新規潤滑剤としてのイオン液体

近藤ゆりこ^{*1}・小山 貴大^{*1}・佐々木信也^{*1}

Ionic Liquids as Novel Lubricants

Yuriko KONDOU^{*1}, Takahiro KOYAMA^{*1} and Shinya SASAKI^{*1}

^{*1}Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

(Received May 28, 2012, Accepted August 4, 2012)

Ionic liquids are expected to be used as advanced lubricants because of their low volatility, high thermal stability, and high oxidation stability. It is well known that halogen-containing ionic liquids exhibit excellent lubricity for metals. On the other hand, there is concern about the corrosiveness of ionic liquids caused by tribo-chemical reactions. Formation of the metal-fluoride boundary layer reduced friction; however, corrosion occurred on the worn surfaces after the sliding. In order to apply the ionic liquids as lubricants, it is necessary to prevent the corrosiveness. It is an effective method to control the sliding atmosphere such as in vacuum, because the hydrofluoric acid, which is produced by the reaction between metal fluoride and contaminating water from the atmosphere, causes the corrosion. The phosphorus element in the halogen-containing ionic liquids composed of a phosphate anion or phosphonium cation also inhibits the corrosion. The halogen-free ionic liquids do not cause any remarkable corrosion, though they show inferior lubricity compared with the halogen-containing ionic liquids. It is one of the important solutions to find the best combination of the halogen-free ionic liquid and the sliding material. The lubricity of ionic liquids shows domination in vacuum. Especially, the superior performance is possessed as a space lubricant compared with the conventional lubricants. The view in the future as the lubricant fluids is introduced with the basic tribological properties of the ionic liquids.

1. はじめに

イオン液体はアニオンとカチオンからなる液体の塩で、1992年に H. S. Wilkes¹⁾によって空気中で安定かつ低融点のものが合成されて以来、基礎的な研究に加えて応用に向けての技術開発も活発に行われている。トライボロジーの分野でも潤滑剤としての利用が注目され、2001年に W. Liu ら²⁾による研究成果が発表されて以降、関連する論文等³⁻²⁸⁾は年々増加の傾向にある。潤滑剤として見たイオン液体の特徴は、蒸気圧が極めて低く熱安定性が高いこと、またイオン伝導度が高いことなどが挙げられよう。このような特徴からイオン液体は、高温⁷⁻⁹⁾や真空¹⁰⁻¹²⁾など従来の潤滑油では使用に限界がある極限環境下での新たな潤滑剤として、その応用に大きな期待が寄せられている²⁹⁻³⁷⁾。

潤滑剤は様々な摺動条件下での使用が余儀なくされるため、用途に合ったイオン液体を選ぶ必要がある。イオン液体は別名デザイナー液体と呼ばれるように、多種からなるアニオンとカチオンの組み合わせにより多様な特性の発現が可能であるとされる。そのため、選択肢の多さも魅力の1つであり、潤滑剤としてイオン液体に求める特性を明らかにすることが重要となっている。しかし、潤滑メカニズムには依然として未解明な点も多く、選択にあたっては試行錯誤的なアプローチが免れないのが現状である。

本稿では、潤滑剤の視点からイオン液体の基本特性に関する優位性および問題点を紹介するとともに、真空用潤滑剤への適用を中心に今後の展望について述べる。

2. 潤滑剤としてのイオン液体

2.1 潤滑剤に必要とされる性質

一般に摩擦係数は潤滑剤を用いない乾燥潤滑下でもっとも高い値を示す。潤滑剤の役割は、このような摩擦を制御するとともに、表面損傷を抑制することにある。トライボロジー分野で用いられるストライベック線図³⁸⁾を Fig. 1 に示す。この図は、横軸を軸受特性数（流体の粘度 η × 摩擦速度 V / 平均面圧 P ）、縦軸を摩擦係数とし、摩擦面における潤滑状態の遷移を表現するものである。潤滑下では軸受特性数の増加によって、境界潤滑、混合潤滑、そして流体潤滑へと遷移する。乾燥摩擦では、真実接触部において相対する固体表面が直接接触・凝着するため、凝着部分のせん断抵抗によって高い摩擦力が生じる。境界潤滑では、真実接触部に介在する

Fig. 1 Schematic of the stribeck curve; the friction coefficient as a function of the lubrication parameter: $\eta V/P$. In this formula, η is the fluid viscosity, V is the relative speed of the surfaces, and P is the load on the interface per unit bearing width.

