6063アルミニウム合金のフレットング疲労特性に及ぼす 陽極酸化処理の影響

西田 友久*・水谷淳之介**・武藤 睦治***
前嶋 正受****・伊藤 六郎*****

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 51, No. 9 (2001), pp. 457-463

Effect of anodized coating on fretting fatigue characteristic of 6063 aluminum alloy

Tomohisa NISHIDA*, Junnosuke MIZUTANI**, Yoshiharu MUTOH***
Masatsugu MAEJIMA**** and Rokuro ITOH*****

Wear, scratch, plain fatigue and fretting fatigue tests were carried out using aluminum alloy JIS 6063-T5 specimens with anodic film and lubricating anodic film. Though the surface hardness of lubricating anodic film was lower than that of anodic film, lubricating anodic film had excellent wear resistance and crack resistance compared to anodic film. Plain fatigue strength of the specimen with anodic film was lower than that of the specimen with lubricating anodic film, which almost coincided with that of the specimen without film. Fretting fatigue strength of the specimen with lubricating anodic film was higher than that of the specimen with anodic film, which was higher than that of the specimen without film. The lubricating anodic film had the lowest coefficient of friction and a higher cracking resistance, which contributed to the late crack initiation and the low crack growth rates. The anodic film also had low coefficient of friction compared to the specimen without film and prevented metal-contact, which may result in higher fretting fatigue strength compared to the specimen without film. The lubricating anodic film is of significant benefit to fretting fatigue strength without degradation of plain fatigue strength.

(Received May 8, 2001)

Keywords: plain fatigue, fretting fatigue, lubricating anodic film, anodic film, in-situ observation

1. 緒 言

アルミニウム合金は軽量・安価でリサイクル可能であることなど多くの優れた特徴を有しているため、航空機や車両等の輸送機器など広範な分野で利用が拡大されている。しかし、軟質で耐食性に欠ける部分があるために表面損傷を受けやすいという問題点があり、これまでも表面改質が検討されている。中でも、耐食性・耐摩耗性の向上を目的とし、表面に硬い酸化皮膜を生成させる陽極酸化処理いわゆるアルマイト処理が広く利用されている。また、さらに皮膜にふっ素樹脂あるいは MoS_2 等の固体潤滑剤を含浸させた潤滑アルマイト処理は自動車部品や油圧機器に採用されている。このような部品は通常いくつかの部材から構成されており、部材が受ける繰返し応力に重畳して、部材間の接触部で摩擦・摩耗が作用する場合も多く、したがって、通常の疲労のみならずフレットング疲労が重要な問題となっている。アルマイト処理を施した材料の通常疲労強度に関する報告は、これまで

にもいくつかあるものの^{1)~4)}、フレットング疲労強度に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、アルミニウム合金に通常のアルマイト処理を施した試験片、およびアルマイト層の封孔および潤滑性付与を目指し、アルマイト多孔質層にモリブデン硫化物を析出させた試験片を用意し、通常疲労ならびにフレットング疲労試験を行い、アルミニウム合金の疲労強度に及ぼすアルマイト処理の影響について検討した。さらに、フレットング疲労き裂の発生・進展状況をその場・連続観察するため、走査電子顕微鏡付き疲労試験機 (SEM サーボ) を用いたフレットング疲労試験も行い、アルマイト処理および潤滑アルマイト処理がフレットング疲労破壊挙動に及ぼす影響についても詳細に検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として、試験片には展伸用アルミニウム合金6063-

* 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).

**** (株)フジクラ (東京都)。Fujikura, Ltd. (Koto-ku, Tokyo).

***** (株)ミヤキ (浜松市)。Miyaki, Ltd. (Hamamatsu-shi, Shizuoka).

Table 1 Chemical composition (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6063-T5	0.44	0.20	0.03	0.02	0.53	0.01	0.01	0.02

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM420	0.21	0.23	0.70	0.016	0.014	0.13	0.07	1.01	0.15

Table 2 Mechanical properties

	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation ϕ (%)	Young's modulus E (GPa)	Hardness (MPa)
6063-T5	230	21	65	770

