非平面円柱形状試験片における硬質アルマイトの 往復運動平面摩耗試験

塩澤 佑一朗^{a,*}, 三神 武文^a, 三井 由香里^a, 八代 浩二^a

^a 山梨県産業技術センター(〒400-0055 山梨県甲府市大津町 2094)

Abrasive-Wheel-Wear Abrasion Resistance Test for Hard Anodic Oxide Coating on the Nonplanar Cylinder Shape Sample

Yuichiro SHIOZAWA^{a,*}, Takefumi MIKAMI^a, Yukari MITSUI^a and Koji YATSUSHIRO^a

^a Yamanashi Industrial Technology Center (2094, Otsu-machi, Kofu, Yamanashi 400-0055)

Wear resistance testing of the anodic oxide coating on aluminum and its alloys is specified in the Japanese Industrial Standard (JIS). Based on JIS, the abrasive-wheel-wear abrasion resistance test for a hard anodic oxide coating is applied only to a plate-shaped sample (JIS H 8682-1:2013). However, because the test method is simple, this test is also applied to a nonplanar cylindrical sample at the production site. For this case, little technical information is openly available because the test is conducted independently at each manufacturer, regardless of the regulations. To collect technical information for this study, we applied the abrasive-wheel-wear abrasion resistance test for the nonplanar cylindrical sample. With increasing curvature of the nonplanar cylindrical sample, the abrasion resistance and the wear track width on abrasive paper were decreased linearly. These findings indicate that the contact area between the nonplanar cylindrical sample and abrasive paper plays an important role in abrasive-wheel-wear abrasion resistance. Based on these results, we provide a relation of abrasion characteristics for the plate-shaped and nonplanar cylindrical samples. For the nonplanar cylindrical sample, it is noted that the wear track becomes inhomogeneous with increase of the double stroke of the abrasion resistance test.

Keywords : JIS H 8682-1:2013, Hard Anodization, Anodic Oxide Coating,
Abrasive-Wheel-Wear Abrasion Resistance, Nonplanar Cylinder Shape Sample

1. 緒 言

アルミニウム材料に陽極酸化皮膜(以下, 単にアルマイトという)を施すと, 耐食性, 耐摩耗性, 耐熱性, 電気絶縁性および装飾性などすぐれた機能を付与できるため, その材料の適用範囲は飛躍的に広がる。硬質アルマイトの開発により耐摩耗性はさらに向上し, アルミニウム材料は摺動部品(ピストン, シリンダー, 歯車など)にも適用されるようになった¹⁾。

展伸材, 鋳造材などの素地に耐摩耗性を付与する目的で施す硬質アルマイトについては, 1995年に日本工業規格(JIS)において規格化され, 1999年の改正を経てJIS H 8603:1999 アルミニウム及びアルミニウム合金の硬質陽極酸化皮膜に定められている²⁾。アルマイトの耐摩耗性試験方法については, 1999年に制定されて2013年に国際規格(ISO)を礎として改正された往復運動平面摩耗試験(JIS H 8682-1:2013)³⁾, 噴射摩耗試験(JIS H 8682-2:2013)⁴⁾および砂落し摩耗試験(JIS H 8682-3:2013)⁵⁾が現在運用されている。往復運動平面摩耗試験は, 試験片を研磨紙で摩耗した後, その試験片の膜厚または重さを測るといった簡便な試験方法である。

本試験では, 平滑な皮膜を有する平面試験片(最小寸法70 mm×70 mm)を用いる旨が規定されており, 非平面形状の試験片には適用することができない。このような試験片には, 皮膜の耐摩耗性の平均値を示す噴射摩耗試験を行うこととされている。しかし実際の製造現場では, 試験の容易さや, 製品使用時の摩耗条件に近い方法で試験を行う必要性, また試験機の保有状況などを考慮して, 非平面形状試験片においても往復運動平面摩耗試験を採用することがある。このとき本来であれば往復運動平面摩耗試験とは呼ぶべきではないが, 簡単のため本報では以降も往復運動平面摩耗試験と表記する。このような場合, 各企業が独自に行う試験となるため公開される技術情報が少ないのが現状である。そこで本報では, 往復運動平面摩耗試験における非平面形状試験片の有効性について検討を行ったので報告する。

