AC4CH アルミニウム合金の通常疲労 およびフレットング疲労特性

西田 友久* ・ 水谷淳之介** ・ 武藤 睦治***
好井 健司**** ・ 海老原 治**** ・ 宮下 悟****

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 10 (1999), pp. 493-498

Plain fatigue and fretting fatigue strengths of AC4CH aluminum alloy

Tomohisa NISHIDA*, Junnosuke MIZUTANI**, Yoshiharu MUTOH***
Kenji YOSHII****, Osamu EBIHARA**** and Satoru MIYASHITA****

Plain fatigue, fatigue crack growth and fretting fatigue tests were carried out using cast Al-Si aluminum alloy JIS AC4CH-T6 as well as the forged aluminum alloy JIS 6061-T6. Plain fatigue strength of the cast aluminum alloy was lower than that of the forged alloy. The lower fatigue strength was attributed to casting defects such as pores in the cast aluminum alloy, which enhanced fatigue crack formation. On the other hand, fretting fatigue strength of the cast aluminum alloy was almost equal to that of the forged alloy. No difference of both tangential force coefficient in fretting fatigue and fatigue crack growth rates were observed between the two materials. The prediction of fretting fatigue lives for both materials were made on the basis of the fracture mechanics approach. The predicted lives were in good agreement with the experimental results.

(Received March 17, 1999)

Keywords: cast aluminum alloy, forged aluminum alloy, plain fatigue, fretting fatigue, tangential force

1. 緒 言

アルミニウム合金は加工法の相違によって次の二つに大別される。第1は、溶塊から圧延、押出し、鍛造などの塑性加工を行って、板、形材、棒などの加工製品にするアルミニウム合金、いわゆる展伸用アルミニウム合金であり、第2は、鋳型に鋳造して最終形状に近い鋳物やダイカストを得る鋳造用アルミニウム合金である。鋳造用アルミニウム合金はこれまで、鋳造の際に生じる巣などの内部欠陥のために、強度部材としての使用は限られていた。しかし、近年では軽量化に加え、低コスト化、生産性の向上が強く望まれるため、鋳造用アルミニウム合金が注目されてきている。近年の鋳造技術の発展により、製品の鋳造歩留り（製品質量/鋳造質量）が非常に高く、複雑な形状の鋳造も可能で、安定した品質が得られるようになってきた。この方法による製品は航空機用エンジン部品、自動車用部品、油圧部品などに広く採用されている。これらの部品は、多くの部材を組合せて製作されており、部材間接合部では、使用中の負荷の繰返しに伴い微小相対すべりの繰返し、すなわちフレットングを生じる場合も多い。このフレットング作用は表面の摩耗損傷とともに疲労強度の顕著な低下をもたらすことが知られている^{1),2)}。こ

のため、部材単体の静的強度や疲労強度のみならず、フレットング疲労強度が部品の品質保証および損傷防止にとって考慮すべき重要な要因となっている。

これまでのアルミニウム合金のフレットング疲労強度に関する研究^{3)~5)}は航空機部材として用いられる展伸用アルミニウム合金を対象としたものがほとんどであり、鋳造用アルミニウム合金に関する検討はなされていないのが現状である。

そこで本研究では、鋳造用アルミニウム合金の通常疲労およびフレットング疲労試験を行い、走査電子顕微鏡 (SEM) による微視き裂の発生やき裂伝ば挙動を観察し、鋳造用アルミニウム合金におけるフレットング疲労の基本的特性を調べた。これらの結果を、同様の試験を行った鍛造 (展伸) 用アルミニウム合金の結果と比較検討し、両者の特性の相違を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 供試材

試験片用の供試材は、自動車用ホイール材としてよく使用される鋳造用アルミニウム合金 (JIS AC4CH-T6) であり、比較のために鍛造用アルミニウム合金 (JIS 6061-T6) も用

* 沼津工業高等専門学校機械工学科 (〒410-8501 静岡県沼津市大岡3600)。Department of Mechanical Engineering, Numazu National College of Technology (3600. Ooka, Numazu-shi, Shizuoka 410-8501).

