

表面電位制御によるイオン液体の摩擦挙動操作

Operation of Friction Behavior of Ionic Liquids by Controlling Surface Potential

東理大・院（学）*丹治 隼輔 関西大・理工（正）川田 将平

東理大・工（正）宮武 正明 東理大・工（正）佐々木 信也

Shunsuke Tanji*, Shouhei Kawada**, Masaaki Miyatake*, Shinya Sasaki*

*Tokyo University of Science, **Kansai University

1. 緒言

境界潤滑領域下における摩擦においては、摩擦表面に吸着する潤滑油由来分子が潤滑特性に大きく影響することが知られている¹⁾。そのため、吸着膜の分子種や配向、膜厚を制御できれば、マクロな摩擦を能動的に操作できると考えられる。本研究においては、この摩擦操作を確立するため、イオン液体を利用した潤滑システムに注目した。イオン液体の物理的特徴として、低蒸気圧、熱安定性、高導電率、広い電位窓などが挙げられるが²⁾、特にファンデルワールス力、クーロン力の影響で、固液界面に電気二重層を形成する³⁾特徴を持つことから、新規潤滑剤として期待されている⁴⁾。固液界面におけるイオン液体の吸着構造は、固体材料の表面電位に大きく依存する⁵⁾ため、表面電位を制御することでマクロな摩擦挙動の操作が可能であると考えられる。先行研究では、低面圧下において、表面電位の正負により摩擦係数を変化させることに成功した。これは、吸着するイオン種が変化したことによると考えられる。一方で、摩擦係数が変動する時間応答性が低い欠点がある⁶⁾。本研究では、能動的な摩擦制御システムを構築するため、摩擦表面の電位制御を行うことで高面圧下における摩擦係数の挙動操作を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験材料

使用したイオン液体の名称および略称と導電率をTable 1に示す。カチオンのアルキル鎖長、導電率による摩擦挙動への影響を比較した。これらのイオン液体はIoLiTec社（ドイツ）製である。

しゅう動試験片には、SUJ2軸受鋼のディスク（ $\phi = 24\text{ mm} \times t = 7.9\text{ mm}$ ）とボール（10 mm）を使用し、両試験片間の電食・通電を防止するため、ディスク試験片にはダイヤモンドライカーボン（a-C:H膜）をコーティングした。

Table 1 Chemical names, abbreviations and conductivity of the used ionic liquids

Chemical name	Abbreviation	Conductivity [mS/cm]
1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate	[BMIM][PF ₆]	1.37
1-Hexyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate	[HMIM][PF ₆]	0.80
1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate	[BMIM][BF ₄]	3.15
1-Hexyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate	[HMIM][BF ₄]	1.18
1-Methyl-3-octylimidazolium tetrafluoroborate	[OMIM][BF ₄]	1.27
1-Butyl-3-methylimidazolium tricyanomethanide	[BMIM][TCC]	8.83

2.2 実験条件

摩擦挙動は、Fig.1に示すボールオンディスク型摩擦試験機により評価した。表面電位の制御方法として、BAS社製の電気化学アナライザー1200Cを用いた。ディスク試験片に作用電極を接続し、対極、参照電極として白金線をイオン液体中に挿入している。実験条件は、荷重0.6 N（ヘルツの接触圧390 MPa）、しゅう動速度3.1 mm/sで行った。印加した電位は各イオン液体が電気分解しない電位窓内の電圧とした。

