研 究

強磁性材料の摩耗に及ぼす磁場の影響 (第1報)*

—ニッケル・S 45 C 組合せによる繰返し摩耗実験—

熊 谷 一 男**

Effect of Magnetic Field on Wear of Ferro-
magnetic Materials (1st Report)
—Wear of Nickel Pin versus Carbon Steel Disk
under Repeated Rubbing Condition—

Kazuo KUMAGAI

Experimental results are presented on the effects of magnetic field around a pin, H , and magnetic moment of a magnetized rotor, M , on wear. Under the test condition with normal load, P , of 4.1 N and sliding velocity, V , of 30 m/min, the severe-mild wear transition point is found at about 50 A/m of H or about $6.5 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ of M . Weaker H or M causes severe wear characteristics with a high wear rate, metallic luster of worn truck and large metallic debris. In case of stronger H or M ,

the wear type is transformed into mild wear characteristics, and the amount of wear is reduced remarkably because the rotor surface is covered with many fine particles of black oxide. Furthermore, the value of H or M at the transition point becomes smaller in case of lighter P or slower V . The magnetic moment of rotor, M , amounts up to $6 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ or more by plane grinding and even reaches $0.5 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ by turning. Therefore, this paper points out that wear-test specimen must be manufactured in absent of magnetization and experiments must be performed faint magnetic field as much as possible.

Key words: wear test, nickel pin, carbon steel disc, magnetic field, magnetic moment, severe-mild transition.

1. 緒 言

我々の周囲には、約 40 A/m (0.5 Oe) のほぼ一様とみなされる地球磁場のみならず、発電機・モータ・送配電線などによる地球磁場よりはるかに強い局所的な磁場が存在する。したがって、このような磁場内にある強磁性材料は、わずかながら磁化されていると考えるのが自然であろう。

けれども、磁場のもとでの摩耗に関する研究は、強磁性材の摩耗を増加させるとする Muju らの研究¹⁾²⁾ ならびに Raghuram や Neema らの磁化による工具寿命の増加³⁾⁴⁾ などが報告されている程度であり、しかもこれらの研究は、直流磁場での処女面摩耗に関するものであって、より一般的な形態である繰返し摩耗における磁場の影響についての検討は、まったくなされていないようである。

一方、近年電磁気利用の機器が広く用いられている現状から、磁場の摩耗に及ぼす影響を明らかにすることは、その摩耗対策を考える上でも、きわめて有用なことと思われる。

このような観点から、磁場の影響をより強くうけるであろう強磁性材料の大気中の乾燥状態で繰返し摩耗実

験を行った結果、処女面摩耗についての Muju らの結果^{1)~4)} とは逆に、磁場は摩耗を著しく減少させること、しかもシビア摩耗からマイルド摩耗の状態に遷移せしめる磁界の強さは、ごく微弱なものであることなどが明らかにになったので、以下に報告する。

2. 試験片ならびに実験装置

摩耗試験はピン・ロータ方式によったが、ピンは直径 2 mm の純ニッケルで、磁化特性をよくするために、 $900^\circ\text{C} \times 20 \text{ min}$ の真空焼きなましを行った。

ロータは入手のままの S 45 C 丸棒より、直径 42 mm、幅 4 mm の円板状に削り出したものであり、加工によって磁化されることがあるので、必要に応じて消磁して実験に供した。ロータ外径は、順次削り落として 42~38 mm の範囲で使用したが、その外周面(摩擦面)は、#320・3/0・6/0 の研磨紙で仕上げ、アルコールおよびベンジンで拭拭後アセトンで超音波洗浄した。

ピンについても同様の処理をしたが、ロータ外周面になじむような形に端面を仕上げた。

表 1 は、試験片の機械的性質を示している。

図 1 は、摩耗試験装置の概略図で、ロータの回転はコップ無段変速機で変速することが可能である。磁化コイル中央に挿入されたピンへの付加荷重 P は、レバーを介したおもりによって与えられる。おもりは、 P の変動を防ぐために油中に浸されている。レバーを支えるスタン