** 富山商船高等専門学校 (新湊市)。Toyama National College of Maritime Technology (Shinminato-shi, Toyama).

*** 長岡技術科学大学 (長岡市)。Nagaoka University of Technology (Nagaoka-shi, Niigata).

**** トピー工業㈱ (豊橋市)。Topy Industries, Ltd. (Toyohashi-shi, Aichi).

Table 1 Chemical composition (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
AC4CH-T6	6.6	0.12	0.03	0.02	0.36	0.03	0.03	0.13
6061-T6	0.57	0.35	0.29	0.04	0.87	0.18	0.03	0.02

	C	Mn	Si	P	S
FCD500	3.62	2.23	0.30	0.031	0.009

Table 2 Mechanical properties

	Hardness HV (GPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Elongation ϕ (%)	Young's modulus E (GPa)
AC4CH-T6	1.0	218	149	3.0	78
6061-T6	1.2	354	336	11.5	76
FCD500	1.7	—	—	—	—

意した。両材料は、合金組成や強度などは異なるが、それぞれ casting および加工性も良好であることから実際のホイール材として多く用いられており、両材料の比較は重要である。接触片用の供試材としては、ホイールの取付け部に使用されている球状黒鉛鋳鉄 (JIS FCD500) を用いた。それらの化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。

2.2 繰返し応力-ひずみ特性試験

供試材の繰返し応力-ひずみ関係を振幅変動法⁶⁾により求めた。試験は、試験片ゲージ部に軸方向ひずみ検出装置を取付け、ひずみ制御下で漸増漸減するひずみ波形を、ひずみ速度一定に保ちながら応力-ひずみ曲線が定常状態に達するまで繰返し負荷した。なお、最大ひずみ振幅は casting アルミニウム合金で 0.8%，鍛造用アルミニウム合金で 1.2% で、ひずみ速度はいずれも 0.1%/s として行った。

2.3 通常疲労試験およびフレットング疲労試験

Fig. 1 に通常疲労試験片、フレットング疲労試験片および接触片の形状・寸法を示す。試験片はゲージ部を機械加工後、エメリー紙で粗粒のものから順次研磨した。なお、最終仕上げは 1500 番紙で研磨方向は荷重方向となるよう配慮した。フレットングは接触片一対をブルーベリングにより疲労試験片板状部に押付けて起こさせ、押付け面圧は 50 MPa 一定となるように調節した。試験中における接触片と試験片間の接線力は、接触片中央部裏面に貼付したひずみゲージにより測定した。

試験は容量 98 kN の油圧サーボ式疲労試験機を用い、荷重波形として引張圧縮 ($R=-1$) の正弦波、繰返し速度 10~20 Hz の荷重制御の条件下で行った。

2.4 疲労き裂伝ば試験

疲労き裂伝ば試験片の形状・寸法を Fig. 2 に示す。中央に長さ 2 mm のスリットを放電加工により導入した。試験は油圧サーボ式疲労試験機を用い、荷重波形として引張圧縮 ($R=-1$) の正弦波、繰返し速度 10~20 Hz の荷重制御の条件下で行った。き裂長さは精度 1/100 mm の読取り顕微鏡を

Fig. 1 Fatigue specimens.

Fig. 2 Fatigue crack propagation specimen.

用いて測定した。応力拡大係数範囲 ΔK の算出には次式を用いた⁷⁾。

$$\Delta K = \sigma_a (\pi a)^{0.5} F(a/W) \quad (1)$$

$\xi = 2a/W$ とすると、

$$F(\xi) = (1 - 0.025\xi^2 + 0.06\xi^4) \cdot \{s(\pi\xi/2)\}^{0.5}$$

ここで、 σ_a : 応力振幅 (MPa) ($\sigma_a = \Delta P / WB$)

a : き裂長さ (m)

W : 板幅 (m)

B : 板厚 (m)

ΔP : 荷重振幅 (N)

ΔK : 応力拡大係数範囲 (MPa $\sqrt{m}$)

である。下限界値 ΔK_{th} は荷重漸減法により求めた⁸⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 繰返し応力-ひずみ特性試験結果

振幅変動法により求めた、繰返し応力-ひずみ曲線を Fig. 3 に示す。図中には静的応力-ひずみ曲線も示している。図からもわかるように、casting アルミニウム合金においては繰

Fig. 3 Cyclic stress-strain curve.

Fig. 4 S-N curve.

