集電用 Cu-Fe 合金の油潤滑における耐摩耗性*

竹 内 久 祐** 小 林 豊 治**

Hisasuke Takeuchi and Toyoji Kobayashi: Wear Resistance of Cu-Fe Alloys as Oil-Lubricated Sliding Contacts. Contact materials used in oil-filled tap changers for regulating the voltage of transformers or electric locomotives must be wear resistant, because the accumulation of particles produced from the wear of sliding contacts tends to cause a high voltage breakdown. The purpose of this investigation was to find out the most desirable pair of electro-conductive materials, which would make the oil-lubricated current collector maintenance-free for a long period of time.

A series of wear tests were carried out with fourteen different materials contacted with a copper plate, using (a) a horizontal sliding type wear tester without current flowing, and (b) an actual high voltage tap changer for the electric locomotive with current flowing through the contacts.

Materials tested were Cu-Fe cast alloys, Ag-W and Cu-W sintered alloys, aluminium bronze, manganese bronze, etc. The results are summarized as follows:

(1) By measuring the weight loss and roughness of the worn surfaces, the group of Cu-Fe alloys, especially the one containing 40% Cu, were found to have excellent wear resistant properties, followed by Ag-W and Cu-W alloys.

(2) The wear resistance of the Cu-Fe alloys was improved by heat treatments; by quenching and tempering, a hard contact material with relatively high conductivity was obtained. The microstructure of Cu-Fe alloys consisted of two phases, hard iron-rich phase and soft copper-rich one. The difference of micro-hardness between the two phases was enhanced by heat treatments. This was considered to account for the superior wear resistance of the alloys, particularly when heat-treated.

When Cu-Fe alloys were contacted with Cr-Cu alloys, the total weight loss was much less than that when contacted with pure copper.

(Received February 10, 1967)

I. 緒 言

電気機器に使用される 摺動接触子 (集電材料) を挙げれば、回転機の刷子、パンタグラフのスリ板、変圧器の電圧調整用タップ選択器、計器のスライド抵抗体、テレビのチューナなどがある。これらは潤滑剤の有無、周囲雰囲気の種類などにより使用中の接触抵抗や摩耗速度が著しく変化することがあり、さらに表面の荒れや接触子の相対的な運動の異常のため火花を生ずると、損耗は一層加速されることが知られている。しかし本報告では接触子自体の寿命の問題よりも、さらにきびしく摩耗を警戒する油中タップ切換用接触子について検討する。たとえば、変圧器において負荷側の電圧変動に応じて自動的に電圧比を変更する装置⁽¹⁾では、電流をしや断する耐弧接触子と無電弧にてタップ切換を行なう摺動接触子とがあり、いずれも消耗は問題であるが、後者の場合摺動により発生した金属粉が油中に懸濁し、それが量以上溜まると機器の高圧絶縁が維持できなくなるという懸念から十分な監視を要するのである。交流電気機関車に搭載される高圧タップ切換器⁽²⁾も同様な問題点を蔵し、その切換頻度はとくに大きい。

さて、集電を目的としない摺動機械部品では、速度や荷重を考慮して材料の組合せが選ばれるが、電気接触子に

においては通電容量を確保すべく、Cu や Ag のような良導電性金属を中心として選択される。著者らは実用機器の摺動条件に類似した摩耗試験機を作製し、10 余種の導電合金を調製してそれらを比較したので以下実験経過を詳述する。

II. 試 験 方 法

1. 水平 摺 動 試 験

2 種の金属体に無通電で摺動を与え、両者の重量減を求める摩耗試験機を作製した。Fig.1 はその機構を示した略

Fig.1 Schematic diagram of horizontal sliding type wear tester.

図である。本装置はクランク機構 ①～④ により、水平の往復運動をする試験片 ⑤ が液中に浸つた形になっており、その往復のストロークが 50 mm、1 往復の時間が 2.4 sec である。相手材の試験片 ⑥ はヤトイ ⑦ を用いて床面に対して固定される。ウェイト ⑧ は 5～125 kg の範囲内で加減

** 株式会社日立製作所 日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi)

* 1962 年 4 月本会東京大会に一部発表

(1) 保坂：電力，44 (1960)，1181.