* 原稿受付 昭和 58 年 7 月 30 日。日本機械学会・精機学会東北支部盛岡地方講演会(昭和 58 年 6 月 4 日)にて発表。

** 正 会 員 秋田大学鉱山学部(秋田市手形学園町 1-1)

Table 1 Mechanical properties of material used

Test piece	Material	Tensile strength MPa	Elongation %	Micro hardness HV
Pin	Nickel (99.45%)	357	41	135
Rotor	Carbon steel (S 45 C)	—	—	263

Fig. 1 Experimental equipment **Fig. 2** Magnetic properties of coil

ドにはひずみゲージを貼って、摩擦面における接線力 F を測定するようにした。試験片を含んだ試験装置の固有振動数は約 160 Hz である。

ピンならびにロータの摩耗量は、感度 0.1 mg の直示天びんでひょう量した重量差から求めた。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 ピンを磁化した場合

本節では、ピンを磁化コイルで磁化した場合の効果を検討する。そのために、ロータのもつ磁気モーメント M を $2 \times 10^{-4} \text{ Am}^2$ 以下になるよう消磁して用いた。

3.1.1 磁化コイルの特性

磁化コイルは、図 2 に示すようなアルミニウム製ピンに直径 0.3 mm のエナメル線を 1300 回巻いたものであり、そのコイル定数 C は 56770 m^{-1} である。コイル中央における直流ならびに交流電流 i による計算された

Fig. 3 Relations between wear and sliding distance for various AC magnetic field

磁界の強さ H_0 を図 2 に示したが、交流 10 mA においても H_0 は 185 A/m 程度で、図の縦軸に H_0 と記した地球磁場の強さが約 40 A/m であること、ならびに H はコイル中央を離れるにつれて急速に減少することからすれば、実験はきわめて弱い磁界のもとでなされたといえる。

ピンのコイル端面よりの突出し長さ z が 2 mm のときのピン先端における磁束密度 B の値も同図に示されているが、本報で主として扱う 10 mA 以下の i では磁束計の振れはごくわずかであったので、 $i=100 \text{ mA}$ における B の実測値と原点を結んだ B の概略値であり、またピンが摩耗して z が 3 mm から 1 mm に変化したとき B には 25% 程度の变化があるので、ピンの磁化の度合は電流 i によって示すことにする。

3.1.2 摩耗に及ぼす交流磁界の影響

ピンにかかる力 P が 4.1 N 、摩擦速度 V が 30 m/min のもとで、交流電流 i をいろいろに変え、摩擦距離 L が 1800 m までの間で、各 L ごとにピンならびにロータの重量を測定し、その変化から求めたそれぞれの摩耗量 $\Delta W_p, \Delta W_r$ を示したのが図 3 である。図より i の大なるほど摩耗は小となり、 i がある値以上になると、摩擦距離 L のごく短い時点で摩耗のほとんど進行しない、いわゆるマイルド摩耗の状態になることがわかる。

そこでさらに詳細な実験を行い、 i に対する摩耗量として示したのが図 4 であって、3 mA 近傍 ($B \approx 0.3 \text{ mT}$) に、シビア摩耗からマイルド摩耗の状態に移移する臨界の電流値 i_c が存在し、 $i > i_c$ ではピンならびにロータの摩耗量は急激に減少することがわかった。

図 5 ならびに図 6 は、それぞれ摩擦速度 V ならびに

Fig. 4 Effect of AC magnetic field on wear

Fig. 5 Relations between wear and AC magnetic field for various sliding velocities

