四球試験における球材質の影響**

(第1報 超硬球による切削油剤の試験)

松永 正久* 竹中 規雄* 鳴沢 勇平* 内 藤 敏*

The Effect of Ball Material with a Four-Ball Apparatus.

(Part 1. Studies on cutting fluid using an apparatus with steel ball and tungsten carbide balls.)

Masahisa MATSUNAGA, Norio TAKENAKA, Yuhei NARUSAWA and Bin NAITO.

The frictional behavior of some cutting fluids are examined with a four-ball apparatus. The balls for usual four-ball apparatus are made of steel, but in this experiment a steel ball for the upper frictional member and tungsten carbide balls for the lower members are used, because the friction in cutting is the one between steel and tungsten carbide. At the low speed the frictional behaviors between steel and tungsten carbide is somewhat different from the behaviors between the steel each other. The difference is explained in view of the conductivity of heat. At high speed, however, the difference is insignificant.

The effects of chlorine and sulphur are discussed. In the experiment, it is found that the higher the chlorine content, the better frictional behaviors are obtained. The inclusion of sulphur does not improve the frictional behavior, but increase the critical load.

1. 緒 言

四球潤滑油試験機は潤滑油の特性をしらべるのに便利な試験機であるので、最近では切削油剤・研削油剤・バレル研摩用コンパウンドなどの試験にも使用されている。しかしこの試験機をこのような油剤の特性の試験に用いることは次の二つの難点がある。まず第1はその材質であつて、通常四球試験に用いられる鋼球対鋼球の接触においては、切削・研削などの場合と材質的に相違があるので、材質を合わせるために、切削油の場合は一方の球を切削工具材料に、研削油の場合は研削砥石に、バレル研摩用コンパウンドの場合においては同用チップで行なうべきである。第2の難点はその摩擦速度であつて、四球試験機の標準摩擦速度 6.9 m/min では切削・研削の場合に比較してあまりにも低い。

この研究の目的はこれらの点よりみて、実際の切削・研削の場合に近い条件で切削油剤・研削油剤の摩擦特性をしらべるために球材質をかえることと、摩擦速度をあげることに主眼を置くものである。

2. 装置および方法

筆者の一人はすでにバレル研摩用コンパウンドについ

て、一方の球をバレル研摩用チップとした場合の実験結果を報告した¹⁾。

この実験もその報告と同一の装置を用いた。すなわち装置は振興造機製四球潤滑油試験機を改造したものであり、摩擦力は板ばねのひずみを抵抗線ひずみ計によつて自記させるようにした。ひずみ計の回路は図1に示すよ

図1 抵抗線ひずみ計の回路
(A, B : A', B' でブリッジ回路構成)

* 東京大学生産技術研究所

** 昭和36年4月精機学会春期講演会において講演

うにした。

荷重を付加するための油圧ポンプは市販の装置においては主軸と同時に回転するようになっており、実験結果のうち(8)まではこのような装置を用いた。この装置を用いると荷重を変更するときには主軸は回転したままであるので、この上昇の間の過渡現象が入ってくる。また断続的に荷重を上昇したり、一定の荷重で回転を開始することがむずかしい。それゆえに実験の途中において、これを切り離して、油圧ポンプだけを別箇のモータで駆動するようにした。このようにすることによって後にみられるように実験上種々の便宜がある。図2は改造

図2 実験装置の写真

した装置の写真であつて、A, B は改造箇所を示し、A は抵抗線ゲージを取り付けた部分、B は油圧ポンプと同駆動用モータとを示している。

単位球当たりの垂直荷重 p は圧力シリンダの油圧 P kg/cm² より次のように表わされる。

$$p = \left(\frac{\pi}{4} D^2 P - 8.6 \right) / \sqrt{6}$$

ここに D は油圧シリンダの直径 cm, 8.6(kg) は油圧シリンダの自重である。この報告においては主として p をもつて球にかかる荷重を表わしてある。使用した装置においては $P \geq 5.0$ kg/cm² のときには

$$p \approx 20 P$$

で表わされる。

この切削油剤の試験においては下方3箇の球を超硬にして実験した。用いた超硬の材質はD1であり、その成分を表1に示す。

表1 用いた超硬の成分(%) (D1)

