焼結摩擦材の摩擦性質

葉山房夫*・鹿野剛平**

Fusao Hayama and Kohei Shikano: Frictional Characteristics of Sintered Friction Materials. Frictional characteristics of sintered Cu-C, Cu-Sn-C and Cu-Sn-C-SiO₂ alloys used for lining of clutch and brake have been researched. Results are obtained as follows.

(1) As the porous sintered alloy has low modulus of elasticity, the surface contact is better than that of cast material. So it can be expected that the porous body has large coefficient of friction and good wear resistivity.

(2) Cu-C alloy needs to contain more than 2% of C for good wear resistivity, and Cu-Sn-C alloy needs to have more than 5% of C. And when the hardness of sintered material or mate steel is high, more carbon needs for good frictional characteristics.

(3) Cu-Sn-C alloy shows high friction compared with Cu-C alloy.

(4) When SiO₂ is added for friction material, the coefficient of friction gets to the high stable value more rapidly, especially at high temperature.

(5) And the friction reaches to the high stable value more quickly at high percentage of SiO₂, but in that case both sintered alloy and mate steel wear highly. So the reasonable content of SiO₂ is less than 6%.

(Received June 23, 1963)

I 緒言

焼結合金はクラッチやブレーキのライニングとしてよい特性を有するといわれて、近時それらの苛酷な摩擦条件用として広く用いられるようになってきている。これら粉末冶金製品が何故摩擦材としてよい特性を示すのか、鑄造合金と異なる理由は何かにについて考えてみると、第一はそれが多孔質体であること、第二は黒鉛や SiO₂ のような成分を添加含有させることのできることである。この二点に特に注目して、焼結摩擦材を解析するのは、その発展に資するところがあると考えて本研究を行った。

II 試料および試験方法

青銅系焼結合金について配合および製造条件を変えた試料を用いた。使用した銅粉、錫粉は Table 1 のようなもので、業者よりまとめて購入し、全実験を通じて同一のものを用いた。

摩擦試験片は摩擦面が5×5mm角で長さは10~20mmである。これを Fig. 1 に示す試験機で、外径75mmの

Fig. 1 Testing apparatus for wear.

鋼の回転輪の外周と摩擦したのである。試験機は摩擦速度、圧力を自由に変えられ、摩擦力を記録できるように

* 早稲田大学鑄物研究所 東京都新宿区戸塚町1の500

** 東洋カーボン株式会社

Table 1 Particle size of powder

Powder	+200	+250	+325	-325
Cu, Electrolytic	0~3	10~15	20~25	R
Sn, Pulverized	0~1	2~10	5~15	R
SiO ₂	0	100	—	—

なっている。

測定は、試料および銅リングの摩耗量、摩擦係数、試料の温度上昇について行なった。温度は試料中央に摩擦面に垂直に穿孔した直径 1.2mmφ の孔に熱電対を摩擦面より一定の距離まで挿入して行なった。

Ⅲ 実験結果及び考察

1 多孔性と摩耗および摩擦係数 まず Cu 90%, C 10% の合金を取上げ、内径 15mm のダイスで、高さ約 18mm に成型し、成型圧力、焼結温度を変え、焼結保持時間は 1hr とした試料を作成した。これより摩擦面が圧面に平行な面になるように試料を取り、摩耗試験を行

Fig. 2 Effects of compacting pressure and sintering temperature on wear of Cu-C (10%). (Pressure: 10kg/cm², Speed 92m/min)

Fig. 3 The coefficient of friction of some sintered friction materials and cast phosphor bronze sliding against hardened steel in: kerosene. (Speed: 14m/s)

Fig. 4 Stress-strain curves of copper at compression test (A: Cast copper, B, C: Sintered copper, Density of B=7.65, C=6.84)

なった。Fig. 2 はその結果で、摩擦条件は摩擦圧力 10kg/cm²、速度 92m/min、相手鋼は合金工具鋼第 3 種を焼入したもので、かたさは HRC ≒ 62 程度である。

大体成型圧力 4ton/cm² 付近で摩耗量が極小になっている。この際の密度は 5.8~6.0 になっている、これ以上密度を大にすると再び多少摩耗しやすくなっている。

次に Fig. 3 は市販の青銅系焼結摩擦材を鋳造の青銅と比較したもので、たえず白灯油を注いだ状態で焼入鋼と摩擦し、摩擦係数を測定した (速度 14m/s)。A, B, C 3 種の焼結摩擦材は皆、鋳造材よりはるかに摩擦係数が大きかった。

