

**ミニトラクション試験機を用いた TEMPO 系有機摩擦調整剤の性能評価**  
**Performance of TEMPO-based Organic Friction Modifiers**  
**Measured Using a Mini Traction Machine**

名大・情（正）\*侯 金赤    名大・情（非）若林 知紀    名大・情（非）塚本 真幸  
 名大・情（正）張 賀東    名大・工（正）福澤 健二    名大・工（正）伊藤 伸太郎  
 名大・工（正）東 直輝

Jinchi Hou\*, Tomonori Wakabayashi\*, Masaki Tsukamoto\*, Hedong Zhang\*,

Kenji Fukuzawa\*, Shintaro Itoh\*, Naoki Azuma\*

\*Nagoya University

## 1. はじめに

世界エネルギー消費量の約 23%は、仕事せずに摩擦・摩耗で失われている。このエネルギー損失や温室効果ガスを極限まで削減できるグリーン潤滑技術が、地球温暖化防止には極めて重要である<sup>1)</sup>。そのため、粘性による摩擦損失を大幅に低減できる究極の潤滑油低粘度化が試みられている<sup>2)</sup>。しかし、固体二面の相対運動速度が低い場合、低粘度の潤滑油が固体二面を十分に分離できず、固体同士の直接接触の発生により摩擦・摩耗が急増する。この問題の解決には、摩擦調整剤を潤滑油に添加する方法がある。摩擦調整剤が固体表面に反応膜もしくは吸着膜を形成することによって、固体接触を回避させ、その結果摩擦・摩耗の急増が抑制される<sup>2,3)</sup>。現在、硫黄・リン系物質を含む摩擦調整剤が一般的に用いられている。しかし、環境保全のために、これらの物質を含まず、炭素、窒素、酸素、水素原子のみで構成される環境にやさしい高性能な有機摩擦調整剤（Organic Friction Modifier: OFM）が必須である。そこで、新規な OFM として、末端に環状構造とラジカルをもつ TEMPO 系分子を提案した<sup>4-6)</sup>。従来の OFM であるステアリン酸とモノオレイン酸グリセリル（Glyceryl Monooleate: GMO）に比べて、高圧条件でも摩擦係数が低く、かつ経時変化が小さく、摩耗も少ないことを明らかにした<sup>4,7,8)</sup>。しかし、使用していた回転式ピンオンディスク試験機の機能制限により、特性評価は、境界潤滑領域にあたる低速摺動条件のみで行い、印加可能な最大接触圧も 1.2 GPa が限界であった。そこで本研究では、ミニトラクション試験機（Mini Traction Machine: MTM）を用い、混合潤滑から境界潤滑までの高速から低速摺動および 3.0 GPa までの高接触圧条件下で、TEMPO 系と従来の OFM の摩擦・摩耗特性を比較評価した。

## 2. 実験方法

Figure 1 に示す 4 種類の OFM を用いた。2 種類の TEMPO 系分子 C<sub>12</sub>Amide-TEMPO (Fig. 1(a)) と OHII-TEMPO (Fig. 1(b)) は独自に合成した。比較のために、市販の GMO (Fig. 1(c)) とステアリン酸 (Fig. 1(d)) も用いた。潤滑基油には、ポリアルファオレフィン (PAO) 合成潤滑油を用いた。これらの OFM をそれぞれ潤滑基油に添加し、測定試料とした。試料の濃度および 80 °C における粘度を Table 1 に示す。なお、各試料の濃度は、ピンオンディスク試験で最も良い性能を示す値とした。

Figure 2 に示す MTM を用いて、OFM の摩擦・摩耗特性を評価した。ボールとディスクの材質はともに SUJ2 鋼であった。摺動条件として、すべり率を 50 と 150%，回転速度を 3200 から 2 mm/s までに漸減するように設定した。平均ヘルツ接触圧は、0.8 と 1.2 GPa に設定し、ステアリン酸の場合は 2.0 GPa, C<sub>12</sub>Amide-TEMPO の場合は 2.0 と 3.0 GPa も用いた。摺動中の温度は 80 °C に保った。