返し硬化挙動を示すが、鍛造用アルミニウム合金においては繰返し硬化・軟化挙動は顕著でない。このような軟化・硬化に関する挙動は金属材料について一般的によく知られた傾向と一致している⁹⁾。得られた繰返し応力-ひずみ曲線を次式を仮定し、当てはめてみる。

$$\sigma_a = \sigma_{yc} (\epsilon_{pa} / 0.002)^n \quad (2)$$

ここで、 σ_a , ϵ_{pa} はそれぞれ応力振幅、塑性ひずみ振幅であり、 σ_{yc} は繰返し降伏応力、 n は繰返し硬化指数である。試験結果に基づき式(2)中の σ_{yc} および n の値を求めると、鋳造用アルミニウム合金および鍛造用アルミニウム合金でそれぞれ 336 MPa, 212 MPa および 0.0948, 0.0143 であった。

3.2 通常疲労特性

Fig. 4 に通常疲労の S-N 曲線を示す。図から、鋳造用アルミニウム合金の疲労強度は鍛造用アルミニウム合金のそれに比べ、低いことがわかる。本研究において、疲労限度はいずれの場合も 10^7 回の疲労強度と定義し、鋳造用アルミニウム合金が 80 MPa、鍛造用アルミニウム合金が 140 MPa であった。これまで鋳造用アルミニウム合金の通常疲労強度に関する報告は少ないが、回転曲げによる試験で、疲労限度が 80 MPa¹⁰⁾ および 115 MPa¹¹⁾ 程度という報告がある。一方、鍛造用アルミニウム合金の引張圧縮の疲労限度は約 110 MPa¹²⁾ で今回の試験結果の方が高い値を示した。これは、鍛造条件等が異なり、両材の機械的性質が異なっていること

Fig. 5 Crack initiation region for forged and cast aluminum alloys under the plain fatigue.

に起因していると考えられる。

それぞれの疲労き裂発生核を走査電子顕微鏡 (SEM) で観察したところ、鍛造用アルミニウム合金の場合、Fig. 5(a) に示したような表面からき裂が発生・伝ばしたと考えられるのに対して、鋳造用アルミニウム合金の疲労き裂は、Fig. 5(b) に示したような巣などの鋳造欠陥より発生していた。破面から測定した鋳造用アルミニウム合金の通常疲労におけるき裂発生核の深さ方向の寸法 a は 50~150 μm 程度であり、そのアスペクト比 $\lambda (=a/c)$ は 0.5~0.85 であった。鋳造用アルミニウム合金においては、このような 100~150 μm 程度の大きな欠陥がき裂の発生核となり、疲労寿命を低下させたものと考えられる。

3.3 フレッシング疲労特性

3.3.1 フレッシング疲労強度

Fig. 4 中にフレッシング疲労の S-N 曲線を示す。鋳造用アルミニウム合金は、引張強さ、硬さおよび通常疲労の疲労限度が低いにもかかわらず、フレッシング疲労強度に関しては鍛造用アルミニウム合金とほぼ同程度 (約 60 MPa) であった。

S-N 曲線の縦軸の応力を引張強度で標準化した値、すなわち引張強さに対する疲労強度の割合で示した曲線を Fig. 6 に示す。これより、引張強さに対する通常疲労限度の比 (σ_w/σ_B) は、鋳造用アルミニウム合金の場合 0.37、鍛造用アルミニウム合金の場合 0.39 と同程度の値を示した。しかし、引張強さに対するフレッシング疲労限度の比 (σ_{wf}/σ_B) は、鍛造用アルミニウム合金の方が著しく低いことがわかる。さらに、鍛造用アルミニウム合金の通常疲労限度 σ_w に対するフレッシング疲労限度 σ_{wf} の比 (σ_{wf}/σ_w) は 0.43 であり、これまでのアルミニウム合金に関する報告例^{4),5)} の 0.4~0.5 とほぼ同一であった。これに対し、鋳造用アルミニウム合金のそれは 0.67 と高い値を示した。このように引張強さあるいは通常疲労強度を基準とすると、鋳造用アルミニウ

Fig. 6 S-N curves' normalized by σ_B . Fig. 7 SEM observation of a fretting crack on the longitudinal cross section of the specimen tested up to 1% of fretting fatigue life under $\sigma_a=100$ MPa.

