ベーナイト鋼のすべり摩耗特性*

竹 内 栄 一** 浅 見 和 也*** 磯 尾 仁 義***

On the Sliding Wear Characteristics of Bainite Steel

Eiichi TAKEUCHI, Kazuya ASAMI, Saneyoshi ISOO

This study was made for examination of the sliding wear characteristics of bainite steel. As a stator, carbo-nitrized steel was used, while as a rotor, four kinds of test pieces of bainite steels having a material hardness between H_V 250-390 and made into a desired configuration by punching, fine blanking or turning were used. They were subjected to unlubricated sliding wear for obtaining velocity-wear characteristics and wear resistance of said bainite steel, under the conditions of contact pressure 10 kg/cm², sliding velocity 0.10-4.00 m/s, and sliding length 0-5000 m. This experimental results show that bainite steel was extremely work-hardening and especially when it was punched out, its work-hardening was large, and also that the wear rate was comparatively small when the hardness of steel material was comparatively high. It is shown also that such work-hardening phenomena or the residual stress produced on a sliding surface on account of work has much influences over the wear characteristics, wear resistance and so on of said steel material. It is found, by the observation of metal transfer produced with the progress of wear, that said transfer phenomenon was hardly visible in the material which was obtained by turning and in which tensile stress remained in the sliding surface, while a severe metal transfer was observed in the material which was obtained by punching or fine blanking and in which compression stress remained.

1. 緒 言

高度な加工精度と耐久性を要求される通信機器や電子計算機あるいは各種事務機器類の構造用材料として最近ベーナイト鋼が広く利用されるようになった。一般にベーナイト鋼は衝撃や曲げ疲れ等の機械的性質に優れた特性を有することは周知である。しかし、その摩耗特性についてはベーナイト鋼の多くが薄鋼板であり、かつプレス加工等によって得た端面における摩耗現象を知る必要があることから実験的に困難を伴う場合が多く、したがって系統的に行った研究はほとんど報告されていない。

本研究は工業的な生産方式によって得た素材かたさの異なる4種類のベーナイト鋼について、非潤滑状態のもとでのすべり摩耗を行い、それぞれの摩耗特性を検討すると共に、プレス打抜きあるいは切削加工などの加工方法を変えた場合のすべり面に生成する加工硬化現象等が摩耗に及ぼす影響についてもあわせて吟味したものである。

2. 実験に用いた試験片ならびに方法

摩耗実験に用いた固定試験片は0.12%Cの厚さ2mm低炭素鋼板からプレス打抜き加工によって採取した図1に示すごとき寸法、形状を有するもので、プレス加工後回転試験片と面接触する24R面を研削仕上げしたのち、NaCN 50%, BaCl₂ 30%, NaCl 20%の浸炭窒化性混合塩浴中で830°C、1h処理し、その温度から油焼入れ、200°C、1h焼もどしを行い、すべり面付近のかたさを H_V 700~750としたものである。また、これと組合せる回転試験片は冷間圧延後表1に示す諸条件のもとでオーステンパ処理を施した厚さ1mmの鋼板から図1に示す寸法、形状の中空円板状にプレス打抜き、精密プレス

図1 摩 耗 試 験 片

* 原稿受付 昭和49年10月14日。ベーナイト鋼帯の加工性と精密機器への適用 シンポジウム (昭和49年7月12日) にて発表。

** 正 会 員 東京都立工業技術センター (東京都北区西ヶ丘3-13-10)

*** ブラザー工業(株) (名古屋市港区港明町2-1)

表1 実験に用いた摩耗試験片の化学組成ならびに熱処理条件

試験片 種類	記号	化学組成(%)					熱処理条件
		C	Si	Mn	P	S	
固定	S 15 C	0.12	0.29	0.58	0.021	0.011	830°C~60 min 浸炭窒化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし
回転	H _V 250 S 35 C	0.36	0.22	0.70	0.028	0.013	850°C加熱, 440°C オーステンパ, 板材送り速度: 2 m/min
"	H _V 300 S 45 C	0.45	0.27	0.69	0.026	0.014	850°C加熱, 440°C オーステンパ, 板材送り速度: 2 m/min
"	H _V 340 S 55 C	0.55	0.22	0.71	0.021	0.013	840°C加熱, 410°C オーステンパ, 板材送り速度: 2 m/min
"	H _V 390 S 55 C	0.55	0.22	0.71	0.021	0.013	830°C加熱, 400°C オーステンパ, 板材送り速度: 1.8 m/min

