

EXUP-BUSH用耐熱ステンレス軸受の開発

Development of a heat-resistant stainless steel bushing for EXUP

高橋 尚久

技術論文

Abstract

Many of the sports type models designed and manufactured by Yamaha Motor Co., Ltd. adopt the Exhaust Ultimate Power-valve system (abbreviated name EXUP) to control the vehicle's exhaust flow characteristics. EXUP improves the torque characteristics of the low- to mid-speed range, is effective in stabilizing engine idling rpm and reducing exhaust noise. Because the EXUP valve located in the exhaust passage is constantly exposed to high temperatures, the valve bushing must be highly resistant to oxidation and abrasion and must have lubricity as well.

With such qualities in mind, we tested a "SUT" sintered stainless steel based bushing and a copper based bushing for EXUP. The "SUT" we tested is the type mainly used in the EGR (Exhaust Gas Recirculation) valve bushings of automobiles. SUT is an austenitic substrate stainless steel with a 20% content of hard Co-based particles distributed through the alloy that improves the oxidation resistance and abrasion resistance. However, when such an SUT bushing was used in the system's development stage it made a disagreeable noise when the valve of EXUP was rotating, and there was a problem of occasional fixation of the valve due to adhesion to the housing parts. As for the copper based bushing—often used in sliding bushings—it was found to be lacking in heat resistance, which caused adhesion and fracture.

To solve these problems, we developed a new SUT-based bushing by adding graphite and varying amounts of a hard particle and the chemical composition of the stainless steel alloy. After uniformly mixing in particles with highly differing specific gravities, the powdered metal was molded and sintered. When sintering, the Cr carbide is extracted in the base metal. And then a cylindrical bushing is made by machining and evaluated for (a) oxidation resistance, (b) wear and adhesion resistance and (c) noise. From these tests we were able to obtain performance that was satisfying enough.

The bushing of the SUTG series developed in this way was adopted on the production model YZF-R1 in 1998 and has since been improved based on its performance on many other models. Until now, more than one million units of the SUTG bushing for EXUP valve have been produced, including those adopted on products of other companies' products.

要旨

ヤマハ発動機(以下、当社)製の二輪車のうち、多くのスポーツ系モデルには、排気ガス流量を制御する排気バルブ装置「EXUP (Exhaust Ultimate Power-valve)」が装着されている。これは、低～中速トルクの改善や、アイドリングの安定化、騒音低減などに有効である。EXUPは排気通路に設けられるため、バルブは常に高温の排気ガスに曝されており、このバルブを支える軸受には、耐高温酸化性、耐摩耗性、および潤滑性が要求される。

そこで、ステンレス焼結軸受「SUT」と銅系軸受を、EXUP用軸受としてテストした。SUTは従来、主に自動車のEGR(Exhaust Gas Recirculation:排気ガス再循環装置)バルブに取り付けられていたもので、20%Coベースの硬質粒子を分散し、耐酸化性と耐摩耗性を有したオーステナイト基ステンレス鋼である。しかしながら、EXUP用軸受として開発初期に使用した際、バルブ回転時に不快なノイズを鳴らし、バルブ軸やハウジングとの凝着によるバルブの固着を引き起こすという問題があった。さらに、すべり軸受でよく用いられる銅系の軸受は、耐熱性に劣り、凝着や破損が生じた。

そこで、SUTをベースに自己潤滑性を持つステンレス軸受を開発することとした。原料段階で黒鉛を加え、硬質粒子の量とベースのステンレスの化学成分を調整した。これら比重の大きく異なる粒子を均一に混合した後に、成形し、焼結する。この焼結の際に、黒鉛の一部をCr炭化物として基地中へ析出させ、残りは遊離黒鉛として分散させる。そして、機械加工によって円筒軸受に仕上げられる。

単品および車両により、a)耐高温酸化性、b)耐摩耗性・耐凝着性、c)ノイズの評価を行い、十分満足な性能を得ることができた。

こうして開発したSUTG軸受は、1998年YZF-R1で採用されて以来、モデルの性能向上に応じて改良され、SUTGシリーズとして量産され続けている。これまでに、他社の採用もふくめ、100万個以上生産されている。