ム合金は耐フレット疲労特性に優れた材料と考えることができる。

フレット疲労の破壊起点は、両材料ともフレット部端部近傍であり、鋳造用アルミニウム合金においても、鋳造欠陥が関与している様子は観察されなかった。このように初期欠陥が関与しない状況は、多数の空孔を有する焼結材のフレット疲労の場合と類似している¹³⁾。

き裂の発生時期を検討するため、フレット疲労寿命の1%程度で試験を中断し、その縦割り断面を観察した。その結果、Fig. 7に示すように、フレット部端部近傍においてすでにき裂の発生が認められた。

3.3.2 接線力係数

Fig. 8に接線力係数と相対すべり量の関係を示す。接線力係数は摩擦力（接線力）を押付け力で除した値で定義され、接触面全体がすべる条件では摩擦係数に一致する。図より、いずれの材料の場合も接線力係数は相対すべり量の増加とともに増大し、相対すべり量が15 μm 程度以上で約0.7で飽和する傾向を示した。この関係に両材料で大きな相違は認められなかった。

3.3.3 表面粗さ

両材のフレット部の表面損傷状況を調べるため、フレット面の表面粗さを測定した。フレット部表面は、接触端部で粗く、中央部で平坦な形態をとっていた。Fig. 9に接触端部近傍で測定された最大表面粗さと相対すべり量の関係を示す。図より、いずれの材料も最大表面粗さは相対すべり量の増加とともに増大し、接線力係数の場合と同

Fig. 8 Relationship between tangential force coefficient and relative slip amplitude.

Fig. 9 Relationship between maximum surface roughness and relative slip amplitude.

様15 μm 程度で飽和する傾向を示した。

3.3.4 2段階試験

フレット疲労試験をある繰返し数で中断し、接触片を取り外し、その後通常疲労試験を継続する2段階試験¹⁴⁾を行った。応力振幅はフレット疲労寿命が 3×10^5 回付近である100 MPaとし、与えた繰返し数は同応力での破断繰返し数 N_f の値に対する0.6%~30%とした。

Fig. 10に2段階試験結果を示す。図中の横軸はフレット部中断時の繰返し数 N_{fx} 、縦軸は全破断寿命 N_T 、すなわち接触片を取り外した後の通常疲労の破断寿命 N_{px} に N_{fx} を加えた総繰返し数である。図中、 $N_{fx}/N_T=100\%$ の線上的データは中断なしのフレット疲労寿命 N_f の値で、Fig. 4中の $\sigma_a=100$ MPaのときの値と一致する。鋳造用アルミニウム合金の場合、 $N_{fx}/N_f < 0.1$ の範囲では、いずれもフレット部以外で破断し、その疲労き裂発生核は通常の場合と同様に内在する鋳造欠陥であった。したがってこの領域においては、フレット疲労により導入されたき裂よりも、鋳造欠陥からのき裂進展が破壊挙動を支配していると考えられる。一方、鍛造用アルミニウム合金の場合 $N_{fx}/N_f < 0.006$ ではフレットの影響は現れず、 $0.01 \leq N_{fx}/N_f < 0.1$ の範囲では N_{fx} の増加とともに N_T は減少した。両材料におい

Fig. 10 Two-stage test results.

て、 $N_{fx}/N_f \geq 0.1$ の領域では $N_T = N_f$ となり、本研究の範囲内では、フレットングの影響を受けてき裂が伝ばする領域は全寿命の10%程度と考えられる。

3.4 疲労き裂伝ば特性

疲労き裂伝ば試験結果より得られた伝ば速度 da/dN と ΔK の関係を Fig. 11 に示す。図からわかるように、鋳造用アルミニウム合金および鍛造用アルミニウム合金の伝ば曲線は下限界近傍を除き、ほぼ一致している。城野ら¹⁵⁾および塩澤ら¹⁶⁾は両材料いずれの場合もき裂伝ば曲線の第Ⅱ段階に折れ曲がり点が存在し、三つの領域に分けられることを報告している。本研究においても同様の傾向が認められる。ここで、多少無理な部分もあるが、後述の寿命推定に用いるため、伝ば曲線を次式で近似することにする。

$$da/dN = C_0 (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (3)$$

ここで、 C_0 , m は材料定数、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。近似曲線を図中に示す。各材料定数の値は、鋳造用アルミニウム合金の場合 $C_0 = 8.702E-13$, $m = 4.4$, $\Delta K_{th} = 4.1$ MPa, 鍛造用アルミニウム合金の場合 $C_0 = 9.56E-14$, $m = 5.40$, $\Delta K_{th} = 3.3$ MPa となった。