(2) 前川，益富：日立評論，別冊 40 号，(1961)，72.

できる。1組の試験片の形状を Fig.2 に示す。

1回の試験は、往復摺動1万回で延べ6.4時間費やして

Fig.2 Shape and dimension of specimen. (mm)

行なわれた。使用した液は変圧器油である。試験前の面の仕上げは一定とし、摺動後の両試片の面の荒れを観察し重量変化と対照した。

2. 実用的試験

交流電気機関車用高圧タップ切換器の油中本体を使用し寿命試験を行なつたが、セグメントとしては6個（実機の1/4）の銅板を垂直面上に配置し、これに対して試験接触子（刷子ともいう）4個を同時に摺動させるようにした。刷子はバネ圧力5kgでセグメントに押しつけながら75mm/secの速度でタップ上を移動し、下端から上端までの間を往復すること3万回をもつて1回の試験とした。刷子の形状は前節の固定側試片とほぼ似たものである。電気回路は Fig.3 に示すとおりで、本体と別に気中しや断器と

Fig.3 Electric circuit for life test of contacts using actual tap changer.

限流抵抗器とを配置し、油中本体における電圧タップの切換を無電弧で行ない、刷子とセグメントに関しては実用機と等価の回路にしてある。

この試験ではセグメントおよび刷子の重量減を求めることが困難であつたので、それらの表面アラサを調べた上、

定性的判定をしたほか、刷子の長さの変化を測定して摩耗量とした。

III. 供 試 材 料

本実験では、同種金属の組合せは避け、接触面積の大きな方に純銅を用いることとし、刷子の材料はより硬い導電合金を選ぶ方針をとつた。Table 1 (a) ~ (d) に示す14種類の合金を調製し、試験接触子の形状に加工した。表中のCu-Fe合金は高周波電気炉により気中溶解し、砂型に铸込み、その铸塊より切り出したものであるが、Smithらの研究⁽³⁾にもとづき低炭素の原料鉄を使用して偏析を避け、脱酸にMnおよびSiを用いた。この合金はCu含有量の高いものほど鍛造および冷間加工が容易なので、80% Cuの鍛造材を供試した。Cu-Fe合金の顕微鏡組織はPhoto.1のとおりで、铸造材ではFe相(Cuを含む)が樹状晶をなして発達し、その間をCu相(Feを少量溶解している)が埋めている。

このほかAg-W, Cu-W, 銀-黒鉛接点材, 含油メタルなどの焼結合金, ならびにAl青銅およびMn青銅で組成の異なる鍛造材2種類を選んだ。なお, Cu-Fe合金は熱処理によつて変化を与えることができる⁽⁴⁾が, これについては後章に述べる。なお耐摩耗材料選定の目安としては, 一般に相互に固溶度をもたない材料の組合せが好ましいことをGoodzeit⁽⁵⁾が述べている。

IV. 試 験 結 果

1. Cu-Fe, Ag-W および Cu-W 合金の水平摺動試験

Cu-Fe合金5種類およびAg-W, Cu-Wをそれぞれ固定側に、硬銅板を可動側を用いて油中摺動試験を行なつた結果を Fig.4 に示す。ウェイトは5kg, したがって単位面積当りの圧力は8.2kg/cm²である。これから, Cu-Fe合金の中ではCu含有量の少ないものの方が, それ自体の摩耗量も相手材の摩耗量も小さくなるという傾向がみられる。また铸造材より鍛造材の方が好結果を示すことも認められる。Cu対Cuの摩耗試験は前記の面圧では, 再現性ある測定値が得られないほどかじりを生じた。

また, Ag-W および Cu-W は HFC-8 よりややまさる程度の成績であり, それらより一段すぐれた耐摩耗性をもつのが HFC-2 または HFC-4 であると判定された。

2. 実用試験結果

高圧タップ切換器による3万回往復摺動試験結果を示したものが Table 2 で, 試験前後の刷子の長さの差およびセ

- (3) C. S. Smith, E. W. Palmer : Trans. AIME, **188** (1950), 1486.
- (4) E. E. Schumacher, A. G. Souden : Metals and Alloys, **7** (1936), 95.
- (5) C. L. Goodzeit : Materials in Design Eng., (1958), 105.

Table 1 Chemical composition and some properties of test materials.