Fig. 6 Relations between wear and AC magnetic field for various normal loads

Fig. 7 Optical micrograph of rubbing surface

荷重 P を変えて行った実験結果で、いずれの場合も i_c は存在するが、 V の大なるほど、また P の大なるほど i_c はより大きな値となっている。特に V が 45 m/min では、 i が 500 mA ($z=2$ mm で $B=23$ mT) 以上にならないとマイルド摩耗状態に移移しないことがわかる。

一方、 V が 20 m/min ならびに P が 1.4 N と低速・軽荷重の場合には、 i が 0 mA においてもマイルド摩耗の状態にあるのは、後述するように、ロータのもつわずかな残留磁気モーメントによるものと思われる。

3.1.3 摩擦面の観察

磁界のもとでの摩耗試験で顕著に認められることは、臨界電流値 i_c を境にして、ロータ摩擦面の色合いが明らかに異なることである。図 7 は、 $i=0$ と i_c 以上の 5 mA のときの、 $P=4.1$ N、 $V=30$ m/min の条件で 700 m 摩擦したロータならびにピンの摩擦面の状態を示している。

すなわち、 $i=0$ mA では、摩擦面は荒れておってかつ金属光沢を有し、摩耗粉の大きさも、後述の図 17 ③、④に示すものと同様に大きく、また金属光沢をもつ、いわゆるシビア摩耗の状態にあるが、これに対して $i=5$ mA では、ロータならびにピンの摩擦面はいずれも黒く変色しており、摩耗はほとんど進行しなくなる。

この黒色化は、図 17 ②に示すものと同じく、きわめて微細な黒色の酸化摩耗粉の付着によるもので、初期と定常の間の著しい摩耗率の差異を説明できるのは、摩擦面に対する摩耗粉の蓄積以外に見当たらないとする佐田の主張⁵⁾ ならびに酸化物の存在が摩耗を減少させるとする笹田らの結論⁶⁾ によれば、磁化されたピンの下面や周辺に、あるいはわずかな磁気を帯びてロータの摩擦面全体に付着吸引された酸化摩耗粉の介在が摩耗を減少せしめ、マイルド摩耗状態に移移させる主要因と考えられる。

3.1.4 摩耗粉を除去したときの摩耗挙動

摩耗の減少が微細な摩耗粉の吸引介在によるものと考えれば、この摩耗粉を除去することによって摩耗状況は変

Fig. 8 Effects of wear particle and magnetic current-fluctuation on wear
 $P=4.1\text{ N}$, $V=30\text{ m/min}$

わってくると思われる。そこで十分に脱脂した絵筆をロータの摩擦面に当てて摩耗粉を除去した結果、 i_c 以上の $i=5\text{ mA}$ のもとでも、図 8 に示すように、 $i=0\text{ mA}$ の場合と同じようなシビア摩耗の様相を示した。

3.1.5 磁化を途中で変化した場合の摩耗挙動

$i > i_c$ のもとでマイルド摩耗に遷移しはじめた $L=600\text{ m}$ のところでは、摩擦面には酸化摩耗粉がうすくついている程度であるが、ここで電流を切って磁化を中止しても、図 8 に示すように $L=6600\text{ m}$ においてもマイルド摩耗の状態、酸化摩耗粉存在の効果はかなり長い距離持続する。

このときのロータ面には酸化摩耗粉はあまりなく白色を呈するが、ピンの摩擦面には黒色の微細摩耗粉が埋め込まれたようになっている。

しかし $L=200\text{ m}$ で電流を切り磁化を中止した場合には、同図に示したように、酸化摩耗粉が存在しないためにシビア摩耗の状態に移行する。

一方、 $i=0\text{ mA}$ で 660 m 摩擦後、電流を 5 mA とした場合には、図 8 に示したようにマイルド摩耗に移行する。

3.1.6 交流磁場によるニッケルの流れ応力の変化

強磁性材料の流れ応力は、交流磁場のもとでは低下することをさきに報告したが、以上の実験で摩耗の減少をもたらすことの確かめられた 50 A/m 程度のごく微弱な交流磁界によってもニッケルピンの流れ応力が変化するかなかを検討する必要がある。