3.5 鋳造用アルミニウム合金における通常疲労寿命の推定

鋳造用アルミニウム合金の通常疲労試験のき裂発生核は、Fig. 5 に示したような鋳造欠陥であった。そこで、半無限体中の半楕円状表面き裂の一樣引張りを仮定し^{17,18)}、次式を用い寿命推定を試みた。

$$K = M_f(\Phi, ac^{-1}) \sigma(\pi a)^{0.5} \{ \sin^2 \Phi + (ac^{-1})^2 \cos^2 \Phi \}^{0.25} / E(k) \quad (4)$$

$$E(k) = 1 + 1.464(ac^{-1})^{1.65}$$

$$M_f = 1.13 - 0.1(ac^{-1}) \quad 0.02 \leq ac^{-1} < 1$$

$$M_f = (1 + 0.003(ca^{-1})) (ca^{-1})^{0.5} \quad ac^{-1} \geq 1$$

疲労寿命は、式(4)を式(3)に代入し、それを積分することにより算定した。その結果を Fig. 4 中に示した。推定寿命は実験値に対し、高応力レベルでは過大な寿命を与えるものの、低応力レベルでは比較的よい一致を示した。

3.6 フレットング疲労寿命の推定

フレットング疲労き裂は繰返しのごく初期に発生し、フレットング疲労寿命の大部分はき裂の伝ばに費やされることが知られており^{2),19),20)}、著者らは高強度焼結鋼¹³⁾や

Fig. 11 Relationship between crack growth rate da/dN and stress intensity factor range ΔK .

SKH10焼結高速度鋼²¹⁾について接線力を考慮にいたしたフレットング疲労き裂の破壊力学的解析を行い、推定したフレットング疲労寿命が実験値とよく一致することを示した。本供試材についても、上述のようにフレットング疲労き裂の発生は、きわめて初期に生じていた。そこで、本研究においても同一の手法により、次に示すようにいくつかの仮定のもとにフレットング疲労寿命の推定を試みた。

まず、接触により生じる接線力は接触面に一様ではなく、端部に αFa だけ集中しており、残りの $(1-\alpha)Fa$ が一様に分布していると考ええる。ここで、 Fa は接線力振幅、 l は接触部の相対すべり方向長さ、 α は接線力の端部への集中割合を示す係数である。また、押付け荷重の押付け方向の静的圧縮力は平均応力効果を生じるが、小さいので無視する。

フレットングき裂はこの接線力と繰返し応力を受けながら伝ばするので、この場合の応力拡大係数範囲 ΔK は、半無限体貫通き裂を仮定すると、次式で与えられる²²⁾。

$$\Delta K/2 = 1.12\sigma_a(\pi a)^{0.5} + K_{F1} + K_{F2} \quad (5)$$

ただし、

$$K_{F1} = 1.29\alpha Fa l / (\pi a)^{0.5},$$

$$K_{F2} = 1.29(1-\alpha) Fa (\pi a)^{0.5} \left[(3/2\pi) \ln \{ l + (l^2 + a^2)^{0.5} \} a^{-1} - (1/2\pi) l (l^2 + a^2)^{-0.5} \right]$$

ここで、 a はき裂長さ、 K_{F1} は接触部端部に集中する接線力による K 値、 K_{F2} は接触部に一様分布する接線力による K 値である。接触部端部への接線力の集中割合 α は、 ΔK を (σ, a, α) の関数として表し、疲労強度 σ_{wf} と停留き裂長さ a_s および下限界値 ΔK_{th} から推定することができるが、本供試材においては明瞭な停留き裂を観察できなかったため、 α をパラメータにとり、多数の ΔK - a 曲線を描き、曲線が極小を示す点の ΔK 値が ΔK_{th} と一致する場合の α を求めた。このようにして得られた α は鋳造用アルミニウム合金が0.35、鍛造用アルミニウム合金が0.28となった。

疲労寿命は、式(5)を式(3)に代入し、それを積分することにより算定した。積分は初期き裂長さを接触端部の最大表面粗さにとり、試験片板厚の半分を最終き裂長さ a_f とした。初期き裂長さをどのように仮定するかは問題であるが、フレットング疲労の場合 K 値はフレットング作用のため、き裂が短くても大きいので、推定寿命は初期き裂長さの影響を顕著には受けない。Fig. 4 中に示すように、推定寿命は、