1 はじめに

当社製二輪車のスポーツ系モデルには、性能向上のため排気ガス流量をコントロールする排気バルブ装置「EXUP」が設けられている。エンジンの回転数に応じて、排気管中にあるバルブを連結されたサーボモーターで開閉することにより、排気圧を制御し、主に中低速域のトルク特性を改善している。またアイドル時の回転数の安定化、騒音低減、排ガス濃度低減などの効果もある。低回転～中回転域ではバルブは閉じており、高回転域では全開となる。約700℃以上の排気ガスをバルブで制御しているため、バルブ、および、軸受(bush)には大きな熱負荷がかかっており、高温・高面圧・無潤滑などの環境下に耐えられる軸受材料が要求されている。

そこで、従来自動車で使われていたステンレス焼結軸受「SUT」に注目し、基地へのCr炭化物の析出と、遊離黒鉛の分散を行い、耐摩耗性と自己潤滑機能を向上させた材料を開発し、量産二輪車に採用した。本報では、その材料特性を報告する。

2 排気バルブ装置「EXUP」

二輪車スポーツ系主要モデルは、主にDOHC・4気筒・600cm³以上のエンジンを搭載し、エンジンの前側から4本のエキゾーストパイプを配して、2本もしくは1本の排気管に連結・統合され、後輪側に配置した消音器より排気ガスを排出する。この排気管連結部にEXUPを搭載している。**図1**、**2**にSUTG軸受を採用したモデル「FZ1」の排気系および車両全体図、**図3**にEXUPの断面図を示した。