ピンを作り出す純ニッケル線の引張変形の過程で、 50 Hz の交流電流による磁界 H を加えると、図 9 の挿図に示すように、流れ応力 σ は $\Delta\sigma$ だけ低下するが、図は $\Delta\sigma$ の H ならびにひずみ e による変化を示している。

Fig. 9 Decrease in tensile flow stress of pure nickel wire under AC magnetic field

Fig. 10 Measurements of tangential force F and frictional coefficient μ

図の $H=32.2\text{ A/m}$ は、摩耗試験装置における磁化コイル電流 $i=1.7\text{ mA}$ の磁界に相当するが、このような弱磁場においても流れ応力は低下することがわかる。しかしこのときの $\Delta\sigma$ は、ひずみが 1% 以下においてのみ認められ、しかも流れ応力 σ の 0.2% 以下の変化であり、 $H=161\text{ A/m}$ でも $\Delta\sigma$ は σ の 1.2% 以下であって、この程度のピン材の流れ応力の低下は、磁場内での繰返し摩耗の挙動を支配する主要因になるとは思われない。

3.1.7 接線力 F の測定

図 10 は、接線力 F の測定結果の一例で、 i_c 以下の $i=2\text{ mA}$ では摩擦面の荒れによって F の値に大きな変動がみられるが、 i_c 以上の $i=5\text{ mA}$ ではその変動はわずかで摩擦音もなめらかであって、微細摩耗粉の存在がピンとロータとの間の凝着を抑制しているものと思われ、これが摩耗の減少をもたらすと考えられる。ただ、 F から

Fig. 11 Effect of DC magnetic field on wear

求めた摩擦係数 μ の値は、 i によってあまり変化しないようである。

3.1.8 摩耗に及ぼす直流磁界の影響

直流磁界の場合にも、図 11 に示すように、交流磁界におけると同等以上の外部磁場を加えることによって、摩耗の激減することが確かめられた。

直流磁界では、強磁性材の流れ応力の低下はみられず、このことから交流磁界による流れ応力の低下は、ほとんど繰返し摩耗には影響していないといえる。

3.1.9 ピンの磁化による摩耗減少の原因

3.1.3 項ないし 3.1.8 項に述べた実験結果から、ピンを磁化することによって摩耗の激減する原因は、黒色の微細な酸化摩耗粉が摩擦面間に吸引介在することによると考えられる。この酸化摩耗粉の発生機構は明らかではないが、3.2 節で述べるように、シビア摩耗域における摩耗粉にはき裂の入っているものがあることから、このような摩耗粉が磁化吸引されて繰返し摩擦をうける過程で破砕し、活性化されて酸化が促進され、それによってさらに微細化が進むであろうし、またシビア摩耗域においても微細な摩耗粉をも生じるであろうから、これらは微弱な磁場によっても容易に摩擦面に介在し得たであろうと考えている。低速・軽荷重の場合、移着粒子は大きく成長できず、微細な摩耗粉のいわゆるマイルド摩耗になり、摩耗粉の大きさは摩擦速度に比例するとする笹田の報告⁹⁾によれば、低速・軽荷重で i_0 が小であるのは、摩耗粉が小さく吸引に要する磁化が小さくてよく、また高速・重荷重で i_0 の大きいのは、より大きな摩耗粉を吸引するために強い磁化を必要としたことによるものと考えられる。