2. 試験方法

2. 1 試験片

同様な表面処理条件(硫酸アルマイト浴および常温封孔処理)で硬質アルマイトを施したアルミニウム合金 A5052 の平板(70 mm×75 mm, 厚さ 1.0 mm)および直径の異なる 3 つの円柱形状(直径 50 mm, 30 mm, 10 mm, 長さ 80 mm)の試験

* E-mail : shiozawa-sgfd@pref.yamanashi.lg.jp

片を購入して(株式会社スタンダードテストピース), 試験に用いた。各形状試験片の写真を図1(a)に示す。平板および直径50 mm, 30 mm, 10 mm 円柱試験片における硬質アルマイトの膜厚は, 後述の膜厚計による測定でそれぞれ $\sim 17 \mu\text{m}$ および $\sim 13 \mu\text{m}$, $\sim 14 \mu\text{m}$, $\sim 21 \mu\text{m}$ であった。

2.2 硬質アルマイトの硬さ

硬質アルマイトの硬さは, マイクロビッカース硬さ試験機(株式会社ミットヨ, HM-220D)を用いて測定した。本試験では, 各形状試験片における硬質アルマイトの凹凸を小さくするため, 研磨剤(日本磨料工業株式会社, ピカール金属みがき, 研磨粒子平均粒度 $3 \mu\text{m}$)を用いて試験片表面を研磨した。このとき硬質アルマイトの膜厚はほとんど変わらないことを後述の膜厚計による測定で確認した。すべての硬さ試験はヌープ圧子を用いて行い, 試験力は 0.2 kgf とした。ヌープ圧子は, ビッカース圧子と比較して試験片に深く押し込まれないため, 表面皮膜の硬度計測に利点がある。測定条件における硬質アルマイトへの圧子の侵入深さは, 表面から $\sim 4.3 \mu\text{m}$ であった。円柱試験片は, ヌープ圧子の圧痕の長軸方向が円柱軸方向となるように試験機に設置した。ヌープ硬さ(HK)は, 圧痕の長さを試験機付属のソフトウェア(株式会社ミットヨ, AVPAK)を用いてコンピュータ画面上で計測することにより取得した。

Fig. 1 (a) A picture of the hard anodic oxide coating on aluminum alloy (A5052) samples of a plate and cylinders ($\Phi 50 \text{ mm}$, $\Phi 30 \text{ mm}$ and $\Phi 10 \text{ mm}$), respectively. (b) A picture of the abrasive-wheel-wear abrasion resistance tester. (c) and (d) show the contact forms between a plate or cylinder sample and abrasive wheel, respectively.

2.3 往復運動平面摩耗試験

往復運動平面摩耗試験は, 日本工業規格の JIS H 8682-1:2013 アルミニウム及びアルミニウム合金の陽極酸化皮膜の耐摩耗試験方法—第1部: 往復運動平面摩耗試験³⁾を準用して行った。試験に用いた摩耗試験機(スガ試験機株式会社, NUS-ISO3)の外観写真を図1(b)に示す。この試験機は, 研磨紙を貼り付けた摩耗輪と試験片を接触させて荷重を加えた状態で, 試験片の往復運動を行う。試験機については先行文献に詳しくまとめられている⁶⁾。本試験では, 試験片に施された硬質アルマイトの耐摩耗性を求めるために摩耗試験前後の試験片のアルマイト厚さまたは質量を測定する。本報ではアルマイト厚さを測定して, JIS 規格に基づいた次式により耐摩耗性を求めた³⁾。

$$WR_w = \frac{N}{d_{1t} - d_{2t}}$$

ここで, WR_w は往復運動平面摩耗試験における耐摩耗性 ($\text{ds}/\mu\text{m}$), N は往復運動(ダブルストローク: ds)の回数(ds), d_{1t} は試験片の予備摩擦後の平均アルマイト厚さ(μm), d_{2t} は試験片の試験後の平均アルマイト厚さ(μm)である。