ただし浸炭窒化処理には NaCN 50%, BaCl₂ 30%, NaCl 20% の混合塩浴を使用

打抜き(以下, 精密打抜きと略記)あるいは切削加工したもので, このうち切削加工の試験片については外径をあらかじめ 50 mm にプレス打抜きしたのち旋削加工によって 48 mm に仕上げた. なおこの場合, 素材かたさ H_V 250 のものは S 35 C, H_V 300 については S 45 C, また H_V 340 および 390 の回転試験片は S 55 C のペーナイト鋼板からそれぞれ採取した.

摩耗実験は 100% すべり摩擦方式の試験機を用いた¹⁾. また実験条件は接触圧力を 10 kg/cm² に一定とし, すべり速度のみ 0.10~4.00 m/s の範囲に変化させて定常摩耗域における速度-摩耗特性等を吟味した.

摩耗後は主として回転試験片のすべり面についてその状態を観察し, その結果から摩耗機構を検討した. すなわち, 後述のごとく速度-摩耗特性曲線を求めた実験において, 高速側における摩耗特性が打抜きと切削加工により相違することが認められ, その原因を解明するためすべり面における残留応力ならびに相手材料の金属転移現象 (metal transfer) を観察した. まず, 加工あるいは摩耗によって変化する残留応力の測定には X 線ひずみ測定装置を用い, sin²φ 法によりすべり方向と同一方向の残留応力について求めた. なお, このときの応力計算には弾性係数 21 000 kg/mm², ポアソン比 0.28, 計数管定数 -30.52 をそれぞれ定数として用いた. また, 金属転移現象の観察には X 線マイクロアナライザ (以下 XMA と略記) を使用したが, 本実験の場合, 類似の鉄系材料同志の組合せによる摩耗であるため, この実験に限り固定試験片として BC-6 を使用し, 回転試験片のすべり面における Cu Kα の線分析を行った.

3. すべり面に生ずる加工硬化現象

一般にペーナイト鋼は普通鋼に比べて加工硬化現象が著しいものの一種といわれ, これが摩耗に影響をもたらすことは容易に推察される. そこで本実験では上述のごとく加工方法を異にする 3 種類のペーナイト鋼について加工後のすべり面のかたさを測定し, 素材かたさとの関

図2 回転試験片に用いたペーナイト鋼の加工方法と加工硬化現象

係を求めた. 図2はその結果を示したものである. これによると, いずれも加工により著しい硬化現象を伴うことが認められた. すなわち, プレス打抜き加工したものは最もかたさ変化が激しく, 素材かたさのいかにかわらず H_V 150 程度の増加がみられ, 精密打抜き加工がこれに次いで H_V 100 前後の上昇となった. これらに比べて切削加工したペーナイト鋼は約 H_V 70 の硬化であり, プレス打抜き材に比べてかたさの増加割合は約 1/2 となることを認めた.

次に上述の加工法のうち, プレス打抜きと切削加工材についてそれらのすべり面中央付近に相当する領域のすべり方向と同一方向に生成している残留応力を測定した. その結果は図3に示すごとくなり, プレス打抜き材については素材かたさのいかにかわらず約 30 kg/mm² の圧縮応力が得られた. しかるに切削加工材ではいずれも引張応力が残留し, 素材かたさが高くなるほど応力値は減少の傾向がみられた.

