

# 耐摩耗試験に関する研究

塩澤佑一朗・三神武文・三井由香里

## The Abrasion Resistance of Surface Coatings studied by Abrasive-wheel-wear Abrasion Resistance Test

Yuichiro SHIOZAWA, Takefumi MIKAMI and Yukari MITSUI

### 要 約

本報では、日本工業規格（JIS H 8503:1989 および JIS H 8682-1:2013）に基づく表面処理皮膜の往復運動平面摩耗試験において、非平面形状試験片の影響について調べた。表面処理皮膜としては硬質アルマイト、無電解ニッケル-リンめっきおよび硬質クロムめっきを用いた。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ることを確認した。各形状試験片を用いて摩耗試験を行ったところ、硬質アルマイトおよび無電解ニッケル-リンめっきでは円柱試験片の曲率が大きくなるにつれて耐摩耗性が直線的に減少する傾向がみられたが、高い硬度を有する硬質クロムめっきではその傾向がみられなかった。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ることがわかった。

### 1. 緒 言

表面処理皮膜の耐摩耗性を評価するために、日本工業規格（JIS H 8503:1989 または JIS H 8682-1:2013）において往復運動平面摩耗試験が定められている。この試験は、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う方法である。本試験では、平滑な皮膜を有する平面試験片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。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。このような場合、各企業が独自に行う試験となるため技術情報が少ないのが現状である。そこで本研究では、往復運動平面摩耗試験における非平面形状試験片の影響について調べることを目的とした。

### 2. 実験方法

#### 2-1 試験片

アルマイト品については、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）で硬質アルマイトが施され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 に示す。

めっき品については、先に述べた各形状の機械構造用炭素鋼 S45C に硬質クロムめっきまたは無電解ニッケル-リンめっき（8%P）を施したものを試験片とした。めっきは、製品レベルの品質を得るために山梨県内めっき専門業者に委託して行った。

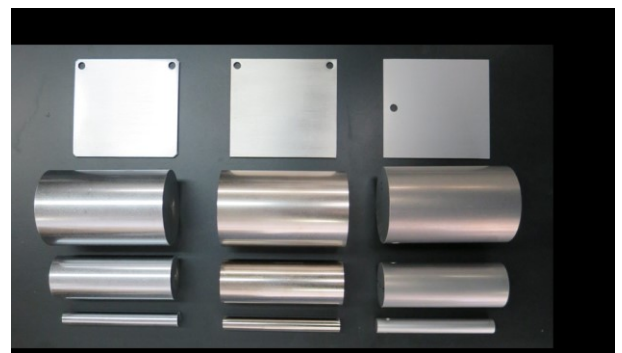


図 1 表面処理を施した各形状試験片

表 1 各形状試験片におけるそれぞれの表面処理皮膜の初期平均皮膜厚さ

| 試験片   | 平均膜厚 (μm) |            |          |
|-------|-----------|------------|----------|
|       | 硬質アルマイト   | 無電解ニッケル-リン | 硬質クロム    |
| 平板    | 18.7±0.8  | 10.5±0.1   | 10.0±0.4 |
| Φ50円柱 | 12.8±0.9  | 7.8±0.1    | 10.1±1.2 |
| Φ30円柱 | 12.1±1.0  | 9.5±0.3    | 12.3±3.9 |
| Φ10円柱 | 7.4±1.1   | 10.5±0.9   | 13.3±2.0 |

各形状試験片におけるそれぞれの表面処理皮膜の初期平均皮膜厚さは後述の膜厚測定方法において見積り、表1にまとめた。

### 2-2 表面処理皮膜の硬さ

表面処理皮膜の硬さは、マイクロピ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、各形状試験片の表面被膜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）を用いて試験片表面を研磨した。このとき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、試験力は最大 0.2 kgf とした。その試験力において、表面処理被膜へのヌープ圧子の侵入深さが膜厚よりも十分小さくなることを確認した。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。

### 2-3 往復運動平面摩擦試験

往復運動平面摩擦試験は、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被膜の耐摩耗試験方法-第1部:往復運動平面摩擦試験を準用して行った。試験に用いた摩擦試験機（スガ試験機株式会社、NUS-ISO3）の外観写真を図2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（ダブルストローク、ds）を行う。本試験では、試験片に施された皮膜の耐摩耗性を求めるために摩擦試験前後の試験片の皮膜厚さまたは質量を測定する。本報では任意の往復運動回数まで摩擦を行い、皮膜厚さを測定してJIS規格に基づいた次式により耐摩耗性を求めた<sup>1)</sup>。

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

ここで、 $WR_w$ は往復運動平面摩擦試験における耐摩耗性（ $ds/\mu m$ ）、 $N$ は往復運動（ダブルストローク: ds）の回数（ds）、 $d_{1t}$ は試験片の初期平均皮膜厚さ（ $\mu m$ ）、 $d_{2t}$ は試験片の試験後平均皮膜厚さ（ $\mu m$ ）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擦ではなくピストン運動などの往復運動における摩擦を想定したため、円柱試験片の平面摩擦は円柱軸方向とした。円柱試験片における摩擦試験では、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。摩擦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。