^{*1} 東京理科大学工学部機械工学科（〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1）

吸着膜もしくは化学反応膜が固体間の凝着を抑制しせん断抵抗を弱めるため、乾燥摩擦に比べて摩擦係数は減少する。混合潤滑では、せん断抵抗の小さい流体膜が荷重の一部を負担するため、真実接触面積の減少に伴って摩擦係数はさらに低下する。流体膜が荷重すべてを負担することで真実接触部が消滅する流体潤滑では、摩擦力は流体の粘性抵抗のみによって発生するため、摩擦係数は最小値を示す。しかし、さらに流体の粘度や摩擦速度が増して軸受特性数が大きくなると、粘性抵抗の増加によって摩擦係数は上昇する。

イオン液体の多くは室温付近で液体状態であるため、そのまま潤滑油基油として用いることが可能であるが、潤滑油添加剤^{4,5,16,22)}や増ちょう剤と混ぜたグリース³⁹⁾としての利用なども検討されている。イオン液体に求められる特性は、潤滑状態によって異なる。具体的には、境界潤滑や混合潤滑状態では、真実接触部での凝着を抑制するため、摩擦表面に強固な吸着・反応膜を形成することが必要とされる。一方の流体潤滑状態では、高面圧・低速度域でも荷重負担可能な十分な膜厚の油膜を形成するため、粘度特性が重要な因子となる。ただし、過剰な表面反応は摩耗増加や腐食の原因となり、高い粘度は摩擦抵抗の増加をもたらすことになるため、常に潤滑性能とのバランスを考慮する必要がある。

2.2 イオン液体の流体潤滑性能

摩擦の低減と摺動面の損傷抑制を考えれば、固体接触のない流体潤滑状態での摩擦が望まれる。流体潤滑状態の場合、

潤滑油の特性で重要な役割を担うのは粘度である。イオン液体は室温で液体状態であっても、構成するアニオンとカチオンの組み合わせにより粘度特性は大きく異なり、水程度のものから水あめのようなものまで粘度の幅は広い。液体の粘度は温度上昇に伴って低下するが、イオン液体も例外ではない。潤滑油の場合、温度と粘度との関係を粘度指数 (Viscosity Index, VI) という指標を用いて表わし、一般にこの値が大きいほど粘度変化が少ないとして好まれる。イオン液体の VI は、潤滑油基油として一般的な鉱油や合成油 (poly- α -olefin, PAO) に比べて **Table 1** に示すように高い値を有している。同じカチオンから成る2種類のイオン液体 ([BMIM] [TFSI] と [BMIM] [PF6]) を混合して温度-粘度特性を測定したところ、**Fig. 2** に示すようにそれぞれの粘度はイオン液体の混合割合に応じて変化することが確認された⁴⁰⁾。このことは、複数種のイオン液体を組み合わせることにより、任意の粘度特性を持つイオン液体の調整が可能であることを示唆している。イオン液体は蒸気圧が低く熱安定性にも優れることから、特に高温や真空等の特殊環境下において流体潤滑状態で使用される、動圧・静圧すべり軸受等への適用が検討されている⁴¹⁾。

弾性流体潤滑 (Elastohydrodynamic lubrication, EHL) 状態で使用される転がり軸受や歯車などの潤滑油やグリースの場合、潤滑性能を支配する重要な物性は、数 GPa に至る高圧下での粘性である。大野ら^{42,43)}はメチルイミダゾール系

Table 1 Viscosity properties of ionic liquids and base oils.