4. ペーナイト鋼の速度-摩耗特性

4.1 打抜き加工したペーナイト鋼の速度-摩耗特性

プレス打抜き加工によって作製した素材かたさ H_V 250~390 (すべり面のかたさ H_V 405~540) のペーナイト鋼回

残留応力の測定: $\sin^2\psi$ 法 (ただし, 測定した応力の方向は摩耗の際のすべり方向と一致させた)

試験片: 固定; 0.12% C 鋼 (830°C~60 min 浸炭窒化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし), 回転; S 35 C~S 55 C, ベーナイト鋼
摩耗条件: $p=10 \text{ kg/cm}^2$, $v=1.00 \text{ m/s}$, $l=1000 \text{ m}$

図3 加工方法ならびに素材かたさの異なるベーナイト鋼の摩耗に伴うすべり面付近の残留応力の変化 (回転試験片)

転試験片と, 浸炭窒化処理を施した炭素鋼の固定試験片を組合わせて接触圧力 10 kg/cm^2 一定のもとですべり速度のみ $0.10 \sim 4.00 \text{ m/s}$ の範囲に変化させた非潤滑, すべり摩耗を行い, 主として回転試験片に用いたベーナイト鋼についてその速度-摩耗特性曲線を求め, 図4に示す。

この結果によると, 凝着摩耗によって摩耗率が最大となる条件は, 素材かたさのいかんにかかわらずすべり速度 1.00 m/s 付近となることが認められた。また, そのときの最大摩耗率はすべり面のかたさが高くなるほど低下する傾向があり, すべり面かたさ $H_V 500$ 前後から高硬度側ではほとんど変化がみられなかった。しかしながら, すべり速度 2.00 m/s 以上の高速領域では摩耗後重量増加が起り, 激しい凝着等による相手材料の金属転移現象が生成することを示している。この原因として, 前掲図3に示したごとくプレス打抜材のすべり面には約 30 kg/mm^2 の圧縮応力が残留し, これが摩耗の進行に伴ってさらに増加する傾向にあり, 金属転移を起こした領域の機械的な破壊によるすべり面からの剝離, 脱落を妨げているものと考えられる。

次に精密打抜加工によって得た回転試験片を用いて上述と同様な条件により摩耗を行った。図5はその結果の

試験片: 固定; 0.12% C 鋼 (830°C~60 min 浸炭窒化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし), 回転; S 35 C~S 55 C ベーナイト鋼
摩耗条件: $p=10 \text{ kg/cm}^2$, $v=0.10 \sim 4.00 \text{ m/s}$, $l=2000 \sim 5000 \text{ m}$, 非潤滑-すべり摩耗

図4 プレス打抜加工したベーナイト鋼の速度-摩耗特性曲線 (回転試験片)

試験片: 固定; 0.12% C 鋼 (830°C~60 min 浸炭窒化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし), 回転; S 45 C~S 55 C, ベーナイト鋼
摩耗条件: $p=10 \text{ kg/cm}^2$, $v=0.10 \sim 4.00 \text{ m/s}$, $l=2000 \sim 5000 \text{ m}$, 非潤滑-すべり摩耗

図5 精密打抜加工したベーナイト鋼の速度-摩耗特性曲線 (回転試験片)

一部を示したもので, 摩耗率が最大となるすべり速度は $0.50 \sim 0.70 \text{ m/s}$ 付近にあり, ことに低硬度材料において摩耗損失が大きいことを表している。換言すると, 素材かたさ $H_V 340$, すべり面かたさ $H_V 445$ 前後のもの,あるいはこれよりも高硬度側のベーナイト鋼はプレス打抜加工材よりもやや摩耗率が低くなる (後掲図8参照)。この原因の一つとして, 精密打抜加工したものはプレス打抜加工材に比べて表面あらかの優れていることが挙げられる。しかし, この場合も高速摩耗域において相手材料からの金属転移により摩耗後重量増加を伴うことが認められた。

なお, 上述の実験共最大摩耗率を表す条件より低速側では摩耗粉末のほとんどが $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ によって占められ, 酸化摩耗が摩耗損失の主体となっていることを表し,

試験片: 固定; 0.12% C 鋼 (830°C~60 min 浸炭窒化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし), 回転; S 35 C~S 55 C, ベーナイト鋼
 摩耗条件: $p=10 \text{ kg/cm}^2$, $v=0.10\sim4.00 \text{ m/s}$, $l=2000\sim5000 \text{ m}$, 非潤滑すべり摩擦

図 6 切削加工したベーナイト鋼の速度-摩耗特性曲線 (回転試験片)