(a) Cu-Fe alloys.

Remarks	Nominal composition (%)		Process	Hardness R_B	Elec. conductivity (IACS %)
	Fe	Cu			
HFC-2	80	20	as cast	86.6	13
HFC-4	60	40	"	75.2	19
HFC-6	40	60	"	61.0	26
HFC-8	20	80	"	45.8	32
HFC-8 F	20	80	as forged	56.0	34

(b) Ag-W and Cu-W sintered alloys.

Remarks	Composition (%)	Hardness, R_B	Elec. conductivity (IACS %)
WC	Cu 30, W 70	90	46
WA	Ag 28, W 72	88	50

(c) Aluminium bronze and manganese bronze.

Name	No.	Chemical analysis (%)						Structure	Elec. conductivity (IACS %)
		Al	Mn	Fe	Ni	Zn	Cu		
Al bronze	1	5.90	—	0.15	—	—	bal.	α	14.4
"	2	9.84	1.05	3.98	1.38	—	bal.	$\alpha + \beta$	—
Mn bronze	1	—	9.66	—	—	—	bal.	α	—
"	2	0.37	0.84	0.67	0.36	bal.	63.74	$\alpha + \beta$	14.3

(d) Other materials.

Name	No.	Composition (%)						Hardness R_B	Note
		Cu	Fe	Sn	Ni	C	Ag		
Oil-impregnated metal	1	83	4.5	10.5	—	2.0	—	45~55	Oil content 5.0 vol %
	2	73	12.5	9.0	3.0	2.5	—	45~55	" " 6.0 "
Silver-graphite	AG 2	5.65	—	—	—	5.0	88.35	—	—

Photo.1 Microstructure of Cu-Fe alloys. Etched by Picral. ($\times 100 \times 1/2$)

グメント面の荒れを調べた結果である。これからわかるように、Cu 20~60% の Cu-Fe 合金が最も摩耗が小さく、Ag-W そして Cu-W がこれにつぐ。このことはさきの水平摺動試験の成績とよく一致する。含油メタルも摩耗は比

較的小さい。青銅系合金および銀 - 黒鉛系接点材は著しく摩耗しており、かじりによる突起もみられ、寸法変化量にもばらつきが大きいことが知られた。またセグメント銅板の荒れの状態はアラサ計を用いて記録し、excellent.....ア

ラサ 2~4 μ , good.....4~8 μ , poor.....8 μ 以上の3段階に
 評点を与えた。

Fig. 4 Result of horizontal sliding type wear test.

Table 2 Wear of brushes and segments.

Materials of brush	Wear of brush (mm)	Wear-resistivity of segment
HFC-2	0.006	excellent
HFC-4	0.004	"
HFC-6	0.013	"
HFC-8 F	0.007	"
Ag-W	0.007	good
Cu-W	0.009	"
α Al bronze	0.159	poor
$\alpha+\beta$ Al bronze	0.029	"
α Mn bronze	0.009	good
$\alpha+\beta$ Mn bronze	0.024	poor
K-1	0.007	"
K-2	0.006	"
AG-2	0.06	"

Force of spring, 5 kg.

以上の結果から、成分系の異なつた2種の材料を組合せて油中通電摺動を行なう場合に、Fe または W を主成分とする接触子合金が自らも耐摩耗性を示し、また相手材を傷める傾向も小さいことがわかつた。そして Fe 60%, Cu 40% の鋳造材が以上の実験範囲内で最良の材質と知られた。

V. 熱処理による Cu-Fe 合金の改良

溶製の Cu-Fe 合金と類似した複合組織の Fe-Cu 系材料が焼結法でも製造できる。また含銅鋼は焼入れによつて硬化することも知られている⁽⁶⁾。そこで焼結溶浸法による Fe-Cu (60:40) 合金を試料に加え、そして Cu-Fe 合金の熱処理による耐摩耗性の変化を究明した。

まず先記の鋳造試料 HFC-4 を 950°C より水冷したもの、

(6) H. Cornelius: Kupfer in technischen Eisen, (1940), 225.

および 800°C で焼鈍して完全軟化させたものを摩耗試験に供し鋳造のままのものと比較した。Table 3 に試料の硬さ

Table 3 Hardness of 4/6 Cu-Fe cast alloy influenced by heat-treatment.

