エンジン用バルブ・バルブシート材の高温衝撃摩耗特性* (マルテンサイト系耐熱鋼 SUH3 と鉄系焼結材との平面衝突の場合)

大 谷 剛 生^{*1}, 矢 畑 昇^{*2}
藤 木 章^{*3}, 江 平 淳^{*3}

Impact Wear Characteristics of Valve and Valve Seat Insert Materials for Engines at High Temperature (Plane Impact of Martensitic Heat Resistant Steel SUH3 against Fe-Base Sintered Alloy)

Takeo OOTANI, Noboru YAHATA,
Akira FUJIKI and Atsushi EHIRA

In order to simulate the wear of the valve and valve seat insert of actual engines, an impact wear test is conducted using a ring of JIS SUH3 steel valve material, and a disk of sintered alloy valve seat insert material. Test conditions are as follows: impact energy is 0.588 J; atmosphere is normal air; temperatures are room temperature, 200°C and 400°C; sliding speed is from 0 to 0.8 m/s. Under these conditions, for impact only without sliding, very low wear is observed. Under impact with sliding conditions, at room temperature and 200°C, a bright worn surface is observed. With a sliding speed over 0.4 m/s the wear rate is severe. However, at 400°C, oxidation occurs and no acceleration of wear rate is observed at all sliding speeds. At any sliding speed and test temperature, the sintered alloy disk wear is more severe than that of the SUH3 steel ring. These results can be explained taking into consideration the oxidation and mechanical properties of these materials.

Key Words: Impact Wear, Sliding Speed, Impact Cycle, High Temperature, Bright Worn Surface

1. ま え が き

近年,自動車エンジンに対する要求として高性能化・高出力化,メンテナンスフリー化および低燃費化などが挙げられる。これらに伴って,各部品に対する耐摩耗性の要求は厳しく,その中でもバルブ,バルブシートを含む動弁系に対する耐摩耗性の要求は特に厳しいものがある。バルブおよびバルブシートは高温にさらされる上に,バルブはバルブスプリングによりバルブシートに衝撃的に着座(接触)するとともに,着座時には一般に滑りを伴う。さらに,両部品には燃焼ガスによる圧力および化学的雰囲気が付加される。したがって,このような条件下における両部品の摩耗解析は極めて困難であり,これまでに十分な研究がなされていないのが現状である⁽¹⁾⁽²⁾。

従来,これらの摩耗のシミュレーションとしては通常の滑り摩耗試験^{(3)~(5)},または滑りを伴わない衝撃のみに注目した摩耗試験⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が行われてきたが,それらの摩耗は実際のバルブやバルブシートの摩耗とは異

なった傾向を示した。著者らの一人はこれまでに機械部品,例えば歯車,カム,圧縮機のリング弁などは,相手材と滑りを伴いながら衝撃的に接触するということから,常温における滑りを伴う衝撃摩耗を研究してきた^{(6)~(9)}。

本研究ではエンジン用バルブおよびバルブシートの実際の摩耗現象のシミュレーションとして,スプリングによるバルブとバルブシートとの衝撃的な接触と接触時の滑りを考慮した高温衝撃摩耗試験機を開発・試作し,実際に使用されている両部品材料の衝撃摩耗特性に及ぼす温度および滑り速度の影響について調べた。

2. 実 験 方 法

開発・試作した滑りを伴う衝撃摩耗試験機は衝撃エネルギーとして重力による位置エネルギーを利用した立形リング-ディスク式のもので,その概略構造を図1に示す。本試験機は衝撃エネルギーはつめ車のつめ長さとおもりを変えることにより,相対滑り速度はディスクの回転速度を変えることにより,それぞれ0.294~1.473 J および 0 (静止)~1 240 rpm の範囲で設定できる。また,衝撃時にディスクの回転速度が変動しないように,十分な慣性モーメントを有するはず

* 原稿受付 平成5年10月7日。

^{*1} 学生員,東京農工大学大学院 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

^{*2} 正員,東京農工大学工学部。

^{*3} 日産自動車(株)材料技術部 (〒230 横浜市鶴見区大黒町6-1)。

み車を取付けた。高温雰囲気下での試験を行うために加熱炉を設置し、静止において試験片温度とその近傍温度との較正を行い、試験中は後者の温度を測定し制御した。以下に称する温度は較正から求めた試験片の温度である。また、熱が試験機の動作に影響しないように、各試験片の取付軸を強制空冷した。