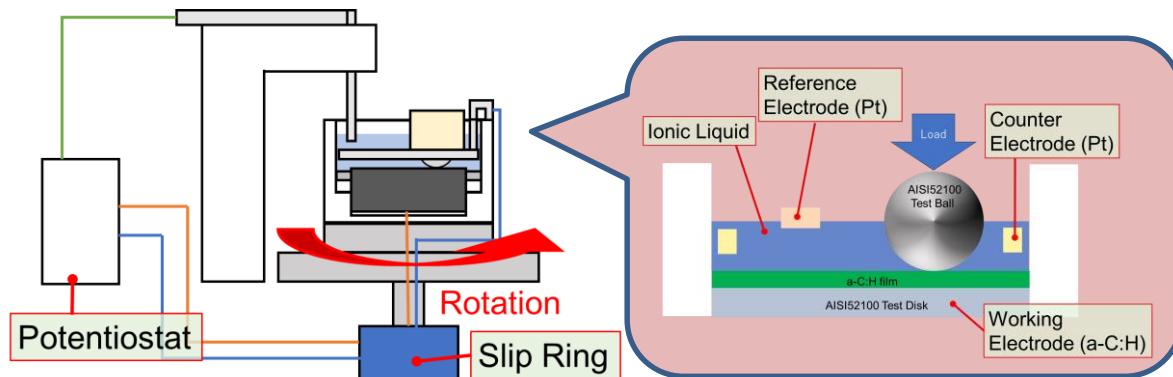


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

3. 実験結果および考察

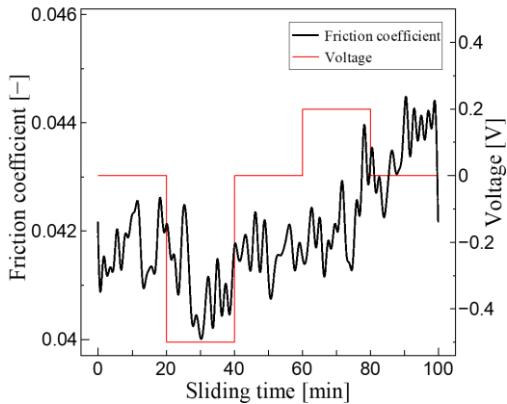


Fig. 2 The result of [BMIM][PF₆]

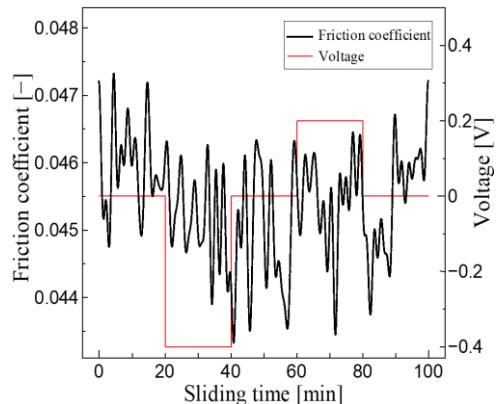


Fig. 3 The result of [HMIM][PF₆]

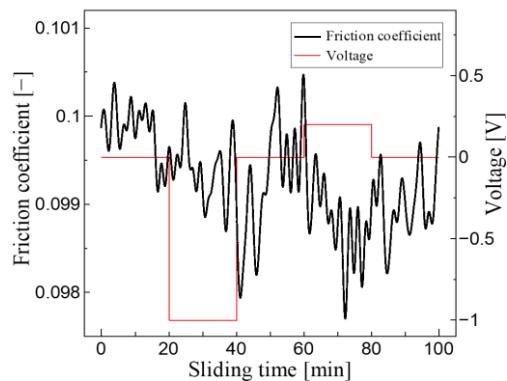


Fig. 4 The result of [BMIM][BF₄]

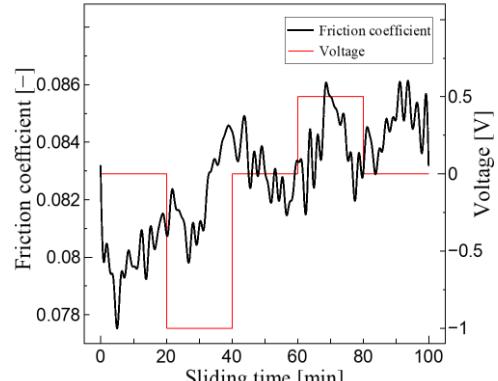


Fig. 5 The result of [HMIM][BF₄]

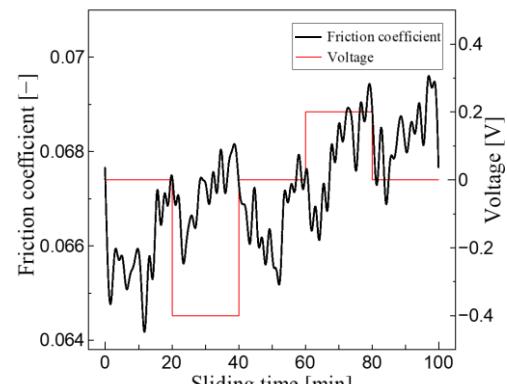


Fig. 6 The result of [OMIM][BF₄]