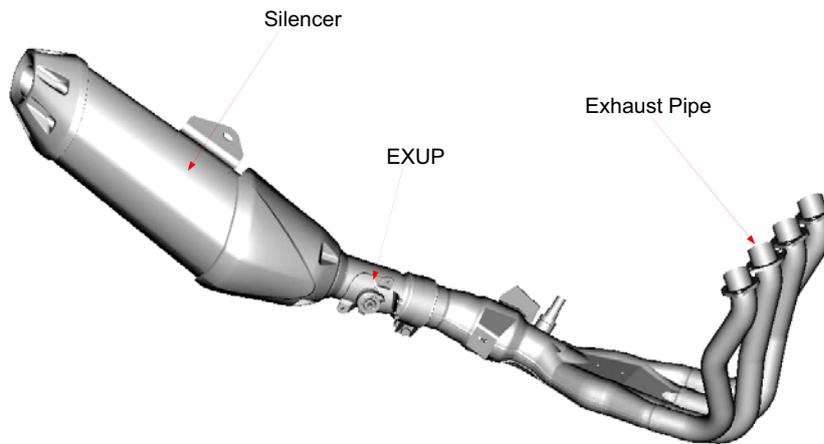


図 1 Exhaust System of FZ1 Model



図 2 2008年モデル FZ1

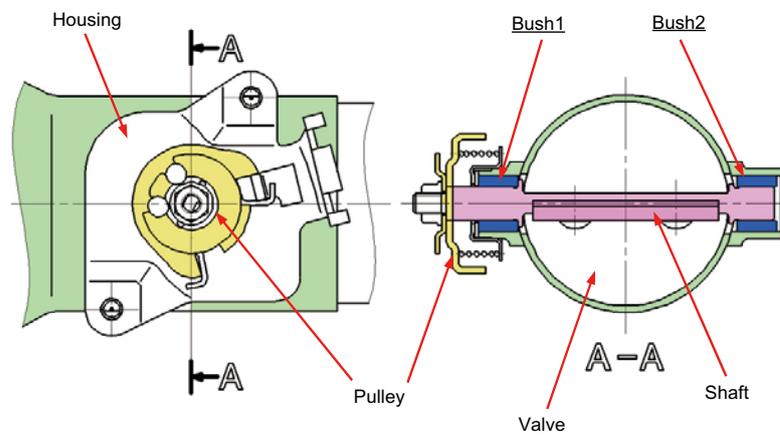


図 3 Valve System of EXUP

3 黒鉛分散ステンレス軸受材料

3.1 開発材料

従来のステンレス焼結軸受「SUT」は、オーステナイト系ステンレス基地に20% Co基硬質粒子を分散させて、高温耐酸化・耐摩耗性を向上させた材料である^{1,2)}。しかし、EXUP用軸受として使う場合、バルブ作動時にバルブ軸やハウジングとの擦れ音が発生したり、凝着磨耗や固着が発生する恐れがあった。そこでSUTに固体潤滑剤を分散して自己潤滑性を持たせる改良を行った。固体潤滑剤としては、二硫化モリブデン(MoS₂)、窒化硼素(BN)、PTFE(Polytetrafluoroethylene)、黒鉛などが知られているが、排気ガス温度800℃を想定し、耐熱性の高いBNと黒鉛を検討し、最終的に、黒鉛を選択した。基材のステンレス鋼種、および、硬質粒子と黒鉛の配合量により特性が変わるため、開発材は10種類以上作製しているが、本報では量産で用いた2種類(SUTG-2、SUTG-3)について報告する。表1に化学成分を示した。基地のCr・Ni量は、凝縮水に対する耐食性と、耐高温酸化性に影響する。硬質粒子はCo-28Mo-9Cr-2.5Si合金であり、Mo珪化物が主たる硬質相を形成していて、耐摩耗性・耐凝着性に効果がある²⁾。焼結時に黒鉛の一部を基地と反応させることで、基地中にCr炭化物を析出させ、気孔には遊離黒鉛が分散するようにした。

原料粉の比重は、ステンレス鋼粉7.7~7.9、硬質粒子8.8に対し、黒鉛は1.7と非常に小さいため、均一混合が難しく、また比重分離する前に成形する必要があった。また同じ成分系でも焼結温度を変化させてCr炭化物の析出量を制御した。炭化物の析出が多すぎると、基材の耐食性・衝撃強度が低下し、逆に少ないと遊離黒鉛が多く分散すぎて、基材強度が低下する。これらを基礎評価して条件を確立した後に、耐高温酸化性・耐摩耗性および相手との凝着性、バルブ作動音の評価を行った。

表 1 Chemical composition of Bush (mass%)

		Cr	Co	Ni	Mo	Si	C	Fe
Conventional	SUT	15	12	10	8	1	-	Bal.
	Developed	SUTG-2	16	12	9	6	1	3
	SUTG-3	21	12	15	6	1	3	Bal.

3.2 ミクロ組織

前述のように、成分比率の異なる開発材が2種類あるものの、基本的なミクロ組織は同じである。SUTと比較して図4に示した。基地はオーステナイト系ステンレスで、開発材は微細なCr炭化物が析出している。粒径150μm以下の硬質粒子は、混合時のままの形態を保ちながら焼結されている。気孔中には遊離黒鉛が分散している。

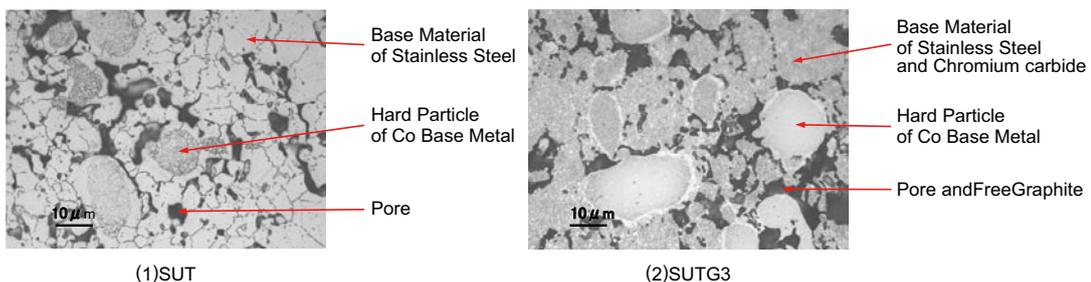


図 4 Microstructure of Bush Materials

3.3 材料特性

円筒軸受の内外径における相手材は、オーステナイト系ステンレス溶製材である。排気ガス熱によりハウジングとバルブ軸、および、軸受がそれぞれ膨張するため、バルブ回転を確保するクリアランスを保たなくてはならない。初期クリアランスを広げすぎると振動による異音発生となる。初期クリアランスを狭めるためには、軸受材の熱膨張率を低く抑えることが望ましい。表2に熱膨張係数を示した。焼結材はもともと溶製材より熱膨張係数は低くなるが、開発材はCr炭化物の析出により、さらに小さくなっている。

