

# 低フリクションを実現する自己潤滑性特殊鋼の境界潤滑機構

## Boundary Lubrication Mechanism for Self-lubricating Specialty Steel with Low Friction Loss

久保田 邦親\*  
Kunichika Kubota

上田 精心\*  
Seishin Ueda

庄司 辰也\*  
Tatsuya Shoji

開発特殊鋼 SLD-MAGIC™ は 2005 年に開発され、その低フリクション性により冷間塑性加工分野の金型材料として特に耐カジリ性に優れているため順調に売上高は拡大してきた。しかしながら、そのナノレベルのメカニズムは解明されてはいなかった。そこで、ナノレベルの情報を得られる XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)、放射光、ラマン分光法を用い、摩擦現象との対比で解析を行ったところ、合金元素と潤滑油の相互作用により、低フリクション性が発現しその原因は、潤滑油が変質した炭素結晶のタイプにより理解できることが分かった。このような境界潤滑下における摩擦挙動を説明するため、炭素結晶の競合 (CCSC; Competitive Crystal Structures of Carbon) モデルを提案し、2016 年現在は自動車等の摺動部品に応用展開中である。本報告では、モデル構築の過程とそれから導き出されるトライボシステムの展望について述べる。

The Hitachi-developed steel SLD-MAGIC™ has become popular in the Japanese die and mold market for cold-working processes because it exhibits superior galling resistance to other steel and iron materials. However, until recently, the nanoscale mechanism responsible for its lubrication properties has not been well understood. To clarify this issue, samples of different types of steel were analyzed using ball-on-disk tribometry, X-ray photoelectron spectroscopy, Raman spectroscopy, and X-ray fluorescence spectroscopy using synchrotron radiation. The results led to the development of a new boundary lubrication model, referred to as the CCSC model. This report describes the foundations of this model and its tribological implications.

● Key Word : 境界潤滑, 潤滑油, グラファイト層間化合物  
● Production Code : SLD-MAGIC

● R&D Stage : Mass Production

## 1. 緒言

自動車部品関係の摺動部品や、産業機器部品の使用環境の変化により低フリクション化のニーズが高まっている。この分野は科学技術分野としては、トライボロジーと呼ばれ、さまざまな研究がなされている。トライボロジーではおおよそ、流体潤滑と境界潤滑状態という2つの潤滑モードに分類され、前者はレイノルズ方程式より出発した流体潤滑理論で、構造、潤滑油設計に大いに寄与している。一方、固体同士の接触が主となる、境界潤滑下では確固とした設計方針が出せる理論がない。そのような中、日立金属が開発した冷間ダイス鋼 SLD-MAGIC™ の摩擦特性の調査を行っていたところ、室温近くの境界潤滑下での摩擦挙動において摩擦係数が上がりにくい性質（以下、自己潤滑性と記す）があることが分かった。その耐久性は、

特にハイテン成形用の金型で発揮され、その耐カジリ性（焼付き性）の高さゆえに冷間塑性加工分野で利用が拡大した<sup>1)</sup>。

このため、適用分野拡大を狙い、境界潤滑の本質的な理解を深めるために、SLD-MAGICの摩擦特性をさまざまな角度から検討した。その結果、自己潤滑性の発現因子は合金元素においては、CuとSが作用していることが判明した<sup>2)</sup>。また材料と吸着有機物との相互作用で起こることも判明した<sup>3)</sup>。しかしながら、そのナノレベルのメカニズムは不明であった。

そのため、XPS、放射光、ラマン分光法を用いて解析を行ったところ、吸着有機分子が分解できる炭素の結晶のタイプにより摩擦挙動が変化することを見出し、それを炭素結晶の競合モデル (Competitive Crystal Structures of Carbon; CCSC モデル) として提案した。このモデルは油

\* 日立金属株式会社 高級金属カンパニー

\* High-Grade Metals Company, Hitachi Metals, Ltd.

潤滑における機械損傷のメカニズムを説明できる<sup>4)</sup>。本報告では、そのモデルの創出過程と展望について報告する。

## 2. 実験方法

表1に評価装置および条件を示す。摩擦係数計測用の試験機はASTM G99相当のボールオンディスク試験機で、ディスク側をテストピースとし、ボールは直径6 mmのSUJ2 (62HRC)を用いた。XPSは島津製作所製μ-ESCA AXIS、放射光はJ-Park KEK-PF 日立専用ラインBL-11B、ラマン分光法は日本電子製JRS-SYS200を用いた。表2には実験に用いた合金組成を示す。油の吸着は、図1の状態は無洗浄でのテストを行い、図10では油を塗布して布で拭きとっていたが、それ以降のデータに関してはEppendorf社製精密ピペット(10-100 μl)を用い、アセトン希釈により精密な付着量の管理を行った。

表1 評価装置および条件

Table 1 Analysis methods and conditions

Name of equipment	Manufacturer or place	Details of conditon
Ball on disk	Nanotec (Japan)	ball; ø6 mm SUJ2 (AISI 52100) 62HRC, radius of friction track; 2.89 mm, pressure; 80 MPa, velocity; 11 m/min, disk specimen; ø20 mm×5 t (Ra; 0.2 μm), equivalent to AISI G99
XPS analysis	Shimazu	μ-ESCA AXIS 15 keV target; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Synchrotron radiation	J-PARC	KEK-PF, exclusive line of Hitachi BL-11B
Raman analysis	JOEL	JRS-SYS2000 (infrared wavelength; 633 nm)

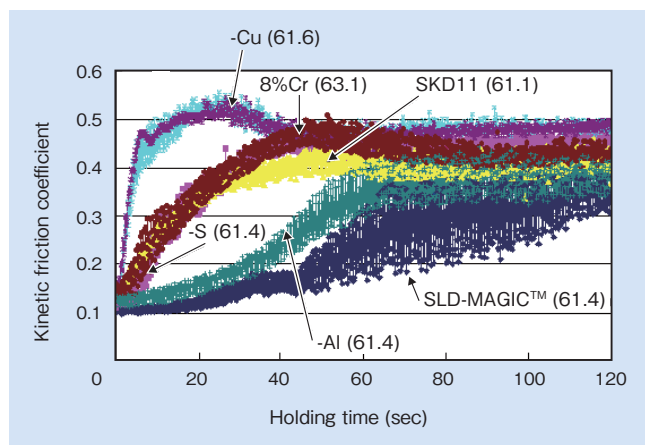


図1 摩擦挙動に作用する合金元素( )内数字は硬さ(HRC)

