

高面圧すべり接触におけるステンレス鋼の摩擦・摩耗特性(2)

-水溶性潤滑油の効果-

岩坂 明*・岸本 広大*・中辻 武**

Friction and Wear Properties of Stainless Steel under High Pressure in Sliding Contact(2) -The effect of water solubility lubricants-

Akira IWASAKA, Kodai KISHIMOTO*, Takeshi NAKATSUJI**

ABSTRACT

Boundary lubrication can easily be broken to yield severe adhesion when subjected to high pressure sliding contact. In such a case, so-called extremely pressure additives are usually added to the mineral oil to protect the surfaces from severe wear and seizure. It is almost the same for the lubrication of deep drawing. The present authors conducted the friction tests for such water solubility lubricants as, 300E, 300S, 300S-S, 300S-ZnP and solid lubricants by using a four-ball tester to clear the difference between their protection mechanisms for wear and scuffing. In thus way, we could find an adequate guideline for right selection of additives suited to the encountered problem. However, an adequate guideline for stainless steel of being apt to yield severe adhesion could not be found yet. Therefore, we conducted the friction tests for stainless steel.

Keywords: tribology, EP additives, high pressure, severe wear and scuffing

1. はじめに

高荷重の圧延や深絞り等の塑性加工における工具と被加工材の接触面間は、金属接触が支配的な状態となり、厳しい潤滑状態になる場合が多い。このような状態では、熱の影響により金属表面に極度の摩耗や凝着および焼付きが生じやすくなり、加工面が荒れる場合がある。これらを防止するために、金属接触面に物理吸着膜や化学吸着膜を形成させる方法や、極圧添加剤を混入させ、熱を利用して化学反応膜を形成させる方法がある。

本研究では難加工材であるステンレス鋼を対象にし、環境面を考慮し、水溶性潤滑油剤を使用した時の加工性について検討を試み、鉱油系潤滑油剤(以下、不水)を使用した過去の実験データとの比較を行った。

具体的な水溶性潤滑油剤の種類としては、市販のダイファン 300E と新しく開発した 300S, 300S-S, 300S-ZnP を使用した。これら全ては接触面に物理吸着膜を形成させる OH 基を有している。また、300S は 300E に界面活性剤が添加されているもので、300S-S は化学反応を主体と

する硫黄系極圧添加剤が 5%添加されており、300S-ZnP にはリン酸亜鉛系極圧添加剤が 5%添加⁽¹⁾されている。極圧添加剤は、熱によって金属と反応し、硫化鉄被膜、リン酸鉄被膜、塩化鉄被膜といった融点の高い膜を形成する。固体潤滑剤は、接触中に粒子を形成するものであり、その粒子が金属の接触表面の粗さに入り込み、それが膜となり二面を物理的に分離する。

実験は、一般的指標を得るために、高速四球形摩擦試験機を用い、すべり速度を一定、荷重を 3 段階に変化させ摩擦実験を行った。本報ではその結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 実験は図 1 の高速四球形摩擦試験機を使用した。試験機の主要部である、試料油容器を拡大したものを図 2 に示す。試験球は、固定球には直径 1/2 インチ SUS304 ステンレス鋼(以下、304 鋼)を用い、回転球には工具を想定し、同径の Si₃N₄セラミック球(以下、Si₃N₄)、SUJ2 高炭素クロム鋼(以下、SUJ2 鋼)の 2 種を用いた。加工対象である SUS304 ステンレス鋼のビッカース硬度は硬

* 神戸高専専攻科 機械システム工学専攻

** 神戸高専機械工学科 教授

度測定したHV284(2780[MPa])を用いた。また、それぞれの試験球の表面粗さはラッピングにより算術平均粗さRa=0.01 μ mに仕上げられていた。

固定球は3球、回転球は1球使用。オイルカップの下から油圧により負荷をかけ、回転球のみ回転させ、オイルカップを固定するトーションバーに貼り付けられたひずみゲージによって、ひずみ量 γ を測定し、2面間の摩擦係数 μ を算出する。また実験後に万能投影機にて摩耗痕径を測定し、摩耗痕の大きさからも検討を行う。



図1 高速四球形摩擦試験機.