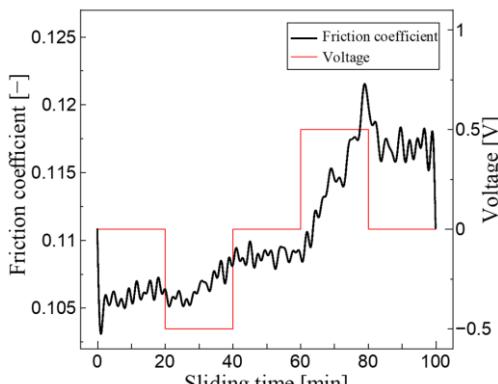


Fig. 7 The result of [BMIM][TCC]

Figure 2～7 に各イオン液体への印加電圧およびそれに伴う摩擦係数の挙動を示す。

[BMIM][PF₆] と [HMIM][PF₆] を用いた場合において、負電圧印加時に 0.002 程度の摩擦係数の減少が確認された。[BMIM][BF₄]においても、負電圧印加開始後 10 分のあたりで 0.001 ほどの摩擦減少が見られる。一方で、[HMIM][BF₄]、[OMIM][BF₄]、[BMIM][TCC] では、負電圧を印加すると摩擦係数の上昇が確認された。

正電圧印加時においては、[BMIM][BF₄]の摩擦係数はほとんど変化しなかったが、それ以外のイオン液体においては、摩擦係数の上昇が確認された。特に、[BMIM][TCC]においては、0.01 以上の摩擦係数上昇が確認された。

これらの結果から、[BMIM][TCC]が最も顕著な摩擦係数の変化を示した。[BMIM][TCC]は今回試験を行ったイオン液体の中で最も導電率が高く、イオン液体中のイオンが動きやすいため、吸着したイオンの交換が起きやすく摩擦係数の変化をもたらしたと考えられる。したがって、マクロスケールでの電圧印加による摩擦制御にはイオン液体の導電率が重要な要素であると考えられる。また、他のイオン液体に関しては正電圧をかけた際に摩擦係数が上昇傾向を示すことから、アニオン由来の吸着膜よりもカチオン由来の吸着膜の方が摩擦低減効果を発揮すると考えられる。一方で、電圧印加以前の摩擦係数の違いはあるものの、アルキル鎖長の差による電圧印加時の摩擦挙動の違いは見られ

なかった。また、同じカチオンを有している[BMIM][BF₄], [BMIM][PF₆], [BMIM][TCC]の負電圧印加時の摩擦係数はそれぞれ、0.040, 0.099, 0.105付近であり、一致していない。この原因として二つ考えられる。一つ目は、イオン液体による吸着膜において、カチオンのアルキル鎖による立体的な障害により吸着膜形成に影響を及ぼし⁷⁾、摩擦係数の変化が見られなかつことが挙げられる。二つ目としては、拡散二重層の部分がイオン液体毎に異なっており、摩擦係数に影響を及ぼしたと考えられる。今後は、分光法や原子間力顕微鏡などを利用することで、イオン液体の電気二重層を観察する必要がある。

4. 結言

本研究では、摩擦表面の電位を制御することでイオン液体の摩擦係数の操作を試みた。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 高面圧下において、イオン液体を潤滑剤として用い、摩擦表面に電位差を与えることで摩擦係数を変化させることが可能である。
- (2) 高い導電率を持つイオン液体が摩擦係数制御に適していると考えられる。
- (3) アニオン由来の吸着膜よりもカチオン由来の吸着膜の方が摩擦低減効果を発揮すると考えられる。

文献

- 1) I. M. Hutchings.: Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, CRC Press, (1992).
- 2) H. Kamimura., et al.: Effect and Mechanism of Additives for Ionic Liquids as New Lubricants, Tribology International, 40, 4, (2007), 620-625
- 3) R. Hayes, et al.: At the interface: solvation and designing ionic liquids, Phys. Chem. Chem.Phys. 12, 1709 (2010)
- 4) F. Zhou, et al.: Ionic Liquid Lubricants: Designed Chemistry for Engineering Applications, Chemical Society Reviews, 38, 9, (2009), pp. 2590-2599.
- 5) Hayes, R., et al.: Double Layer Structure of Ionic Liquids at the Au (111) Electrode Interface: An Atomic a Force Microscopy Investigation, The Journal of Physical Chemistry C, 115, 14, (2011), pp. 6855-6863.
- 6) S. Kawada, et al.: Friction Control by Applying Electric Potential under Lubrication with Ionic Liquids, Tribology Online, 14, 2, (2019), pp. 71-77.
- 7) J. Sweeney, et al.: Control of Nanoscale Friction on Gold in an Ionic Liquid by a Potential-Dependent Ionic Lubricant Layer, Physical Review Letters, 109, 155502 (2012)