 - (8) Ito, Y. et al., A Method for Estimating the Fatigue Endurance Limit of Notched Specimens, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, Vol.66, No.641(2000), pp.98-103.
 - (9) Nishida, M., *Stress concentration in Japanese*, (1973), p.608, Monkita-Shuppan.
 - (10) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *Design Materials for Fatigue Strength of Metals 1 in Japanese*, (1977), pp.103-106, The Japan Society of Mechanical Engineers.
 - (11) The Society of Materials Science, Japan ed., *Fracture and Strength of Materials in Japanese*, (1993), p.100, The Society of Materials Science, Japan.
 - (12) The Society of Materials Science, Japan ed., *Data Book on Fatigue Strength of Metallic Materials*, Vol.4, (1992), pp.279-283, The Society of Materials Science, Japan.
-