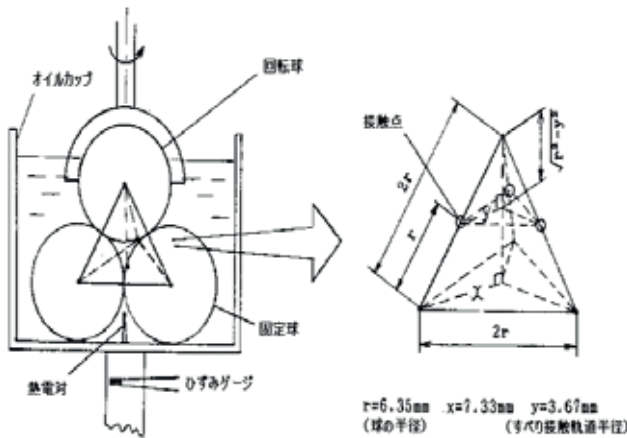


図2 試験装置主要部.



図3 万能投影機.

2.2 実験条件 負荷荷重は荷重比 α で定義される。荷重比 α とは、荷重を一般的にするための無次元量である。

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{HV} \quad \dots(1)$$

σ_{\max} =最大ヘルツ応力[MPa]
HV=ビッカース硬度[MPa]

ただし、0.10 $<\alpha<$ 0.20は低荷重、0.20 $<\alpha<$ 0.35は中荷重、 $\alpha>$ 0.35は高荷重にそれぞれ分類される。試験で与えた荷重比は、0.5(高荷重)、0.7(厳しい高荷重)、0.8(超高荷重)の3段階⁽²⁾とした。回転球の回転速度は1000[rpm]、試験時間は900[sec]で行った。ただし、HVは一般的指標を得るために、JIS法やshell法で規定されているSUJ2高炭素クロム鋼の硬度、HV(7840[MPa])を用いた。またこれは、Cr入り冷間・熱間金型材料の材質に近い。

3個の固定球と上部回転球間に荷重Wが油圧により加えられると、単位球あたりの垂直荷重Pは、幾何学的に式(2)のように表される。

$$P = \frac{W}{\sqrt{6}} \quad \dots(2)$$

測定したひずみ量 γ を摩擦モーメントTに変換し、摩擦係数 μ を式(3)から計算する。

$$\mu = \frac{T}{0.011 P} \quad \dots(3)$$

μ : 摩擦係数 T: 摩擦モーメント[N \cdot m]
P: 単位球あたりの垂直荷重[N]

3. 実験に関わる原理

3.1 実験における目標摩擦係数と境界潤滑 図4に相対運動している接触2面間の潤滑状態を示す。この潤滑状態は摩擦係数により次のように区分される。本研究では、境界潤滑の代表値である摩擦係数 μ が0.08以下になることを目標としている。

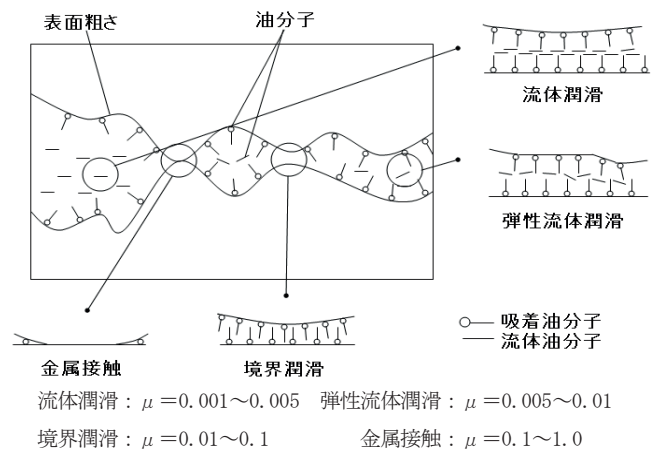


図4 潤滑状態の種類.