T5 材を、接触片には SCM420 鋼を用いた。それらの化学成分を Table 1 に、試験片の機械的性質を Table 2 に示す。試験片は表面処理を施さない試験片（未処理材と呼ぶ）、アルマイト処理を施した試験片（アルマイト材と呼ぶ）およびアルマイト処理後に多孔質層にモリブデン硫化物を析出させた試験片（潤滑アルマイト材と呼ぶ）の 3 種類を用意した。アルマイト処理は、試験片表面を市販脱脂剤で脱脂洗浄後、20 mass% 硫酸電解浴を用いて、電流密度 2.5 A/dm^2 、35 min の条件で行い、厚さ約 $30 \mu\text{m}$ の皮膜を生成した。モリブデン硫化物は通常のアルマイト処理後、ただちにテトラチオモリブデン酸アンモニウムを脱イオン水に溶解させた電解槽に置いて、電流密度 0.1 A/dm^2 、6 min の条件で陽極通電し、アルマイト層の気孔中に析出させた。

2.2 摩耗試験およびスクラッチ試験

疲労試験に先立ち、皮膜の基本的特性を調べるため、摩耗試験とスクラッチ試験を行った。摩耗試験はボールオンディスクタイプ（ボール材質：SUJ2、ボール寸法：5 mm、1 回転当たりの摩耗距離：3.14 cm）の摩擦摩耗試験機を用いて、押付け荷重 1.5 N、すべり速度 5 cm/s、回転摩耗距離は約 62 m、大気中のもで行った。また、スクラッチ試験は、アルマイト材および潤滑アルマイト材の両皮膜について、直径 0.2 mm の球頭サファイア針に 4.9 N の荷重をかけて毎分 50 mm の速さで行い、100 倍の光学顕微鏡にてスクラッチ痕のクラック発生状況を観察した。

2.3 皮膜の残留応力

皮膜には残留応力を生じており、それが疲労特性に影響を及ぼしている可能性がある。陽極酸化皮膜のアルミナ質は無定形アルミナであるため、応力測定に X 線の利用が困難とされている。そこで、次に示す方法で残留応力の推定を試みた。

供試材として厚さ $50 \mu\text{m}$ 、幅 25 mm、長さ 100 mm の 99.8% の純アルミニウムの箔を溶剤脱脂後、 400°C で 1 時間、完全焼なまし後、試片の片面にマスキングテープを丁寧に貼付け、マスクのない片面のみを 15 mass% 硫酸浴中、浴温 15°C で 2 A/dm^2 の定電流密度で、2, 5, 8, 10, 15, 20 および $24 \mu\text{m}$ の 7 水準の酸化皮膜を生成した。モリブデン硫化物を含浸した試料の作製は、上記 7 水準の酸化皮膜を成膜直後、十

Fig. 1 Plain fatigue specimen (unit: mm).

(a) Fretting fatigue specimen.

(b) Contact pad

Fig. 2 Fretting fatigue specimen and contact pad (unit: mm).

分に水洗し、そのまま、脱イオン水に溶解したテトラチオモリブデン酸アンモニウム $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$ の 0.1 mass% 溶液中にて、酸化皮膜を陽極とし、ステンレス板を陰極として、 20°C の浴温で、50 mA の定電流密度で電解電圧が 120 V に上昇するまで電解した。これらの皮膜を成膜後十分に洗浄し、マスキングテープを接着面に有機溶剤を浸透させながら注意深く引きはがし、 60°C で乾燥後、室温に保管した。

処理した試験片は長手方向にそり変形するため、その曲率半径を高精度 ($1/100 \text{ mm}$) の円形板スケールにて実測し、後述のように、この曲率半径を Barklie & Davies の式⁵⁾に代入し残留応力を算出した。

2.4 通常疲労試験およびフレットング疲労試験

通常疲労試験片の形状・寸法を Fig. 1 に、フレットング疲労試験片および接触片の形状・寸法を Fig. 2 にそれぞれ示す。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ピングリングにより試験片板状部に押付けることによって起こさせた⁶⁾。このときの接触面圧は 50 MPa 一定となるように調節した。また、試験片と接触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。通常疲労試験およびフレットング疲労試験はいずれも容量 98 kN の油圧サーボ式疲労試験機を用い、引張圧縮（応力比 $R = -1$ ）の荷重制御で繰返し速度 10~20 Hz の条件で行った。フレットング疲労試験終了後、フレットング面、破断面などの走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察を

Fig. 3 Fretting fatigue specimen and contact pad for SEM Servo (unit: mm).