以上の密度と摩耗の関係と、粉末冶金品が摩擦係数の大きいことはそれが多孔質体であることによると考えた。Fig. 4 は銅の焼結品を圧縮した際の応力とひずみの関係である。密度が低下するに従い、いちじるしく弾性係数が小になっている。このような弾性係数の低い材料を接触させた場合には、面にうねりがあっても荷重を増すと容易に高い部分が変形してへこみ、低い部分も接触するようになる。すなわち多孔質体の面は接触がよくなりやすい。かたくて弾性係数の大きい材料はこのようなわけにはいかない。結局、多孔質焼結材は接触面において、接触点の数が増える。普通の鋳造材の場合には一般に接触面における接

Table 2 Unit wear of Cu-C alloy and mate steel.

C %	Unit wear of sintered Cu-C, mg/cm ² /km				Unit wear of steel, mg/cm ² /km.			
	Mate steel				Steel			
	0.45C	0.75C	Q. 0.45C	Q. 0.75C	0.45C	0.75C	Q. 0.45C	Q. 0.75C
0	12.6	4.4	42	27	31.9	7.9	0.5	0.5
1	2.0	6.5	1320	62.3	0	0.07	-0.07	0.06
2	1.4	1.1	2.2	1.3	0.07	0.03	0.05	0.14
5	1.1	0.9	—	—	0.21	0.02	—	—
11	1.1	1.1	0.8	—	0.02	-0.05	0.02	—
15	—	0.6	—	—	—	0.05	—	—

Hardness of steel in H_RC: 0.45C=14, 0.75C=32
Q. 0.45C=52, Q. 0.75C=65

触点の数が少なく、接触点の大部分は大きく塑性変形する。これによって摩擦の場合に接触点の凝着が起り、摩耗の原因となるとされている²⁾。もし接触点の数が非常に多ければ、各接触点の荷重が小になり、その塑性変形が小になって、凝着が起り難い。そこで摩耗が大きくなならない。すなわち摩擦材は密度を適当に抑えて、弾性係数を余り大にしないものが摩耗によいのである。

つぎに摩擦係数が大という点であるが、銅合金のような比較的軟らかい金属では、摩擦力は接触点凝着部のせん断抵抗によるよりも、突起により合金を押しつける力の方が相当大きい部分になると考えられる²⁾。このような場合には接触がよくて、真実接触面積の大きい場合に、摩擦係数が大きくなる。焼結合金の接触にはこの考え方が適用できると考える。事実、どのような摩擦板も使用当初よりも多少使って接触がよくなると、摩擦係数が相当大になる。

2 黒鉛と摩耗 摩擦材には必ずといってよいほど黒鉛を入れている。油中使用のものでさえ然りである。そこでまず黒鉛のみの影響をしらべるために Cu-C 系を取上げた。直径 25mm のダイスで、約 50g の試料を 3t/cm² で成型し、800°C で 1hr 保持し、焼結して、摩耗試験に供した。摩擦圧力 10kg/cm²、摩擦速度 138m/min の条件で、相手鋼を変えて試験した。相手鋼は Table 2. に示されているように、0.45% C と 0.75% C の炭素鋼を生のもと焼入したものである。Fig. 5 には摩耗経過の例を示し、Table 2 は定常状態の摩耗量を相手鋼材の摩耗量と一緒に示している。

この結果、黒鉛量は少なくとも 2% 以上でなければならない。C=0% では相当摩耗が多く、相手鋼も相当摩耗する。C=1% では相手鋼が軟いときには、ある程度よい摩擦性能を示すが、焼入鋼相手の場合では全く使えない。これは相手の鋼が軟らかい場合には、黒鉛が鋼の表面に付着して脱着しにくいいため、少ない黒鉛量でも摩擦に対して潤滑効果があるのである。C 量が増すにつれて、この影響が明らかでなくなるのは当然である。

次に Cu-Sn-C 系で Sn 量と C 量の関係を検討した (Table 3)。焼結は 800°C、1hr とした。摩擦条件は前の実験と同じである。C=0% では Sn があっても摩耗が多い。相手鋼も非常に摩耗する。C=5% の場合には Sn 量の少ない 5%の方が多少耐摩耗である。C=11% では、Sn が 4.5% でも 9% でも耐摩耗性の差は殆んどないといえる。

C% の少ない場合には、Cu-Sn の地が Sn が少なく

Fig. 5 The course of wear of sintered Cu-C alloys (0.45C: 0.45% C Carbon Steel, Q. 0.45C: Quenched carbon steel, C, 1 C, 2: Carbon percent of Cu-C)

Table 3 Unit wear of sintered Cu-Sn-C alloy and mate steel.