Fig.1 Effect of alloying elements on frictional behavior (numbers in parentheses show hardness (HRC) of disk specimens)

## 3. 実験結果

### 3.1 SLD-MAGICの摩擦特性

#### 3.1.1 合金元素の影響(CuとSの効果)

図1は合金実験により確かめられた摩擦挙動に作用する金属元素を示す。本実験では、自己潤滑性に有効と思われる元素をSLD-MAGICから抜いて実験を行った。意図的脱脂が行われていないこれらの結果より、-Al (SLD-MAGICからAlを抜いた組成)、開発鋼SLD-MAGICのみ

保持時間40秒以下で摩擦係数が特に低く、CuとSを同時添加したものは良好な特性を示していることが分かった<sup>2)</sup>。

図2は図1のJIS SKD11とSLD-MAGICだけの摩擦係数の時間変化を抜き出したものである。この中で、摺動を10秒間行った摩擦ありと摩擦なしの表面分析をXPSで行った。図3にその結果を示す。表面は炭素のコンタミネーションが多いが、Arスパッタを進めると徐々にFe, Oのピークが上がった。しかし、CuとSは検出されなかった。

表2 供試材の化学組成

Table 2 Chemical compositions of samples

SLD-MAGIC™	Fe-1.0%C-8.3%Cr-Ni-Mo-W-Al-Cu-S
SKD11	Fe-1.5%C-12.0%Cr-Mo-V
8%Cr steel	Fe-1.0%C-8.3%Cr-Mo-V
-Cu	Fe-1.0%C-8.3%Cr-Ni-Mo-W-Al-S
-S	Fe-1.0%C-8.3%Cr-Ni-Mo-W-Al-Cu
-Al	Fe-1.0%C-8.3%Cr-Ni-Mo-W-Cu-S

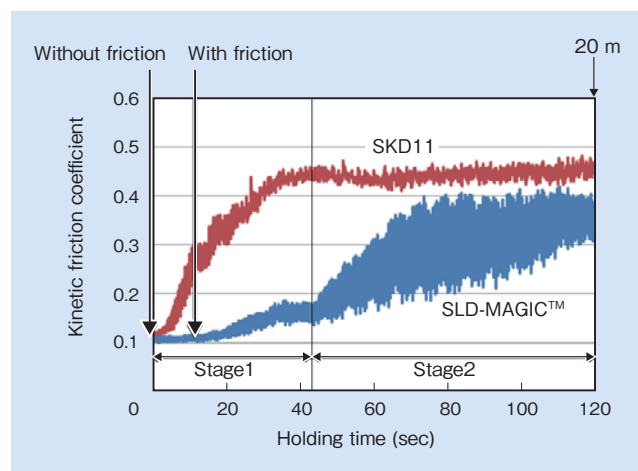


図2 SKD11とSLD-MAGIC™のXPS分析結果

Fig.2 Frictional behavior of samples used for XPS analysis

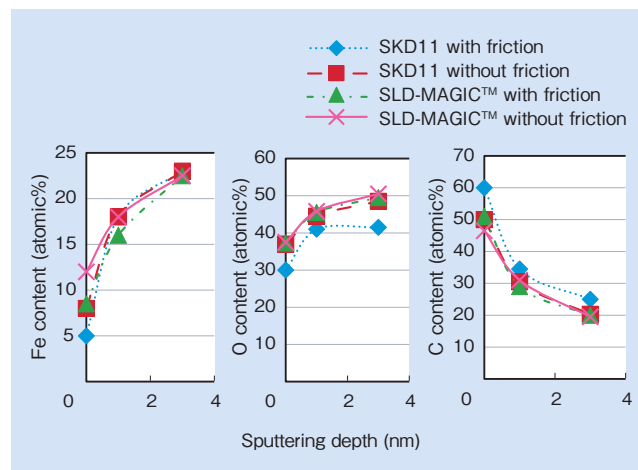


図3 最表面から3 nmの深さまでの元素分布

Fig.3 Composition profiles from top surface to 3 nm depth

### 3. 1. 2 SKD11との摩擦面の違い(自然酸化物の形成状況)

図4にはスパッタしなかった場合のXPSによるFeの2p軌道のピークを示す。信号強度の違いはあるもののケミカルシフトは見られず、鋼種、摩擦あり/なしの化学結合状態の差異は見られなかった。次に、3 nm スパッタした場合のFeの2p軌道のピークを図5に示す。

ここでは摩擦ありのSKD11にのみ金属Feのピークが見られ、その他のものはFe酸化膜のピークのみであった。つまり、図2中に示すように、摩擦係数が上昇していたSKD11のほうが酸化膜が摩擦で薄くなっていったため、3 nm 掘り進んだことによりSKD11のみが金属新生面がむき出しになっていることを示している。図6はスパッタしなかった場合のO-1sピークであるが、水酸化物(FeOOH)、安定酸化物(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)、FeOの3つのケミカルシフトが検出された。摩擦されていないほうは開発鋼、SKD11