	WC	Ti	Co	C
D1	88~92	/	3~6	5~7

3. 結 果

(1) 極圧添加剤の作用

摩擦トルクの記録の模型は図3に示す如くであり、通

通電 極定 の座	記 号	記録の模型 (←右より圧へ圧力上昇)	線	備 考
安 定	A			右より圧が 小さくて 全 体として見ら るとほぼ平行直 線となすもの も含む。
	B			$L' = 0$ を含む $L > \frac{L'}{2}$ の型
	C			
や や不安 定	A'	A 型		
	B'	B 型		
	C'	C 型		
不 安 定	A''	A 型		
	B''	B 型		
	C''	C 型		
焼 き付 き	D			

図3 摩擦トルクの模型図

常の場合には荷重を増加するとともに安定より次第に不安定に移り、ついに焼き付きを生ずるにいたる。

しかし極圧添加剤があると、その模様は少しちがつている。結果の一例を図4に示す。すなわち右より荷重を増してゆくと、ある荷重において油性向上剤の効果が少なくなつて、トルクは比較的不安定になるが、さらに荷重を増すと、極圧添加剤の作用が始まり、摩擦トルクは比較的稳定になり、かつ摩擦係数も低くなる。

(2) 基礎試料

基礎試料としては乾燥、四塩化炭素および二硫化炭素についておこなつた。乾燥状態における結果は図5に示す。鋼球対超硬球の高圧における摩擦係数は0.4程度で割合高いけれども、鋼球同志および鋼球対砥石球の場合に比して低く、破断圧力のはるかに高い。これは砥石球

図 4 極圧添加剤の作用

図 5 乾燥状態における摩擦係数

図 7 二硫化炭素を用いた結果

図 6 四塩化炭素を用いた結果

の場合は主作用が切削であること、鋼球同志の場合は同種材料の組み合わせであることから考えて当然といえよう。

塩素化合物の基本的のものとしては四塩化炭素を選ん

だ。極圧添加剤として作用する塩素は $-CCl_3$ 基を含むものもつとも効果があることはすでに発表されており²⁾、この最も基本的な化合物が CCl_4 であるからである。得られた結果は図 6 に示す如くであり鋼球同志の場合の極圧における摩擦係数はきわめて低いことがわかる。しかし鋼球対超鋼球の場合には摩擦係数は高くなり、破断圧力は低くなる。したがって塩素は超硬にはほとんど作用を及ぼさないものと考え

られる。超硬対超硬を用いると当然この傾向は強く現われる。

二硫化炭素を用いた結果は図 7 に示す如くであり、 $P=220\text{kg}$ 程度の荷重でいずれも摩擦係数の急激な上昇がおこる。いおうは高压における摩擦特性を改善するものとして知られているが²⁾、二硫化炭素にそのような特性のないのは、この液体が揮発しやすいこと（実験中 200 kg をこえると沸とうする）と、安定であつて金属表面に硫黄化合物を生成せぬためと考えられる。

(3) 水溶性塩化油

試験に使用した切削油は水溶性切削油（エマルジョン・タイプ）に塩素又は塩

素及びいおうを添加したものであり、その添加量は表 2 に示す如くであり、No. 6 は基油である。

水溶性塩化油に対する結果は図 8 に示す。Cl を含有しない基油の破断圧力は図に示すように鋼球同志のとき

表 2 使用した切削油

番 号	Cl %	S %
No. 1	2	0
No. 2	4	0
No. 3	6	0
No. 4	4	0.5
No. 5	4	1.0
No. 6	0	0

ちがつて、基油の場合においても圧力と共に摩擦係数は低下する。これは極圧添加剤と共に基油に含まれる油性向上剤の作用によるものであろう。この場合低圧の場合においては Cl 2% 程度では基油の場合と大差がないが、4~6% 加えることによつて摩擦特性が改善される。しかし高圧の場合においては塩素量の影響はほとんどみられない。これは割合少量の Cl でも表面に塩化物を生成することができるためと考えられる。

(4) 水溶性硫酸塩油

さらに いおう を含む水溶性硫酸塩油についての結果を図 9 に示す。この場合 Cl 含有量 4% の場合よりも改善されるが、Cl 量 6% の場合と比較して大差はないことがわかる。

