

物理吸着系摩擦調整剤の摩擦低減メカニズムに関する検討 (第2報：吸着層構造のイメージングと摩擦特性との関連性)

Mechanism of Friction Reduction by Physisorbed Friction Modifiers

-2nd Report: Imaging of Adsorbed Layer Structure and Relationship between Structure and Friction Properties

神戸大・理, 島津テクノ (正) *森口 志穂 神戸大・理, 分子研 (正) 大西 洋

京大院・工 (正) 小出 駿介 京大・工 (正) 平山 朋子 京大・工 (正) 山下 直輝

Shiho Moriguchi*, **, Hiroshi Onishi*, **, Shunsuke Koide****, Tomoko Hirayama****, Naoki Yamashita****

*Kobe University, **Shimadzu Techno-Research, Inc., ***Institute for Molecular Science, ****Kyoto University

1. はじめに

近年の機械機器の省エネルギー化の流れにおいて、摩擦係数低減に寄与する有機摩擦調整剤の重要性は年々高まっており、今後更なる摩擦低減を実現するためには、摩擦低減に最適な添加剤吸着層の構造を解明する必要がある。本研究では、モデル吸着層として Langmuir-Brodgett (LB) 膜を用意し、その構造と摩擦特性の関係性の把握を目指している。第1報^[1]において、吸着層の相状態が潤滑油中での摩擦係数に大きな影響を及ぼしていることを示した。それを受けて本報では、周波数変調式原子間力顕微鏡 (Frequency-Modulation Atomic Force Microscope, FM-AFM) を用いて、さまざまな相状態にあるモデル吸着層の断面イメージングを行うことで、その摩擦特性の発現メカニズムを調査した。

2. 相状態と摩擦特性の関係性

Fig. 1 に、第1報で示した相状態と摩擦係数の関係性をあらためて示す。左から、Si 基板上に形成した液体膨張膜状 (Liquid-expanded phase, LE 相)、液体凝集膜状 (Liquid-condensed phase, LC 相)、固体膜状 (Solid phase, S 相) にある LB 膜の摩擦係数をコロイドプローブ AFM によって調べた結果を示しており、各プロットは異なる分子から成る LB 膜での摩擦試験結果を表している。なお、測定はモデル基油であるドデカン中に基板を浸漬させた状態で行った。これより、LE 相状の分子膜は圧力に対して右上がり、LC 相は右下がり、S 相は横ばいの傾向を示すことが見て取れる。また、400 MPa 程度の面圧では、いずれもほぼ $\mu=0.05$ 程度の値に収束している。これより、相状態に応じて摩擦係数は大きく影響を受けること、面圧増加に応じて相の影響は小さくなることが分かった。この結果より推察される摩擦メカニズムを Fig. 2 に示す。LC 相ではプローブと分子膜間に引っ掛かりの力が働くことで、特に低面圧下での摩擦係数が高くなり、LE 相では間に潤滑油を挟み込むことで、特に低面圧下での摩擦係数が低くなったと予想される。

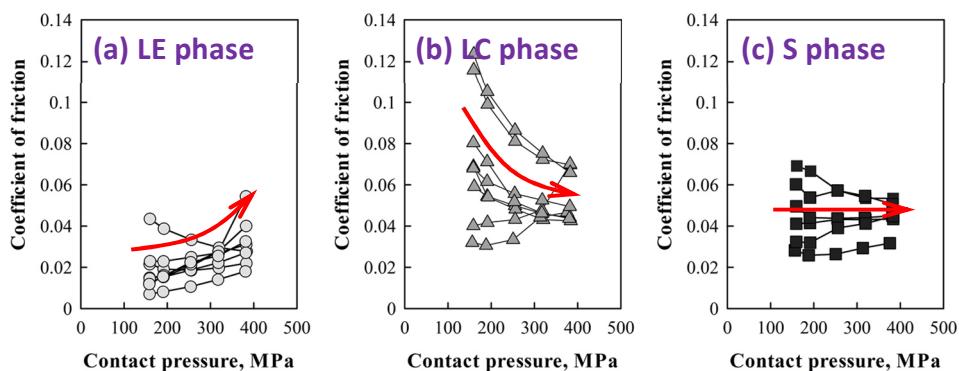


Fig. 1 COF behaviours of LB film in dodecane: (a) LE phase, (b) LC phase and (c) S phase