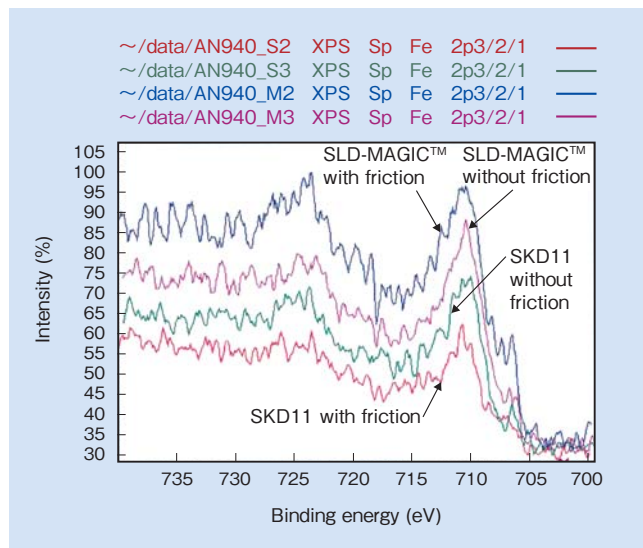


図4 スパッタなしのFe-2p軌道ピーク  
Fig. 4 Fe-2p XPS spectrum before sputtering

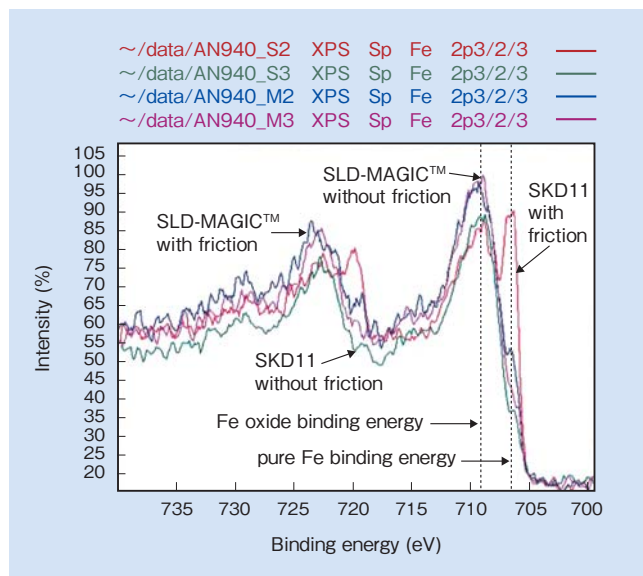


図5 3 nm スパッタした場合のFe-2p軌道ピーク  
Fig. 5 Fe-2p XPS spectrum after 3 nm sputtering

両者ともFeOのピークが高いので最表面の酸化物構造はFeO主体であることが分かる。また、摩擦ありのSKD11は安定酸化物のピークが弱まり、水酸化物のピークが高くなっていることから、酸化膜の奥は水酸化物状態になっていることが分かる。一方、摩擦ありの開発鋼のピークは、安定酸化物のピークの発達が著しいことから、FeOが安定酸化物へ変質したことがうかがえる。

以上の結果を図7にまとめた。開発鋼には酸化膜の損傷は認められないが、不安定な酸化物が摩擦により安定酸化物へ変質している。一方、SKD11では酸化膜が約2 nm程度損傷を受けた状態になっており、これが、摩擦係数が上がる原因であることが分かる。ただし、摩擦界面上のいかなる現象によって開発鋼の自然酸化膜が損傷しなかったのかは依然として不明であった。

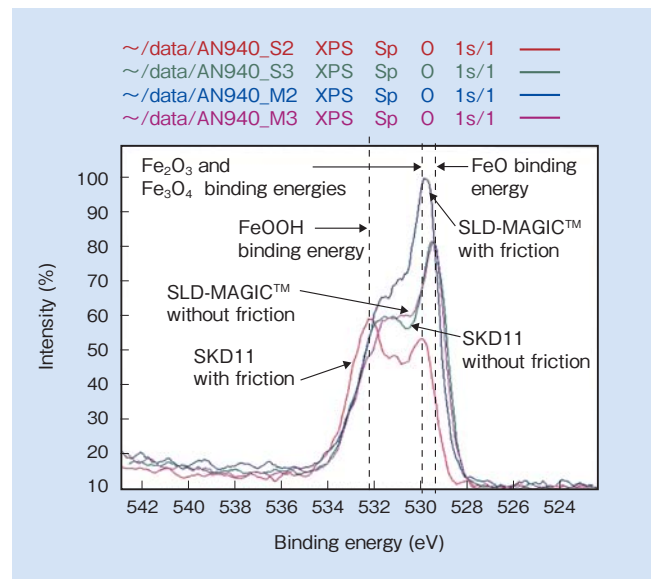


図6 スパッタなしのO-1s軌道ピーク  
Fig. 6 O-1s XPS spectrum before sputtering

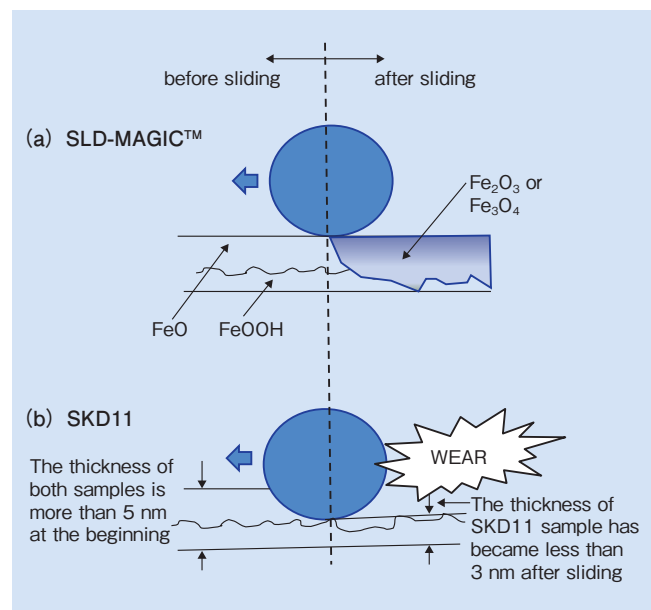


図7 XPS分析結果の模式図 (a) SLD-MAGIC™ (b) SKD11  
Fig. 7 Schematic illustration of sliding wear test based on XPS results (a) SLD-MAGIC™ (b) SKD11