(5) その他の切削剤

市販の不水溶性塩化油、水溶性塩化油について実験した結果は図 10 に示す。いずれの場合においても超硬球を用いるときは破断圧力は向上するが、摩擦係数は高い。

(6) 稀釈度の影響

稀釈度をかえた場合の結果の一例を図 11, 図 12 に示す。図 11 は鋼球同志, 図 12 は鋼球対超硬球の場合である。いずれの場合においても傾向は図 8 及び図 9 と同様である。稀釈度の影響としては、稀釈するほど摩擦係数が大きくなっていることがわかる。ここに図示しなかつたが他の結果でも同様であるが、10倍と20倍とでは摩擦特性はそれほどちがわない。

(7) 回転速度の影響

前にのべたように回転数 200rpm の場合には鋼球同志を用いた場合と鋼球対超硬球を用いた場合とでは摩擦特性が比較的ちがっていたが、回転数を上昇すると、この相違は破断圧力を除いては比較的少なくなる。たとえば 1500rpm の場合の摩擦特性を図 13, 図 14, 図 15 に示す。この図には高速の場合における極圧添加剤の影響をも同時に示してある。この図より見てわかるように図 13 と図 14 との摩擦特性には 200rpm におけるような差がない。

この理由は現在のところでは明らかではないが、両者の熱伝導率もその一因をなしているものと考えられる。

図 8 水溶性塩化油に対する結果

図 9 水溶性硫酸塩油に対する結果

は 120kg, 鋼球対超硬球のときは 200kg 程度であり、塩素を加えることによつて高圧における摩擦特性はいちぢるしく改善されることがわかる。超硬を用いた場合の 200kg 以下における摩擦特性は Cl の量 2~4% においては差がないが、6% 程度加えると改善される。また極圧における摩擦特性も Cl 量を増すことによつて改善されることがわかる。この結果によれば十分な極圧効果を与えるためには Cl 6% 程度が必要ながことが明らかであろう。鋼球対鋼球の場合においては超硬を用いたときと

図 10 市販切削油に対する結果

図 11 稀積度の影響 (鋼球同志)

図 12 稀積度の影響 (鋼球対超鋼球)

試験機の高転数: 1500 rpm

球の材質: 鋼: 鋼

切削剤: △基油, ○基油+Cl 2%

●基油+Cl 4%, ●基油+Cl 6%

図 13 1500rpm における摩擦特性 (鋼球同志の場合)

試験機の高転数: 1500rpm

球の材質: 上球: 鋼 下球: D1 超硬

切削剤: △基油, ○基油+Cl 2%

●基油+Cl 4%, ●基油+Cl 6%

図 14 1500rpm における摩擦特性 (鋼球対超鋼球の場合)

試験機の高回転数：1500 rpm.

球の材質 上球：鋼，下球：D1 超硬

切削剤：○基油(C14%含有)，◎基油+S0.5%，●基油+S1%

図 15 1500 rpm における摩擦特性 (いわゆる含む切削剤の場合)

鋼の熱伝導率は $0.10 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ であるのに対して超硬 D1 は $0.19 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ であり，超硬の方が高い。すなわち低速の場合には低い荷重において高温となり，極圧添加剤の効果が早く表われると共に図 6 に示すように塩素との反応性が鋼球の方が良いためと考えられる。事実図 8 を見てもわかる通り，極圧添加剤のきき始める p は鋼球同志の場合には $p=100 \text{ kg}$ 程度であるのに対し，鋼球対超硬球においては $p=200 \text{ kg}$ 以上である。

しかるに高速においては発生する熱量が多いために，伝導の効果があまりきかないで，両者はほぼ同じような温度になるためと考えられる。

図 13，図 14 を見ると分かる通り，摩擦係数の最大の点はいずれも $p=60 \text{ kg}$ 付近であり，この辺で極圧添加剤が効果を及ぼし始めるものと考えられ，この圧力は材質によらず等しい。

以上のような熱伝導率による仮設はあくまで推定であるが，鋼と熱伝導率のほぼ等しい S1 (熱伝導率 $0.10 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$)

試験機の高回転数：200 rpm

切削剤 ● No. 3, ▲ No. 5

球の材質 鋼-D1 超硬

図 16 稀釈度と耐圧荷重との関係

$^\circ\text{C}$) を用いて実験をすれば，もう少しはつきりすると思われるので，現在この実験を準備中である。

図 13 及び図 14 は高速摩擦における塩素の効果を示すものであるが，大体において C12% では効果が少なく，4%，6% となると効果が良く表われることを示している。