3.2 境界潤滑における油性と油膜強度 油性とは、境界潤滑状態において金属表面に油分子が物理吸着または化学吸着膜などを構成して摩擦を減少させる性質をいう。油性が高いとは、金属表面にこのような吸着膜を形成して摩擦を減少させる能力が高いことをいう。摩擦を減少させる要因となる物理吸着、化学吸着、化学反応を模式図を用いて順に説明する。

3.2.1 物理吸着と化学吸着 油性を高めるために、油に油性剤を添加するが、油性剤には物理吸着を生じるOH基と化学吸着を生じるCOOH基がある。物理吸着とは潤滑剤と金属表面が電氣的に結合することである。一般に可逆的であり、熱によって脱離するので低摩擦発生条件の場合に限られる。物理吸着の模式図を図5に示す。

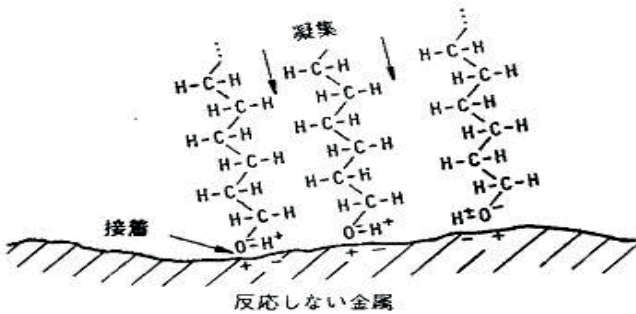


図5 物理吸着の模式図.

化学吸着とは、潤滑剤の分子が化学結合し、金属石けんの膜を形成する。これは一般的に可逆的であり、化学吸着膜による潤滑は中程度の荷重、温度、すべり速度で可能であり、過酷な運転条件では膜は破断する。化学吸着の模式図を図6に示す。

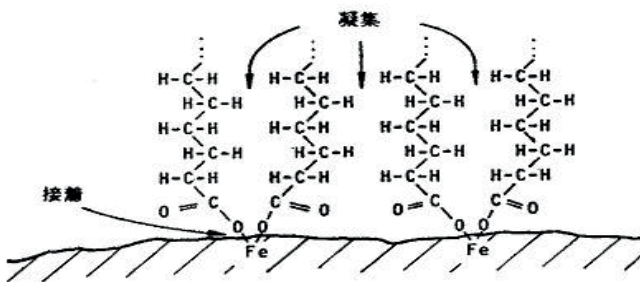


図6 化学吸着の模式図.

3.2.2 化学反応 さらに油性を高めるために、極圧添加剤を添加する。多くの極圧添加剤は、硫黄S、リンP、塩素Clを含んでおり、熱によって金属と反応して硫化物、リン酸化物、塩化物といった融点の高い化合物を形成する。これは物理吸着膜や化学吸着膜よりも安定であり、高荷重、高温、高すべり速度条件に適している。硫黄系極圧添加剤は硫化ラードがよく用いられ、耐焼付き性に優れている。リン系極圧添加剤は、アミノフォスフェートがよく用いられ、耐摩耗性に優れている。また、2種類を混ぜたものもよく用いられる。それは自動車用であ

る。さらに良好な潤滑作用が得られるものとしてCl-P系がある。これは塩素化パラフィンが瞬時に下地と反応して、塩化鉄皮膜を形成してそこにリンが溶解して、すぐに下地の鉄と反応するという性質を有する。化学反応例の模式図を図7に示す。

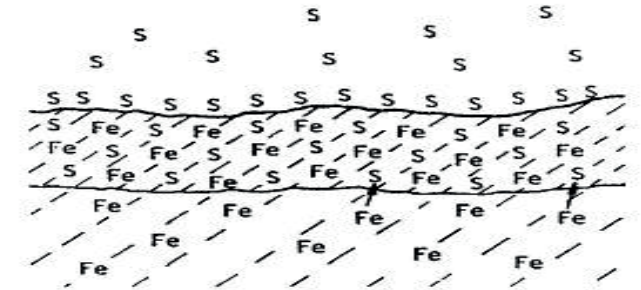


図7 化学反応例の模式図.