本報では, 表面処理された円柱部品の回転による摩耗ではなくピストン運動などの往復運動における摩耗を想定したため, 円柱試験片の平面摩耗は円柱軸方向とした。円柱試験片における摩耗試験では, 小型部品を試験機に固定するための試験片ホルダー(スガ試験機株式会社)を用いた。摩耗に用いた研磨紙は炭化けい素研磨紙 CP 240 (プレシ, 耐水研磨紙)で, その研磨紙を貼り付けた摩耗輪と試験片間の押付け力は 19.6 N とした。これらは JIS H 8682-1:2013 において硬質アルマイトを試験する際に指定されている条件である³⁾。また, 試験機に固定した試験片の往復運動速度は 40 ds/min であり, 往復運動のストローク長さは 30 mm であった。図1(c)と(d)に, 摩耗輪と平板または円柱試験片の間の接触形態をそれぞれ示す。試験機が静止状態で, 摩耗輪, それに貼り付けた研磨紙および各試験片が剛体であると仮定した場合, 摩耗輪と平板とは線接触, 円柱試験片とは点接触となる。本試験では, 任意の往復運動回数まで摩耗を行い, 試験片を試験機から取り外して後述の方法で膜厚測定を行うというサイクルを繰り返し, このとき試験片の同一の摩耗位置でそのサイクルを繰り返し, 往復運動回数を積算した。試験室の室温は $\sim 23^\circ\text{C}$ で, 相対湿度は $50\sim 60\%$ であった。

2.4 硬質アルマイトの膜厚測定

各形状のアルミニウム合金 A5052 における硬質アルマイトの膜厚は, 渦電流式膜厚計(株式会社フィッシャー・インストルメンツ, ISOSCOPE FMP30)を用いて測定した。この膜厚計は, 先端幅が 2.4 mm の計測用プローブ(株式会社フィッシャー・インストルメンツ, FTD3.3)を備えている。膜厚計の測定値のゼロ補正には, 表面処理をしていない各形状のアルミニウム合金 A5052 を用いた。また膜厚計の校正は, 試験片上に校正用ホイル(株式会社フィッシャー・インストルメンツ, アルミニウムベース, 膜厚 $24 \mu\text{m}$)を各形状に沿うように置いて膜厚測定することで行った。往復運動平面摩耗試験を行った試験片の膜厚測定位置は, その摩耗痕の中心とした。すべての測定で, 膜厚計の計測用プローブが各形状

試験片に対して垂直に接触するようにした。

3. 試験結果および考察

3.1 マイクロビッカース硬さ試験

図2は、アルミニウム合金 A5052 の平板試験片および直径 50 mm, 30 mm, 10 mm の円柱試験片に施した硬質アルマイトのヌーブ硬さを、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて測定した結果である。図2に示すように、各形状の試験片におけるヌーブ硬さは 300 HK~350 HK であり、測定誤差の範囲内で同様な値であった。円柱試験片では、曲率(円柱半径の逆数)が大きくなるにつれて測定誤差が大きくなる傾向にあったが、これは曲率が大きい試験片ではヌーブ圧子の押し込みが不安定になる可能性などが原因として考えられる。アルミニウム合金は、添加する元素の種類と割合の違いによって物性が異なり 1000 番台から 8000 番台までの合金名が使用されるが、アルマイト処理したときの表面硬度もそれぞれの合金において異なる。JIS H 8603:1999 の「表2 皮膜硬さ」によると、本報で用いた A5052 素地が分類される 2 種-(b)に施したアルマイトのビッカース硬さは 300 HV 以上とされている²⁾。また、表面処理企業の技術資料を参考にすると、特許技術などで特に硬度の高いものを除いた一般的なものは~350 HV (ヌーブ硬さ: ~356 HK) 程度である。したがって、本報で用いた試験片のアルマイト硬さも一般的な硬質アルマイトの値の範囲内であるといえる。また、用いた円柱試験片の範囲内では、試験片形状が硬さにほとんど影響しなかった。これは、硬質アルマイトの微視的な構造が用いた非平面形状よりも十分に小さく⁷⁾、各試験片で同様な表面状態になっているためだと考えられる。

3.2 往復運動平面摩耗試験

図3は、硬質アルマイト処理したアルミニウム合金 A5052 の平板試験片および直径 50 mm, 30 mm, 10 mm の円柱試験片における往復運動平面摩耗試験の結果である。試験機に取り付けた試験片を任意の回数だけ往復運動(ダブルストローク