Compositions %		Unit wear of sintered Cu-Sn-C, mg/cm ² /km				Unit wear of mate steel, mg/cm ² /km			
		Mate steel				Steel			
Sn	C	0.75C	0.75C	Q. 045C	Q. 0.75C	0.45C	0.75C	Q. 0.45C	Q. 0.75C
5	0	—	—	5.6	4.9	—	—	20.3	21.1
5	5	1.0	0.5	0.8	—	0.02	0.07	0.12	—
9.5	5	1.4	1.5	1.1	—	0.35	0.71	0.13	—
4.5	11	0.6	0.5	0.7	—	0.05	0.08	0.12	—
9	11	0.8	0.8	0.7	—	0.17	0.08	0.07	—

Fig. 6 The course of the coefficient of friction (Cu-C2%) (1st run=2km, 2nd, 3rd, etc=5km, Pressure: 10kg/cm², Speed 138m/min)

で多少軟質の方が黒鉛が象嵌されやすく、よく付着しやすいので、潤滑効果が十分になる。C=5% はC量が少ないのでSnの少ない方がよく、C=11%ではC量が十分にあるので、Sn量の多少の影響が現われないのである。

Cu-C系とCu-Sn-C系とを比較すると、摩耗の差はさほど大きくはない。しかし後出のように摩擦係数に相当の差が示されている。

3 黒鉛と摩擦係数 前項の実験中、同時に測定した摩擦係数について検討を加える。測定結果の一例を示すと、Fig. 6 のようである。図の横軸には時間がとてあるが、摩擦距離で示すと、始動より2kmの間、摩擦係数測定を続ける。次に試料を外し冷却し、常温になった後に摩耗量を測定し、次の運転を始める。その後5km摩擦を続け、摩擦係数を記録する。ここで摩耗量測定で、摩擦を中断する。以下5km毎に同様の操作を行なった。第1回目は試料の表面が研削のままであるか

Fig. 7 The course of the frictional coefficient of sintered Cu slid on some carbon steels.

ら条件が異なるが、第2回目からは適当に酸化した定常状態になったものをそのまま摩擦しているわけである。そこで2回目以後の摩擦係数の変化は大体同じになっている。以下の図では第2回目以後の測定結果を示すことにする。

Fig. 7 はCuのみの焼結体の摩擦係数を示す。0.65付近の値を示して、Cを入れたものに比し、非常に大きい。凝着が非常に大きいのである。軟材相手のときは摩擦係数が初めからほぼ一定であるが、焼入鋼相手のときは初めは摩擦が大である。これは恐らく停止中にできた酸化皮膜の影響がかたさが大きいために、長く持続するためと思われる。

Fig. 8 はCu-C系の摩擦係数である。C=1%では最初はCの効果が多少あるが、摩擦中にC量が足りなくなり、摩擦係数が大になっていく。この影響は相手鋼が軟い0.45% Cの炭素鋼では殆んど明らかでないが、0.75% Cの炭素鋼では相当に現われている。C=2%では大体摩擦が安定している。C%が増すにつれて摩擦係数が減っている。そして、時間の経過に対して安定している。

次にFig. 9 はCu-Sn-C系における摩擦係数であるFig. 8と比べて同じC量の場合にCu-C系に比して遙かに大きい摩擦係数になっている。これはCu-Sn地の

Fig. 8 The course of the frictional coefficient of sintered Cu-C alloy slid on carbon steel.

Fig. 9 The course of the frictional coefficient of sintered Cu-Sn-C alloy slid on steel.