### 3. 1. 3 極最表面分析 (放射光分析)

以上のように XPS 分析で開発鋼の最表面の状態は詳細には解明できなかったため、放射光を用いて、表面分析を行った。図 8 に放出電子収量の信号と蛍光 X 線の比較を示す。開発鋼には 2,470 eV 付近で SLD<sup>TM</sup> (SKD11) と違ったピークが現れ、開発鋼の最表面には S が存在していることが分かった。これをさらに詳細に見てゆくため、放出電子収量を微分したものと蛍光 X 線収量のピークを比較した。これらは最表面 (< 3 nm) と内部が同一状態だと両

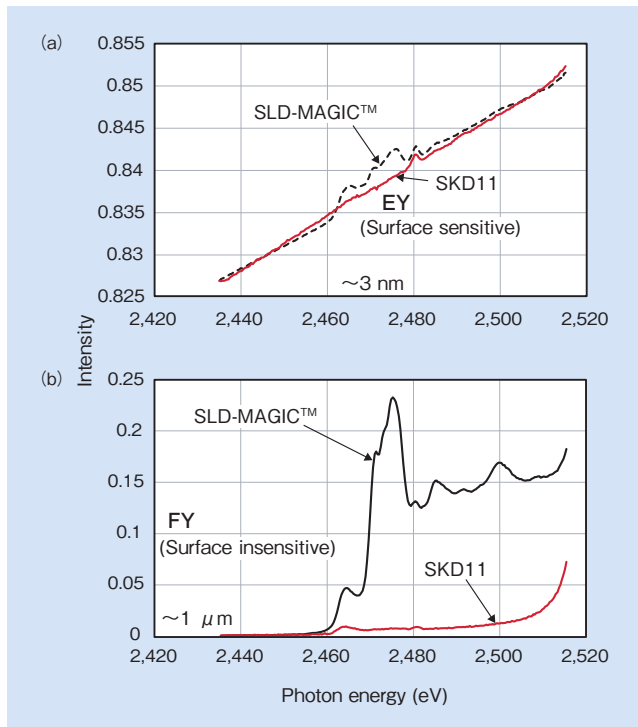


図 8 SLD-MAGIC<sup>TM</sup> と SKD11 の放射光分析結果  
(a) 放出電子収量 (EY) (b) 蛍光 X 線収量 (FY)  
Fig. 8 Synchrotron radiation results for SLD-MAGIC<sup>TM</sup> and SKD11  
(a) electron yield (EY) (b) X-ray fluorescence yield (FY)

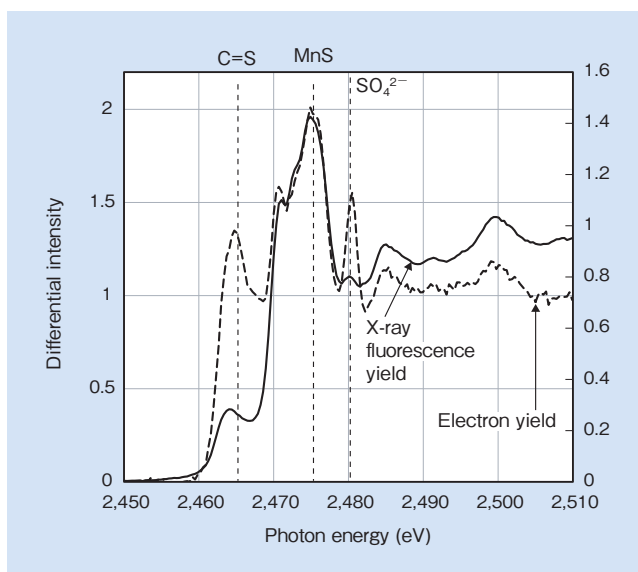


図 9 SLD-MAGIC<sup>TM</sup> に対する放射光分析詳細分析 (EY 微分値と FY の比較)  
Fig. 9 Differential EY and FY values for SLD-MAGIC<sup>TM</sup>

信号は一致するが、そうでない場合、差異を生ずる。この観点で開発鋼の信号を整理したものが図 9 である。メインピークは MnS であることがデータベースより判明したが、それ以外にも最表面に C=S 結合状態と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> のイオン状態のものが認められた。イオン結合のケミカルシフトは弱いので断定はできないが、Cu の有効性を示す図 1 の結果と合わせて考察すると CuSO<sub>4</sub> が表面にできていることになり、C=S 結合が認められたことからチオール系有機物の関与が推察されるため有機物吸着の実験を行った。

## 3. 2 潤滑油の影響

### 3. 2. 1 Cu, S および有機物の相互作用について

ハンドリングなどで表面に微量な油脂が吸着したままとなる可能性を排除するため、意図的に有機物の吸着状態を制御し、アセトン脱脂のままとそれにタービンオイルを塗布した布で拭いた場合の摩擦試験の結果を図 10<sup>3)</sup> に示す。脱脂のままの場合、鋼種にかかわらず急激に摩擦係数が上昇するが、オイル吸着の場合、両鋼種とも摩擦係数の上昇は抑制され、特に開発鋼に良好な自己潤滑性が発現した。そのため、この表面の状態を調べるため、ラマン分光法 (波長 633 nm) で表面状態を調査した。図 11 にはオイル吸着状態の両鋼種のしゅう動トラック上を分析した結果を示す。1,450 cm<sup>-1</sup> 付近のピークがオイルのピークであることは摩擦なしの表面で確認してある。自己潤滑性を示した開発鋼にはブロードではあるが 1,600 cm<sup>-1</sup> 付近に摩擦生成物が認められ、グラファイトが多いことが分かる。一方自己潤滑性が発現しなかった SKD11 は、1,350 cm<sup>-1</sup> 付近に生成物が認められダイヤモンドであることが分かる。また、ダイヤモンドピーク付近に小さなピークが認められるが、これは鉄酸化物のピークである。これらのなかでグラファイトのピークが 1,600 cm<sup>-1</sup> 以下の場合にはアモルファスカーボンであるが 1,600 cm<sup>-1</sup> 以上で 1,640 cm<sup>-1</sup> 付近で急激に減衰する物質が不明なので特定することとした。