表2 Thermal Expansion coefficient (10⁻⁶/°C)

Temp.	Bush			wrought SUS304
	SUT	SUTG-2	SUTG-3	
RT-200°C	15.0	13.0	10.4	17.3
RT-500°C	16.9	14.9	13.0	18.4

3.4 機械的性質

軸受材の試験片における機械的性質を表3に示した。遊離黒鉛の分散により、焼結密度はSUTより6～9%下がり、見掛け硬さも11～28%低下するが、相手攻撃性の点で有利に働いている。

引張強度は、参考であり軸受の機能としてはそれほど重要ではない。

表3 Mechanical property

		SUT	SUTG-2	SUTG-3
Density	Mg/m ³	6.7	6.1	6.1
Apparent hardness	HRB	83	70	60
Tensile strength	N /mm ²	215	250	180

※ (reference value)

4 高温酸化試験

4.1 試験条件

排気ガス中の酸素濃度は低いものの、長時間の熱負荷に耐えられなくてはならない。そこで大気炉加熱による高温酸化試験を行った。試験片は500°C-100hr、および、700°C-100hr後の酸化増量を測定した。

4.2 試験結果

図5に結果を示す。酸化増量は加熱前後の試験片の重量を天秤により測定して試算した。比較材としてSUS316相当のステンレス焼結材を用いた。Cr炭化物の析出により、オーステナイト基地中のCr濃度が低下するため、比較材やSUTに比べると耐酸化性はやや劣るものの、実用上は問題なかった。

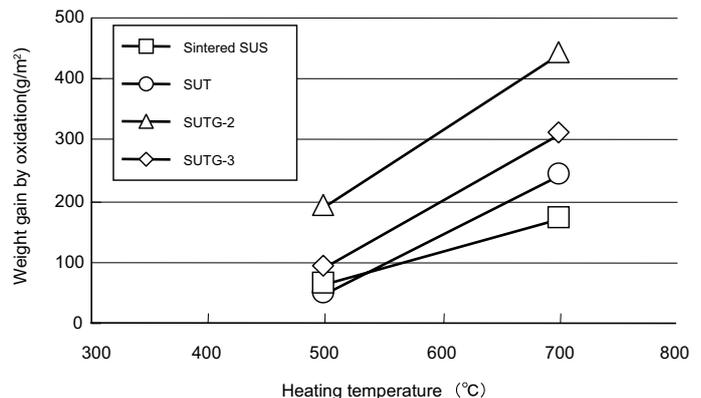


図5 Comparison between sintered stainless and SUT series in oxidation test

5 高温摩耗試験

5.1 試験方法および条件

SUTと比較材、および、SUTG-2、SUTG-3の耐摩耗性を評価するため、SRV高温摩耗試験を実施した。試験方法、および、試験条件を図6に示す。評価する材料をディスク形状に加工し、相手材はロールにする。固定されたディスクの上を荷重のかかったロールが往復動する。評価材のディスクは下からヒーターにより所定の温度へ加熱される。相手材はSUS316のクロマイズ処理されたものを使用。表面硬さはおおよそ1000~1200HVである。EXUPの使用環境は無潤滑であるため、ここでも無潤滑であり、オイル滴下等を行っていない。試験雰囲気は大気中である。

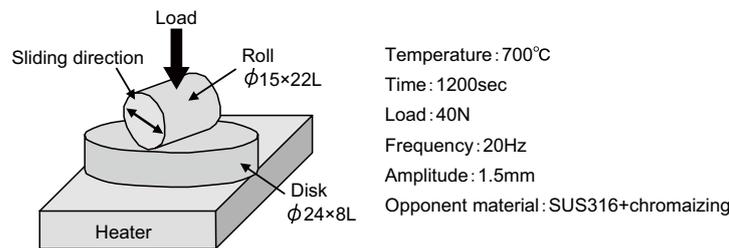


図6 Comparison between sintered stainless and SUT series in Thermal wear test

5.2 試験結果

図7に摩耗試験結果を示した。硬質粒子のない普通のステンレス焼結材は、表面酸化が少ないものの摩耗量は多くなっている。それに比べ、SUTの摩耗量は約1/10に減少し、SUTG-2は、SUTのさらに約1/10まで減少している。SUTは硬質粒子分散により耐摩耗性は向上するものの、オーステナイト基地部分が柔らかいため、不利である。SUTGシリーズは、基地にCr炭化物を析出させているため、非常に優れた耐摩耗性を発揮している。また、相手部品の材質が同系のステンレスの場合、高温時の凝着摩耗が心配されるが、SUTGシリーズは、遊離黒鉛が分散しているため、凝着も起こりにくくなっている。