Fig. 4 Schematic illustration of fretting fatigue test.

行うとともに、フレット部表面粗さを表面粗さ測定器により測定した。

2.5 フレット疲労き裂のその場・連続観察

フレット疲労き裂の発生・進展状況を詳細に連続観察するため、走査電子顕微鏡付き疲労試験機 (SEM サーボ) を用いたフレット疲労試験も行った。その試験片および接触片の形状・寸法を Fig. 3 に示す。用いた SEM サーボは容量 5 kN であり、引張圧縮 (応力比 $R=-1$) の荷重制御、接触面圧 50 MPa で試験を行った。

試験片に押付け力を作用させるプルービングリングは、疲労試験機および電子顕微鏡と干渉せず、さらに試験片と接触片の観察が可能となるように寸法等を配慮した。なお、電子顕微鏡を用いたき裂の観察時には、接触部全体が見えるように、プルービングリングを Fig. 4 のように傾斜させた。

3. 実験結果および考察

3.1 アルマイト皮膜および潤滑アルマイト皮膜の基本特性

Fig. 5 に摩耗試験結果から、摩擦係数とすべり距離の関係を示す。図よりアルマイト材の摩擦係数は試験開始後約 9 m (約 300 回転) 後に 0.4 程度で安定し、また、潤滑アルマイト材のそれは約 50 m (約 1500 回転) 後に 0.2 程度で安定し、潤滑アルマイト材の摩擦係数の方がアルマイト材のそれに比べ約 1/2 と低いことがわかる。

Fig. 6 に 24 μm 厚さの皮膜に対するスクラッチ痕の観察例を示す。図より明らかなように、潤滑アルマイト材の方がアルマイト材に比べスクラッチによるき裂発生が少ない。

Fig. 5 Relationship between frictional force coefficient and slip distance.

Fig. 6 Observations of surface crack induced by the scratch test.

Fig. 7 Relationship between hardness and distance from fretting surface.

Fig. 7 に硬さと表面からの距離の関係を示す。アルマイト材の表面硬さは $HV=550$ 程度、潤滑アルマイト材のそれは $HV=370$ 程度であり、皮膜以外の基材部では、いずれも $HV=90$ 程度で未処理材の硬さと同じであった。

以上のように、潤滑アルマイト皮膜の方がアルマイト皮膜に比べ硬さが低いにもかかわらずスクラッチによるき裂が発生しにくく摩耗特性にも優れていた。

3.2 皮膜の残留応力

アルミニウムが酸化されて表面に酸化皮膜が成長するとき、この皮膜が緻密なアルミナ結晶であれば、その結晶構造はアルミニウム合金と比較して、およそ 1.49 倍に増加すること

は、Kubashevsky の容積分率 (酸化皮膜/金属) の値からもよく知られている⁷⁾。したがって、この場合は酸化皮膜にはかなり大きな圧縮応力が発生することになる。容積分率が 1 以下のとき、皮膜には引張応力が発生し⁷⁾、機械的特性や耐食性などに問題を引起こす。

Fig. 8 Foil curvatures for varying thickness of anodized coatings.

Fig. 9 Differences in residual stress of anodic film between non-impregnation and impregnation.

また、一般に硫酸浴などを主体とする多孔質型のアルミニウム陽極酸化皮膜は、多孔質型皮膜とはいっても、皮膜の成長当初はかなり緻密であって、容積率1.49を示す結晶性酸化皮膜（結晶性アルミナ）ほどではなくても、圧縮応力が発生しているものと推定される^{8),9)}。

アルマイト皮膜の成長段階を観察すると、成長当初の空孔容積の存在率は5%程度で、かつ単純な多孔であると推定され¹⁰⁾、これが数十 μm 厚さの皮膜になると空孔の形状も母材側は細めで、表面側は化学溶解により太めに開孔される。その形状は複雑ではあるが、空孔の容積は平均して20%前後となり、表面部はさらに大きな数値になっているものと推定される。単純に理想的な容積率の1.49を基準に試算していくと、アルマイト皮膜の成長当初（2~5 μm 程度まで）計算容積率は $1.49 \times (1 - 0.05) = 1.40$ 、数十 μm 皮膜のとき20%とすると、同様に容積率の変化は1.18以下となっており、実際の圧縮応力もかなり低くなっていることが推定できる¹¹⁾。