ク: ds) させて摩耗した後、硬質アルマイトの膜厚を渦電流式膜厚計で測定するというサイクルを繰り返すことで取得した。JIS H 8682-1:2013 では、試験片表面の粗さなどが耐摩耗性に及ぼす影響を除くために、予備のダブルストローク(予備摩耗)を行う旨が規定されている。これは、硬質アルマイトを試験する場合は 100 ds となっている。ただし、膜厚が薄い場合などは、受渡当事者間の協定によって予備摩耗を省略してもよいとされている。本試験では、同一の試験条件(研磨紙、押付け力および往復運動速度)で摩耗したときの各試験片における膜厚減少量を考慮し、平板試験片では 100 ds, 円柱試験片では 20 ds を予備摩耗とした。図3に示すように、各試験片で予備摩耗時と予備摩耗後の膜厚減少量がほとんど同じであったことから、本報においては試験片表面の初期粗さなどが耐摩耗性に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。また、平面試験片の 0 ds~400 ds, 円柱試験片の 0 ds~80 ds の範囲で各試験片の膜厚は直線的に減少したことから、初期膜厚の違いが耐摩耗性に及ぼす影響もほとんどないと考えられる。ただし、表面処理皮膜の種類や膜厚によっては初期膜厚が耐摩耗性に大きく影響することもあるため注意が必要である。図3において、平板試験片の場合、耐摩耗性は予備摩耗を除く 100 ds~400 ds の範囲で 30.4 ds/ μm と見積もられた。円柱試験片では、予備摩耗を除く 20 ds~80 ds の範囲で、直径 50 mm, 30 mm, 10 mm でそれぞれ 13.7 ds/ μm , 12.1 ds/ μm , 7.3 ds/ μm と見積もられた。ただし、円柱試験片の平面摩耗におけるこれらの値は点接触による応力集中の影響があるため見かけの耐摩耗性といえる。試験片形状の影響により、平板>直径 50 mm 円柱>直径 30 mm 円柱>直径 10 mm 円柱の順で WR_w 値が高く見積もられる。

往復運動平面摩耗試験における試験片形状の影響について詳しく調べるために図3と同一の試験を複数回行い、平板試験片においては 100 ds~400 ds, 円柱試験片においては 20 ds

Fig. 2 Knoop hardness for the hard anodic oxide coating on aluminum alloy (A5052) samples of a plate and cylinders ($\Phi 10$ mm, $\Phi 30$ mm and $\Phi 50$ mm), respectively. The test force of Knoop hardness test was 0.2 kgf.

Fig. 3 Thickness of the hard anodic oxide coating on aluminum alloy (A5052) samples of a plate and cylinders ($\Phi 10$ mm, $\Phi 30$ mm and $\Phi 50$ mm) as a function of double stroke for abrasive-wheel-wear abrasion resistance test, respectively.

～80 ds の範囲の膜厚減少から耐摩耗性 WR_w (ds/ μ m) を求めた。図 4 (a) は、見積もられた各形状における耐摩耗性を円柱の直径に対してプロットした結果である。平板試験片における耐摩耗性は直径に対してプロットできないため、横軸に平行な点線(plate)で示している。図 4 (a) に示すように、円柱試験片では平板試験片よりも常に WR_w 値が低く、直径が大きくなるにつれて WR_w 値が非直線的に増加する傾向がみられた。円柱試験片の見かけの耐摩耗性は、表面の性質が同一ならば直径が無大のとき平板に一致するため、その傾向がみられていると考えられる。図 4 (b) では、耐摩耗性を円柱の曲率(円柱半径の逆数)に対してプロットした。本報で用いた円柱試験片の範囲内では、曲率が大きくなるにつれて低下する WR_w 値を直線関係で近似することができた。この近似直線において、切片(曲率 0 mm^{-1})のときの WR_w 値は平板試験片のそれと一致していない。この原因としては、誤差の範囲で直線近似できたが、実際は円柱試験片の3点と平板

Fig. 4 The abrasive-wheel-wear abrasion resistance (WR_w) of the hard anodic oxide coating on aluminum alloy (A5052) samples of a plate and cylinders ($\Phi 10$ mm, $\Phi 30$ mm and $\Phi 50$ mm) as a function of (a) diameter and (b) curvature for the cylinder sample, respectively.