### 2-4 表面処理皮膜の膜厚測定

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。

各形状試験片におけるめっき膜厚は、蛍光X線分析装置（SIIナノテクノロジー株式会社、SEA1200VX）を用いて測定した。硬質クロムめっきまたは無電解ニッケル-リンめっきの膜厚をファンダメンタル・パラメータ（FP）法により見積もった。蛍光X線分析における各形状試験片の測定範囲は直径1 mmの円とした。

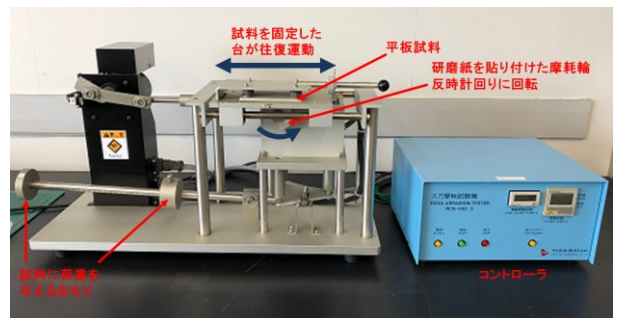


図2 往復運動平面摩擦試験機

## 3. 結果

### 3-1 マイクロピッカース硬さ試験

図3は、各表面処理をした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表面皮膜のヌープ硬さを、マイクロピッカース硬さ試験機を用いて測定した結果である。図3に示すように、硬質アルマイトは~300HK、無電解ニッケル-リンめっきは~550HK、硬質クロムめっきは~1000HKであり、本報で用いた試験片の範囲内では形状が皮膜硬度にほとんど影響しないことを確認した。

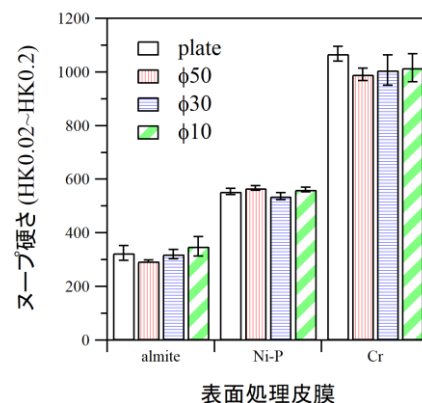


図3 硬質アルマイト、無電解ニッケル-リンめっきおよび硬質クロムめっきを施した各形状試験片（平板および直径50 mm、30 mm、10 mm 円柱）のヌープ硬さ

### 3-2 往復運動平面摩擦試験

表 2 は、各形状試験片における表面処理皮膜の往復運動平面摩擦試験結果である。耐摩耗性は先に述べた JIS 規格に基づく式により求めた<sup>1)</sup>。平板試験片における各表面処理皮膜の結果を比較すると、硬質アルマイトと無電解ニッケル-リンめっきは同様な耐摩耗性 (~30 ds/μm) を示したが、硬質クロムめっきではその 15 倍程度の性能を示した。これは硬質クロム皮膜の高い硬度に由来すると考えられる。平板と円柱試験片を比較すると、直径 50 mm 円柱における硬質アルマイトと無電解ニッケル-リンめっきの耐摩耗性は平板試験片よりも 2.2~2.6 倍小さいのに対して、硬質クロムめっきでは 4.6 倍小さくなっている。また、硬質アルマイトと無電解ニッケル-リンめっきでは円柱の直径が小さくなるにつれて耐摩耗性が徐々に低下する傾向がみられた。これについては後述の考察において述べる。

表 2 各形状試験片における表面処理皮膜の往復運動平面摩擦試験結果

| 試験片   | 耐摩耗性 (ds/μm) |            |          |
|-------|--------------|------------|----------|
|       | 硬質アルマイト      | 無電解ニッケル-リン | 硬質クロム    |
| 平板    | 29.9 ± 1.4   | 28.9 ± 0.3 | 467 ± 4  |
| Φ50円柱 | 13.6 ± 0.7   | 11.0 ± 0.4 | 102 ± 8  |
| Φ30円柱 | 12.1 ± 1.0   | 10.2 ± 0.7 | 138 ± 13 |
| Φ10円柱 | 7.4 ± 1.1    | 8.3 ± 0.9  | 105 ± 14 |