炭素系の無機材料の構造とピーク位置の関係を調べたが、633 nm の波長で、1,600 cm<sup>-1</sup> 以上を示すものはこの

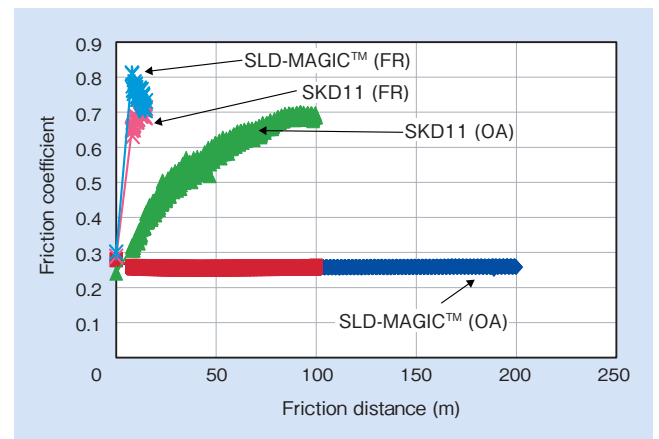


図 10 タービンオイル吸着あり (OA) / なし (FR) のボールオンディスクテスト  
Fig. 10 Results of ball-on-disk tests with (OA) and without (FR) turbine oil adsorption

中には存在しなかった<sup>5)</sup>。ラマン分光法は、格子振動だけ入射光の波長がシフトすることを原理としているので、sp3が含まれず、高カイザー側にシフトしていることからグラファイト系でかつグラファイト面内の結合力を高めるような物質を念頭に調査したところ、**図 12**のようなグラファイト層間化合物(Graphite Intercalation Compound; GIC)という物質<sup>6)</sup>が特定できた。

この物質は、グラファイト中に周期的層間隔でイオンが挿入された物質であるため、イオン-イオン層間のグラファイト数を X とすると stageX という形で整数倍の状態を取る<sup>6)</sup>。ここでイオン挿入の飽和限界値である stage1 は**図 11**に示された、1,640 cm<sup>-1</sup> 付近の急激なピークの減衰挙動と一致する。すなわち stage1 より多くのイオンは

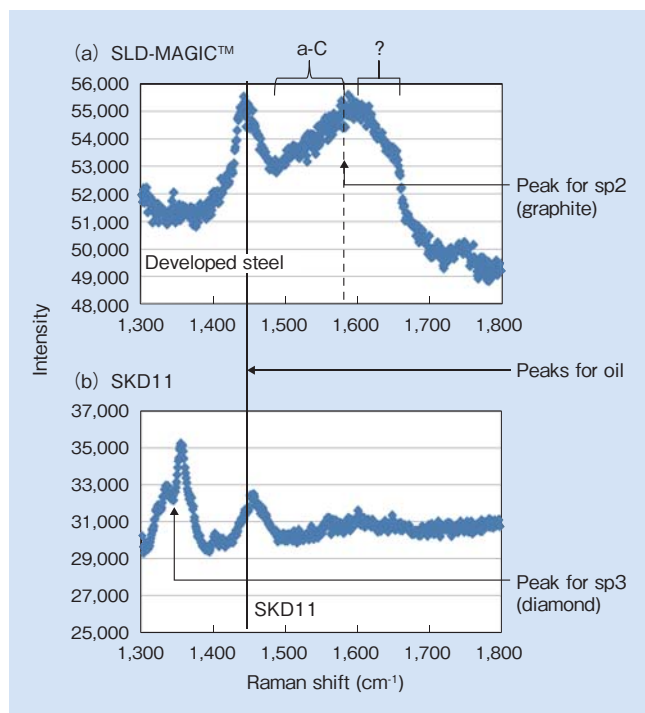


図 11 油吸着時の摩擦面のラマン分光分析結果  
(a) SLD-MAGIC™ (b) SKD11

Fig. 11 Raman spectra from frictional surfaces for the case of oil adsorption (a) SLD-MAGIC™ (b) SKD11

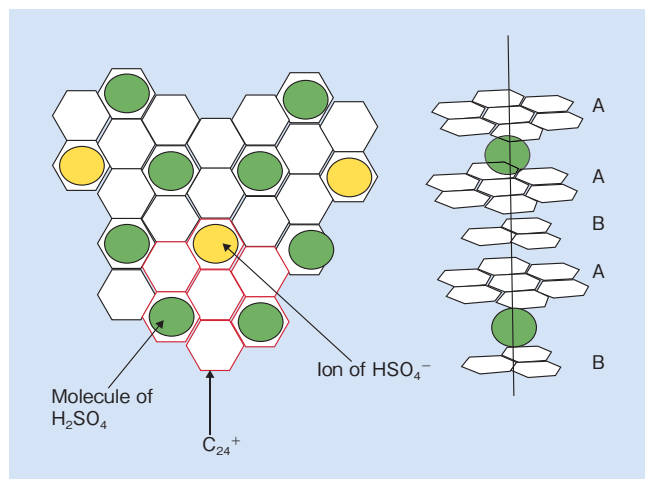


図 12 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-グラファイト層間化合物の結晶構造の模式図  
Fig. 12 Schematic drawing of crystal structure of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-GIC

吸蔵できないので stage1 より小さい GIC の状態がなく、ピークの急減が引き起こされたと考えられる。

ここで示されている GIC は、アクセプター（負イオン挿入）型であり今まで、検出された負イオンは SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>なので、このタイプのものが存在するかどうか調べたところ、膨張黒鉛などでよく応用される硫酸 GIC が存在することが分かった。さまざまな GIC のなかでもこの GIC は結晶のスタックが A/A でも A/B でもどちらでもとれる(**図 12** 参照)という性質があり<sup>7)</sup>、すべりの自由度が高いため潤滑物質<sup>8)</sup>としては最適と考えられた。

