

# 特集 フューエルポンプ用耐食性焼結軸受材の開発\*

## ーガソリン潤滑下でのトライボロジー評価技術の確立ー

### Development of Sintered Bearing Material with Higher Corrosion Resistance for Fuel Pumps ー Establishment of an Evaluation Technique of Tribology under Gasoline Lubrication ー

野須敬弘

Takahiro NOZU

成迫秀喜

Hideki NARISAKO

村上洋一

Youichi MURAKAMI

清水輝夫

Teruo SHIMIZU

稲吉成彦

Naruhiko INAYOSHI

丸山恒夫

Tsuneo MARUYAMA

大井清利

Kiyotoshi OOI

原川俊郎

Toshiro HARAKAWA

In recent years, due to a growing demand for improvement in the performance and reliability of automotive fuel pumps and the advancement of globalization, automotive fuel pumps are being used with inferior gasolines that include more sulfur, organic acids or compounds, compared to more general gasolines. Conventionally, the bearings in these fuel pumps have mainly been made of sintered bronze alloy. With this bronze alloy, however, it is difficult to achieve a significant improvement in the tribology characteristics of bearings, in order to meet the demands for performance improvement, etc., and corrosion is severe with inferior gasolines that contain highly-concentrated organic acids or sulfur and the corrosion products that accompany them. Therefore, in order to obtain fine tribology characteristics and superior corrosion resistance in gasolines with highly-concentrated organic acids and sulfur, various copper-based alloys were studied using the powder metallurgy process. As a result, graphite dispersed Cu-Ni sintered alloys with a high tin alloy layer showed superior corrosion resistance and fine tribology characteristics when lubricated with a gasoline containing highly-concentrated organic acids and sulfur.

**Key words:** Corrosion resistance, Sintered bearing, Fuel pump

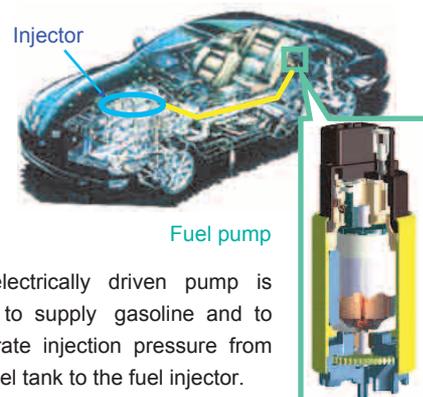
#### 1. 緒言

車載モータで使用される軸受の中で過酷なしゅう動環境に位置付けられるものの一つにフューエルポンプ用軸受がある。Fig. 1に示すように、フューエルポンプは自動車の燃料タンク内で常時ガソリンに浸り、ガソリンを燃料タンクからインジェクタに圧送する。その軸受に関する主なトライボロジー課題は二つある。一つは、ガソリンという極めて低粘性な液環境下で常時作動するため軸受材料の摩擦摩耗特性がポンプの性能・寿命に直結すること。もう一つは、モータリゼーションのグローバル化の急速な動きのなかで、世界各国の種々の燃料潤滑下において軸受の長期信頼性を確保しなければならないことである。不純物のほとんどない一般ガソリンを用いる地域だけでなく、有機酸や硫黄、それに伴う腐食生成物などの不純物を多く含むガソリンを用いる地域においても、優れた耐摩耗性ならびに耐食性が求められており、これら要求を満足する材料開発が必要となっている。

このフューエルポンプ用軸受は、従来材として耐摩耗性に優れる銅-すず-炭素系の青銅系焼結合金が使われているが、硫黄に対する耐硫化性は十分とは言えな

い。ステンレス合金、ある種の高合金鋼やニッケル合金、コバルト合金のような耐食合金を用いれば、耐食性は満足できるが、これら耐食合金では、軸受材で最も重要な摩擦摩耗特性は銅合金よりはるかに劣る。

本研究では、銅合金のトライボロジー特性を生かしながら、耐食性を向上させるために、溶解材の汎用銅合金での耐食性を参考として<sup>1)2)</sup> 種々の銅合金を粉末冶金法によって調製し、高濃度の有機酸や硫黄を含む



An electrically driven pump is used to supply gasoline and to generate injection pressure from the fuel tank to the fuel injector.

