

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(1)

- 鉱油系潤滑油の効果 -

岸本 広大*・岩坂 明*・中辻 武**

Friction and Wear Properties of Stainless Steel under High Pressure in Sliding Contact(1) -The effect of additives in the mineral oil-

Kodai KISHIMOTO*, Akira IWASAKA*, 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 non additive, S type, P type, CI type, S-P blended type, CI-P blended type 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. 緒言

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、加工対象を難加工材料としてよく知られている、SUS304 ステンレス鋼とし、鉱油系潤滑油を使用したときの塑性加工性について検討を行った。

具体的な添加剤の種類としては、硫黄(S)系単体添加剤、リン(P)系単体添加剤、塩素(CI)系単体添加剤、S-P ブレンド添加剤、CI-P ブレンド添加剤の極圧添加剤や、二硫化モリブデン(MoS₂)やカルシウムスルホネート(SO₃CaSO₃)の固体潤滑剤を用いた。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. 原理

2. 1 潤滑の種類 図1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。

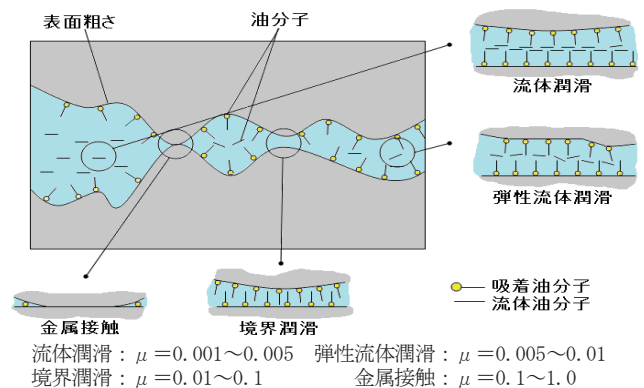


図1 潤滑状態の種類.

* 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

3. 実験装置および実験方法

3. 1 実験装置 実験は図 2-1 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 2-2 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 Si_3N_4 セラミック球(以下, Si_3N_4)、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 $R_a=0.01\mu\text{m}$ 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。また実験後に図 3 の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 2-1 高速四球形摩擦試験機。

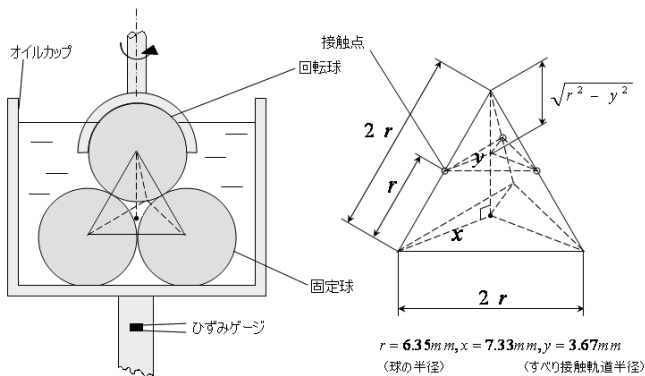


図 2-2 試験装置主要部。



図 3 万能投影機。

3. 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 を図 4 を用いて、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・m]

P : 単位球あたりの垂直荷重 [N]

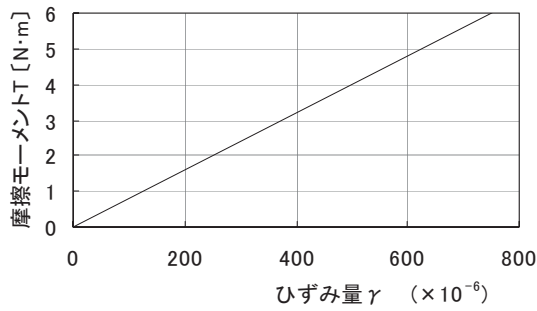


図4 ひずみ量 γ と摩擦モーメント T の関係.