実際のエンジン用バルブとバルブシートは約 45° の傾斜面で衝撃的に接触するが、今回は解析を容易にするため両試験片の形状と寸法は図2に示すような平面(垂直)の衝突面とした。それらの材質は自動車用エンジンの吸気側に一般に使用されているバルブ材(リング)とシート材(ディスク)を用いた。すなわち、リングにはマルテンサイト系耐熱鋼 SUH3 を、ディスクに

は鉄系焼結材を用いた。これらの化学組成を表1に示す。リングは所定の形状・寸法に機械加工した後、 1025°C で0.5時間加熱後油冷の焼入れと 720°C で1.5時間加熱後水冷の焼戻しを施した。一方、ディスクは鋼粉・黒鉛を成形・焼結し、Cu を溶浸した焼結材であり、その後機械加工を行って所定の形状・寸法に仕上げた。これらの顕微鏡組織を図3に示す。リングは微細な炭化物を含む焼戻しマルテンサイト組織(硬さ HV 332)であり、ディスクはパーライト地に塊状のやや灰色をおびた白色硬化相(硬さ約 HV 1000)と網状の白色 Cu 相を含む組織(平均硬さ HV 373)である。両試験片の衝突面はエメリー紙 400 番まで研磨し、試験直前にアセトンにて超音波洗浄を行って完全に脱脂した。

試験条件は衝撃エネルギーを 0.588 J (重さ 20 N, 落下高さ 30 mm)一定とし、平均滑り速度を 0 (静止), 0.1, 0.4, 0.8 m/s, 試験温度を室温, 200, 400°C と変化させた。参考として、衝撃エネルギー 0.588 J のときの衝撃力波形を図4に示す。この波形はディスクの代わりに力検出器(先端形状 R 40 mm, 硬さ HV 300)を、リングの代わりに焼入れ SUJ2 ディスク (HV 700) を

図1 衝撃摩耗試験機の概略構造

図2 試験片の形状と寸法

表1 供試材の化学組成

Material	Chemical Composition(wt.%)								
	C	Si	Cr	Co	Ni	Cu	Mo	W	Fe
SUH3	0.4	2.1	11	—	—	—	1.0	—	Bal.
Sintered Alloy	1.3	—	7	6	2	15	0.5	2	Bal.

Ring: SUH3

Disc(Sintered alloy) 50 μm

図3 供試材の顕微鏡組織

それぞれ取付けて、滑りのない衝突で得られたものである。このときの最大衝撃力は約 6 230 N、衝突(接触)時間は 690 μ s 程度であった。1 秒間あたりの衝撃回数は二度打ちを避け、かつ十分な衝撃となるように 5.2 回と定めた。また、最大衝撃回数は 50 万回とした。

摩耗量は所定の衝撃回数で両試験片を試験機から取外し、電子天びん(容量 180 g、精度 0.1 mg)により質量を測定することにより求め、多くの場合は再び試験機に取付けて試験を続行した。試験後、両試験片の摩耗面や摩耗表面層を顕微鏡を用いて詳細に観察した。

図 4 衝撃力波形

3. 実験結果

3.1 摩耗量 大気中の室温, 200°C および

図 6 衝撃回数に伴う摩耗量の変化過程(200°C)

図 5 衝撃回数に伴う摩耗量の変化過程(室温)

図 7 衝撃回数に伴う摩耗量の変化過程(400°C)

400°Cにおいて、耐熱鋼(SUH 3)のリングを静止あるいは回転する鉄系焼結材のディスクに衝撃エネルギー0.588 J一定で繰返し衝突させたとき、衝撃回数に伴う両試験片の体積摩耗量(測定質量とともに密度7.8 g/cm³で換算)の変化過程を図5~7にそれぞれ示す。ここで、繰返し衝撃回数は最低5万回とし、かつ両試験片の一方が摩耗体積が50 mm³を超える回数をもって試験を終了し、それ以下の場合は50万回まで試験を行った。

滑り速度が零、すなわち静止の場合は室温および200°Cにおいては50万回の繰返し衝撃数後でも両試験片の摩耗量はほとんど零(1 mm³以下)であった。また、400°Cにおいても滑りを伴うものに比べて非常に少ない摩耗量であった(3 mm³程度)。

一方、衝撃時に滑りを伴うときは多くの場合において、繰返し衝撃回数とともに摩耗量は増加した。室温(図5)の摩耗量は初期衝撃回数からほぼ直線的に増加し、滑り速度0.4 m/sや0.8 m/sでは焼結材のディスクは著しく摩耗し、そのために5万回や10万回という少ない衝撃回数で試験を中止した。また、試験温度が200°Cや400°Cにおける滑りを伴うときは、初期摩耗過程と定常摩耗過程とが現れ、特にリングでは初期繰返し回数でわずかな体積増が見られた。200°Cの滑り速度0.4 m/sや0.8 m/sでは室温の場合よりも