の WR_w 値を通る曲線で近似される可能性などが考えられる。

3. 3 往復運動平面摩耗試験における研磨紙上の研磨痕

図 5 は、各形状の試験片において往復運動平面摩耗試験を行ったときの(a)研磨紙上の研磨痕写真および(b)その研磨痕の横幅をマイクロメータ(株式会社中村製作所)を用いて計測した結果をそれぞれ示している。図 5 (a)において、平板試験片では研磨紙の横幅(12 mm)全体と接触するため、研磨痕は12 mmの横幅となる。一方、円柱試験片では直径50 mm, 30 mm, 10 mmの順で研磨痕の横幅が小さくなっていく傾向が目視でみられた(図 5 (a))。図 5 (b)は、マイクロメータで計測した円柱試験片における研磨痕の横幅を、円柱の曲率に対してプロットした結果である。曲率が大きくなるにつれて、研磨痕の横幅は直線的に減少する傾向がみられた。これは、図 4 に示した耐摩耗性と曲率の関係と同様な傾向である。試験機に固定した各形状試験片が剛体であると仮定すると、静止状態のとき摩耗輪と平板とは線(長さ12 mm)で、円柱試験片とは点で接触する。しかし実際には、円柱試験片、摩耗輪に貼り付けた研磨紙および摩耗輪自体は剛体ではない。おそらく、その3つの中では研磨紙の変形が摩耗輪との接触に大きく影響していると思われる。そのため、静止状態のとき

Fig. 5 (a) Pictures of the polishing track on abrasive papers for the samples of a plate and cylinders ($\Phi 10$ mm, $\Phi 30$ mm and $\Phi 50$ mm), respectively. (b) The measurement width of the polishing track of fig. 5 (a) as a function of curvature for the cylinder sample.

摩耗輪と円柱試験片は点接触でなくなり、図 5 (a) のように横幅のある摩耗痕を研磨紙に残すと考えられる。したがって、試験片への研磨紙の押付け力は試験条件で一定 (19.6 N) となっているため、研磨痕の横幅が小さくなれば円柱試験片と研磨紙の押付け応力が大きくなる。また、図 2 に示したように各円柱試験片で硬質アルマイトの硬さはほとんど同じであった。これらの結果から、曲率の大きな試験片において平面摩耗における WR_w 値が低下する原因として、研磨痕の面積が小さくなることが挙げられる。

一方で、図 4 (b) の場合と同様に、図 5 (b) の近似直線においても切片 (曲率 0 mm^{-1}) のときの摩耗幅は平板試験片のそれと一致していない。本報では簡易に実測可能な摩耗幅に注目したが、円柱試験片の場合は摩耗部分の体積が重要な可能性が考えられる。円柱試験片では、平板のように均一な深さで摩耗されない可能性があるためである。したがって図 5 (b) では、実際は円柱の 3 点と平板の摩耗幅を通る曲線で近似される可能性や、摩耗体積ではなく摩耗幅でプロットしている点などが、切片が平板の摩耗幅と一致しない原因として考えられる。しかしながら、 WR_w 値と簡易に実測可能な摩耗幅の組み合わせによっても平板と円柱試験片の摩耗特性に相間が得られることを次の 3. 4 項において述べる。

3. 4 各形状試験片における摩耗特性の相間

往復運動平面摩耗試験における非平面形状試験片の有効性について検討するために、本報で得られたデータをまとめた。図 6 は、各形状試験片において 1 ds 摩耗したときの硬質アルマイトの膜厚減少量 (WR_w の逆数, WR_w^{-1}) を、摩耗幅あたりの押付け力に対してプロットした結果である。平板では摩耗幅あたりの押付け力が最も小さいため、 WR_w^{-1} 値が最も小さくなる。一方、試験片の曲率が大きくなるにつれて、単位摩耗幅あたりの押付け力が大きくなるため WR_w^{-1} 値は徐々に大きくなる。図 6 に示したように、このプロットを行うと平板および非平面形状試験片のデータで直線関係が得られることがわかった。任意の試験条件 (試験片, 押付け力など)

Fig. 6 The amount of decrease of the thickness for hard anodic oxide coating samples at 1 double stroke (WR_w^{-1}) as a function of the pressing force per abrasion width. The pressing force was 19.6 N.

