

撥油性 Al 表面の開発に関する研究

A study on the development of oil-repellent aluminum surfaces

都市大・理工（院）*荒川 和志 都市大・理工（院）浅川 知彦 都市大・理工（正）崔 俊豪

Kazushi Arakawa, Tomohiko Asakawa, Junho Choi

Tokyo City University

1. はじめに

近年の温暖化などの環境変化に影響を与えている要因の一つとして、産業革命以来の化石燃料の大量消費による温室効果ガスの排出がある。その対策として温室効果ガスの排出量を全体としてゼロにするというカーボンニュートラルを目指し、内燃機関においては熱効率の向上が求められている。熱効率を向上させるためには排気損失や機械損失といった損失を減らす必要があるが、本研究では、機械損失の中でも大きな割合を占めるすべり軸受による摩擦損失に着目して熱効率の向上を目指す。

すべり軸受による摩擦損失の削減において、境界・混合潤滑領域における摩擦低減技術に関する研究が数多く行われているが、流体潤滑領域における摩擦低減に関する研究は潤滑油の低粘度化や軸受サイズの変更が主となっている。

流体潤滑領域に関する摩擦損失は主に潤滑油のせん断抵抗によって生じるとされているが、上記の潤滑油の低粘度化などもこの潤滑油のせん断抵抗を低減することを目的としている。ここで、潤滑油のせん断抵抗がニュートンの粘性の法則によると、せん断抵抗を τ 、粘度 η 、速度 u_x 、回転方向を x 、軸から軸受への方向を y として

$$\tau = \eta \frac{\partial u_x}{\partial y}$$

と表されることに着目すると、すべり軸受表面と潤滑油の境界面ですべりを生じさせることで、軸-軸受間の速度勾配を軽減し、潤滑油のせん断抵抗を低減することが可能である (Fig.1) [1].

そこで本研究では、流体潤滑領域における潤滑油のせん断抵抗を低減できる撥油性軸受表面を開発することを目的に研究を行う。

撥液性表面とは睡蓮の葉のように液滴をはじく表面のことであり、作成には固体表面の表面エネルギーを低下させることとマイクロスケールの表面構造を付与することの両方が必要である。エンジンオイルなどの表面張力の小さい液体に対しては撥液性を実現することは特に困難であるが、リエントラント構造という内側に窪んだ構造を持たせることが撥液性の発現に有効である[2].

リエントラント構造では、構造の角度 $\theta_{overhang}$ と平滑面での接触角 θ_{flat} が等しくなる点で液体の濡れ広がりが止まり、 $\theta_{overhang}$ が θ_{flat} よりも小さくなることで構造内から液体が押し出される力が働き、撥液性を持つ (Fig.2) [3].

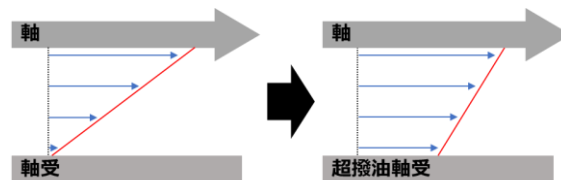


Fig. 1 Schematics of reduced shear resistance

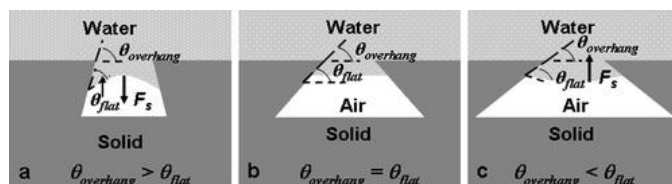


Fig. 2 Liquid-repellent mechanism based on re-entrant structure [3]

2. 実験方法

2.1 軸受 Al 合金表面へのマイクロ表面構造の作製

2.1.1 SF_6+O_2 原料ガス

著者らはバイポーラ型プラズマ利用イオン注入成膜装置を用いてシリコンウェハに対して passivation (保護膜による表面安定化), etching (浸食) を繰り返すことで針状のブラックシリコンを形成し、撥液性表面の開発を行ってきた。エンジン軸受に用いられるアルミニウム合金の表面に同様のプロセスを行うことによりアルミニウム表面へのマイクロ凹凸構造の作製を行った。なお、実験に用いたエンジン軸受は Al の他に Si と Sn をそれぞれ 6% 程度含んでいる。プラズマエッチング条件の詳細を Table 1 に示す。

2.1.2 SF_6+N_2 原料ガス

ガス比率時と同様に passivation 効果のために混入させている O_2 に着目し、酸化アルミニウムのように安定した化合

Table 1 Conditions of plasma etching.