Fig. 1 Outline of an automotive fuel pump

\*2007年8月21日 原稿受理

ガソリン内での摩擦摩耗試験および腐食試験を行った。その結果、トライボロジー特性と耐食性の両者の特性を具備するフューエルポンプ用軸受材組成であるすず高濃度合金層を有する黒鉛分散型の銅-ニッケル系焼結合金の耐食性および摩擦摩耗特性を明らかにした。

## 2. 新規焼結軸受材料の検討

### 2.1 材料開発の考え方

従来材として主に使用されている銅-すず系焼結合金（青銅）は、世界展開を考慮した場合、硫黄、有機酸に対する耐食性は十分とは言えず、粗悪ガソリン潤滑下では、腐食生成物が生成するといった課題がある。開発の第一の狙いは、耐食性の向上であり、従来材の銅-すず系に比べ耐食性に効果がある銅-ニッケル-すず系をベースに選定した。更に、軸受表面にすず高濃度合金層を形成させることにより、銅イオンの溶出防止となるコーティング効果が得られるようにした<sup>2)</sup>。また開発の第二の狙いは、耐摩耗性の向上である。軸受材の耐摩耗性向上手法としては、ベース合金中へ硬質物の添加、あるいは固体潤滑剤を添加する方法がある<sup>3)</sup>。例えば、軸受強度の向上に寄与するCu-P合金の形成を目的としたPの添加、更に自己潤滑性に優れた黒鉛の添加が考えられる。

以上の考えに基づきフューエルポンプ用耐食性焼結軸受材の検討を行った。本報では、最適組成の検討ならびに開発材の粗悪ガソリン潤滑下での耐食性ならびにしゅう動特性検討結果について述べる。

## 3. 新規焼結軸受材料の検討

### 3.1 試料調製方法

試料の調整方法を、Fig. 2に示す。銅-ニッケル-すず-りん-炭素系において、すず、炭素の最適な組

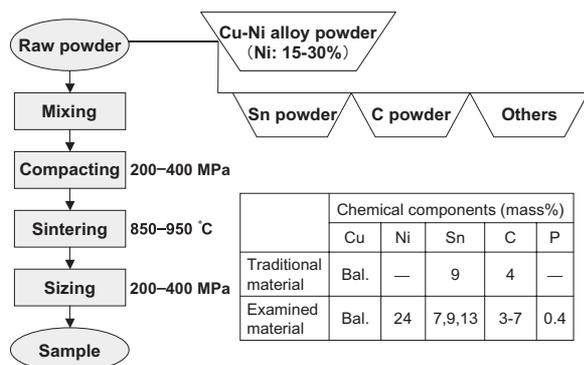


Fig. 2 Flow chart on making process of test sample

成を求めるために、原料として銅-（15～30 mass%）ニッケル合金粉を用い、すず粉を7～13 mass%と変化させ、また潤滑成分である黒鉛を分散させるために炭素を3～7 mass%とし、りんを0.4 mass%添加し混合した。次に、200～400 MPaにて成形後、最高温度850～950℃で焼結して、従来の銅-すず系の1.5倍を超える冷却速度で、比較的速い冷却を行った。得られた焼結体をサイジングによって、内径φ5 mm×外径φ9 mm×長さ6 mmの軸受形試験片とプレート形試験片を作成した。

### 3.2 供試材と試験片形状

候補材の仕様をTable 1に示す。候補材は、基本特性である強度のスクリーニングによりすずおよび炭素量の最適化を実施した。強度は圧環強度（JIS Z 2507）により評価した。銅-24 mass%ニッケル-0.4 mass%りんを基本組成とし、すず量を7～13 mass%、炭素量を3～7 mass%と変化させた。また比較のため、従来材の試料番号Aの銅-10 mass%すず-4 mass%炭素も供試した。