方がCu地に比して、硬さと強さが大きいと考える。この故に摩擦材にはSnを添加したものを使用するのである。しかしSnが入ると、C=5%でも時間に対する摩擦係数の変化がある。特に相手鋼が硬い場合にそうである。C=11%ではこの変化が殆んどなくなっている。このようなわけで青銅系摩擦材は一般に相当量のCを含有させるのである。しかし以上の結果は実際の場合に比べて、試料が極端に小さいので、摩擦係数の変化が多少大きく出すぎているといえる。

4 温度と摩擦係数 以上の摩擦係数の変化が極端に大きい一因として試料温度が変化しやすいことを考えて、まず市販の実用品につき温度の影響を検討した。試料の摩擦面を10mm角とし、回転リング直径250mmの大きい試験機を用い、リングを加熱し表面温度を調整して、それと摩擦係数の関係を求めた。Fig. 10はその結果である。摩擦係数は100°C付近で最大になり、それ以上温度が高くなると、徐々に低下している。

このような温度変化による摩擦係数の変化は、100°C

Fig. 10 The relation between the coefficient of friction and the temperature of mate steel. (10kg/cm², 8.7m/s)

位までは材料が多少軟らかくなるために表面接触がよくなり、摩擦係数が増すと考える。そしてそれ以上温度が高くなると、接触改善の影響よりも材料の強さの減少による摩擦抵抗低下の方が大となるのだと考える。

5 SiO₂の影響 摩擦材にはSiO₂を添加することがしばしばある。多くは油中で使用する場合に摩擦係数を大にするためである。しかしこの実験は乾式で行なった。

試片はCu-Sn-C系で、Sn 5%, C 5% 材にSiO₂をそれぞれ3%, 6%, 9%添加した。成型圧力は3t/cm²、焼結は800°Cで1hr保持した。摩擦試験において温度の影響を求めるために鋼リングを下方から加熱し、下半分の雰囲気および鋼面の温度を所定の温度にした後に、冷たい常温の摩擦材試料を取付け、摩擦したのである。速度は130m/min、摩擦圧力は10kg/cm²とした。そして2km摩擦し、約10分停止し、その間に摩擦量測定を行ない、その後で再び2km摩擦することを繰り返す。試料の温度変化と摩擦係数を測定したのである。相

Fig. 11 The course of the frictional coefficient and the temperature of sample slid on quenched 0.45C-Steel at various temperatures.

Fig. 12 The course of the frictional coefficient and the temperature of sintered test piece slid on quenched 0.45C-steel at various temperatures.

手鋼の温度は常温より 355°C 迄としている。

Fig. 11 は SiO_2 3% のものの実験結果の一部で、第 3 回目までの摩擦係数の変化を示している。最初の 2km では摩擦係数は上昇するのに相当時間が掛っているが、2 回目以後は割合に速やかに上昇している。これは摩擦面の接触が直ちによりくなり、速やかに定常状態に入るためである。しかも図の各点に付記した試料温度を検討してみると、摩擦係数が大になった点では必ず温度が高くなっている。例えば相手鋼の温度 125°C の場合、試料が 70°C 近くになると、摩擦係数は 0.65~0.7 になっている。第 2 回目、第 3 回目では摩擦開始後じきにこの温度になっている。勿論、第 2 回、第 3 回は当りがよく出ているから、速やかに摩擦係数が大になり、摩擦仕事による温度上昇が速やかになっているのであろう。

しかし相手鋼の温度が低いと摩擦係数の上昇に時間が掛っている。Fig. 12 の SiO_2 3% の分は第 2 回目の結果について 355°C までの各温度に対して図示してあるが、明らかに高温では始めから摩擦係数が高い。すなわち開始後すぐに接触がよくなるのである。これは前項でも述べたように摩擦表面がある程度軟いからである。Fig. 12 では 125°~190°C で摩擦係数が最大になり、それ以上の相手鋼温度ではむしろ低くなっている。これは Fig. 10 に示したもので説明できると考える。大体試料温度測定点での温度が 100°C を越えると摩擦係数は低下している。摩擦係数は SiO_2 粒子の引掻きに相当影響されると考えられるので、接触の良否と引掻れる材料のせん断強さがそれを左右するのである。

Fig. 12 には SiO_2 6% と 9% のものを 3% のものと比較してある。 SiO_2 % が増すにつれて摩

擦開始後の摩擦係数増加が速やかになっている。6% 材は相手鋼温度が 55°C 付近で、9% 材は 23° と 50°C の間で、摩擦係数が最大になっている。すなわち SiO_2 が多くなるにつれて、相手鋼の低温度で摩擦係数が最大値に達している。そして SiO_2 の多いものは温度が 250°, 350°C と高くなると、かえって摩擦係数の低下をきたすことが大きい。結局、 SiO_2 が多い場合には、摩擦力が接触面の凝着よりも引掻きにより左右されることが多くなり、せん断強さの大きい際に大きい摩擦係数になるのである。

Fig. 13 は相手鋼の温度を横軸にとって、以上の様相を明らかにしたものである。すなわち、 SiO_2 の多い方が、摩擦係数に対しての温度変化の影響が少なく、安定した結果がえられる。

Fig. 14 はこれらの材料の摩擦を示したもので、同時に相手鋼 (0.45% C 炭素鋼の焼入材) の摩擦も示して

Fig. 13 The relationship between the coefficient of friction and the temperature of steel.