皮膜残留応力の変化はこのような形状の単純な変化のみではなく、基材合金に起因する皮膜中の合金成分や、金属間化合物の溶解や残留状態に起因する残留応力の発生、硫酸電解液やアルミニウム水酸化物あるいは硫酸アルミニウム等が空孔に吸着し、それによる残留応力の変化が生じているはずであるが、この皮膜の残留応力の値を実測することは、前述の通りX線解析法等の使用もできず、困難とされている。

Fig. 8に十分に焼なましされた薄いアルミニウム箔の片面のみに異なる厚さの陽極酸化皮膜を生成させた場合（アルマイト皮膜）の変形状況を示す。図よりアルマイト皮膜が厚くなるとともに変形が増大することがわかる。また、潤滑アルマイト皮膜の場合も同様の傾向を示した。Fig. 9に皮膜厚さ20 μm のアルマイト材と潤滑アルマイト材の変形状況を比較して示している。図からモリブデン硫化物の含浸により変形の改善が認められる。このような変形挙動から、次に示すBarklie & Daviesの式⁵⁾を用いて、アルマイト皮膜および潤

Fig. 10 Residual stress in anodic film and lubricating anodic film.

Fig. 11 S-N curve.

滑アルマイト皮膜に生じている残留応力を試算した。

$$\sigma = h^2 E / 6rd(1 - d/h) \quad (1)$$

ここで、 h : アルミニウム箔の厚さ、 E : アルミニウム箔のヤング率、 r : そり変形の曲率半径である。皮膜厚さの違いによる残留応力の変化をFig. 10に示す。図より、膜厚10 μm を越え、引張の残留応力を生じる領域では、潤滑アルマイト皮膜の引張残留応力はアルマイト皮膜のそれに比べ、約20 MPa低いことがわかる。

3.3 通常疲労特性

Fig. 11に通常疲労試験結果よりS-N曲線を示す。通常疲労の疲労寿命はアルマイト材が未処理材および潤滑アルマイト材に比べ短くなる傾向が認められた。また、 10^7 回の疲労強度は未処理材および潤滑アルマイト材が90 MPa、アルマイト材は80 MPa程度であり、潤滑アルマイト材は未処理材とはほぼ同程度であったが、アルマイト材は約13%程度低下した。

塩澤¹⁾は2014-T6および6151-T6材にアルマイト処理を施し、回転曲げ疲労強度試験を行い、アルマイト層が母材の変形に追従できなくなり皮膜が破壊するため、アルマイト材の 10^7 回の疲労強度は未処理材のそれに比べ20~30%程度低下

Fig. 12 Crack initiation under the plain fatigue.

することを報告しており、本実験結果と同傾向の結果を示している。また、平田ら²⁾は1080アルミニウムにアルマイト処理を施し、回転曲げ疲労強度試験を行い、高応力側では母材の変形により皮膜が破壊し疲労強度は低下するが、疲労限度付近では硬い皮膜の存在により疲労強度はわずかに向上する傾向を示した。これらの結果はアルマイト皮膜の疲労試験中の割れが疲労寿命・疲労強度低下の要因の一つであることを示している。

また、Fig. 10よりアルマイト皮膜には潤滑アルマイト皮膜に比べてもかなり大きな引張残留応力が生じていると推察され、これも通常疲労強度を低下させる原因の一つであると考えられる。

通常疲労試験におけるき裂発生点近傍の破面観察結果の一例をFig. 12に示す。未処理材は同図(a)に示すように、表面近傍においてすべりの作用により発生したと思われる領域から、それを起点としてき裂が伝ばしている様子が認められたのに対し、アルマイト材は同図(b)に示すようなアルマイト皮膜がある範囲にわたって数か所で破壊し、それらを起点として発生したき裂が合体しているように見受けられた。一方、潤滑アルマイト材の場合、同図(c)に示すように疲労破面の皮膜は、アルマイト材のように破壊した様子はほとんど認められず、疲労き裂は皮膜よりわずかに内側の基材から発生したように見受けられた。

3.4 フレッシング疲労特性

3.4.1 フレッシング疲労強度

フレッシング疲労に関するS-N曲線をFig. 11中に示す。疲労寿命は未処理材、アルマイト材および潤滑アルマイト材の順に向上し、その 10^7 回の疲労強度はそれぞれ30, 40および50 MPa程度であった。

Fig. 13 Relationship between tangential force coefficient and relative slip amplitude.