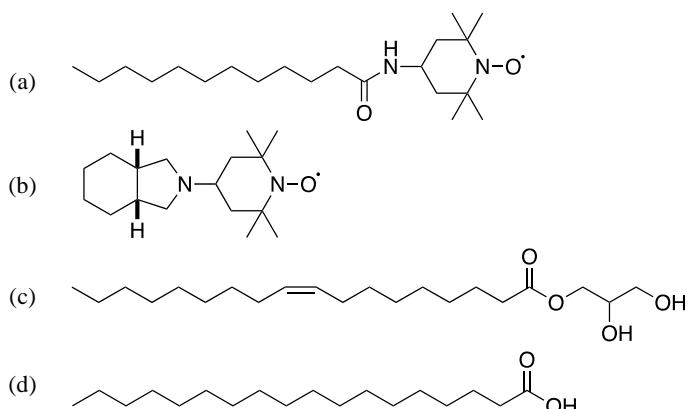


Fig. 1 Chemical structures of (a) C<sub>12</sub>Amide-TEMPO, (b) OHII-TEMPO, (c) GMO, and (d) stearic acid

Table 1 Concentration and viscosity of solutions of different OFMs in PAO at 80 °C

OFM	C <sub>12</sub> Amide-TEMPO	OHII-TEMPO	GMO	Stearic acid
Concentration, wt%	0.5	1.5	0.5	0.5
Viscosity, mPa· s	8.65	8.69	8.73	8.86

### 3. 結果と考察

一例として、すべり率50%と高接触圧条件で測定したC<sub>12</sub>Amide-TEMPOとステアリン酸の摩擦係数をFig. 3に示す。C<sub>12</sub>Amide-TEMPOは、接触圧3.0 GPaにおいても摩擦低減効果が接触圧2.0 GPaにおけるステアリン酸より高く、しかもその効果は100 mm/s未満の低速回転時の境界潤滑領域に留まらず、100 mm/s以上の高速回転時の混合潤滑領域にも波及していた。図示していないが、接触圧0.8と1.2 GPaの場合でも、類似な結果が得られ、C<sub>12</sub>Amide-TEMPOはステアリン酸とGMOより摩擦低減効果が優れていることを確認した。一方、OHII-TEMPOは、100 mm/s以上の高速回転時はステアリン酸とGMOより摩擦係数がわずかに低かったが、100 mm/s未満の低速回転時は逆の結果になった。Figure 4は、接触圧0.8と1.2 GPaにおけるディスク上の摩耗痕の幅を測定した結果である。いずれの接触圧においても、C<sub>12</sub>Amide-TEMPOは摩耗痕幅が最も小さかった。一方、OHII-TEMPOは、1.2 GPaではステアリン酸とGMOよりも摩耗痕幅が小さかったが、0.8 GPaでは逆の結果であった。

### 4. まとめ

OFMとして環状構造とラジカルをもつC<sub>12</sub>Amide-TEMPOとOHII-TEMPOおよび汎用のGMOとステアリン酸を対象に、MTMを用いて、混合から境界潤滑領域までの摩擦・摩耗特性を比較評価した。C<sub>12</sub>Amide-TEMPOは、3.0 GPaの高接触圧までにおいても、GMOとステアリン酸より優れた混合・境界潤滑特性を示し、摩擦・摩耗低減効果が高いことを確認した。一方、OHII-TEMPOは、高接触圧条件における摩擦低減効果や混合潤滑領域における摩擦低減効果を示すものの、境界潤滑領域における摩擦低減効果はGMOとステアリン酸に及ばないことを確認した。

### 謝辞

本研究は、一部をJSPS科研費（基盤研究（B）21H01238）およびNSKメカトロニクス技術高度化財団の研究助成を受けて実施した。MTM試験を実施していただいた兒島正宜氏（島貿易株式会社産業エネルギー事業本部）およびTEMPO系OFMの質量分析を行っていただいた尾山公一博士（名古屋大学物質科学国際研究センター化学測定機器室）に謝意を表する。侯金赤は、中国国家留学基金（番号：202006030017）の支援に感謝する。