特にディスクが著しく摩耗し、0.8 m/sでは1万回の衝撃回数での摩耗量が50 mm³を超えた。

図5~7から定常摩耗過程における衝撃1回当たりの摩耗量、すなわち摩耗率(mm³/cycle)と滑り速度との関係を試験温度をパラメータとして図8に示す。この図から滑り速度が零、すなわち静止の場合はいずれの温度においても摩耗率はほとんど零であり、滑りを伴う場合とは著しく異なることが注目される。すなわち、滑りを伴うときの両試験片の摩耗率はすべての試験温度で滑り速度とともに増加した。また、リングとそれよりもやや硬いディスクとの摩耗率を比較すると、滑り速度や試験温度に関係なく、全体的にディスクのほうが大きい摩耗率を示した。試験温度は静止や低滑り速度0.1 m/sでは、両試験片の摩耗率にはほとんど影響を与えない。しかし、滑り速度が0.4 m/s以上になると試験温度の摩耗率に及ぼす影響が顕著となり、最も少ない温度が400°Cで、ついで室温、200°Cの順となった。特に、室温や200°Cにおけるディスクの摩耗率は滑り速度0.4 m/s以上では著しく増大した。

3.2 摩耗面 試験終了後の代表的、すなわち摩耗率の著しく異なる滑り速度における両試験片の摩耗面状態を図9に示す。両試験片の摩耗面はほぼ同じ状態を示した。すなわち、両試験片とも酸化摩耗面か、輝面(金属光沢)摩耗面かのいずれかであった。そして、酸化摩耗状態では両試験片の摩耗率は比較的小さく、

図8 摩耗率の滑り速度特性

図9 摩耗面

図 10 摩耗表面層組織

輝面摩耗では大きくなった。試験温度が室温および 200°C の場合は、滑り速度 0.1 m/s 以下では摩耗面全体は酸化摩耗粉で覆われていて滑らかであるが、0.4 m/s 以上では金属光沢した粗い摩耗条痕と、リングには大きな凹部が多数観察された。これに対して 400°C における摩耗面は比較的滑らかな酸化摩耗面であり、滑り速度 0.8 m/s では黒褐色の酸化面となった。

次に、酸化摩耗面および輝面摩耗面のリング摩耗面を X 線回折によって調べた。輝面摩耗面では α -Fe 回折線のみが観察され、酸化摩耗面では α -Fe 回折線以外に α -Fe₂O₃ が認められた。特に、400°C では α -Fe₂O₃ のほか高温で生成される Fe₃O₄ や FeO の回折線がわずかに認められた。

3・3 表面層組織 定常摩耗における両試験片の

摩耗表面層組織状態を調べるため、ほぼ摩耗痕中央部の滑り方向に平行な断面について観察した。その代表的な試験温度と滑り速度の例を図 10 に示す。用いた試験条件下では図に示すような流動組織以外の組織変化や繰返し衝撃による疲労き裂は観察されなかった。一般に流動組織は試験温度に関係なく、滑り速度の増加とともに、その流動程度と深さが増大した。特に、輝面摩耗状態である室温と 200°C の滑り速度 0.4 m/s 以上では著しい大きな流動組織が認められた。一方、400°C のように酸化摩耗状態では滑り速度が増大しても、さほど大きな流動組織を生じなかった。

4. 考 察

実際のエンジン用バルブとバルブシートの摩耗をシ

ミュレーションするため、耐熱鋼 SUH 3 のリングと鉄系焼結材のディスクを組合せ、衝撃エネルギー 0.588 J 一定下で大気雰囲気、室温、200°C および 400°C において滑りを伴う衝撃摩耗試験を行った。用いた滑り速度は比較的低速である静止から 0.8 m/s までの範囲であり、各試験温度における両試験片の衝撃回数と体積摩耗量との関係について調べた。その結果から、衝撃 1 回当たりの体積摩耗量で表した摩耗率 (mm^3/cycle) の滑り速度特性を図 8 に示した。両試験片の摩耗率は試験温度に関係なく、滑り速度の増加とともに増大した。室温や 200°C では滑り速度 0.4 m/s 以上になると、著しく摩耗率は増大し、この傾向は著者らの一人が行った焼なまし S 45 C 炭素鋼の衝撃摩耗特性⁽⁸⁾ に類似している。また、400°C における摩耗率のように滑り速度とともにわずかに増加する傾向は、焼入れ S 45 C 炭素鋼⁽⁹⁾ のものに似ている。以上のように、滑り速度の増加に伴う両試験片の摩耗率の変化傾向は試験温度に大きく左右される。さらに、滑りを伴うときはディスク(焼結材)の摩耗率はリング(SUH 3)のものに比べて常に著しく大きいことがわかった。