試験片: 固定; 0.12% C 鋼 (830°C~60 min 浸炭窒化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし), 回転; S 45 C ベーナイト鋼 ($H_v 300$) および 0.12% C 鋼 (熱処理条件は固定試験片と同じ)
 摩耗条件: $p=10 \text{ kg/cm}^2$, $v=0.10\sim4.00 \text{ m/s}$, $l=2000\sim5000 \text{ m}$, 非潤滑すべり摩擦

図 7 加工方法を異にするベーナイト鋼の速度-摩耗特性曲線の比較 (回転試験片)

かつすべり速度の低いときほど摩耗率の低下する傾向がみられた。

4.2 切削加工したベーナイト鋼の速度-摩耗特性

外径 50 mm にプレス打抜きしたベーナイト鋼を旋削加工によって 48 mm に仕上げたのち, これを回転試験片として前項で述べたと同様な条件によりすべり摩耗実験を行い, 切削加工材の速度-摩耗特性曲線を求めた。図 6 はその結果を示したもので, この場合もすべり面のかたさが低下するほど最大摩耗率は増加の傾向を呈するが, そのときのすべり速度は 0.50~0.60 m/s 付近に存在する。しかしながら, 高速摩耗域における摩耗率には打抜き加工材にみられたような摩耗後重量増加を起こすことがほとんど認められなかった。これは前掲図 3 に示したごとく摩耗前すべり面に引張応力が存在し, これが摩

耗の進行に伴って低下し, その一部は圧縮応力に移行する傾向にあるが, 多くの場合凝着によって生じた金属転移が比較的低エネルギーでせん断破壊され, 剝離, 脱落を起こしたものと推察される。

4.3 速度-摩耗特性と加工方法の関係

図 7 はプレス打抜き, 精密打抜きおよび切削加工により成形した工業的利用度が比較的高いと思われる素材かたさ $H_v 300$ のベーナイト鋼の回転試験片を用い, これと浸炭窒化処理鋼の回転試験片を組合わせたときの速度-摩耗特性曲線を示したものである。これによると, 凝着摩耗域における摩耗損失は精密打抜き材が最も大きく, 切削加工材, プレス打抜き材の順に摩耗率は低下している。また, このときのすべり速度は精密打抜き, 切削加工材共 0.50 m/s 付近にあり, プレス打抜き材では 1.00 m/s となる。このような結果からプレス打抜き材は他の方法で加工したものに比べて最大摩耗率が最も低く, かつそのすべり速度が高速側にあることからみて最も優れた耐摩耗性を表しているものと判断される²⁾。

なお, 上述の結果と比較するためプレス打抜きした 0.12% C 鋼の回転試験片を固定試験片と同様な条件で浸炭窒化処理し, 実験に供した。結果は図 7 に併記したごとくであり, すべり速度 0.60 m/s 付近に凝着による摩耗率の最大値が現れる。しかし, ベーナイト鋼に比べてすべり面かたさがきわめて高く, したがって摩耗率は全条件にわたって低い値となることが認められた。

図 8 はそれぞれ異なった加工法によって得たベーナイト鋼の回転試験片について最大摩耗率とすべり面かたさの関係を示したものである。これによると, 切削加工材の場合は, 本実験で得たすべり面かたさ $H_v 330\sim450$ の範囲においてその値が高くなるほど摩耗率の漸減傾向が認められた。しかし, プレス打抜きや精密打抜きのごとき打抜き加工を行ったものは, かたさと摩耗率の関係はなほ類似しており, すべり面かたさ約 $H_v 450$ より低硬度側でかたさの増加に伴う摩耗率の減少が著しく, 逆に高硬度側の $H_v 500$ 付近では摩耗率ならびにその変化の少ない結果が得られた。

上述のごとき現象はすべり面におけるかたさ, 残留応力あるいは表面あらさなどの総合的影響によるものと考えられ, 本実験では主として前 2 者の影響について考察

試験片: 固定; 0.12% C 鋼 (830°C~60 min 浸炭空化, 油焼入れ, 200°C~60 min 焼もどし), 回転; S 35 C~S 55 C, ペーナイト鋼