### 文献

- 1) S. W. Zhang: Green Tribology: Fundamentals and Future Development, Friction, 1, 2 (2013) 186.
- 2) H. Spikes: Friction Modifier Additives, Tribology Letters, 60, 1 (2015) 5.
- 3) Z. Tang & S. Li: A Review of Recent Developments of Friction Modifiers for Liquid Lubricants (2007–Present), Current Opinion in Solid State and Materials Science, 18, 3 (2014) 119.
- 4) X. Zhang, M. Tsukamoto, H. Zhang, Y. Mitsuya, S. Itoh & K. Fukuzawa: Experimental Study of Application of Molecules with A Cyclic Head Group Containing A Free Radical as Organic Friction Modifiers, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 14, 4 (2020) 19-00442.
- 5) X. Chen, J. Yang, K. Yasuda, N. Koga & H. Zhang: Adsorption Behavior of TEMPO-based Organic Friction Modifiers During Sliding Between Iron Oxide Surfaces: A Molecular Dynamics Study, Langmuir, 38, 10 (2022) 3170.
- 6) J. Hou, M. Tsukamoto, H. Zhang, K. Fukuzawa, S. Itoh & N. Azuma: Characterization of Organic Friction Modifiers Using Lateral Force Microscopy and Eyring Activation Energy Model, Tribology International, 178 (2023) 108052.
- 7) J. Hou, M. Tsukamoto, S. Hor, X. Chen, J. Yang, H. Zhang, N. Koga, K. Yasuda, K. Fukuzawa, S. Itoh & N. Azuma: Molecules with a TEMPO-based Head Group as High-performance Organic Friction Modifiers, Friction, 11, 2 (2023) 316.
- 8) 何・塚本・Hor・張・三矢・福澤・伊藤：ラジカルを含む環状構造末端をもつ分子の有機摩擦調整剤としての応用，トライボロジー会議2020秋別府予稿集（2020）A6.

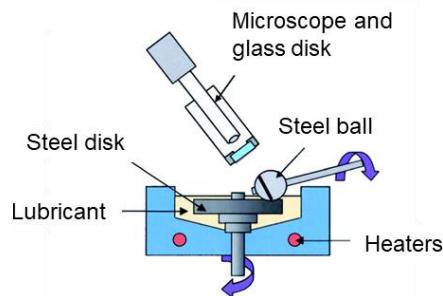


Fig. 2 Schematic of Mini-Traction Machine

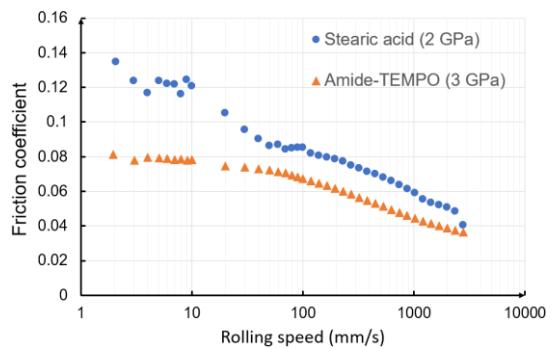


Fig. 3 Friction coefficients of C<sub>12</sub>Amide-TEMPO at contact pressure of 3.0 GPa and stearic acid at contact pressure of 2.0 GPa.

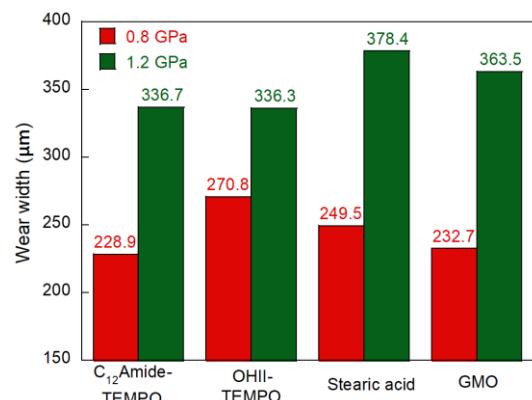


Fig. 4 Width of wear tracks for C<sub>12</sub>Amide-TEMPO, OHII-TEMPO, GMO, and stearic acid