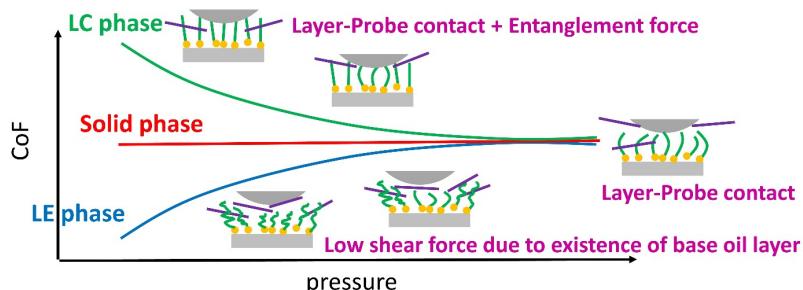


Fig. 2 Mechanism of friction behaviour of LB films with different phase

3. FM-AFM による表面・断面イメージング

Fig. 2 で示した摩擦メカニズムの妥当性を検証するために、FM-AFM を用いて LC 相および LE 相状の分子膜の表面および断面イメージングを行った。その際、LB 膜創成分子には 1,2-dialkyl-sn-glycero-3-phosphocholine (PC) を用いた。炭素数が 12 の PC12 から成る LB 膜は LE 相状にあり、炭素数が 18 の PC18 から成る LB 膜は LC 相状にあることが LB 膜採取時の π -A 曲線から分かっている。また、モデル基油にはドデカンを用いた。

ドデカン中で取得した LC 相 LB 膜と LE 相 LB 膜の表面像を **Fig. 3** に示す。一般的に、LC 相の LB 膜は分子が比較的直線状で整列しているのに対し、LE 相の LB 膜は分子がより乱れた状態で存在していると言われている^[2]。本表面像からも、LC 相と LE 相の LB 膜は明らかに様相が異なり、これまでに報告されているような状態にあることが分かった。

さらに、それぞれの膜を有する基板に対して、断面像を取得した。得られた断面像を **Fig. 4** に示す。LB 膜がない Si 基板上では明瞭なドデカンの層構造が見られたのに対し、LC 相の LB 膜では、基板から 2nm 程度離れたところに抗力を大きく受ける線状の領域が見られた。この 2nm という距離は LB 膜を構成する分子の分子長に相当することから、この線状の領域は LB 膜の上面であると推察できる。これより、LC 相状の LB 膜は膜上面で大きな抗力を発生するが、一旦 LB 膜の内部に入るとそこでは大きな力を発生しない、すなわち、LB 膜内部では垂直抗力を支持し得る力が弱く、摩擦プローブはまさに“足場を取られやすい”状態にあると言える。一方、LE 相状の LB 膜の断面像では、LB 膜の上面は明確には存在せず、代わりに厚い層構造の形成が見て取れる。この層構造はドデカン分子の並びに相当していると考えられることから、厚いドデカン層がプローブ/LB 膜間の潤滑作用を招き、低摩擦特性の発現をもたらしたと推察できる。