No.	Heat-treatment	Hardness R_B	Micro Vicker's hardness (25g)	
			Cu phase	Fe phase
C	as cast	75.2	181	285
A	annealed at 800°C for 2 hours, furnace cooled.	64.5	184	250
Q	water quenched from 950°C	90.5	140	327

(R_B) ならびに Cu 相と Fe 相に着目したマイクロビッカース硬さの測定値を示す。これらを1万回往復摺動試験に供した結果が Fig. 5 である。これによると、HFC-4 自体の摩耗量には大差がないが、相手の Cu を摩耗させる点では焼鈍材が劣り、むしろ鋳造のままあるいは水冷処理した方が好ましいことがわかる。このことから考察すると、焼入温度において Cu が最大限 (状態図によれば約 8%) 固溶した Fe 相の粒子は $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の結果相当硬くなつてゐるが、Cu 相はいわゆる溶体化処理が行なわれたことになり、低い硬さを示している。すなわち Table 3 から知られるように、硬軟2相の硬さの差は焼入れにより顕著になり、焼鈍すれば逆に差が小さくなる。この硬軟2相より成る材料が軸受の場合に知られているように、油膜を保有して接触部の摩耗を少なくする効果をもつものと考えられる。

Fig. 5 Results of wear test of 4/6 Cu-Fe alloy as influenced by heat-treatment.

以上の推論をさらに確かめる意味で、焼結 Fe-Cu 合金を含めて Cu-Fe 合金の熱処理方法に変化を与え、西原式摩耗試験機で過酷な実験を行なつた。熱処理としては Cu 40-Fe 60 合金を 950°C から焼入れ後 400~600°C の間 50°C おきに 1 hr 焼戻して硬さおよび比抵抗を求めると Fig.

6 ようになる。これから、450°C 付近の焼戻しによつて Fe 相のマイクロ硬さが 488 という高い値を示す一方、Cu 相

よる差異は認められなかつた。この球状粒は鑄造凝固時に γ -Fe より析出した Cu 側固溶体の粒と思われる。しかし焼

Fig. 6 Effect of tempering temperature on electric conductivity and hardness of quenched 4/6 Cu-Fe alloy.

の硬さはほとんど変化しないこと、また焼戻しにより導電率が増加し水冷状態の 2~3 倍になることがわかる⁽⁷⁾。この焼戻条件を採用して焼入材、炉冷焼鈍材と比較しつつ耐摩耗性を調べた。この場合外径 30 mm、内径 16 mm、厚さ 8 mm の環状試料を用い、同形の硬銅試料を相手材として西原式コロガリ摩耗試験（荷重 4.5 kg, 800 r.p.m. ですべり 10% を与え、油を供給）を行なつた。10⁷ 回転後の摩耗量は Table 4 に示すとおりで、焼入焼戻した溶製の Cu-Fe 合金が最もすぐれており、焼入材がこれにつぐ。そして焼鈍材では、みずからの摩耗も相手材の摩耗も著しく大きい。Fig. 5 では焼鈍材の耐摩耗性が悪くないことを記したが、今回のような高速の試験では条件が過酷となり、いつたんかじりが始まれば急速に摩耗が進むことを表わしている。なお焼結 Fe-Cu 合金は組織が溶製材と異なり Fe 粒子は細かく、そして連続していることと、若干空洞が残っているために試験結果が少しく異なるのは当然であろう。

以上の熱処理による性質の差異を、顕微鏡組織から説明

(a)

(b)

Photo. 2 Electron-microphotograph of 40% Cu-Fe cast alloy. (×5000)

(a) Specimen annealed at 800°C.

(b) Specimen quenched from 950°C and tempered at 500°C for 2 hours.

Table 4 Wear loss of the heat-treated Cu-Fe alloys and hard copper by Nishihara type tester, after 10⁷ rev. accompanying 10% slide.