概して候補材の試料番号B～Iでは、すず量の増加に伴って、7 mass%から9 mass%程度まで強度は増加するが、13 mass%では強度の増加は見られず、若干すず汗の現象が見られた。ここで従来材の試料番号Aの銅-10 mass%すず-4 mass%炭素および候補材の代表として試料番号Gの銅-24 mass %ニッケル-0.4 mass%りん-5 mass%炭素で、試料番号Aの約1.5倍と比較的速い冷却をした材料の断面組織をFig. 3に示す。候補材では、銅-ニッケル系合金の表面ならびに開気孔、内在気孔の面内にすず50 mass%以上を含有するすず高濃度合金層が形成されていた。

同様に腐食試験および軸受試験の供試材として、銅-ニッケル-すず系焼結合金から成る軸受試験片を作成した。また、軸受試験のシャフト材としては、

Table 1 Sample materials and mechanical properties

Sample symbol	Base alloy	Chemical components (mass%)		Radial crushing strength (MPa)	
		Sn	C		
Traditional material	A	Cu-9Sn	9	4	128
	B	Cu-24Ni-0.4P	7	5	250
Examined material	C	Cu-24Ni-0.4P	13	5	235
	D	Cu-24Ni-0.4P	9	0	657
	E	Cu-24Ni-0.4P	9	3	340
	F	Cu-24Ni-0.4P	9	4	295
	G	Cu-24Ni-0.4P	9	5	246
	H	Cu-24Ni-0.4P	9	6	233
	I	Cu-24Ni-0.4P	9	7	206

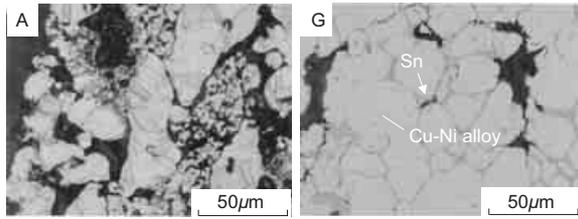


Fig. 3 Cross section structure of test sample  
(Sample symbol A: Traditional material,  
Sample symbol G: Examined material)

SUS440C, QTを用意した。

ガソリン雰囲気摩擦摩耗試験に供した試験片形状と試験機の概略をFig. 4に示す。シャフト材に相当するバーベル形試験片は、SUS440Cから成り、熱処理を施した（HRC57～62程度）。軸受材に相当するプレート形試験片は、Table 1に示す候補材を用いた。

### 3.3 耐食性試験

Table 2に示すような種々の粗悪ガソリンを調査して、それら試験液内に軸受試験片を懸架して、温浴で60℃にて浸漬試験を行った（Fig. 5）。100時間後における試験片の外観、寸法変化、重量変化、変色、ならびにICP分析による溶液中の金属イオン溶出量により、耐食性・耐硫化性を評価した。

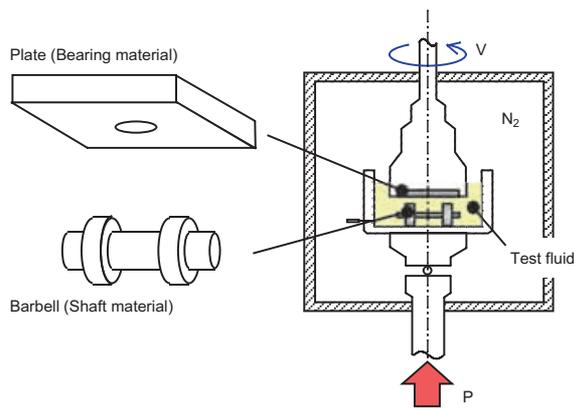


Fig. 4 Schematics of the specimen geometry and the testing machine

Table 2 Test conditions

Lubrication	I	Gasoline
	II	High-sulfur gasoline
	III	High-organic acid gasoline
Force/time	20 N/min+100 N/60min	
Sliding rate	0.5 m/s	
Temperature	RT	

