

不均質成膜による自動車エンジン摺動面の表面改質

Surface Modification using Heterogeneous Coating for Sliding Interface of Internal Combustion Engines

名城大・理工（正）*宇佐美 初彦

Hatsuhiko Usami*

*Meijo University

1. はじめに

自動車用エンジンの運転環境は起動停止から定常状態に渡る摺動条件、温度状態は寒冷地の起動停止時の氷点下から高温外気環境での高負荷時には 100℃を超える広範囲にわたる。近年、自動車動力源の電動化への移行が加速しているが、これに伴い駆動や発電を担う内燃機関摺動面では起動停止が頻発し固体接触の頻度は増加する。環境負荷低減の観点からは、エンジンの摩擦損失低減は重要な課題の一つであり、境界潤滑状態での摩擦低減手法は従来にも増して重要な課題の一つと位置付けられる。

境界潤滑環境での摩擦低減手法としては、添加剤による油膜形成の促進や摩擦調整剤の反応に伴う低摩擦被膜の形成に加え、テクスチャリングあるいは自己潤滑性皮膜の付与といった表面改質技術があげられる。テクスチャリングでは、凹部の油剤供給源および異物捕集機能が寄与する反面、潤滑油剤の流体抵抗に影響するので流体潤滑状態では摩擦抵抗を増加させる場合もある。また、固体接触部の低摩擦化を目的として自己潤滑性材料との複合化も実用化されているが、流体潤滑状態のほうが低摩擦であるので、表面改質には油膜破断をいかに抑制するかが重要である。

自動車エンジンの摩擦損失低減では、単一の潤滑油剤で温度および運転環境が広範囲にわたる条件で効果を発現する必要がある、表面形状（テクスチャ）や表面組織を部位に応じて適正化することが求められる。前述のように、油剤供給機能をもつ平坦な表面組織の実現に期待がかかる。そこで、表面組織を不均質化し低剛性領域が荷重支持の際に変形し局所的に油溜り部として機能する構造とすることで、境界潤滑から流体潤滑に至る領域で摩擦低減に寄与できる可能性は高い。

本報告では、不均質な表面組織の実現を目指し、テクスチャリングと熱処理を複合化することで、自動車エンジン摺動面の摩擦損失低減への寄与が期待できる表面改質手法および表面構造を提案する。そして、添加剤としてのフラーレンの適用可能性についても展望する。

2. 不均質成膜による表面改質

低摩擦材料である鋳鉄はフェライトもしくはパーライトの素地と偏析した黒鉛から構成される複合組織であり、露出した黒鉛が摩擦面上で被膜を形成することで自己潤滑性を発現する。このような鋳鉄の組織構造は微細凹部を付与した表面に固体潤滑材料を複合化することで、自己潤滑機能をもつ複合表面を形成できる可能性を示唆している。すなわち、密着性の改善に留まらず、固体潤滑との複合化を目的としてテクスチャリングを活用し、その凹部に固体潤滑材を複合化することで、摺動面に自己潤滑性を付与できる¹⁾。従来、テクスチャリングでは、その摩擦低減効果から微細形状が求められ適用可能な手法は限定されていたが、固体潤滑材貯蔵のためのテクスチャでは寸法の拡大が見込めるので、汎用性の高い切削加工や塑性加工等も加工手法となり得る。

ピストン素材に使用されるアルミニウム casting 合金（AC8A）表面にショットピーニングにより付与されたディンプル凹部に MoS₂ をローラバニシングにより圧入し表面を複合化した際の摩擦特性が報告されている²⁾。相手材はねずみ鋳鉄（FC230）であり、材種としてはピストンスカートとシリンダライナーに相当する。これによると、Sn を配合することで MoS₂ の密着性が改善され、0.01 を下回る摩擦特性が確認されている。同様な表面の複合化による摩擦低減効果ではチタン（Ti）³⁾ や青銅⁴⁾ でも確認されており、予め付与されたテクスチャ凹部を活用に表面の組織構造を複層化することで下地の高剛性な特性と固体潤滑材の潤滑特性を両立できる可能性は高い。すなわち、硬質下地の上に自己潤滑性の被膜を形成することで、凝着成長抑制に寄与する表面構造を形成できる。複合組織化に関しては粉末冶金での結果が多く報告されているが熱履歴への影響が懸念されるが、機械加工の複合化によって表面近傍を選択的に改質することで機械的性質への熱履歴の影響の抑制できる。特に、時効処理等の熱処理が適用された部材では、耐久性や信頼性の観点から有用である。

Sn 等は既にジャーナル軸受のオーバーレイとして実用化されており、従来適用されてきた鉛や PTFE の使用が Rohs 指令や PFAS により規制が進む中では、利用分野の拡大が期待される材料の一つである。Sn は青銅等の軸受材料の構成元素でもあり、Cu との金属間化合物を形成することでその機械的性質の改善に寄与する。青銅に対して Sn や亜鉛（Zn）を成膜することで、相手材をクロム軸受鋼とした潤滑摩擦では、摩擦特性が実験初期から低減安定化し、耐摩耗性も大幅に向上することが報告されている⁵⁾。さらに Sn と Zn の合金を成膜した場合にはさらなる摩擦低減安定化

が確認されている。Sn と Zn は溶解限度の極めて小さい共晶組成を示し化合物を形成しないので組織構造を微細に制御でき、Sn 単層よりも膜を硬質化できる。Sn と Zn の合金を成膜することで SUJ2 同士の転がり接触においても耐摩耗性向上に寄与することも確認されている⁶⁾。