Pair No.	Materials tested		Wear loss (g)		
	Upper specimen	Lower specimen	Upper S.	Lower S.	Total
1	40% Cu-60% Fe melted alloy (Q)	Hard copper	0.0014	0.0023	0.0037
2	" " (A)	" "	0.0425	0.6110	0.6535
3	" " (Q-T)	" "	0.0002	0.0042	0.0044
4	40% Cu-60% Fe sintered alloy (Q)	Hard copper	0.0014	0.0924	0.0938
5	" " (A)	" "	0.0016	0.0039	0.0055
6	" " (Q-T)	" "	0.0014	0.0034	0.0048

Note (1) Q: 950°C×2 hr water quenched. (2) A: 800°C×2 hr furnace cooled.

(3) Q-T: Tempered at 450°C for 1 hr after quenching.

づけたいと考え、鑄造の 40% Cu-Fe 合金の Fe 相内の組織を観察したが、Photo. 2 の電子顕微鏡写真にみられるように、樹枝状晶の内部に多数の球状粒子が存在し、熱処理に

(7) 小野、竹内：特許公報，昭 38-24208。

戻時に進行する硬化現象を裏づけるような析出物は認知することができなかつた。つぎに、樹状晶の Fe 相および樹枝間の Cu 相を別々に X 線マイクロアナライザにより走査した結果、Photo. 3 (a), (b) の記録を得た。Fe 相内にある球

状粒はほとんど 0.4μ 以下のものであり、電子流照射のス
ポットの大きさより著しく小さいため、これが Cu 相であ

り 10%) を実施した。Table 6 がその結果で、硬銅と
Cu-Fe 合金との組合せよりも Cu-Cr と Cu-Fe の組合せの

Photo.3 Results with a micro probe analyser on 40% Cu-Fe cast alloy. (a) Interior of Fe-rich phase (dendrite) (b) Matrix of Cu-rich phase.

ることを確認できなかったが、Photo.3 における小さな多
数の peak は Fe-Cu 状態図から予想される γ -Fe よりの析
出物にあたるものであろう。なお、樹状晶を横切った走査
線上の特性 X 線強度比の平均値から、Fe 相中の Cu は 8~
10% 含有されていることがわかる。他方、Cu 相中の Fe 含
有量は 3~5% である。なお焼鈍材と急冷材とで E.P.M.A
の結果には差異がみられない。

Table 5 は 4/6 および 8/2 の Cu-Fe 合金を圧延し、熱
処理した後の諸性質を一括比較したものである。

方のはるかに耐摩耗性がよいことがわかる⁽⁸⁾。この場合は
Cu-Fe 合金は焼鈍材でも極めて摩耗が小さい。この表で◎
印と×印の 2 者を比較すると全摩耗量は 1:500 ぐらいの
違いがある。硬銅と Cu-Cr 合金との硬さの差はあまりな
いが、硬銅は摺動により表面層が加熱され、硬さが低くな
って塑性流動を生じかじりが起こりやすくなったと考えら
れる。なお、Ag-W あるいは Cu-W と Cu-Cr との組合せ
は Cu-Fe 対 Cu-Cr の組合せより少し劣る。

以上の結果から Cu-Fe 合金の耐摩耗性は、それ自体の

Table 5 Physical and mechanical properties of 4/6 and 8/4 Cu-Fe alloys.

Kind	Heat treatment	Elec. sp. resistivity ($\mu\Omega$ -cm)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness R_B	Young's modulus ($\times 10^3$ kg/mm ²)
HFC-4	as sand cast	9.3	41.8	18.4	71.1	17.5
	rolled, annealed at 800°C for 2 hr.	9.0	37.0	30.6	59.9	17.6
	rolled, quenched at 950°C	17.3	57.3	11.6	86.7	17.1
	after quenching, tempered at 450°C for 1 hr.	9.3	62.3	6.6	93.2	17.3
HFC-8	rolled, annealed at 800°C for 2 hr.	5.1	34.5	43.3	36.0	14.3
	rolled, quenched at 950°C	10.0	43.0	36.7	55.1	14.4
	after quenching, tempered at 450°C for 1 hr.	5.1	45.0	30.8	57.8	14.4

Note: Chemical analysis of test alloys (%)

	C	Si	Mn	Cu	Fe
HFC-4	0.01	0.22	0.17	40.41	bal.
HFC-8	0.01	0.20	0.35	80.29	bal.