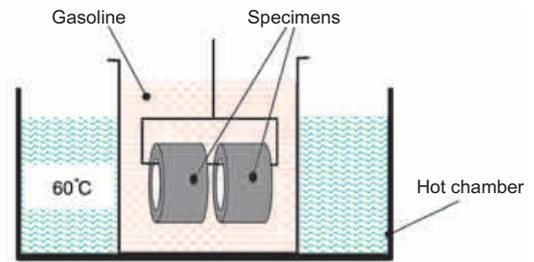


Fig. 5 Testing method of anti-corrosion examination

### 3.4 摩擦摩耗試験

#### 3.4.1 軸受試験

本実験で使用し軸受試験機の概要をFig. 6に示す。ここでは、乾燥状態および含油状態での摩擦係数を測定した。乾燥状態での運転条件は平均面圧1.1 N/mm<sup>2</sup>、回転数3000 r/min、クリアランス0.04 mmとした。また、含油状態での運転条件は、平均面圧1.4 N/mm<sup>2</sup>、回転数7000 r/min、PV値155 MPa・m/min、クリアランス0.04 mmとし、ガソリンの粘度に近いISO粘度VG8を軸受試験片に含浸した。

#### 3.4.2 ガソリン雰囲気摩擦摩耗試験

粗悪ガソリン潤滑下でのしゅう動評価としては、Fig. 4に示すN<sub>2</sub>パージ密閉型のガソリン雰囲気摩擦摩耗試験を用いて、総合的に種々なガソリンで材料評価が的確にできるバーベル・プレート試験法により摩擦摩耗特性の評価を行った。このバーベル・プレート試験法は円筒線接触形態をとることにより、比較的低温圧条件でも片当りの少ない安定した接触状態が得られることが特徴である。試験条件の概要をTable 3に示す。

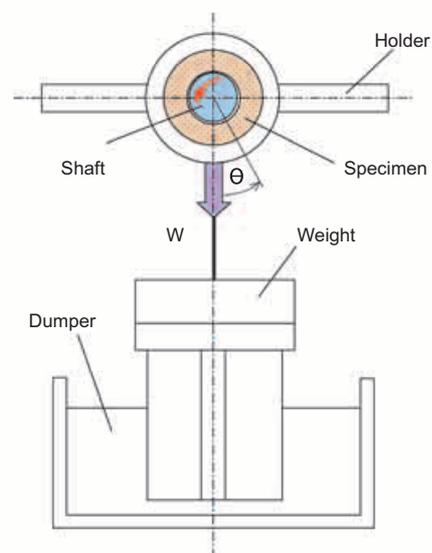


Fig. 6 Testing apparatus of frictional performance for bearing specimen

Table 3 Test conditions

		Ratios of contents of gasoline as compared with in general industrialized markets.
Gasoline	I	Sulfur × 5000
	II	Organic acid × 5000
Testing time	100 h	

試験は一般ガソリンおよび最悪な粗悪ガソリンから推定される最大濃度で一般地域の5000倍の硫黄濃度の高硫黄ガソリンならびに最悪な粗悪ガソリンから推定される最大濃度で一般地域の5000倍の酸濃度の高有機酸ガソリン浸漬下で行った。試験終了後、光学顕微鏡 (OM) および走査電子顕微鏡 (SEM) によりしゅう動面の観察を行うとともに、摩耗痕から摩耗体積を算出し比摩耗量を求めた。更に粗悪ガソリン潤滑下での耐食性を評価するため、試験終了後のしゅう動面についてエネルギー分散型X線分光法 (EDX) を用いて調査した。

4. 実験結果および考察

4.1 組成最適化

4.1.1 すず量

銅-24 mass%ニッケル-0.4 mass%りんを基本組成とし、炭素を5 mass%添加して、すず量を7~13 mass%と変化させた軸受試験片を用いてFig. 5に示す腐食試験を行った。Fig. 7に示すように、高硫黄ガソリン浸漬下では従来材は、寸法変化、重量変化ともに大きく変化するのに対し、検討材は、すず添加量によらずいずれも変化はなく耐硫化性に優れることが確認できた。一方、高有機酸ガソリン浸漬下では、高硫黄ガソリン浸漬下と同様に従来材は寸法変化、重量変化ともに大きく変化するのに対し、すず添加量9 mass%では変化が少なく安定しており、耐食性に優れる。