Fig. 14 Relationship between maximum surface roughness and relative slip amplitude.

3.4.2 接線力係数

Fig. 13にフレッシング疲労試験中に測定した接線力 F と押付け力 P との比より求めた接線力係数(F/P)と相対すべり量の関係を示す。なお、相対すべり量は接触片を剛体として算出した値を用いた。図より接線力係数の飽和する値は未処理材が0.85、アルマイト材が0.7、潤滑アルマイト材が0.6程度であった。摩耗試験による摩擦係数ほど顕著ではないが、潤滑アルマイト皮膜がアルマイト皮膜に比べフレッシング摩擦特性にも優れていることが明らかとなった。

3.4.3 表面粗さ

Fig. 14に最大表面粗さと相対すべり量の関係を示す。表面粗さは相対すべり量の増大とともに増加し、相対すべり量が10~20 μm の間でそれぞれ飽和する傾向を示した。その値は未処理材が45 μm 、アルマイト材が20 μm 、潤滑アルマイト材が10 μm 程度であり、潤滑アルマイト材の表面粗さが著しく低い値を示し、耐摩耗性に優れていることがわかる。

3.4.4 フレッシング部の顕微鏡観察

フレッシング疲労き裂は、いずれの場合も接触片の外端近傍で発生しており、その縦断面の一例をFig. 15に示す。同図(a)は未処理材を示しており、き裂は接線力の影響を受けて45度方向に進展し、これまでに報告されている表面処理を施していない材料のフレッシング疲労の場合と同様

Fig. 15 SEM observations of fretting cracks on the longitudinal cross-section of the specimens.

の様相を示している^{12)~14)}。

同図(b)に示すように、アルマイト皮膜の損傷は外端部近傍で特に著しく、皮膜がフレッティングによって完全にはく離している部分があり、フレッティング疲労き裂も多数観察された。

同図(c)に示すように、潤滑アルマイト皮膜の破損はアルマイト皮膜に比べて軽微であることがわかる。このように潤滑アルマイト材においてフレッティング破面の損傷が未処理材やアルマイト材に比べて小さいのは、Fig. 13に示した接線力係数が他の場合に比べて低いこと、およびスクラッチ試験でも明かなように皮膜が割れにくいためと考えられる。

3.4.5 フレッティング疲労き裂のその場・連続観察結果

負荷の繰返しに伴うアルマイト材のき裂進展状況の一例をFig. 16に示す。図より、アルマイト材のき裂は、繰返し数のごく初期で発生していることがわかり、押付け力を加えただけでき裂が発生する場合も認められたが、一般的には 5×10^2 回 ($N/N_f=0.5\%$, N_f : 破断繰返し数)において表面層に垂直に割れを生じ、繰返し数 3×10^3 回 ($N/N_f=3\%$)でわずかに母材へ進展し始め、その後繰返し数の増加に伴い、成長していく。

Fig. 17に、同一応力レベルにおけるアルマイト材および潤滑アルマイト材のフレッティング疲労き裂進展挙動の一例を示す。両材料とも、試験により生じる摩耗粉は未処理材に比べ発生時期が遅く、発生量も著しく少ないことが確認できた。これは、未処理材に酸化皮膜を施したことにより、アルミニウム合金同士の金属接触が防止されたためと考えられる。また、皮膜の割れは、アルマイト材と潤滑アルマイト材

Fig. 16 Observations of fretting crack on the side surface of the specimen in real time with SEM (alumite: $\sigma_a=120$ MPa, $P=50$ MPa, $N_f=10^5$).