室温および 200°C における摩耗現象は、滑り速度 0.1 m/s 以下では両試験片の摩耗面とも酸化粉で全体が覆われた比較的滑らかな酸化摩耗であり、摩耗率は小さくかつ摩耗表面層組織の流動程度も小さい。しかし、滑り速度が 0.4 m/s 以上になると、両試験片の摩耗面は粗く、輝面(金属光沢面)となって摩耗率は著しく増大する。すなわち、両試験片間に激しい凝着が起る凝着摩耗となり、図 11 に示すようにリングの摩

耗面には凝着によって引きち切られてきたと思われる凹部やディスクの白色硬化相の破碎、さらに摩耗表面層組織の流動程度とその深さが増大する。これに対して、400°C における摩耗形態は本実験範囲の滑り速度である 0.8 m/s までは酸化摩耗となり、摩耗率は滑り速度とともに多少増加するが比較的小さく、表面層組織の流動も小さかった。このように、400°C においては室温や 200°C のように滑り速度 0.4 m/s 以上になっても輝面摩耗が現れないのは、両試験片の加熱温度 400°C における酸化性の影響と推測された。

そこで、両試験片の高温酸化性を調べるため、総面積 400 mm^2 の角柱試験片を製作し、200°C および 400°C で各々 5 時間加熱・空冷したときの質量増加と表面観察から酸化程度を比較した。なお、各角柱試験片の表面はエメリー紙 240 番で研磨し、アセトンにて超音波洗浄を行って完全に脱脂してから加熱した。その結果、200°C では電子天びんの精度 (0.1 mg) を超えての質量増加は検出されず、また 400°C でも両試験片とも 0.1 mg 程度の質量増加であった。しかしながら、200°C の加熱後では試験片表面にはほとんど変化が現れないのに対して、400°C の加熱後では表面が黒く酸化していることが認められた。また、他の実験で求めた供試材とほぼ同じである SUH 3 (リング) と焼結材 (ディスク) の室温、200°C および 400°C における硬さと引張り強さを図 12 に示す。図 12 よりディスク材の硬さは室温ではリング材よりやや硬いが、200°C を越えると軟化してリング材よりも硬さはわずかに小さくなること、およびリング材の引張り強さは常にかなり高い値であることがわかる。すなわち、ディスク材はリング材よりももろいことが推測されるが、このことは図 3 の顕微鏡組織からも想像される。

ここで、図 8 に示す摩耗率の滑り速度特性を両試験片の高温における酸化性と図 12 の機械的性質を考慮

図 11 輝面摩耗状態における表面層組織 (室温, 0.8 m/s)

図 12 各試験温度における機械的性質

して考察してみる。まず、試験温度 200°C では両試験片とも室温と同様にほとんど酸化されないが、機械的性質の引張り強さや硬さは低下する。このことから、輝面摩耗領域における 200°C の摩耗率は室温のものより大きくなったものと考えられる。これに対して、400°C における両試験片の機械的性質がかなり低下するにもかかわらず、全滑り速度領域で酸化摩耗となり摩耗率が室温や 200°C のものより著しく小さくなったのは、400°C における酸化性のためであろう。このように試験温度が高いほうが摩耗が少なくなるという現象は、辻ら⁽¹⁰⁾が行った耐熱鋼 SUH 3 と炭素工具鋼 SK 5 との常温と高温における滑り摩耗の結果と同じである。一般に摩擦面に酸化膜が生成されると、金属間接触が防止されるとともに、その潤滑作用により摩耗は少なくなる。特に、高温では摩耗面に比較的緻密な酸化膜が生じるため、摩擦による酸化膜の破壊も起こりにくくなる。本試験で使用したリング材のような耐熱鋼ではその表面に不動態膜といわれる極めて薄く、かつ密な酸化皮膜が生じるといわれている⁽¹¹⁾。したがって、母材の軟化が起こっても酸化現象が強く影響し、室温よりも摩耗量は減少したものと思われる。