Fig. 8に腐食試験後の燃料中への金属イオン溶出量を示す。高硫黄ガソリン浸漬下では、いずれも検出限界以下で変化は見られないが、高有機酸ガソリン浸漬下では、検討材は従来材に比べ金属イオン溶出量が抑制されており、すず添加量9 mass%が最も優れる。従って、最適すず量を9 mass%とした。

4.1.2 炭素量

(1) 乾燥状態での摩擦試験

銅-24 mass%ニッケル-0.4 mass%りんを基本組成にして、すずを9 mass%添加して、炭素量を3~7 mass%と変化させた軸受試験片を用いて、Fig. 6に示す軸受試

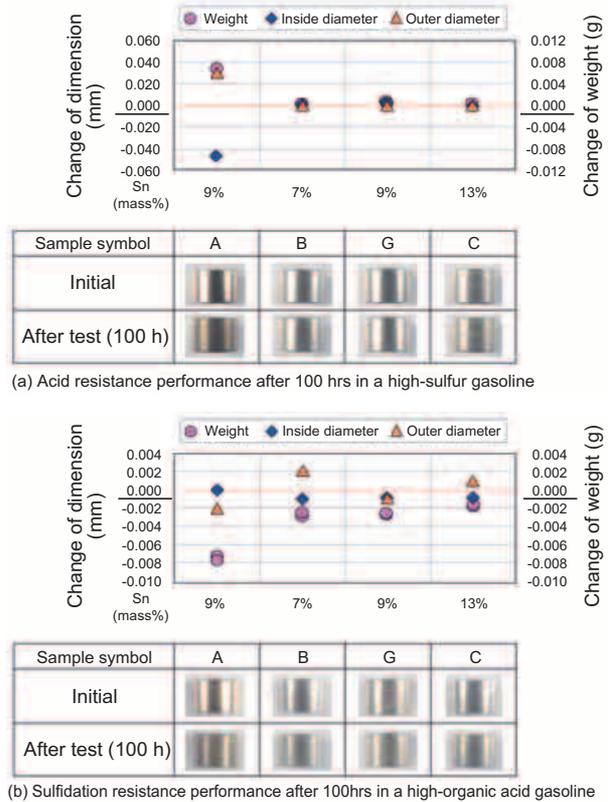


Fig. 7 Effects of tin contents on impurities resistant performances

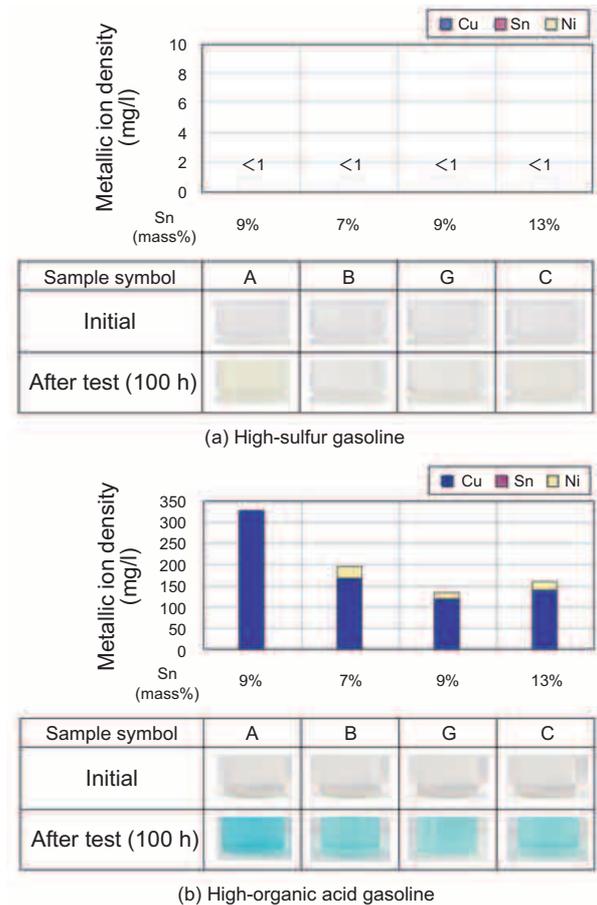


Fig. 8 The amount of dissolution of metallic ions into the fuel after the immersion test