でこの関係式を取得することで、未知の曲率を持つ試験片についても摩耗特性の推測が可能である。

3. 5 往復運動平面摩耗試験における試験片上の摩耗痕

図 7 は、平板および直径 50 mm 円柱試験片において往復運動平面摩耗試験を 100 ds 行ったときの試験片上の摩耗痕の写真である。図 7 において、平板試験片では研磨紙の横幅 (12 mm) と同じ幅の摩耗痕が試験片にみられた。この摩耗痕の膜厚は測定誤差の範囲内で均一であった。これは、平板試験片では炭化けい素研磨紙によって均一なアブレシブ摩耗⁸⁾が起きるためだと考えられる。一方で直径 50 mm の円柱試験片では、図 5 (a) の研磨紙上における研磨痕に対応した幅の摩耗痕がみられた。さらに図 7 中に矢印で示した位置に、線状に摩耗された痕がみられた。この線状摩耗痕上で膜厚を確認すると周囲よりも深く摩耗されていたことから、円柱試験片におけるアブレシブ摩耗ではアルマイトや研磨剤 (炭化けい素) に由来する摩耗粉の噛み込みによる摩耗 (スクラッチング) が生じると考えられる⁹⁾。このような線状摩耗痕は、100 ds 以上の平面摩耗を行ったいずれの円柱試験片にもみられた。これは、円柱試験片では往復運動回数が多くなると摩耗痕が不均一になることを示しており、膜厚測定に注意が必要である。本報の円柱試験片における摩耗試験では、膜厚測定誤差の範囲内で摩耗の不均一性をほとんど無視できるのは 80 ds までであった。JIS H 8682-1:2013 では、試験片の膜厚 ($0.1 \mu\text{m}$ の単位まで) または重さ (0.1 mg の位まで) を測るため、重さを計測すればその不均一性を考慮した耐摩耗性を評価することができる。しかし、非平面形状試験片の重量によっては、精密電子天秤などで計測できない場合がある。また試験片の線状摩耗部分においては、硬質アルマイトがなくなり露出した素材自体が摩耗されていないことを確認する必要がある。

Fig. 7 Pictures of the abrasive wear track on the samples of a plate and $\Phi 50$ mm cylinder, respectively. The double stroke was 100 times. The arrow of the picture for $\Phi 50$ mm cylinder indicates the abrasion track which is a line shape.

4. 結 言

本報では、JIS H 8682-1:2013 に基づく往復運動平面摩耗試験における非平面形状試験片の有効性について調べた。JIS 規格では平面試験片を用いる旨が規定されているが、円柱試験片を用いた場合でも再現性のある試験を行うことができた。各形状試験片を用いて試験を行ったところ、平板>直径 50 mm 円柱>直径 30 mm 円柱>直径 10 mm 円柱の順で平面摩耗における耐摩耗性値が高く見積もられた。そのとき円柱試験片の見かけの耐摩耗性は、曲率が大きくなるにつれて直線的に低下する傾向がみられた。さらに研磨紙に残った摩耗痕の横幅も、円柱の曲率が大きくなるにつれて小さくなる傾向がみられ、平面摩耗における硬質アルマイトの耐摩耗性において試験片と研磨紙との接触面積が重要であることがわかった。そこで、平板および円柱試験片の単位磨耗における膜厚減少量を摩耗幅あたりの押付け力に対してプロットすると、直線関係が得られることがわかった。これらの情報は、曲率を持つ試験片の平面摩耗特性を推測する際に重要である。

一方で、円柱試験片では往復運動回数が多くなると深い線状の摩耗を生じて摩耗痕が不均一になるため、膜厚測定に注意が必要であった。硬質アルマイト処理は耐摩耗性が要求される摺動部品などに施されるが、その部品の形状(曲率)によって平面摩耗特性は変わってくる。部品形状とその耐摩耗性を考慮した上で膜厚を設定することで、表面処理による製品不良のトラブルを減らすことが期待できる。

(Received June 3, 2021 ; Accepted August 18, 2021)

文 献

- 1) S. Tomita ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **41**, 1081 (1990).
- 2) JIS H 8603:1999
- 3) JIS H 8682-1:2013
- 4) JIS H 8682-2:2013
- 5) JIS H 8682-3:2013
- 6) H. Watanabe ; *Jitsumu Hyomen Gijutsu*, **32**, 198 (1985).
- 7) H. Yamaguchi ; *J. Jpn. Inst. Light Met.*, **59**, 204 (2009).
- 8) A. Hase ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **65**, 556 (2014).
- 9) M. Mizumoto, K. Usami ; *Turbomachinery*, **24**, 267 (1996).