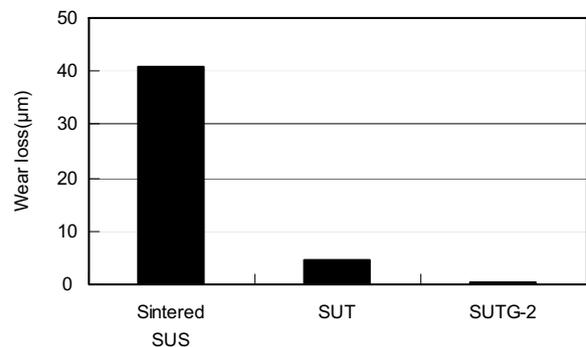


図7 Result of wear amount of specimen in SRV wear test

6 加熱振動試験

6.1 試験方法

EXUPにおけるバルブの動きは、ワイヤ、プーリーを介したモーター駆動による回転方向での往復と、エンジン、および、路面振動による上下微動である。このような動きを再現する摩耗試験機は無いため、実機部品からEXUP部分を取り出し、市販の振動試験機にて、加熱しながら振動させて摩耗測定を行った。試験装置の外観を図8に示す。試験条件は表4に示す通りで、二輪車の走行1万km以上におけるバルブ軸、および、軸受の摩耗状態が再現できるように設定した。



図8 Equipment of Vibration test

表4 Vibration condition

Vertical vibration	Sine wave	325Hz
	Accelerated velocity	490m/s ²
Motion of valve	open-close cycle	1cycle/2sec
	open angle	0 ~ 100°
Atmosphere of test		combustion gas
Temperatue of Bush		580°C

6.2 試験結果

軸受は、外径側がハウジングと接触し、内径側はバルブ軸と接触している。そこで振動試験前後の各部品の内径・外径寸法を測定し、それぞれの摩耗量とクリアランスの増加を計算した。また試験中のバルブ動作音に異音が無いかどうか官能評価を行った。これらの結果を表5にまとめた。

SUTGシリーズは相手材との凝着が生じにくく、動作時の異音は発生しにくい。また試験後の酸化度合いは全く問題無いレベルであった。最終的には走行耐久試験により問題無いことを確認し、量産車へ採用した。

表5 Result of vibration test

	wear of Bush		wear of shaft outer	wear of Housing inner	Abnormal noize	wear by adhesion	Total clearance
	outer	inner					
SUT	△	×	×	△	×	×	×
SUTG-2	○	△	○	△	○	○	○
SUTG-3	○	△	○	△	○	○	○

7 まとめ

- (1) SUTに黒鉛を混合して焼結させ、Cr炭化物の析出と遊離黒鉛の分散により、耐熱性・耐摩耗性に優れたEXUP用耐熱ステンレス軸受を開発した。
- (2) Cr炭化物の析出は、基地のCr濃度を低下させるため、耐高温酸化性にはやや不利になるものの、加熱振動試験では全く問題無かった。また耐摩耗性を向上させ、相手材との耐凝着性では有利に働いていた。
- (3) 遊離黒鉛の分散は、自己潤滑効果により異音の発生を抑え、相手材への攻撃性も抑制する効果が見られた。

今回の開発材は日立粉末冶金(株)との共同出願で特許を取得しており、他社の採用に際してはロイヤリティーを得ている。1998年YZF-R1の採用から始まり、今年で11年目を迎えている。そして開発材2種類とも、二輪車スポーツ系モデルの量産車に搭載され、これまでに100万個以上生産されている。

■参考文献

- 1) 河田英昭, 眞木邦雄: 日立粉末冶金テクニカルレポートNo.6, p.2-8 (2007)
- 2) 河田英昭, 藤塚裕樹: 日立化成テクニカルレポートNo.44, p.31-34 (2005)

■著者



高橋 尚久
Naohisa Takahashi
コーポレートR&D統括部
材料技術部