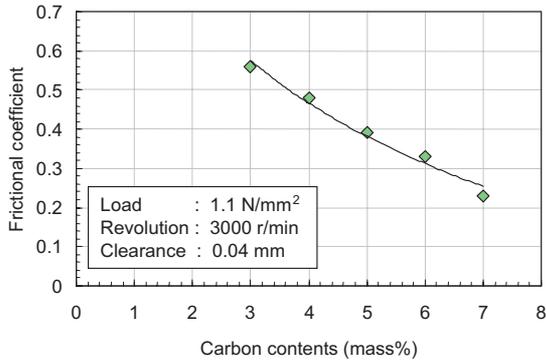


Fig. 9 Frictional performances under dry lubrication

験機によって乾燥状態での摩擦係数を測定した。Fig. 9に示すように、炭素量の増加に伴って摩擦係数は減少する。

(2) 含油状態での摩擦試験

銅-24 mass%ニッケル-0.4 mass%りんを基本組成にして、すずを9 mass%添加して、炭素量を3~7 mass%と変化させた軸受試験片を用いて同様にFig. 6に示す軸受試験によって含油状態での摩擦係数を測定した。Fig. 10に示すように、炭素量の増加に伴って5 mass%程度まで摩擦係数は減少するが、7 mass%になるとむしろ摩擦係数は増加の傾向となる。また、本組成の軸受試験片は、従来材Aと比較すると摩擦係数は低く、摩擦特性に優れている。そこで、摩擦が低い炭素量5 mass%が適すと推定できた。

以上の結果から検討材Gを最適組成とした。

4.3 ガソリン雰囲気摩擦摩耗試験

4.3.1 ガソリン潤滑下での摩擦摩耗特性

ガソリン潤滑下での各種供試材の摩擦摩耗評価結果をFig. 11に示す。炭素量の増加すなわち強度の低下と共に比摩耗量が増加する結果となった。また摩擦係数は炭素量の増加とともに減少し、Fig. 9の摩擦試験結果と一致した。従来材Aと検討材Gを比較すると、検討材Gは耐摩耗性に優れかつ、相手攻撃性（パール形試験片の摩耗）も従来材と同等レベルに抑えられている。

4.3.2 開発材の摩擦摩耗特性

腐食摩耗の評価として高硫黄ガソリンならびに高有機機酸ガソリン潤滑下での従来材Aと検討材Gの摩擦摩耗特性結果をFig. 12に示す。いずれの燃料環境下においても、検討材Gの比摩耗量、摩擦係数は、従来材