Ionic liquids & Base oils	Kinematic viscosity [mm ² /s]		Viscosity Index VI
	40°C	100°C	
[PP13] [TFSI]* ¹ 	52.5	10.0	181
[P(h3)t] [TFSI]* ² 	118	15.4	137
[BMIM][BF4]* ³ 	44.5	9.01	189
[BMIM][PF6]* ⁴ 	81.0	13.6	172
[BMIM][TFSI]* ⁵ 	29.0	6.88	211
[BMIM][I]* ⁶ 	203	21.0	122
[EMIM][DCN]* ⁷ 	8.6	3.01	252
[BMIM][TCC]* ⁸ 	14.6	3.70	146
Synthetic oil (PAO 4)	16.8	3.90	129
Synthetic oil (PAO 6)	30.5	5.79	135
Mineral base oil	30.1	5.28	106

*1: N-Methyl-N-propylpiperidinium bis (trifluoromethanesulfonyl) imide

*2: Trihexyl (tetradecyl) phosphonium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide

*3: 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate

*4: 1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate

*5: 1-Butyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethanesulfonyl) imide

*6: 1-Butyl-3-methylimidazolium iodide

*7: 1-Ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide

*8: 1-Butyl-3-methylimidazolium tricyanomethane

Fig. 2 Viscosity property of mixed ionic liquids as a function of temperature.

イオン液体の高圧粘性を測定し、高圧下で分子性結晶を晶出するなどその挙動が液晶と類似していることを報告している。イオン液体の高圧粘度指数などの物性については、今後のデータ蓄積が待たれるところであるが、EHL潤滑下において支障をきたすような挙動⁴⁴⁾は報告されていない。

2.3 イオン液体の境界潤滑性能

イオン液体のトライボロジー特性に関する研究報告のほとんどは、境界潤滑性能に関するものである。これまでに潤滑特性が報告されているイオン液体としては、カチオンにイミダゾリウム誘導体を、アニオンにテトラフルオロボレート [BF₄] やヘキサフルオロホスフェート [PF₆]、ビス(トリフルオロメチルサルホニル)イミド [TFSI] などハロゲン元素のフッ素を含んだものが多数を占めている。Fig. 3に、各イオン液体の潤滑性能を調べた結果⁴⁵⁾を示す。摩擦材料にはボールとディスクともに軸受鋼 (AISI 52100) を用い、摩擦条件は摩擦温度50°C、荷重50 N、往復周波数50 Hz、振幅1 mm、摩擦時間60分とした。[BMIM][TCC]と[EMIM][DCN]の2種類は、ハロゲンを含まないイオン液体である。これらに対し、ハロゲン含有イオン液体は摩擦・摩耗ともに小さく、良好な境界潤滑性を示している。ハロゲン含有イオン液体で潤滑した摩擦面には、トライボケミカル反応によって金属フッ化物が形成され、この反応膜が境界潤滑膜として作用することにより、良好な潤滑性が発揮され则认为られている^{2,4,8,11)}。

一方で、フッ素などのハロゲン含有イオン液体は、摺動材料の鉄鋼^{16-22,46-48)}、アルミ合金^{17,21,22,46)}、ブロンズ^{46,47)}やチタン合金⁹⁾に対して腐食を引き起こすことも知られている。腐食の原因は、イオン液体の分解によりフッ化水素が発生するためとされ、この反応にはイオン液体に不純物として含まれる水が大きく関与すると言われている²¹⁾。イオン液体の分解と腐食反応は、静的な環境下でも起こるが、摩擦環境下ではより顕著に現れる。これは、摩擦によって攪拌されるイオン液体には周囲雰囲気より水が混入し易くなること、さら

Fig. 3 Lubricity of each ionic liquid for steel/steel sliding.

Fig. 4 Progress of corrosion on disk specimen after sliding test with [PP13][TFSI] at 50°C in air: (a) 0.1 h, (b) 1.0 h, (c) 8.0 h, (d) 24 h.