を比較すると、前者が繰返し数 5×10^2 回、後者が 1.2×10^3 回程度で発生し、母材へのき裂進展は前者が 3×10^3 回、後者が 6.4×10^3 回程度で生じていた。未処理材の場合、き裂進展が確認されたのは 10^3 回程度であったことより、潤滑アルマイト材においては、他の材料よりもき裂の発生および進展が抑制されることが明らかとなった。

4. 結 言

アルミニウム合金に通常のアルマイト処理および潤滑アルマイト処理を施し、皮膜の基本特性を調べた。また、同様の処理を施した試験片を用いて通常疲労試験およびフレッティング疲労試験を行い、それらの疲労強度に及ぼすアルマイト処理の影響について検討した。さらに、フレッティング疲労き裂の発生・進展状況をその場・連続観察するため、走査電子顕微鏡付き疲労試験機 (SEM サーボ) を用いたフレッティング疲労試験も行い、アルマイト処理および潤滑アルマイト処理がフレッティング疲労破壊挙動に及ぼす影響についても詳細に検討した。得られた結果をまとめると次に示す通りである。

(1) 潤滑アルマイト皮膜は、アルマイト皮膜に比べ硬度は低いがじん性に優れ、スクラッチによるき裂が発生しにくく、また、摩擦・摩耗特性にも優れていた。さらに、潤滑ア

Fig. 17 Observations of fretting crack on the side surface of the specimen with SEM ($\sigma_a=120$ MPa, $P=50$ MPa).

ルマイト皮膜に生じる引張残留応力もアルマイト皮膜の場合の1/2程度と低い。

(2) 通常疲労の疲労強度は、未処理材に比べて潤滑アルマイト材はほぼ同等であったのに対し、アルマイト処理材はそれらより低かった。これは潤滑アルマイト皮膜が、延性的で割れを生じにくく、引張残留応力も低いため、未処理材と同等の疲労破壊挙動を示すのに対し、アルマイト皮膜は脆性的で、引張残留応力も高いため、疲労試験中に容易に割れを生じ、これが疲労き裂の起点となり、疲労強度を低下させるためである。

(3) 通常のアルマイト処理により、フレットング疲労強度は未処理材に比べ向上した。これはアルマイト皮膜が、金属同士の接触を防止していること、および相対すべりに伴う

摩擦係数を低減していることなどの効果によるものと考えられる。一方、潤滑アルマイト処理により、フレットング疲労強度はアルマイト材よりさらに向上した。これは、潤滑アルマイト皮膜が、通常のアルマイト皮膜に比べ、さらに割れにくく、より長期的に、金属同士の接触を防止していること、および摩擦係数がアルマイト皮膜に比べさらに低くなっており、き裂の発生・伝ばを遅延しているためであると考えられる。

(4) 以上のように、潤滑アルマイト処理は、アルミニウム合金の通常疲労強度を低下させることなく、フレットング疲労強度を改善することができる有効な手段と考えられる。

参考文献

- 1) 塩澤和章：アルミニウム研究会誌，324-3 (1999)，3.
- 2) 平田昌範，前嶋正受，猿渡光一，重野 博，高谷松文：表面技術，47 (1996)，376.
- 3) A. M. Cree, G. W. Weidmann, R. Hermann: J. of Mat. Sci. Letters, 14 (1995)，1505.
- 4) 金属材料疲れ強度の設計資料 (Ⅲ) 環境効果，日本機械学会，(1974)，142.
- 5) R. H. Barklie and J. Davies: Inst. of Mechanical Engineering, (1957)，731.
- 6) 西田友久，水谷淳之介，武藤睦治，好井健司，海老原治，宮下 悟：軽金属，49 (1999)，493.
- 7) 馬場規泰：アルミニウム研究会誌，281-3 (1994)，1.
- 8) N. B. Pilling and R. E. Bedworth: J. Inst. Metals, 29 (1923)，529.
- 9) J. C. Nelson and R. A. Oriani: Corrosion Science, 34 (1993)，307.
- 10) S. Wernik and R. Pinner: ROBER DRAPER Ltd. Third Edition, TEDDINGTON, (1964).
- 11) 前嶋正受，猿渡光一，石禾和夫，高谷松文：表面技術，46 (1995)，856.
- 12) 田中紘一，武藤睦治，迫田秀一：日本機械学会論文集，51，A (1986)，1200.
- 13) 武藤睦治，西田友久，坂本 勲：材料，37 (1988)，649.
- 14) R. B. Waterhouse: Fretting Fatigue, Applied Science Publ, (1981)，159.