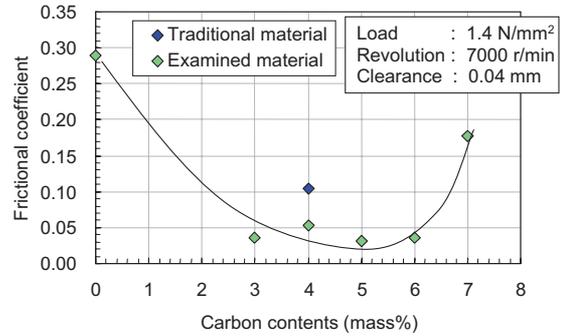


Fig. 10 Frictional performances under oil-impregnated lubrication

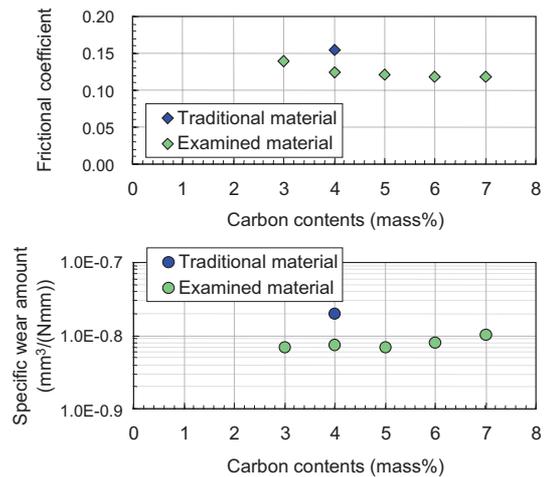


Fig. 11 Friction/wear characteristics under gasoline lubrication (Specific wear rate of plate-shaped specimen)

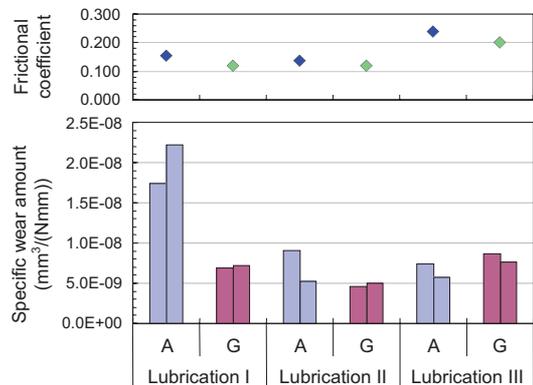


Fig. 12 Friction/wear characteristics under high-sulfur gasoline lubrication and high-organic acid gasoline lubrication (Specific wear rate of plate-shaped specimen)

Aと比較して同等以下であり、優れた摩擦摩耗特性を示した。従来材Aにおいて、一般ガソリン潤滑下に比べ粗悪ガソリン潤滑下での比摩耗量が少ない原因としては、粗悪ガソリン潤滑下では、しゅう動面全域にわたって腐食生成物が堆積しており、その結果、比摩耗量が少ない結果となっている。

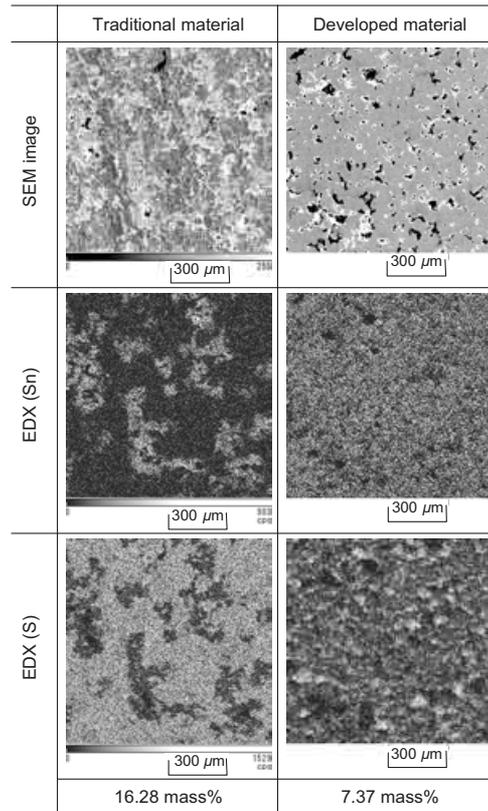
#### 4.3.3 しゅう動面の分析

高硫黄ガソリンならびに高有機酸ガソリン潤滑下での摩耗試験終了後のプレート形試験片しゅう動面のSEM像とEDX分析結果をFig. 13に示す。高硫黄ガソリン潤滑下においては、検討材Gは、しゅう動面全域に渡ってすが均一に分散しており、従来材Aに比べ硫黄の検出量も少なく硫化が抑制されている。一方、高有機酸ガソリン潤滑下においては、プレート試験片しゅう動面の酸素量を比較すると、検討材Gは従来材Aに比べ酸素量は少なく、酸化が抑制されていることが確認できた。これは、検討材Gでは高濃度合金層が軸受表面ならびに開気孔、内在気孔の面内を被覆していることにより、銅の露出を防止しており腐食反応を抑制していると考えられる。以上の結果から、粗悪ガソリン潤滑下において、高濃度合金層が形成された黒鉛分散型の銅-ニッケル系焼結合金は、従来材の青銅系焼結合金と比較して、腐食生成物の生成が抑制されており大幅に耐食性が改善されることが明らかとなった。