4. 実験結果および考察

4.1 不水溶性潤滑油における摩擦係数の変化

回転球にSUJ2鋼を使用した、 $\alpha=0.5$ の場合の摩擦係数の変化を図8に示す。図において、上矢印は実験中に焼付いたことを表している。P、S-P、 MoS_2 添加油を使用した場合、良好な潤滑状態を保つことができた。しかしそれ以外では焼付き、 $\alpha=0.7$ に上げた場合、全て焼付くという結果に至った。これらの結果から、工具材料としてSUJ2等の鋼系を使用するのは望ましくないと考えられる。

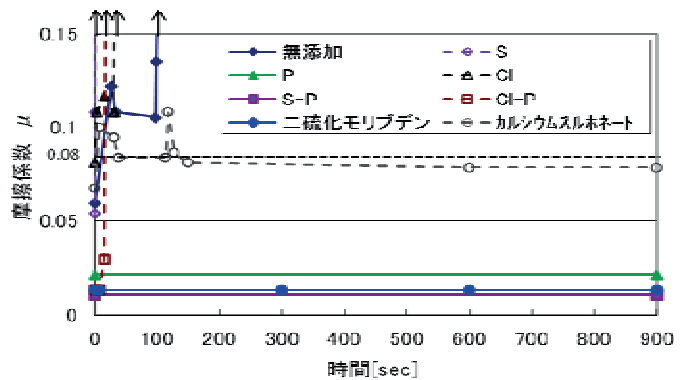


図8 回転球:SUJ2鋼 摩擦係数($\alpha=0.5$), 不水.

次に、回転球にセラミックを使用した場合の摩擦係数の変化を図9($\alpha=0.7$)、図10($\alpha=0.8$)に示す。

まず $\alpha=0.5$ の場合、全ての潤滑油が良好な潤滑状態を保つことができた。図9($\alpha=0.7$)の場合でも、 $\alpha=0.5$ よりも荷重が大きいので、不安定なものもあるが、全ての潤滑油が、目標値である $\mu=0.08$ 以下の値をとることができている。セラミックとの組み合わせは、鋼とは逆に親和性の低い組み合わせであることが要因であると考えられる。

図10($\alpha=0.8$)では、無添加の潤滑油の場合焼付き、P系を添加した潤滑油の場合、目標値よりもやや高い摩擦係数をとるという結果となった。それ以外の潤滑油は目標値よりも低く、良好な潤滑状態を保つことができた。摩擦

係数から見ると、工具はセラミックを使用すれば良いと考えられる。

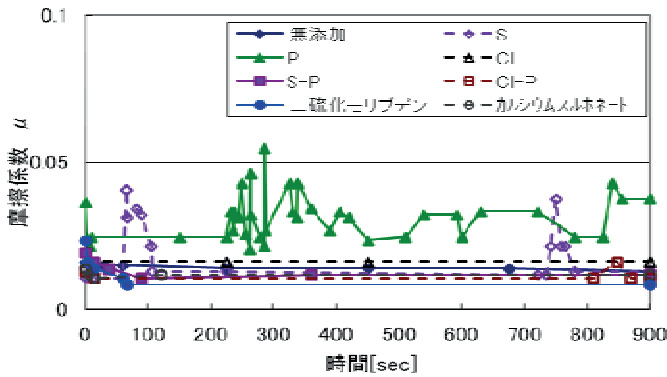


図9 回転球:セラミック 摩擦係数(α=0.7), 不水.

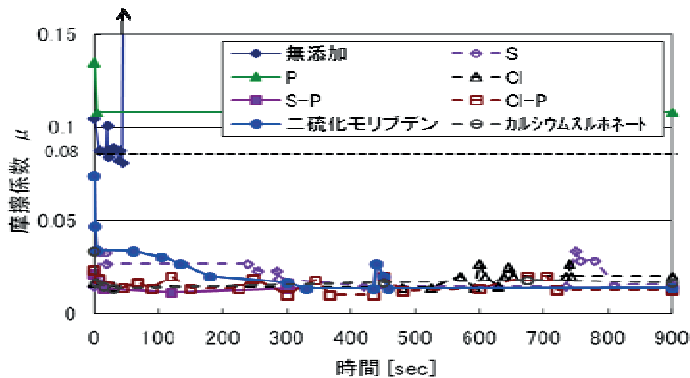


図10 回転球:セラミック 摩擦係数(α=0.8), 不水.