3. 3 潤滑油 試料油は一般的に広く用いられる ISO VG 32 タービン油を基油とし、様々な極圧添加剤や固体潤滑剤を混入させたものを用いた。添加剤の種類は、S系、P系、Cl系、S-P系、Cl-P系の5種類の極圧添加剤と、 MoS_2 系、 SO_3CaSO_3 系の2種類の固体潤滑剤を使用した。混入した添加剤の成分量を表1に示す。

表1 極圧添加剤、固体潤滑剤の種類と添加量.

各添加油	添加剤の内訳 (質量%)
S系単体添加油	S添加剤5%
P系単体添加油	P添加剤2%
Cl系単体添加油	Cl添加剤4%
S-P系 ブレンド添加油	S添加剤5%
	P添加剤2%
Cl-P系 ブレンド添加油	Cl添加剤4%
	P添加剤2%
二硫化モリブデン系 単体添加油	MoS_2 添加剤5%
カルシウムスルホネート系 単体添加油	SO_3CaSO_3 添加剤10%

4. 実験結果および考察

4. 1 各添加剤における摩擦係数の変化 回転球にSUJ2鋼を使用した、 $\alpha=0.5$ の場合の各添加剤における摩擦係数 μ の変化を図5に示す。摩擦係数の図において、上矢印は摩擦係数 μ が0.7に達しているものであり、実験中に焼き付いたことを表している。また、目標値である摩擦係数 $\mu=0.08$ を図中に太い破線で示している。

P、S-P、 MoS_2 添加油を使用した場合、非常に良好な潤滑状態を保つことができるという結果が得られた。しかし、 SO_3CaSO_3 添加油では摩擦係数が目標値よりも大きく、その他の潤滑油では、実験開始直後に焼き付くという結果に至った。焼き付いた原因としては、親和性が高く、凝着が起りやすい組み合わせであることが原因だと考えられる。

この組み合わせで α を0.7に上げて実験を行った場合、0.5で焼き付かなかったものも、全て焼き付くという結果に至った。これらの結果から304鋼を加工する工具材料に鋼系を使用するのは望ましくないと考えられる。

次に回転球に Si_3N_4 を使用した場合の各添加剤における摩擦係数 μ の変化を図6($\alpha=0.5$)、図7($\alpha=0.7$)、図8($\alpha=0.8$)に示す。

図6($\alpha=0.5$)の場合、全ての潤滑油で良好な潤滑状態を保つことができている。図6~図8より、SUJ2鋼を使用するよりも Si_3N_4 を使用する方が良いということがわかった。

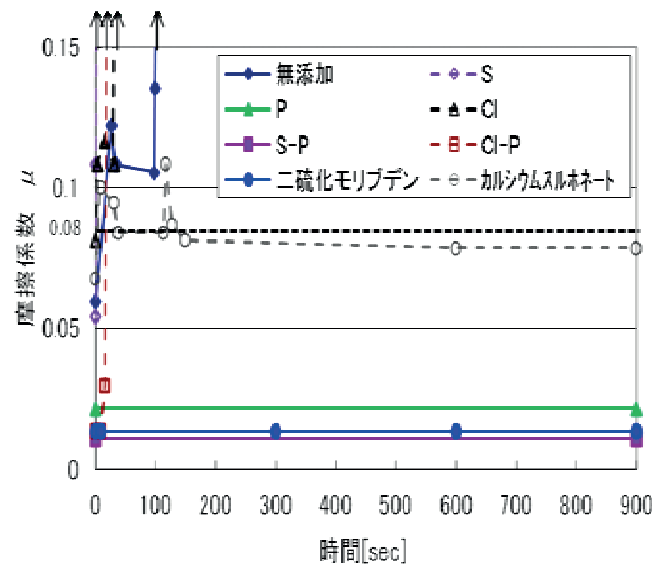


図5 SUJ2鋼の回転球を使用して、 $\alpha=0.5$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化.