にトライボケミカル反応によって摩擦面に形成された金属フッ化物が、水と反応してフッ化水素を発生するためと考えられている。そのため、摩擦後においても腐食は進行する。潤滑油に疎水性イオン液体 [PP13][TFSI] を用い、軸受鋼のボールとディスクを相対湿度50%の大気中で往復摺動した後の摩擦面の変化の様子⁴⁸⁾を Fig. 4に示す。摩擦試験直後には顕著な腐食は見られなかったが、そのまま大気中に24時間放置すると、イオン液体が触れた部分全体に腐食による変色が観察された。SEM-EDX分析の結果、形成されたピット状の腐食痕表面には、フッ素と酸素を多く含む腐食生成物の沈着が確認された⁴⁸⁾。尚、軸受鋼表面に [PP13][TFSI] を塗布しただけでは、一週間空气中に放置した後でも腐食の発生は確認できなかったことから、摩擦がイオン液体の分解と腐食反応を促進したものと考えられる。

2.4 イオン液体の腐食対策

ハロゲン含有イオン液体は境界潤滑性能に優れるものの、同時に腐食性を発現することがある。この腐食を防止するには、次の3つの対策が考えられる。

2.4.1 雰囲気制御

腐食性の発現には、コンタミネーションとしての水が大きく関与していることから、不純物濃度が低い疎水性のイオン液体を水が混入し難い環境下で使用すれば、腐食反応を抑制することが可能である。Fig. 5 に疎水性ハロゲン含有イオン液体 [PP13] [TFSI] の大気中および乾燥窒素中における摩擦・摩耗特性⁴⁸⁾を示す。乾燥窒素雰囲気中では200℃でも摩擦係数は低く安定しており、摩耗も大気中に比べて小さい値を示した。また、乾燥窒素雰囲気中で摩擦した試験片では、Fig. 6 に示すように摩擦試験後に大気中に放置しても腐食の進行は観察されなかった。このことから、例えば真空中のように水混入がほとんど起きない環境下では、腐食は進行し難いものと考えられる。

2.4.2 フッ化金属生成反応の抑制

腐食の原因であるハロゲン化水素の発生を抑制するためには、ハロゲンと金属の過剰な反応を防ぐ保護膜を摩擦表面に形成させる方法が考えられる。Fig. 3 において、カチオンが同じでアニオンにリンの有無の違いがある [BMIM] [PF6] と [BMIM] [BF4]、アニオンが同じでカチオンにリンの有無の違いがある [PP13] [TFSI] と [P(h3)3] [TFSI] をそれぞれ比較すると、摩擦係数についてはリンを含むイオン

Fig. 5 Comparison of friction and wear behavior of [PP13][TFSI] in air and in dry-nitrogen atmosphere.

Fig. 6 Optical micro-images of worn disk surfaces under lubrication with [PP13][TFSI] in air ((a), (b)) and dry-nitrogen ((c), (d)). (a) after 0.1 h, (b) after 24 h, (c) after 0.1 h and (d) after 24 h.

液体の方が若干高めの値を示すものの、摩耗についてはリンを含む方が大幅に低減していることが判る。これはイオン液体に含まれるリンが、摩擦表面と反応して耐摩耗性に優れたリン酸化合物膜を形成する^{19,23-25)}とともに、この反応膜がフッ化水素発生の原因となるフッ化金属の形成を抑制したためと推察される。なお、リンを含むイオン液体を潤滑油として用いた場合、摩擦後に大気中に放置した試験片における腐食の進行は確認できなかったことから、抑制効果は摩擦後も機能していると考えられる。

2.4.3 ハロゲンフリーイオン液体

ハロゲンに起因した腐食反応を完全に排除するためには、ハロゲンフリーイオン液体を選択すべきであるが、Fig. 3 に示したようにその境界潤滑性能はハロゲン含有イオン液体に比べて大きく劣る。ただし、ハロゲンフリーイオン液体であっても、[BMIM][TCC] と [EMIM][BCN] を比較すると、アニオンの違いによって潤滑性に差があることから、ハロゲン化金属膜の形成に依ることなく、ハロゲンフリーイオン液体による境界潤滑性の発現が可能であると考えている⁴⁹⁾。

Fig. 7 に、各種耐摩耗性材料に対するハロゲンフリーイオン液体の境界潤滑性⁵⁰⁾を示す。ここで用いた2種類のハロゲンフリーイオン液体の潤滑性能は摺動材料によって優劣が異なるが、例えば水素フリーダイヤモンドライクカーボン(H-free DLC)と[EMIM][DCN]の組み合わせのように、優れた潤滑性を示す組み合わせも見出されている。ハロゲンフリーイオン液体による潤滑メカニズムの詳細は今後の課題であるが、適切な摺動材料との組み合わせを選択することにより、ハロゲンフリーイオン液体の適用範囲は広がるものと期待される。

Fig. 7 Friction and wear properties of hard-coatings and sintered-ceramics under lubrication with [EMIM][DCN] and [BMIM][TCC].