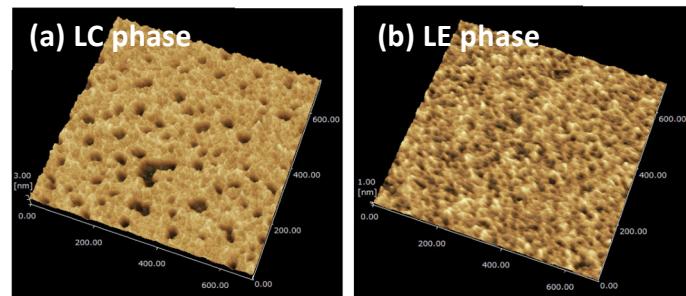


Fig. 3 Surface images of LB films in dodecane

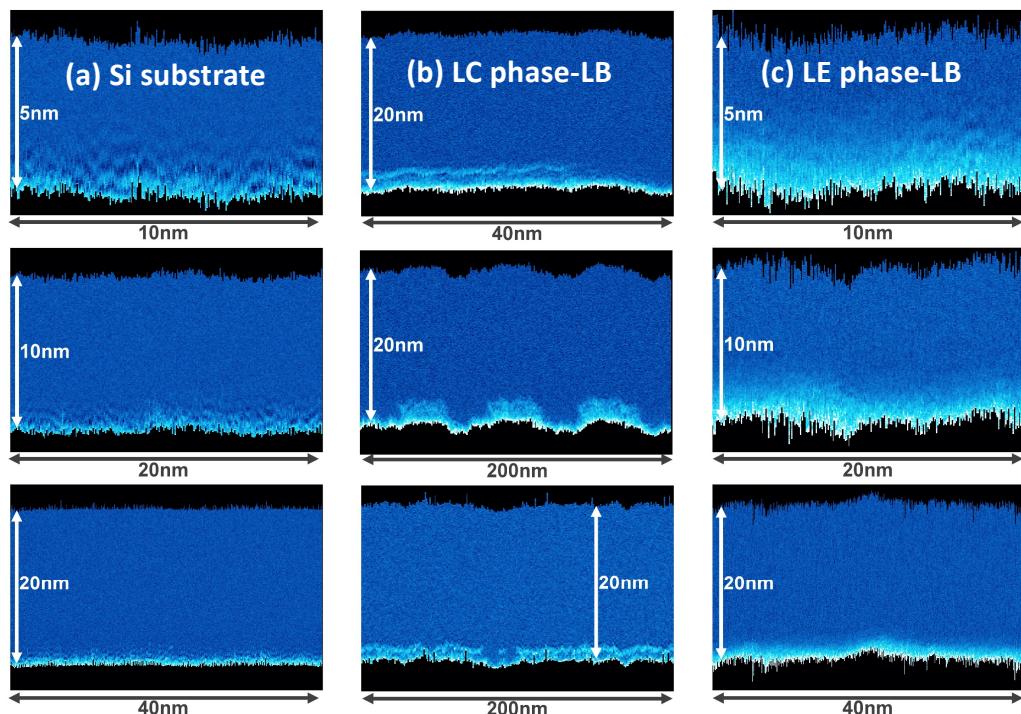


Fig. 4 Cross-sectional images of substrate without/with LB films in dodecane

4. 結論

分子膜の存在そのものが摩擦低減作用を有する物理吸着系摩擦調整剤による吸着層を模したモデル LB 膜を用いて摩擦試験を行い、さらにその表面・断面像を取得したところ、以下のことが分かった。

- ・ 形成される吸着層の相状態に応じて、摩擦特性の傾向は大きく異なる。
- ・ LC 相状の膜は膜の上面でのみ荷重を支持するためにプローブの引っ掛けを招きやすく、その結果として摩擦係数が高くなりやすいのに対し、LE 状の膜は厚い基油分子層をまとうことで高い摩擦低減効果を発揮し得る。

参考文献

- [1] 蒲順也, 平山朋子, 山下直輝: トライボロジー会議 2023 春東京予稿集 (2023).
- [2] D. Mohammad-Aghaie, E. Macé, C. A. Sennoga et al., J. Phys. Chem. B, 114, 3 (2010) 1325-1335.

謝辞 本研究は科研費基盤(S) (No. 23H05448) の助成の下、行われた。ここに謝意を記す。