	Ar sputter	Plasma etching	
Precursor gas	Ar+H ₂	SF ₆	O ₂ (or N ₂)
Gas flow (sccm)	10	27	7
Treatment pressure (Pa)	0.6	1.0~2.0	
Treatment time (h)	0.5	6	
Positive pulse voltage (kV)	2.0	2.0	
Negative pulse voltage (kV)	-5.0	-1.5	
Pulse frequency (Hz)	4000		
Pulse width (μs)	5		
Delay (μs)	20		

物である窒化アルミニウム膜を形成する N_2 を O_2 の代わりに用いた。

2.2 PTFE 成膜による表面エネルギーの低下

PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）は化学的安定性や絶縁性能から多くの分野で用いられているフッ素樹脂であり、表面自由エネルギーが小さいことから撥液性の向上が見込める。この PTFE 膜をブラックシリコンのような表面構造の上に真空蒸着法を用いて蒸着することで低表面エネルギーを有する表面を作製した。

2.3 表面構造の評価

形成した表面は数 μm ～数百 nm と非常に微小であるため、主に FE-SEM（電界放射型走査電子顕微鏡）、AFM（原子間力顕微鏡）を用いて観察を行った。また、EDX によって表面構造の元素分析を行った。さらに、接触角計を用いてエンジンオイル（0W-20）に対する撥液性の評価を行った。

3. 実験結果

3.1 Al 合金表面上へのマイクロ凹凸構造の作製

3.1.1 SF_6+O_2 原料ガス

エッチング時のガス圧を変更した軸受 Al 材に対してプラズマエッチングを行った結果を Fig. 3 に示す。Figure 3 の左上から未処理、2Pa、4Pa であり、他の条件は Table 1 と同一である。未処理のものと比較すると、どの表面も元からある線状の凹凸形状が変化し、平滑化され、4Pa に関しては若干の不均一な凹凸構造が形成されたが、マイクロスケールの凹凸構造にはなっていないことがわかる。また、4Pa に変更した表面に関しては一度融解したような形状が得られ、頂上部からは Sn が検出されたことから、処理時の温度が Sn の融点を超えていることがわかる。

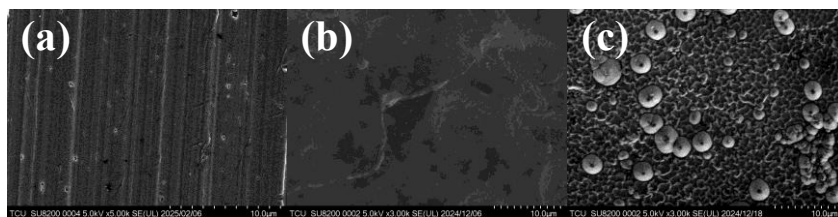


Fig. 3 Comparison of process gas pressure: (a) Untreated, (b) 2Pa, (c) 4Pa

3.1.2 SF_6+N_2 原料ガス

エッチング時のガスを SF_6+N_2 へ変更し、かつ、処理ガス圧を 2Pa、4Pa でエッチングした軸受 Al 材の表面構造を Fig. 4 に示す。なお、他の条件は Table 1 と同一である。Figure 4 の左から 2Pa、4Pa である。2Pa 条件では $\sim 2\mu m$ の凹凸構造が観察されているが目標としている数 μm オーダーの表面構造にはまだ達していないことがわかる。4Pa では、Fig. 3 でみられる Sn が融解して析出した表面構造が全面に観察できる。原料ガスを O_2 から N_2 に変えることで表面構造の形成は進んでいるが、表面温度がより上昇していることが窺える。

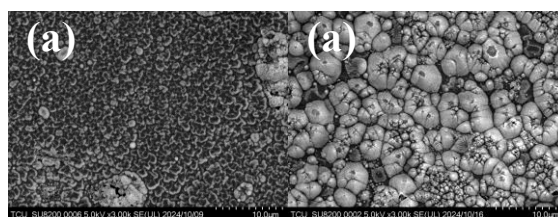


Fig. 4 Plasma etching using SF_6+N_2 raw gas: (a) 2Pa, (b) 4Pa

3.2 接触角

原料ガス SF_6+N_2 を用いて表面上にマイクロ凹凸構造の作製ができた Al 合金材に対し、膜厚約 300nm の PTFE を真空蒸着し、0W-20 のエンジンオイルに対して接触角を測定した結果を Table 2 に示す。超撥液と言われる 150° には届かなかったが、潤滑油に対する撥液性が向上したことがわかる。

Table 2 Contact angles of the liquid repellent Al alloy surfaces.

	Untreated	Plasma etching+PTFE vapor deposition
Precursor gas	-	SF_6+N_2
Treatment pressure (Pa)	-	2
Contact angle ($^\circ$)	10	125

4. おわりに

すべり軸受用 Al 合金材に対して撥油性を得るために、Al 表面にマイクロスケールの凹凸構造を作製するための研究を行った。凹凸構造の作製は、フッ素プラズマエッチングを用いた。Al 材に直接プラズマエッチングを行った結果、 $\sim 1\mu m$ スケールの凹凸構造は生成されたものの、高い撥油性を示すための $3\mu m$ 以上の凹凸構造には達していなかった。また、ガス圧を大きくすることで、凹凸構造の形成は促進されるが、Al 合金材内部の Sn が融解し表面にドーム構造を形成することが分かった以上の結果から、今後、Sn の融解を防ぐために $200^\circ C$ の以下の低温プロセスによる新しい凹凸構造の作製手法を考案する必要がある。

文献

- 1) M. Koushima : A Study of Engine Bearings Friction Loss Reduction Under Hydrodynamic Lubrication Conditions, SAE International, 2022-01-0324(2022).
- 2) A. Tuteja et al. : Designing superoleophobic surfaces, Science, 318, 5856 (2007) 1618–1622.
- 3) L. Cao, H. A. Hu, and D. Gao : Design and fabrication of micro-textures for inducing a superhydrophobic behavior on hydrophilic materials, Langmuir, 23, 8 (2007) 4310–4314.