摩耗条件: $p=10 \text{ kg/cm}^2$, v : 最大摩耗率が得られた速度 (m/s), $l=2000\sim5000 \text{ m}$

図8 ペーナイト鋼の摩耗に及ぼすすべり面のかたさの影響

を行った。すなわち、切削加工した回転試験片はその表面あらさが他のものと比べて最もよく、かつすべり面かたさがその素材かたさによって前掲図2に示すようにほぼ直線的变化をするが、残留応力は図3から明らかなごとく摩耗前素材かたさの高いものほど引張応力が低く、しかも例えば接触圧力 10 kg/cm^2 , すべり速度 1.00 m/s , すべり距離 1000 m で摩耗したのちはさらに応力の減少がみられ(速度 2.00 m/s 付近より低速側で摩耗を行った場合、同様な結果が得られる³⁾), その一部は圧縮側へ移行して $+12\sim-12 \text{ kg/mm}^2$ の範囲となる。これらの結果と図8の摩耗曲線を比較検討した場合、素材かたさ $H_v 250$ 付近ではすべり面かたさが低く、かつ摩耗前後において引張強さが残留しているため摩耗率が多くなり⁴⁾, 逆に $H_v 390$ の素材かたさを有するペーナイト鋼は摩耗の進行に伴って残留応力が引張りから圧縮へ移行し、しかもその値がゼロに近くなるため、およびすべり面かたさが高いことなどから摩耗率が減少するものと判断される。

これに対してプレス打抜材はかたさのいかにかわらず摩耗前約 -30 kg/mm^2 , 摩耗後 -40 kg/mm^2 前後の圧縮応力が残留する。しかもすべり面に生ずる加工硬化現象は切削加工と比べてはるかに顕著である。これらの結果を図8と比較すると、すべり面かたさが低い状態のもとでは残留応力の影響をも受けて著しい摩耗損失がみられる。しかし、高硬度側では後述のごとき相手材料からの金属転移現象、ならびにこの部分の剝離、脱落にはいっそう大きなせん断力を必要とする関係上多量の金

属転移領域を残存することとなり、結果的には摩耗率が低い値となって表れたものと判断される。なお、精密打抜材についても上述と同様なことがいえるものと考えられる。

5. ペーナイト鋼すべり面に生ずる金属転移現象

回転試験片として用いたペーナイト鋼のすべり面に生ずる相手材料の金属転移現象をより明らかな状態で観察するため固定試験片に BC-6 (Cu 82.98%, Sn 5.18%, Pb 4.31%, Zn 6.30%, その他 1.23%) を用い、これとプレス打抜きおよび切削加工した素材かたさ $H_v 300$ のペーナイト鋼回転試験片を組合わせて前述と同様な条件で速度-摩耗特性曲線を求めた。その結果、摩耗後重量増加を起こす高速領域にある接触圧力 10 kg/cm^2 , すべり速度 4.00 m/s の条件で距離 5000 m 摩耗を行った各回転試験片のすべり面について XMA により相手材料からの金属転移現象を観察した。図9および図10はその結果の一例を示したものである。すなわち、図9はプレス打抜加工材のすべり面における金属転移現象を吟味したもので、ほぼ全面にわたって相手材料の主要成分である Cu が存在し、一部には粗大な凝着領域を検出することができた。これに対して切削加工したものは図10にみられるごとく Cu の金属転移がきわめて少ないことを認めた。

上述のような差異の表れた原因は、金属の疲労現象においてしばしば認められるごとく、表面に圧縮応力が存在するものの方が、引張応力の残留するものよりも疲労限の高くなるという現象から類推して、摩耗の過程で生成した凝着領域が次の段階で剝離、脱落する場合、すべり面に圧縮応力があるときは強度的に弱いと考えられる凝着部の一部からせん断が起こり、結果としてすべり面には金属転移現象がみられるようになる。これに対し、すべり面に引張応力が存在するときは、すべり面の一部からせん断が起こり、金属転移領域をも含めて破壊、脱落するため、摩耗後のすべり面には相手材料からの金属転移現象が検出しにくかったものと考えられる。