なお本実験は、強磁性材同士の繰返し摩耗の場合であって、酸化摩耗粉介在の度合の少ない処女面摩耗においては、直流磁場によっても摩耗は増大すると Muju ら¹²⁾

Fig. 12 Variation of magnetic moment of rotor by rubbing tests

Fig. 13 Magnetic moment of rotor manufactured by plane grinding

は述べており、3.1.6 項で示した交流磁化による流れ応力の低下は、処女面摩耗に影響を与えるであろうと考えられ、今後の検討課題である。

3.1.10 摩耗試験前後のロータの磁気モーメントの変化

ピンを磁化することによってロータが永久磁石化することも考えられるが、図 12 に示すように、試験前の最大の磁気モーメント M_0 が $L=1800 \sim 2100$ m の摩耗試験後にもつ磁気モーメント M_1 は M_0 と大差なく、ロータ自体が摩耗試験により磁化して i_0 に影響することはないと判断される。この磁気モーメントの変化が少ないのは、交流磁場が消磁としても作用したことによると思われる。

3.2 磁化したロータの摩耗に及ぼす影響

S 45 C 材で作られたロータは、旋削や平面研削によって加工されるが、その際磁化されることが多い。そこで、ロータのもつ磁気モーメント M と摩耗との関係について検討した。 M は高い感度を有する無方位磁束計⁹⁾で測定したが、図 13 にその一例を示すように、研削の場合

Fig. 14 Relations between wear and magnetic moment of rotor

Fig. 15 Relations between wear and magnetic moment of rotor

$6 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ 以上にもなることがわかった。

3.2.1 磁化したロータによる摩耗試験

図 14 ならびに図 15 は、コイル電流 i を 0 として、いろいろな値の M をもつロータによる摩耗試験を行った結果であって、ピンを磁化したときと同様に、摩耗に影響を及ぼす臨界の磁気モーメント M_c が存在し、摩擦速度 V が 30 m/min の場合、荷重 P が 2.7 N のときは、 M_c は $7 \times 10^{-4} \text{ Am}^2$ 程度であるが、 P が 4.1 N と重くなると、 M_c は $6.5 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ に増加することがわかる。

図 16 は、この M_c を P に対して図示したもので、ロータのもつ磁気モーメントがこの M_c 以上のときはマイルド摩耗状態に、また M_c 以下のときはシビア摩耗状態になることを示している。

P が 1.4 N と軽荷重の場合には、消磁によってもわずかに残留する $2 \times 10^{-4} \text{ Am}^2$ 以下の磁気モーメントによっても微細摩耗粉をロータ面に吸引し得て摩擦面は黒色化し、摩耗の減少をもたらすことを示しており、前述のように、図 5 および図 6 で i が 0 mA でも摩耗の少ないのはこのロータのもつわずかな残留磁気によるものと思

Fig. 16 Effect of normal load on critical magnetic moment

われる。

ロータの両側面を平面研削により仕上げたときの、ロータの磁気モーメントは、 $6 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ 以上になるが、いわゆる磁石としてはごく弱いものであり、旋削によって与えられる $0.5 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ の磁気モーメントでは、ほとんど磁気を帯びていないように思われるほどの微弱な値であって、この程度の磁気によっても摩耗が大きく影響をうける場合のあることは、強磁性材料同士の組合せにおける摩耗の研究を行う際の試験片の準備には、細心の注意が必要であることを示すとともに、摩耗防止の一手段となる可能性を示すものと思われる。

3.2.2 摩擦面ならびに摩耗粉の顕微鏡観察

臨界磁気モーメント M_c を境にして、摩耗量には極端な差異があるが、これはピンの磁化におけると同様に、微細酸化摩耗粉の付着の有無によるものである。

図 17 は、 M_c 以下の $3 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ と M_c 以上の $7.4 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ の磁気モーメントをもつ 2 つのロータの、摩擦距離 L に対する摩耗量 ΔW_r を求め、図中に示した測定箇所、光学顕微鏡によるロータ表面の観察と、摩耗粉の走査型電子顕微鏡による観察を行った結果である。