また、摩耗率は滑り速度や試験温度に関係なく、すなわち酸化摩耗状態でも、輝面摩耗状態でも、全体的にディスクのほうが大きな値を示した。これは、輝面摩耗状態では両試験片間に激しい凝着摩耗が起こり、Bowden と Tabor の理論⁽¹²⁾より凝着部の破断が引張り強さの小さいディスク側において起こるためであると思われる。一方、酸化摩耗状態においては摩擦面に存在する酸化粉によりアブレシブ摩耗が生じる。アブレシブ作用においては両試験片の硬さが同じ程度であるならもろい材料のほうが摩耗する結果⁽¹³⁾から、リングよりもろいディスクで摩耗は多くなったものと推測される。しかし、室温の滑り速度 0.1 m/s では摩耗率はリングのほうが大きな値を示しているが、これは酸化摩耗状態でかつ母材の軟化が起こっていないためにディスクの白色硬化相によるアブレシブ作用が強まり、摩耗量は室温においてやや硬いディスクのほうが少なくなったものと考えられる。

5. 結 論

大気中の室温、200°C および 400°C において耐熱鋼 SUH 3 のリングを静止、あるいは回転する鉄系焼結材のディスクに繰返し衝突させて、両試験片の衝撃摩耗特性に及ぼす温度、滑り速度の影響について調べた。また、同時に両試験片の摩耗面や摩耗表面層につ

いても分析・観察を行った。試験条件は衝撃エネルギーを 0.588 J 一定とし、滑り速度を 0 (静止), 0.1, 0.4, 0.8 m/s, 試験温度を室温, 200, 400°C と変化させ、繰返し衝撃回数は最大 50 万回までとした。その結果、次のことが明らかとなった。

滑り速度が零、すなわち静止の場合の摩耗量はリング、ディスクともに試験温度に関係なく、滑りを伴うものに比べて非常に少ない (3 mm³ 程度)。滑りを伴うときの両試験片の摩耗率は滑り速度とともに増加し、室温、200°C では 0.4 m/s 以上で輝面摩耗状態となり、特にディスクが著しく大きな摩耗率を示し、摩耗量は 200°C で最大となった。これに対し、400°C では酸化摩耗状態となり摩耗率の著しい増加は見られず、比較的安定した滑り速度特性を示した。また、滑り速度や試験温度に関係なく、全体的にディスクのほうが多く摩耗した。これらの結果は、高温における両試験片の酸化性と機械的性質によって説明された。

実際のエンジンのバルブがバルブシートに着座する際の滑りは最大 0.1 m/s 程度と考えられ、また斜面衝突の影響および燃焼ガスによる化学的雰囲気も付加されるため、本研究が実際の摩耗現象の完全なシミュレーションを実現したとはいえない。これらについては今後さらに研究を進めていく予定である。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重な助言をいただいた日産自動車(株)総研材料研究所 岸 克宏氏、ならびに本試験装置の設計・製作に協力された東京農工大学大学院生 徐 茂龍氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Dissel, R. V., Barber, G. C., Larson, J. M. and Narasimhan, S. L., Engine Valve Seat and Insert Wear, *SAE Technical Paper*, No. 892146 (1989).
- (2) Fujiki, A. and Kano, M., New PM Valve Seat Insert Materials for High Performance Engines, *SAE Technical Paper*, No. 920570 (1992).
- (3) Hofmann, C. H., Jones, D. R. and Neumann, W., High Temperature Wear Properties of Seat Insert Alloys, *SAE Technical Paper*, No. 860150 (1986).
- (4) Onoda, M., Kuroishi, N. and Motooka, N., Sintered Valve Seat Insert for High Performance Engine, *Metal Powder Report*, (1989), 111.
- (5) 吉田・森・河崎・志村・斉藤, 自動車技術会学術講演会前刷集, 912 (1991-10), 2, 101.
- (6) 矢畑・土田, トライボロジスト, **35-2** (1992), 144.
- (7) 徐・矢畑, 材料試験技術, **37-1** (1992), 8.
- (8) 徐・矢畑・池ヶ谷, 機論, **58-555**, C (1992), 3369.
- (9) 矢畑・茅野, 材料試験技術, 投稿中.
- (10) 辻・安藤, 機論, **43-367** (1977), 773.
- (11) 斎藤・阿竹・丸山, 金属の高温酸化, (1986) 91, 内田老鶴園.
- (12) 曾田, 固体の摩擦と潤滑, (1961) 271, 丸善.
- (13) 葉山, 金属・合金の摩耗現象の基礎, (1987) 36, 丸善.