上述の分析結果から炭素結晶の競合(Competitive Crystal Structures of Carbon; CCSC)モデルというものを創出した<sup>7), 9), 10)</sup>。**図 13**にその説明図を示す。出発物質であるオイルは炭化水素(C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>)が主体なのでそれが摩擦仕事によるエネルギーを受けて脱水素化を引き起こし、ダイヤモンドとグラファイト、GIC の3つの炭素結晶が生じることで、有機物吸着下での金属の摩擦現象を説明しようとするものである。

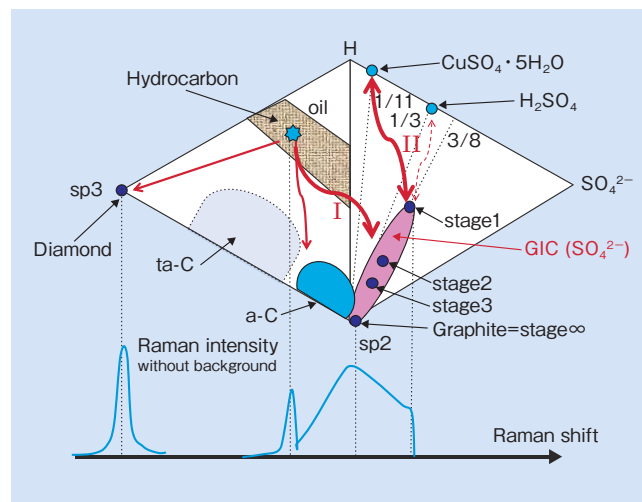


図 13 二重擬三元系状態図による炭素結晶の競合(CCSC)モデルの説明図

Fig. 13 Double quasi ternary phase diagram illustrating CCSC model

ダイヤモンドが生成すると砥粒の働きを持ち、金属の表面酸化膜を破るため凝着が引き起こされ摩擦係数が高くなる。一方で、グラファイトに変化した場合は潤滑性が保たれ、特に GIC が形成されるとさらに潤滑性能は向上するというモデルである。このモデルは極圧添加剤に添加の上限が存在する現象も説明可能である。S系有機化合物を添加してゆくと、摩擦界面に GIC が形成され良好な潤滑性を示すが、S を入れすぎると stage1 以上の濃度状態に達し SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> がフリーになり表面の自然酸化物を腐食し、摩擦損傷が生じると説明できる。

Cu の作用は、CuSO<sub>4</sub>・5H<sub>2</sub>O を形成し先に述べた硫酸イオンがフリー化した場合、これを固定化する働きを持っているものと考えられる。**図 1**で S 入りで Cu を抜いた鋼種では、S 無添加の鋼種より摩擦係数の増加が逆に著しいことから、摩擦による SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> イオン生成は stage1 を飽和させるに十分な量が形成されていると考えられる。この

CuSO<sub>4</sub>・5H<sub>2</sub>O はHが酸化して水が形成された場合でも、結晶内に水を固定するので電解状態も防ぐような2重の働きがあると推察される。この結晶水の脱水温度は101℃であるので、表面に硫酸銅が潤沢にできていると仮定した場合、水は表面に液体状態で存在しえないことになる。

### 3.2.2 有機物の影響

当初は、化学成分種の明確でない有機物を使用し、その吸着量も制御できていなかったため、その点を改善すべく、さらなる実験を行った。図14は、開発鋼をディスクとし、油の滴下量を変えた場合の摩擦係数が0.3以上上がるまでの距離のデータを示す。潤滑性能が最も悪かったのはベンジルアミン(ベンゼンに1個のアミノ基が修飾されたもの)であったが、データのばらつきは比較的少なかった。パラフィン油はかなり微量な量でも潤滑性を発揮するがばらつきが多少大きくなった。一方パラフィン油にステアリン酸を入れたものはさらに潤滑性能は向上しているが、ばらつきが最も大きくなった。

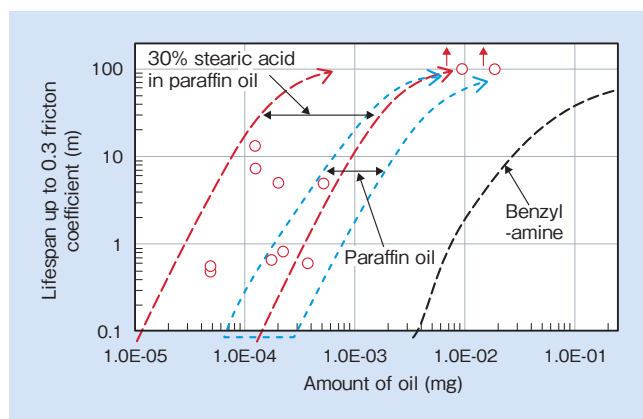


図14 SLD-MAGIC™でオイル量を変えた場合の摩擦係数0.3に到達するまでの摩擦距離

Fig. 14 Dependence of lifespan up to friction coefficient of 0.3 on amount of oil

摩擦中に有機分子がCHおよびCC結合開裂を引き起こすトライボケミカル分解<sup>11)</sup>があることはよく知られているが、ベンジルアミンはベンゼン環を含むのでこのトライボケミカル分解が最も起こりにくく、直接的なダイヤモンド化が引き起こされた可能性がある。

CC開裂になると通常の有機化学では予測がつきにくいので分析化学の質量分析計の分野で言われている、フラグメンテーションを考えるとわかりやすい。そこから考えを引き出すとCC開裂の起こりやすさは単結合>環状単結合>二重結合>ベンゼン環となる<sup>12)</sup>。このことでベンジルアミンが悪かった原因は説明可能である。

一方パラフィン油はすべて単結合なのでトライボケミカル分解が起こりやすく、それがエチレン分子(イオン、ラジカル)などに分解し、一種のディールスアルダー反応を引き起こしながらグラファイト片を形成し、それによって潤滑性が向上したと考えられる。また、ステアリン酸添加パラフィン油は潤滑性がさらに改善されているが、これは油性剤<sup>13)</sup>として働いていることが考えられる。ただし、ばら