3. 真空用潤滑剤としての応用

3.1 真空中での潤滑性

真空中、特に宇宙用機器においては、厳しい温度環境に曝されるため、低蒸気圧で温度安定性のある潤滑剤が求められている^{39,44,51}。現在、宇宙用液体潤滑剤には低蒸気圧のPFPE (Perfluoropolyether) やMAC (Multiply-Alkylated Cyclopentane)、あるいはこれらを基油とするグリースが用いられている。これら潤滑油の利用に当たっては、極圧剤等の添加により潤滑性が向上することが知られているが、添加剤の蒸発や基油の永久粘度低下⁴⁴など解決すべき課題も多く残されている。これに対してイオン液体は、無添加基油の比較においてPFPEやMACに比べ優れた潤滑性を示すことが報告されている⁵。また、グリースでの比較においても、PFPEやMAC系に比べイオン液体系グリースは、真空中で優れた境界潤滑特性を示すとの報告がある^{39,51}。さらに、宇宙での利用を想定した放射線に対する評価においても、十分な耐放射線性を持つことが確認されている³⁹。

一方で、産業用真空機器においては、大気解放が余儀なくされる摺動面も多く存在する。そのため、ハロゲン含有イオン液体の使用に際しては、先に述べた腐食の問題に十分な注意を払う必要がある。なお、大気暴露中における防錆という点では、吸着被膜型の錆止め剤が有効であるとの報告³⁹もあるが、これはあくまでも静的条件下での結果であって、摺動を伴う場合についてはその効果は不明である。

3.2 アウトガスの発生

真空中でのアウトガスについては、発生条件ならびにガス種・量の許容範囲は真空の利用目的などによって異なる。宇宙機器材料の場合、アウトガスの測定 (ASTM E595-93) は、試料とコレクタプレートを真空度 7×10^{-3} Pa 以下、試料温度 125°C 、コレクタプレート温度 25°C で24時間保持し、試験前後の質量変化よりTML (Total Mass Loss) を損失質量比、CVC (Collected Volatile Condensable Materials) をコレクタプレートの再凝着物質比として算出する⁵²。羽山ら³⁹は開発したイオン液体基油グリースの評価を行い、TMLとCVCがそれぞれ1.0%以下と0.1%以下となり、NASA推奨値を満たすことを確認している。また、摩擦中に発生するアウトガスの量についても、イオン液体はPFPEやMACに比べ少ないことが報告されている⁵¹。宇宙機器用潤滑剤として見た場合、イオン液体のアウトガス特性は優れていると言える。

一方で、一部の半導体プロセスのように、僅かなアウトガスによる汚染でも嫌われるような場合には、イオン液体ならびに摺動材料の選択には注意が必要である。Fig. 8にN,N,N-Trimethyl-N-propylammonium bis (trifluoromethanesulfonyl) imide (TMPA TFSI) を潤滑剤として、SiCピンとチタンディスクならびに鉄ディスクを真空中で摩擦した際に分圧変化の様子¹¹)を示す。鉄を摩擦した場合は、 $m/e=30$ と58において僅かな分圧上昇が確認されただけであるが、チタンの場合には摩擦に伴って $m/e=15, 30, 58, 86$ の分圧に明らかな上昇が確認された。アルミの摩擦においても、チタンと同様にアウトガスの発生が確認された。金属摩擦面には

Fig. 8 Partial pressure changes of generated gas species from ionic liquid during sliding under vacuum condition. (a) Titanium disk, (b) Steel disk.