4.2 水溶性潤滑油における摩擦係数の変化 潤滑油を水溶性に変えて実験を行った場合について、検討を行う。回転球はセラミックを使用し、実験を行った。図11 (α=0.7) に摩擦係数の変化を示す。

水溶性潤滑油を使用した場合、α=0.5では全ての潤滑油が良好な潤滑状態を保つことができた。図11 (α=0.7)の場合でも、全ての潤滑油が目標値以下の値をとることができた。しかしながら、α=0.8に上げた場合、全て焼付くという結果に至った。

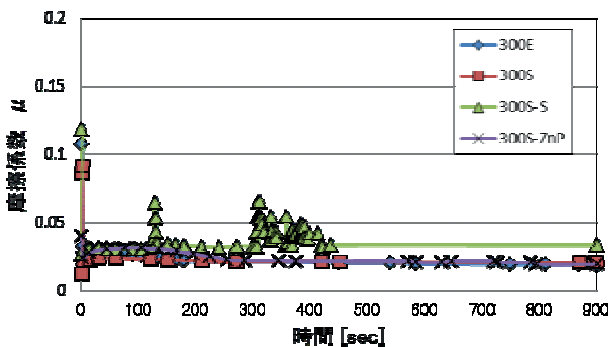


図11 回転球:セラミック 摩擦係数(α=0.7)水溶性.

4.3 水溶性潤滑油における摩耗痕径による比較 図12に

α=0.7の時の摩耗痕による比較を示す。摩耗痕径は、接触面の凝着の指標と捉えられ、この値が小さいほど、耐凝着性は高いと考えられている。図中の破線は式(4)から求めた摩耗痕径の理論値 dt を示す。

$$dt = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi \sigma_y}} \quad \dots(4)$$

ただし、 $\sigma_y = HV/3$, P=回転球と固定球1個当たりの垂直荷重、 σ_y =材料の表面流動応力、HVは304鋼の硬さである2780[MPa]を使用した。304鋼はオーステナイト系であり、通常HVは1960[MPa]以下、耐力は205[MPa]だが、球を線材から旋削・研削・ラッピングで仕上げる過程で加工硬化が大きく、表面近傍はマルテンサイト状態に変化していると考えられ、表面硬度HVは実測値2780[MPa]と上昇した。図から見て分かるように、300Eと300Sが比較的小さい摩耗痕となっている。300S-Sや300S-ZnPの摩耗痕は300Eや300Sに比べて大きくなっている。4種類の水溶性潤滑油剤の摩耗痕の比較からは、極圧添加剤を加えない300Eが最も良好な潤滑油剤と言える。極圧添加剤は摩擦をある程度低下させるが、摩耗を促進するようである。

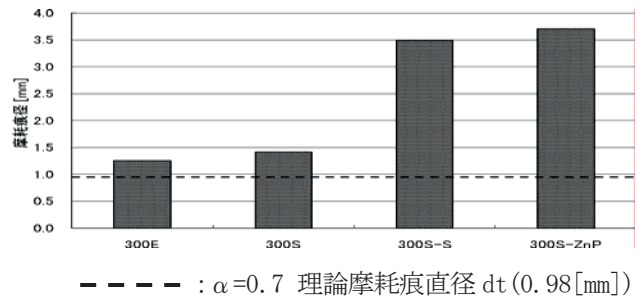


図12 摩耗痕径による比較.

5. おわりに 加工対象をステンレス鋼とした場合の工具材料は、親和性の観点から、鋼よりもセラミックの方が良いという結果が得られた。また、環境面を考慮しα=0.7までは水溶性を使用するべきであると考えられる。α=0.8では不水を適用する方法しかないという結果が得られた。

参考文献

- (1)Daisuke YAGI, Yusuke OYAMA, Takeshi NAKTSUJI and Akihiko OKUTSU: “Tribological Properties of Water-soluble Processing Oil Additives and Extreme Pressure Additives under High Pressure in Sliding Contact
- (2)”, Proceedings of CJIGHMTMD-2008,pp239-244

謝辞

以上の研究は、科研費(21560156)の助成を受けたものである。