6. 結 言

素材かたさ $H_v 250\sim390$ のペーナイト鋼について、プレス打抜き、精密打抜きおよび切削加工のごとく、それぞれ加工法を異にする方法で作製した固定試験片と、一定条件で浸炭空化処理した 0.12% C 鋼の回転試験片を組合わせて、非潤滑-すべり摩耗を行い、ペーナイト鋼の摩耗特性に及ぼすかたさ、加工方法などの影響を吟味すると共に、その摩耗機構、ことに金属転移現象について

試験片：固定；BC-6，回転；ペーナイト鋼（ H_V 300，プレス打抜加工）

摩耗条件： $p=10 \text{ kg/cm}^2$ ， $v=4.00 \text{ m/s}$ ， $l=5000 \text{ m}$ ，非潤滑-すべり摩擦

分析条件：加速電圧；25 kV，試料電流；0.04 μA ，X線径；約4 μm ，分光結晶；LiF，X線検出器：Cu $K\alpha$ Kr Exa.，Fe $K\alpha$ Ar Exa.，カウントフルスケール；別記，タイムコンスタント；Cu $K\alpha$ 2s，Fe $K\alpha$ 0.6s

図9 プレス打抜加工したペーナイト鋼のすべり面に生じた相手材料の金属転移現象

試験片：固定；BC-6，回転；ペーナイト鋼（ H_V 300，切削加工）

摩耗条件： $p=10 \text{ kg/cm}^2$ ， $v=4.00 \text{ m/s}$ ， $l=5000 \text{ m}$ ，非潤滑-すべり摩擦

分析条件：加速電圧；15 kV，試料電流；0.04 μA ，X線径；約4 μm ，分光結晶；LiF，X線検出器：Cu $K\alpha$ Kr Exa.，Fe $K\alpha$ Ar Exa.，カウントフルスケール；別記，タイムコンスタント；Cu $K\alpha$ 2s，Fe $K\alpha$ 0.6s

図10 切削加工したペーナイト鋼のすべり面に生じた相手材料の金属転移現象

検討した。次にその結果を要約する。

- (1) ペーナイト鋼は加工の段階で著しい加工硬化現象を伴うが、かたさの増加する割合は切削加工，精密打抜きおよびプレス打抜きの順に大きくなる。
- (2) 摩耗前後におけるペーナイト鋼のすべり面に存在するすべり方向と同一方向の残留応力を $\sin^2\phi$ 法により測定した。その結果，打抜加工材については圧縮応力が，また切削加工材については引張応力が観察され，これらは摩耗後さらに圧縮応力を増加させるか，あるいは引張りから圧縮方向へ応力の移行する傾向がみられた。
- (3) 打抜加工を施したペーナイト鋼は凝着摩耗域で生ずる最大摩耗率がそのかたさの影響を受けやすく，これが高いものほど摩耗率は低下する。これに対して切削加工材は傾向的には上述と類似しているが，かたさの増加に伴う摩耗率の減少割合は小さい。換言すると，打抜きと切削加工材ではかたさの増加が影響する摩耗率の減少傾向は異なるものといえる。
- (4) 高速摩耗域において，打抜加工したペーナイト鋼はしばしば相手材料の金属転移現象により摩耗後重

量増加を起こすことがある。しかし切削加工材についてはこのような現象の検出がはなはだ困難である。

- (5) 前項のごとく，加工方法のいかんによって相手材料からの金属転移現象に変化が現れる原因は，すべり面に存在する残留応力の影響によるものと判断される。すなわち，プレス打抜材のごとく顕著な圧縮応力が残留するものは凝着等によって生じた金属転移領域の剝離，脱落にかなりのエネルギーをもたせんと断力を必要とするが，引張応力が残存する切削加工材の場合はこれが比較的低エネルギーのせん断力により剝離され，脱落するものと判断される。

引用文献

- 1) 竹内栄一：鑄鉄の摩耗，誠文堂新光社（1968）18.
- 2) 竹内栄一：鑄鉄の耐摩耗因子に関する検討，金属表面技術，15（1964）289.
- 3) 竹内栄一：鋼のすべり摩耗に及ぼす残留応力の影響，材料試験技術，19，3（1974）28.
- 4) 遠藤吉郎，福田嘉雄，井上源之助，高宮修武：鋼の摩耗に及ぼす内部応力の影響，精密機械，37（1971）496.