イオン液体とのトライボケミカル反応によってフッ化金属が形成されるが、この際にイオン液体の一部の分解物がアウトガスとなって真空中に放出されるものと考えられる。摩擦に伴うアウトガスの発生を抑えるためには、DLCのような化学活性の低い摺動面との組み合わせが有効である⁵³。

4. おわりに

イオン液体は、これまでの潤滑油にはない様々な優れた特性を有しており、これらの特徴を生かした新しい潤滑システムの構築に期待が寄せられている。しかしながら、イオン液体が広く実用化に至るまでには、分解・腐食といったイオン液体そのものの安定性・耐久性に係わる問題や、摺動材料との組み合わせを最適化するための指針作りなど、克服しなければならない課題も多く残されている。ただし、これらの根本的なところは、イオン液体特有の問題というよりは、トライボロジーの基礎メカニズムの解明そのものに帰着されるものである。そのため最近では、潤滑油添加剤の作用メカニズム解明のためのモデル化合物として、イオン液体を活用する試みも始まっている。このような基礎的な潤滑メカニズムの解明を通し、イオン液体の潤滑剤への実用化に道が拓かれることを期待したい。

〔文 献〕

- 1) J. S. Wilkes and M. J. Zaworokto: Journal of the Chemical Society, **13** (1992) 965.