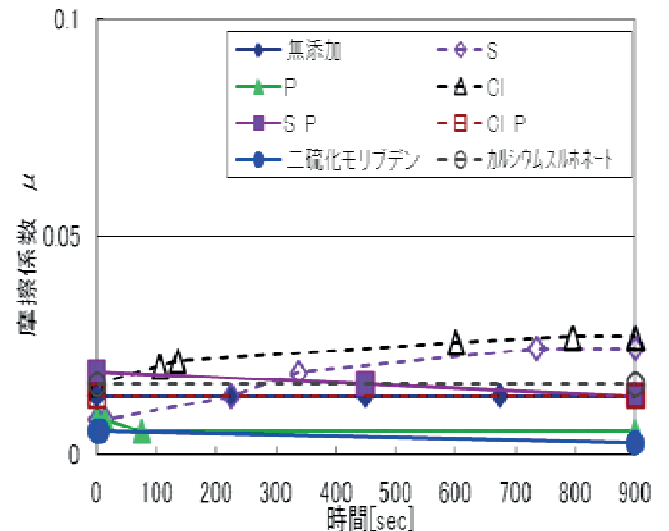


図6 Si_3N_4 の回転球を使用して、 $\alpha=0.5$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化.

図7 ($\alpha=0.7$)の場合、 $\alpha=0.5$ よりも荷重が大きいため、少し不安定なものもあるが、全ての潤滑油で目標値である $\mu=0.08$ 以下の値をとることができている。Si₃N₄ 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大きな要因であると考えられる。

図8 ($\alpha=0.8$)では、無添加潤滑油の場合焼付き、P系添加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り、それ以外の潤滑油で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。摩擦係数からみると、工具はセラミックを使用すれば、潤滑油は無添加とP系添加油以外、どれを使用してもよいと考えられる。

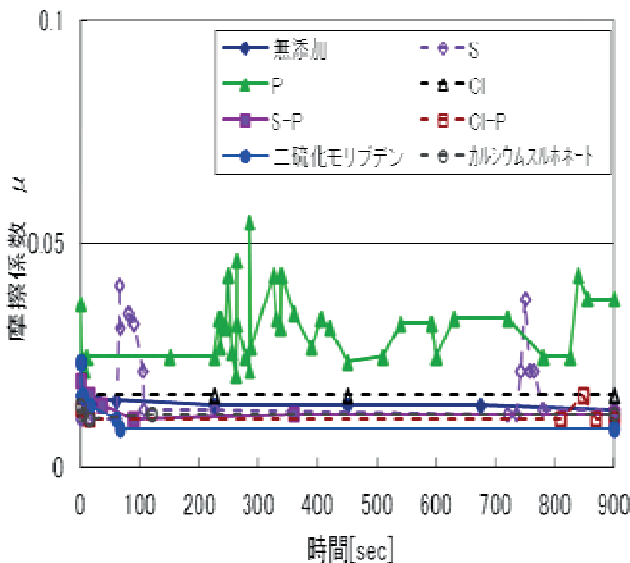


図7 Si₃N₄の回転球を使用して、 $\alpha=0.7$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化。

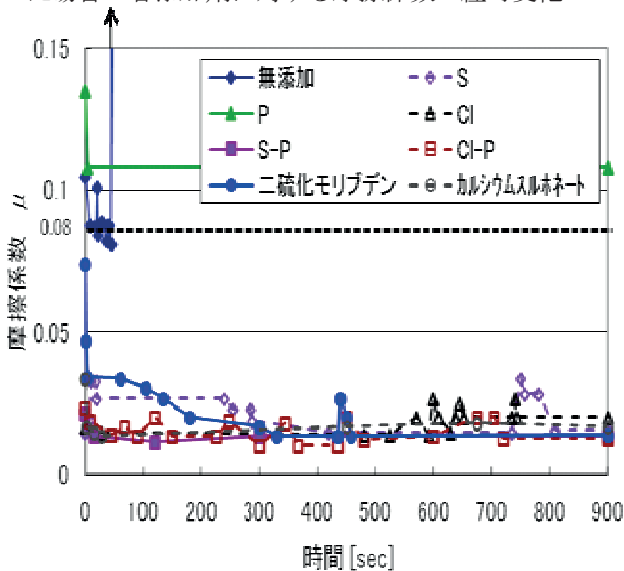


図8 Si₃N₄の回転球を使用して、 $\alpha=0.8$ の条件で試験した場合の各添加剤に対する摩擦係数の経時変化。

4. 2各添加剤における摩耗痕径の変化 図9に回転球をSi₃N₄とした場合の304鋼に生じた摩耗痕径を示す。摩耗痕径は図3の万能投影機を使用し測定した。摩耗痕の値は、固定球3球の摩耗痕の平均値をとった値である。