ある。大体 SiO_2 の 6% ぐらいが試料摩耗は少ないが、相手鋼の摩耗が多い。摩擦係数と摩耗の両者を考えると、 SiO_2 は 3~6% 間に適当なものがあると思われる。

IV 総 括

焼結合金が摩擦材としてよい特性を示すのは、それが多孔質体であることと黒鉛を含有していることにありとみて、これに注目しながら検討を進めた結果、次のような結論がえられた。

1 多孔質体は弾性係数が鋳造材より相当に低いために摩擦面の接触がよい。したがって密度が 5.8~6.0 付近に摩耗の少ないものがえられる。

2 多孔質体は接触がよいので、鋳造材より大きい摩擦係数がえられる。

3 Cu-C 系の摩耗においては、C量は少なくとも 2% 以上としなければ凝着による摩耗が大きくなる。

4 Cu-C 系でC量が 1~2% の場合には相手鋼の影響が現われ、相手鋼が軟らかいと鋼面にCが付着しやすく、その潤滑効果が相当に示されるが、相手鋼が硬いとCは脱落しやすく、不十分の潤滑性を示すことになっている。またC量の少ない場合には相手鋼の摩耗も大である。

5 Cu-Sn-C 系では、Cu-Sn が Cu より硬いために、Cu-C 系よりC量を増さないで十分の潤滑効果がえられない。Sn=5% 材ではC量は 5% で十分であるが、Sn=9% 材ではC量が 5% では不十分であった。

6 Cu-C 系の摩擦係数にはCが 1~2% では相手鋼の影響が大きく現われる。多少かたい鋼相手の場合には、摩擦を永く続けると、C量が不足になって摩擦面の凝着傾向が大になってくる。C量が 5% 以上になると摩擦係数は大体安定する。

7 Cu-Sn-C 系ではC量が 5% の場合に、相手鋼が高炭素鋼のときの摩擦係数は時間がたつにつれて大になり、多少凝着傾向が大きくなる。C量が 11% になると摩擦係数の値は大体安定している。

8 Cu-Sn-C 系と Cu-C 系とを比べると、摩耗量は Cu-Sn-C 系の方が多少少ない程度であるが、摩擦係数は相当に異なり、Cu-Sn-C 系のそれが大である。したがって摩擦材には Cu-Sn-C 系が用いられるので

Fig. 14 The relationship between unit wear of sintered alloy (and steel) and the temperature of steel.

ある。

9 摩擦係数と摩擦面温度の関係は、100°C 位までは温度上昇と共に摩擦係数が大になっていくが、それ以上の温度になると逆に徐々に低下している。

10 SiO_2 を添加した摩擦材では相手鋼の温度が増すにつれて、摩擦係数は速やかに高い安定値に近づくようになっている。

11 SiO_2 3% 材では相手鋼温度が 125°C 付近で、 SiO_2 6% では 55°C 付近で、9% 材では 23~50°C では最大の摩擦係数になっている。すなわち、 SiO_2 が増すにつれて、低温度で高い摩擦係数になる。

12 SiO_2 が増すにつれて、摩擦係数は摩擦開始後速やかに安定するようになる。

13 摩擦係数がある程度大になった際には、必ず試料の摩擦面温度がある相当の値にまで上昇している。

14 SiO_2 を含む摩擦材は相手鋼を摩耗させることが大である。それ自身の摩耗は SiO_2 6% 材が最も少ないが、相手鋼の摩耗は SiO_2 が少ない程少なくなる。したがって SiO_2 の添加量は 6% より多少少なく抑えるべきである。

文 献

- 1) F.P. Bowden and D. Tabor: The Friction and Lubrication of Solids. (Oxford Press) 1950, 73~87
- 2) 同 上, 90~97