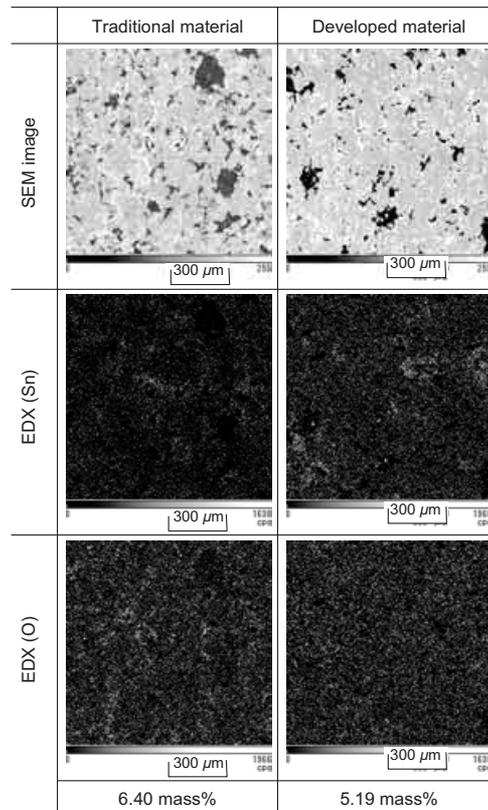
### 5. 結論

耐食性および耐摩耗性を有するフューエルポンプ用軸受材の開発を目的に、高濃度合金層を有する黒鉛分散型の銅-ニッケル系焼結合金に着目し、粗悪燃料を想定した高硫黄ガソリンならびに高有機酸ガソリン中での耐食性ならびに摩擦摩耗特性について検討した結果、次の知見を得た。

- (1) 高濃度合金層が形成された銅-ニッケル系焼結合金からなる軸受は、高硫黄ガソリンならびに高有機酸ガソリン潤滑下において金属イオンの溶出を抑制し、従来材である銅-すず合金に比べ大幅に耐食性が向上した。
- (2) 高濃度合金層が形成された銅-ニッケル系焼結合金に黒鉛を分散させることで、トライボロジー特性と耐食性の両者の特性を兼ね備えたフューエルポンプ用焼結軸受材を開発できた。



(a) High-sulfur gasoline



(b) High-organic acid gasoline

Fig. 13 SEM and EDX analysis image of sliding surface under high-sulfur gasoline and high-organic acid gasoline

<参考文献>

- 1) Kammlott GW, Franey JP, Graedel TE : Atmospheric Sulfidation of Copper-Alloys, Journal of the Electrochemical Society, 131, No.3 (1984), pp. 505-515.
- 2) 日本伸銅協会編：銅および銅合金の基礎と工業技術 (1998), p. 285.
- 3) 志村幸雄：機械要素活用マニュアル すべり軸受 (1998).



<著者>



野須 敬弘  
(のず たかひろ)  
材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究  
に従事



村上 洋一  
(むらかみ よういち)  
材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究  
に従事



稲吉 成彦  
(いなよし なるひこ)  
材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究  
に従事



大井 清敏  
(おおい きよとし)  
ガソリン噴射技術部  
フューエルポンプの開発・設計に  
従事



成迫 秀喜  
(なりさこ ひでき)  
ガソリン噴射技術部  
フューエルポンプの開発・設計に  
従事



清水 輝夫  
(しみず てるお)  
三菱マテリアルPMG株式会社  
焼結合油軸受の研究・開発に従事



丸山 恒夫  
(まるやま つねお)  
三菱マテリアルPMG株式会社  
焼結合油軸受の研究・開発に従事



原川 俊郎  
(はらかわ としろう)  
三菱マテリアルPMG株式会社  
焼結合油軸受の研究・開発に従事