$M > M_c$ の場合でも、初期の測定点 ① では、ロータ表面ならびに摩耗粉は金属光沢を呈し、摩耗率は大きであるが、以後摩耗の進行は鈍化し、② ではロータ表面に黒色の微細摩耗粉が付着しておいて、排出された摩耗粉は、① の直後に生じたと思われる大きい摩耗粉に、その後に生じた微細粉をまぶしたようになっており、大きい摩耗粉にもき裂が入っていて分裂の過程にあると思われるものがあり、微細粉の生成機構を暗示すると思われる。③ 以降では、摩耗粉はほとんど生じない。

一方 $M < M_c$ では、摩擦距離 1500 m の ④ においても初期の ③ と同様に、ロータ表面ならびに摩耗粉は金属光沢をもち、微細な酸化摩耗粉の存在は認められない。

この観察結果からも、ロータを磁化した場合にもピンを磁化した場合と同様に、微細な酸化摩耗粉の摩擦面へ

Fig. 17 Optical micrograph of rotor surface and scanning electron micrograph of wear particle

の吸引介在が摩耗減少の主要因であると考えられる。

4. 結 言

ニッケルピンとS45Cロータの組合せによる強磁性材同士の繰返し摩耗試験における磁場の影響を検討した結果を要約すれば、以下のようである。

- (1) 臨界値以上の交流または直流外部磁界に置かれたピン、あるいは臨界値以上の磁気モーメントをもつロータにおいては、摩耗は急激に減少し、シビア摩耗からマイルド摩耗の状態に遷移する。
- (2) 摩擦速度 30 m/min, 荷重 4.1 N における外部磁界 H_0 の臨界値は 50 A/m, ロータの磁気モーメン

トの臨界値は $6.5 \times 10^{-3} \text{ Am}^2$ 程度の微弱なものであるが、低速・軽荷重のもとでは、より小さな磁気によってもマイルド摩耗状態となる。

- (3) 摩耗の減少は、磁化による微細摩耗粒子の吸引介在によると思われる。
- (4) 以上のことから、強磁性材料同士の組合せにおける摩耗の研究に用いる試験片の機械加工による残留磁気モーメント、ならびに実験の際の外部磁界には、十分留意する必要があることを指摘する。
- (5) なお、交流外部磁場によるニッケルピンの流れ応力の低下が摩耗に及ぼす影響ならびに磁場中での酸化摩耗粉の発生機構などについては、今後さらに検討する必要があると考える。

最後に、磁気モーメントの測定法についてご教示頂いた本学乗富教授に厚く御礼申し上げるとともに、実験に協力された本学藤田技官ならびに当時の学生奥田、桑原の両君に感謝の意を表します。また有意義なご指摘ご教示を頂いた校間委員の各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) M. K. Muju & A. Ghosh: A Model of Adhesive Wear in the Presence of a Magnetic Field—I, *Wear*, **41**, 1, (1977) 103.
- 2) M. K. Muju & A. Radhakrishna: Wear of Non-magnetic Materials in the Presence of a Magnetic Field, *Wear*, **58**, 1, (1980) 49.
- 3) V. Raghuram & M. K. Muju: Improving Tool Life by Magnetization in Hot Machining, *Int. J. Mech. Tool Des. Res.*, **20**, 2, (1980) 87.
- 4) M. L. Neema & P. C. Pandey: The Effect of Magnetization on the Wear of High Speed Steel Tools, *Wear*, **59**, 2, (1980) 355.
- 5) 佐田登志夫: 繰返し摩擦における摩耗の過渡現象の機構, *日本機械学会論文集*, **24**, 143 (1958) 407.
- 6) 笹田 直, 大村平人: くり返し摩擦における初期および定常摩耗, 潤滑, **15**, 11 (1970) 758.
- 7) 熊谷一男: 強磁性材料の機械的性質に及ぼす磁場の影響, *日本機械学会論文集 (A 編)*, **49**, 443 A (1983) 796.
- 8) 笹田 直: 凝着と摩耗, 潤滑, **24**, 11 (1979) 700.
- 9) 乗富一雄: 岩石の磁気測定, *物理探鉱*, **23**, 1 (1970) 54.