3. 添加剤としてのフラーレンの適用可能性

潤滑油には種々の添加剤が配合され実用に供されるが、近年、微細粒子（ナノ粒子）の適用が検討されつつある¹⁾。グラフェン、ナノダイヤモンド等の炭素材料もその一つであり⁷⁾、中でもフラーレンは直径 1 nm 程度の球状分子であり他の炭素材料よりも遥かに小さく油剤にも溶解するので⁸⁾、その摩擦低減機構は他の微細粒子とは異なる可能性がある。既にフラーレン添加油剤の摩擦低減に関する事例も報告されており⁹⁻¹⁵⁾、本学会誌においても本年 5 月に特集号が上梓された¹⁶⁾。これらによると、フラーレンの配合により、摩擦面の材種や油種によっては油剤の摩擦面への吸着が促進され、摩擦や摩耗を低減する。特に鋼やアルミニウム合金で顕著な効果を発現し、摩擦調整剤との協奏効果も期待でき、油剤の酸化劣化の抑制も報告されていることから、自動車エンジン用添加剤としては魅力的な特性を発揮する。特に寒冷地での起動時のように、摩擦調整剤による摩擦低減効果が期待できない低温環境では、フラーレン添加による油膜保持効果は有用である。

一方で、油剤に溶解したフラーレンの凝集に伴う粗大粒子の形成も指摘されており、これが異物として摺動面の損傷を誘発する可能性もあり、さらなる検討が必要である。摩擦面に微細な凹凸を付与することで、フラーレン分散油剤の潤滑効果はさらに向上することも報告されているが、これについてもフラーレンの凝集体を補修する凹部の形成が有効であることを示唆している。

4. まとめと今後の展望

自動車エンジン摺動面のように、運転条件や温度環境が広範囲に変化する摺動面の摩擦損失低減のための表面構造および表面改質手法を紹介した。自己潤滑性材料と素地を機械的な手法により複合化した表面構造を付与することで、平坦であっても、摩擦抵抗を低減できることが確認された。同手法に Sn 等の軟質金属を配合することで膜の密着性も改善され、テクスチャ形状によっては素地の高剛性を反映した自己潤滑性の発現も期待できる。

添加剤としてのフラーレンの潤滑効果については、特定の金属では油剤吸着促進効果による摩擦低減効果も確認されており、複合化された表面との相乗効果も期待できる。

文献

- 1) 宇佐美：テクスチャを応用した表面改質 ―自己潤滑材料との相互作用―，トライボロジスト，60，6(2015)255
- 2) 矢元・本田・宇佐美・三原：自動車ピストン用 Al 合金の表面設計と耐焼付き性評価，自動車技術会論文集 49，2 (2018) 199
- 3) H. Usami, Y. Horiba, H. Akita and S. Kobayashi: APPLICABILITY OF SURFACE PLASTIC FLOW PROCESS FOR MODIFICATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TITANIUM, Modern Machinery Science, Oct. (2014)502
- 4) 平井・小川・佐藤・宇佐美：機械的手法によって摩擦面に黒鉛を複合化された青銅の乾燥摩擦特性，設計工学 52，4(2017)251
- 5) M. Yamada and H. Usami: Tribological Properties of Tin-Zinc Hybrid Coating on Bronze in Lubricated Condition, Tribology online, 17,1(2022)54, released on J-STAGE
- 6) H. Usami and T. Mohri: Tribological properties of Sn-Zn coating in rolling/sliding contact, Proceedings of International conference, ICM&P 2022 International Conference on Materials & Processing 2022 2C-5
- 7) N. Xiao, Y. Chen, H. Lin, H. Liaquat, F. Zhang, K. Yang: Multidimensional nanoadditives in tribology, Applied Materials Today, 29(2022)101641
- 8) 今村：ナノカーボン添加剤の技術動向，トライボロジスト 67 2(2022) 107
- 9) W. A. Scrivens, J. M. Tour: Potent solvents for C60 and their utility for the rapid acquisition of ¹³C NMR data for fullerenes, J. Chem. Soc. Chem. Communication., 15 (1993) 1207.
- 10) 近藤・門田・高・栗谷：潤滑油中のフラーレンの特異な凝集体と解析，トライボロジー会議 2019 春東京予稿集 A5
- 11) H. Usami and K. Yasuda: Applicability of dissolving fullerene into engine oil as friction modifier acting at low temperature, The 10th International conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2022), July 5-8, 2022, Sapporo, Japan, B9-3, 87-88
- 12) J. Lee, S. Cho, Y. Hwang, H. J. Cho, C. Lee, Y. Choi, B. C. Ku, H. Lee, B. Lee, D. Kim and S. H. Kim: Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces, Tribology International, 42 (2009) 440
- 13) G. Jiang, Y. Yang: Preparation and tribology properties of water-soluble fullerene derivative nanoball, Arabian Journal of Chemistry (2017) 10, S870–S876
- 14) J. Pan, X. Gao, C. Liu, K. Zhang, W. Zheng, and C. Chen: Macroscale super durable super lubricity achieved in lubricant oil via operando tribo-chemical formation of fullerene-like carbon, Cell Reports Physical Science 3, 101130, November 16, 2022
- 15) 高崎・本田・今・八木：潤滑油中フラーレンの酸化防止 効果とラジカル捕捉メカニズムの解明 (第 1 報) ―ラジカル捕捉後のフラーレン化合物に関する一考察―，トライボロジスト，68，6 (2023) 411.
- 16) 堀田 智哉：フラーレン添加油に関する研究事例と将来展望，トライボロジスト，69，5 (2024) 330