図 15 はさらにいおうの効果を示すものであり，S1% になると破断圧力がいちいちしく上昇していることがわ

図 17 稀釈度と耐圧荷重との関係

図 18 稀釈度と耐圧荷重との関係

かる。

(8) 耐 圧 荷 重

以上の各種の試験における条件をいろいろにかえた場合の耐圧荷重(油膜の破断する最高荷重 p_{max})を求めた。得られた結果は図 16, 17, 18 に示す如くである。

図 16 は 200rpm に対する結果であり、稀釈度の低い場合も高い場合も耐圧荷重が低い。稀釈度が高くなると耐圧荷重の増すのは冷却作用によるものと考えられ、40~50倍までは冷却効果がきいてきて耐圧荷重が増し、それ以上になると添加剤の濃度がうすくなるので、添加剤の効果が減少して耐圧荷重が減少するものと考えられる。

図17は750rpmの場合、図18は1500rpmの場合の結果である。これらの図は比較的ばらつくが、次のようなことがわかる。(i)耐圧荷重は回転数を増すほど低くなる。これは当然のことである。(ii)鋼対超硬の組み合わせを使用した場合には稀釈度を増すほど耐圧荷重は減少する。これは高速の場合には冷却性よりも極圧添加剤の作用の方が焼き付きを防止するのに有効であることを示している。(iii)鋼同志の場合にはこのような傾向はあまりみられず、耐圧荷重は稀釈度によってそれほど変化はない。(iv)いおうの効果は鋼対超硬の場合は顕著に表われるが、鋼同志の場合にはあまりはつきり表われない。

(9) 簡易試験法

以上のような試験が四球試験の常道であるけれども、もう少し簡便に試験する方法がある。それは均一荷重の条件で摩擦を行ない、そのときの最高摩擦係数と摩擦の安定するまでの時間とをとる方法である。前記の油圧ポンプを主軸駆動から切りはなしたのはこの目的に適している。

得られたトルクの記録の一例は図 19 に示す如くであり、これを整理したのが図 20 である。多少のばらつきはあるが、切削油の性能を比較できることがわかるであ

試験機の回転数: 750 R.P.M
球の材質: 鋼
切削油の稀釈度: 1:10
単位球当りの重直荷重: 57.6 Kg (油圧: 3kg/cm²)
回転時間: 10 min

図 20 簡易試験法による試験結果

ろう。

4. 結 言

四球試験において球の片方を超硬にした場合、及び回転速度を上昇した場合について試験をした結果次の結論を得た。

(1) 四球試験において 200rpm の場合においては鋼球同志及び鋼球対超硬球を用いたときには摩擦特性にちがいがあ。これは材質による特性のちがいと共に熱伝導率が両者いちちるしくちがうことによるものと思われる。

(2) ただし回転数を増加すると両者の特性は似てくる。これは伝導によって失われる熱よりも発生する熱量が多いために、両者の接触点温度があまりちがわないためと考える。

(3) 水溶性塩化油を用いたときは塩素 2% から 6% の範囲では塩素の多いほど結果は良い。

(4) いおうの効果は低速の場合にはあまり顕著に表われないが、高速になると効果を示す。これは現在までの他の実験結果と合っている。

図 19 簡易試験法によるトルク記録の一例

(5) 耐圧荷重は低速の場合にはある稀釈度のところで最高値となるが、高速の場合には稀釈度を増すほど低く出る。これは高速の場合には冷却性よりもいわゆる極圧性の方が重要なことを示している。また耐圧荷重に及ぼす いおう の効果は鋼対超硬の場合には顕著に表われるが、鋼球同志の場合にはあまりはつきり表われない。

(6) 四球試験機を用いる潤滑油の簡易試験法を示した。

今後はS 1を用いた試験、簡易試験法による実験、摩耗面積に関する検討などのほかに、表面に生成する化合

物に対する電子回折的研究については松永の手で、実際の切削試験との関係については竹中の手で検討を進めてゆく予定である。

この研究費の一部は文部省科学研究費（総合研究）の援助によるもので感謝の意を表わすと共に、試料を提供されたユシロ化学（株）に対し、深謝します。

(1961, 8月5日受付)

文 献

- 1) 松永：金属表面技術，11 (1960) 329, 12 (1961) 14.
- 2) P.I. Sanin 他：Wear 3 (1960) 200.