- 2) C. Ye, W. Liu, Y. Chen and L. Yu: Chem. Commun., (2001) 2244.
- 3) W. Liu, C. Ye, Q. Gong, H. Wang and P. Wang: Tribol. Lett., **13** (2002) 81.
- 4) H. Kamimura, T. Kubo, I. Minami and S. Mori: Tribol. Int., **40** (2007) 620.
- 5) B. Yu, F. Zhou, C. J. Pang, B. Wang, Y. M. Liang and W. M. Liu: Tribol. Int., **41** (2008) 797.
- 6) N. Coerr, I. C. Gebeshuber, D. Holzer, H. D. Wanzenboeck, A. Ecker, A. Pauschitz and F. Granek: Journal of Microengineering and Nanoelectronics, **1** (2010) 29.
- 7) N. Canter: Tribol. Lubric. Tech., **63** (2007) 12.
- 8) B. S. Phillips, G. John and J. S. Zabinski: Tribol. Lett., **26** (2007) 85.
- 9) A. E. Jimenez and M. D. Bermudez: Tribol. Lett., **37** (2010) 431.
- 10) A. Suzuki, Y. Shinka and M. Masuko: Tribol. Lett., **24** (2007) 307.
- 11) T. Yagi, S. Sasaki, H. Mano, K. Miyake, M. Nakano and T. Ishida: Proc. IME J: J Eng. Tribol., **223** (2009) 1083.
- 12) 飯島 茂, 益子正文, 鈴木章仁, 野木 高, 小原新吾: トライボロジスト, **56** (2011) 320.
- 13) H. Kamimura, T. Chiba, N. Watanabe, T. Kubo, H. Nanao, I. Minami and S. Mori: Tribol. Online, **1** (2006) 40.
- 14) Y. Xia, S. Sasaki, T. Murakami, M. Nakano, L. Shi and H. Wang: Wear, **262** (2007) 765.
- 15) Q. Lu, H. Wang, C. Ye, W. Liu and Q. Xue: Tribol. Int., **37** (2004) 547.
- 16) J. Qu, J. J. Truhan and S. Dai: Tribol. Lett., **22** (2006) 207.
- 17) J. Qu: Wear, **267** (2009) 1226.
- 18) X. Liu and F. Zhou: Tribol. Lett., **23** (2006) 191.
- 19) L. Zhang, D. Feng and B. Xu: Tribol. Lett., **34** (2009) 95.
- 20) Z. Zhao, Y. W. Shao, T. M. Wang, D. P. Feng and W. M. Liu: Corrosion Eng. Sci. Tech., **46** (2011) 330.
- 21) M. D. Bermudez, A. E. Jimenez and G. Martinez-Nicolas: Appl. Surf. Sci., **253** (2007) 7295.
- 22) A. E. Jimenez, M. D. Bermudez, F. J. Carrion and G. Martinez-Nicolas: Wear, **261** (2006) 347.
- 23) I. Minami, T. Inada, R. Sasaki and H. Nanao: Tribol. Lett., **40** (2010) 225.
- 24) M. F. Fox and M. Priest: Proc. IME J: J. Eng. Tribol., **222** (2008) 291.
- 25) I. Minami, M. Kita, T. Kubo, H. Nanao and S. Mori: Tribol. Lett., **30** (2008) 215.
- 26) F. U. Shah, S. Glavatskih, D. R. MacFarlane, A. Somers, M. M. Forsyth and O. N. Antzutkin: Phys. Chem. Chem. Phys., **13** (2011) 12865.
- 27) S. H. Choa, K. C. Ludema, G. E. Potter, B. M. DeKoven, T. A. Morgan and K. K. Kar: Tribol. Trans., **38** (1995) 757.
- 28) J. Zhu, R. Chu and X. Meng: Lubric. Sci., **21** (2009) 103.
- 29) M. D. Bermudez, A. E. Jiménez, J. Sanes and F. J. Carrion: Molecules, **14** (2009) 2888.
- 30) F. Zhou, Y. Liang and W. Liu: Chem. Soc. Rev., **38** (2009) 2590.
- 31) I. Minami: Molecules, **14** (2009) 2286.
- 32) M. Palacio and B. Bhushan: Tribol. Lett., **40** (2010) 247.
- 33) E. Schlücker and P. Waserscheid: Chem. Ing. Tech., **83** (2011) 1476.
- 34) 森 誠之: イオン液体Ⅱ, 大野弘幸監修(シーエムシー出版, 東京, 2005) 277.
- 35) 森 誠之: 表面技術, **60** (2009) 502.
- 36) 南 一郎, 森 誠之: 表面科学, **28** (2007) 311.
- 37) 南 一郎: 潤滑経済, **2** (2012) 2.
- 38) 日本トライボロジー学会編集: トライボロジーハンドブック(養賢堂, 東京, 2001).
- 39) 羽山 誠, 佐々木節夫: トライボロジー会議予稿集, 東京 (2012) 387.
- 40) 小山貴大, 坪井 涼, 佐々木信也: トライボロジー会議予稿集, 東京 (2011) 47.
- 41) 三橋啓太, 吉本成香, 宮武正明: トライボロジー会議予稿集, 名古屋 (2008) 491.
- 42) 友澤和俊, 大野信義: トライボロジー会議予稿集, 名古屋 (2008) 259.
- 43) S. Mia, K. Tomozawa, S. Morita and N. Ohno: *Proceedings of World Tribology Congress IV*, Kyoto (2009) 572.
- 44) 大野信義: トライボロジスト, **57** (2012) 103.
- 45) 小山貴大, 近藤ゆりこ, 坪井 涼, 佐々木信也: トライボロジー会議予稿集, 東京 (2012) 365.
- 46) M. Uerdingen, C. Treber, M. Balser, G. Schmittc and C. Werner: Green Chem., **7** (2005) 321.
- 47) C. Gabler, C. Tomastik, J. Brenner, L. Pizarova, N. Doerra and G. Allmaier: Green Chem., **13** (2011) 2869.
- 48) Y. Kondo, S. Yagi, T. Koyama, R. Tsuboi and S. Sasaki: Proc. of IME J: J. Eng. Tribol., **226** (2012) 991.
- 49) S. Sasaki, Y. Kondo, T. Koyama and R. Tsuboi: *Books of synopses, 18th International Colloquium Tribology* (Esslingen, Germany, 2012) p. 161.
- 50) 近藤ゆりこ, 小山貴大, 坪井 涼, 中野美紀, 三宅晃司, 佐々木信也: トライボロジー会議予稿集, 東京 (2012) 373.
- 51) 野木 高: トライボロジスト, **56** (2011) 561.
- 52) <http://matdb.jaxa.jp/Outgas/Outgasdoc1j.html>
- 53) S. Sasaki, K. Miyake, M. Nakano and T. Ishida: *Books of synopses, 17th International Colloquium Tribology* (Esslingen, Germany, 2010) p. 202.