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。図中に示した横実線、横破線、横一点鎖線はそれぞれ、各荷重段階で式(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個あたりの垂直荷重、 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]であるが、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。

摩耗痕の大きさは多少の差が見られた。 $\alpha=0.7$ までは反応性の高いCl系や固体潤滑剤であるMoS₂系やSO₃CaSO₃系が材料の流動による避けられない理論摩耗痕径 dt 程度まで小さくなっていた。固体潤滑剤に関しては、ある程度の荷重までは、2面を分離する方が効果があるということを物語っている。しかし、 $\alpha=0.8$ ではCl系、S-P系、Cl-P系の方が小さくなるという結果になった。これは超高荷重下では、固体潤滑剤が破壊され凝着防止効果が低く、反応熱を必要とする極圧添加剤の方が効果が大きいことを示している。

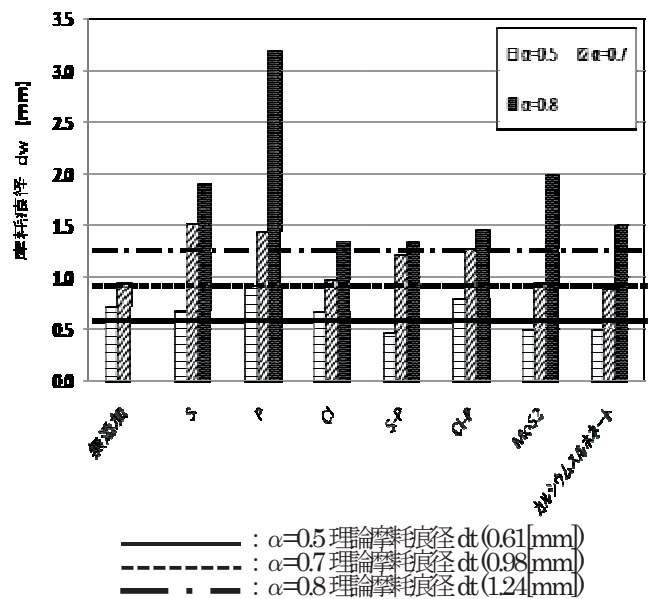


図9 摩耗痕径による比較。

5. 結言

SUS304 ステンレス鋼の深絞りには、それとの親和性の低さからセラミック工具が有効という結論が得られたが、荷重の大きさによって使用する潤滑油を変える必要があるという結果も得られた。 $\alpha=0.7$ の厳しい高荷重の下では、Cl系および MoS_2 系や SO_3CaSO_3 系、 $\alpha=0.8$ の超高荷重下ではCl系やS-P系、Cl-P系を使用するほうが加工面は安定すると考えられる。

最近では環境面を考慮し、Clフリーの方向にあるので、 $\alpha=0.7$ の厳しい高荷重下では二硫化モリブデンやカルシウムスルホネートの固体潤滑剤が、 $\alpha=0.8$ の超高荷重下ではS-P系極圧添加剤を使用する必要があると思われる。

参考文献

- (1)トライボロジー, 1980, 講談社, 著者 Hチコス 監訳者桜井俊男 pp.124-130.
- (2)トライボロジー, 1998, 理工学社, 山本雄二 兼田楨宏 pp.13-14.
- (3)トライボロジー概論, 1982, 養賢堂, 木村好次 岡部平八郎 pp.34-36.
- (4)Reaction Characteristics of Cl-P Blended EP Additives in Early Stages of Severe Sliding Contact, Japanese Journal of Tribology, Vol.42, No.11(1997) T.Nakatsuji, A.Mori pp.1273-1285(Allerton Press, Inc.).

謝辞

本研究は平成 21~23 年度科研費基盤研究(c) (21560156)の助成を受けたものである。