鋳造用アルミニウム合金および鍛造用アルミニウム合金のいずれの場合とも、実験結果と比較的よい一致を示した。

4. 結 言

鋳造用アルミニウム合金の通常疲労およびフレッティング疲労特性を調べ、鍛造用アルミニウム合金のそれらと比較した。得られた結論を要約すると次の通りである。

(1) 鍛造用アルミニウム合金は繰返し硬化も軟化も生じないが、鋳造用アルミニウム合金は顕著な繰返し硬化挙動を示した。

(2) 鋳造用アルミニウム合金の静的強度および通常疲労強度は、鍛造用アルミニウム合金に比べ低いが、フレッティング疲労強度はほぼ同等であった。

(3) 鋳造用アルミニウム合金の通常疲労破壊は鋳造欠陥が起点となっているが、フレッティング疲労においては鋳造欠陥ではなく、鍛造用アルミニウム合金と同様にフレッティング部端部近傍からき裂が発生・伝ばし破断に至っている。

(4) 静的強度および通常疲労強度が低い鋳造用アルミニウム合金のフレッティング疲労強度が、鍛造用アルミニウム合金と同等であったのは、フレッティング疲労き裂の発生がいずれの材料とも寿命のきわめて初期であり、疲労寿命に対してき裂伝ば寿命が支配的であること、接線力が両材料で差がなく、疲労き裂伝ば曲線もほぼ同一であるため、き裂伝ば寿命がほぼ同一となることによると考えられる。

参 考 文 献

- 1) R. B. Waterhouse: Fretting Fatigue, Int. Materials Reviews, 37 (1992), 77.
- 2) Y. Mutoh: JSME, Series A, 38 (1995), 405.
- 3) J. A. Alic, A. L. Hawley and J. M. Urey: Wear, 56 (1979), 351.
- 4) H. Conelius: Z. Metallk., 36 (1944), 101.
- 5) A. J. Fenner and J. E. Field: Revue Met., 55 (1958), 475.
- 6) 西島 敏, 田中紘一, 松岡三郎, 阿部孝行, 神津文夫: 日本機械学会論文集 A 編, 46 (1980), 1314.
- 7) H. Tada, P. Paris and G. Iriwin: The Stress Analysis of Crack Handbook, Del Research Corporation, (1973).
- 8) ASTM Standard E647, (1986), 662.
- 9) 日本材料学会編: 材料強度学, 日本材料学会, (1986), 110.
- 10) 久保田祐信, 越智保雄, 石井 明, 柴田良一: 材料試験技術協会, 41 (1996), 42.
- 11) 皮籠石紀雄, 西谷弘信, 都野 徹: 日本機械学会論文集 A 編, 51 (1989), 1783.
- 12) 軽金属協会編: アルミニウムハンドブック, 朝倉書店, 232.
- 13) 西田友久, 武藤睦治: 日本機械学会論文集 A 編, 60 (1994), 298.
- 14) M. H. Wharton, D. E. Taylor and R. B. Waterhouse: Wear, 23 (1973), 251.
- 15) 城野政弘, J. Song, 三上省二, 大垣雅由: 材料, 33 (1983), 468.
- 16) 塩澤和章, 水谷淳之介, 西野精一, 江幡節男, 横井信安, 春山義夫: 日本機械学会論文集 A 編, 57 (1991), 1279.
- 17) I. S. Raju and Jr. J. C. Newman: NASA Technical Paper 1578 (1979), 1578.
- 18) I. S. Raju and Jr. J. C. Newman: Engng. Fract. Mech., 11 (1979), 817.
- 19) R. B. Waterhouse: Fretting Fatigue, Applied Science Publ, (1981), 127.
- 20) T. Satoh and Y. Mutoh: Fretting Fatigue, (ed. by R. B. Waterhouse and T. C. Lindley), Mechanical Engineering Publications, (1994), 405.
- 21) 西田友久, 武藤睦治, 田中紘一, 中村秀樹: 日本機械学会論文集 A 編, 55 (1989), 1073.
- 22) 田中紘一, 武藤睦治, 迫田秀一: 日本機械学会論文集 A 編, 51 (1986), 1200.