### 3-3 試験片上の摩擦痕

図 4 は、平板および直径 50 mm 円柱試験片の硬質アルマイト皮膜において、摩擦試験を 100 ds 行ったときの試験片上の摩擦痕の写真である。図 4 において、平板試験片では研磨紙の横幅 (12 mm) と同じ幅の摩擦痕が試験片にみられた。この摩擦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擦<sup>2)</sup>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、平板よりも狭い摩擦痕となり、図 4 中に矢印で示した位置に線状に摩擦された痕がみられた。この線状摩擦痕上で膜厚を確認すると周囲よりも深く摩擦されていたことから、円柱試験片におけるアブレシブ摩擦では皮膜や研磨剤 (炭化けい素) に由来する摩擦粉の噛み込みによる摩擦 (スクラッチング) が生じると考えられる<sup>3)</sup>。これは、円柱試験片では往復運動回数が多くなると摩擦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。JIS H 8682-1:2013 では、試験片の膜厚 (0.1 μm 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擦部分においては、皮膜がなくなり露出した素材自体が摩擦されていないことを確認する必要がある。

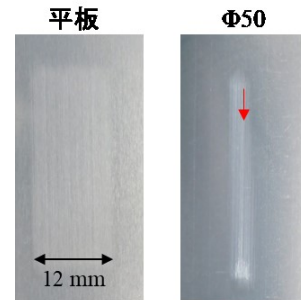


図 4 平板および直径 50 mm 円柱試験片における硬質アルマイト皮膜上の摩擦痕

## 4. 考察

図 5 は、各形状試験片における (a) 硬質アルマイト、(b) 無電解ニッケル-リンおよび (c) 硬質クロム皮膜の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結果である。平板試験片における耐摩耗性は曲率に対してプロットできないため、横軸に平行な点線 (平板) で示している。図 5 (a) 硬質アルマイトの結果から、円柱試験片では平板試験片よりも常に耐摩耗性が低く、曲率が大きくなるにつれて耐摩耗性が直線的に低下する傾向がみられた。この傾向は (b) 無電解ニッケル-リンでもみられた。これは、曲率が大きくなるにつれて研磨紙と円柱試験片の接触面積が小さくなる (押付け力は一定のため、押付け圧力が大きくなる) ためだと考えられる。ヌープ硬さが 550HK 程度より小さい表面処理皮膜では曲率における耐摩耗性の違いが顕著となる。一方で (c) 硬質クロムでは、本報の試験条件および測定誤差の範囲内で、曲率に対して耐摩耗性が相関しなかった。これは硬質クロムが高硬度 (~1000HK) のため、本試験条件における曲率の影響を無視できるためだと考えられる。これらの結果から、550HK 程度よりも十分に大きい表面処理皮膜を施すことで、耐摩耗性に及ぼす曲率の影響を小さくすることができると考えられる。

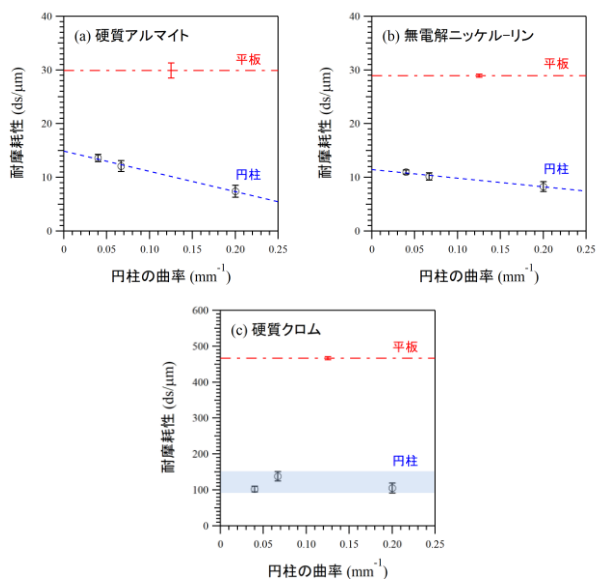


図5 (a) 硬質アルマイト, (b) 無電解ニッケル-リンおよび (c) 硬質クロム皮膜において各形状試験片の膜厚減少の傾きを円柱の曲率 (円柱半径の逆数) に対してプロットした結果

## 5. 結 言

本報では, JIS H 8503:1989 および 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影響について調べた. 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, ヌーブ硬さが 550HK 程度までの表面処理皮膜では曲率が大きくなるにつれて耐摩耗性が直線的に低下する傾向がみられ, 実際の工業製品において表面処理部品の膜厚設計などを行う際に参考となるデータを得た. さらに, 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ることもわかった. このような情報は, 非平面形状試験片を用いた往復運動平面摩耗試験について技術支援を行う際に重要である.

表面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表面処理皮膜を設計することで, 製品不良のトラブルを減らすことにつながる.

## 参考文献

- 1) 日本工業規格: 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性試験方法-第 1 部: 往復運動平面摩耗試験 (2013)
- 2) 長谷亜蘭: 表面技術, vol.65, No.12, pp.556-561 (2014)
- 3) 水本宗男, 宇佐美賢一: ターボ機械, vol.24, No.5, pp.11-17 (1996)