つきが大きいということから、潤滑に悪く作用する因子も内在しているのではないかと考えられた。

ステアリン酸は炭素数18のカルボン酸であるが、カルボン酸は、炭化水素の自動酸化でも発生する物質で、摺動中の油劣化を示す物質でもある。翻って考えるとこのCCSCモデルには炭化水素の酸化という視点が抜けており、この点を改善するためにカルボン酸のCC開裂について調べた。カルボキシル基から遠い場所から順次CC開裂が起こる傾向が確認された<sup>12)</sup>が、開裂のパターンが多岐にわたるため、単純なカルボン酸であるギ酸と酢酸の実験を行った。実験には、JIS SK5とSLD-MAGIC™(両者とも62HRC)のディスクを使用した。

図15には吸着オイル量を0.05~0.15 μlに固定した場合の摩擦係数の実験結果<sup>9)</sup>を示す。この結果から、SK5において、ギ酸が強力に潤滑性を劣化させていることが分かる。また、開発材はギ酸がはいても良好な潤滑性を示すことが分かった。

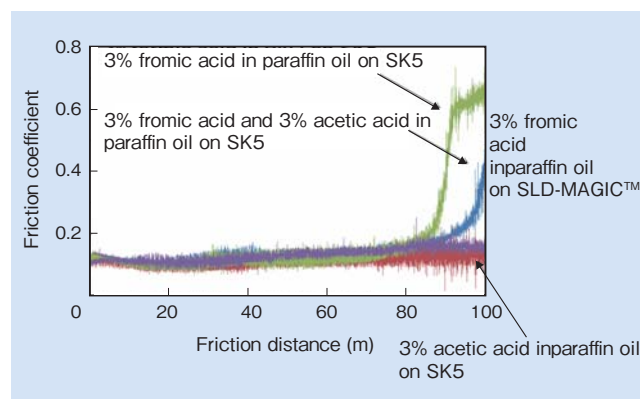
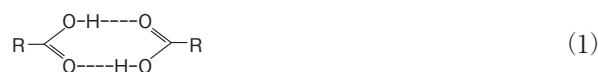


図15 パラフィン中にギ酸と酢酸を添加した場合の摩擦テスト結果(油量0.1 mm<sup>3</sup>, SK5; AISI W1-8)

Fig. 15 Results of friction tests in the presence of formic acid and acetic acid in paraffin (amount of oil; 0.1 mm<sup>3</sup>, SK5; AISI W1-8)

カルボン酸は疎水性の油中においては、以下のような、二量体を形成しやすいことから、



成長途上のグラファイト端部が酸化された場合も同様な構造が端部に形成されると考えられる。このような端部構造はグラファイト成長を抑制すると思われるが、特にギ酸はカルボン酸のなかでも二重水素結合を弱めるケト・エノール互変異性<sup>14)</sup>がないためグラファイト表面を不活性にし、強力にグラファイトの成長を抑制すると考えられる。

グラファイトは常温、常圧においても6 nm以下の粒子径(炭素数、数千~数万)のものであれば熱力学的にダイヤモンド構造が安定していることが報告されている<sup>15)</sup>。この規模でグラファイトが長くともまっていると少しの刺激でダイヤモンド粒子へと同素変態する確率が高まり、これにより形成されたナノダイヤモンド粒子が砥粒のような役割をするためにギ酸添加油は、潤滑性が劣化するものと考えられる。一方開発鋼上では、グラファイト粒子が6

nm 以下にとどまったとしても、図 12 のような GIC 構造へ変化するため、ダイヤモンド砥粒は形成されず、良好な自己潤滑性が発現する。

以上のように、有機物種で注意すべきなのは、油の酸化反応によるギ酸形成反応であり、また二重結合が飽和しているベンジルアミンも基油としては潤滑性が劣化する。

#### 4. 汎用機械部品における摺動設計

図 16 はストライベック曲線を示している。上図が一般的なもので、下図は P (圧力)、F (摩擦力)、V (相対速度) といった具体的な値で書き直したものである。よって、下図をゾンマーフェルト数 (粘性力 / 圧力の無次元数) などに変換すると、上図の一本の曲線となる。

現在、低燃費化のためオイルの粘度を下げる技術が流行を見せている。これは下図 low viscosity 状態を狙い、高 V のところでの摩擦係数を低下させることを狙っているが一方で、境界潤滑状態がひろがり、摩擦損傷が起りやすくなる。本来であれば ideal の状態を実現したいところで摩擦面積を小さくすることで、摩擦エネルギー損失の低減と軽量化が同時に狙えるが、これも面圧が大きくなり摩擦損傷が発生しやすくなる。しかし、本開発材料を用いると摩擦面積をおおむね 30% 前後低減できることがいくつかのデータから見込まれ、CCSC モデルを念頭にその方向性を模索している車両機械メーカーもある。汎用機械の耐久性は疲労設計としゅう動設計に大別され、前者は転位論と破壊力学で説明でき欠陥がなければ、おおむね材料強度の 1/2 レベルとなる。後者の許容面圧は 1/10 ~ 1/100 レ

ベルと非常に低く統一化された理論もなく試行錯誤が基本となっている。この耐久強度のギャップはダイヤモンドの形成による損傷加速もひとつの要因と解釈することができ、ダイヤモンド形成抑止に集中した摺動動部の設計を行うことで許容面圧を高めることが可能になるからである。

この観点で考えると、ただ単に硬さを上げてゆくと接触面圧を高め、かえってダイヤモンドが形成されやすくなるのでしゅう動特性が劣化するが、開発材料には高硬度でも摩擦特性に優れているというデータもある。硬さに関する設計則はまだ明確化されておらず、ダイヤモンド以外の硬質なコンタミネーションの存在状況にもよるが、開発材料は 22 ~ 62HRC と熱処理により幅広い強度に調整可能なので、現用材との差し替えを行うのであれば、同一硬度もしくは少し硬度を上げて使うことが望ましいと考えている。