熱処理効果もさることながら、相手となる材料によつて著
しく変わることがわかった。

VI. Cu-Cr 合金を相手とした 接 触 子 材 料

純銅以外の高導電率の加工材として利用しようと思われ
る Cu-Cr 合金を一方に選び、Cu-Fe、Ag-W および Cu-W
合金を相手試料として前章のようなコロガリ摩耗試験 (す

VII. 考 察

以上の実験で、機械的摩耗に対して好ましい組合せは明
確になつてきたが、通電摺動による摩耗は IV で確認した
程度である。V の焼戻処理により導電率は向上するが、同
時に材料の硬さが増した場合に接触抵抗の増加が避けら
れないと予想される。実測の結果では Cu:Cu-Fe (焼鈍の
まま) の組合せは Cu 同志の場合の約 2 倍の接触抵抗を示

(8) 小林, 竹内: 特許第 449384 号, (1965).

した。それにもかかわらず、通電試験結果が良好なのは、行なつた結果はつぎのとおりである。

実際の摺動では真の接触面積の増減がたえず起こり、微小 (1) Cu-Fe 合金は最も耐摩耗性がすぐれ、相手材に摩耗

Table 6 Result of wear test on the materials contacted with Cr-Cu alloy or hard-copper.

Pair No.	Materials		Wear loss (g)		Evaluation
	Upper specimen	Lower specimen	Upper S.	Lower S.	
1	Cr-Cu alloy	HFC-4 (annealed)	0.0020	0.0004	excellent
2	"	Ag-W (29: 71)	0.0029	0.0017	good
3	"	Cu-W (32: 68)	0.0043	0.0028	good
4	"	Sintered 40% Cu-Fe	0.0056	0.0016	good
5	Hard copper	HFC-4 (annealed)	0.9433	0.0013	poor
6	"	Sintered 40% Cu-Fe	0.2079	0.0060	good

Note: (1) Test condition: Same as shown in Table 4.

(2) Cr-Cu alloy: 0.8% Cr, solution treated at 1000°C for 1.5 hours.

(3) HFC-4 alloy: Sand cast, annealed at 800°C for 2 hours. Hardness (R_B) 63.8

(4) Sintered 40% Cu-Fe alloy: Prepared by infiltration, using Höganas iron powder. Hardness (R_B) 77.5

接点への集中電流による温度上昇の結果材料の接着する傾向が Cu:Cu の場合に大きく、Cu と Fe 相粒子の場合は小さいためであろうと考えている。一般に、互いに拡散しない、あるいは固溶度をもたぬ異種金属の間では、局所の温度が高くなつても接着傾向は小さいといわれる⁽⁵⁾。Ag-W あるいは Cu-W の刷子材は W 粒と Cu セグメントとの接触であり、接触抵抗の点では最も不利な条件にあるにもかかわらず比較的刷子性能が良好であつたのは、その非接着性によると考えられる。

結局、大電流用の摺動通電材料としては、軟かい良導電性金属を適量混えた複合組織体が好ましいことが了解されよう。

VIII. 結 言

強電機器に使用される油中接触子として、導電性のよい合金 14 種を調製し、硬銅を相手材とする摺動摩耗試験を

(9) 竹内, 小林: 特許第 464553 号, (1966)。

を与えない点でも優秀である。この群について Cu-W および Ag-W 焼結合金がよい。

(2) 鑄造の Cu-Fe 合金では Fe 40~60%, Cu 60~40% の組成が好ましいが⁽⁹⁾, Cu 含有量の高いものを鍛造圧延により改善できるほか、熱処理により銅鉄 2 相の硬度差を大きくすることによつて、耐摩耗性を向上させることができる。

さらに、Cu-Fe 合金接触子の相手材を硬銅から Cu-Cr 合金に替えることにより、著しく摩耗が小さくなることがわかつた。

本研究は、油中に浸つた接触子の耐摩耗性をおもに論じたものであるが、接触子に少量の油を供給しつつねに油膜の存在する状態における摩耗についても同様の結論が適用されると考えられる。

本研究遂行にあたり日立研究所 富田貞美, 細谷 明, 阿部孝男, 日立化成工業桜川工場 大沢真人, 同 桑島敏夫, さらに日立製作所水戸工場 益富文男の諸氏に多大の御尽力をいただいた。付記して深謝の意を表する。