また、ダイヤモンド形成を促進させるギ酸を電気化学的に取り除くフィルターの開発も重要になっていくものと思われる。潤滑油側の開発もダイヤモンド形成を抑制するという視点が必要となるだろう。例えば、極圧添加剤も S-P 共同添加<sup>16)</sup>の効果が認められているが、廃油処理の際 SO<sub>x</sub> となるので環境問題が懸念される。しかし、P 系の添加剤と本材料を組み合わせることで、S-P 共同添加のような優れた特徴が発揮されるものと予想される。また微細周期構造を狙ったテクスチャリング効果の駆使も重要な技術である。これはレイノルズ方程式の帰結として相対速度がゼロになっても、油を供給するメカニズム<sup>17)</sup>があり貧潤滑下の油供給技術として重要性を担っていくと考えられる。

以上のような材料、部品構造、潤滑油にわたる体系的な取り組みにおいては統一の指針が必要であり、CCSC モデルの精密化は重要な課題だと考えられる。

#### 5. 結 言

過酷な境界潤滑下では有機物に変質し、グラファイトができれば良好な摩擦状態を維持し、ダイヤモンドが形成されれば、潤滑特性を悪化させる。この現象は有機物種にも左右される。開発鋼 SLD-MAGIC はさらに GIC を表面に形成させることで高い潤滑性能を発揮する。その潤滑性能などが説明可能な、CCSC モデルというものを提案しそれに基づく摺動設計についても展望を述べた。

なお、本研究の一部は KEK-PF と日立製作所の共同研究 (課題番号 2012C211) として KEK-PF の BL-11B で行われた。

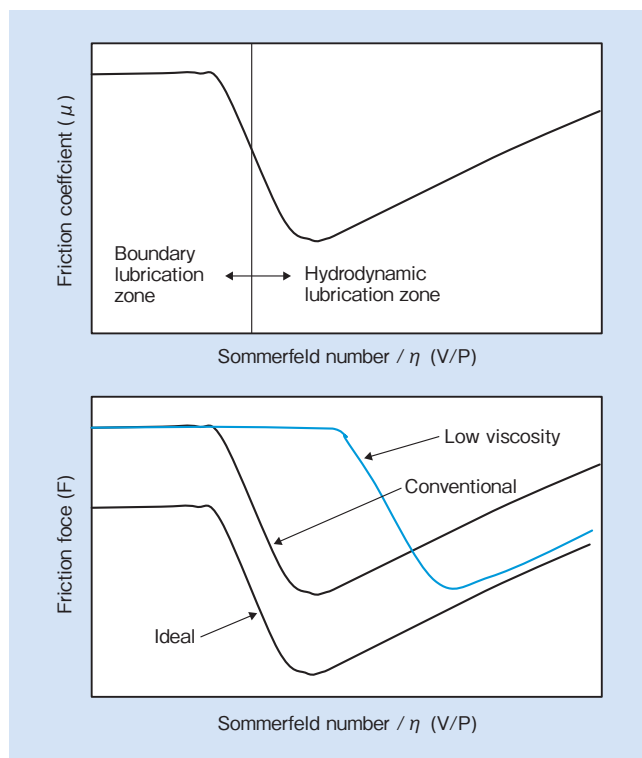


図 16 ストライベック線図の模式図  
Fig. 16 Schematic drawing of Stribeck curve

## 引用文献

- 1) 久保田邦親, 阿部行雄, 小松原周吾「ハイテン成形性に優れた冷間金型用鋼の開発」, 素形材 vol.12, (2007) p.10-12.
- 2) K.Kubota, et al.Wear Volume 271, Issues 11-12, 2 September 2011, p.2884-2889.
- 3) 久保田邦親, 大石勝彦, 田村庸: 材料とプロセス Vol.25, No.2 (2012) p.1032.
- 4) 久保田邦親, 上田精心, 庄司辰也, トライボロジー会議 2014 春姫路予稿集 C21.
- 5) A.C.Ferrali et al., Phil. Trans.R.Soc.Lond. A362 (2004), p.2477-2512.
- 6) 渡辺信淳 編著:「グラファイト層間化合物」近代編集社 (1986) p.193-195.
- 7) 久保田邦親, 上田精心, 大石勝彦, 田村庸: 日本金属学会秋季講演大会概要集 (2013) p.703.
- 8) J.L.Mansot, K.Delbe, P.Baranek, P.Thomas, F.Boucher, et al 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum 2013, Sep 2013, Lyon, France.
- 9) 久保田邦親, 上田精心, 大石勝彦, 田村庸: トライボロジー会議 2013 秋福岡予稿集 D42.
- 10) 久保田邦親, 上田精心, 庄司辰也, 田村庸: 日本塑性加工学会講演論文集 春 (2014) p.629.
- 11) S.Mori: JTEKT Eng. Journal No.1008 (2010) 2-12
- 12) 中田尚男: 「有機偶数電子イオンのフラグメンテーションにおけるマスシフト則」 J.Mass Spectrom.Soc.Jpn.vol.50, No.4 (2002) p.173-188.
- 13) 桜井俊男: 「潤滑の物理化学 第二版」幸書房 (2004) p.245-248.
- 14) メートランド・ジョーンズ「ジョーンズ有機化学(下)」東京化学同人社 (2000) .
- 15) C.C.yang and S.Li: J. Phys. Chem. C 112, (2008), p.1423-1426.
- 16) 後藤成志 村木正芳, 「硫黄-リン系極圧添加剤における無灰系摩擦緩和剤の摩擦・摩耗特性」トライボロジスト第 51 巻 第 5 号 (2006), p.383-390.
- 17) 藤田悦夫, 久保田邦親, 舛形芳樹, 三奈木義博 国際特許 WO2004/003246.



久保田 邦親  
Kunichika Kubota  
日立金属株式会社  
高級金属カンパニー  
冶金研究所  
博士 (工学)



上田 精心  
Seishin Ueda  
日立金属株式会社  
高級金属カンパニー  
冶金研究所  
技術士 (金属部門)



庄司 辰也  
Tatsuya Shoji  
日立金属株式会社  
高級金属カンパニー  
冶金研究所